第28卷第6期 大地测量与地球动力学 Vol. 28 No. 6
2008年12月 JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS Dec. ,2008

文章编号:1671-5942(2008)06-0031-07

龙门山及其邻近地区深部地球物理探测*

徐朝繁[1)] 潘纪顺[2)] 王夫运[1)] 田小峰[1)] 冯建林[1)]

(1)中国地震局地球物理勘探中心,郑州 450002
2)华北水利水电学院, 郑州 450011)

摘 要 为揭示汶川 *M*s8.0 特大地震的深部构造背景,广泛收集整理龙门山地区的深部地球物理探测资料,对龙门山构造带的深部结构与构造特征进行分析讨论。资料表明:龙门山构造带是一地壳厚度陡变带,两侧普遍存在低速高导层,地壳上地幔顶部结构存在较大差异,带内逆掩断层发育,低速高导层缺失,表现为高阻基底。西侧川西高原的 Pn 波速度较低(7.6~7.8 krn/s),东侧四川盆地较高(8.0~8.2 krn/s),低的上地幔顶部 Pn 波速度结构可能意味着川西高原壳幔之间存在较为强烈的热交换过程,中上地壳内的低速高导层有可能成为龙门山 L 形的滑脱面,为龙门山中上地壳内浅源地震的孕育提供深部构造条件。

关键词 龙门山构造带;汶川地震;地球物理探测;深部结构; 低速高导层

中图分类号:P315.2 **文献标识码**:A

DEEP GEOPHYSICAL EXPLORATION OF LONGMENSHAN AND ITS ADJACENT AREA

Xu Zhaofan[1)], Pan Jishun[2)], Wang Fuyun[1)], Tian Xiaofeng[1)] and Feng Jianlin[1)]

(1) *Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou* 450002
2) *North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou* 450011)

Abstract In order to reveal the deep tectonic background of Wenchuan *M*s8.0 earthquake, the deep geophysical investigation data were collected and deep structural characteristics beneath Longmenshan area were discussed. The present results show that the Longmenshan tectonic zone is a steep variation belt of crustal thickness. At its two sides, the layers with low velocity or high conductivity are widely distributed, and there is big difference in structures of crust and uppermost mantle. It means that the Longmenshan tectonic zone has a high resistance basement. In western Sichuan Plateau, the Pn velocity is 7.6~7.8 km/s, which is lower than that of Sichuan Basin, where the Pn velocity is 8.0~8.2 km/s. The lower Pn velocity suggests that there is possiblly strong heat exchange between crust and mantle in western Sichuan Plateau. The low velocity-high conductivity layers in middle-upper crust are likely to be an *L* detachment, which served as the deep tectonic conditions for shallow earthquake development in Longmenshan tectonic belt.

Key words: Longmenshan tectonic belt; Wenchuan earthquake; geophysical probe; deep structure; low velocity - high conductivity layer

---

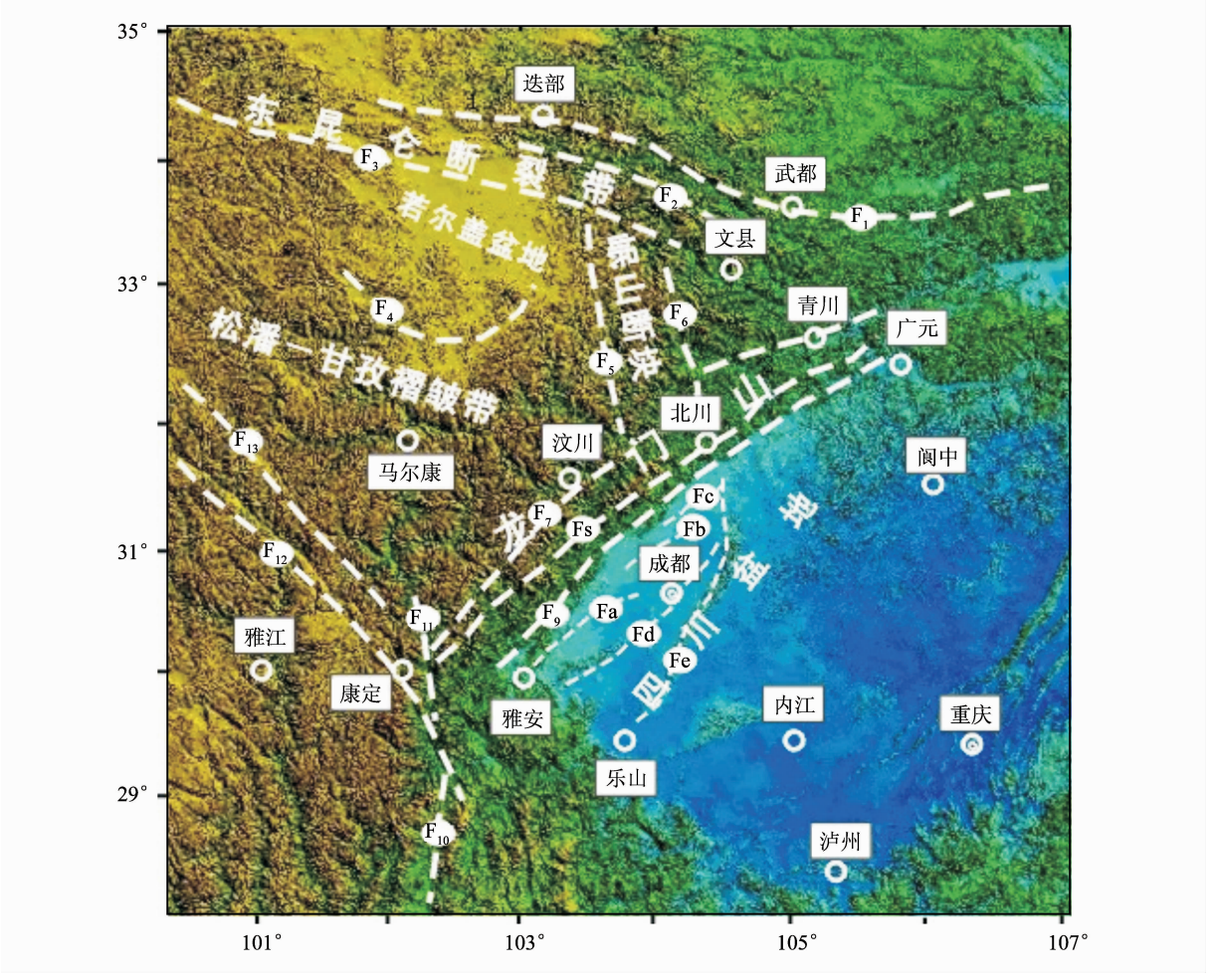
* **收稿日期**:2008-09-12
基金项目:国家自然科学基金(40841017);地震科学联合基金(106076)
作者简介:徐朝繁,男,1960 年生,博士,高级工程师,主要从事地震成像及壳幔结构研究. E - mail: xuzhaofan126@126.com

1 引言

汶川 *M*s8.0 特大地震发生后，有关青藏高原东缘龙门山地区的构造变形表现、深部地球动力学过程、深部结构特征等再次引起地学界的广泛关注。探测该地区地壳上地幔结构，揭示其内部构造特征，是深入理解青藏高原东缘地区陆陆汇聚、俯冲、碰撞、隆升奥秘的关键，而在目前情况下，由于地震已对龙门山地区地质稳定性造成了巨大的破坏，要利用高分辨的深部探测方法及较为全面的野外地质调查研究震源区精细结构十分困难，因此，充分利用已有的深部地球物理资料，研究其深部结构特征，就显得十分必要。自 20 世纪 70 年代起，在龙门山及其周边地区开展了一些深部地球物理探测工作，石油部门也在龙门山地区实施了一些地震反射剖面，这些重要的科学数据，为探讨龙门山地区的陆块碰撞机制与动力学问题奠定了基础。在国家自然科学基金的资助下，我们广泛收集了龙门山地区的深部地球物理探测研究资料，进行了初步的分析总结，希望能够给龙门山地区的深部变形机制研究提供参考。

2 龙门山地区的地质构造背景及地震活动性

龙门山地区位于青藏高原东缘，南北地震构造带的中段，主要由龙门山断裂带和岷山断块组成，东西分别与四川盆地、松潘-甘孜褶皱带相邻，北以东昆仑活动断裂带东段为界，沿着构造块体边界，分布有多组走向不同的断裂构造（图 1）。龙门山断裂带北起广元市青川县东，南至雅安市西的天全县附近，走向近北东，主要由茂汶-汶川（后山断裂），北川-映秀（中央断裂），彭县-灌县（前山断裂）等 3 条主干断裂组成，宽约 30 km～40 km，长近 500 km 的俯冲断带，发育有数量众多、规模不等的飞来峰构造[1]，表现为极其复杂的构造变形及地形地貌特征。龙门

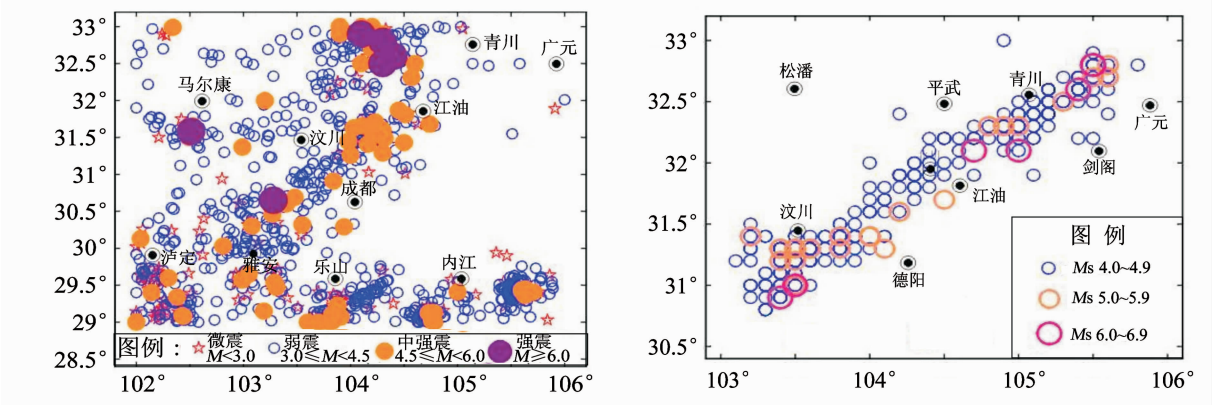


F_1 舟曲-两当断裂；F_2 武都-迭部断裂；F_3 东昆仑断裂；F_4 阿坝弧形断裂；F_5 岷江断裂；F_6 虎牙断裂；F_7 茂汶-汶川断裂；F_8 北川-映秀断裂；F_9 澎县-灌县断裂；F_{10} 安宁河断裂；F_{11} 大渡河断裂；F_{12} 鲜水河断裂；F_{13} 色拉寺-玉科断裂；Fa～Fc 龙门山山前断裂；Fd 蒲江-新津断裂；Fe 龙泉山断裂

图 1 龙门山及其邻近地区构造简图

Fig. 1 Brief tectonic map of Longmenshan and its adjacent area

山构造带与其西侧紧邻的松潘-甘孜褶皱带及北侧的岷山断块具有完全不同的构造走向[2,3]。大约以安县为界,龙门山断裂带的东北段及西南段具有迥然不同的历史地震活动及构造特征[4,5],历史上西南段(天全至安县段)中小地震频繁,具有晚第四纪活动性,是四川地区的主要活动断裂带及强震构造带之一,东北段(约安县至青川东段)仅偶有小震发生(图 2(a))。截至 2008 年 8 月 20 日,据中国地震信息网公布的汶川 *M*s8.0 地震 261 个 4 级以上中强余震序列初步定位结果显示,震中分布在沿龙门山断裂带长近 400 km,宽约 40 km 的近北东走向的条带上(图 2(b)),历史上仅偶有微震发生的龙门山断裂带东北段不但余震频度高,而且强度大,8 次 6 级以上强余震有 5 次发生在安县以北的龙门山断裂带东北段上。汶川 *M*s8.0 地震的余震空间分布特征似乎显示龙门山断裂带深部具有较为一致的构造属性和变形特征。



(a)1970 年 1 月 1 日—2008 年 4 月 30 日龙门山及其临近地区地震分布　(b) 汶川 *M*s8.0 地震 4 级以上余震分布(截至 8 月 20 日)

图 2　龙门山地区历史地震(a)及汶川地震 4 级以上余震序列(b)分布图

Fig. 2　Distribution of historical earthquakes(a) and Wenchuan *M*s8.0 earthquake aftershooks of *M*s≥4.0(b) in Longmenshan aera

3　深部地球物理探测

龙门山地区深部结构的探测始于 20 世纪 70 年代川南攀枝花地区的矿山爆破及天然地震的观测研究,之后中国地震局、中国科学院、地矿部及石油部门在龙门山及其邻近地区实施了多条深部结构探测剖面[6-17]。图 3 给出了截至 2008 年 8 月,在四川龙门山及其邻近地区所完成的深部地球物理探测剖面分布情况,这些剖面不包括中国地震局地球物理勘探中心目前正在成都平原西缘龙门山山前隐伏断裂带上进行的浅层地震探测工作。这些剖面按技术途径可分为深地震测深①~⑦、大地电磁测深⑧~⑩、地震反射剖面 A~F,这些深部地球物理观测研究给出了该地区不同分辨尺度的地壳及岩石圈地幔结构特征。

3.1　深地震测深剖面

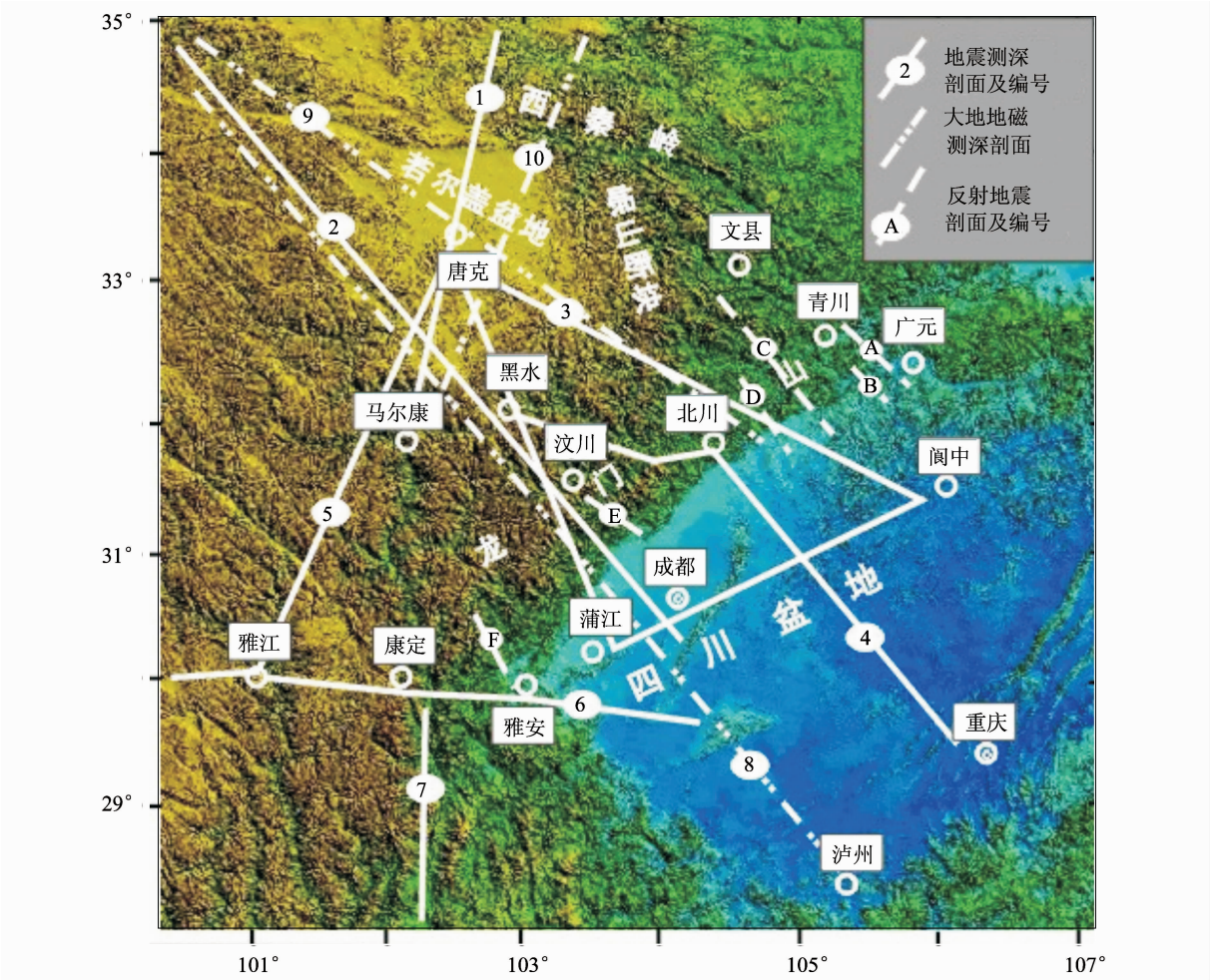
深地震测深又称之为宽角反射与折射,是一种可同时获取深部速度结构及界面形态展布特征的主动源地震探测方法,近几年来,基于快速发展起来的轻便数字地震观测技术,小炮间距及小观测点距的高分辨折射地震探测技术在城市活断层探测及一些复杂结构的探测研究中得到了较为广泛的应用[17-21]。自 20 世纪 70 年代至 2008 年 8 月,在龙门山及邻近地区共完成深地震测深剖面 7 条(图 3),其中红原-碌曲-合作为高分辨折射探测剖面,花石峡-邵阳、黑水-北碚和竹巴龙-资中剖面跨过了龙门山构造带的中南段。龙门山三角剖面分别在唐克、蒲江、阆中放炮,每次在炮点相邻的两边同时接收地震信号,其中的唐克-阆中及唐克-蒲江测线穿过了龙门山断裂带。

3.2　大地电磁测深剖面

大地电磁测深是一种利用天然源的电磁方法,它以天然的平面电磁波为场源,通过在地表观测相互正交的电磁场分量来获取地下地电构造信息。1984—1985 年间,地矿部物探研究所完成了一条横穿龙门山的阿坝-泸州大地电磁测深剖面[14],该剖面从川西北阿坝县,经马尔康、理县、汶川、都江堰、止于川东南的泸州,穿过了汶川 *M*s8.0 主震区。中石化南方公司于 2002 年完成的红原-岷县和玛曲-江油大地电磁测深剖面分别穿过了若尔盖盆地和龙门山构造带[17]。

3.3　地震反射剖面

地震反射剖面把反射信号作为从震源到反射界面,然后再到检波器的往返中所用去的双程回声时



深地震测深剖面:①红原-碌曲-合作;②花石峡-邵阳;③龙门山三角剖面; ④黑水-北碚;⑤唐克-奔子栏;⑥竹巴龙-资中;⑦拉鲊-长河坝;大地电磁测深剖面:⑧阿坝-泸州;⑨玛曲-江油;⑩红原-岷县;反射地震探测剖面:A :青川-茶坝宽线剖面;B:矿山梁测线;C:平武-南坝-厚坝 L55 测线; D:北川-通口-彰明 L14 测线;E:白鹿-香水 S6 测线;D:灵关-飞仙关测线

图 3 龙门山及其邻区地震与大地电磁测深剖面分布图

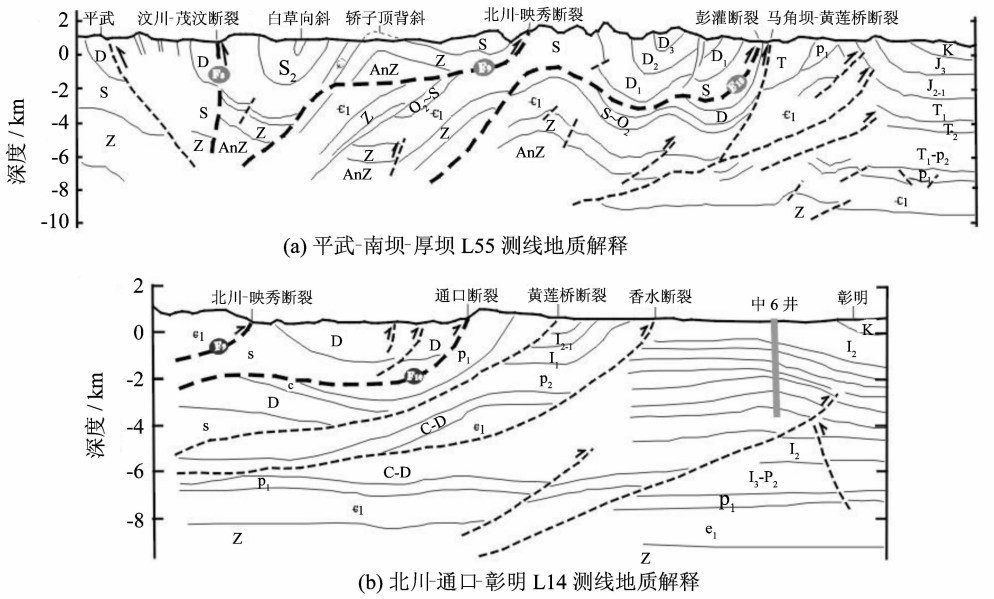
Fig. 3 Deep seismic and telluric electromagnetic sounding profiles in Longmenshan and its adjacent area

间的函数,它所反映的是可能的岩性分界面处波阻抗的差异特征。在龙门山地区完成的反射地震剖面有 6 条(图 3),均由石油部门完成。在所完成的 6 条剖面中,L55 测线较长,近垂直穿过了整个龙门山构造带,其次是青川-茶坝宽线剖面和 L14 测线,跨过了龙门山中央断裂及山前带,其他剖面较短,只跨过了龙门山构造带山前带的部分区段。平武-南坝-厚坝 L55 测线由四川石油管理局与美国地球物理服务公司(GSI)1828 队于 1985—1987 年共同完成,该剖面从新场至平武,横跨龙门山前、后山带,并于古城附近穿越青川断裂进入摩天岭东西向构造带,全长 83.4 km,是目前唯一一条穿过整个龙门山断裂带的地震反射剖面。

4 深部地球物理探测取得的主要成果

4.1 龙门山逆冲推覆构造带结构特征

龙门山地区实施的反射地震探测结果给出了探测区较为清晰的上部地壳内逆冲推覆构造变形特征,以及龙门山构造带与川西前陆盆地的接触关系图像。图 4 为测线 L55、L14 的地质解释图[15],反映了龙门山逆冲推覆变形带的典型构造特征。图 4 显示,龙门山推覆构造带是被几条巨大的 L 形逆掩断层分割成几个巨型的推覆构造,其间又发育着次一级或再次级的冲断层及冲断块。相邻的巨型推覆构造及其前缘下盘其地层发育、岩石性质、褶皱形态、断层特征等均有明显的差别,且较新的推覆构造重覆于较老的推覆构造之上。贾东等[5]通过详细的野外地质调查及对龙门山北段和南段的反射地震剖面构造的综合分析后认为,龙门山北段主要表现出阿尔卑斯型逆冲推覆构造,晚三叠纪变形强于新生代变形,南段则以基底卷入的叠瓦状冲断为特点,新生代变形较为突出。



(a) 平武-南坝-厚坝 L55 测线地质解释

(b) 北川-通口-彰明 L14 测线地质解释

图 4　典型反射地震剖面地质解释图[15]

Fig. 4　Geological interpretation for the reflected seismic profile[15]

4.2　地壳结构与构造

朱介寿等[22]利用四川 40 个固定和流动台站纪录资料,给出了川西地区 3 层地壳结构模型,求得上、中、下地壳的厚度分别为 21 km、14 km 和 17 km,地壳平均厚度约 51 ~52 km,Pn 波速度约 7.8 km/s。蒋国芳[23]利用四川测震台网短周期地震仪纪录的来自于不同方向的深远震在 Moho 所产生的 PS 波,用转换波方法求得四川地区 42 个台站下方的 Moho 面深度,结果表明:以龙门山构造带为界,其东西两侧的 Moho 深度存在较大差异,在东侧的成都附近约 45.8 km,而其西的甘孜约 62.4 km。赵珠等[24]利用四川台网纪录的爆破和天然地震 P 波资料,求得川西高原的地壳厚度约 61 ~64 km,Pn 波速度为 7.8 ~7.84 km/s,四川盆地的地壳厚度为 40 ~41 km,Pn 波速度为 8.15 ~8.2 km/s。

深地震测深结果显示[7-15],龙门山构造带是一个地壳厚度陡变带,带内地壳结构复杂,深大断裂发育,在其两侧地壳结构及上地幔顶部 Pn 波速度均存在较大差异。在龙门山东侧的四川盆地,莫霍面埋深 43 ~46 km,Pn 波速度为 8.0 ~8.2 krn/s;在龙门山断裂带底下,莫霍面深约 45 km,Pn 波速度为 7.8 km/s;在龙门山西侧的松潘-甘孜褶皱带内,莫霍面深度在 51 ~54 km 之间,Pn 波速度为 7.6 ~7.8 km/s,川西高原低的上地幔顶部 Pn 波速度结构可能意味着壳幔之间存在较为强烈的热交换过程。另外,深地震和大地电磁测深结果显示(图 5):在龙门山断裂带东西两侧的松潘-甘孜褶皱带及四川盆地的中上地壳中存在低速层和高导层[14,17],其埋深在 20 ~30 km 的深度范围内,龙门山构造带低速高导层缺失,具有高阻基底。竹巴龙-资中深地震测深剖面结果[8,25]显示:龙门山以西的川西高原,上地壳存在厚度为 8 ~10 km,速度为 5.80 km/s 的低速层,但四川盆地不存在上地壳低速层结构,表现为速度随深度增加的正常速度分布,这些结果表明,在四川盆地

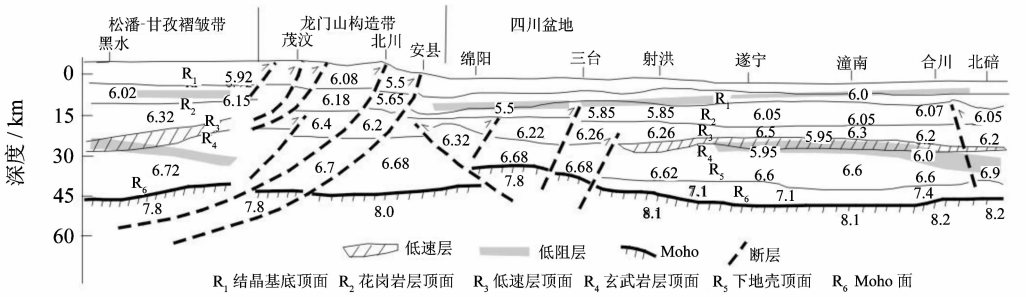


图 5　龙门山地区深地震测深及大地电磁测深结构剖面[13,14]

Fig. 5　Structural section of deep seismic and telluric electromagnetic sounding profiles of Longmenshan area

内,上部地壳内低速层的分布可能不具有普遍性。

一般认为上地壳的低速高导层是存在流体作用的显示,或者与推测存在的深层韧性剪切带有关,可以推测,中上地壳内的低速高导层,有可能成为龙门山 L 形逆掩断层的滑脱面,为龙门山中上地壳内浅源地震的孕育提供了深部构造条件。基于区域地壳结构模型的龙门山地震定位结果[26]及最新的中国中西部地震定位结果[27]均显示:龙门山及川西高原大部分地震事件的重新定位震源深度小于 20 km,为发生在中上地壳脆性结构层内的浅源地震。

5 结语

龙门山地区位于松潘-甘孜褶皱带、西秦岭造山带和川西前陆盆地的交汇区域,青藏高原物资东流的汇聚之地,地壳活动强烈,地质结构复杂,其地质演化过程、俯冲碰撞模式、强震形成机理等若干地学基本问题还存在较大争议,问题的关键是缺乏较为完整且有足够分辨率的深部结构信息。在龙门山及其邻近地区实施的深部地球物理探测研究工作虽然奠定了一定的基础,但限于当时的观测技术条件、较为恶劣的自然环境条件及该地区复杂的地质构造背景的制约,所取得的科学数据还存在较大的不足,其结果的分辨率较低,尚不能完全揭示出龙门山地区深部变形特征及其形成机理。充分利用已建立起来的现代地球物理观测技术系统,特别是高分辨率的主动源数字地震探测技术,以获取足够分辨率的深部结构图像就显得十分必要。

参 考 文 献

1 韩建辉. 论龙门山飞来峰群[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(1):55 – 59.

1 Han Jianhui. Discussions on the klippes in the Longmen Mountains[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, 26(1):55 – 59. (in Chinese)

2 王二七,等. 龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因[J]. 地学前缘, 2001, 8(2):375 – 384.

2 Wang Erqi, et al. Early Mesozoic left-lateral movement along the Longmenshan fault belt and its tectonic implication [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(2):375 – 384. (in Chinese)

3 刘树根,等. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带-川西前陆盆地系统为例[J]. 地质学报, 2003,77(2):177 – 186.

3 Liu Shugen,et al. Coupling relationships of sedimentary basin-orogenic belt systems and their dynamic models in west China —— A case study of the Longmenshan orogenic belt-west Sichuan foreland basin system[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2):177 – 186. (in Chinese)

4 陈国光,等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 2007,29(3):657 – 673.

4 Cheng Guoguang, et al. Primary research of activity segmentation of Longmenshan fault belt since late-quaternary[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(3):657 – 673. (in Chinese)

5 贾东,等. 龙门山褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 2003,9(3):462 – 469.

5 Jia Dong,et al. Structural features of the Longmenshan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, central China[J]. Geological Journal of China University, 2003, 9(3):462 – 469. (in Chinese)

6 陈学波,等. 龙门山构造带两侧地壳速度结构特征[A]. 见:国家地震局科技监测司编. 中国大陆深部构造的研究与进展[C]. 北京:地震出版社,1998,97 – 113.

6 Cheng Xuebo, et al. The crustal velocity structure features at the two sides of Longmenshan[A]. in: Progress in deep tectonics of Chinese mainland[C]. Beijing: Seismological Press,1998, 97 – 113. (in Chinese)

7 卢德源,等. 康定-渡口南北向构造带爆破地震测深的研究[J]. 地质评论,1989,35(1):41 – 50.

7 Lu Deyuang, et al. Deep seismic sounding in Kanding-Dukou tectonic belt[J]. Geological Review, 1989,35(1):41 – 50. (in Chinese)

8 崔作舟,陈纪平,吴苓. 阿尔泰-台湾岩石圈地学断面综合研究:花石峡-邵阳深部地壳的结构和构造[M]. 北京:地质出版社,1996,49 – 168.

8 Cui Zuozhou, Chen Jiping and Wu Lin. Synthetic study on lithospheric geoscience section from Altai to Taiwan: Deep structure and tectonics along Huashixia-Shaoyang profile [M]. Beijing: Geologocal Press,1996, 49 – 168. (in Chinese)

9 王椿镛,等. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构[J]. 中国科学(D 辑),2003,33(增刊):181 – 189.

9 Wang Chunyong, et al. Crustal P wave velocity of western Sichuan and eastern Tibet continent[J]. Science in China (Ser. D), 2003, 33(Supp.):181 – 189. (in Chinese)

10 王椿镛,等. 松潘-甘孜造山带地壳速度结构[J]. 地震学报,2003,25(3):229 – 241.

10 Wang Chunyong,et al. Crustal structure beneath the Songpan-Ganze orogenic belt[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3): 229 – 24. (in Chinese)

11 张先康,等. 阿尼玛卿缝合带东段上地壳结构——马尔康-碌曲-古浪深地震测深剖面结果[J]. 地震学报, 2007, 29(6):592 – 604.

11 Zhang Xiankang, et al. Upper crust structure of eastern Anymaqn suture zone: Results of Barkan-Luqu-Gulan deep seismic sounding profile[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 20(6):628 – 640. (in Chinese)

12 徐朝繁,等. 射线数分布分析法及其在复杂地壳结构探测中的应用[J]. 地震学报,2006,28(2):167 – 175.

12 Xu Zhaofan, et al. Ray hit analysis method and its application to complex upper crustal structure survey[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 19(2): 173 - 182. (in Chinese)

13 宋鸿彪. 龙门山造山带地质和地球物理资料的综合解释[J]. 成都理工学院学报, 1994, 21(2): 79 - 88.

13 Song Hongbiao. The comprehensive interpretation of geological and geophysical data in the orogenic belt of Longmen Mountains[J]. China Journal of Chengdu Institute of Technology, 1994, 21(2): 79 - 88. (in Chinese)

14 李立, 金国元. 攀西裂谷带及龙门山断裂带地壳、上地幔的大地电磁测深研究[J]. 物探与化探, 1987, 11(3): 12 - 19.

14 Li Li and Jin Guoyuan. Telluric electromagnetic sounding for Panxi rift valley and Longmenshan fault belt[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1987, 11(3): 12 - 19. (in Chinese)

15 宋文海. 论龙门山北段推覆构造及其油气前景[J]. 天然气工业, 1989, 9(8): 2 - 9.

15 Song Wenhai. Thrusting tectonics in north segment of Longmenshan and its perspective for oil and gas[J]. Natural Gas Industry, 1989, 9(8): 2 - 9. (in Chinese)

16 肖富森, 等. 龙门山构造带北段地震、地质综合解释[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 35 - 39.

16 Xiao Fushen, et al. Synthesis interpretation of seismology and geology for north Longmenshan tectonics belt[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 35 - 39. (in Chinese)

17 陈高, 等. 松潘 - 阿坝地区深部电性特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2006, 31(6): 857 - 878.

17 Chen Gao, et al. Electrical property of deep structure in Songpan-Aba district[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(6): 857 - 878. (in Chinese)

18 徐朝繁, 等. 新疆伽师强震群区上部地壳细结构的高分辨折射地震探测研究[J]. 地震学报, 2006, 28(1): 60 - 69.

18 Xu Zhaofan, et al. Fine upper crustal structure of Jiashi strong earthquake swarm region in Xinjiang inferred from high resolution seismic refraction experiment[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 19(1): 62 - 71. (in Chinese)

19 徐朝繁, 等. 高分辨折射地震资料处理方法及其应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1 052 - 1058.

19 Xu Zhaofan, et al. Processing method for high resolution seismic data and its application[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(4): 1 052 - 1 058. (in Chinese)

20 王夫运, 等. 川西盐源 - 马边地震带地壳速度结构和活动断裂研究[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(5): 611 - 621.

20 Wang Fuyun, et al. Upper crustal P wave velocity structure and active faults in Yanyuan - Mabian seismic zone, weatern Sichuang[J]. Science in China (Ser. D), 2008, 38(5): 611 - 621. (in Chinese)

21 林茂炳, 吴山. 龙门山推覆构造变形特征[J]. 成都地质学院学报, 1991, 18(1): 46 - 55.

21 Lin Maobin and Wu Shan. Deformational features of nappe structures in the Longmenshan [J]. Journal of Chendu Institute of Geology, 1991, 18(1): 46 - 55. (in Chinese)

22 朱介寿, 蒋国芳. 用人工地震初探川西地区的地壳结构[J]. 成都地质学院学报, 1984, 21(2): 111 - 122.

22 Zhu Jieshou and Jiang Guofang. Crustal structure beneath western Sichuan inferred from artificial seismic data[J]. China Journal of Chengdu Institute of Technology, 1984, 21(2): 111 - 122. (in Chinese)

23 蒋国芳. 利用地震转换求取四川地壳厚度的初步尝试[J]. 四川地震, 1987, 3: 36 - 41.

23 Jiang Guofang. The crustal thickness in Sichuan inferred from converted teleseismic waves[J]. Earthquake Study in Sichuan, 1987, 3: 36 - 41. (in Chinese)

24 赵珠, 张润生. 四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究[J]. 地震学报, 1987, 9(2): 154 - 165.

24 Zhao Zhu and Zhang Runsheng. Primary study on crustal and upper mantle in Sichuan[J]. Acta Seismologica Sinica, 1987, 9(2): 154 - 165. (in Chinese)

25 王椿镛, 等. 青藏高原东部壳幔速度结构和地幔变形场的研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 349 - 359.

25 Wang Chunyong, et al. Study of crustal and upper mantle structure and mantle deformation field beneath the eastern Tibetan plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(5): 349 - 359. (in Chinese)

26 赵珠, 等. 龙门山断裂带地壳速度结构和震源位置的精确修定[J]. 地震学报, 1997, 19(6): 615 - 623.

26 Zhao Zhu, et al. The Crustal structures and accurate hypocenter determination along the Longmenshan fault zone[J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(6): 615 - 623. (in Chinese)

27 杨智娴, 等. 中国中西部地区地震的重新定位和三维地壳速度结构[J]. 地震学报, 2004, 26(1): 19 - 29.

27 Yang Zhixian, et al. Earthquake relocation in middle - west China and 3D crustal structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(1): 19 - 29. (in Chinese)