

国家自然科学基金
资助项目优秀成果选编

(六)

国家自然科学基金委员会 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

国家自然科学基金委员会在成立三十周年之际，编辑出版了《国家自然科学基金资助项目优秀成果选编（六）》。

本书以照片及简练的文字对部分获国家自然科学基金资助项目的优秀成果进行了介绍。

图书在版编目（CIP）数据

国家自然科学基金资助项目优秀成果选编. 六 / 国家自然科学基金委员会编. —北京：科学出版社，2016.9

ISBN 978-7-03-050038-0

I. ①国… II. ①国… III. ①中国国家自然科学基金委员会—科研项目—成果—汇编 IV. ①N12

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 231842 号

责任编辑：张 析 / 责任校对：何艳萍

责任印制：肖 兴 / 封面设计：王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本：889×1194 1/16

2016 年 10 月第一次印刷 印张：15 1/2

字数：448 000

定价：298.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）



▲ 李克强总理接见国家杰出青年科学基金工作座谈会代表（一）

（2014年8月21日）



▲ 李克强总理接见国家杰出青年科学基金工作座谈会代表（二）

（2014年8月21日）



▲ 刘延东副总理到国家自然科学基金委员会调研

(2013年5月28日)

《国家自然科学基金资助项目优秀成果选编（六）》

顾问委员会和编辑委员会名单

顾问委员会

主任：杨卫
顾问：沈岩 姚建年 何鸣鸿 刘丛强 高文 高瑞平

编辑委员会

主编：高瑞平
副主编：韩宇 王长锐
编委：解思深 孟庆国 张希 陈拥军 武维华 杜生明 傅伯杰 柴育成
王光谦 黎明 柴天佑 秦玉文 吴启迪 李一军 王红阳 董尔丹
封文安 李建军 郑永和 郑仲文 冯锋 刘权

分编辑委员会

数学物理学部编委会

主任：解思深
副主任：孟庆国 董国轩
编委：白坤朝 雷天刚 詹世革 刘强 张守著 蒲钊

化学科学部编委会

主任：张希
副主任：陈拥军
编委：黄宝晟 陈荣 庄乾坤 郑企雨 杨俊林 董建华 王春霞 孙宏伟

生命科学部编委会

主任：武维华
副主任：杜生明 冯雪莲
编委：李人卫 薛岚 温明章 于振良 杨正宗 殷文璇 谷瑞升 杨新泉
罗晶 胡景杰

地球科学部编委会

主任：傅伯杰
副主任：柴育成 宋长青 郭进义
编委：刘羽 冷疏影 姚玉鹏 于晟 任建国 张朝林

工程与材料科学部编委会

主 任：王光谦

副主任：黎 明 车成卫 王国彪

编 委：王之中 郑雁军 陈克新 马 劲 朱旺喜 赖一楠 刘 涛 茹继平
丁立健 李万红

信息科学部编委会

主 任：柴天佑

副主任：秦玉文 张兆田 何 杰

编 委：吴国政 宋朝晖 刘 克 宋 苏 潘 庆

管理科学部编委会

主 任：吴启迪

副主任：李一军 高自友

编 委：李若筠 刘作仪 吴 刚 杨列勋

医学科学部编委会

主 任：王红阳

副主任：董尔丹 孙瑞娟 徐岩英

编 委：韩立炜 江虎军 李 萃 曹河圻 吕群燕 李恩中 闫章才 洪 微
张作文 吴 镭 张凤珠

国际合作局编委会

主 任：冯 锋

副主任：鲁荣凯 邹立尧

编 委：张 琳 张永涛 刘秀萍 范英杰 王文泽 陈乐生

执行编辑

刘 权 冯 勇 吴善超 沈林福

前言 / Preface

21世纪以来,科学技术日新月异,全球创新呈现新的发展态势。新一轮科技革命和产业变革正在孕育兴起,基础科学前沿突破精彩纷呈,学科交叉特征突出。科学、技术、工程相互渗透,知识创新、技术创新和产业创新深度融合。大变革时代悄然到来,各国争相强化对未来科技制高点的战略布局。

我国正处于迈向创新型国家的关键决胜阶段。党的十八大提出创新驱动发展战略,统筹部署以科技创新为核心的全面创新。十八届五中全会描绘了未来五年国家发展的宏伟蓝图,提出要牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念。作为创新源头,基础研究在创新驱动发展中具有十分重要的战略地位和作用。

当前,我国基础研究正处于从量变到质变、从点的突破到全面提升的重要转折期。仅从发表论文看,数量与质量同步攀升,科技论文总量连续多年居于世界第2位;2005年至2015年9月,我国论文共被引1287万余次,高被引论文(引用次数居世界前1%)15011篇,均居世界第4位。据统计,2015年我国科学家发表的国际科学论文(SCI收录)266188篇中,标注为科学基金资助的占62.1%。在科学基金支持下,大批青年学者立足新起点规划科研职业生涯发展,有的成长为学术带头人,有的成长为各自领域的领军人物或骨干,越来越多的科学家在国际重要学术期刊和学术组织中担任重要职务,中国科技人员的创新力、领导力、影响力蒸蒸日上,在国际科学舞台上发挥着日益重要的作用。广大科研人员锐意创新,潜心研究,硕果累累。有些成果带动和促进了学科发展,丰富了人类知识宝库,推动科学前沿不断演进,有些成果服务创新驱动,为国家经济和社会长远发展提供了科技动力和源头储备。

2016年恰逢国家自然科学基金委员会成立30周年。30年来,在党中央、国务院的正确领导下,在广大科学家共同努力下,科学基金坚持以改革创新为动力,探索完善我国基础研究管理体制,激励出成果、出人才、出思想,为提升我国基础研究水平和原创能力做出了显著贡献,国内外影响和声誉日隆。

在建委30周年之际,我们遴选了2011~2015年国家自然科学基金资助项目的部分优秀成果,编辑出版了《国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)》,作为众多科研人员探索创新取得优秀成果的典型代表予以展示,希望能够进一步激发科技工作者潜心创造的动力。本书在编辑、出版过程中,得到相关科学家和国家自然科学基金委员会各部门高度重视,科学出版社给予了支持和配合。

孜孜创造,熠熠生辉。国家新常态经济转型,“双创”蓬勃发展,对基础研

究源头创新需求更为迫切。“十三五”期间，科学基金将在加强成果管理和科学传播、完善重大成果培育机制等方面不懈努力。藉此成果选编出版的机会，我谨代表国家自然科学基金委员会，向长期关心、支持科学基金事业的党和国家相关部门表示衷心感谢！向在基础研究领域辛勤耕耘、探索创新的广大科技工作者和科学基金管理工作者致以崇高的敬意！



杨伟

目录 / Contents

● 数学物理科学部	1
凯勒几何中的典则度量和里奇流	2
对数偶的对偶复形	3
玻尔兹曼方程的流体动力学极限	4
同余数问题的重大突破	5
微分流形的几何拓扑	6
自守形式与素数分布的研究	7
功能材料与结构的多场效应与破坏理论	8
昆虫的飞行力学	9
超高温条件下复合材料的热致损伤机理和失效行为	10
纳微系统中固-液界面动力学的多尺度行为	11
大型洞室群变形破坏机制与分析方法	12
首次在黑超软谱态下发现相对论性重子物质喷流	13
发现宇宙早期发光最亮、中心黑洞质量最大的类星体	14
超新星的多样性及其前身星性质研究	15
嫦娥二号探测数据揭示图塔蒂斯小行星的物理特性及地质特征	16
基于光与冷原子的大尺度量子信息处理	17
40K以上铁基高温超导体的发现及若干基本物理性质研究	18
四元半导体光伏材料的关键物理问题理论研究	19
拓扑超导及Majorana费米子探测	20
超冷费米原子气体中自旋轨道耦合的研究	21
大亚湾反应堆中微子实验发现新的中微子振荡模式	22
应用引力全息性质到强关联材料磁性研究	23
在北京谱仪Ⅲ实验中确认X(1835) 粒子并发现X(2120) 和X(2370) 新粒子	24
暗物质直接探测以及中国锦屏地下实验室超低本底实验环境研究	25
稳态等离子体约束改善的机理研究	26
● 化学科学部	27
二维超薄材料：研究催化活性位点的理想模型体系	28

尖晶石氧化物可控制备新方法 with 电化学应用	29
二维碳的新同素异形体——石墨炔的合成	30
上转换发光材料用于生物成像研究	31
碳龙化学：金属杂戊搭炔和金属杂戊搭烯	32
特色骨架手性配体：从SpinPhox膦-噁唑啉到SKP双膦配体	33
手性有机小分子和金属联合不对称催化	34
基于“化学脱笼”反应的蛋白质特异激活	35
甲烷无氧活化直接制取烯烃	36
亚纳米分辨的单分子拉曼光谱成像	37
低维光功能材料的控制合成与物化性能	38
光学性质单分散的溶液量子点	39
量子态分辨的化学反应动力学	40
创建低温溶解机理及构筑天然高分子基新材料	41
可控聚合及其工业化新技术	42
新型纤维状能源器件	43
启动剪切下缠结高分子流体的非线性流变学	44
基于核酸的化学生物传感和分子诊疗新方法	45
活体电分析化学	46
石墨烯的电分析化学和单细胞生物分析化学	47
含高浓度分散相的搅拌反应器数值放大与混合强化	48
微结构传质设备及其工业应用	49
高诱导活性的原位再生人工骨	50
典型有机污染物多介质界面行为与调控原理	51
高活性耐硫 NO_x 选择性催化还原催化剂研究	52
● 生命科学部	53
水稻膜蛋白 <i>COLD1</i> 感知低温而赋予耐寒性	54
拟南芥乙烯信号通路中EIN2蛋白介导的翻译调控	55
细胞质抗细菌天然免疫的感知和执行机制	56
α -酮戊二酸依赖的单分子非血红素铁酶催化环内过氧桥键的合成	57
毛果杨遗传转化体系的建立	58
大熊猫的低能量代谢特征使其能够以竹子为生	59
DNA甲基化调控的结构功能研究	60
细胞坏死的分子机制和生理功能	61

NT3-壳聚糖支架激活内源性神经发生修复脊髓损伤	62
新型光控多功能的肿瘤诊疗一体化纳米体系	63
胆固醇通过溶酶体与过氧化物酶体的膜接触进行转运	64
人类初级视皮层的神经活动生成自下而上的注意显著图	65
同源染色体间的异质性促进遗传突变发生	66
人类原始生殖细胞基因表达和DNA甲基化的特征和模式	67
真核生物中DNA的新修饰	68
大豆驯化改良基因的系统挖掘	69
食品中小分子有害物免疫分析机理研究	70
微生物天然产物农药发现新技术	71
西瓜全基因组测序与果实品质形成的分子机制及应用	72
基因组大数据推动黄瓜功能基因研究	73
基于生物生存策略的有毒动物中药功能成分定向挖掘技术体系	74
全基因组重测序揭示猪环境适应性的分子机理及可能的种间杂交现象	75
基于高性能生物识别材料的动物性产品中小分子化合物快速检测技术	76
H5N1病毒与甲流病毒重配可获得呼吸道飞沫传播能力	77
草鱼全基因组序列图谱构建	78

● 地球科学部 79

第三极地区冰川与大气环流变化的三模态和相互作用及其影响	80
社会水循环原理与过程研究推动了水资源学科发展与管理改革	81
基础地理信息动态更新模型与技术体系	82
黄土区土壤-植物系统水动力学与调控机制	83
昼夜不对称增温对北半球陆地生态系统的影响	84
中亚造山拼贴体多向汇聚作用	85
华北早元古代超高温构造-热事件与俯冲-碰撞造山	86
大陆碰撞成矿理论的创建及应用	87
青藏高原生长的深部过程、岩石圈结构与地表隆升	88
昆明寒武纪小石坝化石库研究	89
大地震或调控长尺度碳收支	90
深部碳循环的镁 (Mg) 同位素示踪	91
地质样品元素和同位素分析新技术	92
太阳风与地球磁层相互作用研究	93
极区电离层“等离子体云块”的形成和演化	94

高压技术助力“地心之旅”	95
地球系统动力学模式的理论框架及初步设计	96
南亚高压、亚洲夏季风和青藏高原影响的动力问题	97
国际贸易对全球大气环境的影响	98
南海与邻近热带区域的海洋联系及动力机制	99
海洋酸化提高浮游植物苯酚类物质的含量及其食物链效应	100
海洋变暖对全球表面温度上升速度减缓的影响作用分析	101
深俯冲大陆地壳脱水熔融与壳幔相互作用	102
汶川地震地质灾害评价与防治	103
激光雷达的研制及其对空间和大气环境的探测	104

● 工程与材料科学部	105
------------	-----

新型磁热效应材料的发现和相关科学问题研究	106
纳米金属力学行为尺度效应的微观机理研究	107
航天用非连续增强金属基复合材料制备科学研究	108
热电输运新效应与新型高性能热电材料设计	109
声子晶体等人工微结构材料的新效应	110
航空航天用高性能碳/碳复合材料基础理论与应用	111
节油轮胎用高性能橡胶纳米复合材料的设计及制备	112
实现高效率有机/聚合物太阳能电池的新型聚合物材料及器件结构	113
通用高分子材料的无卤阻燃高性能化	114
生态环境材料与制备工程	115
层状盐岩力学特性及油气地下储备	116
难冶钨资源深度开发应用理论与技术	117
盾构电液控制系统新原理和新方法	118
复杂曲面数字化制造的几何推理理论和方法	119
复杂构件不均匀变形机理与精确塑性成形规律	120
深低温回热制冷机理	121
内燃机低碳燃料的互补燃烧调控理论及方法	122
多孔介质与微/纳结构中热传递机理研究	123
脑起搏器的前沿技术与创新疗法研究	124
高精度的高场超导磁体设计理论与方法	125
长期循环动载下饱和软弱土地基灾变机理及控制	126
废水处理系统中好氧微生物颗粒的形成机制及调控原理	127

干旱内陆河流域考虑生态的水资源配置理论与调控技术	128
城市及区域生态过程模拟与安全调控	129
隧道与地下工程重大突涌水灾害治理关键技术及工程应用	130
● 信息科学部	131
神经细胞传感器阵列研究	132
多频宽带微波电路理论与器件构建方法	133
地球同步轨道合成孔径成像雷达信息处理	134
数字媒体通信理论与关键技术	135
宽带移动通信基础理论与技术研究	136
极高真空测量的基础理论和关键技术	137
全数字化PET成像技术	138
可视媒体几何计算研究	139
图像非均匀计算理论与方法	140
“天河二号”高性能计算机体系结构创新	141
面向社区共享的高可用云存储系统	142
AVS视频编码标准持续进步并获得大规模应用	143
视觉模式的局部建模及非线性特征获取	144
基于欠驱动控制的自动桥式吊车系统	145
基于眼球运动神经回路控制机理的机器人仿生视觉系统	146
化工过程物质与能量高效利用的优化运行方法与应用研究	147
力触觉临场感遥操作机器人关键技术及应用	148
原子自旋SERF效应的超高灵敏磁场与惯性测量	149
面向生理信号检测与处理的超低功耗片上系统关键技术	150
新型氮化镓基异质结构材料与高效能电子器件研究	151
纳米氧化钒薄膜与非制冷红外焦平面探测器研究	152
高分辨真彩色动态全息三维显示关键技术的研究	153
氮化镓单晶衬底材料的生长物理和装备技术研究	154
基于超材料的太赫兹功能器件研究	155
片上光信号处理技术	156
● 管理科学部	157
能源供应安全及国家战略石油储备研究	158

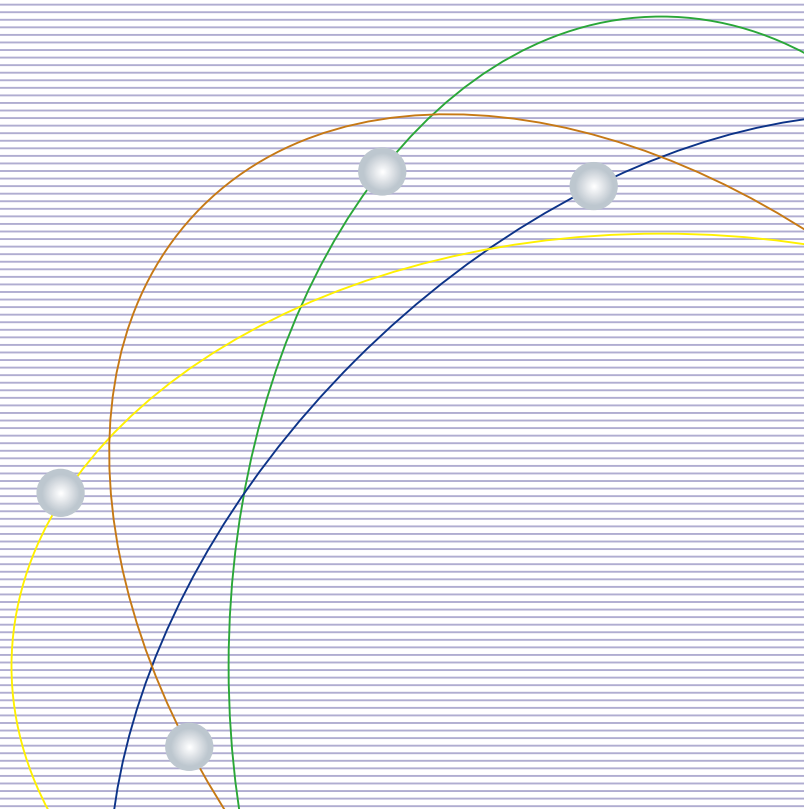
网络促销与口碑：哪种效果更胜一筹？	159
循环经济及低碳发展基础理论与评价研究	160
中国企业管理理论创新研究——“合”理论	161
基于云计算的复杂环境下不确定性决策支持平台	162
考虑复杂网络技术经济特征的供应链管理方法与政策设计	163
大数据分析揭示自然灾害条件下的人群行为规律	164
城市交通系统管理理论与控制方法	165
会计信息质量及其在资本市场中的作用	166
互联网技术和社会化媒体影响资本市场信息环境的规律	167
社会网络如何影响消费者决策	168
货物种类有限时的分类存储策略：分类多不代表效率高	169
基于复杂系统建模的地震应急医学救援实证研究有效提高我国 应急管理精确决策能力	170
中国高速铁路促进区域经济整合的经济机制与效果研究	171
中国公共部门科研人员知识产权保护与利用研究	172
● 医学科学部	173
过度免疫反应导致重症甲型流感	174
胸闷变异性哮喘	175
移植后白血病复发及移植物抗宿主病新型防治体系的建立及应用	176
白血病环境下造血干细胞功能受抑的调控机制	177
MG53在2型糖尿病及其并发症中的作用	178
GPR48在能量平衡与肥胖发生中的作用研究	179
自身免疫性肝病诊治和肝内免疫微环境研究	180
自身免疫性肾小球病靶抗原和补体活化机制的探索	181
致盲眼病相关基因的鉴定和致病机制研究	182
脑卒中及其后遗症抑郁的病理机制和干预策略的研究	183
病理性记忆储存和消除的神经机制	184
研究揭示异染色质的结构失序是人类干细胞衰老的驱动力	185
T _H 分化始动机制的发现	186
组织免疫微环境促进人肝癌进展的新机制	187
ICOS分子调控T _H 细胞发育及生发中心反应的新机制	188
重大临床心理与精神障碍的磁共振影像学研究	189
多功能分子成像与肿瘤诊疗	190

冠状病毒的进化与跨种传播	191
肺腺鳞癌转分化与耐药	192
肿瘤微环境调控肝癌复发转移的基础与临床转化研究	193
辣食摄入与死亡风险	194
麻风病的发病机制与风险预测	195
我国研制的疫苗首次在塞拉利昂开展境外临床试验	196
中药药代动力学关键技术体系的创新及应用	197
针刺神经影像学方法构建及经穴效应特异性神经影像学研究	198
● 国际合作局	199
铁基超导体配对对称性研究	200
靶向铜离子伴侣蛋白的化学干预和新型抗肿瘤作用机制研究	201
小麦兼抗型成株抗性基因的发掘与育种应用	202
《泛喜马拉雅植物志》第30卷等三卷出版	203
兽脚类恐龙新发现和鸟类起源研究进展	204
含特定晶面光催化材料的设计与构建	205
飞秒成像下的时间解析光传输分解及超快无镜头计算成像	206
中国健康与养老追踪调查	207
重症疟疾关键调控因子及其作用机制的发现	208
泛素连接酶HECTD3在乳腺癌中的功能和机制研究	209
● 附录	211



国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

数学物理科学部



凯勒几何中的典则度量和里奇流

Canonical Metrics in Kaehler Geometry and Ricci Flow

凯勒几何中的典则度量是微分几何中一个非常活跃的研究课题,众多一流数学家在这方面做出了杰出的贡献。北京大学朱小华教授在凯勒-爱因斯坦度量的存在性和凯勒-里奇流等复几何的核心研究问题中取得了有国际影响的研究成果。在国家自然科学基金(批准号:10425102, 11271022)的资助下,完成了如下三方面的工作:

1. 凯勒-里奇孤立子的唯一性及相关的几何分析问题。与他人合作证明了凯勒-里奇孤立子的唯一性,发现了新的研究复蒙日-安培方程的先验估计,引进了新的几何不变量,研究了凯勒-

里奇孤立子的存在性障碍(obstruction),研究并改进了复流形上一类 Moser-Trudinger 不等式。发表论文多篇,其中一篇论文发表在权威数学杂志 *Acta Math.* 上,被有关专家称为凯勒几何研究的一个主要突破,已被 SCI 论文他引 62 次。

2. 环流形上的典则度量。与他人合作证明了第一陈类为正定的环流形上凯勒-里奇孤立子的存在性,解决了环流形上凯勒-爱因斯坦度量的存在性问题。在有关 Calabi 极值度量的 Yau-Tian-Donaldson 猜测方面,与他人合作证明了在环流形的情形 K-稳定性是存在极值度量的必要条件。其中一篇论文被 SCI 论文他引 89 次。

3. 第一陈类为正定的复流形上凯勒-里奇流的 Hamilton-Tian 猜测。与他人合作证明了具有凯勒-爱因斯坦度量或凯勒-里奇孤立子的复流形上凯勒-里奇流的收敛性。其中一篇论文发表在数学杂志 *JAMS* 上,被 SCI 论文他引 44 次。

相关研究成果获 2013 年度国家自然科学基金二等奖。

图 获奖证书



对数偶的对偶复形

Dual Complex of Singular Pairs

北京大学许晨阳教授在国家自然科学基金(批准号:11425101)的资助下,从事代数几何特别是高维双有理几何的研究,在对偶复形的研究上取得了重要成果。

由代数偶的边界除子得到的对偶复形是代数几何中包括奇点、代数簇退化等基本问题的研究中自然出现的一个研究对象,它给出除子之间如何相交的信息。传统上人们研究对偶复形总把它化为代数偶是简单正规相交的情形。

许晨阳首次系统地使用了极小模型纲领中的进展来研究对偶复形的拓扑,得到的结果主要分为以下几个方面:

1. 给出了极小模型纲领非常一般的充分条件,保证对偶复形在此过程中同伦不变。然后把该结果用于奇点和代数簇退化的研究中,得到了一大类更加精确的不变量。

2. 使用相关技术研究模 Zeta 函数,解决了关于最大阶极点值的 Veys 猜想。

3. 构造了对数 Calabi-Yau 偶的一个新的双有理模型,使得边界除子充分“大”。用此技术证明了该情况下对偶复形的基本群有限,并进一步在维数小于等于 4 的情形下解决了 Kontsevich-Soibelman 关于 Calabi-Yau 簇退化的对偶复形总是球的猜想。

这些结果是代数几何领域的突破性进展,在国际数学界得到了广泛的认可。在国际权威杂志上已发表或已接受即将发表近十篇高水平论文,包括 *J. Amer. Math. Soc.* 和 *Invent. Math.* 等数学杂志。



图 K3 曲面

玻尔兹曼方程的流体动力学极限

Hydrodynamic Limit of the Boltzmann Equation

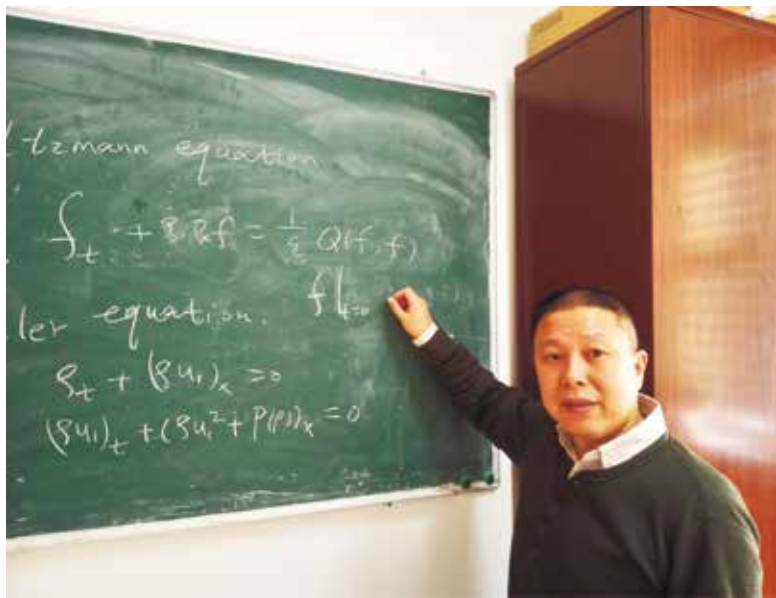
中国科学院数学与系统科学研究院黄飞敏研究员等在国家自然科学基金(批准号:10825102)的资助下,证明了黎曼解情形下玻尔兹曼方程到可压缩欧拉方程的流体动力学极限。

1900年希尔伯特在第2届国际数学家大会上提出了著名的23个数学问题。这23个问题基本主导了整个20世纪数学的发展,并对21世纪的数学发展仍发挥重要作用。其中的希尔伯特第六问题的核心内容之一就是指出从数学上严格证明玻尔兹曼方程到可压缩欧拉方程的流体动力学极限。1912年希尔伯特利用

形式展开(后被称为著名的希尔伯特展开)推导了玻尔兹曼方程的一阶近似是可压缩欧拉方程,但一直没有严格的数学证明。

黎曼解是研究可压缩欧拉方程的基石,通常由3种基本波(激波、稀疏波和接触间断波)复合而成,因此在黎曼解情形下严格证明玻尔兹曼方程到可压缩欧拉方程的流体动力学极限是研究一般情形的基础,具有基本的重要性。研究黎曼解的主要困难在于激波是压缩波,稀疏波是膨胀波,而接触间断波是扩散波,针对不同基本波的研究方法互相不兼容。对此黄飞敏等巧妙地构造了两类新的双曲波,在黎曼解情形下从数学上严格证明了玻尔兹曼方程到可压缩欧拉方程的流体动力学极限,在著名的希尔伯特第六问题的研究上取得了重要进展。美国《数学评论》的评论员在评论该成果时共列举了黎曼解情形玻尔兹曼方程的流体动力学极限的五个工作,其中三个为黄飞敏等的工作,并且评论到:“作者考虑了三个波复合的黎曼解情形,……,通过引进两类双曲波,……,证明了玻尔兹曼方程的流体动力学极限。”

图 黄飞敏研究员
在进行数学推导



同余数问题的重大突破

An Important Breakthrough on Congruent Number Problem

中国科学院数学与系统科学研究院田野研究员在国家自然科学基金（批准号：11325106）的资助下，在具有千年历史之久的同余数问题的研究中取得了重大突破，荣获华人数学家大会颁发的晨兴数学金奖和 Abdus Salam 国际理论物理中心和国际数学联盟颁发的拉马努金奖。

记载于公元 972 年 M B Alhocain 的阿拉伯文稿中的同余数问题被称为“千年数论难题”。一个正整数，若存在以它为面积而三条边长都是有理数的直角三角形，则称之为同余数。同余数问题是指判断一个给定的正整数是否为同余数。

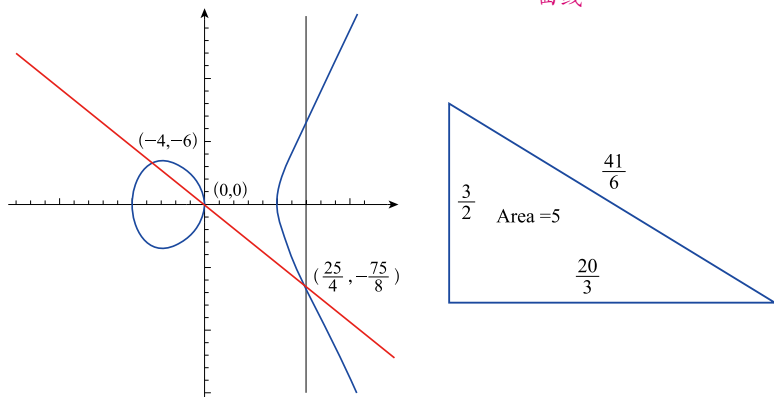
13 世纪，意大利数学家斐波那契指出 5 和 7 是同余数，他也猜想 1、2、3 不是同余数，但未能给出证明。直到 1659 年，法国数学家费尔马发现无穷下降法来证明了 1、2、3 不是同余数。1952 年，德国数学家 Heegner 取得同余数问题的第一个实质突破，证明了模 8 余 5、6、7 的素数或素数的两倍都是同余数。20 世纪 60 年代提出的七大千禧年数学问题之一的 BSD 猜想被认为是这一古老问题的实质，BSD 猜想预言每个模 8 余 5、6、7 的正整数都是同余数。

近年来，田野研究员通过算术几何、自守形式、L 函数、Galois 表示等数学

分支的交叉融合研究，证明了在模 8 余 5、6 或 7 的每个剩余类存在无穷多个任意给定素因子个数的无平方因子的同余数，并对相应的椭圆曲线证明了“七大千禧问题”之一的 BSD 猜想。这一成果所引入的方法能够证明许多情形下的一直困扰人们的精细 BSD 猜想的 2 部分，已有多篇文章采用或推广这些方法。

前期的主要结果发表于美国科学院院刊 *PNAS* 和剑桥数学杂志，国际数论专家剑桥大学 Coates 教授在 *PNAS* 发表专文评论这项工作，指出该问题是“the oldest unsolved major problem in number theory, perhaps in the whole of mathematics”，（数论，也许是整个数学中，最古老未解的主要问题），“Tian's work is an important milestone in the history of this ancient problem”（是这个古老问题的里程碑）。

图 同余数和椭圆曲线



微分流形的几何拓扑

Geometry and Topology of Differential Manifolds

首都师范大学方复全教授在国家自然科学基金(批准号:10931005, 11431009)的资助下,系统地研究了微分流形的几何与拓扑。与他人合作,证明了“正曲率黎曼流形 π_2 有限性定理”,首次发现了“Ricci流存在非奇解的拓扑障碍”等。作为主要成果之一,获2014年度国家自然科学基金二等奖,并应邀在2014年国际数学家大会上作45分钟特邀报告。

正曲率流形是黎曼几何中最基本的研究课题之一。由著名的 Gauss-Bonnet 定理可知,正曲率曲面同胚于二维球面或射影平面。Ricci流奠基人 Hamilton 证明:三维正曲率流形同胚于正曲率空间形式。在四维及四维以上,迄今为止,还没有一个结构性或有限性定理。

Berger 猜想:任何正曲率流形必允

许一致夹(pinched)曲率的度量,即它的曲率介于两个只依赖维数的正常数之间。利用 Ricci 流, Brendle-Schoen 近来取得了重大进展,证明了微分几何中历时五十年的重要猜想:曲率介于1和4之间的流形必为空间型。

对于曲率一致夹的流形,1969年美国科学院院士 Cheeger 证明:偶数维、曲率一致夹的流形最多只有有限多种微分同胚型。但奇数维情形则完全不同,存在无限多个单连通的、曲率一致夹的七维流形,它们的第二同伦群 π_2 为无限循环群。

方复全-戎小春合作得到了上述 Cheeger 定理的奇数维版本,后被他人广泛称为“正曲率黎曼流形的 π_2 有限性定理”。该定理断言:奇数维、曲率一致夹、 π_2 有限的单连通流形最多只有有限多个。同时,还证明了“ π_2 有限、曲率一致夹流形的非坍塌定理”。从而部分解决了著名的“Klingenberg-Sakai 猜想”(见1990年版丘成桐问题集, Prob. 11, Prob.13)。Petrunin 与 Tuschmann 合作,也同时独立证明了这些结果。

在美国科学院院士 Cheeger 主编的《微分几何综述》(微分几何杂志增刊)中,著名几何学家 Ziller 的报告将该成果列为19世纪以来正曲率流形几何方面的九个拓扑结构定理之一。



图 方复全教授在国家科学技术奖励大会现场

自守形式与素数分布的研究

Study of Automorphic Forms and the Distribution of Primes

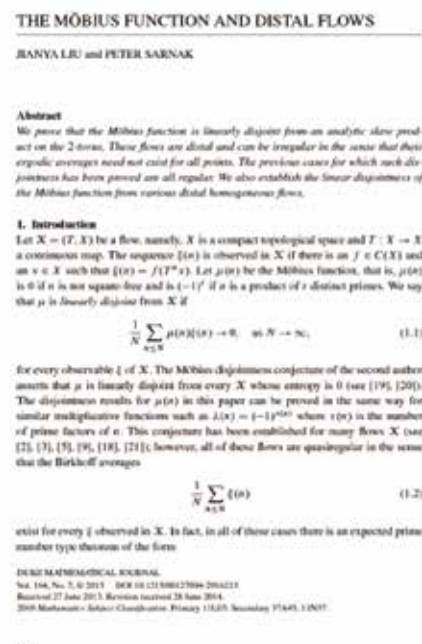
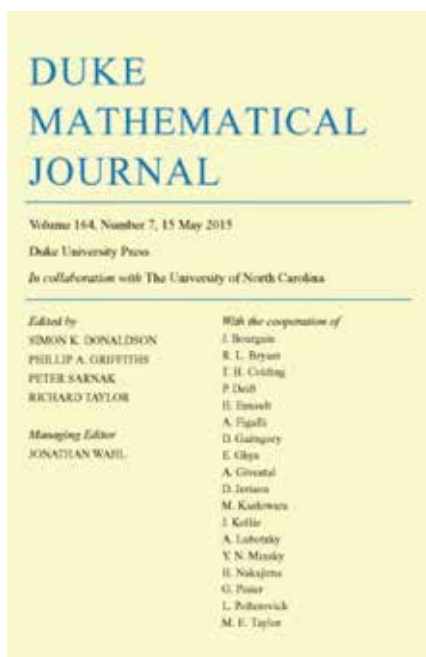
山东大学刘建亚教授等在国家自然科学基金（批准号：11031004）的资助下，系统地研究了自守形式理论和 Sarnak 的两个猜想，并将高维自守形式等应用到素数分布。成果获 2014 年度国家自然科学基金二等奖。

素数分布一直是数论的核心研究领域之一，围绕素数分布形成了众多的猜想，其中最为综合性的当属沃尔夫奖得主 Sarnak 等提出的纲领性猜想。它预测了素数在群作用轨道上的分布，由于该猜想和其他数学分支有着更为密切的联系，因而素数分布不再是孤立的话题。当代数学的重要思想，例如表示论、动力系统，在它的研究中都发挥着重要作用。沿着这个思路，素数分布问题可以用动力系统的思想来研究，在这一方向 Sarnak 又提出了麦比乌斯正交性猜想。

针对如何拓宽将自守形式用于素数分布的途径问题，重点开展了 Sarnak 的两个猜想的研究工作。刘建亚等综合利用自守表示理论等新工具对三元二次型研究了 Sarnak 猜想，这些一般的二次型可以有交叉项，因而经典方法无效。此外，刘

建亚考察了一般的素变量二次型表整数等非线性素数分布问题，证明了当变量个数不少于 10 时，仿射二次曲面中坐标全为素数的点集是 Zariski 稠密的。这些工作推广了菲尔兹奖得主 Bourgain 和沃尔夫奖得主 Sarnak 等的重要工作，拓宽了将自守表示、自守 L-函数的成果用于素数分布的途径。进而，刘建亚等对一类不规则流证明了麦比乌斯正交性猜想。此前该猜想已获证明的所有情形均为正规流。刘建亚的研究结果刊于 *Duke Math. J.* 等国际权威期刊，得到了菲尔兹奖得主 Bourgain，沃尔夫奖得主 Sarnak 等国内外同行的肯定与引用。

图 代表作封面及首页



功能材料与结构的多场效应与破坏理论

Multi-field Effect and Fracture Theory of Functional Materials and Structures

西安交通大学王铁军教授等在国家自然科学基金(批准号:10125212, 10672129)的资助下,研究了功能材料与结构的多场效应与破坏,取得的主要成果获2013年度国家自然科学基金二等奖。

功能材料和结构的快速发展与应用提出了许多新的力学问题。如同机械工业初期一样,力学及结构强度设计必然成为功能材料及功能结构设计中的基础环节。无论是航天航空柔性结构还是微机电系统中的功能结构,其基本形式都是梁、板、壳和多层介质。力学及多场耦合因素相关破坏是导致其失效的关键因素之一,例如,在多层介质制造过程中,由于热学、力学量的失配引起的残余应力或热落差应变;层状结构界面间的缺陷引起的应力与电场集中;使用过程中的热应力、性能老化、电迁移等都

涉及多场耦合,是导致结构失效的重要原因。因此,研究力场、电场、温度场等多物理场共存或耦合作用下,功能材料和结构的多场效应与失效机理,具有重要意义。

项目团队深入研究了:①功能梯度结构的热-力变形理论,丰富和发展了弹性力学基本理论,为功能结构的设计与失效分析提供了基础理论。②智能材料的电弹性与断裂理论,完善和发展了电弹性及力电缺陷理论,为功能结构的可靠性分析提供了理论依据。③压电层状介质中的弹性波理论,对基于压电层状结构的表声波器件设计具有重要指导意义。得到的相关理论、方法或结果已被国内外同行采用或作为其研究的基础或起点,得到学术界的积极评价与广泛引用。

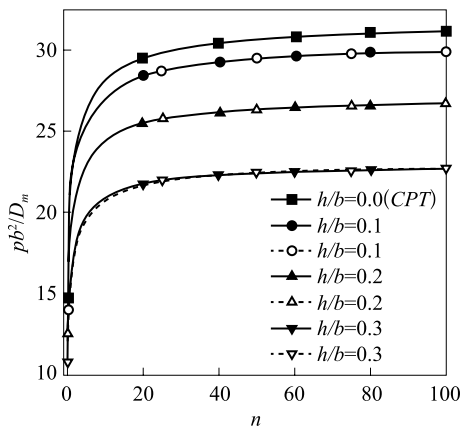


图1 功能梯度板的临界屈曲载荷

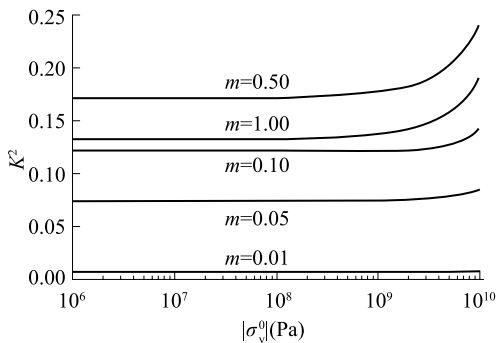


图2 压电层状介质中的波

昆虫的飞行力学

Insect Flight Dynamics

研究昆虫飞行的力学问题,可为设计新概念微型飞行器提供力学基础;同时,为研究昆虫生理学、行为学、神经生物学等提供力学依据。北京航空航天大学孙茂教授的研究小组在国家自然科学基金(批准号:10732030,11232002)的资助下,对昆虫飞行力学进行了系统深入研究,完成了从基本方程建立到动稳定性和可控性分析一整套工作,对昆虫拍动飞行外部力学领域的发展起了实质性推动作用。

建立了拍动飞行的稳定性理论:推导了昆虫的运动方程,其与流体力学方程一起,构成昆虫运动的基本方程组;其有两个时间尺度(翅膀拍动周期和昆虫扰动运动周期)。假设两时间尺度相差大,将运动方程在小时间尺度上平均,忽略高阶小量,复杂的高频振荡项被消去,周期解的稳定性问题变为平衡点的稳定性问题;稳定性归为一特征值问题。揭示了昆虫飞行存在两个不稳定模态,因而是动不稳定的。导出了特征值的近似解析表达式,清楚地

解释了各特征模态的物理成因。在运动方程中加入表示控制力和力矩的项;用模态分析方法研究飞行的可控性和增稳控制问题,结果表明:飞行虽然是动不稳定的,但是可控的。

研究成果被国际权威综述刊物 *Progress in Aerospace Science* 和 *Non-linear Dynamics* 用大量篇幅介绍;孙茂教授被国际顶尖综述刊物《现代物理评论》邀请撰写昆虫飞行力学的长篇综述论文。主要成果获2013年度国家自然科学基金二等奖。

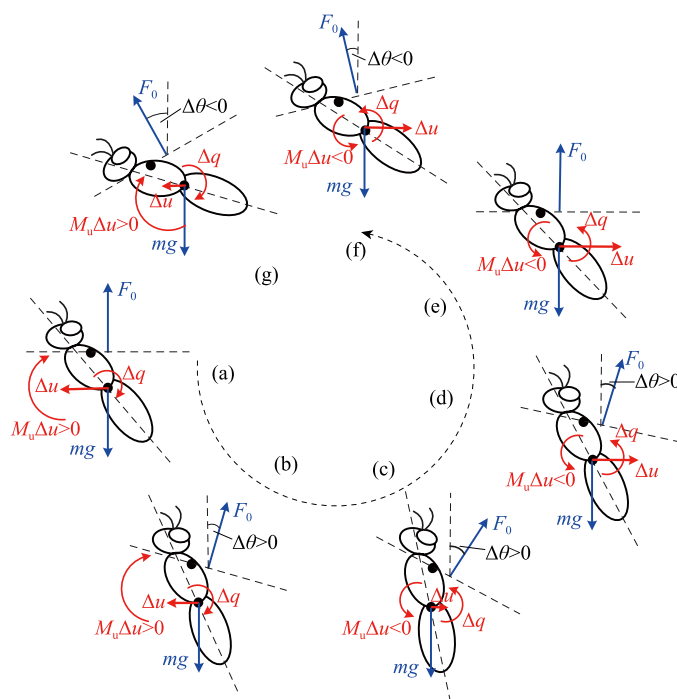


图 悬停飞行的失稳机制:水平运动和俯仰运动相互增强

超高温条件下复合材料的热致损伤机理和失效行为

The Heat-induced Damage Mechanism and Failure Behavior of Composite Materials under Ultra-high Temperature Conditions

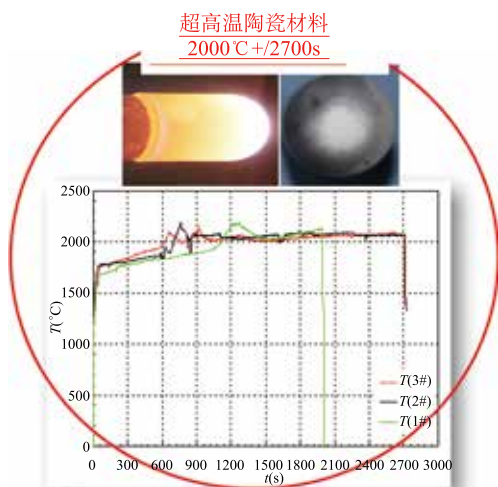
哈尔滨工业大学韩杰才教授等在国家自然科学基金(批准号:10725207, 10821201, 11121061)的资助下,深入开展了高焓、高温等极端服役环境下复合材料的热致损伤/失效机理与破坏理论、热-力-氧化与热-力-电等多场耦合分析方法研究,取得多项研究成果,为高超声速飞行器用高温复合材料性能表征、预报和优化设计提供了理论基础。主要成果获2014年度国家自然科学奖二等奖。

高超声速飞行器涉及的基础科学问题是国际学术研究的热点,最大的挑战之一是高速飞行“热障”带来的高温材料本身和复杂高焓/非平衡流动环境与材料的耦合问题,这些都蕴含着未被认

知和解决的核心科学问题。针对这些科学问题,重点开展了三方面的研究工作:①高温复合材料的气动热响应与热致损伤机理。②高温复合材料的热致损伤模型和热弹性断裂力学。③复合材料热-力-氧化与热-力-电耦合失效行为。取得的突出进展为:揭示了影响材料温度的环境与材料表面特性控制要素,从更微观层次获得了材料热冲击损伤机制和表面层/耗尽层/反应层的高温演化规律与失效机制,提出了“超高温非烧蚀防热材料体系”;建立了超高温陶瓷复合材料2000℃以上静/动态氧化烧蚀模型和裂纹扩展阻力模型,实现了高温强韧化与抗氧化性能的微结构协同;完善了裂纹面电边界条件,实现动态力/电条件下多层压电介质的断裂强度预报,建立了压电陶瓷材料热-力-电耦合效应下的强度评价方法。

主要成果在 *Compos. Sci. Tech.*、*Acta Mater.* 等本领域国际著名刊物发表,SCI他引1500余次,得到国际国内著名学者和美国NASA、美国空军实验室、法国宇航中心、意大利宇航中心等知名机构大量正面引用与积极评价,相关成果已用于指导国家重大需求超高温防热复合材料的研制。

图 超高温陶瓷材料在2000℃以上、2700s长时间氧化烧蚀试验



纳微系统中固-液界面动力学的多尺度行为

Multiscale Behaviors of Solid-Liquid Interface Dynamics in NEMS/MEMS

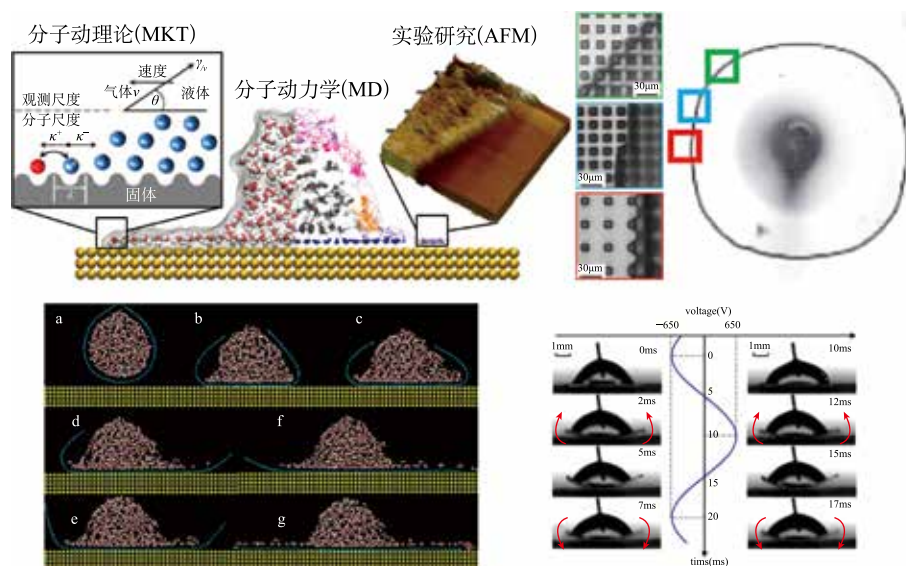
中国科学院力学研究所赵亚溥研究员等在国家自然科学基金（批准号：11072244, 11372313）的资助下，在纳微系统中固-液界面动力学的多尺度行为及应用方面取得系统性和创造性的研究成果，获 2014 年度国家自然科学奖二等奖。

上天、入地、下海，固-液界面无处不在。在微流控芯片、芯片上实验室等纳微系统中，固-液界面的作用更为突出。因此，固-液界面动力学是从重大工程应用中凝练出的关键科学问题。由于该问题跨越了多个时空尺度，分子间作用十分突出，是一个典型的多尺度力学问题，也是公认的国际力学难题。其关键科学难题是“Huh-Scriven 佯谬”：三相接触点处应力和能量耗散的奇异性问题。

赵亚溥课题组在多尺度上揭示了电润湿中前驱膜和前驱链的特性，得到了电场下“Huh-Scriven 佯谬”的首个解答，为电润湿研究提供了新特征尺度。首次提出了“电弹性

毛细”新概念，为药物输送和 MEMS 驱动提供新方式。揭示了粗糙表面润湿动力学规律，建立了统一描述微观和介观耗散机制的理论框架。在 *PRL*（封面）、*JFM* 等国际力学、物理顶级刊物上发表 SCI 论文 50 余篇，出版专著 2 部，SCI 他引 700 余次。诺贝尔奖得主，中、美、俄等权威学者大篇幅、重点引用。被 *Science*、*New Scientist* 等重点报道，在相关领域产生了重要国际影响并引发了大量的后续研究，引领和推动了固-液界面动力学及相关领域的发展。

图 纳微系统中固-液界面动力学的多尺度行为



大型洞室群变形破坏机制与分析方法

Deformation and Failure Mechanism of Large Carven Group and Its Analysis Method

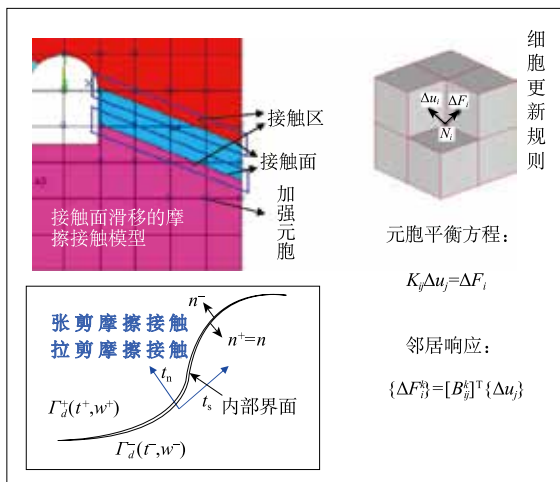
中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭研究员等在国家自然科学基金(批准号:10872209,11232014)的资助下,研究了错动带、不利地质构造和水等影响下大型洞室群开挖过程中围岩变形破坏机制和分析方法,揭示了若干重要岩石力学规律,有效指导了大型洞室群设计与安全施工。主要成果获2013年度国家科学技术进步奖二等奖。

大型洞室群是在岩体中开挖形成、由多个大型洞室组成大型洞室群体。高应力、错动带、与洞室轴线小角度相交的陡倾结构面等不利地质构造及多洞室间的叠加效应等,使其大型洞室围岩开挖卸荷效应、变形破坏机理和分析方法研究有别于以往。

重点研究了大型洞室群围岩稳定的4个关键科学问题:实验与监测方

法,自主研发了真三轴实验装置,建立了劣化力学模型。②提出了开挖过程中大型洞室层间错动带变形破坏过程实验与监测方法,揭示了颗粒破碎、剪切和拉伸破坏机制,建立了反映该机制的力学模型。③提出了考虑高应力开挖卸荷作用的大型洞室群稳定性分析的三维细胞自动机数值方法,自主研发了分析软件EPCA^{3D}。④揭示了高应力、错动带和不利结构面影响下大型洞室群围岩变形破坏不协调的主要特征与非线性演化关系,构建了基于变形及其速率的安全预警等级。⑤提出了基于现场揭露地质信息动态更新的围岩稳定性动态反馈分析方法以及开挖与支护优化设计方法。所建立的理论模型和分析方法,成功应用于白鹤滩(我国在建的世界最大地下洞室群)、乌东德和锦屏二级(我国典型高应力大型地下洞室群)等水电站大型洞室群稳定性分析、动态优化设计,所得结论被实践所检验。发表的10余篇岩石力学领域的高水平论文得到同行学者的100多次SCI重点引用,出版英文专著2部,提出多个国际ISRM建议方法,申请发明专利10项,作重要国际学术会议的20余次特邀报告,20多项具体工程优化建议已被多个设计与工程业主单位采纳并付诸实施,取得了显著效果。

图 洞室非连续变形破坏的细胞自动机分析理论



首次在黑洞超软谱态下发现相对论性重子物质喷流

Relativistic Baryonic Jets from an Ultraluminous Supersoft X-ray Source

中国科学院国家天文台刘继峰研究员等在国家自然科学基金（批准号：11333004，11425313）的资助下，在国际上首次从超软 X 射线源发现相对论性重子物质喷流，揭示了黑洞吸积和喷流形成的新模式。

致密天体吸积过程中相对论喷流的形成机制，是天体物理学的基础问题之一。理论上虽然很难回答这个问题，但对于微类星体相对论喷流的观测，在现象上给出了规律：对于辐射出超软 X 射线的天体，相对论喷流是无法产生的。刘继峰团队在对于河外星系 M81 中超软极亮 X 射线源（M81 ULS1）的光谱观测中证认出高度蓝移的宽 H_{α} 发射线，

揭示了投影速度高达 17% 光速的相对论性重子喷流的存在证据。这种相对论喷流不可能起源于白矮星或中等质量黑洞，而是起源于恒星级黑洞或中子星，但是又与 M81 ULS1 的超软 X 射线光谱相矛盾。因此，X 射线超软源中相对论喷流的发现，打破以往对喷流形成的理论认知。刘继峰团队指出，处在超爱丁顿吸积状态，并拥有光厚吸积盘外流的黑洞，可以用来解释这种超软谱态与相对论喷流的共存现象。

成果于 2015 年 12 月 3 日发表在 *Nature*（Liu et al. 528: 108-110）并被认为是 2015 年度本领域内最重要的五大发现之一。



图 1 M81 ULS1 的位置

彩图由 Hubble 空间望远镜、GALEX 紫外望远镜、Spitzer 红外望远镜、Chandra X 射线望远镜的图像合成。

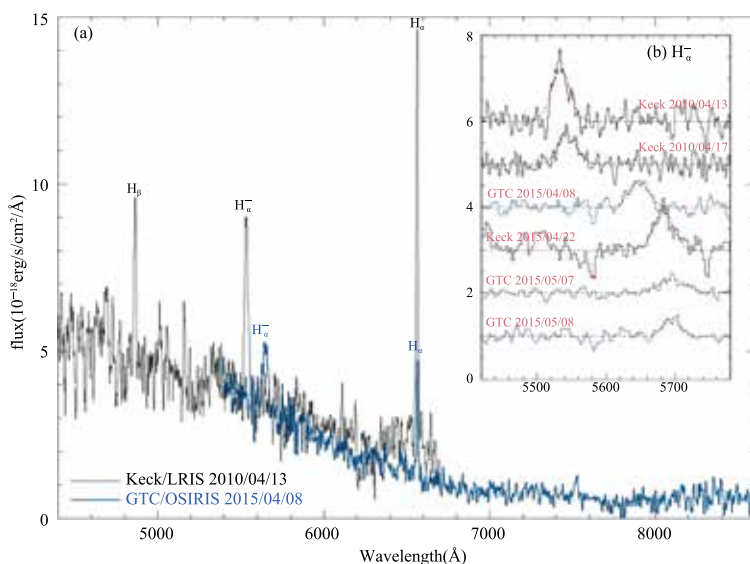


图 2 M81 ULS1 的 Keck 和 GTC 光谱

(a) 中黑线和蓝线分别显示 Keck 2010 年 4 月 13 日和 GTC 2015 年 4 月 8 日的观测结果；(b) 中显示 6 次观测中 H_{α} 的比较。

发现宇宙早期发光最亮、中心黑洞质量最大的类星体

Discover the Most Luminous Quasar with the Most Massive Black Hole in the Early Universe

北京大学吴学兵教授领导的科研团队在国家自然科学基金(批准号11373008, 11533001)的资助下,发现了宇宙早期发光最亮、中心黑洞质量最大的类星体。这一成果在国际顶级科学期刊 *Nature* 上发表后引起国内外广泛关注,并入选了2015年度中国高等学校十大科技进展。

类星体是在光学图像上看起来类似银河系内的恒星但实际上却非常遥远的天体,其巨大能量来自于中心的超大质量黑洞吸积周围物质释放出的引力能,最遥远的类星体是研究早期宇宙的宝贵

探针。利用中国科学院云南天文台丽江2.4米望远镜首先观测和国外4台望远镜后续观测,吴学兵团队发现了一个距离地球128亿光年、发光强度是太阳的430万亿倍、中心黑洞质量为120亿倍太阳质量的类星体,它是目前已知的宇宙早期发光最亮、中心黑洞质量最大的天体。它的发现为科学家们研究宇宙早期的结构提供了难得的机遇,其中心超重黑洞的存在对现有的宇宙早期黑洞形成与增长及星系演化理论提出了挑战。

该团队研究论文作为4篇封面推荐论文之一发表在2015年2月26日的 *Nature* 上。国内外数百家新闻媒体,包括美国有线电视新闻网(CNN)、时代周刊、华盛顿邮报,英国路透社、卫报,德国明镜周刊,中国中央电视台、新华社、人民日报等,对此发现进行了重点报道。该论文被ESI列为空间科学领域高引用论文,被英国 Digital Science 旗下 Altmetric 网站评为2015年全球最受媒体和公众关注的100篇科学论文。该发现也入选了美国 *Discover* 评出的2015年度100个顶级科学事件。

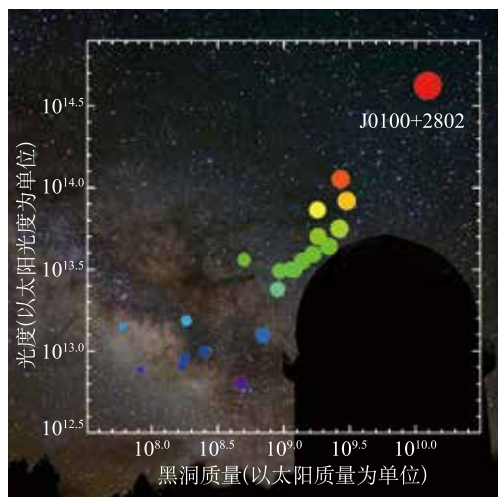


图 新发现类星体 J0100+2802 与其他高红移类星体发光强度与黑洞质量的比较(背景为丽江2.4米望远镜圆顶及夜空)

超新星的多样性及其前身星性质研究

Studies of Diversity of Supernovae and Properties of Their Progenitors

清华大学王晓锋教授等在国家自然科学基金（批准号：11073013, 11178003, 11325313）的资助下，对各类超新星开展了系统的观测和研究，在深入理解超新星爆发多样性，特别是 Ia 超新星的前身星性质和爆发机制等方面取得了若干重要进展，主要成果入选 2013 年度中国十大天文科技进展并获得 2015 年度中国天文学会“黄授书奖”。

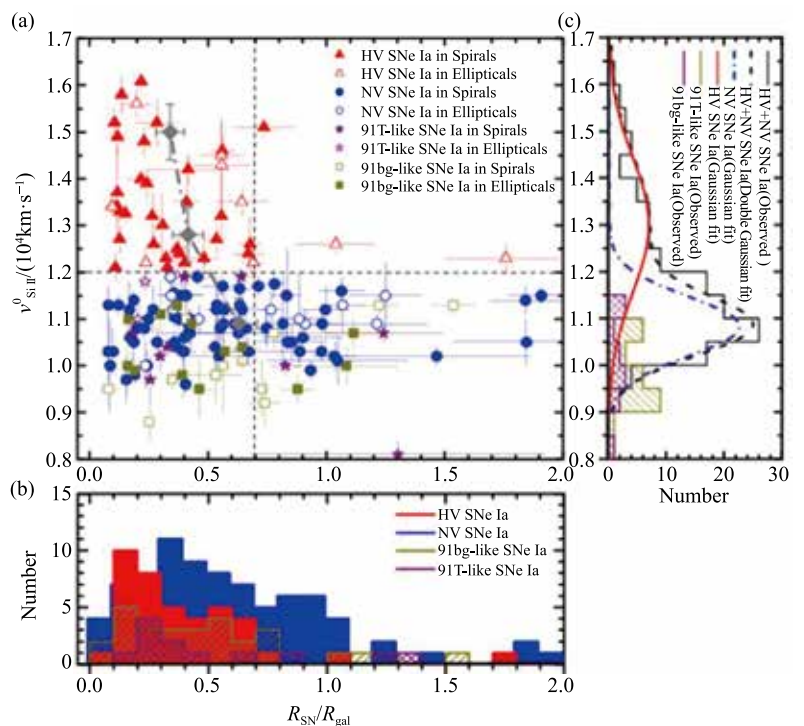
超新星是恒星演化至晚期的特殊爆发天象，在天体物理学中具有非常重要的地位，如从恒星演化到宇宙金属增丰。超新星从爆发物理上主要分为白矮星热核爆发和大质量恒星的核心塌缩爆发两大类。在观测上，不同超新星的观测性质表现出多样性和复杂性的特点，其起源研究对于理解不同质量恒星晚期演化具有重要的意义，特别是 Ia 超新星作为宇宙“标准烛光”，其前身星和爆发机制仍然不清楚，这使得在利用这类天体开展宇宙学研究方面受到演化引起的系统误差的影响。因此，建立各类超新星的观测特征与其前身星的对应关系是当前天体物理领域关注的前沿和热点问题。

针对超新星观测的多样性对应的前身星物理，重点开展了以下几方面的研究：①大视场超新星巡天观测。② Ia 超新星前身星及爆发机制研究。③核心塌

缩超新星的前身星确定。

取得的突出进展为：①利用国内设备成功开展了大视场超新星巡天，相关数据增加了对超新星爆发初态的了解。②首次发现 Ia 超新星的观测差异同其爆发环境存在密切相关，得到了这一差异受前身星性质影响的关键证据。③对核心塌缩的观测研究限制了大质量恒星晚期演化行为。发表 20 篇超新星相关的论文（包括第一作者 *Science* 论文），这些工作得到国内外同行 800 多次引用，在国内外重要学术会议上作 10 多次邀请/特邀报告。

图 Ia 超新星存在两类前身星的观测证据（主图横轴代表超新星在星系中的径向距离，纵轴代表光球膨胀速度）



嫦娥二号探测数据揭示图塔蒂斯小行星的物理特性及地质特征

Physical Properties and Geological Features of Asteroid Toutatis as Observed by Chang'e-2

中国科学院紫金山天文台季江徽研究员等在国家自然科学基金(批准号: 11273068, 11473073, 11303103, 41403056)的资助下, 基于嫦娥二号探测数据, 研究了4179号小行星图塔蒂斯的基本物理特性及表面地质特征, 为小行星的形成演化和撞击历史提供了重要线索, 成为探月工程(二期)的重要成果。

应用于工程。

基于嫦娥二号获得的图塔蒂斯的光学图像, 通过与国内外学者的合作, 开展了系列研究工作并取得以下重要进展: ①揭示图塔蒂斯小行星的物理特性、表面特征、内部结构与形成机理。②较精确给出了图塔蒂斯自转轴的空间指向, 揭示了其自转特性。③揭示了图塔蒂斯表面的大部分碎石来源于早期其母体形成时的残留碎片, 研究结果对其形成与演化具有重要科学意义。

2012年12月13日, 嫦娥二号精确实现与近地小行星图塔蒂斯的近距离飞越探测, 成为人类历史上首次近距离(约为770m)造访该天体的探测器。在拓展任务中, 紫金山天文台团队精确确定了图塔蒂斯的轨道, 定轨结果直接

2013年12月13日, *Nature* 网站首页头条推介了相关研究成果, *Nature* 中文版推荐为研究亮点——“天文学: 与一个近地小行星的近距离接触”。2014年在第十二届“小行星、彗星和流星”国际会议作大会特邀报告, 2016年将在“中美 Kavli 前沿科学研讨会”作大会特邀主题报告, 所取得的成果受到

国际同行的广泛关注。上述研究成果在国际著名学术期刊 *Sci. Rep.*、*MNRAS* 等上发表, 分别获得2012年度和2013年度中国十大天文科技进展。

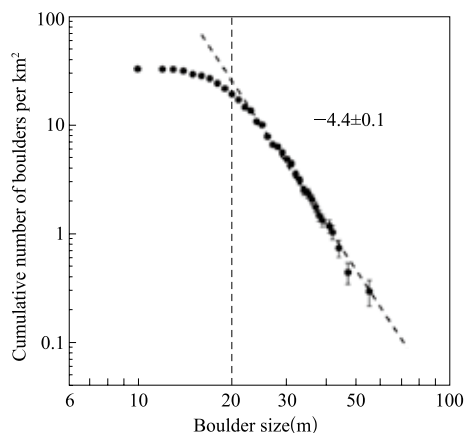


图1 图塔蒂斯小行星表面碎石的频率大小分布图

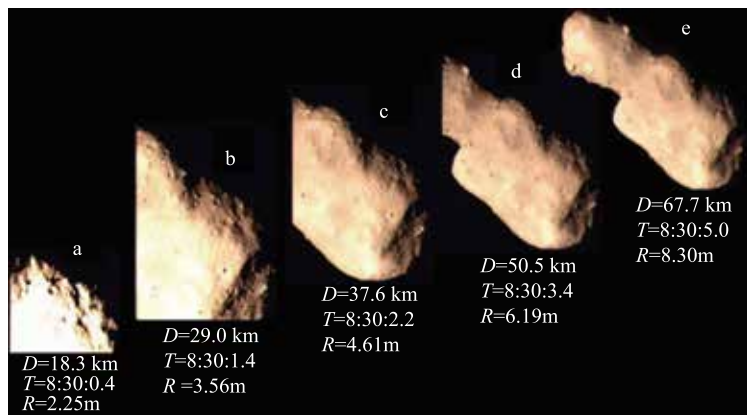


图2 嫦娥二号对图塔蒂斯小行星的飞越探测成像

基于光与冷原子的大尺度量子信息处理

Scalable Quantum Information Processing with Photons and Cold Atoms

中国科学技术大学潘建伟教授等在国家自然科学基金（批准号：10734050，10925418，11221403）的资助下，开展基于光与冷原子的远距离量子通信以及可扩展的量子计算、量子模拟和量子精密测量研究，取得了一系列具有重要国际影响的成果，获 2015 年度国家自然科学基金一等奖。

量子信息技术可以在确保信息安全、提高运算速度和提升测量精度等方面突破经典信息技术的瓶颈，为社会经济发展面临的一些重大瓶颈问题提供全新的解决途径。在量子通信方面，实现了国际上首个全通型城域量子通信网络；实现国际上综合性能最优的长寿命、高读出效率的冷原子量子存储；实现了百公里级自由空间量子通信等，为实现广域量子通信网络奠定了坚实的基础。在量子计算与模拟方面，实现了八光子纠缠，保持着纠缠光子制备的世界纪录；基于国际领先的多光子纠缠操纵技术，实现了快速求解线性方程

组、量子机器学习、量子拓扑纠错等重要量子算法的演示；在国际上首次实现多自由度的量子隐形传态；利用超冷原子 BEC 对自旋 - 轨道耦合开展了系列量子模拟研究。

在 *Nature*（3 篇）、*Nature* 子刊（13 篇）、*PNAS*（2 篇）、*PRL*（22 篇）等重要国际学术期刊上发表论文 60 余篇，研究成果入选英国物理学会评选的 2015 年度物理学十大突破之首、入选美国物理学会评选的 2013 年度国际物理学重大事件、入选 *Nature* 评选的 2012 年度“十大科技亮点”、4 次入选两院院士评选的年度中国十大科技进展新闻。

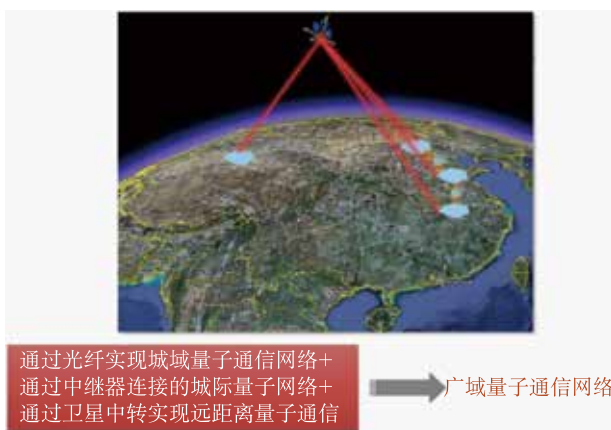


图 广域量子通信发展路线

40K 以上铁基高温超导体的发现及若干基本物理性质研究

Discovery of Fe-based Superconductors with $T_c > 40$ K and Determination of Some Basic Physical Properties

中国科学院物理研究所和中国科学技术大学研究团队经过长期积累与合作,首次突破麦克米兰极限温度,确定铁基超导体为新一类高温超导体;合成系列铁基高温超导体并确认为第二个高温超导家族,创造并保持铁基超导体块材临界温度的最高记录;基于若干基本物理性质的研究,确认了铁基超导体具有的主要非常规特性,为理解铁基超导电性起到了奠基性的作用,在国际上引领了铁基超导研究的热潮,进一步探索高温超导机理,找到更适合应用的超导体做

出了贡献。基于以上成果,赵忠贤研究员,陈仙辉教授、王楠林研究员、闻海虎研究员、方忠研究员共同荣获 2013 年度国家自然科学奖一等奖。

自 1986 年高温超导材料发现以来,国家自然科学基金委员会一直将高温超导新材料探索和超导物理机理研究列入优先支持领域。研究团队曾获国家自然科学基金(批准号:1073412,10574118,10834013,59825107,10221002)等的资助。



图 成果获国家自然科学奖一等奖

四元半导体光伏材料的关键物理问题理论研究

Theoretical Studies on the Photovoltaic Quaternary Semiconductor

复旦大学龚新高教授课题组在国家自然科学基金（批准号：10934002）的资助下，系统地研究了四元半导体光伏材料中关键物理问题，揭示了结构、电子性质和关键缺陷的相关规律。拓展了对多元半导体的认识，为其应用奠定了物理基础，在 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 成为重要光伏材料的过程中起到了重要的推动作用。成果获 2014 年度教育部优秀成果奖（自然科学）一等奖。

为发展高效、廉价、环境友好的太阳能电池，近几十年来人们一直在探索各种新型半导体光伏材料。如何理解这些新型材料的复杂物性、发现其中规律、揭示影响光伏性能的关键因素，是凝聚态物理研究的重要问题之一。围绕多元半导体等新型光伏材料，发展新计算方法，发现了 $\text{I}_2\text{-II-IV-VI}_4$ 族四元半导体晶体结构和电子结构的演化规律，澄清了相关的长期争议；发现了四元半导体的特征缺陷，揭示了光伏性能的影响机制，确定了优化光伏性能的生长条件。主要成果如下：

1. 发展了预测复杂材料结构与能带带阶计算的新方法

发展了预测复杂晶体结构的全局优化方法，发现并命名了 $\text{I}_2\text{-II-IV-VI}_4$ 族四元半导体的六方相结构。能带带阶是太

阳能电池等半导体异质器件的关键参数，但实验测量和理论计算都非常困难。建立了基于芯电子能级绝对形变势的直接计算方法。该方法被国内外理论组采用，计算结果被广泛应用于太阳能电池等器件的设计中。

2. 揭示了 $\text{I}_2\text{-II-IV-VI}_4$ 族四元半导体晶体结构和电子结构的演化规律

提出了研究四元半导体的思路，揭示了 $\text{I}_2\text{-II-IV-VI}_4$ 族半导体结构、带隙和带边等物性随成分的演化规律，从而澄清了几十年来关于其结构和带隙的争议。结果被应用于后续理论和实验研究。

3. 发现了 $\text{I}_2\text{-II-IV-VI}_4$ 族半导体的关键缺陷，确定了改善光伏性能的生长条件

确定了一种阳离子替位是最高浓度的受主缺陷，发现了四元半导体中缺陷簇易于形成这一重要特征；揭示了生长条件影响光伏性能的微观机制，明确了最优生长条件。结果被包括该类电池效率世界纪录保持者在内的至少十个实验组采纳。在 *PRL*、*PRB*、*APL*、*JACS* 等期刊上发表论文 40 余篇，6 篇入选 ESI 高引用论文。在美国材料研究学会春季会议等国际会议上作 40 多次邀请报告。



图 龚新高教授在作报告

拓扑超导及 Majorana 费米子探测

Topological Superconductor and Majorana Mode

上海交通大学贾金锋教授等在国家自然科学基金(批准号: 91021002, 91221302)的资助下, 在世界上率先制备出拓扑绝缘体/超导异质结构, 并证明它是一种新型的拓扑超导, 最近又在其中观测到 Majorana 费米子存在的可靠证据。

拓扑超导是一种新的量子态, 它的表面存在 Majorana 费米子。所谓 Majorana 费米子是 1937 年 Ettore Majorana 提出的, 它的反粒子就是它本身。它不仅是一种新奇的量子态, 而且可能在量子计算方面有很好的应用前景。然而到目前为止, 自然界中还没有找到一种拓扑超导体。

理论学家预言把拓扑绝缘体与超导体结合在一起, 就可以产生人工的拓扑超导。随着拓扑绝缘体的问世, 国际上掀起了一轮新的在实验上追逐 Majorana 费米子的竞赛。

贾金锋研究组利用自身在薄膜制备和原位表征方面的优势, 通过无数次实验的尝试, 首次成功地在超导衬底上生长出界面原子级清晰且电接触良好的拓扑绝缘体/超导异质结构, 成功地实现了超导电子对和拓扑表面态的共存。该工作被 *Science* 审稿人评价为“材料科学的突破(a breakthrough)”和“巨大的实验成就(a tremendous experimental feat)”。文章在 *Science* 发表时被编辑以“Demonstrating the Coexistence of Superconductivity and Topological Order”为题进行了推荐。此后, 他们又证实了这种异质结构是一种人造拓扑超导材料, 并成功观测到了 Majorana 费米子存在的迹象, 这些工作先后发表在 *PRL* 上。国际著名期刊《现代物理评论》和美国《新科学家》等杂志把这一系列工作作为探索 Majorana 费米子的重要进展之一, 认为他们的研究工作开辟了人造拓扑超导材料研究的新领域。

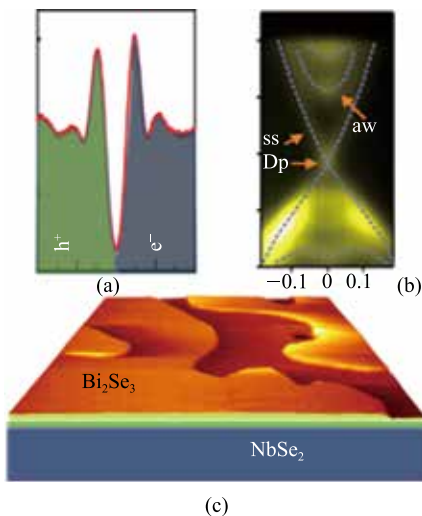


图 在超导体衬底上生长的拓扑绝缘体薄膜的 STM 图 (c), 以及在该体系中观察到的超导能隙 (a) 和拓扑表面态 (b)

超冷费米原子气体中自旋轨道耦合的研究

Spin-orbit Coupling in Ultracold Fermi Gases

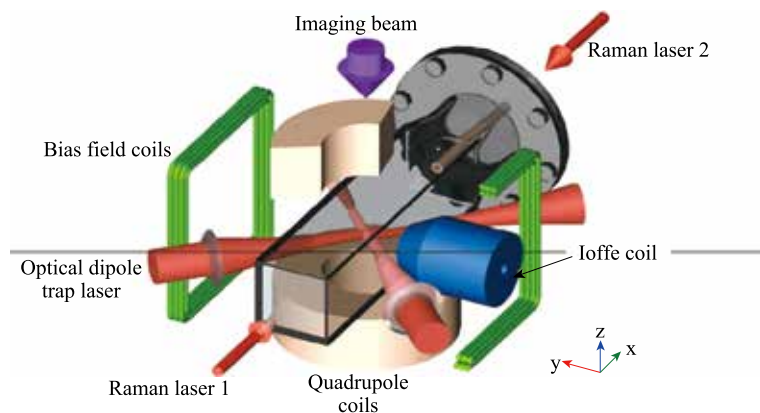
山西大学张靖教授等在国家自然科学基金（批准号：10725416，11234008，61121064）的资助下，在超冷原子费米气体中开展了对自旋轨道耦合量子模拟的实验研究，相关研究成果发表在物理杂志 *Nat. Phys.* (2014, 10: 110)、*Phys. Rev. Lett.* (2012, 109: 095301) 上。这是我国在超冷原子领域中完成的一项重要实验研究成果。

自旋轨道耦合描述了电子自旋和动量两个自由度的相互作用，在凝聚态物质中具有重要的作用，比如拓扑超流，拓扑绝缘体，以及一直在寻找的 Majorana 和 Weyl 费米子。与固体材料比较，超冷原子气体具有很强的人为控制度，可以十分方便地改变原子系统的参数，包括：外部束缚势、原子之间相互作用、原子密度和温度等。它是实现量子模拟的理想平台，可以对凝聚态物理等许多重要物理问题进行量子模拟，寻求一些重要物理问题的解决方案。

通过设计拉曼激光束与超冷费米原子之间的相互作用，张靖教授小组首次在实验上实现了自旋轨道耦合的费米中性原子系统，观测到了自旋轨道耦合破坏了动量分布的空间反演对称性，以及原子密度的变化引起了费米面的拓扑变化，还采用动量可分辨的射频谱得到了自旋轨道耦合费米中性原子系统的特

征色散曲线。发现了一种新的制备 s 波 Feshbach 分子的方法，即从单组分的超冷费米原子出发，结合自旋轨道耦合和 Feshbach 共振技术，使得单组分的费米子变为两个自旋态的相干叠加态，这些相干态强烈地依赖于费米原子的动量，相反动量的原子结合成对最后形成弱束缚的 Feshbach 分子。这项研究表明自旋轨道耦合改变了费米原子的成对机制，可以使得费米原子系统在自旋轨道耦合作用下形成了单重态和三重态组分的相干叠加态。该体系有望进一步冷却并且将其束缚到一维系统，有可能观测到有趣的物理现象，比如拓扑超流和 Majorana 费米子。该实验研究得到了国内外同行的广泛关注，发表的文章得到了 300 多次的 SCI 引用，张靖教授被国内外重要学术会议邀请作相关专题报告 20 余次。

图 实验装置示意图



大亚湾反应堆中微子实验发现新的中微子振荡模式

Discovery of a New Type of Neutrino Oscillation at Daya Bay Reactor Neutrino Experiment

中国科学院高能物理研究所王贻芳研究员领导的大亚湾反应堆中微子实验团队在国家自然科学基金(批准号:10890090, 11390380)的资助下,在国际上率先发现了新的中微子振荡模式(对应中微子混合角 θ_{13}),并精确测定其振荡概率。这使人类可以更深入地认知中微子的基本特性,开启了未来中微子物理发展的大门。该成果被世界权威学术杂志——美国《科学》杂志评选为2012年度十大科学突破之一,并获得了2014年美国物理学会粒子物理最高奖——潘诺夫斯基奖和2016年基础物理学突破奖。

中微子是构成物质世界的基本粒子,共有3种类型,不带电,质量极其微小。不同种类的中微子在飞行过程中能相互转换,物理学称之为“中微子振荡”。原则上三种中微子之间相互振荡,两两组

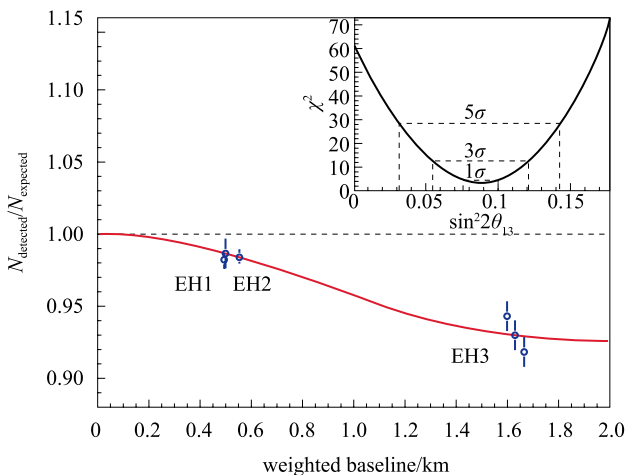
合,应该有三种模式。其中两种模式已被大气中微子实验和太阳中微子实验所证实。第三种振荡(对应中微子混合角 θ_{13})则一直未被发现,甚至有理论预言其根本不存在。由于中微子混合角 θ_{13} 是中微子振荡的六个基本参数之一,也是物理学中的28个基本参数之一,其大小关系到中微子物理研究未来的发展方向,并和宇宙中的“反物质消失之谜”相关,科学意义重大,是国际上中微子研究的热点。

该实验团队在国际上首次提出了一系列降低系统误差的方法,精度比过去国际最好水平提高近一个量级,并攻克了多项技术难关,完成样机研制、工程设计、探测器建造和数据采集与分析,于2012年宣布发现新的中微子振荡模式。之后的三年中,保持高质量的运行,取得

了世界上最大的反应堆中微子数据样本,不断刷新 θ_{13} 、中微子质量平方差、反应堆中微子能谱等的测量精度,带领中微子研究进入精确测量时代。

发表十余篇中微子领域的高水平论文,得到同行学者的一千余次的SCI重点引用和重要国际学术会议的近百次邀请报告。

图 3 个实验厅内的6个中微子探测器测量到的中微子数与预期中微子数的比值。横坐标是中微子的飞行距离。纵坐标为1的虚线表示没有振荡。红线为中微子振荡曲线的最佳拟合值。 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的 χ^2 分析图嵌于右上角



应用引力全息性质到强关联材料磁性研究

Applying the Gravitational Holographic Properties to Understanding Magnetism in Strongly Correlated Systems

为了理解强关联电子体系中自发磁有序相关的物理问题，中国科学院理论物理研究所蔡荣根研究员及课题组，2014年提出了一个描述强关联电子体系中自发磁有序的全息对偶模型。模型能够实现“时间反演”对称性的自发破缺与自发磁化。高温时，诱导磁矩与外磁场呈现出单值的关系；但低温时，呈现出所谓的“磁滞”现象。磁化率符合铁磁材料的居里-外斯定律。课题组还研究了重费米子材料如 UGe_2 、 URhGe 和 UCoGe 中的超导和铁磁共存问题。

他们进一步构造了强关联材料的反铁磁相变全息模型。反铁磁转变温度 T_N 会被外加磁场压低。当外加磁场 B 达到一个临界强度 B_c 时，转变温度 T_N 压低到零。这表明存在一个量子相变。利用这个全息模型，与英国拉夫堡大学 Kusmartsev 教授合作，对磁性结构材料 BiCoPO_5 和 $\text{Er}_{2-2x}\text{Y}_{2x}\text{Ti}_2\text{O}_7$ 在磁场诱导下的量子相变进行了研究。结果表明，对偶模型计算的结果能够和实验测量的结果相吻合。以 $\text{Er}_{2-2x}\text{Y}_{2x}\text{Ti}_2\text{O}_7$ 为例，实验测量结果和全息理论计算的结果比较。

对偶模型预测了反铁磁激发能隙 Δ 与外加磁场 B 满足如下关系：

$$\frac{\Delta}{k_B T_{N0}} = C(B/B_c - 1)$$

这里 C 是一个比例系数， k_B 是玻尔兹曼常量。对于 $\text{Er}_{2-2x}\text{Y}_{2x}\text{Ti}_2\text{O}_7$ ，实验测量结果 $C \approx 5.0$ 并且和 x 几乎无关。而全息对偶模型给出 $C \approx 4.2$ 。他们还构造了金属-绝缘体相变模型，结果与一些锰化物的巨磁阻效应定性一致。

他们的一系列工作发表在该方向的国际主流刊物 *Phys. Rev. D* 和 *J. High Energy Phys.* 上。这些工作引起了国际同行的广泛兴趣，并应邀在一些国际学术会议上作大会邀请报告。这些工作是他们获得 2011 年度国家自然科学奖二等奖项目的继续，得到了国家自然科学基金（批准号：11035008，11375247，11435006）的资助。蔡荣根研究员获得了 2014 年汤森路透全球高被引科学家奖，入选 2014 年和 2015 年爱思维尔中国高被引科学家名录。

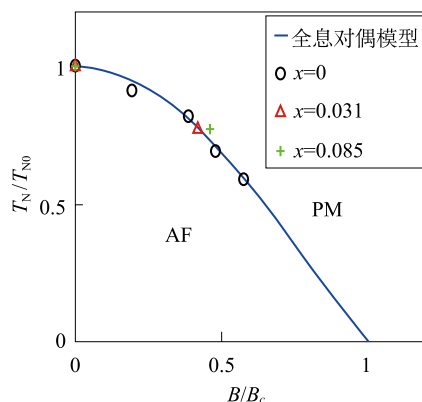


图 全息对偶计算得到的反铁磁转变温度和不同掺杂下 $\text{Er}_{2-2x}\text{Y}_{2x}\text{Ti}_2\text{O}_7$ 实验测量值之间的对比

图中 T_N 为反铁磁转变温度； T_{N0} 为磁场 B 等于 0 时反铁磁转变温度；AF 表示反铁磁相；PM 表示顺磁相； B 为外加磁场强度； B_c 为临界磁场值。全息对偶模型的计算给出 $B_c \approx 1.50\text{T}$ ，而实验测量得到的 $B_c \approx 1.45\text{T}$ 。

在北京谱仪Ⅲ实验中确认 X(1835) 粒子并发现 X(2120) 和 X(2370) 新粒子

Confirmation of X(1835) and Observation of X(2120) and X(2370) New Particles at the BES Ⅲ Experiments

中国科学院高能物理研究所金山研究员等在国家自然科学基金(批准号: 10821063, 11121092)的资助下, 利用北京正负电子对撞机上北京谱仪Ⅲ(BES Ⅲ)实验获取的高统计量 J/ψ 粒子事例数据, 确认了北京谱仪Ⅱ实验发现的新粒子 X(1835), 还首次测定了它的自旋宇称, 并且发现了 X(2120) 和 X(2370) 两个新粒子。

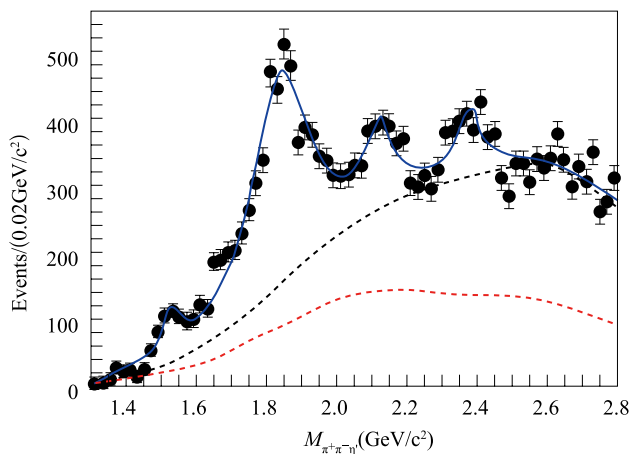
北京谱仪Ⅱ实验在 $J/\psi \rightarrow \gamma p\bar{p}$ 过程中, 发现了质子-反质子质量阈附近的反常增强结构 X(1860), 在 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \eta'$ 过程中发现 X(1835) 新粒子, 在国际上引起了强烈反响, 有理论认为 X(1835) 可能与 X(1860) 是同一个粒子, 因而可能是高能物理实验长期寻找的质子-反质子束缚态。X(1835) 新粒子的发现被

评为 2006 年度中国基础研究十大新闻第一名, 并作为首个在中国进行的高能物理实验中发现的新粒子被国际权威《粒子数据手册》收录。“北京谱仪Ⅱ实验中发现新粒子”获 2013 年度国家自然科学基金二等奖。

利用改进升级后的北京谱仪Ⅲ实验获取的 225 兆 J/ψ 粒子事例, 在 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \eta'$ 过程中证实了 X(1835) 粒子的存在, 同时还观测到两个新的共振态粒子 X(2120) 和 X(2370)。首次完成了 $J/\psi \rightarrow \gamma p\bar{p}$ 中 $p\bar{p}$ 阈增长结构的分波分析, 不但证实了 BES Ⅱ 实验的观测结果, 还确定其自旋宇称为 0^{++} 。北京谱仪Ⅲ实验还在 $J/\psi \rightarrow \gamma K_S K_S \eta$ 过程中也证实了 X(1835) 的存在, 不仅发现了 X(1835) 粒子新的衰变模式, 并首次通过分波分析

确定其自旋宇称为 0^{++} , 与 $p\bar{p}$ 末态测量结果一致, 进一步支持了质子-反质子束缚态的理论解释。以上这一系列成果均发表在《物理评论快报》上, 并多次受邀在各类国际大会上报告物理结果。目前, 北京谱仪Ⅲ实验正在利用更大统计量数据对新发现的强子态进行深入的研究。

图 BES Ⅲ 实验中确认了 X(1835) 新粒子, 并且发现了 X(2120) 和 X(2370) 两个新粒子



暗物质直接探测以及中国锦屏地下实验室 超低本底实验环境研究

The Study on the Direct Detection of Dark Matter and on the China Jinping Underground Laboratory's Ultra Low Background Environment

中国暗物质实验（China dark matter experiment, CDEX）合作组首席科学家、清华大学康克军教授等在国家自然科学基金（批准号：10935005，11055002，11355001）的资助下，开展暗物质直接探测研究以及在世界最深的中国锦屏地下实验室（CJPL）开展超低本底实验环境的研究。

2014 年，以清华大学为主导的 CDEX 合作组在 *Phys. Rev. D* 的“Rapid Communication”栏目发表了最新的研究成果：获得了点电极高纯锗探测器在 10GeV 以下能区里最灵敏的暗物质实验结果，利用相同的探测器技术确定性地排除了美国 CoGeNT 实验组几年前给出

的暗物质存在区域，为更好地理解过去多年国际上多个实验组发布的相互矛盾的暗物质实验结果提供了全新的、灵敏度更高的实验证据。

在开展暗物质实验研究过程中，德国马普物理研究所、美国加州大学伯克利分校、法国核物理研究所、韩国首尔大学等国际著名学术机构与我国 CDEX 合作组建立了密切的合作关系。目前，CDEX 合作组正在开展更高灵敏度的探测实验，同时清华大学与雅砻江流域水电开发公司紧密合作，正在实施 CJPL 二期扩建任务，为我国和全世界科学家提供得天独厚的地下低本底实验环境。

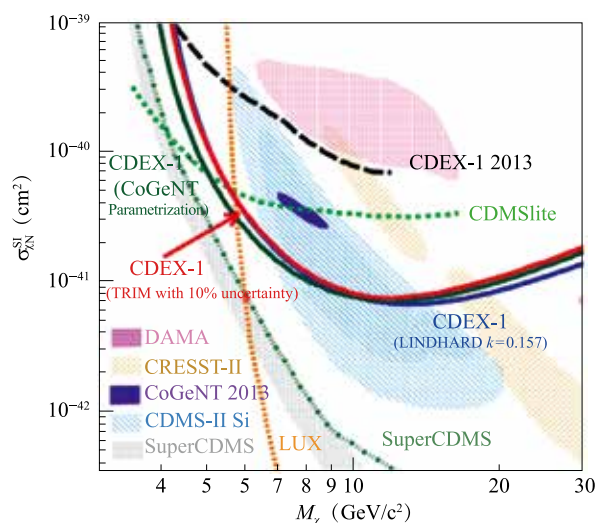


图 CDEX-1 实验最新暗物质实验排除线结果（红线），暗物质不可能在这条排除线上方的区域存在，利用相同探测技术，确定性地排除了美国 CoGeNT 实验组多年来宣称的暗物质存在区域（紫色椭圆区域）

稳态等离子体约束改善的机理研究

The Mechanism Research on Improvement of Steady-state Plasma Confinement

中国科学院合肥物质科学研究院李建刚研究员及其带领的创新团队在国家自然科学基金(批准号:11021565, 11321092)的资助下,围绕稳态等离子体约束改善的机理研究这一国际前沿课题开展了深入的基础研究。在吸收消化国外先进知识和经验的基础上,利用以我国为主研发的设备及仪器,通过实验验证,探索稳态等离子体先进高约束科学问题的机理,已经获得一些重大突破。作为主要成果,该团队被授予2013年度国家科学技术进步奖框架下的创新团队奖。

聚变能是人类最理想的清洁能源之

一,对我国的可持续发展有着重要的战略和经济意义。团队长期从事磁约束核聚变研究,自主设计建造了全超导托卡马克装置和多个大规模实验系统,实现了长脉冲高温等离子体运行,取得了一系列具有国际领先水平的科研成果,为聚变科技发展做出了创新贡献。

团队自主设计、建设、成功运行了世界上首台全超导非圆截面托卡马克核聚变实验装置 EAST, 2012 年获得超过 30s 的高约束模(发表在 *Nat. Phys.*)以及 411s 高参数偏滤器等离子体放电,创两项世界记录,已成为国际稳态等离子体聚变前沿研究的重要基地。团队成

员在国际聚变工程与技术、等离子体物理的历届国际大会上作特邀、综述、主题、邀请和总结报告 30 余次。

图 1 超过 30s 的高约束等离子体放电

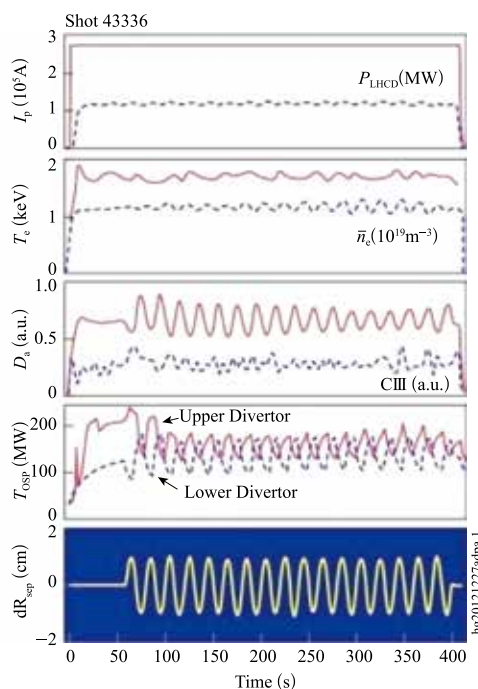
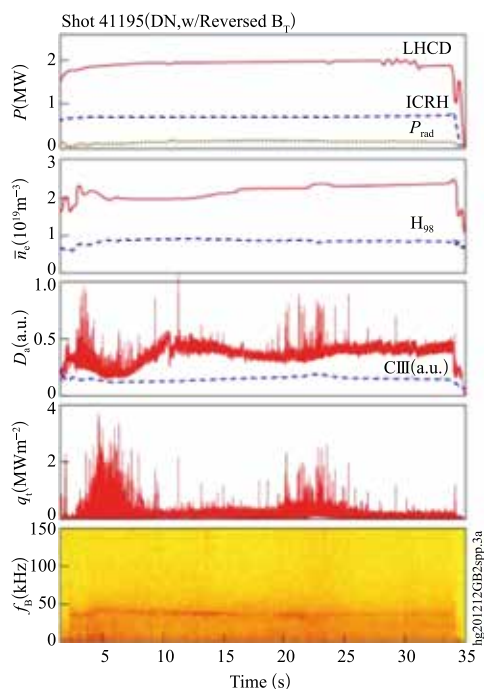


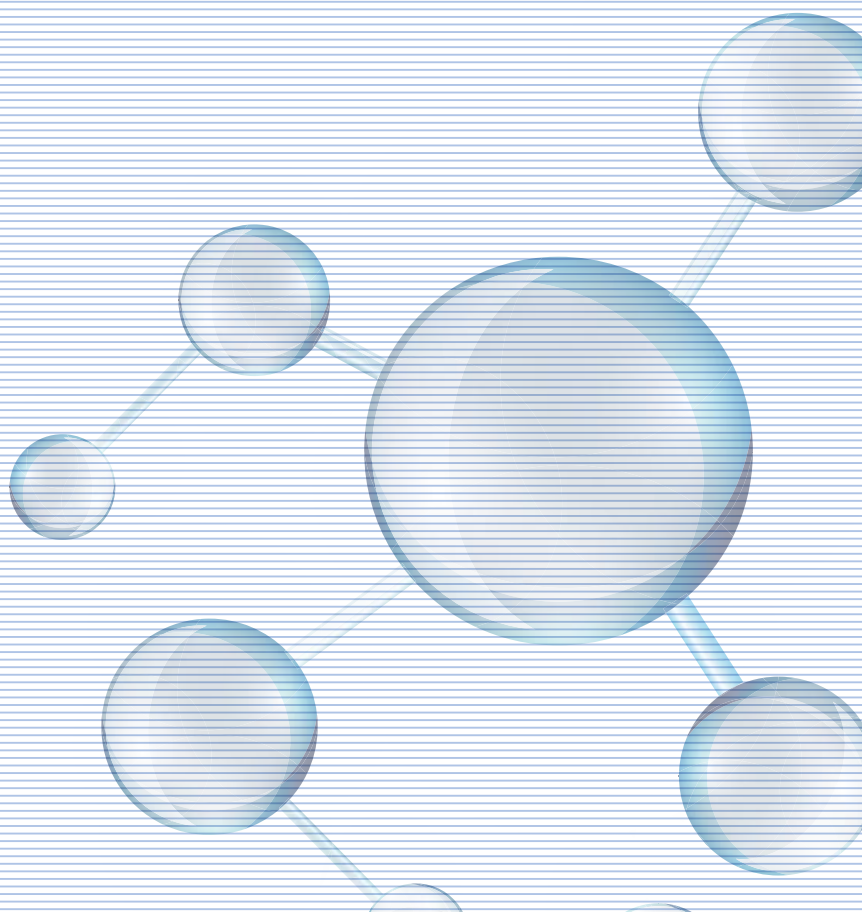
图 2 超过 400s 的高参数偏滤器放电



NSEFC

国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

化学科学部



二维超薄材料：研究催化活性位点的理想模型体系

Ultrathin Two-dimensional Material: an Ideal Model for Understanding Active Sites in Catalysis

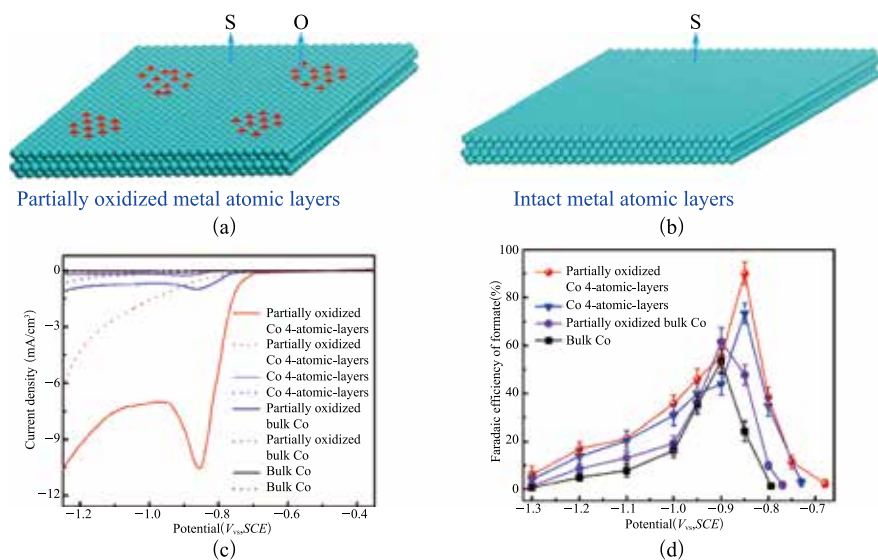
超薄二维材料是一种全新的材料，原子级的厚度使得这类材料能够暴露出更多的内层原子，为光电催化反应提供了大量有效活性位点。中国科学技术大学谢毅教授等在国家自然科学基金（批准号：21331005, 21422107, 21222101, 11321503）的资助下，通过在原子级厚二维结构表面制造空位型缺陷或者掺入杂质原子来定向调控其电子结构；进一步利用 X 射线吸收精细结构谱、正电子湮没谱、电子顺磁共振谱、超快时间分辨光谱和第一性原理计算表征和理解原子级厚二维无机材料的原子结构、缺陷类型以及电子结构，明确这类材料的原子结构、缺陷结构、电子结构与其光、电催化性能之间的构效关系，为催

化性能的协同优化提供理论指导和明确的实验方案，实现了一系列二维超薄结构在高效光、电催化等功能方面的显著提升。总之，原子级厚二维超薄结构成为研究催化活性位点的理想模型体系，其本征物理性质的表面化学法调控为建立明确的结构 - 性能间的关系及高效光、电催化应用提供了一个新的机遇。

相关工作已在 *Nature* (1 篇), *Nature Commun.* (3 篇), *J. Am. Chem. Soc.* (6 篇), *Angew. Chem. Int. Ed.* (8 篇) 和 *Adv. Mater.* (3 篇) 等国际著名学术期刊上发表论文二十多篇，还为 *Chem. Soc. Rev.* 和 *Acc. Chem. Res.* 撰写了多篇综述。由于在该领域取得的进展，谢毅应邀为 *Nature*

撰写了题为“More energy, cross disciplines”的 2015 年新年展望 (*Nature*, 2015, 517: 16)。相关研究成果两次入选《中国科学院重大科技基础设施重大成果》，谢毅个人获 IUPAC Distinguished Women in Chemistry/Chemical Engineering Award (2013), TWAS Prize in Chemistry (2014) 和 L'Oréal-UNESCO for Women in Science Awards (2015)。

图 杂化超薄二维结构中两种不同种类的活性位点 (a)、(b)；不同种类的活性位点所导致的电催化性能差异 (c)、(d) (*Nature*, 2016, 529: 68)



尖晶石氧化物可控制备新方法与电化学应用

Controllable Preparation and Electrochemical Application of Spinel Oxides

具有 AB_2O_4 组成的尖晶石型氧化物是一类重要功能材料，在电、磁、催化、能量储存与转化等领域具有广泛用途，但其制备常采用传统的固相烧结法，需要高温较长时间加热克服扩散阻力和反应能垒，耗能耗时，并且产物形貌难以调控，粒径大，比表面积小，电化学活性低，构效关系不明确。南开大学陈军教授等在国家自然科学基金（批准号：20873071，21231005，21322101）的资助下，提出“还原-转晶”、“氧化沉淀-嵌入晶化”新合成方法，在常压和低温（ $\leq 180^\circ\text{C}$ ）下成功制备了 $M_xMn_{3-x}O_4$ （ $M=\text{Co}, \text{Mg}, \text{Zn}$ ）、 $N\text{Co}_2\text{O}_4$ （ $N=\text{Ni}, \text{Fe}, \text{Zn}$ ）等系列尖晶石纳米材料，实现了组成和晶型的同步调控，获得了传统固相法难以合成的热力学亚稳态立方 CoMn_2O_4 和四方 Co_2MnO_4 。进一步研究了钴锰尖晶石对氧还原、氧析出电催化

反应的催化性能，揭示了立方相、氧缺陷、锰混合价态对于增强氧吸附、降低 O_2 活化能垒、诱导电荷转移、提升氧催化活性的促进作用，阐明锰系尖晶石电化学性能与锰平均价态的类火山型关系（顶点

接近 3.5）。构筑了循环性能较好的锂空气电池，可逆循环 155 周、容量保持率 92.6% 的锌空气电池，以及 5A 放电容量 500A·h 的镁空气电池。尖晶石制备新方法操作简单、有利于节能减排，为设计高效廉价非铂电催化材料、研制可充金属空气电池提供了新思路。相关研究成果发表在 *Nature Chem.*（2011, 3: 79; 2012, 4: 962）、*Nature Commun.*（2015, 6: 7345）、*Angew. Chem. Int. Ed.*（2013, 52: 2474; 2015, 54: 4338）等学术期刊上并获中国发明专利授权，被 *Nature China*（doi: 10.1038/nchina.2011.8）以 *Nanomaterials: speedy spinels* 为题作为研究亮点报道，被《科技导报》评选为 2011 年度中国重大科学进展，并被《中国科学基金》作为亮点研究进展和封面（2015, 29: 5）进行介绍。

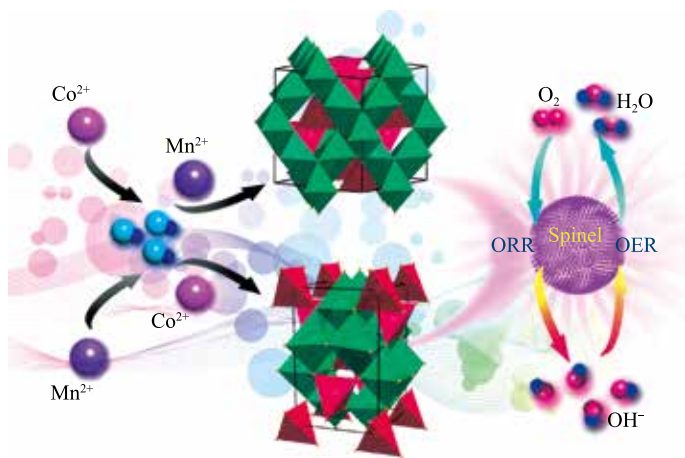


图 尖晶石纳米颗粒的四方和立方晶形可控合成与电催化氧还原/氧析出构效关系

二维碳的新同素异形体——石墨炔的合成

Synthesis of Graphdiyne—The New Two-dimensional Carbon Allotrope

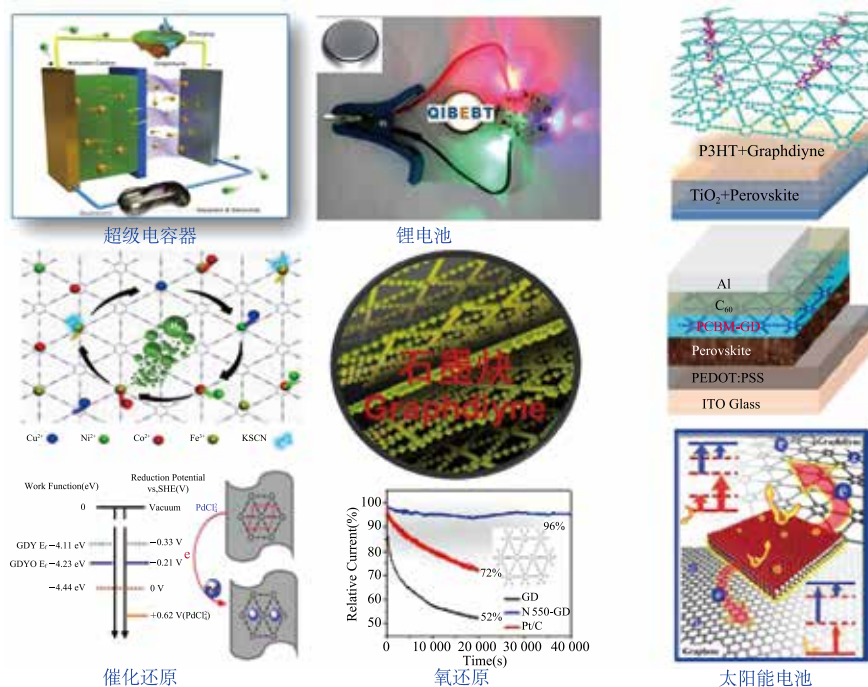
中国科学院化学研究所李玉良研究员在国家自然科学基金(批准号:21031006)的资助下,首次化学合成了二维碳的新同素异形体——石墨炔,使碳材料家族又诞生了一个新成员,开辟了人工化学合成新碳素异形体的先例,并建立了二维全碳材料石墨炔聚集态结构可控生长新方法,解决了薄膜生长的多个关键科学问题,确定了生长机理,确证了石墨炔二维结构及其层间距

为 0.365 nm,系统研究了石墨炔薄膜的基本电学、光学、物理特性,与国内外著名的课题组进行合作研究,在石墨炔的理论、计算机模拟、电学、能源、催化等领域取得了系列研究成果。石墨炔作为具有中国自主知识产权的新材料,引领了国际上众多科学家积极参与到该领域研究,在国际上产生了重要影响,美国、加拿大、日本、德国等国的诸多课题组开展了研究,使石墨炔研究正在

形成一个新的研究热点和领域。著名纳米领域杂志 *Nano. Tech.* 以 2015~2025 年二维材料机遇分析专题指出,石墨炔是最具潜力和商业价值的材料之一,并列为该专题的第七章进行评述。美、英等国及欧盟已将石墨炔相关研究列入框架和政府计划。

在 *Acc. Chem. Res.*, *Adv. mater.*, *Chem.Soc.Rev.* 等国际著名学术刊物上发表论文 83 篇,获中国发明专利 5 项,获 2014 年度国家自然科学基金二等奖。

图 石墨炔的基础研究和应用



上转换发光材料用于生物成像研究

Upconversion Materials for Bioimaging

发光生物成像是一种非侵入式、在线实时的活体可视化示踪技术，因其具有亚细胞层次的分辨率、快速响应、高灵敏度等特点而广泛地应用于生物医学领域。近年来，复旦大学李富友教授等在国家自然科学基金（批准号：20825101，21231004）的资助下，在上转换发光材料的生物成像领域取得重要进展。围绕活体发光成像领域中存在背景干扰强等难题展开研究，综合运用稀土化学、配位化学、纳米技术和显微光学原理，成功地建立了上转换发光活体成像方法。选择具有反斯托克斯位移发射、近红外激发的上转换发光材料作为研究对象，开发出了小尺寸、高效率的成像探针，并发展了多种通用方法用于材料的水溶性改性和生物功能化；在此

基础上首次提出了激光扫描上转换发光显微术和三重态湮灭上转换发光活体成像术，分别搭建了用于细胞和小动物活体成像的上转换激光扫描共聚焦显微镜和小动物活体成像系统，用实验方法证实了上转换发光生物成像具有背景噪声低、检测深度大、光稳定性好等特点；此外还提出了上转换发光纳米材料的多功能化策略，并成功地在活体水平上实现了小动物多模式成像及功能底物检测成像，拓展了相关生物成像技术的应用领域。上述成果系统发表于 *Nat. Protoc.*, *Chem. Rev.*, *Chem. Soc. Rev.*, *J. Am. Chem. Soc.*, *Adv. Mater.* 等杂志上，并获 2014 年度高等学校科学研究优秀成果奖自然科学奖一等奖。

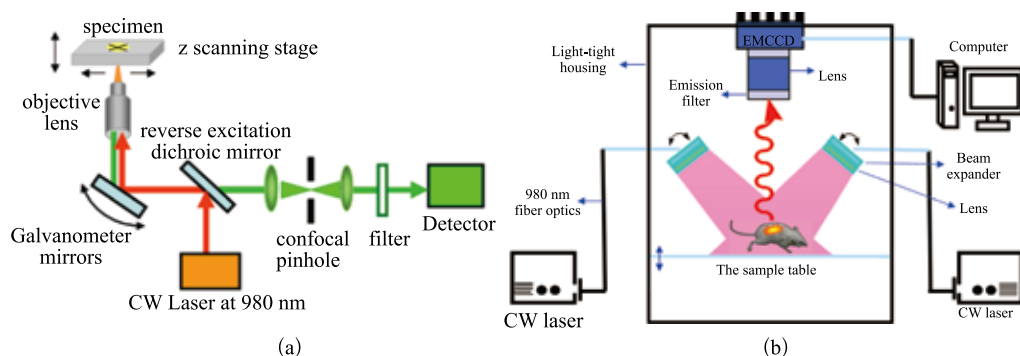


图 上转换发光
激光扫描共聚焦显微镜
(a) 及小动物活体成像
系统 (b) 的光路示意图

碳龙化学：金属杂戊搭炔和金属杂戊搭烯

Carbolong Chemistry: Metallapentalyne and Metallapentalene

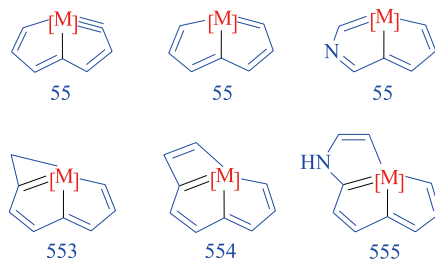
厦门大学夏海平教授团队在国家自然科学基金(批准号: 20925208)等的资助下, 历经4年攻关, 建立了原创性碳龙化学, 其核心分子骨架包括金属杂戊搭炔和金属杂戊搭烯。这类骨架由含一条7~12个碳原子组成的“碳龙”将一种过渡金属螯合形成金属杂戊搭炔/烯及其衍生物, 故也称其为“碳龙化学”。在配位化学中, 络合物多齿配体配位的主角长期是N、P、O、S等杂原子。碳龙化学证明了一个颠覆传统的事实: 纯碳链可以作为多齿配体, 配位主角全部是碳原子。

戊搭炔的有机母体骨架是反芳香性的, 但金属杂戊搭炔骨架却是芳香性的。首例金属杂戊搭炔由博士生朱从青成功合成与系统表征, 并获得了芳香性的实验证据, 合作者朱军副教授通过理论计算也证明其芳香性。该化合物还挑战了化学键极限: 分子内含有小于 130° 的卡拜碳键角。成果发表于 *Nature Chem.* (2013, 5: 698)。该杂志同步以“Breaking the rules”为题发表专评。该

工作得到国内外多家科技媒体和网站的专题评论或报道, 并入选2013年度中国高等学校十大科技进展。

该团队随后发表了7篇后续报道 (*Nature Commun.*, 2014, 5: 3265; *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, 53: 6232; 2015, 54: 3102; 2015, 54: 6181; 2015, 54: 7189; *Sci. Rep.*, 2015, 5: 9584; *Chem. Sci.*, 2016, 7: 1815)。使这一我国原创的化学体系得以系统化。这些研究发现: 此类新芳香体异常稳定, 其光电特性与有机芳香体截然不同, 在太阳能利用、光电材料和生物医学等领域应用前景广阔。维基百科现在已有这一全新芳香骨架基元。

该团队已报道的碳龙骨架基元如下:



特色骨架手性配体：从 SpinPhox 膦-噁唑啉到 SKP 双膦配体

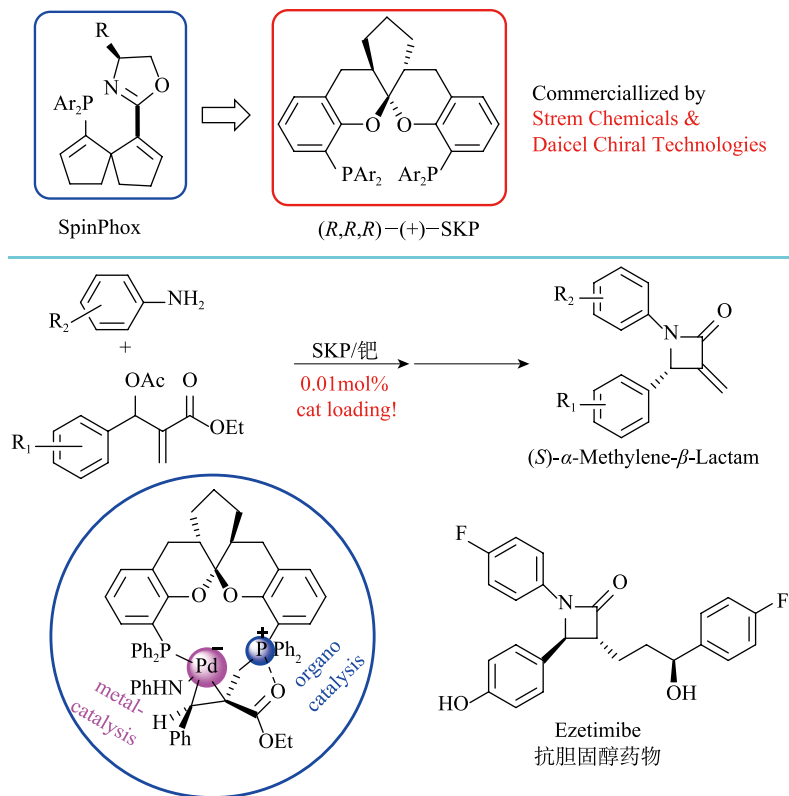
Chiral Ligand Design: from SpinPhox to SKP

追求催化的高效率、完美的选择性并实现其应用是手性合成领域发展的挑战问题，如何通过分子设计，实现“配体-金属-底物-环境”之间立体和电子效应的完美匹配是解决上述瓶颈问题的突破口，而手性配体的设计则是实现突破的关键。中国科学院上海有机化学研究所丁奎岭研究员领导的团队在国家自然科学基金（批准号：21172237，21232009）的资助下，发展了具有特色骨架和创新结构的手性螺环壬二烯基膦-噁唑啉配体 SpinPhox 和手性螺缩酮双膦配体 SKP 及其过渡金属催化剂，在包括 C=C 键氢化和烯丙基胺化等不对称反应中，获得了成功应用，解决了现有催化剂无法解决的选择性和效率问题，为包括重磅手性药物依泽替米贝（Ezetimibe）的合成提供了全新的高效、绿色过程，为多类新型生物活性分子的制备提供了高效新方法。其中手性配体 SKP 系列和催化剂 SpinPhox/Ir 系列已经商品化（Strem Chemicals 和 Daicel Chiral Tech.），被国内外同行广泛采用并给予高度评价，SKP 系列作为自主创新的手性配体和相关催化技术，已申请国际专利（PCT/CN2013/071091、

PCT/CN2013/071092），并在美国、欧洲（EPA 13819243.0）和日本进入实审。SpinPhox 和 SKP 是近年来国际上出现的为数不多的几类新型优势配体之一。

丁奎岭获得首届 Yoshida Prize (International Organic Chemistry Foundation, Japan) (2015)、中国化学会手性化学奖 (2014)，2013 年增选为中国科学院院士。

图 手性配体 SpinPhox、SKP 及其应用：手性药物依泽替米贝的绿色合成



手性有机小分子和金属联合不对称催化

Asymmetric Organocatalysis Combined with Metal Catalysis

中国科学技术大学龚流柱教授团队在国家自然科学基金(批准号: 20732006, 21172207, 21232007)的资助下进行手性有机小分子和金属联合不对称催化的研究。

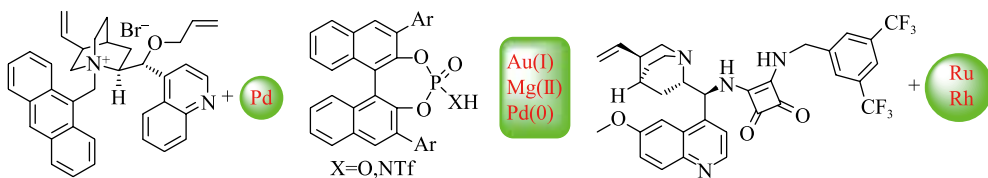
为了发挥有机小分子和金属催化剂两者的优势, 克服单一催化剂体系存在的问题, 2001 年他们报道了手性季铵盐和钯配合物“协同催化”的不对称烯丙基化反应, 这是国际上提出手性有机小分子和金属“联合催化”概念的最早期论文之一。近年来, 他们一直致力于这个领域的研究, 取得了一系列重要进展: ①发展了金/手性磷酸、 δ -Lewis 酸/手性磷酸和钌/手性双功能有机小分子等联合催化剂体系, 实现了一系列非经典

的不对称串联反应。②通过金属/有机小分子“协同”和“接力”催化, 初步解决了烯丙基碳-氢键不对称官能化反应中的立体选择性控制问题。

有关研究工作先后发表在 *J. Am. Chem. Soc.* 和 *Angew. Chem.* 等重要国际学术刊物上, 应邀为 *Acc. Chem. Res.* 撰写专论。其中手性磷酸和金配合物“接力催化”的工作被国际同行认为是“金催化领域的一种全新概念”, 并引起欧洲和印度等国的有机化学家跟踪研究。目前“手性有机小分子和金属联合催化”已成为新兴研究领域, 他们被认为是该领域的代表性研究小组之一。

成果获 2013 年度国家自然科学基金二等奖。

Asymmetric Organocatalysis Combined with Metal Catalysis



Tetrahedron; *Asymmetry*, 2001, 12: 1567; *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, 130: 7782; *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, 131: 9182; *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134: 6532; *J. Am. Chem. Soc.*, 2013, 135: 9255; *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, 137: 4054; *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, 137: 12732; *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2012, 51: 771; *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, 53: 10763; *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, 53: 12218; *Acc. Chem. Res.*, 2014, 47: 2365; *Science of Synthesis: Asymmetric Organocatalysis*, (Ed.: Maruoka, K), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2012, 2: 697

图 手性有机小分子/金属联合催化剂体系

基于“化学脱笼”反应的蛋白质特异激活

Chemical Decaging Reactions for Specific Protein Activation

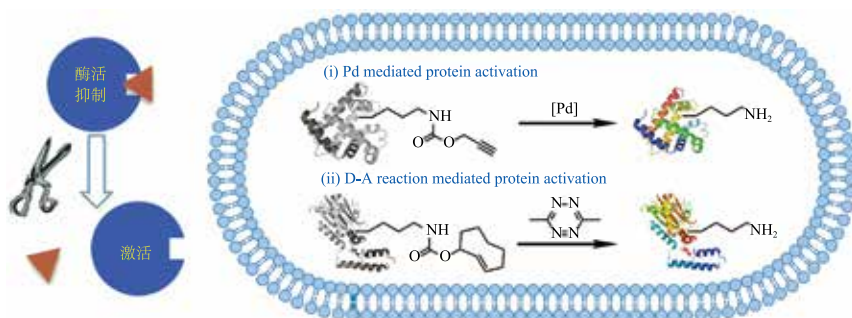
适用于活体环境的蛋白质操纵工具可实现对目标蛋白的结构和功能的原位研究,是当今化学生物学领域的前沿方向之一。与传统的活性抑制型化学探针相比,能够对蛋白质进行高时空特异激活的技术具有极大的优势。北京大学陈鹏教授课题组在国家自然科学基金(批准号:21225206, 91313301, 21432002)的资助下,通过发展基于“化学脱笼”反应的生物正交激活技术,实现了活细胞内蛋白质功能的特异开启,并进而研究了细胞信号转导过程的分子机制。

为了发展普适性的蛋白质激活策略,他们首先开发了生物正交“断键”反应,可以分别利用金属钯催化剂介导的脱炔丙基反应(*Nature Chem.*, 2014, 6: 352-361),以及逆电子需求的狄尔斯-阿尔德反应(*Nat. Chem. Biol.*, 2014, 10: 1003),在活细胞内实现“化学脱笼”。接着,他们巧妙地将非天然氨基酸定点插入技术与上述反应相结合,开发了普适的生物正交激活策略。该策略能够将目标蛋白质的关键氨基酸残基暂时保护起来,使其丧失活性,再通过“化学脱笼”反应将这种保护脱去,从而实现蛋白质活性的原位恢复,并已经成功用于激活并研究特定由磷酸激酶介导的细胞信号转导过程。由于蛋白激酶对绝大多数生理

过程都有重要影响,还与包括癌症、代谢及免疫功能障碍在内的很多疾病相关,该技术可以在激酶信号转导研究中获得新的信息,并能进而解析其调控疾病发生发展的分子机制。

上述成果受到了国内外同行的广泛关注,《自然-方法》对两篇文章均进行了亮点介绍(*Nat. Methods*, 2014, 11: 472; *Nat. Methods*, 2015, 12: 16);《自然-化学生物学》杂志也进行了专题报道(*Nat. Chem. Biol.*, 2014, 10: 328)。生物正交反应领域的国际权威,美国斯坦福大学的 Carolyn Bertozzi 教授对“化学脱笼”这一概念表现出了极大的兴趣,在最新发表的文章中重点引用了上述工作,并给与了高度评价(*Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015, 54: 1)。陈鹏教授于2014年获得(RSC)Chem Soc Rev Emerging Investigator Lectureship,该奖项每年在全球范围内颁发给一位从事化学领域研究的青年科学家。

图 基于“化学脱笼”反应的蛋白质特异激活



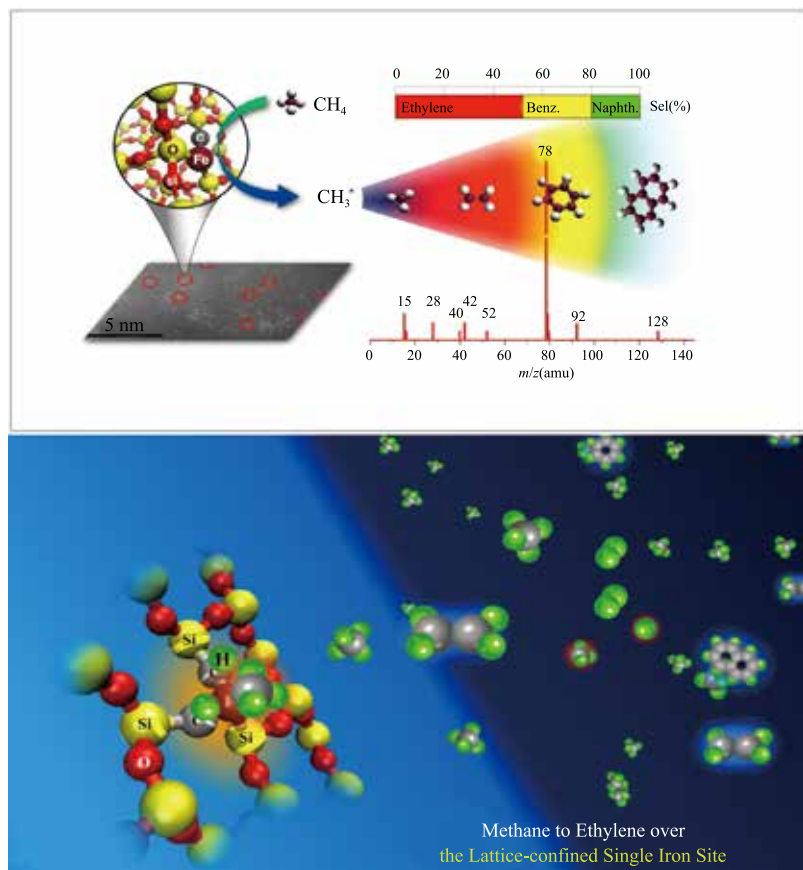
甲烷无氧活化直接制取烯烃

Non-oxidative Activation of Methane to Light Olefins

甲烷分子(天然气的主要成分)是自然界中最稳定的有机小分子,它的选择活化和定向转化是一个世界性难题,被誉为化学领域的“圣杯”。随着世界范围内富含甲烷的页岩气和天然气水合物,以及生物沼气等的发现与开采,以储量相对丰富和价格低廉的天然气替代石油生产基础化学品成为学术界和产业界研究和发展的重点。中国科学院大连化学物理研究所包信和研究员带领团队在国家自然科

学基金(批准号:21321002,11079005,21033009,21103181)的资助下,基于“限域催化”的新概念,创造性地构建了硅化物晶格限域的单中心铁催化剂,成功地实现了甲烷在无氧条件下选择活化,一步高效生产重要基础化工原料乙烯,以及芳烃和氢气等高值化学品;初步确定在催化剂中具有很高催化活性的低价铁原子通过两个碳原子和一个硅原子镶嵌在氧化硅或碳化硅晶格中,形成高温稳定的铁活性中心。甲烷分子在配位不饱和的单铁中心上催化脱氢,形成的活性甲基自由基迅速从催化剂表面脱附,经气相自由基偶联反应生成乙烯和其他高碳芳烃分子。在1090℃下,甲烷单程转化率达48%,乙烯和芳烃选择性大于99%,反应过程本身实现了二氧化碳的零排放。为世界首次报道。这一成果在理论上实现了甲烷分子碳氢键的高效选择活化,在应用上彻底摒弃了高耗能和高水耗的合成气制备过程,实现了天然气的无氧直接转化制高值化学品,被国际学术界和产业界誉为“改变世界的技术”,《德国应用化学》等国内外科学杂志迅速组织了各类专题评述。成果获2014年度中国科学十大进展。现这项基础研究成果正与企业合作,力争尽快进行中试和最终的产业化试验。

图 硅化物晶格限域的单中心铁催化剂实现甲烷无氧条件下的高效转化



亚纳米分辨的单分子拉曼光谱成像

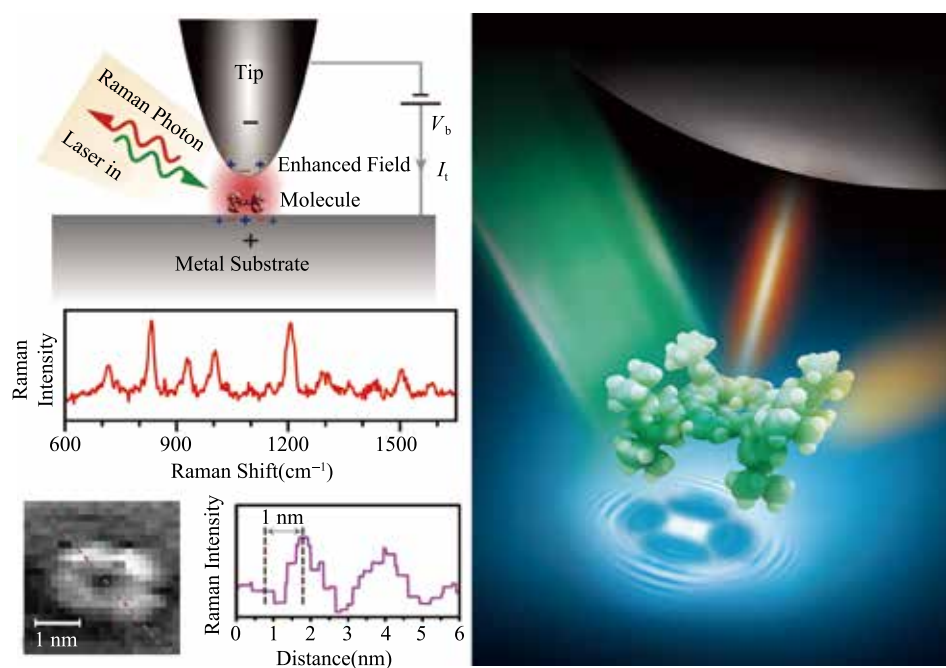
Single-molecule Raman Spectromicroscopy Goes Sub-nanometer

中国科学技术大学董振超教授研究小组在国家自然科学基金（批准号：91021004，21333010）的资助下，在高分辨化学识别与成像领域取得重大突破，在国际上首次实现了亚纳米分辨的单分子拉曼光谱成像。这项研究结果突破了光学成像手段中衍射极限的瓶颈，将具有化学识别能力的空间成像分辨率提高到前所未有的 0.5 nm 水平，并成功实现了紧邻的不同分子的化学识别。这一成果对了解微观世界，特别是微观表面

化学反应和光催化机制、分子纳米器件的微观构造、以及包括 DNA 和蛋白质测序在内的高分辨生物分子成像，具有极其重要的科学意义和实用价值。相关研究工作在权威学术期刊《自然》上发表后立即引起国际科技界的广泛关注。《自然》“新闻与展望”栏目、美国《今日物理》和《化学与工程新闻》、德国《应用化

学》、美国国家公共广播电台和英国《化学世界》网站等众多国际知名期刊和媒体纷纷撰文介绍这一重大研究进展。成果荣获 2013 年度中国分析测试协会科学技术奖特等奖、2014 年度中国科学院杰出科技成就奖，入选 2013 年度“中国光学重要成果”、中国科学十大进展和两院院士评选的“中国十大科技进展新闻”。（*Nature*, 2013, 498: 82; *Nature Nanotech.*, 2015, 10: 865）

图 单分子拉曼
成像展示图



低维光功能材料的控制合成与物化性能

Opto-functional Low-dimensional Materials: Controllable Synthesis and Physical/Chemical Properties

光功能材料在信息、能源、环境等领域有着广泛应用,而光电集成技术迫切需要能够突破现有原理和技术局限的新型低维光电功能材料。中国科学院化学研究所赵永生研究员在国家自然科学基金(批准号:21125315, 51073164, 91022022)的资助下,在国际上率先开展了低维有机光功能材料的研究,发现了有机体系中的量子尺寸效应,并在此基础上研究了激发态的限域和传播行为,实现了发光调控、光波导与激光、光探测与传感等功能与应用。

1. 阐明了分子间弱相互作用对聚集行为的决定性影响,解决了有机微纳晶的控制合成难题。提出了基于分子间弱相互作用的有机低维结构的构筑思路;通过分子设计,利用表面活性剂、化学反应等控制手段,实现了低维微纳结构

的可控合成;创新性地在气相沉积中引入吸附剂控制饱和度,有效提高了低维结构的均匀性和结晶性。这些高效、可控的制备方法为揭示微观尺度下的光物理化学过程并探索其应用提供了物质基础。

2. 发现了分子激发态的尺寸限域和传播现象,实现了有机低维体系的若干新型光功能。首次发现了有机低维材料中的激子限域效应,实现了尺寸依赖的跃迁调控;基于激子限域有效地提高了能量转移效率,在有机低维体系中实现了发光调控;进而将激子传播与光传播过程相结合,利用一维结构的谐振腔效应构建了有机纳米激光器;通过设计、合成特定有机低维结构降低光传输损耗,实现了有机微纳光波导和光信号调制单元器件,并应用于激光、场发射和光探测等器件。

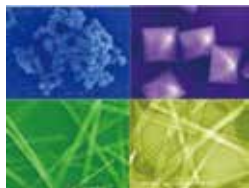


图1 有机低维结构: 纳米颗粒、多面体、微米管和纳米带

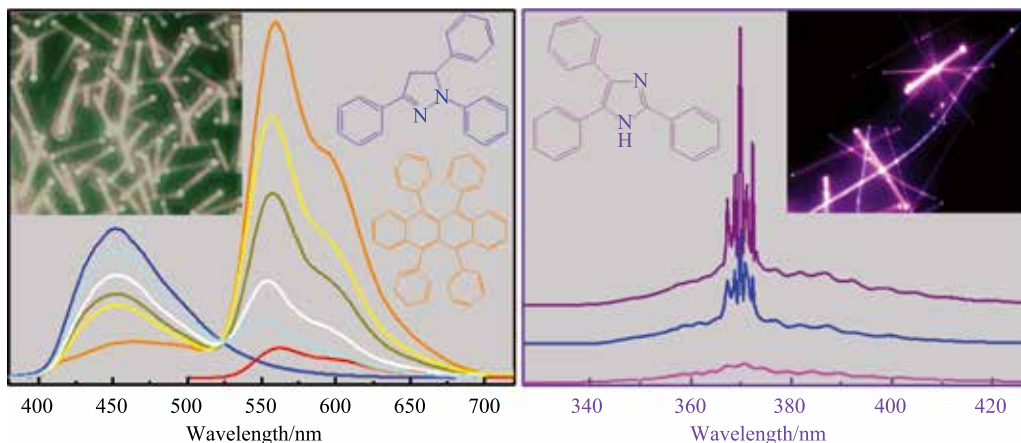


图2 有机微纳白光光学波导与纳米线紫外激光器

光学性质单分散的溶液量子点

Optically Monodisperse Colloidal Quantum Dots

溶液量子点即胶体半导体纳米晶。

由于其发光连续可调、色纯度高、易激发、高亮度、高稳定性，量子点被认为是人类发现的最优秀发光和光电材料。尽管它们在显示、照明、光伏、医学检验等行业应用前景都得到了展示，但量子点性能离真正实现重大应用还颇有距离。

浙江大学彭笑刚教授团队在国家自然科学基金（批准号：21233005）的资助下，提出了一条量子点研究新思路：作为发光和光电材料，其性质应该由激发态决定。把研究聚焦到溶液量子点的激发态控制后，他们发展了一系列研究方法，进而证明，单晶性优良的量子点的激发态性质完全决定于表面结构。通过系统研究量子点激发态与表面关系后，他们发现了一套实验路线来精确控制量子点表面，并获得了理想的量子点发光材料：荧光量子产率（PL QY）近 100%、峰宽到达本征宽度、光发射通道单一、

无单粒子闪烁。

新型量子点和新的研究方法的发现，使得该团队在基础研究和应用方向上同时获得了重大进展。例如，在基础研究方面，他们回答了困扰量子点领域 20 年的谜团：单颗粒荧光闪烁机理。在应用方面，他们把量子点发光二极管性能大幅提高到接近理论极限、稳定性接近实用水平。该成果在 *Nature* 报道后，被产业界认为拥有颠覆显示和照明两个产业的潜力。

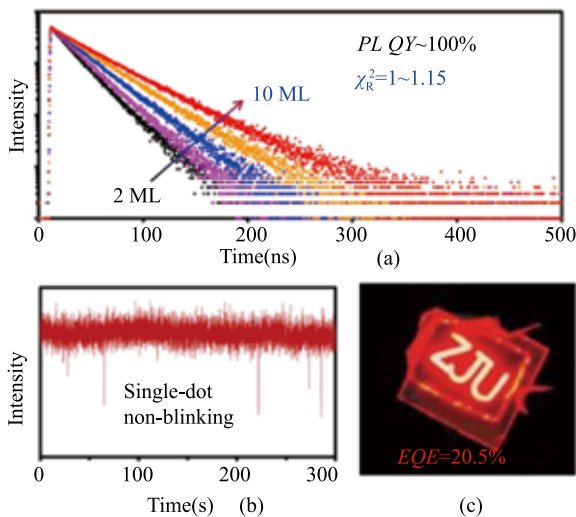


图 外延生长 2 ~ 10 层 CdS 的 CdSe/CdS 核壳量子点的瞬态荧光光谱、瞬态荧光光谱单指数拟合优度 (χ_R^2)、对应的荧光量子产率 (PL QY) (a)、荧光非闪烁 (non-blinking) 单量子点荧光强度时序谱 (b)、处于工作状态量子点发光二极管 (外量子产率 (EQE) 达到 20.5%) 的数码照片 (c)

量子态分辨的化学反应动力学

Quantum-State-Resolved Chemical Reaction Dynamics

中国科学院大连化学物理研究所杨学明、张东辉研究员领导的研究团队在国家自然科学基金(批准号: 21127902, 21021064, 21321091, 20833007, 21433009)等的长期资助下, 在分子反应动力学新方法发展和新现象发现方面都取得了重大进展, 2011 ~ 2015 年期间有三项工作在《科学》杂志上发表(*Science*, 2011, 333: 440; 2013, 342: 1499; 2015, 347: 60)。

化学反应微分截面是反应碰撞中反应散射到特定空间角度的反应物之间的有效碰撞面积, 是化学动力学实验能测量的最为细致的物理量, 也是研究化学反应机理最为重要的物理量之一。2011 年, 他们发展完善了一套有效的四原子态-态量子动力学理论与计算方法, 首次得到了一个四原子反应 $\text{HD} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{D}$ 的全维量子散射微分截面, 并与高分辨交叉分子束实验取得了高度吻合, 从而在原则上解决了四原子反应量子散射问题, 成为继 1976 年最简单三原子 $\text{H} + \text{H}_2$ 反应的微分截面首次得到计算以来的一个重大突破, 被誉为“反应动

力学发展的一个里程碑”。

反应共振态是化学反应体系在过渡态区域形成的具有一定寿命的准束缚态, 它不仅提供了一个让实验直接观察化学反应在过渡态附近行为的契机, 也能极大地影响化学反应速率和产物量子态分布, 因而长期以来一直是反应动力学研究一个备受关注的重要课题。2013 年, 他们首次在交叉分子束实验中实现了对包含振动激发态 HD 分子反应的研究, 并通过高精度势能面构造和量子动力学计算, 在 $\text{F} + \text{HD} (\nu=1) \rightarrow \text{HF} + \text{D}$ 反应发现了只能通过 HD 的振动激发来经历的两个全新共振态。该研究表明振动激发不仅能提供反应能量, 还能开启新的反应通道, 使人们能观察到在基态反应中所无法观察到的共振现象。2015 年, 他们又通过结合理论与实验, 首次在 $\text{F} + \text{H}_2 / \text{HD}$ 反应之外的 $\text{Cl} + \text{HD} (\nu=1) \rightarrow \text{DCl} + \text{H}$ 反应中发现了由化学键软化所产生的共振态。研究表明此类化学键软化现象是由于反应过渡态附近分子间相互作用的非谐性所导致的, 而几乎所有的化学反应过渡态附近都存在很大的非谐性, 因而往往能在振动激发态绝热势能面上造成一定的势阱, 并有可能支持共振态。因此, 反应共振态在振动激发态反应中很可能是一个普遍现象, 极大提高了对反应共振现象的认识和理解, 对化学反应动力学研究具有重要的学术意义。

图 1 四原子反应的精确量子动力学

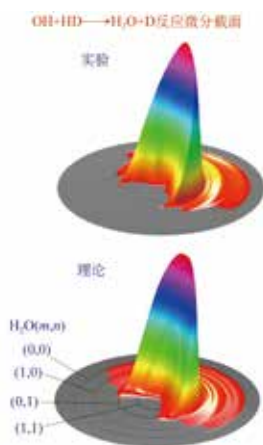
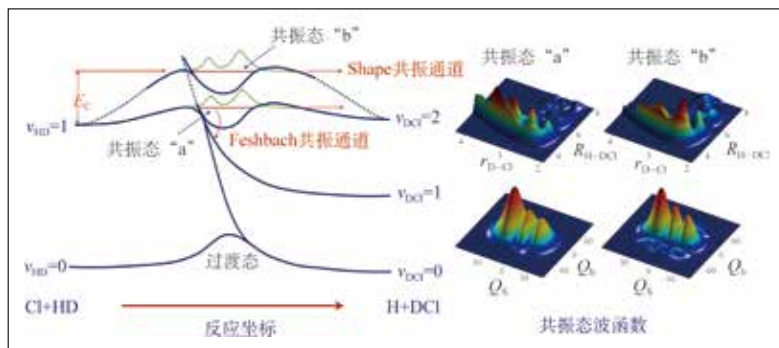


图 2 化学键软化诱导的反应共振



创建低温溶解机理及构筑天然高分子基新材料

New Mechanism of Dissolution at Low Temperature and Construction of the Natural Polymer Based Novel Materials

武汉大学张俐娜教授在国家自然科学基金（批准号：21334005，30530850，59933070，20874079，20474048）等的资助下，进行了天然高分子结构、分子尺寸和链构象表征以及天然高分子基新材料构筑的系统研究，并已取得原始创新性和具有实用价值的科研成果。例如，开创崭新的低温溶解法，实现难溶性纤维素、甲壳素、甚至聚苯胺在 NaOH/ 尿素水溶液等体系中低温溶解，并提出低温下大分子与溶剂形成氢键配体导致溶解的新机理。同时，利用低温溶解的纤维素、甲壳素、壳聚糖和聚苯胺溶液通过物理再生方法构建出一系列新材料（光、电、磁功能材料、储能材料、生

物医用材料、分离与吸附材料等），由此打开了利用可再生的生物质资源构建环境友好材料的“绿色”新途径，并揭示其结构与性能之间的构效关系。2011～2015 年张俐娜教授获 2011 年度美国化学会安塞姆·佩恩奖（国际纤维素与可再生资源材料领域最高奖），评价为：“这是纤维素加工技术上的里程碑”；获 2012 年度国家自然科学基金二等奖、2012 年度教育部高等学校十大科技进展和 2013 年度武汉市科技重大贡献奖。此外，发表论文约 100 篇、申请发明专利 34 项、主编《天然高分子基新材料》系列丛书（共十册）。



完成人：张俐娜、蔡杰、许小娟、周金平、吕昂



图 美国化学会安塞姆·佩恩奖奖章、国家自然科学基金二等奖证书、教育部高等学校十大科技进展证书和武汉市科技重大贡献奖证书（从左至右）

可控聚合及其工业化新技术

Controlled Polymerization and Its Industrial Applications

合成橡胶是国际公认的战略物资,我国是世界上第一大合成橡胶生产国。掌握合成橡胶的关键核心技术——引发/催化剂体系及可控聚合技术,为使将来成为世界合成橡胶强国奠定科学与技术基础。北京化工大学吴一弦教授在自然科学基金(批准号:20204001,20934001,51221002)的资助下,在引发/催化体系构筑、活性中心的活性与稳定性、聚合方法及聚合新工艺方面开展系统研究,并将高分子化学与无机化学、有机化学、化学工程等学科交叉融合,从科学研究、技术创新到产业应用,取得了重要进展:

1. 发明了新引发体系及异丁烯可控

聚合方法,揭示了可控引发、可控链增长及聚合特征转化的机理,实现了原位调控聚合物微观结构参数,研究成果已成功应用于我国丁基橡胶工业化生产。

2. 发展了水相正离子聚合新方法 & 非极性烯烃单体在极性水相介质中低温聚合绿色工艺,突破了关键科学与技术难题,改变了传统认识。

3. 发明了高活性、高定向性的稀土催化剂及其制备方法,实现了烯烃立构聚合与活性聚合的统一,发明了聚合体系彻底终止/降黏技术。进一步与中国石化企业合作开展工程化研究,建成中国石化第一套稀土顺丁橡胶工业装置

(规模:3万吨/年),实现了研究成果向产业转化。

相关研究已获授权发明专利37项(其中,国际发明专利12项),多项专利技术已在工业化生产中实施应用。共发表学术论文24篇。获中国石油化工集团公司科技进步奖一等奖1项和二等奖1项、中国青年科技奖1项和中国青年女科学家奖1项,入选国家百千万人才工程1项。



图 稀土催化丁二烯聚合制备高性能顺丁橡胶工业化装置(3万吨/年)

新型纤维状能源器件

Novel Fiber-shaped Energy Conversion and Storage Devices

刚性的块状或板状结构已成为能源器件进一步发展的瓶颈问题，如可穿戴设备被认为是下一个全球科技革命的突破口，但目前相对笨重的供能系统无法满足其轻质、柔性、可集成等综合性能要求。复旦大学彭慧胜教授在国家自然科学基金（批准号：20904006，21225417，51573027，91027025）的资助下，在国际上提出并发展出新型纤维状的太阳能电池、锂离子电池和超级电容器，与通常的平面结构相比具有质量轻、柔性好、可集成等优点，并可通过低成本的纺织技术实现规模化生产，在新能源领域发展了一个新方向。可望带来新的科技革命，改变人们的生活方式。

彭慧胜教授以通讯作者发表论文 90 多篇，包括 1 篇 *Nature Nanotech.*、1 篇 *Nature Photon.*、21 篇 *Angew. Chem. Int. Ed.*、2 篇 *J. Am. Chem. Soc.* 和 25 篇 *Adv. Mater.*。成果 2 次被 *Science* 和 5 次被 *Nature* 以“研究亮点”等报道，2011 年被 *Nature* 集团评

为月度“亚太地区十大研究亮点”。应邀出版专著 *Fiber-shaped energy harvesting and storage devices* (Springer)。授权发明专利 40 多项，其中 30 项实现了转让。获得国内外学术荣誉 19 项，包括英国皇家化学会 Fellow、美国杜邦教授奖、教育部长江学者特聘教授、中国青年科技奖等。指导的 1 名毕业生因为博士学位论文获得国际纯粹与应用化学联合会国际青年化学家奖、2 名博士生获得美国材料研究学会优秀博士生奖。

图 2015 年 *Nature Nanotechnology* 以封面报道新型纤维状材料与器件



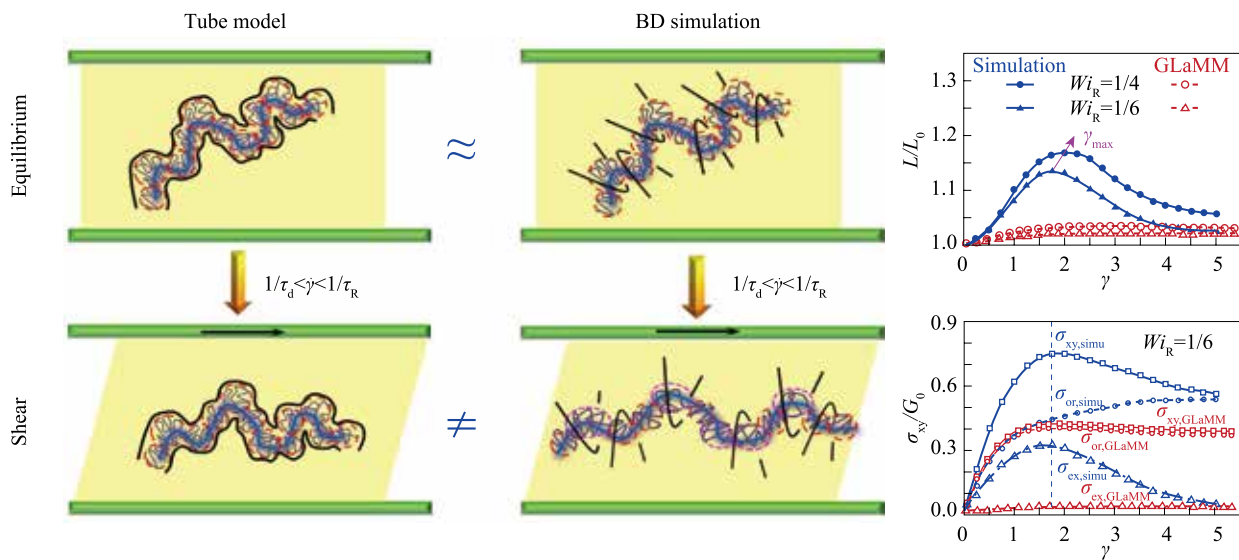
启动剪切下缠结高分子流体的非线性流变学

Non-linear Rheology of Entangled Polymer Fluids during Startup Shear

中国科学院长春应用化学研究所安立佳研究员等在国家自然科学基金(批准号: 21120102037)的资助下, 发展和建立了一整套研究缠结高分子流体的 Brown 动力学模拟和分析方法, 发现在剪切速率高于松弛时间倒数且低于 Rouse 松弛时间倒数的启动剪切下, ①缠结的分子链不仅发生了取向, 而且显著地被拉伸, 说明分子链的运动不服从 Rouse 动力学。②缠结的分子链确实发生了解缠结, 在启动剪切初期, 被拉伸的“缠结网络”能够抑制分子链解缠结, 说明即使“管子”存在, 也不是一条光滑、无势垒的管道。③应力过冲与取向贡献

的超额应力相关, 且应力极大值与轮廓长度极大值对应的应变基本一致, 说明应力过冲的分子机理是被拉伸的分子链发生了回缩, 而不是“管子模型”预言的分子链过度取向。以上研究结果首次在分子水平上质疑了学术界普遍使用的“管子模型”基本假定和物理图像的有效性。在此基础上, 他们还提出了“缠结高分子流体剪切抑制解缠结”的新概念, 用于描述传统理论无法理解的缠结高分子流体非线性流变学行为, 为重新构建缠结高分子流体非线性流变学理论和发展高分子材料加工新技术提供了清晰的物理图像。

图 快速启动剪切下, 缠结高分子流体分子图像、轮廓长度与剪切应力的“管子模型”预测与 Brown 动力学模拟的比较



基于核酸的化学生物传感和分子诊疗新方法

DNA-based Chemo/Biosensors and Molecular Theranotics

核酸适体是 20 世纪末发现的一类新兴的 DNA/RNA 分子, 具有可与抗体相媲美的分子识别功能和待开发的生物活性。湖南大学谭蔚泓教授团队在国家自然科学基金(批准号: 21221003)的资助下, 进一步完善了核酸适体活细胞筛选的新概念, 创建了以活细胞为靶标的核酸适体筛选新方法(*PNAS*, 2014, 111: 1449; *JACS*, 2015, 137: 6734), 建立了多种化学生物传感和分子诊疗新方法, 开拓了核酸适体细胞分析化学新领域。

1. 建立系列核酸适体化学生物传感新方法, 克服复杂生物体系基质干扰大、靶分子含量低等难题。将核酸适配体逻辑回路用于蛋白结合图谱的分析(*JACS*, 2015, 137: 6734), 利用核酸和生物酶间的级联反应构建人工适应性免疫系统(*Nature Chem.*, 2015, 7: 835)。

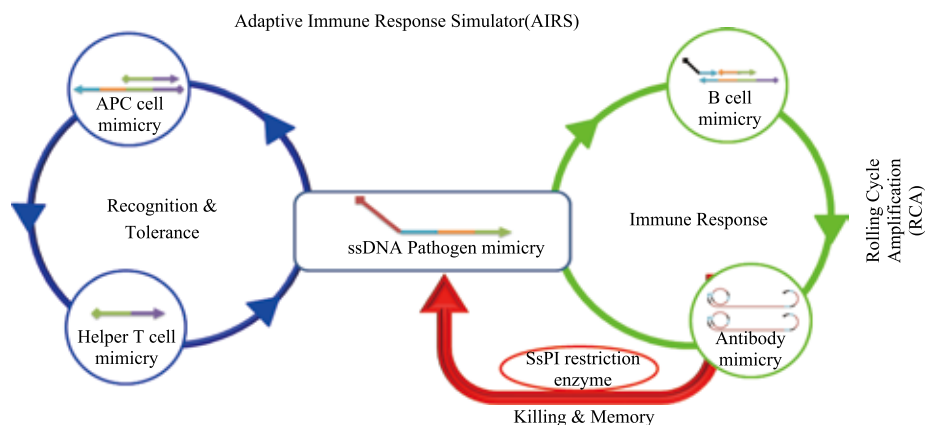
利用靶向识别性质, 发展细胞高效捕获方法, 实现了稀有细胞的检测; 设计合成上转换发光、双光子荧光、表面增强拉曼散射等低背景探针, 克服生物体系的基质干扰, 发展了深层组织成像新方法(*Angew. Chem.*, 2013, 52: 13965; *JACS*, 2014, 136: 9838; 136: 13558)。利用诱导内

吞性质, 发展双模态成像探针, 实现肿瘤细胞高分辨成像(*JACS*, 2014, 136: 11220)。

2. 发展多种核酸适体靶向给药体系, 实现分子模块化设计和可控释放, 为分子诊疗学提供新平台。利用循环核酸序列构建 DNA 纳米花结构, 为多色时空分辨成像和给药提供新方法(*JACS*, 2013, 135: 16438; *Angew. Chem.*, 2014, 53: 5821; *Nature Protocol.*, 2015, 10: 1508)。设计合成 DNA 水凝胶和光交联 DNA 聚合体, 实现高负载靶向给药(*JACS*, 2013, 135: 18644; 2015, 137: 1412)。以二氧化锰纳米片作为多功能纳米载体, 构建了高效基因沉默及增强光动力学治疗平台(*Angew. Chem.*, 2015, 54: 4801; 2016, 55: 5477)。

上述研究成果获 2013 年度湖南省自然科学奖一等奖及 2014 年度国家自然科学基金二等奖。

图 人工适应性免疫系统(*Nature Chem.*, 2015, 7: 835)



活体电化学分析化学

In Vivo Electrochemical Analysis

图 1 活体在线分析



图 2 活体原位分析

图 3 基于表界面化学的活体分析化学

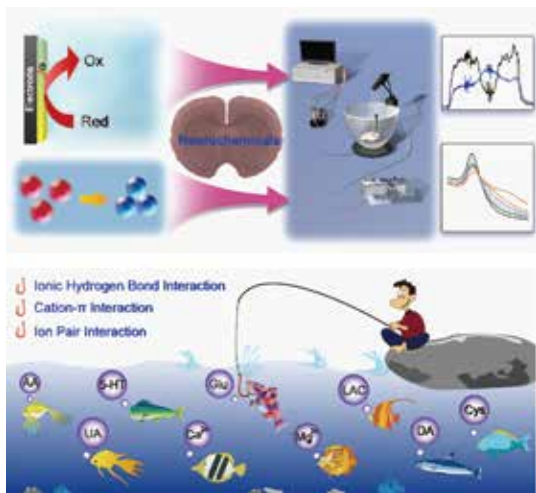


图 4 基于离子间相互作用的活体分析

活体分析化学旨在活动物层次,开展以与生命过程密切相关分子的分析化学研究,是分析化学与生命科学(尤其是神经生理学)高度交叉的前沿研究领域之一。活体分析化学由于能够更加真实定量地反映生命活动过程的化学本质,因而正在引起国际上的高度重视。虽然活体分析源于 20 世纪 70 年代,但是至今仍然未能得到很好的发展,其中存在着一系列关键的科学和技术问题。中国科学院化学研究所毛兰群研究员在国家自然科学基金(批准号:20625515, 90813032, 21210007, 21321003)的连续资助下,十几年来一直致力于活体分析化学的基础和应用研究,并取得了很好的

进展。针对在活体环境中,如何实现分析选择性这一关键问题,他们提出并建立了通过合理设计和调控表界面化学和离子间相互作用而实现高选择性的新原理;率先发现了碳纳米管能够有效加快抗坏血

酸界面电子转移的性能,创建了基于碳纳米结构抗坏血酸活体原位和活体在线的时空分辨分析方法,并在活体层次观察到了脑缺血过程中脑内抗坏血酸的变化规律;通过结合活体微透析取样技术,创新性地发展了多种生理活性分子(如抗坏血酸、葡萄糖、乳酸、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、多巴胺和半胱氨酸等)活体在线分析原理和技术,部分方法已成功地应用于神经化学过程的研究。

已在包括 *JACS*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, *Acc. Chem. Res.*, *Chem. Soc. Rev.* 等杂志上发表论文 150 余篇,论文他引 4800 余次,应邀撰写专论 4 章。活体分析化学的研究成果获 2015 年度国家自然科学奖二等奖和 2012 年度北京市科学技术奖一等奖。毛兰群研究员现任 *Analyst* 副主编, *Electrochemistry Communications*, *Electroanalysis* 编委,国家自然科学基金委员会“面向活体的分析化学基础研究”创新研究群体负责人。应邀在重要国际会议上作大会报告和邀请报告 40 余次。在 *Analyst* 上首次出版活体分析化学的专辑,负责召开了两届活体分析化学国际研讨会,推动了该领域的发展。

石墨烯的电分析化学和单细胞生物分析化学

Graphene Electroanalysis and Single Cell Bioanalysis

生物传感是基于生物识别与信号转换的分析技术。疾病的早期诊断和复杂生物体系的分析，对生物传感提出了新的挑战，实现高灵敏度、高选择性实时检测是生物传感领域的关键科学问题。

清华大学李景虹教授在国家自然科学基金（批准号：21235004，21327806，20975060）的资助下，围绕石墨烯电化学、生物传感及细胞成像新方法开展了系统深入的创新性研究。发展了石墨烯量子电容的精确测量方法；揭示了石墨烯界面电子转移规律；建立了石墨烯的元素掺杂及生物酶组装方法，构建了高灵敏和高选择的石墨烯电化学生物传感器，并用于临床样品分析；系统阐明了石墨烯与生物大分子的作用机制、结构效应和生物效应，实现了活细胞内生物小分子的实时成像分析；发展了基于核酸的链置换反应启动滚环放大的细胞内单分子 miRNA 的原位成像分析，及单细胞内钙离子信号瞬时动态过程的无标

电化学成像新技术。该系列工作被多次以大篇幅独段和原图引用评价“第一次构建了石墨烯/核酸适体复合探针，实现了活细胞中核酸和蛋白质的分析检测”，“首次将石墨烯氧化物用于活细胞实时生物成像分析研究”，“该工作平台带动了一系列石墨烯核酸荧光探针的研究”，并受 *Nat. Protoc.* 邀请发表实验指南。

近年来在 *Nat. Nanotechnol.*, *Nat. Commun.*, *Nat. Protoc.*, *J. Am. Chem. Soc.*, *Angew. Chem. Int. Ed.* 等国际期刊发表论文 300 余篇。他引 19300 余次，H 因子 74，34 篇论文入选本领域 ESI TOP 1% 高被引论文，14 篇论文入选 ESI Top 1% “hot paper”，应邀在 *Chem. Rev.*, *Chem. Soc. Rev.* 等期刊发表综述论文，阶段性成果获 2015 年度国家自然科学奖二等奖和 2012 年度教育部自然科学奖一等奖。

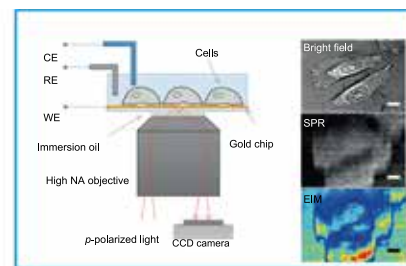


图 1 单细胞生物分析

图 2 石墨烯电分析化学与生物传感

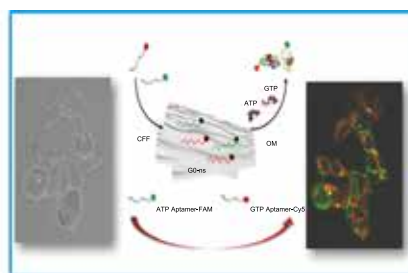
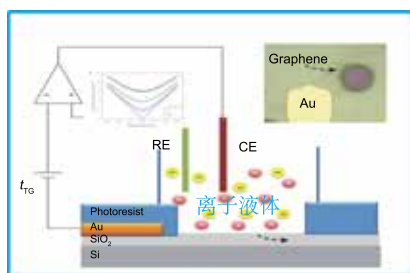


图 3 石墨烯 FRET 生物成像分析

含高浓度分散相的搅拌反应器数值放大与混合强化

Scale-up of Multiphase Stirred Reactors Containing High Holdups by Numerical Simulation and Mixing Intensification Technique

反应器放大是实验室到工业生产的必经之路,关系到能否减少副产物、简化流程和降低分离负担。国内外普遍使用传统的逐级试验放大方法,成本高、周期长,导致收率大幅下降。数值放大技术(小试→数值模拟→工业化)是理想的放大方法。超过80%的工业反应器是搅拌槽,但工业使用很多和放大困难的却是含高浓度分散相的非均相搅拌反应器,有两个难题亟待解决:一是缺少高浓度非均相微观混合的计算模型;二是缺少计算与收敛速度快、准确性高的高效数值方法。

中国科学院过程工程研究所杨超

研究员在国家自然科学基金(批准号:20990224, 21025627)的资助下,将混合分数方差引入微观混合模型,与欧拉多相流模型耦合,建立了非均相微观混合模型;构建各向异性的非均相湍流模型,提高雷诺时均方法的精度,建立了快而准的算法;从而有效解决了上述两个难题,发明了实用的数值放大技术、强化非均相混合的向心流搅拌桨和旋转进料混合器,实现了高浓度搅拌反应器数值放大走向工业应用的突破。已在中国石油化工集团公司等8家石化、医药和精细化工企业应用,取得了显著的经济和社会效益。

授权发明专利12项(包括1项美国专利)、实用新型2项;建立了有自主知识产权、成体系的反应器设计放大软件,获计算机软件著作权11项;SCI论文53篇,英文专著1部,会议邀请报告32次,中国石油化工集团公司鉴定成果2项。获2015年度国家技术发明奖二等奖及国际化工奖1项。

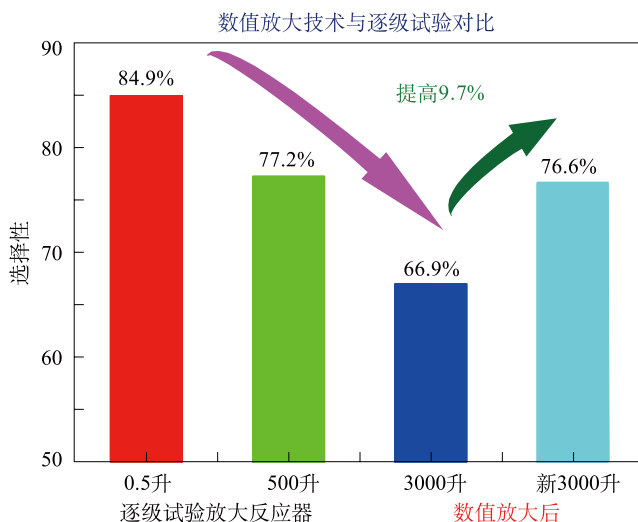


图 盐酸吉西他滨工艺气液固三相搅拌反应器的工业放大与应用效果对比

微结构传质设备及其工业应用

Microstructured Devices for Mass Transfer and Their Applications

微化工技术是化学工程学科的前沿方向，也是化学工业发展的制高点，已成为实现化工过程安全、绿色和高效的关键技术之一。美国、德国、日本等化工强国自 20 世纪 90 年代起便展开相关研究，但至今鲜见在大型化工生产过程中的实际应用。清华大学骆广生教授研究团队在国家自然科学基金（批准号：20525622，20876084，21036002）的资助下，历经十余载攻关，揭示了基于薄层剪切的多相分散过程的控制因素和传递规律，耦合微分散与热质传递的动态界面行为以及微结构内湍动引发的流体二次分散作用，发明了微滤膜、微筛孔阵列、微槽等高通量、低成本、可组合

的微结构元件，发展了“相似放大”和“数量放大”相结合的工业微化工设备放大方法，开发的系列化微结构化工传质设备成功应用于若干大规模化工生产过程中：针对湿法磷酸萃取净化，设备体积和制造成本仅为引进设备的 1/2000 和 1/50，完全打破了国外技术垄断的格局；针对己内酰胺酸团萃取，与引进设备相比，减少有机废弃物排放 50%，提高配套设备处理能力 50%；针对纳米碳酸钙制备，实现颗粒尺寸均匀可控，降低过程能耗 90%，创造了显著的经济效益和社会效益。该研究成果使我国在微化工技术应用方面走在了国际前列，成果获 2012 年度国家技术发明奖二等奖。



图 1 纳米碳酸钙微反应器



图 2 食品级磷酸生产微化工装置

高诱导活性的原位再生人工骨

High Bioactivity Degradable Biomaterials for Promoting Bone Repairing

骨缺损是临床的常见病例,但并非每个骨伤患者都能自主愈合,往往需要材料的植入来修复。其中,材料的降解性和生物活性是影响修复效果的关键。为此,华东理工大学刘昌胜教授在国家自然科学基金(批准号:20425621)的资助下,在利用基因工程原核表达技术构建骨形态蛋白-2(BMP-2)实现中试生产的基础上,通过组成和结构的调整,设计出具有良好细胞响应性、高生物活性的可降解生物材料,诱导骨的原位再生。此过程依靠体内自身细胞在材料中的黏附、生长、增殖和分化;在材料被降解的同时,从外围进入的细胞在BMP-2的作用下诱导分化形成新骨,原位修复骨缺损;即达到先“搭桥过河”

后“过河拆桥”的作用。所构建的高诱导活性原位再生人工骨,不仅解决了器官移植所难以克服的免疫排斥反应和供体不足的问题,而且促进了骨缺损的快速高效修复,具有重要意义。

国内第一个载天然全链长BMP-2的人工骨产品已获批并用于临床。研究成果被国际多学科交叉生物材料学会主席Lemaitre教授评价为“……处于骨修复技术的前沿……”。共发表SCI收录论文45篇,申请国家发明专利18项,其中授权10项;参编著作3部。在此基础上继续深入探索,并在临床上进行研究。成果分别获2014年度国家自然奖二等奖和2013年度上海市自然科学奖一等奖。

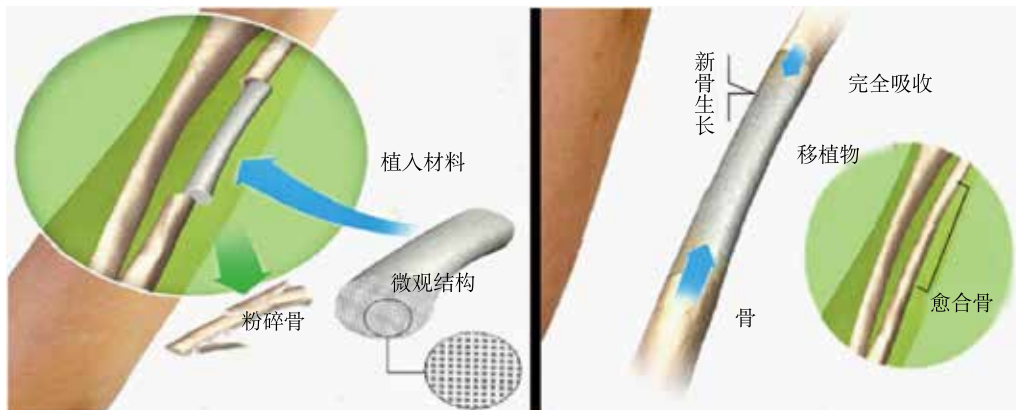


图 高诱导活性的人工骨促进骨原位再生

典型有机污染物多介质界面行为与调控原理

Environmental Interface Behaviors of Typical Organic Pollutants and Their Regulating Mechanisms

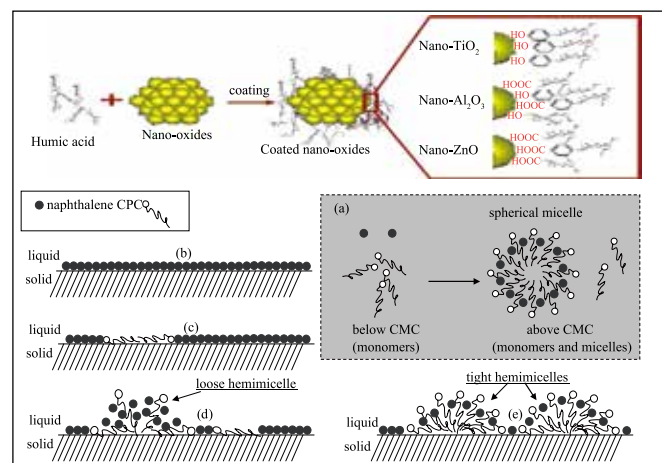
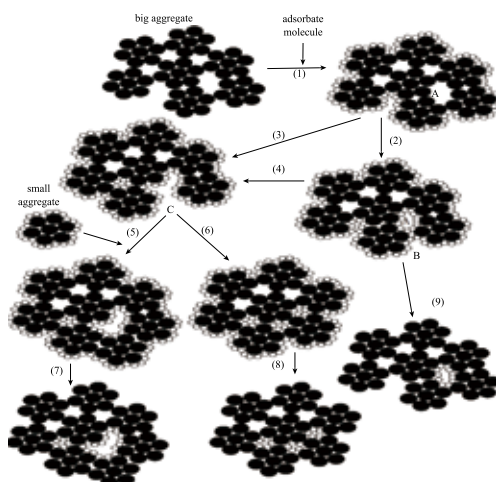
浙江大学朱利中教授等在国家自然科学基金（批准号：20125719，20737002，40571143，20077025）的资助下，成果获 2013 年度国家自然科学奖二等奖。

界面行为始终贯穿于有机污染物迁移转化及生物效应的整个生命周期，多介质界面行为的分子机理及调控研究是土壤污染控制与修复的重要基础。项目围绕我国土壤污染防治的重大需求，以界面行为分子机制及生物有效性调控前沿科学问题为核心，突破了有机污染物非线性界面行为、生物有效性调控、有机污染场地 / 土壤增效修复等关键科学难题。

主要发现点如下：①揭示了有机污染物非线性界面行为的分子机理，提高了对非线性界面行为本质的认识。首先

证实了有机质是非线性吸附的主导源，发现土壤中纳米颗粒团聚重组及其选择性结合有机质可影响有机污染物的非线性吸附行为，提出有机质吸附相变 - 锁定作用及导致有机污染物脱附滞后性的微观机制。②建立定量预测有机污染物非线性界面行为的数学模型，最大预测误差从 3 个数量级降至 20% ~ 30%，解决了准确预测有机污染物环境界面行为的科学难题。③揭示了基于多介质微界面行为的有机污染物生物有效性调控原理，提出全方位保障农产品安全的新思路。④阐明混合表面活性剂调控有机污染物固 - 液界面行为、增效修复有机污染土壤的新技术原理，为攻克传统表面活性剂增效修复技术洗脱效率低、成本高等应用技术瓶颈提供了理论依据。

图 纳米颗粒对有机污染物非线性吸附的团聚重组 - 锁定机制

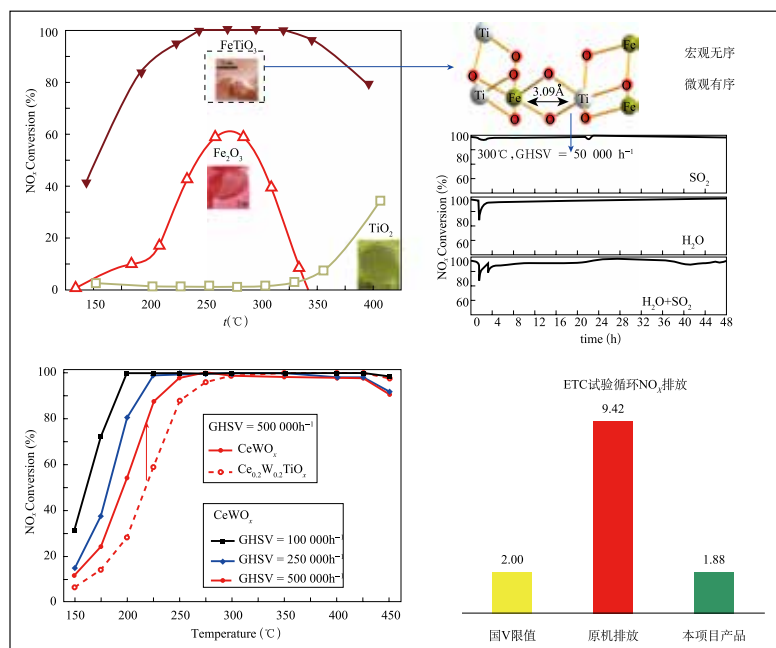


高活性耐硫 NO_x 选择性催化还原催化剂研究Highly Active and Sulfur Resistant Catalyst for Selective Catalytic Reduction of NO_x

柴油车排放 NO_x 是造成大气灰霾、光化学烟雾的重要原因。针对这一难题,中国科学院生态环境研究中心贺泓教授的研究团队立足我国柴油含硫量高的现实国情,在国家自然科学基金(批准号:20425722, 20437010, 51278486)的资助下,研究发现具有氧化还原活性的过渡金属氧化物都是选择性催化还原(SCR) NO_x 的高效催化剂,催化剂的抗硫性能主要靠其表面酸性调节,并

据此设计了重型柴油车用钒基 NH_3 -SCR 催化剂,在中国重型汽车集团有限公司等企业建成了催化转化器量产生产线,实现了 40 万台柴油车的规模化应用,取得了显著的社会和经济效益。进一步研究确认铁钛和铈钨复合氧化物在 SCR 反应中具有极高的催化活性,阐明了铁、铈氧化物微晶结构是 SCR 反应活性中心。创新制备方法合成高水热稳定性的 Cu 小孔分子筛催化剂并阐明其反常的“快速 SCR”机理,为催化反应体系和催化转化器设计提供了有力的理论依据。新型非钒基 SCR 催化剂在重型柴油车上装车示范应用表明,较现有的钒基催化剂呈现出更优异的活性、热稳定性与耐高空速特性,为满足未来柴油车更高排放标准提供了具有国际竞争力的技术储备。

图 高活性耐硫复合氧化物 SCR 催化剂设计与合成



The logo graphic for the National Natural Science Foundation of China (NSFC) is located on the left side of the page. It consists of a solid green semi-circle at the bottom and a dashed green semi-circle at the top, both with a radius of approximately 100 units, centered at the horizontal position of the text.

NSFC

国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

生命科学部



水稻膜蛋白 *COLD1* 感知低温而赋予耐寒性

Membrane Protein *COLD1* Is Involved in Sensing Cold and Confers Chilling Tolerance in Rice

水稻起源于热带和亚热带, 经过长期的人工驯化选择, 使其种植区域逐渐北移。种植区域北移对品种的基本要求是具有较高耐寒性, 另一方面, 全球气候变化导致的局部区域异常低温也使水稻的生产受到威胁, 因此, 提高耐寒性是稳定水稻产量的有效途径。

中国科学院植物研究所种康研究员带领的研究团队在国家自然科学基金(批准号: 30821007)的资助下, 利用遗传学、生理学、分子生物学和进化生物学思路发现了控制水稻耐寒性数量

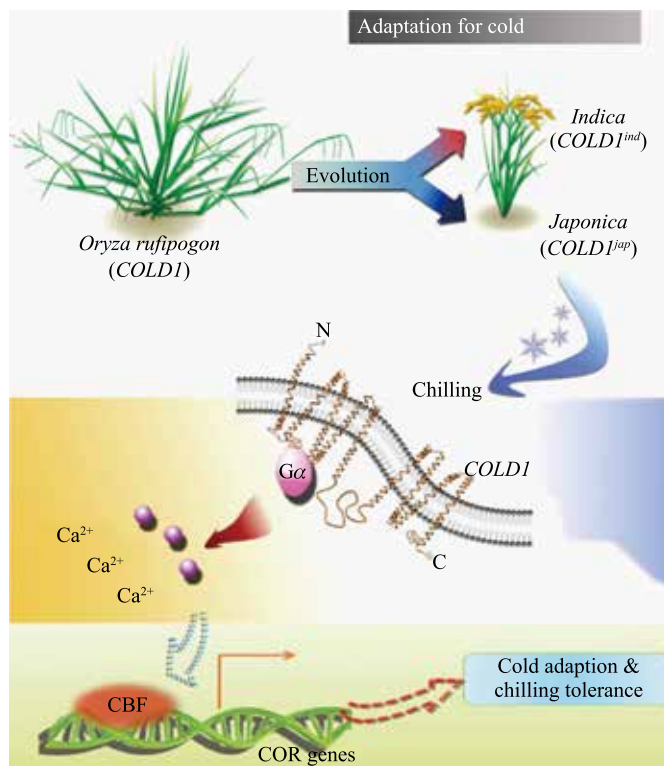
性状位点的基因 *COLD1*, 揭示膜蛋白 *COLD1* 参与感知低温信号的分子细胞学机制以及耐寒性状的人工驯化机制。该研究成果以封面故事发表在 *Cell* [2015, 160(6): 1209-1221]。该成果的合作团队包括中国水稻研究所钱前研究员、中国科学院植物研究所葛颂研究员、中国科学院昆明动物研究所王文研究员以及首都师范大学李乐攻教授的研究组。

这是第一个植物温度感受器的研究报道, 揭示了通过人工驯化和选择得到的 *COLD1* 等位基因和特异 SNP 赋予

水稻耐寒性的新机制。对 *COLD1* 模块的解析有助于通过分子设计来培育耐寒水稻品种, 也可直接用于超级杂交稻亲本 93-11 和其他籼粳稻的耐寒性改良, 从而使其种植区域扩展, 为粮食供应安全提供保障。国内外学术期刊 *Cell*、*Sci. Signal.*、*Faculty1000*、*National Sci. Rev.*、*Mol. Plant*、*J. Genet. Genomics*、*Science China* 等对这一具有里程碑意义的成果作了专评。

图 水稻人工驯化选择 *COLD1* 基因感知低温机制

经过人工驯化选择, 来自于中国野生稻的 *COLD1^{op}* 在粳稻中被保留下来。*COLD1* 蛋白与 G 蛋白 α -亚基互作促进其 GTP 酶活性、激活 Ca^{2+} 信号, 从而使下游防御寒害的基因表达, 提高粳稻的耐寒性。



拟南芥乙烯信号通路中 EIN2 蛋白介导的翻译调控

EIN2-Directed Translational Regulation of Ethylene

Signaling in *Arabidopsis*

植物激素乙烯在植物生长发育和抵御逆境等方面具有重要的作用。采摘后的果实会因产生大量的乙烯导致过熟从而大大缩短货架期；不利天气因素和严重的病虫害会诱导农作物产生大量的乙烯进而导致早衰减产。

北京大学郭红卫教授在国家自然科学基金（批准号：91217305，91017010）的资助下，取得了乙烯信号转导领域的突破性进展。EIN2 是乙烯信号通路的关键正调组分。最近，郭红卫教授带领的团队发现 EIN2 蛋白在细胞质通过抑制 *EBF1* 和 *EBF2* mRNA 的翻译过程来激活乙烯信号。他们研究表明这两个 mRNA 的 3' UTR 中存在多个 PolyU 基序，为介导翻译抑制过程的顺式作用元件。此外，研究还表明乙烯诱导 EIN2 与 3' UTR 发生相互作用，并与其他蛋白互作而将 *EBF1/2* mRNA 锚定到 processing body 中。该研究成果在线发表于国际知名期刊 *Cell* [2015, 163(3): 670-683]，该刊同期撰文专门评述。并被 *Nature-Plant*、《植物学报》、《科技日

报》等杂志、报刊关注报道。

郭红卫团队的研究揭示了一条新的乙烯信号转导通路，并在植物信号转导领域第一次表明 mRNA 的 3' UTR 像一个“感受器”感知上游信号并向下游传递，对植物学的研究具有重要的启发意义。该研究成果还具有重要的应用前景，可以实现人为控制乙烯信号的“打开”和“关闭”来抵御病虫害或者延迟果实的成熟和农作物的衰老，为农业生产实践服务。

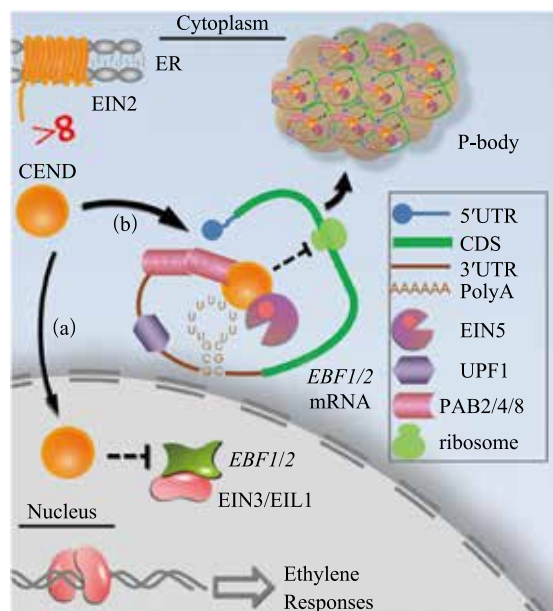


图 EIN2 蛋白所介导的乙烯信号转导通路

(a) 穿梭—入核机制；(b) 翻译抑制机制。

细胞质抗细菌天然免疫的感知和执行机制

Cytosolic Anti-bacterial Immunity: Sensing and Execution

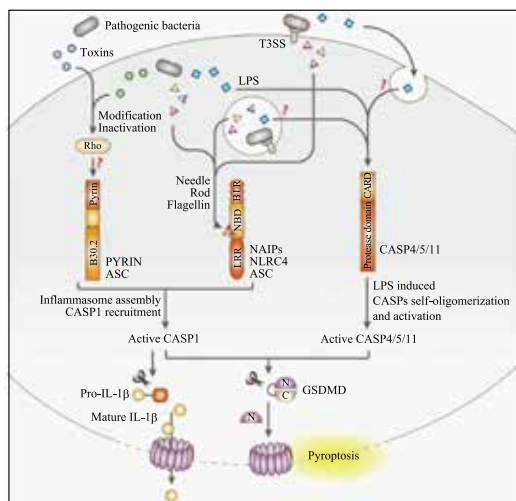
机体抗感染天然免疫反应的首要步骤是对病原的特异识别。位于膜上的TLR受体蛋白可以有效识别细胞外的病原进而诱导细胞因子和炎症因子的转录表达。TLR受体对于进入胞质里面的细菌和细菌分子不能识别,此前的研究表明炎性caspase家族蛋白,特别是位于炎症小体复合物下游的caspase-1,在细胞质天然免疫中发挥关键作用,但人们对炎性caspase上游如何识别各种病原菌以及其下游是如何诱导细胞炎性坏死(焦亡)的机制一直不清楚。

北京生命科学研究所邵峰研究员课题组在国家自然科学基金(批准号:31225002, 31461143006)的资助下,开展了哺乳动物如何在细胞质内识别入侵的病原菌和启动下游炎症反应的分子机制研究,取得系列原创性发现。①发现NAIP

功能,并揭示分泌毒素的细菌三型分泌系统可作为模式分子被识别,成果发表在*Nature* [2011, 477 (7366): 596-600]。②发现家族性地中海热自身炎症性疾病蛋白Pyrin为天然免疫模式识别受体,感知多种重要病原菌对宿主Rho蛋白的修饰和失活,介导炎症小体组装和caspase-1的激活。这是17年来首次阐明家族性地中海热疾病基因的正常生理功能,同时也揭示了一种可区分致病菌和非致病菌的免疫识别新模式,成果发表在*Nature* [2014, 513 (7517): 237-241]上。

③发现炎性caspase-4/5/11为细菌内毒素(LPS)的胞内免疫受体,诱导宿主细胞炎症性坏死。该通路不仅在抗细菌免疫中起关键作用,也是细菌诱发内毒素休克最主要的原因。这是继膜受体TLR4后首次发现LPS的胞内受体,对理解caspase家族的激活机制也有很大概念突破,成果发表在*Nature* [2014, 514 (7521): 187-192]上。④首次鉴定出GSDMD蛋白为炎性caspase的共有底物,被炎性caspase切割后的GSDMD可以诱导细胞炎性坏死。这是20年来首次揭示细胞焦亡的关键分子机制,为多种自身炎症性疾病和内毒素诱导的败血症提供了全新的药物靶点,开辟了细胞程序性坏死和天然免疫研究的新领域,成果发表在*Nature* [2015, 526 (7575): 660-665]上。

图 细胞质抗细菌天然免疫的感知和执行



家族 的 NLR 蛋白直接识别细菌的鞭毛素和三型分泌系统组成蛋白,进而和另一 NLR 蛋白聚合形成炎症小体,激活 caspase-1。这是首次实验证明 NLR 家族蛋白具有天然免疫受体

α -酮戊二酸依赖的单分子非血红素铁酶催化环内过氧桥键的合成

Endoperoxide Formation by an α -ketoglutarate Dependent Mononuclear Non-haem Iron Enzyme

中国科学院微生物研究所张立新研究员在国家自然科学基金（批准号：31125002）的资助下，以与青蒿素抗疟疾活性密切相关的环内过氧桥键为研究对象，通过分离海洋真菌中的具有抗感染等多种生物活性的含过氧桥键萜类吡啶生物碱震颤真菌毒素（Verruculogen），解析了一类新的环内过氧桥键的生物合成机制。该化合物中的过氧桥键是由一个依赖 α -酮戊二酸的单核非血红素铁酶 FtmOx1 催化合成。上述研究结果发表于 2015 年 11 月 26 日的 *Nature*。

自然界中含有过氧桥键的化合物具有多种生物活性，包括抗感染、抗肿瘤以及抗心律失常等。其中最具代表性的青蒿素已经作为抗疟疾药物应用于临床接近四十年。尽管利用合成生物学技术在转基因酵母中生产出青蒿素合成的前体青蒿酸，但是催化青蒿酸形成青蒿素的环内过氧键合酶却一直没有找到。

张立新研究团队大胆猜测催化这类

反应的环内过氧键合酶元件可能来源于黄花蒿共生的真菌中，试图从自主构建的海洋微生物天然产物库中发现这类含有过氧桥键的化合物及其相应的催化酶。通过与海外团队——美国波士顿大学刘平华教授和得克萨斯大学张燕教授密切合作，从几株霉菌中分离出具有抗感染等多种生物活性的 Verruculogen。该化合物中的过氧桥键是由一个依赖 α -酮戊二酸的单核非血红素铁酶 FtmOx1 催化合成。

文章首次报道了 FtmOx1 的晶体结构 [图(a)] 以及 FtmOx1 分别与 α -酮戊二酸和底物 fumitremorgen B 的共晶体结构，并通过详尽的酶学实验验证了 FtmOx1 的功能。阐明这一特别的环内过氧桥键的生物合成新机制为发现催化青蒿酸形成青蒿素的环内过氧键合酶向前迈进了一大步。进一步研究其酶学机制，将为含有过氧桥键的萜类吡啶生物碱的广泛应用奠定科学基础。

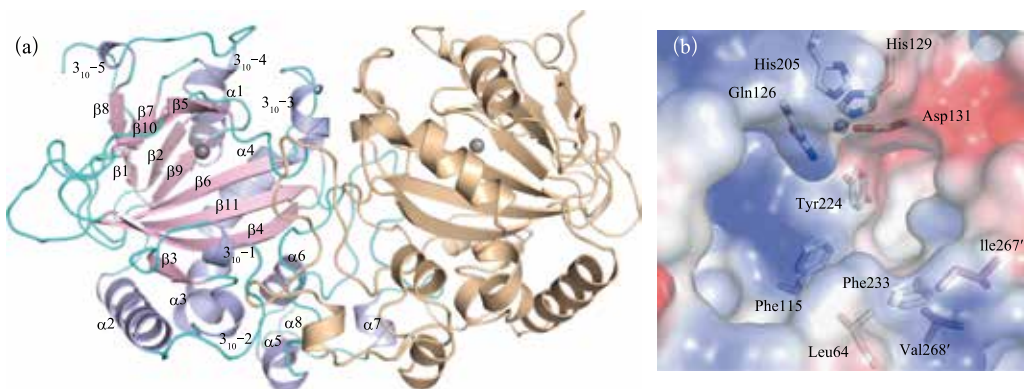


图 FtmOx1 的晶体结构 (a) 和活性位点 (b)

毛果杨遗传转化体系的建立

Establishment of Genetic Transformation System for *Populus trichocarpa*

木材是制浆造纸及生物质能源利用的最重要原料。而木材形成中木质素的含量和结构在很大程度上影响了制浆造纸的效率。了解木质素的组成并不同程度抑制木质素单体合成途径中酶基因的表达,从而降低木质素含量或改变木质素结构,对制浆造纸、生物质能源的遗传改良具有重要意义。

东北林业大学姜立泉教授及其研究团队在国家自然科学基金(批准号:

31430093)的资助下,开展了毛果杨木材形成过程中木质素合成转录调控机制的研究。该团队选取毛果杨为研究材料,因其在已测序的木本植物中,拥有最为丰富的基因组注释信息,它也是了解木材形成的遗传及基因组机制最为理想的模式植物。然而,毛果杨很难在其自然栖息地之外进行培育,并且其遗传转化相当困难。该团队在东北林业大学首先建立了一个完善的温室系统,用以培养健康的野生型毛果杨,作为必须的遗传转化的材料。同时,该团队在其已经建立的遗传转化体系基础上进行改进,建立了更稳定且高效的毛果杨遗传转化体系。该转化体系共分为5个阶段的诱导培养,总时长约6~8月,即可获得转基因毛果杨,为接下来的基因功能验证及树木生长发育规律的揭示提供了非常有效的手段。此外,该团队对木质素单体合成的21个基因共构建了30个下调表达载体,为遗传转化提供供体材料。该研究的部分结果已发表在 *PNAS* [2015, 112(27): 8481-8486] 上。

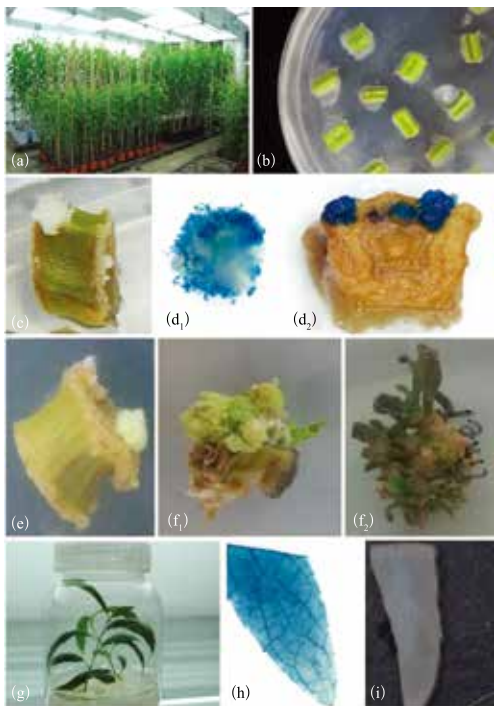


图 毛果杨温室系统及遗传转化系统

(a) 温室植株; (b) 茎段外植体共培养; (c) 愈伤组织诱导; (d) 愈伤组织 GUS 染色; (e) 芽诱导 1; (f) 芽诱导 2; (g) 生根诱导; (h) 转基因生根苗 GUS 染色; (i) 野生型生根苗 GUS 染色。

大熊猫的低能量代谢特征使其能够以竹子为生

Low Daily Energy Expenditure Enables Giant Panda to Survive on a Bamboo Diet

大熊猫为我国特有的濒危哺乳动物，有活化石之称。其在分类学上属于食肉目物种，但在长期的演化过程中食性逐渐特化为以竹子为食。竹子是一类高纤维低营养的食物，其能否满足大熊猫的能量需求，大熊猫能量代谢特征是否已对竹子产生适应，一直是备受关注的科学问题。

中国科学院动物研究所魏辅文研究员在国家自然科学基金（批准号：31230011，91431102）的资助下，与中国科学院遗传与发育生物学研究所科研人员合作，利用双标水技术对大熊猫的能量代谢进行了测定，发现其能量消耗很低，仅为相同体重其他物种的 37.7%，比考拉还低，与三趾树懒相似。进一步分析，发现了一系列与这一低能量代谢相关的特征。在形态上，大熊猫的重要耗能器官如肝脏、肾脏和大脑相对缩小，仅为期望值的 62.8% ~ 82.5%；行为上，大熊猫的活动量很低，每天有一半的时间都是不活动的；生理上，用于调节能量代谢的甲状腺激素水平很低，这一低水平甲状腺激素可能与其合成通路上的一个遗传突变密切相关。那么，大熊猫在这种低能量消耗的状态下如何维持体温的恒定？研究人员通过热成像测定，发现其体表温度显著低于其他黑白相间的哺乳动物，说明其厚而致密的皮毛具有很好的保温作用。研究成果发表于 *Science* [2015, 349 (6244): 171-

174] 上，受到了媒体的广泛报道与同行专家的高度评述。

该研究利用整合与比较的研究方法，揭示大熊猫的低水平能量代谢特征，其在形态、行为、生理、遗传以及基因组等水平上产生一系列适应性特征，从而使其能够以竹子这一低质量的食物为生。这一工作也为理解物种在长期演化过程中对环境变化的适应机制提供了一个很好的研究范例。

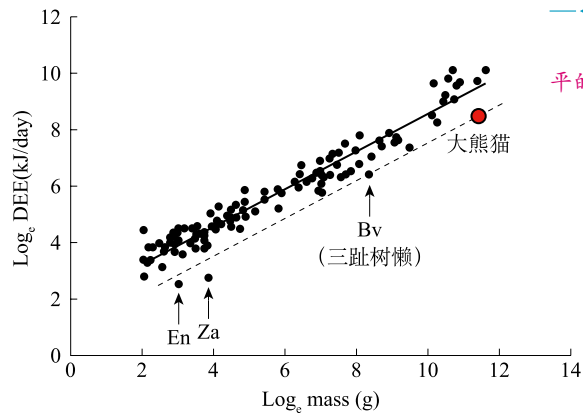


图1 大熊猫低水平的能量消耗

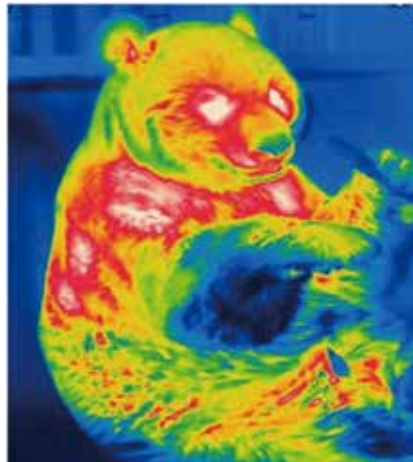


图2 大熊猫热成像图（体表温度显著低于其他黑白相间的哺乳动物）

DNA 甲基化调控的结构功能研究

Structural and Functional Studies of the Regulation of DNA Methylation

DNA 是生命体的遗传物质,在哺乳动物的基因组 DNA 上,相当一部分胞嘧啶会发生甲基化修饰,变成 5- 甲基胞嘧啶 (5mC)。DNA 的甲基化在胚胎发育、生殖细胞形成、干细胞重编程等过程中发挥至关重要的作用。在肿瘤的发生过程中,都发现 DNA 甲基化的失调。DNA 甲基化建立和去除是由 DNA 甲基转移酶 DNMT3A 和 DNA 氧化酶 TET 分别催化的。因此,研究 DNMT3A 和 TET 的结构与功能,对理解上述生理病理过程,

指导靶向药物设计,都具有重要意义。

复旦大学徐彦辉研究员课题组在国家自然科学基金(批准号:31270779,31425008)的资助下,开展了 DNMT3A 和 TET 的结构与功能研究。研究表明, DNMT3A 本身是低活性的,在应该被甲基化的基因组区域,存在一种蛋白,可以激活 DNMT3A,使高活性的酶可以顺利将该区域的 DNA 甲基化,这样的一种机制保证了修饰只发生在应该发生的基因组区域,实现了对甲基化修饰的精确调控(*Nature*, 2015, 517: 640-644)。该成果发表被 *Faculty 1000* 选为推荐论文。

TET 蛋白能够将 5mC 连续氧化为 5hmC (5- 羟甲基胞嘧啶), 5fC (醛基胞嘧啶) 和 5caC (羧基胞嘧啶), 起始 DNA 去甲基化。研究发现, TET 使 5mC 翻出 DNA 双螺旋, 插入到 TET 的催化中心, TET 只对 CpG 位点的 5mC 有高活性(*Cell*, 2013, 155: 1545-1555), *Cell* 专门撰文进行评述, 该成果被 *Faculty 1000* 选为推荐论文。TET 的催化机制进一步证明氧化只易产生 5hmC, 为细胞内 5hmC 含量相对丰富提供了重要依据(*Nature*, 2015, 527: 118-122)。

上述工作系统地揭示了 DNA 甲基化调控中动态精确调控的分子基础。

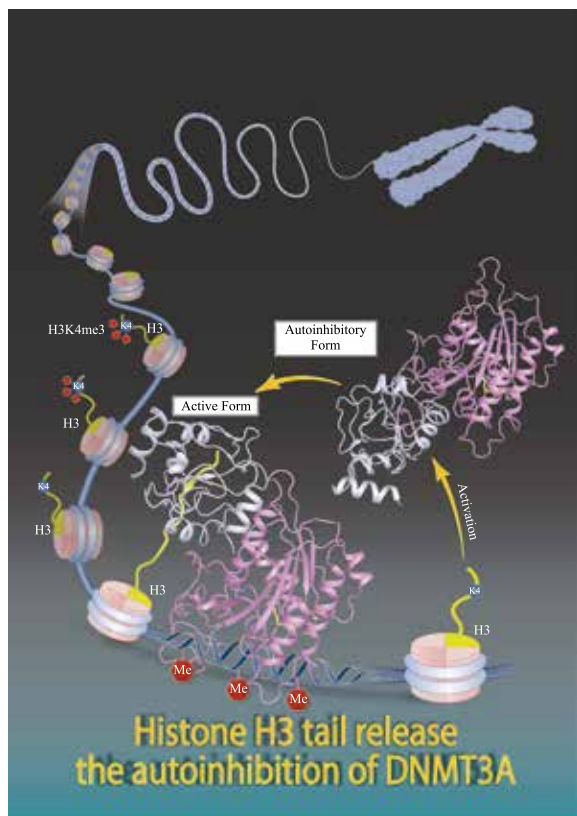


图 DNA 甲基化建立受组蛋白调控的分子机制

细胞坏死的分子机制和生理功能

Molecular Mechanisms and Physiological Functions of Cell Necroptosis

细胞坏死是发育和多种器官内稳态维持的重要助力，并且与多种病理进程相关，如心肌坏死和动脉粥样硬化等疾病。但是长期以来，细胞坏死信号的传递机制以及该死亡方式在机体生理病理过程中发挥的作用都是亟待回答的重要科学问题。

厦门大学韩家淮教授及其领导的科研团队在国家自然科学基金（批准号：30830092，31330047）的资助下，针对上述问题开展研究。课题组首次确定 RIP3 的磷酸酯酶 PPM1B 负调控细胞坏死的新机制 [*Nat. Cell Biol.*, 2015, 17(4): 434-444]。该研究结果为治疗由于过量分泌肿瘤坏死因子导致的全身炎症反应

综合征提供了一个全新视角。同时，采用自主开发的针对定量质谱 SWATH-MS 数据处理软件 [*Nat. Methods*, 2015, 12(2): 1105-1106]，研究团队将会对细胞坏死过程中的动态信号流进行更全面、更细致的解析。

在病理生理学研究方面，研究团队发现动脉粥样硬化病理后期进程中巨噬细胞发生 RIP3 介导的细胞坏死以及炎症反应对于动脉粥样硬化病灶的发展有着极为重要的作用

[*Cell Rep.*, 2013, 3(1): 200-210]；揭示细胞坏死能够抑制单纯疱疹病毒（HSV）传播感染 [*Cell Host Microbe.*, 2015, 17(2): 229-242]；证实细胞坏死在临床化疗药物顺铂诱导的急性肾损伤中的重要作用，为降低顺铂的药物副作用提供了新的思路 [*J. Am. Soc. Nephrol.*, 2015, 26(11): 2647-2658]。

韩家淮团队获 2013 年度国家自然科学基金二等奖。目前，课题组结合国家“人类健康与疾病的生物学基础”重大需求积极推进相关工作的深入开展，并参与引领整个细胞坏死领域研究的快速发展。

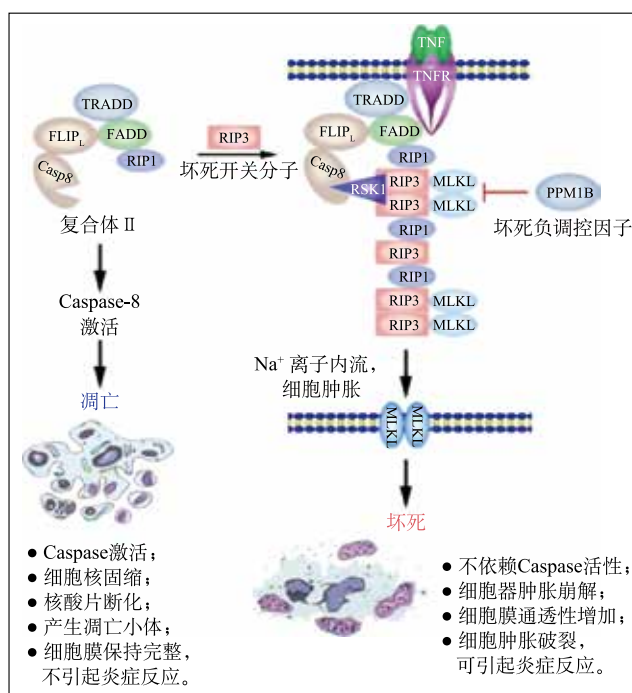


图 细胞坏死是一类由特定信号介导的具有特殊形态变化的新的细胞死亡类型

NT3-壳聚糖支架激活内源性神经发生修复脊髓损伤

NT3-chitosan Scaffold Activates Robust Endogenous Neurogenesis to Enable Functional Recovery after Spinal Cord Injury

北京航空航天大学与首都医科大学特聘教授李晓光团队在国家自然科学基金(批准号: 31130022, 31320103903)的资助下,在国际上首次证明,采用无生命的生物材料激活自体内源性干细胞修复脊髓损伤,向修复中枢神经损伤迈出了重要一步。2015年10月12日,国际著名期刊《美国科学院院刊》(*PNAS*)同期发表了该团队“神经营养因子3-壳聚糖通过诱发大鼠内源性神经新生修复受损脊髓功能”和“通过转录组分析揭示脊髓损伤后功能修复的潜在分子机制”的两篇论文。

脊髓损伤(SCI)也称截瘫,不但造成患者终身残疾,而且会给家庭和社会带来沉重的负担,是世界医学界尚未

解决的重大难题。

这项成果的创新性在于利用生物材料激活动物内源性神经干细胞修复脊髓损伤,避免了伦理纠纷、免疫排斥和发生肿瘤的风险,为治疗截瘫开创了全新思路。如果临床治疗有效,将会破解百年来“中枢神经不能再生”的世界重大医学难题,其社会效益、经济效益及历史意义是不可估量的。

2013年诺贝尔生理或医学奖获得者、美国斯坦福大学的Südhof Thomas C教授在《中国科学》发表评论文章,对这项研究成果进行高度评价。路透社也对这项成果进行了报道,目前国外同行也对该项成果进行关注,纷纷表达合作的意愿。



图1 术后6个月NT3-壳聚糖支架内新生的脊髓组织,其上分布有清晰的血管网络。壳聚糖支架的分子结构由棍棒图显示

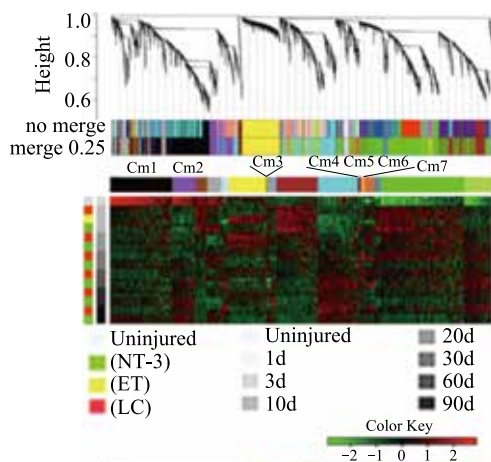
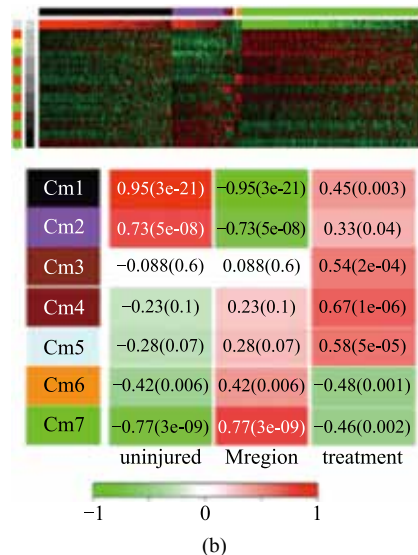


图2 借助WGCNA分析揭示了脊髓损伤/再生过程中的相关基因表达模块



新型光控多功能的肿瘤诊疗一体化纳米体系

Laser-triggered Multifunctional Nanoplatfrom Enabling Site-specific Drug Delivery for Cancer Theranostics

恶性肿瘤的诊断和治疗一直是科学界的重大难题，肿瘤耐药与转移复发是目前临床化疗失败的主要原因。国家纳米科学中心陈春英研究员在国家自然科学基金（批准号：31070854）的资助下，基于纳米材料独特的光学和磁学性质，开展了肿瘤靶向治疗研究。提出了利用金纳米棒的等离子激元效应和高效的光热转化效率，实现抑制耐药基因的表达，增加化疗药物胞内蓄积，最终有效克服肿瘤耐药；设计了金纳米棒纳米复合载药体系，实现光热和化学药物的联合治疗方式，极大提高了肿瘤治疗效果。同时发现通过表面化学修饰可改变金纳米材料的生物分布、代谢途径和肿瘤富集等性质，为纳米药物的临床应用提供重要的安全性评价。

取得的一系列重要进展发表于本领域重要学术期刊 *Nano Lett.*、*Adv. Mat.*、*JACS*、*Biomaterials* 并受到国内外的广泛关注和高度重视，共有 6 篇论文入选 ESI “近十年高引频论文”，1 篇论文入选“近两年热点论文”。该研究紧密结合民生需求，为实现癌症诊疗的一体化，为发展按需给药和肿瘤的精准医疗建立了一种有应用前景的新思路。

鉴于在研究过程中取得的重要进展，陈春英获 2012 年度国家自然科学奖二等奖，2014 年入选 Thomson Reuters 公布的全球高引用科学家，成为“药理学与毒理学”领域最具国际影响力的全球 133 名科学家之一；同时，2014 年获得国家杰出青年科学基金资助和第十一届中国青年女科学家奖。

图 1 光控多功能诊疗纳米体系的肿瘤主动靶向和药物释放的精细设计

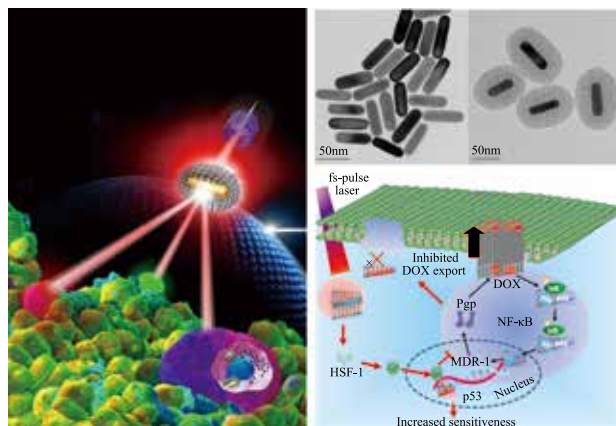
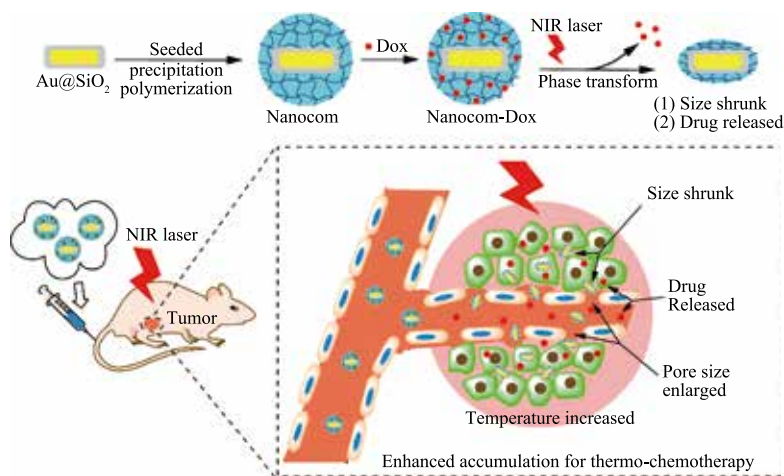


图 2 多功能诊疗纳米体系介导的飞秒脉冲激光局域光热刺激能克服肿瘤细胞的耐药性

胆固醇通过溶酶体与过氧化物酶体的膜接触进行转运

Cholesterol Transport through Lysosome-Peroxisome Membrane Contacts

由武汉大学宋保亮教授带领的研究团队在国家自然科学基金(批准号:31430044, 31230020, 91413112)的资助下,第一次揭示了细胞内胆固醇通过溶酶体与过氧化物酶体的膜接触进行转运。该研究成果于2015年4月9日在*Cell*上发表,该刊同期专门撰文进行评述,对这项工作进行了亮点推荐。

胆固醇是一类脂质分子,它在细胞内的分布极不均匀且高度动态运输。针对这一胆固醇领域的重要问题,同时也是一个基本的细胞生物学现象,宋保亮

团队通过巧妙设计、全基因组筛选,最终鉴定出341个与胆固醇运输相关的基因。发现溶酶体通过和过氧化物酶体相互接触,将胆固醇转移给后者。进而,鉴定出介导这两个细胞器接触的分子分别是Syt7蛋白和PI(4,5)P₂磷脂,从而解释了分子机制。过氧化物酶体功能缺失会导致一大类相关疾病,即过氧化物酶体紊乱疾病,表现为发育和神经系统功能障碍,目前没有治疗手段。该工作第一次发现在这类病人的细胞中有大量胆固醇堆积,并证明通过改善胆固醇转运可有效治疗过氧化物酶体紊乱疾病。

这项研究工作包括:①发现了细胞内胆固醇运输的新途径。②揭示了过氧化物酶体这一细胞器的新功能。③提出治疗过氧化物酶体紊乱疾病的新策略。该工作从细胞生物学长期未解决的基本重大问题出发,着眼于人类遗传疾病的机理阐明和治疗改进,具有深远意义。

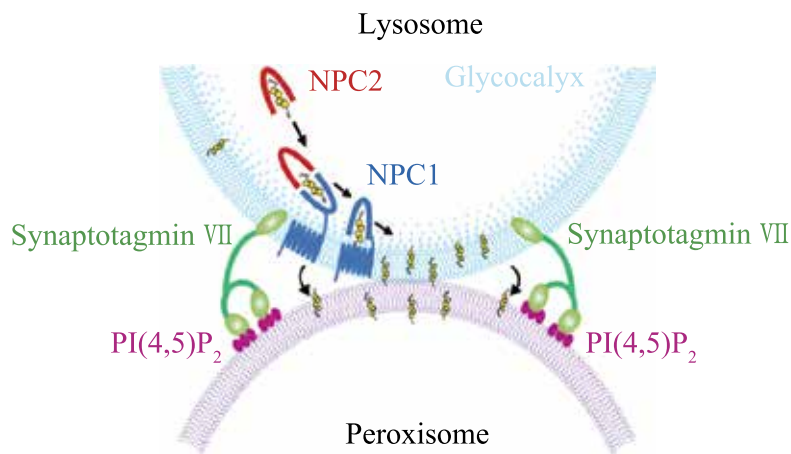


图 细胞内胆固醇
运输模式图

人类初级视皮层的神经活动生成自下而上的注意显著图

Neural Activities in Human Primary Visual Cortex Creates a Bottom-up Saliency Map of Attention

对注意机制的研究是脑与认知科学领域中最受关注的科学问题之一。注意是指心理资源被有选择性的分配给某些认知加工过程，使得这些认知过程对信息的加工更加快速准确。人类每一时刻都接受到大量的外界信息，处于被“信息轰炸”的状态中。人类有限的心理资源和神经资源不可能同时处理这么多的信息，只能选择性的处理具有高优先性的信息而忽视低优先性的信息，注意的作用正是体现于此。

北京大学方方教授在国家自然科学基金（批准号：30925014）的资助下，结合心理物理学、功能性磁共振成像、高密度脑事件相关电位和计算模型证明了人类的初级视皮层可以在视觉信息加

工的非常早期阶段（72 ~ 74ms）生成视觉显著图，用以引导空间选择性注意的分布。该领域中的主流理论是额叶-顶叶网络负责注意的生成和调节，但以往研究混淆了自下而上和自上而下两种注意过程，该研究通过引入对意识水平的操作来分离这两种过程，证明了自下而上的注意及其分布（即视觉显著图）完全可以由初级视皮层的活动预测。这些发现挑战了传统注意理论，促使人们重新思考负责注意的生成和调控的脑神经网络。这个研究对机器感知领域也有重要意义，它为复杂场景中视觉信息加工算法，提供了来自认知神经科学的新的理论依据和约束。

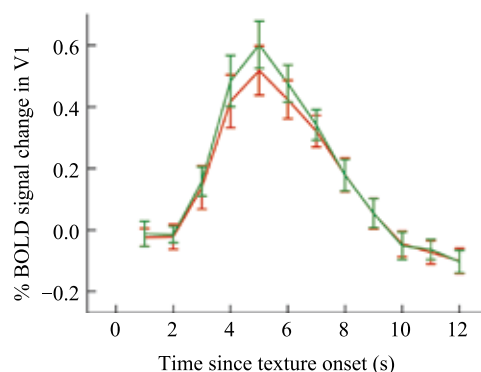
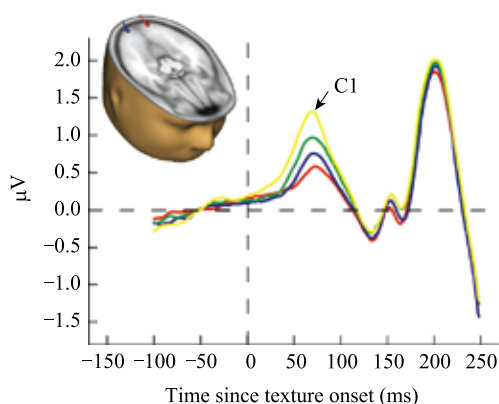
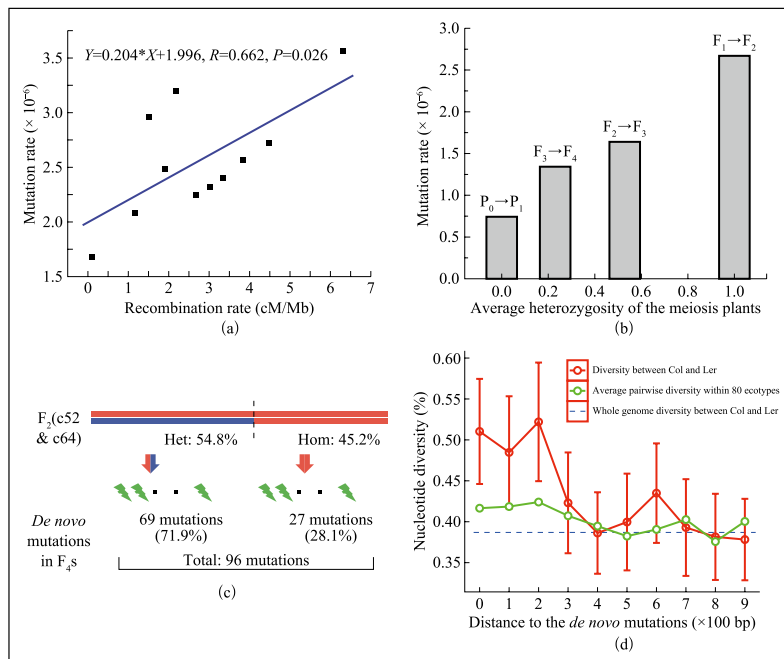


图 高密度脑事件相关电位和功能性磁共振成像的实验结果

同源染色体间的异质性促进遗传突变发生

Higher Mutation Rates in Heterozygotes

图 (a) 突变率与重组率正相关; (b) 基因组杂合度越高, 突变率越高; (c) 杂合区域较纯合区域产生更多的突变; (d) 基因组间差异越大的区域突变越多



减数分裂过程中产生的遗传突变, 是生物多样性产生的源头, 也是生物适应性演化的内在驱动力。目前, 对突变率的估计主要是基于经历多个世代的DNA序列的分析。由于有害突变的普遍性, 这种分析或多或少都要受到自然选择的影响。因此, 对一次减数分裂的产物测序, 直接测定其突变的数量、分布

及其影响因素, 可望从源头上回答“生物的遗传变异究竟是如何产生的”这一基本的生命科学问题。

南京大学田大成教授课题组在国家自然科学基金(批准号: 91331205)等的资助下, 利用拟南芥、水稻等自花传粉植物, 构建了来自相同遗传背景的、经历一次减数分裂的纯合体、杂合体(F_1)及其自交分离世代(F_2 到 F_4), 测序检测了遗传突变的发生, 发现突变率与同源染色体间的异质性密切相关(见图), 植物的杂合体比纯合体突变率高3~4倍; 染色体间的杂合区间比纯合区间的突变率高; 随着 F_1 、 F_2 、 F_3 代和亲本植株的杂合度由100%减少到0, 突变数量也随之递减; 越接近亲本染色体间的异质位点、越接近DNA的断裂位点, 突变的数量越多。异质促进突变, 这一结果丰富了人们对遗传突变发生分子机制的认识。相关文章发表在 *Nature* [2015, 523(7561): 463-467] 上, 且该刊同期专门撰文进行了评述。

人类原始生殖细胞基因表达和 DNA 甲基化的特征和模式

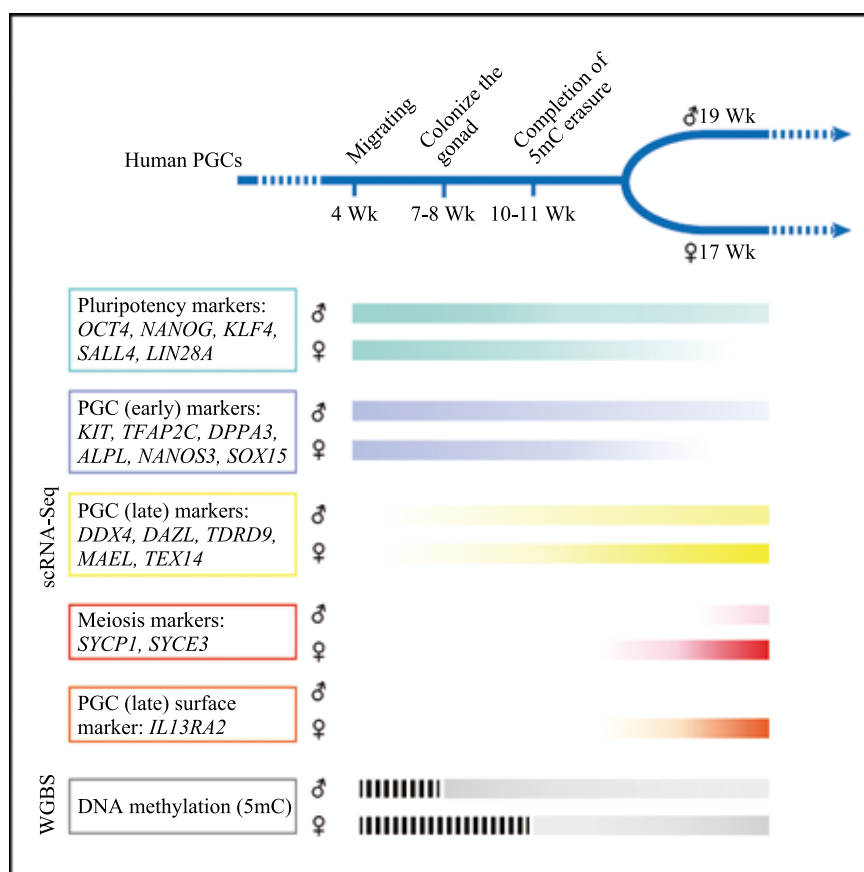
The Transcriptome and DNA Methylome Landscapes of Human Primordial Germ Cells

基因组 DNA 甲基化作为一种重要的表观遗传修饰方式，是调控细胞分化过程中基因表达的主要机制之一。它虽然不改变基因序列但可以遗传给后代，而且，易受外界环境的影响而发生改变，在胚胎发育、干细胞分化及癌症的发生等方面发挥着重要作用。原始生殖细胞产生于胚胎发育的早期，是发育为成熟的精子和卵母细胞的前体细胞。

北京大学乔杰教授课题组在国家自然科学基金（批准号：31230047）等的资助下，系统地研究了人类多个发育阶段原始生殖细胞（PGC）的转录组和 DNA 甲基化组，发现了人类原始生殖细胞不同于小鼠原始生殖细胞的关键独特特征，即人类原始生殖细胞在发育过程中会经历大规模的 DNA 甲基化擦除，在胚胎发育到第 10 ~ 11 周时，DNA 甲基化水平降至最低点，仅有 7% 左右保留下来，特别是在一些重复序列元件上仍然残留大量 DNA 甲基化，尤其是微卫星序列 ALR 以及一些进化上

比较年轻的元件，这一发现为人类隔代遗传现象的表观遗传分析提供了重要线索。研究同时发现了人类植入后雌性胚胎 X 染色体失活和激活的特征，并揭示了人类原始生殖细胞早期发育基因的表达特征。相关研究成果以封面文章形式发表在 *Cell* [2015, 161 (6): 1437-1452] 上。

图 人类原始生殖细胞代表性基因的表达水平和基因组 DNA 甲基化水平随发育时间变化示意图



真核生物中 DNA 的新修饰

*N*⁶-Methyladenine: A New DNA Modification in Eukaryotes

DNA 甲基化作为重要的表观遗传机制调控基因表达,影响着一系列生物学过程,如细胞命运决定、组织器官发育及人类疾病等。目前,5-methylcytosine (5mC) 在哺乳动物基因组 DNA 中被认为是唯一的碱基甲基化形式调控基因的表达。*N*⁶-methyladenine (6mA) 虽然以较高丰度存在于原核生物及一些低等的真核生物中,但在高等真核生物基因组中含量极低,因此有关 6mA 在高等真核生物的研究一直被忽视。

中国科学院动物研究所陈大华研究员课题组与中国科学院生态环境研究中

心汪海林研究员课题组在国家自然科学基金(批准号:91019022, 31130036)的资助下,发现果蝇基因组中 6mA 在早期胚胎发育过程中存在高度动态变化特征,且这一动态受到去甲基化酶 DMAD 严格调控。遗传学研究表明,DMAD 对于果蝇的发育是必须的。通过进一步对 DMAD 突变体及野生型果蝇卵巢基因组 DNA 的 MeDIP 高通量测序,发现果蝇卵巢基因组中的 6mA 修饰经常发生于转座子区域,特别是在 DMAD 突变体中,位于转座子区域的修饰显著增加,表明 DMAD 可能通过降低转座子区域

的 6mA 修饰来调控转座子的表达。该项研究揭示了真核生物 DNA 新修饰形式,在表观遗传研究领域取得了原创性的突破。相关研究文章在 *Cell* [2015, 161 (4): 893-906] 上发表,该刊同期专门撰文进行评述。

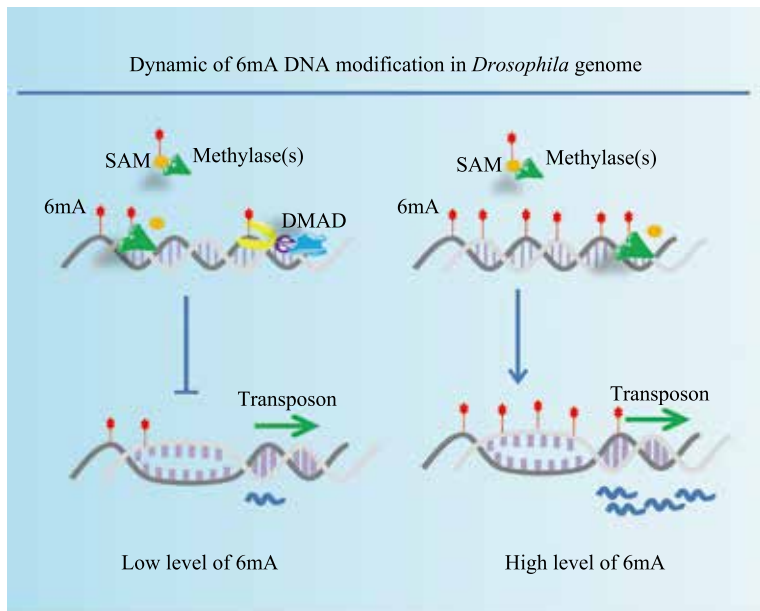


图 果蝇基因组 DNA 6mA 修饰的动态调控

大豆驯化改良基因的系统挖掘

Global Survey of Domestication and Improvement Related Genes in Soybean

大豆是人类和动物油脂和蛋白质的主要来源，现代栽培大豆大约在 5000 年前由其近亲野生大豆驯化，继而进一步选育而成。解析大豆遗传演化规律、挖掘大豆驯化改良基因对指导大豆育种具有重要意义。

中国科学院遗传与发育生物学研究所田志喜研究员联合中国科学院昆明动物研究所王文研究员课题组在国家自然科学基金（批准号：31222042）等的资助下，对 302 份代表性大豆种质进行了深度重测序（ $>10\times$ ）和基因组分析，结果表明大豆在驯化和改良过程中遗传多态性明显降低，暗示大豆具有明显的选择瓶颈效应。利用 XP-CLR 方法在驯化阶段（野生大豆→农家种）鉴定出 121 个强选择信号，在品种改良阶段（农家种→栽培品种）鉴定出 109 个强选择信号。为了明确这些选择信号所对应的性状，对种子大小、种皮颜色、生长习性、油含量等性状做了全基因组关联（GWAS）分析，找出一系列显著关联位点。进而

把选择信号、GWAS 信号以及前人研究的油含量 QTLs 相整合，发现很多选择信号和油相关的性状有关，说明大豆产油性状受人工选择较多，形成复杂的网络系统共同调控油的代谢，从而引起不同种质油相关性状的变异。研究还定位了一些重要农艺性状的调控位点，并且明确了一些基因在区域化选择中的作用，例如控制花周期的 *E1*，控制生长习性的 *Dt1*，控制绒毛颜色的 *T* 等。研究结果于 2015 年发表于 *Nat. Biotechnol.*，为大豆重要农艺性状调控网络的研究奠定了重要基础。

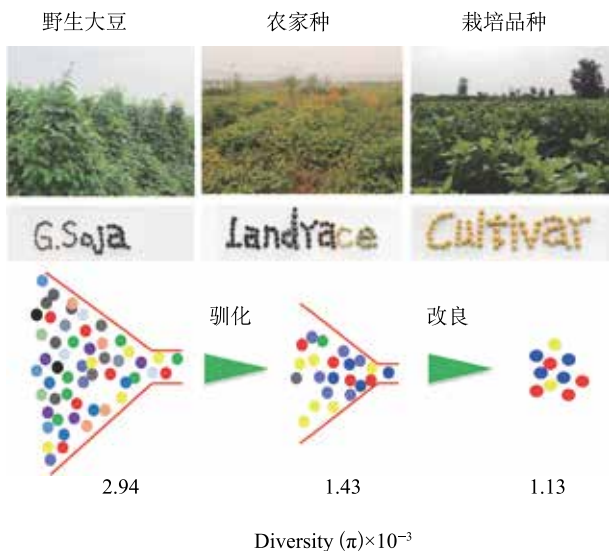


图 大豆驯化改良中表型与遗传多样性变异

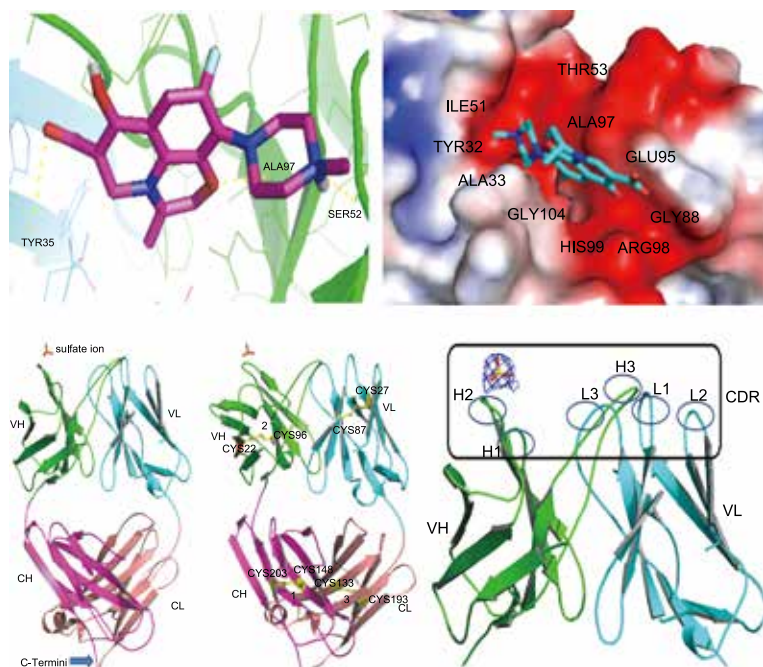
食品中小分子有害物免疫分析机理研究

The Immunoassay Mechanism of Small Molecule Hazardous Substances in Food

天津科技大学王硕教授在国家自然科学基金(批准号:31071547, 31225021)的资助下,通过对36种生物抗体和半抗原结构的三维构型、疏水性、电子特性等与抗体特异性形成相关作用因素的动态分析,发现抗体功能结构域氨基酸残基与半抗原分子间的静电耦合度是影响抗体特异性的关键因素,半抗原键长、键角是耦合作用的决定因子,提出了半抗原结构对抗体特异性决定作用模型和半抗原结构设计的分子模

型策略,构建了模拟优化体系,实现了半抗原的目标导向设计和特异性抗体的可控制备,解决了抗体制备过程中抗体特异性可控性差、免疫检测产品检测稳定性差等小分子免疫技术推广应用中的技术瓶颈,推动了以免疫技术为核心的快速检测技术应用的关键问题。在生物抗体免疫分析研究的基础上,提出“仿生免疫检测”概念,建立了仿生酶联免疫分析方法,构建了仿生免疫亲和层析技术与液相色谱、电感耦合等离子体质谱在线联用平台,推动了食品中痕量小分子污染物在线、高精度、快速检测技术的发展。相关研究成果发表SCI论文64篇,4篇论文引用进入ESI1%。以上述理论成果为指导,开发了4项具有自主知识产权的可视化快速检测核心技术,授权国家发明专利7项。研制了70余种创新产品,产品广泛应用于食品生产、流通、监管等环节,在应对食品安全突发事件及技术性贸易壁垒中发挥了重要作用。该项成果获2012年度国家科学技术进步奖二等奖,在该理论成果基础上建立的农药西维因免疫分析技术获2015年度国家专利优秀奖。

图 氧氟沙星抗体结构解析,通过蛋白质结晶和晶体结构分析级化学信息学计算,发现Tyr35、Ser52、Ala97、Glu95等氨基酸在特异性形成中起决定作用



微生物天然产物农药发现新技术

New Technology for the Discovery of Microbial Natural Products

东北农业大学向文胜教授及研究团队在国家自然科学基金（批准号：31225024）等的连续资助下，利用病虫害侵染寄主植物过程中根招募防御性特异微生物，创新性构建了发现环境友好型代谢农用活性化合物和菌株筛选技术体系，为创制具有原创性结构和新靶标天然产物农药奠定了基础。在新技术支撑下，已成功发现 70 余个具有农用活性的微生物新种、新属；以及 230 余个新骨架、新活性化合物；注重应用基础研究，对螨类具有高效活性的产米尔贝霉素和 13 个新化合物的冰城链霉菌，对线虫具有高效活性的产多拉菌素霉菌和 9 个新化合物新微生物 NEAU1069，以及能代谢 4 个新化合物、可半合成杀虫剂莫西克汀化合物的新微生物 *neau3* 等 3 个新微生物进行产业化开发与应用。阐明了有产业化前景新微生物代谢活性化合物的生物合成与调控机理，构建高产、优良工程菌 6 个，创立和简化了 4 个半合成产品生产工艺流程，获中国新药证书 6 项，实现 3 个筛选新微生物、6 个发酵及半合成产品产业化。

研究成果获 2015 年度国家技术发明奖二等奖。相关研究论文发表引起国内外生物制药业的高度关注，2015 年 *Int. J. Syst. Evol. Micr.* (4) “封面文章”发表其研究成果，入选 ESI Highly Cited

Papers (*Antonie Van Leeuwenhoek*, 2014, 105 (2): 307-315)。发现的微生物新属 “*Xiangella*” “进入在国际上有代表性、参考价值极高，反映细菌学发展新成就” 的《伯杰氏系统细菌学手册—2016》。

微生物天然产物农药发现新技术，引领新农药创制。发现的多个新微生物及产品产业化，推动了企业“产业升级”，“打造全球领先的生产基地”，发现的众多微生物新种、新属、新活性化合物及新作用靶标分子，有效推动了微生物天然产物农药基础和应用基础研究的发展。

图 1 代谢米尔贝霉素及 13 个新化合物冰城链霉菌

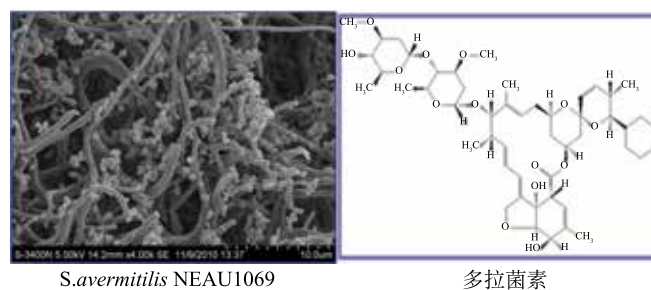
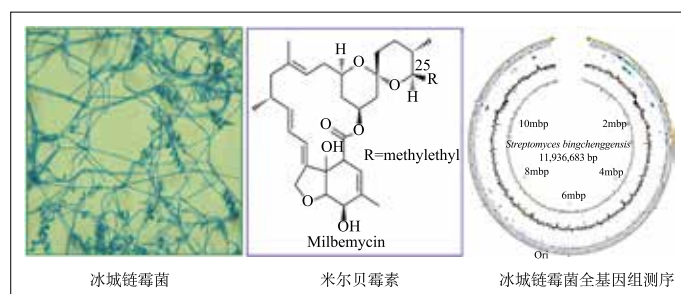


图 2 代谢多拉菌素及 9 个新化合物的 *S. avermitilis* NEAU1069

西瓜全基因组测序与果实品质形成的分子机制及应用

The Whole Genome Sequencing and the Molecular Mechanism of Fruit Quality in Watermelon

我国是全球西瓜生产与消费第一大国,阐明西瓜重要品质性状的遗传构成和调控机制,并建立高效西瓜品质育种分子体系,是解决目前西瓜品质下降的重要课题。北京市农林科学院蔬菜研究中心许勇研究员及其课题组在国家自然科学基金(批准号:31361140355,31272184)等的资助下,开展了西瓜全基因组测序与果实品质形成的分子机制及应用的研究。

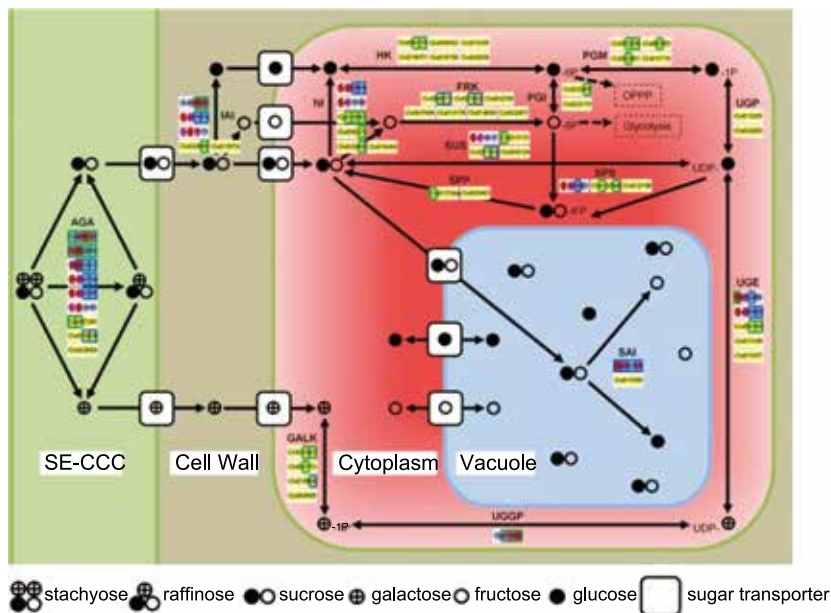
课题组首次绘制了全球第一张西瓜全基因组序列图谱与变异图谱,首次重现了西瓜染色体的进化历程,明确了现代栽培西瓜最直接的祖先,并发现了从

野生到现代栽培西瓜的进化和人工驯化过程中抗病基因丢失的分子证据(*Nat. Genet.*, 2013, 45: 51-58)。同时课题组绘制了西瓜果实糖与瓜氨酸代谢的基因网络,挖掘了栽培西瓜糖转运与积累的重要候选基因;揭示了西瓜瓤色基因及其与糖分积累途径的交互作用机制;为进一步开展西瓜分子育种提供了理论基础与海量数据。上述研究被国内外同行公认为西瓜基础研究的突破性成果。在此基础上,建立了西瓜分子标记辅助育种技术体系,定向回交转育创制出一批抗病早熟优质育种材料及骨干亲本,有效地拓展了我国西瓜育种优异性状来源。

课题组选育的“京欣”系列西瓜品种,成为全国保护地西瓜的主流与标杆品种,占华北、华东地区保护地早熟西瓜种植面积的60%,经济与社会效益显著。

研究成果不仅提升了我国西瓜育种技术水平与材料创新能力,而且也支撑了我国西瓜产业的可持续发展,对保障我国农产品的有效供给和农民增收做出重要贡献。先后获2013年度北京市科学技术奖一等奖和2014年度国家科学技术进步奖二等奖。

图 西瓜果实糖代谢的基因网络



基因组大数据推动黄瓜功能基因研究

Big Data of Genomics Drives Isolation of Trait Genes in Cucumber

黄瓜是我国第一大设施蔬菜作物，也是植物维管束和性别决定研究的模式物种。其遗传基础狭窄，缺乏完整的遗传图谱，导致分子育种无法有效进行，迫切需要加强功能基因研究。

中国农业科学院蔬菜花卉研究所黄三文研究员领导的课题组在国家自然科学基金（批准号：31225025，31322047）等的资助下，借助基因组学大数据方法体系，在黄瓜起源、演化及重要农艺性状基因方面取得重大突破。

在完成黄瓜基因组序列图谱的基础上（*Nat. Genet.*, 2009, 41: 1275-1281），分析来自世界各地的 3342 份黄瓜资源构建了含 115 份黄瓜品系的核心种质资源库，通过重测序核心种质构建了全基因组遗传变异图谱，揭示了黄瓜的起源、演化、群体结构等群体遗传学特征，并为黄瓜重要功能基因研究提供了重要的资源和工具（*Nat. Genet.*, 2013, 45: 1510-1515）。

通过基因组学大数据和传统生物学手段相结合，克隆了黄瓜苦味物质生物合成基因 9 个、调控基因 2 个（*Science*, 2014, 346: 1084-1088），调控基因分别在叶

片和果实中调控苦味合成；通过群体分化挖掘基因的新策略，快速克隆了黄瓜果实积累 β -胡萝卜素基因（*Nat. Genet.*, 2013, 45: 1510-1515）；揭示了黄瓜全雌系是由 30kb 大小 DNA 片段的串联重复引起，涉及 3 个基因（*Plant Cell*, 2015, 114: 1595-1604）。这些成果为将来培育无苦味、高营养和高产黄瓜品种奠定了重要的理论基础，具有重要的理论和应用价值，并且为其他蔬菜作物功能基因研究提供了思路借鉴。

图 1 黄瓜核心种质分布、分类和果实特征

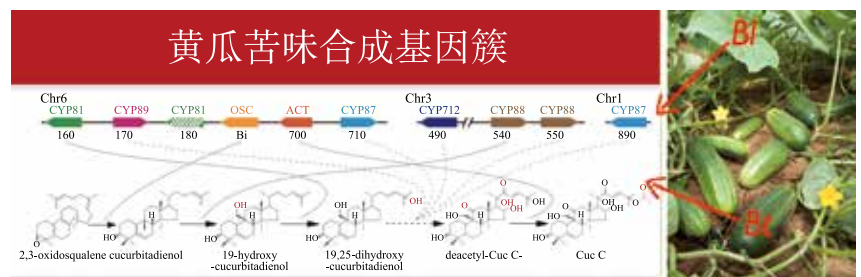
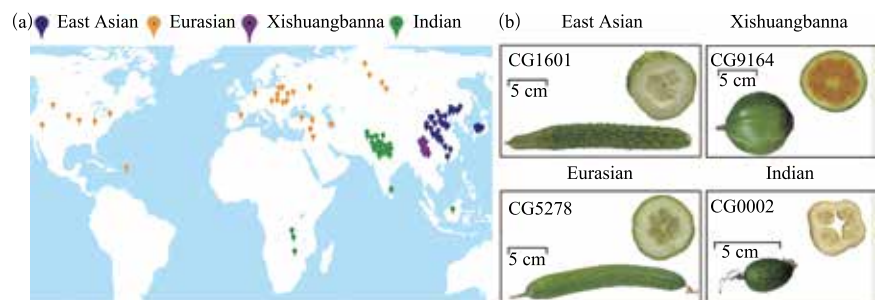


图 2 黄瓜苦味合成和调控的分子机制

基于生物生存策略的有毒动物中药功能成分 定向挖掘技术体系

Techniques Based on Survival Bio-strategies to Prospect Bioactive Compounds from Pharmaceutical Venomous Animals

有毒动物中药功能成分已成为解析生命现象必备的“分子探针与解密器”，推动了生命科学领域中多个学科的蓬勃发展，成为新药作用靶点发现与确立的有力工具以及新药研发的优质先导分子。我国在有毒动物功能成分研究与利用方面，缺乏系统性的功能分子资源挖掘、储备、功能评价等技术体系。

中国科学院昆明动物研究所赖仞研究员牵头的研究团队在国家自然科学基金(批准号:30830021)等的资助下，

瞄准动物与其他生物物种及非生物环境相互作用的分子机制，以有毒药用动物(如牛虻、蟾蜍、毒蛇以及胡蜂)为研究对象，系统研究了15种动物的生存策略并探索了其实施生存策略的分子机制，识别了800多种有利于其生存的生物活性多肽，如吸血动物利用免疫抑制、抗血栓等多肽从宿主成功获得血液；有毒动物通过作用于多种离子通道或膜受体的神经毒素麻痹猎物的神经系统和呼吸系统而成功捕食；两栖动物利用抗菌肽、抗氧化肽等抵御微生物及紫外线对其皮肤的感染。系统揭示了动物与其他生物物种及非生物环境相互作用及实施其生存策略的分子机制。

发表SCI论文130篇，授权国家发明专利30项。基于这些工作的积累，获2013年度国家技术发明奖二等奖。结合生物资源多样性和中药现代化研究的国家重大需求，建立了有毒动物中药功能成分的微量、非破坏性定向挖掘技术体系和高通量、高敏感的功能评价技术体系。发掘了大量具有应用前景的活性多肽，产生多项可产业化的创新成果，充分实现了科研活动创新链和产业链的结合。

图1 吸血节肢动物环境适应及生存策略的分子机制



图2 两栖动物环境适应及生存策略的分子机制



全基因组重测序揭示猪环境适应性的分子机理 及可能的种间杂交现象

Adaptation and Possible Ancient Interspecies Introgression in Pigs Identified by Whole-Genome Sequencing

中国是世界第一养猪大国，也是家猪的两个主要驯化中心之一，拥有全球最丰富的猪种资源。经过近万年的自然选择和人工选育，中国地方猪形成了繁殖力高、肉质鲜美、抗逆性强等优异种质特性，并对中国南北方不同的生态环境具有极佳的适应性。然而产生这种环境适应性的分子机理却不为人知。

江西农业大学黄路生教授、任军教授等在国家自然科学基金（批准号：31230069）等的资助下，开展了中国地方猪环境适应性的分子机理研究。该课题组历时4年半，构建了覆盖我国24个省区68个猪种的中国地方猪种基因组DNA库。在此基础上，挑选出12个代表性猪种的69头中国地方猪，会同华大科技的研究人员，首次在猪中进行了全

基因组高覆盖度重测序分析。该项成果鉴别了2100万个新基因组变异位点，极大地丰富了国际猪基因组遗传变异位点数据库；证实了中国地方猪对全球现代商业猪种的培育做出的重要贡献；重点揭示了中国地方猪冷热适应性的遗传机理，并首次在哺乳动物中提出了古老种间杂交改变适应性进化的遗传证据，丰富了人们对哺乳动物适应性进化的认识。研究结果不仅具有理论创新性，对培育适应我国不同温度环境的优良猪种，促进我国养猪业的可持续发展也具有重要的科学价值。该项成果以全文的形式、作为封面文章发表在2015年1月26日的*Nat. Genet.*上，并在其博客上近10年来首次作为国际农业动物遗传学领域“亮点成果”加以介绍。

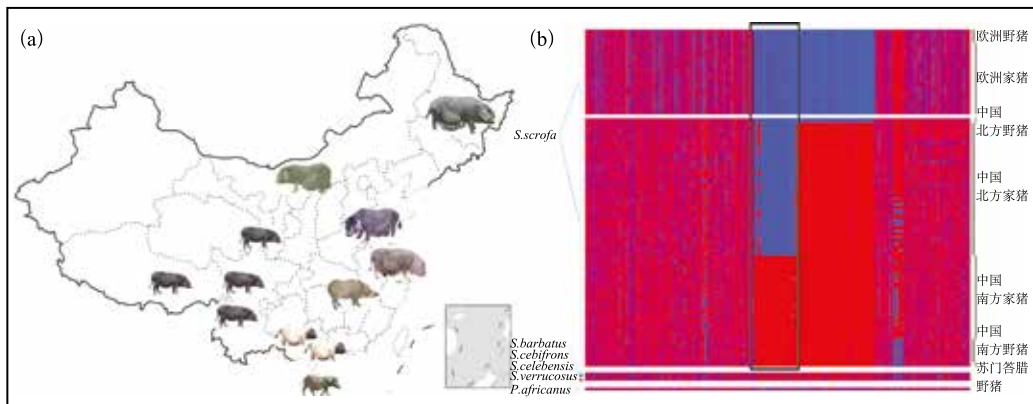


图 中国地方猪的地理分布及种间杂交区域

(a) 69头中国地方猪的地理分布；(b) 猪X染色体单倍型模式，方框中蓝色区域为与环境适应性有关的种间杂交区域。

基于高性能生物识别材料的动物性产品中 小分子化合物快速检测技术

Rapid Detection Techniques of Small Molecular Compounds in Animal Products Based on Excellent Biometric Materials

动物饲养过程中抗菌药物和非法添加物滥用、饲料霉变等导致的残留事件不断发生,动物性产品安全问题严峻。具有实时、现场、大批量筛查特点的快速检测技术是保障动物性产品安全的最有效手段。但传统快速检测技术及检测产品存在识别种类单一、灵敏度低和稳定性差等问题,难以满足残留监控需求。上述问题的解决,必须依靠小分子化合物半抗原合理设计、新型生物识别材料创制、检测产品核心试剂配方与工艺技术发明等方面的理论和技术突破。

备广谱性、高灵敏性或高特异性的抗体,成功率显著提高。

在上述抗体制备技术基础上,创新了小分子化合物抗体定点改造理论和技术。通过分子模拟,在阐明目标物和抗体分子识别机制的基础上,确定关键氨基酸,根据不同需求进行定点突变,以获得优良的抗体。创制的单链抗体、受体蛋白等多种新型生物识别材料,为高通量多残留快速检测提供了关键技术和材料。

通过发明目标物标准溶液稳定剂、荧光增强剂、在生物识别材料和标记探针之间引入介导蛋白,使得标记效率更高,标记物更稳定;采用抗体组合模式,突破不同抗原抗体之间非特异性结合的技术瓶颈,提高了快速检测产品的稳定性、灵敏度和检测通量。

研究成果获 2015 年度国家技术发明奖二等奖,授权多项国家发明专利,具有完全的自主知识产权。快速检测产品已在全国 30 个省(市)和地方各级检测机构以及食品生产加工企业中广泛应用,经济、社会效益显著。研究成果丰富了免疫分析理论体系,为高性能生物识别材料的获得提供了新思路和新方法,加速了快速检测产品的创新升级,推动了快速检测行业的科技进步。

图 1 小分子化合物半抗原合理设计

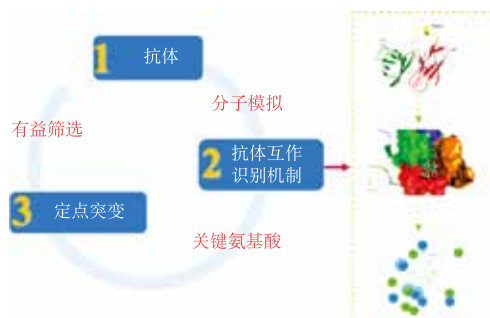


图 2 小分子化合物抗体定点改造技术

H5N1 病毒与甲流病毒重配可获得呼吸道飞沫传播能力

H5N1 Hybrid Viruses Bearing 2009/H1N1 Virus Genes

Transmit in Mammals by Respiratory Droplet

流感病毒基因组由 8 个单股负链 RNA 分子组成。两个流感病毒感染同一宿主，可发生基因片段的交换，产生新的基因重配病毒。近 100 年人类爆发的 4 次人流感大流行中 3 次是由人流感病毒和动物流感病毒基因重配产生的新病毒引发。H5N1 禽流感病毒已经在 60 多个国家和地区引起家禽和野鸟疫情爆发，并导致 600 多人感染发病，病死率近 60%。“H5N1 病毒能否通过基因重配而获得在人与人之间的传播能力并引起人流感大流行”是关系如何“备战”H5N1 流感大流行的重要科学问题。

中国农业科学院哈尔滨兽医研究所陈化兰研究员的科研团队在国家自然科学基金（批准号：30825032）的资助下，对这一重要科学问题进行了探索性研究。他们采用反向遗传技术，在保留 H5N1 病毒 HA 基因的前提下，在生物安全 3 级实验室构建了含有 2009 甲型 H1N1 病毒 1~7 个基因不等的所有 127 种可能的重配病毒。利用小鼠测试了这 127 种重配病毒对哺乳动物的致病力，发现其中三分之二以上对小鼠高度致死。利用豚鼠模型对 21 种重配病毒进行传播能力评估，发现 8 种重配病毒能够经空气传播，其中 5 种重配病毒获得高效空气传播能力。

这项研究从全新角度揭示了 H5N1 病毒对公共卫生的现实威胁，为应对 H5N1 流感大流行的政策制定提供了重要科学依据。相关论文 2013 年 5 月 3 日在线发表于 *Science*。

图 1 携带甲流病毒 PA 基因或 PA 和 NP 双基因的 H5N1 重配病毒可在豚鼠间通过呼吸道飞沫传播

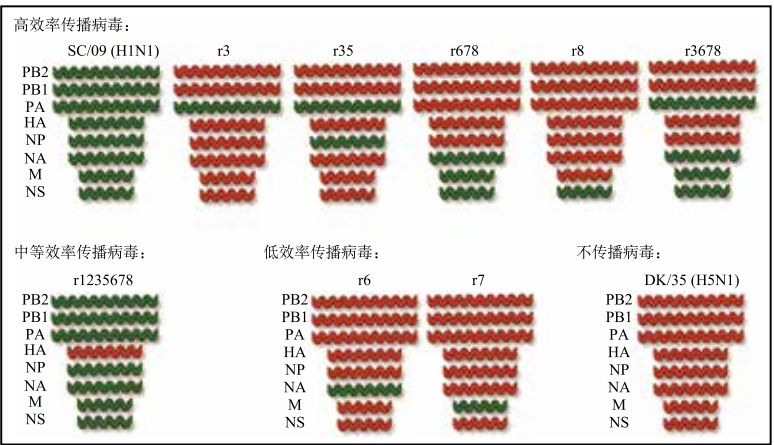
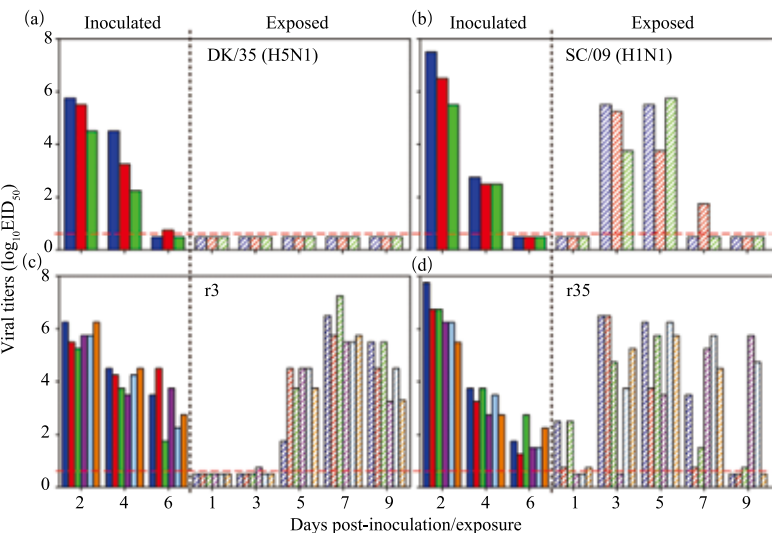


图 2 8 种 H5N1 重配病毒能够经空气传播，其中 5 种重配病毒获得高效空气传播能力

草鱼全基因组序列图谱构建

The Draft Genome of the Grass Carp Has Been Completed

草鱼是重要的淡水养殖鱼类,其产量约占全球淡水养殖总量的16%,以典型的草食性特征而得名。2015年,由中国科学院水生生物研究所汪亚平研究员牵头,中国科学院水生生物研究所、中国科学院国家基因研究中心、中山大学等研究团队在国家自然科学基金(批准号:31130055)等的资助下,采用鸟枪法测序策略,分别对一尾雌性和一尾雄性草鱼进行了全基因组测序,获得雌性(0.9GB)和雄性(1.07GB)草鱼基因组组装序列,研究结果发表在2015年5月4日的*Nat. Genet.*。

基于草鱼多个组织的转录组数据和斑马鱼同源基因信息,在雌性基因组中注释了27263个蛋白编码基因。利用草鱼遗传连锁图谱,将114个草鱼的

scaffold 组装至24个连锁群,覆盖基因组64%。与现有12种脊椎动物基因组的比较研究发现,草鱼与斑马鱼经历了相似的基因组演化历程,它们共享7227个基因家族,两者的分化时间大约距今49~54百万年。

共线性分析和FISH检测结果显示,草鱼的第24号染色体对应于斑马鱼的第10和第22号染色体,草鱼雄性特有序列主要分布在草鱼的第24号染色体上,提示草鱼24号染色体的融合可能与其性染色体的分化有关。比较转录组分析发现,草鱼在草食性转化过程中,肠道中昼夜节律相关基因的表达模式发生了重设,肝脏中甲羟戊酸通路和类固醇生物合成通路被激活。草鱼可能通过持续高强度的食物摄入,获取足够多的可利用营养以维持其快速生长。

草鱼全基因组序列的解析,将为鱼类重要经济性状相关基因的发掘和养殖品种的遗传改良提供关键技术支撑,同时,也将为鱼类基因组演化、性别决定及分化机制等理论研究奠定重要基础。

图 草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*)



NSFC

国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

地球科学部



第三极地区冰川与大气环流变化的三模态和相互作用及其影响

Three Modes of Glacier Status and Atmospheric Circulations and Their Influence on the Third Pole Region

以青藏高原为主体的第三极地区拥有约 10 万 km^2 的冰川。准确认识近期冰川变化格局对于区域水资源利用及冰川灾害预警等具有重要的意义。中国科学院青藏高原研究所姚檀栋研究员等在国家自然科学基金(批准号: 41190080)的资助下, 利用遥感和实地观测等多种手段, 综合研究了第三极地区冰川变化及其与大气环流的关系。

综合分析了第三极冰川过去三十年的末端变化、面积变化、物质平衡变化, 揭示了第三极地区冰川变化的空间格局, 发现冰川状态存在系统性差异, 存在三种模态: 在喜马拉雅山地区, 冰川退缩最为强烈, 表现为长度后退、面积缩小和物质损失; 向第三极内陆地区冰川退

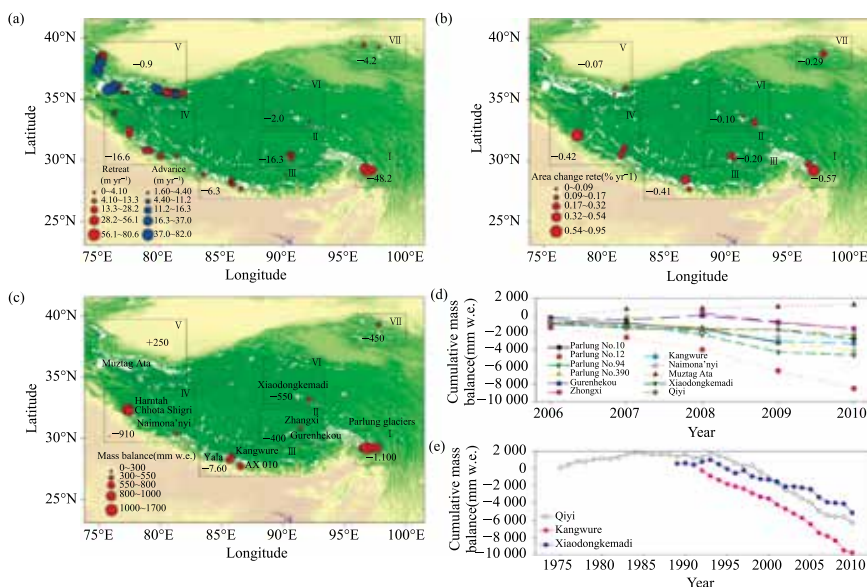
缩逐渐减弱; 而在最西北的帕米尔地区, 冰川退缩十分微弱, 甚至有部分冰川前进、面积扩张。研究发现, 冰川状态的三种模态和大气环流的三种模态有密切关系: 季风模态区冰川退缩最为强烈, 西风模态区部分冰川前进, 过渡模态区冰川退缩较弱。研究还发现, 第三极冰川变化已经引起了湖泊、河流等水循环过程的强烈变化, 从而影响到其他各个圈层的变化。

研究成果发表在 *Nat. Clim. Change* 等国际期刊上, 产生了重要科学和社会影响。*Nature*、*Science* 多次重点报道研究成果的科学重要性。汤森路透 2015 年评出的地学十大前沿领域之一, 就是包括本研究成果的第三极区域冰川物

质变化与气候的关系及其影响。2012 年发表于 *Nat. Clim. Change* 的文章已经被引 200 多次, 是地学领域 Top 0.1% 的高被引论文。研究成果入选中国科学院 2012 年度科技进展和 2012 年度全国十大科技进展提名。并成为美国科学院报告《喜马拉雅山冰川 - 气候变化、水资源和水安全》的重要科学依据, 是 IPCC 第五次评估报告的重要参考文献。

图 第三极地区冰川变化的三模态

(a) 冰川长度变化模态; (b) 冰川面积变化模态; (c) 冰川物质损失模态; (d~e) 冰川物质损失变化的时间特征。



社会水循环原理与过程研究推动了水资源学科发展 与管理改革

Research on Principle and Process of Social Water Cycle Promotes the Development of Water Resources Discipline and Reform of Water Resources Management

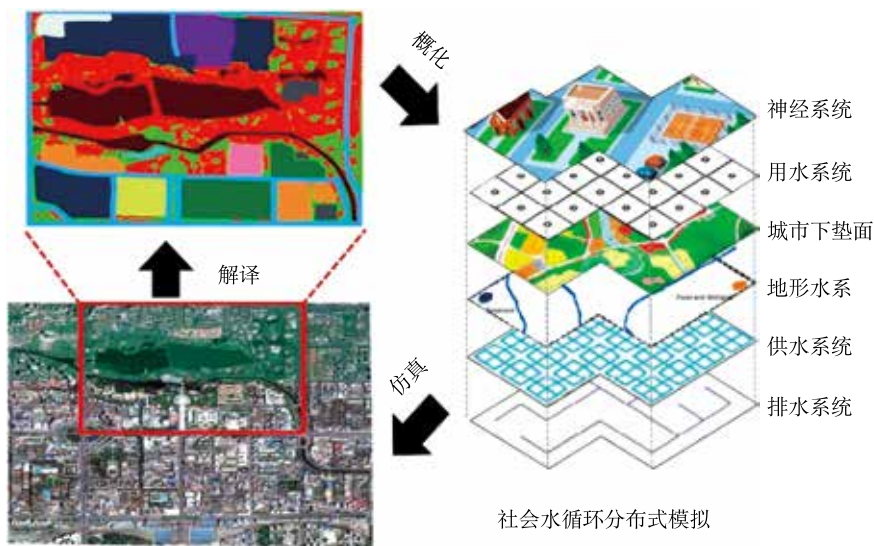
“自然 - 社会”二元水循环是水资源形成、演化以及开发、利用与保护的客观基础。随着经济社会取用水量的不断增加,我国水资源问题的主因逐步从过去的供给不足转向为不合理开发利用的外部性,要实现全行业的节水减排和需水管理,必须突破社会水循环的机理规律认知与模拟调控方法。

中国水利水电科学研究院王浩研究员在国家自然科学基金(批准号:40830637)等的资助下,开展社会水循环系统演化机制与过程模拟研究。解析了社会水循环的系统结构与演进过程,提出社会水循环是水资源学的基本研究对象,循环内生驱动力是“社会势”;计算了2010年全国社会水循环的有效降水通量、径流通量和虚拟水通量,结果表明我国有效降水利用量远大于径流性取用水量,虚拟水的南输量远大于实体水的北调量;研究了分行业需水用水原理与节水减排机制,

建立了层次化社会水循环模拟模型,提出了社会水循环系统“取 - 用 - 排”整体调控模式,在海河流域进行了实证应用,有效促进了流域用水效率提高和水生态环境改善。

取得的研究成果厘清了水文学与水资源学的学科边界,同时理论成果及时应用于新时期国家水资源管理实践,推动了我国节水型社会建设向着量化与标准化的方向发展,引发了以“三条红线”为核心内容的国家最严格水资源管理制度的出台与实施。

图 城市用水分布
式模拟技术



基础地理信息动态更新模型与技术体系

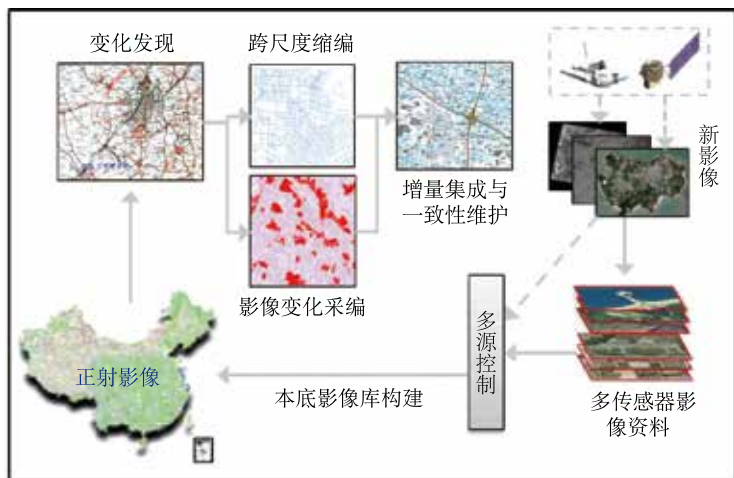
Models and Systems for Dynamic Geo-Spatial Information Updating

大范围基础地理信息的及时有效更新是多年来世界各国面临的重大挑战,涉及到大范围变化快速测定、自动化数据质量检核、集成化变化信息服务等诸多技术难题。面对我国经济建设、社会发展的迫切应用需求,国家基础地理信息中心陈军教授带领团队在国家自然科学基金(批准号:40337055)等的资助下,完成了基础地理信息动态更新模型和方法研究,提出了GIS支持下地物变化的影像测定和增量处理模型与方法,形成了成套的更新采编装备,大幅提升了大面积更新的工效;提出了以空间关

系计算、表达与合理性判断为核心的数据质量自动化检核方法,实现了更新要素关系自动计算、拓扑链匹配的冲突探测、错误信息自动定位;提出了1:5万尺度基础地理信息的精细化表达与建模方法,构建了覆盖全部陆地国土的精度高、规模大、内容丰富的全国性基础地理数据库体系。

在此基础上构建了国家基础地理信息更新技术体系,含18项技术标准、20余项生产与服务软件,在全国装备了7000余套,形成了规模化生产能力,实现了从传统模拟地图修测到信息化更新的革命性转变。成果用于支撑完成了我国1:5万数据库首次全面更新及其后的年度更新,将全国1:5万基础地理要素的现势性由以往20~30年提高到全要素5年以内、重点要素1年以内,从根本上改变了我国基础地理信息滞后于经济社会发展的被动局面,为各行业提供了权威可靠的数据信息,有效满足了国家建设发展及国防安全的需要,并使中国成为世界上该领域先进国家之一。研究成果获2014年度国家科学技术进步奖二等奖。

图 基础地理信息
动态更新技术体系



黄土区土壤－植物系统水动力学与调控机制

Soil Water Dynamics in the Soil-Plant System and Its Control Mechanism in the Loess Plateau

黄土高原是全球水土流失最为严重的区域。控制水土流失最有效的措施是植被建设。水分的丰缺、调控和管理对该区域的植被建设和农业生产起关键作用。中国科学院水利部水土保持研究所邵明安研究员、香港中文大学张建华教授、中国农业大学康绍忠教授等在国家自然科学基金（批准号：49725102，40025106，49871039，90102012，49890330）等的资助下，通过长期的野外试验，土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水动力学模拟，系统揭示了该区土壤-植物水分的动力学关系及调控机制。

首次获得了土壤水文参数最通用的 van Genuchten 模型的解析表达式，建立了确定参数的新方法，分析求解了土壤水分运动的 Richards 方程。阐明了干旱逆境下土壤—根系—冠层间信号产生、运输及对地上部水分的调控机制。

建立了考虑冠层光能输送空间变化的植物三维蒸腾模型、植物根系吸水机理模型，确切证明了植物根系吸水有效根密度的物理基础、土-根和叶-气为 SPAC 中水流关键界面，形成了系统的

SPAC 水运转理论。提出了旱地农业的合理轮作模式和土壤-植物系统水分调控新方法，为旱区农业和生态系统水调控提供了重要基础和新途径。

面向黄土高原农业生产和植被建设，取得的成果受到国际学术界高度评价，为建立黄土高原合理的旱地农业模式和有效的植被建设提供重要理论依据。

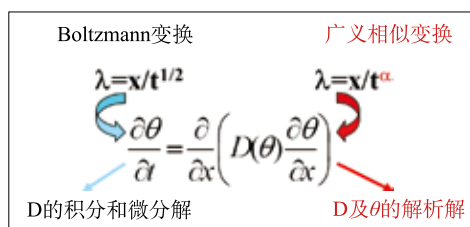


图1 用广义相似变换拓展传统的 Boltzmann 变换，使土壤水分运动方程的解析解成为可能

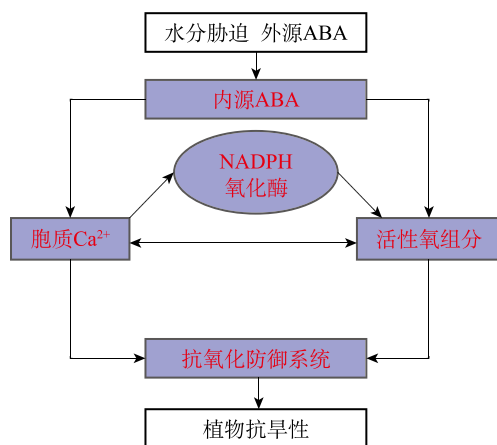


图2 ABA 诱导植物细胞抗氧化防御的生理生化机制及其信号转导机理

昼夜不对称增温对北半球陆地生态系统的影响

Asymmetric Effects of Daytime and Night-time Warming on Northern Hemisphere Ecosystems

相比于白天,地球在夜晚时正以更高的速率变暖:在过去的50年里,日最低温度升高速度比日最高温度升高速度要快40%。然而,一直以来人们很少关注这种昼夜不对称增温对植被生长和生态系统功能的影响,这是当前全球变化研究的一个空白点。

北京大学朴世龙教授等在国家自然科学基金(批准号:41125004)等的资助下,系统研究了白天和晚上温度上升对北半球植被生产力和生态系统碳源汇功能影响及其机制。研究发现,昼夜不对称增温对北半球陆地生态系统碳源汇功能的影响显著,而且表现出明显的地带性规律。白天温度升高有利于大部分寒带和温带湿润地区植被生长及其生态系统碳汇功能,但并不利于温带干旱和半干旱地区植被生长。而夜间温度上升对植被生长的影响则与白天相反。这一发现不仅纠正了过去普遍认为温度上升有利于北半球植被的生长、从而有利于提高生态系统碳汇功能的认识,而且为改进现有的生态系统碳循环模型及地球系统模型提供了重要的理论基础,对全球气候变化及全球生态学研究具有重要意义。

该研究结果发表在 *Nature* (2013, 501:88-92)。 *Nature* 在同一期专门发表一篇来自于全球生态学专家 Dr. Still 的评述,认为这项研究有助于了解全球气候变化对陆地生态系统的影响。该成果入选2013年度中国高等学校十大科技进展。

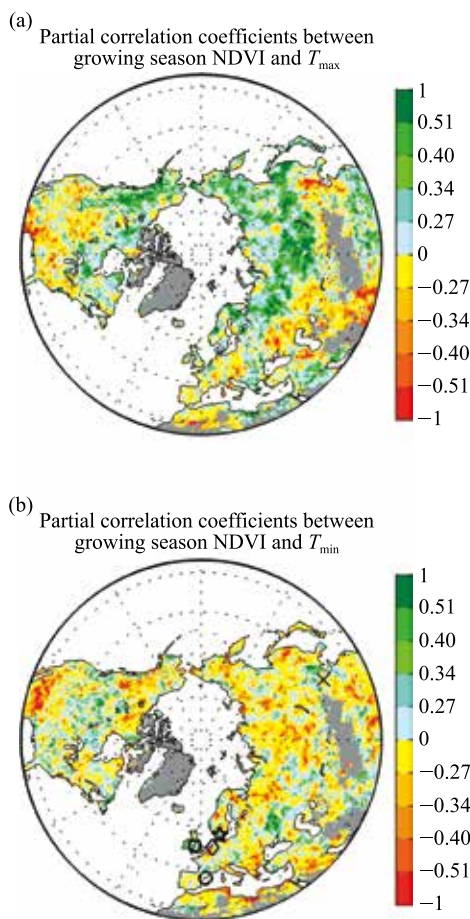


图 白天(a)和晚上(b)温度上升对北半球植被生长的影响

中亚造山拼贴体多向汇聚作用

Multiple Accretion of the Central Asian Orogenic Collages

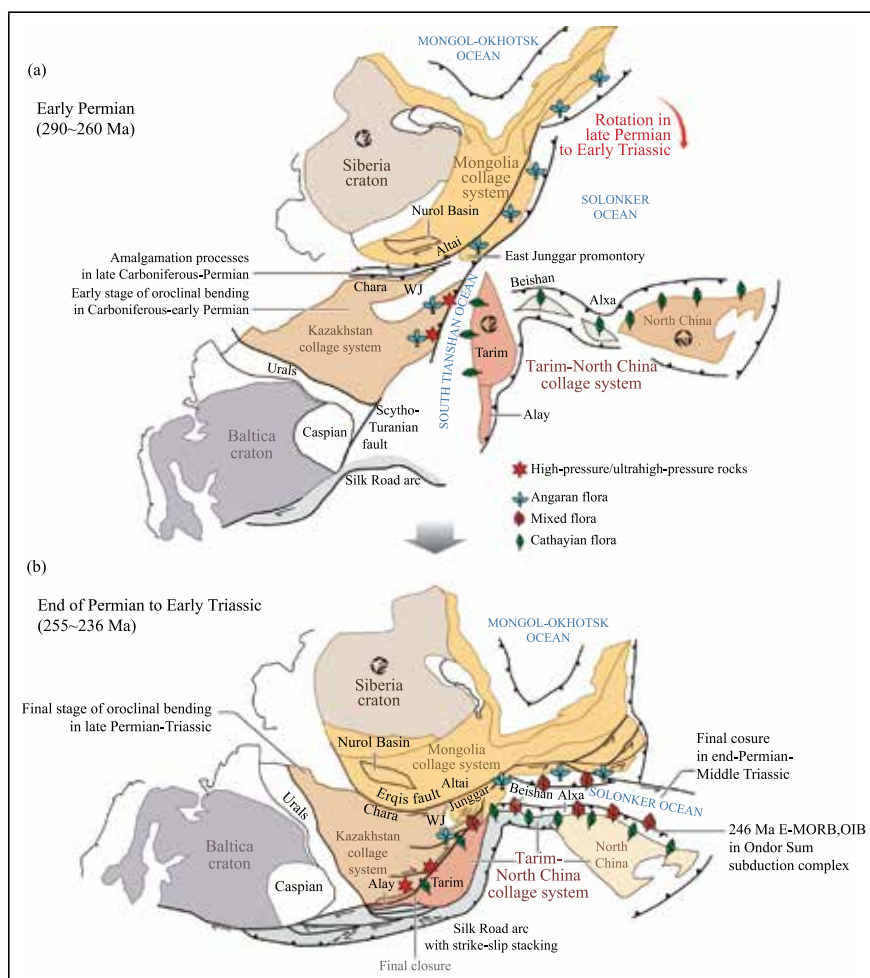
大陆造山带的结构与演化一直是国际大陆动力学研究的重大科学前沿之一。古老造山带演化历史复杂、组成复杂，厘定主大洋闭合后的一级缝合带往往是地质学家面临的难题。中亚造山带发育最显著的显生宙陆壳增生拼贴体，对厘定古亚洲洋一级缝合带、探索亚洲大陆增生等基础问题有十分重要的意义。

中国科学院地质与地球物理研究所肖文交研究员在国家自然科学基金（批准号：40725009）等的资助下，以中亚造山拼贴体汇聚过程为解剖对象，进行了中亚造山带古地理、构造格局研究，系统地厘定了西伯利亚-蒙古拼贴体、哈萨克斯坦拼贴体以及塔里木-北山-阿拉善-华北拼贴体，确定南天山-索伦缝合带为古亚洲洋最终消亡、中亚南部拼贴作用最终结束的主缝合带，创建“多增生楔-多期次-多方向-多方式”多重复式增生造山作用模式。这些创新性成果解决了国际学术界关于中亚增生造山作用方式、演化时限等长期

争议的重大问题，为理解大陆造山带构造格局提供了新的视角。

该成果多篇国际 SCI 论文被美国科技信息研究所认定为近十年来高引用、热点文章，部分成果获 2012 年度国家自然科学基金二等奖。

图 中亚造山拼贴体二叠-早三叠世古地理演化格局再造图



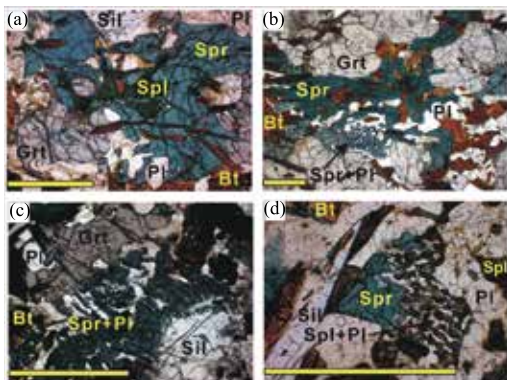
华北早元古代超高温构造 – 热事件与俯冲 – 碰撞造山

Paleoproterozoic Subduction-Collisional Orogeny with UHT metamorphism in Western Block of the North China Craton

早元古代是全球性板块体制建立和发展的关键阶段,其重要标志是几乎同时发育了 19 条俯冲-碰撞造山带,其中包含了丰富多样的构造过程,是早期板块构造研究的重要主题。华北克拉通发育一个巨大的早元古代俯冲-碰撞造山系统,中国科学院地质与地球物理研究所郭敬辉教授和彭澎教授等在国家自然科学基金(批准号:40730315)等的资助下,针对这一造山系统的西部开展深入

研究和矿物温度计研究,查明了超高温变质岩的空间分布和主要露头,并进一步确定超高温变质作用具有顺时针的 PT 轨迹,证明其发育在俯冲-碰撞构造过程。②通过细致的岩石地球化学和同位素年代学研究,不仅发现超高温变质岩与幔源侵入岩的时空关系密切,而且厘定出这期岩浆活动是华北克拉通早元古代最强烈的一次岩浆活动,也是超高温热事件的动因。③针对区域性的 S 型花岗岩,建立了变质沉积岩熔体+残留相+幔源基性物质添加的特殊的混合成因机制,阐明了幔源基性岩浆造成超高温事件导致地壳发生大规模熔融的模式。综合各类资料,提出增生契与活动陆缘拼贴→洋脊俯冲→陆陆碰撞这一新的构造模式,揭示出华北克拉通西部超高温热事件是叠加在俯冲-碰撞构造过程中这一基本性质,为早元古代俯冲-碰撞构造演化增添了新的科学内涵。

图 1 大青山超高温变质岩显微结构(黄色比例尺为 1mm)



研究,从中识别和建立了超高温构造-热事件的序列,深化了对早元古代俯冲-碰撞造山过程的认识。其中的新成果有:①通过详细野外调查,结合变质岩石学研

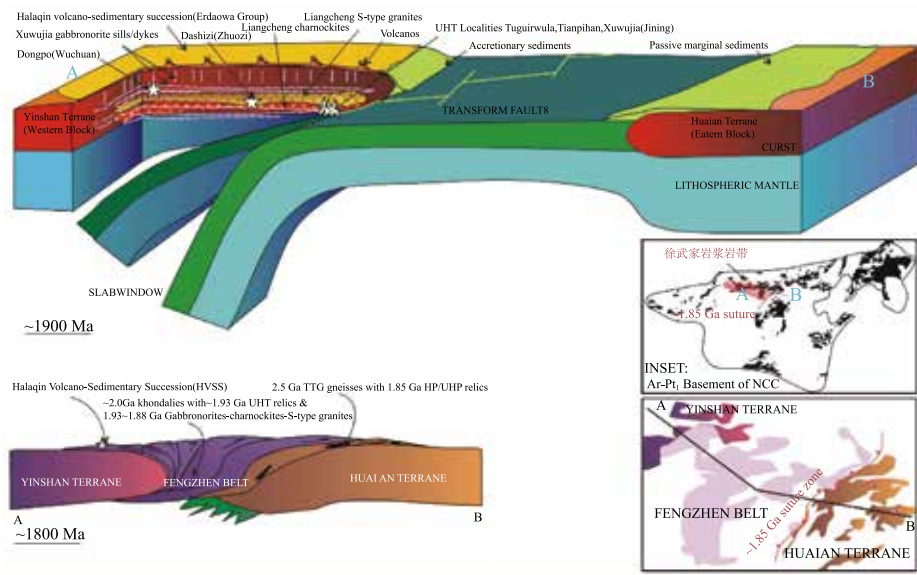


图 2 华北西部早元古代超高温构造 – 热事件与俯冲 – 碰撞构造模式

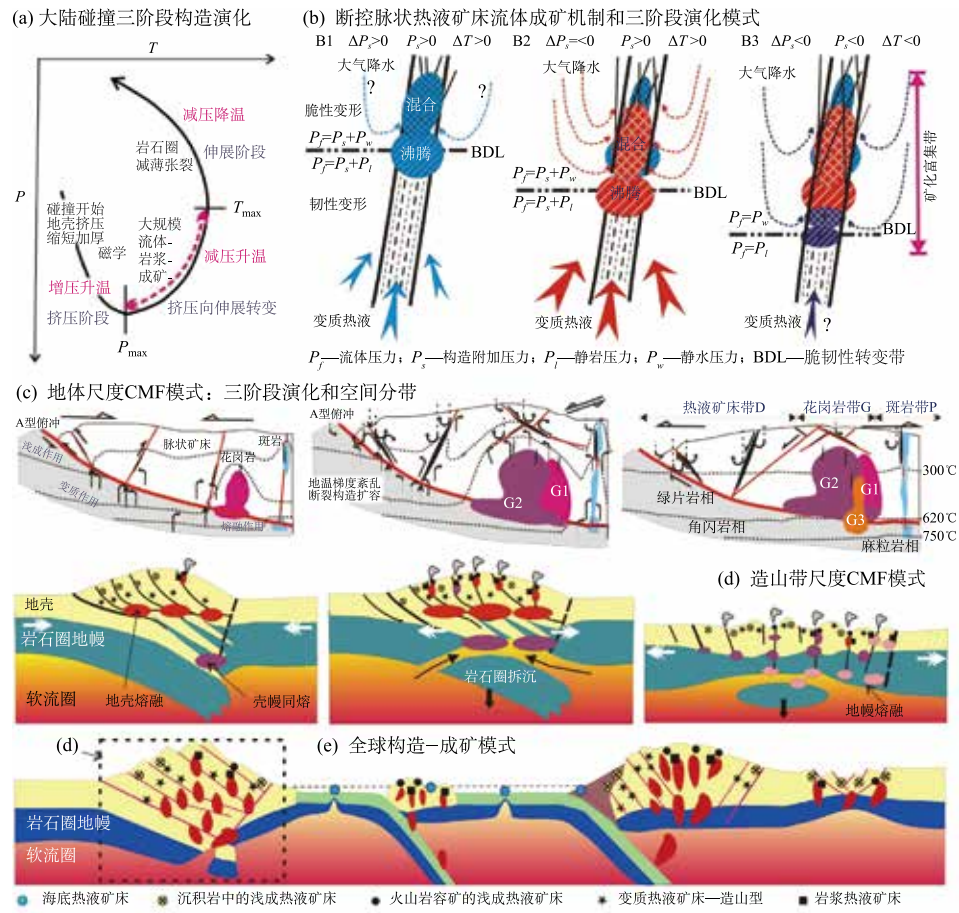
大陆碰撞成矿理论的创建及应用

Development and Implication of Continental Collision Metallogeny

我国大陆碰撞造山带丰富，找矿勘查需要大陆碰撞成矿理论支撑；但传统观点认为碰撞不成矿，长期缺乏大陆碰撞成矿理论。北京大学陈衍景教授瞄准学科空白和找矿需求，在国家自然科学基金（批准号：49672119, 40425006, 40730421）的资助下，通过大范围区域地质调查和大量矿床解剖研究，系统创建了大陆碰撞成矿理论，提出来成矿省、矿田和矿床尺度的大陆碰撞成矿（CMF）模式，完善了国际流行的全球构造-成矿模式，阐明了大陆碰撞过程的成矿类型及源-运-储-变-保特征，为碰撞造山带找矿预测和评价提供了科学支撑。该理论促进了大陆碰撞造山带成矿规律揭示，确定挤压向伸展转变期大规模成矿，发现了鲜为人知的富 CO₂ 多子晶矿物包裹体，推动了一些重要矿床的发现和勘查突破，被翟裕生院士和 OGR 主编 Pirajno 编入

矿床教材，称为“陈氏 CMF 模式”，弥补了矿床学教材长期空白“大陆碰撞成矿”章节的缺陷，改变了国外矿床教材无中国人所建成矿模型的历史。该成果的 7 篇论文单篇被 SCI 引用超过 100 次，获 2015 年度国家自然科学奖二等奖。

图 大陆碰撞成矿理论的相关模型



青藏高原生长的深部过程、岩石圈结构与地表隆升

Deep Processes, Lithospheric Architecture and Surface Uplift of Tibetan Plateau Growth

青藏高原生长是现今全球地形 - 地貌塑造的关键并强烈影响了亚洲甚至全球的气候和环境变化以及资源分布。解决青藏高原生长过程的关键,是认识和理解地球深部与地表过程的相互作用,这也是 2010 年联合国行星地球年提出的综合固体地球科学新前沿之一。

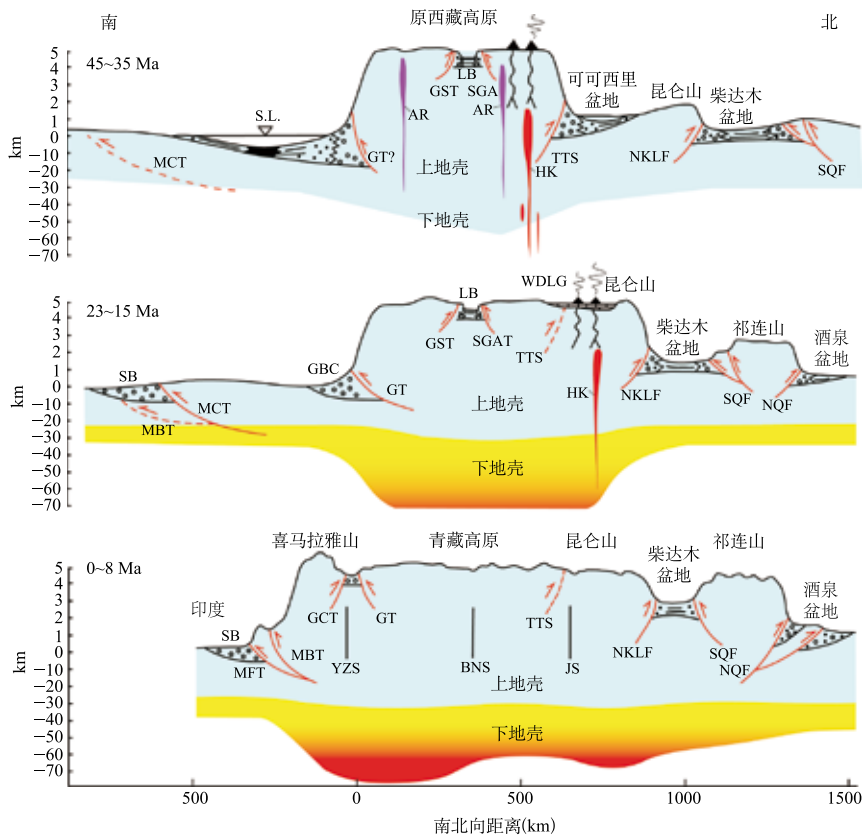
中国地质大学(北京)王成善教授及其课题组在国家自然科学基金(批准号: 40830317, 41172129, 40672086, 40332020, 40974058)等的资助下,从

地球深部和地表过程相互作用的角度,对青藏高原生长这一重大科学问题开展了长期研究。主要创新成果是提出了高原中部(羌塘和拉萨地体)率先隆起并在约 40 Ma 已达到现在高度的“原青藏高原”隆升新模式,发现青藏高原巨厚地壳中的物质状态是热的、塑性的及幔源物质在青藏高原南部拉萨地体巨厚地壳形成中发挥了重要作用。2005 ~ 2014 年,有 12 篇被 ESI 认定为 Top 1% 论文,在 *Geology* 和 *Geochemistry & Geophysics*

学科的高被引论文量位居国内外固体地球科学主要青藏高原研究组首位。这些成果突破了国际上关于青藏高原隆升、地壳生长和岩石圈结构的传统认识,提升了中国科学家在青藏高原形成演化研究领域的国际影响和地位,为青藏高原找矿重大突破提供了重要的科学支撑。

该成果发表在 *Science*、*Nature* 和 *PNAS* 等刊物上, *Science News* 和 *Nature China* 为此分别发表专门评述性文章,国际岩石圈委员会主编的《综合固体地球科学新前沿》专辑也将原青藏高原隆升模式列为高原隆升三种主要模式之一。成果获 2015 年度国家自然科学基金二等奖。

图 喜马拉雅和
西藏高原地质演化概
略图



昆明寒武纪小石坝化石库研究

Xiaoshiba Fossil Lagerstätte from the Cambrian of Kunming, South China

云南大学张喜光教授等在国家自然科学基金（批准号：40972012，41272027）的资助下，就昆明地区寒武系第3阶小石坝化石库（生存时代略晚于澄江动物群的重要过渡化石群）的研究，在 *Nature*, *PNAS* 等发表一系列文章。在化石生物学和生命早期演化领域取得开拓性进展。

1. 原始真节肢动物抚仙湖虫头部结构和早期演化 [图 (a)、图 (b)]

经剖析抚仙湖虫类头部附肢的基本形态和结构，辨析与之相关不同节肢类群附肢的同源性。该原始节肢类头部结构模式的确立，为真节肢动物系统分类

和早期演化提供了切实的理论依据和重要实证 (*Nature*, 2013)。

2. 被甲的叶足类及有爪动物的早期分异 [图 (c)]

此类“带腿的蠕虫”为自身保护和生存，发育出超乎想象复杂的背刺组合和用于滤食特化的腿肢，在寒武纪大爆发期间成功开拓出独自の生态空间。该发现对有爪动物早期演化有着重要的潜在意义（论文被选作封面文章 2015 年发表于 *PNAS*）。

上述成果的科学意义，得到同行专家的一致肯定，并受到世界多家媒体的关注。

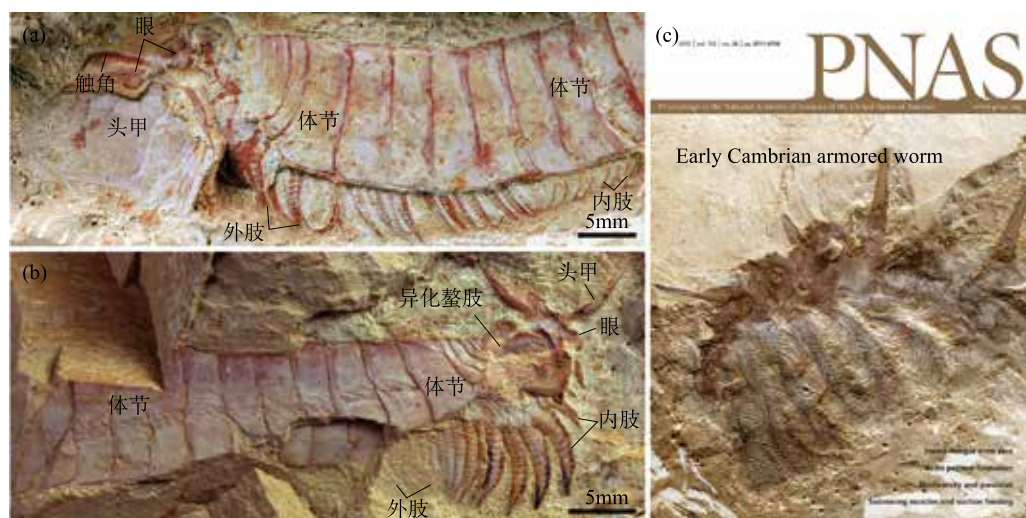


图 寒武纪小石坝化石库的抚仙湖虫类 *Chengjiangocaris* (a, b) 和叶足类 *Collinsium* (c)

大地震或调控长尺度碳收支

Large Earthquakes May Regulate Long-term Carbon Budget

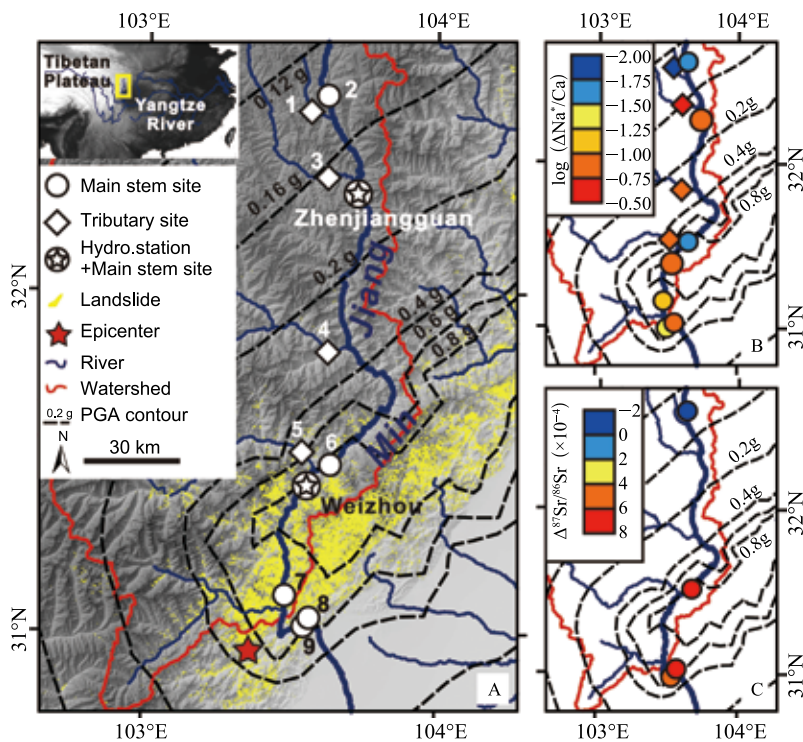
构造隆升带的硅酸盐风化(消耗 CO_2)和物理剥蚀(埋藏有机碳)速率以及河流化学,是晚新生代大气 CO_2 变化和全球变冷原因的一个争论焦点,但现有的证据基本是间接的,几乎没有构造事件前后碳收支的对比研究。

中国科学院地球环境研究所金章东研究员及其国际团队在国家自然科学基金

金(批准号:40873082,41225015)的资助下,系统评价了2008年汶川特大地震对岷江流域剥蚀-风化以及碳收支的影响强度、幅度和持续时间。通过地震前后岷江河水化学的比较,河水中硅酸盐组分及其引起的 CO_2 消耗率增加了近4倍, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值增加了 0.000644 ± 0.000146 ,这些增加主要是地下水的释放和滑坡物质快速风化的结果。重要的是,研究还发现地震滑坡将在流域停留数十到数百年,仅仅清空 $<25\text{ mm}$ 细颗粒即需要 33 ± 24 年,粗颗粒将持续千年以上,其持续时间与季风控制的高强度径流天数紧密相关。研究指出,如果其他大地震也有类似效应,那么地震将把风化和碱度与长时间尺度碳收支直接联系起来。这些成果以两篇论文发表在*Geology*上,其中一篇被选为“亮点论文”(Featured Articles)。

本项成果首次量化了高强度构造事件对流域硅酸盐风化及其碳消耗通量变化,为“构造-风化-气候变化”假说提供直接而有力的证据。

图 2008年汶川地震前后岷江河水化学的变化幅度



深部碳循环的镁 (Mg) 同位素示踪

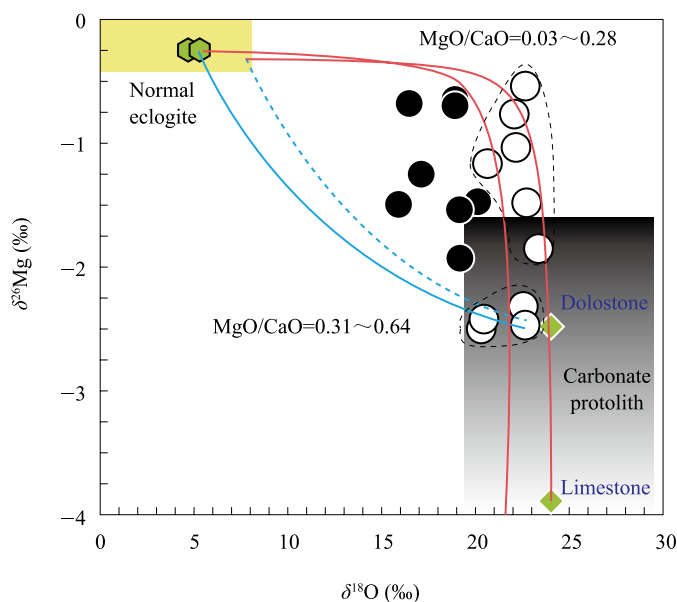
Tracing Deep Carbon Recycling Using Mg Isotopes

海洋吸收大气 CO_2 并以碳酸盐形式沉积于大洋底部，大洋板块的俯冲可将这些沉积碳酸盐带入地幔深部，而后再通过火山作用将 CO_2 释放返还给大气。这样一个全球规模的深部碳循环过程对认识地球历史大气 CO_2 和气候的变化非常重要。然而，人们对于进入地幔的深部碳循环知之甚少，因而它也成为近年来国际地球科学研究的前沿领域。

中国地质大学(北京)李曙光教授在国家自然科学基金(批准号: 41230209)的资助下, 在国际上率先开展了深部碳循环的镁 (Mg) 同位素示踪研究。该研究首先调查了板块俯冲过程中的 Mg 同位素地球化学行为。查明随着温度, 压力的升高和岩石变质和脱水作用的发生, 俯冲洋壳(玄武岩)和它携带的沉积碳酸盐岩和泥质沉积物的 Mg 同位素组成是否发生变化以及可能发生的变化范围。研究表明, 组成洋壳的玄武岩在俯冲过程中, 经历的变质-脱水作用不能使玄武岩 Mg 同位素发生分馏。然而, 玄武岩和碳酸盐之间在高压变质条件下可发生 Mg 同位素交换反应, 导致高压变质玄武岩(榴辉岩) Mg 同位素变轻, 钙质碳酸盐变重但仍比地幔轻, 镁质碳酸

盐(白云岩)保持轻 Mg 同位素组成不变。此外, 泥质沉积岩具较重的 Mg 同位素组成不随变质程度增加而发生变化。这些工作为应用 Mg 同位素示踪深部碳循环奠定了理论基础。另一方面, 该研究调查了中国东部大面积发育的晚白垩世和新生代玄武岩的 Mg 同位素组成, 发现它们具有比正常地幔异常轻的 Mg 同位素组成, 并且论证了这一轻 Mg 同位素异常是西太平洋板块俯冲携带的沉积碳酸盐岩再循环进入中国东部上地幔的结果。4 篇相关论文发表在 *Nat. Commun.* (2014) 和 *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2014, 2015a, b) 上。

图 显示俯冲板片的榴辉岩与碳酸盐岩发生同位素交换反应导致的 Mg-O 同位素变化 (Wang et al. *Nat. Commun.*, 2014)



地质样品元素和同位素分析新技术

Novel Technologies for Element and Isotope Analysis in Geological Samples

元素和同位素分析是现代地球科学研究的重要手段,也是地球科学创新研究的源泉。中国地质大学(武汉)胡兆初教授等在国家自然科学基金(批准号:41273030, 41322023)的资助下,在地质样品元素和同位素分析技术创新方面取得了如下成果:

1. 采用氮气等活性基体改进剂,开发出了激光原位 B、Hf、Nd、Pb 和 S 同位素分析新方法,显著提高了这些同位素测定的准确度和精度。以锆石原位 Hf 同位素分析为例,新方法 Hf 的检测灵敏度相对于老方法提高了 4 ~ 5 倍,实验室利用该新方法已为 20 多家单位,共计完成 6 万多个锆石原位 Hf 同位素样品点的分析工作,获得了许多地球科学家的好评。该文章自 2012 年发表以来,已被 SCI 引用 122 次。

2. 建立了氟化氢铵和氟化铵敞口消解全岩样品的新方法。氟化氢铵和氟化铵消解法囊括了敞开式消解法的便捷和低成本以及高压密闭消解法可以消解难溶矿物的优点。整体而言,该法具有高效、安全、低成本、灵活、工作量小等优点,是地质样品消解方法领域的一个里程碑似的发展,具有非常强的市场应用前景。

3. 研发了激光剥蚀电感耦合等离子体质谱信号平滑器。在激光单脉冲分析情况下信号稳定性提高了 12 倍,成功实现了高空间分辨率副矿物定年。该系统已被中国科学院地质与地球物理研究所、西北大学、台湾大学、德国马普所等十多家单位使用。

依据以上研究成果,在 *Chem. Geol.*、*Anal. Chem.* 等影响因子大于 3 的国际 SCI 刊物上发表论文 13 篇。受邀在国际重要地球化学综述 *Treatise on Geochemistry* 中撰写地质样品消解方法进展的章节(该丛书文章中仅有 2 篇来自中国,这是其中之一)。获得国家发明专利授权 3 项。2015 年,胡兆初教授当选为英国皇家化学学会会士。

图 激光剥蚀在线信号平滑器



太阳风与地球磁层相互作用研究

Study on the Interaction between the Solar Wind and the Earth's Magnetosphere

太阳风 - 磁层 - 电离层耦合是太阳活动影响地球空间环境的关键环节, 如何描述这一复杂耦合系统, 以及如何从太阳风扰动来预测地球空间天气变化一直是空间物理和空间天气领域的难题。

中国科学院国家空间科学中心王赤研究员及其课题组在国家自然科学基金(批准号: 40831060, 40325010)的资助下, 致力于该难题的攻关。王赤与中国科学技术大学胡友秋教授合作建立了全球三维太阳风 - 磁层 - 电离层耦合系统的磁流体力学模型, 其创新点是高精度、高分辨、低耗散, 比国际流行的传统模型的数值耗散低近一个数量级, 使我国成为国际上少数拥有能自洽描述太阳风 - 磁层 - 电离层耦合系统数值能力的国家之一。首次获得了磁层顶 KH 不稳定性的全球特征及其演化规律; 发现了地球空间磁场对行星际扰动的负响应新现象, 并揭示了其演化过程和变化规律; 给出了新的太阳风 - 磁层的能量耦合和开放磁通量函数, 提出了新的空间天气预报关键要素; 首次给出行星际激波作用下的磁层 - 电离层 - 地表的磁场响应链。

这一系列工作已经在权威期刊美国地球物理杂志 *JGR* 上发表文章 40 余篇, 得到国内外同行的高度评价, 多项成果

成为该杂志的研究亮点, 开创了我国太阳风 - 磁层相互作用的数值建模研究领域, 揭示了地球空间环境对太阳风扰动的响应过程 and 变化规律, 为空间天气预报奠定了科学基础。

图 1 行星际激波与地球磁层相互作用的数值模拟

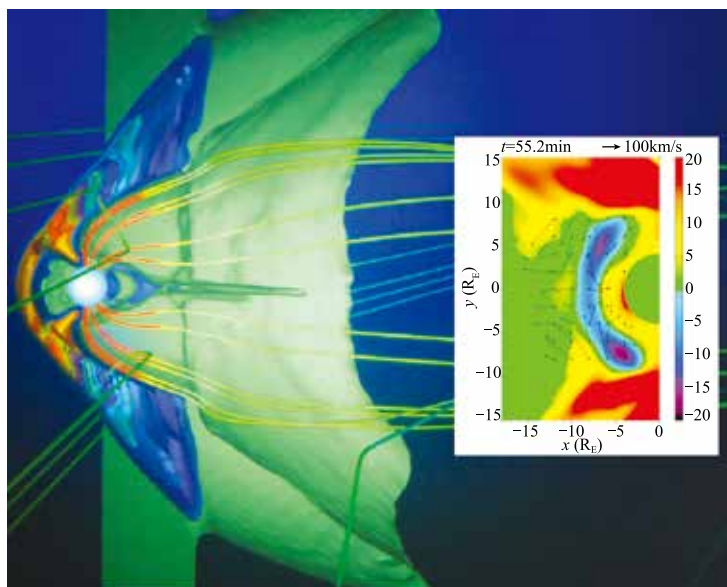
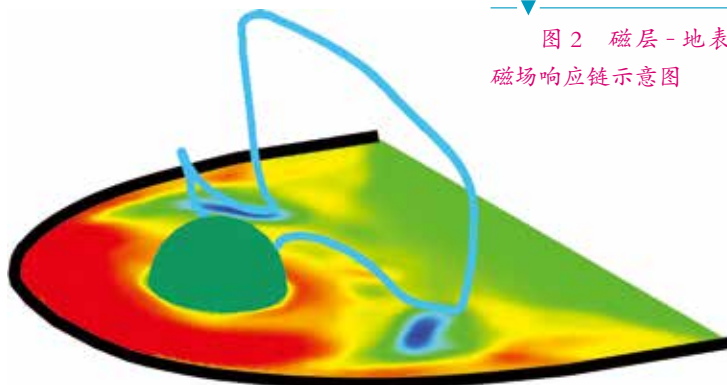


图 2 磁层 - 地表磁场响应链示意图



极区电离层“等离子体云块”的形成和演化

The Formation and Evolution of the Plasma Patches in the Polar Ionosphere

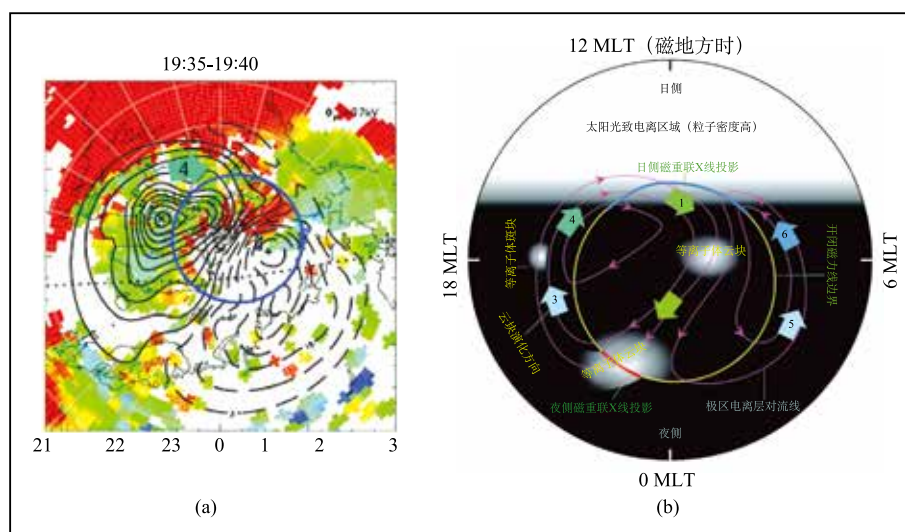
太阳不仅照亮了整个太阳系，还时时刻刻朝四面八方喷射高速等离子体（被称之为“太阳风”）。由于极区是地球开向太空的天然窗口，地球磁力线在极区高度汇聚并几近垂直向太空开放，因而太阳风与地球磁层相互作用，会在地球极区高层大气引起众多物理现象，其中“等离子体云块”最为常见。“等离子体云块”的形成和演化能给人类的通信、导航、电力设施和航天系统等造成很大危害，也能作为日地能量耦合过程的示踪器。因此，极区电离层“等离子体云块”的相关研究是国际空间天气和空间物理学领域中最重要研究课题之一。

山东大学张清和教授、中国极地研究中心张北辰研究员等在国家自然科学基金（批准号：41274149, 41104091）的

资助下，利用包含我国子午工程南极中山站高频雷达在内的国际超级双子极光雷达网（SuperDARN）和全球卫星导航系统（GPS）地面接收机所获取极区电离层全域对流和等离子体数据，首次直接观测到了一次强磁暴扰动地球期间，极区电离层“等离子体云块”的形成和完整演化过程，该成果在 *Science*(2013, 339: 1597-1600) 上作为当期亮点发表。

该成果是“磁重联”引入地球磁层50多年来首次直接完整的追踪证实整个磁层大尺度对流循环过程，为日地能量整个耦合过程提供了直接观测证据，有助于学界深入理解太阳风-磁层-电离层耦合过程，能为空间天气预测和预报以及极区电离层建模提供物理依据和科学支持。

图 SuperDARN 雷达和 GPS 地面接收站联合观测的极区电离层等离子体云块的完整演化过程 (a) 和北半球极区电离层等离子体云块演化过程示意图 (b)



高压技术助力“地心之旅”

High Pressure Technique Assisting a Journey to the Center of the Earth

外地核的组分和运动状态的研究不仅与人们的生活息息相关，更与国家的重大需求密切相关。引发地球表面的地震、火山等自然灾害的地幔对流却与外地核的组分和温度密切相关。外地核的运动状态与地磁场密切相关，而地磁场的变化影响航天器的飞行安全。但有关外地核的组分还存在诸多争议。近年来日益成熟的高压技术能够模拟外地核的温度和压强环境，为研究地核的组分和运动状态提供了有效的方法和途径。

武汉理工大学黄海军教授及其课题组，与中国工程物理研究院经福谦研究员、美国卡内基科学研究院地球物理实验室的费英伟教授合作，在国家自然科学基金（批准号：41074056）等的资助下，利用高压实验装置——二级气体炮对外地核候选物质进行了系统的研究。将高温高压实验原位测量的 Fe-S、Fe-O-S 体系的密度和声速与根据地震波数据给出的外地核的密度和声速相对比，发现外地核是贫氧的。即早期地球吸积

过程是在还原条件下完成的，这对研究类地行星的演化过程具有重要意义和参考价值。部分成果发表在 *Nature*（2011，479：513-516）上。国际著名地球物理学家 Thomas S Duffy 教授在同期 *Nature* 上撰写了推介文章，认为这一原创性成果，将解决 60 年来关于外地核中化学成分的争论。同时 *Science News*、*Science Daily*、*Nature China* 也将这项研究成果作为研究亮点进行报道。



图1 高压实验装置——二级气体炮

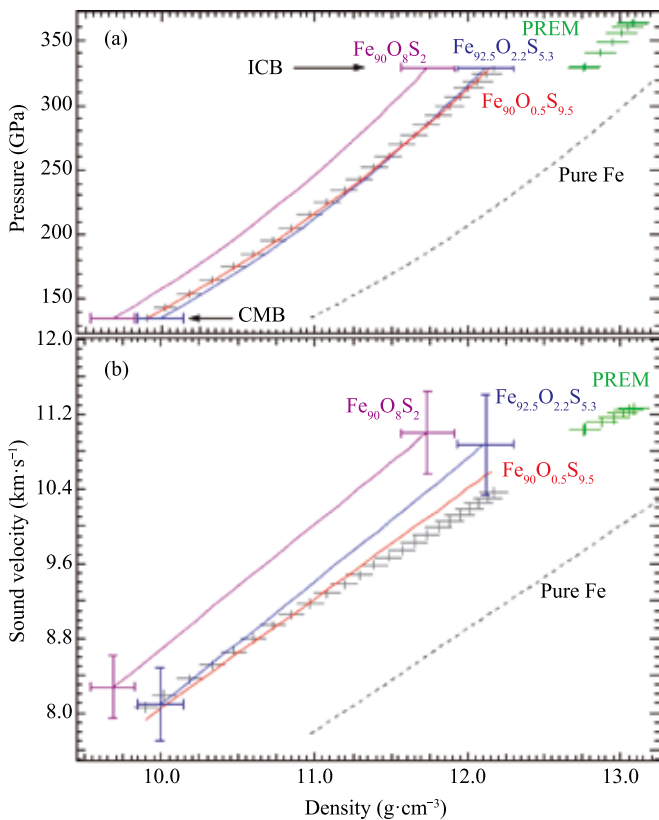


图2 外地核温度和压强环境下 Fe-O-S 体系密度和声速与 PREM 模型的比较

地球系统动力学模式的理论框架及初步设计

The Theoretical Framework of Earth System Dynamic Model and Its Preliminary Design in IAP/CAS

中国科学院大气物理研究所曾庆存研究员在国家自然科学基金(批准号:40830103)的资助下,应对全球气候与环境变化的急迫需求,探讨地球系统动力学模式的总体理论框架,针对目前一些难点和重要科学问题作了深入研究。

提出了地球系统动力学模式的总体理论框架,开展分系统模式和一些关键过程的理论和离线实验,均已获得很好结果,为我国自主研制地球系统动力学模式奠定了稳固的理论基础。

基于上述成果,当前 CAS-ESM 第一版本已研制成功,由大气环流模式、大洋环流和海冰模式、陆表物理过程和水文过程模式、全球植被动力学模式、气溶胶和大气化学过程模式、海洋生物

地球化学模式以及陆表生物地球化学模式七个子系统模式,以及它们间相互耦合和全耦合组成,该模式系统可用于模拟地球系统各自演化过程及它们之间的相互作用,以及各圈层的物理、化学和生物过程。

理论和方法上的独创:①研制新一代大气环流模式,提出保持质量和有效能量守恒的动力框架,并引入一些灵活性算子。②提出基于阵风的气溶胶粒子发射模型,改进自然源气溶胶的地表发射。③提出适定的大洋环流模式中的盐度上边界条件,并已在海洋环流模式中应用良好。④自主研发核心物理过程模块:云-气溶胶-辐射相互作用集合模拟系统,优化大气环流模式和气溶胶模

式的辐射方案。⑤自主研发全球植被生态动力学模式,包含特有的灌木林模块、新的火干扰影响模块、萌衍方案等,且保持内部协调性,模拟得到全球植被分布,并与观测对比。

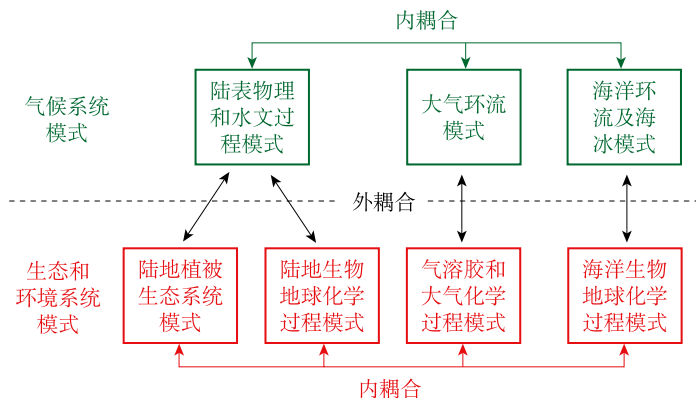


图 中国科学院
地球系统模式示意图

南亚高压、亚洲夏季风和青藏高原影响的动力问题

Dynamics of South Asian High, Asian Summer Monsoon and Tibetan Plateau Impacts

中国科学院大气物理研究所吴国雄研究员研究团队在国家自然科学基金(批准号: 40875034, 41275088, 40925015)等的资助下, 基于天文、水文、位涡和纬向非对称不稳定理论研究南亚高压、亚洲夏季风和青藏高原影响的动力问题。

该研究揭示强对流潜热激发南亚高压产生和失稳并影响亚洲夏季风各子系统爆发进程的机制; 用其发展的 Sverdrup 关系和修正的 Gill 模型揭示夏季南亚高压和上对流层暖中心在亚洲副热带形成及其年际和年代际变化机理。阐明由于青藏高原强迫、南亚海陆分布和海气相互作用在孟加拉湾形成春季暖池和季风爆发涡旋、在其西部形成季风爆发障碍、并在印度西海岸形成强迫惯性不稳定, 导致亚洲夏季风首先在孟加拉湾东部爆发、然后东传至南海、最后出现在印度的三阶段。证明南亚夏季风的形成和维持是青藏高原加热作用而非其对干冷空气的隔断作用: 高原表面加热所激发的位涡-位温强迫形成强大表面气旋式环流, 使水汽从海洋向陆地输送并形成大陆季风; 亚洲夏季风是热力驱动的。

成果在 *Sci. Rep.*、*Clim. Dynam.* 等期刊上发表, 并被 *Nature*、*Science* 报道; 对理解亚洲夏季风本质、预测其变化具有重要科学和应用价值; 被美国地球物理联

合会 (AGU) 誉为开创性贡献 (seminal contributions)。吴国雄 2012 年当选英国皇家气象学会名誉会士 (Honorary Fellow)、2014 年获陈嘉庚地球科学奖、2015 年当选 AGU 会士 (Fellow)。刘屹岷 2012 年获国务院特殊津贴、2014 年入选国家百千万人才工程。

图1 亚洲夏季风形成示意图

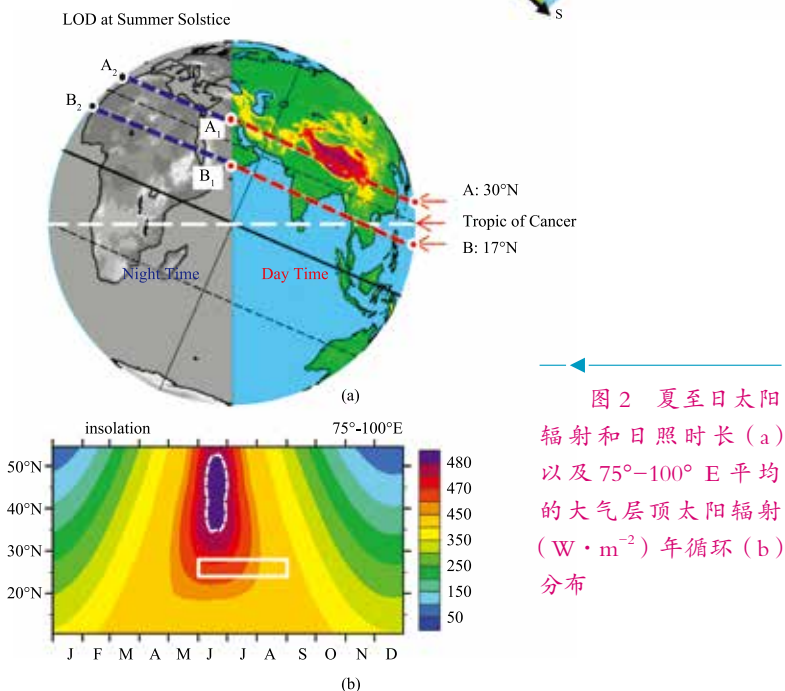
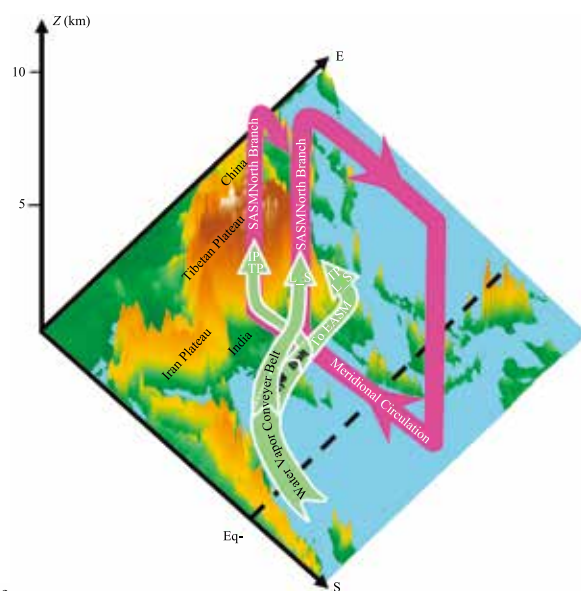


图2 夏至日太阳辐射和日照时长 (a) 以及 75°-100° E 平均的大气层顶太阳辐射 ($W \cdot m^{-2}$) 年循环 (b) 分布

国际贸易对全球大气环境的影响

International Trade and Global Atmospheric Environment

北京大学林金泰研究员在国家自然科学基金(批准号: 41422502, 41175127, 41005078)等的资助下, 与国内外合作单位联合研究国际贸易和大气运动耦合导致的双向大气污染转移及其对区域空气质量的影响, 部分成果发表在 *PNAS* (2014, doi: 10.1073/pnas.1312860111) 上并获 2015 年度 Cozzarelli 奖。

产品生产和消费相关的工业、交通运输、电力生产等经济活动导致大量污染排放。国际贸易使产品的生产及相应的污染排放从消费国转移到出口国, 而

各国生产同一产品导致的排放量也有所区别, 因此国际贸易改变了排放的空间分布和全球总量, 并与大气输送过程结合, 对全球和区域大气环境产生重要影响。目前这方面的研究几乎是空白。林金泰团队首先研究中国的国际贸易相关的经济活动对全球大气污染和传输的影响, 发现仅 2006 年中国东部地区近地面硫酸盐颗粒物有近三分之一来自与产品出口相关的经济活动, 其中出口美国导致的污染占出口相关总污染的五分之一, 并且部分污染物可通过大气输送影响美国(图 1)。发现美国从中国进口产品而减少美国排放, 但增加了中国的污染排放和大气传输, 其净效果是中国地区和美国西部的硫酸盐污染增加而美国东部的污染减少了(图 2)。若美国通过加强技术支持等手段帮助中国减排, 不仅能改善中国的空气质量, 同时也能降低美国西部的污染。因此, 对国际贸易的相关环境影响的评估有益于增强国际交流和协作, 减少全球污染排放和传输。

图 1 2006 年中国产品出口相关的硫酸盐对北半球近地面硫酸盐的百分比贡献

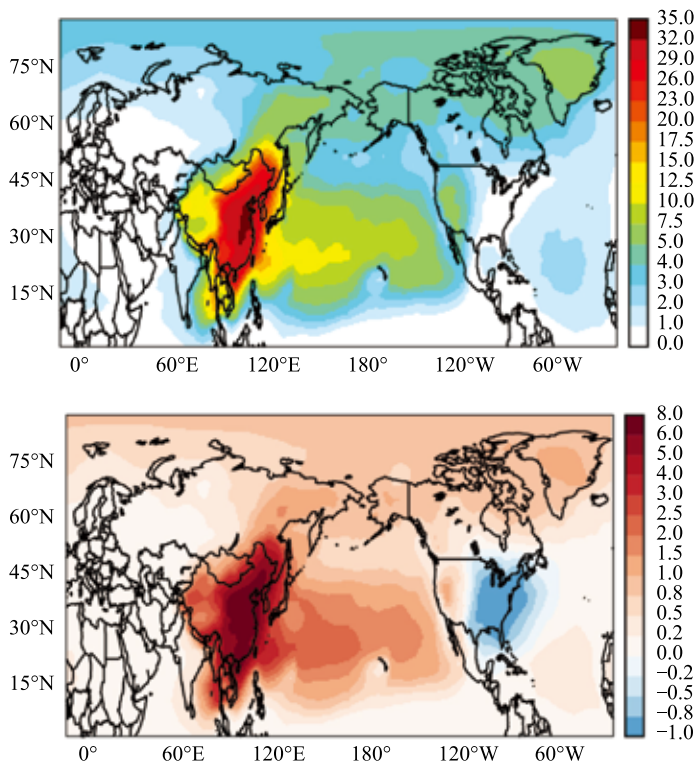


图 2 2006 年美国从中国进口产品与自身生产相应产品相比, 对北半球近地面硫酸盐的百分比影响

南海与邻近热带区域的海洋联系及动力机制

The Oceanic Connections between the South China Sea and Its Adjacent Tropical Regions and Their Related Dynamic Mechanisms

过去对南海的研究多局限于季风驱动的封闭和半封闭海盆，南海通过吕宋海峡和太平洋存在密切的水交换，但环流形态的认知仍局限于季风驱动的半封闭边缘海海盆环流特征。南海在沟通热带太平洋和印度洋环流过程中的贡献，之前尚不清楚。

中国科学院南海海洋研究所王东晓研究员等在国家自然科学基金（批准号：40830851）等的资助下，开展了南海与邻近热带区域的海洋联系及动力机制的研究，相关研究成果获2014年度国家自然科学奖二等奖。

揭示了南海环流“贯通”特征，确定了南海贯穿流在联系西太平洋和东印度洋中的重要地位。在揭示南海环流“贯

通”特征的同时，基于地形-斜压联合效应的动力学理论揭示了南海暖流形成的遥强迫新机制，发现了南海贯穿流-南海西边界流-南海暖流/涡旋动力关联。证明了南海贯穿流的区域气候效应，确定了南海贯穿流在南海与邻近海域热盐再分配的重要地位。

以上成果在南海环流开放性“贯通”特征及其影响方面提出了创新性认识，形成了“南海贯穿流”理论，打破了之前印尼贯穿流是两大洋唯一通道的大洋环流理论的局限性，为我国区域海气耦合业务预报模型的建立与改进提供了新的理论基础，提升了中国海洋学家在该领域的国际影响和地位。

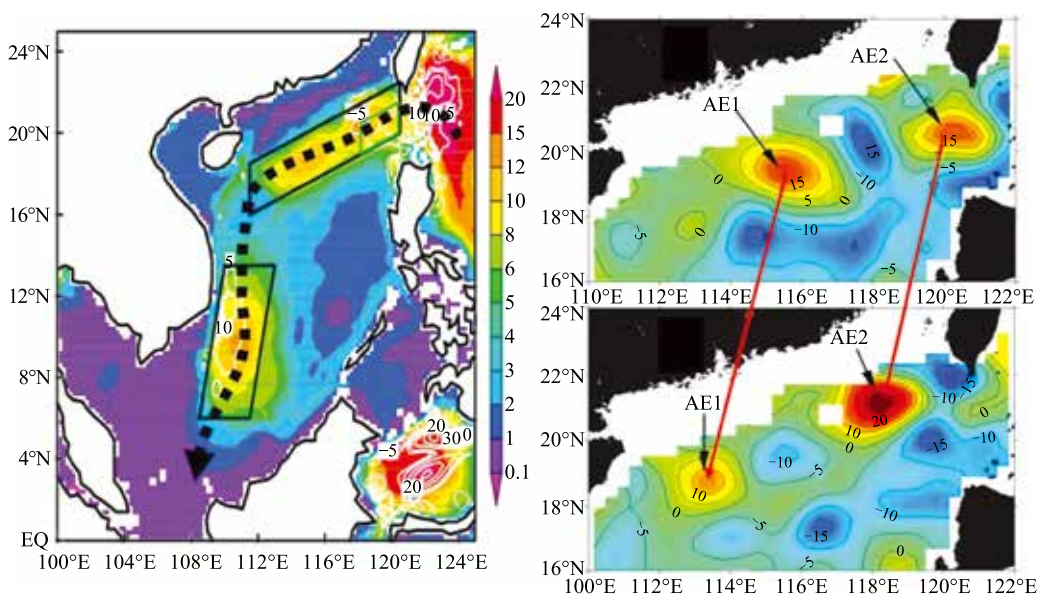


图 南海贯穿流是南海中尺度涡旋发展的能量源泉，也是中尺度涡旋运动的牵引者

海洋酸化提高浮游植物苯酚类物质的含量及其食物链效应

Ocean Acidification Increases the Accumulation of Toxic Phenolic Compounds Across Trophic Levels

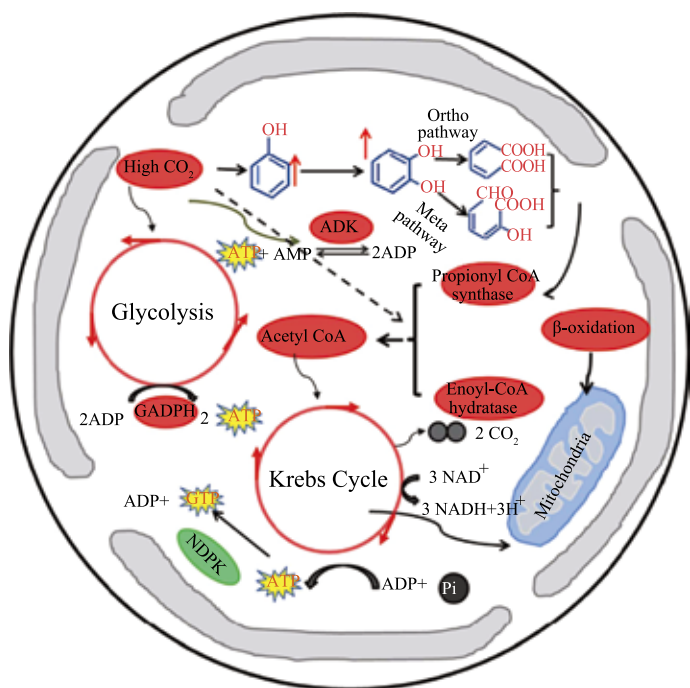
海洋,以每小时一百万吨以上的速率,从大气中吸收 CO_2 ,缓解全球变暖的同时,却使海水 pH 不断下降,引起海洋酸化(海水 $p\text{CO}_2$ 、 H^+ 和 HCO_3^- 增加,而 CO_3^{2-} 浓度下降)。该化学环境的变化,影响海洋生物的代谢与生存;然而,其影响机理尚不清楚;虽已有不少报道,但争议性强,不确定性大。

厦门大学高坤山教授及其课题组在国家自然科学基金（批准号：41430967，41120164007）的资助下，历时五年，结合多种实验手段，在不同规模培养体系（实验室内，微与中尺度生态系统装置）中开展了一系列研究，阐明了浮游植物在海洋酸化条件下增加毒性物质——苯酚类的含量，并使得次级生产

者浮游动物体内的该类物质也升高,显示了酸化影响的食物链效应。该成果发表在 *Nat. Commun.* 上 (DOI: 10.1038/ncomms9714, 2015)。研究发现,钙化浮游植物在两种 CO_2 浓度条件下 (对照组: $395 \mu\text{atm}$; 酸化组: $1000 \mu\text{atm}$) 蛋白表达有明显差异。并根据蛋白种类的变化,建立了如下科学假设:酸化促进该藻类 β -氧化、柠檬酸循环、糖酵解等代谢途径,会使得细胞内苯酚类(毒性物质)含量升高,并产生食物链效应。通过微(30 升)和中尺度(4000 升)生态系统装置与设施进一步研究发现,浮游植物群落苯酚类物质含量和呼吸速率,与对照组相比,在酸化条件下,分别增加了 46% ~ 212% 和 130% ~ 160%。在此基础上,将微、中尺度生态系统中生长的浮游植物喂食浮游动物,发现浮游动物体内苯酚类物质含量也明显升高,增加了 28% ~ 48%。该结果表明以上理论假设成立。发生上述变化的内在机制是:浮游植物为了应对海水酸化胁迫,促进苯酚类物质的合成,并通过其降解增加细胞抵御酸性胁迫所需要的额外能量。

研究表明,随着海洋酸化的进一步恶化,食物链能量与物质的传递可能会受到影响,甚至殃及海产品的质量。然而,这种效应在不同海域或生态系统中,是否同样存在,尚需要进一步验证。

图 海洋酸化诱导
钙化浮游植物细胞内上
调(红色)或下调(绿
色)的代谢途径



海洋变暖对全球表面温度上升速度减缓的影响作用分析

The Contribution of Global Ocean Warming to Global Surface Warming Slowdown

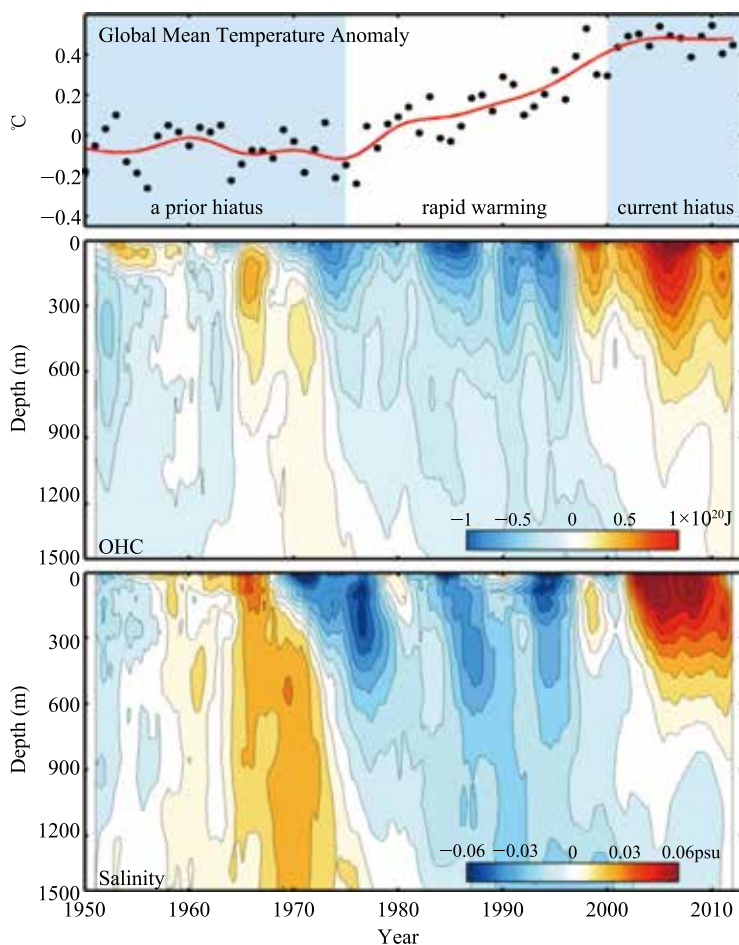
1998 ~ 2013 年, 尽管温室气体排放及其所导致的热辐射强迫仍然加速上升, 全球气候系统一直在吸收热量, 但是全球平均表面温度却呈现上升速度减缓甚至停滞的趋势 (即全球变暖“减缓”)。揭示全球变暖“减缓”的动力学原因, 了解影响和调控全球表面温度变化的关键物理过程, 是进一步认识人类活动对气候变暖的贡献, 提升未来气候变暖趋势预测能力的关键问题。

中国海洋大学陈显尧教授在国家自然科学基金 (批准号: 41330960, 41176029) 的资助下, 与美国华盛顿大学 Ka-Kit Tung 教授合作开展了 1998 ~ 2013 年间全球表面温度上升速度减缓的特征和机制研究。

通过分析全球海洋三维温 - 盐结构的变异规律指出, 上层海洋变暖是解释全球变暖“减缓”的关键原因, 向深层输送热量主要发生在北大西洋和南大洋, 大洋热盐环流变异是热量向中深层海洋输送的主要机制。类似的变暖“减缓”现象曾发生在 1950 ~ 1970 年, 并且两次事件中北大西洋 0 ~ 1500 米层海洋

温度和盐度都具有非常显著并同步的多年代际振荡特征。该成果发表在 *Science* (2014, 345: 897-903), 为科学预测气候变暖“减缓”还将持续多长时间提供了新的理论和依据。

图 全球平均表面温度以及北大西洋北部海洋热含量和盐度的垂向分布



深俯冲大陆地壳脱水熔融与壳幔相互作用

Dehydration Melting of Deeply Subducted Continental Crust and Crust-Mantle Interaction

俯冲带变质脱水和部分熔融是壳幔相互作用的基本过程。这些过程可以发生在俯冲带的不同深度,具体受俯冲带热结构控制。深俯冲洋壳在热俯冲带发生部分熔融,导致埃达克岩的产出。然而,由于大洋俯冲带缺乏直接出露的超高压变质岩,人们对深俯冲洋壳在冷俯冲带的变质脱水和部分熔融行为知之甚少,限制了人们对大洋俯冲带壳幔相互作用机制和性质的理解。

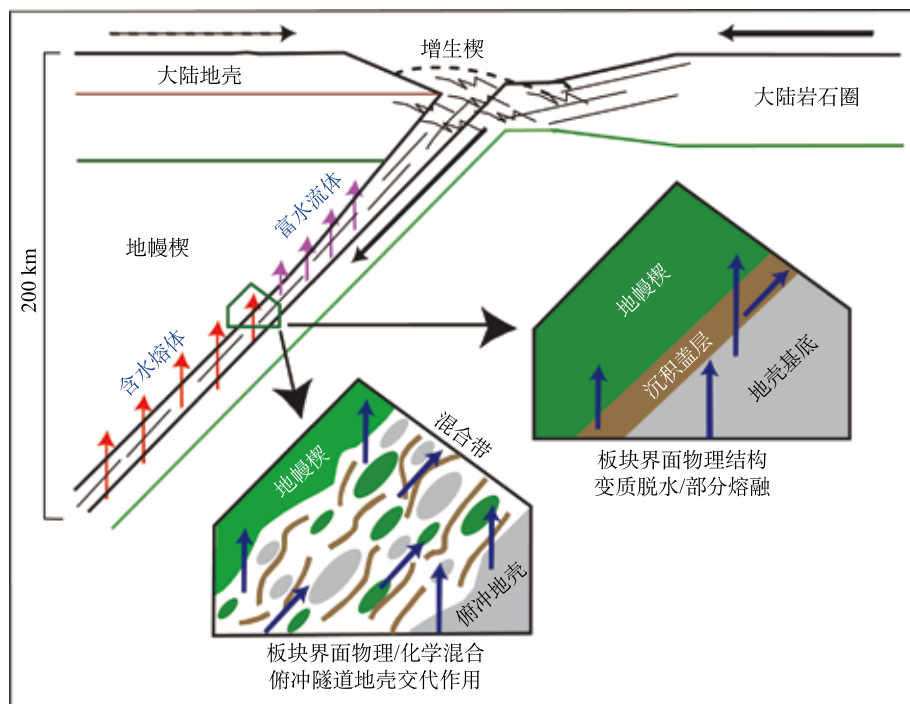
中国科学技术大学郑永飞教授领导

的研究组在国家自然科学基金(批准号:40921002,41221062)的资助下,在中国东部大别-苏鲁造山带和西部柴北缘造山带超高压变质岩中,发现了一系列深俯冲地壳岩石脱水熔融的证据,提出了区分变质矿物与深熔矿物的地球化学标准,确定了不同类型超高压岩石部分熔融的时限、机制、程度和范围。

大陆俯冲带属于冷俯冲带,出露的超高压变质岩含有地幔深度脱水熔融的信息。项目组通过现代岩相学和显微结

构分析以及矿物地球化学研究,发现脱水熔融产物可以是含水熔体的聚集形成长英质细脉,或在超高压变质矿物内部形成多相固体包裹体,或在层状超高压变质岩石内部形成长英质的浅色脉体,甚至在造山带橄榄岩中形成深熔锆石。超高压变质岩的脱水熔融有利于俯冲带深变质过程中超临界流体的形成,对俯冲带元素活动性以及超钾岩浆成因具有重要意义。

图 大陆俯冲带
脱水熔融和壳幔相互作用



汶川地震地质灾害评价与防治

Assessment and Control of Geo-hazards Triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake

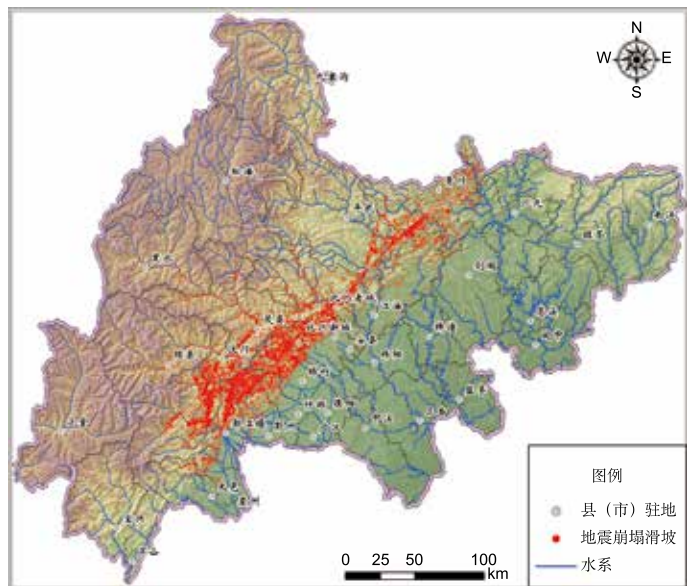
2008年5.12汶川大地震是新中国成立以来首次发生在人口密集山区的8级强震，触发了数万处崩塌滑坡地质灾害，其数量之多、规模之大、类型之齐全、成因机理之复杂，在全世界范围内都极为罕见和独特，其现象和科学内涵已远远超出人们原有的认识。抓住汶川地震这千年一遇的极震事件并将其作为1:1的地震天然试验场，对汶川地震触发的地质灾害开展深入系统的科学研究，既是丰富和提升人类对强震触发地质灾害认知水平的迫切需要，也是汶川地震灾后科学重建和进一步提升我国广大高地地震风险山区地质灾害防治能力的迫切需要。

成都理工大学黄润秋教授及其课题组在国家自然科学基金（批准号：40841009）等的资助下，通过大量的现场调查、遥感解译、现场观测与监测、大型振动台试验、数值仿真模拟以及理论分析等综合手段，系统揭示了强震触发地质灾害发育分布规律和复杂斜坡动力响应规律，为科学防范震区次生灾害和灾后重建城镇选址提供了重要科学依据；首次发现以“拉裂”为主的强震触发崩滑灾害成因机理，提出新的强震地质灾害成因机制分类体系；揭示了强震

后泥石流灾害的启动机理和发展趋势，建立了震区泥石流预警模型，研发了泥石流实时监测预警系统，成功预警多起泥石流事件；提出了强震区泥石流防治“水砂分流”、“柔性排导槽”等新思路和新工艺，解决了震区大规模泥石流治理的难题。

项目组先后向国家有关部门提供咨询意见20余份，研究成果已直接应用于指导汶川地震、芦山地震、鲁甸地震等抗震救灾和灾后恢复重建过程中科学选址和地质灾害防治工作，取得了显著的社会和经济效益。研究成果获2014年度国家科学技术进步奖一等奖。

图 通过现场调查和遥感解译制作的汶川地质灾害空间分布图



激光雷达的研制及其对空间和大气环境的探测

Lidar Manufacture and Its Application in Detecting Space and Atmospheric Environments

激光雷达是用激光束作为辐射源的一种遥感探测设备,它能以优良的时空分辨对大气和空间环境进行原子分子水平的遥感测量。武汉大学易帆教授及其研究团队在国家自然科学基金(批准号:41221003, 41327801)的资助下,自主研制出多台代表当代技术发展水平且探测能力位居世界前列的大型激光雷达系

统,通过观测获得了具有重要科学意义的发现。

地球上空 80~110 km 中层顶区域存在全球覆盖的金属原子层。研究金属层对于理解该区域的环境特征,阐明其基本物理过程具有重要意义。利用自主研制的三台共振荧光激光雷达观测,研究团队获得了多项具有重要科学价值的新发现,主导了当今世界中层顶金属层共体积(common-volume)测量研究[见(Plane et al. *Chem. Rev.*, 2015)的引用和评述]。共体积测量还发现 Fe 和 Na 层结构和变化的普适关系,激起了国际上二个激光雷达研究组的强烈兴趣,他们模仿追循易帆教授研究团队的工作,获得了相同的结果(Huang et al. *JGR*, 2013; Yue et al. *JGR*, 2013)。表明发现的 Fe-Na 关系具有全球普适性,代表了金属原子层内在固有的规律。这大大推动人们对中层顶区域基本物理过程的理解。

研制出测量精度排位世界第二的纯转动拉曼测温激光雷达,观测发现了对流层温度小尺度变化的普适特征。还研制出世界上第二台测量大气中气-液二相水,谱分辨的拉曼激光雷达,为云/气溶胶研究提供了有效工具。

图 1 纯转动拉曼测温激光雷达的发射机

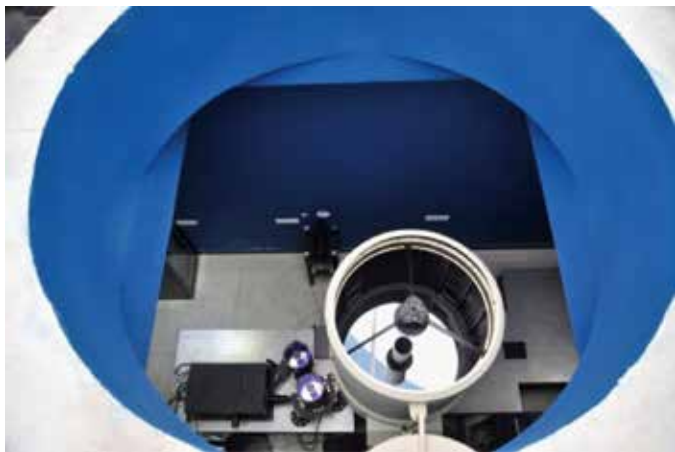


图 2 纯转动拉曼测温激光雷达的接收系统



NSFC

国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

工程与材料科学部



新型磁热效应材料的发现和相关科学问题研究

Discovery of Novel Magnetocaloric Materials and the Investigations on Related Scientific Issues

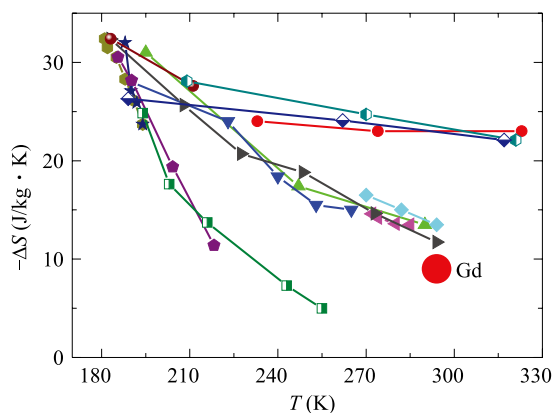
中国科学院物理研究所沈保根研究员等在国家自然科学基金(批准号: 59525101, 59871062, 50271082, 50571112, 10174094)的资助下, 在 $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ 基化合物、Heusler 合金等材料设计和磁热效应研究方面取得了一系列有国际影响的原创性成果。

与普通气体制冷相比, 以磁热效应为基础的磁制冷技术, 具有绿色环保、高效节能等优点。高效磁热效应材料的探索不仅涉及一系列重要科学问题, 也关系到国家能源战略的需求及可持续发展。探索高效磁热效应材料是几十年来国际上材料研究的重要课题。沈保根团队系统研究了稀土-过渡族金属间化合物的结构、磁性和磁热效应, 发现了一类新型 $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ 基大磁热效应材料, 室温磁熵变值超过传统稀土材料 Gd 的 2 倍, 获得了 $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ 基材料的核心发明专利, 阐明了巨大磁热效应来源于与之相伴的晶格负热膨胀和巡游

磁热效应的密切关联, 证明了大磁热效应来源于磁场对马氏体结构相变的调节。从理论和实验上研究了 Maxwell 关系用于一级相变体系熵变值的方法, 指出了之前 *Nat. Mater.*、*Phys. Rev. Lett.* 等论文中报道超大磁熵变的错误, 给出了相分离体系磁熵变的确定方法, 解决了多年来国际上一直有争议的重要基础性问题。美国工程院院士 Gschneidner 教授指出“中国科学家证明了直接用 Maxwell 关系计算熵变对相分离体系不适用”, 曾在 *Nat. Mater.* 报道超大磁熵变材料的作者 Carvalho 等也发表论文认同他们的观点, 并修正了原有工作的错误。

据 Web of Science 统计, 自他们 2000 年第一篇论文发表以来国内外已有 130 多个实验室相继开展了 $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ 基材料的磁热效应研究。 $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ 基化合物已成为目前国际上最受重视并在室温磁制冷样机上得到应用的三类材料之一。代表性论文的引用数是国际上 80 年来有关磁热效应论文被引用次数最高的 7 篇论文之一。美、日、欧多个国家的有关单位将 $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ 基材料用于了样机试验, 其中美国国家航天技术中心 2010 年的样机试验表明, $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ 基材料的制冷能力超过 Gd 的 2 倍。该项成果获 2010 年度北京市科学技术奖一等奖、2012 年度国家自然科学奖二等奖和 2014 年度陈嘉庚技术科学奖。

图 $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ 基材料的磁熵变 (ΔS) 宽温区可调, 室温附近超过传统材料 Gd 的 2 倍



电子变磁转变行为, 提出了寻找大磁热效应材料的判据。在 Heusler 合金 NiMnGa 中发现了室温大磁热效应, 揭示了磁弹性和

纳米金属力学行为尺度效应的微观机理研究 Size Effect of Mechanical Behavior and Microstructural Mechanism in Nanocrystalline Metals

中国科学院力学研究所武晓雷研究员等在国家自然科学基金（批准号：50471086，50571110，10721202，11021262）的资助下，在纳米金属宏观力学行为尺度效应及其微观机理研究方面取得了重要成果。

金属材料晶粒尺度从通常的几十微米减小至几百、甚至几十纳米时，宏观强度提高了 5 ~ 25 倍、但均匀拉伸塑性显著降低，归因于从传统位错塑性转变为晶界塑性产生的尺度效应，澄清尺度效应的微结构机理是理解并调控宏观性能的关键科学问题。利用电子显微分析和分子动力学计算模拟研究相结合，从纳米金属的变形微结构形成与演化入手，

发现了孪生变形倾向随晶粒尺度减小的逆尺度效应特性，描绘了纳米金属孪生变形、层错和点阵位错形成等微结构形成、演化和交互作用的新规律以及对材料宏观强韧性能的影响机制。

研究成果提供了刻划纳米结构金属力学行为跨尺度力学理论的物理基础，丰富了纳米金属变形物理的内涵。美国加州理工大学 J R Greer、麻省理工学院 C A Schuh、西北大学 J Weertman 教授等多个课题组，也开展了基于纳米金属尺度效应实验和理论的跟踪和拓展研究。研究成果获 2013 年度国家自然科学奖二等奖。

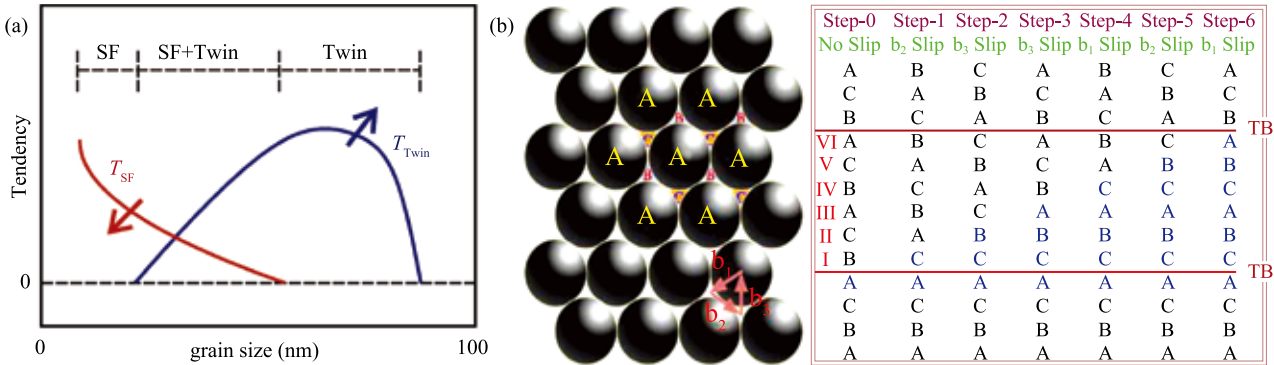


图 纳米尺度内层错 (SF) 与孪生变形 (twin) 倾向的尺度效应 (a) 及纳米金属无宏观应变孪生变形的位错机制 (b)

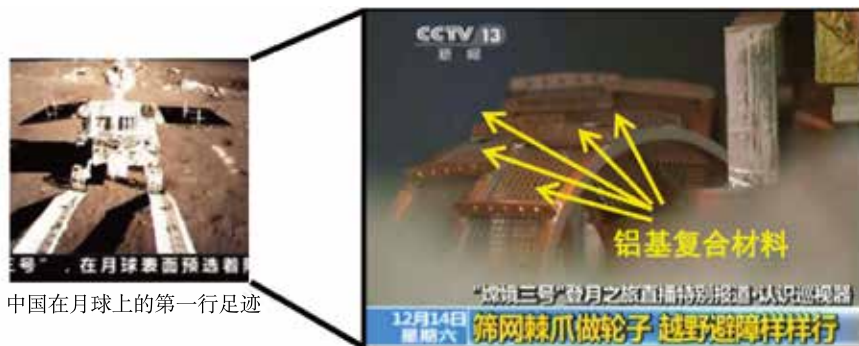
航天用非连续增强金属基复合材料制备科学研究

Research on Fabrication of Discontinuously Reinforced Metal Matrix Composites

非连续增强金属基复合材料在航天等高科技领域占据战略地位。上海交通大学张荻教授领衔的科研团队在国家自然科学基金(批准号:59471011, 59631080, 50671064, 50271041, 50871066)等的连续资助下,针对制约该材料发展的复合调控难、界面匹配难、形变加工难三个瓶颈问题开展了复合设计热/动力学、界面调控、形变加工机理三方面系统的基础工作,取得的主要基础研究成果为:①建立了金属基复合材料制备过程中的热/动力学理论模型。②揭示了增强体与基体的复合界面调控规律。③发现并揭示了非连续增强铝基、钛基复合材料塑性及超塑性形变机理。

研究成果构筑了非连续增强金属基复合材料共性基础理论,获美国空军实验室首席科学家 D B Miracle 教授等高度评价 30 余次。基础研究成果有力地支撑了国家航天领域的重大需求,先后为“嫦娥三号”及“玉兔号”月球车为代表的探月工程、卫星、空间站等 20 余种重要航天器创制和提供了 6000 余件高品质、轻质高强多功能复合材料及关键构件,为航天高科技发展和维护国家安全做出了重要贡献。研究成果先后获 2003 年度上海市科技进步奖一等奖、2006 年度上海市自然科学奖一等奖和 2015 年度国家自然科学奖二等奖。

图 月球车行走机构用铝基复合材料棘爪



热电输运新效应与新型高性能热电材料设计

Study on Thermoelectric Transport Mechanisms and Design of Novel Thermoelectric Materials

中国科学院上海硅酸盐研究所陈立东研究员等在国家自然科学基金（批准号：51121064，51222209，11234012，51472262，51372261）等的资助下，在热电输运新效应探索和新型高性能热电材料设计方面取得了重要成果。

热电转换技术利用半导体材料实现热能和电能之间直接相互转换。目前，热电材料的广泛应用受制于其较低的性能优值和有限的材料体系，通过多尺度微观结构设计实现电热输运协同调控是实现高性能热电材料的重大挑战。基于原子分子层次的晶体结构设计调控，并通过实验研究与材料计算的高度融合，揭示了晶体结构-电子结构-晶格振动等结构要素之间的本征关联及其对电热输

运性能的影响机制；针对多种不同结构特征的热电材料体系，建立了结构调控与微观设计方法。针对典型孔洞结构方钴矿热电化合物，提出了宽频声子散射机制 [图 (a)] 并设计合成了中温区高性能热电材料，该成果被美国 MIT 等团队誉为里程碑的工作；发现了 $\text{Cu}_{2-x}\text{Se/S}$ 等快离子导体化合物的类液态热电输运效应及其微观机制 [图 (b)]，在多种材料体系中实现了高热电性能，引发了国际上对该类体系新型热电材料的研究热潮；开发了高效热电器件及其应用技术，推动了热电材料科学和技术的发展。部分研究成果获 2013 年度国家自然科学基金二等奖。

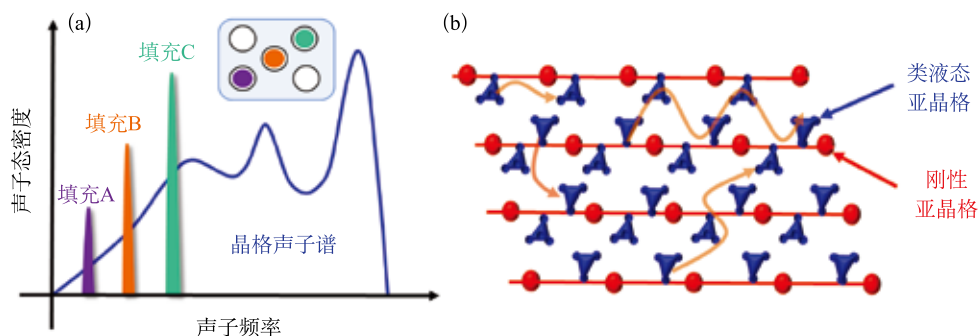


图 方钴矿填充原子的宽频声子散射机制 (a)、 $\text{Cu}_{2-x}\text{Se/S}$ 等快离子导体化合物晶体结构的两套独立亚晶格结构及其产生的类液态热电输运效应 (b)

声子晶体等人工微结构材料的新效应

Some Novel Effects in Microstructured Materials of Phononic/Photonic Crystals and Metamaterials

南京大学陈延峰教授等在国家自然科学基金(批准号: 50225204, 50632030, 11134006, 51472114, 10404012)和国家973计划的资助下,在声子晶体等人工微结构带隙材料方面取得了重要成果。

材料的物理性能不仅取决于材料的组分,还决定于材料的显微组织。最近20多年来,越来越多的研究表明:以光子晶体/声子晶体和超构材料为代表的人工微结构材料,通过有目的的人工设计,能够获得超越组元材料性质的新颖物性,实现了均匀材料所没有的,超乎想象的力、热、声、光、电、磁功能的突破。

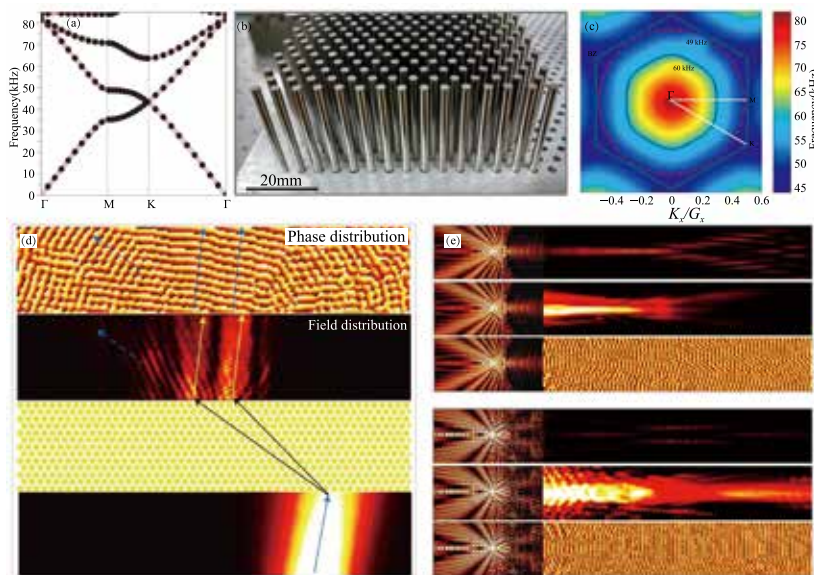
项目组利用人工微结构设计,对声子、光子能带进行裁剪,在声子晶体等人工微结构材料方面做出了一系列成

果:揭示了声子晶体新颖的折射规律,成功实现声波的单负折射和双负折射效应,以及声波超透镜聚焦成像。发展了一种宽带、无阈值的新型声波二极管原型器件。首次证实了声波异常透射现象和声表面倏逝波,拓展了亚波长材料与器件的研究领域。与加州理工学院合作在Si基光子芯片中观察到宇称-时间反演自发对称破缺现象,实现了1.55微米通信波段光波的单向传播与调控。研制了ZnO分布于无铅压电材料晶界处的0-3型微结构材料,解决了长期以来制约无铅压电材料实用化的热退极化问题。

相关论文被 *Phys. Rev. Lett.* 选为封面文章, *Science*、*Nature Mater.*、*Mater. Today* 等杂志分别以“单向隔声墙”、“声波的方向感”和“单向声波”为题作亮点评述。MIT的Maldovan在 *Nature* 上发表题为“声子学中声和热的革命”的综述论文指出:这一简单有效的方法打开了在片上集成声子器件实现声逻辑处理的大门。相关论文被 *Nature Mater.* 选为封面文章发表,美国工程院院士X Zhang撰文评述PT对称破缺临界点的工作。

研究成果获得2013年度中国物理学会叶企孙奖;获2013年度教育部自然科学奖一等奖和2015年度国家自然科学基金二等奖。

图 声子晶体材料(b)、能带设计(a)、等频线(c)和声波双负折射(d)及超透镜成像(e)



航空航天用高性能碳 / 碳复合材料基础理论与应用

Theory and Application of High-performance Carbon/Carbon Composites Applied in Aerospace

西北工业大学李贺军教授及其团队在国家自然科学基金（批准号：50225210，50372050，50572091，50072019，90716024）等的资助下，在航空航天用高性能碳 / 碳复合材料基础理论与应用方面取得了重要成果。

碳 / 碳复合材料属战略性高技术材料，是先进空天飞行器及其动力系统不可或缺的关键材料。近年来，高技术武器装备的跨代发展尤其是多个国家重大专项对碳 / 碳复合材料提出了更高温度、更抗冲刷、更长时间的严酷环境使用要求。研究团队针对影响该材料应用的一系列关键科学问题，揭示了不同织构热解炭形成机制，实现了基体热解炭的微结构精细调控，以 T300 碳纤维预制体制备出室温弯曲强度超过 500MPa、1700℃弯曲强度达 800MPa 的碳 / 碳复合材料。揭示了原位定向纳米管 / 线结构形貌控制与增强增韧机理，发展了微纳多尺度增强增韧方法，实现了材料强度与韧性的同步提高，满足了航空航天领域特殊热结构件的苛刻性能要求。揭示了涂层高温防护、自愈合与氧化失效机理，开拓了多相镶嵌、自愈合及纳米线增韧等多种涂层体系设计及制备方法，解决了涂层与基体界面相容性难题，使涂层在空气环境中防护寿命达 1500℃、1480h，1600℃、900h，在 1600℃燃气风

洞冲刷环境下的防护寿命超过 300h，为该材料在航空航天热结构热防护部件上的应用奠定了基础。

研究成果得到了国内外同行的高度评价：*Mater. Res. Lett.* 主编，美国 Y T Zhu 教授评价认为：“碳纳米管的引入显著提高了碳 / 碳复合材料的性能”。*Scripta Materialia* 前主编、美国工程院院士 J H Perepezko 教授认为：“制备的涂层具有良好的抗氧化和抗热震性能”。南洋理工大学纳米材料专家 K Zhou 教授在论文（*Pro. Mater. Sci.*，IF 27.417）中大篇幅评价认为：“纳米线拔出、桥连与诱导裂纹转向增韧机制显著提高了涂层氧化保护效果。研究成果获 2008 年度国家技术发明奖二等奖、2008 年陕西省科学技术奖一等奖及 2013 年度教育部技术发明奖一等奖；获全国百篇优秀博士学位论文 1 篇。相关理论成果已应用于兵器

XX 系列远程火箭弹、XX 超音速导弹发动机等陆海空军的多种高新武器装备及重点型号，为国防高技术武器装备的跨代发展提供了有力支撑。

图 抗氧化 / 碳
喷管 1600℃燃气风洞
试验考核



节油轮胎用高性能橡胶纳米复合材料的设计及制备

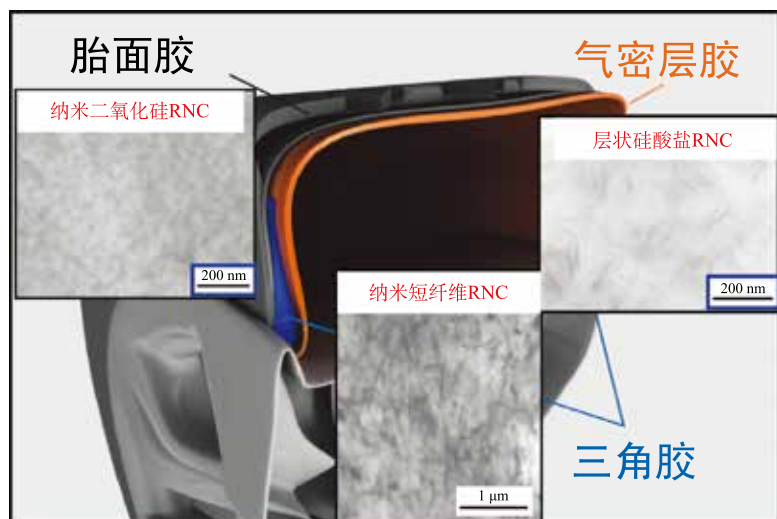
Design and Preparation of High Performance Rubber Nanocomposites toward Fuel-efficient Passenger Tyres

“节油、安全”已成为汽车轮胎的发展趋势,高性能橡胶纳米复合材料(RNC)是发展节油安全轮胎的关键。发展新型无机纳米填料的低成本纳米分散方法解决纳米填料的分散与界面调控难题,一直是困扰橡胶纳米复合材料规模化制备及应用的瓶颈。北京化工大学张立群教授研究团队在国家自然科学基金(批准号:50303002,50403029,50673010,50725310,51073009)等的长期资助下,在节油轮胎用RNC的设计与制备方面取得了重要成果。团队率先将分子模拟方法引入到复杂的橡胶复合材料体系的研究中,在纳米填料的分散与聚集、纳米复合材料的界面及非线性黏弹性等方面取得了重要的理论成果;发明了水相纳米解离-改性-乳液

共混共凝聚技术,开发了原位改性熔体分散技术,解决了不同纳米填料在橡胶中的纳米分散与界面调控的难题,进而开发了高性能的轮胎气密层用层状硅酸盐RNC、胎面用高填充纳米二氧化硅RNC、钢丝圈三角胶用纳米短纤维RNC,实现了规模化制备,研制出达到国际最好水平的节油安全轮胎(B/A级),产品80%以上出口。国际权威汽车杂志德国*AUTO BILD*对全球50个著名品牌轮胎测评,采用本成果生产的节油轮胎与米其林轮胎同获“最优”评价。本成果为我国轮胎行业应对欧盟轮胎标签法、各种贸易技术壁垒具有重要的支撑引领作用。

研究成果发表SCI收录论文134篇,SCI他引1672次,受到国际同行高度评价。参编4部英文专著,授权发明专利20项。在大型国际会议上作邀请报告和大会报告20余次。有关研究论文分别在澳大利亚第五届国际复合材料会议上获Klaus Friedrich最好论文奖,以及获英国材料、矿物和采矿学会Alan Glanvill Award最好论文奖。相关成果获2015年度国家技术发明奖二等奖。还获得中国石油和化学工业协会科技进步奖一等奖2项,中国产学研促进会中国产学研合作创新成果奖1项。

图 节油轮胎关键部件用橡胶纳米复合材料



实现高效率有机 / 聚合物太阳电池的新型聚合物材料及器件结构

Realization of High-efficiency Organic/Polymer Solar Cells Through Novel Semiconducting Polymers and Device Structures

有机 / 聚合物太阳电池是一种极具发展前景的太阳能利用技术，其大规模应用的关键在于大幅提高器件的能量转换效率。

华南理工大学曹镛教授团队在国家自然科学基金（批准号：50433030，50990065，51010003，51225301，91333206）的资助下，面向我国在新能源领域的重大需求，在推动本领域的发展中做出了若干原创性的贡献。

团队设计和合成了几类兼具高载流子迁移率、宽吸收光谱、合适能级、可溶液加工等诸多优良特性的聚合物光伏材料；研制出新型水 / 醇溶性共轭聚合物作为太阳电池电极 / 活性层界面调控层，开辟了一种实现器件开路电压及整体性能大幅提升的新途径。团队在国际上率先相继将单结聚合物太阳电池的能量转换效率提高到 8%、9% 以上，并在 2015 年公开报道了 10% 以上的效率。

相关成果得到国际国内同行的高度评价并引起大量的跟进研究，

研究团队也因此成为本研究领域国际领先团队之一。

近五年团队发表相关 SCI 论文 116 篇，其中 19 篇为 SCI 高被引论文。20 篇核心论文被他引达 5000 次。单篇论文最高他引 1800 余次，并在 2005 ~ 2015 年我国被引次数最高的 10 篇论文中排名第二，在物理学科高被引论文中排名第一。研究成果获 2015 年度国家自然科学奖二等奖并入选 2012 年度中国科学十大进展。

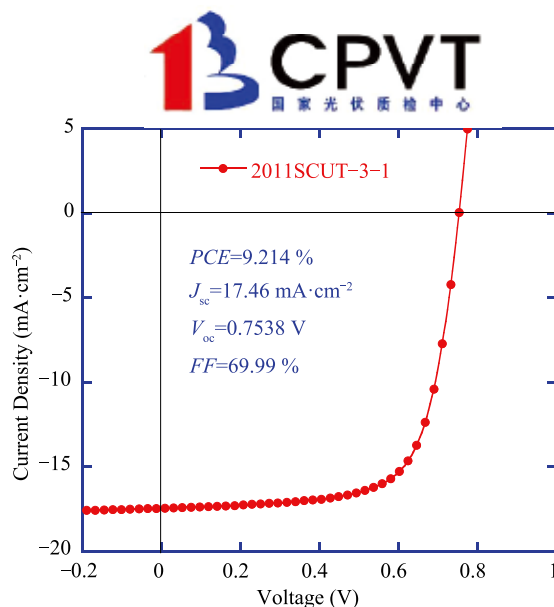


图 研究团队公开报道国际上首个能量转化效率达到 9% 的聚合物单结太阳电池的伏安特性图 (*Nature Photon.*, 2012, 6591-6595)

通用高分子材料的无卤阻燃高性能化

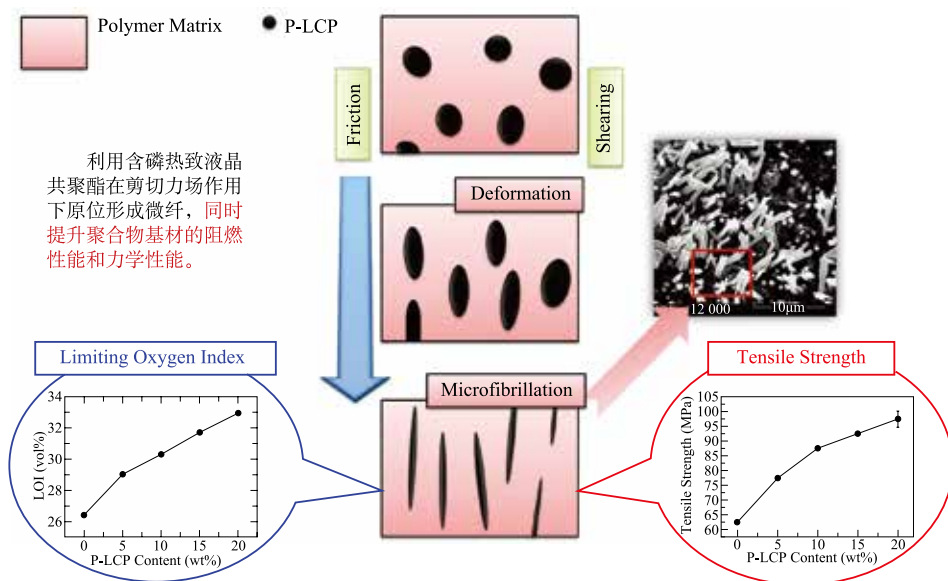
Halogen-free Flame Retardation of Polymeric Materials

要赋予通用高分子材料阻燃性能, 需要在其体系中引入阻燃剂或可产生阻燃作用的结构, 但这会导致材料力学性能的恶化, 而且一些高效的含卤阻燃剂因具有毒性或环境危害而被限用。因此, 在通用高分子材料的阻燃中, 迫切需要发展环境友好的无卤阻燃体系, 解决材料阻燃性能与高性能之间的矛盾。四川大学王玉忠教授在国家自然科学基金(批准号: 50525309, 50933005, 51073106, 51320105011)的资助下, 通过阻燃机理及构效关系研究, 提出和发展了一些新的阻燃原理和技术。例如: 提出了液晶高分子材料原位成纤增强阻

燃的学术思想, 发明了同时实现阻燃与增强的全新阻燃技术, 解决了添加传统阻燃剂会导致高分子材料力学性能下降的难题; 提出了炭源和气源一体化的膨胀阻燃体系设计思想, 发明了含氮超支化成炭剂及其构成的新型膨胀协同阻燃体系, 解决了难炭化高分子材料体系的无卤阻燃高效化难题; 发现了次膦/磷酸盐取代基影响其阻燃作用的规律与机制, 据此发明的复合与杂化协同阻燃体系用于纤维增强复合材料体系的阻燃, 在通过对本体的气相/凝聚相阻燃作用的同时, 还会在纤维表面形成凹凸不平炭化层阻止纤维导流作用, 从而解决了

“烛芯效应”难题。相关工作已发表 SCI 论文 130 余篇, SCI 他引 2800 余次, 特邀英文综述/专著 6 篇/章, 境外国际会议 Plenary 和 Keynote 邀请报告 9 次; 获得授权发明专利 31 项, 并在多家国内外企业实施应用, 取得了显著经济效益。获 2010 年度国家技术发明奖二等奖和 2015 年度四川省科技进步奖(技术发明类)一等奖。

图 液晶高分子阻燃剂的阻燃增强技术



生态环境材料与制备工程

Eco-materials and Processing Engineering

生态环境材料 (Eco-materials) 是新材料重点发展方向之一。在国家自然科学基金 (批准号: 50525413、51174010、51422401) 等的资助下, 北京工业大学聂祚仁教授坚持全生命周期环境友好的“生态环境材料与制备工程”研究, 近年在稀土难熔金属粉末冶金及循环再造材料工程科学方面取得突破。

以多元系复杂金属盐溶液单元配合与沉淀作用, 构建了多金属选择性“配合-沉淀”体系热力学模型, 预测分离行为及形式; 揭示了再生金属结构缺陷产生及抑制规律, 确定分解和稳定的临界条件, 实现了再生粉体结构性能修复 (XRD 峰的半高宽相差近 3 倍) 和活

化、特殊粉末成型; 提出了控制稀土盐分解与仲钨酸铵分解匹配的多元稀土钨复合新途径并优化获得最佳参数, 突破稀土钨深加工材脆性瓶颈。近期发表于 *Hydrometallurgy*、*Electrochimica Acta*、*Adv. Mater.* 等期刊。

解决材料流程 LCA 难题, 在 *Int. J. LCA* (UNEP、ISO 联合会刊) 发表了作者中 50% 以上的文章, 当选 *Int. J. LCA* 唯一中国编委。SCI 论文百余篇, 他引 2000 多次, 受邀为 *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* (IF 7.1) 等撰写综述; 授权发明专利 80 余项、获 2008 年度国家技术发明奖二等奖和 2010 年度、2012 年度国家科学技术进步奖二等奖。

图 2 “配合-沉淀”碳氮预沉锰热力学分析

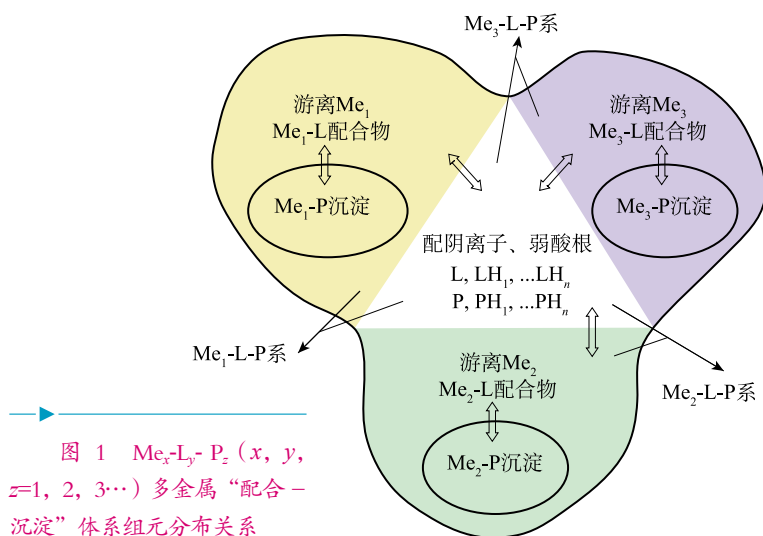
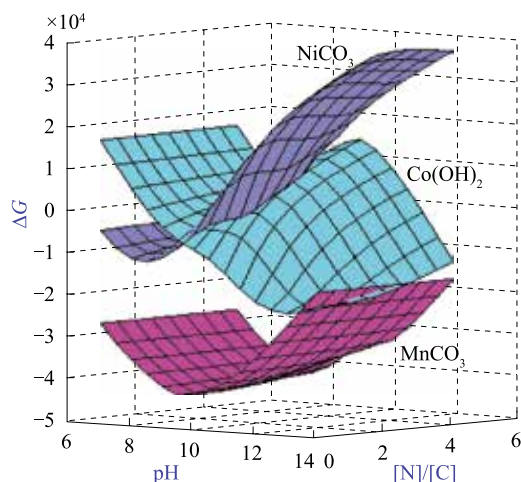


图 1 $Me_x-L_y-P_z$ ($x, y, z=1, 2, 3, \dots$) 多金属“配合-沉淀”体系组元分布关系



层状盐岩力学特性及油气地下储备

Mechanical Property of Bedded Salt Rock and SPR & UGS in Salt Caverns

盐岩, 由于其孔隙度低、渗透性小、损伤自恢复等特征, 是大规模油气地下储备、高放射性废物及工业废渣深埋的理想场所。与欧美等国海相沉积的盐丘型相比, 我国主要是湖相沉积的层状盐岩, 具有盐层薄、夹层多、杂质高等特征, 在这种地质条件下建库, 国内外尚无先例, 是世界级难题。

中国科学院武汉岩土力学研究所杨春和研究员在国家自然科学基金(批准号: 50725414, 50434050, 50374064, 41272391, 19972071)等的资助下, 在层状盐岩力学特性及其油气地下储备等方面开展了长期、系统深入的研究工作, 取得了系列研究成果。

揭示了夹层及界面对层状盐岩储库稳定性和密闭性的影响机理, 建立了夹层的有限可控垮塌理论, 解决了大型层状盐岩储库长期稳定性建模中的重大技术难题, 从理论与实践上证明了层状盐岩地下油气

储备的可行性, 并找出了其适用条件。

针对我国层状盐岩盐层薄、夹层多的特征, 提出了小厚度保护层设计准则和小间距安全矿柱标准, 解决了我国层状薄盐层中能够建大腔、多建腔的问题。制定了“运行压力、采气速率、运行模式”为三要素的设计标准及方法, 为我国储气库实施提供了科学依据。

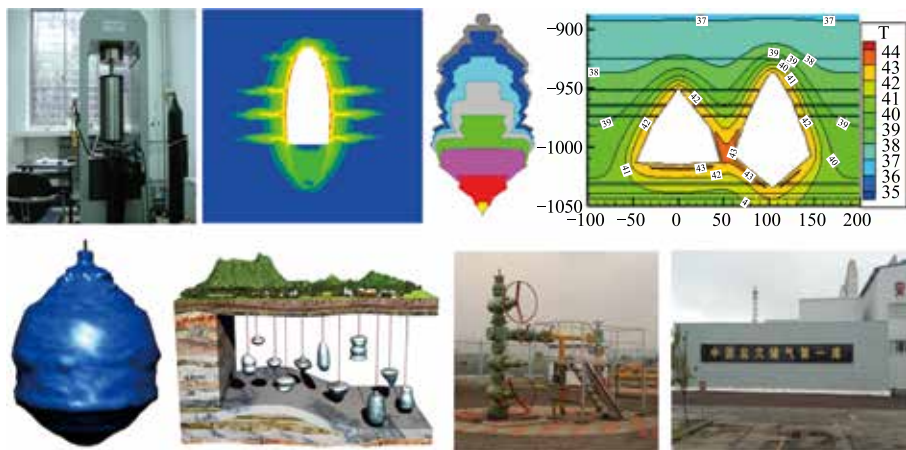
发明了夹层垮塌控制技术和油垫隔离调控工艺, 实现了夹层垮塌及溶腔形态的有效控制, 保证腔体质量; 自主创新了以两口距优化为中心的高效造腔全程控制技术, 提高了造腔效率, 使我国造腔技术达到国际先进水平。

上述系列成果, 成功应用于金坛盐岩储气库工程。相关成果与规范已推广应用在江苏淮安、湖北潜江、云应、河南平顶山等我国所有在建的储气库中, 社会、经济效益显著。

发表相关学术论文 190 余篇 (SCI/

EI), 出版专著 4 部, 被国内外期刊和学位论文他引 3000 余次; 授权国家发明专利 11 项、获软件著作权登记 4 项, 参加编写行业规范规程 3 部。相关成果获得 2012 年度中国科学院优秀博士学位论文, 2005 年度和 2011 年度国家科学技术进步奖二等奖。

图 层状盐岩力学理论与应用成果展示



难冶钨资源深度开发应用理论与技术

Theories and Techniques for Intensive Utilization of Refractory Tungsten Resources

中南大学赵中伟教授等在国家自然科学基金（批准号：50344031，50323008）等的资助下，在难处理复杂钨资源的深度开发利用方面取得了重大进展。

我国钨的储量和产量均居世界第一，而随着钨资源开发利用的深入，原料杂质含量渐高、钨钼共生复杂，开发高效的钨冶炼新技术、制备高性能钨制品显得尤为重要。项目组建立了白钨矿碱浸出的新理论，研发了基于浸出/结晶耦合机理的碱浸出-高浓度离子交换-铁基吸附剂深度除锡钼-锰盐沉淀法分离钨钼等系列成套技术，解决了占我国钨资源 78% 的白钨矿开发的关键技术难题。针对高性能钨材制备技术的应用基

础问题，揭示了杂质元素对硬质合金制备过程的作用规律，发明了三明治结构、表面韧性梯度结构以及特粗晶等各种新型结构硬质合金制备技术。

项目技术的成功应用，使我国大量低品位难冶钨矿变为可用资源，确保了我国钨资源使用年限由原来的不足 5 年延长到 25 年以上。项目形成的新型结构硬质合金涂层刀片和钻齿的制备技术，显著提高了我国龙头企业厦门钨业集团和株洲硬质合金集团的产品附加值和国际竞争力，为国民经济和国防建设做出了贡献。项目成果获 2011 年度国家科学技术进步奖一等奖。

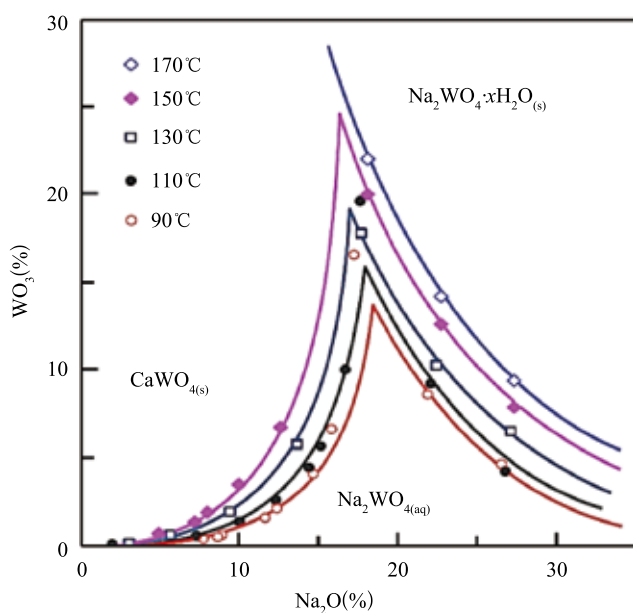


图 白钨矿碱分解 $\text{CaO-WO}_3\text{-Na}_2\text{O-H}_2\text{O}$ 三元系相图

盾构电液控制系统新原理和新方法

New Approaches and Methods of Electro-hydraulic Control System for Shield Tunnel Boring Machine

浙江大学杨华勇教授在国家自然科学基金(批准号:50425518)的资助下,以盾构电液控制系统为应用对象,围绕变负载非线性工况下系统运动控制和节能两大电液控制学科领域前沿问题开展研究。取得如下成果:①提出了基于盾构姿态预测的推进纠偏控制新方法,解决了断面偏载下传统纠偏技术导致盾构S形推进的难题,提高了隧道质量和掘进工效。②提出了适于界面载荷突变的密封舱压力动态平衡控制新方法,解决了界面载荷突变下传统出土量控制技术

导致密封舱压力大幅波动使平衡失效而引起地表塌陷难题,提高了隧道掘进安全性。③提出了基于地层智能识别的盾构刀盘转速控制节能方法,解决了现有盾构功率不能随载荷变化而自动调节导致能耗高的国际性难题,实现了盾构节能技术的跨越。

2014年度基于这些基础理论和后续开发的创新技术与国内龙头企业合作自主设计制造的盾构达到120余台,产值55亿元,超过国内新增盾构市场的80%。带动材料、元件与工程施工等上

下游产业估计在880亿元以上,这些盾构被广泛应用于北京、上海、广州、新加坡等36个国内外城市,在400多个地铁、公路、铁路和水利等各类隧道工程施工中发挥了重要作用,取得了显著的经济和社会效益,推动了我国大型掘进装备制造业的科技进步,实现了盾构产业的跨越发展。

成果获2012年度国家科学技术进步奖一等奖。

图 盾构在车间组装调试



复杂曲面数字化制造的几何推理理论和方法

Geometric Reasoning for Digital Manufacturing of Complex Surfaces: Theories and Methods

华中科技大学丁汉教授等在国家自然科学基金（批准号：59725514，50525517，50625516）的资助下，系统研究了“装备-工具-零件”交互作用中动态几何关系的表达、推理与计算方法，取得了突出进展。

1. 提出了点接触约束系统形、力封闭性量化分析与不确定载荷条件下多点夹持系统的最优设计方法，该方法适用于具有分片光滑表面的任意物体，对夹持点数亦无限制，是唯一的通用方法，且平息了“旋量空间中L2模无定义”的争议。

2. 揭示了可视性与刀具可达性之间的映射关系，定义了可视锥、完全可视锥和部分可视锥，提出了基于可视性筛选和GPU的可视锥计算高效算法，解决了复杂曲面多轴数控加工中任意刀具的可行方向高效计算难题。

3. 建立了非球头刀扫掠包络面的局部重建与整体形状控制原理，发现了刀具包络曲面与理想设计曲面间局域三阶密切和宏域曲率匹配的几何学条件，提出了宽行加工刀位规划的三阶密切法与整体逼近法。

研究成果解决了薄壁复杂曲面零件高效精密加工所涉及的复合形（过定位、多支承）夹具设计、狭窄空间中刀具无干涉运动规划、自由曲面非球头刀宽行加工成形等核心基础问题，得到MIT、Stanford、Berkeley、

法国CNRS、德国宇航中心、京都大学等学术机构的大篇幅引用和跟踪研究。被C空间理论创始人Lozano-Perez、可操作性椭圆理论创始人Yoshikawa、IEEE机器人与自动化协会副主席Goldberg、ASME“面向制造的设计”委员会主席Gupta、CIRP会士Bernard等评价为：“曲面零件多点夹持规划唯一的通用方法”，“提出了夹持稳定性评价的定量指标，其计算速度优于其他同类指标”，“可视性分析对解决数控加工、模具分型、CMM测量等制造过程中的运动规划问题具有重要作用”，“刀位规划的整体逼近法是优美、创新和令人振奋的，并被列入该领域1979～2012年发展路线图”。后续开发工作在运载、能源和国防行业的关键曲面零件制造中获得重要应用。

研究成果获2009年度上海市自然科学奖一等奖、2010年度教育部自然科学奖一等奖和2012年度国家自然科学奖二等奖。

图 复杂曲面零件五轴数控加工应用实例

(a) 离心式叶轮；
(b) 叶盘。



(a)



(b)

复杂构件不均匀变形机理与精确塑性成形规律

Unequal Deformation Mechanism and Precision Plastic Forming Rules of Complex Components

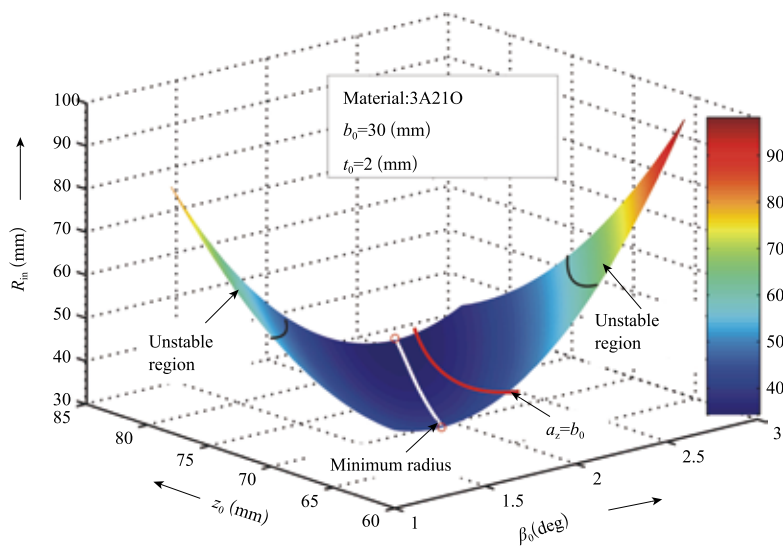
西北工业大学杨合教授等在国家自然科学基金(批准号: 50225518, 50935007, 59475059, 59775055, 59975076)等的资助下, 在复杂构件不均匀变形机理与精确塑性成形规律方面取得重要进展。

难变形材料复杂构件精确塑性成形, 是实现高性能轻量化构件成形性一体化制造不可替代的关键技术, 在航空航天高端制造领域有战略需求。然而, 由于材料难变形和结构难成形, 导致其制造过程会产生剧烈的不均匀变形, 从而易引发失稳起皱、裂纹等缺陷, 并导致载荷增大, 严重制约成形质量和成形极限的提高。为突破这一难

题, 建立了难变形材料复杂构件不均匀变形全过程多尺度模型, 使对不均匀变形的内在机制分析、预测和优化控制成为现实。通过理论、实验及数值仿真研究, 揭示了复杂加载可抽象为点、线、面三种动态约束形式, 发现了不同约束下不均匀变形行为及关键控制因素, 并提出了理论判据。发现了优化调控不均匀变形可抑制缺陷产生, 发掘材料变形潜力, 提高难变形材料复杂构件成形极限和质量的效应与机理。据此提出了调控不均匀变形变“害”为“利”、化“不可能”为“可能”的精确塑性成形新原理。

成果在塑性成形国际期刊 *Int. J. Plasticity (IJP)* 和 *J. Mater. Process Technol. (JMPT)* 等发表 SCI 论文 100 多篇, 被 *JMPT* 主编、ICTP 会议主席 Tekkaya 院士等国内外同行广泛正面引用和高度评价: “做出原创性贡献”、“取得突破性进展”。开拓出“不均匀变形控制与精确塑性成形理论研究”新学科方向, 成功应用于航空航天高端制造领域关键构件精确成形, 推动了塑性成形理论和技术的发展。成果获 2012 年度国家自然科学基金二等奖。

图 协调不均匀变形提高难变形材料复杂构件成形极限的效应



深低温回热制冷机理

Mechanism of Regenerative Refrigeration at Cryogenic Temperatures

浙江大学陈国邦教授和邱利民教授等在国家自然科学基金（批准号：59376264，59586002，59976034，50006011，50106013）等的资助下，在深低温回热制冷循环、低温流体热物性、液氮温区脉管制冷方面取得了重要成果。

气体绝热膨胀的理论制冷极限是回热式低温制冷研究基本问题之一。首次证明了气体绝热膨胀的制冷极限，提出了低温制冷循环的分类方法，改进了预测低温制冷机性能的布雷顿循环，解决了低温制冷机性能预测的理论难题。发明了混合工质脉管制冷新方法，提出将德拜晶体比热容理论扩展到量子流体，首次建立了宽范围、高精度氮-3 状态方程，解决了制约低温制冷机性能的工质难题。发明了双小孔脉管制冷技术，能有效控制和利用因双向进气引起的直流，研制的双小孔型两级脉管制冷机率先进入液氮温区。发明了双阀双向进气结构，多次创造并保持单级脉管制冷机最低制

冷温度纪录，最低达 10.6K。

国际著名低温专家 Radebaugh 博士撰文指出，“中国研究者特别擅长于推进脉管制冷机的低温极限。在浙江大学获得的低温是单级脉管制冷机的世界纪录”。美国威斯康星大学 J. Pfothhauer 教授指出：“浙江大学低温课题组由于在脉管制冷机研究中做出的多样而重要的贡献，使其在国际低温界知名”。成果已在我国航天、国防、工业气体、高科技等重要领域获得重要应用。成果获全国优秀博士论文 1 篇、国际制冷学会林德奖 2 项，卡皮查奖 1 项；获美国低温工程会议优秀学生论文奖、克里宾奖，中国制冷学会青年奖各 1 项等。研究成果获 2014 年度国家技术发明奖二等奖。

图 1 研制的具有自主知识产权的单级脉管制冷机



图 2 出版的低温专著成为同行开展研究和教学的重要参考



多孔介质与微/纳结构中热传递机理研究

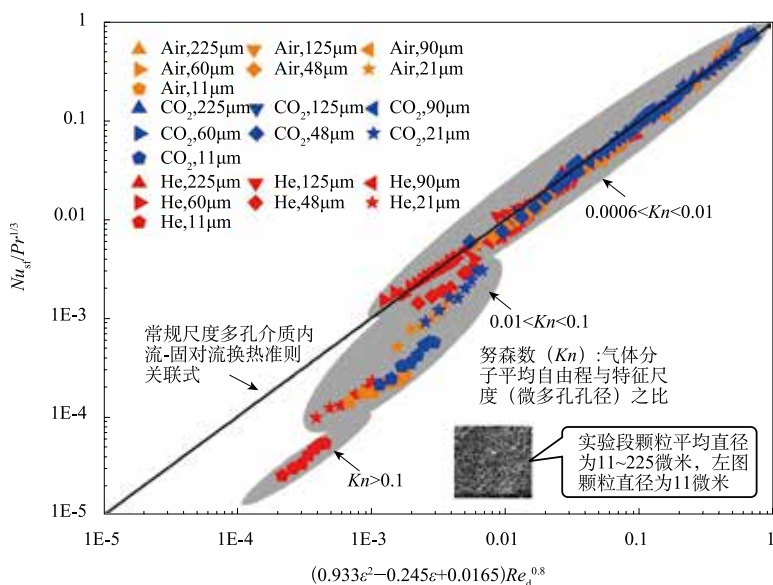
Heat Transport in Porous Media and Micro/Nano Structures

清华大学姜培学教授等在国家自然科学基金（批准号：50025617，50736003，59995553，50676047，59506004）的资助下，在多孔介质与微/纳结构中热传递机理研究方面取得了创新成果。

微/纳多孔结构被越来越多地应用于能源动力、航天航空等重要领域的关键换热部件。本成果揭示出影响多孔介质中对流换热的本质是多种因素间的竞争机制；提出颗粒直径对多孔介质对流换热非线性影响的判据。建立了多因素耦合影响的多孔介质对流换热局部非热平衡模型和热边界条件模型。提出运用分形理论描述颗粒团聚体，发展了含纳米颗粒流体有效热导率经典模型并提出分形模型；从纳米尺度传热机制出发，建立了纳米颗粒热导率和比热容以及纳米多孔结构有效热导率计算模型。提出调控孔隙率的思想，构建研发了微细板翅强化换热结构、烧结颗粒微多孔换热器和深槽微型换热器。所建立的多孔介质中对流换热模型被国内外学者广泛采用。*Int. J. Multiphase Flow* 创刊主编、以色列学者 G.Hetsroni 教授指出：“在等热流密度边界条件下的非热平衡模型存在着四种不同的热边界假设……姜等认为两者局部热流密度相等，其结果与实验结果相符”。国际多孔介质及其应用国际会议副主席、日本 A. Nakayama 教授指

出：在多孔介质结构（特别是颗粒直径）对对流换热的影响研究中存在着相互矛盾的结论，“（姜研究组）给出了明确解释”、“发展了第三种结论”。纳米流体发明人 S.U.S. Choi 教授评述本成果“首次开展了纳米流体中……分形理论模型的研究”，“为 Maxwell-Garnett 经典模型的拓展”。研究成果有力推动了多孔介质与微纳尺度热传递理论的发展，已应用于大推力火箭发动机发汗冷却面板、高温环境中喷油支板发汗冷却热防护、CO₂ 地质封存及增强型地热系统的研究与设计。研究成果获 2012 年度教育部自然科学奖一等奖和 2014 年度国家自然科学奖二等奖。

图 微多孔介质内流-固换热努谢尔特数



脑起搏器的前沿技术与创新疗法研究

Deep Brain Stimulation Research in Advanced Technologies and Novel Therapy

清华大学李路明教授在国家自然科学基金(批准号:51125028)的资助下,在脑起搏器的前沿技术与创新疗法方面取得了重要成果。

脑起搏器是通过植入刺激器向植入大脑的电极发送电脉冲,刺激大脑特定核团从而改善脑疾病症状的疗法。我国各类功能性神经疾病患者超过6000万人,而脑起搏器是国际公认的治疗帕金森病等的最佳神经外科疗法。以往市售产品被美国公司垄断,不仅售价高昂,国内患者难以承受,也客观上阻滞了新技术和新治疗模式的开发和应用。

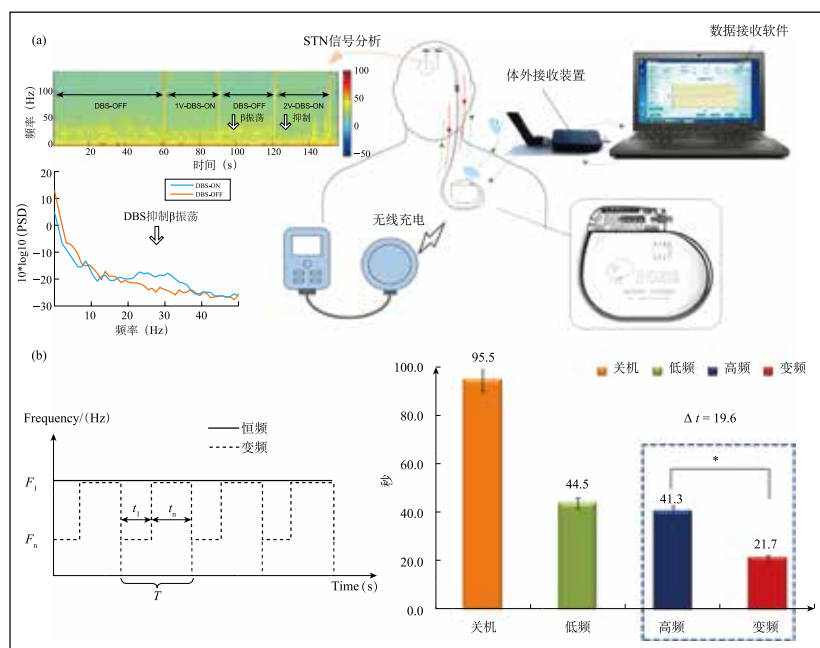
李路明教授带领团队15年来持续

努力,按照“跟踪一并行一引领”三步走的总体战略,开展了脑起搏器研制与技术、疗法创新工作。前期突破脑起搏器关键技术、建立围绕“安全性、可靠性”为核心的技术体系,形成完全自主知识产权保护,实现了可充电等系列脑起搏器的国产化,各项主要技术指标全面超过美国产品,打破了其垄断。进而率先在满足患者重大需求、突破脑科学研究瓶颈方面取得重大进展,开发出全球首个3.0T磁共振兼容脑起搏器、首个可充电同步记录实时传输植入脑电的脑起搏器,建立起脑疾病治疗和脑科学研究的先进技术平台,并提出变频电刺激

新疗法,首次突破传统单一高频刺激治疗范式,解决了广大帕金森病患者的中线症状困扰,实现了技术和疗法引领。

成果获得国内外学术、医学界广泛认可,受到中央电视台、人民日报等多次报道,并吸引了哈佛医学院、MIT等众多国际知名机构学者合作。成果获2012年度教育部中国高等学校十大科技进展、2015年度北京市科学技术奖一等奖和2015年度首届黄家驷生物医学工程奖唯一一项一等奖。

图 可充电同步记录植入脑电的脑起搏器系统及信号分析(a)、变频刺激模式以及不同刺激模式帕金森患者起步时间对比(b)



高精度的高场超导磁体设计理论与方法

Theory and Methods for Design on High Magnetic Field Superconducting Magnet System with High Accuracy

中国科学院电工研究所王秋良研究员等在国家自然科学基金（批准号：50577063，50925726）的资助下，在高精度的高场超导磁体的设计理论与方法及实践等方面取得了重要成果。

复杂结构的大规模高精度的高场磁体系统是科学仪器、医疗和国防等领域的关键核心组成部分。其运行接近材料的极限、极低温环境下大型构件与超细结构多尺度并存、因冷收缩导致结构参数的不确定性恶化磁场质量、精细磁场分析与制造精度难以控制及多场耦合的非线性等问题，已严重制约了系统性能。

针对上述问题，项目组克服了传统理论模型的局限性，创造性地建立了极端条件下强磁装备设计的跨尺度非线性多场耦合理论和开域逆问题混合求解算法，揭示了在极低温与强电磁场作用下超导体的电机效应和磁热不稳定性等规律，建立了完整的设计理论体系，发明了设计方法和关键制造技术，成功研制可以挑战材料与结构

极限的多种类型的高磁场装备，解决了用于仪器、医疗和特种装备等的实用化技术难题。

获国内发明专利授权 50 项，美国专利授权 7 项，软件著作权 7 项。发表 SCI 收录论文 100 余篇，SCI 他引 1225 次。出版中、英文专著 4 部。成果被欧洲协会期刊 *SNF* 以亮点成果报道，被 Elsevier 列入 2014 年中国高被引用学者榜单，2013 年度博士论文获中国科学院院长特别奖，部分成果获 2012 年度北京市科学技术奖一等奖，获 2013 年度国家技术发明奖二等奖。

图 理论与方法的工程实践



长期循环动载下饱和软弱土地基灾变机理及控制

Catastrophe Mechanism and Control of Saturated Soft Soil Foundation under Long-term Cyclic Load

浙江工业大学蔡袁强教授在国家自然科学基金(批准号:50478081, 50778136, 50979096, 51025827, 51238009)等的资助下,在长期循环动载下饱和软弱土地基灾变机理及控制技术方面取得了重要成果。

我国沿海饱和软弱土地区已建和在建大量高速公路、铁路、机场跑道、城市防洪堤等重大工程。如何提高软弱土地基重大工程在交通、涌潮等动荷载长期循环往复下服役性能,并发展有效的软弱土地基灾变控制技术是工程领域重大挑战之一。

研究系统揭示了交通、涌潮等荷载引起的复杂应力路径下饱和软弱土应

变累积和强度衰减等循环软化规律;发现了软弱土灾变表征值:容许循环应力比。提出了循环应力比小于容许循环应力比的软弱土地基加固准则;发明了新型护岸桩式丁坝结构。揭示了长期涌潮荷载下丁坝动力稳定安全系数衰减规律;解决了传统土力学的拟静力方法不能反映软弱土长期循环软化特性和水土两相动力耦合作用的难题。研发了以超固结比为指标的超载预压长期沉降控制技术与桩式丁坝长期稳定设计方法及失稳灾变控制技术;攻克了公路深厚软基工后累积沉降过大,传统堆石丁坝地基过大变形,造成坝身断裂、失稳破坏的难题。

在软弱土地区的 58 项重要工程的成功应用。实现了我国首座软土地基上大型机场跑道 0.8mm/月的沉降控制;桩式丁坝技术提高了堤防的稳定性,实现了世界最强涌潮荷载下桩式丁坝结构零维修。成果在 *Geotechnique*, *J. Geot. and Geoenviron. Engin.*, *ASCE* 等岩土国际权威刊物上发表学术论文 20 余篇,分别获 2009 年度教育部科学技术进步奖一等奖、2012 年度浙江省科学技术奖一等奖和 2013 年度国家科学技术进步奖二等奖。

图 潮涌作用下的桩式丁坝



废水处理系统中好氧微生物颗粒的形成机制及调控原理

Formation Mechanisms and Manipulation Strategies for Aerobic Granules in Wastewater Treatment Systems

中国科学技术大学俞汉青教授等在国家自然科学基金（批准号：50625825，50738006，50828802，50978243，51129803）的资助下，在废水生物处理系统中微生物的颗粒化方面取得了重要成果。

废水处理系统中微生物颗粒的形成可显著提高处理效率、降低成本。但微生物颗粒化过程非常复杂且难以调控。以微生物颗粒的形成机制和作用原理为核心，探索了在微生物颗粒化过程中化学、物理学和生物学因素的贡献，揭示了颗粒形成的微观机制和宏观过程，提出并诠释了微生物颗粒化四阶段理论；建立了表征微生物颗粒特性及微观结构的系列新方法；实现了对微生物颗粒结构的定量分析。阐明了微生物颗粒的水力学特性；构建了反映微生物颗粒特性

的数字化模型。揭示了颗粒内部微生物代谢与污染物降解的作用机制；发展了微生物颗粒快速培养的系统方法和关键技术。突破了工业废水、低浓度污水培养微生物颗粒的技术瓶颈；建立了国际第一座好氧颗粒处理城市污水示范工程，开拓了微生物颗粒技术的工程应用。

成果已发表 SCI 收录论文 120 篇，其中在环境领域最有影响力的刊物 *Environ. Sci. Technol.* 和 *Water Res.* 上分别发表 22 篇和 31 篇，其中 3 篇列入 ESI 近十年高被引 TOP 论文；分获 2008 年度和 2011 年度全国百篇优秀博士学位论文；成果被 Wiley 和 Springer 公司出版的专著各收录 1 章；获发明专利授权 7 项。成果获 2012 年度教育部自然科学奖一等奖和 2014 年度国家自然科学基金二等奖。



图 废水处理系统中的微生物颗粒

干旱内陆河流域考虑生态的水资源配置理论与调控技术

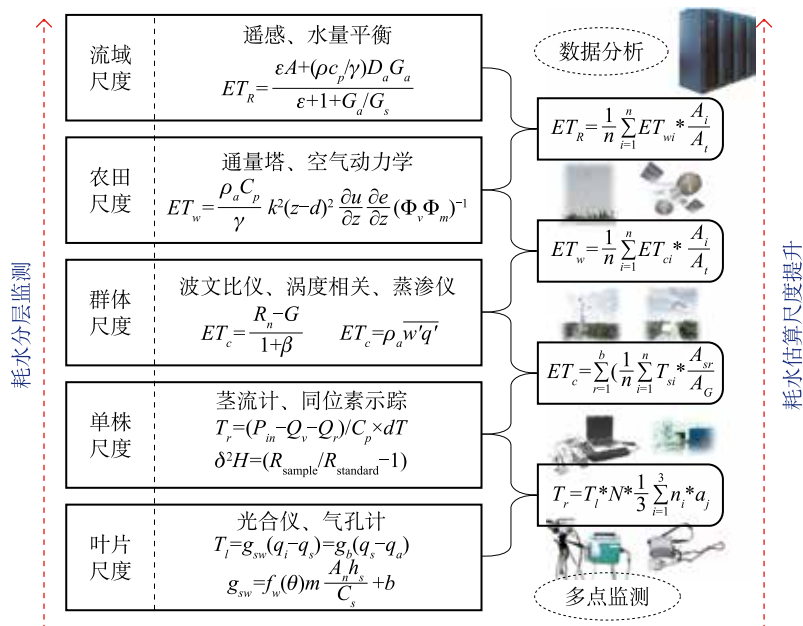
Water Resources Allocation Theory and Regulation Technology Based on Ecology in Arid Inland Basin

中国农业大学康绍忠教授等在国家自然科学基金(批准号: 50339030, 50679081, 50939005, 50709038, 50779066)等的资助下, 在干旱内陆河流域考虑生态的水资源配置理论与调控技术方面取得了重要成果。

我国干旱内陆区面积占全国总面积的 29%, 水资源量仅占全国的 3.8%, 水资源过度开发利用导致了严峻的生态环境问题。基于长期田间定位实验及区域水转化监测, 形成了干旱内陆河流域基

于多尺度水转化及高效用水的水资源配置理论与调控技术。提出了定量评价变化环境对流域地表径流与耗水影响的新方法, 建立了融合 ANN 与数值方法的干旱区地表径流-地下水耦合模型; 创建了多尺度多层分布式农田耗水观测系统。揭示了 17 种农作物和防风固沙植物的耗水规律, 开发了节水调质高效灌溉综合技术体系。创建了考虑生态的干旱内陆河流域水资源科学配置理论与调控方法, 研制了实现流域多过程综合节水调控的 12 种系列新产品以及流域水资源管理网络系统。该成果被国际灌排委员会(ICID)介绍和推广, 成果第一完成人因在干旱内陆河流域水资源调控方面的突出贡献获 ICID 国际农业节水技术奖, 并被英国 Lancaster 大学授予荣誉科学博士学位, 提升了我国在该领域的国际地位。研究成果获 2007 年度和 2011 年度全国优秀博士学位论文, 2012 年度教育部高等学校优秀成果科学技术进步奖一等奖和 2013 年度国家科学技术进步奖二等奖。

图 多尺度分层分布式耗水监测系统及数据处理方法



城市及区域生态过程模拟与安全调控

Simulation and Security-regulation of Ecological Process at Urban and Regional Scales

北京师范大学杨志峰教授等在国家自然科学基金（批准号：51121003, 51421065, 50939001, 50239020, 40871056）等的资助下，在城市及区域生态过程模拟与安全调控方面取得了重要成果。

我国城市化速度和大型工程建设规模在近 20 年来已成为世界之最，由此引发的城市及区域无序扩张、资源能源过度消耗、污染事故频发、环境质量恶化等严重损害生态系统健康和人类生活品质，危害城市及区域生态安全等问题。因此摸清生态过程运行规律、准确诊断生态健康状态、科学实施生态调控具有重大战略意义。突破城市水、气等要素规划与管理的传统思路，系统创建一套健康诊断—过程模拟—安全调控—系统平台“四位一体”的自主创新技术体系，为保障国家和区域生态安全及人群健康、建设资源节约型和环境友好型社会提供科技支撑。

成果原创性受到国际同行高度评价，并在城市和区域尺度上获得大面积推广和应用，为国务院、发展和改革委员会、科学技术部、环境保护部等多个职能部门提供决策依据。国际知名生态学家、美国俄亥俄州立大学的 Bakshi 教授发表在 *Ecol. Model.* (2011) 的文章以本

成果生态系统优化和调控技术为主要依据，设置了美国经济生产部门投入产出效益分析框架。国际著名出版社 Taylor & Francis 集团力邀成果主要完成人撰写并出版了《生态城市规划指南》(*Eco-city Planning-A Planning Guide*) 一书，为国际同行提供原创和前沿的生态城市规划理论框架和技术支持。*Ecol. Model.* 主编 Brian D. Fath 邀请成果完成人在该杂志组织了 Special Issue，导向性展示中国环境生态保护方面的最新研究成果。成果完成人作为主席举办第 18 届国际生态模拟、第 9 届国际环境信息等学术年会，研究成果获 2009 年度高等学校科学研究优秀成果奖（科学技术）一等奖和 2012 年度国家科学技术进步奖二等奖。

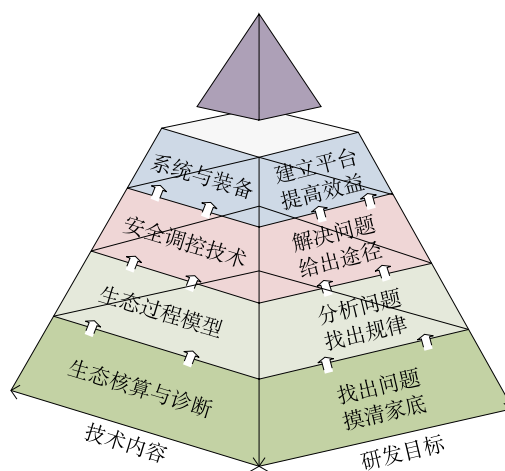


图 四位一体自主创新技术体系

隧道与地下工程重大突涌水灾害治理关键技术及工程应用

Key Treatment Techniques of Serious Water Inrush Disaster in Tunnels and Underground Engineering and It's Applications

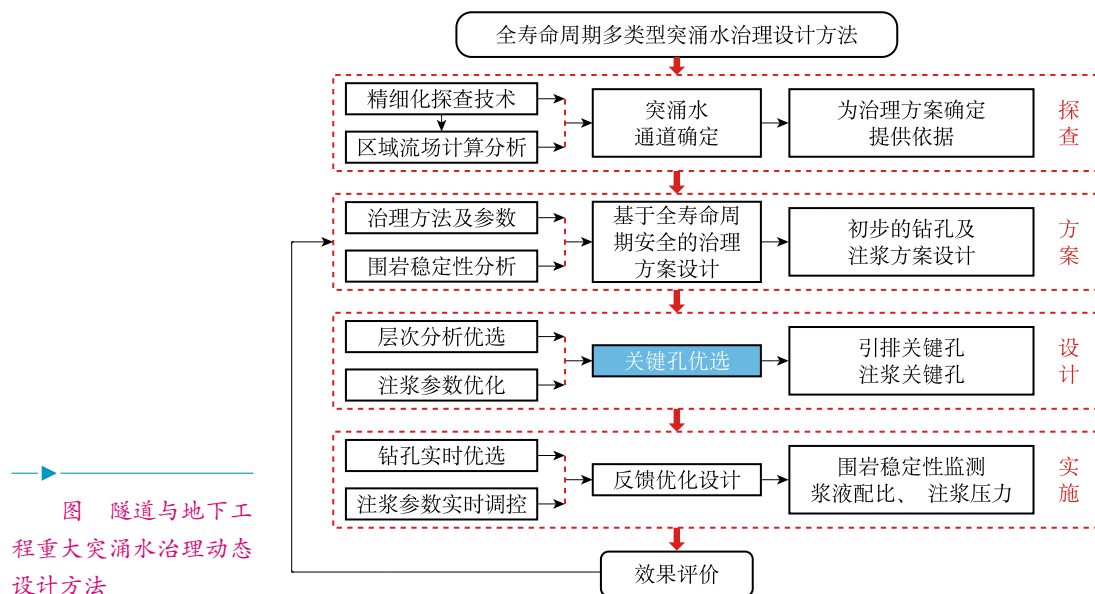
山东大学李术才教授在国家自然科学基金(批准号: 51139004, 50539080)的资助下, 在隧道与地下工程重大突涌水灾害控制方面取得了重要成果。

我国隧道与地下工程建设进入了空前繁荣期, 在地形地质条件极端复杂的西部山区和岩溶地区, 施工中遭遇的重大突涌水灾害治理堪称世界级工程技术难题。由于突涌水具有突发性强、类型多样、水压水量大等特点, 其治理方法与封堵机理极其复杂, 现有注浆材料、工艺和技术在重大突涌水灾害治理过程中面临巨大挑战。

针对以上难题, 建立了典型浆液在围岩动水中扩散的试验方法与理论模型, 揭示了高压大流量动水封堵机理。发明

了堵水和加固一体化的水泥基复合注浆材料, 研发了相应配套工艺与技术, 成功解决了高压大流量动水封堵的重大工程技术难题。提出了以关键孔注浆和围岩稳定控制为核心的全寿命周期动态设计方法, 钻孔工作量降低 60% 以上, 保证了施工期突涌水成功治理和运行期安全。

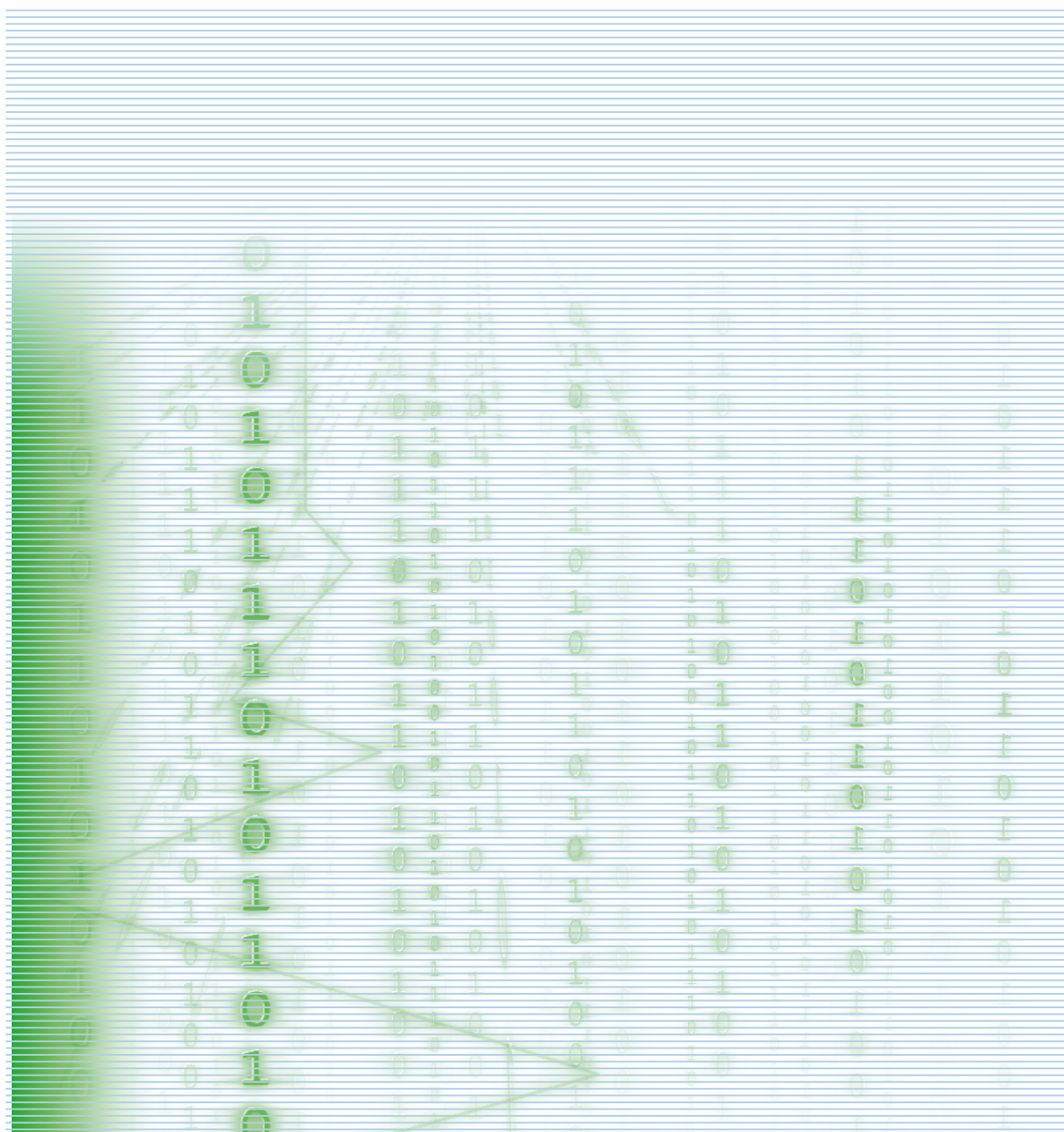
研究成果广泛应用于江西吉莲高速、南京地铁、青岛地铁等四十余项国家重点工程的突涌水治理, 取得显著经济效益和社会效益, 得到业内广泛认可, 有力促进了行业科技进步与发展。研究成果获 2013 年度教育部科学技术进步奖一等奖和 2014 年度国家科学技术进步奖二等奖。





国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

信息科学部



神经细胞传感器阵列研究

Biosensors Array for Neural Cells

神经细胞的递质释放检测研究对探索神经系统运行机制和解读神经疾病病因具有重要的科学意义。然而,高灵敏、高时间分辨率神经信号检测的微型阵列器件缺乏,使神经细胞多位点、原位动态实时探测难以实现。

在国家自然科学基金(批准号:61125105)等的资助下,中国科学院电子学研究所蔡新霞研究员等针对神经细胞信息检测中的难点和瓶颈问题,开展了神经细胞传感器阵列的前沿技术研究,取得了以下主要创新成果:

1. 研究探索了神经细胞递质释放检测新机理和新方法,提出了微电极阵列定向修饰聚吡咯石墨烯纳米复合材料的高灵敏、高时间分辨、原位动态检测神经细胞递质释放新方法,检测到单个PC12细胞多巴胺量子释放的信号,为

揭示递质的胞吐过程提供了实时动态变化新数据。

2. 重点突破了新型离体/在体微电极阵列制备工艺、微电极表面定向修饰纳米功能材料技术,研制出微电极阵列,实现了对谷氨酸、多巴胺和5-羟色胺的高灵敏检测。

3. 在神经细胞检测验证方面,基于植入式在体微电极阵列技术,实现了大鼠活体脑内纹状体神经细胞谷氨酸、多巴胺与电生理活动等微弱信号的有效获取,完成了器件验证。

相关研究成果授权国家发明专利9项,获2013年度国家技术发明奖二等奖;成果发表在本领域顶级期刊 *Biosens. Bioelectron.*、*ACS Appl. Mater. Inter.*、*Nature* 子刊 *Microsystems & Nanoengineering* 等刊物上,得到了国际同行的关注和认可。

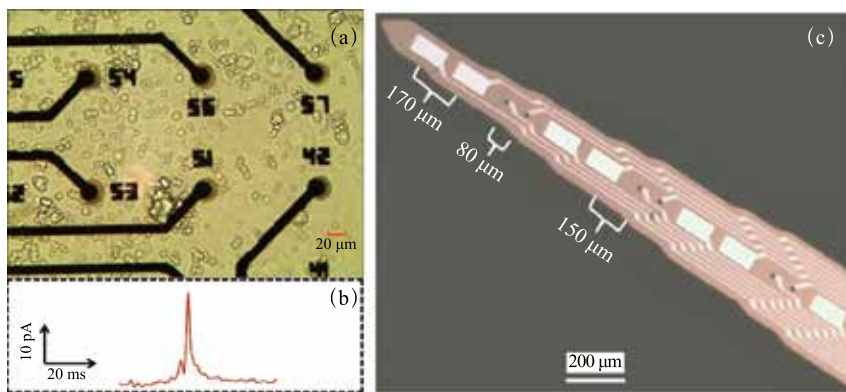


图 离体传感器阵列

多频宽带微波电路理论与器件构建方法

Multi-frequency Broadband Microwave Circuits Theory and the Realization of Devices

无线电系统有两个重要发展趋势，其一是无线通信、雷达、指挥等系统的一体化，以提升系统的多用途能力；其二是移动通信和雷达系统的多频段应用，频率数可达数十个，平行 T/R 射频组件数达到 $10 \sim 100000$ ，以提升系统的抗干扰能力，提升有限频率谱的系统容量。相应地，带来了大量射频通道并行的大体积、宽带高功耗和电磁兼容难题，大量射频通道独立的协同控制、电波传播环境自适应、频率可重构和系统功能可重构难题。北京邮电大学刘元安教授等在国家自然科学基金（批准号：69782007，61201027，61327806）等的资助下，围绕多频宽带微波电路理论与器件构建方法，开展了一系列的创新研究工作，奠定了低耗、一体化、兼容、易重构的共时多频多通道射频系统和共时多频宽带射频系统发展的理论基础。主要创新成果如下：

建立了频不变、非对称频变和对称频变复阻抗负载共时多频微波电路的网络模型和匹配方法，完成了大范围频率比和功分比可调的共时多频功分器、功放器、滤波器等关键器件的电路构建及实现，研制了多种结构的微波器件、功

能融合器件、天线和射频系统。提出、发展并建立了频率比、功分比可调的严格方法，为复杂射频系统的智慧化发展奠定了理论和技术基础。在此基础上，发展了低功耗大范围频率比及功率比的多频匹配网络，发明了任意频率比的天线多频技术，研制了终端天线和射频空中一致性测试装置。

成果发表高水平论文 30 余篇，约占国际同方向高水平论文的三分之一，7 篇论文入选国际高被引库 ESI-TOP，1 篇入选年“中国百篇最具影响国际学术论文”，获国家技术发明奖二等奖 1 项，完成国内外标准 5 项。

图 1 双频电磁能量分布图
(a) 低频模式；(b) 高频模式。

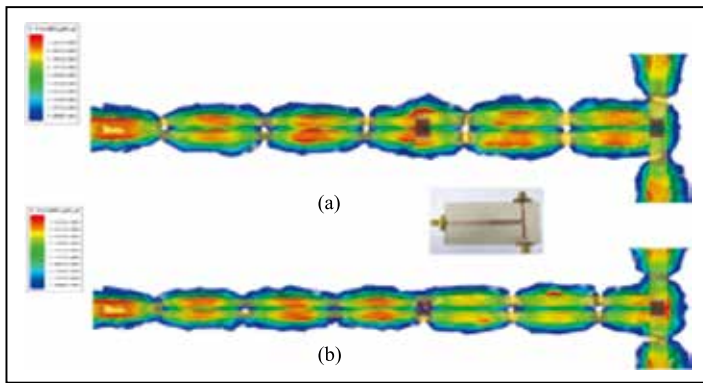
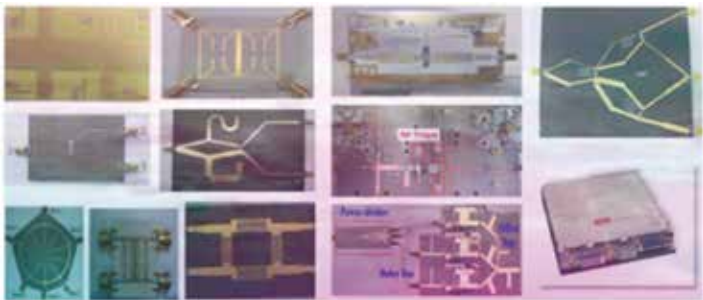


图 2 多频器件与系统



地球同步轨道合成孔径成像雷达信息处理

Information Processing of Geosynchronous Synthetic Aperture Imaging Radar

地球同步轨道合成孔径雷达(GEO SAR)是运行在地球同步轨道上的合成孔径成像雷达,其具有一定的轨道倾角,为非静止轨道。GEO SAR可保证对我国及部分周边国家区域每天一到两次的观测,对重点区域甚至可实现连续不间断监视。但其轨道高度的增加引起时空尺度的巨大改变,造成信息获取和恢复的难题。北京理工大学龙腾教授等在国家自然科学基金(批准号:61032009,61225005)的资助下,在GEO SAR信息获取机制、信息处理方法方面开展了系统深入的研究,

并取得了以下成果:

1. 提出了基于广义模糊函数与子空间投影的精确分辨率分析,以及一种基于二维相位扫描的小角度全零多普勒控制方法,为中高轨SAR系统分析与设计提供了理论基础。

2. 提出了非‘Stop-and-Go’假设下的高精度GEO SAR精确信号模型,并基于此提出了基于级数反转与高阶方位去斜的成像处理算法,解决了曲线轨迹成像难题。

3. 建立了大气传播效应对成像影响的数学模型,定量分析了电离层影响,提出了基于图像最小熵准则的幅相联合补偿二维自聚焦算法,为后续GEO SAR的实际运行提供了依据和解决方案。

4. 开展了基于IGSO轨道的导航卫星双基地成像实验,验证了GEO SAR成像理论,并完成了大气传播效应影响的分析。

研究成果在IEEE TGRS/TAP等国际期刊和本领域重要国际会议上共发表论文132篇,其中SCI论文63篇,授权国家发明专利18项。研究成果直接支撑了国家空间基础设施中对GEO SAR项目的系统论证,并已于2015年完成了背景立项,为世界首颗GEO SAR卫星的立项论证提供了关键技术支撑。

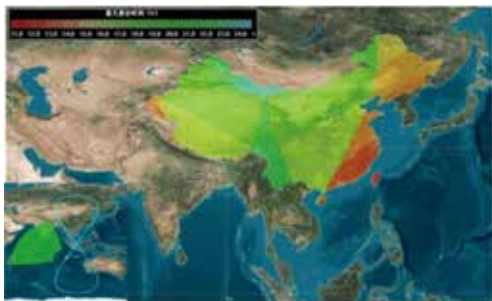


图1 GEO SAR
轨道及覆盖示意图

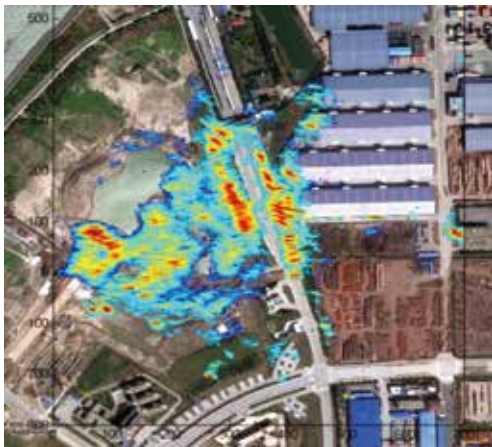


图2 基于北斗
IGSO卫星的GEO SAR
成像试验结果

数字媒体通信理论与关键技术

Theory and Technology for Digital Media Communication

随着数字媒体向网络化、泛在化、融合化的方向发展,数字媒体内容呈现爆炸式增长的态势,如何提高海量数字媒体信息有用性和可用性是网络社会中信息科学面临的重大科学问题。上海交通大学张文军教授带领的团队在国家自然科学基金(批准号:61221001)的资助下,瞄准未来网络社会对高品质数字媒体内容的全方位体验需求,探索广播和通信网络结构和业务的高效融合方法,开展了系统研究,取得了重要理论和技术突破:

1. 利用美国数字电视广播标准(ATSC3.0)全球征集技术方案的契机,提出的中国提案开创性地扩展了数字电视广播网络的上行功能,全方位提升了广播电视网络的业务承载能力。经过与高通、三星、SONY、LG等对手的技术直面竞争,提案中三项技术已获得ATSC3.0标准的正式采纳。这是中国在广播电视领域第一次走向国际标准竞争前台,成功使我国多项专利技术导入主流国外标准,为提升我国相关企业国际市场竞争力提供了根本保障。

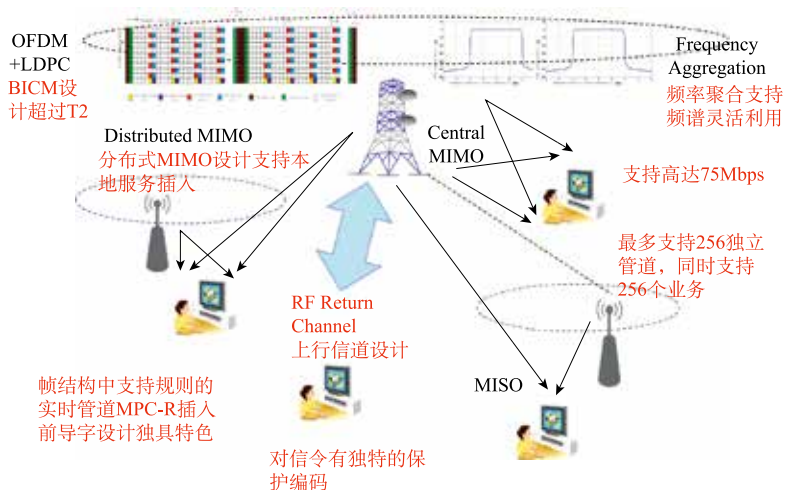
2. 成功搭建了超高清直播无线传输的全链路,解决了超高清4K电视全链路所需要的超高清内容编辑和编码、高速率传输解调、超高清解码和播放的关键技术问题,是继日本NHK的SHV系统后第二个具备超高清全链路系统。

3. 进行一系列技术攻关,实现了复

杂地形环境下的大时空全程播报,提升了资源受限网络中的视频重建质量,解决了全球直播“最后一公里”问题,保障了恶劣网络环境下的刚性服务指标。在中央电视台网络化新闻采播、神舟飞船返回舱搜救、重大安保指挥通信等一系列重大工程中实现了多个“首次使用”,并实现了规模化应用推广,取得了显著的社会公益效益。

相关成果发表SCI论文75篇,授权中国发明专利27项。获国家科学技术进步奖二等奖1项,教育部科学技术进步奖一等奖1项;获IEEE通信学会亚太杰出论文奖、Scott Helt Memorial Award等国际学术奖励7项。组织发起了全球未来广播电视技术合作计划(FoBTV)。牵头组建了“未来媒体网络”协同创新中心,并成功获得教育部和财政部“2011计划”的认定。

图 提出国际化物理层系统提案



宽带移动通信基础理论与技术研究

Fundamental Theories and Key Technologies for Wideband Mobile Communications

移动通信是信息社会的重要基础支撑。移动通信发展所面临的基础性核心问题是：移动数据业务流量飞速增长，但可用的频谱资源和发射功率严重受限。探索高效无线传输技术，并在移动通信无线网络构架进行创新，从而进一步提升无线资源的利用效率，是近年来移动通信系统寻求突破的主要研究方向之一。在国家自然科学基金（批准号：60496310）等的资助下，东南大学尤肖虎教授所带领的团队，在宽带移动通信容量逼近和新型分布式无线网络构架方面进行了长期的探索，并取得了一系列具有重要国际影响的研究进展。

在国际上最早从宽带移动通信收发两端着手、提出容量可达最优传输理论的研究团队之一，并形成了易于工程实

现的容量逼近系列发明专利，于2011年获我国移动通信领域首个国家技术发明奖一等奖。代表性论文发表于 *IEEE Comm. Mag.* 以及 *IEEE Trans. on IT* 等；欧盟 FP7 研究项目 WINNER 技术报告（IST-4-027756 D6.13.9 v1.0）多次引述此研究工作，指出其成果是应对 B3G 挑战的关键技术；并受到一批国际著名学者的高度评价。获国际通信学术界有重要影响的 IEEE 通信理论莱斯最佳论文奖，为该奖项自设立以来首次授予中国大陆学者。

在国际上最早开展分布式移动通信架构及小区边沿问题基础研究，提出了分布式系统容量的闭式解析理论方法，从理论上证明了其频谱和功率效率的显著优势。目前分布式网络已成为 4G 核心技术，并成为 5G 重要候选技术。因对移动通信分布式组网这一新兴技术研究与推广应用所做出的开拓性贡献，获 2014 年度陈嘉庚科学奖。代表性论文分别发表在 *IEEE Wireless Comm.*（IF 6.524，是本领域影响因子最高的期刊）和 *IEEE JSAC*，是国际上最早系统介绍分布式组网和小区边沿性能分析的论文，引起多个国家学者的广泛重视，应邀在 IEEE ICC 上作大会特邀报告。

图1 国家技术发明奖一等奖证书



图2 陈嘉庚科学奖证书



图3 IEEE ICC 大会特邀报告证书



极高真空测量的基础理论和关键技术

Fundamental Theories and Key Technologies of Extreme-high Vacuum Measurement

极高真空 (XHV) 测量技术在空间探测、加速器、核聚变等领域需求迫切, 电离规是目前唯一用于 XHV 测量的仪器, 但传统热阴极和冷阴极电离规都存在影响测量下限进一步延伸的技术瓶颈。因此, XHV 测量还有待于新原理、新技术的提出和实践。兰州空间技术物理研究所李得天研究员及团队提出了基于碳纳米管 (CNT) 场发射阴极电离规的思想, 并在国家自然科学基金 (批准号: 61125101) 的资助下, 取得了重要突破。主要成果如下:

①通过理论模拟和实验验证相结合的方法揭示了电离规中电子激励脱附效应的产生机理, 并提出了抑制方法。②构建了 CNT 阴极电离规物理模型, 建立了系统的仿真方法, 对电极参数、电场分布、电子和离子运动轨迹进行了优化。③在金属合金衬底上直接生长了垂直取向的 CNT, 系统研究了衬底表层组分和形貌

对 CNT 微观结构的影响, 阐明了在金属合金衬底上催化生长和调控 CNT 的机制, 并制成了性能优良的 CNT 阴极电子源。④在国际上首次提出了固定流导法气体微流量测量新方法, 满足了对 XHV 电离规进行测试和校准的需要。经系统研究, 研制的 CNT 阴极电离规的线性测量下限达到了 10^{-9} Pa 量级, 是国际上公开报道的最好水平。

项目团队出版了专著 1 部, 发表 SCI 和国际重要会议论文 24 篇, 成果受到国际同行高度评价, 认为“是对真空测量和气体微流量测量的重要贡献”。相关成果获 2015 年度国家技术发明奖二等奖。成果还在月球样品密封装置、载人交会对接舱门快速检漏仪、重粒子加速器等方面得到应用, 李得天研究员因此也于 2015 年 7 月当选国际宇航科学院院士。

图 2 CNT 阴极电离规的计量学特性

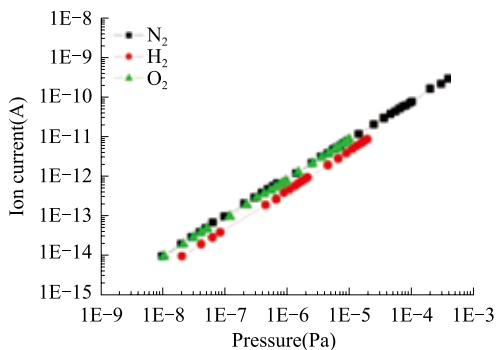


图 1 CNT 阴极电离规的传感器



全数字化 PET 成像技术

All Digital PET Imaging Technology

正电子发射断层成像(PET)是当今领先的生物学分子影像工具,在恶性肿瘤等重大疾病的早期诊断及治疗、病理研究、新药研制、生物学基础研究等领域有不可替代的应用价值。华中科技大学谢庆国教授等在国家自然科学基金(批准号:61425001,61210003,61027006,60972099,60602028)的资助下,历时十余年完成了理论、技术、系统三个层面的创新,建立了全数字化PET成像这一新方向。主要成果包括:

1. 发明了多电压阈值(multi-voltage threshold, MVT)方法,解决传统PET无法精确采样脉冲信号的历史难题,在国际上首次实现PET超高速闪烁脉冲的精确数字化,奠定了全数字PET的创新

基础。

2. 发明了单事件探测器模组,率先实现了PET探测系统数据采集和数据处理的完全模块化,在降低系统复杂度的同时,提高了探测性能和稳定性,并为新型系统设计提供了灵活度。

3. 发明了应用适应性成像方法,突破传统PET结构单一固定的局限,在国际上率先实现了高分辨率、高灵敏度的局部成像以及特殊结构(如平板)系统成像,使得面向特定应用、特定部位提供最优化成像性能成为可能。

基于以上成果,团队于2010年研发出世界首台小型全数字PET科学仪器,其空间分辨率高达0.87mm,灵敏度最高可达26%。迄今,利用该仪器已与多家单位展开应用合作,完成了1200余例生物学成像实验,支撑了肿瘤、阿尔茨海默症等重大疾病的基础研究。2015年,团队又成功研制出世界首台临床全身全数字PET,成像空间分辨率达到2mm。目前,团队在向临床全数字PET取得医疗器械认证的目标推进。

相关成果已在*IEEE TNS*, *PMB*等国际期刊和NSS/MIC等会议上发表论文69篇,获得国际国内专利授权62项,获2013年度湖北省技术发明奖一等奖。



图1 小型全数字PET用于应用研究



图2 临床全身全数字PET调试现场

可视媒体几何计算研究

Research on Geometric Computing in Visual Media

清华大学胡事民教授的课题组在国家自然科学基金（批准号：60225016，60673004，U0735001）的资助下，从可视媒体内在几何模式的本质属性入手，揭示了多种几何模式与可视媒体的联系，提出了内嵌几何模式的思想，建立了以几何模式辅助可视媒体计算的框架，形成了可视媒体几何计算的系统理论，取得了一批创新性成果，发表在 *ACM Trans. Graph.*, *IEEE Trans. PAMI*, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics* 等国际重要学术期刊和 ACM SIGGRAPH, IEEE CVPR 等重要学术会议上。

1. 可视媒体形状几何计算。提出了图像中形状几何的视觉显著性检测、自动提取和相似匹配算法，大幅提高检测准确率和召回率。进一步提出了基于形状几何的互联网图像合成方法 Sketch2Photo，形成了基于形状几何进行图像合成的新方向。显著性检测的论文单篇他引超过 1200 次。

2. 可视媒体几何不变量计算。提出了图像旋转不变量和几何不变量的计算

模型，扩展了不变量抵抗变换的能力，并应用于人脸检测和人脸跟踪。被曾担任 *IEEE TPAMI* 副主编的 Google 公司 Luc Vincent 博士评价为有“印象深刻的效果”，称为“清华检测器”。

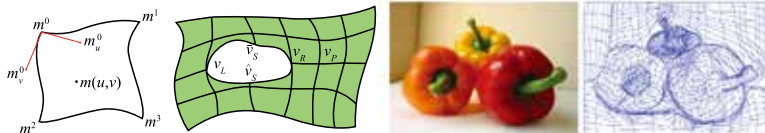
3. 基于内嵌网格几何的可视媒体计算。设计了高维层次网格和梯度网格等内嵌网格几何，给出了可视媒体参数化表达，首次实现了复杂拓扑条件下图像的梯度域矢量化，有效提升了计算效率，为解决可视媒体计算中的性能瓶颈这一基本难题提供了新的思路。

相关研究成果获得了广泛的国际学术影响，在 SIGGRAPH 等国际重要会议上作大会报告十余次。获 2015 年度国家自然科学奖二等奖。

图 1 基于形状几何的互联网图像合成



图 2 基于内嵌网格几何的图像梯度域矢量化



图像非均匀计算理论与方法

Image Non-uniform Computing Theory and Methods

图像计算主要研究图像表示、编码、分析和理解等各种处理的计算原理和计算方法,是计算机图像处理的核心和基础。传统图像计算的模型和方法一直受限于“图像在各层(表示层、感知层和认知层)均具有均匀的特性”的定性思维,计算能力受到严重制约。中国科学技术大学吴枫教授等在国家自然科学基金(批准号:60672161, 60333020, 60632040)等的资助下,历经10余年攻关研究,在图像非均匀计算关系、计算机理、计算模型等方面取得重要进展。

1. 计算关系方面:阐明了表示层的非均匀性体现在时空相关各向异性,揭示了用局部方向计算紧致表达时空相关的规律,提出了方向预测和方向更新算子,发现了通过局部方向计算实现自适应方向变换的内在计算关系,构建了任意方向自适应变换新体系,解决了时空相关各向异性造成图像变换域表达不紧致的经典难题。

2. 计算机理方面:阐明了感知层的非均匀性体现在结构和纹理的感知差异性,揭示了结构和纹理的感知重要性与其信息熵的反向规律,发现了结构区域关键数据编码与纹理合成的融合计算机理,解决了均匀一致编码计算无法区别结构纹理感知差异性的难题。

3. 计算模型方面:阐明了认知层的非均匀性体现在语义相似性的非线性多模态,揭示了语义相似性具有非线性度量和多模态协同的本质规律,提出了图像语义相似性的非线性度量方法,突破了欧几里得度量的局限,构建了图像多模态相似性的非线性统一计算模型。

上述成果得到了包括多国科学院/工程院院士等国际同行的高度认可。基于项目科学发现研制的H.264实时编码器被微软操作系统Windows 7所采用,编码器用户已达4.5亿。获得国内首篇IEEE TCSVT最佳论文奖,代表性论文被SCI他引620次。吴枫教授因在视觉数据编码方面的

贡献被推选为IEEE Fellow。该研究成果获2015年度国家自然科学基金二等奖。

图 本项目提出的结构区域关键数据编码(图中红色曲线)与纹理合成的融合计算机理



“天河二号”高性能计算机体系结构创新

Innovation on Architecture of Tianhe-2 Supercomputer

中国人民解放军国防科学技术大学杨学军教授及其研究团队在国家自然科学基金（批准号：60621003，60921062）等的资助下，面向国家千万亿次高性能计算需求，围绕异构并行体系结构的高性能科学计算开展研究，取得以“天河二号”为代表的国际领先成果。

1. 围绕大规模并行系统可扩展性的基础理论问题，杨学军等首次提出了并行计算机综合效能加速比定律。该定律定量地揭示了并行系统各项特征，特别是可靠性和能耗对可扩展性的影响，使得并行计算机的可扩展性不再以单一计算性能提升为目标，为大规模并行计算机系统，特别是未来E级计算系统设计提供了理论支撑和指导。

2. 随着并行规模增大，并程序的不确定性问题在天河超级计算机的大规模并行应用中已经日益凸显。卢凯等针对目前确定性并行技术中的全局同步问题进行优化，首先提出了一种新的弱内存一致性模型DLRC，在不引入全局同步的情况下能够消除数据竞争对程序不确定性的影响，对于天河上大规模并程序的开发、调试和维护产生了积极作用。

3. 大规模并行应用是超级计算机系统研制成功的重要标志之一。2014年，廖湘科等联合华大基因，在“天河二号”上成功设计实现了一条“人类全基因组重测序软件流水线”，该流水线可以在4小时内完成2000人的全基因组重测序数据分析，获得了1200倍的加速比。相关研究成果获国际“可扩展计算挑战赛”2015决赛奖。软件工具的总下载量已经超过2700余次。

上述研究成果为研制成功“天河二号”超级计算机系统发挥了决定性作用。“天河二号”在Top500中连续六次排名世界第一，标志着我国自主研发高性能计算机的综合技术水平进入世界领先行列。

图“天河二号”高性能计算机系统



面向社区共享的高可用云存储系统

High-available Cloud Storage System for Community-based Data Sharing

数据的爆炸性增长催生了云存储系统的蓬勃发展,大型企事业单位自建自管云存储、与单位信息基础设施和业务服务需求相匹配的数据可控共享、以及用户 TB 甚至 PB 级数据的本地化即时使用等不断涌现的新型需求,迫切需要探究构建和实施云存储的新途径。清华大学郑伟民教授课题组在国家自然科学基金(批准号:61170008, 61373145, 60925006)等的资助下,进行了系统性的关键技术攻关,取得以下主要成果:

1. 提出了提升云服务和云数据可用性的方法;实现了云存储的容器化封装、全系统保护及按需恢复;提出了一系列优化云存储系统性能和效率的方法,消除了云存储系统的性能瓶颈,提

高了效率。

2. 提出了基于社区的可控共享支持方法,程序读写竞争错误自动防护等方法,解决了由于共享所引起的安全管控、存储空间急剧膨胀等系列难题。

3. 提出了可自调整适配的云存储系统架构及实现方法,基于策略定制的主机-集群-数据中心三个层级的扩展方法等,方便了大型企事业单位自建自管云存储系统以及用户本地化即时使用 TB 乃至 PB 级数据的需求。

上述成果在 ACM FSE、USENIX FAST、MICRO、IEEE TPDS/TOC、ACM TOS 等著名国际会议和期刊上发表论文 20 余篇,获美国发明专利授权 2 项,获国家技术发明奖二等奖 1 项。

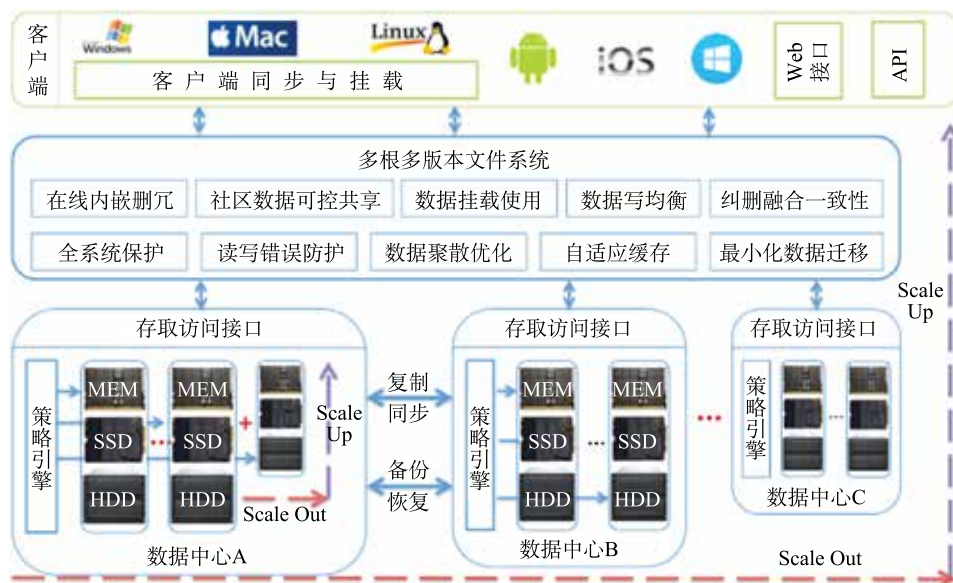


图 面向社区共享的高可用云存储系统的架构

AVS 视频编码标准持续进步并获得大规模应用

Continuous Progress and Deployment of the AVS Video Coding Standards

视频编码是数字视频产业的核心技术，是产业不断发展升级的源动力。北京大学高文教授带领的团队在国家自然科学基金（批准号：60333020, 60833013, 61121002）等的持续资助下，陆续制定出一系列视频编码标准，并获得大规模产业应用，成果获中国电子学会电子信息科学技术奖一等奖（两项）和 2012 年度国家科学技术进步奖二等奖。

2012 年，在 AVS 第一版本《信息技术 先进音视频编码 第 2 部分：视频》国家标准基础上，制定了面向高清晰度广播电视应用的 AVS+ 标准。2014 年 3 月，工业和信息化部与国家新闻出版广电总局联合发布《AVS+ 技术应用实施指南》，明确在卫星、有线、地面数字电视及互联网电视等领域全面推广，AVS

成为我国所有数字电视终端唯一必须支持的视频解码标准。截止 2015 年底，中央电视台所有高清频道以及全国超过 2/3 的省级卫视均已采用 AVS+ 播出。

第二代视频编码 AVS2 面向超高清视频编码，已经颁布为国家新闻出版广电总局行业标准。测试表明，AVS2 的编码效率领先于最新国际标准 HEVC/H.265，在编码监控视频时，效率可达到 HEVC/H.265 的 2 倍，对视频监控、智慧城市等具有重大应用价值。

AVS 在国际化方面也取得重要进展。2012 年在 IEEE 标准化委员会成立 IEEE AVS 工作组，2013 年 6 月颁布 IEEE 1857 标准，集成了过去十多年制定的 AVS 标准，有力支持了 AVS 在东南亚、中亚等多个国家的大规模应用。

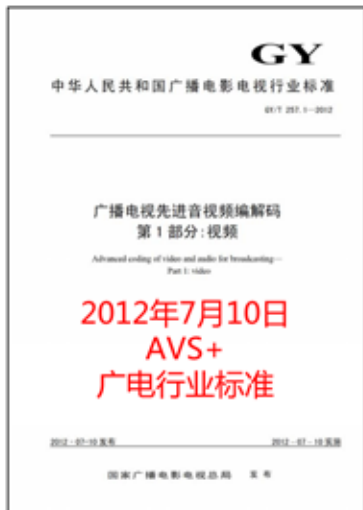


图 AVS 相关标准

视觉模式的局部建模及非线性特征获取

Local Pattern Modeling and Nonlinear Feature Extraction for Visual Processing

图像、视频等视觉信息的有效建模是模式识别、图像处理和计算机视觉的核心问题。视觉模式的建模就是要获取其中反映本质特性的描述,从而为解决后续识别、检索等应用中的瓶颈问题提供支撑。围绕这一基础性问题,在国家自然科学基金(批准号:60332010,61025010)的资助下,中国科学院计算技术研究所陈熙霖研究员领导的课题组进行了系统研究,取得的主要成果如下:

1. 借鉴人类视觉的选择性响应特性和感受器的相对性特性,提出了仿初级感受野特性和反映视感知相对性的局部特征描述方法,在包括人脸识别、人体识别、纹理分析、目标检测与跟踪等方面得到了广泛的应用。

2. 通过对数据分布流形的学习,获取视觉信息的非线性结构,从而获得数据分布的本征维度。在此基础上,建立了流形间的对齐和距离度量方法,在图像集合、视频识别以及超分辨率等方面获得了广泛的应用。

3. 通过对光照、姿态等影响成像结果的过程建模,进而用逆过程分析,获得稳定的特征表示,在光照补偿、跨姿态识别等方面得到了广泛应用。

研究成果发表在包括 *TPAMI*、*IJCV*、*TIP* 以及 *ICCV*、*CVPR* 等本领域主流刊物和会议上,相关工作累计他引超过 4000 次,最高单篇引用超过 700 次;相关成果获 2015 年度国家自然科学基金二等奖。

图 参加相关竞赛
获得的奖励证书



基于欠驱动控制的自动桥式吊车系统

Underactuated Control Based Automatic Overhead Cranes

桥式吊车是一种典型的欠驱动系统，在运送过程中，一方面要使台车快速运动到期望位置，另一方面需要使负载摆动保持在较小的范围，且台车停止时，负载无残余摆动。研究欠驱动吊车系统具有重要的理论价值和实际应用前景。在理论方面，欠驱动系统的暂态性能分析和高性能控制是当前控制领域的热点和难点问题；而从实际应用来看，如果设计出新颖的控制方法实现桥式吊车系统的高性能自动控制，则可以提高它的运送效率和安全性能，创造出良好的经济和社会效益。

南开大学方勇纯教授课题组在国家自然科学基金（批准号：61325017）等的资助下，对于欠驱动吊车的自动控制问题进行了深入研究，提出了基于轨迹规划的欠驱动吊车控制方法，创新性地将欠驱动系统的镇定控制问题转化为驱动状态的运动规划和跟踪控制器设计两个步骤，即首先根据欠驱动吊车的运动学特性来规划台车轨迹，然后利用其动力学特性设计控制器使台车沿规划好的轨迹运动，并在控制器中引入消摆环节来处理干扰导致的摆动。这种设计思路在很大程度上降低了欠驱动系统设计

与分析的理论难度，为解决欠驱动系统的控制问题提供了一种切实可行的思路，且非常便于实际应用。基于这个研究思路，在欠驱动吊车轨迹规划与跟踪控制方面取得了一系列研究成果。

课题组自 2012 ~ 2015 年，在 *IEEE* 汇刊和 *Automatica* 上发表论文 12 篇，授权发明专利 4 项，登记计算机软件著作权 1 项。基于上述研究成果，研制出 32 吨级安全高效自动操作桥式吊车系统，工业现场测试结果表明：与传统操作方式相比较，运送效率可提高 20% 左右，而事故率降低 50% 以上，同时使操作人员的工作效率提高 2 ~ 3 倍，可望缓解我国吊车操作人员严重不足的问题。此外，这种自动吊车定位精度高，有助于实现核废料运送与处理等操作。同时，无人式的操作方式可以使桥式吊车在各种危险环境下作业，从而进一步拓宽其工作范围。

图 安全高效自动桥式吊车系统 (32 吨级)



基于眼球运动神经回路控制机理的机器人仿生视觉系统

Bionic Robot Vision System Based on Oculomotor Neural Circuits Control Mechanism

图1 眼球运动数学模型



由于机器人受运动环境、姿态变化和机体振动等因素的影响,使得在非结构环境中工作的机器人视觉系统难以满足在振动、颠簸环境中的应用要求,往往会出现视频图像跳动、模糊以及跟踪目标丢失等问题。而视觉正是机器人获取外部信息最为主要的形式,因此,机器人运动视觉是亟待解决的关键问题之一。

上海大学罗均教授课题组在国家自然科学基金(批准号:61233010)等的资助下,从两个角度深入开展机器人仿生眼的研究,并取得有意义的成果:①基于眼球运动神经回路功能图谱与控制机理,建立了眼球视觉运动的仿生算法与控制系统。②基于眼球运动学与解剖学的特点,研制符合眼球运动法则的仿生机械云台。

课题组根据眼球运动的功能图谱,建立了包含摆动式与急停式前庭动眼反

射的控制模型,解决了往复扰动导致单急停式失效的问题。根据双目神经回路的视交叉以及神经回路对称性,建立了双目平移和旋转的前庭动眼反射、平滑追踪、异向运动控制模型。针对颠簸环境下动态目标跟踪的问题,提出前庭动眼反射复合平滑追踪的眼球复合运动控制仿生算法,有效补偿了机器人姿态变化与跟踪目标动态变化引起的目标丢失。

在此基础上,课题组提出基于仿生眼球运动控制模型的水下三维云台抗颠簸控制算法,应用在无人艇的水下三维云台中,在南海岛礁海域、南极罗斯海探测中得到应用,为国家海洋战略、极地战略做出贡献。项目研究成果及应用获得了2015年度上海市科技进步奖一等奖和中国国际工业博览会创新金奖。

图2 眼球运动神经回路

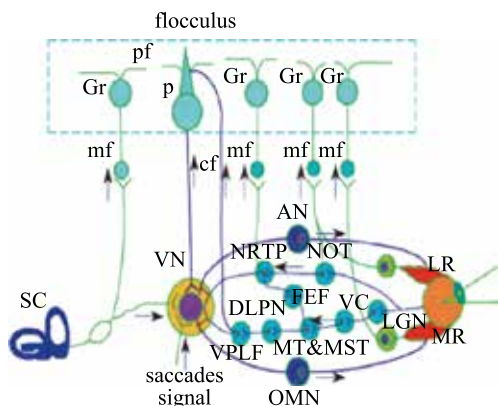


图3 无人艇水下云台抗颠簸控制应用场景



化工过程物质与能量高效利用的优化运行方法与应用研究

Operation Optimization for Highly Efficient Utilization of Materials and Energy of Chemical Process Systems

石油加工和化工生产过程是最典型的物质转化过程，研究其物质与能量高效利用的系统集成优化方法，对于提高我国原材料工业的国际竞争力意义重大。

华东理工大学钱锋教授团队在国家自然科学基金（批准号：61333010）的资助下，针对大型化工装置多产品需求、多目标运行等特点，从基于机理与运行信息融合的建模方法、系统整体行为的动态多目标优化两个方面开展了应用基础研究：①提出并实现了乙烯裂解炉炉膛内逐点流动、燃烧、辐射传热与炉管内自由基裂解反应过程的耦合建模方法与关键技术，突破了不同原料共裂解、烧嘴与炉管优化排布、裂解炉运行效益最大化等技术瓶颈，为中国石油天然气股份有限公司大庆石化公司 15 万吨/年大型裂解炉自主制造提供技术支撑。②提出了自适应代理模型建模方法，建立了前馈神经网络-状态空间的代理模型结构以改善预测

误差随时间积累问题，解决了化工生产过程中催化剂失活、结焦等引起的动态特性表征问题。③针对过程运行效率时变工况下多单元的资源配置与能质转化过程集成优化等问题，提出了复杂约束支配处理的多目标优化、基于控制向量参数化的动态优化等方法，解决了裂解炉群循环调度与操作优化一体化运行、PTA 联合装置全流程物质与能量高效利用的优化运行等问题。

研究成果成功应用于扬子石化、上海石化、吉林石化等多套大型乙烯和 PTA 装置上，其中优化运行技术已在我国大型乙烯装置的 76 台裂解炉上应用，扬子石化 PTA 装置综合能耗平均降低 20%，达到或超过了同类装置国际先进水平。相关成果发表论文 20 篇，其中 SCI 收录 11 篇；已授权国家发明专利 1 项，公开 12 项；登记计算机软件著作权 18 项；获中国石油化工集团公司科技进步奖二等奖 1 项。

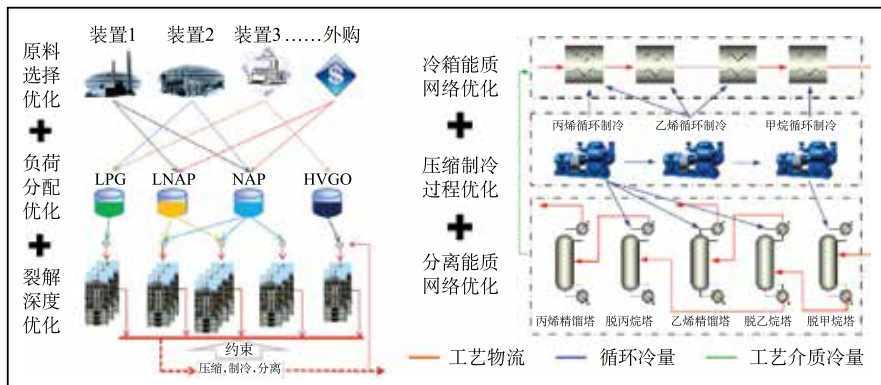


图 炉群资源配置与能质转化过程联合优化

力触觉临场感遥操作机器人关键技术及应用

Key Technologies of Haptic Telepresence Teleoperational Robot and Its Application

力触觉临场感遥操作机器人将人的智慧与机器人的适应性相结合,通过人与机器人之间传感与控制信息的交互,完成未知或危险环境中复杂的作业任务。

东南大学宋爱国教授课题组在国家自然科学基金(批准号:61075068, 61272379, 61325018)的持续资助下,对力触觉临场感遥操作机器人的力触觉感知、力触觉反馈、大时延力控制三大关键技术开展基础研究,取得了以下重要的进展:①通过实验,发现了人手力触觉感知的非线性随机共振行为,并建立了反映人手力触觉感知行为的随机共振模型。②提出了一种自解耦的机器人多维力传感器的结构设计方法,从结构上有效降低了多维力传感器的维间耦合效应;提出了一种基于耦合误差建模的解耦算法,进一步提高了多维力传感器的测量精度,测量精度优于1%F.S.。③提出了一种

一种基于并联机构的机器人力反馈手控器设计方法,解决了力反馈手控器三维平动和三维转动之间运动与力的耦合问题,力反馈精度优于2%F.S.。④提出了力触觉临场感遥操作机器人的自适应阻抗无源控制算法和基于虚拟预测环境建模的控制算法,分别解决了随机小时延($<2s$)和确定性大时延($>2s$)两类情况下遥操作机器人的稳定性问题。部分成果在我国载人航天与探月工程、核反应堆与核电站工程、助老助残等领域得到应用。

该团队近三年在 *IEEE TIE*、*IEEE TNN*、*IEEE TIM* 以及 *Automatica*、*Robotica* 等国际一流刊物上发表论文48篇,其中SCI论文37篇。成果获2013年日内瓦国际发明金奖和2014年度江苏省科技进步奖一等奖。

图1 为泰山核电站三期研制的核电站巡检遥操作机器人



图2 为中国航天员训练中心研制的水下模拟失重环境操作力测量多维力传感器及测量系统



图3 正在为丹阳假肢厂有限公司研制第三代力触觉反馈肌电控制假手,可实现截肢患者对假手带力触觉感觉的控制

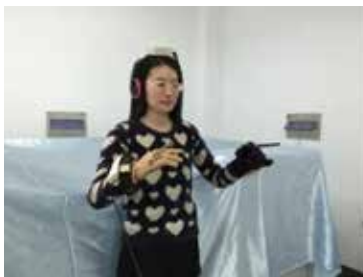


图4 为中国空间技术研究院研制的机器人航天员肌电、手势多模式人机交互遥操作控制系统

原子自旋 SERF 效应的超高灵敏磁场与惯性测量

Ultra-high Sensitivity Magnetic Field and Inertia Measurement Based on SERF Atomic Spin Effect

北京航空航天大学房建成教授团队在国家自然科学基金（批准号：61227902）的资助下，开展了超高灵敏原子磁场与惯性测量技术与实验研究，取得了重要进展。

1. 基于原子自旋效应的超高灵敏磁场测量相比核磁共振的极弱磁场测量灵敏度可提高三个数量级以上，达到 aT 量级（ 10^{-18}T ），可进行大脑及神经细胞的极弱磁测量，是未来用于脑科学研究的有效手段。课题组成功研制超高灵敏原子自旋磁场测量实验研究平台，2015 年 8 月，基于钾单原子抽运的磁场测量灵敏度达到了世界第二的指标即 $0.77\text{fT/Hz}^{1/2}$ ；基于钾 - 铷原子混合抽运的磁场测量灵

敏度在国际上首次进入亚飞特量级，达到 $0.76\text{fT/Hz}^{1/2}$ 。以上研究成果还可应用于物理学电偶极矩测量前沿基础研究。

2. 原子陀螺仪作为继机械转子陀螺、光学陀螺之后的第三代陀螺仪，漂移精度可望达到 $10^{-8}(\circ)/\text{h}$ 以上，是未来新一代水下潜器和水下机器人长时间高精度定位导航的核心部件。课题组成成功研制超高灵敏原子自旋惯性测量实验研究平台，2015 年 12 月超高灵敏原子惯性测量灵敏度达到了 $1.8 \times 10^{-6}(\circ)/(\text{s}) \cdot (\text{Hz}^{1/2})$ （目前国际报道最好水平）。成功研制 SERF 原子自旋陀螺仪原理样机，实现漂移指标优于 $0.05^\circ/\text{h}$ （目前国际报道最好水平）。



图 1 2015 年研制的 SERF 陀螺仪样机



图 2 2015 年研制的原子自旋磁场测量实验研究平台



图 3 2015 年研制的原子自旋惯性测量实验研究平台

面向生理信号检测与处理的超低功耗片上系统关键技术

Ultra-low Power System-on-Chip for Bio-medical Information Detection and Processing

面向生理信号检测与处理的片上系统是推动便携式医疗与健康监护设备发展的核心技术,但功耗问题是限制该类应用的瓶颈。因此,微瓦量级的超低功耗生理信号检测与处理片上系统及其设备目前是全球范围的研究热点和难点问题。

在国家自然科学基金(批准号:61234002)的资助下,复旦大学曾晓洋教授带领的研究团队深入开展了面向体域网(W-BAN)应用的生理信号检测与处理片上系统关键技术攻关,近3年来在超低功耗心电与脑电信号检测与处理算法及其VLSI电路技术,近阈值电压片上存储器,以及微瓦量级SoC集成等方面取得重要进展,在*IEEE Transaction*系列刊物上发表论文10多篇。主要的创新成果包括:

1. 生理信号处理算法及其VLSI结

构:提出基于降采样滤波器的心电信号R波检测算法以及新型的心电信号压缩算法,系统总能耗降低2倍以上;使用支撑向量机(SVM)算法进行脑电信号检测,并提出顺序最小优化(SMO)算法的并行化实现,算法加速比和电路实现成本显著改善。

2. 近阈值电压的片上存储器技术:提出了Twin-Cell SRAM结构,基于基准电压的差分敏感放大器及螺旋式延时链技术,以及带位交叉功能的存储器结构,片上存储器电路可以稳定工作在0.3V电源电压。

3. 微瓦量级片上系统(SoC)集成技术:提出创新的多电压域电路设计、超低功耗嵌入式MCU、以及低电压SAR-ADC等为核心的超低功耗系统集成技术。并采用65nm工艺完成SoC流片测试,总功耗低于400 μ W。

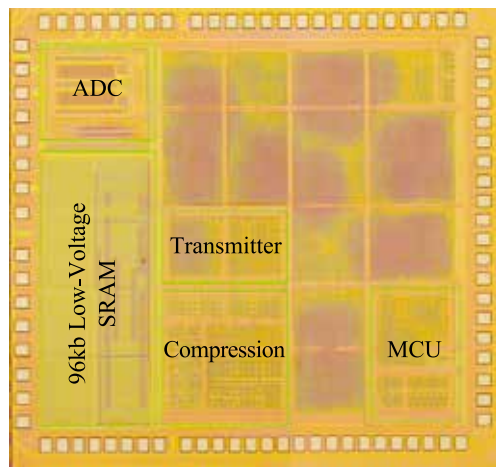


图1 超低功耗生理信号片上系统(SoC)

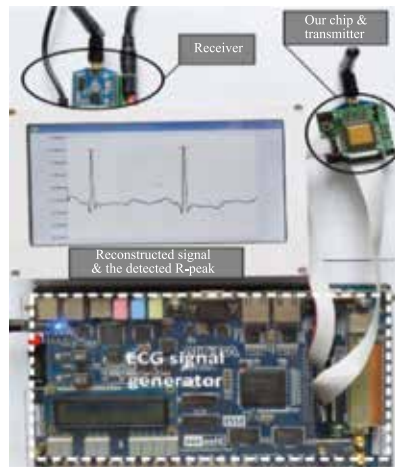


图2 SoC演示系统

新型氮化镓基异质结构材料与高效能电子器件研究

Novel GaN Heterostructures and High Efficiency Electronic Devices

氮化镓 (GaN) 半导体被誉为是研制高效能微波功率器件、功率开关器件以及短波长发光器件的理想技术。然而在材料生长机理与生长系统、材料结构与机理、器件结构与工艺机理等诸多方面 GaN 都与之前的硅和砷化镓等半导体技术存在显著不同, 技术难度和复杂度更高。

为了突破 GaN 基电子器件与材料的核心难题, 在国家自然科学基金 (批准号: 60736033, 60890191, 61334002) 等的资助下, 西安电子科技大学郝跃教授及其团队围绕 GaN 基电子器件领域的关键基础科学与技术问题开展深入探索, 取得了系统的创新性成果。相关成果被国际半导体领域著名杂志 *Semiconductor Today* 5 次报道, 受邀在国际会议作特邀报告 10 余次, 获 2009 年度国家技术发明奖二等奖和 2015 年度国家科学技术进步奖二等奖。

主要创新成果如下:

1. 基于所发现的 GaN 外延薄膜中位错倾斜 - 聚团 - 快速湮灭的新机制, 提出了一种二维 - 三维生长模式交替的冠状生长方法, 实现了极低位错密度的 GaN 外延材料, $1.7\mu\text{m}$ 薄膜位错密度低至 $5 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$, 比传统方法改善了近 2 个数量级。

2. 提出并实现了气源分时输运的脉冲式 MOCVD 生长方法与核心设备, 解决了 AlGaN、InAlN 等多元氮化物半导体材料无法高质量共融生长的难题, 实现了国际同期最高质量的 InAlN 和 AlGaN 材料。

3. 突破了高温、高压下 GaN 异质结构中高密度二维电子气溢出的难题, 成功实现了新型 GaN 双异质结构和多沟道 GaN 异质结构, 将器件工作电压提高了 1 倍, 高温下的电子迁移率提高了近 2 倍。

4. 基于低缺陷新型 GaN 异质结构材料, 结合所提出的浮空场板和新型绝缘栅技术, 研制出高效率的 GaN 微波功率器件, 73% 的功率附加效率为同期国际最高水平, 被誉为是过去十多年 GaN 电子器件领域三项最具代表性成果之一。

图 1 脉冲式 MOCVD 系统



图 2 高效能 GaN 电子器件

纳米氧化钒薄膜与非制冷红外焦平面探测器研究

VO_x Nanoscale Thin Films and Uncooled Infrared Focal Plane Detectors

非制冷红外焦平面探测器(UIFPDs)是国际上第三代凝视型红外探测技术领域的研究热点,代表世界强国前沿科技水平。研究大规模、小像元、高灵敏UIFPDs,必须解决微热目标探测、微热光电转换和微弱信号处理三大科技难题。在国家自然科学基金(批准号:60806021, 61235006, 61307117)等的资助下,电子科技大学蒋亚东教授等系统地研究了UIFPDs多物理场模型及器件设计方法、纳米氧化钒薄膜微结构与性能关系、CMOS专用读出电路设计、大规模小像元UIFPDs阵列单片集成制造中的关键技术等问题,在基础理论、关键材料、读出电路以及器件制造等方面都取得了突破性进展。主要创新成果如下:

1. 建立了UIFPDs的力-光-热-电多物理场耦合机理模型,构建了“材料-电路-器件”设计平台,实现了UIFPDs自上而下的系统级正向设计。

2. 在国际上率先提出了基于混合价态纳米氧化钒薄膜的生长调控方法,自主研发了纳米氧化钒薄膜专用溅射系统,研制出无相变、高电阻温度系数(优于2.5%/K)的纳米氧化钒热敏薄膜(图1)。

3. 发明了源极负反馈和斩波稳定相结合的CMOS放大电路结构,实现了低噪声信号读取和一阶衬底温度补偿,解决了大规模阵列弱信号提取及衬底温度补偿难题。

4. 发明了谐振耦合式微光腔结构和低应力薄膜混频生长方法,解决了高响应单元结构设计和高一致性焦平面阵列单片集成制造难题;研制出系列不同规格UIFPDs器件;其中 640×512 ($17\mu\text{m}$) UIFPDs(图2)噪声等效温差(NETD)小于40mK,达到同期国际先进水平。

相关成果获授权专利41项(美国专利2项);发表SCI论文80余篇;形成了“设计-材料-电路-器件”的全自主

知识产权技术体系。部分成果获2012年度四川省科技进步一等奖和国家技术发明奖二等奖。

图1 纳米氧化钒薄膜微观形貌

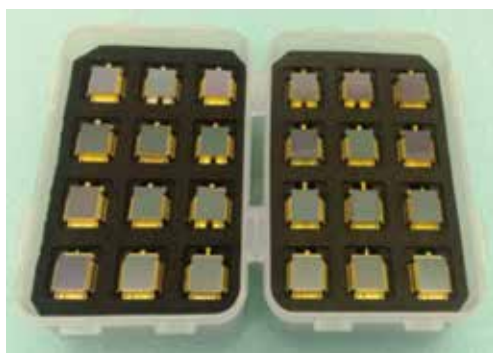
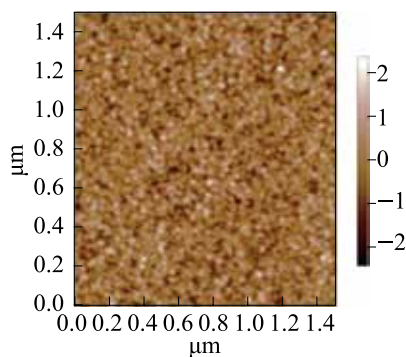


图2 640×512 ($17\mu\text{m}$) 焦平面探测器实物图

高分辨真彩色动态全息三维显示关键技术的研究

Study on Key Technologies of High-resolution Full-color Dynamic Holographic 3D Display

全息三维显示可以提供人眼所需要全部深度暗示,是符合人眼观察习惯的未来终极三维显示方法。显示器件的限制和计算的瓶颈,影响宽视角、高分辨、真彩色、动态全息三维显示技术的实用化。

在国家自然科学基金(批准号:61235002, 61420106014)的资助下,北京理工大学王涌天教授团队针对目前动态全息三维显示中的关键科学问题开展研究,取得了若干突破性进展,在 *Nat. Commun.*、*Adv. Mater.*、*Opt. Lett.*、*Opt. Express* 等国际著名刊物上发表多篇论文。主要创新成果如下:

1. 采用无缝拼接和凝胶承接的方法,实现了全息三维再现视场角的扩大。研制出量子点掺杂水凝胶的承接材料,可裸眼观察到材料内部重建的三维图像;提出多空间调制器无缝拼接和凹反系统相结合的方法,增大了再现像的可视角度。光学实验实现了 10^7 信息容量、 23° 视场角的三维光学再现的原理性验证系统。

2. 结合各种软硬件计算手段实现了百亿像素的大数据全息图快速计算。提出新型全息仿射解析面元法、伪逆矩阵-最小全变分算法、高效快速全息消遮挡算法以及高清压缩查找表法等一系列高速快捷的算法,结合 GPU 高速并行架构最终实现了 10^9 大数据量的快速计算,同条件下比传统 CPU 算法计算速度提高千倍。

3. 利用微纳结构的超颖材料和氧化石墨烯材料,研制成功彩色大视场角微纳调制器件,为未来全息三维显示指出了方向。

4. 提出复振幅调制和变频采样调制机制,大大提高了三维场景再现像质量和图像分辨率。利用复振幅彩色复用技术及编码方法,实现了单空间光调制器的彩色动态全息三维显示系统。

图1 微纳调制的三维全息显示结果

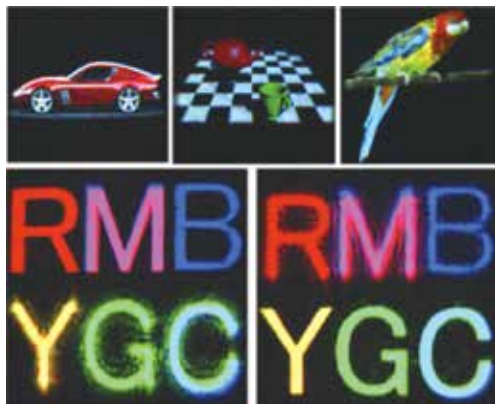
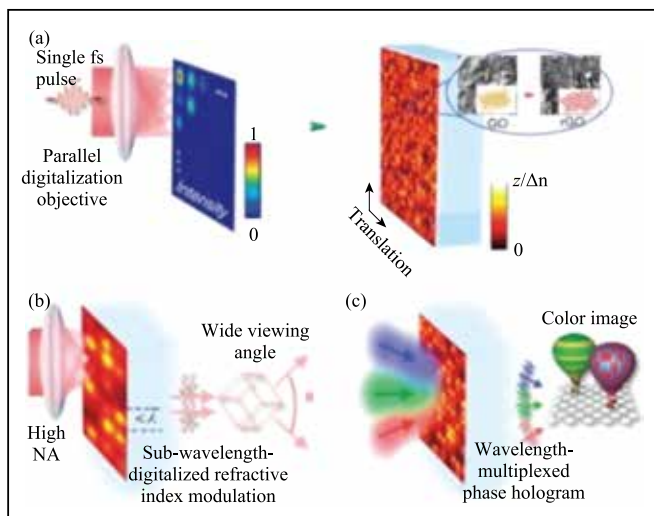


图2 单空间光调制器的彩色三维全息显示

氮化镓单晶衬底材料的生长物理和装备技术研究

Growth Physics and Equipment Technologies of Large-size GaN Single Crystal

随着 III 族氮化物器件工艺的成熟, 发展更高功率密度、更高效率和高可靠性的器件成为竞争的焦点, 大尺寸、极低缺陷密度氮化镓 (GaN) 单晶衬底和同质外延技术是其核心技术基础。同质外延技术有望开启光电子和电子领域的产业革命, 实现光和电、探测和传感、照明和通信、宽带信息和功率驱动的高效集成融合发展。

在国家自然科学基金(批准号: 61325022, 60776003)的资助下, 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所徐科研究员等围绕 GaN 单晶材料生长方

法和装备技术、应力和缺陷控制、材料物理和掺杂机理等开展了系统研究, 在自主研发的设备上开发出高质量 2~4 英寸 GaN 单晶衬底成套制备工艺技术。主要创新成果如下:

1. 自主研发成功 GaN 生长的氢化物气相外延 (HVPE) 装备, 开发了 GaN 单晶衬底的成套工艺技术, 研制成功 2~4 英寸 GaN 单晶衬底。

2. 深入研究了 GaN 材料中的位错滑移和增殖机理, 发现 GaN 材料中位错的运动规律, 在此基础上设计了图形界面、开发了 GaN 纳米柱技术, 将 2 英寸 GaN 单晶位错密度降低到 10^3cm^{-2} 。

3. 开展了电学性能掺杂调控的研究, 获得了背景电子浓度接近 10^{15}cm^{-3} 、室温迁移率大于 $1100\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的非掺杂 GaN 单晶材料; 通过 Si 掺杂实现了 n 型高电导率 GaN, 通过 Fe 补偿掺杂实现了半绝缘 GaN 单晶材料的制备; 揭示了单根位错对载流子少子寿命的影响机理, 为各类高性能 GaN 基器件研制和应用研究奠定了坚实的材料基础。

4. 研制的 2 英寸 GaN 单晶衬底实现成果转化, 目前全球用户达到 200 余家, 主要用于我国蓝光激光器、绿光激光器、超高亮度 LED、高能探测器、功率电子器件, 推动了氮化镓同质外延技术的产业发展。



图 1 自主研发的 HVPE 生长设备

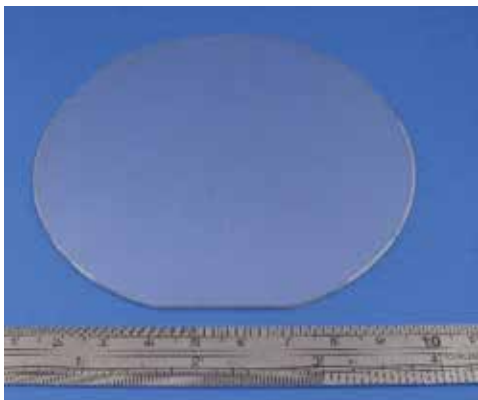


图 2 HVPE 生长的 4 英寸 GaN 单晶衬底照片

基于超材料的太赫兹功能器件研究

Functional Terahertz Meta-devices

太赫兹技术是 21 世纪重大的新兴科学技术领域之一，在通信、雷达、检测、成像、传感等方面有着广泛的应用前景。目前，随着光子学和电子学技术的发展，太赫兹产生和探测技术已日趋成熟，但用于操控太赫兹波的功能器件还很匮乏，极大地限制了太赫兹技术的发展与应用。

在国家自然科学基金（批准号：61138001）的资助下，天津大学太赫兹研究中心张伟力教授团队利用超材料及石墨烯等国际前沿热点研究方法，在新型太赫兹功能器件的研究中，取得了多项突破性进展。研究成果发表在 *Nat. Commun.*, *Phys. Rev. Lett.* 和 *Adv. Mater.* 等高水平期刊上。主要创新成果如下：

1. 提出大尺寸三维太赫兹隐身方案，从实验上实现了大尺寸、宽带的太赫兹隐身器件。隐身区与整体隐身结构的体积比为 0.05 : 1，比国际上报道的微结构太赫兹隐身器件高出一个量级，且其构成材料来源广泛，具有重要

的应用前景。

2. 利用二维石墨烯材料，提出了基于石墨烯和半导体复合结构的太赫兹波调控的新方法，在低功率连续激光和低电压（0.1 ~ 4V）的双重激励下，实现了对太赫兹信号的大幅调制，调制深度高达 83%，带宽覆盖了 0.4 ~ 2 THz 范围。该器件的特征可类比电学中的“二极管”效应，为太赫兹二维材料和主动控制器件的发展奠定了重要基础。

利用人工微结构，提出了太赫兹相位突变的控制方法，在太赫兹波段实现了平面型太赫兹异常偏折器件，偏折角度为 25° ~ 84°。在此基础上，又实现了奇异全波带菲涅尔波带片。该研究为太赫兹空间波调制器的发展提供了重要的理论和实验基础。

图 1 太赫兹三维隐身材料

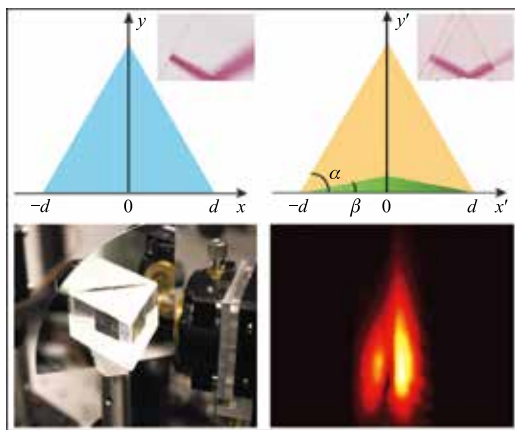
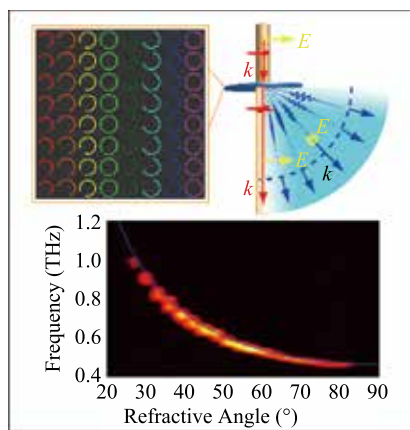


图 2 平面型宽带太赫兹异常偏折器件



片上光信号处理技术

On-chip Optical Signal Processing Technologies

光信号处理技术可以避免光电和电光转换过程,克服光电转换瓶颈,降低系统功耗,在高速光通信网络、高性能计算、高端仪器仪表、国防和军事等领域得到应用。在国家自然科学基金(批准号:61125501,60877056)的资助下,华中科技大学张新亮教授围绕 InP 基和 Si 基光信号处理芯片的器件机理、工艺和应用开展了系统研究,代表性研究成果包括:

1. InP 基器件及应用:建立半导体光放大器(SOA)结构参数与光信号

处理应用输出性能的内在联系,通过能带设计选择性调控 SOA 中的不同非线性过程。研制成功 InP 基 SOA 和延时干涉仪、阵列波导光栅的单片集成芯片,基于该集成芯片,

成功实现多信道的全光波长转换。在全光逻辑运算方面,成功实现 4 路 40Gb/s 信号的 16 个最小项和最大项产生,为构建任意的逻辑运算功能奠定了基础。

2. Si 基器件及应用:研制成功与 CMOS 工艺兼容的 SOI 基 400Gb/s 的集成相干接收机。通过优化设计, Si 上 Ge 波导探测器的 3dB 带宽超过 70GHz,是目前国际上同类型探测器的最高带宽。发展了针对模式复用、偏振复用、波分复用、高阶相位调制格式信号的 SOI 基处理芯片,实现了 640Gb/s 的非归零格式信号产生,实现了 4 波长、3 模式信号的码型转换。

项目完成过程中,在 *Opt. Express*、*Opt. Lett.* 和 *IEEE* 等期刊发表论文 140 余篇,成果被三次在年度光子学突破专刊上作为代表性进展评述,被国际经典教材引用,两次被邀请在 *SPIE Newsroom* 上撰写进展评述,在国际学术会议上作邀请报告 30 余次。部分成果曾分别获得 2009 年度和 2013 年度湖北省自然科学奖一等奖。

图 1 400Gb/s 集成相干接收机

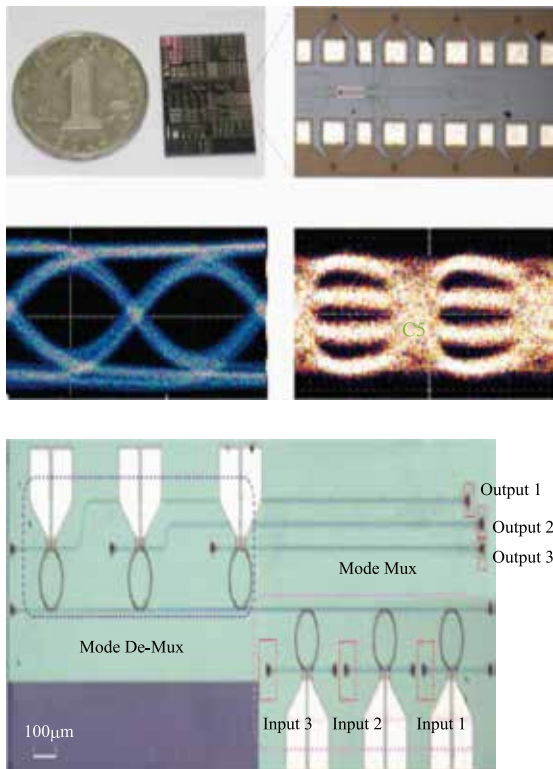


图 2 波分复用和模式复用处理集成芯片



NSFC

国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

管理科学部



能源供应安全及国家战略石油储备研究

Study on Energy Supply Security and Optimal National Strategic Petroleum Reserve

中国是世界上最大的能源生产国、消费国和净进口国,石油对外依存度已增至 60%,面临着日益复杂的能源供应安全问题。在国际能源供应格局复杂多变和能源市场价格极不稳定的条件下,以较低的成本,最大限度地保障我国的能源供应安全既是国家重大战略需求,也是管理科学学科的热点和前沿研究方向。

北京理工大学魏一鸣教授及其课题组在国家自然科学基金(批准号:70733005)等的资助下,开展了能源供

应安全与能源政策的基础研究。课题组针对能源供应链中的风险问题,提出了能源供应风险识别与评估方法,基于投资组合理论构建了风险评估模型,定量研究了我国原油和成品油进口来源风险、运输风险、价格风险,并提出了降低风险的具体策略;针对我国建立国家战略石油储备基地过程中如何确定储备规模、降低储备成本,如何应对石油供应短缺或中断事件等亟待解决的实践问题,建立了不确定性条件下的石油储备最优规模、最优补仓和释放策略的动态优化模型,并给出了突发自然灾害、金融危机、产油国局部武装冲突等不同情景下最优的储备补仓或释放方案。

依托该项目研究工作,课题组在 *Energy Economics* [2012, 34(4): 1234-1243] 等 SCI/SSCI 国际期刊发表论文 23 篇,推动了能源经济与管理学科的发展。根据项目成果提炼形成的政策咨询报告被中共中央办公厅、国务院办公厅刊物采用,并为国家有关部门提供了决策支持;依托项目成果形成的《中国能源报告 2012: 能源安全研究》于 2015 年获“第七届高等学校科学研究优秀成果奖(人文社会科学)”一等奖。

图 1 自然灾害情景下的最优储备规模

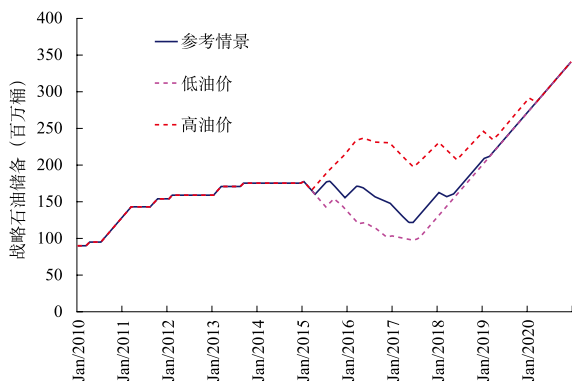
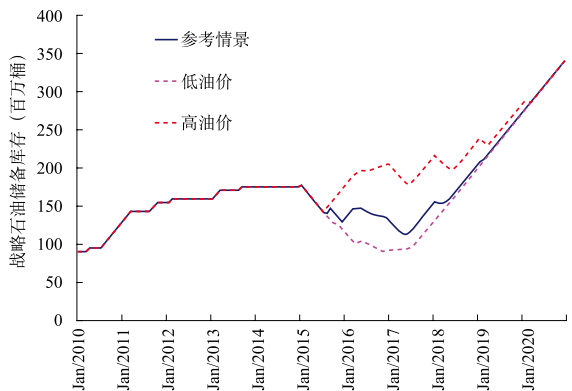


图 2 产油国局部武装冲突情景下的最优储备规模



网络促销与口碑：哪种效果更胜一筹？

Promotional Marketing or Word-of-Mouth?

随着电子商务的蓬勃发展，消费者往往会接收到网络口碑信息和商家的促销信息。那么哪一种信息对消费者决策的影响更大？复旦大学黄丽华教授及其课题组成员在国家自然科学基金（批准号：70828003）的资助下，研究了这两种信息对产品销量的直接影响，并研究这两者之间的交互作用。

课题组成员根据现有研究结论以及理论分析，以在线评论的评分、数量和分散度来衡量网络口碑，并关注优惠券和关键词赞助搜索这两种促销手段，分别提出了关于这些参数对产品销量的影响关系，以及网络口碑与促销手段之间的互补作用

的假设。课题组建立了相应的计量模型，基于大众点评网的实际数据（餐馆）进行了实证检验。研究发现，除了口碑数量，大多数的口碑和促销交互作用并不显著，其中，口碑数量与优惠券促销存在着负相关的关系。结果表明，餐馆的口碑数量越多，优惠券吸引顾客的边际效应递减；而有较少口碑数量的餐馆提供优惠券会吸引更多的顾客，促销在其吸引消费者方面起着很重要的作用。这也表明，在第三方评论平台上，消费者更在意口碑而不是促销信息。本研究对那些考虑在第三方评论平台上进行营销活动的企业来说有重要的理论参考价值。

表 餐馆网络促销和口碑的效果比较

变量类别	变量名	模型 1	模型 2	模型 3
口碑	评分	0.033**	0.036**	0.030**
	数量	0.341***	0.333***	0.345***
	负面点评比例	-0.065**	-0.061	-0.071**
促销	优惠券促销		0.239***	0.275***
	优惠券面值		-0.001	-0.001
	竞价排名广告		0.054	0.027
	竞价排名 * 优惠券		-0.072**	-0.092**
口碑与促销信息的交互	评分 * 优惠券			0.038
	评分 * 竞价排名			0.039
	数量 * 优惠券			-0.151**
	数量 * 竞价排名			0.096**
	负面评论 * 优惠券			-0.041
	负面评论 * 竞价排名			-0.043
控制变量	平均价格	0.042**	0.044**	0.044**
	竞争对手数量	0.005	0.006	0.006
	节假日	-0.040**	-0.039	-0.038

Fundamental Theories and Assessment Methods on Circular Economy and Low Carbon Development

相关成果发表在 *Science*, *Nature*, *Nat. Clim. Change* 等国际顶级期刊上, 并先后取得辽宁省科技进步奖二等奖及三等奖等在内的科研奖项 5 项。课题负责人作为主要作者 (Lead Author) 参加了联合国政府间气候变化委员会第五次评估报告 (IPCC-AR5) 第三工作组第十章 (工业) 的撰写工作, 服务于国家的气候变化谈判。

中国企业管理理论创新研究——“合”理论

A Theory of Amalgamation—An Indigenous Theory for Chinese Management

在过去的三十多年里，尽管中国的经济与社会发展取得了令人瞩目的成绩，但完全基于中国管理实践并能对国际主流产生重大影响的中国原创重大管理理论尚未产生。

为填补这一空白，中山大学陆亚东教授及其课题组在国家自然科学基金（批准号：71232010）的资助下，开展了基于中国背景下的战略管理理论创新研究，构建了中国特色的“合”理论体系，阐明了仅有普通资源的中国企业独特的发展路径——通过创造性地利用“合”（包括复合、联合、结合、相合）建立其竞争优势或弥补其劣势，创造出市场快速响应、高性价比、复合式服务等独特的优势。“合”理论关注资源和能力的

独特组合、开放利用和共生发展，其核心思想是以合补短、以合促长、合则共生。“合”理论不仅考虑了中国独特的社会与文化、制度与市场等外部因素，也结合了中国企业特有的组织基础和资源特征，不仅阐述了其理论内涵和目标及手段，也展示了其哲学基础和理论逻辑与范式。

“合”理论已在国际、国内主要研究期刊发表，并迅速引起关注、转载和评述，被普遍认为是中国特色管理理论的重大突破，为推动中国特色管理理论走向国际主流奠定了重要基础。该理论融合归纳了中国企业独特的优秀实践，又为更大范围的中国企业未来发展指出了前进方向。

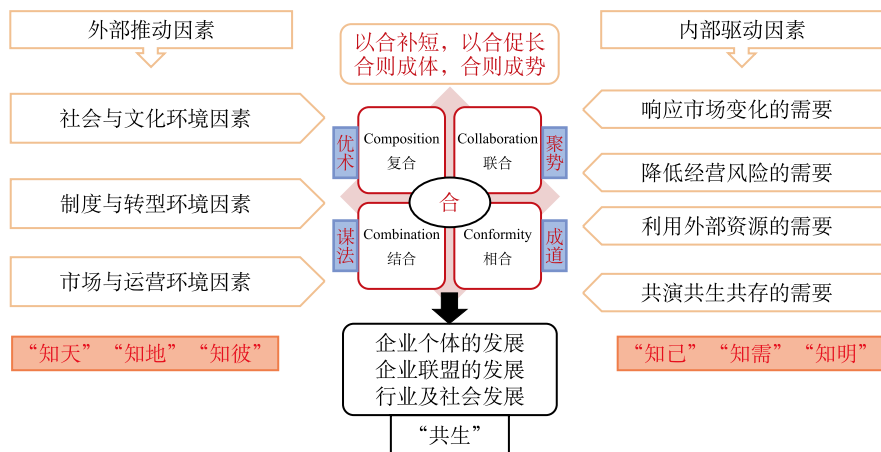


图 合理论的核心内涵

基于云计算的复杂环境下不确定性决策支持平台 Uncertain Decision Support Platform under Complexity Environment Based on Cloud Computing

中南大学陈晓红教授及其课题组在国家自然科学基金(批准号:71221006,71431006)的资助下,开展基于云计算的复杂环境下不确定决策支持平台研究与开发工作。

该平台采用本体技术对决策问题的属性进行分析并描述决策问题相关概念之间的语义关系,提出基于云平台环境构建了决策问题分析服务框架,该方法提高了DSS对决策问题分析理解的智能性和准确性。提出了一种基于模糊类别分布的文本分类特征选择方法,该方法解决了相关技术中存在的文本分类系统在非均衡数据集情况下分类性能较差的问题,进而提高了平台中文本分类器的性能。此外,根据基于SOA架构的开放

式群决策支持平台框架模型,开发出包括基础构建、Web服务、决策分析在内的集数据采集、数据分析和决策方案形成、决策服务推送于一体,服务器、桌面端和移动端相统一的平台原型系统。

该平台已成功为“两型”工程问题提供决策支持,包括节能减排、环境综合治理、资源循环利用等工程的目标、措施与方案制定,“两型”产业与园区建设工程规划等问题。该成果获得发明专利11项,部分结果发表在*Nature*(2015, 527: 38)上,获2015年度教育部第七届高等学校科学研究优秀成果奖(人文社会科学)一等奖。

图2 平台云服务提供与组装



图1 不确定性决策支持平台原型系统



考虑复杂网络技术经济特征的供应链管理方法与政策设计

Management Method and Policy Design for Supply Chain Considering the Technological and Economic Characteristics of Complex Networks

长沙理工大学赖明勇教授等在国家自然科学基金(批准号:70925006,71420107027)的资助下,以具有复杂网络技术经济特性的供应链为研究对象,沿着技术微观层面、市场中观层面到政策宏观层面的研究思路,系统开展融合个体行为、市场均衡、调控策略的供应链管理方法与政策设计研究,并应用在电力和物流行业中。

立足于一次能源供应、发电、输电、售电至用电整个供应链,剖析参与电网调度的可控负荷需求响应行为,刻画考虑天气波动的可再生和化石能源发电行为,揭示了机组、电网和负荷之间的影响机理。在此基础上,提出了诱导绿色电力供应链均衡的市场调控政策设计方法。研究成果形成了电力供应链脆弱性评估的 CIGRE 和 IEEE 行业技术规范,

并成功应用于国家/区域/省级电网公司、大型发电企业、政府管理部门的监管和政策制定工作中,为提升电力产业管理水平提供了重要的理论支撑。

针对商品生产、批发、零售至消费的供应链,建立基于海量数据挖掘的物流分拣策略以及不确定性配送车辆智能调度方法,显著提高了多品种、复杂订单、非规则包装的分拣效率,极大提升了车辆路径实时优化和监控导航性能。在此基础上,提出了成本和需求同时发生扰动时多零售商供应链的协调机制,实现仓储、配送、零售等物流业务的协同管理,形成了中华人民共和国烟草物流服务行业标准。成果获国家科学技术进步奖二等奖,形成具有复杂网络的供应链管理理论与政策设计理论体系。

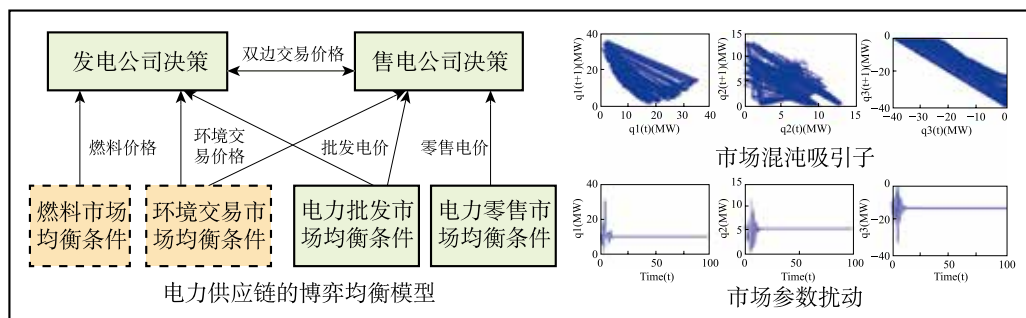
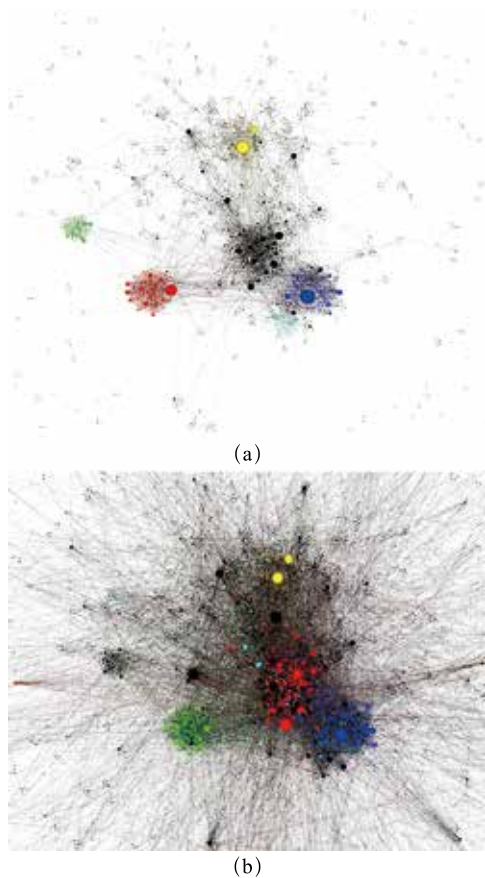


图 绿色电力供应链管理

大数据分析揭示自然灾害条件下的人群行为规律

Big Data Analytics Reveal Human Behavior Pattern under Extreme Nature Disasters

图 地震前日文
Twitter 网络 (a)、地震
后日文 Twitter 网络 (b)



在极端事件下对受影响的民众进行实时、准确、全面的行为分析,对于科学开展应急救援具有重要意义。由于重大灾害事件的破坏性,往往不能及时从物理空间获取第一手灾害信息,此时,以移动互联网为基础的社交网络平台,如微博、微信、Facebook、Twitter 等开展大规模人群行为分析与灾害事件研判提供了可能。然而,从互联网数据中挖掘出与灾害事件相关的有效信息,还面临语言规范、语种、人群划分等难题。

在国家自然科学基金(批准号:71301165)的资助下,中国人民解放军国防科学技术大学吕欣副教授带领的一项研究,首次通过互联网大数据揭示了日本 3.11 大地震前后的人群活

动规律。通过分析超过七百四十万活动用户的全球微博数据,研究发现,大地震对在线人群的行为模式产生了深刻影响:不仅仅体现在用户在线信息发布量的增加,直接受到影响的日文用户群体还极大程度上增加了与其交互的网络用户数量(个体社交网络的扩展)。吕欣等提出了一个崭新的在线社会网络社区分析框架,通过对网络用户进行社区发现、动态分析、微博内容提取,该框架可以用于全面地描述地震前后在线社会网络的社区结构和在线内容的演化模式。

该研究成果于 2014 年 10 月在 *Sci. Rep.* (2014, 4: 6773) 发表,并被世界科技研究新闻资讯和美国圣塔菲研究所分别以“人类在社交媒体上如何应对灾难事件”和“社会震荡波:研究人类应对灾害行为的 Twitter Style”为题高度评价和报道。

此外,通过总结多年以来在移动大数据与应急管理方面的应用经验,吕欣及其合作者撰写的关于移动大数据可代表性、隐私保护和数据共享机制的通信评论发表在 *Nature* (2014, 514: 35)。

城市交通系统管理理论与控制方法

The Management Theory and Control Method of Urban Traffic & Transportation Systems

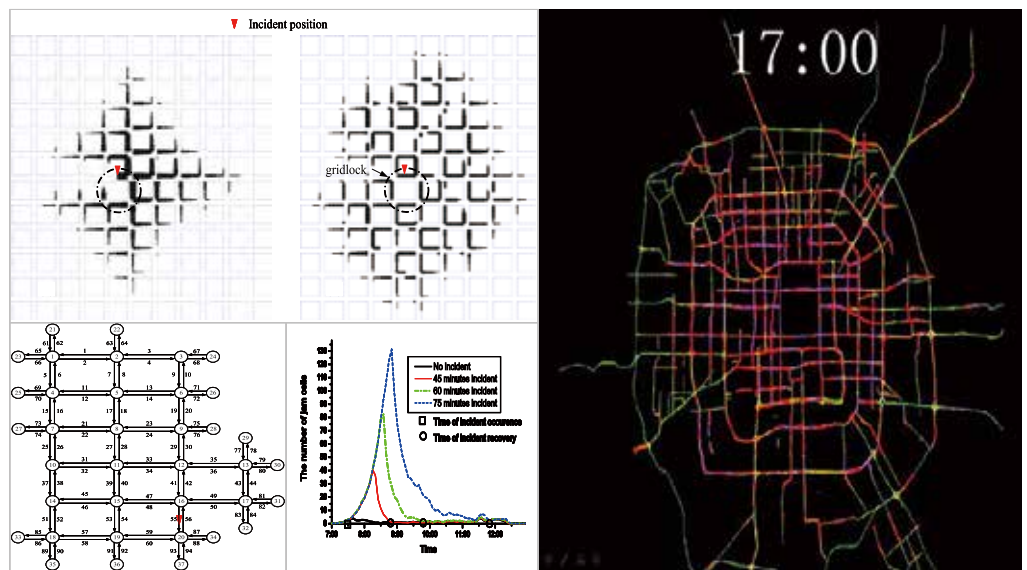
对交通拥堵传播规律的认识是进行拥堵缓解和预防的前提,也是当前国际上关于城市智能交通研究的热点与难点问题。

北京交通大学高自友教授在国家自然科学基金(批准号:70631001)的资助下,带领团队在城市交通管理理论及应用领域进行了系统深入研究。在城市道路交通方面,深入分析了机动车和非机动车之间的相互干扰机理,建立了道路混合交通流动力学模型,研究了混合交通流在路网上的时空分布,为提升城市道路通行能力奠定了理论基础;将微观道路交通流模型与宏观路网交通流模型交叉融合,提出了可准确刻画交通拥堵的形成、传播与消散全过程的动态最优配流模型,为准确构建城市交通拥堵评价指标体系及交通信息预报系统提供了理论依据。在城市轨道交通方面,系统研究了城市轨道交通列车运行组织优化的基础理论和方法,探讨了不确定因素干扰下列车

运行图的优化设计方法及高效、节能的列车运行组织方法,提出了移动闭塞条件下的列车控制优化策略,构建了基于出行需求与系统节能的城市轨道交通调度控制一体化理论模型,为列车运行组织优化的设计、仿真和分析提供了有力工具。部分研究成果已在城市交通拥堵指数评价指标设计以及北京市公交调度指挥系统研发等实际应用中取得了良好的应用效果。

成果发表在权威期刊 *Oper. Res.*、*Transp. Sci.* 及 *Transp. Res.-B* 上,并得到国内外同行的大量引用,先后获 2011 年度国家自然科学奖二等奖、2014 年度教育部自然科学奖一等奖。

图 城市交通拥堵的形成、传播与消散的全过程



会计信息质量及其在资本市场中的作用

Accounting Information Quality and Its Role in the Capital Market

如何发挥资本市场的资源配置作用,是推进资本市场建设的重要内容;而上市公司所披露的会计信息则是资本市场中的重要信息,其质量如何,如何在资本市场中发挥作用,则是直接关系到资本市场能否取得发展的重要问题。北京大学吴联生教授等在国家自然科学基金(批准号:71025003)的资助下,对该问题进行了研究,相应成果发表在 *The Accounting Review*、《经济研究》等国内外权威刊物上。

研究发现,当会计准则赋予管理层

更多的判断空间时,上市公司所披露的会计信息的质量会下降,并进而提高股价暴跌的风险;其中,会计盈余管理和真实盈余管理之间存在着部分替代的效应;而我国大力推进的会计事务所合并,不仅能够提高会计信息质量,还能够提高审计效率,但审计效率提高所带来的价值并没有与上市公司分享;但在我国政府控制的审计市场中,依赖于行政权利的稳定关系,会计事务所和上市公司的政府背景影响了审计师选择,从而对会计信息质量产生负面影响。上市公司盈余公告对资本市场资源配置功能的促进作用,其途径在于直接向资本市场提供了公共信息,而不是刺激分析师去获得更多的私人信息。

该项目研究推进了会计信息基本理论和中国特色审计理论的发展;同时,该项目紧密结合我国会计和审计的实践,为我国会计准则的制定与审计市场的发展提供了重要依据。

图 成果发表论文的学术期刊



互联网技术和社会化媒体影响资本市场信息环境的规律

Impacts of Internet Technologies and Social Media on the Information Environment of Capital Markets

随着“互联网+”上升为国家战略，有效利用互联网技术实现行业和市场升级转型，是当前急需研究的重要社会经济问题。清华大学徐心教授和合作者在国家自然科学基金（批准号：70890080，71001056）的资助下，开展了分析互联网技术和社会化媒体影响资本市场信息环境的理论和实证研究。

金融行业和资本市场的核心产品属信息产品，资本市场为降低运行成本、减小市场波动并维护市场公平，必须建立一个稳定透明的市场信息环境。建立在互联网上的社会化媒体已成为市场参与者广为使用的信息平台，此类平台可以有效汇聚分散在市场中的信息碎片。项目研究组针

对此类平台，提出社会化媒体影响资本市场信息环境的规律，发现社会化媒体通过消弱市场信息不对称，促进上市公司信息披露并降低市场波动的实证证据，这些发现为有效利用互联网技术建设公平透明的市场信息环境、并进而提高市场运作效率提供理论和实证依据。

该成果的部分结果发表在 *MIS Quarterly* [2013, 37(4): 1043-1068], 并被 *MIS Quarterly* 评选为2013年度（唯一）最佳论文。*MIS Quarterly* 是管理信息系统学科国际权威期刊，是该学科历史最悠久的刊物。这是自该刊成立以来，首次将最佳论文奖授予署名单位是中国大陆科研院校的研究成果。

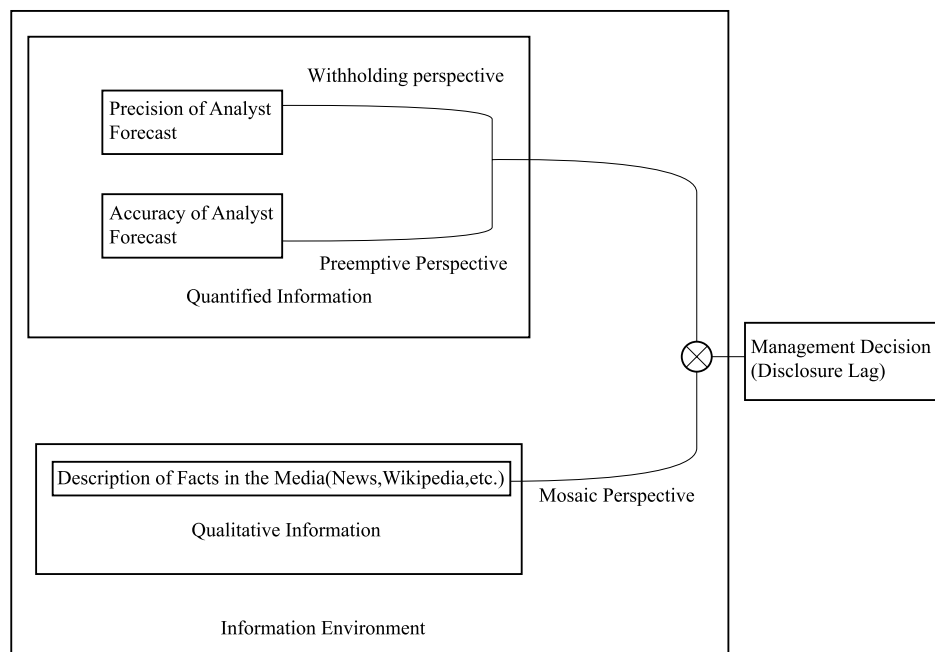


图 社会化媒体削弱资本市场信息不确定性的理论框架

社会网络如何影响消费者决策

How Social Networks Affect Consumer Decision Making

随着互联网信息技术和社交网络新媒体的飞速发展,消费者的决策越来越受到社会网络中其他用户的影响,这种决策者之间的相互影响与依赖成为全球互联时代消费者决策行为的一个根本特征。清华大学陈煜波教授在国家自然科学基金(批准号:71325005)的资助下,对社会网络中人与人之间的群体性社会互动如何影响消费者决策行为和商业创

新展开深入的理论研究。该课题的研究发现当社会网络较小时,朋友圈的信息比陌生人网络更加准确,观察朋友的行为可以让消费者更准确地推断产品质量;然而当网络逐渐增大时,陌生人的网络变得更有效,陌生人社会网络中的其他用户的行为可以提

供比朋友圈更准确的质量信息。而最有利于信息积累和传播的网络是一个包括朋友、熟人和陌生人的混合网络,其中用户之间的偏好既不完全相同也不差别过大。这样用户既可以利用其他用户的信息进行社会化学习,也不会盲目从众忽略自己的私有信息。从企业管理角度,对大众市场产品,企业应该更多地采用弱关系的社会化网络新媒体作为产品营销平台、从而促进消费者观察其他陌生人的行为。然而,针对用户网络相对较小的小众产品,强关系的朋友圈社会网络则能更有效。

该成果发表于管理学国际顶级期刊 *Marketing Science* [2015, 37(4): 573-589] 上。

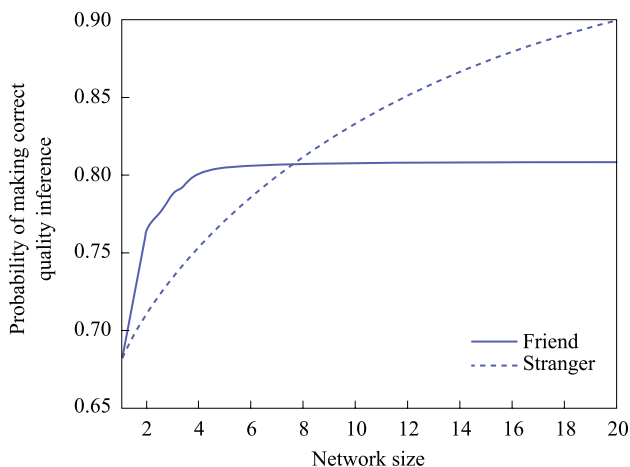


图 不同社会网络中消费者做出正确质量判断的可能性

货物种类有限时的分类存储策略：分类多不代表效率高

Class-based Storage with a Finite Number of Items: More Is Not Always Better

在过去近 40 年中，仓储管理领域存在一个普适性结论：在分类存储策略中，区域分类数量越多仓储系统存取货效率越高。此结论由三位 INFORMS Fellow 于 1976 年在管理学顶级刊物 *Manage. Sci.* 上提出，并被各大名校教程（如 *Facility Planning* 等）作为专业理论使用。然而，此结论并未被现实企业所采用，反而 3 ~ 5 类的分类存储策略应用广泛。这一现象成为仓储管理领域过去近 40 年的理论未解之谜。

中国科学技术大学余玉刚教授及其课题组在国家自然科学基金（批准号：71225002）等的资助下，开展了针对下一代仓储系统的运作优化研究。课题组研究指出货物分类数量增加可以有效区分货物周转率，进而提高存取货物的效率，但与此同时，随着每一类中货物种

类的减少会导致不同货物之间对存储空间共享效率降低，从而导致仓储系统的总存储空间膨胀（图 1），降低了仓储系统的运行效率。基于这一现象，课题组对仓储系统的分类存储策略模型进行了重建与优化，发现系统存取货物所需时间与分类数量之间在一般情景下的“碗形曲线”关系（图 2），首次在理论上说明了货物分成 3 ~ 5 类能够为系统提供最高的工作效率，这与现实中企业的做法高度一致，为上述困扰学界近 40 年的谜题给出了理论解释。“碗形曲线”揭示管理者可以根据成本等其他需求在“碗底”自由选择分类数，不会对仓储系统的效率带来显著影响。该成果的主要结论发表在 *Prod. Oper. Manage.* [2015, 24, (8): 1235-1247] 上。

该研究成果修正了沿用近 40 年的仓储管理理论的不足，为传统仓储理论及教科书修订提供了重要参考。

图 1 系统所需存储空间与货物分类数量的关系

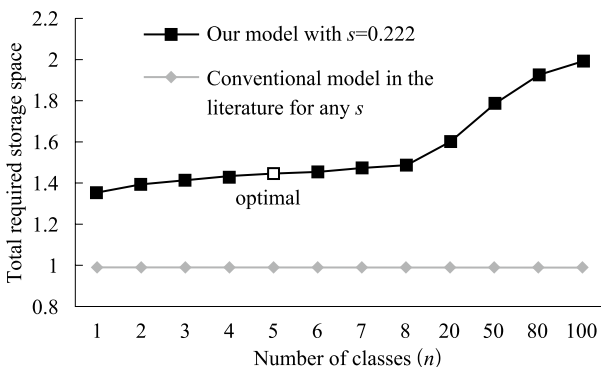
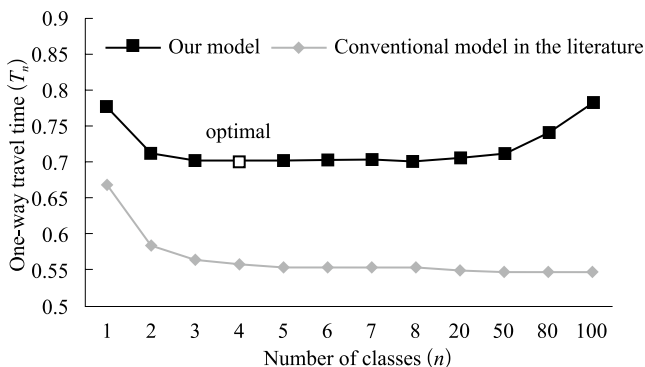


图 2 分类数量与系统平均存取时间代表性关系



基于复杂系统建模的地震应急医学救援实证研究 有效提高我国应急管理精确决策能力

Empirical Research of Earthquake Emergency Medical Relief Based on Complex Systems Modeling Effectively Enhances Ability of Accurate Decision-making of China's Emergency Management

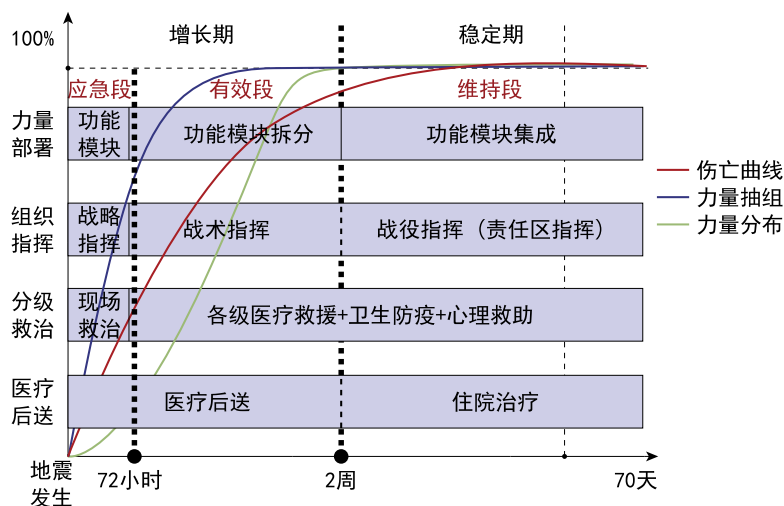
中国自古以来有“震灾大国”之称，特别是近十年，地震灾害发生频率呈上升趋势，其所造成的大规模伤亡已成为危害我国公共安全的核心问题。因此，系统总结与发现地震伤亡发生规律，精确制定应对策略以提升救援效率、降低伤亡危害，更成为我国灾害应急管理的首要任务。

中国人民解放军第二军医大学张鹭教授及其课题组在国家自然科学基金(批准号: 91224005)的资助下，开展了基于地震伤病员发生复杂建模的救援力量配置与部署策略研究。课题组聚焦地

震应急医学救援实证研究，围绕地震伤病员(需方)与救援力量(供方)两条主线，历经6年先后针对汶川、玉树、芦山、鲁甸四次地震进行灾区调研与数据收集，总结并提出地震应急医学救援“两期三段”基本规律(地震伤病员“两期”特征与救援力量部署“三段”规律)，通过深入数据挖掘，建立地震创伤因子库，应用系统动力学与复杂系统建模等手段，构建地震应急救援与医疗后送复杂模型体系，为我国地震应急医学救援的科学决策提供理论依据与策略方案。

相关研究结果发表于世界顶级医学期刊 *Lancet* [2012, 379 (9818): 853-861 IF: 39.8] 后，芦山地震后再次在 *Lancet* 发表述评 [2013, 381 (9882): 1984]，实现国内应急管理领域理论突破。目前项目已累计发表地震救援相关SCI论文12篇，主编专著3部(英文专著1部)，授权发明专利7项，并获2014年度国家科学技术进步奖二等奖，研究成果对国家和军队灾害应急医学救援的理论与实践具有重要意义。

图 地震应急医学救援“两期三段”规律



中国高速铁路促进区域经济整合的经济
机制与效果研究

The Mechanisms and Effects of China's Bullet Trains on
Regional Market Integration

城镇化是中国经济增长的引擎，但也会带来交通拥堵和环境污染等“城市病”，降低城市居民的生活质量。近年来中国高速铁路的快速发展显著“拉近”了大城市与临近中小城市之间的距离，有助于缓解大城市的增长压力，也能够为沿线中小城市带来经济发展机会。

清华大学郑思齐教授在国家自然科学基金（批准号：70973065，71273154）的资助下，与美国加州大学洛杉矶分校卡恩教授合作，开展了高速铁路对区域经济整合影响的经济学研究。通过定量测度中国高速铁路引发的市场潜力增加和城市区位优势动态变化，发现高速铁路的开通将有效降低大城市的集聚成本，在大城市周边连接高速铁路的中小城市

明显受益，促进了区域协调发展。该成果在美国科学院院刊 *PNAS* 上以研究长文（*PNAS Plus*）的形式发表 [2013, 110（14）：E1248-E1253]，该刊也撰文对主要研究发现进行了介绍和评述。

该成果是国际上早期关注中国高速铁路溢出效应的经济学研究之一，为中国高速铁路的社会经济效益分析提供了定量依据，能够为城际交通基础设施的规划、建设与管理提供支持。成果在线发表后引起了较大反响，被中国政府门户网站、人民网、*Harvard Business Review*、*The Economist* 等国内外媒体报道，美国科学促进会旗下机构 EurekaAlert! 也进行了报道和专访。

图 2010 年全国三大经济区内高速铁路分布及典型线路通行时间变化



中国公共部门科研人员知识产权保护与利用研究

The Intellectual Property Rights Protection and Utilization of Scientist in China's Public Sector

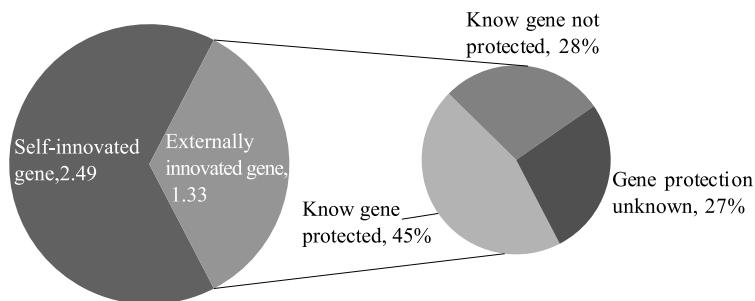
过去研究表明, 尽管知识产权不断引起高度重视, 但以基础研究为主的公共科研部门的科学家对知识产权并不很关注。然而, 当公共部门的研发同时涉及公共产品和技术商业化, 科学家会对知识产权做出如何反应? 过去文献没有回答这个问题。

北京理工大学胡瑞法教授及其课题组在国家自然科学基金(批准号: 71210004)等的资助下, 通过对承担转基因重大专项研究的147家政府科研单位的378个研究团队调查数据的分析, 研究了中国科学家对其研发中所采用的技术和功能基因的知识产权(特别是对他人的知识产权)的认知和实际使用行为。研究表明: 科学家是否关注知识产权同其研究使命有关; 同是公共科研部门的科学家, 当其研究更偏向能商业化的技术时, 他们就更关注使用他人

专利的技术和材料, 并能较好地合法利用; 研究结果也解释了同是公共科研部门的科学家, 在中国比美国更关心其所使用他人的研究技术和材料是否已被专利保护的现象, 这是因为中国科研部门同时承担着基础研究和应用研究。该成果的部分结果发表在 *Nat. Biotechnol.* [2013, 31(11): 986-988] 上。

另外, 该项目团队的研究也发现中国的转基因技术研发具有与跨国公司竞争的實力。中国的转基因授权专利和SCI论文数都仅次于美国但远高于其他国家, 其中转基因水稻和转基因棉花居世界领先地位。尤其是转基因水稻, 无论是所获得的专利或者基础研究, 均处于世界绝对领先水平; 其他转基因作物的研发竞争力虽然低于美国, 但远高于其他国家。

图 中国转基因研发人员对其所利用基因知识产权的了解及利用情况



NSEFC

国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

医学科学部



过度免疫反应导致重症甲型流感

Hyper Immune Response Is Key to the Severity of Influenza Virus Infection

首都医科大学王辰教授在国家自然科学基金(批准号:81030032)的资助下,利用甲型H1N1流感患者临床标本和实验动物模型,证实过度免疫应答和炎症反应为流感重症原因,揭示不同亚型流感的重症危险因素和过度炎症反应差异;发现T淋巴细胞、NK细胞、IFN- γ 等过度免疫在重症甲型流感发病中的作用机制;发现IL-10、IL-12(p70)、HMGB1及Ang II分别为甲型H1N1和H7N9流感重症生物标志物;开展抗病毒药物和免疫调节药物干预重症流感所致过度免疫应答以减轻病症研究,

揭示了重症流感发生机制,为临床重症流感早期诊断和防控提供了理论依据和可行方案。本项目已发表SCI论文8篇,课题组成员作为国家卫生和计划生育委员会H7N9诊疗指南主要执笔人,将研究成果指导临床实践并成为行业规范;与国际知名专家共同在*Lancet Infect. Dis.*和*Expert Rev. Anti-Infe. Therapy*撰写流感相关综述2篇;部分成果作为“我国首次对甲型H1N1流感大流行有效防控及集成创新性研究”的重要部分获2014年度国家科学技术进步奖一等奖。

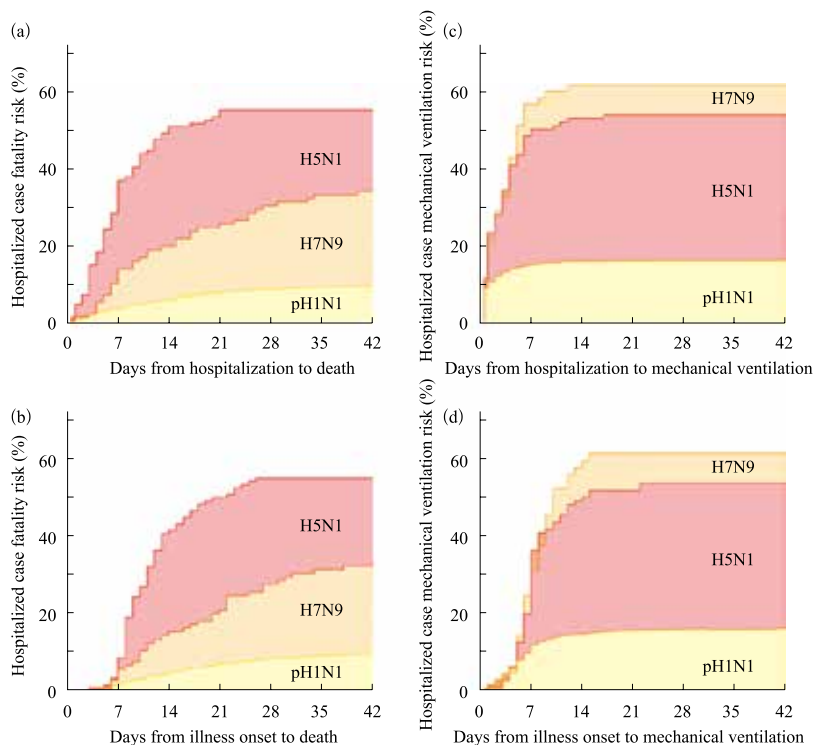


图 H7N9 炎症反应强度介于 H5N1 和 H1N1 之间 [Clin. Infect Dis., 2014, 58 (8): 1095-1103]

胸闷变异性哮喘

Chest Tightness Variant Asthma

浙江大学沈华浩教授在国家自然科学基金（批准号：30825019）等的资助下，经过近 10 年研究，发现并首次提出以胸闷为唯一症状的不典型哮喘：胸闷变异性哮喘（chest tightness variant asthma, CTVA）。沈华浩等分析了 2004 ~ 2011 年，以胸闷为唯一临床表现就诊于该院呼吸科的 24 例哮喘患者后发现，胸闷变异性哮喘患者没有喘息和呼吸困难，没有反复发作的咳嗽，肺部听诊没有哮鸣音，却具有气道高反应性和可逆性气流受限，以及典型的哮喘病理特征，并对吸入性皮质类固醇（ICS）或 ICS 加长效 β_2 受体激动剂治疗有效（见表）。论文发表在 *Ann. Allergy Asthma Immunol.* (2013, 111: 226) 上。

这是国际上首次报道以胸闷为唯一

临床表现的哮喘新类型，也是全世界为数不多的由我国科学家命名的疾病之一。国际著名哮喘专家，咳嗽变异性哮喘的提出者 Richard Irwin 教授，以及我国著名呼吸病学专家钟南山院士等专门就胸闷变异性哮喘撰写述评，认为该哮喘新类型的提出是对哮喘研究领域的重要贡献。目前，在最新出版的我国高等医学院校统编教材《内科学》，我国呼吸领域权威临床工具书《呼吸病学》，以及最新修订的《中国支气管哮喘防治指南》等均纳入了胸闷变异性哮喘概念。这一新型哮喘的发现有望完善哮喘的临床表现和诊断理论体系。同时，对该类型哮喘的诊治将得到临床医生的进一步重视，尤其会使相关漏诊或误诊的胸闷变异性哮喘患者受益。

表 胸闷变异性哮喘患者治疗转归情况

	治疗前 (95% 置信区间)	治疗后 (95% 置信区间)	P 值
ACT 评分	17.29 ± 0.97 (15.29 ~ 19.30)	22.50 ± 0.63 (21.19 ~ 23.81)	< 0.0001
FEV ₁ (% 预计值)	64.33 ± 5.64 (49.85 ~ 78.82)	87.20 ± 6.65 (70.11 ~ 104.3)	< 0.05
PD ₂₀ (mg)	1.07 ± 0.19 (0.66 ~ 1.47)	1.85 ± 0.26 (1.29 ~ 2040)	< 0.05

注：ACT 评分：哮喘控制测试评分；FEV₁：第一秒用力呼吸容积；PD₂₀：使 FEV₁ 降低 20% 所需剂量。



图 首例胸闷变异性哮喘患者的治疗历程

移植后白血病复发及移植物抗宿主病新型防治体系的建立及应用

Novel Therapy and Prophylaxis Systems for Leukemia Relapse and Graft-versus-host Disease after Stem Cell Transplantation

图 确定 Ph 阳性 ALL 的 $CD34^+CD38^-CD58^-$ 启动细胞群

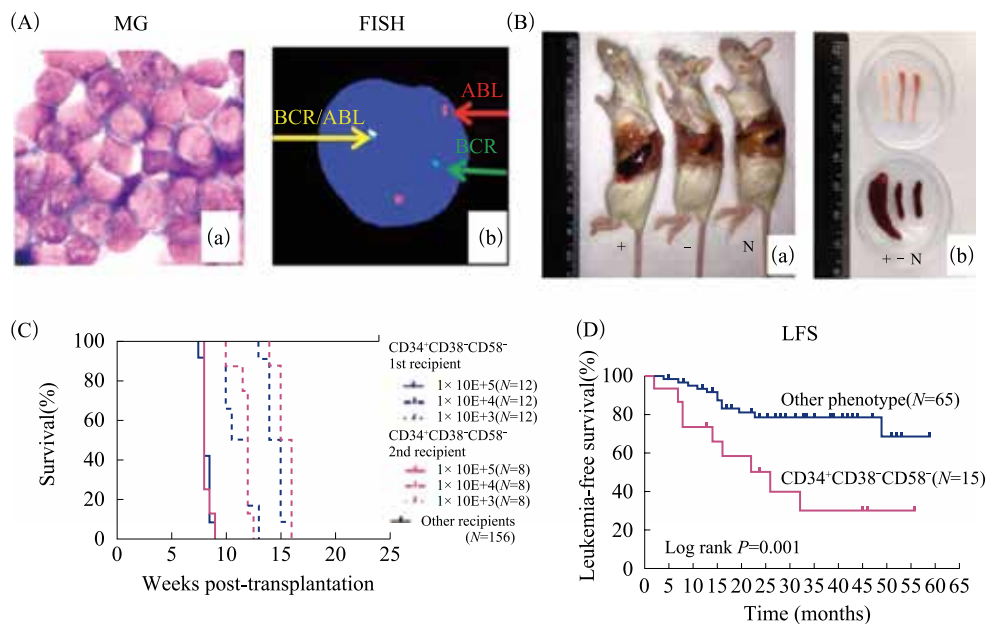
(A) 常规染色和免疫荧光原位杂交显示的 Ph⁺ 患者白血病细胞; (B) $CD34^+CD38^-CD58^-$ 细胞移植小鼠后, 表现为脾脏肿大、股骨红系造血受抑; (C) 小鼠移植 $CD34^+CD38^-CD58^-$ 细胞的生存情况; (D) 初诊时的 $CD34^+CD38^-CD58^-$ 白血病启动细胞数量可预测白血病患者预后。

造血干细胞移植是治疗白血病的有效手段, 但移植后白血病复发及移植物抗宿主病 (GVHD) 研究是该领域的重要科学问题。在国家自然科学基金 (批准号: 81230013) 的资助下, 北京大学黄晓军教授在该领域取得如下成果: 建立了国际原创的改良供者淋巴细胞回输防治白血病复发体系; 首次表明微小残留病变指导的危险分层可显著改善 t (8; 21) 急性髓细胞白血病 (AML) 的预后; 证实危险分层指导的小剂量激素可预防降低 GVHD, 但不增加感染等副反应; 证实单倍型移植治疗缓解后 AML 患者与同胞全合移植相当; 提出国际认

可的单倍型供者选择原则; 证明服用格列卫治疗新诊断的年轻慢性粒细胞白血病 - 慢性期患者的预后优于同胞全合移植; 首次提出仅口服抑制剂、维甲酸就可能治愈非高危急性早幼粒细胞白血病。

在白血病复发机制研究方面, 黄晓军教授证实 $CD34^+CD38^-CD58^-$ 细胞是白血病的启动细胞, 可用于危险分层; 发现移植后 KIR 通过调控 NK 细胞的发育发挥抗白血病作用; 小剂量白细胞介素 -2 有可能通过调控 $CD4^+CD25^+Foxp3^+T$ 细胞及 NK 细胞发育实现 GVHD 和抗白血病作用的分离; 首次报道抑制剂耐药的新“突变热点区 (PML-C202-S220)”。

上述成果完善了国际原创的“北京方案”, 其推广将提高我国移植整体水平, 提升我国的国际学术影响力。成果已在 *J. Clin. Oncol.*、*Blood* 和 *Leukemia* 等期刊发表论文 30 余篇, 获国家科学技术进步奖二等奖 1 项, 授权专利 3 项, 国际大会发言 10 余次。



白血病环境下造血干细胞功能受抑的调控机制

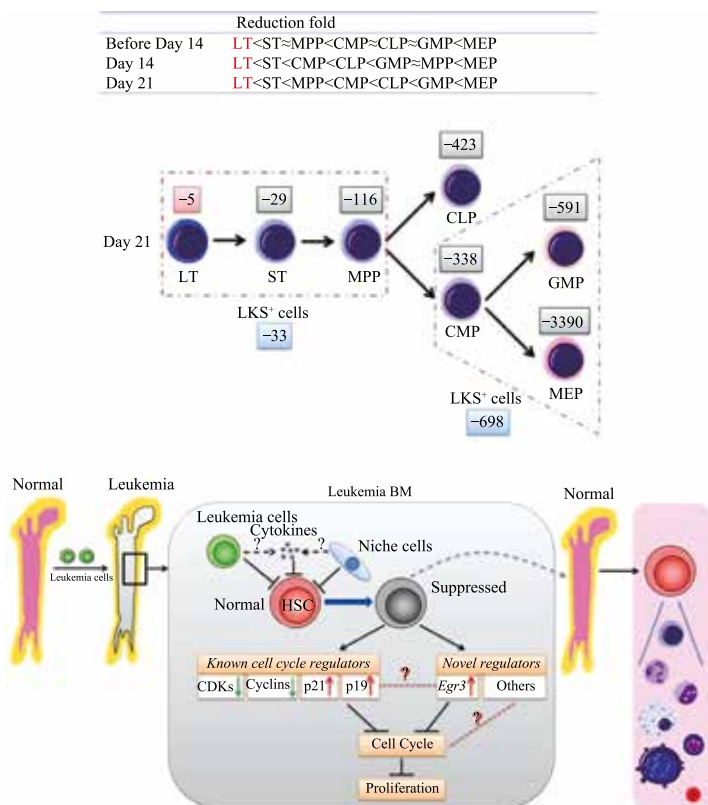
The Mechanisms of Hematopoietic Stem Cell Inhibition under Leukemia Condition

中国医学科学院程涛教授团队在国家自然科学基金（批准号：81090410）的资助下，以临床中常见的预后不良的携带 *MLL-AF9* 融合基因的急性髓系白血病为模型，系统研究了白血病发病过程中正常造血干/祖细胞（HSC/HPC）的动力学变化规律。研究发现随着白血病的发展，骨髓中造血 HSC/HPC 的绝对数量均有所减少，其中巨核红系祖细胞（MEP）变化最大，而 HSC 减少幅度最小。随着白血病的发展，骨髓 HPC 和 HSC 处于静止期的比例逐渐上升，到白血病后期，HSC 基本处于不增殖状态，直接导致其向祖细胞分化受阻，HPC 耗竭。进一步通过体外集落形成与体内竞争移植实验，证实了白血病下受抑的 HSC/HPC 回到正常造血环境后，功能与对照组无明显差异。说明这些受抑的 HSC/HPC 能完全恢复其重建造血和自我更新的功能。利用基因芯片和生物信息学分析，发现 *Egr* 家族基因在白血病条件下的 HSC 中高表达，其中 *Egr3* 的表达水平最高。通过功能实验发现高表达 *Egr3* 极大地抑制了 HSC 与 HPC 的增殖与重建能力，而敲降 *Egr3* 能促进 HSC 与 HPC 的增殖以及重建能力。更为重要的是，敲降 *Egr3* 能挽救 HSC 在白血病环境中周期受抑的现象 [Blood, 2015,

126 (11): 1302-1313]。

该成果不仅揭示了 HSC 在白血病下受抑的分子机制，同时也为研究 HSC 的功能基因提供一条新的技术途径。同时，在当期的 *Blood* 上发表了一篇评述性文章“Blood feuds”，评述中突出强调了该工作的临床相关性，并指出 MEP 减少的原因以及造血微环境的改变将是未来重点研究方向。在 *Nat. Genet.*、*Blood*、*Leukemia* 等杂志上发表了相关研究工作，并获天津市自然科学奖一等奖。

图 造血系统在白血病中的受抑规律及调控机制



MG53 在 2 型糖尿病及其并发症中的作用

The Role of MG53 in Type 2 Diabetes and Its Complications

图 MG53 介导 2 型糖尿病和糖尿病心肌病的发生

骨骼肌中, MG53 通过降解胰岛素信号通路的关键分子, 包括胰岛素受体 and 胰岛素受体底物 1, 引起胰岛素抵抗, 进而造成 2 型糖尿病的发生。而心肌中, MG53 除了能够通过与骨骼肌类似的机制引起胰岛素抵抗, 造成心肌糖代谢紊乱以外, 还能够通过转录激活 PPAR- α 造成心肌脂代谢紊乱, 进而造成糖尿病心肌病。

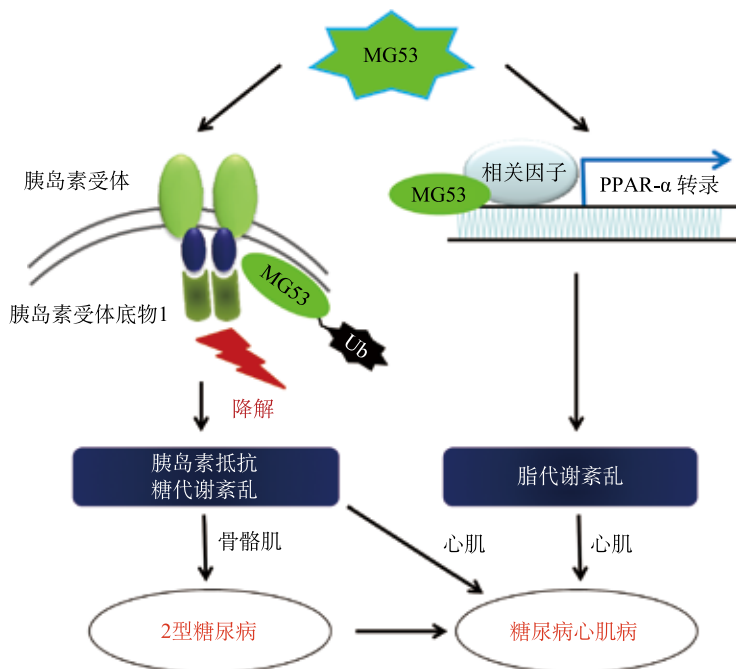
北京大学肖瑞平教授在国家自然科学基金(批准号: 81130073)的资助下, 发现一种心肌与骨骼肌特异性表达的蛋白, MG53 是早期胰岛素抵抗形成的关键分子, 阐明了 2 型糖尿病的始发机制, 从而进一步寻找有效的预防与治疗的干预靶点。

2 型糖尿病是目前威胁人类健康的重要疾病, 胰岛素抵抗是其发生发展的核心机制。骨骼肌是人体内最大的器官, 其对血糖的清除作用占到体内胰岛素依赖性葡萄糖摄取的 70% ~ 90%, 骨骼肌对血糖的利用异常会对机体的代谢产生重大影响。研究发现, MG53 能够通

过泛素-蛋白酶体途径降解细胞膜上的胰岛素受体(IR)以及受体下游的胰岛素受体底物 1(IRS1), 抑制骨骼肌胰岛素信号传导, 进而产生胰岛素抵抗。揭示了 MG53 是抑制骨骼肌胰岛素敏感性的强有力的调节因子, MG53 介导的胰岛素信号通路抑制更是造成全身胰岛素抵抗、代谢障碍和 2 型糖尿病的核心机制。相关研究成果发表在 *Nature* (2013, 494: 375) 上。

糖尿病心肌病是糖尿病的主要心脏并发症之一, 可引起心力衰竭, 是造成糖尿病病人死亡的主要原因。基于以上研究, 发现心脏中的 MG53 除了能够引起胰岛素抵抗、影响糖代谢以外, 还能够通过转录调节 PPAR- α , 进而影响心肌细胞的脂代谢, 最终造成心脏的糖脂代谢异常和糖尿病心肌病的发生。相关研究成果发表在 *Circulation* (2015, 131: 795) 上, 并且配发了由美国得克萨斯大学西南医学中心 Joseph A Hill 教授撰写的述评, 肯定了该成果在糖尿病心脏病机理研究的尖端领域做出具有开拓性意义的工作。

研究成果不仅揭示了 2 型糖尿病及其心血管并发症的新机制, 而且为相关疾病的预防和治疗提供了新方向和新靶点。



GPR48 在能量平衡与肥胖发生中的作用研究

The Role of GPR48 in Energy Balance and Obesity Development

上海交通大学宁光教授在国家自然科学基金（批准号：81030011）的资助下，开展 G 蛋白偶联受体-48（G protein-coupled receptor 48, GPR48）的研究工作，发现肥胖者白色脂肪中 GPR48 表达明显增加，全身性 GPR48 基因敲除小鼠食欲亢进，但白色脂肪减少、基础代谢率增加，对高脂诱导的肥胖明显抵抗，证实 GPR48 参与棕色脂肪活性调节、白色脂肪向棕色脂肪转化等过程，证实 GPR48 参与能量代谢及肥胖发生。同时完成了 GPR48 loxp 小鼠的培育，完成棕色脂肪和白色脂肪条件性敲除 GPR48 的工作，结合多项体外实验阐述 GPR48 参与能量代谢及肥胖发生的确切机制，该原创性研究揭示了能量代谢异常机制及其与肥胖发生关系的重大意

义。本项目发表 SCI 收录学术论文 11 篇，获得授权国内专利 2 项，获 2012 年度国家科学技术进步奖二等奖和 2014 年度上海市科技进步奖一等奖，项目负责人获得 2014 年中国医师奖和 2014 年吴阶平医药创新奖。

图 1 LGR4 与肥胖明显相关 [Nat. Cell Biol., 2013, 15 (12): 1455-1463]

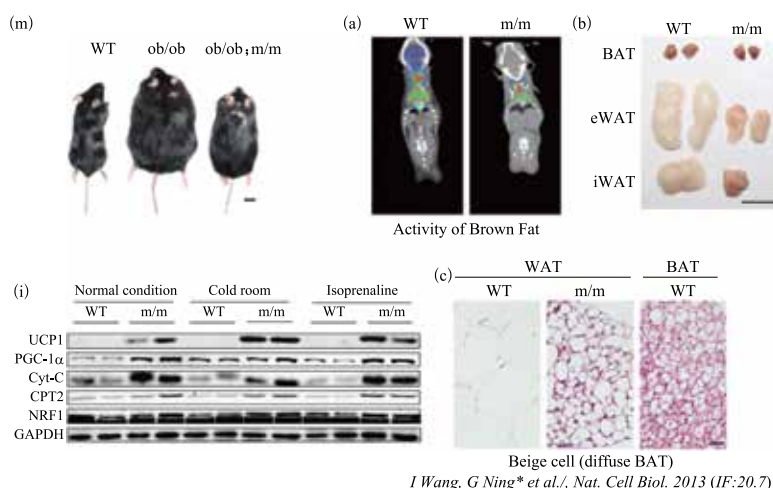
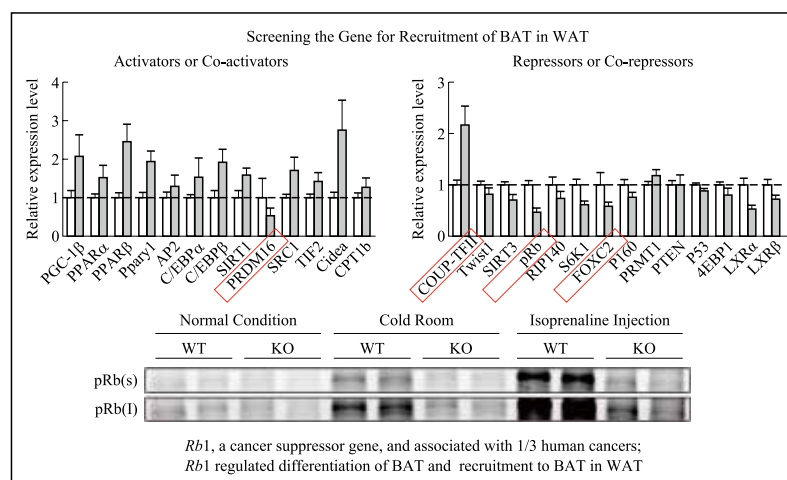


图 2 LGR4 通过 PKA 信号通路调节 Rb 基因的表达并参与 Beige/Browning 过程



自身免疫性肝病诊治和肝内免疫微环境研究

Management of Autoimmune Liver Disease and Research of
Hepatic Immune Microenvironment

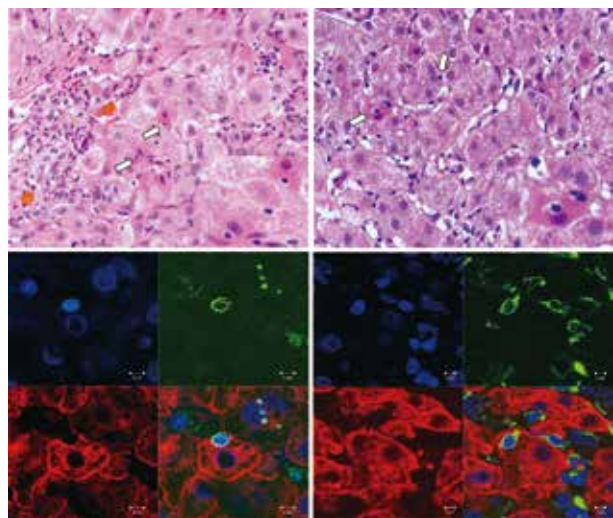
上海交通大学马雄教授在国家自然科学基金(批准号: 81325002)的资助下,在自身免疫性肝病诊治和肝内免疫微环境方面作了系列研究。

自身免疫性肝病包括自身免疫性肝炎(autoimmune hepatitis, AIH)、原发性胆汁性肝硬化(primary biliary cirrhosis, PBC)及其重叠综合征等,早期诊断和治疗可显著改善患者预后及其生活质量。该研究的主要科学发现包括:①对 AIH-PBC 重叠综合征诊断标准提出修改意见,认为血清 IgG 水平 $\geq 1.3 \times \text{ULN}$ 具有更高的诊断准确性。②发现淋巴细胞穿入现象是 AIH 特征性组织病理学特点之一,而 CD8⁺ T 细胞是发生穿入的主要细胞类型(图 1)。③发现了不成熟树突状细胞参与了 PBC 肉芽肿的形成过程(图 2)。④肝内调节性 T 细胞和 Th17 细胞

失衡、IL-12/Th1 向 IL-23/Th17 信号漂移等是自身免疫性肝病肝内免疫微环境变化的关键事件。⑤ FXR 通过扩增髓系免疫抑制细胞在自身免疫性肝病中发挥重要的免疫负性调控作用。

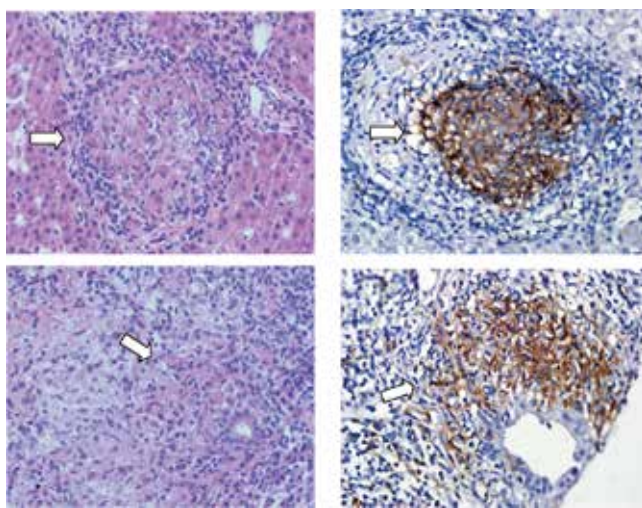
该成果的学术及经济社会价值:①在 *Hepatology* 等国际期刊发表论文 10 余篇。②主持制订《自身免疫性肝炎诊断和治疗共识(2015)》。③多次受邀在亚太肝病年会和欧洲肝病学会 PBC 和 AIH 专题会议作报告。④发起“将原发性胆汁性肝硬化改名为原发性胆汁性胆管炎”的倡议,并在 *Gastroenterology* 等 8 种消化和肝病杂志同时发表,是 PBC 研究历程中里程碑事件之一。

图 1 淋巴细胞穿入现象是自身免疫性肝炎肝组织学特点,而 CD8⁺ T 细胞是发生穿入的主要细胞类型



DAPI/CD8/CK8/CK18

图 2 CD11c 免疫组化染色法可清晰地显示肝内肉芽肿的存在



自身免疫性肾小球病靶抗原和补体活化机制的探索

Investigation of Target Antigens and Complement Activation Mechanisms in Autoimmune Glomerular Diseases

北京大学赵明辉教授等在国家自然科学基金（批准号：81021004，81321064）的资助下，重点研究疑难和危重肾小球病的免疫炎症机制。在抗中性粒细胞胞浆抗体（anti-neutrophil cytoplasmic antibody, ANCA）相关血管炎和抗肾小球基底膜（glomerular basement membrane, GBM）病等的诊断和自身抗原研究中填补了国内空白，并跻身于相关研究领域国际领军的研究团队。在自身免疫性肾小球病的发病机制的研究成果不但提出了创新的理论体系，也挽救了大量患者生命。

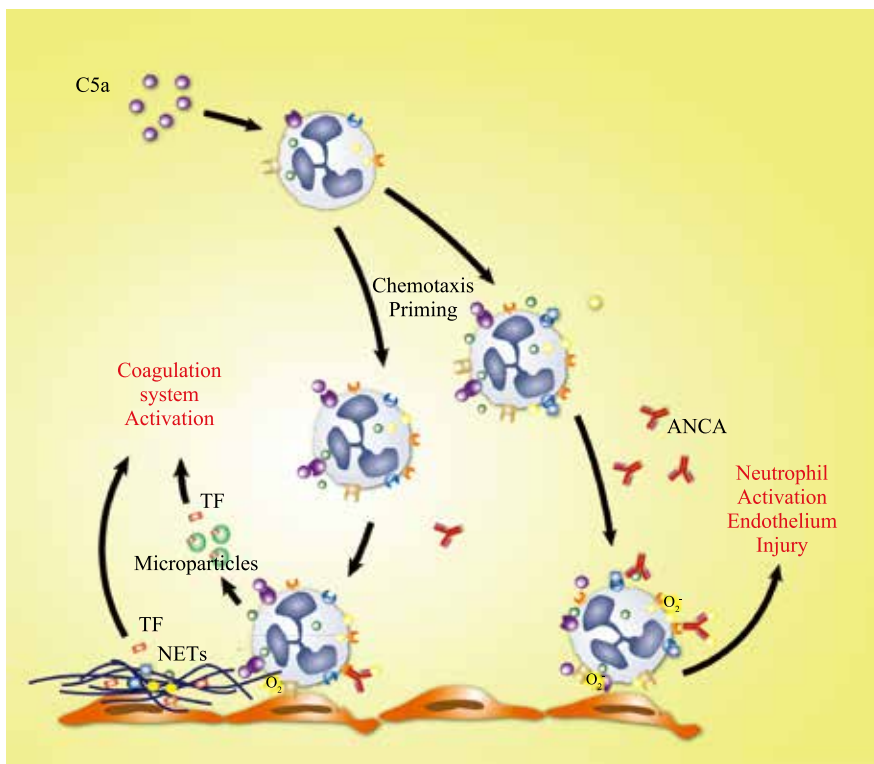
主要成果：①发现补体旁路系统活化在 ANCA 相关血管炎发病机制中发挥了关键的致病作用，C5aR 已经成为治疗靶点进入临床验证。②发现了抗 GBM 抗体新的抗原决定簇及其关键氨基酸基序，阐明遗传易感背景，推动感染病因学说的研究。③阐明抗 C1q 抗体及其抗原决定簇在狼疮肾炎发病中的重要作用，发现肾脏血管病变决定患者预后，

为完善狼疮肾炎病理分型提供理论基础。

④明确了 IgA1 分子糖基化异常在 IgA 肾病发病及进展中的重要作用，阐明了补体异常活化在 IgA 肾病的发病及进展中的调控机制，提供了潜在的治疗和干预靶点。

成果获 2011 年度教育部高等学校科学研究优秀成果奖（自然科学奖）一等奖。

图 补体 C5a 在 AAV 中致病机制模式图



致盲眼病相关基因的鉴定和致病机制研究

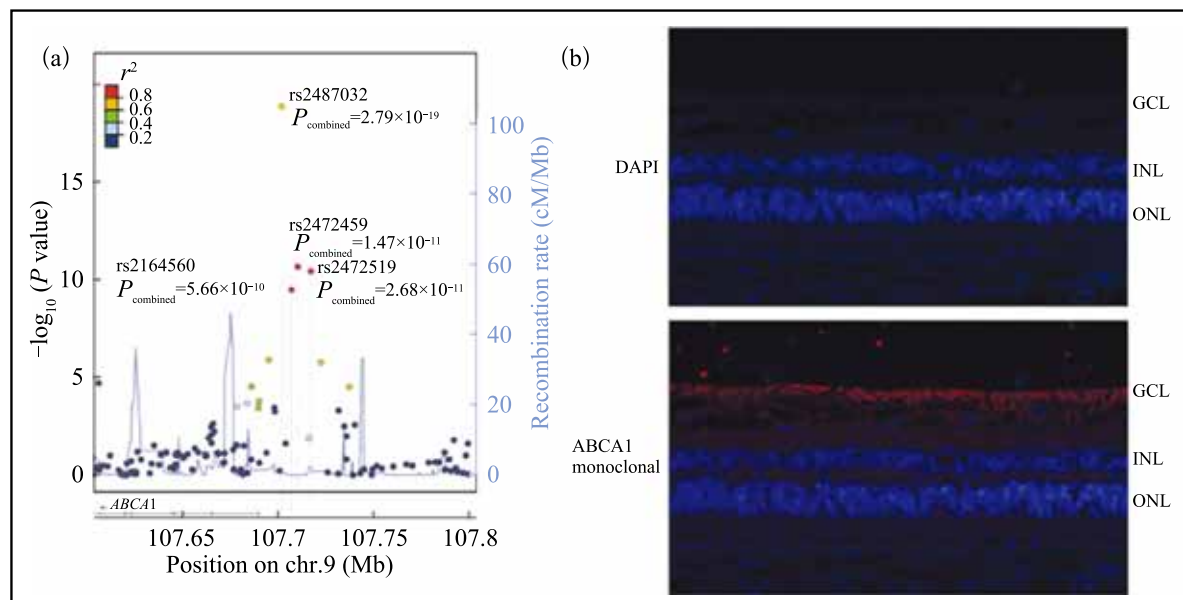
Identification of Blindness Causing Genes and Pathogenesis Study

老年性黄斑变性、高度近视、青光眼、青少年视网膜病变等是导致视力残疾和失明的重要原因。电子科技大学杨正林教授在国家自然科学基金(批准号: 81025006, 81430008, 81170883)等的资助下, 针对这些重要的致盲眼病进行了系统深入的相关基因及致病机制研究, 并取得了重要的研究成果。鉴定了中国人老年黄斑变性主效基因——*HTRA1*, 并探索了其致病机制; 鉴定了中国人高度近视的易感区域 13q12.12 和致病基因——*ZNF644*, 分别被 OMIM 网站收录并命名为两个新的近视位

点——*MYP20* 和 *MYP21*; 发现了一个新的青少年视网膜黄斑变性的致病基因 *PROM1*; 针对原发性开角型青光眼的研究, 发现了 *ABCA1* 基因区域 SNPs 与中国汉族人 POAG 有极显著相关, 而且 *ABCA1* 非常特异地在视网膜视神经节细胞层表达, 而这一研究也在不同人群得到验证。研究成果分别在 *Nat. Genet.* (2 篇), *JCI*, *Am. J. Hum. Genet.*, *PNAS*, *Plos. Genetics* 等期刊上发表, 先后获四川省科学技术进步奖一、二等奖各 1 项, 授权专利 7 项, 荣获第八届谈家桢生命科学创新奖。

图 *ABCA1* 基因区域 SNPs 与中国汉族人 POAG 有极显著相关

(a) *ABCA1* 易感区域 SNPs 位点的重组率;
(b) 视网膜视神经节细胞层表达。



脑卒中及其后遗症抑郁的病理机制和干预策略的研究

Study on the Pathological Mechanisms and Intervention

Strategies of Stroke and Its Sequela Depression

脑卒中已成为我国首位死亡原因及首位致残原因，脑卒中后抑郁是卒中康复的重大障碍，但目前临床上尚无有效的神经保护药和起效快的抗抑郁药。南方医科大学高天明教授课题组在国家自然科学基金（项目批准号：81030022，U0632007，U1201225）的资助下，对上述问题开展了新机制、新靶点和新手段的研究，做出了原创性和系统性的成果。①揭示了脑卒中神经元死亡的新机制——L型钙通道功能降低机制，首次提出了钙缺乏是神经元死亡直接原因的新假说，修正了传统的钙超载学说。②为脑卒中神经保护提供了治疗时间窗长的新靶点。以往国际上针对神经元死亡通路上的关键分子而研发的神经保护药在临床试验中均已失败，其原因之一是治疗时间窗短，而本研究发现了一些治疗时间窗长的神经保护新靶点如L型钙通道、BK钾通道。③为脑卒中后抑郁的治疗提供了起效快的新手段：目前临床上的抗抑郁药均起效慢，而本课题组揭示了抑郁发生的一种新机制——星型胶质细胞ATP释放减少，并发现应用ATP、间歇性低氧等方法具有快速的抗抑郁作用，为研发新型抗抑郁手段提供了科学依据。

上述研究成果发表在 *Nat. Med.*、*Nat. Neurosci.*、*Neuron*、*PNAS* 等国际著名刊

物上。部分成果获 2011 年度国家自然科学基金二等奖。发表在 *PNAS*（2010）上的论文被评为 2010 年度中国百篇最具影响国际学术论文，入选 ESI 全球前 1% 高被引论文；发表在 *Nat. Med.*（2013）上的论文也被 *Nat. Rev. Neurosci.* 选为研究亮点，瑞典和法国著名学者在 Faculty of 1000 以“新发现、新药物靶点”为题高度评价该研究工作；发表在 *Nat. Neurosci.*（2014）上的论文被国际著名学者认为“开辟了BK通道研究的全新领域”。

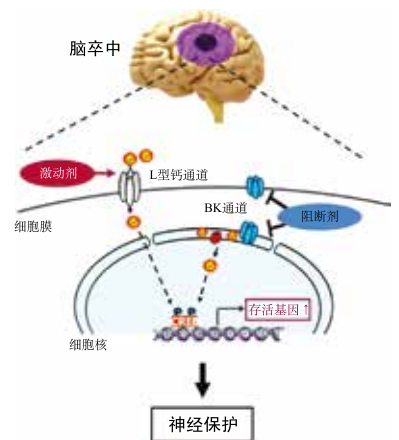
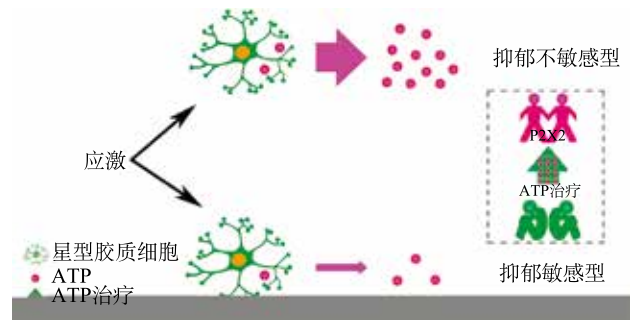


图1 脑卒中神经元死亡新假说：钙活动降低，激活L型钙通道、抑制BK钾通道具有神经保护作用

图2 抑郁发生新机制：星型胶质细胞ATP释放减少，ATP通过P2X2受体产生快速抗抑郁作用



病理性记忆储存和消除的神经机制

Neural Mechanisms Underlying Storage and Erasure of Pathologic Memory

成瘾、创伤后应激障碍等疾病反复发作、难以根治,其根本原因在于成瘾药物、创伤事件(非条件性刺激)与环境线索(条件性刺激)反复关联形成强烈而持久的病理性记忆,但目前病理性记忆的神经机制尚不清楚且缺乏有效的抹除方法。在国家自然科学基金(批准号:81221002,31230033,91432303)等的资助下,北京大学陆林教授带领的研究团队发现,cdk5、eIF2 α 和PKM ζ 等蛋白激酶在病理性成瘾记忆的再巩固和维持中发挥关键作用,这解释了病理性记忆在脑内长期存在的生物学基础,拓展了精神疾病的病理性记忆理论。在此基础上陆林教授在国际上首次提出“条件性刺激唤起-消退”心理学模式可有效抹除病理性成瘾记忆,即利用环境线索短期暴露(条件性刺激唤起)后记

忆不稳定的特点进行消退,可以有效抹除与该线索相关的成瘾记忆;此后又率先提出“非条件性刺激唤起-消退”模式,即模拟创伤事件(非条件性刺激唤起)后进行消退,可以有效抹除与所有线索相关的病理性恐惧和成瘾记忆,作用效果更为广泛。该研究成果首次在成瘾者中证明了应用病理性记忆再巩固理论消除成瘾记忆可以降低心理渴求,为病理性成瘾记忆理论的临床转化应用提供了最关键的证据;所提出的“唤起-消退”心理学操作范式为成瘾及其他病理性记忆相关精神疾病的治疗提供了新的非药理学干预手段和临床治疗的新思路。相关成果在 *Science*、*Nat. Commun.* 等杂志发表后,英国皇家科学院院士、剑桥大学 Everitt 教授等精神病学领域的专家在 *Science*、*Biol. Psychiatry* 发表专评,高度评价了该研究成果。英国广播公司(BBC)、环球邮报(GlobalPost)等二十余家国内外媒体给予报道和评论。相关成果获2013年度教育部高等学校科学研究优秀成果奖(自然科学奖)一等奖和2015年中华医学科技奖二等奖。

图 “唤起-消退”
心理学模式消除成瘾
记忆



研究揭示异染色质的结构失序是人类干细胞衰老的驱动力

A Werner Syndrome Stem Cell Model Unveils Heterochromatin Alterations as a Driving Force of Human Aging

衰老是人类疾病的重要危险因素，成年早衰症是由 WRN 基因突变所致，研究成年早衰症对于揭示人类衰老奥秘及防治衰老相关疾病有重要意义。中国科学院生物物理研究所刘光慧教授及其合作者在国家自然科学基金（批准号：81330008，31222039）等的资助下，在干细胞衰老机理方面取得突破性的研究成果。

刘光慧教授课题组提出“组织干细胞的加速衰老可能是人类早衰症的病因”这一科学假设，并通过基因组靶向编辑技术使得人间充质干细胞中的 WRN 基因发生纯合缺失突变，在实验室产生出人类早衰症特异的间充质干细

胞。这些早衰症间充质干细胞不但表现出典型的细胞衰老指征，而且异染色质发生了显著的结构退行性变化，主要表现为着丝粒和端粒附近的 H3K9me3 “山脉”（mountains）的缺失。研究进一步揭示了异染色质的高级结构失序是人类干细胞衰老的驱动力之一。这些新型发现为在表观遗传水平实现延缓人类细胞衰老奠定了理论基础，为研究和防治衰老相关疾病提供了新的潜在靶点和思路。成果发表于 2015 年 *Science* 后，受到 *Science*，TIME，The Washington Post 等国际知名刊物和媒体的报道，并被 GEN 评为“The Top 10 Most Prominent Science News Stories for 2015”。

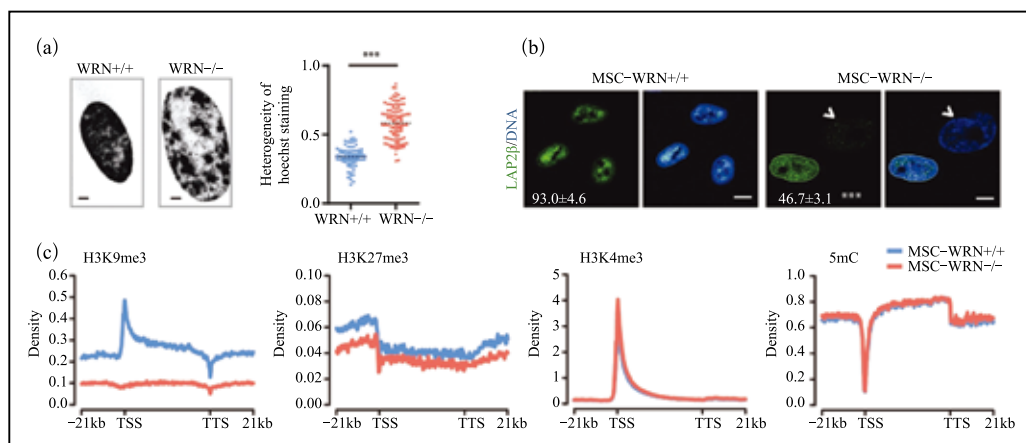


图 人类成年早衰症间充质干细胞的表现遗传学分析

T_{fh} 分化始动机制的发现

TCF-1 Initiates the Differentiation of T_{fh} Cells

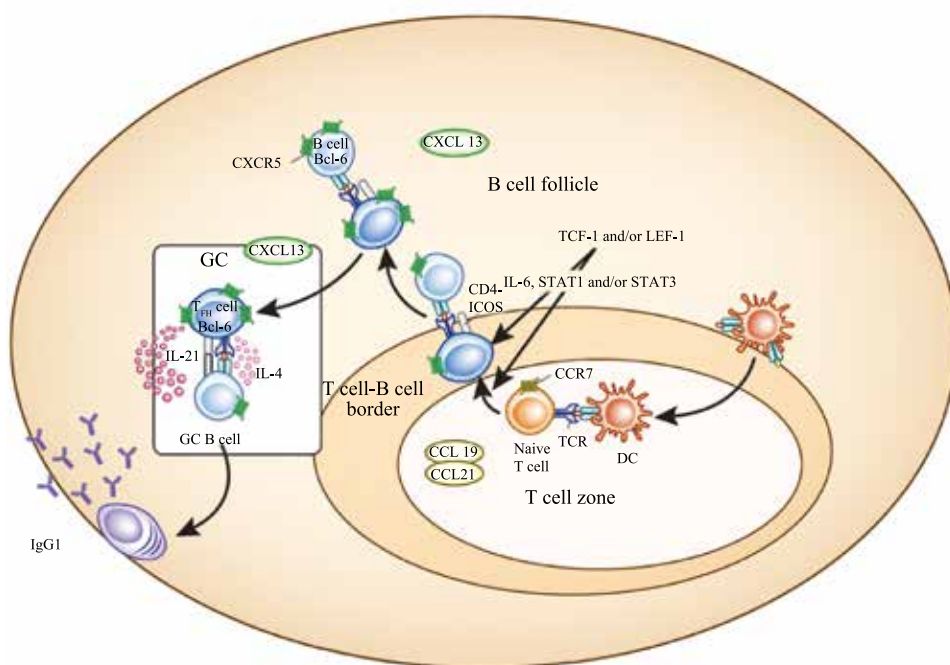
在国家自然科学基金(批准号: 31470870, 81471624, 31000631)等的资助下, 中国人民解放军第三军医大学周新元教授研究组揭示了 TCF-1 调控 T_{fh} 细胞分化的新机制。

众所周知, 疫苗是目前应对传染病最经济、最有效的手段; 而疫苗的有效性基于诱导高亲和力保护性抗体; 高亲和力抗体的产生则受到一类特殊 T 细胞亚群——滤泡辅助性 T 细胞 (follicular helper T cells, T_{fh}) 的调控。因此, T_{fh} 分化和功能研究是国际上热点领域之一, 此领域的核心科学问题是 T_{fh} 细胞的分化和命运是如何被决定的。该课题组的研究首次发现转录因子 T Cell Factor

1 (TCF-1) 始动、决定了初始 T 细胞向 T_{fh} 分化的命运。研究发现: TCF-1 直接结合 *Bcl6*、*Blimp1* 的基因调控序列而上调 *Bcl6*、下调 *Blimp1* 从而调控初始 T 细胞向 T_{fh} 分化而非向 Th1 分化; 调控了已分化 T_{fh} 细胞生发中心反应、浆细胞产生和抗体生成。这是我国在适应性免疫应答研究领域的重要突破。这一发现对研制更有效的疫苗、佐剂及其对自身免疫病的干预具有重要意义。成果在 *Nat. Immunol.* (2015, 16: 991-999; doi: 10.1038/ni.3229) 发表; 著名免疫学家 Masato Kubo 在同一期 *Nat. Immunol.* 的 News and Views 栏目发表了评论 (*Nat. Immunol.*, 2015; 16: 900-901)。

图 TCF-1 调控 *Bcl6*, *Il6ra*, *Il6st* and *Icos* 等基因的表达, 进而调控 T_{fh} 的分化

IgG1, immunoglobulin G1 (免疫球蛋白 G1); CCL19 and CCL21, chemokines (趋化因子); TCR, T cell antigen receptor (T 细胞受体); DC, dendritic cell (树突状细胞) (节引自 Kubo M. *Nat. Immunol.*, 2015, 16: 900-901)。



组织免疫微环境促进人肝癌进展的新机制

Immune Microenvironments in Hepatocellular Carcinoma Patients: Composition, Generation and Clinical Significance

由免疫细胞及相关因子形成的组织免疫微环境既是机体清除肿瘤的战场，又可被肿瘤利用来帮助其进展，是肿瘤防治的重要靶标，但以往的研究通常是将肿瘤组织作为一个整体并集中于免疫抑制的研究。中山大学郑利民教授在国家自然科学基金（批准号：30730086，81230073，91442205）等的资助下，以国内高发的肝癌为主要模型取得以下研究成果：①率先报道了多种免疫细胞在人肝癌组织中的选择性分布特性以及对疾病进展的不同影响，揭示了肿瘤利用免疫细胞在组织中迁移/分化的时间与空间特性来对其进行动态教育，并使其在组织不同区域呈现出独特分布和功能的免疫编辑新机制。②发现肿瘤除了免疫抑制，还会主动诱导“免疫活化”并利用免疫系统的负反馈调节机制来产生免疫逃逸，但同时保留了炎症反应的特性并通过多种机制促进肿瘤的血管生成与疾病进展。③发现并鉴定出多个在组织中具有促肿瘤或抗肿瘤作用的巨噬细胞新亚群。这些成果有助于以新的思路来理解肿瘤免疫编辑的机制，并为通过

选择性调控“免疫微环境”来恢复或重建其抗肿瘤功能奠定理论基础。上述系列结果先后发表在 *J. Clin. Invest.*, *J. Exp. Med.*, *PNAS*, *Hepatology* 和 *J. Hepatol.* 等期刊。部分成果获 2014 年度国家自然科学奖二等奖，并入选 Elsevier 发布的 2014 年度中国高被引学者（Most Cited Chinese Researchers）榜单。

图 1 免疫细胞在肝癌组织不同区域中的选择性分布特征

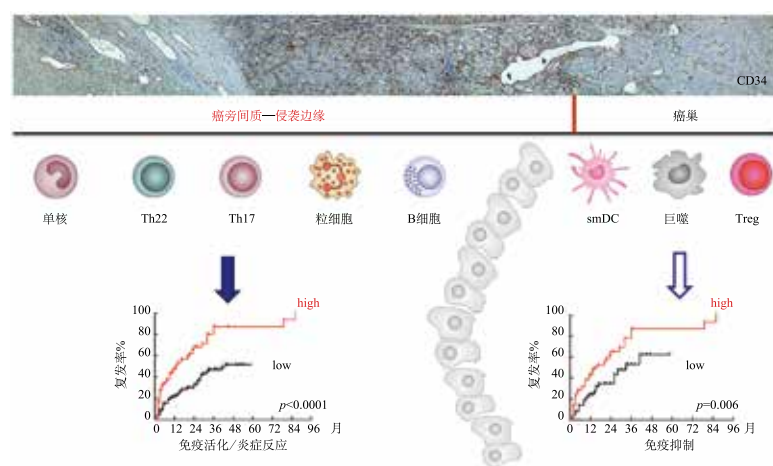
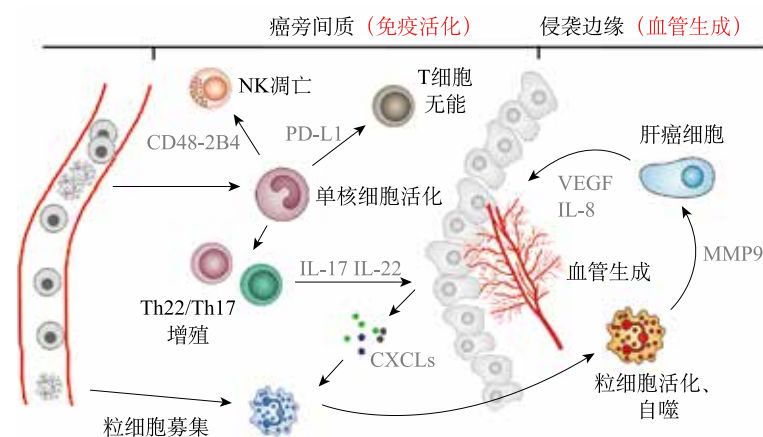


图 2 肿瘤可主动诱导单核巨噬细胞的活化，并利用免疫系统的负反馈调节机制来产生免疫逃逸，但同时保留了炎症反应的特性并通过多种机制促进肿瘤的血管生成与疾病进展



ICOS 分子调控 T_h 细胞发育及生发中心反应的新机制

Novel Mechanisms Underlying ICOS Regulation of T_h Cells and the Germinal Center Reaction

清华大学祁海教授在国家自然科学基金(批准号: 81330070, 81361120397, 81072464, 81161120405)的资助下, 在基础免疫学领域取得具有国际影响力的研究成果。

长效高亲和力抗体生成和免疫记忆的产生是体液免疫保护机体的重要防御机制, 主要发生在次级淋巴器官中的生发中心(germinal center, GC)。GC 反应的关键为滤泡辅助性 T 细胞(follicular helper T cell, T_h)的发育成熟, 及其对 GC B 细胞分化的辅助, 表现为 T 与 B 细胞间的紧密互作。ICOS 是 B7 家族经典协同刺激信号分子, 其缺陷导致人普通变异型免疫缺陷。课题组针对 T_h 发育及 GC 反应机制深入研究, 发现 ICOS 以非协同刺激方式与抗原非递呈 B 细胞上的 ICOSL 结合, 为 T_h 提供在滤泡区迁移的持续动力(图 1)。该成果发现共

刺激分子的新功能, 并创新性地关注到抗原非特异 B 细胞在免疫应答中的作用, 推动 T_h 生成机理和发育理论的更新与修正。随后, 课题组发现 ICOS-ICOSL 参与 T_h 辅助 GC B 高频突变及亲和力筛选, 证明 ICOSL-CD40L 介导的 GC B 与 T_h 间的正反馈循环, 是 GC 亲和力成熟的关键, 首次揭示 ICOSL 分子是调控 GC 亲和力成熟的关键分子(图 2)。其重大意义在于, 一直认为几乎不可能人为操控疫苗抗体亲和力特性, 而以 ICOSL 为突破口, 为开发更有效的抗病毒中和抗体疫苗开辟了潜在方向。本成果发表在 2013 年和 2015 年的 *Nature* 上, 得到同行学者的高度评价。祁海教授因此荣获谈家桢生命科学创新奖。

图 1 ICOS 以非共刺激依赖方式调控 T 细胞迁徙能力

T 细胞通过 ICOS 与抗原非递呈 B 细胞上的 ICOSL 结合, 促进胞内 PI3K 活化, 支持细胞伪足持续产生, 从而维持自身在滤泡区的运动能力, 为形成 T_h 细胞的前提。

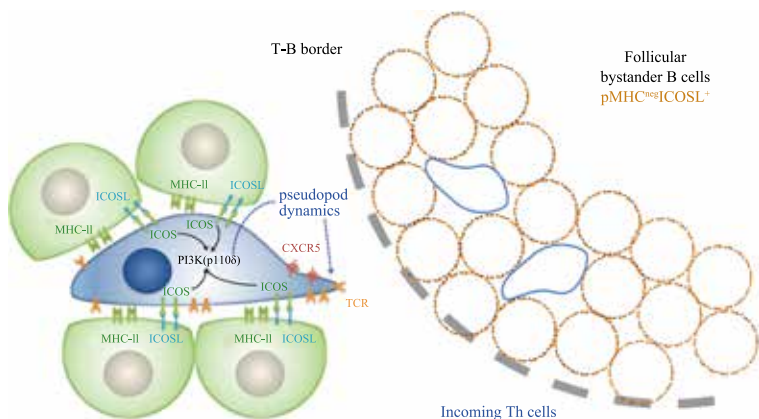
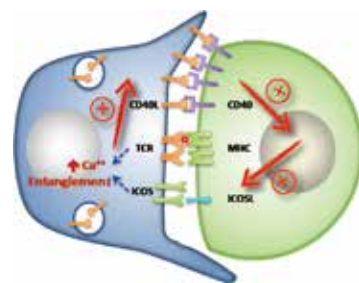


图 2 T_h 和 GC B 细胞“纠缠”互作及 ICOSL 介导的 GC 筛选正反馈环路模式图

利用双光子活体成像技术, 发现生发中心内独特的 T-B 互作形式——单次互动时间很短, 但胞膜接触面积大, 命名为“纠缠”(entanglement)。GC B 细胞与 T_h 细胞间以“纠缠”形式互作, 促进细胞间 ICOSL-CD40L-CD40-ICOS 正反馈循环, 是生发中心亲和力成熟的关键前提。



重大临床心理与精神障碍的磁共振影像学研究

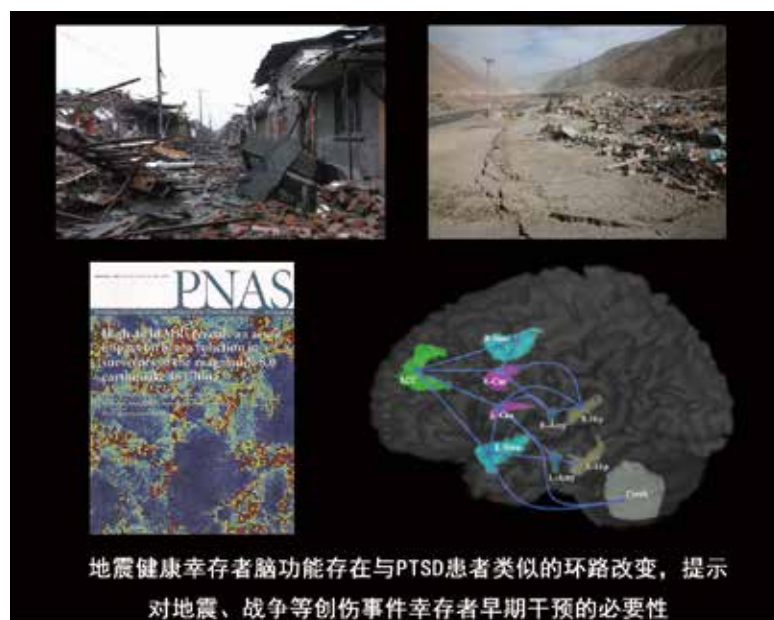
Magnetic Resonance Imaging Study of the Major Mental Disorders

精神心理障碍发生率高、脑残率高、自杀率高、反复发作并难以治愈，给个人、家庭和社会带来沉重负担。其临床难点在于病理机制不清并缺乏客观诊断和评价指标。四川大学龚启勇教授在国家自然科学基金（批准号：30625024，81030027，81220108013）的资助下，面向重大精神心理障碍的临床难题，对精神分裂症等发病机制与早期诊断方法做了深入的磁共振影像学研究，建立了结构-功能-行为解析模式，揭示了精神分裂症等疾患发病初期和治疗后的生物学影像表征，其中“脑结构通过功能连接影响症状”的发现被领域著名杂志 *Am. J. Psychiat.* 大篇幅述评，认为在“解决脑灰质体积如何联系到行为和临床症状这一关键科学问题”上做了开拓性的工作。美国科学院院士、脑功能成像先驱 Raichle 教授等权威专家多次在 *Nat. Rev.* 上撰文引用，认为相关发现为揭示精神疾病的脑机制提供了重要的影像学证据。相关论文入选“中国百篇最具影响国际学术论文”和 ESI 高被引论文，并被遴选为美国临床医生 I 类继续教育学分文章。

基于上述精神影像的工作，龚启

勇教授受邀为 *Am. J. Psychiat.* 撰写相关特约综述并被作为该杂志同期 podcast 亮点。在第 23 届国际医学磁共振学会（ISMRM）大会上，作为首位华人学者受邀成为 NIBIB New Horizons Lecture 荣誉冠名演讲专家，并以 NIBIB New Horizons Lecture: Emerging MRI to Uncover the “Disordered Mind”: Are We in an Era of “Psycho-Radiology?” 为题作大会主题报告。同时作为首位中国本土学者入选 ISMRM Fellow，成果获 2015 年度国家自然科学基金二等奖。

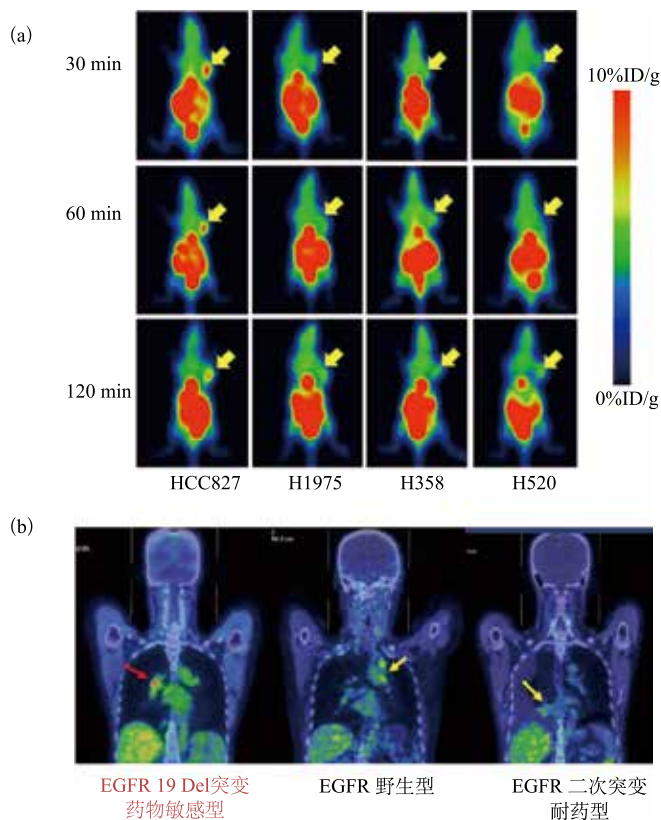
图 磁共振成像显示重大应激事件致脑功能改变



多功能分子成像与肿瘤诊疗

Multifunctional Cancer Molecular Imaging and Therapy

图 18F-MPG PET/CT 分子成像能够在动物水平识别不同荷瘤鼠的 EGFR 突变状态 (a); NSCLC 临床受试者 PET/CT 成像中, EGFR 药物敏感突变型 NSCLC 病变对 18F-MPG 探针摄取明显高于野生型和二次突变耐药型 ($P<0.05$) (b)



肿瘤早期诊断与早期治疗一直是临床医学的难点,分子成像为实现肿瘤早期诊疗提供了可能,在体分子靶点的特异性识别及靶向干预是实现肿瘤分子成像与诊疗的技术关键。肿瘤分子成像技术可借助靶向分子探针在活体状态下直观、定性、定量地揭示分子靶点,从而成为解决肿瘤分子成像与诊疗问题的重要手段。哈尔滨医科大学申宝忠教授在国家自然科学基金(批准号:81130028, 31210103913, 30970807)的资助下,围绕分子影像与肿瘤诊疗的关键科学问题展开了系统性成像技术及其应用研究。提出了“肿瘤细胞及其微环境系统分子成像”新理念,即针对肿瘤发生、发展过程中肿瘤细胞内信号传导通路上的关键基因,细胞膜上受体蛋白,细胞间缝隙连接蛋白,细胞外微环境中细胞因子,新生血管等一系列分子事件多层面、多角度进行定性和定量的可视化,从而实时、连续、动态、直观且全面地评价肿瘤复杂病理生理特性。在该理念指导下实现的“针对信使 RNA 的分子成像”,被领域著名杂志 *J. Nucl. Med.* 大篇幅述评,认为在实现“肿瘤细胞内信号传导通路上的关键基因可视化”这一关键科学问题上做出了拓展性的工作,并被 *J. Nucl. Med.* 杂志评为 2010 年度三大突破性研究成果之一。同时,申宝忠教授及其团队还创建了一系列肿瘤诊疗多功能分子成像新技术和新方法,其中,通过研发一系列突变 EGFR 靶向分子探针实现了肺癌的在体分子分型,并率先开展了临床转化应用,用于肺癌分子靶向治疗优势人群筛选和疗效精准判定。上述研究成果发表国际期刊论文 96 篇,其中在 *J. Nucl. Med.* 上连续发表系列论文 6 篇;申报及授权中国发明专利 11 项,美国发明专利 1 项, PCT 专利 1 项。在国际、国内学术会议作特邀大会报告 32 次。获 2015 年度国家科学技术进步奖二等奖。

冠状病毒的进化与跨种传播

Evolution and Interspecies Transmission of Coronavirus

冠状病毒作为一类重要的动物源性传染病病原，曾多次跨越种间屏障感染人类，造成严重的社会经济损失。因此，深入研究冠状病毒的分子进化和跨种传播机制，对病毒病的有效防控和治疗策略具有重要意义。中国科学院微生物研究所高福研究员研究团队在国家自然科学基金（批准号：81321063）的资助下，通过一系列实验阐明了中东 MERS 病毒的入侵机制，并且提供证据支持 MERS 病毒起源于蝙蝠的论断，最后总结了基于刺突蛋白特征的冠状病毒跨种传播过程。

MERS 病毒的囊膜上含有刺突蛋白，是介导病毒识别受体以及病毒囊膜与宿主细胞膜融合的重要分子。该团队首先鉴定了 MERS 病毒刺突蛋白中负责受体结合的关键区域，通过解析其与受体 CD26 的复合物结构揭示了病毒识别

受体分子并阐明了膜融合机制，以此为依据研发了人源化的治疗性抗体和多肽药物，可以有效预防 MERS 病毒的感染及疾病治疗。随后发现与 MERS 病毒亲缘关系最近的蝙蝠冠状病毒 HKU4 可以利用同一个受体 CD26 感染细胞，为 MERS 病毒的蝙蝠起源说提供了结构及功能数据支持。基于之前的研究成果，该团队细致地总结了 MERS 病毒等重要冠状病毒刺突蛋白的结构特点、受体识别特征、以及刺突蛋白如何被宿主蛋白酶有效切割激活等，深入分析了基于该蛋白特征的病毒跨种传播过程。

上述研究成果先后发表在 *Nature*, *J. Virol.*, *Cell Host & Microbe*, *Trends Microbiol.* 以及 *Cell Res.* 等重要学术期刊上，受到国内外同行高度关注，并被广泛引用。

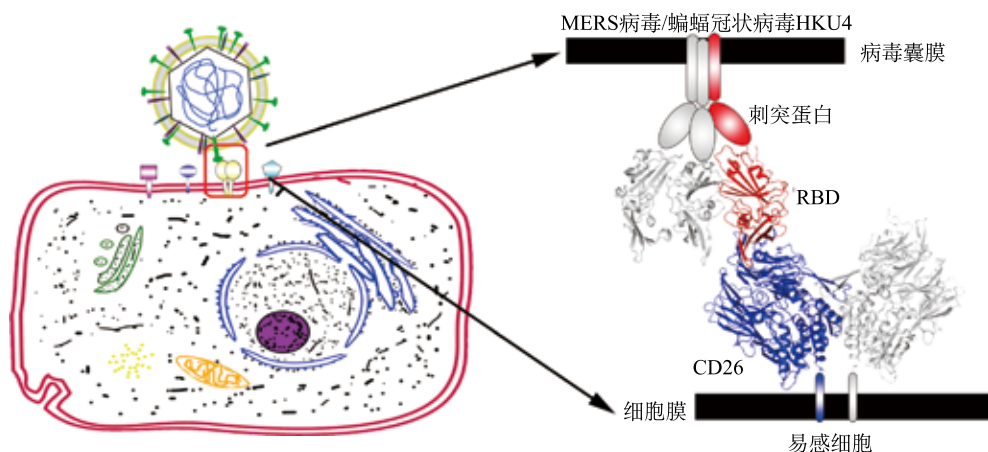


图 MERS 病毒 / 蝙蝠冠状病毒 HKU4 识别受体 CD26 的模式图

肺腺鳞癌转分化与耐药

Lung Adenocarcinoma to Squamous Cell Carcinoma Transdifferentiation and Drug Resistance

中国科学院上海生命科学研究院季红斌研究员在国家自然科学基金(批准号: 31370747, 81325015, 81430066)等的资助下, 与复旦大学合作者揭示了 LKB1 失活调控非小细胞肺癌可塑性及药物响应的重要作用及其分子机制, 为认识人类肺癌的发病机理提供了新的视角和思路, 对肺癌的诊断和治疗具有重要的临床指导意义。该研究作为 *Cancer Cell* 封面文章刊出。

肺腺癌与肺鳞癌是两个完全不同的病理亚型, 而临床上肺腺鳞癌的存在提示腺癌和鳞癌之间可能存在着谱系转变。季红斌课题组结合小鼠肺癌模型与

临床样本的研究, 在体内水平证实肺腺癌向肺鳞癌转分化的存在, 发现 LKB1 缺失会引起肺腺癌中活性氧自由簇过度积累, 从而导致其向鳞癌转分化; 更重要的是, 肺腺鳞癌转分化会使肿瘤有效地逃脱药物的治疗。肺腺鳞癌恶性程度高、预后差, 由于缺乏可用的研究体系, 其发病机制一直不清楚。该研究首次证实肺腺鳞癌转分化的临床假说, 为肺腺鳞癌发病机理的研究提供目前唯一可用的研究体系, 并提示肺腺鳞癌转分化可能是肺癌治疗中一个新的细胞水平的耐药机制。这将为肺癌精准治疗提供新的思路。

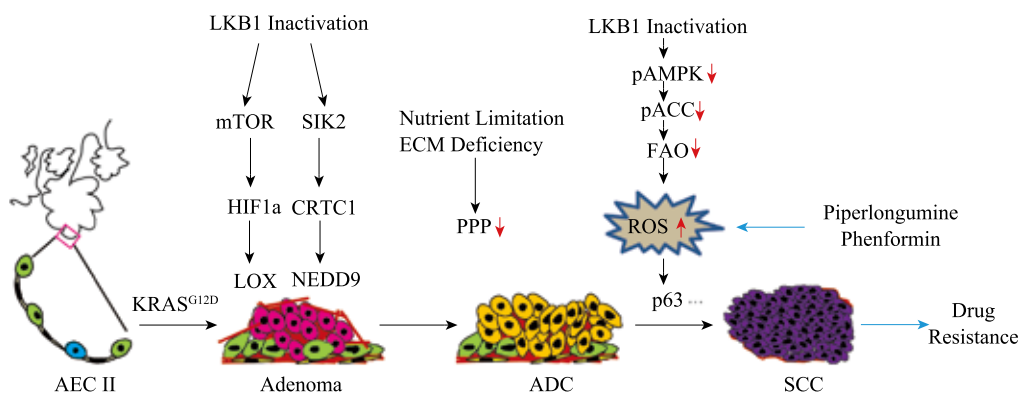


图 肺腺鳞癌转分化的分子机制及其与药物耐受的关系

LKB1 缺失在肺腺癌早期会激活 mTOR-HIF1-LOX 以及 SIK2-CRTC1-NEDD9 信号轴来促进肿瘤恶性进展, 但在后期会使 AMPK-ACC 信号轴及下游脂肪酸氧化通路无法正常激活, 从而导致细胞无法有效地清除因 PPP 通路失调引起的 ROS 累积并最终导致氧化还原态的失衡, 并促进肺腺鳞癌转分化的发生。靶向细胞代谢的临床前药物如 Piperlongumine 和 Phenformin 能有效地抑制肺腺癌恶性进展, 但同时会促进 ROS 的异常积累从而导致肺腺鳞癌转分化, 使得肿瘤发生耐药。

肿瘤微环境调控肝癌复发转移的基础与临床转化研究

The Role of Tumor Microenvironment on Recurrence and Metastasis of Liver Cancer

以高复发转移潜能为核心的肿瘤生物学特性是肝癌预后差的最主要根源，是新世纪进一步提高肝癌疗效必需攻克的难题。复旦大学樊嘉教授在国家自然科学基金（批准号：81030038，30872379，81272725）的资助下，在国内外率先开展肝癌微环境与肿瘤复发转移的系列科研工作，经过15年的潜心研究，形成了相对完整的肝癌微环境调控的理论。发现肝癌外周血 EpCAM⁺ 循环肿瘤细胞（CTC）可预测肝癌术后的早期复发。系统研究了自噬在肝癌治疗中的作用及调节机制，阐明了在肝癌中内质网应激、ROS产生、泛素-蛋白酶体的阻断均可以诱导自噬以维持在应

激情况下的保护作用。系统研究揭示了 CD151 分子促进细胞外基质重塑及肝癌新生血管形成并参与肝癌侵袭和转移。系统研究发现人肝癌微环境中非特异性免疫细胞如巨噬细胞、特异性免疫细胞如 Treg 及炎症趋化因子促进肝癌的侵袭转移。

本系列研究多项成果近年来在高影响因子杂志发表相关 SCI 论文 54 篇，被多种顶级期刊引用并高度评价。由于在肝癌基础与临床转化研究中做出的突出贡献，分别获 2012 年度国家科学技术进步奖二等奖、2015 年度教育部科学技术进步奖一等奖、上海市科技进步奖一等奖、中华医学科技奖二等奖。

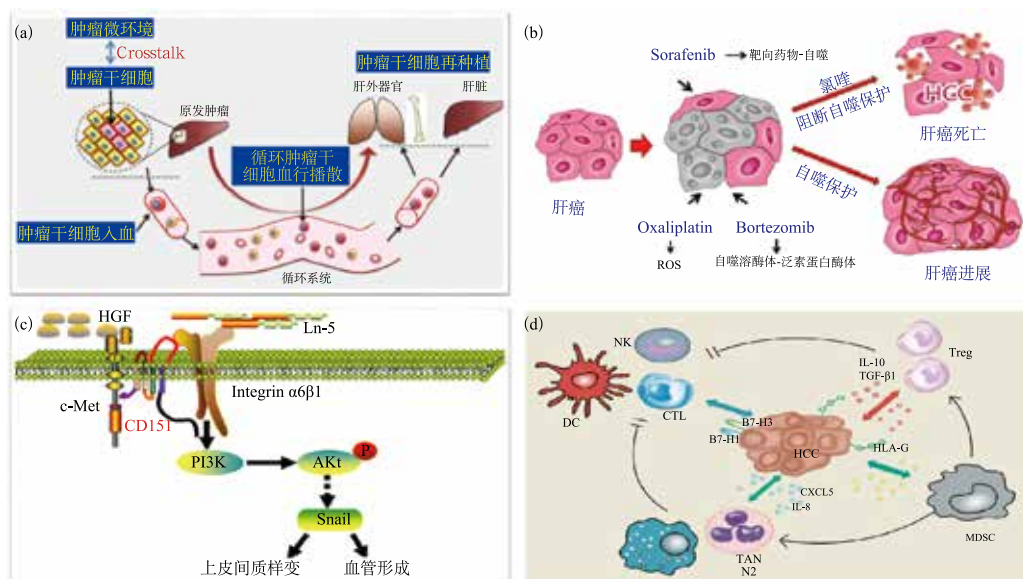


图 肿瘤微环境调控肝癌复发转移的基础与临床转化研究

(a) 循环肿瘤细胞参与肝癌转移复发；(b) 自噬调控肝癌细胞多种应激情况下起保护作用；(c) CD151 调控肝癌上皮-间质转化促进肝癌转移发生；(d) 免疫微环境调节免疫和改造微环境参与肝癌侵袭转移。

辣食摄入与死亡风险

Spicy Food Consumption and Cause Specific Mortality

北京大学李立明教授及其团队在国家自然科学基金(批准号: 81390540)的资助下, 利用中国慢性病前瞻性研究(China Kadoorie Biobank, CKB)项目发现常吃辣食与降低的死亡风险存在关联。

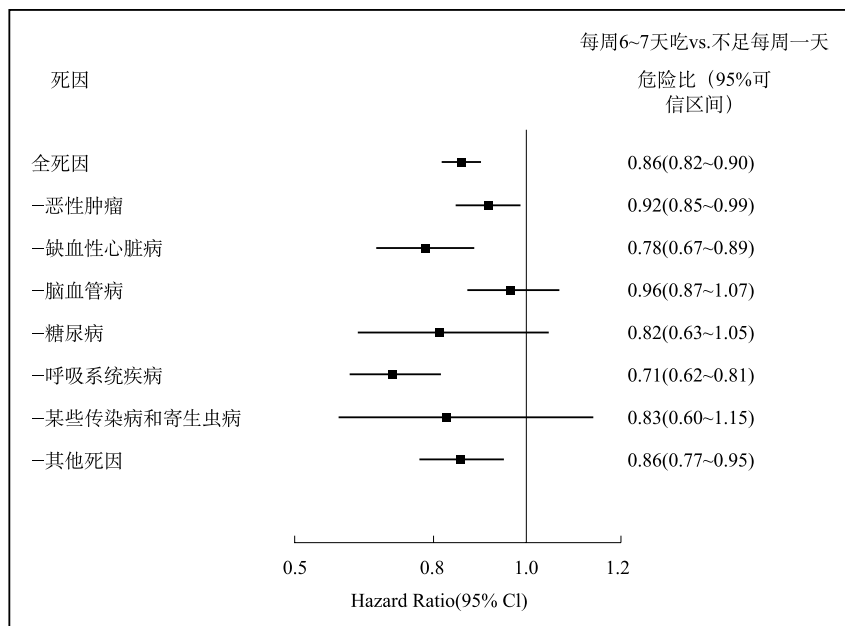
CKB项目是中国医学科学院与英国牛津大学合作建立和维持的一项前瞻性队列研究。中方项目负责人为李立明教授。该项目覆盖中国的5个农村和5个城市地区。2004~2008年开展基线调查, 共募集512 891名30~79岁基线信息完整的研究对象。项目对所有研究对象的死亡和各种健康结局开展长期随访, 是迄今全球少有的几项建立有生物

样本库的大型前瞻性队列研究之一。

在本次研究共纳入487 375人进行分析。该研究人群中, 每周吃辣者最常使用的辣物原料为新鲜辣椒和干辣椒。截至2013年12月底, 平均随访7.2年, 累积350万人年, 在随访期间共发生死亡事件20 224例。研究发现, 在调整了可能的混杂因素后, 与不常吃辣食的个体(<1天/周)相比, 常吃辣食者(6~7天/周)的总死亡风险降低了14%(95%可信区间: 10%~18%)。研究同时发现, 常吃辣食者死于肿瘤、缺血性心脏病和呼吸系统疾病的风险也存在类似的降低。

该研究于2015年8月发表在国际权威医学杂志*Brit. Med. J.*, 引起各国研究者和媒体的广泛关注, 纽约时报、时代周刊、英国独立报、加拿大新闻网以及澳大利亚、新西兰等国家的媒体都给予了第一时间的报道。在Altmetric根据社会影响综合评分评出的2015年最具影响力的100篇研究论文中, 本研究论文排名第26位(链接<https://www.altmetric.com/top100/2015/#explore>), 这是学术界难得的荣誉。

图 辣食摄入与死亡风险



麻风病的发病机制与风险预测

The Pathogenesis and Risk Prediction of Leprosy

麻风具有遗传易感性，但易感基因和发病机制尚不清楚。近年来，山东省皮肤病性病防治研究所张福仁研究员课题组在国家自然科学基金（批准号：30771943）的资助下，联合安徽医科大学张学军教授团队率先采用全基因组关联研究，发现了 *NOD2*、*LRRK2*、*TNFSF15* 等 7 个麻风易感基因，揭示了以 *NOD2* 介导的固有免疫缺陷为特征的麻风发病新机制；随后课题组在国家自然科学基金（批准号：81072391，81101187，81371721，31200933，81072391）的资助下，先后通过拓展分析发现两个新的麻风易感基因 *IL23R* 和 *RAB32*，证实了自噬在麻风发病中的作用；之后又陆续发现 *BCL10*、*IL12B*、

IL18RAP、*BATF3* 等易感基因，揭示了麻风患者的获得性免疫缺陷，同时也发现了多个麻风与炎症性肠病（IBD）的共同易感基因及其功能，提示自然选择导致疾病谱的变化；还发现了氨苯砒所致重症药物不良反应——氨苯砒综合症的风险因子——HLA-B*13:01。

上述发现为麻风发病风险预测、精准预防和精准治疗的实施、加快消除麻风危害奠定了基础，研究成果多次发表于 *N. Engl. J. Med.*、*Nat. Genet.* 等著名学术期刊，张福仁研究员获 2011 年度山东省科技进步奖一等奖、2013 年中华医学科技奖二等奖和 2015 年度山东省自然科学奖一等奖。

图2 氨苯砒综合症的风险因子 HLA-B*13:01 区域信号图

x 轴为所在染色体位置；
纵轴为 $-\log_{10}(P)$ 。

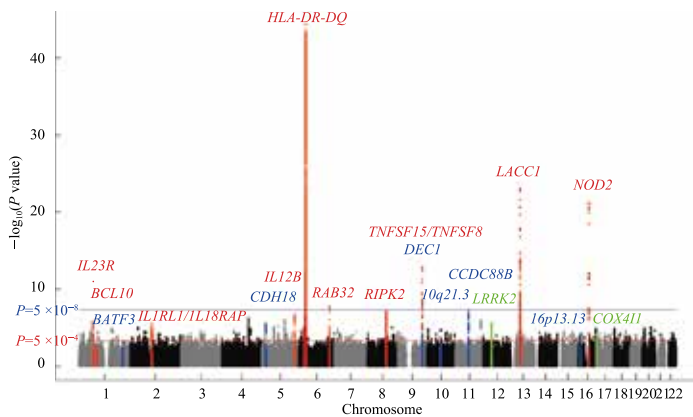
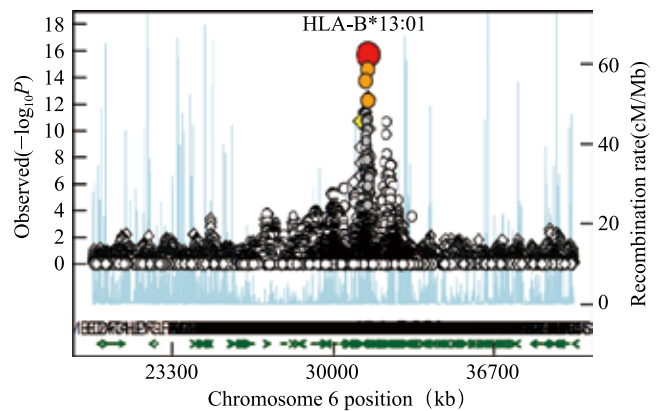


图1 课题组已发现的 18 个麻风发病风险基因

x 轴为所在染色体位置；纵轴为 $-\log_{10}(P)$ 。



我国研制的疫苗首次在塞拉利昂开展境外临床试验

The First Abroad Clinical Trial for Chinese Vaccine Was Launched in Sierra Leone

中国人民解放军军事医学科学院陈薇研究员在国家自然科学基金(批准号:81025018)等的资助下,带领团队自主研制了重组埃博拉病毒病疫苗(Ad5 EBOV),并于2015年10月10日正式启动了在非洲的Ⅱ期临床试验。这是中国研制的疫苗首次在国外获得临床许可,开创了我国科技人员走出国门,在境外进行疫苗临床研究“零”的突破。

2014年3月西非爆发埃博拉疫情,几个月内数千人的死亡使其成为“国际卫生事件”。陈薇研究团队研发的2014基因型重组埃博拉疫苗于2014年12月在国内开启了埃博拉疫苗临床的Ⅰ期试验,这是我国首个、世界上第三个在2014年埃博拉疫情之后进入到临床研究的埃博拉疫苗。研究结果于2015年3月

在著名医学杂志 *Lancet* 全文发表。

该疫苗有三大特点:一是针对性强,是目前全球唯一进入临床的2014基因型疫苗;二是冻干剂型,稳定性好,适合疫苗冷链条件难以保障的西非地区广泛使用;三是具有很好的安全性和免疫原性。

2015年3月后,研究团队启动了赴埃博拉疫情最严重的西非国家之一——塞拉利昂的临床注册工作。经过严苛的知识产权审查、多轮的技术资料审评、会议答辩和现场考核,终于获得了重组埃博拉疫苗Ⅱ期临床试验许可。本次临床试验共入组500名塞拉利昂当地人,受试者回访率达到100%。

本次临床试验中积累的宝贵经验将在我国疫苗临床试验国际化的进程中起到重要作用。

图1 首位埃博拉疫苗受试者接种



图2 埃博拉疫苗产品

中药药代动力学关键技术体系的创新及应用

Innovation and Application of Systematic Key Technologies for TCM Pharmacokinetic Studies

中国药科大学王广基教授在国家自然科学基金（批准号：81273589，30973583，30630076）的资助下，建成具有普适性和示范作用的一整套适合中医药特点的中药药代动力学研究体系。

课题组提出了中药“多向代谢”的新理论，涵盖Ⅰ/Ⅱ相代谢、量变代谢和内化代谢三种反应类型，应用于探索生脉方体内各类活性代谢产物和多成分PK/PD网络关系，揭示其主要组分群的“多向代谢”特点、规律和机理；并以桂枝茯苓胶囊、丹参滴丸等名优中药及经典方剂为研究载体，建立一整套中药药代物质基础研究技术体系，解决了中药

药代物质基础研究的科学难题。

提出中药药代导向的作用机理研究新策略。诸多中药靶组织浓度低，体内药效物质基础不明确，例如，通过对人参皂苷的PK/PD的研究发现，人参皂苷难以透过血脑屏障，但可通过调节外周免疫细胞及神经递质代谢转运，阻断炎症因子向脑部的传递，发挥脑神经保护作用，提供了“脑病外治”的科学依据。研究成果突破了药物须进入“靶器官”才能发挥作用的传统认识。

研究成果发表SCI论文57篇；成果获2012年度江苏省科技进步奖一等奖。

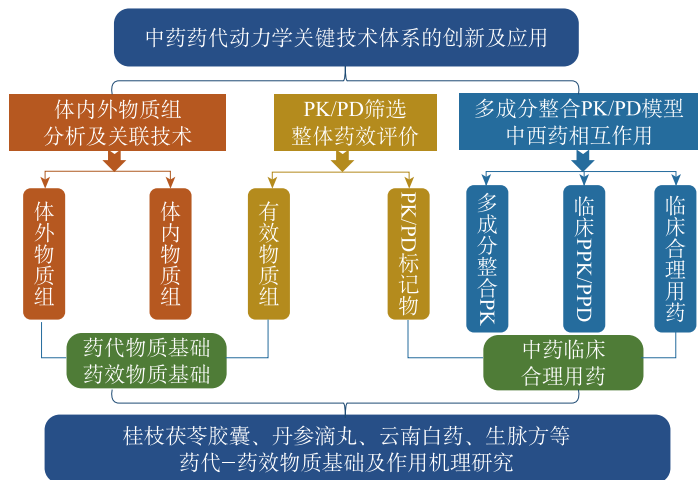


图 中药药代动力学关键技术体系的创新及应用

针刺神经影像学方法构建及经穴效应 特异性神经影像学研究

Construction of Acupuncture Neuroimaging Methods and Study on Specificity of Acupoint Effect Neuroimaging

成都中医药大学梁繁荣教授及其合作者在国家自然科学基金(批准号:30930112, 30772835, 81273854)等的资助下,围绕“经穴效应是否存在特异性”这一关键科学问题,系统构建并完善了针刺效应的神经影像研究方法学,并以功能性消化不良(FD)、偏头痛为

脏腑病和经络病研究载体,运用PET/CT和fMRI技术,首次发现FD患者的前中扣带回、脑岛、丘脑和小脑的葡萄糖代谢显著增高,大脑多个脑区的白质微结构、灰质密度和默认网络功能活动呈现显著异常;率先发现偏头痛患者的前扣带回、前额皮质、脑岛和基底节存在显著功能和结

构异常,大脑多个脑区的白质微结构呈现显著异常;以上发现为两种疾病的经穴效应特异性中枢机制研究提供了靶点。针刺治疗后的研究进一步发现,与非经非穴和他经穴相比,针刺阳明经穴对FD患者自我平衡网络脑区功能的全面调节和对脑岛、前扣带回、丘脑功能的靶向性调节是治疗FD中枢整合的重要特征;与阳明经非特定穴相比,针刺阳明经特定穴对FD患者疾病相关重点脑区功能的靶向性调整更为显著;与非经非穴和他经穴相比,针刺少阳经穴对偏头痛患者中脑导水管灰质、脑岛和前扣带回等疼痛矩阵网络相关脑区的影响具有显著性差异;与少阳经非特定穴相比,针刺少阳经特定穴对偏头痛患者前扣带回、壳核、额眶区的靶向性调节更为显著;总之,研究从经穴与非穴、不同经穴、同经不同穴三个层次证实了经穴效应特异性的存在,并总结出经穴效应特异性的中枢整合具有网络性和靶向性特征,相关成果共发表学术论文96篇,其中SCI源刊论文71篇,先后被*Nat. Rev.*、*Brain*、*Gastroen. Hepatol.*、*Neurology*等知名生物医学期刊引用,为深入阐释经穴效应特异性的科学内涵提供了客观依据。

图1 FD患者与健康受试者的脑糖代谢差异

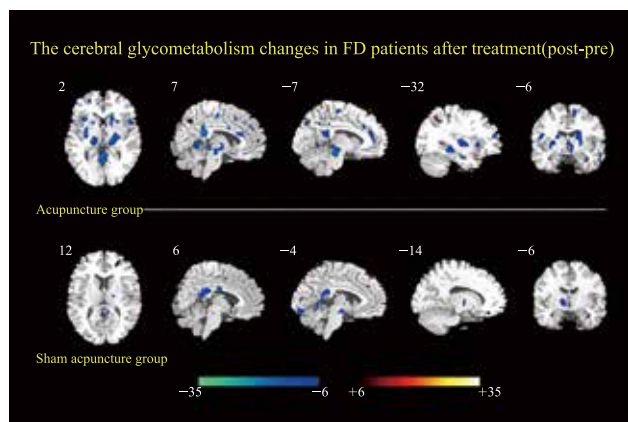
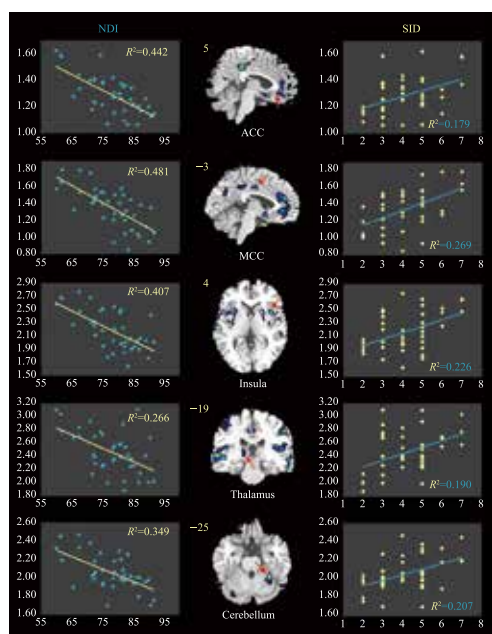


图2 针刺阳明经
特定穴治疗后FD患者
的脑糖代谢变化

NSEFC

国家自然科学基金资助项目优秀成果选编(六)

国际合作局



铁基超导体配对对称性研究

The Study of the Superconducting Pairing Symmetry of Iron-based Superconductors

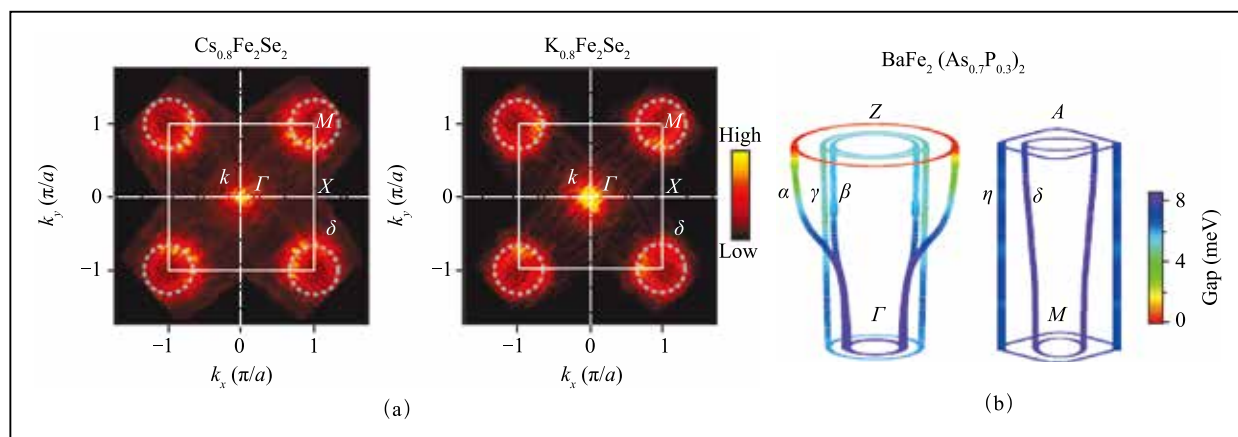
复旦大学封东来教授在国家自然科学基金(批准号:11161140398,10810053)等的资助下,利用高分辨的角分辨光电子能谱技术对铁基超导体的配对对称性进行研究。配对对称性一直是超导研究中最受关注的一个基本性质,它的确定对于理解超导配对机理十分重要。

在铁基超导体的研究中, S_{\pm} 配对机制曾获得越来越多的理论和实验支持,其描述的超导配对发生在布里渊区中心的空穴口袋和布里渊区顶角的电子口袋之间。该项目组对新型铁基超导体 $A_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ ($A=\text{K}, \text{Cs}$) 的实验发现这一超导只存在电子口袋,而没有空穴口袋。这与之前所有的铁基超导体有很大的差别。他们也测得超导能隙在动量空间的分布,发现它与之前普遍认为的 S_{\pm} 配对有很大差异,而更好地和S波配配对

称性吻合,因而挑战了之前的主流理论,为建立更完善的理论奠定了实验基础。这一结果发表在*Nat. mater.* (2011, 10: 273-277)。以该成果为代表的系列工作获2015年度国家自然科学奖二等奖。

铁基超导体的特殊之处还在于它既包含能隙无节点的成员,也包含能隙有节点的成员,目前理论上尚未有定论。该课题组首次成功观察到了 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ 中的超导能隙,发现其能隙面内为各向同性,这就否定了其节点与d波配对有关。特别是,在布里渊区边界附近的一个空穴型费米面上,观察到了超导能隙中的节点。这是首次在铁基超导体中直接探测到能隙节点的位置,对理解铁基超导体的超导机理有很大帮助。这一结果发表在*Nat. Phys.* (2012, 8: 371-375),并被同期杂志的“News and Views”专栏撰文给予评述。

图 $A_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ 的费米面拓扑结构,整个布里渊区内只有电子型口袋(a); $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ 能隙分布图,其中节点为围绕Z点的 α 能带一圈,说明是s波配对下的节点,把含节点类和无节点类的铁基超导能隙结构都统一在S波框架下(b)



靶向铜离子伴侣蛋白的化学干预和新型 抗肿瘤作用机制研究

Inhibition of Human Copper Trafficking by a Small Molecule Significantly Attenuates Cancer Cell Proliferation

铜离子水平的紊乱会导致多种疾病，其体内铜调控机制研究已经成为肿瘤生物学研究的重要方向。通过铜离子螯合剂可以显著抑制肿瘤生长，但也伴随着极大毒副作用。细胞内有多种负责运输铜离子的伴侣蛋白，其在多种肿瘤组织中的表达明显高于正常组织。与金属螯合剂相比，靶向它们可以更加特异、精细地调节铜离子的浓度以及分布，从而在实现治疗效果的同时减少毒副作用。

中国科学院上海药物研究所蒋华良研究员在国家自然科学基金（批准号：21210003）等的资助下，与美国芝加哥大学何川教授和艾默里大学陈靖教授等开展国际合作，采用药物设计结合化学生物学实验验证策略，首次发现小分子

抑制剂 DC-AC50 通过干扰铜离子运输，选择性阻断肿瘤细胞增殖，且在多种动物实验中表现出良好的抗肿瘤活性。该成果发表在 *Nat. Chem.* [2015, 7 (12): 968-979] 上。论文发表后，被 *Chem. Eng. News* 即时报道并获第一个铜离子螯合剂的发明人——美国西北大学教授 Thomas O'Halloran 的高度评价。

该项成果是靶向铜伴侣蛋白的小分子抑制剂的首例报道，已经申请美国专利并获批准，并已授权至苏州一家制药企业继续开展后续药物研发工作。该成果不仅为肿瘤的靶向治疗提供了高效、低毒的先导化合物，为抗肿瘤研究开辟了全新的领域，也为铜离子在生物体内的化学调控机制研究奠定了坚实的基础。

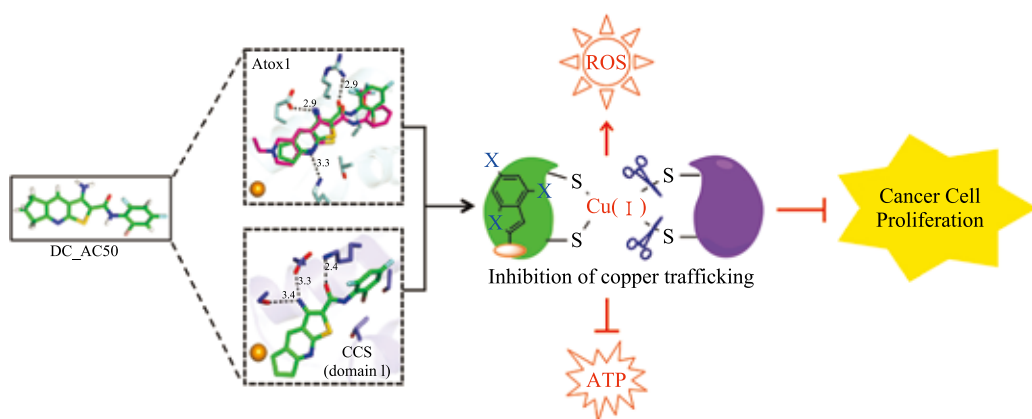


图 铜伴侣蛋白调控剂抗肿瘤创新药物先导化合物研发

小麦兼抗型成株抗性基因的发掘与育种应用

QTL Mapping for Pleiotropic Adult Plant Resistance Genes in Wheat and Application in Breeding

中国农业科学院作物科学研究所何中虎研究员和夏先春研究员在国家自然科学基金(批准号:30220140636, 30821140351)的资助下,针对小麦品种对白粉病、条锈病和叶锈病的抗性频繁丧失这一难题,发现兼抗上述三种病害且效应较大的成株抗性基因位点(QTL)5个及其紧密连锁的分子标记9个,与国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)合作发现2个兼抗条锈和叶锈病的基因也抗白粉病。揭示了平原50等持久抗性

品种的遗传机制,聚合3~5个效应相对较大的兼抗型成株抗性基因,即可在甘肃和四川等锈病重发区实现持久抗性。建立了分子标记与常规育种相结合的兼抗型成株抗性育种新方法,育成农艺性状优良的兼抗型成株抗性育种新材料100多份,为培育兼抗型持久抗性新品种提供了遗传基础清晰的亲本、基因、分子标记和成功范例,为从根本上解决品种抗病性频繁丧失提供了新思路 and 可操作的新方法。在作物遗传育种主流国际期刊发表SCI论文

50篇。以上述成果作为主要内容,获2015年度国家科学技术进步奖二等奖。何中虎于2009年和2013年分别当选为美国作物学会和农学会Fellow,于2012年获中华农业英才奖并当选为CIMMYT Distinguished Scientist。

图 何中虎研究员
(中)与麦农在田间



《泛喜马拉雅植物志》第30卷等三卷出版

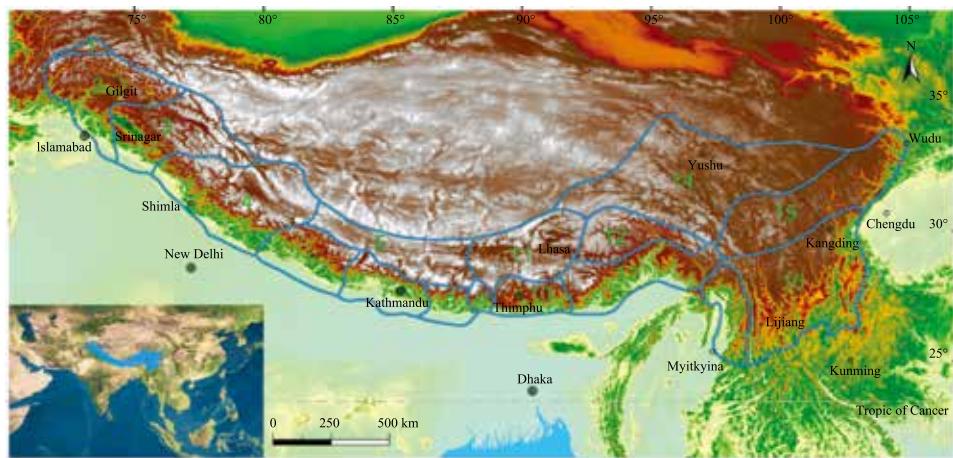
Three Volumes of *Flora of Pan-Himalaya* Published

泛喜马拉雅地区包括喜马拉雅山脉及其所毗邻的横断山、喀喇昆仑山和兴都库什山，构成地球上一个独特的地理单元，跨越中国、巴基斯坦、印度、尼泊尔、不丹、缅甸和阿富汗等7个国家。该地区为世界屋脊，地球的第三极，亚洲的水塔，地理环境独特，地形及气候复杂多变，生物多样性极其丰富。但因生态环境脆弱，当地居民生态保护意识又相对淡薄，为了保护环境和生物多样性，合理开发和可持续利用当地的生物资源，对该地区植物物种现状的调查势在必行。

中国科学院植物研究所洪德元研究员在国家自然科学基金（批准号：31110103911）的资助下，组织并领导来自美、英、日、印度等16个国家的近百名植物分类学家，开展了 *Flora of Pan-*

Himalaya（《泛喜马拉雅植物志》）的编研项目。5年来，组织了国内外综合考察10余次、专业考察近百次，采集标本6万余份，获得DNA材料2万余份，发现新属6个、新种逾百个，发表论文60余篇。在此基础上，编撰完成了第30卷（十字花科）、47卷（冬青科、桔梗科等）和48（2）卷（菊科风毛菊属），并于2015年12月由科学出版社和剑桥大学出版社联合出版。

《泛喜马拉雅植物志》将植物志的传统内容与生物学的最新发展和手段紧密结合，代表了当今植物志的最高国际水准。项目的开展将对世界上这一独特地区的地球科学和生物科学的深入研究提供重要的基础数据，为保护当地生态环境、制定科学的生物多样性保护和区域发展战略提供科学数据。



Subdivisions of the Pan-Himalaya
1.Vakhan; 2.N Pakistan; 3.Jammu & Kashmir; 4.U Ganga & Indus; 5.U Yarlung Zangbo; 6.W Nepal; 7.C Nepal; 8.E Nepal; 9.Sikkim & Darjiling; 10.Bhutan;
11.M Yarlung Zangbo; 12.L Yarlung Zangbo; 13.Yarlung Zangbo-Brahmaputra; 14.Tangut; 15.N Hengduan; 16.S Hengduan; 17.U Irrawaddy.

图 泛喜马拉雅地区

兽脚类恐龙新发现和鸟类起源研究进展

New Discoveries of Theropod Dinosaurs and Advances in Bird Origin Research

中国科学院古脊椎动物与古人类研究所徐星教授在国家自然科学基金(批准号: 41120124002)的资助下,在兽脚类恐龙演化和鸟类起源研究方向取得了一系列重要成果。恐龙向鸟类演化过程的复原是古生物学和演化生物学最热点研究方向之一。徐星与合作者在中国、加拿大和日本等地开展野外工作,发现一批重要兽脚类恐龙化石,通过多学科交叉手段,揭示了这些化石蕴含的重要形态学信息,极大推动了人们对于兽脚类恐龙分类多样性和形态差异性的理解。尤其重要的是,通过整合来自这些化石的信息和其他资料,徐星与合作者推动了有关鸟类起源若干重要问题的解决,

其中包括羽毛和飞行等重要鸟类特征的演化。这些成果发表在包括《自然》和《科学》等学术刊物上,引起了国际学术界的广泛关注,并获得高度评价。《科学》杂志把鸟类起源研究列为2014年度世界十大科学突破之一;《自然》杂志2012年9月发表人物专访,介绍了徐星有关恐龙演化和鸟类起源方面的研究。徐星与合作者的研究工作还得到了主流媒体的高度关注,美国有线电视新闻网CNN于2015年11月在其重要访谈节目‘On China’中,采访了徐星等人,专门介绍中国恐龙研究。

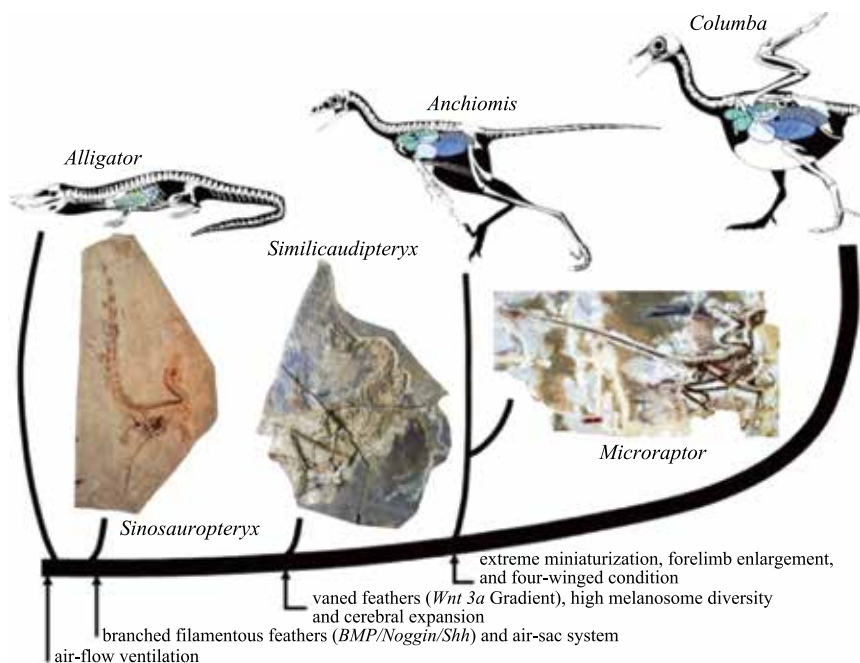


图 基于多学科资料推测的若干鸟类特征演化历史(引自 Xu et al. *Science*, 2014)

含特定晶面光催化材料的设计与构建

Designing and Construction of Faceted Photocatalysts

在国家自然科学基金(批准号: 50921004, 51221264, 21090343, 51181220510)等的资助下,中国科学院金属研究所成会明研究员与澳大利亚昆士兰大学逯高清教授在特定晶面选择性暴露光催化材料及先进储能材料等方面开展合作研究,取得了具有国际影响的成果。

光催化是发生在半导体材料表面的反应,光催化材料的表面特征直接影响其光催化活性,控制光催化材料的表面结构是构建高性能光催化材料的重要途径。通过合作研究,实现了多种晶体的不同晶面选择性暴露的控制制备,发现了具有普适性的晶面控制的能带带边位置差异,并进一步提出了晶面原子配位非饱和度和晶面能带带边位置协同决定光催化活性的观点,为构建高性能光催化材料提供了新依据。实现了异质原子掺杂的高能晶面,揭示了晶面与异质原子或氧空位在调控表面原子结构和能带结构的协同效应,提出了通过异质原子诱导带边弯曲来调控晶面带边位置的新思路,实现了光催化氧化、还原反应择优性的调变。相关研究成果推动了光催化的研究从无特定晶面阶段发展到含特定晶面阶段,为构建高性能光催化材料提供了新机遇,同时还促进了相关学科的发展。

双方还提出了层次孔碳高效储能的概念,发展了柔性无集流体高容量石墨烯基超级电容器电极材料和碳纳米管/硫复合电极材料,推动了新型储能材料的发展。双方合作发表了一系列高质量论文,受到同行的广泛关注,多篇论文入选 ESI 高被引论文以及年度中国百篇最具影响国际学术论文,并受邀撰写综述论文数篇,相关成果还获得了澳大利亚、中国发明专利。通过合作研究有力提升了双方研究团队在先进能源材料领域的国际影响力,促进了中澳科技合作。逯高清教授荣获中国科学院国际科技合作奖和中华人民共和国国际科技合作奖;成会明研究员被昆士兰大学聘为荣誉教授,并获得了何梁何利科技进步奖、美国 Pettinos 奖、德国 Felcht 奖等奖励,2013 年当选为中国科学院院士。



图 不同晶型(锐钛矿、金红石、板钛矿)二氧化钛晶体的晶面选择性暴露示意图 (Chem. Rev., 2014, 114: 9559)

飞秒成像下的时间解析光传输分解 及超快无镜头计算成像

Femtosecond-imaging Based Time-resolved Light Transport and Ultra-fast Lens-less Computational Imaging

清华大学戴琼海教授在国家自然科学基金(批准号: 61120106003)的资助下,与MIT MEDIA LAB合作,研究了飞秒成像下的时间解析光传输分解及超快无镜头计算成像。针对传统光学成像的光子只能在时域上被积分在一起以形成图像上某一像素值,无法实现光传输解耦。为此,提出了一种时间解析的全局光传输解耦计算成像方法,实现了飞秒成像在光传输研究领域的新发展与应用(图1)。研究工作包括直接分量下的场景深度计算、光传输时域分布函数下的材质区域标记、体积散射介质的散射模型验证及参数测量、局部邻域时间函数簇统计分析下的边缘解耦检测、光传输解耦下的新图像渲染。

飞秒成像下的超快无镜头计算成像针对超高时间分辨率下,现有4维稳态光传输时间维度缺失,其分析理论对时间解析超快成像研究不再适用的问题,提出了时间解析的5维光传输频域分析理论及一种暂态光传输下的超快无镜头计算成像方法(图2)。本方法构建的系统克服了由镜头引入的成像局限性,实现了无镜头的时间解析计算成像,在天文观测、机载侦察、超微医学成像、超薄移动成像等方面都具有潜在的重要应用前景。成果发表在计算机视觉领域顶级会议CVPR(ORAL)、ECCV,2014年在视觉领域顶级期刊IJCV连续发表两篇文章。

图1 飞秒成像下的时间解析光传输分解及应用

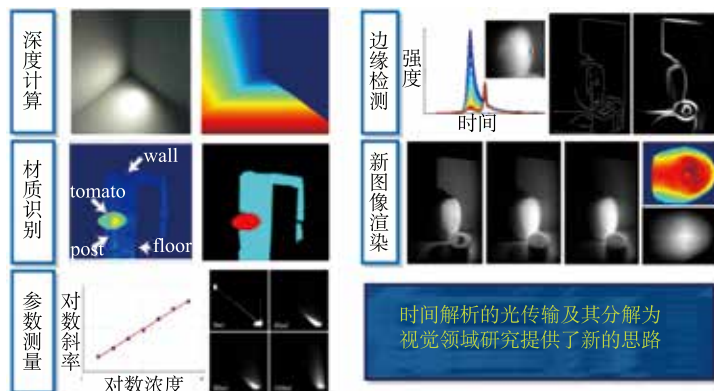


图2 飞秒成像下的超快无镜头计算成像系统



中国健康与养老追踪调查

China Health and Retirement Longitudinal Study (CHARLS)

中国健康与养老追踪调查（CHARLS）是由北京大学国家发展研究院赵耀辉教授主持的大型长期追踪调查项目。该研究得到国家自然科学基金（批准号：70910107022，70773002，71130002）等的资助。

在我国人口快速老龄化的形势下，养老负担、慢病支出、照料负担都将大幅度提升，对养老、就业、社保等方面政策提出挑战，CHARLS 调查是专门为应对这些挑战而设计，对受访者的社会经济与健康状况（包括躯体、心理、认知、生物标识）进行跨学科学的动态观察，去掉受访者隐私信息后的数据无偿、快速提供给学术界使用。CHARLS 采取多阶段分层随机抽样设计，对全国中老年人具有全国代表性，样本包括了 150 个县级单位（散布在全国 28 个省区），450 个村级单位，一万二千余户、2 万余个人，自 2011 年基线调查以来，隔年追踪访问。CHARLS 执行团队注重质量控制，在问卷科学性、抽样的随机性、应答率、测量的准确性

等方面都达到国际前沿水平。

CHARLS 数据在隐去受访者敏感信息后对国内外学术界免费开放，已经成为中国在世界上最具影响力的微观数据库，截止 2016 年初，拥有 13 392 名注册用户，用户发表论文总数达到 449 篇。

图 1 CHARLS 数据用户历年论文成果（不完全统计）

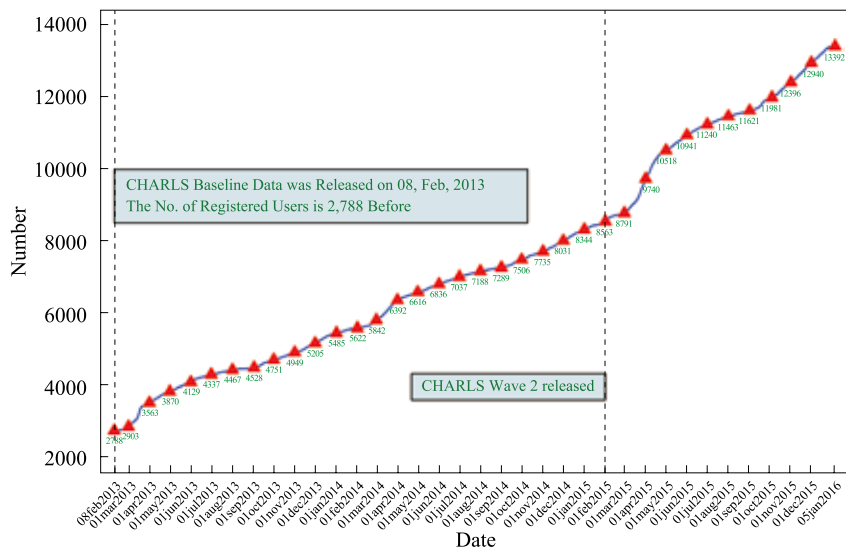
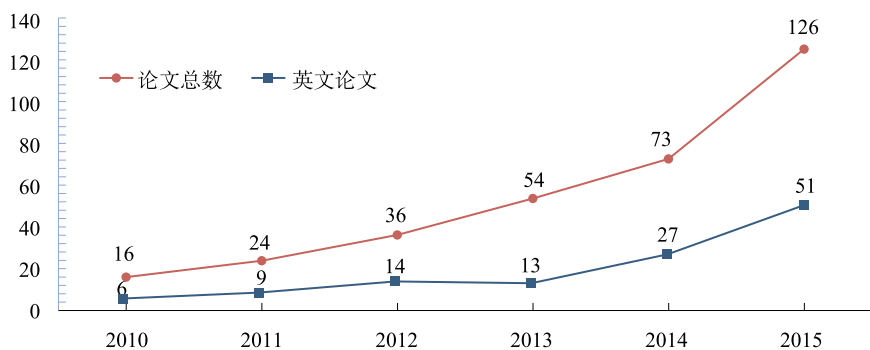


图 2 CHARLS 累计用户数

重症疟疾关键调控因子及其作用机制的发现

Identification and Mechanistic Investigation of the Severe Malaria-associated Regulatory Factor

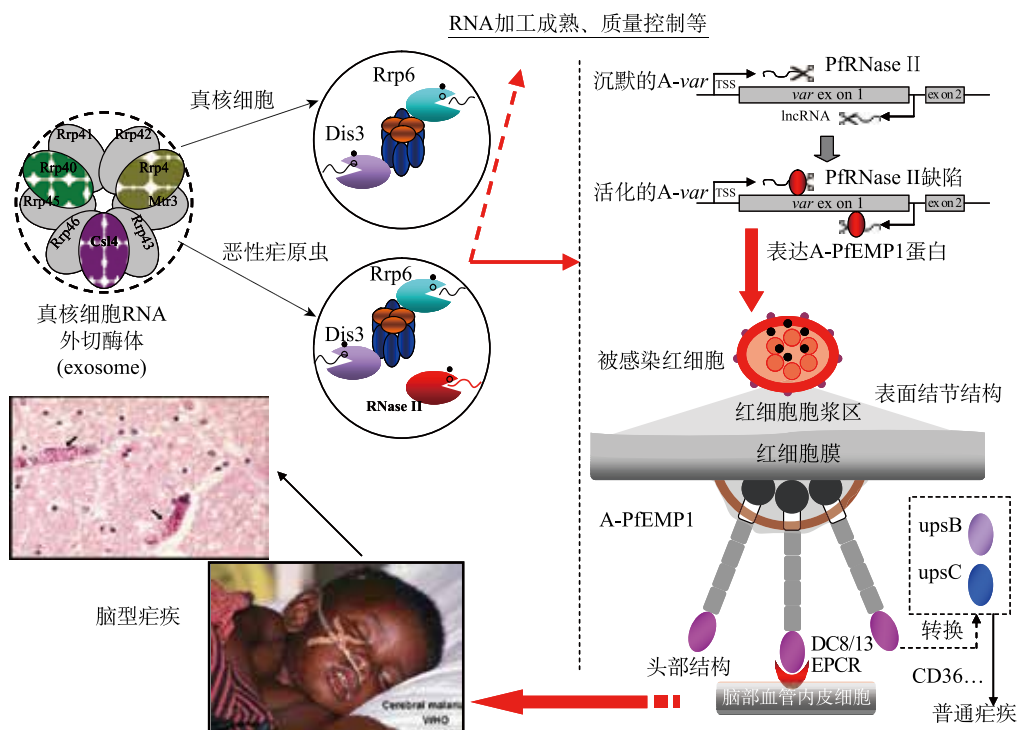
疟疾、艾滋病和结核病一起被世界卫生组织列为当前全球三大公共卫生问题。恶性疟原虫引起的重症疟疾导致全球每年约百万患者的死亡。随着疟原虫对青蒿素药物抗性的产生和扩散，全球疟疾防治面临巨大危机。已知疟原虫变异基因家族中的A亚类 *var* 基因 (A-*var*) 能导致凶险型疟疾；但是其调控机制不明，而这正是寻找重症疟疾防治靶点的关键所在。

同济大学张青锋教授与法国巴斯德研究所 A Scherf 教授在国家自然科学基金 (批准号: 81361130411) 的资助下，

开展合作研究，充分整合双方的技术和资源优势，以 A-*var* 基因的转录后调控作为切入点，对其表达调控机制进行了深入研究，发现了重症疟疾的调控因子 PfRNase II 蛋白，并且证实该蛋白介导的基因转录后降解机制是其控制重症疟疾的重要途径。这不仅是国际上首次发现与调控重症恶性疟疾的关键因子，为该疾病的防治如疫苗和药物等研发提供了新的靶向分子；而且首次阐明了一种由 RNA 核酸酶调控的真核病原体抗原变异机制，为研究真核病原体免疫逃避机制提供了新的视角。该成果于 2014

年 9 月发表于《自然》，随即 *Nat. Rev. Microbiol.* 和 *F1000* 等予以亮点推荐；CCTV 新闻频道“科学前沿”栏目以“上海：科学家发现防治疟疾关键蛋白质”为题进行报道。

图 RNA 酶调控重症疟疾的分子机制



泛素连接酶 HECTD3 在乳腺癌中的功能和机制研究

The Role of HECTD3 E3 Ubiquitin Ligase in Breast Cancer

中国科学院昆明动物研究所陈策实研究员及其团队在国家自然科学基金（批准号：81120108019）的资助下，和美国纽约州 Wadsworth Center 李宏民教授合作，对泛素连接酶 HECTD3 的功能和分子机制展开研究，功能方面聚焦在乳腺癌细胞凋亡、耐药以及肿瘤转移方面，取得了一批有重要意义的科研成果。

蛋白质泛素连接酶是继蛋白激酶后新的抗癌药物靶点，目前针对 Mdm2 泛素连接酶的小分子药物已经在临床抗癌试验之中。HECTD3 是一个新的泛素连接酶，课题组前期研究发现它在乳腺癌、前列腺癌等肿瘤中高表达，但是对它的功能和机制缺乏研究。课题组发现

在癌细胞中抑制 HECTD3 表达可以增加癌细胞对顺铂、紫杉醇等多种化疗药物和放疗的敏感性。机制方面课题组发现 HECTD3 可以修饰底物蛋白 MALT1 和 Caspase-8 从而抑制细胞的死亡。课题组还解析了 HECTD3 识别底物蛋白的 DOC 结构域晶体结构。在 HECTD3 基因敲除的小鼠模型上，课题组发现 HECTD3 具有促进炎症和乳腺癌肺转移的功能。部分相关成果已经发表在 *Cell Death and Disease* 以及 *Neoplasia*。这些成果为开发 HECTD3 抑制剂作为抗癌药物进行靶向治疗克服肿瘤耐药转移具有重要的价值。

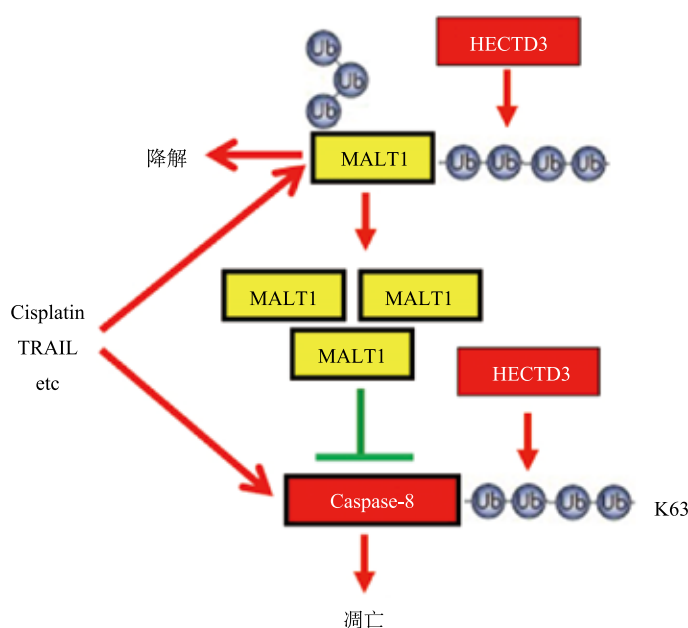


图 HECTD3 泛素化修饰 MALT1 和 Caspase-8 导致癌细胞耐药

附录 2011~2015 年度国家自然科学基金获奖人受国家自然科学基金资助情况

国家自然科学基金一等奖获奖人受国家自然科学基金资助情况统计表

序号	获奖成果名称 (2013 年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
1	40K 以上铁基高温超体的发现及若干基本物理性质研究	赵忠贤、陈仙辉、王楠林、闻海虎、方忠	中国科学院物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 新型非常规超导材料的探索和机理研究 铁基超导体的电荷动力学研究 高温超导体低能准粒子激发和机理问题研究 	31
序号	获奖成果名称 (2014 年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
1	网络计算的模式及基础理论研究	张尧学、周悦芝、林闯、任丰原、王国军	清华大学	<ul style="list-style-type: none"> 基于市场经济模型的高速网络服务质量 (QoS) 控制方法 网络计算环境下资源组织与管理的基础理论研究 	26
序号	获奖成果名称 (2015 年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
1	多光子纠缠及干涉度量	潘建伟、彭承志、陈宇翱、陆朝阳、陈增兵	中国科学技术大学	<ul style="list-style-type: none"> 基于光子与冷原子的量子信息物理和技术 量子信息科学 	32

国家自然科学基金二等奖获奖人受国家自然科学基金资助情况统计表

序号	获奖成果名称 (2011 年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
1	流体力学与量子力学方程组的若干研究	张平、江松	中国科学院数学与系统科学研究院	<ul style="list-style-type: none"> 流体力学及相关问题的数学理论 	9
2	薄膜 / 纳米结构的控制生长和量子操纵	贾金锋、马旭村、陈曦、赵忠贤、薛其坤	中国科学院物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 二维金属薄膜表面催化的量子调控 	31
3	轻元素新纳米结构的构筑、调控及其物理特性研究	王恩哥、白雪冬、于杰、马旭村、刘双	中国科学院物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 纳米结构薄膜生长机理和原子尺度控制的研究 	26
4	电荷转移分子体系光学非线性及超快全光开关实现	龚旗煌、胡小永、王树峰、杨宏	北京大学	<ul style="list-style-type: none"> 飞秒光物理与介观光学研究 光子晶体开关及其飞秒近场研究 	29
5	引力体系动力学和热力学性质及其内在联系的研究	蔡荣根、王斌、张元仲	中国科学院理论物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 高维引力理论、应用及其实验检验 	13
6	稀土纳米功能材料的可控合成、组装及构效关系研究	严纯华、张亚文、孙聆东、高松	北京大学	<ul style="list-style-type: none"> 稀土功能材料化学 	37
7	超临界流体、离子液体及其混合体系相行为与分子间相互作用研究	韩布兴、刘志敏、张建玲、姜涛、闫海科	中国科学院化学研究所	<ul style="list-style-type: none"> 离子液体复杂体系化学热力学与分子间相互作用研究 	35

序号	获奖成果名称 (2011年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
8	几类无机材料的氢、锂、镁储存 与电池性能研究	陈军、李玮瑒、 陶占良、程方益、 马华	南开大学	• 镁二次电池新型电极材料研究	9
9	大分子自组装的新路线及其运用	江明、陈道勇、 姚萍	复旦大学	• 大分子组装获得空心聚合物纳米微 球的新途径	20
10	催化材料的紫外拉曼光谱研究	李灿、冯兆池、 张静、范峰滔、 杨启华	中国科学院大连化学物 理研究所	• 催化新材料、新反应和新研究方法的 探索研究	39
11	纳米尺度和分子水平上生物信息 获取的新原理与新方法	王柯敏、何晓晓、 羊小海、杨荣华、 唐志文	湖南大学	• 细胞、亚细胞层面上生命活动的纳 米表征	20
12	中国东部燕山期花岗岩成因与地 球动力学	吴福元、李献华、 杨进辉	中国科学院地质与地球 物理研究所	• 辽东半岛中生代花岗岩成因与岩石 圈演化	23
13	华北及邻区深部岩石圈的减薄与 增生	徐义刚、郑建平、 范蔚茗、许继峰、 郭锋	中国科学院广州地球化 学研究所	• 华北岩石圈减薄-增生过程: 新生代 火山岩及幔源包体的约束	29
14	青藏高原地体拼合、碰撞造山及 隆升机制	杨经绥、许志琴、 李海兵、张建新、 吴才来	中国地质科学院地质研 究所	• 青藏高原大陆动力学及资源环境效应	26
15	晚中新世以来青藏高原东北部隆 升与环境变化	方小敏、李吉均、 潘保田、马玉贞、 宋春晖	兰州大学	• 青藏高原东北部隆升过程与大地貌 形成	28
16	典型持久性有毒污染物的分析方法 与生成转化机制研究	江桂斌、郑明辉、 刘景富、蔡亚岐、 蔡宗葑	中国科学院生态环境研 究中心	• 持久性有机污染物形态、环境过程 与毒理效应	44
17	典型污染物环境化学行为、毒理 效应及生态风险早期诊断方法	王晓蓉、陈景文、 尹大强、郜洪文、 朱东强	南京大学	• 土壤中持久性有机有毒污染物的迁 移转化规律及对地下水的影响	23
18	多倍体银鲫独特的单性和有性双 重生殖方式的遗传基础研究	桂建芳、周莉、 杨林、刘静霞、 朱华平	中国科学院水生生物研 究所	• 三倍体银鲫资源的遗传评价及其生 物学基础研究	14
19	棉纤维细胞伸长机制研究	朱玉贤、秦咏梅、 姬生健、施永辉、 李鸿彬	北京大学	• 乙烯、GA和超长链脂肪酸调控棉纤 维发育的分子机制研究	9
20	植物分子系统发育与适应性进化的 模式与机制研究	施苏华、吴仲义、 唐恬、周仁超、 曾凯	中山大学	• 红树植物适应性进化的模式与机制	23
21	《中华人民共和国植被图(1:100 万)》的编研及其数字化	侯学煜、张新时、 李博、孙世洲、 何妙光	中国科学院植物研究所	• 中国百万分之一植被图, 二百万分之 一的区划图及说明书 *2	4
22	新发传染病的分子病理学和免疫 学发病机制研究	顾江、丁明孝、 王月丹、高子芬、 宫恩聪	北京大学	• 人禽流感 H5N1 和甲型流感 H1N1 的 多器官感染模式研究	14

序号	获奖成果名称 (2011年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
23	缺血性脑卒中神经保护新靶点的研究	高天明、张光毅、 李晓明、裴冬生、 关秋华	南方医科大学	• 离子通道功能异常在缺血性脑损伤中的作用及其机理	22
24	基于非测距的无线网络定位理论与方法研究	刘云浩、倪明选、 李 默、杨 铮	香港科技大学	• 无线自组织网可信可管关键技术研究	5
25	计算机网络资源管理的随机模型与性能优化	林 闯、李 波、 任丰原、尹 浩、 蒋屹新	清华大学	• 网络计算环境下资源组织与管理的基础理论研究	22
26	极化电磁散射传输与空间微波遥感对地观测信息理论	金亚秋、徐 丰、 法文哲	复旦大学	• 地球环境中极化电磁散射信息的定量遥感	17
27	近红外光激发下高阶多光子上转换过程及其强紫外上转换光发射的研究	秦伟平、宋宏伟、 秦冠仕、赵 丹、 吕少哲	中国科学院长春光学精密机械与物理研究所	• 飞行微粒子的瞬态光谱、强紫外上转换发光特性及应用研究	17
28	介孔基复合材料设计合成、非均相催化性能与应用探索	施剑林、陈航榕、 高秋明、张文华、 严东生	中国科学院上海硅酸盐研究所	• 新型介孔主客体复合材料及其非均相催化性能调控	15
29	硬度的微观理论及新型亚稳相设计	田永君、王慧田、 高发明、何巨龙、 孙 建	燕山大学	• 新型亚稳材料的设计原理、实验合成与结构调控	21
30	生物矿化纤维的分级组装机理研究	崔福斋、王秀梅、 李恒德、蔡 强、 孔祥东	清华大学	• 生物矿化过程及其模拟 • 天然生物材料的多级结构、微组装和仿生研究	32
31	亚稳纳米材料生长的基础研究	杨国伟、王成新、 欧阳钢、杨玉华、 王 冰	中山大学	• 纳米尺度下亚稳材料制备的热力学和动力学理论与实验研究	12
32	双剪统一强度理论及其应用	俞茂宏、李跃明、 马国伟、张永强、 范 文	西安交通大学	• 基于双剪统一强度理论的黄土边坡强度理论效应研究	7
33	微纳尺度传热的尺度效应及其物理机制	过增元、李志信、 梁新刚、张 兴	清华大学	• 航天技术和信息器件中的微细尺度传热	28
34	基于行为的城市交通流时空分布规律与数值计算	高自友、黄海军、 杨 海、林兴强、 毛保华	北京交通大学	• 城市交通网络优化与管理的若干基础问题研究	33
35	提高光催化环境污染控制过程能量效率的方法及应用基础研究	全 燮、朱永法、 李新勇、姚文清、 于洪涛	大连理工大学	• 环境污染物的高能效及高活性光催化降解研究	24
序号	获奖成果名称 (2012年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
1	模空间退化和向量丛的稳定性	孙笑涛	中国科学院数学与系统科学研究院	• 代数几何	1
2	大维随机矩阵理论及其应用	白志东	东北师范大学	• 大维随机矩阵理论及其在无线电通讯中的应用	5

序号	获奖成果名称 (2012年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
3	守恒律组和玻尔兹曼方程的一些数学理论	杨 彤	香港城市大学	• 偏微分方程	2
4	低维强关联电子系统中的奇异自旋性质理论研究	王玉鹏、曹俊鹏、 张 平、陈 澍、 戴建辉	中国科学院物理研究所	• 极低温下强关联电子系统和介观系统研究 • 低维强关联体系电子态性质研究	26
5	金笼子与外场下纳米结构转变的研究	龚新高、孙得彦、 刘志锋、顾 晓、 季 敏	复旦大学	• 低维纳米体系热传导的模拟和计算研究	17
6	基于核自旋的量子计算研究	杜江峰	中国科学技术大学	• 用固体中电子及核自旋进行量子计算及量子仿真之理论与实验研究	8
7	“高能电子宇宙射线能谱超出”的发现	常 进	中国科学院紫金山天文台	• 空间观测高能电子和伽玛射线	6
8	基于边臂策略的立体化学控制与催化反应研究	唐 勇、孙秀丽、 叶 松、周 剑、 康彦彪	中国科学院上海有机化学研究所	• 一些新型的叶立德成环反应研究 • 新型手性三噁唑啉配体的合成及其在不对称合成中的应用	33
9	特定结构无机多孔晶体的设计与合成	于吉红、庞文琴、 李激扬、李 乙、 徐如人	吉林大学	• 无机开放骨架晶体功能材料的结构设计及定向合成	23
10	含氮手性催化剂的设计合成及其不对称催化有机反应研究	冯小明、刘小华、 林丽丽	四川大学	• 新型手性氮氧偶极双功能催化剂催化酮的不对称硅腈反应研究	19
11	纳米材料的安全性研究	赵宇亮、陈春英、 王海芳、丰伟悦、 柴之芳	中国科学院高能物理研究所	• 碳纳米材料的细胞和分子毒理的研究 • 科研与周边环境中低剂量纳米材料的长期暴露水平及其毒理学效应研究	29
12	基于天然高分子的环境友好功能材料构建及其构效关系	张俐娜、杜予民、 蔡 杰、陈凌云、 周金平	武汉大学	• 耐水性大豆蛋白塑料的结构与性能研究 • 纤维素氨基甲酸酯的绿色合成、溶解及其新型纤维的制备	19
13	复杂生物样品的高效分离与表征	邹汉法、张丽华、 叶明亮、吴仁安、 张玉奎	中国科学院大连化学物理研究所	• 复杂体系的高效分离与表征	44
14	金属酶的化学模拟及其构效关系研究	毛宗万、计亮年、 巢 晖、刘建忠、 鲁统部	中山大学	• 金属酶与活性模拟物的结构杂化及生物医学功能研究	40
15	黄土和粉尘等气溶胶的理化特征、形成过程与气候环境变化	安芷生、张小曳、 曹军骥、李顺诚、 刘晓东	中国科学院地球环境研究所	• 亚洲粉尘源区大气碳气溶胶的理化特征及其源解析 • 二次碳气溶胶的形成、影响因素及其环境意义	36
16	中亚增生造山作用及其环境效应	肖文交、孙继敏、 高 俊	中国科学院地质与地球物理研究所	• 西昆仑南部构造样式与变形期次及其增生型造山作用	25
17	中国大气污染物气溶胶的形成机制及其对城市空气质量的影响	庄国顺、郭志刚、 黄 侃、孙业乐、 王 瑛	复旦大学	• 我国气溶胶的来源、转化及其对气候的影响	19

序号	获奖成果名称 (2012年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
18	过去 2000 年中国气候变化研究	葛全胜、王绍武、邵雪梅、郑景云、杨保	中国科学院地理科学与资源研究所	<ul style="list-style-type: none"> 过去 300 年中国东部季风区雨带进退图谱与模拟诊断 青海柴达木盆地东部地区过去 2000 年气候变化重建 青藏高原过去 2 千年气候变化和气候模拟研究 	30
19	水稻复杂数量性状的分子遗传调控机理	林鸿宣、高继平、任仲海、宋献军、金健	中国科学院上海生命科学研究院	<ul style="list-style-type: none"> 水稻稻米品质性状的遗传学基础研究 水稻耐盐、抗旱新基因 SDL 的遗传调控机理研究 	8
20	年轻新基因起源和遗传进化的机制研究	王文、杨爽、周琦、蔡晶、李昕	中国科学院昆明动物研究所	<ul style="list-style-type: none"> 新基因的起源和进化 	12
21	脊椎动物免疫的起源与演化研究	徐安龙、黄盛丰、元少春、陈尚武、禹艳红	中山大学	<ul style="list-style-type: none"> 生命系统的生物信息学研究与功能模拟 中国人 HLA 全区域序列分析及其在自身免疫性疾病基因定位中的应用 	13
22	植物应答干旱胁迫的气孔调节机制	宋纯鹏、张骁、苗雨晨、江静、安国勇	河南大学	<ul style="list-style-type: none"> 保卫细胞氧化信号传导及其调控植物逆境适应的分子基础 	21
23	纳米材料若干新功能的发现及应用	阎锡蕴、梁伟、汪尔康、顾宁、杨东玲	中国科学院生物物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 探讨纳米材料模拟酶及其应用 纳米胶束增强抗肿瘤药物活性和疗效的机制研究 	47
24	凹耳蛙声通讯行为与听觉基础研究	沈钧贤、徐智敏、余祖林	中国科学院生物物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 凹耳蛙声行为及听觉基础研究 蛙高频声通讯的生物物理基础 	12
25	中药复杂体系活性成分系统分析方法及其在质量标准中的应用研究	果德安、叶敏、吴婉莹、关树宏、刘璇	北京大学	<ul style="list-style-type: none"> 中药复杂体系的化学成分分析与体内代谢研究 	9
26	TGF- β /Smad 信号通路维持组织稳态的生理功能和机制	杨晓、滕艳、王剑、兰雨、孙强	中国人民解放军军事医学科学院生物工程研究所	<ul style="list-style-type: none"> TGF-β 信号通路相关 miRNA 在心血管系统发育和稳态维持中的功能和机制 	15
27	小檗碱纠正高血脂的分子机理、化学基础及临床特点	蒋建东、宋丹青、魏敬、孔维佳、潘淮宁	中国医学科学院医药生物技术研究所	<ul style="list-style-type: none"> 通过小檗碱分子探针的化学构建探索其新降血脂机制的第一生物靶标 	5
28	无线多媒体协同通信模型及性能优化	陆建华、朱文武、张黔、殷柳国、陶晓明	清华大学	<ul style="list-style-type: none"> 新一代无线网络多媒体系统、理论及应用 	12
29	控制系统实时故障检测、分离与估计理论和方法	周东华、叶昊、钟麦英、方崇智、王桂增	清华大学	<ul style="list-style-type: none"> 复杂工程系统故障预测与预测维护理论及关键技术研究 	21
30	全生命周期软件体系结构建模理论与方法	梅宏、黄罡、张路、张伟	北京大学	<ul style="list-style-type: none"> 体系结构驱动的可信软件构造方法与技术研究 	18
31	若干新型非线性电路与系统的基础理论及其应用	吕金虎、陈关荣、禹思敏	中国科学院数学与系统科学研究院	<ul style="list-style-type: none"> 复杂动力网络的牵制控制及其在力学系统中的应用 	7

序号	获奖成果名称 (2012年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
32	神经生物信息模式识别与时空分析	胡德文、王正志、周宗潭、徐 昕、刘亚东	中国人民解放军国防科学技术大学	• 生物视觉信息处理机制建模及形状目标识别	17
33	氧化锌薄膜微结构与性能调控中的若干基础问题	潘 峰、曾 飞、宋 成、杨玉超、刘雪敬	清华大学	• 薄膜中亚稳磁性相的形成及其磁化行为	9
34	特征结构导向构筑无机纳米功能材料	谢 毅、吴长征、熊宇杰	中国科学技术大学	• 纳米材料和纳米结构的化学制备与性质	14
35	新型磁热效应材料的发现和相关科学问题研究	沈保根、胡凤霞、孙继荣、张西祥、吴光恒	中国科学院物理研究所	• 稀土-过渡族化合物磁热效应的物理机理研究	33
36	复杂构件不均匀变形机理与精确塑性成形规律	杨 合、詹 梅、郭良刚、李宏伟、孙志超	西北工业大学	• 钛合金复杂大件等温局部加载不均匀变形与组织一体化调控	17
37	复杂曲面数字化制造的几何推理理论和方法	丁 汉、朱向阳、尹周平、朱利民、王 煜	华中科技大学	• 复杂曲面类零件五轴数控加工动力学与主动控制	29
38	多尺度多物理场耦合的复杂系统中流动与传热传质机理研究	何雅玲、唐桂华、赵天寿、闵春华	西安交通大学	• 太阳能吸热器多物理/多尺度/多场耦合的非均匀非稳态工作机理与性能优化的基础研究	12
39	低维纳米功能材料与器件原理的物理力学研究	郭万林、胡海岩、张田忠、郭宇锋、王立峰	南京航空航天大学	• 低维功能材料结构力-电-磁耦合与器件原理的物理力学研究	34
40	压电和电磁机敏材料及结构力学行为的基础研究	沈亚鹏、陈常青、田晓耕、王子昆、王 旭	西安交通大学	• 1-3 型压电/铁电复合材料机电耦合特性及其工程应用研究 • 铁电单晶及其复合材料的本构行为研究	10
41	非线性应力波传播理论进展及应用	王礼立、任辉启、虞吉林、周风华、吴祥云	宁波大学	• 应力波对材料在一维冲击拉伸下的非稳定黏塑性流动, 损伤演化和碎裂化的影响	15
序号	获奖成果名称 (2013年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
1	若干重要的可压缩欧拉方程整体解研究	黄飞敏、王 振	中国科学院数学与系统科学研究院	• 可压缩流体的若干数学理论研究	14
2	凯勒几何中的典则度量和里奇流	朱小华	北京大学	• 复几何中的典则度量和 Ricci 流	3
3	回归中的模型检验和降维	朱力行	香港浸会大学	• 统计分析中的降维技术及其应用	3
4	无限维控制系统的结构理论	张 旭	四川大学	• 分布参数系统的 H- 无穷控制理论	8
5	大样本恒星演化与特殊恒星的形成	韩占文、陈雪飞、孟祥存、王 博	中国科学院云南天文台	• 双星演化及其应用 • Ia 型超新星前身星研究及其应用	10
6	北京谱仪 II 实验发现新粒子	金 山、李卫国、房双世、季晓斌、闫沐霖	中国科学院高能物理研究所	• 北京谱仪上的新强子态和新物理现象研究	25

序号	获奖成果名称 (2013年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
7	量子通信与量子算法的物理基础研究	龙桂鲁、邓富国、 仝殿民、李岩松、 王 川	清华大学	• 量子计算算法编码与过程控制研究 • 远程量子通信中的物理问题研究	32
8	量子几何相位及其相关问题研究	朱诗亮、汪子丹	华南师范大学	• 几何位相及其在介观系统和量子计算中的应用	6
9	荧光染料识别与响应调控的理论与应用基础研究	彭孝军、段春迎、 樊江莉、何 成、 白志平	大连理工大学	• 染料分子激发态释能调控与功能强化 • 精细有机化工(染料、涂料、感光剂、黏合剂与日用化工等)	27
10	有机小分子和金属不对称催化体系及其协同效应研究	龚流柱、蒋耀忠、 吴云东、宓爱巧、 唐 卓	中国科学技术大学	• 手性有机小分子催化反应研究 • 新型手性螺环催化剂及其不对称催化反应研究	24
11	电催化剂的表面结构效应、设计合成和反应机理研究	孙世刚、周志有、 田 娜、陈声培、 姜艳霞	厦门大学	• 分子水平层次电催化表面过程和反应动力学	33
12	纳微配位空间的金属-有机超分子组装行为及构效关系	苏成勇、康北笙、 鲁统部、潘 梅、 姜 隆	中山大学	• 基于超分子手性的非心对称配体配位聚集体的设计组装、结构调控与性能研究	21
13	高分子复合材料微加工制备及其物理与化学问题	杨振忠、徐 坚、 陈永明	中国科学院化学研究所	• 纳米结构高分子复合功能体系的可控制备和性能	36
14	基于碳氢键活化的氧化偶联	施章杰、李必杰、 万小兵、杨尚东、 林 松	北京大学	• 过渡金属催化活化芳环 C-H 键构建 C-X (X=C, N, O 等)	15
15	基于手性膦氮配体的不对称催化	侯雪龙、戴立信、 游书力、严小霞、 彭 谦	中国科学院上海有机化学研究所	• 非金属催化的亚胺化合物的不对称转化 • 环胺化合物在不对称反应中的应用	40
16	硬骨鱼纲起源与早期演化研究	朱 敏、赵文金、 贾连涛、卢 静、 乔 妥	中国科学院古脊椎动物与古人类研究所	• 硬骨鱼类、四足动物起源与古动物地理研究	9
17	典型有机污染物多介质界面行为与调控原理	朱利中、陈宝梁、 杨 坤、林道辉	浙江大学	• 土壤典型有机污染物的界面过程及修复技术原理	25
18	华北克拉通早期陆壳形成与演化	翟明国、郭敬辉、 彭 澎	中国科学院地质与地球物理研究所	• 华北克拉通早前寒武纪高压和高温两类麻粒岩的分布、成因及地质意义	31
19	沙尘对我国西北干旱气候影响机理的研究	黄建平、王式功、 王天河、周自江、 陈 斌	兰州大学	• 黄土高原半干旱区气溶胶对陆-气间相互作用影响的观测实验研究	13
20	黄土区土壤-植物系统水动力学与调控机制	邵明安、张建华、 上官周平、黄明斌、 康绍忠	中国科学院水利部水土保持研究所	• 黄土高原地区土壤干层的空间分布研究 • 坡面土壤-植被-大气界面物质交换过程与模拟	36
21	水稻质量抗性和数量抗性的基因基础与调控机理	王石平、储昭晖、 丁新华、张启发、 孙新立	华中农业大学	• 水稻对白叶枯病的质量抗性调控机理多样性研究 • 水稻反转录转座子的多样性及其对水稻种质多样性的影响	40

序号	获奖成果名称 (2013 年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
22	被子植物有性生殖的分子机理研究	杨维才、石东乔、 刘洁、唐祚舜、 李红菊	中国科学院遗传与发育 生物学研究所	• 植物生殖发育生物学 • 被子植物胚囊信号调控与花粉管响应的分子机制	15
23	TNF 诱导的细胞坏死分子机制的研究	韩家淮、张端午、 谢昌传、张娜、 周化民	厦门大学	• 肿瘤坏死因子引起细胞坏死的信号通路研究	8
24	禽流感病毒进化、跨种感染及致病力分子机制研究	陈化兰、于康震、 邓国华、周继勇、 李泽君	中国农业科学院哈尔滨 兽医研究所	• H5N1 禽流感病毒的表型多样性的分子变异机制研究	15
25	干细胞多能性与重编程机理研究	裴端卿、潘光锦、 秦宝明、秦大江、 张小飞	中国科学院广州生物医 药与健康研究院	• 胚胎干细胞多能性维持与分化的化学生物学研究 • 人尿液细胞重编程为神经干细胞的命运决定分子机制及相关功能研究	9
26	DC 细胞活化调控与 Th 细胞分化机制在免疫相关疾病中的研究	孙兵、施木德、 邓位文、吴晓东、 刘智多	中国科学院上海生命科 学研究院	• 白介素-12 β 2 受体在 Th1 细胞介导的自身免疫病中的致病性研究 • 辅助性 T 细胞分化的分子机制的研究	14
27	日本血吸虫寄生和致病分子基础的系统生物学研究	韩泽广、胡薇、 刘锋、王升跃、 冯正	上海人类基因组研究中心	• 日本血吸虫雌虫在与雄虫合抱后至性成熟过程的关键分子事件研究 • 基于生物信息学的日本血吸虫嘌呤代谢研究	10
28	若干重要中草药的化学与生物活性成分的研究	岳建民、丁健、 杨升平、张华、 樊成奇	中国科学院上海药物研 究所	• 新骨架和新结构活性天然产物的发现与研究 • 三种藏药用雪兔子属植物生物活性成分和药用物质基础的研究	22
29	寡糖的合成及某些基于糖类的药物发现	叶新山、熊德彩、 耿轶群、王冠男、 张礼和	北京大学	• 寡糖化合物的合成研究：方法及应用	37
30	热休克蛋白和 DNA 损伤修复基因在环境应激和疾病中的作用	邬堂春、沈洪兵、 胡志斌、林东昕、 张晓敏	华中科技大学	• 热休克蛋白 70 基因的遗传变异和其抗体与冠心病的联系	44
31	有机半导体的设计原理、高效制备与光电器件	黄维、赖文勇、 解令海、范曲立、 唐超	南京邮电大学	• 电泵浦有机半导体受激发射研究 • 基于配位/离子型有机半导体材料的光伏太阳能电池和电存储器件	20
32	时滞系统鲁棒控制的自由权矩阵方法	吴敏、何勇、 张先明	中南大学	• 时滞系统鲁棒控制的自由权矩阵方法及其应用	9
33	生物计算中数据编码与模型构建理论方法研究	许进、魏小鹏、 张强、王天明、 滕弘飞	北京大学	• 大规模图信息处理 DNA 计算模型研究 • 多重约束下 DNA 计算编码问题的分析与设计方法研究	34
34	基于不充分信息的机器学习理论与方法研究	周志华、陈松灿、 张敏灵、黎铭、 谭晓阳	南京大学	• 机器学习中的若干重要问题研究 • 开放动态环境下在线机器学习理论与方法	29
35	多源干扰系统的建模、分析与控制理论研究	郭雷、孙长银、 吴淮宁、李涛	东南大学	• 非高斯与多源干扰系统控制和估计理论及应用研究	13

序号	获奖成果名称 (2013年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
36	复杂对象的几何表示和计算理论与方法	鲍虎军、周 昆、 刘利刚、张纪文、 蔺宏伟	浙江大学	• 复杂物理对象的几何优化与过程模拟	17
37	基于自然智能的学习与优化基础理论研究	焦李成、刘 芳、 刘 静、公茂果、 张 莉	西安电子科技大学	• 基于智能体多目标进化的应急资源调度模型与算法	22
38	高效光/电转换的新型有机光功能材料	张晓宏、李述汤、 张秀娟、陶斯禄、 张成义	中国科学院理化技术研究所	• 高效光电转换有机/纳米复合结构的研究	10
39	热电材料的多尺度微观结构调控与性能优化	陈立东、张文清、 史 迅、唐新峰、 张清杰	中国科学院上海硅酸盐研究所	• 高性能纳米复合热电材料	28
40	多功能金属有机聚合物/磷光材料及其在新兴领域的应用研究	黄维扬、周桂江、 何卓琳、王行柱、 何 泽	香港浸会大学	• 以金属炔基聚合物为前体的纳米压印光刻快速制备位元规则介质 • 配合物磷光材料发光颜色的光动态调节	5
41	纳米电催化能源材料的功能定向制备和协同效应机理研究	沈培康、徐常威、 孟 辉、刘应亮	中山大学	• 新型多元金属碳化物纳米结构能源材料及功能调控研究	15
42	过渡金属及其化合物纳米材料的可控合成、微结构及相关特性	郭 林、杨世和、 王荣明、陈晋平、 刘晨敏	北京航空航天大学	• 过渡金属化合物基多级结构微纳米材料的合成、机理及特性研究	13
43	一维纳米半导体材料的可控生长及其机理	杨德仁、张 辉、 杜 宁、沙 健、 马向阳	浙江大学	• 准一维纳米硅材料的制备与物性研究	36
44	燃料设计理论及其控制内燃机燃烧与排放的基础研究	黄 震、吕兴才	上海交通大学	• 柴油机颗粒物生成及演变机理 • 压燃式发动机高效低温燃烧的基础研究	13
45	机械早期故障瞬态信息的小波熵检测与自适应提取理论	林 京、屈梁生、 邱 海、吴芳基、 张爱民	西安交通大学	• 机械系统动态监测、诊断与维护 • 基于小波变换的海洋声学参数获取方法研究	6
46	高性能纤维增强复合材料加固混凝土结构的力学性能及设计理论	滕锦光、陆新征、 林 力、叶列平	香港理工大学	• 高性能纤维增强复合材料在土木工程中应用的基础研究	10
47	并联机器人机构拓扑与尺度设计理论	高 峰、刘辛军、 赵现朝、金振林、 李为民	上海交通大学	• 新机型、新机构 • 并联机构性能评价新指标及其应用研究	11
48	面向再制造的表面工程技术基础	徐滨士、王海斗、 张显程、董世运、 梁秀兵	中国人民解放军装甲兵工程学院	• 再制造基础理论与关键技术	23
49	燃料电池中多相能质传递与反应动力学的相互作用机理	赵天寿、杨 浩、 陈 蓉、刘建国、 杨卫卫	香港科技大学	• 可再生与替代能源利用光微流体多相流传热传质 • 直接甲醇燃料电池微尺度膜电极复合结构内多相多组分耦合传递规律研究	6

序号	获奖成果名称 (2013年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
50	广义协调与新型自然坐标法主导的高性能有限元及结构分析系列研究	龙驭球、岑松、龙志飞、傅向荣、陈晓明	清华大学	<ul style="list-style-type: none"> 通用面积坐标法的新进展及有限元新模式与新对策 复合材料层合结构分层仿真的有限元分析新模式及其软件开发 	9
51	纳米结构金属力学行为尺度效应的微观机理研究	武晓雷、魏悦广、洪友士	中国科学院力学研究所	<ul style="list-style-type: none"> 梯度纳米结构表层材料的微观塑性行为 材料纳米力学行为的连续与准连续表征理论和方法研究 	21
52	功能材料与结构的多场效应与破坏理论	王铁军、申胜平、匡震邦、邵珠山、马连生	西安交通大学	<ul style="list-style-type: none"> 金属泡沫的随机疲劳裂纹扩展规律研究 铁电与电致伸缩材料的本构、破坏与多场分析 	17
53	昆虫飞行的空气动力学和飞行力学	孙茂、吴江浩、杜刚、兰世隆	北京航空航天大学	<ul style="list-style-type: none"> 昆虫飞行的动稳定性与控制研究 昆虫机动飞行的运动学观测及流体动力学和动力学机理研究 	11
序号	获奖成果名称 (2014年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
1	微分流形的几何拓扑	方复全	首都师范大学	<ul style="list-style-type: none"> 低维流形的几何与拓扑 	6
2	自守形式与素数分布的研究	刘建亚、展涛、吕广世	山东大学	<ul style="list-style-type: none"> 自守形式的算术与几何素数分布的研究及应用 	25
3	复杂流体的数学理论和计算方法	张平文	北京大学	<ul style="list-style-type: none"> 复杂流体和复杂流动的计算方法与数学理论 	23
4	巨电流变液结构和物理性质的研究	温维佳、沈平、谭永炎、杨世和、马红儒	香港科技大学	<ul style="list-style-type: none"> 电流变液体的结构与性质的理论研究 	6
5	超高压下简单分子凝聚体系的新奇结构相变和压力效应	邹广田、崔田、刘冰冰、马琰铭、高春晓	吉林大学	<ul style="list-style-type: none"> 新一代大型超高压产生装置 高压下凝聚态物质的新结构与新效应 	34
6	低维材料中新奇量子现象及其调控的机理研究	段文晖、顾秉林、吴健、周刚	清华大学	<ul style="list-style-type: none"> 低维纳米结构的热输运理论和计算方法研究 	12
7	态-态分子反应动力学研究	张东辉、杨学明、戴东旭、肖春雷、孙志刚	中国科学院大连化学物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 态态分子反应动力学的实验与理论研究 分子反应动力学的实验与理论研究 	29
8	低维光功能材料的控制合成与物化性能	姚建年、赵永生、付红兵、马颖、翟天佑	中国科学院化学研究所	<ul style="list-style-type: none"> 新型光电功能材料的研究 低维有机光子学 	27
9	配位聚合物构筑与结构性能调控	卜显和、李建荣、杜森、胡明亮、曾永飞	南开大学	<ul style="list-style-type: none"> 多功能配位结构的设计、量子化学模拟及合成 新型多功能配位高分子材料的构筑与性能研究 	14
10	功能核酸分子识别及生物传感方法学研究	谭蔚泓、杨荣华、蒋健晖、王柯敏、俞汝勤	湖南大学	<ul style="list-style-type: none"> 化学生物传感的分析化学基础研究 核酸适配体的筛选与分子识别基础研究 	36

序号	获奖成果名称 (2014年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
11	若干分子基材料的自组装、聚集态结构和性能	李玉良、刘辉彪、李勇军、张德清、朱道本	中国科学院化学研究所	<ul style="list-style-type: none"> 分子材料自组装、聚集态结构与性质研究 阴离子稳定的自组装智能超分子 	76
12	功能导向的多酸设计与合成	王恩波、苏忠民、王新龙、李阳光、许林	东北师范大学	<ul style="list-style-type: none"> 多酸基化合物 NLO 特性的可逆氧化还原开关效应 多酸调控染料敏化太阳能电池的光电转换性能研究 	27
13	晚新生代风化成壤作用与东亚环境变化	郭正堂、郝青振、吴海斌	中国科学院地质与地球物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 风成红土碳同位素组成与新近纪植被演化 	15
14	废水处理系统中微生物聚集体的形成过程、作用机制及调控原理	俞汉青、李晓岩、盛国平	中国科学技术大学	<ul style="list-style-type: none"> 废水生物处理反应器中微生物颗粒的形成机制和培养技术 废水生物处理反应器中微生物颗粒的形成机制和培养技术 	21
15	二十万年来轨道至年际尺度东亚季风气候变率与驱动机制	汪永进、张平中、谭明、刘殿兵、吴江滢	南京师范大学	<ul style="list-style-type: none"> 晚第四纪中国南方季风事件的高分辨率石笋记录与机制诊断 	30
16	南海与邻近热带区域的海洋联系及动力机制	王东晓、方国洪、甘剑平、刘钦燕、庄伟	中国科学院南海海洋研究所	<ul style="list-style-type: none"> 南海环流变率及其对上层海洋热含量的影响 南海环流中的涡致输运及其在环流季节转换中的作用 	33
17	青藏高原冰芯高分辨率气候环境记录研究	姚檀栋、秦大河、田立德、王宁练、康世昌	中国科学院青藏高原研究所	<ul style="list-style-type: none"> 青藏高原冰芯中甲烷气体与全球变化研究 	41
18	华北克拉通早元古代拼合与Columbia 超大陆形成	赵国春、孙敏、李三忠	香港大学	<ul style="list-style-type: none"> 俄-蒙阿尔泰古生代花岗岩时代、岩石成因及构造背景研究 	8
19	气候预测的若干新理论与新方法研究	王会军、范可、孙建奇、姜大膀、高学杰	中国科学院大气物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 东亚气候系统变化机制及预测方法 中高纬大气环流异常对西太平洋台风活动的影响及预测模型研究 	26
20	哺乳动物多能性干细胞的建立与调控机制研究	周琪、王秀杰、曾凡一、高绍荣、赵小阳	中国科学院动物研究所	<ul style="list-style-type: none"> 早期胚胎端粒延长的分子机制及其在体细胞重编程中的功能研究 	40
21	高等植物主要捕光复合物的结构与功能研究	常文瑞、柳振峰、匡廷云、严汉池、王可玢	中国科学院生物物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 高等植物捕光蛋白-色素复合物的三维结构与功能研究 	15
22	双生病毒种类鉴定、分子变异及致病机理研究	周雪平、谢旗、陶小荣、崔晓峰、张钟徽	浙江大学	<ul style="list-style-type: none"> 双生病毒与番茄互作的分子机理研究 双生病毒致病的分子机理研究 	19
23	基因组多样性与亚洲人群的演化	张亚平、孔庆鹏、吴东东、彭晨、孙昌	中国科学院昆明动物研究所	<ul style="list-style-type: none"> 动物 DNA 条形码基因和隐存多样性的研究 	21
24	中国两栖动物系统学研究	费梁、叶昌媛、江建平、胡淑琴、谢锋	中国科学院成都生物研究所	<ul style="list-style-type: none"> 贡嘎山地区两栖爬行动物多样性及其形成与演化研究 	7

序号	获奖成果名称 (2014年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
25	水稻重要生理性状的调控机理与分子育种应用基础	何祖华、王二涛、 王建军、张迎迎、 邓一文	中国科学院上海生命 科学研究院	• 水稻 Eui 基因的表达调控与 GA 流量 的分子设计	16
26	TRPC 通道促进神经突触形成机 制研究	王以政、袁小兵、 贾怡昌、周 健	中国科学院上海生命 科学研究院	• TRPC6 在局灶脑缺血导致神经元死 亡中的作用	8
27	遗传病致病基因和致病基因组重 排的新发现	张 学、王宝玺、 何春涤、沈 岩、 孙 森	北京协和医学院	• 重要出生缺陷遗传致病基因的识别 及功能研究	17
28	组织免疫微环境促进人肝癌进展 的新机制	郑利民、庄诗美、 邝栋明、吴 艳、 方坚鸿	中山大学	• IL-17 和巨噬细胞调控消化系统肿瘤 进展 / 退化的网络机制	24
29	瞬时受体电位通道在代谢性血管 病中的作用与机制	祝之明、刘道燕、 黄 聿、闫振成	中国人民解放军第三军 医大学	• 瞬时受体电位通道 TRPV1 在动脉粥 样早期病变与血管修复中的作用 • 瞬时受体电位通道 (TRPC3) 在高血 压血管振荡中的作用	17
30	分布式协同控制的混合智能优化 与稳定性	陈 杰、王 凌、 方 浩、孙 健、 肖 峰	北京理工大学	• 复杂生产系统的智能仿真优化理论 与方法研究	15
31	具有网络通讯约束的动态系统控 制理论与方法	高会军、吴立刚、 张立宪	哈尔滨工业大学	• 双网环境下工业生产过程运行优化 控制方法研究	9
32	逻辑动态系统控制的代数状态空 间方法	程代展、齐洪胜	中国科学院数学与系统 科学研究院	• 逻辑动态系统的控制与优化	15
33	基于环境约束和多空间分析的机 器人操作理论研究	乔 红、王子栋、 刘智勇、沈 波	中国科学院自动化研究所	• 机器人学及机器人技术 • 基于随机发生不完全信息的非线性 系统控制与滤波	14
34	新型人工电磁媒质对电磁波的调 控研究	崔铁军、马慧锋、 蒋卫祥、程 强	东南大学	• 新型人工电磁媒质的基础理论与关 键技术 • 新型人工电磁媒质的典型应用研究	11
35	局域态操控的红外探测机理	陆 卫、陈效双、 李志锋、王少伟、 沈学础	中国科学院上海技术物 理研究所	• 红外光电子材料中量子特征体系研究 • 长波红外探测材料与器件的机理研究	33
36	钙磷基生物材料的转化机理及新 生物性能研究	刘昌胜、袁 媛、 陈芳萍、王 靖、 魏 杰	华东理工大学	• 生物材料与生物力学对干细胞分化 过程的影响	20
37	导电聚合物微纳米结构及其多功 能化	万梅香、魏志祥、 朱 英、江 雷	中国科学院化学研究所	• 导电聚合物微纳米结构与界面浸润 性协同调控的高效氧还原反应 • 导电聚合物微纳米结构阳极与微生 物高效胞外电子传递机制	31
38	可见光响应光催化材料及在能源 环境中的应用基础研究	邹志刚、李朝升、 于 涛、周 勇、 闫世成	南京大学	• 可见光氧化物半导体的多孔薄膜光 电极制备及分解氢系统的研究	17
39	直接醇类燃料电池电催化剂材料 应用基础研究	孙公权、辛 勤、 姜鲁华、王素力、 李焕巧	中国科学院大连化学物 理研究所	• 直接甲醇 / 氧聚合物电解质膜燃料电 池的研究 • 直接甲醇燃料电池电极表面活性相 及其调变规律研究	13

序号	获奖成果名称 (2014年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
40	高性能半导体光催化材料制备与 微结构调控	余家国、余火根、 程 蓓、刘升卫、 赵修建	武汉理工大学	• 半导体材料 • 纳米光催化材料在环境应用中的光 腐蚀及阻止	25
41	吸附式制冷的吸附机理、循环构 建及热设计理论	王如竹、王丽伟、 吴静怡、代彦军、 夏再忠	上海交通大学	• 吸附制冷用新型甲醇复合吸附剂研 究: 目标导向合成、吸附特性及性 能测试 • 吸附式制冷与热功转换技术	21
42	多孔介质与微 / 纳结构中热传递 机理研究	姜培学、王补宣、 胥蕊娜、周乐平、 任泽霏	清华大学	• 细 / 微多孔结构中传热传质现象研究 • 多孔介质传热的基础研究 • 多孔介质中对流和相变传热传质的 研究	27
43	基于离散体系的跨尺度多相反应 流的介观理论和方法	郑楚光、郭照立、 柳朝晖、施保昌	华中科技大学	• 多相流体动力学多场耦合和尺度关 联的介观理论和模型	23
44	超高温条件下复合材料的热致损 伤机理和失效行为	韩杰才、杜善义、 张幸红、王保林、 孟松鹤	哈尔滨工业大学	• 复合材料力学 • 超高温陶瓷材料催化特性及机理研究	21
45	纳微系统中表面效应的物理力学 研究	赵亚溥、袁泉子、 林文惠、张 吟、 郭建刚	中国科学院力学研究所	• 微纳米多层材料的断裂力学 - 非局部 效应和表面 / 界面效应的连续介质统 一模型	22
序号	获奖成果名称 (2015年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
1	资产定价理论中的非线性期望 方法	陈增敬	山东大学	• 金融数学中的若干随机分析问题的 研究	9
2	自正则化极限理论和斯坦因方法	邵启满、荆炳义	香港科技大学	• 高维数据分析中的收缩估计与似然 推断 • 随机过程的强极限理论	8
3	真空紫外激光角分辨光电子能谱 对高温超导机理相关科学问题的 研究	周兴江、刘国东、 赵 林、陈创天、 许祖彦	中国科学院物理研究所	• 自旋分辨激光光电子能谱对拓扑绝 缘体的电子结构和自旋结构的研究 • 超导材料晶体结构和电子结构研究	23
4	高压下钠和锂单质及二元化合物的 结构与物性	马琰铭、王 晖、 王彦超、李 全、 崔 田	吉林大学	• 高压下凝聚态物质的新结构与新效应 • 新一代大型超高压产生装置	32
5	铁基超导体电子结构的光电子能 谱研究	封东来、张 焱、 谢斌平、陈 飞、 杨乐仙	复旦大学	• 非常规超导及相关材料的同步辐射 角分辨光电子能谱研究 • 铁基高温超导体中新奇量子态的微 观特性研究	26
6	活体层次定量获取化学信号的新 原理和新方法研究	毛兰群、于 萍、 张美宁、严乙铭、 林雨青	中国科学院化学研究所	• 信号转导过程的分析新方法研究 • 针对信号转导过程研究的分析新方 法与新技术	25
7	分子尺度分离无机膜材料设计合 成及其分离与催化性能研究	杨维慎、李砚硕、 王海辉、熊国兴、 林励吾	中国科学院大连化学物 理研究所	• 膜催化反应的化工基础研究 • 无机膜分离与膜催化	34

序号	获奖成果名称 (2015年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
8	新型富勒烯的合成	谢素原、谭元植、 郑兰荪、吕鑫、 黄荣彬	厦门大学	<ul style="list-style-type: none"> 新型富勒烯的制备与功能化 内嵌金属富勒烯结构及化学性质的理论化学研究 	45
9	石墨烯的电分析化学和生物分析 化学研究	李景虹、王颖、 刘洋、陈达、 唐龙华	清华大学	<ul style="list-style-type: none"> 石墨烯生物功能界面的构建及生物传感研究 基于石墨烯组装纳米结构的电化学发光免疫传感技术的研究 	14
10	生物分子识别的分析化学基础 研究	杨秀荣、逯乐慧、 徐国宝、汪尔康、 王振新	中国科学院长春应用化 学研究所	<ul style="list-style-type: none"> 微-纳流控生化分析集成系统的研究 用于生物分子相互作用研究的生物传感新原理、新方法 	56
11	大陆碰撞成矿理论的创建及应用	陈衍景	北京大学	<ul style="list-style-type: none"> 变质作用与造山带演化 熊耳山区中生代流体作用和成矿特征研究 	12
12	青藏高原生长的深部过程、岩石 圈结构与地表隆升	王成善、魏文博、 朱弟成、莫宣学、 金胜	中国地质大学(北京)	<ul style="list-style-type: none"> 雅鲁藏布江缝合带地质研究 特提斯喜马拉雅晚白垩世大洋红层与古海洋变化 	39
13	微生物在海洋碳储库及气候变 化中的作用	焦念志、张瑶、 骆庭伟、张锐、 郑强	厦门大学	<ul style="list-style-type: none"> 海洋生物地球化学过程和机制 海洋微生物生态学 	35
14	典型内分泌干扰物质的环境行为 与生态毒理效应	胡建英、万祎、 张照斌、常红	北京大学	<ul style="list-style-type: none"> 环境生物地球化学 污染生态化学 	19
15	电离层变化性的驱动过程	万卫星、刘立波、 宁百齐、赵必强、 丁锋	中国科学院地质与地球 物理研究所	<ul style="list-style-type: none"> 电离层变化性及相关物理过程 中国电离层结构与扰动地域特性的研究 	41
16	东亚人群和混合人群基因组的连 锁不平衡研究	金力、徐书华、 黄薇、何云刚	复旦大学	<ul style="list-style-type: none"> 东亚人群遗传多样性及其进化和医学意义 中国人群基因组多态性的分子标记及相关研究 	35
17	抗病毒天然免疫信号转导机制	舒红兵、钟波、 王延轶、李颖、 雷曹琦	武汉大学	<ul style="list-style-type: none"> 细胞抗病毒天然免疫 细胞抗病毒反应的分子机制 	21
18	家蚕基因组的功能研究	夏庆友、周泽扬、 鲁成、王俊、 向仲怀	西南大学	<ul style="list-style-type: none"> 家蚕特优基因资源及定向遗传改良的基础研究 家蚕性别调控分子机制和应用基础研究 	30
19	髓系白血病发病机制和新型靶向 治疗研究	陈赛娟、陈竺、 王月英、胡炯、 沈杨	上海交通大学医学院附 属瑞金医院	<ul style="list-style-type: none"> 白血病的系统生物学与靶向治疗研究 慢性粒细胞性白血病发病及其急变的分子机制 	57
20	乳腺癌转移的调控机制及靶向治 疗的应用基础研究	宋尔卫、王均、 姚和瑞、姚雪彪、 苏逢锡	中山大学	<ul style="list-style-type: none"> 靶向选择性激活巨噬细胞 HIF-1 RNAi 治疗乳腺癌的研究 靶向乳腺成癌细胞的 miRNA 治疗乳腺癌的研究 	54
21	磁共振影像学分析及其对重大精 神疾病机制的研究	龚启勇、贺永、 孙学礼、吕粟、 黄晓琦	四川大学	<ul style="list-style-type: none"> 基于实时反馈的脑功能磁共振视觉刺激与眼动分析系统 基于神经影像的人脑连接组学研究 	43

序号	获奖成果名称 (2015年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
22	图像非均匀计算理论与方法	吴 枫、李厚强、 汪 萌、刘 东、 洪日昌	中国科学技术大学	• 数据、图像和视频高效编码 • 云环境下的图像视频群体协同表达 与处理	18
23	复杂耦合动态系统控制与应用	段志生、黄 琳、 李忠奎、王金枝、 杨 莹	北京大学	• 复杂耦合系统控制与应用 • 非线性与含不确定参数系统动力学 与控制理论	30
24	用于功能集成的微型化光子器件 基础研究	李宝军、邢晓波、 张 垚、赵新宏、 余华清	中山大学	• 微纳光子器件功能集成和微细加 工技术研究	11
25	不确定性系统的辨识与控制	张纪峰、刘允刚、 赵延龙、刘淑君、 马翠芹	中国科学院数学与系统 科学研究院	• 不确定混杂非线性系统的适应控制 • 控制科学中若干关键基础问题的研究	39
26	可视媒体几何计算的理论与方法	胡事民、黄继武、 艾海舟、徐 昆、 陈 韬	清华大学	• 网络可视媒体智能处理 • 智能信息处理的理论与方法	46
27	视觉模式的局部建模及非线性特 征获取理论与方法研究	陈熙霖、山世光、 高 文、王瑞平、 柴秀娟	中国科学院计算技术研 究所	• 高逼真度视听系统的理论与方法 • 视觉模式分析与识别	28
28	受限控制系统的参数化设计理论 与应用	段广仁、林 参、 刘国平、周 彬、 吴爱国	哈尔滨工业大学	• 约束与时滞系统的控制理论及其应用 • 基于截断预估器反馈的时滞系统控 制与约束控制	19
29	复杂网络演化动力学分析与控制	汪小帆、李 翔、 苏厚胜、荣智海、 卢文联	上海交通大学	• 复杂网络集群行为分析与控制 • 控制理论与方法——网络系统的设 计、控制与优化	27
30	声子晶体等人工带隙材料的设计、 制备和若干新效应的研究	陈延峰、卢明辉、 张善涛、冯 亮、 闵乃本	南京大学	• 完备和有缺陷的光子晶体的制备和 能带计算 • 新型微结构材料的制备与物理效应	22
31	弛豫铁电体的微畴-宏畴理论体系 及其相关材料的高性能化	姚 熹、徐 卓、 魏晓勇、李振荣、 李 飞	西安交通大学	• 弛豫型铁电陶瓷的微畴和宏畴转变 的研究 • 弛豫铁电单晶压电性能及其尺寸效 应的起源和优化研究	25
32	航天用非连续增强金属基复合材料 制备科学基础研究	张 荻、范同祥、 吕维洁、张小农、 张国定	上海交通大学	• 金属材料的仿生复合制备与性能研究 • 先进结构陶瓷	31
33	低维氧化锌材料的载流子调控与 功能化研究	刘益春、申德振、 徐海阳、邵长路、 陈世建	东北师范大学	• 氧化锌基单晶薄膜材料、物性及器 件研究 • 基于氧化物纳米线三维异质结材料 太阳能电池的基本问题研究	37
34	工程材料表面的润湿及其调控	周 峰、郭志光、 王道爱、张招柱、 刘维民	中国科学院兰州化学物 理研究所	• 高端润滑材料设计制备科学与工程 应用发展战略研究 • 空间润滑材料与技术研究	32
35	实现高效率有机太阳能电池的新型 聚合物材料及器件结构	曹 镛、吴宏滨、 黄 飞、陈军武、 何志才	华南理工大学	• 新型高效聚合物太阳能光电材料及 器件的基本科学问题及其实现途径 • 高效有机高分子光伏电池的研究	42

序号	获奖成果名称 (2015年)	获奖人	主要完成单位 (第一获奖人单位)	获国家自然科学基金 资助的主要项目名称	获资助 项目数
36	内燃机低碳燃料的互补燃烧调控理论及方法	黄佐华、王金华、 胡二江、汤成龙、 张英佳	西安交通大学	<ul style="list-style-type: none"> • 能源高效节约和可再生转化利用的多相流理论基础 • 火花点火式发动机中的燃烧 	31
37	机械结构系统的整体式构型设计理论与方法研究	张卫红、朱继宏、 高彤、王栋、 许英杰	西北工业大学	<ul style="list-style-type: none"> • 结构拓扑优化的工程特征设计理论与方法研究 • 结构布局的动力学综合优化方法 	21
38	混凝土结构裂缝扩展过程双K断裂理论及控裂性能提升基础研究	徐世烺、梁坚凝、 李庆华、吕朝锋、 李庚英	浙江大学	<ul style="list-style-type: none"> • 混凝土结构裂缝的形成与发展机理及控制技术研究 • 断层非均匀破裂过程的演化动力学研究 	25
39	流域水沙条件对水质的影响过程及机理	夏星辉、杨志峰、 沈珍瑶、郭学军、 陈静生	北京师范大学	<ul style="list-style-type: none"> • 流域水环境、水生态与综合管理 • 流域水污染控制 	36
40	形状记忆和电致活性聚合物复合材料的主动变形机理与力学行为	冷劲松、刘彦菊、 吕海宝、杜善义、 刘立武	哈尔滨工业大学	<ul style="list-style-type: none"> • 大变形智能复合材料的力学行为 • 光驱动形状记忆聚合物材料及其在可变翼飞行器中的应用 	26
41	皮肤与牙热-力-电耦合行为机理	卢天健、徐峰、 胡更开、林敏	西安交通大学	<ul style="list-style-type: none"> • 皮肤组织的生物热力学和疼痛力学 • 饵激光防龋机理及防龋效果的热-力、热-化学耦合研究 	29

