

超越板块构造——我国构造地质学要做什么？

金振民¹, 姚玉鹏²

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

摘要: 对近十年来全球构造学和构造地质学的重要进展进行了简要评述. 30年前建立的全球构造理论改变了人们对地球及其演化的认识. 作为固体地球统一理论的板块构造主要涉及刚性板块边界之间的变形、地震活动和火山作用. 至今还没有完整理论阐明板块运动的驱动力和地幔对流机制. 板块边界和板内变形等许多问题仍然无法回答. 大陆岩石圈和大洋岩石圈在成分、厚度和力学强度方面有明显的差别, 因此现有板块构造不完全适合于大陆构造. 大陆地壳和地幔流变学的综合研究是认识大陆构造和超越板块构造的最佳途径. 流变学是大陆造山带几何学和动力学的桥梁. 大陆岩石圈对构造作用、重力作用和热作用的响应在很大程度上取决于其流变强度. 岩石圈流变性质是岩石圈分层和塑性流动的主导因素. 大量透入性变形和巨型大陆造山带内部构造显示非刚性特征. 大陆构造和力学行为主要由地壳强度而不是地幔强度所控制. 从大陆岩石圈多层性和力学强度不均匀性表征看, 现在是抛弃传统“三明治”构造模式的时候了. 面对地球系统科学和地球动力学新思维发展趋势, 多学科综合研究大陆构造(造山带)和加速高水平构造地质学人才的培养是我国构造地质学发展的最紧迫任务.

关键词: 板块构造; 超越板块构造; 大陆构造; 流变学; 构造地质学; 人才建设.

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2004)06-0644-07

收稿日期: 2004-10-12

Beyond Plate Tectonics: What Do We Do in Structural Geology?

JIN Zhen-min¹, YAO Yu-peng²

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Department of Earth Sciences, National Science Foundation of China, Beijing 100085, China

Abstract: The major progresses of the global tectonics and structural geology in the last 10 years are reviewed. The new global tectonics that emerged three decades ago profoundly changed our understanding of the earth and its evolution. Plate tectonics as a unifying theory of the earth mainly is connected with deformation, seismicity and volcanism within plate boundaries. No comprehensive theory accounts satisfactorily for the driven force of plate motion and mechanism of mantle convection. Many of the problems of plate boundary formation and inter-plate formation remain unanswered. Continental lithosphere is significantly different from oceanic lithosphere in the aspects of composition, thickness and mechanical strength. However, the plate tectonics is not applied to continental tectonics as well. Comprehensive study for rheology of continental crust and the upper mantle is the best way in understanding continental structure and beyond plate tectonics. Rheology is the liaison between geometry and dynamics of continental orogeny. Responses of continental lithosphere to structuring, gravitation and thermodynamics largely depend on its rheological strength. Rheological strength of continental lithosphere is closely connected with stratification and heterogeneity. The pervasive deformation and internal structure of wide continental orogenic belts indicate non-rigid behavior. Continental tectonics and mechanical behavior are controlled by strength that resides mainly in the crust rather than in the mantle. From the view of multilayering and mechanical heterogeneity of continental lithosphere, it is time to abandon the sandwich model. Facing development trend of earth science system and new thinking of geodynamics, multidisciplinary study on continental structure (orogenic belts) and promptly training outstanding talent is an urgent task.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40172068).

作者简介: 金振民(1941-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事岩石圈流变学 and 高温高压实验研究. E-mail: zmjin@cug.edu.cn

Key words: plate tectonics; beyond plate tectonics; continental structure; rheology; structural geology; talent construction.

当今世界上的地球科学已从原来固体地球科学占压倒优势发展到地质、海洋和大气三足鼎立新局面.地球系统科学穿越不同时间和空间尺度.21世纪地球科学面临的重大可能突破是在地球系统变化的理论(汪品先,2002).在20世纪70年代中期,美国第四纪地质学家F. R. Flint曾经将19世纪的达尔文生物进化论、20世纪50~60年代出现的海底扩张—板块构造学说以及预测(21世纪)将会出现的气候变迁理论,统称为地球动力学3个方面的科学:即“生物圈动力学”(theory of dynamics of the biosphere)、“岩石圈动力学”(theory of dynamics of the lithosphere)和“大气动力学”理论(theory of dynamics of the atmosphere)(孙成权和曲速升,2002).从这种意义上来看,地球系统科学已成为地球科学发展的必然之路.最近由美国基金委地球科学部(2002)主持研讨会所汇集的白皮书“构造地质学和大地构造学的新起点——New Departures in Structural Geology and Tectonics”(郭安林和张国伟译,2004)和美国地球物理联合会(AGU)(2002)出版的《全球板块动力学历史》专著(Richards *et al.*, 2000),分别对板块构造学说30年来的历史进行了回顾和反思,并提出了构造地质学和大地构造学(SG&T)未来发展的新方向.本文在学习上述2个材料的基础上,结合我国构造地质学目前现状和发展方向,提出一些讨论性意见.

1 最近十年来全球构造学和构造地质学研究的一些重要进展

(1)全球和洋壳俯冲带地震3-D层析图像与地幔热结构和化学成分所反映的地震波速度变化特征,揭示了俯冲板块可以延伸到地幔底部和巨型地幔柱(低速体)的存在,这些地球内部深部构造的重大成果,既不是板块构造理论所能预测到的,也不是计算机热模拟结果(Van der Hilst *et al.*, 1991, 1997).

(2)全球超高压变质岩的发现为大陆碰撞造山带研究提供了新的方向;具有超高压指示意义的矿物(柯石英、金刚石、原生菱镁矿、钛-斜硅镁石、-PbO型金红石等)和超高压矿物出溶体为窥测大

陆深俯冲板块深度提供了重要的示踪标志(Xu *et al.*, 1992; Green *et al.*, 2000; Hwang *et al.*, 2000; Zhu and Ogasawara, 2002; Chopin, 2003; Zhao *et al.*, 2004).

(3)拆沉和底侵作用在大陆地壳增生、岩石圈厚度、结构和壳-幔交换所起的作用已倍受关注.(Kay and Kay, 1993; 金振民和高山, 1996; Wernicke *et al.*, 1996; Seber *et al.*, 1996; 高山和金振民, 1997; Zhou and Li, 2000).

(4)地壳深熔和地幔部分熔融作用对大陆碰撞带和大陆高原地壳增厚和隆升有重要影响.少量熔体使岩石体积增大和孔隙压力降低,从而使岩石有效强度减弱和粘度降低(Kohlstedt and Zimmerman, 1996; 杨晓松和金振民, 1999; Rosenbergs, 2001).

(5)地球流变学、岩石圈流变和岩石流变学是研究全球构造和区域地质构造几何学和动力学之间的纽带(Karato and Wu, 1993; Burg and Ford, 1997; Jackson, 2002, 2002).

(6)地震波各向异性与变形矿物优选方位关系是大陆岩石圈动力学和大陆碰撞造山带研究的新方向,是探测地球深部物质性质、结构和变形状态的“指示器”和“地震化石”(seismic fossil),被称为构造地质学和地震学之间的桥梁(Ribe, 1992; McNamara, 1994; 金淑燕, 1997; Silver and Chan, 1998).

(7)岩石圈应变局部化(strain localization)和应变弱化(strain weakening)是导致全球板块构造边界和大陆构造流变分层的主因(Vissers and Drury, 1995; Drury and Vissers, 1996; Kohlstedt and Zimmerman, 1996; Pili and Ricard, 1997).

(8)流体、熔体和名义上无水矿物对岩石圈地幔流变强度和岩石物理性质有重要约束作用(Newton, 1989; Ahrens, 1989; Bell and Rossman, 1992; Bai and Kohlstedt, 1992; Thomson, 1992; 夏群科等, 1999; Zhang *et al.*, 2001).近十年来研究表明,大洋俯冲带和大陆俯冲带中的流体(特别是名义上无水矿物中的结构水: nominally anhydrous minerals, 简称NAMS)对壳-幔交换作用、岩浆形成、岩石圈流变强度、岩石物理性质和深源地震有着重要影响.最近Zhang *et al.* (2004)通过榴辉岩高温高压实验表明,在缺少含水相矿物条件下,榴辉岩中绿辉石和石榴石中晶格缺陷含有大量结构水(OH).这些构造

水在一定的高温高压条件下产生动力学不稳定性而在矿物颗粒边界析出并形成微量熔体,从而导致岩石有效应力的下降并诱发高压条件下脆性破裂,这可以解释洋壳俯冲带中等深度地震活动新的成因.这种断裂机制的另一面潜在重要性在于揭示了岩石高压失稳只需要极少量低粘度流体的参与(含量少于 1%),从而说明大洋和大陆俯冲带以及岩石圈中少量的 NAMS 的脱水对地球动力学过程演化有着十分重要的影响,应当值得充分重视(Zhang *et al.*, 2001, 2004).

(9) 背散射法(EBSD)新技术在构造地质学中的应用使超细粒构造岩的优选方位和组构研究产生根本性革命(Bascou *et al.*, 2001; Prior *et al.*, 1999, 2000).

(10) 可视性三维岩石高温高压变形实验和大变形扭转实验,为真实模拟天然岩石大变形开辟了新途径.

2 超越板块构造——大陆流变学和造山带

20 世纪诞生的板块构造理论为统一全球构造格局做出了革命性的贡献.从经历了 30 年的地球科学实践来看,板块构造基本上还是一种运动学理论,它主要描绘了地球表面水平运动的主要特征,而没有确定驱动或承受板块运动的力源.板块构造革命之后的 30 年,地球物理学家、地质学家和地球化学家已经注意到板块构造的动力学和地幔对流问题.例如,大量火山热点(夏威夷、冰岛和黄石公园),并不是与板块构造理论所确定的边界一致,而主要来自地幔深部底辟柱.虽然在太阳系中,板块构造是地球所特有的构造,然而,与地幔柱有关的火山作用几乎也出现在金星、火星和月亮上.因此,至今为止还没有一种对流理论能令人满意地解释地幔热柱与板块运动的关系.大洋岩石圈与大陆岩石圈物质组成、厚度和流变学强度有明显差异,因此大陆构造的多样性、复杂性和分层性是板块构造理论难以解释的.事实上大陆地质构造不可能完全符合板块构造已有的模式.因此美国自然科学基金委地球科学部(构造地质部分)白皮书提出了超越板块构造(beyond plate tectonics),把流变学研究作为大陆地质学和大陆造山带研究的新起点.

流变学(rheology)是物理学的分支,是研究物体变形和流动规律的交叉学科.岩石(或岩石圈)流变学是以位错理论为基础,以高温高压实验为技术手段,研究地球物质在不同物理化学环境中(温度、压力、差异应力、流体和水)变形和流动的科学.流变学是研究大陆构造的重要理论基础,是研究大陆构造几何学、运动学和动力学的桥梁.大陆岩石圈对构造作用、重力作用和热作用的响应在很大程度上依赖于其流变性质,因此流变性质是控制大陆岩石圈分层和塑性流动的主导因素之一,也是探索大陆动力学的基础.近 20 年以来,地质学家们将流变学理论应用于岩石圈和大陆造山带研究,已取得了丰富的成果.特别值得指出的是,流变学为大陆造山带动力学研究找到了新的研究方向.流变学的约束需要细致的野外观察和力学模拟,两者完美的结合可以把天然岩石变形和活动构造区域作为天然实验室.高温高压流变学实验是人类直接模拟和再现地球内部结构和物质运动的一面“镜子”.

岩石流变学实验研究不仅可以建立岩石的流变本构(状态)方程:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \exp(-Q/RT)^n,$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; A 为物质结构常数; Q 为活化能; R 为气体常数; T 为绝对温度; σ 为差异应力($\sigma_1 - \sigma_3$); n 为应力指数.流变学实验还可以获得 2 个方面重要信息:(1)为解释天然变形岩石微观和宏观构造提供比较信息;(2)获得岩石在不同物理化学环境下构造热动力演化信息,从而为建立大陆动力学模型提供力学方面约束条件.

大陆岩石圈流变分层性为分析地震震源分布和有效弹性厚度相关问题指明了新的研究途径.最近大陆地震震源分布和重力异常研究成果(Maggi *et al.*, 2000a, 2000b; Jackson, 2002, 2004)向这种传统的大陆岩石圈“三明治”模式的强度轮廓提出了挑战.大部分大陆地震活动都集中在上地壳(20 km 左右),如加利福尼亚、爱琴海、青藏高原和扎格罗斯;而在另一些地区,包括东非、中国天山、印度地盾和贝加尔湖附近,下地壳地震活动则比较显著(Maggi *et al.*, 2000b).虽然现在或过去在俯冲过程中大陆地幔中约 100 km 深度确实也发生过地震,但这些地震可能位于大洋而非大陆岩石圈中(Maggi *et al.*, 2000a).从以上研究进展我们可以获得以下 2 点启示:(1)大陆岩石圈不只有一个发震层(seismogenic layer);(2)大陆地幔地震的成因机制仍然还不

清楚。

流变学理论强调了大陆地壳和地幔的成分与力学强度不均匀性;流体(水、熔体)和名义上无水矿物对大陆岩石圈强度影响的重要性;地幔回流(mantle return flow)是大陆岩石圈会聚边界变形(局部应变化剪切带)和大陆地壳加厚、造山带楔状体形成的主因;下地壳和地幔强度的差异耦合或非耦合关系与大陆变形的复杂变形图像息息相关;弱下地壳和富含流体下地壳观点也倍受人关注。水或熔体的存在对岩石圈力学强度变化有着极为重要的影响。同样的岩石类型由于其本身含水量不同(“干”或“湿”岩石),不仅可以改变 Byerlee 摩擦强度,同时对下地壳和上地幔流变强度和热活能有重要制约作用(Jackson, 2002)(图 1)。

Jackson(2002)在研究大陆岩石圈强度时指出,现在是放弃大陆岩石圈“果酱—三明治”(the Jelly Sandwich)模式的时候了,应当以板状流变强度或板状粘性强度和流体地幔流动模式(fluid mantle flow model)替代以刚性岩石圈为主体的板块构造理论在大陆构造中的应用。因此,在制订振兴我国构造地质学发展战略时,国外最近发展动态是值得密切关注的。

3 我国构造地质学要做什么?

针对地球科学目前发展的趋势,笔者对我国构造地质学发展和人才培养提出以下 4 方面的建议,以供同行参考。

(1) 首先我们还是应当解放思想,改变观念。我

国的构造地质学研究要有开放意识,要自己主动地打开大门,向相邻学科学习,把相邻学科知识引进来,实现综合研究的突破。提倡全球构造视野、学科交叉和渗透融合(interdisciplinary, intra-disciplinary, multi-disciplinary)。要以全球板块构造理论和地球物质垂向运动和侧面对流的地幔柱理论为新思维,以地球动力学过程和地球系统科学为主线来构建科学研究方向和教学课程改革的框架。以动态生动思维新思路来代替传统方式和局限于区域性的研究方法(金振民, 2001)。

(2) 加速构造地质学和大地构造学的优秀和杰出人才的培养。培养高水平构造地质学人才是我国构造地质学面临的十分迫切的任务。我国地学界曾经造就了一批杰出构造地质学家,如李四光、黄汲清、张文佑、陈国达、张柏声、李春昱、马杏垣、郭令智等。然而目前构造地质学年轻杰出人才寥寥无几。据 2003 年统计,迄今为止国家自然科学基金委地球科学部评选的国家杰出青年科学基金的 92 位人才中仅有 3 人属于构造地质学学科,相对其他地质学科(地球化学、岩石矿物学、地层古生物学、地球物理学、地理学等),构造地质学年轻杰出人才的数量有明显差距(图 2)。

这种状况与 21 世纪地球系统科学和地球动力学研究发展的总趋势是很不适应的。因此,构造地质学的发展一方面要高度重视研究地球系统各层圈之间的动力学联系和地球系统形成、发展和演化规律;另一方面要切实加速高水平构造地质学人才的培养。构造地质学人才的培养首先应当从地球科学本科生和研究生培养着手:

地球科学本科生培养应当优先(priority)考

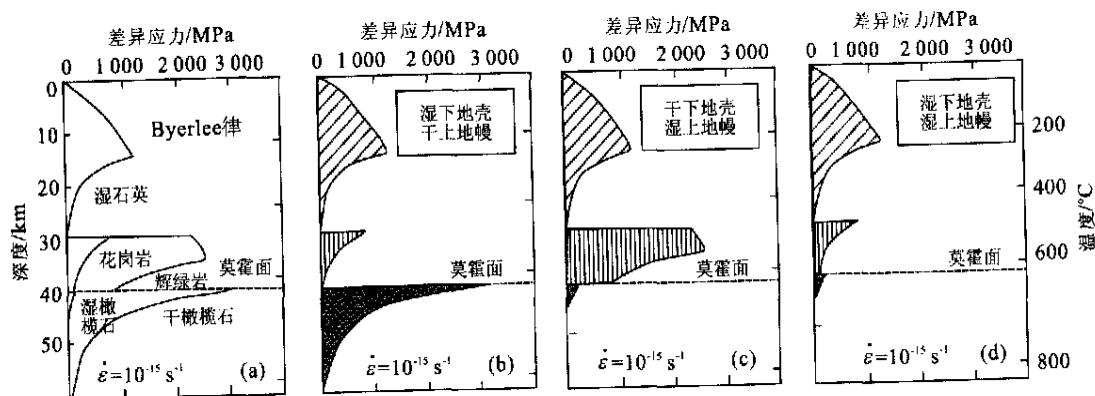


图 1 水对岩石圈力学强度的影响(Jackson, 2002)

Fig. 1 Effect of water on mechanical strength of lithosphere

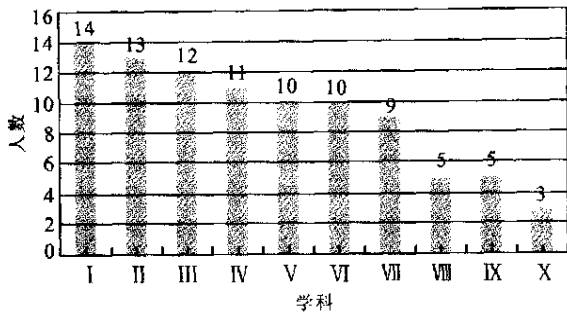


图 2 地球科学部各学科国家杰出青年科学基金人才分布

Fig. 2 Outstanding talents of national science young foundation

· 地球物理; · 土壤/环境/地貌; · 岩石、矿物、矿床学; · 大气物理科学; · 地球化学; · 地理学; · 海洋学; · 沉积/古生物; · 水文/工程地质; · 构造地质学

考虑:培养学生认真收集野外或实验原始资料和数据;学会怎样进行实验数据的处理(分析、解释和假说);学会怎样应用综合的方法和手段整合和研究复杂问题(原则意识);预测结果和理解复杂系统的动力学关系;认识数据和模式处理过程中不确定性和多解性。通过学生自己的探索实验(或野外实践)、假说验证、分析和推测,学会如何思考问题和初步从事科学研究。批评式的思考能力(critical-thinking)和解决问题(problem-solving)能力是决定一个学生下一步在研究生阶段学习是否成功的关键和基本科研素质。鼓励研究生和年轻学者敢于思考,敢于冲击旧的传统观点,敢于提出问题。在地球科学研究中提出令人费解的问题和新见解是新观点和新理论产生的前提和萌芽。著名物理学家爱因斯坦(物理学的进化, 1938)对科学研究中敢于提出问题的重要性做过如下精辟论述:“提出一个问题往往比解决一个问题更重要,因为解决一个问题也许是一个数学上或实验上技巧,而提出新的问题、新的可能性,从新的角度看旧问题,却需要创造性的想象力,从而标志着科学的进步”。

构造地质学研究生培养优先考虑的问题:要超越本学科范围内的学习(如构造地质学、大地构造学、地球物理学),要求具备更高层次的定量研究问题的技能(提倡进一步选修一些微分方程、线性代数、热动力学、连续介质力学、反演理论、数值分析、空间统计分析、高温高压实验技术等)。加强构造地质学教学和科学研究要突出以下 3 点:强调微分几何学在分析地质构造中的作用;要把连续介质力学

和流变学作为构造地质学和大地球构造力学模型构建基础和动力学过程研究所必需的基本科学;要接受严密的方法学训练,并把它运用于整个定量研究的全过程;要获得为国内外同行所认可的高质量数据。

(3) 建议组织有关单位和人员制订 21 世纪初期我国构造地质学和大地球构造学发展战略计划。

(4) 在充分重视野外地质观察和调查基础上,要高度重视严密的定量构造地质学、实验构造学、数值模拟构造学和高温高压实验学;要提倡构造地质学原创性研究和野外实践成果的理论升华和有全球影响的理论模型的提炼。

致谢:在构造地质学人才培养方面,笔者与西北大学张国伟院士、国家自然科学基金委地球科学部马福臣教授和柴育成教授进行了多次有益讨论,他们提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。

References

- Ahrens, T. J., 1989. Water storage in the mantle. *Nature*, 342: 122 - 123.
- Bai, Q., Kohlstedt, D. L., 1992. Substantial hydrogen solubility in olivine and implications for water storage in the mantle. *Nature*, 357: 672 - 674.
- Bascou, J., Barrual, G., Vauchez, A., et al., 2001. EBSD-measured lattice-preferred orientations and seismic properties of eclogites. *Tectonophysics*, 342: 61 - 80.
- Bell, D. R., Rossman, G. R., 1992. Water in the earth's mantle: The role of nominally anhydrous minerals. *Science*, 255: 1391 - 1397.
- Burg, J. P., Ford, M., 1997. Orogeny through time: An overview. In: Burg, J. P., Ford, M., eds., *Orogeny through time*. Geological Society of London, London, U K, 1 - 17.
- Chopin, C., 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 212: 1 - 14.
- Drury, M. R., Vissers, R., 1991. Shear localization in upper mantle peridotite. *Pure and Applied Geophysics*, 137(4): 439 - 460.
- Gao, S., Jin, Z. M., 1997. Delamination and its geodynamical significances for the crust-mantle evolution. *Geological Science and Technology Information*, 16(1): 1 - 9 (in Chinese with English abstract).
- Green, H. W., Dobrzinetskaya, L., Bozhilou, K. N., 2000. Mineralogical and experimental evidence for very deep exhumation from subduction zones. *Journal of Geodynam-*

- ics, 30: 61 - 76.
- Guo, A. L., Zhang, G. W., Cheng, S. Y., 2004. Beyond plate tectonics—Review on the opportunity for continental geology research. *Progress in Natural Science*, 14(7): 729 - 733 (in Chinese with English abstract).
- Hollister, L. S., Cranford, M. L., 1986. Melt enhanced deformation: A major tectonic process. *Geology*, 14: 558 - 561.
- Hwang, S. L., Shen, P. Y., Chu, H. T., et al., 2000. Nanometer size PbO_2 type in garnet: A thermobarometer for ultrahigh-pressure metamorphism. *Science*, 288: 321 - 324.
- Jackson, J. A., Austrheim, H., McKenzie, D., et al., 2004. Metastability, mechanical strength and the support of mountain belts. *Geology*, 32(7): 625 - 628.
- Jackson, J., 2002. Faulting, flow and the strength of the continental lithosphere. *International Geology Review*, 44: 39 - 61.
- Jackson, J., 2002. Strength of the continental lithosphere: Time to abandon the Jelly Sandwich? *GSA Today*, September, 4 - 10.
- Jin, S. Y., 1997. Seismic anisotropy of continental lithosphere and dynamical implications. In: Zhang, B. X., Hong, D. W., Wu, X. Z., eds., *Modern methods of study for lithosphere*. Publishing House of Atomic Energy, Beijing, 79 - 88 (in Chinese).
- Jin, Z. M., 2001. Curriculum innovation of earth sciences in the university of Minnesota and its implications. *Journal of China University of Geosciences (Social Science Edition)*, 1(1): 57 - 61 (in Chinese).
- Jin, Z. M., Gao, S., 1996. Underplating and its geodynamical significances for the crust-mantle evolution. *Geological Science and Technology Information*, 15(1): 1 - 7 (in Chinese with English abstract).
- Karato, S. I., Wu, P., 1993. Rheology of the upper-mantle: A synthesis. *Science*, 260: 771 - 778.
- Kay, R., Kay, S., 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177 - 189.
- Kohlstedt, D. L., Evnns, B., Mackwell, S. T., 1998. Strength of the lithosphere—constraints by laboratory experiments. *J. Geophys. Res.*, 100(B): 17587 - 17602.
- Kohlstedt, D. L., Zimmerman, M. E., 1996. Rheology of partially molten mantle rocks. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 24: 41 - 62.
- Maggi, A., Jackson, J. A., McKenzie, D., et al., 2000a. Earthquake focal depths, effective elastic thickness, and the strength of the continental lithosphere. *Geology*, 28: 495 - 498.
- Maggi, A., Jackson, J. A., Priestley, K., et al., 2000b. A reassessment of focal depth distribution in southern Iran, the Tien Shan and northern India: Do earthquake really occur in the continental mantle? *Geophys. Res. Lett.*, 143: 629 - 661.
- McNamara, D. E., 1994. Shear wave anisotropy beneath the Tibetan plateau. *J. Geophys. Res.*, 99(B): 13655 - 13665.
- Newton, R. C., 1989. Metamorphic fluids in the deep crust. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 17: 385 - 412.
- Pili, E., Richard, J. M., 1997. Lithospheric shear zone and mantle-crust connections. *Tectonophysics*, 280(1 - 2): 15 - 29.
- Prior, D. J., Boyle, A. B., Brenker, F., et al., 1999. The application of electron back-scatter diffraction and orientation contrast image in the SEM to textural problems in rocks. *American Mineralogist*, 84: 1741 - 1759.
- Prior, D. J., Wheeler, J., Brenker, F. E., et al., 2000. Crystal plasticity of natural garnet: New microstructural evidence. *Geology*, 28: 1003 - 1006.
- Rosenbergs, C. L., 2001. Deformation of partially molten granite: A review and comparison of experimental and natural case studies. *Int. J. Earth Science (Geol. Rundsch)*, 90: 60 - 76.
- Ribe, N. M., 1992. On the relation between seismic anisotropy and finite strain. *J. Geophys. Res.*, 93(B36): 8737 - 8747.
- Richards, M. A., Gordon, R. G., Van der Hilst, R., D., 2000. The history and global plate motions. *Geophysical Monograph Series*, American Geophysical Union, Washington, DC, 1 - 398.
- Seber, D., Barasangi, M., Ibenbrahim, A., et al., 1996. Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran sea and Rif-Betic mountains. *Nature*, 379: 785 - 790.
- Silver, P. G., Chan, W. W., 1998. Implication for continental structure and evolution from seismic anisotropy. *Nature*, 375: 34 - 39.
- Sun, C. Q., Qu, S. S., 2002. Status and trends of the international earth science studies. *Advance in Earth Sciences*, 17(3): 344 - 347 (in Chinese with English abstract).
- Thomson, A. B., 1992. Water in the earth's mantle. *Nature*, 358: 295 - 302.
- Van der Hilst, R., Engdahl, R., Spakman, W., 1991. Tomographic imaging of subducted lithosphere below northwest Pacific islands arc. *Nature*, 353: 37 - 43.
- Van der Hilst, R., Widiyantoro, S., Engdahl, R., 1997. Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*, 386: 578 - 584.

- Visser, R., Drury, M. R., 1995. Mantle shear zones and their effect on lithosphere strength during continental breakup. *Tectonophysics*, 249(3-4): 155-171.
- Wang, P. X., 2002. Crossing the Earth's sphere—On the "Earth systemic process" meeting in Edinburg. *Advance in Earth Sciences*, 17(3): 311-313 (in Chinese with English abstract).
- Wernicke, B., Clayton, R., Ducea, M., et al., 1996. The origin of high mountain in the continents, the southern Sierra Nevada. *Science*, 271: 190-193.
- Xia, Q. K., Chen, D. G., Zhi, X. C., 1999. Research progress in structural water in nominally anhydrous mantle minerals. *Advance in Earth Sciences*, 14(5): 452-457 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S., Okay, A. I., Ji, S., et al., 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 80-82.
- Yang, X. S., Jin, Z. M., 1999. Relationship between intracrustal partial melting and thickening of Tibetan plateau crust. *Geological Science and Technology Information*, 18(1): 24-29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J. F., Green, H. W., Bozhilov, et al., 2004. Faulting induced by precipitation of water at grain boundaries in hot subducting oceanic crust. *Nature*, 428: 633-636.
- Zhang J. F., Jin, Z. M., Green, H. W., et al., 2001. Hydroxyl in continental deep subduction zone: Evidence from UHP eclogite of the Dabie mountains. *Chinese Science Bulletin*, 46(7): 591-596.
- Zhao, W. X., Hu, Y. X., Xia, F., et al., 2004. Krich larnellar exsolution in clinopyroxene: Constraint on the depth of peridotite source at Zhimafang. *Chinese Science Bulletin*, 49(7): 711-715.
- Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Origin of Late-Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269-287.
- Zhu, Y. F., Ogasawara, A. Y., 2002. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene. *International Geology Review*, 44: 831-836.

附中文参考文献

- 高山, 金振民, 1997. 拆沉作用 (Delamination) 及其壳 - 幔演化动力学意义. *地质科技情报*, 16(1): 1-9.
- 郭安林, 张国伟, 程顺有, 2004. 超越板块构造——大陆地质研究新机遇评述. *自然科学进展*, 14(7): 729-733.
- 金淑燕, 1997. 大陆岩石圈各向异性 and 动力学意义. 见: 张炳熹, 洪大卫, 吴宣志主编, *岩石圈研究的现代方法*. 原子能出版社, 北京, 79-88.
- 金振民, 2001. 明尼苏达大学地球科学课程改革及启示. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 1(1): 57-61.
- 金振民, 高山, 1996. 底侵作用 (underplating) 及其壳 - 幔演化动力学意义. *地质科技情报*, 15(1): 1-7.
- 孙成权, 曲速升, 2002. 国际地球科学发展态势. *地球科学进展*, 17(3): 344-347.
- 汪品先, 2002. 穿越圈层, 横跨时空——记“地球系统过程”国际大会. *地球科学进展*, 12(3): 311-313.
- 夏群科, 陈道公, 支霞臣, 1999. 名义上无水的地幔矿物中结构水的研究进展. *地球科学进展*, 14(5): 452-457.
- 杨晓松, 金振民, 1999. 部分熔融与青藏高原地壳加厚的关系. *地质科技情报*, 18(1): 24-29.