

关于加强流变构造学研究的建议^{*}

张国伟 郭安林

(西北大学地质系 西安 710069)

摘 要 流变学构造研究已成为 21 世纪固体地球科学的前沿领域。构造地质学作为固体地球科学各个分支领域的带动学科, 需要以流变学的理论和研究方法武装自身, 以便从根本上和真正意义上开展大陆地质和大陆动力学的研究, 进而推动板块构造理论的进步和为创建崭新的超越板块构造的构造理论奠定基础。在论及开展构造地质和大陆地质的流变学研究的 5 点理由之后, 本文提出了 3 项旨在加强流变学研究的建议, 即: 1) 大陆流变构造的观测、分析和积累研究, 2) 实验研究和理论探索, 3) 基础理论学习与人才培养, 供国内构造地质学界同仁讨论。

关键词 流变学 流变构造 建议 大陆地质与大陆构造研究

中图分类号: P542

文献标识码: A

文章编号: 0563 - 5020(2007) 01 - 010 - 06

当代地球科学正面临着发展的重大机遇和挑战。一方面, 全球变化和人类活动所引发的人类社会可持续发展问题对地球科学提出了新的重大需求; 另一方面, 地球科学在 20 世纪发展的基础上, 正处于创建新的科学理论的前夜。首先, 本世纪地球科学的进步, 需要从整体上动态地认识与研究地球, 构建地球系统科学, 建立新的地球科学认知体系和技术方法。其次, 在固体地球科学方面, 板块构造在经历了近乎半个世纪的科学实践后, 遭受到了大陆地质问题的困扰。在大陆地质的探索过程中, 超越板块构造的新思维崭露头角, 包括流变作用与大陆造山作用, 大地构造与地表系统互动作用, 构造与生命演化, 从瞬时快速弹性变动到漫长造山作用永久变形间联系等新观点和新思路, 标志着统领固体地球科学领域的构造理论, 正在从经典的板块构造理论观念向着构建囊括板块构造在内的新的地球观和构造观方向发展 (Zhang Guowei et al, 2006)。在这一构造理论创新的变革中, 大陆地壳和地幔流变学的综合研究异军突起, 代表了认识大陆构造和超越板块构造的最佳途径, 架起大陆造山带几何学和动力学研究的桥梁 (金振民等, 2004)。

1 构造地质学与流变构造学

构造地质学作为固体地球科学各个分支领域的具有带动性的学科, 应起着引领整个固体地球科学发展的作用。在上述地学发展的大背景下, 如何不失时机地抓住机遇, 瞄准关键科学问题, 充分发挥和利用我国区位优势 and 已有的科学积淀, 参与国际地学界创建新的地球科学理论的竞争, 是值得悉心思考的问题。美国构造地质学家已在“构造地

^{*}国家自然科学基金重点项目 (40234041) 资助。

张国伟, 男, 1939 年 1 月生, 教授, 中国科学院院士, 构造地质学和前寒武纪地质学专业。

2006 年 1 月 14 日在“构造地质学新理论与新方法学术研讨会”上的报告, 2006 - 07 - 21 改回。

质学和大地构造学的新航程”研讨会上将流变学研究放在未来 10 年 4 个重要的地学研究方向的首要地位 (Structural Geology & Tectonics Forum, 2002)。因此,综合地球科学最新发展,流变学研究显然和无疑地成为本世纪构造地质学的前沿领域。是否采用流变学研究的理论和方法从事构造地质学的研究直接关系到大陆地质和大陆动力学研究的深度和实质问题的探索解决。

从上述国际地学发展形势和对我国构造地质学发展的考虑出发,并根据“构造地质学新理论与新方法”学术研讨会的议题,特提出“关于加强流变构造学研究的建议”,供国内构造地质学界同仁讨论。

建议在构造地质学和大陆地质研究中开展和加强流变构造学研究主要基于以下 5 个方面。

(1) 板块构造的发展实现了大陆地质和大陆构造研究成为地学发展的前沿领域。大陆地质与大陆构造研究的日益深入,需要借助流变学的理论和方法重新审视和研究大陆。与大洋岩石圈相比,大陆地质构造和大陆岩石圈特性迥异,即大陆具有长期漂浮、离散、拼合、保存、演化和不易返回地幔的特征以及非刚性的广泛弥散性的变形属性等。地质界现已开始认识到大陆流变学行为控制并影响着大陆形成与演化,塑造了大陆现今的形态与面貌,造就了大陆造山带的开阔变形带特征。但现实是,目前大陆流变学研究是构造地质学研究薄弱的环节。对大陆物质的本质与规律的揭示与认识,关键问题之一是深入开展大陆地质与大陆构造和大陆岩石圈地幔岩石的流变学研究 (周辉, 2000)。

(2) 地球是复杂的粘弹性体,具有弹性与粘滞性双重物理性质。在地球形成与演化漫长历程中,在多重因素诸如时间、热、流体和地球物质的非均匀性等复合作用控制下,地球物质包括地壳和地幔,尤其是大陆岩石圈的流变性与流变作用,及其对地球性状与形成演化及动力学,特别是对大陆的本质属性、行为及其规律方面的意义,应抓住重点加以研究。

(3) 构造地质学经历了经典几何学为主的传统构造地质学和以有限应变理论为基础的现代构造地质学的发展历程。它未来新的进步,需要流体地质学及其以深部地质为基础的流变构造学和流变动力学的支撑。构建流变构造学应是构造地质学界各分支学科共同的任务。

(4) 中国大陆属于多块体拼合的大陆,长期处于全球特殊复合构造部位和具有长期、多期活动性和多个大陆造山带,因而具有全球共性中突出地域特征和赋存大量当代地学发展的特有信息,成为地学发展前沿领域得天独厚的研究基地与天然实验室,也是大陆流变学实验与研究的良好场所。因此,流变构造学应是我们有条件开展并易于突破的研究领域。

(5) 国际地学界正在开展地球系统科学研究,通过国际协作和实施长期科学监测和科学工程,加速积累科学素材,以期推动板块构造理论的发展和创建超越板块构造的新理论。地球大陆流变研究正是创建新的地球构造观与理论的重要基础,故我们应不失时机抓住前沿的关键科学问题,参与国际地学的发展与竞争,为在板块构造理论的基础上创建新构造观理论和方法做出中国构造地质学家应有的贡献。

2 加强流变构造学研究的具体建议

建议加强以下 3 方面的工作:天然大陆流变构造的观测、分析和积累研究;实验研究和理论探索;基础理论学习与人才培养。

(1) 天然大陆流变构造的观测、分析和积累研究

大陆是地球物质流变学研究的信息库和展览馆。应开展不同尺度大陆构造流变学的观察、分析研究,重新审视天然岩石变形构造,认识并大量积累天然岩石流变作用素材,从宏观到微观揭示和探索地球不同尺度、不同构造层次的流变构造与行为,用连续介质力学方法思考和解决问题,并过渡和拓展到非连续介质流变学方法。

从野外天然构造流变学现象观察着手,在已有构造认识的基础上,破除固有观念的桎梏,重新审视和认真筛分大量各类不同天然岩石变形构造,观察、分析和解读丰富的天然岩石流变构造,并进行力学模拟。天然变形现象与实验模拟两者结合研究能够使自然变形岩石与客观存在构造现象成为流变构造学的天然实验室。在此基础上扩展到区域岩石圈流变学的综合分析研究,进行大陆造山带、大陆岩石圈和地球流变学的探索,从而加深对地球圈层结构、大陆深部构造、造山带地质、区域构造本质与机制的理解,有所新发现、新概括,提出新认识、新理论,为构建流变构造学奠定可靠的客观基础。

(2) 加强实验流变学研究 with 理论探索

流变学是 20 世纪 20 年代发展起来的边缘学科。对构造地质学而言,流变学是以岩石(地壳和地幔岩石)介质材料作为研究对象,研究其在应力场、物理—化学场中变形和流动规律的科学,所以可以称作岩石流变学。依据研究对象的尺度,还可进一步划分为地球流变学、地壳或岩石圈流变学、地幔流变学以及具体的构造流变学等。岩石流变学是新生学科,流变构造学则更是当代新构造地质学急需开拓的前沿领域。

岩石流变学以研究岩石力学性态的时效特征为基本内容,即研究在地球不同地质环境中,包括流体(熔体)参与下不同组成、结构与从深部到浅层不同物理、化学和生物条件下,岩石的变形、流动与强度的时间效应与行为规律。方法上,除天然岩石观测研究外,重要的是实验研究,即通过实验与理论分析建立流变模型(力学模型和物理模型)和本构方程。探讨研究岩石流变机理与影响因素,尤其在实验室条件下模拟天然岩石的变形过程与机制,获得与积累基本参数,求得建立流变本构方程,揭示岩石流变特征与规律,认识与解读地质构造。

鉴于构造地质学发展的新需求,建议除地质工程学界的有关实验研究外,构造地质学界应重视下列 3 方面的研究。1) 从岩石矿物显微尺度的流变学研究:加强关于矿物岩石流变学机理与控制因素的探索研究,诸如位错、蠕变、松弛、流体—岩石—流变关系(水—岩、部分熔融岩石等),相变—流变关系等的研究。2) 模拟天然条件下的高温高压实验研究(周永胜等, 2004)。3) 从宏观到微观有关岩石构造流变学研究的相关基础理论探讨。

从推进板块构造发展和创建超越板块构造理论的角度出发,探讨大陆动力学和构建流变构造学,我们首先需要考虑下列宏观性构造问题。

1) 从构造角度思考地球物质和研究地球物质(包括大洋、大陆以及它们的总体与其

间的基本差异,宏观、微观和超微观的研究)。

2)板块构造和大陆构造与大陆流变作用,包括:大洋岩石圈的俯冲,大陆岩石圈折沉、垮塌、折返隆升和部分熔融,岩石板片的拆离滑脱,通道流动和韧性挤出逃逸,拉伸盆地的形成与反转,地震的形成和发生等(Barboza and Bergantz, 1998; Burrov et al, 1998; Meissner and Mooney, 1998; Schott and Schmeling, 1998; Neubauer et al, 1999; Sandiford, 1999; Doin and Henry, 2001; Vanderhaeghe and Teyssier, 2001; Searle and Szulc, 2005)。

3)岩石圈的垂向分层性和横向不均一性以及相关的应力—应变状态(包括分布与局部化)(周辉, 2000;刘俊来, 2004)。

4)控制大陆流变的因素和宏观到微观机理及其动态过程。

5)天然岩石变形观测研究与实验研究(如何把实验结果应用于天然,而天然的情况如何构成实验的约束条件等,此外还有内涵、外延与可比性等)。

6)多学科(地质、地球物理、地球化学、数理模拟、固体力学、材料科学和金属物理学等)相结合的大陆流变构造观测与实验研究和理论探索。

美国的“构造地质学和大地构造学的新航程”(白皮书)中提出的大陆流变学研究的6个主要方面和未来方向(Structural Geology & Tectonics Forum, 2002)可供借鉴。它们是:1)脆—韧性过渡变形和应变局部化研究;2)力学与水(熔体)耦合系统;3)特定材料的实际流变学研究;4)描述与建立瞬时和稳态速率的状态本构方程;5)大型剪切应变组构发展和地震波各向异性;6)化学组份引起的岩石弱化和硬化作用。

(3)基础理论学习与人才培养

目前,国内流变学在构造地质学研究上的应用相对薄弱。其原因主要是现有构造地质工作者流变学理论素养欠缺和未来构造地质学人才培养体系的不健全。针对这种现状,提出下列2点建议。

1)重视现有构造地质学工作者的再培训,开展补课工作,使其掌握或基本掌握流变学的基本理论和实际工作方法。

2)从教育源头抓起,重点放在下一代新型构造地质学家的培养方面。除去加强流变构造野外地质工作基本能力和素质的培养外,从现在起强化本科生和构造地质学研究生的有关流变学的数理基础教育。同时,为构造地质学研究生开设与流变学相关的理论课程如材料力学、连续介质力学、微分几何学以及非线性理论等。

3 近期努力方向

根据上述建议,我国近期加强构造流变学研究,可概括为:先从野外小尺度的大量观测研究入手,建立天然客观存在的流变构造研究坚实基础;进而进行室内相应的微观不同尺度研究实验模拟,探索流变构造学的理论与方法,并探索客观地开展大尺度乃至区域陆壳与大陆岩石圈和全球构造流变学的综合分析研究。即:首先进行对自然界大量客观存在的不同层次、尺度和不同条件下不同岩类的流变作用与流变结构、特性、规律、机制及控制因素的系统深入的综合探索,为建立流变构造学的系统理论和实际野外观测工作方法奠定可靠基础。至少应尽快在系统性与实用性方面力争达到类似传统构造几何学和有限应变构造理论方法研究的基本水准。在实验流变学研究方面,应在国内外已有

成果的基础上,加强实验条件和实验针对性与关键流变参数及本构方程的实验研究与积累,尤其是在不同层次的条件下,因非流体与流体参与不同岩石特别是基性与超基性岩石在深层动态高温高压长时间作用下的流变性的定量分析。加强和重视实验与天然流变构造研究约束条件,模拟可比性等关系的探索研究。为参与国际地学发展,从长远与根本上考虑,为大陆地质与大陆构造研究理论的新突破奠定坚实的观测科学素材,建议除加强流变学的基础理论研究外,国家在结合地震观测和大地测量的基础上,建立相应的大陆构造与流变的观测网站,进行中、长期监测和探测,积累精细科学数据以便奠定研究与创造探索基础。西方发达国家如美国等正在开展此项长期监测科学工程。最后,关于人才培养,应配合教育部门,从适应地学发展要求出发,对高等学校地质学与构造地质学的教学进行从基础课、专业基础课到专业课等的有关教学与课程设置改革,将构造流变学的基础理论、基本知识与方法纳入教学全过程中,以尽快培养出新型的构造地质学与构造流变学人才。

参 考 文 献

- 金振民,姚玉鹏. 2004. 超越板块构造——我国构造地质学要做什么? 地球科学, 29 (6): 644—650.
- Jin Zhenmin and Yao Yupeng. 2004. Beyond plate tectonics: What do we do in structural geology? *Earth Science*, 29 (6): 644—650.
- 刘俊来. 2004. 变形岩石的显微构造与岩石圈流变学. 地质通报, 23 (9—10): 980—985.
- Liu Junlai. 2004. Microstructure of deformed rocks and rheology of the lithosphere. *Geological Bulletin of China*, 23 (9—10): 980—985.
- 周 辉. 2000. 大陆岩石圈流变动力学研究进展. 地学前缘, 7 (增刊): 121—127.
- Zhou Hui. 2000. Progress on studies of rheological dynamics of continental lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 7 (Suppl): 121—127.
- 周永胜,何昌荣. 2004. 大陆岩石圈流变研究进展与高温高压流变实验现状. 地球物理学进展, 19 (2): 246—254.
- Zhou Yongsheng and He Changrong. 2004. The status of continental lithosphere rheology and experiments on creep of rocks at high temperature and high pressure. *Progress in Geophysics*, 19 (2): 246—254.
- Barboza S and Bergantz G W. 1998. Rheological transitions and the progress of melting of crustal rocks. *Earth Planet Sci Lett*, 158: 19—29.
- Burov E, Jaupart C and Mareschal J C. 1998. Large-scale crustal heterogeneities and lithospheric strength in cratons. *Earth Planet Sci Lett*, 164: 205—219.
- Doin M-P and Henry P. 2001. Subduction initiation and continental crust recycling: the roles of rheology and eclogitization. *Tectonophysics*, 342: 163—191.
- Meissner R and Mooney W. 1998. Weakness of the lower continental crust: a condition for delamination, up lift, and escape. *Tectonophysics*, 296: 47—60.
- Neubauer F, Genser J, Kurz W and Wang X. 1999. Exhumation of the Tauern window, Eastern Alps. *Phys Chem. Earth (A)*, 24: 675—680.
- Sandiford M. 1999. Mechanics of basin inversion. *Tectonophysics*, 305: 109—120.
- Schott B and Schmeling H. 1998. Delamination and detachment of a lithospheric root. *Tectonophysics*, 296: 225—247.
- Searle M P and Szulc A G. 2005. Channel flow and ductile extrusion of the high Himalayan slab——the Kangchenjunga Daringjeeling profile, Sikkim Himalaya. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25: 173—185.
- Structural Geology & Tectonics Forum. 2002. New Departure in Structural Geology and Tectonics. <http://www.pangea.stanford.edu/>

ford edu/~dpollard/ NSF/
Vanderhaeghe O and Teyssier C. 2001. Crustal-scale rheological transitions during late-orogenic collapse. *Tectonophysics*, 335: 211—228.
Zhang Guowei, Guo Anlin and Yao Anping. 2006. Thoughts on studies of China continental geology and tectonics. *Progress in Natural Sciences*, 16 (11): 16—20.

SUGGESTIONS ON ENHANCING RHEOLOGICAL
STUDY IN STRUCTURAL GEOLOGY

Zhang Guowei Guo Anlin

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

Abstract

The study on rheological structure is becoming a frontier field of solid earth sciences in the 21st century. As a leading discipline of various fields in the solid earth sciences, structural geology has to be aimed using rheological theory and method in order to launch a real and fundamental study of continental geology and continental dynamics for pushing plate tectonics theory forward and paving the road for new development beyond the plate tectonics. After listing five strong reasons, this paper presented the following suggestions aiming at enhancing rheological study in the nation for the purpose of further discussion: 1) observation, analysis and accumulation of rheological structure in continent, 2) experimental study and theoretical exploration, and 3) cultivation of talents in rheological study.

Key Words Rheology, Rheological structure, Suggestions, Study on continental geology and continental dynamics

广而告之

“地质科学”2000年进入中国科学院创新基地以后,用3年时间(2000~2002年)走出低谷,2003年开始进入稳定上升期,2005年的影响因子在全国1652种核心科技期刊影响因子总排序中已跃至第8位。据“中国科技期刊引证报告”,“地质科学”近年的影响因子、总被引频次和他引率列于下表。

	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
影响因子	0.513	0.693	0.791	0.689	1.254	1.689	2.008
总被引频次	393	458	441	518	742	1086	1124
他引率				0.95	0.93	0.85	0.82

本刊编辑部对广大作者和读者的厚爱和支持深表谢意。2006年起“地质科学”将进入高峰发展期,企盼着广大作者和读者的进一步关注和呵护。