

神经成像在心理发展研究中的应用*

王益文^{1,2,3**} 陈光辉² 刘岩² 姚志鹏¹ 白云¹ 林崇德^{3**}

1. 东南大学学习科学研究中心, 南京 210096; 2. 山东师范大学心理学院, 济南 250014;

3. 北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室, 北京 100875

摘要 心理发展脑机制的发现主要来自行为实验范式的研究。但是, 行为研究范式难以深入探讨发展的脑机制问题。近年来, 神经成像技术已应用于探查心理发展的脑机制, 技术性能决定了其在发展研究中的适用性。神经成像在发展研究中还存在许多亟待解决的方法学问题。与心理发展传统研究相结合, 该研究领域正在形成一些新特点和发展趋势。

关键词 心理发展 神经成像 事件相关电位 功能磁共振成像

传统的心理发展研究揭示了心理的年龄特征和发展规律, 但是缺乏对心理发展脑机制的探讨。近年来, 多种神经成像技术被应用于探知心理认知和行为发展的神经基础^[1,2]。下面评述行为研究的范式及其不足, 介绍心理发展研究中常用的神经成像技术, 总结神经成像应用于心理发展研究的研究问题并分析其已有的发展趋势。

1 心理发展的行为研究范式

行为实验 (behavioral experiment) 是传统心理发展的主要研究范式, 它通过测量评估个体外显的行为表现推测内在心理特征和发展机制, 实验中的正确率和反应时是主要的测评指标。心理发展研究中的行为研究范式主要包括: “全或无”的范式、多重 S—R 范式、婴儿范式和标记任务等。

1.1 “全或无”范式

“全或无”范式 (presence-absence paradigm) 通过是或否的定性回答来反映个体心理特征, 它一般只能提供所研究问题的是否性回答, 如儿童在某一年龄是否出现某种能力。对婴儿认知和语言发展的该类研究只能提供群组的描述性数据。即使进行大

样本测量, 也很难确定实验中所有变量的潜在关系, 因此婴儿在某一年龄具备某种能力的证据有时很难让人信服。为了弄清楚多个变量的作用, 通常需要运用其他测量方法来进一步验证所得出的结论。在对青少年和成人的研究中, 由于研究课题受到较多社会因素的影响和制约, 目前仍然经常使用“全或无”的范式进行定性研究。

1.2 多重 S—R 范式

多重 S—R 范式 (multiple stimulus-response paradigms) 是心理物理学 (psychophysics) 经常使用的范式, 它根据被试对 3 个以上序列刺激的反应进行信息收集。例如, 根据婴儿对不同条纹宽度序列刺激的反应来测量婴儿的视敏度 (visual acuity)。相比于“全或无”的范式, 将单一刺激拆分成序列刺激, 能够更有效地探知个体不同认知能力的发展层次。该范式在报告婴儿表现时使用群组性数据, 这样可以避免个体发展中因数据间断而导致的错误。此外, 该范式对公认的序列刺激进行系统性测量, 在验证发展的内在机制时, 它比“全或无”的范式更有说服力。

2006-09-18 收稿, 2006-10-30 收修改稿

* 国家社会科学基金“十一五”规划青年项目 (CBA060059) 和认知神经科学与学习国家重点实验室开放课题资助

** 通信作者, E-mail: wangeven@126.com; lingchongde@263.net

1.3 婴儿范式

婴儿不具备言语和行为报告能力,所以无法进行口头报告和自陈式的测量.婴儿范式是通过观察婴儿外在行为来推测某一心理特征的研究范式.婴儿范式主要包括三个:偏好法(preference)、习惯化/去习惯化法(habituation/dishabituation)和违反预期法(violation of expectation)^[3].偏好法最早由 Fantz 提出,主要用于研究儿童视觉能力的发展.它有视觉和听觉两种刺激呈现方式,通过比较婴儿注意两类刺激的持续时间来推测偏好是否存在.习惯化/去习惯化法是通过重复呈现单一刺激(视觉、听觉或视听混合刺激),比较婴儿的关注次数与呈现次数的关系.关注次数逐渐低于呈现次数为习惯化;当新刺激出现时,关注次数又接近呈现次数为去习惯化.违反预期法根据婴儿对一系列违反物理属性或认知原则的视觉刺激的注视时间来推测其是否具有某一知识或能力.婴儿在违反预期情形中的注视时间长于在预期一致情形中的注视时间.可见,婴儿范式的研究过程具有较高的生态效度,但其研究结论仍基于对被试的行为表现进行推测.

1.4 标记任务

标记任务(marker task)采用行为的方法探讨脑发育和心理发展的关系,该类任务与某个或多个特定脑区的发育有关.该范式通过使用特定的行为任务,来研究不同任务的完成情况随年龄发生的变化,进而收集已知脑发育模式解释行为变化的证据.由于不同脑区在不同年龄对相同任务可能是同等重要的^[4],所以对标记任务结果的解释就变得更加复杂.不过,标记任务是探知脑机制和功能发展的一条有效途径.

“全或无”的范式仅能够提供是否性回答;婴儿范式还不能得到某种行为的神经机制和脑中该行为表征的输出方式;多重 S-R 范式只在某一反应具有序列刺激变量时才比较有效.行为研究范式自身的局限性使其不利于对个体发展中的脑机制进行研究.行为实验范式存在不足,神经成像技术逐渐成为研究心理发展神经机制的主流方法和研究范式^[5].

2 心理发展脑机制的研究技术

神经成像技术是研究心理认知发展脑机制的有

效工具,其应用促使心理发展研究进入与脑科学相结合的阶段.事件相关电位和功能磁共振成像是研究心理发展脑机制的主要技术,能够更直接地探讨认知发展的神经基础.

2.1 事件相关电位

事件相关电位(event-related potentials, ERP)是以信号过滤和叠加方式从脑电图(electroencephalogram, EEG)中提取出来的与心理身体或心理活动有关的脑电成分.低密度和高密度的 ERP 所收集的数据具有相似性,但是高密度 ERP 通过在头皮上安置多导(128 导或 256 导)电极,可以推测生物电活动的脑内源(偶极子, dipole)位置和方向.多导记录和偶极子源定位反过来又为 ERP 提供一定的空间分辨率.推测中所用算法的特殊性使得某些假设对儿童比对成人更有利,例如,儿童较低的颅骨导电水平和较少的皮层褶皱可以提高源定位的准确性.研究者一般使用复杂的专业程序(如 BESA 或 Curry)进行溯源分析,但是,至今很少对发展性数据进行溯源分析.此外,ERP 还可用于诊断认知发展异常(阅读困难、注意缺乏障碍、孤独症等),为其治疗提供有效的参照数据.

随着年龄增长,ERP 的波幅和潜伏期均有所变化,而且被试年龄越小这种变化越大.因此在发展的 ERP 研究中,年龄组的间隔要根据脑发育的不同阶段而定,婴儿期的被试选取应间隔 1—2 个月,童年期应间隔 1—2 年,青少年期应间隔 2—3 年.如果平均 ERP 成分的年龄跨度过大,那么个体发展变化的轨迹就会变得模糊,未知的变异也可能增多.在收集 ERP 发展研究的数据时,需要根据被试的个体差异进行适当调整.针对个体生理发育的差异,研究者需要调整 ERP 的数据记录系统的系数.例如放大器增益参数(amplifier)、采样率(sampling rates)、计分参数(scoring parameters)、波幅范围(headroom)等(见表 1).针对个体的心理发展差异,研究者需要调整实验过程.婴幼儿被试注意的保持时间较短,容易怯场,所以需要减少反应键个数,最好设置暂停键和重复键,甚至设计被动无反应实验.应该设置固定座椅,进行言语鼓励等,并在准备室中放置玩具以及实验过程中由养护者陪同等;儿童的自我意识逐渐增强,所以需要事先征

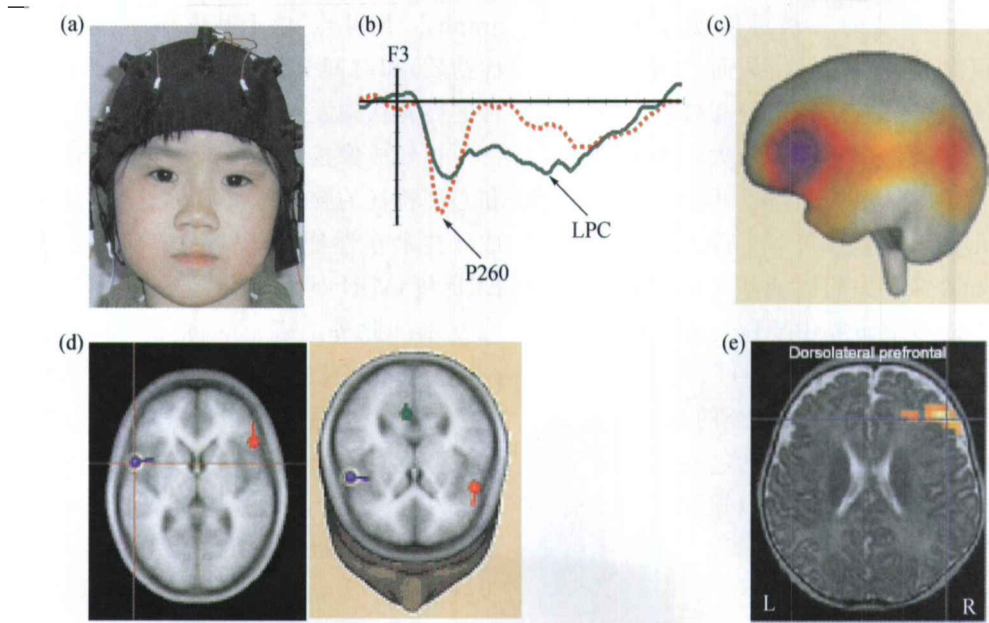


图1 ERP和fMRI实验效果示例

(a) NeuroScan 儿童 ERP 电极帽; (b) ERP 波形图^[6]; (c) 皮层电流密度^[7]; (d) ERP 偶极子源^[7]; (e) fMRI^[8]

得被试的同意并告知其实验的过程和原因，还要及时回答他们在实验过程中提出的问题并允许其随时退出；青少年个体由于处于青春期中，所以需要使用充分的指导语保证他们在参与实验时进行正确的反应^[9]。

表1 ERP 发展研究中建议采用的相关参数

年龄	放大倍数	采样率 /Hz	波幅范围 / μV	计分参数 / μV
0-2 个月或 6 岁以上	50 000	200	± 100	± 100
3 个月至 6 岁	20 000	200	± 250	$\pm 100 - \pm 225$

2.2 功能磁共振成像

磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 技术用来获得脑结构图像。MRI 研究发现大脑皮层的发育经历了一个不断成熟的过程。一方面，大脑灰质容量随年龄呈倒“U”形的发展变化，跨脑区研究进一步表明儿童至青少年大脑皮层灰质容量的降低反映了大脑从不成熟到成熟的塑造过程 (sculpting process)^[10]。这一成熟过程既有细胞树突连接的增强和轴突的髓鞘化，也有神经元退化事件 (neuronal regressive events)，如树突的修剪 (pruning) 和神经元间连接的递减。另一方面，大脑白质的容量基本按照线性模式增长，直到成年早

期，个体的大脑白质都在不断增长。可见，脑发育中退化和演进的活动会同时进行，认知发展和脑功能也会产生相互作用效应。

功能磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 是一种测量血氧依赖水平 (blood oxygen level dependent, BOLD) 反应进行成像的技术，它假设大脑活动的区域变化与局部血流以及氧化的血液动力学变化相关，儿童 fMRI 研究的效果图例见图 1(c)。fMRI 具有毫米级的空间分辨率和秒级的时间分辨率，是发展研究中最重要功能定位成像技术之一。弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 是在 fMRI 基础上发展起来的一种新技术，它基于水分子的弥散性来探测白质微观结构的变化，并根据白质中水分子的弥散性受髓鞘和纤维定位规则性的影响程度来推断脑内联结的指标^[11]。DTI 通过探测脑内的联结性 (connectivity) 来评估心理不同年龄个体的脑功能发展状况。

发展脑机制的研究主要从上述脑结构发育和脑功能发展的两个方面展开。第一对大脑发育的评价；第二是感觉运动和认知活动脑区定位的研究。已有的儿童和成人研究已经显现了 fMRI 技术在空间定位上的优势^[12]。在儿童至青少年时期被试的实验中，fMRI 研究应尽量避免由于被试头动而产生的

运动伪迹。因为一次轻微的头动可能使原来很低(高)的信号变成很高(低)的信号,从而严重影响统计结果。此外,磁共振扫描过程中的高磁场和高射频对孩子和孕妇有危险,而且噪声较大,要对被试(尤其是婴儿)的双耳采取保护措施。fMRI可以用于脑皮质定位和儿童脑发育评价等方面。在该类研究中,由于一些与情感有关的大脑基底区域容易受到伪迹的干扰,所以整个研究中要避免被试出现大的情感波动(特别是青春期个体)。DTI与EEG相结合,能够确定个体发展中认知神经的加工速度,并可以把神经元联结、髓鞘化与行为、神经生理学测量的相关变化联系起来,从而可以追踪测定发展和已成熟的脑功能和脑联结。

3 研究技术的性能分析

发展脑机制领域汇集了心理学、神经科学、认知科学、遗传学等学科的知识,融合了来自神经解剖学、神经成像、脑损伤、行为研究和习性学等领域的证据。由于学科自身的交叉性特点,它的研究方法包括行为实验、神经成像术、分子遗传学、计算机模拟、单细胞记录和神经化学化验等。特别是那些基于脑代谢、血流量或生物电活动的神经成像技术,它们可以用来描绘激活脑区的功能图像,从而促进认知功能的脑机制研究。有些神经成像术,如正电子放射断层扫描(positron emission to-

graphy, PET),由于其创伤性(要求静脉注射放射性物质)和时间分辨率较低(十几秒)等缺陷,在正常的婴儿认知发展研究中受到限制。

神经成像技术对于准确认识个体的脑活动机制和心理特征的脑结构具有关键性的作用,各种神经成像技术在性能上各有优劣,其性能分析见表2。ERP和fMRI是发展研究中经常使用的两种神经成像技术。此外,近红外光谱(near infra-red spectroscopy, NIRS)是一种有发展前景的光学成像术。它可以用来测量微光束通过颅骨和脑组织时发生分散或弯曲的微小变化^[13],并能检测脑内的血氧变化。NIRS在发展研究中可操作性很高,在研究年幼儿童时它是极好的fMRI替代技术,不足之处在于测量深层脑结构的能力较低。EEG和ERP的时间分辨率是现有神经成像技术中最好的,但是其空间分辨率最差;fMRI具有较高的时空分辨率,但是其存在研究费用高、可操作性差等问题;脑磁图(magnetoencephalography, MEG)测量了颅内生物电流产生的微弱磁场变化。由于磁场不受头皮和颅骨等导电率的影响,MEG在具有毫秒级时间分辨率的同时其失真比EEG小得多。但MEG设备操作维护复杂、要求严格的磁屏蔽环境,实验中被试头部要保持不动,这限制了其在儿童研究中的应用。随着MEG技术的不断改进,MEG必将成为是心理发展脑机制研究中重要的功能成像技术。

表2 各种脑图像技术的性能对照表^{[14]a)}

性能	低 → 高				高
发展研究适用性	PET SPECT	phMRI	fMRI	MRI, DTI, MRS	EEG, ERP, NIRS
时间分辨率	MRI, DTI, MRS	phMRI	PET, SPECT	fMRI, NIRS	EEG, ERP, MEG
空间分辨率	ERP, EEG	MEG	SPECT	PET	NIRS, fMRI, DTI, MRI, phMRI
损伤性		ERP, EEG, NIRS, MEG	fMRI, MRI, DTI, MRS	phMRI	PET, SPECT
技术费用		EEG, ERP, NIRS	fMRI, DTI, MRI, MRS	phMRI	PET, SPECT MEG
测量皮质与深层结构	NIRS		MEG, ERP, EEG	SPECT	PET, MRS, fMRI phMRI, DTI

a) MRS(磁共振光谱), SPECT(单光子放射断层扫描), ph=pharmacological(药理学)

心理发展研究应用神经成像技术来揭示脑功能的发展过程中脑内变化与认知发展的关系。随着心理发展和神经成像技术的共同进步,认知发展脑机

制的研究进入了新的阶段。但是由于二者各自的特异性,这一领域的发展仍然处于探索阶段中,许多问题和局限需要在日后的研究中不断克服和改进。

在研究实验范式上,每一种神经成像技术各有专长,但都不能同时保证时空上的高分辨率;神经成像实验中儿童被试的注意力很难持久,测量结果经常会混入伪迹(如动作电位和眼电位),从而导致测量难度加大;由于测量都是在实验室进行的,所以很难保证研究结论的生态效度;发展研究对更多的被试所进行的多次测量增加了研究费用。在研究内容上,神经成像旨在确定个体发展中脑活动的具体变化和发展轨迹。但是,至今还没有一个理论能够很好的解释和预测大脑的组织形式和信息表征的变化轨迹。理论没有对研究的方法技术发挥高层次的指导作用。

4 问题与总结

在儿童发展脑机制研究的探索过程中,针对所要研究的问题和已有研究技术与范式的特点,总结了该领域研究中出现的一些问题。

第一,神经成像技术的结合使用。单一神经成像技术在发展研究中的应用存在很大局限,其自身的性能特点要求与互补性的神经成像技术结合使用,如结合使用高时间分辨率的ERP与高空间分辨率的fMRI。神经成像技术具体的结合形式有多种,如用EEG诱发fMRI,EEG诱发隔行扫描的fMRI和在同步EEG-fMRI中记录两种信号^[15]。DTI凭借水分子的弥散性可以探测到脑皮层白质的微观结构,并进而推断脑内的联结指标。它与fMRI和EEG结合使用可以更好的测定个体发展中的脑功能和脑联结。随着科学技术的发展,神经成像技术在不断更新换代。例如,在发展研究中,NIRS成为fMRI的良好替代技术^[13]。

第二,探讨脑功能的具体变化与影响因素的关系。脑功能的变化具体表现为个体发展过程中表征类型的变化。心理表征过程既受到脑活动类型的影响,也与个体所处的外界环境有关。心理表征脑机制的特异化(specialization)和定位化(localization)增强了认知发展子系统间的功能整合,脑功能就是在这一过程中逐渐得到成熟与完善。脑功能的发展变化受到来自生物方面、环境方面和自我方面的不同影响。这些因素究竟如何共同影响脑功能的发展尚待进一步研究^[16]。此外,还有许多问题亟待解决,如婴儿偏好新奇刺激的内在机制是什么?婴儿对环

境表征的具体化和多样化程度如何?社会认知的大脑支持系统如何运行等^[17]。

第三,以整体研究为导向。目前,研究者开始尝试从整个大脑或个体的整个发展过程出发进行某一问题的研究。神经成像的跨脑区研究逐渐成熟,纵向研究不断增多。同时,发展性问题本身的复杂性,要求研究中必须考虑生态效度和影响个体发展的社会因素,所以需要将神经成像实验的数据与传统心理学研究的数据相互结合,从而深化潜在的脑功能发展机制模型。此外,脑损伤研究也将为脑功能发展机制研究提供有用的证据。

第四,通过系统的神经成像研究,结合其他脑机制研究技术^[18],构建科学的心理发展理论。先天遗传与后天教养如何影响脑结构的发展,后天教养因素在多大程度上参与脑结构的形成,都有待于进一步的神经成像研究^[19];先天遗传与后天教养的关系问题将在研究中得到新的阐释。个体发展中,脑结构变化如何影响脑功能,不断成熟的脑功能在多大程度上依赖于脑结构的发展,这都将促使发展神经科学构建本领域的理论基础。

参 考 文 献

- 1 de Haan M, Johnson MH. *The Cognitive Neuroscience of Development*. New York: Psychology Press, 2003, 19—42
- 2 王益文,林崇德. 信息保持、短时存贮与执行控制的脑模型. *心理科学进展*, 2004, 12(5): 661—671
- 3 Aslin RN, Fiser J. Methodological challenges for understanding cognitive development in infants. *Trends in Cognitive Sciences*, 2005, 9(3): 92—98
- 4 Goldman PS. Functional development of the prefrontal cortex in early life and the problem of neuronal plasticity. *Experimental Neurology*, 1971, 32(3): 366—387
- 5 王益文,林崇德,陆祖宏. 发展认知神经科学的研究进展. *自然科学进展*, 2006, 16(12): 1530—1535
- 6 王益文,林崇德,魏景汉,等. 工作记忆中汉字与空间的分离及动态优势半球的ERP效应. *心理学报*, 2004, 36(3): 253—259
- 7 王益文,林崇德. 额叶参与执行控制的ERP负荷效应. *心理学报*, 2005, 37(6): 723—728
- 8 Dehaene-Lambertz G, Dehaene S, Hertz-Pannier L. Functional neuroimaging of speech perception in infants. *Science*, 2002, 298(5600): 2013—2015
- 9 Handy TC. *Event-Related Potentials: A Methods Handbook*. Cambridge: The MIT Press, 2005, 272—281
- 10 Casey BJ, Tottenham N, Liston C, et al. Imaging the developing

- brain; What have we learned about cognitive development? Trends in Cognitive Sciences, 2005, 9 (3): 104—110
- 11 Munakata Y, Casey BJ, Diamond A. Developmental cognitive neuroscience: Progress and potential. Trends in Cognitive Sciences, 2004, 8(3): 122—128
- 12 Thomas KM, Hunt RH, Vizueta N, et al. Evidence of developmental differences in implicit sequence learning: An fMRI study of children and adults. Journal of Cognitive Neuroscience, 2004, 16(8): 1339—1351
- 13 Johnson MH. Developmental Cognitive Neuroscience: An Introduction, 2nd Edn, Cambridge: Blackwell, 2005, 1—18
- 14 Casey BJ, de Haan M. Introduction: New methods in developmental science. Developmental Science, 2002, 5(3): 265—267
- 15 de Haan M, Thomas KM. Applications of ERP and fMRI techniques to developmental science. Developmental Science, 2002, 5(3): 335—343
- 16 Johnson MH, Munakata Y. Processes of change in brain and cognitive development. Trends in Cognitive Sciences, 2005, 9(3): 152—157
- 17 王益文, 张蔚, 周晓林, 等. 心理理论脑机制研究的初步分析. 心理学报, 2005, 37: 955—959
- 18 王益文, 张文新. 联结主义神经网络及其在心理学中的应用. 心理学动态, 2001, 9(4): 368—375
- 19 Posner MI, Rothbart MK. Influencing brain networks: Implications for education. Trends in Cognitive Sciences, 2005, 9 (3): 99—103

我国科学家出任国际权威刊物《地球化学与宇宙化学学报》副主编

经《地球化学与宇宙化学学报》(Geochimica et Cosmochimica Acta, GCA)主编帕多瑟克(Frank Podosek)博士提名、美国地球化学学会审查批准,中国科学院地质与地球物理研究所段振豪研究员被聘请担任该刊副主编(Associate Editor)。GCA是由地球化学学会(The Geochemical Society)和陨石学学会(The Meteoritical Society)两大国际性学会主办、爱思唯尔出版公司(Elsevier Science Ltd)出版的半月刊,属于国际地球化学领域最权威的期刊,在地球科学领域非评述性国际期刊中其SCI影响因子(3.897)名列第一,其副主编均为国际地球化学和宇宙化学领域的顶尖科学家。段振豪是担任该刊副主编的首位中国科学家。

段振豪博士于2002年从美国加州大学圣迭戈分校回国后被中国科学院地质与地球物理研究所聘为“引进国外杰出人才”研究员,在国家杰出青年科学基金和中国科学院“百人计划”的支持下,迅速建立了一个计算地球化学实验室。四年来他在国际权威期刊上发表了20多篇论文,仅在GCA上就发表了10多篇第一作者论文。他的第一作者论文被SCI文章引用了近500次,被引次数以每年约70—80次的速度上升,这在地学领域是非常突出的。2005年中国科学院资源环境领域23个研究所评出三个优秀“百人计划”,段振豪博士是其中之一。在开拓国内计算地球化学领域研究的同时,段振豪博士还建立了一支优秀的研究队伍。

段振豪博士主要从事地质流体物理化学和分子动力学计算机模拟研究。在以下几个方面取得了突出成果:

1) 建立了多个具有预测性的状态方程,用于计算由水-气-盐组成的地质流体的相平衡、化学位、焓、压力-温度-体积(PVT)性质等方面的物理化学性质。该项成果为研究水岩反应、包裹体形成条件、油气形成和运移、油气和地热开发、多组分多相时空模拟、热液矿床成因、CO₂储藏和甲烷水合物形成条件提供了非常有用的理论工具,被多个国际石油和地热公司所使用。

2) 成功地利用分子动力学的原理模拟了地质流体的搬运、结构和热力学性质,用Monte-Carlo方法模拟了天然流体的相平衡和金属离子水合物的水溶特性,该项成果为计算机模拟地球化学研究开辟了新的途径。

3) 结合物理化学模型和分子动力学原理,预测超临界流体的多种物理化学性质,把实验研究的温压范围(小于1000℃、1万大气压)扩展到2000℃和10万大气压,为高温高压地球化学定量研究创立了一个重要的理论工具。

4) 利用物理化学模型研究了许多地球化学问题,如柴达木盆地钾盐成因、墨西哥湾天然气赋存状态、拉斯维加斯地热流体物化状态等。

(供稿:郭进义)