1000-0569/2008/024(07)-1433-44 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

大陆动力学的过去、现在和未来 —— 理论与应用*

许志琴[1] 李廷栋[1,2] 杨经绥[1] 嵇少丞[3] 王宗起[4] 张泽明[1]
XU ZhiQin[1], LI TingDong[1,2], YANG JingSui[1], JI ShaoCheng[3], WANG ZongQi[4] and ZHANG ZeMing[1]

1. 中国地质科学院地质研究所 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037
2. 中国地质科学院, 北京 100037
3. 加拿大蒙特利尔大学综合工学院, 蒙特利尔 H3C 3A7
4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
1. *Institude of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences; Key Laboratory of Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources, Beijing* 100037, *China*
2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
3. *Department of Civil, Geological and Mining Engineering, Ecole Polytechnique de Montreal, Montréal H3C 3A7, Canada*
4. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
2008-03-05 收稿,2008-06-20 改回.

Xu ZQ, Li TD, Yang JS, Ji SC, Wang ZQ and Zhang ZM. 2008. Advances and prospectives of continental dynamics: Theory and application. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7):1433-1444

Abstract This paper presents an overview on advances and prospectives of continental dynamics with a special focus on the rheology of continental lithosphere, tectonics of the entire mantle beneath plates, modern continental deformation dynamics, continental deep-subduction dynamics, channel flow in the mid-lower crust, dynamics of composive orogenic belts, basin-range coupling and continental accretion, mantle compositions and mantle tectonics, and global continental scientific drilling integration plans. It is concluded that the continental dynamics is a new departure following plate tectonics and it is critical necessary to establish a new theorical system of continental dynamics for satisfying the human needs for resources, energy, environmental protection, and prevention/mitigation of earthquake harzards.
Key words Rheology; Modernal continental deformation and neotectonics; Continental deep-subduction; Channel flow; Mantle tectonics; Continental scientific drilling; New theorical system of continental dynamics

摘 要 近十年来大陆岩石圈流变学、板块下的构造和整个地幔运动、现代大陆变形动力学、大陆深俯冲动力学 、“中下地壳的隧道流”、复合造山带和复合造山动力学、盆-山耦合与大陆增生、地幔物质和地幔动力学以及全球大陆科学钻探整合计划等大陆动力学研究的重要进展,表明大陆动力学是继“板块构造”之后固体地球科学发展的新的起点,建立大陆动力学新的理论体系以及为资源、能源、环境和预防地震灾害的人类需求服务,是大陆动力学发展的未来。
关键词 流变学; 现代大陆变形和新构造; 大陆深俯冲; 隧道流; 地幔构造; 大陆科学钻探; 大陆动力学新理论体系
中图法分类号 P541

大陆一直是地质科学研究的世袭领地,虽然板块构造诠释了全球构造的许多现象,但是对于解释大陆的基本问题迄今仍然具有局限性。与板块构造学说所阐明的大洋岩石圈生长和消亡过程相比,大陆岩石圈的增生、保存和消沉过程更为复杂,尚未建立令人信服的动力学的模式。

近代大陆岩石圈流变学、地震反射剖面及大陆科学钻探的成果揭示,不同于简单的大洋刚性块体,大陆岩石圈是一个不均一、不连续、具多层结构和复杂流变学特征的复合体。

* 中国地质调查局项目(1212010610105)资助成果.
第一作者简介: 许志琴, 女, 研究员, 中国科学院院士, 构造地质学专业, 长期从事大陆动力学研究工作, E-mail: xzq@ccsd.cn

最新的研究还表明,大陆地壳没有一个共同的成因和起源,它是由不同物质组成的不同块体拼贴而成,具有大范围变化的构造和热历史,流体和熔融体对其作用又改变了大陆岩石圈流变学的结构;因此大陆流变学结构和演化过程十分复杂,人们愈来愈发现运用经典的板块理论很难解释大陆地质,具有复杂流变特征的大陆岩石圈使板块构造理论"登陆"受到很大的阻力。

1989 年 3 月,美国地球科学家为首提出了 1990—2020 年为期 30 年的具有科学导向的"大陆动力学"研究计划。提出大陆动力学科学挑战的基本科学问题有:大陆的成因和演化、陆下地幔及其与大陆地壳的相互作用、地震及板块边界相互作用、大陆地壳中的岩浆成因和动力学、大陆岩石圈的变形和活动性、大型沉积盆地的成因和演化、地壳—水圈相互作用和作为气候和全球研究关键的地球系统历史等。一个以解决大陆组成、结构、行为、动态演化和驱动力以及发展板块构造理论为目的、服务于人类需求的战略计划的提出,在世界上大多数地学家中产生强烈反响。

由于 20 年来运用先进的量化手段如:精确测量地壳运动的仪器、新一代可移动式地震台网、宽频性能的电磁感应技术、用于地下成像的层析技术、数字模拟仿真系统的能力、追索岩石形成的时间和深度的同位素系统研究、高分辨率的地质年代技术、推断压力—温度—时间(*PTt*)史的热年代学方法、用于开发沉积岩纪录的高精度和详细地质年代的先进数值和观测手段、高温高压岩石变形实验以及岩石显微构造和矿物组构的 EBSD 技术,加之大陆科学钻探等,大陆动力学的研究和大陆动力学理论获得超出人们臆想的进展。一个重新审视大陆组成、结构、演化及动力学过程的大陆动力学理论完善的任务正摆在地球科学家面前,这是一场继"板块构造"之后固体地球科学发展的新的起点。

本文通过近十年来大陆岩石圈流变学、板下构造和整个地幔运动、现代大陆变形动力学、大陆深俯冲动力学 、"中下地壳的隧道流"、复合造山带和复合造山动力学、盆-山耦合与大陆增生、地幔物质和地幔动力学以及全球大陆科学钻探整合计划等方面研究的重要进展,思考大陆动力学的过去、现在和未来发展,认为大陆动力学是继"板块构造"之后固体地球科学发展的新的起点,提出建立大陆动力学新的理论体系以及为资源、能源、环境和预防地震灾害的人类需求服务,是大陆动力学发展的未来。

1 大陆岩石圈流变学——大陆动力学的理论基础

流变学是研究组成地球的岩石和矿物力学性质和变形行为的科学(Kohlstedt *et al.*, 1995; Ji *et al.*, 2002)。地球各层圈的构造变形归根到底就是多矿物岩石的变形,因为要了解地球各层圈的变形及其形成的构造,首先必须深刻理解多矿物复合岩石在各种物理条件(例如,温度、围压、差应力、应变速率、应变方式等)下和化学环境(主要是氧逸度和水含量)中的流变学行为。大陆在构造挤压作用下如何成山、在拉张作用下如何成海?为什么地球上老于 200Ma 的大洋岩石圈几乎全都已经俯冲到软流圈中去,而许多太古代(>2.5Ga)年龄的大陆克拉通,其岩石圈厚度高达 200km ~ 400km,却还能一直漂游在软流圈之上?稳定的大陆克拉通在什么条件下会变得不稳定或破坏(即发生活化与岩石圈减薄)?莫霍面是否为滑脱面?壳幔耦合及其在构造变形中的作用与随地质时代的演化?挤压造山带如喜马拉雅山究竟能升多高?为什么在侧向静岩压力梯度作用下青藏高原深部地壳可以做大规模的隧道流动?高原隆起到什么高度才发生喜马拉雅山式的地壳挤出逃逸?地震破裂如何形成、扩展和滑移?要回答这些当今地球动力学的重要问题,无不需要我们对地壳和地幔的流变学行为有着深刻而又详尽的认识。流变学作为地球动力学的理论基础,其研究的重要性在国际上已被越来越多的地质和地球物理学家认识和重视。

大陆岩石圈流变学的研究运用现代材料学、地球物理学和地球化学的新理论和新方法,利用目前国际上最高灵敏度和准确度的高温高压实验和分析测试系统,采用大应变简单剪切高温高压岩石变形实验、电镜内高温变形台的同步观察,并与野外地质详细观察、理论分析、物理模拟和计算机数值模拟有机结合,集中研究多矿物复合岩石在不同物理条件、化学环境中的流变学行为、变形机理、显微构造和物理性质,探索地球各层圈流变结构,深刻理解大陆岩石圈构造变形的动力学过程,是当前一项重要的基础工作,在我国与国际流变学研究仍存在很大差距的今天,应尤为关注。

2 板下整个地幔运动——研究岩石圈板块运动的根本

板块运动指岩石圈板块在软流圈上的运动。新的研究表明,研究板块构造只考虑岩石圈的尺度及岩石圈动力学已远远不够。全球地震层析新资料为我们提供了一个板下构造及整个地幔运动的地球物理证据:(1) 太平洋板块东侧的地幔地震层析资料揭示了太平洋板块和美洲大陆汇聚边界之间的运动状况,太平洋岩石圈板片的高速异常体在向东俯冲的过程中可以抵达 2900km 深度的核幔边界(Grandt *et al.*, 1997);(2) 非洲 S-20RTS 地震层析模型证实非洲大陆之下的超地幔柱(Mantle plume)的存在,揭示深部热的低速(高温)异常体可以从核幔边界往上穿跨地幔转换带直达全球地表热点,冰岛、卡那利群岛、黄石和大洋群岛之下的热点也是深地幔柱的产物。

也就是说,岩石圈板片可以从地球表面俯冲到核幔边界(2900km 深度,压力 135GPa),超地幔柱也可以从核幔边界直接上涌到地壳表层,并导致大量热点的产生;同时,全球范围内地幔中地震波高速异常和低速异常的连续出现,表明物质可以从上到下或者从下往上穿过 410km ~ 660km(13 ~ 22GPa)

深度的地幔转换带。这一发现进一步证实了转换带边界并不能阻止大规模物质从上地幔进入下地幔或下地幔进入上地幔。因此，研究板块运动必须考虑整个地幔的动力学背景。

大陆板块汇聚边界的俯冲板片，特别是大陆板块汇聚边界的地幔构造的地震层析图像显示，为我们研究大陆板块汇聚边界的深部状态提供了更多的思考。如喜马拉雅的地幔地震层析图像揭示中下地幔范围内保存了若干高速异常体板片，可能代表特提斯大洋岩石圈或者拆沉的印度次大陆岩石圈的“化石”残片（R. V. der Voo, *et al.*，1999）。这些地幔层析资料支持了侏罗纪—白垩纪时期印度北面特提斯大洋及岩石圈超深俯冲的观点，而且为拆沉作用提供了证据；通过大陆板块汇聚带的地幔地震层析资料，我们可以寻找与新生代俯冲无关的古（侏罗纪—白垩纪）俯冲残片，并捕捉到古拆沉的证据。从中我们得到重要的启示：岩石圈板片可以俯冲到地幔深部，一部分成为拆沉的“化石”残片，一部分在碰撞的过程中又折返上来，折返上来的板片保存了大量地幔动力学的信息，包括超高压变质作用、超高压矿物相的转换、超高压矿物流变学、流体及熔融作用、壳-幔作用及地幔中的物质循环等。因此，我们可以通过地球物理以外的各种地质手段来研究超高压变质带，发现超深地幔矿物及超深俯冲的证据，探究汇聚板块边界的地幔动力学。

地壳中发生的地质作用的动力源最有可能来自深部地幔，甚至核幔边界，归因于地幔对流和地幔柱的作用。高分辨率的地震资料已经显示拆沉岩片可以达到下地幔深度，这就要求有整个地幔对流来加以诠释。整个地幔（Whole mantle）的对流是地幔演化的重要过程，并提供了在下地幔形成的深部地幔矿物被运移到地球表面的可能性。

岩石圈的超深俯冲、超地幔柱及整个地幔对流的新模型（图 1）（Maruyama *et al.*，2007）是对传统的板块构造有关对流、俯冲及驱动力的基本模型的挑战。核幔边界既是高速深俯冲异常板片的“埋葬之地”，又是低速异常体和超地幔柱的发源之地，这一新的观点给人们一个启示：板下全地幔运动是研究岩石圈板块运动的根本，这是固体地球科学发展中的一个十分重要的发现，给予人们考虑地球动力学的全新思路（许志琴等，2005a）。

3 现代大陆变形动力学——精确追踪重大灾害事件的地球反应

一系列的大陆构造过程，包括造山运动的变形、沉积盆地的形成、矿产资源的富集、地震活动和火山喷发等已经被观察和描述，板块构造理论的发展为解释大陆结构、造山带的起源和地震与火山分布提供了构架，但是引起大陆变形相关的地球深部过程仍然无从知晓。例如，虽然我们知道陆壳不断往外增生，但是对于板块构造的牵引机制，与地球内部的结构性差异、组成性差异、热性差异有什么关联，板块构造应力如何转化为分离的断层，以及是什么控制地震区大小、为什么一些重大地震偶尔会冲击板块内部，下一个类似的重大地震事件何时、何地发生等依然知之甚少。

现代观测技术的发展，使地壳运动在任何时间范围内进行直接测量已经成为可能，对于感知的地壳运动已经可以及时地进行大陆变形的测量。互联遥测地震仪网络已可以对与地震有关的快速运动（分秒级别）进行实时检测和分析，GPS 大地测量法、钻孔应变（borehole strain）和卫星雷达干涉测量法可以精确地测量时间更长（小时到年）的运动，这些运动使应力重新分配到板块边缘及其内部。目前地质年代学新技术使得大跨度时间（涉及地震和火山喷发循环，造山运动和大陆演变）测量达到精确性。

2008 年 5 月 12 日发生的四川汶川大地震是我国近 30 年来损失最惨重、波及范围最广而且援救最困难的一次强烈地震，造成近 8 万人死亡、37 万多人受伤、4500 多万人失去家园，导致巨大的财产损失。这次灾难再一次提醒人们，通过认识大陆地壳断裂带的运动规律和预防地质灾害是我们地球科学工作者刻不容缓的重要责任。汶川大地震发生在龙门山脉，它是由扬子克拉通的西缘在青藏高原向东强烈挤压下重新活化而形成的高山，龙门山脉的主体部分 — 彭灌杂岩就是活化了的扬子克拉通结晶基底。50 ~ 60Ma 以来印度大陆就像一架巨型的推土机，往北使劲地推进，它推起了辽阔的青藏高原，当青藏高原平均海拔高度超过 5000m 之后地壳就很难再增厚。高原内部热的、塑性的、甚至部分熔融的下地壳物质被迫东移，将热量、构造应力和热液流体传递给扬子克拉通的西缘，使那里的岩石变形（褶皱与冲断），形成一条南起泸定和天全，北达广元和陕西勉县一带，长近 500km、宽约 40km ~ 50km、北东走向的龙门山脉。20km 深度以下的龙门山地壳以缓慢的韧性变形每年向东前进几个毫米；而地表到 15km ~ 20km 深度之间则是脆性变形层，不断改变自已状态，以适应龙门山下地壳的韧性位移。龙门山下 20km ~ 25km 深处是脆-韧性转变带，在地震休眠期作韧性或半脆性变形，但在地震时作脆性变形，破裂可以从震源扩传到转变带。显而易见，研究地壳各深度层次的岩石流变学性质及其变形行为对于了解大陆强震的孕育和发生过程具有重要的理论意义、同时对于探索如何更好的预防和减轻地震灾害也具有现实意义。

目前 GPS（卫星定位）技术在地壳运动研究中得到广泛应用，但对 GPS 测量的数据应进行科学解释。GPS 的结果显示龙门山断裂两侧的相对运动速度仅为 1.5 ~ 1.9mm/a，因此前人得出龙门山断裂带不活动或微弱活动的结论（Chen *et al.*，2000；张培震等，2002；Zhang *et al.*，2004；Burchfiel *et al.*，2008）。但仔细分析青藏高原 GPS 图可以发现：汶川地震前已有 4 个 8 级和 10 多个 7 级以上的历史大地震（邓启东等，2007）发生在与刚性的阿拉善地块、鄂尔多斯地块和扬子地块接壤的青藏高原北缘和东缘，在那里 GPS 测量的位移量突然变小或位移方向突然转变（图 2），汶川地震恰位于类似的部位。

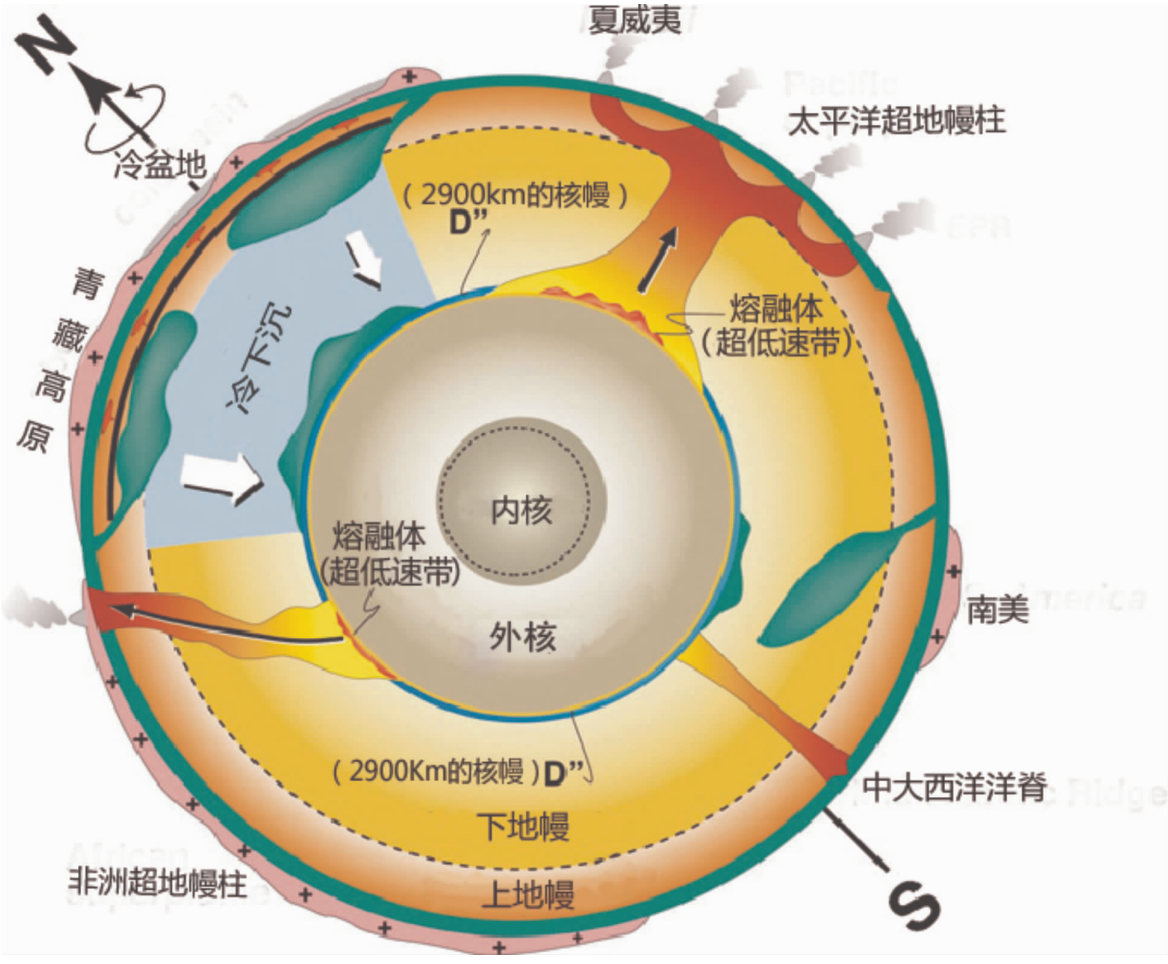

图 1 显示地球中超地幔柱和超级俯冲(或冷下沉)的地幔主要对流模式(据 Maruyama *et al.*, 2007).
Tibet-青藏高原; cold basin-冷盆地; cold dowmweilling-冷下沉; Haweii-夏威夷; Pacific Superplume-太平洋超地幔柱; melt (ULVZ)-熔融体(超低速带); S. America-南美; Mid-AtlanticRidge-中大西洋脊; low mamtle-下地幔; upper mantle-上地幔; D"(2900km 的核幔); Outer core-外核; Inner core-内核; African perplume-非洲超地幔柱

Fig. 1 Major convection pattern of the Earth's mantle showing superplumes and one super-downwelling (modified after Maruyama, 1994)

其实, GPS 数据只反映近十几年来的地面的水平位移, 而龙门山断裂带的主中央断裂——北川—映秀断裂是一条高角度逆冲兼右型走滑性质的断裂,其水平运动分量较小, 加之由于长期受阻于刚性的扬子地块而处于应力聚中的闭锁状态,直到 2008 年 5 月 12 日下午 2 点 28 分才触发猛醒。所以, 那些 GPS 测不到位移或只有很小位移的断裂,可能是危险的断裂, 是会突发强震的地方。

地震灾害的预报目前确实存在很大的难度, 但是人们对自然规律的认识总是有一个从无知到认知的过程。著名美国科学家 Zoback(2007)提出当今活动断裂和地震领域的八大科学问题:

(1)无震和有震条件下断裂滑移的变形机制有什么区别?

(2)为什么断裂滑移有时可导致地震,有时没有地震,有时又处于中间过渡状态,什么因素控制这些过程的相互转变?

(3)地震是如何形成的? 断裂是如何发展、演化或停止的?

(4)地震之前,断裂带或其次级构造有没有前兆现象? 如果有,能否根据钻孔观测建立地震预报或早期预警机制?

(5)控制和能够造成海啸的断裂滑移过程是什么?

(6)断裂过程中特别是在快速的断裂滑移过程中流体压力及其成分的作用如何?

(7)断裂带的渗透性在地震之间和地震之时是如何演化的?

(8)整个地震过程中在断裂带上或在断裂附近的应力的张量怎样变化?

许多科学家们也正在千方百计利用新的科学技术和探索新的途径来提高对地震、火山等地质灾害预警能力,提升对地球内部变形机理的认知程度。美国最近提出实施 EARTHSCOPE 计划,该计划意在详细地揭示北美大陆岩石圈

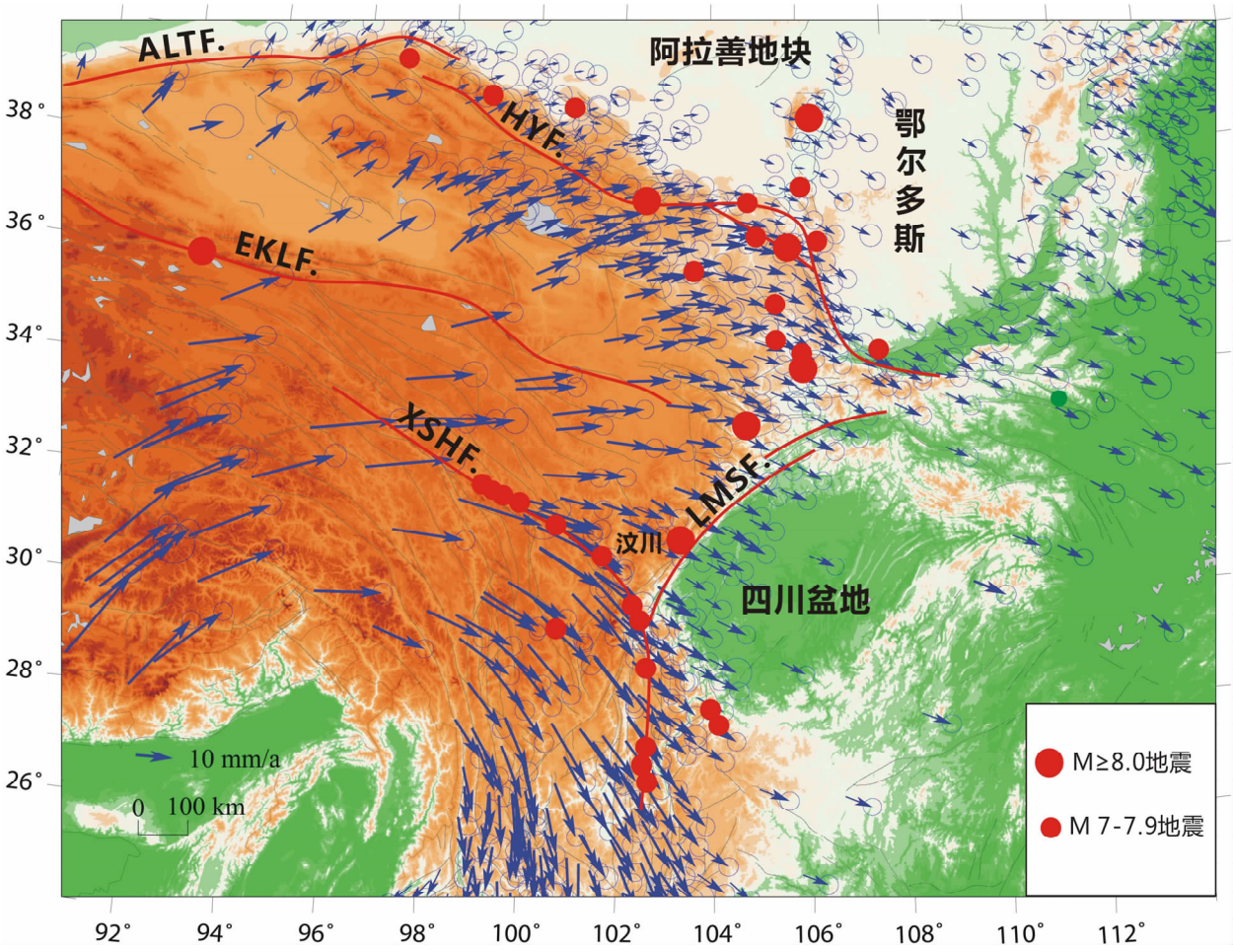

图 2 青藏高原北缘和东缘的 GPS 位移速度(据 Zhang *et al.*, 2004 修改)和 7 级以上地震分布图(据邓起东等,2007 修改)
ALTF.-阿尔金断裂; HYF.-海源断裂; EKLF.-东昆仑断裂; XSHF.-鲜水河断裂; LMSF.-龙门山断裂

Fig. 2 Map of GPS displacement speed (modified after Zhang *et al.*, 2004) and earthquakes (M > 7) distribution map (modified after Deng *et al.*, 2007) at northern and eastern Tibet Plateau

和地球深部构造,提高对地震、火山等地质灾害预警能力,提升对地球内部的认知程度,并通过新的观测技术来确定大陆变形的动力学特征,尤其是对大陆地块边界弥散性应变特征的动力学成因解释,以图建立新的理论。其内容包括:(1) USArray(美国地震台阵):大陆范围内的便携式地震台阵将以高分辨率绘制大陆结构和底层地幔的地图;(2) PBO(板块边界观测站):全球卫星定位系统(GPS)接收器和应变器的固定阵列,绘制不断发生的变形地图,其分辨率达1 毫米级或更高(超过区域基线);(3) InSAR(干涉仪合成孔径雷达):遥感技术将提供广泛地理区域的空间连续应变测量,其分辨率在分米和厘米之间;(4) SAFOD(加利福尼亚州圣安德列斯断层深度观测站):通过圣安德列斯断层的钻孔观测站测量查明引起断层滑动、地震和地壳变形的地表条件。EarthScope 已成为精确追踪构造事件的地球反应的重要手段,为在大陆动力学方面取得重大进展开启了大门。通过 EarthScope 计划进行现代大陆变形的精确测量,揭示地震和火山发生的动力学机制,无疑是大陆动力学研究的一个新起点,具有全球地学科学的先导意义。

1999 年 9 月 21 日,台湾集集地震 (Mw 7.6)发生在台湾中央山脉西缘的南北向的车笼埔(Chelunpu)断裂上。为了理解引起集集地震的断层带的结构和机制,台湾和日本于 2000 年 4 月联合实施了车龙铺钻探项目。新西兰 Alpine 断裂是世界上著名的右旋逆断层,曾发生(Mw7.9)的大地震,新西兰 Alpine 断裂的深部钻探计划将在 2009 年实施,其目的在于研究大型挤压转换板块边界中地震带的活动变形过程和地震成因,并设想在未来的几十年中通过地球物理监测活动断层。日本是地震多发的国家,近 20 年来除重视地震预防和加强应急措施外,还通过科学钻探开展地震机制研究和提高地震预警的能力。2006 年在日本召开来自世界各地的 80 位科学家组成的由大陆科学钻探(ICDP)和大洋科学钻探(IODP)联合会议,重新检验断裂带上科学钻探的工艺,包括应力测量、流体压力测量、磁导率测量、岩芯取样、岩屑取样、流体取样,以及在断裂带及其周围的地表-钻孔地球物理场特征的研究。

4 大陆深俯冲动力学——当前大陆动力学研究的热点

传统的板块构造理论认为,低密度的大陆物质难以再循环进入地幔,因而停留在地表,并被挤压褶皱成一个复杂的拼贴构造。但是超高压变质作用的重大发现(Chopin, 1984),使大陆深俯冲作用成为当代国际地学界研究的热点和前沿发现。

目前全球大陆碰撞造山带的板块汇聚边界上已发现20余条超高压变质带(Liou *et al.*, 2000),这是地球科学发展史和造山带研究史上的一个重大的进展。高压—超高压变质带记录了洋壳和陆壳的深俯冲、碰撞造山及折返的历史全过程,揭示了低密度的陆壳物质,只要其流变强度足够大就可以被俯冲到100km以下的地幔深度,然后又快速折返回地壳。

超高压变质带的发现成为了解板块俯冲、碰撞,造山带的缩短、加厚,以及俯冲深根的形成机制等造山过程动力学必不可少的研究对象,为造山带和造山动力学研究提出了富有挑战性的前沿科学问题。

20余年来超高压变质带的研究,还遗留一些关键的难题尚待解决:大陆地壳究竟能俯冲到多大深度?低密度的大陆壳岩石究竟是如何俯冲到地幔深度,又是如何折返到地表的?超高压变质与壳-幔相互作用及地球物质再循环的关系如何?汇聚板块边缘的深部物质组成、结构、流变学及动力学机制?巨量俯冲物质折返后的去处?由于超高压变质作用记录了洋壳/陆壳深俯冲、碰撞造山及折返的历史过程,因此它是造山带研究的一项重要内容,因此脱离碰撞造山带的大背景和造山作用的长期性、复合性而开展大陆深俯冲和超高压变质岩拆返的研究,很难深入认识超高压变质带深部机理和动力学过程。在我国的大别—苏鲁地区、挪威、欧洲的阿尔卑斯、太平洋中的新加里东带的大量研究,证明了大陆地壳物质的深俯冲和快速折返(Liu *et al.*, 2004),对此科学家们提出了不同的模型来解释大陆物质深俯冲和快速折返的机制(Ernst *et al.*, 1998; Okay and Sengor, 1992; Hacker *et al.*, 2003; 许志琴等, 2005b),但对其中的物理化学过程尚缺乏深刻的认识。

2007年在法国和德国召开了有400名科学家参加的国际第二次俯冲动力学大会,在深入开展大陆俯冲带的塑性流变、大陆俯冲带的地震层析图像和俯冲通道、大陆俯冲带的板片拆偶作用、变质反应对俯冲动力学的影响、大陆俯冲带上部的大陆地壳的变形及动力学熔融和混合岩化过程、大陆俯冲带和上部板片之间相互作用的热—岩石—力学模拟等方面研究的成果。正如世界上许多研究者所强调的,超高压变质岩石是研究大陆造山带的形成与演化、壳幔相互作用以及地球动力学等方面最直接的样品和天然实验室(Maruyama *et al.*, 1996; Liou *et al.*, 1998)。

板块俯冲带也是强烈地震和岩浆活动带(Peacock, 2003; Hacker *et al.*, 2003)。俯冲板块可以将大量流体运送到俯冲带之上的地幔楔,使其发生部分熔融,形成强烈的火山活动和脱气作用,并通过漫长的演化形成大陆地壳(Manning, 2004)。同时,在俯冲带发生的元素循环是导致深部地幔化学与同位素成分不均匀的重要因素,因此俯冲带被称之为"俯冲带工厂"(Subduction factory)(Hacker *et al.*, 2003)。通过世界上最典型大陆造山带中高压、超高压变质岩、岩浆岩以及地幔橄榄岩的构造地质学、岩石学、地球化学和年代学研究,并结合矿物化学、变质反应平衡与不平衡动力学、变质作用温度和压力(P-T)轨迹、流体活动和流体—岩石相互作用,以及矿物(岩石)和流体在相当于俯冲带物理、化学条件下的实验研究,可以系统地揭示大陆造山带的物质组成、原岩类型和形成环境,重塑陆壳岩石深俯冲过程中的物理(PT条件)和化学(矿物、全岩和流体成分)变化,探索超高压极端条件下的流体成分、性状和元素地球化学行为,研究全球物质分异与转换过程,建立大陆俯冲带变质化学地球动力学模型。

中国大陆科学钻探工程在苏鲁超高压变质带上实施,为揭示陆-陆碰撞深根的三维物质组成、结构以及大陆深俯冲和折返过程的流变学、流体作用、壳-幔物质交换和PTt轨迹等提供了不可多得的实例(许志琴等,2007)。

5 "中下地壳的隧道流"——揭示地壳内部的运动

陆-陆碰撞可以产生大规模的地壳变形,而人们对地壳深部(中下地壳)的变形行为知之甚少。一个建筑在地质学、流变学、物理学以及实验岩石学和模拟实验的综合研究基础上的中下地壳隧道流(Channel flow)的新概念的提出,揭示了中下地壳内部的侧向流动,对于认识浅部地壳行为以及深部和浅部作用的耦合提供了新的思考。

隧道流(Channel flow)意旨在上、下两个近乎刚性的板片地壳之间存在着一层塑性流动强度极低(或发生部分熔融)的岩层,此层岩石的韧性大变形犹如"隧道"中流动的流体。在高原中由于在侧向上存在静岩压力的变化梯度,这些粘性"流体"可以从高原的内部向其边缘流动(Batchlor, 2000; Turcotte and Schubert, 2002)。例如,印度大陆板块向北漂移并和欧亚大陆板块碰撞挤压,形成了世界屋脊喜马拉雅山和巨大的青藏高原。青藏高原深部地壳的岩石在高温高压下发生部分熔融,在巨大的青藏高原块体的挤压下向高原的周缘挤流。古老的四川盆地下面是强硬的岩石圈,深深地扎根于其下的上地幔之中,强烈地阻挡着青藏高原向东扩张。在青藏高原扩张和四川盆地反扩张的前沿阵地,于是就挤压形成了高耸的龙门山,2008年年四川汶川大地震正是人类遭遇龙门山造山运动的悲惨一幕。

隧道流的位移量取决于流体隧道的形态、高温岩石粘度和部分熔融的程度以及板块边界的位移速率。在隧道壁不平行的情况下,如果流体粘度足够低,差应力可以引起隧道内高速率的物质浮力折返流动(Mancktelow, 1995; Gerya and Stockhert, 2002)。隧道流模型可以简单地看着是由两种流体

的端员模型混合组成的速度场：(1)库特流(Couette flow)(即简单剪切流)位于运动板块之间，隧道周围的剪切作用产生均一的涡度；(2)泊松流(Poiseuille flow)(也被称作管流"Pipe-flow"效应)位于静止板块之间，由于压力梯度产生隧道中部的最大速度以及隧道上部和底部的反方向剪切矢量(Mancktelow，1995)造成。

隧道流的重要鉴别标志是：(1)低粘度的地壳物质被高粘度的岩石所包围；(2)在隧道流两侧的几何边界上，逆冲断层和正断层(剪切带)同时运动；(3)沿顶部剪切带的动态反转即俯冲导致的早期反转运动，由回流引起的正向剪切，以及古隧道挤出和折返过程中产生的脆性正断层运动；(4)隧道和挤压板块的普遍剪切。

近年来位于运动和静止板块边缘的隧道流的概念已被广泛地应用在地质动力过程中，包括：(1)软流圈逆流研究；(2)大陆伸展机制研究；(3)大陆高原形成及演化过程；(4)大型陆-陆碰撞造山作用的构造研究；(5)大型热碰撞造山的变质过程研究；(6)静岩超压状态下的俯冲带流体动态分析；(7)有膏盐层存在的被动陆缘附近的变形现象。

2004 年 12 月在伯灵顿召开由伦敦地质学会主办的"大陆碰撞带中-下地壳的隧道流、挤出和折返"大会，着重讨论了喜马拉雅—西藏碰撞系新生代地壳隧道流问题。有关新喜马拉雅中地壳岩石的隧道流或韧性剪切挤出方面的证据(Grujic *et al.*，1996，2002；Searl and Szulc，2005；Carosi *et al.*，2006；Holliste and Grujic，2006；Jessup *et al.*，2006；Searle *et al.*，2006)以及与之相关的模型(Beaumont *et al.*，2001，2004，2006；Godin *et al.*，2006；Jamieson *et al.*，2004，2006)已经得到了充分地阐述和研究(例如，Hilley *et al.*，2005；Harrison，2006；Williams *et al.*，2006)(图 3)，McCann *et al.*(2003)还提出了大陆下地壳流动的新理论来解释地形特征与浅部地质构造的脱耦现象。也有人对我国青藏高原东缘和南缘的野外变形构造研究推论下地壳流变的存在，并认为喜马拉雅和龙门山的崛起与新生代时期下地壳物质的挤出有关(Burchfiel，2004)。作者在喜马拉雅和龙门山的崛起研究中，发现龙门山的隆升与白垩纪时期龙门山前震旦纪杂岩组成的中地壳物质的脆性挤出有关，是松潘甘孜地体与扬子地体之间的陆内俯冲的产物(许志琴等，2007)；而喜马拉雅东构造结南迦巴瓦变质体中含下地壳麻粒岩相变质体的隆升是塑性挤出机制所致(许志琴等，2008)。基于这些最新的研究成果，喜马拉雅隧道流是否能够普遍运用，以及应用于其他山脉，尚需要进一步研究证明。另外，老的造山带中的实例却仍旧很少(Jamieson *et al.*，2004；White *et al.*，2004；Williams and Jiang，2005；Hatcher and Merschat，2006；Xypolias and Kokkalas，2006)。隧道流在陆-陆碰撞过程模式建立方面的应用正在逐步细化，但仍存在一些问题和矛盾。

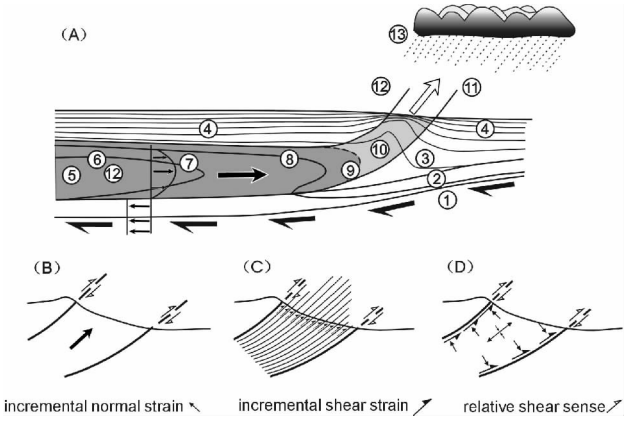

图 3　中-下地壳的隧道流模式(据 Godin *et al.*，2006)
incremental normal strain-递增的正应力；incremental shear strain-递增的剪切应变；relative shear sense-相对剪切方向
Fig. 3　Channel flow model of mid-lower crust (after from Godin *et al.*，2006)

6　复合造山带和复合造山动力学——固体地球科学的研究重心

造山带一直是固体地球科学的研究重心，在全球大陆范围内，显生宙以来的巨型造山带的面积占 30% 以上。这些巨大的造山带不仅记录了板块会聚造山的历史，而且由于板块扩张脊(洋脊)物质的加入，也记载了板块裂解、洋盆扩张、俯冲和消亡的过程。

著名阿尔卑斯造山带经过 100 多年的研究已成为全球造山带研究的"经典"，喜马拉雅山则是正在崛起的、年轻的和活动的造山带，人们对古造山带的许多认识和理论可从这里得到启迪、印证或修正。地质学长期观测表明，稳定大陆克拉通的边缘是长期活动的、宽度可达 1000km 构造活动带，这些活动带覆盖了几乎大陆总面积的四分之一。地质学家通过对大陆造山带的解剖，认识到造山形变不限于会聚板块边缘的狭长地带内，而可以扩展到板内，达数百乃至上千千米的活动域。

地球上的许多复合造山带都是构筑在长期活动带(>300Ma)之上。例如，发育在太平洋东岸、美洲大陆西海岸宽近 1000km、长度超过 10000km 的科迪勒拉造山带就是长期活动的复合造山带的典型代表，在 200Ma 之前，该造山带经历过如下几期造山运动：奥陶纪(425Ma)火山岛与北美碰撞引起劳伦边缘的俯冲和蛇绿岩套仰冲(Taconic 造山运动)；包括 Avalonia 在内的冈瓦纳地体增生(Salinic 造山运动)；泥盆纪(380Ma)时期 Avalonia 小陆块与北美碰撞(Acadian 造山运动)，以及晚古生代(约 300Ma)非洲大陆与北美碰撞即与 Pangea 联合古陆形成有关的 Alleghenian 造山运动。青藏高原也是一个巨型复合造山拼贴体，它的形成经历了早古生代、三叠纪、晚中生代和新生代造山带的多期拼贴过程，有人称其为"造山形成的高原"(Dewey，2005)，它明显地指示了亚洲大陆自北往南的增生过程。喜马拉雅只是其中最后形成的一条造山带，研究表明，现代喜马拉雅造山带的前身是泛非-早古生代形成的原始喜马拉雅造山带(许志琴等，2005a)。

但是,目前对地球上绝大部分复合造山带的长期活动性和"长寿"原因并不清楚,复合造山过程和复合造山动力学机制已不能用简单的"碰撞造山"的理论来予以说明。Hyndman *et al.* (2005)根据科迪勒拉造山带具有长期弱化、低强度、薄和热的岩石圈特征,提出浅的软流圈对流使宽阔的弧后域变热的观点,认为由造山带中造山花岗岩基、高级变质作用和韧性变形所指示的造山热能来自原先的弧后热岩石圈,而不是来自于造山变形过程本身(Hyndman *et al.*, 2005)(图2)。

近年来大陆造山带地球物理研究揭示了造山带岩石圈的物理状态具有流变学分层结构,壳内、幔内的低速高导层,古造山带无山根,莫霍面呈水平状,软流圈的巨大起伏,岩石圈地幔的减薄,地壳、地幔的非均一性与各向异性等特征。为此,造山动力学的假说与推断应运而生,如地幔对流、软流圈上侵构造、拆沉作用、底侵作用、下地壳的水平流变、大陆壳的重力驱张、地壳和上地幔的藕合与解藕关系等(Molnar *et al.*, 1988; Platt and Vissers, 1989; Bird, 1991; Pysklywec and Cruden, 2004; Pysklywec and Beaumont, 2004),并且提出地壳的非均匀性和流变性的多样性,使人们认识到造山带形成力源的复杂性和多源性。

由此可见,造山带的研究已经摆脱了传统构造地质学和经典板块构造观念的束缚。国内外研究现状和趋势表明,全球造山带的研究正面临一个新的起点,表现为由单一造山带向复合造山带研究的转向,由造山带浅部结构向深部结构综合研究的转向,以及由造山带的造山类型划分和造山作用描述的研究向造山过程、变形机制和造山动力学研究的聚焦。在技术路线上,已由单学科研究向多学科(地质、地球物理、地球化学、地貌、环境、气候、资源、灾害等)的系统集成研究扩展。复合造山和复合造山动力学的研究已成为大陆动力学理论创新的重要阵地。

7 盆-山耦合——揭示板块运动和大陆增生作用重要切入点

山脉和盆地是地球上最引人瞩目的地貌特征。二者的耦合,与构造应力关系十分密切(李继亮等,2003)。20世纪90年代以前,大部分研究偏重沉积盆地本身,并开始注重盆地的构造分类,Paul Mann *et al.* (2003) 对877个大油田进行构造分类:大陆裂谷及其上覆坳陷型盆地或"牛头式盆地"、面向主要洋盆的被动大陆边缘盆地、走滑边缘盆地、陆陆碰撞边缘盆地、地体加积-陆弧碰撞或浅俯冲形成的大陆碰撞边缘盆地、俯冲边缘的弧前盆地和弧间盆地。自90年代以来,大陆动力学计划把盆地与山脉作为有机整体并视为国际地学界研究的一个重要研究领域,并实施了全球地学断面(GGT)计划,改变了盆地和山脉分别进行研究的历史。但对于盆-山耦合过程、机理和耦合过程中沉积作用的演化,迄今尚缺乏系统的分析和研究。

从过去的研究重点看,盆-山耦合研究主要关注沉积盆地对相邻造山带的沉积响应关系,而对盆地和山脉的演化历史,包括构造演化、沉降与沉积演化、侵蚀作用乃至岩石圈的有效弹性厚度和流变学厚度的全面研究相对欠缺。

大陆造山带内沉积盆地构造原型恢复是造山带研究的难点和前沿科学问题之一(Busby and Ingersoll, 1995; McCann *et al.*, 2003)。沉积盆地及其充填物组成的研究始终是造山带研究过程中不可忽视的内容,而且是盆-山耦合研究的一项重要内容(Haughton *et al.*, 1991; Dickinson, 1993; Link *et al.*, 2005)。现代板块构造理论将沉积盆地与造山作用紧密联系起来,并按照造山作用类型对沉积盆地进行了分类(Busby and Ingersoll, 1995),这些不同类型沉积盆地的形成发展详细记录了板块相互作用及造山带的演化历史(McCann *et al.*, 2003)。大洋板块俯冲消减作用、陆壳的拼合增生作用、各类地质体的碰撞作用以及造山带晚期的大规模推覆和走滑作用使得造山带内不同大地构造单元发生肢解和破坏(Moores and Twiss, 1995)。沉积盆地作为造山带最为重要的大地构造单元之一,在造山带演化过程中也毫不例外地因强烈的构造变形而使得其原型发生破坏,从而使得造山带内沉积盆地的构造原型恢复难度增大,进而影响着造山带构造恢复研究工作。

大陆造山带内部及相邻沉积盆地内沉积序列的物质成分变化客观记录了盆地物源区构造演化特征的同时,也客观的记录了盆地相邻造山带的造山作用机制(Busby and Ingersoll, 1995)。沉积盆地沉积物物源分析实际是在盆地内沉积物碎屑组成、性质和结构变化及其原因综合研究的基础上,对沉积盆地构造环境、源区特征、古气候和古地理演变过程的精细反演,以及对盆地与相邻造山带时空耦合关系的客观再现(Zuffa,1985)。在此研究基础上,结合相邻造山带或山脉的研究,按照沉积盆地构造原型分类与现代板块运动相互关系(Ingersoll and Busby, 1995)进行沉积盆地原型恢复,进而反演沉积盆地动力学演化机制,重塑盆地与山脉之间的耦合关系,探讨沉积盆地对大陆生长过程中的物质变化记录,为大陆动力学研究提供重要的沉积学依据。

总之,着眼于大陆造山带中相关沉积盆地是研究大陆动力学的重要方面,也是揭示板块构造作用和大陆增生作用的主要切入点之一;以研究大陆造山带内沉积盆地构造原型恢复这一国际前沿问题为研究目标,不仅可以丰富古大陆边缘和大洋的沉积盆地分析的研究理论和方法,而且可为造山带结构和构造古地理时空演化特征的详细研究提供重要的沉积学依据;以沉积盆地内碎屑沉积记录为主要切入点,利用碎屑组成及其所反映的动力学信息是综合解析盆地演化、古地理重建、古气候恢复等研究内容的前提和发展趋势。

8 地幔物质和地幔动力学—固体地球科学研究的新领域

当今世界,人类更加渴望了解地球深部物质组成和结构,追索地球表层活动的深部根源。因此,地幔物质组成和地幔动力学成为固体地球科学研究的新领域。

长期以来,人们主要通过金伯利岩、钾镁煌斑岩及其金

刚石包体、玄武岩中的橄榄岩包体，以及榴辉岩—石榴石二辉橄榄岩等来研究和探索自然界的深部地幔矿物。人们从金伯利岩金刚石中的极少数包体中发现少量深部地幔信息（Haggerty，1994）。其次利用天体化学和比较行星学的方法，通过对陨石特别是含有许多超高压矿物的石陨石的研究，与地幔相对比，深入了解地球深部物质的组成和存在方式。利用高温高压实验及地球物理方法，推测出深部地球物质的组成、存在方式、物理化学条件、物质循环甚至动力学演化方式。我国学者在蛇绿岩铬铁矿中发现金刚石（白文吉等，2001）；和柯石英地幔超高压矿物（Yang *et al.*，2007），推测它们来自大于300km深度的地幔深部。研究还表明，极地乌拉尔蛇绿岩铬铁矿中也存在一个可以与罗布莎对比的深部地幔矿物群（杨经绥等，2007）。罗布莎和乌拉尔中的超高温、超高压矿物可能来自深部地幔，被包裹在铬铁矿中，通过地幔柱的上升被带到浅部地幔。

对地震观测的低速带和各向异性的研究，表明熔融可以发生在深部地幔。地幔深部的熔融对俯冲下去的岩石圈物质通过地幔对流到地幔柱的上升起到了关键作用。地幔柱上升造成压力的改变，会影响熔融体的粘度和物理化学性质，改变岩浆的成分及岩浆矿床的形成。

地震层析的研究表明，板块边界俯冲下去的大陆地壳可以穿过670km深度的地幔不连续面，达至2900km的核幔边界的“D”层，引起核-幔的相互作用，通过地幔对流，有可能再上升，记录了地幔底辟和上升的历史。另一方面，俯冲岩片也会造成地幔的不均匀性，尤其俯冲水的作用，以及有机和无机物质的循环。罗布莎蛇绿岩的铬铁矿中不仅仅发现来自300km深度的超高压矿物，还发现了古老的地壳锆石，锆石中保留石英和长石的包裹体，其年龄为中元古代，远远早于蛇绿岩的中生代形成年龄。

当前国际上对地幔柱的研究与日俱进，其中一个很大的原因，不仅仅是人们在地球上发现越来越多的地幔柱存在的证据，例如，在夏威夷玄武岩包裹体中发现金刚石等深部地幔矿物证据（Wirth and Rocholl，2003），人们还发现火星和金星上存在地幔柱的证据（Condie，2001）。尤其，上世纪90年代后期，地球物理学中地震资料的分辨率不断提高，使我们能够第一次绘制出地幔图，证明地幔确实是很不均匀的，拆沉岩片能够达到核幔边界的深度，而像夏威夷和冰岛地幔柱的确有很深的根存在。地球上地幔柱直径达数千千米以上，深度达2900km的核幔边界（CMB），其造成地幔物质由深部到浅部的运移（Morgan，1972；Maruyama *et al.*，2007）。通常认为大火山岩省的形成与地幔柱活动密切相关，而与板块构造没有直接关系（Carlson，1991；Coffin and Eldholm，1994）。

地幔柱所表现的地幔动力学与大陆深俯冲所表现的大陆动力学与是地球动力学的两大体系，它们发生在地球的不同构造部位，地震层析显示岩石圈可以俯冲到地球的核幔边界一带，超地幔柱则可以产自核幔边界，将深部的物质运移到浅部，是两者的共同作用，造成了地球物质的大循环，制约了地球的起源和演化，促成了地球上板块增生和消亡，造就了我们今天所见的地球。

9 全球大陆科学钻探整合计划——探测地球的新起点

大陆科学钻探被誉为“伸入地球内部的望远镜”，是获取地壳深部信息的直接方法，它所得到的深部物质组成和结构的真实、可靠的依据是地球科学发展和人类认识地球不可缺少的重要基础。

大陆科学钻探实施40多年来，使得人类在了解和认识大陆的板块运动、地壳应力和地震、火山过程、深部资源、生命起源以及全球变化等诸多方面获得了巨大的成功，所取得的举世瞩目的成绩使人们越来越认识到，为了人类的生存和发展，通过科学钻探直接观察地球，了解地球内部组成、结构、构造和动力学，了解与地质环境、灾害有关的信息，以便充分开发和利用地下资源，有效地保护资源和减轻地震灾害，是一条重要的和有效的科学途径。

国际大陆科学钻探计划（ICDP）于1996年在全球开始实施，中国为三大发起国（德、美、中）之一。目前，正在实施的国际大陆科学钻探项目有20余项，主要研究领域包括板块构造、火山与地震活动、全球环境与气候变化、陨石撞击与灾变事件、地热与流体系统和大陆与地幔动力学等。目前大陆科学钻探已在全球形成宏伟的整合计划，并与国际大洋科学钻探联手，意味着一个探测地球的新时代的来临。

中国大陆科学钻探工程是当前实施的全球大陆科学钻探计划20个项目中最大也是最深（5000m）的科钻井，它位于世界著名的中国中央超高压变质带东部的连云港市东海县，以解决板块会聚边界的大陆深俯冲及地幔动力学为科学目标，受到国际地学界高度瞩目。最近我国又开展了青海湖环境科学钻探、柴达木环境资源科学钻探以及松辽盆地白垩纪科学钻探，彰显中国科学钻探事业方兴未艾。

国际大陆科学钻探中国委员会（ICDP-CHINA）在2006年根据中国大陆地质关键问题，特别是结合当前中国经济发展与社会需求，提出中国大陆科学钻探工程10年长期规划的研究主题：复合沉积盆地和油气资源、矿床成因、大型活动断裂与地震灾害、湖泊、冰川与气候、会聚板块边界与超高压变质带、地史时期的生物灭绝与环境变化 等。提出大陆科学钻探工程整合计划包括超深钻（>8000m）、深钻（4000m~8000m）、中钻（4000m~1000m）和浅钻（<1000m）计划。中国在今后10年内，重点围绕复合沉积盆地和油气资源、大型活动断裂与地震灾害、矿床成因、湖泊、冰川与气候以及重大地质科学关键问题开启中国科钻整合计划。建议实施中国第一口含油气盆地超深井，实施与中国大型活动断裂有关的钻探计划、在大型矿集区实施与矿产资源有关的中浅科学钻井，，实施与地质环境有关的科学中、浅钻，实施以其它重大科学目标的科学钻井，已完成的5158m深的中国大陆科学井将建成中国大陆科学钻探东海长期观测站，并计划和地面的地震台阵系统结合。

汶川特大地震波及半个亚洲，震撼整个中国。汶川特大地震的发震断裂位于青藏高原东缘龙门山断裂带，震级8.0，

最大烈度 11,至今余震 13800 余次,最大余震 6.4 级,余震范围长 350km,宽 80km,地震引起的次生灾害极其严重。我们认为在汶川特大地震发生及其余震尚在继续的特殊时期,快速实施汶川地震断裂带的科学钻探(WFSD),通过对温度、地震波速度和发震断层渗透性等物理参数的精确测量,有可能获取有关地震愈合和破裂周期、地震摩擦热、岩脉填充、渗透性、流体作用、应力状态等重要基础数据,大地震后的快速钻探是研究地震机制和捕捉余震直接信息的有效方法之一。

中国是一个地质大国,作为国际大陆科学钻探委员会发起国之一,应站在全球视野,积极抢占国际地学前沿和关键技术的制高点;要从国家加强地质工作的大局出发,谋划中国大陆科学钻探工作;将中国地质科学的发展和大陆科学钻探事业推进到一个新的阶段,促进我国地球科学研究与资源开发、环境保护、灾害预警与预防的紧密结合,促进国家中长期科学和技术发展规划纲要中提出的地球深部钻探计划的实现。

10 大陆动力学新理论体系的建立和服务于人类需求

今天的地球科学已发展到了一个依靠现代高新技术、进行多学科搭载和交叉、新理论/新观念不断涌现的时代。大陆动力学作为研究大陆组成、结构、行为、动态演化及深部驱动机制的新兴学科,将引导人们用活动的、运动的、演化和机制的理念,全方位来研究复杂的大陆。

回归到大陆动力学计划提出的科学问题的初衷,需要回答的基本问题:大陆的特征是什么?大陆如何分裂、分离、重新固结?哪些作用控制着大陆的组成和生长?为什么大陆会保存下来?在大陆变形中出现怎样的物理过程?大陆与板块系统及整个地球系统如何相互作用?岩浆在哪里生成,当它们通过地壳上升是如何演变?大量的热液又是沿着什么通道堆积成矿以及怎样捕获深埋资源的有效信息?来自板块运动和地幔的作用力是怎样同地壳变形、火山活动和地震现象耦合?大陆中的哪些动力学相互作用控制了沉积盆地的形成?等。大陆动力学研究要阐明的问题都涉及了从上地壳到地球的深部,从千年时间尺度到几十亿年时间尺度,从地球表面的几千米到数百千米的范围。这是一个以建立大陆动力学新理论体系为最终目的的新历史阶段的庞大科研计划,是固体地球科学未来发展方向。

逐步建立大陆动力学新理论体系,是解决 21 世纪人类面临的资源、环境和灾害重大问题的新的理论基础,也将是几代人需要做的事情。目前出现的新的理论和见识,是提供我们对地球科学发展的思考,许多问题需要在实际研究和调查中验证和修正,并提出更新的理念。

大陆是纪录 45 亿年地球动力学历史的博物馆,是地质调查的用武之地,是矿产和资源的源地,也是我们生活的地方。中国大陆具有复杂的岩石圈结构和多种类型的造山带和沉积盆地,有令世界地学家仰慕的大陆动力学研究的野外实验室和窗口,如青藏高原、中国中央巨型复合造山带及超高压变质带,中国也是地震多发的国家。在中国的地域上进行大陆动力学的研究,对比全球,走上国际舞台,是一个长期的任务。只要我们不懈的努力和精心竭力的研究,我国地球科学家完全有可能在大陆动力学研究方面做出具有国际先进水平的成果,对创新地球科学理论作出重要贡献。

以"大陆动力学"为核心的固体地球科学的创新性研究,不仅为了发展大陆动力学新理论、新方法和新技术,也为了服务于社会需求,为矿产资源、能源、灾害和环境的评价和基础关键问题提供科学依据。在国家中长期科学发展规划中,明确提出了我国矿产资源(能源)领域的科技发展目标,紧缺战略矿产资源的寻找是其中的核心任务之一。胡锦涛总书记在今年 6 月 23 日两院院士大会上强调对于地震灾害要提高监视和预警的能力,加强对地震孕育、发生、发展和机理的研究。在不同尺度上,以地球科学系统观、整体观为指导思想,开展大陆动力学演化与矿产资源和能源的形成过程、分布规律和评价的综合研究,解决矿产资源和能源发现和利用中的关键科学问题,特别关注地震灾害给人类带来的严重灾难,更加重视活动断裂带以及地震形成机理的研究,回应我国科学技术发展、国民经济建设和社会迫切需求的目标。

后记 在关注大陆动力学发展的前提下,作者根据所了解的国内外研究态势,进行了思考,仅供同行参考,不当之处请指正。

References

Bai WJ, Yang JS, Robinson P, Fang QS, Zhang ZM, Yan BG and Hu XF. 2001. Study of diamonds from chromitites in the Luobusa ophiolite, Tibet. Acta Geologica Sinica, 75(3): 404 – 409 (in Chinese with English abstract)

Batchelor GK. 2000. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press

Beaumont C, Jamieson RA, Nguyen MH and Lee B. 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. Nature, 414: 738 – 742

Beaumont C, Jamieson RA, Nguyen MH and Medvedev S. 2004. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. Journal of Geophysical Research, 109. DOI: 10.1029/2003JB002809

Beaumont C, Nguyen MH, Jamieson RA and Ellis S. 2006. Crustal flow models in large hot orogens. In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 91 – 145

Bird P. 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography in the isostatic limit. Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets, 96: 10,275 – 10,286

Burchfiel BC. 2004. New technology: New geological logical challenges. GSA Today, 14: 4 – 9

Burchfiel, LH Royden, RD van der Hilst and Hager BH. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. GSA Today, 18(7): 4 – 11

Busby CJ and Ingersoll RV. 1995. Tectonics of Sedimentary Basins. Blackwell Science Inc. Cambridge, Massachusett, 578

Carlson DW. 1991. Physical and chemical evidence on the cause and source characteristics of flood basalt volcanism. Australian Journal of Earth Science, 38: 525 – 544

Carosi R, Montomoli C, Rubatto D and Visona D. 2006. Normal-sense shear zones in the core of the Higher Himalayan Crystallines (Bhutan Himalayas): Evidence for extrusion? In: Law RD, Searle MP and Godin (eds.). Channel flow, Ductile extrusion and exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 425 – 444

Chen Z, Burchfiel BC, Liu Y, King W, Royden LH, Tang W, Wang E, Zhao J and Zhang X. 2000. Global Positioning System measurements from esstern Tibent and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. Journal of Geophysical Research, 105: 16215 – 16227

Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high grade pelitie blueschists of the Western Alps: A first record and some consequences. Contrib. Mineral. Petrol., 86: 107 – 118

Coffin MF and Eldholm O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimentions and external consequences. Reviews of Geophysics, 32: 1 – 36

Condie KC. 2001. Mantle Plumes and Ttheir Record in Earth History. Cambridge University Press

Deng QD, Ran YK, Yang XP, Min W, Chu QZ. 2007. Map of Active Tectonics in China. Beijing: Seismological Press (in Chinese)

Dewey JF. 2005. Orogeny can be very short. Proceeding of the National Academy of Sciences, 102: 15286 – 15293

Dickinson WR. 1993. Basin geodynamics. Basin Research, 5:195 – 196

Ernst WG, Liou JG., Green HW, *et al.* 1998. Ultra-high pressure metamorphism and Geodynamics in collision-type orogenci belts. AGU 1998 Fall Meeting Abstracts, Transections EOS, 79: 970, 982,988

Gerya TV and Stockhert B. 2002. Exhumation rates of high pressure metamorphic rocks in subduction channels: The effect of rheologh. Geophysical Research Letters, 29. DOI: 10.1029/2001GL014307

Godin L, Gleeson TP, Searle MP, Ullrich TD and Parrish RR. 2006. Locking of southward extrusion in favour of rapid crustal-scale bucking of the Greater Nepal. In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 269 – 292

Grandt SP, Hilst RD and Widiyantor S. 1997. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. Nature, 386: 578 – 584

Grujic D, Casey M, Davidson C, Hollister LS, Kundig R, Pavlis T and Schmid S. 1996. Ductile extrusion of the Higher Himalayan Crystalline in Bhutan: Evidence from quartz micro-fabrics. Tectonophysics, 260: 21 – 43

Grujic D, Hollister L and Parish R. 2002. Himalayan metamorphic sequence as an orogenic channel: Insight from Bhutan. Earth and Planetary Science Letters, 198: 177 – 191

Hacker BR, Simon MP, Geoffrey AA and Stephen DH. 2003. Subduction factory: 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? Journal of Geophysical Research, 108 (B1). DOI: 10. 1029/2001JB001129

Haggerty SE. 1994. Superkimberlites: A geodynamic diamond window to the Earth's core. Earth and Planetary Science Letters, 122 (1 – 2): 57 – 69

Harrision TM. 2006. Did the Himalayan Crystallines extrude partially molten from beneath the Tibetan Plateau? In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 237 – 254

Hatcher RD and Merschat AJ. 2006. The Appalachian Inner Piedmont: An exhumed strike-parallel, tectonically forced orogenic channel. In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 517 – 541

Haughton PDW, Todd SP and Morton AC. 1991. Sedimentary provenance studies. Geological Society, London, Special Publications, 57: 1 – 11

Hilley GE, Burgmann R, Zhang PZ and Molnar P. 2005. Bayesian inference of plastosphere viscosities near the Kunlun Fault, northern Tibet. Geophysical Research Letters, 32, L01302. DOI: 01310. 01029/02004GL021658

Hollister LS and Grujic D. 2006. Puled channel flow in Bhutan. In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 415 – 423

Hyndman RD, Currie CA and Mazzotti SP. 2005. Subduction zone backarcs, mobile belts, and orogenic heat. GSA Today, 15 (2). DOI: 10.1130/1052 – 5173(2005)015

Ingersoll RV and Busby CJ. 1995. Tectonics of Sedimentary Basins. Cambridge: Blackwell Science, 1 – 51

Jamieson RA, Beaumont C, Medvedev S and Nguyen MH. 2004. Crustal channel flows: 2. Numrical models with implications for metamorphism in the Himalayan-Tibetan Orogen. Journal of Geophysical Research, 109. DOI: 10.1029/2003JB002811

Jamieson RA, Beaumont C, Nguyen MH and Grujic D. 2006. Provenace of the Greater Himalayan Sequence and associated rocks: Predictions of channel flow models. In: Law RD, Searle MP and Godin, L (eds.). Channel flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 165 – 182

Jessup MJ, Law RD, Searle MP and Hubbard MS. 2006. Structural evolution and vorticity of flow during extrusion and exhumation of the Greater Himalayan Slab, Mount Everest massif, Tibet/Nepal: Implications for orogen-scale flow partitioning. In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 379 – 414

Ji SC, Wang Q and Xia B. 2002. Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks and Ores. Montreal: Polytechnic International Press

Kohlstedt DL, Evans B and Mackwell SJ. 1995. Strength of the lithosphere: Constraints imposed by laboratory experiments. Journal of Geophysical Research, 100: 17587 – 17602

Link PK, Mahoney JB and Fanning CM. 2005. Isotopic determination of sediment provenance: Techniques and applications. Sedimentary geology, 182:1 – 2

Liou JG, Hacker BR and Zhang RY. 2000. Into the forbidden zone. Science, 287: 1215 – 1216

Liou JG, Maruyama SM and Cong BL. 1998. Introdution to goedynamics for high-and ultrahigh-pressure Metamorphism. Island Arc, 7: 1 – 5

Liu J, Klinger Y, Sieh K and Rubin C. 2004. Six similar, sequential ruptures of the San Andreas fault, Carrizo Plain, California. Geology, 32(8): 649 – 652

Li JL, Xiao WJ and Yan Z. 2003. Basin – range coupling and its sedimentation. Acta Sedmentologica Sinica, 21 (1): 52 – 59 (in Chinese with English abstract) Mancktelow NS. 1995. Nonlithostatic pressure during sediment subduction and the development and exhumation of high pressure metamorphic rocks. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 100: 571 – 583

Manning CE. 2004. The chemistry of subduction-zone fluids. Earth and Planetary Science Letters, 223(1 – 2):1 – 16

Maruyama S, Liou JG and Terabayashi M. 1996. Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. International Geology Review, 38: 485 – 594

Maruyama S, Santosh M and Zhao D. 2007. Superplume, supercontinent and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the Core-Mantle Boundary. Gondwana Research, 11: 7 – 37

McCann T, Saintot A, Chalot-Prat, Kitchka F, Fokin AP and Alekseev A. 2003. Evolution of the southern margin of the Donbas (Ukraine), from Devonian to Early Carboniferous times. In: McCann T and Saintot A. (eds.). Tracing Tectonic Deformation Using the Sedimentary Record. Geological Society, London, Special Publications, 208: 117 – 135

Molnar P, Pardo-Casas F and Stock J. 1988. The Cenozoic and Late Cretaceous evolution of the India Ocean Basin: Uncertainties in the reconstructed positions of the Indian, African and Antarctic plates.

Basin Research, 1: 23 – 40
Moores EM and Twiss R J. 1995. Tectonics. New York: W H Freeman and Company, 130 – 154
Morgan WJ. 1972. Deep mantle convection plumes and plate motions. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56(2): 203 – 213
Mann P, Gahagan L and Gordon MB. 2003. Tectonic setting of the world's giant oil and gas fields. In: Halbouty MT (ed.). Giant Oil and Gas Fields of the Decade 1990 – 1999, AAPG Memoir 78, Tulsa: AA PG: 15 – 105
Okay AI and Sengor. AM Celal 1992. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. Geology, 20: 411 – 414
Peacock DC. 2003. Scaling of transfer zones in the British Isles. Journal of Structural Geology, 25(10):1561 – 1567
Platt JP and Vissers RL. 1989. Extensional collapse of thickened continental lithosphere: A working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar Arc. Geology, 17: 540 – 543
Pysklywec RN and Beaumont C. 2004. Intraplate tectonics : Feedback between radioactive thermal weakening and crustal deformation driven by mantle lithosphere instablitities. Earth Planet. Sci. Lett., 221: 275 – 292
Pysklywec RN and Cruden AR. 2004. Coupled crust-mantle dynamics and intraplate tectonics: Two-dimensional numerical and three-dimensional analogue modeling. Geochem. Geophys. Geosyst., 5, Q10003. DOI: 10.1029/2004GC000748
Searle MP and Szulc AG. 2005. Channel flow and ductile extrusion of the High Himalayan slab-the Kangchenjunga-Darjeeling profile, Sikkim Himalaya. Journal of Asian Earth Sciences, 25: 173 – 185
Searle MP, Law RD and Jessup MJ. 2006. Crustal structure, restoration and evolution of the Greater Himalaya in Nepal-South Tibet: implication for channel folw and ductile extrusion of the middle crust. In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 355 – 378
Turcotte DL and Schubert G. 2002. Geodynamics. Cambridge: Cambridge University Press
Van der Voo R, *et al*. 1999. Tethyan Subducted Slabs under India. 171: 7 – 20
White JC, Copeland DC, St-Onge MC, Wodijka N and Scott DJ. 2004. Channel flow in the Paleoproterozoic: The kinematics of cratonic collision and exhumation, SW Baffin Island, Canada (abstract). In: Searle, MP, Law RD and Godin L (eds.). Channel Flow, Ductile Extrusion and Exhumation of Lower-Mid crust in Continental Collision Zones, Abstract Volume. Geological Society, London
Williams PF and Jiang D. 2005. An investigation of lower crustal deformation: Evidence for channel flow and its implications for tectonics and structural studies. Journal of Structural Geology, 27: 1486 – 1504
Williams PF, Jiang D and Lin S. 2006. Interpretation of deformation fabrics of infrastructure zone rocks in the context of channel flow and other tectonic models. In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 221 – 235
Wirth R and Rocholl A. 2003. Nanocrystalline diamond from the Earth's mantle underneath Hawaii. Earth and Planetary Science Letters, 211: 357 – 369
Xu ZQ, Yang JS, Liang FH, Qi XX, Liu Fl, Zeng LS, *et al*. 2005a. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages. Acta Petrologica Sinica, 21(2): 1 – 12(in Chinese with English abstract)
Xu ZQ, Chen J, Wang Q, Zeng LS, Yang JS, Chen FY, Li TF, Liang FH. 2005b. Type-C olivine fabric in the Zhimafang garnet peridotite of the southern Sulu ultrahigh – pressure metamorphic terrane: Formation conditions and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 21(2): 389 – 397(in Chinese with English abstract)
Xu ZQ, Zhang ZM, Liu FL, *et al*. 2007. Continental deep subduction and exhumation dynamics: Evidence from the main hole of the Chinese Continenal Scientific Drilling and the Sulu HP-UHP metamorphic terrane. Acta Petrologica Sinica, 23(12): 3041 – 3053(in Chinese with English abstract)
Xu ZQ, Cai ZH, Li HQ, Chen FY and Tang ZM. 2008. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis. Acta Petrologica Sinica, 24(7):1463 – 1476
Xypolias P and Kokkalas S. 2006. Heterogeneous ductile deformation along a mid-crustal extruding shear zone: An example from the External Hellenides (Greece). In: Law RD, Searle MP and Godin L (eds.). Channel flow, Ductile Extrusion and Exhumation in Continental Collision Zones. Geological Society, London, Special Publications, 268: 497 – 516
Yang JS, Bai WJ, Fang QS, Meng FS, Chen SY, Zhang ZM, Rong H. 2007. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite, Polar Ural. Geology in China, 34(5): 950 – 952(in Chinese with English abstract)
Yang JS, Dobrzhinetskaya L, Bai WJ, Fang QS, Robinson PT, Zhang JF and Harry WG II. 2007. Diamond-and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. Geology, 35 (10): 875 – 878
Zhang P, Shen Z, Wang M, Gan W, Burgmann R, Molna P, Wang Q, Niu Z, Sun J, Wu J, Sun H and You X. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System data. Geology, 32: 809 – 812
Zhang PZ, Wang Q and Ma ZJ. 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau. Earth Science Frontiers, 9(2): 442 – 450(in Chinese with English abstract)
Zuffa GG. 1985. Provenance of Arenites. Dordrecht, Reidel Publishing Company, NATO-ASI Series: 165 – 189
Zoback MD, Hickman S and Ellsworth W. 2007. The Role of Fault Zone Drilling. Geophysics, 4: 649 – 674

附中文参考文献

白文吉,杨经绥,Robinson P, 方青松,张仲明,颜秉刚,胡旭峰. 2001. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的研究. 地质学报,75(3): 404 – 409
邓起东,冉勇康,杨晓平,闵伟,楚全芝等. 2007. 中国活动构造图(1:400万). 北京: 地震出版社
李继亮,肖文交,闫臻. 2003. 盆山耦合与沉积作用. 沉积学报, 21(1):52 – 59
许志琴, 杨经绥, 梁凤华等. 2005a. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录. 岩石学报, 21(1): 1 – 12
许志琴,陈晶,王勤,曾令森,杨经绥,陈方远,李天福,梁凤华. 2005b. 南苏鲁芝麻房石榴石橄榄岩中橄榄石的"C"类组构及其形成条件探讨. 岩石学报,21(2):389 – 397
许志琴,张泽明,刘福来,杨经绥,杨文采,金振民,嵇少丞,王汝成,王勤. 2007. 深俯冲和折返动力学: 来自中国大陆科学钻探主孔及苏鲁超高压变质带的制约,岩石学报,23(12): 3041 – 3053
许志琴,蔡志慧,张泽明,李化启,陈方远,唐泽民. 2008. 喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造及组构运动学. 岩石学报, 24(7): 1463 – 1476
杨经绥,白文吉,方青松,孟繁聪,陈松永,张仲明,戎合. 2007. 极地乌拉尔豆荚状铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群. 中国地质,34(5): 950 – 952
张培震,王琪,马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场. 地学前缘, 9(2): 442 – 450