

超越板块构造^{*}

——大陆地质研究新机遇评述

郭安林 张国伟 程顺有

西北大学地质系, 西安 710069

摘要 较为详尽地评介了美国构造地质学界新近召开的题为“构造地质学和大地构造学的新航程”构造研讨会上所提出的当代构造地质学所面临的4个重大课题(超越板块构造: 流变学与大陆造山作用; 丢失的联结: 从地震到造山作用; 大地构造、气候和地表系统的动态相互作用; 地球和生命的协同演化)中第一个课题, 即“超越板块构造: 流变学与大陆造山作用”的研究趋向, 并列出了未来10年具有科学意义的研究机会与命题。

关键词 构造地质学 板块构造 大陆地质 流变学

随着近年来高科技的飞速发展和在地球科学上的应用, 例如以全球定位系统(GPS)和合成孔径干涉雷达(InSAR)为手段的大地测量技术, 地震层析技术, 精确的热年代学测年技术和宇宙成因同位素测年技术等, 导致了大批的高精度定量数据的涌现和相关理念的长足进步^[1]。在新技术及其获得的新成果的推动下, 作为地质科学带头学科的构造地质学正面临着新的重要发展机遇。这些机遇包括大陆地质构造理论的创新(涉及造山带形成的深部机制, 力学过程, 地壳和岩石圈地幔结构等), 大地构造与人类居住环境关系(比如, 构造与气候以及地球表面过程相互作用关系)的研究, 大地构造演化对生物演进的制约研究, 地震发生与长期地壳构造变形的关系研究等。因此, 如果说发端于20世纪60年代的板块构造学说是人类认识地球的一场伟大的科学进步的话, 那么, 在板块构造学说基础之上的、新的围绕着大陆地质而展开的认识行星地球与地球系统的地学革命正在孕育之中。

众所周知, 板块构造作为固体地球的一个统一理论是在对大洋洋底的观察基础上发展起来的。创

立于60年代并被接受于70年代的板块构造理论的基本点是^[2]: 在推断的地幔对流的驱动下, 新的大洋板块产生于洋中脊和先前老的大洋板块在另一侧汇聚收敛带的俯冲消减以及大洋板块运动所代表的海底扩张; 变形作用、地震和火山活动等内动力作用和过程主要发生在两个位于粘性软流圈之上的刚性大洋板块的边界上。在过去的近40年时间里, 板块构造的理论已经渗透到地球科学研究的所有领域。然而, 随着大陆地质研究的深入, 板块构造理论在解释大陆地质方面已面临着巨大挑战。比如, 两个大陆间的大洋板块俯冲消减之后, 两相碰撞的大陆块体的地壳部分和其深部会采取什么方式继续造山活动, 深部过程和拆沉与底侵作用在大陆造山过程中的效应, 大陆中、下地壳的相对强度, 大陆变形所采取的力学方式及物理化学机制等问题, 经典的板块构造理论均无能为力给予回答。

在上述大背景下, 美国的一批构造地质学家和大地构造学家审时度势地根据地球科学发展的潮流, 于2002年9月在美国科罗拉多州丹佛市召开了题为“构造地质学和大地构造学的新航程(New de-

2003-11-17 收稿, 2004-02-09 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目资助(批准号: 40234041)

2194-2018@mail.gml.ac.cn

© 2004 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

partures in structural geology and tectonics)”的构造研讨会^[3]。在此次研讨会中,美国构造地质学家和大地构造学家在相继提出大陆动力学和21世纪地质科学基础研究的机遇等基础上,首次明确指出板块构造理论模式不适合于大陆地质,并概括出超越板块构造等当代构造地质学所面临的4个重大课题:

- (1) 板块构造:流变学与大陆造山作用;
- (2) 丢失的联结:从地震到造山作用;
- (3) 大地构造、气候和地表系统的动态相互作用;
- (4) 地球和生命的协同演化

这里我们将聚焦于第一个课题,并结合笔者的认识和体会试图将该文稿中有关这一方面的主要内容介绍给国内同行,以期尽快引起地质界的关注,思考和讨论。

1 大陆板块与大洋板块的物性

大陆与大洋作为两个介质,其材料力学性质不同。大洋岩石圈板块呈刚性特征,而大陆岩石圈具有非刚性特征,后者由大陆造山带内强烈的广布式变形构造所体现^[4]。因此,相对于大洋岩石圈板块,大陆岩石圈板块在强度上似乎软弱一些。我们知道,大洋板块的力学性质归因于地壳和地幔的物质组成、结构及其摩擦和流动规律,以及对岩石圈负荷和强度的依赖。大洋岩石圈结构分作4层,第1层是5km的深水层,第2层是沉积层,第3层由约6km厚的镁铁质和超镁铁质的喷发岩和侵入岩石组成,第4层是橄榄岩^[5]。大洋板块的厚度和它的刚性正是由于大洋地壳的辉长岩组成和橄榄石占主体的大洋岩石圈地幔所致。

相对大洋板块而言,大陆岩石圈的组成和物性变化很大,不像大洋板块具有上述物质组成的相对均一性,大陆岩石圈的组成缺乏一个共同的成因方式。大陆岩石圈的组成上部是由非均一成分和具有复杂构造和热演化史的不同块体拼合而成,因而它们具有不同的强度。大陆下地壳的性质因地而异,不同的性质造成了复杂多样的效应与结果,诸如活动断裂带的宽度、震后响应和震间应变、造山带高

度、沉积盆地以及被动大陆边缘的下沉速度的差异等^[1]。

2 大陆下地壳与地幔的相对强度

目前,地壳和地幔的强度对岩石圈性质所作的贡献的相对大小仍不清楚。软弱的和富含流体的下地壳的想法在过去15年间主导了大陆构造研究。例如,一种大陆岩石圈的结构研究认为,岩石圈是由20~30km和40~60km两个韧性层及其间的两个脆性层和一个上地幔脆性层组成;另一种认为,大陆岩石圈是由下地壳韧性层和上、下两个脆性层构成的“三明治”结构^[5,6]。这两种结构模式的共同点都认为下地壳属于弱的塑性层,该层削弱了引发地震的上地壳脆性变形和地幔无震运动之间的耦合作用。然而,现在新的研究认为大陆岩石圈是由软弱的中地壳和强的下地壳组成,并且下地壳的强度可能超过其下伏的地幔^[3,6]。这些论点是基于由地震分布和地形负载的弹性厚度作出的推断。因为缺乏其他佐证,这样的推断是间接的并具有假定性。

3 大陆变形的流变学特点

由于大陆与大洋板块力学性质的差异,导致了它们构造变形的不同。大洋板块表现了在俯冲带的相对单一的消减作用,采取的主要是刚性的变形方式。而大陆的非刚性特点,造成了宽广的大陆造山带内广布式变形和内部构造,主要表现为流变学行为与方式。除了考虑介质材料的力学性质之外,流变学研究将时间因素引入变形力学。从广义上讲,流变学包含了所有随时间变化的变形力学。而流变学行为即是在时间因素起作用的条件下的变形方式。在应力保持不变的条件下,变形强度随时间增强^[7]。这一变形的力学方式是大陆与大洋板块变形的最大不同。一般而言,最老的大洋岩石圈是200Ma,这一时间因素应当考虑。大陆的流变学的行为反映在它所有的相关构造中,包括了聚合和离散构造边界以及转换断层。

近期研究已经揭示,造山带的深部结构整体上往往呈双向俯冲构造扇形。一些模型目前考虑地幔

回流与大陆岩石圈碰撞造山带变形的组合关系。一种情况(图 1(a)), 大陆地幔岩石圈相对强硬, 因此它以板块形式消减, 而软弱的、具浮力的地壳被遗留在后形成加厚的造山带。另一极端情况(图 1(b)), 地幔岩石圈的行为更像流体, 地幔回流可能卷入了一个稳定的对称或非对称的下降流, 或者幕次式的水滴状回流(图 1(b))。地震层析提供了整个行为范畴的初步证据。力学模拟表明回流的方式依赖于聚合的速度和地壳和地幔的流变学性质。地幔回流引发的地壳加厚, 其结果形成大的、类似于在阿尔卑斯、喜马拉雅和落基山观察到的造山带楔形体。

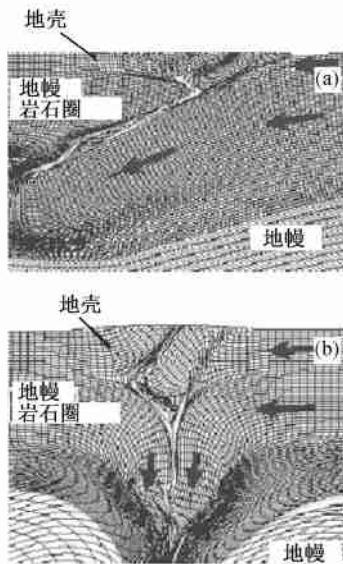


图 1 陆-陆碰撞的不同地幔回流方式的数字模型^[8,9]
(a) 大陆岩石圈地幔以板块方式俯冲消减。(b) 具有幕次式的水滴状脉动的对称回流。这一模型采用与温度相关的粘-弹性流变学。变形轨迹网络显示聚集主密度, 箭头表示相对速度矢量

类似的地幔回流现象已被国内有关造山带研究测深结果所反映。例如西昆仑山与塔里木盆地间地震反射剖面所显示的高锐称之为“V”型的盆山耦合型式^[10,11], 反映了在西昆仑山之下青藏高原西北缘岩石圈与塔里木岩石圈相向俯冲碰撞的图像。而北祁连与河西走廊间的这种回流现象发生在中地壳水平¹⁾, 有可能印证了上述软弱中地壳存在的推断。这些极有可能代表了大陆内部块体碰撞过程的一种

典型方式, 值得国内构造地质学家注意。

4 大陆变形中的流体作用

大陆变形中的流体作用值得重视, 因为大陆岩石圈与流体和熔体的相互作用可以大大改变其流变学结构, 而我们对流体存在的效应和作用过程还知之甚少。最近, 人们已经认识到橄榄石中微量含水组分对改变大洋岩石圈流变学行为的重要性。在裂谷环境中熔体里水的析出导致了大洋岩石圈强度的显著增强。但是, 我们尚不清楚是否水对大陆岩石圈强度起到了类似的作用。根据美国 2001 年“地球科学基础研究的机遇”的研究²⁾, 即使流体含量很小, 但在任何深度的地壳作用过程中都有较大的影响。极少量的水都会对岩石的延展性和摩擦力产生作用。有关研究认为发育完整的走滑断裂(如圣安德列斯断裂)的内部各带要比典型的地壳岩石软得多, 而断裂带内流体压力的增大是这种软弱性的可能原因。

另外, 脆-韧性过渡变形似乎与断裂作用中的流体作用密切相关, 这种关系体现在影响断层和寄主岩石的正负膨胀变形机制上。颗粒粒度减小和岩石与断层泥的混合改变了断层寄主系统的渗透性。流体迁移影响颗粒接触部位的溶解、运移和胶结物的沉淀。

5 大陆地质流变学研究途径

综上所述, 要深刻认识大陆地质和创立新的构造模式, 详细和综合的大陆地质和地幔岩石的流变学研究已经成为我们理解大陆地质的必由之路。那么, 如何着手进行具体的流变学研究就成为一个关键。整个文稿强调了野外、实验室和数字模拟三位一体综合研究的重要性。

流变学行为的实验室研究是可行的, 其间的应力, 应变, 应变速率和其他的热力学参数可以控制。然而, 将实验结果运用到解释大陆造山作用之前, 两个主要问题必须解决。第一, 参照自然应变速率设立一个可靠的外延, 自然应变速率较实验室速率要低 5~7 倍。第二, 必须用可靠的方法将由实验样品得出的数据, 用于估计天然的、有代表性

1) 高锐, 地壳楔入, 地幔俯冲: 陆内岩石圈碰撞构造样式与深部过程。21 世纪初构造地质学发展战略学术讨论会论文摘要, 西北大学, 西安, 2003

的变形岩石整体流变学行为。变形中的岩石并非处于平衡系统。同时,观察到的流动关系,显微构造和组构依赖于变形和复原过程中两者的相互制衡速度。假如我们打算将基于力学机理的流动定律公式化和辨认实验样品和自然变形岩石在同一过程中产生的显微构造,约束力学机制的物理化学研究是必需的。下面列出了野外和实验室流变学综合研究的某些方面^[3]:

(1) 将碰撞造山带演化的野外构造研究与地壳和地幔的地球物理研究结合起来(如国内某些利用地震反射剖面所做的研究工作)。数字模拟(图1)作为实验室研究的外延手段是必不可少的,因为它允许我们去检验地壳和地幔流变作用可能产生的效果。造山带楔形体中折返岩石的野外研究对判别地球动力学模型预测的有效性至关重要。但最主要的是该领域实验研究所提供的证据。

(2) 利用在流体存在或不存在,利于膨胀脆性破裂或摩擦滑动的交叉条件和热活化条件下的塑性及扩散流动以及脆-韧性过渡变形的实验研究来评估各种地壳岩性的流变学性质。实验研究中流变学行为的估计可以参照有选择的野外实例,并尽量利用在应变、应变速率,热动力条件和构造-热史方面的资料。

(3) 在流体-岩石相互作用、矿物生长和溶解以及熔融都很重要的条件下,小尺度的构造和组构、野外的和理论的研究可以用来检验瞬间变形和反应。大尺度的活动构造的模拟可以用来检验对于热和岩石构造的流变学敏感性,以及检验由重力负荷、抬升、剥蚀和岩浆事件所产生的影响。除力学约束和边界条件外,这些模型还需要温-压史的岩石学、年代学和地层学的约束以及热流传导、平移和岩石折返埋藏速率方面的信息。

(4) 断裂切割不同层次地壳的事实不应忽视。这里我们强调野外构造调查与水文学、岩石学和地球化学相结合研究断裂系统的重要性。例如,流动途径的改变所留下的地球化学印记(如稳定同位素,流体包体)有助于我们理解流体如何演化和它们变化的成分如何影响断裂系统的流变学行为。另外,流体-断裂相互作用能够引起断裂带内和旁侧有意义的

化学变化。这些变化随后会影响断裂带。

(5) 大洋板块地震活动的最大深度位于热力学定义的从脆性膨胀过程到韧性-粘性过程的过渡带。但是我们目前缺乏大陆岩石圈内这样的相关关系。因而,关键性的矿物相的力学性质研究和变形机制的评估将提供一个大陆强度,断层和地震深度对热和成分结构依赖的清晰图画。

下列问题应是大陆地质研究未来需要关注的:

(1) 大陆流变学结构怎样导致非板块式的力学行为?

(2) 下地壳是否代表了岩石圈剖面中最强的组成部分?大陆下地壳与地幔的相对强度如何?

(3) 力学性质怎样随应变变量改变?这些改变了的性质如何影响变形局部化?

(4) 在浅、中、下地壳和地幔中变形如何分布和局部化?

(5) 什么样的组构关系制约断裂和其下的软弱剪切带的力学性质?

(6) 岩石膨胀变形,流体运移和升高的流体压力间的反馈信息是什么?

(7) 岩石学和流体化学怎样影响大陆流变学和这一影响如何与构造环境相关?

(8) 从原子到颗粒粒级的力学机制和物理化学如何约束宏观岩石的流变机理?它们对深度、压力和化学活动的依赖性是什么?

(9) 怎样用在快的实验应变速率条件下,测得的小的,均一样品的流变学结果去外推地质应变速率条件下由复合的岩石组成的大陆变形?

(10) 部分熔融在深部地壳岩石的流动中是否起主要作用?

(11) 什么是动力变质作用中变形与反应间的反馈信息?

(12) 通过变形与变质现象如何确定流变学的各向异性和组构?

中国大陆地质具有全球共性中突出的地域特征,赋存有当代地学发展前沿独特而丰富的科学信息¹⁾。从全球背景来看,越是体现中国区域特色,就越能取得有国际影响的高水平的研究成果²⁾。我

1) 国家自然科学基金委员会地球科学部,国家自然科学基金委员会地球科学部学科评审组第十五次会议会议材料,2000

们要立足于我国大陆地质实际,不失时机地抓住前沿课题,在当代地学尤其是有关整体地球系统新的构造观的创新中,在构造地质,包括大地构造,区域构造和狭义的构造地质领域做出原创性的成果。

参 考 文 献

- 1 国家自然科学基金委员会. 2003 年度国家自然科学基金项目指南. 中国科学基金(增刊), 2002, 17
- 2 Christopherson R W. Elemental Geosystems. 3rd edition. New Jersey: Prentice Hall. 2001. 1~586
- 3 New Departures in Structural Geology and Tectonics. <http://www.pangea.stanford.edu/~dpollard/NSF/>
- 4 张国伟, 等. 造山带与造山作用及其研究的新起点. 西北地质, 2001, 34(1): 1
- 5 陈毓川, 等. 世纪之交的地球科学-重大地学领域进展. 北京: 地质出版社, 2000. 1~210
- 6 Jackson J. Strength of the continental lithosphere: Time to abandon the jelly sandwich? GSA Today, 2002, 12: 4
- 7 马 瑾. 构造物理学概论. 北京: 地震出版社, 1987. 1~386
- 8 Pysklywec R N. Evolution of subducting mantle lithosphere at a continental plate boundary. Geophys Res Lett, 2001, 28: 4399
- 9 Pysklywec R N, et al. Lithospheric deformation during the early stages of continental collision: Numerical experiments and comparison with South Island, New Zealand. J Geophys Res, 2002, 107 (B7), ETG 3: 1
- 10 Gao R, et al. Deep seismic reflection profile across the suture zone between the tarim basin and the West Kunlun Mountains. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(17): 2281
- 11 Gao R, et al. Deep process of the collision and deformation on the northern margin of the Tibetan Plateau: Revelation from investigation of the deep seismic profiles. Science in China Series D, 2001, 44 (supp.): 71

国家自然科学基金资助项目“光合膜蛋白质晶体结构研究”取得重要成果

2004 年 3 月 18 日, Nature 杂志以 Article 的形式发表了由中国科学院生物物理研究所、植物研究所合作完成的“菠菜主要捕光复合物(LHC-II)2.72Å 分辨率的晶体结构”研究成果, 该晶体的结构彩图被选作该期杂志的封面。

光合作用捕光天线光能吸收传递分子机制一直是光合膜蛋白研究的热点, LHC-II 是植物类囊体膜上含量丰富的捕光复合物, 有蛋白质、叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、脂质分子等组成. 它们被镶嵌在生物膜中, 具有很强的疏水性, 分离纯化和结晶非常困难. 这样的膜蛋白复合物的晶体结构研究, 是国际上的高难度课题. 中国科学院生物物理研究所常文瑞研究员主持的研究小组经过近 6 年的艰苦努力, 终于在最近完成了这一重要捕光复合物三维结构的测定工作. 中国科学院植物研究所匡廷云院士主持的研究小组在 LHC-II 的分离纯化方面做了大量基础性工作, 为空间结构的解析奠定了坚实的基础. 两家实验室在 LHC-II 研究中富有成效的合作, 使我国在光合膜蛋白晶体结构研究方面取得了成果.

常文瑞小组在 LHC-II 晶体堆积研究中发现了膜蛋白的第三种堆积方式, 该研究成果的主要创新点是:

(1) 与其他膜蛋白不同, 常文瑞小组在 LHC-II 的晶体堆积方式方面, 发现了膜蛋白的第三种堆积方式, 完全不同于以往报道的 I 型和 II 型膜蛋白晶体;

(2) 课题组创新的思路在于将该复合物用 60 个单体组成了一个正 20 面体的空心球体, 亲水部分暴露在球的表面, 将疏水部分隐藏在空心球组成的脂质体脂双层内, 使得该复合物能够结晶;

(3) 2.72Å 分辨率结构, 使得对该复合物中每一个单体内的 14 个叶绿素分子和 4 个类胡萝卜素分子的空间位置进行了准确的确认. 发现了独特的色素分子排布特征, 解释了此光合天线复合物高效进行光能吸收和传递的机制;

(4) 课题组根据解析 3 万个独立原子空间坐标, 建立了该复合物内能量传递网络和途径, 并提出了高等植物在高光强条件下的对能量淬灭, 进行光保护的机理.

(杨正宗)