

川东北-大巴山盆山体系岩石圈结构及浅深变形耦合*

李秋生^{1,2} 高锐^{1,2} 王海燕^{1,2} 张季生^{1,2} 李朋武^{1,2} 卢占武^{1,2} 管焯^{1,2} 侯贺晟^{1,2}
 LI QiuSheng^{1,2}, GAO Rui^{1,2}, WANG HaiYan^{1,2}, ZHANG JiSheng^{1,2}, LI PengWu^{1,2}, LU ZhanWu^{1,2}, GUAN Ye^{1,2} and HOU HeSheng^{1,2}

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 中国地质科学院深部探测与地球动力学开放实验室, 北京 100037

1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

2. Earthprobe and Geodynamics Open Laboratory of CAGS, Beijing 100037, China

2010-12-21 收稿, 2011-03-07 改回.

LI QS, Gao R, Wang HY, Zhang JS, Li PW, Lu ZW, Guan Y and Hou HS. 2011. Lithospheric structure of northeastern Sichuan-Dabashan basin-range system and top-deep deformation coupling. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 612–620

Abstract Recently, the research of basin-mountain system has become one of the hotspots of the frontier research fields in the study of continental geodynamics. For deeper understanding tectonic evolution of Dabashan foreland and to resolve key problem of petroleum exploration this area, a deep seismic reflection profile with a length of 300km was conducted in 2007 by cooperation of Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS) and Southern Exploration and Development Division Company of SINOPEC (SEDDC). Based on the geometry of lithosphere structure from deep seismic reflection profile and the velocity data from Deep Seismic Sounding profiles (DSS), the authors have made an analysis on the feature of lithosphere structure of northeastern Sichuan-Dabashan basin-range system and some discusses on the relationship between deformation style and lithosphere structures, and then update understanding Dabashan orogen. The basement of Yangtze craton extends beneath whole northeastern Sichuan-Dabashan basin-range system. The larger thickness and strength of lithosphere result in Yangtze craton focus its contract deformation rather at the top of crust than middle-to-lower crust in the process of intracontinental orogeny after Yangtze spliced with North China craton. Due to regional deep decollement decoupled the sedimentary cover and basement, the crystalline rock crust keep rigidity and just behave in large scale bending hardly evident lateral shorting, so that the Dabashan orogen shows us feature of ‘thin-skinned structure’ and rootless. The deformation styles and involved depth of Dabashan orogen is dominated by a regional deep decollement existing within the base of mudstone rock layer of lower Cambrian system and marked by TWT 4.0 second reflectors. Along this decollement, the Chengkou fault thrust the strata Sinian System-Lower Paleozoic to shallow and surface moreover overthrust them about 60km to SW onto strata Mesozoic-Paleozoic of northeastern Sichuan basin. The Zhenba fault and Chengkou fault also get gently and vanished at it in deep. The underlying metamorphic rock layers are nearly not involved into deformation.

Key words Dabashan orogen; Foreland; Deep seismic reflection profile; Deep seismic sounding profile; Lithosphere structure; Decollement

摘要 近年来,盆山体系研究已经成为大陆动力学的热点和前沿领域之一。为了进一步理解大巴山前陆的构造演化,解决该区油气勘探的关键问题,中国地质科学院与中国石化南方公司合作,2007年完成了一条300km长的深地震反射剖面。基于深地震反射剖面提供的岩石圈结构的几何图式和深地震测深剖面提供的速度数据,作者分析了川东北-大巴山盆山体系的岩石圈结构特征,探讨了变形样式与岩石圈结构的关系,提出了对大巴山造山带形成的新认识。川东北-大巴山盆山体系继承了扬子克拉通基底。较大的岩石圈厚度和强度,导致扬子克拉通在与华北克拉通拼合后的陆内造山过程中,将其收缩变形集中在其顶部而不是中下地壳,区域性的拆离层使盖层和基底解耦,结晶地壳保持弹性只出现大尺度的挠曲几乎没有横向缩短,故大巴山造山带表现为“薄皮”、“无根”的特征。大巴山造山带的席卷深度和变形样式主要受区域性的深部滑脱面控制,

* 本文受国家自然科学基金项目(40830316,40874045)、国土资源部公益性行业基金项目(200811021、201011042)和中石化南方海相前瞻性项目联合资助。

第一作者简介:李秋生,男,1958年生,研究员,从事中国大陆地壳与上地幔深部构造的地震探测研究,E-mail:liqiusheng@cags.ac.cn

该滑脱面发育于寒武系底部泥岩层内,由TWT 4.0s反射所指示。沿该滑脱面,城口断裂将南秦岭震旦系和古生界地层逆冲到浅表并向南西推覆60km叠置于四川盆地中-古生界地层之上;且镇巴断裂和城口断裂均收敛于该滑脱层,其下伏的变质岩层基本未卷入变形。

关键词 大巴山造山带;前陆盆地;深地震反射剖面;深地震测深剖面;岩石圈结构;滑脱层

中图法分类号 P31

1 引言

沉积盆地和造山带作为大陆岩石圈表面最基本的两个构造单元,也是矿产资源和化石燃料的赋存场所,因此一直都是大地构造学和经济地质学研究的中心课题。但长期以来,造山带和盆地的研究几乎是各自独立进行的,有所谓搞构造“不入盆”,找油气“不进山”之说。直到国际岩石圈计划的重点由大洋转向大陆内部时,人们才认识到只有把二者作为一个相互联系且不可分割的整体(吴根耀和马力,2004),纳入一个统一的系统进行研究,才能更好地认识大陆构造活动的规律,由此提出了盆山体系概念,开始关注盆山耦合作用研究并迅速成为大陆动力学的热门课题和前沿。

盆-山耦合作用研究作为大陆动力学的前沿领域,国内外都是以“前陆冲断带”为切入点。一方面因其所处构造部位特殊(处于造山带和盆地之间的结合部位),是研究盆地成因和造山带演化的关键地段,另一方面,是受社会经济发展

需求的驱动,因为前陆盆地和冲断带往往蕴藏着丰富的油气资源。

大巴山造山带位于川陕交界处,现今四川盆地与秦岭造山带的过渡部位(图1),构造上位于上扬子地块北缘,秦岭造山带南部。它西北与近东西向的米仓山凸起相接,隔龙门造山带与松潘-甘孜造山带为邻,东端止于神农架基底隆起,东南与川东高陡构造带(隔档式褶皱带)毗邻,南侧以连片出露的三叠统的底界与四川盆地分开,整体展布形态为一组向南西方向突出的弧形构造带,它与川东北前陆盆地和川中隆起构成川东北-大巴山盆山体系,由于其所处构造的特殊部位,被视为开展盆山耦合作用研究的理想试验场所之一。特别是普光气田的发现(马永生等,2005),显示该区油气勘探前景看好,潜力巨大,有望成为四川盆地的接替新区。大巴山冲断带及其前陆的形成机制和演化研究,具有理论和实际的双重意义。

前人对秦岭造山带和四川盆地的地质构造和深部结构都有相当深入的研究(许志琴等,1986;曹家敏等,1994;宋鸿彪和罗志立,1995;郭正吾等,1996;何建坤等,1998;张国伟

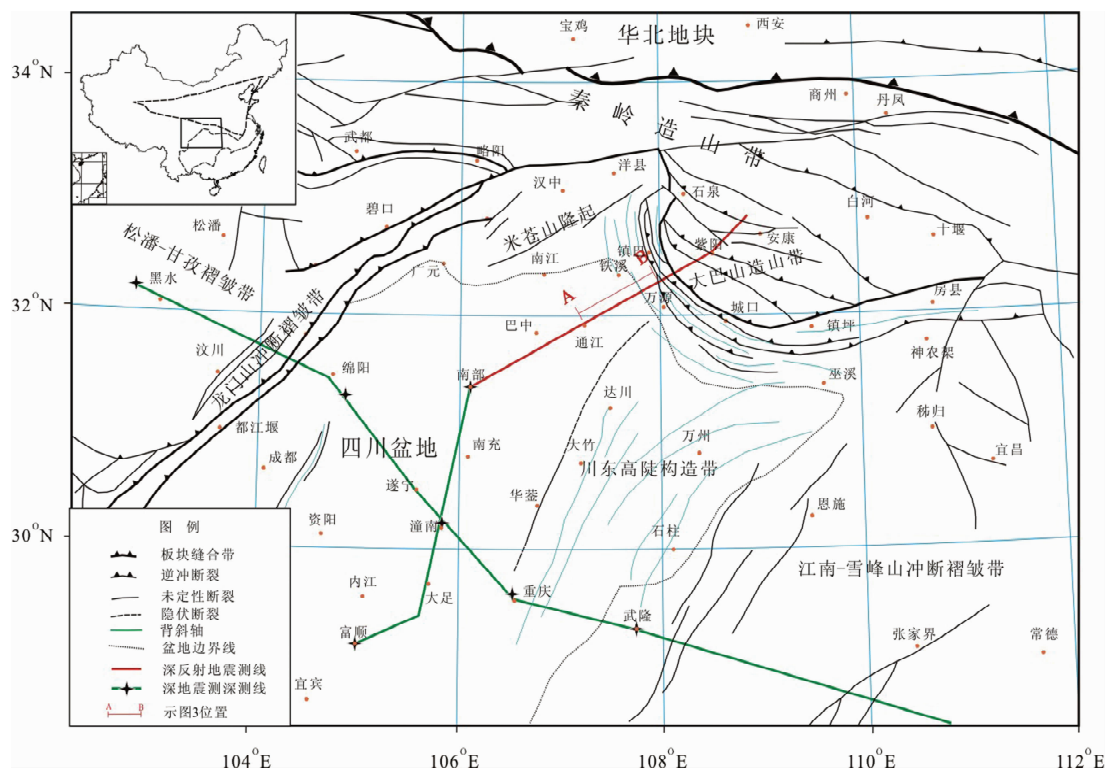


图1 大巴山前陆深地震探测测线位置及构造背景示意图

Fig.1 Location of deep seismic survey line and tectonic background

等,2001),但将盆山一体作为主要对象的研究相对薄弱。尤其是继扬子与华北板块俯冲碰撞之后,陆内变形的席卷深度以及变形从秦岭造山带的根带向四川盆地东北部传递和扩展的方式都不清楚。

近年来,川东北-大巴山盆山体系的研究进展明显。前人主要依据地表构造形迹、区域地球物理资料分析和几条延伸到大巴山腹地的油气地震剖面,结合对区域构造演化的认识,相继提出了大巴山弧形构造带的分带性和构造变形样式(何建坤等,1997;乐光禹,1998;高长林等,2003;李智武等,2006;汪泽成等,2006;刘树根等,2006)。但是由于已有地震剖面长度普遍较短(多局限于镇巴断裂以南,只有个别剖面延入大巴山腹地,无一完整跨过大巴山前陆和造山带),记录时间长度有限(仅 8.0s),进入造山带腹地的测段信噪比较低,难以对盆山过渡部位的深部结构精细成像,加之缺乏岩石圈尺度精细探测提供的几何约束,已有构造演化模型不确定性较大。

自“前陆盆地”概念提出,盆山耦合研究的兴起不过 30 余年,目前仍处于积累资料并进行整合分析的探索、发展阶段。正如 Cloetingh *et al.* (1997)提及的,盆山耦合的研究应建立在岩石圈层次上,岩石圈精细结构资料是构建盆山耦合模型、探讨其深部动力学机制必不可少的依据,而深反射地震剖面探测则是对盆山过渡带的复杂岩石圈结构精细成像的最有效途径之一。

2007 年,中国地质科学院与中国石化南方公司合作开展了“大巴山前陆构造演化与油气远景研究”,重新处理了 2004 年部署的 3 条二维地震线和 2006 年地震采集攻关线(30km),发现了一些重要线索,提出了改善采集资料品质和处理低信噪比资料的技术方案,针对性地设计、实施了完整跨越川东北-大巴山盆山体系的深地震反射剖面探测。剖面起自四川盆地东北部,北至南秦岭南缘,长 300km(图 1)。记录长度达 30s,折算为深度约 100km。作为该项研究的部分内容,作者依据新的深反射地震剖面资料,对大巴山及邻区的深地震测深剖面以及区域重、磁资料进行了综合研究和再认识,提出对川东北-大巴山盆山体系深部动力学机制的一些初步认识,供参考。

2 资料与方法

深反射地震剖面的测线为近北东向。南起四川盆地的南部县,经仪陇、通江、竹峪、鱼渡、紫阳、恒口,过月河,北端止于南秦岭构造带南缘。测线长度 300km。测线南段经由“通南巴”构造,北段完整跨越大巴山弧形构造带,旨在获得大巴山及其前陆的地壳精细结构,揭示大巴山推覆构造发育规模与逆冲-褶皱作用的席卷深度,确定深部滑脱构造或构造薄弱层面的深度。为研究大巴山与四川盆地深部耦合关系提供几何约束。

针对大巴山腹地地形剧烈起伏和中生界、古生界碳酸盐

表 1 深地震反射剖面观测系统参数一览表

Table 1 Acquisition parameter of deep seismic reflection profiling

	正常炮	大炮
观测系统类型	9580-20-40-20-9580	0-0-40-140-19300
CDP 间隔	20m	20m
叠加次数	60 次(砂泥岩)/120(灰岩)	
接收道数	480 道	480 道
最小偏移距	20m	140 m
道距	40m	40m
炮点距	160m(砂泥岩)/80 m(灰岩)	5000m

岩和变质岩、花岗岩出露等复杂条件,设计了针对性的采集方案,即以深井(>20m)、大药量(正常 40kg)、长排列(480 道中间激发)、小道距(40m)、120 次叠加,每隔 5km 加放 200kg 大炮为主要特点的组合方案(表 1)。采集施工使用 Sercel 408XL 24 位数字地震仪,SM24 型超灵敏检波器(自然频率 10Hz),记录长度 30s,采样间隔 2ms。

针对研究区地形复杂、高差大,静校正问题严重;地下高陡构造发育,成像不聚焦;大巴山腹地资料总体信噪比偏低等难点,针对性地实验采用了无射线层析成像静校、各向异性动校、叠前去噪、高精度速度分析、DMO 和起伏地形的克希霍夫叠前偏移等处理技术组合,最终获得了可用于构造解释的处理成果剖面,为本研究提供了可靠的资料依据。

图 1 所示穿过四川盆地的深地震测深剖面是阿尔泰-台湾地学断面的一段。富顺-南部为该地学断面的支测线之一,与主测线近垂直交叉,用于控制四川盆地地壳结构的南北向变化。该测线从川中隆起延伸到川东北,其北端终点恰好与 2007 年完成的深反射地震剖面的南端起点大致重合。从富顺-南部剖面的地壳结构可见,四川盆地的地壳结构在东北方向比较稳定。由于目前川东北-大巴山地区尚无其它深地震测深资料,作者权且认为四川盆地东北部地壳也具有南部炮揭示的速度分布的主要特征,在此前提下,主要依据反射地震剖面提供的几何学对川东北-大巴山盆山体系的岩石圈结构和深浅变形耦合方式做初步的讨论。

3 岩石圈结构及其流变学

对前陆盆地和相关冲断带的起源及其演化的理解,必须立足于岩石圈尺度上。岩石圈的流变学性质,直接或间接控制了前陆盆地的形成和演化。

3.1 岩石圈厚度和强度

天然地震 P 波层析成像结果表明,四川盆地岩石圈厚度为 200~250km(孙若昧等,1991;刘建华等,1995)。天然地震面波反演结果,上扬子块体(四川盆地为其主体部分)的下地壳 S 波速度与典型克拉通区域相当,岩石圈 S 波速度比 AK135 模型快 2%,厚度为 180km(李永华等,2009)。沿黑水-泉州地学断面的深地震测深观测到的 Pn 震相清晰,上地幔顶部速度较高(8.1km/s),并在 50km 深度跃迁到 8.6km/s

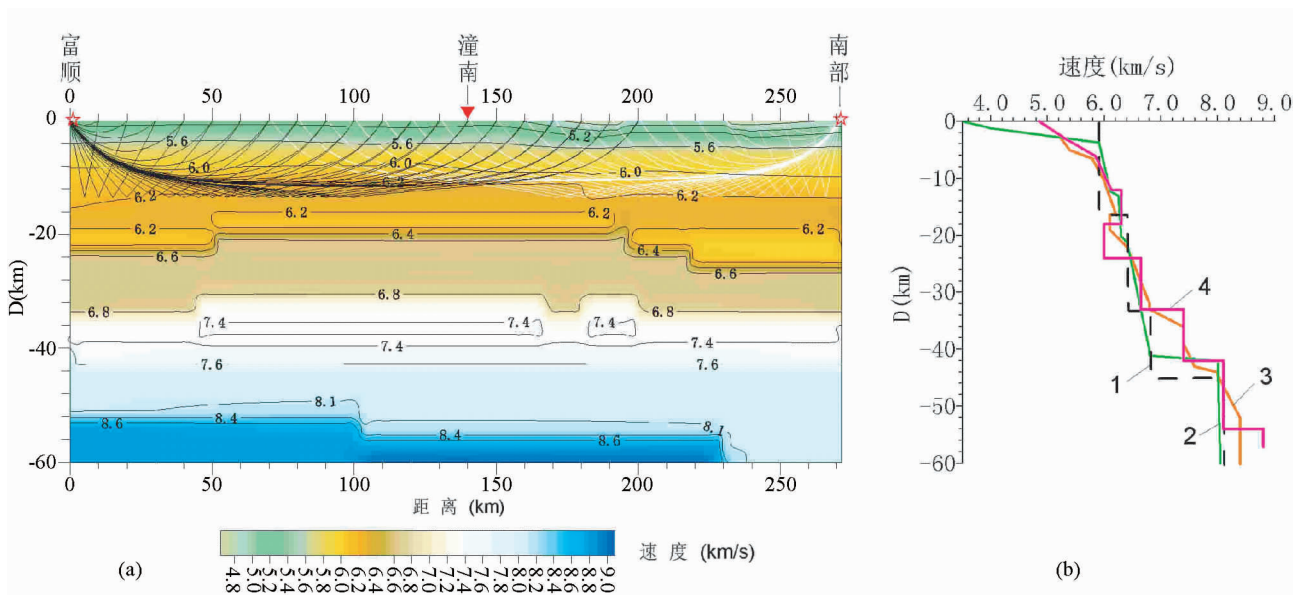


图2 四川盆地与典型克拉通地壳速度结构的比较

(a)-富顺-南部深地震测深剖面地壳速度结构; (b)-四川盆地(以潼南炮和南部炮为代表)及加拿大地盾、鄂尔多斯地块的地壳速度-深度曲线; 1-黑虚线示加拿大地盾; 2-绿实线示鄂尔多斯地块; 3-红实线示盆地中部(潼南); 4-粉红线示川东北(南部)

Fig. 2 Comparison of crustal velocity structure between Sichuan basin and the typical craton area

(a)-P wavespeed structure along the Deep Seismic Sounding (DSS) line of Fushun to Nanbu (location of DSS line shown as Fig. 1); (b)-crustal velocity-depth function between Sichuan basin and the typical Craton; 1-the black dashes line shows Canada shield; 2-the Green sold line shows Ordos block; 3-the red sold line shows central Sichuan basin; 4-the Pink sold line shows the northeastern Sichuan basin

(崔作舟等, 1996)。沿断面的岩石圈有效弹性厚度 T_e (表示岩石圈强度的参数) 研究结果表明, 四川盆地陆核区 T_e 值较大(袁炳强等, 2002)。

3.2 岩石圈结构

通常克拉通内盆地具有陆壳结构, 可分为2层或3层, 波速向下增大, 一般中-下地壳范围不存在软弱层或软弱层已萎缩, 这样的速度结构一般出现在长期稳定的地盾区。如北美的加拿大地盾等。典型克拉通地壳的反射面貌通常为: 上-中地壳“半透明”(无有效反射或只有零星弱反射), 下地壳出现成层性不好的强反射(Ulmišek, 1990)。

川东北-大巴山盆山体系是在扬子克拉通北缘基础上形成和发展起来的(刘树根等, 2006; 沈传波等, 2007), 属于克拉通内盆地, 应具有相近的速度结构, 但长期以来缺乏足够分辨率的深反射资料来检验。

由图2a可见, 四川盆地的地壳厚度44~45km, 地壳结构相对简单, 如潼南炮和南部炮的速度-深度曲线所示(图2b), 由浅到深。波速呈正向增大。与秦岭造山带北侧的鄂尔多斯地块地壳厚度大体近似, 但四川盆地顶部沉积层厚度较大, 地壳内部分层较多。四川盆地的下地壳速度较鄂尔多斯地块和加拿大地盾高, 上地幔甚至存在速度达 $8.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高速层。

深地震测深剖面上的速度界面反映到深反射地震剖面上, 一般是横向可以连续或断续追踪的相位或相位有效

反射同相轴。

在上地壳顶部, 在盆地的大部分区域, 沉积盖层(TWT 0~4.0s)以振幅稳定, 平直延展或宽缓褶皱的单相位或多相位同相轴强反射为特征, 上、下构造层呈整合或假整合接触关系。大巴山褶皱-冲断带, 中-上部的层位遭受中等~强烈的构造变形, 但它们均限于沉积盖层之内, 即终止于TWT 4.0~4.5s的之上。

出现在TWT 9.5~10.0s的窄带反射, 与深地震测深剖面上的R3(壳内低速层顶面)或R4(壳内低速层底面)对应, R3、R4之间的弱低速层($5.97 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 将结晶地壳划分为上、下两部分。

与盆地内部上地壳基本无有效反射的“半透明”相比, 大巴山弧形构造带及其前陆带的上地壳下部出现少量在造山带下常见的倾斜反射或其组合, 如层叠反射(duplex)、楔形反射(wedge)和鳄鱼嘴反射(crocodile), 但这些倾斜反射并没有发展成切穿整个地壳的大型逆冲-滑脱构造。

下地壳底部(TWT 13.0~14.3s)存在一个近水平、密集局部强反射层, 该层在盆地和大巴造山带下的厚度和反射性均无明显差别。Moho反射出现在该局部强反射层的底部, 双程旅行时 $15.0 \pm 0.8 \text{ s}$ 左右(按地壳平均速度 $6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 换算, 地壳厚度约为42.6~47.4km)。以一组低频、窄带状较强反射为标志, 其内部结构清晰, 一般由3~4个正轴组成, 视主频15Hz左右, 在整个剖面上反射性稳定, 信噪比较

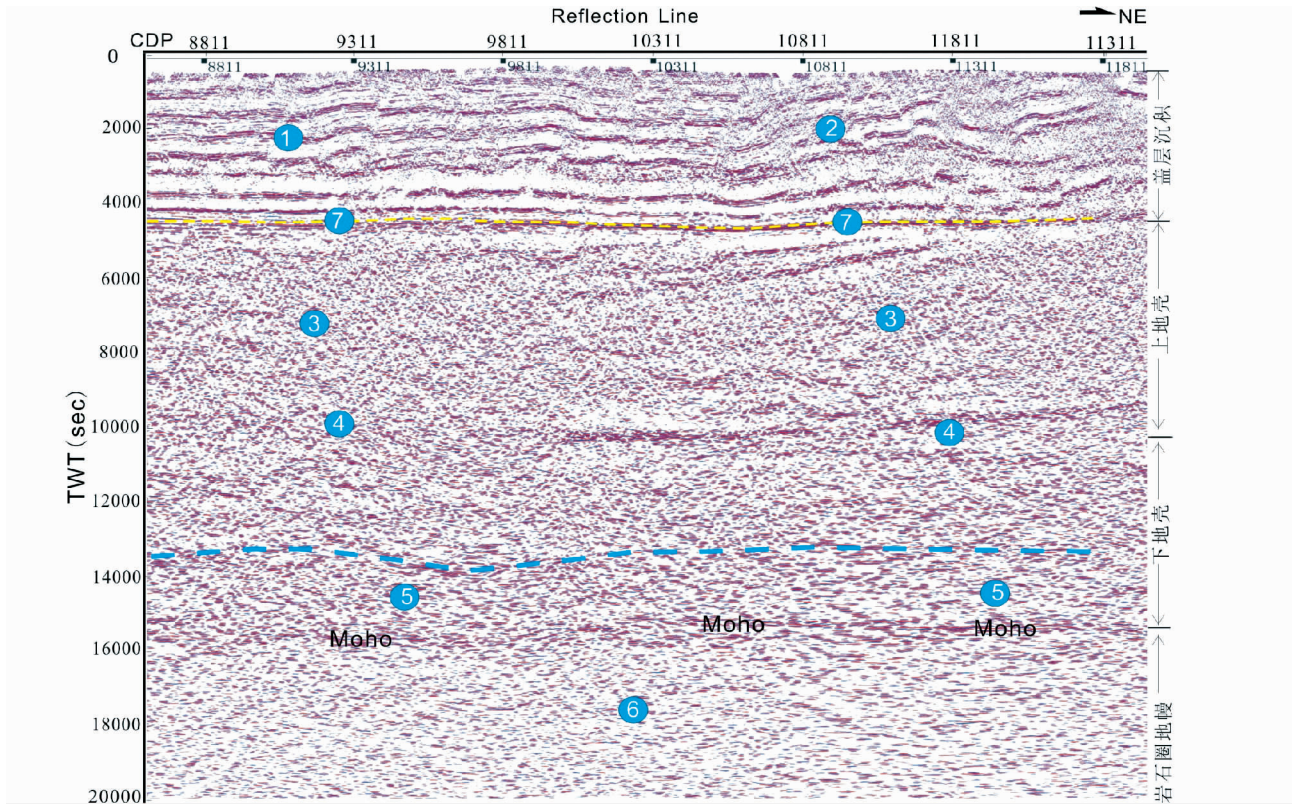


图3 深地震反射剖面揭示的大巴山前陆地壳精细结构(叠前时间偏移剖面局部)

(1)-平缓褶皱反射区(层状);(2)-褶皱-冲断反射区(视层状);(3)-半透明反射区;(4)-壳内低速层反射,侧向不连续;(5)-下地壳底部局部强反射层;(6)-上地幔透明反射;(7)-下寒武统泥页岩滑脱层

Fig. 3 The fine structure of the Dabashan foreland derive from deep seismic reflection profiling (a part of pre-stack time migration)
(1)-gentle fold reflectors area(stratiform); (2)- fold-thrust reflectors area(visual stratiform);(3)-'translucent' reflectors area;(4)-crustal lower-velocity zone reflectors,not always continuous in lateral;(5)-local pronounced reflectors zone at the bottom of lower crust;(6)-'transparent' reflectors at the top-mantle;(7)-decollement formed along mudstone rock layer of lower Cambrian system

高。由其放大图像可见,可 Moho 反射分段连续,相邻段之间局部叠置,NE 盘逆冲到 SW 盘之上,该细节是岩石圈地幔相对脆性的证据(图 3)。

以上资料及其分析表明,川东北-大巴山盆山体系具有克拉通型的岩石圈结构特征,其重要特点之一就是岩石圈刚性较强。

总之,川东北-大巴山盆山体系,继承了扬子克拉通基底,其岩石圈具有大陆克拉通岩石圈的一般特点(厚度较大、垂向结构稳定,岩石圈地幔速度较高),因此在板块碰撞及之后的陆内收缩过程中,显示出较大的刚性(以整体挠曲为主)。当然,不仅仅如此,川东北-大巴山盆山体系的盆山耦合型式、造山带的席卷深度和规模及其浅-深变形样式还与分层结构(stratification)和流变性有关,下文将述及,基底拆离层及其以上的多个滑脱层对大巴山造山带的变形起着决定性的控制作用。

4 岩石圈尺度变形耦合

川东北-大巴山盆山体系的总体面貌是:垂向上,其变形和构造样式受由浅至深发育的多个滑脱层控制,浅、深变形

不耦合;侧向上,表现出分带性,随着远离造山带核部,变形强度逐渐减弱。

4.1 浅表分带变形样式

以断层面滑动变形或脆性破裂为主。从浅到深,在从反射剖面上可识别出 3 个重要滑脱层,即中下三叠富膏岩滑脱层、志留系泥页岩滑脱层和下寒武统泥页岩软弱层。在露头尺度上,滑脱层常表现为十分破碎、小褶皱和小断层发育,褶皱倒转或平卧甚至翻转。

在地震剖面上,滑脱层表现为杂乱或弱反射特征,断层沿其终止。滑脱层上、下岩层变形不协调,变形特征不同。

中下三叠富膏岩滑脱层一般由 3 个同相轴组成。通常在第一、第二正轴之间追踪。志留系泥页岩滑脱层以横向可以连续追踪的双轴次强反射为标志,在多数情况下,第一个正轴相对较弱,第二个正轴较强。两轴相距约为 0.1s。寒武统泥页岩滑脱层以 TWT 4.0s 反射同相轴为标志,由 3 个正同相轴组成,延续约为 0.3s,轴间距约为 0.12s。在剖面上为最强反射震相,连续性好,横向上反射强度稳定,在 TWT 0 ~

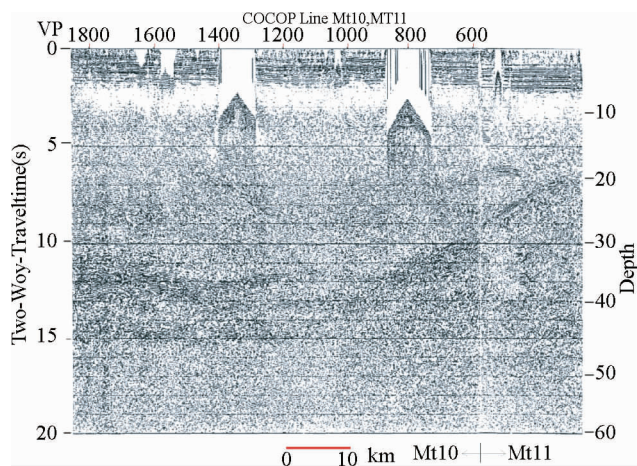


图4 COCORP MT10 和 MT11 线揭示的北美大陆威利斯盆地地壳强反射层

下地壳强反射位于 10~15s 之间,莫霍面位于其底部,将下地壳与透明的上地幔区分开。下地壳层(太古宙)被西倾的反射(元古宙)所截断

Fig. 4 COCORP lines MT10 and MT11 showing the pronounce reflectivity layer of lower-crust underlying Williston basin, North America continent

The pronouncing reflectors layer appear between TWT 10 to 15 second, the Moho terminate it at its bottom and divided the reflective crust from the 'transparent' Mantle. Lower-crust layering (Archean) lateral extending terminated by west-dipping reflectors (Proterozoic)

6s 范围视频率最低。

据地表物质组成、变形样式和变形强度,大巴山及前陆弧形构造具有明显的分带性。不同的亚带分别受由深到浅滑脱层控制(何建坤等,1999;李智武等,2006;汪泽成等,2006):

(1) 大巴山逆冲-推覆构造带(即南秦岭南带)可能受控于下震旦统泥岩至前震旦系顶部的变质火山-沉积岩系。

(2) 叠瓦冲断带。位于镇巴断裂和城口断裂之间,地表构造以断裂占主导地位为特点。由数条东倾平行的逆(冲)断裂以及夹于其间的由震旦系至中下三叠统组成的逆冲岩片构成。镇巴断裂在深部收敛于下寒武统泥页岩软弱层。

(3) 滑脱褶皱带。位于铁溪-巫溪隐伏断裂和镇巴断裂之间,地表构造以类侏罗山式褶皱占主导地位为特点。主要出露中-下三叠统和侏罗系,由一系列紧闭背斜和开阔向斜相间彼此平行排列构成,深部发育以志留系泥页岩为滑脱层的逆冲断裂系统和相关褶皱。

(4) 前陆斜坡带(四川盆地东北部低缓构造区)。以铁溪-巫溪断裂为北界,由下古生界和二叠-三叠系组成,以振幅稳定,平直延展或宽缓褶皱的强反射为特征,褶皱强度中等,褶皱形态一般较完整,伴生断层较少。其变形主要受中下三叠富膏岩滑脱层控制。

4.2 深层变形样式与区域深部背景

地壳内的韧性带或脆性-韧性转换带,是在伸展或挤压应力作用下最易发生拆离、滑脱的层位,导致地壳后期变形沿之发生。

(1) 基底

以 TWT 4.0s 反射同相轴为标志的寒武统泥页岩滑脱层下伏的变质岩层一直延伸到大巴山推覆体之下。据重磁资料,城口断裂以北的大巴山推覆体沿底板滑脱层向 SW 推移了约 60km(李占武与丁燕云,2007),盖在了扬子地台之上,造成上部出露南秦岭地层,下部可能隐伏有扬子区地层。区域航磁资料化极和上延分析结果也表明,以南充、巴中、镇巴、紫阳一线为长轴,有一连片强磁异常。由此推测四川盆地东北部-大巴山造山带具有统一的扬子克拉通基底。

(2) 壳内低速层

壳内低速层的存在可使上、下地壳能够分别以不同方式独立变形。壳内低速层在扬子克拉通与周缘造山带的形成演化过程中可能扮演过重要的角色,但现今四川盆地(扬子克拉通主体)的壳内低速层在长期的克拉通化过程中已严重萎缩,折射地震剖面上的低速层厚度薄(有 2~3km),速度逆转不到 5%,与其顶(R3)或底(R4)界面对应的反射只在盆地边缘部分出现(参见图 3 中 TWT 9.5~10.0s 反射),较其周缘造山带弱的多。因此,在区域收缩环境下,未能充当深部主滑脱层的角色。

(3) 下地壳

扬子克拉通 Moho 面上方普遍存在一 P 波速度为 $7.1 \sim 7.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的构造层(崔作舟等,1996),在反射地震剖面上表现为延续 1.0~2.0s、以近水平短轴密集排列为特征的反射层。比正常下地壳($6.6 \sim 6.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)的速度高 6%~8%。类似的下地壳强反射层通常被发现于显生宙伸展区存在活化古裂谷的克拉通盆地之下(如北美大陆的盆岭省)。

在北美威利斯盆地 COCORP 首次观察到该特征时(图 4),推测为下地壳伸展和/或与盆地形成时的岩浆底侵的表现。Nelson *et al.* (1993) 注意到该层事实上并非遍布整个盆地,而是被限制于怀俄明省的边缘,并被 Trans-Hudson 造山带内的西倾反射构造截断,暗示产生该近水平反射的岩石至少与造山带同龄或更老。重新解释为可能标志着一个形成于大陆边缘岛弧基底上的层状残留体(layered restite)。

(4) 上地幔顶部

上地幔顶部(Pn 波速度 = $8.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)与下地壳底部($7.0 \sim 7.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)的速度差较小(崔作舟等,1996),暗示发生了壳幔相互作用,这种深部过程,往往导致壳幔成分的均一化和物理性质的强耦合。前文提到,50km 深度四川盆地岩石圈的 P 波速度跃迁到 $8.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,这可以解释为强的岩石圈地幔或近南北向的各向异性所致。

由以上资料和分析可知,川东北-大巴山盆山体系,继承了扬子克拉通基底,其岩石圈厚度较大、垂向结构稳定,壳幔

耦合程度高,壳内软弱层不发育或已萎缩,这种结构和流变学特点,决定了在扬子与华北板块碰撞中及之后的陆内收缩过程中,区域挤压应力集中作用于浅表岩层,由于基底滑脱层存在,深、浅变形解耦,以至于在浅表如此强烈的变形带之下,竟然几乎没有明显的地壳横向缩短而形成“山根”,而使大巴山造山带独具特色。

5 讨论:深浅耦合模式

地震探测揭示的大陆岩石圈精细结构的意义在于,它为解释大陆的变形行为提供了依据。20世纪80年代以来,在新的地球物理探测技术迅速发展,高分辨的地震探测愈来愈多地发现大洋岩石圈和大陆岩石圈许多本质的区别(张国伟等,2001)。

大洋岩石圈物性均一,刚性较大,以侧向、整体运动为主,由洋-陆俯冲或陆-陆碰撞形成的造山带,一般位于板块边缘并具有明显的线状特征。而盆地的形成被认为是构造或沉积加载导致岩石圈板块挠曲的结果。

大陆岩石圈侧向物性组成极不均一,垂向随深度变化具

有明显的粘弹性、塑性流变特征,并具有广泛的分层结构,因此其变形行为也明显不同大洋岩石圈。大陆上的许多造山带都是由一系列不同层次的岩席(片)不仅在板缘,而且在板内(陆内)发生大规模侧向位移、叠覆、构造变形而形成,可以发生广泛弥散性、渗透性变形,不一定线性具有线状特征,往往还发生突出的壳幔相互作用。

陆内前陆盆地是前陆盆地三大类型之一,其形成不同于弧后前陆盆地、周缘前陆盆地,这两者分别于洋陆俯冲和陆陆碰撞有关,陆内前陆盆地主要与板块碰撞远端效应所产生的陆内变形—地壳缩短和加厚有关,时间上发生于陆陆拼接完成之后。陆内变形的的方式主要是沿冲断层发生的壳内拆离和逆冲岩片叠置以及壳内熔融岩浆贯入。大巴山前陆盆地就属于与南秦岭陆内俯冲相关的陆内前陆盆地(刘树根等,2006)。

构造应力场分析的结果(刘顺等,2005)表明,变形驱动力主要来自于秦岭造山带自北而南的挤压。晚三叠世晚期,华北和扬子地块已完成对接拼合,形成了新的统一大陆块,大规模的板块俯冲碰撞作用已经结束,整个构造体制在印支期后已转入陆内阶段。但俯冲作用仍在继续,并转化为

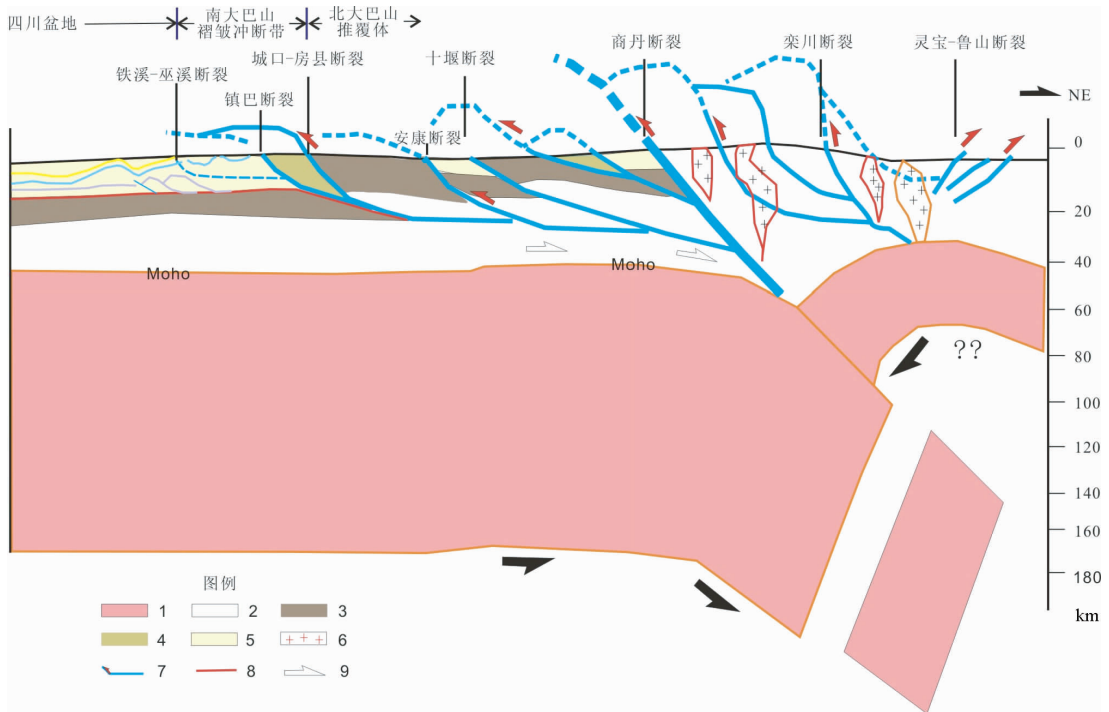


图5 扬子克拉通北缘陆内造山岩石圈尺度构造模式(据何建坤等,1998 补充、修改)

1-岩石圈地幔;2-中下地壳;3-上地壳元古代基底;4-拆离的基底岩片;5-上地壳显生宙盖层;6-不同时期花岗岩;7-断裂及逆冲方向;8-下寒武底部泥页岩区域滑脱层;9-陆内俯冲方向。本图横向非严格比例尺

Fig. 5 The lithosphere scale model of intral-continental orogeny in the northern margin of Yangtze Craton (Amend and extend after He *et al.*, 1998)

1-lithospheric Mantle; 2-middle-lower crust; 3-Proterozoic basement of upper crust; 4-the rock piece extracted from Proterozoic basement; 5- Phanerozoic cover sedimentary of upper crust; 6-granite rock generated during different orogeny; 7-thrust fault and its direction; 8-decollement along mudstone rock layer of lower Cambrian; 9-showing the direction of Intral-continent underthrust. Not strict scale in lateral of this figure

大陆地块内部的陆内俯冲。特别是白垩纪以来,秦岭发生了强烈的陆内造山作用(张国伟等,2001),并逐渐向南扩展。正是在这次运动中,南大巴山沉积盖层强烈变形并结束沉积,地表可见侏罗系和下白垩统呈平行不整合关系并共同卷入变形。

在南秦岭自南向北的陆内俯冲的区域收缩应力背景下,南秦岭的上地壳反向仰冲,由于基底和盖层间滑脱层的解耦作用,基底和沉积盖层的变形行为完全不同:刚性的扬子克拉通保持不变形或仅出现大尺度的刚性挠曲。而盖层主要通过向克拉通方向的大规模顺层滑脱推覆和/或向上切层逆冲扩展,吸收、消纳了地壳缩短,形成了大巴山的变形样式和加拿大落基山式的“薄皮”弧形构造(图5)。

为什么未形成与大巴山高地形呈镜像的 Moho 面下凹呢?

可以有多种解释:(1)由于扬子克拉通岩石圈的有效弹性厚度较大,壳幔耦合紧密,完整性好(没有明显的破裂),故能够承受较大的负载保持弹性性质;因此,陆内俯冲引起的构造加载,可能通过区域大尺度挠曲被调节,而不是形成与高地形呈镜像的 Moho 面下凹。(2)大巴山造山带就位于早期扬子与华北板块碰撞引起的岩石圈挠曲的“肩部”,该部位在两大陆碰合之前可能具有陆-洋过渡地壳,原来较浅的莫霍面在后继的构造活动中由于某种原因被“冻结”而保留下来。(3)东秦岭碰撞造山发生前,南秦岭和北大巴曾发育古大陆边缘幔源型裂谷(何建坤等,1998),裂谷作用使软流圈上隆,导致岩石圈减薄而引起莫霍面抬升。其后碰撞造山过程中因造山带核部区岩石圈的强烈缩短和山根的下压,使这一早期薄弱地带的岩石圈进一步整体上拱(lithospheric budge),碰撞造山结束的岩石圈均衡只能使造山带核部区的山根深度变浅,并不能使原来形成的南秦岭莫霍面翻转,于是它的隆起形态得以保存。不过上述解释都有待于地球动力学模拟检验。

6 结论

川东北-大巴山盆山体系,继承了扬子克拉通基底,其岩石圈厚度较大、垂向结构稳定,壳幔耦合程度高,壳内软弱层不发育、萎缩,这种岩石圈结构和流变学特性,决定了它在扬子与华北板块碰撞中及之后的陆内收缩过程中,岩石圈显示出较大的刚性,以至于大巴山造山带没有形成“山根”。

Moho 面分段北倾、局部叠置等指示变形驱动力主要来自秦岭造山带自北而南的挤压。在南秦岭向北做陆内俯冲的深部背景下,南秦岭上地壳借助于由深到浅多个滑脱层反向仰冲,导致大巴山造山带及其前陆大规模褶皱与缩短,形成了加拿大落基山式的“薄皮”弧形构造。

大巴山弧形构造带的席卷深度和变形样式主要受一区域性的深部滑脱面控制,该滑脱面位于寒武系底部泥岩层内,由 TWT 4.0s 反射所指示。沿该滑脱面,城口断裂将南秦

岭震旦系和古生界地层逆冲到浅表并向南西推覆 60km 叠置于四川盆地中-古生界地层之上;镇巴断裂和城口断裂均收敛于该滑脱层,其下伏岩层基本未卷入变形。

致谢 感谢合作单位中石化南方勘探开发分公司和资料采集单位中石化华东局第六物探大队;胥颐教授审阅了稿件并论文修改提出了宝贵意见。

References

- Cao JM, Zhu JS and Wu DC. 1994. Crustal velocity structure of eastern Qinling. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 21(1): 11 - 17 (in Chinese with English abstract)
- Cloetingh S, Balen van RT, Voorde ter M, Zoetemeijer BP and Bezemer den T. 1997. Mechanical aspects of sedimentary basin formation: Development of integrated models for lithospheric and surface processes. *Geol. Rundsch.*, 86: 226 - 240
- Cui ZZ, Chen JP and Wu L. 1996. Altay-Taiwan GGT: Texture and Structure of Huashixia-Shaoyang deep crust. Beijing: Geological Publishing House, 114 - 141 (in Chinese with English abstract)
- Gao CL, Liu GX, Zhang YZ and Ji RS. 2003. Thrusting nappe structure and oil-gas potential in eastern Qinling and Daba mountain. *Petroleum Geology & Experiment*, 25 (Suppl.): 523 - 531 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZW, Deng KL and Han YH. 1996. Formation and Evolution of Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 200 (in Chinese)
- He JK, Lu HF, Zhang QL and Zhu B. 1997. The thrust tectonics and its transpressive geodynamics in southern Dabashan Mountain. *Geological Journal of China Universities*, 3 (4): 419 - 428 (in Chinese with English abstract)
- He JK, Liu FT, Liu JH and Sun RM. 1998. relationship between distribution of Moho beneath eastern Qinling orogenic belt and the deep process collision orogenic belt. *Acta Geophysica Sinica*, 41 (Suppl.): 64 - 76 (in Chinese with English abstract)
- He JK, Lu HF and Zhu B. 1999. The tectonic inversion and its geodynamic processes in northern Daba Mountains of eastern Qinling orogenic belt. *Scientia Geologica Sinica*, 34 (2): 139 - 153 (in Chinese with English abstract)
- Le GY. 1998. Tectonic characteristics and tectonic evolution of Dabashan orogenic belt and its foreland basin. *J. Mineral. Petrol.*, 18 (Suppl.): 8 - 15 (in Chinese with English abstract)
- Li YH, Wu QJ and Zhang RQ. 2009. The lithospheric S-velocity structure of the western Yangtze craton inferred from surface waves inversion. *Chinese J. Geophys.*, 52 (7): 1757 - 1767 (in Chinese with English abstract)
- Li ZK and Ding ZY. 2007. A tentative discussion on characteristic of the Daba mountain nappe structure. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 31(6): 495 - 498 (in Chinese with English abstract)
- Li ZW, Liu SG, Luo YH, Liu S nd Xu GQ. 2006. Formation and evolution of Dabashan foreland basin and fold-and-thrust belt, Sichuan, China. *Geotectonica et Metallogenia* 30(3): 294 - 304 (in Chinese with English abstract)
- Liu JH, Liu FT, Sun RM, Wu H and Wu D. 1995. Seismic tomography beneath Qinling-Dabie orogenic belts and both the northern and southern fringe. *Acta Geophysica Sinica*, 38 (1): 46 - 54 (in Chinese with English abstract)
- Liu S, Liu SG, Li ZW, Gong ZQ and Sun W. 2005. Analysis of joints from the Meso-Cenozoic tectonic stress field in the west section of South Dabashan fault-fold belt in China. *Journal of Chengdu*

- University of Technology (Science & Technology Edition), 32 (4): 345-350 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Li ZW, Liu S, Luo YH, Xu GQ, Dai GH, Gong CM and Gong ZQ. 2006. Formation and Evolution of Dabashan Foreland Basin and Fold-and-Thrust Belt, Sichuan, China. Beijing: Geological Publishing House, 202-223 (in Chinese)
- Ma YS, Guo XS, Guo TL, Huang R, Cai XY and Li GX. 2005. Discovery of the large-scale Puguang gas field in the Sichuan basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting. Geological Review, 51(4): 477-480 (in Chinese with English abstract)
- Nelson KD, Baird DJ, Waiters JJ, Hauck M, Brown LD, Oliver JE, Ahern JL, Hajnal Z, Jones AG and Sloss LL. 1993. Trans-Hudson orogen and Williston basin in Montana and North Dakota: New COCORP deep-profiling results. Geology, 21, 447-450
- Shen CB, Mei LF, Xu ZP and Tang JG. 2007. Architecture and tectonic evolution of composite basin-mountain system in Sichuan basin and its adjacent areas. Geotectonica Et Metallogenia, 31(3): 288-299 (in Chinese with English abstract)
- Song HB and Luo ZL. 1995. The study of the basement and deep geological structure of Sichuan basin, China. Earth Science Frontiers, 2(3-4): 231-237 (in Chinese with English abstract)
- Sun RM, Liu FT and Liu JH. 1991. Seismic tomography of Sichuan. Acta Geophysica Sinica, 34(6): 708-716 (in Chinese with English abstract)
- Ulmishek G. 1990. Geologic evolution and petroleum resources of the Baltic basin. In: Leighton MW, Kolata DR, Oltz DF and Eidel JJ (eds.). Interior Cratonic Basins. AAPG Memoir, 51: 603-632
- Wang ZC, Zhao WZ, Xu AN, Li DH and Cui Y. 2006. Structure styles and their deformation mechanism of Daba Shan foreland thrust belt in the north of Sichuan basin. Geoscience, (3): 429-435 (in Chinese with English abstract)
- Wu GY and Ma L. 2004. Orogeny and coupled/decoupled basin, development: A review. Geotectonica et Metallogenia, 28(1): 81-97 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Lu YL, Tang YQ, Mattauer M, Matte PH, Malavielle J, Tapponnier P and Maluski H. 1986. Deformation characteristic and tectonic evolution of the eastern Qinling orogenic belt. Acta Geologica Sinica, (3): 237-247 (in Chinese with English abstract)
- Xu Y, Li ZW, Huang RQ, Liu JH and Liu JS. 2010. Pn-wave velocity and anisotropy of the western Sichuan and Longmen mountain region, China. Science China (Earth Science), 53(11): 1665-1670
- Yuan BQ and Zhang GW. 2005. The correlation between the effective elastic thickness of the continental lithosphere and some related geophysical parameters: A case study of the Quanzhou-Heishui geoscience transect. Acta Geoscientia Sinica, 26(3): 203-208 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qingling Orogenic Belt and Geodynamics. Beijing: Science Press, 1-55 (in Chinese with English abstract)
- 高长林, 刘光祥, 张玉箴, 吉让寿. 2003. 东秦岭-大巴山逆冲推覆构造与油气远景. 石油实验地质, 25 (增刊): 523-531
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉. 1996. 四川盆地形成与演化. 北京: 地质出版社, 1-200
- 何建坤, 卢华夏, 张庆龙, 朱斌. 1997. 南大巴山冲断构造及其剪切挤压动力学机制. 高校地质学报, 3(4): 419-428
- 何建坤, 刘福田, 刘建华, 孙若昧. 1998. 东秦岭 Moho 面展布与碰撞造山带深部过程的关系. 地球物理学报, 41(增): 64-76
- 何建坤, 卢华夏, 朱斌. 1999. 东秦岭造山带南缘大巴山构造反转及其动力学. 地质科学, 34(2): 139-153
- 乐光禹. 1998. 大巴山造山带及其前陆盆地的构造特征和构造演化. 矿物岩石, 18(增): 8-15
- 李永华, 吴庆举, 张瑞青等. 2009. 用面波方法研究上扬子克拉通壳幔速度结构. 地球物理学报, 52(7): 1757-1767
- 李占奎, 丁燕云. 2007. 大巴山推覆构造特征的探讨. 物探与化探, 31(6): 495-498
- 李智武, 刘树根, 罗玉宏, 刘顺, 徐国强. 2006. 南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析. 大地构造与成矿学, 30(3): 294-304
- 刘建华, 刘福田, 孙若昧, 吴华, 吴丹. 1995. 秦岭-大别造山带及其南北缘地震层析成像. 地球物理学报, 38(1): 46-54
- 刘树根, 李智武, 刘顺, 罗玉宏, 徐国强, 戴国汗, 龚昌明, 雍自权. 2006. 大巴山前陆盆地-冲断带的形成演化. 北京: 地质出版社, 1-221
- 刘顺, 刘树根, 李智武, 雍自权, 孙玮. 2005. 南大巴山褶断带西段中新代构造应力场的节理研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 32(4): 345-350
- 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 黄锐, 蔡勋育, 李国雄. 2005. 四川盆地普故按大型气田的发现与勘探启示. 地质论评, 51(4): 477-480
- 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 汤济广. 2007. 四川盆地符合盆山体系的结构构造和演化. 大地构造与成矿学, 31(3): 288-299
- 宋鸿彪, 罗志立. 1995. 四川盆地基底及深部地质结构研究的进展. 地学前缘, 2(3-4): 231-237
- 孙若昧, 刘福田, 刘建华. 1991. 四川地区的地震层析成像. 地球物理学报, 34(6): 708-716
- 汪泽成, 赵文智, 徐安娜, 李登华, 崔瑛. 2006. 四川盆地北部大巴山山前带构造样式与变形机制. 现代地质, 20(3): 429-435
- 吴根耀, 马力. 2004. “盆”、“山”耦合和脱耦, 进展, 现状和努力方向. 大地构造与成矿学, 28(1): 81-97
- 许志琴, 卢一伦, 汤耀庆, Mattauer M, Matte Ph, Malavielle J, Tapponnier P, Maluski H. 1986. 东秦岭造山带的变形特征及构造演化. 地质学报, 60(3): 237-247
- 袁炳强, 张国伟. 2005. 大陆岩石圈有效弹性厚度与有关地球物理参数的关系. 地球学报, 26(3): 203-208
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1-55

附中文参考文献

- 曹家敏, 朱介寿, 吴德超. 1994. 东秦岭地区的地壳速度结构. 成都理工学院学报, 21(1): 11-17
- 崔作舟, 陈纪平, 吴苓. 1996. 阿尔泰-台湾地学断面综合研究: 花石峡-邵阳深部地壳的结构与构造. 北京: 地质出版社: 114-141