

王椿镛, 杨文采, 吴建平. 2015. 南北构造带岩石圈结构与地震的研究. 地球物理学报, 58(11): 3867-3901, doi: 10. 6038/cjg20151101.

Wang C Y, Yang W C, Wu J P, et al. 2015. Study on the lithospheric structure and earthquakes in North-South Tectonic Belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 3867-3901, doi: 10. 6038/cjg20151101.

南北构造带岩石圈结构与地震的研究

王椿镛¹, 杨文采², 吴建平¹, 丁志峰¹

¹ “地震观测与地球物理成像”重点实验室, 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

² “大地构造与动力学”国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要 南北构造带是中国大陆东西部大地构造的主要分界, 也是大陆内部强烈地震发生的主要地区之一. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震发生后, 在南北构造带及周边地区进行了大量的野外科学考察、深部地球物理探测和流动地震观测, 在岩石圈结构与构造、强震发生的深部构造环境和动力学过程等方面获得了重要的进展. 本文综述近年来发表的一批研究成果, 包括岩石圈结构的深部地球物理探测和成像, 地震层析成像, 地震各向异性及壳幔变形, 与近期发生的强烈地震相关研究, 以及与大陆动力学有关的研究等. 自 2000 年以来, 我国建成了具有 1000 多个地震台站的国家和区域地震台网. 它们在实时为地震监测服务的同时, 其产生的海量数据还提供用于地球科学研究. 一批作者在国内发表了研究成果, 大大提高了对南北构造带的认识. 我们虽然取得许多共识性的重要成果, 但是也存在一些问题, 发现不同作者的结论是相互矛盾的. 其原因之一可能是, 现有台网的数据成像分辨率和精度仍不足以识别在地壳深处的细节, 例如在孕震尺度概念下的地震危险区. 加强流动地震观测, 提高台站分布的密度, 取得高可信度的目标模型是解决问题的重要方面. 近年来“中国地震科学台阵观测”计划在南北构造带上实施的大型流动台阵观测, 结合固定地震台网的资料, 加上高分辨率深部地球物理探测, 以获得高可信度的地壳上地幔三维精细结构及物性成像, 是提高地震科学和大陆动力学研究水平的一个有效途径.

关键词 南北地震带; 岩石圈结构; 地震各向异性; 地震台阵; 大陆动力学

doi: 10. 6038/cjg20151101

中图分类号 P315

收稿日期 2015-11-13, 2015-11-17 收修定稿

Study on the lithospheric structure and earthquakes in North-South Tectonic Belt

WANG Chun-Yong¹, YANG Wen-Cai², WU Jian-Ping¹, DING Zhi-Feng¹

¹ Key Lab of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, Beijing 100081, China

² State Key Lab of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

Abstract The North-South tectonic belt is the main boundary between the east and west parts of Chinese continent, and is also one of the major regions of strong earthquakes in the continental interior. After the 2008 Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake, a large number of projects (such as the field investigation, deep geophysical exploration and mobile seismic observation) were carried out in the North-South tectonic belt and the surrounding areas. The results of lithospheric structure and tectonics, and the deep tectonic environment and dynamic process of strong earthquakes were obtained. This paper reviews a number of research articles published in recent years. The special symposium includes the deep geophysical exploration and imaging of the lithosphere structure, seismic tomography, seismic anisotropy and crust-mantle deformation, researches on recently

基金项目 国家自然科学基金委员会—中国科学院学科发展战略研究合作项目 2013-1, 地震行业专项(201308011)和国家自然科学基金(41174070, 41474073 和 41474088)资助.

作者简介 王椿镛, 男, 1945 年生, 研究员, 主要从事固体地球物理学方面的研究. E-mail: wangcy@cea-igp.ac.cn

occurred strong earthquakes and the continental dynamics. Since 2000, China has built the national and regional seismic networks containing more than 1000 seismic stations, which serve the seismic monitoring in real time, and provide mass seismic data for the earth sciences. A number of authors have published their results at home and abroad, which greatly improved the understanding of the North-South tectonic belt. However, although many important achievements in common sense have been made, there are also some issues, which are contradictory. One of the reasons may be that the resolution and accuracy of existing network data imaging is still not enough to recognize the details in deep crust, such as the earthquake risk region with the concept of seismogenic scale. An important aspect is to strengthen the temporary seismic observation, improve the distribution of the station, and obtain the high reliability of the target model. In recent years, the large-scale temporary seismic array observation, which is implemented in the North-South tectonic belt made by the project "China's Seismic Array Observation", combined with the data from permanent seismic networks and high-resolution deep geophysical exploration, is an effective way to raise the research level on the earthquake sciences and the continental dynamics.

Keywords North-South seismic belt; Lithospheric structure; Seismic anisotropy; Seismic array; Continental dynamics

1 引言

地震是人类面临的一种严重的自然灾害. 它在全球的分布是不均匀的, 但也不是随机的. 地震多的地区震中常呈带状分布, 通称地震带. 全球性的地震带有环太平洋地震带、阿尔卑斯地震带(即欧亚地震带)和大洋中脊(海岭)地震带. 长时期以来, 地震学家们都认识到, 中国大陆中部有一条贯穿南北的强烈地震的密集带(图 1). 20 世纪 50 年代李善邦先生主持编制中国第一张地震烈度区域图时已经注意到这一条地震密集带, 并对其两侧地质构造差异作对比(李善邦, 1957). 地震学家王振声在 1976 年对南北地震带的范围, 分段及其强震活动特征作了初步的探讨, 认为此带基本上沿 104°E 从北向南延伸, 以 33°N 为界分为南北两段(王振声等, 1976). 1978 年傅承义先生在中国科技大学研究生院讲授“固体地球物理学基础”中, 对“南北地震带”作了明晰的解释: 按照地震活动性和地质构造特征, 可将我国划分为 23 个强震活动带, 其中, “南北地震带”由滇南的元江, 往北经过西昌、松潘、海原、银川直到内蒙古的磴口, …(傅承义等, 1985). 据已有地震记载, 我国大陆的 7 级以上强震有五分之二是发生在这条地震带上. 近 300 多年内, 该带集中了有历史记录以来一半的 8 级以上大地震, 如 1654 年天水 8 级地震, 1739 年平罗 8 级地震, 1833 年嵩明 8 级地震, 1879 年武都 8 级地震, 1920 年海原 8.5 级地震, 1927 年古浪

8.0 级地震, 以及 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震. 南北地震带的活动与从缅甸至印尼苏门答腊的南亚地震带强震活动相关联(汪一鹏等, 2007). 有些学者进一步推测中国南北地震带向北可延伸至蒙古, 与俄罗斯的贝加尔裂谷相连; 向南可到延伸至缅甸. 因此, 南北地震带是东亚大陆内部强烈地震发生的主要场所之一.

在大地构造图上, 中国大陆中部东经 102° — 106° 之间突显一条纵贯南北的构造带, 从滇西南, 经四川和甘肃, 直至贺兰山. 20 世纪 50 年代张文佑先生(1959)在《中国大地构造纲要》中论述了南北构造带对中国大地构造的划分意义, 并指出以此为界, 中国东部的盆山构造体系以 NNE 和 NNW 向断裂控制; 而西部以 NEE 和 NWW 向断裂控制. 马杏垣先生(1989)在《中国岩石圈动力学地图集》的新构造图中明确标示了北起内蒙阿拉善地块东界, 南至云南红河断裂, 呈“之”字形展布的大型构造带. 在不同动力学过程的共同作用下, 阿拉善块体、鄂尔多斯地块、松潘—甘孜地块、扬子克拉通, 和川滇菱形块体等发生了不同性质的变形响应, 总体上形成了一条由不同方向、不同性质断裂和褶皱构成近南北向的复杂构造带, 统称为南北构造带. 地质学家将南北构造带分为北、中、南三段. 北段位于阿拉善地块与贺兰山—六盘山之间, 中段为北东向的龙门山逆冲推覆构造带, 南段为近南北向的鲜水河—小江断裂带. 该构造带的中南段位于青藏高原和华南地块之间的过渡带, 具有强烈的构造变形特征.

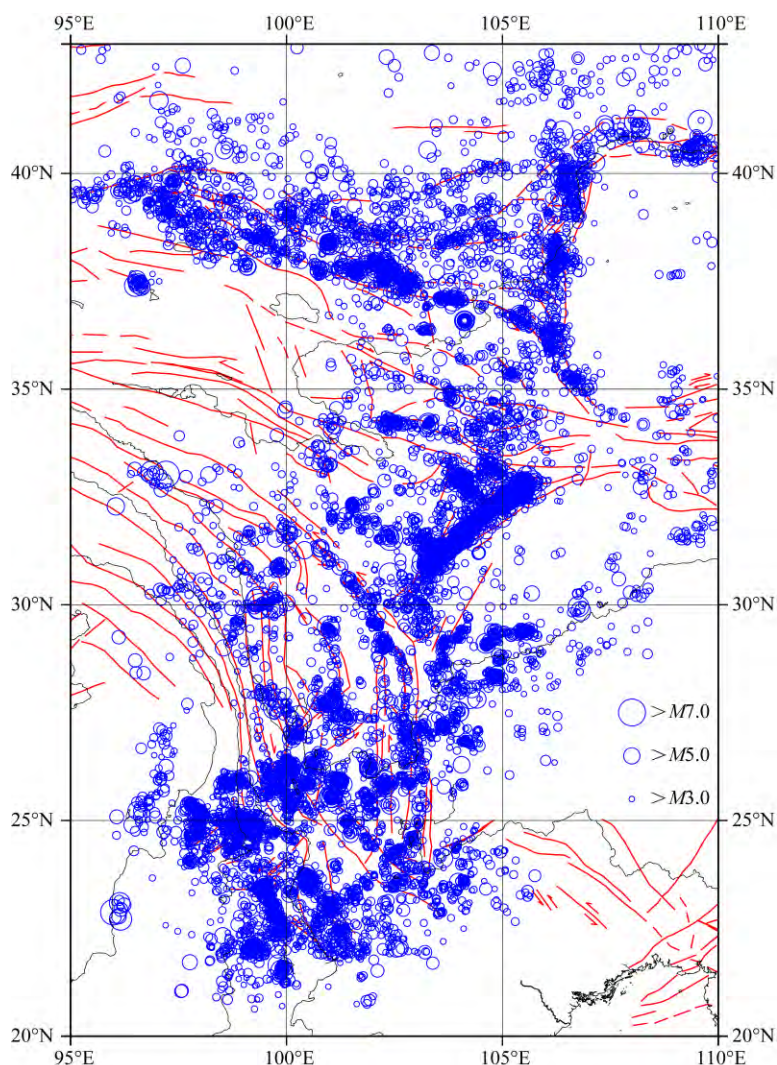


图1 南北构造带地震震中分布图(1970—2014, $>M3.0$) (图1—7底图的断裂分布引自邓起东等(2002))

Fig.1 Distribution of the earthquake epicenters in the North-South Tectonic Belt (1970—2014, $>M3.0$)

GPS 测量得到的相对于稳定欧亚板块的中国大陆地区速度场 (Wang et al., 2001; 牛之俊等, 2005) 揭示了现今中国大陆的地壳变形特征. 中国大陆的东部和西部速度场存在明显的差异, 西部的水平运动速率为 $1\sim 3\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$, 而东部则 $<1\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$, 西部的运动速率明显大于东部. 南北构造带位于西部和东部之间的过渡区, 其速度场具有复杂的变化形态.

自 20 世纪 80 年代以来, 我国地球科学工作者对南北构造带进行了持续的研究, 特别是在深部构造, 地球动力学与大陆强震孕震环境方面, 取得了一批观测和研究成果 (滕吉文, 1994). 他们用深地震测深方法构建地壳速度结构 (如, 张少泉等, 1985; 阚荣举和林中洋, 1986; 胡鸿翔等, 1986; Kan et al., 1986; 熊绍柏等, 1986; 崔作舟等, 1987, 1996; 陈学波等, 1988; 尹周勋和熊绍柏, 1992; 林中洋等, 1993; 李

清河等, 1991; 王有学和钱辉, 2000; 李松林等, 2001, 2002; 王椿镛等, 2003a, b; 白志明等, 2003, 2004; 王有学等, 2005; Wang et al., 2004, 2007; 张忠杰等, 2005a, b; 高锐等, 2006a, b; 张先康等, 2007, 2008), 用大地电磁测深方法研究深部电性结构 (如, 孔祥儒等, 1987; 李立和金国元, 1987; 孙洁等, 1989, 2003; 吴刚和余钦范, 1990; 赵国泽等, 2004, 2008; 汤吉等, 2005; 王绪本等, 2009), 用布格重力异常分析地壳密度结构 (殷秀华等, 1998; 楼海和王椿镛, 1999, 2005; 楼海等, 2002; 李勇等, 2005). 与此同时, 利用天然地震资料进行地震波层析成像、接收函数以及噪声成像等方法构建地壳上地幔三维速度结构模型 (如, 刘建华等, 1989, 2000; 孙若昧等, 1991; 宋仲和等, 1991; 陈立华等, 1992; 王椿镛等, 1994, 2002a, 2008; 丁志峰等, 1999; 刘福田等, 2000; 苏伟等, 2002; Huang et al., 2002; Wang et al., 2003; 吴建平等,

2004, 2006, 2009; 郭颺等, 2004; 陈九辉等, 2005; 周民都等, 2006; 刘启元等, 2009), 进行横波分裂和地球介质各向异性研究 (阮爱国, 2002; 常利军等, 2006, 2008a, b; 王椿镛等, 2006, 2007; Wang et al., 2008). 这些研究获得了南北构造带及其周边地区的地壳上地幔速度结构横向变化, 主要断裂带的深部性状、以及强烈地震的深部孕育环境等重要的基础资料. 2000 年前后开始实施的“国家重大基础科学研究发展规划(973)”项目“大陆强震机理及其预测”将南北地震带作为开展地震研究的重点地区之一. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震发生后, 国家进一步加强了南北构造带及周边地区的野外科学考察和流动地震观测. 国内外地球科学家在岩石圈结构与构造、强震发生的深部构造环境和动力学过程等方面的研究获得了重要的进展. 2014 年 9 月中国地球物理学会大陆动力学专业委员会和固体地球物理专业委员会召开学术研讨会并建议出此专集. 本专集汇集了汶川 $M_s 8.0$ 地震之后, 特别是近年来的一批新的研究成果. 南北地震带是中国大陆内部地震活动最强的地区之一, 作为我国主要的地震危险重点监视区, 展开对南北地震带的深部结构与变形的研究对揭示我国强震活动特性及深部孕震环境具有重要的意义.

2 南北构造带岩石圈结构

发生在龙门山逆冲断裂带上的 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震, 是继 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 地震以来中国大陆人口伤亡最为惨重, 经济损失最为严重的一次大地震. 汶川 $M_s 8.0$ 地震后, 国内外地球科学家对南北构造带及周边地区的地球科学研究项目急剧增加. 通过布设大型宽频带流动地震台阵, 辅以深地震测深、大地电磁测深, 以及重磁探测等手段, 综合地球物理观测与解释, 获取地壳与上地幔精细结构和介质物性的三维分布特征、深部应力及变形的分布, 以期揭示强震的深部孕震环境, 以及强震发生的动力学过程.

2.1 深地震测深和地壳 P 波速度结构

(1) 深地震宽角反射/折射探测剖面

深地震宽角反射/折射剖面是利用人工地震方法探测岩石圈结构的最主要方法之一. 它的优点在于能够揭示速度和界面同时具有横向变化特征的地壳上地幔速度结构. 自 20 世纪 80 年代以来, 一批地球物理深部探测试验计划在南北地震带完成了大约 35 条地震剖面. 这些剖面构成了对该地震带的良好

覆盖 (图 2). 早期的探测剖面炮点间距和观测点间距都比较大, 导致二维速度结构的横向分辨相对较低. 但是当时的记录由于野外的背景噪音水平低, 获得的地震信号信噪比高, 因此对壳内震相识别的可靠性高.

在川西藏东深地震测深野外观测的基础上, Wang 等 (2007) 提出了横穿龙门山断裂带的 EW 向竹巴龙—资中剖面 and NE-SW 向穿过松潘—甘孜地块的奔子栏—唐克剖面的二维 P 波速度结构, 其中显示了川西高原和四川盆地是两个地壳结构截然不同的构造单元, 龙门山断裂带为区域地壳结构的分界. 川西高原的地壳平均厚度、地壳平均速度和 Pn 速度分别为 62 km 、 $6.27\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $7.60 \sim 7.80\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 四川盆地的则为 43 km 、 $6.45\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $8.10 \sim 8.20\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 川西高原马尔康以南的大部分地区上地壳底部存在厚度 $\sim 8\text{ km}$ 的低速层, 且其下地壳介质具有强衰减 ($Q_p = 100 \sim 300$) 的特征. 四川盆地具有地壳平均速度高和地幔顶部的 Pn 速度高的特点.

2010 年完成的遂宁—茂县—阿坝剖面始于四川盆地中部、与龙门山近垂直地朝西北方向穿越 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震极震区, 全长 500 km . 嘉世旭等 (2014) 对反映不同构造单元的震相记录、特别是强震区复杂震相信息的详细分析和模拟追踪计算, 得到龙门山中段褶皱造山带及两侧的横向不均匀地壳速度结构. 解释结果揭示了稳定的四川盆地地壳结构与被改造增厚的川西北高原地壳结构性差异; 探测到高原壳内介质由上向下的岩性变化, 特别是下地壳介质速度大幅降低、岩性强烈弱化的塑性流变性质; 发现了四川盆地与川西北高原之间褶皱造山带下地壳存在由西向东、下缓上陡的巨型铲式上升流; 上升流沿褶皱带东部边缘在龙门山中段上中地壳以陡倾角度向上逆冲, 造成龙门山上地壳中央断裂带附近强烈上隆并使结晶基底突出地表大幅抬升.

西昌及其附近地区强震频繁发生, 历史记载有 1536 年西昌北 7.5 级和 1850 年西昌 7.5 级地震. 盐源—西昌—马湖剖面以研究川西盐源—马边地震带的活动断裂和深部结构为目的. 王夫运等 (2008) 分析了该剖面上地壳的变形特征. 盐源盆地、后龙山地区的上地壳为表层低速和深部均匀高速的双层结构特征. 盐源推覆构造由表层低速推覆体, 向西缓倾的构造拆离面和深部高速基底构成的薄皮构造变化, 金河—箐河断裂是其推覆前缘; 磨盘山断裂为一西倾的低速带, 延伸至基底顶面; 安宁河断裂和则木

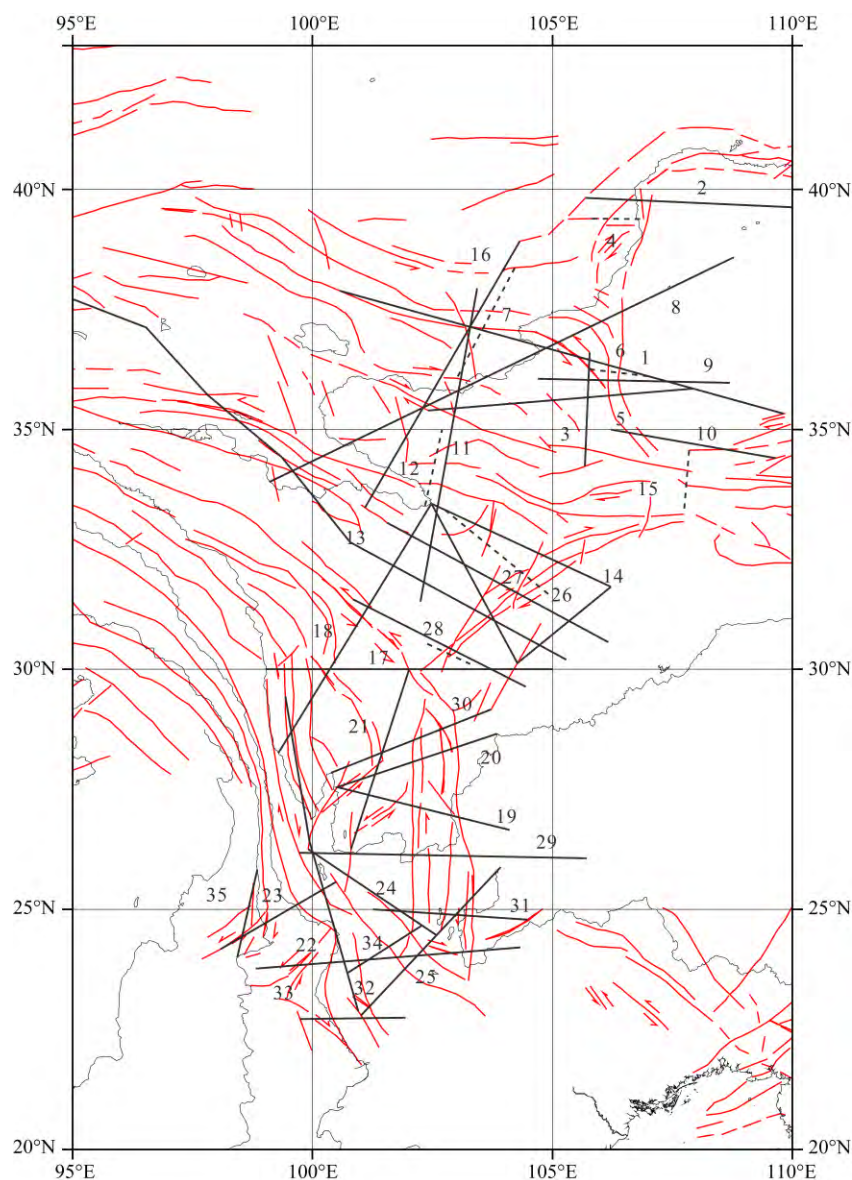


图2 南北构造带深地震探测剖面位置示意图

深地震宽角反射/折射剖面 and 深反射剖面分别用黑色粗线和虚线(及数字)表示。1, 门源—渭南剖面(张少泉等, 1985); 2, 阿拉善—文登剖面(王帅军等, 2014); 3, 西吉—中卫剖面(李松林等, 2001); 4, 银川地堑深反射剖面(方盛明等, 2009); 5, 临潭—灵台和成县—西吉剖面(李清河等, 1991); 6, 六盘山深反射剖面(李洪强等, 2013); 7, 海原深反射剖面(H. Wang et al., 2014); 8, 玛沁—靖边剖面(李松林等, 2004; Liu et al., 2006); 9, 通渭—黄陵剖面(李英康等, 2014); 10, 康县—十堰剖面(李英康等, 2015); 11, 马尔康—曲禄—古浪剖面(张先康等, 2008); 12, 唐克—合作剖面和合作—临夏剖面(王海燕等, 2014); 13, 花石峡—简阳剖面(崔作舟等, 1996); 14, 唐克—蒲江—阆中三角剖面(陈学波等, 1988); 15, 大巴山深反射剖面(董树文等, 2014); 16, 合作—景泰剖面(Zhang et al., 2013); 17, 竹巴龙—资中剖面(王椿镛等, 2003a); 18, 奔子栏—唐克剖面(王椿镛等, 2003b); 19, 丽江—者海剖面(熊绍柏等, 1986); 20, 丽江—新市镇剖面(崔作舟等, 1987); 21, 拉萨—长河坝剖面(崔作舟等, 1987); 22, 中甸—思茅剖面(林中洋等, 1993); 23, 遮放—宾川剖面(胡鸿翔等, 1986); 24, 洱源—江川剖面(胡鸿翔等, 1986); 25, 思茅—马龙剖面(Yan et al., 1985); 26, 若尔盖—龙门山—四川盆地深反射剖面(Guo et al., 2013); 27, 遂宁—茂县—阿坝剖面(嘉世旭等, 2014); 28, 金川—芦山—乐山剖面(王帅军等, 2015); 29, 丽江—攀枝花—清镇剖面(徐涛等, 2014); 30, 盐源—西昌—马湖剖面(王夫运等, 2008); 31, 楚雄—罗平剖面(Wanget al., 2009b); 32, 玉溪—临沧剖面(王夫运等, 2014); 33, 镇康—泸西剖面(潘素珍等, 2015*); 34, 普洱—泸西剖面(张恩会等, 2013); 35, 腾冲自治—中山剖面(王椿镛等, 2002b)

Fig. 2 A sketch map of the location of the deep seismic exploration profiles in the North-South Tectonic Belt
Deep seismic wide-angle reflection/refraction (DSS) profiles and deep reflection profiles are represented
by black thick lines and dotted lines (and numbers).

河断裂为东倾的舌状低速带, 延伸到基底内; 在深处, 大凉山断裂分为两支, 表现为狭窄条带内速度结构的强烈变化, 西支西倾, 东支东倾, 两支断裂均延伸至基底内; 西昌中生代盆地东缘断裂为强速度梯度带, 倾向南西, 延伸至基底顶面. 该区的强震活动主要受安宁河、则木河、大凉山断裂控制.

2010 年和 2011 年底先后在南北地震带南段实施了长度近 300 km 的玉溪—临沧剖面 and 长度 600 km 的镇康—泸西剖面. 王夫运等(2014)对玉溪—临沧剖面解释获得的结果显示: 沿测线地壳结构呈西薄东厚的特征, 以红河断裂带为界, 断裂带以西地壳较薄, 约 34 km, 以东地壳加厚至 44 km; 红河断裂带两侧速度结构具有明显的差异, 西侧速度较低, 东侧速度明显偏高. 潘素珍等(2015)对镇康—泸西剖面各炮初至波资料解释获得了剖面的基底速度结构. 解释结果显示: 沿线基底界面形态起伏变化剧烈, 深度在 1.0~7.0 km 范围内变化, 且速度的横向不均匀性明显. 在测线西端地表速度约 $4.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 基底深度较浅; 地表速度在三江褶皱系下下降至 $4.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 而基底埋深达 7.0 km 左右. 在扬子地台基底埋深缓慢变浅, 基底深度约 5.0 km, 地表速度约 $4.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 测线在东端进入华南块体, 基底深度迅速变浅, 地表速度增至 $4.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 速度变化剧烈地区与断裂带有对应关系, 红河断裂带两侧速度等值线及界面形态变化剧烈. 对普洱—泸西剖面的二维速度结构, 张恩会等(2013)提出, 剖面西南侧上地壳具有异常低的 P 波速度和泊松比, 暗示上地壳以 α 相长英质组分为主, 而剖面东北上地壳相对较高的 P 波速度和泊松比则暗示其物质组成以花岗岩—花岗闪长岩为主.

长度 410 km 的金川—芦山—乐山剖面穿过 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震震中区, 王帅军等(2015)构建了二维 P 波速度结构模型. 扬子块体和松潘—甘孜块体显示不同的速度结构特征, 地壳厚度由南向北逐渐加厚. 沉积盖层在四川盆地厚达 7.8 km, 而松潘—甘孜块体最薄处只有几百米厚; 在中上地壳, 扬子块体平均速度比松潘—甘孜块体的高 $0.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 在四川盆地与松潘—甘孜块体的过渡带附近, 界面起伏变化明显. 过渡带以北在深度大约 20 km 处存在速度 $5.80 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、厚度为 8.0 km 的低速层, 周围介质的平均速度为 $6.0 \sim 6.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 壳内界面在扬子块体内部起伏变化不大, 但在过渡带两侧的 Moho 界面深度由扬子块体的 42 km 增加至松潘—甘孜块体的 62 km. 芦山 $M_s 7.0$ 地震震源位于二维速度结构异常紊乱和界面起伏变化的地带.

丽江—攀枝花—清镇剖面距离云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震主震区不超过 50 km. 徐涛等(2014)利用该地震测深剖面的初至波震相走时数据, 通过有限差分反演揭示该地区上地壳速度结构. 剖面结晶基底厚度平均为 2 km 左右; 小江断裂带内部速度较低, 其东西两侧的速度较高; 推测小江断裂带区域地壳强度比较低, 加上断裂两侧的应变速率很高, 因此小江断裂带和鲁甸—昭通断裂带存在未来发生较大地震的可能性. 该深地震测深剖面还分别跨越了峨眉山玄武岩区的内、中、外带. 探测结果(徐涛等, 2015)显示: (1) 沿剖面结晶基底的平均深度在 2 km 左右; (2) 中地壳平均速度结构为 $6.2 \sim 6.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 内带局部呈现大约幅值为 $0.1 \sim 0.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高速异常, 下地壳速度结构, 在内带为 $6.9 \sim 7.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 中带和外带偏低, 为 $6.7 \sim 7.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 在内带和中带交界附近, 受小江断裂带的影响, 上、中、下地壳均呈现相对低速异常特征; (3) 小江断裂两侧, 尤其东侧地壳平均速度较低, 且固结地壳的平均速度也较低, 初步认为小江断裂至少向地下延伸至 40 km 以深, 可能切穿整个地壳; (4) 沿剖面 Moho 面深度表现为, 内带范围内深约 47~53 km, 中间呈上隆的特征; 中带深约 42~50 km, 外带深约 38~42 km, 中带至外带, Moho 面逐渐变浅. 内带 Moho 面局部隆起、固结地壳呈现高速异常特征, 可能是二叠纪地幔柱活动引起的底侵作用及岩浆上侵的结果, 为古地幔柱的活动遗迹.

(2) 深地震反射探测剖面

深地震反射剖面方法是在地球物理勘探的反射地震技术基础上作一定的探测技术改进而形成的一种深部探测方法. 在揭示地壳和上地幔顶部的细结构方面, 深地震反射剖面具有比其他地球物理探测方法更多的优点. 在大地构造关键地区开展的深部结构和动力学研究通常把深地震反射剖面作为主要的探测手段.

SinoProbe-02 深地震反射探测计划实施了长 300 km、横贯东祁连山和河西走廊南缘的深反射剖面. Wang H 等(2014)对剖面北段的资料作了处理和解释. 研究结果表明, 东祁连山上地壳的特点是断层弯曲褶皱和复式系统, 它涉及到可能导致从早古生代碰撞构造与新生代陆内变形的显生宙地层. 局部存在包含白垩纪地层的半地堑结构. 该地区的活动构造主要是标志青藏高原北缘的左行滑移的海原和天景山断层系. 走滑构造结构具有变倾角和倾向, 并单一进入深度 40~45 km 上的共同滑脱面. 因为

两个断层并不切穿和断错其下方的莫霍面,在青藏高原东北部的活动地壳和地幔变形必须解耦。作为 1920 年海原 8.5 级地震的发震构造, Wang H 等(2014)认为海原断裂可能是一条先存的,在古生代产生的软弱带,并在新生代复活。在近期,海原断裂以具有逆冲分量的左旋走滑为主。无论是海原断裂还是天景山断裂带均显示倾角随深度而显著变化的特征。在近地表,它们显示为近乎直立的结构,而走向深处后,在中-下地壳分裂成两个分支,并变得平缓。

穿过银川地堑的深地震反射剖面(方盛明等, 2009)长~70 km,通过数据处理获得的叠加剖面显示了银川盆地地壳精细结构、深部断裂系(黄河断裂、银川断裂、贺兰山东麓断裂)特征及深浅构造关系。银川地堑上地壳为双程走时 8 s(深度约 20 km)反射面以上的区域,上地壳上部地层层位丰富,分段连续性较好,上地壳下部地层层位特征不明显;下地壳(8~13 s)反射能量较弱,反射同相轴不明显;下地壳下部壳幔过渡带(13 s 附近)由一组能量较强、持续时间较长(1.5 s)的反射波组组成,厚度约 4.5 km。芦花台断裂、银川断裂分别于 12~12.5 km、18~19 km 深处交汇于贺兰山东麓断裂,贺兰山东麓断裂于 28~29 km 深处交汇于黄河断裂。黄河断裂为错断 Moho 面的深大断裂,银川地堑为以黄河断裂为主、其他断裂为辅组合而成的负花状构造。根据贺兰山东麓断裂和银川断裂的相互关系,作者认为贺兰山东麓断裂对 1739 年平罗—银川 8 级地震起主要控制作用。

2011 年在青藏高原东缘实施了从若尔盖、穿过龙门山到四川盆地、东南走向的深地震反射剖面。Guo 等(2013)将深反射图像与地质、全球定位系统和地球化学证据相结合,强烈表明,扬子地壳延伸到该区域的下方。地震剖面图像显示在松潘甘孜地体有巨厚的三叠系沉积覆盖。在不同的地壳块体这些三叠纪沉积物厚度变化很大。此外,无论是松潘甘孜地体东北部的龙日坝断裂带还是龙门山断裂带均显示强烈的壳内反射,它终止于与地壳-幔边界(莫霍面)相一致的深度上。为此,Guo 等(2013)提出了一个新的构造模式:地壳变形被认为参与了青藏高原东缘沿龙门山的斜向挤出和隆起。在更广泛的背景下,地震反射剖面成像的岩石圈结构将推进关于青藏高原东缘对印度—欧亚大陆碰撞的构造响应的理解。

芦山 $M_s 7.0$ 地震震中区完成的一条长近 40 km 深地震反射剖面,自西北向东南穿过双石—大川断裂、芦山向斜、莲花山背斜、名山向斜和大邑断裂等

构造。叠加剖面图表明(王夫运等, 2015)浅部褶皱和断裂构造发育,在上地壳存在 6 条逆冲断裂,而下地壳则存在一条明显的变形转换带。在深度 16 km 左右存在一个滑脱层,浅部的 6 条断裂最终都归并到该滑脱层上。参考主余震精定位结果,芦山地震的发震断裂应该是位于双石—大川断裂和大邑断裂之间的隐伏断裂,其两侧的断裂受控于发震断裂而活动,形成剖面上“Y”字型余震分布。隐伏断裂属山前断裂,不是前山断裂。作者认为芦山地震可能不是汶川地震的余震。

王海燕等(2014)利用 2004 年和 2008 年完成的唐克—合作剖面和合作—临夏剖面资料,进行两条剖面的联线处理后,获得总长达 400 km 的深地震反射剖面。叠加剖面清晰显示青藏高原东北缘地壳及上地幔盖层的精细结构。从浅到深显示,6.0~7.0 s 和 16.5~18.0 s 两个强反射界面将 0~20 s 剖面划分为上地壳、下地壳和上地幔三套反射层系。剖面显示西秦岭造山带下地壳向若尔盖逆冲推覆的深部构造特征。西秦岭下地壳北倾的强反射及其北侧南倾的强反射特征揭示出扬子与华北两个大陆板块在西秦岭造山带下的汇聚行为。16.5~18.0 s 范围内 Moho 界面的埋深和起伏形态暗示青藏高原东北缘地壳经历了高原隆升后强烈的伸展减薄作用。高锐等(2006a, b)认为该剖面显示的以北倾为主的强反射特征是若尔盖盆地地壳整体向西秦岭构造带俯冲。如此造成的上地壳加厚能很好地解释西秦岭构造带的低波速比分布。

2.2 大地电磁测深和电性结构

地壳上地幔的电性结构是重要的深部地球物理参数,其信息主要来源于大地电磁测深。LMS-L3 和 DBS-L1 两条大地电磁剖面分别位于西秦岭与南北构造带交汇区 106°E 东、西两侧。这两条剖面分别跨过了龙门山构造带东北部的青川段和宁强段。詹艳等(2014)二维电性结构揭示,在 106°E 西侧 LMS-L3 剖面的深部电性结构自北向南,西秦岭北缘、成县盆地北缘、康县(即勉略构造带)和平武—青川断裂带都表现为明显的电性梯度带,深部延伸可达几十公里;西秦岭造山带、碧口地块与龙门山构造带东北段 3 个构造单元整体表现为高电阻体、呈现往南叠合且角度逐渐变陡的趋势。在 106°E 西侧西秦岭造山带区域的深部存在壳内低阻层,而东侧区域表现为高电阻体,深部电性结构在 106°E 东、西两侧的差异与该区深部速度结构特征一致。LMS-L3 和 DBS-L1 两条剖面南段的深部电性结构图像揭示出

青川段和宁强段内的平武—青川断裂带具有明显不同的深部结构特征,平武—青川断裂带在青川段为明显的电性梯度带,而宁强段是完整的高电阻块体。汶川强余震向东北发展止于青木川镇附近,与平武—青川断裂带延伸深度和向北东方向的延伸长度密切相关,同时高电阻块体的宁强段对汶川强余震东北发展起到了阻挡作用。

程远志等(2015)对穿过思茅兰坪地体、川滇菱形块体及进入扬子地体的兰坪—贵阳大地电磁测深剖面展开了深部电性结构研究。通过二维非线性共轭梯度反演得到了沿剖面的较为详细的地壳上地幔电性结构,结合其他地质和地球物理资料的分析,确定了主要断裂带和边界带的位置和深部延伸情况,以及壳内高导层的分布位置。研究表明:剖面壳幔电性结构分块性特征与区域地质构造分布特征基本一致;兰坪—思茅地块存在中上地壳高导层,川滇菱形地块中西部存在下地壳高导层,川滇菱形地块东部和华南地块西部存在中上地壳的高导层;川滇菱形地块中部攀枝花附近的高导层埋深最深,而华南地块西部会泽附近的高导层埋深则最浅;兰坪—思茅地块和川滇菱形地块中下地壳的高导层可能与青藏高原物质的东南逃逸有关。

李冉等(2014)对云南北部地区孟连—罗平的北东向大地电磁测深剖面所作的解释表明:该区的三个强震带地球深部都存在壳内低阻体,地震发生在电阻率梯度带上;断裂带的两侧块体介质的电阻率差异是强震活动带重要的深部背景。总体来说,沿剖面的地壳上地幔电性结构反映出与区域地质构造资料基本一致的构造特征。

赵凌强等(2015)对跨过西秦岭造山带的阿坝—若尔盖—临潭—兰州大地电磁剖面数据进行了精细化处理和二维反演,结果表明:西秦岭北缘断裂带为主要的南倾大型电性边界带,延伸深度穿过莫霍面;临潭—宕昌断裂带具有电性边界带特征,其延伸情况具有东、西差异。西秦岭造山带自地表到深度约 20 km 范围表现为东北和西南浅、中部深的倒“梯形”高阻层,在高阻层之下广泛发育低阻层;松潘—甘孜地块中下地壳存在西南深、东北浅低阻层,其东北侧的陇西盆地具有稳定的成层性结构,表明西秦岭造山带正处于松潘—甘孜地块向北挤压和陇西盆地向南的阻挡挤压作用中。松潘—甘孜地块从西南向东北推挤、东北侧陇西盆地相对阻挡的相互作用可能是 2013 年岷县漳县 6.6 级地震发生的外部动力学机制,而震源区特殊介质属性是该地

震发生的内部因素。

2.3 重力—航磁资料分析和密度结构

地球的密度结构是地球物理学研究的经典内容。用重力异常揭示地壳三维密度结构是地球物理的重要目标。南北构造带的布格重力异常分布如图 3 显示,数据取自全球重力模型 EGM2008(Pavlis et al., 2012)。青藏高原东部的重力异常梯级带具有南北地震带及其周围地区中最显著的重力异常特征。青藏高原是一个大范围的重力低异常区,布格重力异常在高原东部为 $-400 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以下。在青藏高原周围,布格重力异常都在 $-250 \sim -150 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右。与青藏高原重力异常区形成很大的反差。围绕高原东部的重力梯级带在北段沿着祁连山与河西走廊分布,为东南走向。向东到西秦岭转向近南北方向,沿龙门山西侧分布。再向南,转为南西向走向,沿小金河断裂带分布。到丽江附近,则转为东西向,北西西向延伸到西藏南部边界。四川盆地为一个明显的重力高异常区,布格重力异常大于 $-100 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,向西突出。在青藏高原东部(川西高原)和四川盆地之间重力场变化最为强烈,重力梯级带变窄,重力等值线密集。四川南部与云南大部为一个附加在青藏高原重力低异常区上的次一级重力低异常区,向东南方向突出。布格重力异常在 $-250 \sim -150 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。在这个低异常区中间,从川南攀枝花到滇中楚雄还有南北向的一个局部重力高异常区。西秦岭地区为一个近东西向的重力低异常区。鄂尔多斯地区和阿拉善地区的布格重力异常变化小,在 $-200 \sim -150 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 左右。鄂尔多斯块体西北部河套盆地及其西侧的吉兰泰盆地为局部重力低异常区,而贺兰山为局部重力高异常区。

沿南北地震带的布格重力异常变化具有分段特征。在地震带南段,小江断裂带位于从四川会东、云南东川到红河的重力低异常区内部。地震带中段,从龙门山到西秦岭,位于重力异常强烈变化的重力梯级带上。在西秦岭以北的地段,沿鄂尔多斯地块西缘,地震带上及其两侧布格重力异常相对变化不大。另外,南北地震带及其周围地区显示出,布格重力异常强烈变化的地方,地震发生频繁,且分布相对密集。但是,在重力异常变化不太大的地方,如南北地震带北段,也有大量的地震发生。

杨文采等(2015a)提出了用多尺度刻痕分析方法研究地壳三维密度、用密度结构对地震进行分类的观点。初步解释认为,南北地震带从北到南中下地

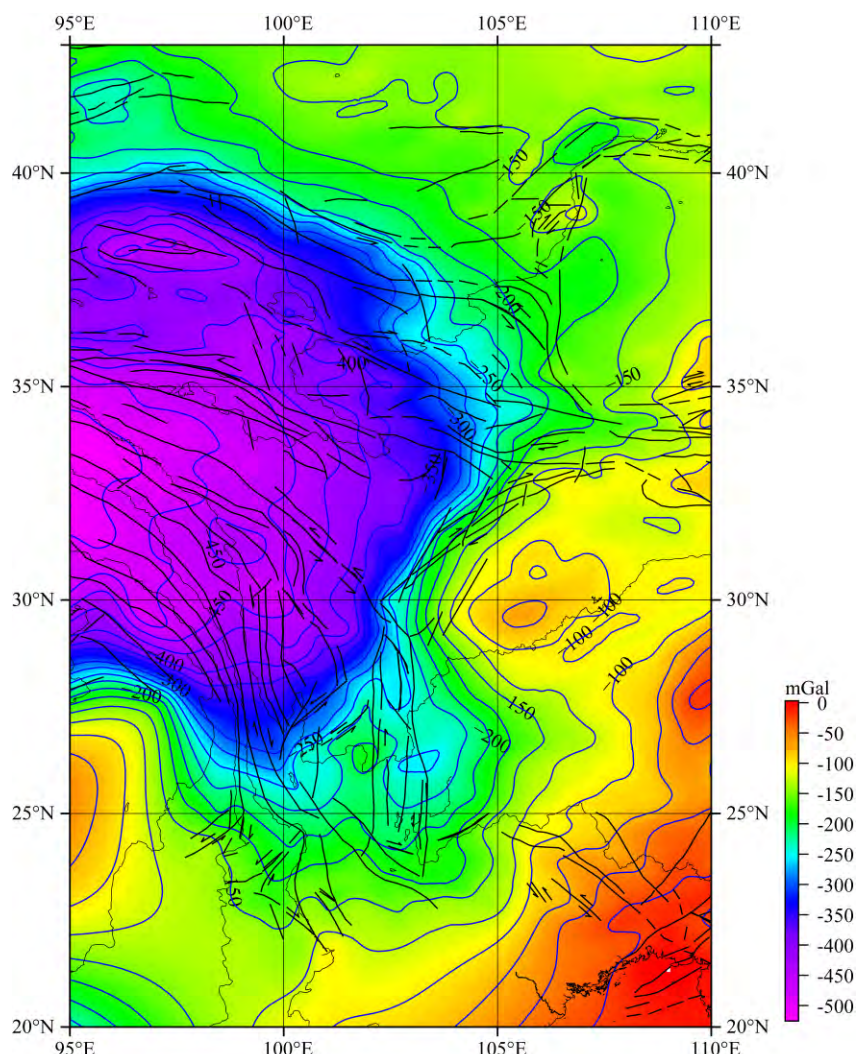


图 3 南北构造带布格重力异常图. 南北地震带中段落在一条巨型的重力异常梯级带上

Fig. 3 Bouguer gravity anomaly map in the North-South Tectonic Belt. The middle section of the North-South Tectonic Belt is located in a giant gravity anomaly gradient belt

壳的密度结构包含四种不同的类型,分别对应于拉张型、挤压型、挤滑型和拉滑型.不同类型的地壳密度结构与不同类型的震源机制密切相关.下地壳岩石的蠕动或许是大陆地震断裂活动的根源之一.杨文采等(2015b)对滇西地区重力异常进行了多尺度密度反演,首先利用小波变换对重力异常进行多尺度分解,接着利用功率谱分析方法估算各层场源的平均深度,然后利用广义密度反演方法进行各层密度反演,取得区域地壳多个深度上的密度扰动图像.滇西上地壳高密度扰动出现在扬子克拉通内部和西缘,以及澜沧江断裂带西缘,后者对应昌宁—勐连蛇绿混杂岩带及岛弧岩浆岩带.上地壳低密度异常主要反映西昌裂谷带和高黎贡—腾冲一带的岩浆房和兰坪—思茅盆地中的坳陷带.滇西上地壳和中地壳出现三条低密度扰动带,与三期大陆碰撞带吻合.大

部分 6 级以上地震分布在低密度异常区或它们的边缘,只有在西昌—元谋古裂谷带才分布在高密度异常区.克拉通内部古裂谷带地震可分布在高密度异常区.在北纬 26° 线以南下地壳为高密度区,以北为低密度区.因此,北纬 26° 线的一个属性是下地壳密度差异分界线.滇西由北向南地壳加厚缩短的程度是逐渐变弱的,在 26° 线以南,南北向的地壳加厚缩短不明显.高黎贡、澜沧江和红河三条走滑剪切带在滇西中地壳密度扰动平面图中表现为密度急变的梯度带,表明它们都穿过中地壳并可能延伸到下地壳.

江为为等(2014)利用重力数据采用 Parker Oldenburg 方法反演了南北构造带及邻域地区的地壳厚度,同时采用体波地震层析成像方法反演了研究区的地壳至上地幔的三维速度结构.通过分析研究表明南北构造带为地壳厚度剧变区,西侧为地壳

增厚区,东侧的鄂尔多斯、四川盆地地壳稳定区,而再向东为地壳逐渐减薄区。中国岩石层减薄与增厚的边界基本被限定在大兴安岭—太行山—秦岭—大巴山—武陵山一带,这也是东部陆缘带和中部扬子、鄂尔多斯克拉通地区深部构造边界的分界线,其两侧不仅浅层地质构造存在较大的差异,上地幔深部的物性状态和热活动也明显不同,这说明研究区的岩石层和软流层结构以及深部物质的分布存在横向非均匀性。中部地区和青藏高原深部构造边界的分界线位于 100°E — 102°E 左右。

杨文采等(2015c)将青藏高原区域重力场小波多尺度分析和反演应用于刻划地壳分层的三维密度结构,取得的主要结果包括六个等效层密度扰动图件,为研究地壳构造和物质运动提供了重要佐证。研究表明在青藏高原地壳内密度变化有以下三个规律。(1)从上地壳到下地壳,平面分布上低密度区的分布范围逐渐扩大;在下地壳只有刚性克拉通地体才显示高密度。(2)从上地壳到下地壳,平面分布上密度扰动区的尺度逐渐扩大;到下地壳高或低的密度区不仅数量大为减少,而且边界更加清晰。(3)从上地壳到下地壳,青藏高原南部的低密度带不断向北移动,反映印度陆块向欧亚大陆的向北俯冲。青藏高原下地壳密度高的克拉通地体有羌塘、柴达木和巴颜喀拉三个;而昆仑山、阿尔金山、祁连山、和冈底斯地块都属于低密度的中新代构造活动单元。青藏高原低密度的物质由下地壳向上挤出,在中上地壳体迅速减小。由于下地壳低密度的物质向上挤出,中地壳密度高的克拉通地体会相应发生裂解,使地块的数目增加。高原北缘的下地壳低密度侧向挤出物质的枝杈有三支;其中一支从西昆仑到天山,另一支从龙门山西秦岭到银川盆地。第三支从高原南缘理塘到大理挤出。它们可能反映下地壳管道流,宽度约 $180\sim 300\text{ km}$ 。7 级以上地震震中都位于下地壳低密度侧向挤出物质的枝杈,也与下地壳管道流位置吻合,表明下地壳低密度带限定可能的物质蠕动范围,而下地壳物质蠕动又会触发大陆地震。

陈石等(2015)对南北地震带南段的地壳厚度作重震联合最优化反演。基于南北地震带南段 67 个固定台站接收函数反演得到的 Moho 面深度,使用由 EGM2008 重力异常模型(Pavlis et al., 2012)计算的布格重力异常,验证重震联合密度界面反演方法的有效性。结果表明,重震联合密度界面反演方法可以有效地同化不同地球物理方法获得的反演模型,且可以改进由于空间分布不均匀的接收函数结果进

行插值可能而引起的误差。通过引入 Crust1.0(Laske et al., 2013)的 Moho 面深度为初值,同时考虑地壳密度的横向不均匀分布,通过模型之间的联合反演有效改善了地球物理反演模型间的不一致性问题。反演得到的最优化 Moho 面深度模型与已知 67 个台站位置接收函数模型之间的标准差约 1.9 km ,小于 Crust1.0 与接收函数结果模型之间标准差为 3.73 km 的统计结果。

申重阳等(2015)利用维西—贵阳剖面观测的重力与 GPS 定位数据,结合区域背景重力场、地质构造及深部地球物理成果,反演该剖面的地壳密度结构。研究表明:剖面布格重力异常总幅差变化达 $190\times 10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,具“斜 N”分段变化特征,从西往东呈上升—下降—上升的态势;高程与布格重力异常比值的趋势性转折部位为“地轴”核心和小江断裂带东侧,可能与先存构造或新生构造发育有关;剖面地壳密度结构可分上、中和下三层结构,各层底界面平均埋深分别约 20 km 、 35 km 和 51 km ,金沙江—红河断裂带和鲜水河—小江断裂带为地壳结构相对简单与复杂的过渡带;地壳厚度西深东浅,下地壳厚度变化相对较大;华坪—攀枝花附近的 Moho 面隆起和上地壳高密度体的存在对青藏高原物质向东南逃逸和东构造结的侧向挤压均起一定阻挡作用。

金川—芦山—键为重力剖面穿越芦山 $M_{\text{s}}7.0$ 地震区,与龙门山断裂带南段直交,采用高精度绝对重力控制下的相对重力联测与同址 GPS 三维坐标测量,获得了沿剖面的自由空气异常和布格重力异常,并对布格重力异常进行了剩余密度相关成像和密度分层结构正反演研究。杨光亮等(2015)分析了芦山地震的构造环境:龙门山断裂带南段存在垂直断裂走向的宽广的巨型重力梯级带,重力变化达 $252\times 10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 以上,反映四川盆地与松潘—甘孜地块地壳厚度陡变性质;四川盆地与松潘—甘孜地块过渡区存在 $(30\sim 50)\times 10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的剩余异常“凹陷”,可能与上地壳低密度体、山前剥蚀与松散堆积和推覆体前缘较为破碎有关;剩余密度相关成像显示地壳密度呈现分段性特征,在芦山地震位置出现高低密度变化。

石磊等(2015)构建了云县—会东和普洱—七甸两条重力剖面的二维地壳密度结构,其中普洱—七甸剖面与孟连—马龙地震剖面部分位置重合。结合区域重力异常特征及下地壳视密度填图结果,认为红河断裂带是南北地震带南段地区重要的构造分界线,断裂带南北向密度结构和莫霍面分布形态存在

较大差异,沿走向构造变化。云县—会东剖面的大姚—会东段下地壳底部存在密度较高的壳幔过渡层,结合下地壳底部壳幔过渡层的密度分布特征,认为该过渡层不是攀西裂谷下的“裂谷垫”,而是由岩浆底侵作用造成的。张恩会等(2015)用基于抛物线密度模型的频率域三维界面反演方法对川滇地区作三维界面反演。

在芦山—康定地区,玄松柏等(2015)对 EGM2008 重力模型(Pavlis et al., 2012)计算的布格重力异常 1~5 阶离散小波变换,得到三方向分量平方和的平方根(HVDM)图像;利用两条实测剖面布格重力异常数据,得到剖面的布格重力异常归一化总梯度(NFG)图像。结果分析表明:(1)垂直于龙门山断裂带南段剖面的 NFG 图像显示推覆构造体前端切割较浅、后端逐步变深至中地壳,表明松潘—甘孜块体在深约 10~30 km 存在滑脱构造,形成逆冲推覆的龙门山构造带;(2)HVDM 图像和剖面的 NFG 图像均显示龙门山断裂带西南段与中段和东北段不同,松潘—甘孜块体对四川盆地的逆冲推覆作用沿北东方向具有分段性;(3)雅江—洪雅剖面 NFG 图像显示鲜水河断裂带和龙门山断裂之间存在高梯度变化带,在鲜水河断裂带下方强变形带不仅在 20 km 左右东倾至龙门山断裂带前缘,且逐渐近垂直向下伸入至少到下地壳,反映了两大断裂带交汇区域变形作用较强。强烈的左旋剪切的鲜水河断裂带对芦山—康定地区构造活动具有主要的控制作用。

王新胜等(2013)综合重力观测资料和地震波走时资料,反演了青藏高原东北缘岩石圈三维密度结构。首先进行地震层析成像,得到研究区岩石圈三维 P 波速度结构;然后利用速度-密度经验关系式,将速度扰动转化为密度扰动,建立三维初始密度模型;最后利用分离的布格重力异常反演得到了岩石圈三维密度结构。反演结果表明:青藏高原东北缘地壳内,密度异常等值线走向与地表断裂走向基本一致,进入地幔后,密度异常等值线走向发生了顺时针旋转,表明地壳和地幔具有不同的构造运动模式,暗示可能发生了壳幔解耦;80~100 km 深度上,与密度异常相比,P 波速度异常明显偏低,推测该区可能发生了部分熔融或者岩石含水量的增加。

张季生等(2007)对松潘—甘孜和西秦岭造山带地球物理特征以及基底构造的综合研究表明,松潘—甘孜地块与西秦岭造山带的基底性质相似,均具有扬子地块的构造属性。高玲举等(2015)利用最新重力、航磁资料,通过异常分析和反演计算,研究

鲜水河断裂、理塘断裂、金沙江断裂的重磁异常特征、莫霍面特征、居里面特征。计算结果表明:川西高原莫霍面东南浅、西北深,地壳厚度在 43~63 km 之间。居里面特征表现为条带状,深度在 17~23 km 之间。鲜水河断裂带对应莫霍面深度梯度带,居里面为高低起伏圈闭。理塘断裂带北段莫霍面局部隆起相间,南段莫霍面逐渐抬升,居里面呈现由西向东加深的梯度带。金沙江断裂带,居里面形成局部抬升,深部可能存在高温地热异常源。综合分析认为,川西高原地壳结构主要特点为:增厚的下地壳,热-塑性变形的中地壳,脆性变形的上地壳。

2.4 地震层析成像

20 世纪 80 年代末至 90 年代初,刘福田研究组(刘建华等,1989)和宋仲和研究组(陈立华等,1992)分别对南北地震带开展了体波走时层析成像和面波层析成像研究。这是我国地震学家最早获得的该区域地壳上地幔 P 波和 S 波三维速度结构图像。尽管当时地震台站布局不均匀且台站数量有限,导致反演结果的分辨率较低,但是速度结构的大尺度特征是正确的,其基本结论至今一直沿用。

(1) P 波走时层析成像

利用研究区域(20°N—43°N, 95°E—110°E)及其周边地区中国地震科学台阵布置的流动台站,国家和区域台网的固定地震台站记录的远震 P 波资料,采用层析成像技术揭示深达 800 km 的三维 P 波速度图像。图 4 显示了 70 km 和 200 km 深度的上地幔 P 波速度扰动分布。成像结果表明,青藏高原东部及东南部上地幔总体表现为较强的低速异常,延深可达 200~300 km,表明青藏高原内部岩石圈的力学强度相对较低;南北地震带东侧的鄂尔多斯地块和四川盆地表现为明显的高速异常,深度可达 200 km 左右。华南块体西南部的南盘江盆地也表现为高速异常,延深可达 120 km 左右。这些高速、高力学强度的块体对青藏高原物质东向挤出起到了强烈的阻挡作用。与这些具有高力学强度的稳定块体相比,阿拉善地块弱高速和局部弱低速异常并存的特征,可能表明在青藏高原东北缘物质的挤压作用下,该地区的岩石圈可能正在经历变形和破坏。

图 4 还显示了鄂尔多斯地块周缘的银川—河套地堑系等拉张断陷盆地表现为明显的低速异常,这些异常可以延伸至 600 km 以上,可能表明这些拉张盆地的形成与深部热作用密切相关。攀枝花附近存在较小范围的高速异常,可能与晚古生代地幔柱活动导致高密度物质侵入岩石圈有关,它对青藏高

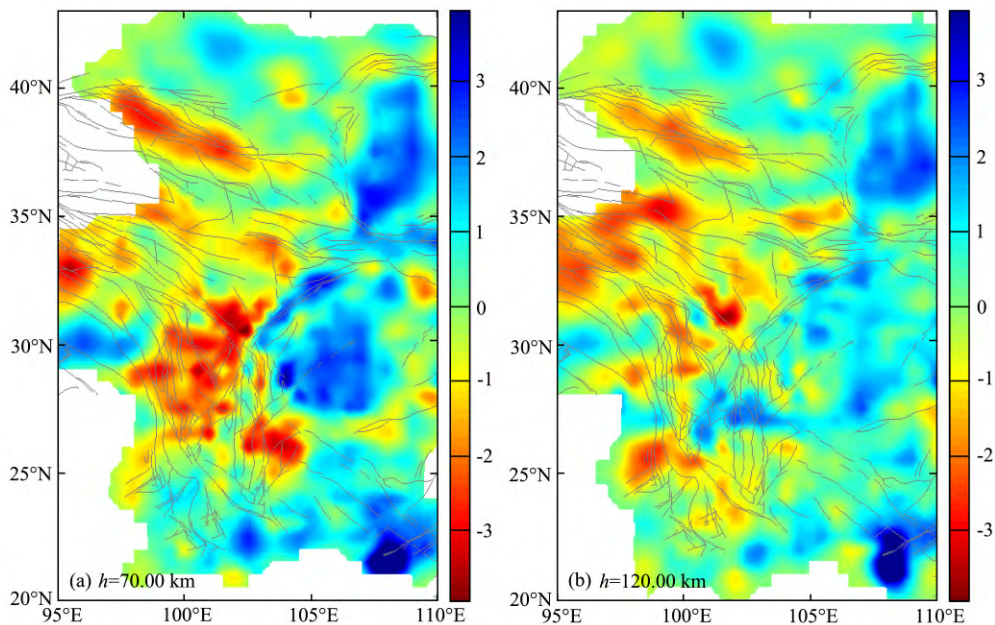


图4 南北构造带上地幔三维P波速度结构(单位: dV_P/V_P 的百分数).

(a) 70 km 深度的速度扰动分布; (b) 120 km 深度的速度扰动分布

Fig. 4 Three dimensional P-wave velocity structure of upper mantle in the North-South Tectonic Belt (Unit: percentage of dV_P/V_P).

(a) Velocity perturbation at depth of 70 km; (b) Velocity perturbation at depth of 120 km

原物质的南向挤出具有一定的阻挡作用,是造成川滇活动块体南北两个次级块体差异运动的重要因素. 缅甸弧以东存在与震源深度分布相一致的高速异常,云南大部分地区在上地幔范围内存在低速异常. 根据层析成像以及接收函数成像等结果的综合分析认为,腾冲火山的形成可能与印度板块与欧亚板块大陆岩石圈在东部碰撞后,大陆型俯冲板块与早先的海洋型俯冲板块在上地幔发生断离,导致深部热物质沿断离带上涌有关 (Hu et al., 2000). 在上地幔过渡带之下围绕青藏高原东构造结存在高速异常,可能与印度板块早期的板块俯冲有关.

Wang Z 等(2010) 基于川滇及周围地区 254 个固定及流动地震台站记录的区域和远震事件的 P 波和 S 波走时数据,联合反演了南北地震带中南段的 P 波和 S 波的地壳和上地幔速度结构. 南北地震带中南段显示的特征是速度结构从高原东南部的山地到扬子地台具有强烈的不均匀性. 四川盆地的上地壳为低 V_P 和低 V_S 异常,与地表的地质特征一致. 前陆盆地主要包含几公里厚的中生代和古生代沉积岩. 扬子地台的深部特征是,克拉通岩石圈向西南倾斜到青藏高原东南缘下方的 400 km 深度,与松潘—甘孜地块和羌塘地块西北部上地幔低速异常明显不同. 在下地壳和地幔顶部的深度上,扬子地台以西的地区显露出低 V_P 和低 V_S 速度 (1%~2%)

的层位,可能反映了下地壳的韧性流. 南北地震带的地震构造明显地受到中国大陆西南下方下地壳的韧性流和上地幔强烈的不均匀性的影响.

Lei 和 Zhao (2009) 利用 2008 汶川 $M_S 8.0$ 地震余震的 P 波和 S 波到时资料反演了龙门山断裂带的 P 波和 S 波速度和泊松比的细结构. 结果表明,汶川主震以北和以南地区的结构存在较大差异,以北地区的龙门山断裂带具有很强地壳不均匀性,这与该区发生了大量汶川地震的余震相一致. 龙门山断裂带主震以南地段具有低 V_P 、低 V_S 和高泊松比 σ 异常,主震震源区下方存在明显低速异常体,表明流体可能存在于龙门山断裂带内,为下地壳流沿龙门山断裂带上侵提供了可能的地震学证据. 利用流动地震台阵及固定台站地震波到时资料反演龙门山断裂带深部结构的研究还有郭颺等(2009),吴建平等(2009),胥颐等(2009),李志伟等(2011),李大虎等(2015)等. 汶川 $M_S 8.0$ 地震的深部动力成因与龙门山断裂两侧的构造差异有关. 松潘—甘孜造山带中下地壳强度较弱,青藏高原的向东运动受到四川盆地刚性岩石层阻碍,迫使龙门山发生垂向变形,中下地壳厚度增加,莫霍面弯曲下沉,基底则褶皱抬升向山前盆地逆冲,地壳形变所产生的应力积累为汶川地震的发生提供深部动力来源.

吴建平等(2013)对小江断裂带及周边区域进行

了壳幔三维 P 波速度结构研究. 结果表明,在中上地壳,小江断裂带内部主要为低速异常,其东侧主要为高速异常.在中下地壳,小江断裂带中部为低速异常,北部和南部主要为高速异常,其中北部的高速异常可延伸到地表附近,南部的高速异常可一直延伸到上地幔.推测小江断裂带中部的低速异常与深部热作用有关;北部的高速异常可能是晚古生代地幔柱活动导致大量基性和超基性幔源物质侵入地壳引起的,它的存在对青藏高原物质向南逃逸起到了一定的阻挡作用,可能是导致川滇活动块体北部次级块体快速抬升的重要因素;南部顶界面向北倾斜的高速异常体对川滇活动块体向南滑移起到了进一步的阻挡作用,导致其上覆的中上地壳低速异常区发生较强的变形和强烈的地震活动,同时在上地幔深度范围起到了稳定的作用,使其南部区域的介质受青藏高原物质向南挤出的影响明显减小.

胥颐等(2013)用地震波到时资料反演了云南地区的 P 波速度结构.反演结果显示,哀牢山—红河断裂两侧的地壳速度结构存在明显的差异,滇中地区的速度异常分布与小江断裂、元谋断裂、程海断裂等南北走向的断裂一致,反映了青藏东部地壳块体顺时针旋转产生的构造效应;壳内低速异常具有分层和分区特征:在哀牢山—红河断裂西侧和澜沧江之间低速异常主要分布在地壳中上部,在小江断裂和元谋断裂附近分布在地壳中下部,在滇中地区则广泛分布于地壳底部至莫霍面附近,东、西两侧分别受到小江断裂和哀牢山—红河断裂的限制.其中攀西地区的低速异常与小江断裂和元谋断裂在此附近交汇形成的热流传输通道以及张裂时期强烈的壳幔热交换有关;在哀牢山—红河和澜沧江地区,除了印支块体向东南方向的挤出之外,印缅块体的侧向挤压和向东俯冲也对地壳深部的构造变形产生了一定的影响,由此引发的地幔上涌将导致热流物质沿着断裂通道进入地壳形成低速层.因此,哀牢山—红河断裂不仅在地壳浅部是分隔印支块体和华南块体的地质界限,也是控制两侧区域深部构造变形和壳内韧性流动的分界.

徐小明等(2015a)基于南北地震带南段 90 个固定台站和 356 个流动台站的远震波形数据,采用波形互相关方法拾取了 88691 个 P 波走时残差数据,应用 FMTT 层析成像方法(Rawlinson et al., 2006)获取了南北地震带南段深部的三维 P 波速度结构.结果显示了研究区深部的结构具有显著的不均匀性:腾冲火山地区深部 400 km 以浅的深度内分布着

明显的低速异常;四川盆地西南部下方 300 km 内具有较强的低速异常;在上地幔顶部,沿川滇菱形块体周边的大型断裂带及川滇菱形块体南端分布着显著的低速异常,这些低速异常为青藏高原物质向东南方向挤出提供了必要的通道;保山地块下方存在一东倾的高速异常带,该高速异常带可能是印度板块岩石圈向东俯冲的体现.

(2) 远震接收函数分析及反演

接收函数是地震记录去除震源、地震波传播路径以及仪器相应等因素后的时间序列,它包含台站下方地壳上地幔速度间断面所产生的转换波和多次反射波的信息.通过对远震接收函数中透射和反射转换震相的到时和波形振幅的解释,获得台站下方地壳上地幔速度结构或速度间断面的位置,称为接收函数成像.用远震体波波中的莫霍界面转换震相 PmS 以及两个后至震相 PPmS 和 PSmS 来求取地壳厚度 H 和波速比 κ ,即接收函数的 $H\kappa$ 叠加方法(Zhu and Kanamori, 2000).另外,接收函数共转换点(CCP)叠加剖面方法是对地壳和上地幔的地震间断面几何形状成像的一种有效方法(Zhu, 2000).这些方法在南北地震带深部结构有许多的应用,例如徐鸣杰等(2005),李永华等(2009),徐强等(2009),Wang 等(2009a),查小惠和雷建设(2013)研究川滇地区,李永华等(2006),姚志祥等(2014)和刘启民等(2014)研究青藏高原东北缘地区,以及 He 等(2014)研究南北构造带等.2008 汶川 $M_s 8.0$ 地震发生后,利用地震台站数据进行接收函数分析与成像的研究,还有楼海等(2008, 2010),刘启元等(2009),杨海燕等(2009),王椿镛等(2010).

图 5 显示了对研究区域(20°N — 43°N , 95°E — 110°E)内 327 个台站的宽频带远震记录应用接收函数的 $H\kappa$ 叠加方法获得的地壳厚度和波速比分布.资料取自 Wang 等(2010, 2014),Xu 等(2013),以及姚志祥等(2014).该区域的地壳厚度具有分段变化的特征.在南段,地壳厚度从南向北增加;南部的最小厚度为 32.5 km,北部($\sim 27^{\circ}\text{N}$)的最大厚度是 57.6 km.在中段,厚度从东向西增加,东部的最小厚度为 37.8 km,西部的最大厚度是 68.1 km,其中横跨龙门山断裂带的地壳厚度变化最大,从东南的 41.5 km 增加到西北的 52.5 km.在北段,六盘山逆冲断裂带延续了中段的变化特征,厚度从 43 km 增加到 52 km;但是往北,银川地堑—贺兰山一带,东西向的地壳厚度变化仅在 5 km 以内.

松潘—甘孜地体北部和西秦岭造山带具有低泊

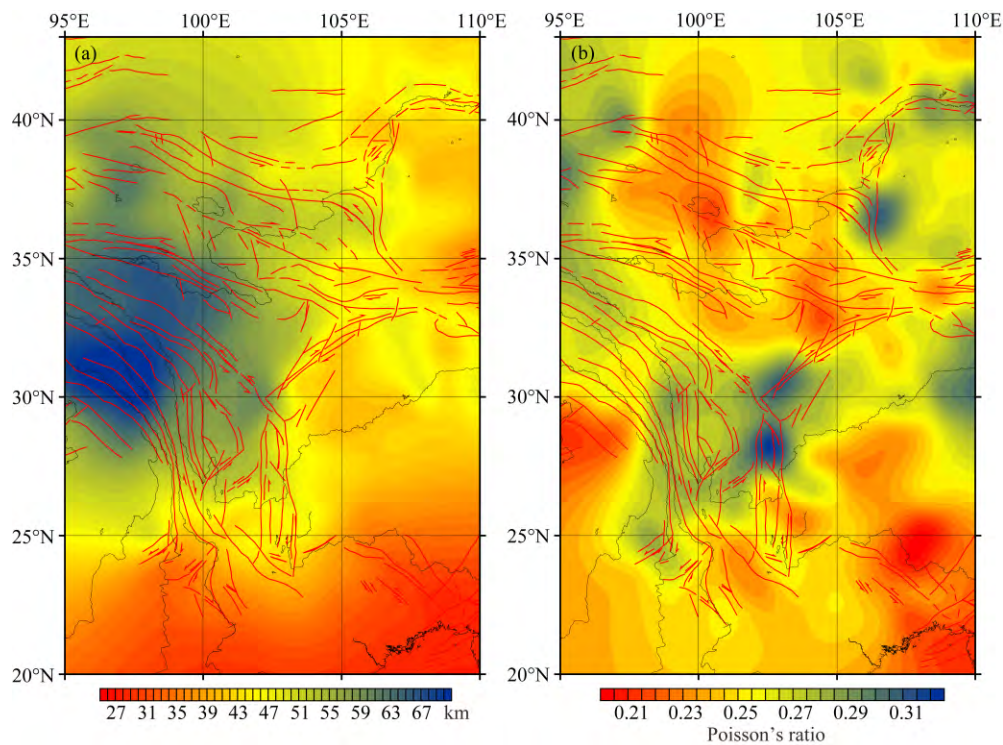


图5 南北构造带地壳厚度和泊松比分布。(a)地壳厚度分布；(b)泊松比分布

Fig. 5 Crustal thickness and Poisson's ratio distribution in the North-South Tectonic Belt.

(a) Crustal thickness distribution; (b) Crustal Poisson's ratio distribution

松比($\nu < 0.26$), 扬子地台的西南部具有低-中泊松比($\nu < 0.27$), 松潘—甘孜地体南部和四川盆地具有中-高泊松比($0.26 < \nu < 0.29$). 龙门山断裂带南段及其附近地区的高泊松比($\nu > 0.30$)可以看成是地壳具有较高的铁镁质组分和/或存在部分熔融 (Owens and Zandt, 1997). 该地区下地壳处于富含流体或温度较高的部分熔融状态, 有助于青藏高原的下地壳物质向东南运动. 松潘—甘孜块体南部的上地壳物质向东运动, 受刚性强度较大的扬子地台的阻挡, 导致沿龙门山断裂带产生应变积累. 当断层被地壳流体弱化, 积累的应变能量快速释放, 产生汶川 $M_s 8.0$ 地震. 另外, 六盘山逆冲断裂带及其附近地区具有高泊松比($\nu > 0.30$), 该地区发育了一组弧形的深大断裂, 这些断层可能是铁镁质物质从上地幔上涌至地壳的通道 (Tommasi et al., 2001), 从而导致高泊松比.

Zhang 等 (2010) 基于垂直于龙门山断裂带、剖面长 380 km 的天然地震台阵观测资料, 用接收函数 CCP 叠加剖面方法 (Zhu, 2000), 揭示了龙门山下方地壳存在 15 km 以上的莫霍界面错断; 达 50 km 的岩石圈底界差异以及 ~30 km 的地幔过渡带厚度变化; 同时, 松潘—甘孜与龙门山断裂带域的

地壳纵横波速度比 V_P/V_S 比值远大于 1.73, 预示着黏性下地壳流或基性/超基性物质的存在. 作者推断四川盆地对青藏高原东缘软流圈驱动的物质东向逃逸阻挡作用可能深达整个上地幔. Bai 等 (2011) 利用阿坝—龙泉山剖面的流动地震观测记录的远震 P 波走时数据作层析成像研究, 获得沿剖面的上地幔二维 P 波速度结构.

张洪双等 (2015) 利用青海和甘肃地震台网 2007—2009 年记录的远震波形资料, 提取多频段 P 波接收函数, 反演了青藏高原东北缘及相邻地块下方 0~100 km 深度的地壳和上地幔 S 波速度结构. 结果表明: (1) 青藏高原东北缘的上、下地壳之间普遍存在一个 S 波速度低速层, 其深度由南端的 ~35 km 向北变浅为 ~20 km, 推测该低速层为一壳内滑脱层, 表明东北缘地区的上地壳变形与下地壳解耦; (2) 昆仑—西秦岭造山带的下地壳厚度较北侧的祁连地块的薄, 推测西秦岭造山带的下地壳抗变形能力更强, 也可能这种差异在块体拼合前已经存在; (3) 青藏高原东北缘及鄂尔多斯和阿拉善地块的下地壳 S 波速度随深度的增加而增加, 这种正梯度的 S 波速度结构反映较高黏滞性的下地壳, 推测青藏高原东北缘的地壳结构不利于下地壳流的发育.

王兴臣等(2015)利用在 2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 地震震区及附近架设的 35 个流动观测台站的远震记录,采用接收函数 $H-k$ 扫描方法和 CCP 叠加成像方法获取鲁甸地震震源区的地壳精细结构. 结果显示鲁甸地震发生在地壳厚度和泊松比变化较剧烈的地区. 昭通断裂西南段和东北段地壳物质组分差异明显,西南段断裂两侧地壳组分均显示为中泊松比分布,东北段断裂两侧泊松比从低泊松比快速变化为高泊松比,表明东北段西南侧壳内含有更多铁镁质组分,造成昭通断裂西南段和东北段对青藏高原下地壳物质向东南运移的阻挡有所差异,导致壳内应变积累,从而引起鲁甸地震的发生. 地壳内部的低速层提供了可能的孕震环境. 鲁甸地震与芦山地震虽然均没有产生明显的地表破裂带,但两者的震源机制以及孕震环境存在着明显的差异.

(3) 地震面波层析成像

近期有多项中国大陆地震面波层析成像的研究成果,例如 Huang 等(2003),Zheng 等(2008),他们的结果均包含了南北地震带的范围. Li 等(2013)对东亚地区用 Rayleigh 面波层析成像方法得到了上地幔三维 S 波速度结构. 图 6 显示在南北地震带上地幔深度 100 km 和 150 km 处的 S 波速度扰动(模型数据取自 Li 等, (2013)), S 波速度参考值分别为 $4.40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

和 $4.45 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 所示的上地幔速度结构表明,在 100 km 深度范围的上地幔部分,松潘—甘孜地块、祁连地块及川滇块体南部等构造活动的块体整体表现为上地幔低速异常,而四川盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯和阿拉善块体则表现为高速异常,暗示这些地质上稳定的构造块体具有厚的岩石圈根. 在 150 km 深度上,除四川盆地保持高速异常外,其他稳定块体下方的高速异常逐渐消失,这表明四川盆地的岩石圈厚度较其他块体的要厚. 另外一个值得注意的现象是,东喜马拉雅构造结下方 $100 \sim 150 \text{ km}$ 的上地幔部分一直表现为 S 波高速异常,该高速异常可能与向北俯冲的印度岩石圈地幔有关.

黄忠贤等(2013)用面波层析成像方法获得南北地震带的岩石圈 S 波速度结构和方位各向异性. 结果表明,南北地震带的东边界不但是地壳厚度剧变带,也是地壳速度分布的分界. 中下地壳的 S 波速度,西侧低于东侧. 在松潘—甘孜地块和川滇地块西部大约 $25 \sim 45 \text{ km}$ 深度范围存在壳内低速层,与青藏高原主体的低速区相连,有利于下地壳物质的侧向流动. 地壳的各向异性图像显示下地壳物质绕喜马拉雅东构造结运动,东向的运动遇到扬子坚硬地壳阻挡而变为向南和向东北运动. 作者认为,面波层析成像结果支持青藏高原地壳运动的下地壳流动模

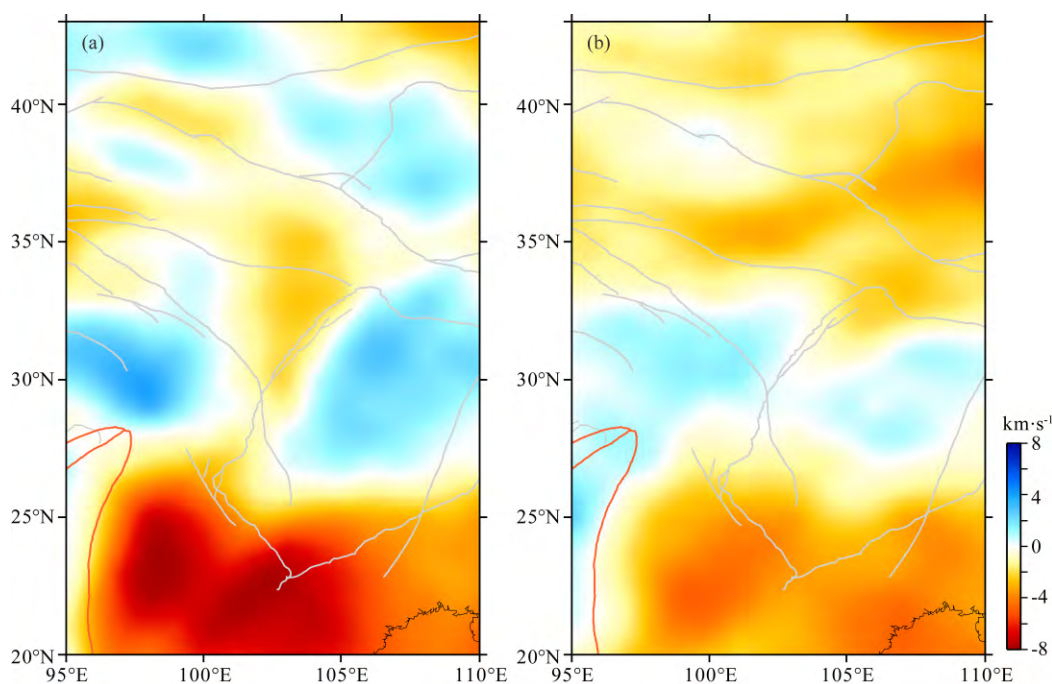


图 6 南北构造带上地幔三维 S 波速度结构(单位: dV_s/V_s 的百分数).

(a) 100 km 深度的速度扰动分布; (b) 150 km 深度的速度扰动分布

Fig. 6 Three dimensional S-wave velocity structure of upper mantle in the North-South Tectonic Belt (Unit: percentage of dV_s/V_s).

(a) Velocity perturbation at depth of 100 km; (b) Velocity perturbation at depth of 150 km.

型. 南北地震带的岩石圈厚度与其东侧的扬子和鄂尔多斯地块相似, 但速度较低. 川滇西部地块上地幔顶部(莫霍面至 88 km 左右)异常低速; 松潘—甘孜地块上地幔盖层中有低速夹层(约 90~130 km 深度). 岩石圈上地幔的速度分布图像与地壳的显著不同, 在高原主体与川滇之间存在 NNE 向高速带, 可能会阻挡地幔物质的东向运动. 上地幔各向异性较弱且与地壳的分布图像显然不同. 因此青藏高原岩石圈地幔的构造运动具有与地壳不同的模式, 软弱的下地壳提供了壳幔运动解耦的条件.

潘佳铁等(2015)利用双台法测得的 3594 条独立路径上的瑞雷波相速度频散曲线, 反演得到青藏高原东南部地区周期 10~60 s 的 Rayleigh 波的相速度分布图像. 2D 相速度分布图显示, 青藏高原东南部地壳上地幔 S 波速度结构存在较明显的横向非均匀性. 大多数地震发生在周期 15 s 相速度图上的低速区或高低速的陡变梯度带附近, 说明该区的强震活动与中上地壳速度结构的变化有关. 中等周期(如 20~30 s)的相速度分布主要与中下地壳速度结构、地壳厚度密切相关, 小江断裂、松潘—甘孜块体呈现最显著的低速, 可能暗示这两处的中、下地壳存在低速层. 较长周期(如 40~60 s)的相速度分布与上地幔顶部热状态和构造活动(如岩浆作用)有关. 滇西南地区表现为大范围的显著低速, 可能暗示滇西南地区上地幔顶部物质存在部分熔融. 腾冲火山下方的频散曲线在 10~60 s 一直为较低的速度, 尤其是到 40 s 以后, 相速度随周期的变大增速明显放缓, 至 60 s 比其他任何块体速度都低, 暗示腾冲火山区下方的低速至少来自上地幔顶部(~100 km). 徐小明等(2015b)基于 Love 波相速度反演南北地震带地壳上地幔结构, 结果显示了松潘—甘孜地体和川滇菱形块体地区的下地壳具有明显的 S 波低速层分布, 该异常分布特征支持解释青藏高原隆升及其地壳物质运移的下地壳流模型. Li 等(2014)利用 Rayleigh 波的群速度测量反演了青藏高原东南部的地壳上地幔 S 波速度结构.

(4) 噪声层析成像

噪声层析成像是一种通过对两个台站较长时间的地震噪声记录进行互相关计算提取台站间的格林函数, 获取面波频散特征, 并进一步通过层析成像获得地球内部的速度结构的方法. 以提取出的台站间的面波格林函数为基础, 利用传统的面波分析方法, 如频散曲线的测量、层析成像反演和 S 波速度反演, 便构成了噪声层析成像的基础.

利用背景地震噪声进行面波成像已经得到了广泛应用(例如, Shapiro et al., 2005; Lin et al., 2007; Yang et al., 2007, 2010). Yao 等(2006, 2008)提出了一种多尺度的面波层析成像方法, 该方法将从传统的双台分析的瑞利波相速度测量与从(环境噪声)干涉测量中估计的经验 Green 函数相结合. 首次将背景噪声成像方法应用于南北地震带, 从 25 个流动台站和 1 个固定台站(KMD)的数据确定青藏高原东南缘地壳和上地幔的三维 S 波速度结构. 由于考虑到力学软弱层对区域变形的可能影响, 特别有意思的是(剪切波)低速层的存在和几何形状. 在一些地区, 显著的低速层存在于中地壳, 其他可能出现在下地壳. 在某些情况下, 剪切波速的横向过渡与大型断裂带重合. 地壳低速层的强度和深度的空间变化表明, 软弱层的三维几何形状是复杂的. 在大的区域上不受阻碍的地壳流可能不会发生. 考虑到这种复杂性是更好地理解块体相对运动和地震模式的关键.

赵盼盼等(2015)基于在龙门山断裂带周边的 57 个台站自 2008 年 11 月至 2009 年 11 月的垂直分量连续地震记录, 利用短周期地震环境噪声成像方法, 获得了龙门山断裂带中北段地壳 25 km 深度范围的 S 波精细速度结构. 结果表明: (1) 龙门山断裂带周边区域 10 km 以上的速度结构与地表断裂的分布形态具有一致性, 速度结构控制了龙门山主要断层的深部延展特征; 在 15 km 及以下深度, S 波速度结构呈现沿龙门山和沿岷山隆起走向的交叉构造格局, 由此造成的速度结构差异可能影响了汶川地震的破裂过程; (2) 速度结构随深度的分布特征为龙门山断裂带主要断层的深部延伸形态给出了良好的约束, 结果进一步确认了龙门山断裂中段的高角度铲型断裂构造特征; (3) 研究区的南端发现了龙门山断裂下方 20 km 以下深度具有与松潘地块中地壳低速层相关的低速结构的迹象, 这可能是汶川地震破裂带南段 22 km 左右深度存在脆韧转换带的一个证据.

Li 等(2009, 2010)分别利用背景噪声瑞利波和背景噪声乐夫波反演了川西藏东地区的地壳 S 波速度结构. 李昱等(2010)利用川西大型密集台阵记录的噪声资料反演了 2~35 s 周期的瑞利波相速度分布, 研究川西地区的地壳结构. Zheng 等(2015)用川滇地区区域台网记录的背景噪声反演青藏高原东南缘三维 S 波速度结构.

(5) 面波频散和接收函数联合反演

用接收函数反演 S 波速度结构主要是通过线性

或非线性反演方法,求得台站下方一维的分层速度结构.单独进行接收函数反演存在解的非唯一性问题,因为它只对断面两侧的速度差异敏感.接收函数与其他地震学方法联合反演是一个方向.面波频散能够较好地反演间断面之间的剪切波速度,但不能确定间断面的准确位置.因此,面波频散和接收函数联合反演(如 Julia et al., 2000)能够克服单独使用其中一种数据的不足,减少解的不唯一性.在南北构造带及其周边地区的深部构造研究中,近来已经有许多这方面的成果,如:胡家富等(2005)利用面波和接收函数联合反演滇西地区壳幔结构. Liu 等(2014)利用川西地区大型流动台阵在 2007 至 2009 年记录的波形数据用接收函数和从背景噪音相关方法获得的 Rayleigh 面波相速度频散联合反演川西藏东地区的地壳上地幔 S 波三维速度结构.这一速度模型与川西—藏东深地震测深剖面的结果(Wang et al., 2007)有很好的-致性,而且在大范围上比二维剖面提供了更高分辨的见识.

3 地震各向异性与壳幔变形

在大陆动力学研究中,我们已经取得许多重要的研究成果,对于中国大陆下方复杂的深部结构及其演化过程已经有了初步的了解.但是,涉及到深部介质的性状,以及与其相关的地壳-地幔耦合变形的问题仍在努力探索之中.例如,张晔军等(2008)从震后形变探讨青藏高原下地壳黏滞系数.目前对壳幔变形研究最多的领域是地震各向异性,它被认为是解决问题的有效途径之一(Silver and Chan, 1988).

3.1 远震 SKS(SKKS)波形偏振分析

一般而言,地幔各向异性是由于地幔物质形变导致橄榄岩中晶格的优势取向所引起的,产生地幔物质形变的原因可能多种多样,但最为直接的原因是板块运动.板块的运动速度在很大程度上决定地幔各向异性的大小和方向.在地幔橄榄岩是 A-型晶格优势取向(LPO)的假定下,远震剪切波分裂测量是获得地幔各向异性参数的主要方法之一(Silver and Chan, 1991).

南北构造带位于中国大陆中部地区,是华北地块西部(鄂尔多斯地块)至扬子地块西南部(四川盆地)与青藏高原东部的过渡区.图 7 显示了南北构造带及其周边地区的剪切波分裂图像.快波方向显示了各向异性的分段特征:(1)北段:鄂尔多斯地块与阿拉善地块交界带,以及鄂尔多斯地块西缘与青藏

高原东北缘,各向异性的快波方向为 NW-SE 方向,一致性较好(常利军等,2011; Li et al., 2011);(2)中段:四川盆地西部的快波偏振方向与青藏高原东部(松潘—甘孜地块和三江褶皱系)基本一致,为 NW-SE 方向,可以认为是青藏高原东部快波方向的延续(常利军等,2009).龙门山位于四川盆地与松潘—甘孜地块之间.扬子地块西部的快波方向总体表现为 NW-SE 方向,在横跨龙门山并未出现明显的变化(仅有少数台站呈现快波方向不一致).(3)南段:位于扬子地块西南部的川滇西部地区,快波方向在 $\sim 27^{\circ}\text{N}$ 以北为 NS 方向,以南则急剧改变为近 EW 向(常利军等,2006; Wang et al., 2008).南段具有与中段(四川盆地)和北段(鄂尔多斯块体)不同的各向异性快波方向特征.南段的各向异性推测是软流圈流动和岩石圈组构的变化所共同产生,在 $\sim 27^{\circ}\text{N}$ 以南地区则以软流圈流动为主.青藏高原内部潜在的软流圈流动的作用在南北构造带上变得显著了,往东到大陆东部地区软流圈流动成为各向异性的主要来源(Wang et al., 2013).

常利军等(2015)对布设在南北构造带南段的 350 个宽频带流动台站和中国地震台网 90 个宽频带固定台站记录的远震 XKS 波形资料作偏振分析,获得了该地区上地幔各向异性图像.结果显示研究区的各向异性具有明显的南北分区特征,北部的快波方向为近 N-S 方向,而南部主要表现为近 E-W 方向,且北部的平均时间延迟小于南部的.作者认为,具有厚岩石圈的北部的各向异性主要由岩石圈变形引起,属于垂直连贯变形模式(Silver, 1996);具有薄岩石圈的南部的各向异性主要由软流圈地幔流引起,缅甸和巽达板片的后撤/回转作用产生了指向西南的软流圈地幔流,在岩石圈底部和软流圈之间产生了一个水平差异运动,产生了一个与简单剪切一致的软流圈变形结构,从而产生了南部观测的各向异性.此外,张洪双等(2013)和马禾青等(2010)分别对南北地震带北段的青藏高原东北缘和宁夏地区提出了 SKS 波偏振分析的结果.

用从 GPS 和第四纪断裂滑动速率数据确定的地面变形场和由地震各向异性数据推断的地幔变形场联合分析来检验青藏高原岩石圈地幔的变形方式.在地幔橄榄岩是晶格优势取向(LPO)型的假定下, Wang 等(2008)用地面的速度梯度张量场和应变率张量场预测确定 LPO 的地幔有限应变场.预测的上地幔各向异性方向与 SKS 分裂的快波方向之间有良好的-致性,表明青藏高原上地幔各向异性

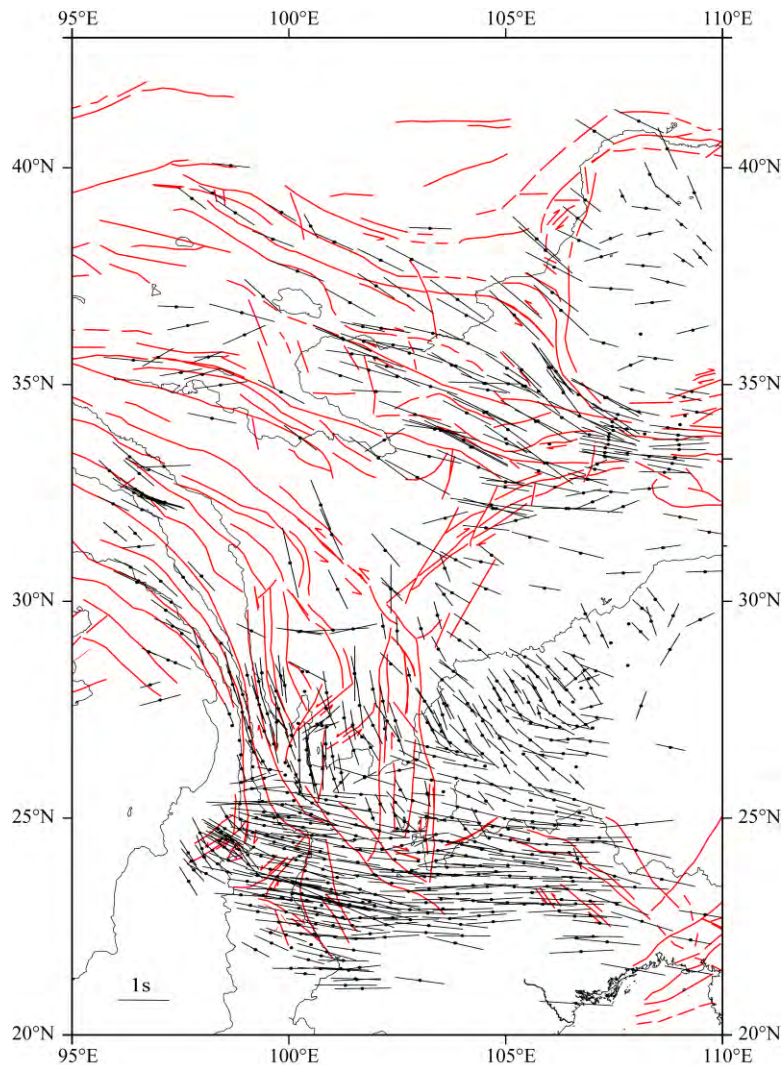


图 7 南北构造带上地幔各向异性分布图. 黑粗线的方向和长度分别表示 SKS 波分裂的快波方向和快慢波的时间延迟
Fig. 7 Upper mantle anisotropy distribution in the North-South Tectonic Belt. The direction and the length of thick black line represents the fast direction and the slow-wave time delay of the SKS wave splitting, respectively

主要来自岩石圈的垂直连贯变形. GPS 和 SKS 波分裂数据不仅加强了高原内部岩石圈力学耦合的证据,而且也解释了高原外部相同的耦合特征. 青藏高原和周围区域力学耦合岩石圈的垂直连贯变形有两个方面的大陆动力学含义. 其一,岩石圈垂直强度剖面被一个重要的条件所约束,即要求与重力势能变化相关的应力能够从地壳传递到地幔. 第二,青藏高原各向异性的空间变化反映了一个岩石圈变形的大尺度模式,以及从高原内部的简单剪切变形向高原外部的纯剪切变形的过渡带. 在青藏高原造山过程中地壳和地幔是垂直连贯变形的. 在驱动变形中重力松弛重要性的前提下,进一步推断地壳和地幔是力学耦合的. 这是对青藏高原的变形方式设定的一级约束(Long and Silver, 2009). 在大陆动力学研究中剪切波分裂和地壳变形联合分析是至关重要

的. 所观测到的各向异性的空间变化反映了岩石圈的大尺度变形模式. 经历变形和造山增厚的岩石圈地幔在造山过程后还残留着. 然而,对于南北地震带中-南段,横波分裂是否可以代表上地幔岩石圈的形变(方位各向异性)仍然存在争议.

3.2 Rayleigh 面波方位各向异性

苏伟等(2008)用 Rayleigh 面波层析成像方法研究青藏高原地壳上地幔方位各向异性. 高原东部大部分地区地壳各向异性强度大于 2%,且表现为环绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转. 在垂直方向上,高原内部的上地壳、下地壳和岩石圈地幔的各向异性方向基本一致,也与 GPS 所观测到的速度场和 SKS 快波方向基本一致,揭示高原下方的岩石圈变形是垂直连贯变形. 在高原外部的云南地区,地壳和地幔岩石圈方位各向异性的强度均小于

2%, 因此 SKS 波从核幔边界至台站间产生的分裂应主要归因于软流圈。

易桂喜等(2010)利用双台窄带通滤波-互相关方法与基于图像分析的相速度频散曲线提取技术,提取 Rayleigh 面波相速度频散资料,进而反演 20~120 s 周期 Rayleigh 面波相速度方位各向异性。Rayleigh 面波方位各向异性图像显示,拉萨地块与羌塘地块西部(约 87°E 以西)不同周期的快波方向变化不大,优势方向为 NNE-SSW 或近 NS 向,反映该地区中下地壳与上地幔具有垂直连贯形变特征。而高原中东部及东缘地区不同周期快波方向差异明显,短周期(20 s)快波方向与长周期(100 s)快波方向接近正交,至少说明中地壳与上地幔形变存在明显差异,地壳与上地幔似乎不存在垂直连贯变形特征,与苏伟等(2008)得到的 Rayleigh 面波群速度方位各向异性的结果有较大的差异。

Yao 等(2010)的面波阵列层析成像揭示青藏高原东南部地壳深部存在超低的剪切波速度,且方位各向异性的模式随深度出现重大变化。上地壳各向异性揭示围绕东喜马拉雅构造结的曲线模式,快波方向一般平行于主走滑断层。深部地壳的低横波速度可以表示韧性变形的轨迹。但它们的横向变化表明,在青藏东南(局部)的地壳通道流动和沿主要走滑断层的运动都是重要的。通过面波各向异性的结果模拟发现青藏高原东南部地区地壳和地幔对各向异性的贡献比较接近,所以不能简单认为该区域的横波分裂主要来自上地幔岩石圈。

鲁来玉等(2014)基于南北地震带南段 300 多个流动地震台站的连续观测记录,采用背景噪声互相关函数的面波层析成像技术,研究云南地区面波群速度和方位各向异性分布。结果显示,地壳的面波快波方向呈现近南北向,整体表现为围绕喜马拉雅东构造结顺时针旋转的趋势,和地表 GPS 速度场以及 S 波分裂的快波方向较为一致。对反映深度大约在下地壳和上地幔顶部的长周期面波,快波方向从近南北向逐渐向西北方向过渡。26°N 以南,快波方向与红河断裂的走向趋于一致,这一现象较为支持云南地区壳幔解耦的观点。

王琼等(2015)利用云南区域地震台网 55 个地震台站背景噪声数据,提取相速度频散曲线,反演得到周期 5~34 s 范围内方位各向异性分布。反演结果表明:短周期(5~12 s)Rayleigh 面波快波优势方向与区域断裂走向有很好的一致性。周期 16~26 s 快波优势方向与 5~12 s 图像总体相似,但细节略

有不同。在周期 30~34 s 范围,滇缅泰块体和印支块体的快波优势方向为 NS 和 NNW 向;而在滇中块体内部,快波方向呈顺时针旋转变化的,可能与青藏高原物质向东逃逸有关。通过与近震 S 波分裂、Pms 转换波分裂和远震 SKS、PKS 和 SKKS 分裂的对比,发现随着周期的增大,快波优势方向与 XKS 快波偏振方向趋向一致,与地壳快剪切波偏振方向呈一定夹角。研究认为,青藏高原东南缘壳幔各向异性具有不同的特征和形成机制。

3.3 地壳各向异性研究

石玉涛等(2013)和孙长青等(2013)分别用剪切波分裂系统分析方法(SAM 方法),对松潘—甘孜地块东部,川滇地块北部与四川盆地西部,以及云南地区展开了地壳各向异性的研究。太龄雪等(2015)利用云南及相邻地区的部分流动台站记录到的 2011 年 6 月至 2013 年 3 月的数字地震波形资料,获得了研究区内 67 个台站的剪切波分裂参数。研究结果表明,受到云南及周边地区复杂的构造、应力环境和纵横交错的断裂分布的影响,该地区快剪切波偏振方向(PAZ)整体上显示出 NNE 向和 NE 向的优势取向,但在空间分布上比较复杂,虽然大部分台站的 PAZ 与构造应力场方向一致,但部分断裂附近台站的 PAZ 受到断裂的影响。结果显示,研究区内不同区域的 PAZ 有一定差异性。划分了 5 个子区,西部 3 个不同区域的 PAZ 从北到南分别为 NNW 向、近 N-S 向和 NE 向,有顺时针旋转的趋势,而东部的 2 个区域 PAZ 分别为 NEE 向和 NNW 向。研究表明,青藏东南缘地区的地壳各向异性空间分布虽然非常复杂,但大体上与区域内的主压应力的方向和断裂分布相关。

郭桂红等(2015)利用甘肃数字地震台网波形记录资料,得到青藏高原东北缘地壳各向异性的平均剪切波分裂参数及剩余地震各向异性参数,分别反映了区域构造和应力场特征及局部构造和局部断裂特征。结果表明:快剪切波 2 个优势偏振方向分别为 $NE47.72^{\circ} \pm 21.8^{\circ}$ 和 $121.65^{\circ} \pm 22.0^{\circ}$,慢剪切波平均时间延迟为 2.63 ± 1.31 (ms/km)。快剪切波平均偏振方向反映了该区域的水平主压应力方向,快剪切波偏振方向的第二优势取向揭示了 NWW 的局部构造意义,表明受本区 NWW 深大断裂带的控制作用。各个台站的剩余快剪切波偏振方向的优势取向与断裂走向一致,表明活动断裂控制着剩余快剪切波偏振方向,剩余慢剪切波时间延迟变化反映了断裂引起地震各向异性程度,形变具有区域特征。

现有的从远震体波 SKS 震相记录中提取壳幔介质各向异性量值的方法均难以获得比较精确的地壳各向异性参数. McNamara 和 Owens (1993) 利用在 Moho 界面上从 P 转换到 S 波的 Ps 转换震相约束地壳各向异性, 获得美国盆岭地区 Ps 转换震相的快慢波时间延迟为 0.2 s. 他们用相同的方法获得青藏高原的时间延迟为 0.17~0.26 s (McNamara et al., 1994). 从接收函数中提取地壳各向异性参数 (Liu and Niu, 2012) 是一种可行的方法. Sun 等 (2012) 应用这一方法研究青藏高原东南部的地壳各向异性. 结果显示在青藏高原东南缘, 地壳各向异性的分裂时间为 0.5~0.9 s. 由此认为, 无论是分裂的时间延迟, 还是快波偏振方向, 都与从 SKS/SKKS 数据所估计的值接近. 但是, 对众多台站数据作试验, 仅有几个台站得到这一结论, 有失普遍性. Chen 等 (2013) 对川滇地区 98 个台站的接收函数径向和切向分量计算各构造单元 Pms 分裂的平均时间延迟和快波偏振方向. 结果表明, 在高原地区的台站 Pms 分裂的平均时间延迟大于周边地区台站的; 最大值在川西地区, 为 0.23 s, 松潘甘孜地块为 0.20, 其他地区为 0.16~0.17 s. Pms 分裂的平均快波偏振方向绕喜马拉雅东构造结旋转, 如同 GPS 运动所揭示的. 常利军等 (2010), Chang 等 (2014) 和 Shi 等 (2012) 通过近垂直入射、记录清晰的直达 S 波在青藏高原东南缘估算的地壳各向异性延迟时间为 0.1~0.2 s. 他们的结果与 Sun 等 (2012) 相差甚远.

3.4 地壳变形带的提取和分析

杨文采等 (2015c) 将区域重力场多尺度刻痕分析用于提取青藏高原地壳变形带的信息, 了解高原内地壳变形带从浅到深的变化和平面分布特征, 并对青藏高原主要地体的空间分布定位, 为岩石圈研究提供地表地质难以取得的新信息. 多尺度脊形化系数的图像刻划不同深度平面上的地壳变形带. 青藏高原地壳变形带从上到下由细密逐渐变为粗稀型, 而且细密型变形区分布的范围逐渐缩小, 到下地壳完全消失. 从这种情况可以推测, 以垂直地面方向上看, 地壳变形带应该是树形的, 下地壳粗稀型的变形带为树的主干, 而中地壳粗稀型的变形带为树的分枝, 上地壳的变形带为树枝的小枝杈. 上地壳细密型变形分布区反映了与中生代地壳缩短变形区的范围, 下地壳清晰连续的变形带反映了青藏高原的构造骨架. 多尺度边界刻痕系数的图像刻画不同深度平面上的地体边界, 下地壳的刻痕边界系数与密度剧烈变化带位置吻合; 因此, 由多尺度刻痕分析划

分地体时同时取得地体密度信息. 青藏高原内密度较高的地体包括喜马拉雅地体、克什米亚地体、察隅河地体、柴达木地体、巴颜喀拉地体和羌塘地体, 柴达木地体、巴颜喀拉地体和羌塘地体是青藏高原中有壳根的核, 而密度最高的克什米亚和察隅河地体在大陆碰撞时不易碎裂, 对东西两个构造结的形成起了关键作用.

4 与近期发生的强烈地震相关的研究

4.1 地震震源机制与构造应力场

王晓山等 (2015) 收集和计算了南北地震带上 819 条震源机制解. 分析了南北地震带现今地壳应力状态总体特征与不同分段地壳应力状态特征. 南北地震带 P 轴方位从北向南呈现规律的变化特征: NNE 向—NE 向—近 EW 向—NW 向—近 NS 向—NNE 向, 表明来自印度板块的 NNE 或 NE 向的水平挤压应力和青藏高原物质东向滑移沿大型走滑断裂带向 SE 向平移的复合作用控制了南北地震带的岩石圈应力场. 南北地震带应力状态的分布特征: 北段为 NE 向走滑类型, 中段为 NEE-EW-SEE 向逆冲类型, 南段为 SE-SSE-NNE 向走滑和正断类型; 由北向南分别对应于鄂尔多斯块体西缘的吉兰泰—银川断陷盆地、六盘山断裂带、龙门山断裂带和川滇块体等, 震源机制解类型比较符合反演得到的应力状态.

刘莎和吴朋 (2015) 通过对 2006—2009 年四川紫坪铺水库库区 8 个地震台站记录的地震事件, 采用剪切波分裂方法获得了水库库区剪切波分裂参数, 并结合地震活动性与水库水位之间的变化关系, 分析了紫坪铺水库库区地壳应力的变化特征. 剪切波分裂结果显示该研究区域快波偏振方向有两个, 分别为北东向和北西向, 充分体现了紫坪铺水库地区地壳应力是由北西向的区域主压应力与南东走向的龙门山断裂带综合作用的结果. 慢波延迟时间平均值为 $5.8 \text{ ms} \cdot \text{km}^{-1}$, 慢波延迟时间较大的地区位于库坝和库尾, 分别是水库蓄水排水引起地壳应力变化最大的区域. 对比慢波延迟时间的变化和水库水位的变化显示了慢波延迟时间与水库水位之间的一致变化关系, 揭示了水库的蓄水排水对地壳应力的影响.

程佳等 (2015) 根据 2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 地震的区域构造特征和余震共轭分布特征, 计算了 1733 年小江断裂带北段的 $M 7\frac{3}{4}$ 地震, 1850 年则木河断裂带的 $M 7\frac{1}{2}$ 地震和 1974 年马边 $M_s 7.1$ 地震对鲁甸 $M_s 6.5$ 地震震源机制解两个节面的黏弹性库仑应

力作用,结果显示 NNW 向主破裂面受到 1850 年则木河断裂带上 $M7\frac{1}{2}$ 地震所引起的库仑应力作用最为明显,认为高速左旋走滑并重复发生 7 级以上强震的则木河断裂对于鲁甸 $M_s6.5$ 地震所在的 NNW 向包谷垭—小河断裂的强震孕育和断裂演化方面具有一定的促进作用。然后,分析了鲁甸 6.5 级地震的共轭破裂与余震分布特征,并计算了两个共轭破裂面单独破裂对另一破裂面的库仑应力作用,结果显示 NEE 向破裂促进了 NNW 向破裂的发生,而 NNW 向破裂后则反过来阻碍了 NEE 向破裂的进一步发展,最终发展成以 NNW 向破裂为主的共轭破裂;最后计算了共轭破裂所引起的库仑应力变化对余震的影响情况,认为位于 NEE 向破裂西侧的余震集中分布主要是由于应力触发而形成。

4.2 强震危险性分析

陈棋福等(2015)探讨了龙门山断裂带深部构造变形的黏弹性模拟及其与强震活动的关联性,他利用黏弹性接触的有限元方法模拟计算了上、下地壳和上地幔在强震轮回活动中的演化过程,模拟结果表明:龙门山断裂带深处的滑动速率比浅表的滑动速率大,龙门山断裂带周围是相对容易积累应变的地区,其 5~19 km 深度是高应力聚集区,随着时间的推移应力集中程度加剧而引发强震。模拟分析证实重复地震观测所揭示的龙门山断裂带深浅活动速率差异,在一定程度上可以解释出乎预料的汶川 $M_w7.9$ 地震的发生。利用重复地震这一天然的“地下蠕变计”探测深部构造变形,可为强震危险性分析提供无可替代的“原位观测”优势。

断层滑动速率是断裂带深部变形的定量描述,也是评估断层活动危险性的重要参量。发生在同一断层位置上 0.5~4.0 级重复地震(或称重复微震)的发现和应作为断裂带深部变形的研究开启了新的途径。李乐等(2015)利用四川数字地震台网和川西流动台阵的数字波形资料来辨识鲜水河断裂带南段存在的重复地震,并基于重复地震估算鲜水河断裂带南段的深部滑动速率。重新定位后的地震图像展示研究区中上地壳存在明显缺震层,其与壳内的低速低阻层相吻合。利用重复地震的地震矩和重复间隔,估算出龙门山断裂南段孕震深部的滑动速率为 $3.0\sim10.2\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,显示研究区不同地震构造区的深部滑动速率存在明显差异。

2014 年 10 月 7 日景谷 $M_s6.6$ 地震位于断裂带南东约 94 km,其地震烈度等震线长轴与余震皆呈北西展布,指向南汀河断裂带。孙浩越等(2015)分析

云南景谷 $M_s6.6$ 地震对周边构造特别是南汀河断裂带地震危险性的影响,通过数值模拟方法计算了地震触发的同震静态库仑应力变化。利用两种同震滑动分布模型计算获得的结果显示,景谷地震对震中附近的断裂,如澜沧江断裂和景谷断裂影响较大,局部应力增加可达 90 kPa;对较远的断裂,如南汀河断裂带、龙陵—澜沧断裂带和无量山断裂带的影响较小,应力变化值均小于 10 kPa。通过设置不同断层参数进一步计算,南汀河断裂带北段两支断裂断层面的静态库仑应力扰动呈半圆形分布,应力增加的最大值位于北纬 24.15° 附近的地表,沿断层的走向和深度都逐渐减小。其中西支断裂上应力变化最大值为 0.89 kPa,东支断裂上为 1.18 kPa。此外,在南汀河断裂带北段的古地震研究结果显示,该断裂段全新世以来发生过产生地表破裂的大地震,震级应当不低于 7 级。放射性碳测年将该次古地震事件的发震时间限定在 900—1480 AD,离逝时间为 535—1115 年。结合古地震事件的离逝时间和断裂带的滑动速率,计算得到南汀河断裂带北段已经积累的水平滑动量为 $2.8+1.5/-1.0\text{ m}$,进一步利用滑动量与震级的经验公式可估算出该断裂段目前积累的滑动量如果完全释放将会产生一个 $7.5+0.1/-0.2$ 级的地震。虽然景谷地震在南汀河断裂带上触发的静态库仑应力变化值表明,该地震可能不会引起南汀河断裂带地震危险性的突变,但仍起到一定的加速作用。再考虑到断裂带北段目前已经积累了约 7.5 级地震所需的能量,该断裂段在未来具有较高的地震危险性。

4.3 地震预测

蒋长胜等(2015)以 2014 年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列为例,采用滑动连续拟合与预测的方式,考察目前国际上广泛使用、对真实地震序列描述最好的“传染型余震序列模型”(ETAS)在主震后的序列参数拟合、余震短期发生率预测的效能,实施了余震的序列参数稳定性和余震短期发生率预测效能的连续评估。连续滑动拟合结果表明,在主震发生后的早期阶段, α 值(触发次级余震的能力)有明显的不稳定变化,在震后 5.10 天稳定在 $1.6\sim2.0$; p 值(余震序列衰减的快慢, p 越大衰减越快,反之越慢)在震后 25.00 天内由 1.07 逐渐下降至 0.78 左右,其后稳定在 $0.72\sim0.85$; b 值在震后 35.00 天内逐渐由 0.80 增加至 0.95,其后稳定在 $0.93\sim0.97$ 。序列衰减减缓过程中伴随着次级余震激发能力增强,在震后早期阶段还伴随着震源区应力累积水平减小现

象. 对连续滑动预测结果的 N -test 检验表明, 余震发生率预测会出现部分失效现象, 1 天预测时间窗失效比例约为 12%、3 天预测时间窗失效比例为 6%. 建议可在震后早期采用 1 天等较短的预测时间窗, 而在序列参数较为稳定时段采用较长的 3 天预测时间窗.

基于川滇地区 2011—2014 年的重力复测资料, 祝意青等(2015)系统分析了区域重力场时-空动态变化及其与 2012 年云南彝良 $M_s5.7$ 、2013 年四川芦山 $M_s7.0$ 、2014 年云南鲁甸 $M_s6.5$ 和四川康定 $M_s6.3$ 地震发生的关系. 结合 GPS、水准观测成果和区域地质构造动力环境, 研究了区域重力场变化的时空分布特征及其机理, 讨论了近期区域重力场动态变化的强震危险含义. 结果主要表明: (1) 重力变化与川滇地区断裂构造活动存在密切空间联系, 重力变化较好地反映了伴随活动断层的物质迁移和构造变形引起的地表重力变化效应; (2) 重力资料对测区内 2012 年以来发生的 4 次 $M_s5.7$ 级以上强震均有较好反映, 地震前震中区及其附近观测到明显的区域性重力异常及重力变化高梯度带, 可能是地震孕育过程中观测到的重力前兆信息; (3) 区域重力场动态演化大体反映了青藏高原物质东流的动态效应, 龙门山断裂带地壳受挤压隆起、面压缩率和重力上升变化的特征最为显著; (4) 重力场的空间分布及其随时间变化与地壳垂直与水平运动及地质构造活动等观测结果有一定的对应关系, 强震易发生在重力变化四象限分布中心地带或正、负异常区过渡的高梯度带上, 研究区的一些重力异常部位仍存在中长期大震危险背景.

阎春恒等(2015)在对龙滩库区 2006 年 9 月 30 日至 2013 年 5 月 26 日发生的 3682 次地震进行精定位的基础上, 利用 FOCMEC 方法和改进的格点尝试法反演了 $M_L2.0$ 级以上地震震源机制及区域构造应力场, 并综合龙滩库区地层岩性、断裂构造和渗透条件等资料, 探讨了地震活动类型与库区蓄水过程的关系, 获得以下认识: (1) 龙滩水库蓄水后的地震活动主要丛集在罗妥、八茂、拉浪、坝首和布柳河 5 个深水区, 地震类型以逆断为主, 正断和走滑也占有一定比例. 蓄水初期, 库区地震类型呈现多样性, 蓄水约 4 年 3 个月后, 地震主要发生在浅部地层中, 并大多为逆断型地震; (2) 5 个地震丛构造应力场最大主应力方向以 NW-SE 为主, 倾角均较小, 中间和最小主应力分布较凌乱, 在此构造应力环境中, 龙滩库区主要断裂整体上呈现走滑运动的性质, 局

部伴生不同程度的逆倾滑或正倾滑运动分量; (3) 库区深、浅部地震活动水平和地震性质之所以会随蓄水过程发生变化, 可能与深、浅部构造应力环境、岩体力学性质和渗透性能的差异有关.

5 与大陆动力学有关问题

5.1 印度与欧亚板块碰撞带的大地震研究

李保昆等(2015)收集全球 239 个台站的 P 波走时资料, 利用我国国家测震台网常规的定位方法和地球速度模型, 对 1950 年 8 月 15 日发生在西藏察隅的 $M8.6$ 强震序列进行了重新定位, 并在此基础上重新计算了震源机制解. 重新定位后的结果表明, 察隅强震序列显示不同时段的地震中分区分布特征: 第 1 阶段是前震, 1950 年 2 月 23 日在墨脱北部雅鲁藏布江大拐弯的顶部发生; 第 2 阶段是 1950 年 8 月 15 日—1950 年 8 月 18 日, 发生主震和之后 3 天内的余震, 都分布在察隅附近, 并且这些震中呈北西条带分布; 第 3 阶段的余震是 1950 年 8 月 22 日—1950 年 9 月 13 日, 它们扩展到南部的印度和缅甸地区; 第 4 阶段的余震是 1950 年 9 月 30 日—1951 年 4 月 15 日, 发生在西部的墨脱、错那等地. 这四个分区的关联特点为顺时针旋移. 重新计算后的震源机制解显示出: 主震的 NWW 走向的节面与主震后 2 区内余震震中的 NWW 分布方向一致; 序列中所有的压应力轴 P 和张应力轴 T 都接近于水平向, 其倾伏角大都小于 20° ; 察隅主震和 2 区内余震的压应力轴 P 为近南北向, 张应力轴 T 为近东西向; 但 3 区和 4 区余震的 P 轴为近东西向, T 轴为近南北向. 反映出该地震序列中余震震源机制解的差异比较大.

2015 年 4 月 25 日尼泊尔发生 $M_w7.9$ 大地震. 单新建等(2015)利用日本 ALOS-2 和欧空局 Sentinel-1A 卫星获得的尼泊尔地震的同震形变场, 结合 GPS 同震位移数据, 联合反演了断层滑动分布特征和空间展布. 结果表明: 尼泊尔地震的同震形变场主要集中在 $150\text{ km} \times 100\text{ km}$ 的范围内, 且分为南北两个相邻的形变中心, 南形变中心的视线向抬升量约为 1.2 m, 北形变中心的视线向沉降量约为 0.8 m, 均位于发震断层上盘. 位于形变抬升区的 KKN4 和 NAST 两个 GPS 站, 抬升量和南向运动量均达到了米级, 而远离震区的其他 GPS 台水平和垂直观测量均在 1 cm 以内. 联合反演得到的断层位错分布主要集中在沿走向 150 km, 沿倾向 70 km 的范围内, 最大滑动量为 5.59 m, 平均滑动量为 0.94 m.

断层面倾角在浅部约为 7° , 随着深度增加, 倾角逐渐变大, 到垂直深度 20 km 时倾角接近 12° ; 5 月 12 日 $M_w 7.2$ 级余震位于主震破裂区的“凹”型滑动缺损区域; 主震破裂区的上边界与 MBT 空间位置十分吻合, 主震破裂区主要集中的 MBT 以北 50~60 km 处, 垂直深度为 8~9 km, 倾角为 9° , 继续向北时主震破裂面以 $10^\circ \sim 12^\circ$ 的倾角向深延伸, 在 18~20 km 处可能与 MHT 交汇。初步判定 MBT 为此次地震的发震断层。

刘刚等(2015)用西藏和尼泊尔的 GPS 连续观测数据和全球分布的远震地震波记录联合反演 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震的破裂过程, 结果显示此次地震发生在印度板块与青藏高原接触界面——喜马拉雅主滑脱断层上。北倾 11° 、近东西(295°)走向的断层面破裂约 100 km 长(博卡拉到加德满都), 130 km 宽(从加德满都到西藏吉隆县); 破裂以逆冲滑动为主, 平均幅度达到 2.4 m, 释放的地震矩高达 9.4×10^{20} N·m。反演结果还显示, 震源体主要破裂分布深度范围为 5~25 km, 属于一次盲地震。基于 GPS 资料推测的地壳现今运动速率及 1833 年地震的震源位置, 推测在此次地震破裂区域地震复发的周期可能在 150~200 a, 而极震区以南的深部滑脱断层仍保持闭锁, 未来仍有导致灾害性大震的可能性。

万永革等(2015)基于 2015 年尼泊尔地震序列的破裂模型及均匀弹性半空间模型, 计算了该地震序列传递到中国西藏境内发生的定日县地震和聂拉木县地震的应力。2015 年尼泊尔地震序列导致定日县地震和聂拉木地震节面和滑动方向的库仑应力增加 $(2 \sim 3) \times 10^3$ Pa 和 $(2.4 \sim 3.1) \times 10^5$ Pa, 表明这两个地震受到尼泊尔地震序列的触发。其次, 作者计算了 2015 年尼泊尔地震序列在中国大陆及其附近主要活动断层上产生的库仑应力变化。喜马拉雅主山前逆冲断裂和青藏高原内部的拉张正断层上的库仑应力有较大的增加, 而青藏高原的走滑断裂, 如阿尔金断裂、东昆仑断裂、玉树玛曲断裂、班公错断裂西部、嘉黎断裂的库仑应力有较大的降低。天山南北两侧的断裂库仑应力降低。而华北及东北、华南地区的库仑应力变化几乎可以忽略不计。最后, 计算了该地震序列造成的水平应力变化。水平面应力在 2015 年尼泊尔地震序列北向(青藏高原大部 and 新疆区域)增加(伸展), 而在地震序列东侧的西藏南部和川滇地区南部降低(收缩), 在华北和东北仅有少许增加, 在华南地区有少许降低。在中国西部, 主压应

力表现为以 2015 年地震序列为圆心的向外辐射状, 而主张应力方向与同心圆切线方向大体一致。水平主压应力方向在东北地区为北东向, 在华北地区为北东东向, 在华南地区为南东东向。这种模式与现今构造应力场方向相似, 表现了 2015 尼泊尔地震序列所代表的印度板块和欧亚板块的碰撞是中国大陆构造变形的主要动力来源。

张广伟和雷建设(2015)利用西藏台网记录波形数据, 采用 gCAP 方法(Zhu and Ben-Zion, 2013)反演了 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_s 8.1$ 级大震 5 次中等余震($5.0 \leq M_s \leq 6.5$)及西藏定日 $M_s 5.9$ 地震震源机制解。结果显示, 6 次地震包含 2 个正断型、2 个走滑型及 2 个逆冲型地震。其中 2 个正断型地震位于主震的东北方向, 即发震断层的上盘, 表明该区域受到主震同震位移的影响, 表现出应力拉张的变化特征; 2 个走滑型地震在主震破裂的东南方向上, 说明随着破裂往东南方向延伸, 余震的走滑分量增强; 另外 2 个逆冲型地震位于 5 月 12 日 $M_s 7.5$ 强余震区域, 与 $M_s 7.5$ 地震的滑移状态一致, 可能与主震同震位移引起该区域处于应力挤压状态密切相关。

熊维等(2015)基于地震应力触发理论, 采用岩石圈地壳分层黏弹性位错模型, 计算了 2015 年尼泊尔 $M_w 7.9$ 地震引起的周边断裂, 特别是青藏高原活动断裂的同震和震后库仑应力变化。结果显示, 尼泊尔地震同震效应引起大部分震区库仑应力升高, 余震主要分布在最大同震滑动等值线外部库仑应力升高区域; 少量余震靠近最大滑动量区域, 可能该区域积累的地震能量在主震期间没有完全释放。尼泊尔地震同震库仑应力对青藏高原, 特别是中尼边境区域活动断裂有一定影响。亚东—谷露地堑南段、北喜马拉雅断裂西段、当惹雍错—定日断裂和甲岗—定结断裂同震库仑应力升高, 其中当惹雍错—定日断裂南端, 北喜马拉雅断裂西段同震库仑应力变化峰值超过 0.01 MPa; 帕龙错断裂、班公错断裂、改则—洞措断裂库仑应力降低, 其地震发生概率有所降低。震后应力影响方面, 未来 40 年内黏弹性松弛作用导致北喜马拉雅断裂、改则—洞措断裂和喀喇昆仑断裂整体应力卸载; 藏南一系列正断层震后应力持续上升, 其中帕龙错断裂南段受到震后黏弹性库仑应力影响, 由应力阴影区逐渐转化为应力增强区, 当惹雍错—定日断裂南段应力进一步加强, 震后 40 年其南端应力变化峰值达到 0.1345 MPa, 亚东—谷露断裂南段应力亦持续增强。藏南正断层的地震活动性值得进一步关注。

5.2 关于深部物质的流动问题

一些研究(如: Bird, 1991; Royden et al., 1997; Clark and Royden, 2000)提出, 在大陆地壳是热的区域内, 中或下地壳存在地质时间尺度下能够流动的低黏滞度软弱层, 称之为通道流. 基于流体动力学原理的模拟计算青藏高原与外围块体大尺度构造地貌关系(Clark and Royden, 2000; Royden et al., 2008)都提示高原下地壳流存在的可能性. 青藏高原演变的“下地壳流模型”模拟得到的地表速度和变形场与 GPS 观测具有很好的一致性, 因而寻找下地壳流存在与否的证据, 是深部地球物理学必须面对的一个科学问题. 由于“下地壳流模型”是依据地形、地壳厚度的横向变化提出来的, 支持其合理性的球物理证据, 特别是深部地壳结构的证据尚缺乏. Klemperer (2006)认为“下地壳流”的发生取决于: (1) 中下地壳存在能够发生流动的软弱层; (2) 存在地壳厚度、地壳密度差异或地貌高差引起的横向压力梯度; (3) 上部脆性上地壳或下部高强度(刚性)上地幔相对于软弱层的运动. 王苏等(2015)综合分析了川滇地区 GPS 观测、震源机制解和地壳各向异性特征, 认为川滇地区上、下地壳没有解耦; 并根据地震层析成像、接收函数反演和大地电磁测深结果, 推测川滇地壳内存在大范围的低速层, 但分布的几何形态较复杂. 在云南地区, 这一壳内低速区似乎被小江断裂和金沙江—红河断裂限制在特定的区域内.

Bendick 和 Flesch (2007) 的数值模拟结果表明, 地壳物质能否流动主要依赖于黏滞度, 如果下地壳黏滞度与上地壳相比达不到超低(两个以上的数量级)的对比度, 则即使是软弱的物质也不一定能够流动. Chen 等(2013)通过综合的数值模拟表明, 存在部分熔融的中地壳具有相对于周围的材料较低的黏滞度, 并不导致上地壳与下地壳解耦. 这与地震各向异性研究的发现(Wang et al., 2008)相一致, 说明在西藏东部地区地壳和岩石圈地幔的变形是耦合的.

地壳泊松比对地壳的组分提供了比仅用 P 波或 S 波速度更全面的判断. 异常高的泊松比($\nu > 0.33$)表示存在部分熔融(Owens and Zandt, 1997). 南北构造带大量台站的接收函数 $H-\kappa$ 叠加分析结果(图 5b)显示, 异常高的泊松比只存在于局部地区. 青藏高原东部“下地壳流模式”是作为由重力松弛产生的横向压力梯度的一种可能的响应而提出的. 在这一通道流模型中, 下地壳内需要有一个超低(几个数量级)黏滞度对比度的通道. 接收函数分析的结果表明青藏高原东部地区缺少广泛分布的低黏滞度通

道的证据, 与在地幔各向异性研究中获得的地壳和上地幔之间存在力学耦合关系的约束是相容的.

赵国泽等(2008), Bai 等(2010), Zhao 等(2012)分别提出了青藏高原东部边缘地壳“管流”层的电磁探测证据. Liu 等(2014)使用在川西地区约 300 个地震台的台阵所记录的地震数据, 以很高清晰度对青藏高原东部的结构成像. 在深部地壳的软弱岩带向东增厚到扬子克拉通, 可以解释为地壳流的通道. 与大地测量数据相结合, 推断的地壳不均匀性表明, 高原扩展可用局部地壳流和跨深大断裂的应变分区相结合来调节. Liu 等(2014)的结论是, 在地壳变形模式中刚体块体运动和地壳流并非是不可调和的.

至今对青藏高原东部的深部结构的了解仍不够全面, 因此对 Klemperer (2006)关于“下地壳流模式”提出的三个条件尚缺乏统一的认识. Bai 等(2010)根据大地电磁探测结果, 认为青藏东部边缘的下地壳不太可能发生大规模的韧性流动, 而是受到断裂和构造边界的制约被限定在局部地区. 因此, 我们还面临下地壳流的规模, 其黏滞度大小, 韧性流动的动力, 以及上下地壳之间的解耦等问题, 这些问题对于青藏高原东缘的构造演化十分重要.

6 讨论

20 世纪 90 年代, 地球物理学家们在以往研究结果的基础上, 总结出南北构造带在深部地球物理方面的主要特点: 既是一条巨型重力梯度带, 又是均衡重力异常和区域磁异常的分界带, 以及地壳厚度和岩石圈厚度急剧变化的地带. 南北构造带 Moho 面埋深在南段地区为南浅北深、中段地区东浅西深、北段地区则变化相对平缓的特点. 这些结论至今仍然是合理的. 但是, 人们对南北构造带许多细节仍然不够了解, 存在不同的观点和认识.

6.1 南北地震带的边界及分段性

地震学家认为, 地震带的确定具备两个条件, 即震中分布的成带性和地震活动性与地质构造带的统一. 在我国中部东经 99° — 106° 附近存在一条符合地震带存在条件的南北向的大震活动带, 从银川凹陷起, 越过六盘山, 穿过秦岭, 经文县、茂汶, 沿横断山直至红河. 在北纬 33° 弧形以北属北段, 其南属南段. 东经 104° 为一条天然的东西分界线, 北段大震震中位于其东面, 而南段大震震中则位于其西面, 震中的南北呼应关系在这一分界线上较为显著(王振声等, 1976).

从中国公元前 1831—1969 年强震(≥ 6 级)震中分布(顾功叙, 1983)看, 中国大陆大约东经 102° — 106° 之间, 强震震中密集分布, 其东侧虽局部地区也有密集现象, 但显出大片空白, 西部高原地区则是一片空白. 从 80 年代有关该地区地质考查资料看, 在“南北地震带”上, 震源机制、主压应力轴方向的总趋势是近乎东西或西北—东南方向的, 但其局部地段的应力场, 并不完全如此, 分段性明显, 各段之间有很大的变化. 最北部的武都以北, 主压应力轴优势方向为北东向; 在潘松一带变为北东东向; 至康定、理塘一带则转为东西向; 南至石棉、昆明一带又转为北西向; 到最南端的通海、思茅又为北北西向. 因此, 应该强调分段性是南北地震带的主要特点.

从当前的地震活动图像(图 1)看, 南北地震带具有比较明确的东部边界, 但西部边界不明显. 南北地震带东西两侧在地壳厚度、壳幔速度结构、地震活动性等方面均具有较大的差异. 但是, 无论从地震活动性还是深部结构看, 地震带的西侧与地震带内部相差不大, 从而难以划定明确的西边界. 根据傅承义先生对地震带的解释: 地震带内大小地震发生的时间、强度和空间分布都有一定的共性, 并与地质构造有些关系. “地震带的划分现在还没有公认的定量标准, 所以它们的边界多少带有任意性”(傅承义等, 1985). 因此, 对于南北地震带范围的认识, 没有必要拘泥于一个区带地理位置的细节上, 而主要应该注重震中分布的成带性和地震活动性与地质构造带的统一. 分段性是南北地震带的一个重要特点.

6.2 南北地震带形成时代和动力来源

至今, 从地质构造上, 不少地质学家仍然认为南北地震带并不是一个地质构造上的区带. 但是, 有些地质构造研究结果表明, 南北地震带的位置是处于地质构造的分界上. 马杏垣等(1987)认为南北地震带即是南北构造带. 对于南北构造带, 形成的时代和动力来源, 以及对中国大陆岩石圈构造有何影响等问题, 长期以来都是地球科学家所关心的课题.

地质学家们通常将我国大陆划分成东西两个一级构造单元, 西部是板块碰撞带强烈隆起区, 东部是滨太平洋弧后带差异升降区, 而南北地震带处在两个一级单元的分界带上. 中国大陆的构造演化与两大动力体系的作用有关, 它们分别来自南北构造带东侧的西太平洋俯冲带和西侧的喜马拉雅大陆碰撞带(任纪舜等, 1999). Tappoinnier 和 Molnar (1976)为解释东亚大陆西部的大范围变形带, 曾提出过一个塑性滑移线理论, 认为天山—贝加尔大陆变形带

和南北地震带皆是中部塑性滑移区与外围弹性变形区的分界线. 他们提出的简化模型虽对南北地震带设计了一个可能的成因, 但却无法解释该处强震为何如此频繁.

万天丰在“2014 年南北构造带深部构造与地震学术研讨会”上的报告从中国大陆构造演化的角度, 来探讨南北构造带的有关问题. 依据不同的地质历史时期的地质资料, 认为南北构造带是发育于新近纪以来地壳深部的断裂构造带, 它控制了中国大陆东西部的地震活动性和活动大地构造特征, 受印度—澳大利亚板块向北碰撞—俯冲的影响, 为印度洋 90°E 海岭在亚洲大陆地壳内发育的断裂构造表现. 印度—澳大利亚板块以不等速度的向北运移、俯冲和碰撞对于中国大陆南部的板内变形产生巨大的影响, 尤其是 90°E 海岭的右行走滑断层作用, 真正形成比较连贯的南北构造带是近代的南北地震带. 但是这南北地震带始终没有迹象表明: 它在地表形成连贯的断层, 而是在中地壳和莫霍面附近形成了一系列 NNE 向断断续续的地震断层带, 此南北向地震带显然是 90°E 海岭的右行走滑断层在中国大陆地壳内促成一系列地震断层的结果. 由于南北地震带的逐步形成, 使现代中国大陆地壳出现显著不同的构造变形特征: 西部形成大量近东西走向的逆掩—推覆断层及褶皱, 地壳以近南北向缩短为主, 它们显然是印度板块向北强烈挤压、碰撞作用的结果(喜马拉雅地区向北的运移速度为 $\sim 5\text{ cm/yr}$); 而东部则以利用近南北向先存断层发生较为微弱的、近东西向的伸展作用为主, 它显然是澳大利亚板块低速($< 2\text{ cm/yr}$)向北挤压和俯冲的远程效应所造成的, 也即与近南北向微弱的缩短作用相关. 总之, 南北构造带是发育于新近纪以来地壳深部的断裂构造带. 南北构造带南段的南北向山脉和构造带并非印支期和中生代就存在的, 它的形成时间应该在中新世大约 21 Ma, 即由于印度板块的快速楔入引起块体旋转而形成的, 将它们构造复位以后, 前古近纪的构造方向应该是北西西向延伸的.

因此, 南北构造带的动力来源问题, 首先必须搞清南北构造带壳幔结构、组成和运动特征, 并在此基础上结合对东亚大陆总体的应力、变形场和其他有关地球物理特征的最新认识, 分析寻找控制南北构造带现代运动的动力原因, 最终提出现代构造活动为何如此强烈的成因模式.

6.3 加强流动地震观测

对于南北构造带来说, 地球科学的研究具有减

轻地震灾害的重大意义. 强震的孕育和发生是一个复杂的物理过程, 必须通过长时间的观测与实践, 通过地质、地球物理、大地测量、地球化学等多学科的交叉融合, 综合理解和认识大地震的物理环境与破裂过程, 才能够从根本上达到预测的目的. 本文涉及的相关问题是: 震源区介质的精细结构和深浅构造的关系、震源区介质物性参数及其变化、断层带变形特征、地震破裂过程等. “十五”以来, 我国的地震观测系统得到迅速的发展, 在全国布设了 1000 多个以宽频带仪器为主, 用于地震监测和地球科学研究的固定台站(郑秀芬等, 2009). 其产出的数据在实时为地震监测服务的同时, 还提供用于科学研究目的. 然而, 当前地震台网数据的成像分辨率和精度尚不足以高可信度识别在孕震尺度概念下的地震危险区. 即使是对于如“地壳通道流”一类的大陆动力学议题争论持续不断, 部分原因来自对“通道流”分辨率不足的问题(Liu et al., 2014). 因此, 加强流动地震观测是提高科学认知的关键所在.

2010 年以来, 随着科技部公益性行业科研专项“中国地震科学台阵探测”的实施, 相继在南北地震带南段和北段布设了宽频带流动地震台阵. 自运行以来, 已经积累了大量的连续观测数据. 在近期, 利用流动台阵观测系统, 结合固定地震台网, 加上高分辨率深部结构探测, 相信不需要很长的时间, 就能够获取理想中的地壳上地幔三维精细结构及物性成像, 为地震预测和大陆动力学研究提供新的研究途径.

本文旨在对自 2000 年以来, 特别是在 2008 年汶川地震之后国内外(重点在国内)地学界发表的有关南北构造带岩石圈结构与地震方面的研究成果作一个综述. 综述时阅读大量的研究成果, 由于时间仓促, 遗漏之处在所难免, 见谅.

致谢 感谢楼海, 李永华, 常利军, 王海燕, 卢占武, 李英康, 房立华, 徐小明, 潘佳铁等在文献和资料收集过程中的帮助.

References

- Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nat. Geosci.*, 3(5): 358-362.
- Bai Z M, Tian X B, Tian Y, et al. 2011. Upper mantle P-wave tomography across the Longmenshan fault belt from passive-source seismic observations along Aba-Longquanshan profile. *J. Asian Earth Sci.*, 40(4): 873-882.
- Bai Z M, Wang C Y. 2003. Tomographic investigation of the upper crustal structure and sesmotectonic environments in Yunnan province. *Acta Seismologica Sinica*. 25(2): 117-127.
- Bai Z M, Wang C Y. 2004. Tomography research of the Zhefeng-Binchuan and Menglian-Malong wide-angle seismic profiles in Yunnan province. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47(2): 257-267.
- Bendick R, Flesch L M. 2007. Reconciling lithospheric deformation and lower crustal flow beneath central Tibet. *Geology*, 35(10): 895-898.
- Bird P. 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography, in the isostatic limit. *J. Geophys. Res.*, 96(B6): 10275-10286.
- Chang L J, Wang C Y, Ding Z F. 2006. A study on SKS splitting beneath the Yunnan region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(1): 197-204.
- Chang L J, Wang C Y, Ding Z F. 2008a. Seismic anisotropy of upper mantle in the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(2): 431-438.
- Chang L J, Ding Z F, Wang C Y. 2010. Variations of shear wave splitting in the 2010 Yushu $M_s 7.1$ earthquake region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(11): 2613-2619, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.009.
- Chang L J, Ding Z F, Wang C Y. 2014. Variations of shear wave splitting in the 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake region. *Sci. China Ser. Earth Sci.*, 57(9): 2045-2052.
- Chang L J, Ding Z F, Wang C Y. 2015. Upper mantle anisotropy beneath the southern segment of North-South tectonic belt, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4052-4067, doi: 10.6038/cjg20151114.
- Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. 2005. Crust and upper mantle S-wave velocity structure across Northeastern Tibetan Plateau and Ordos block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48(2): 333-342.
- Chen L H, Song Z H, An C Q, et al. 1992. Three dimensional shear wave velocity and anisotropy of crust and upper mantle in the China north-south earthquake belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 35(05): 574-583.
- Chen L, Gerya T, Zhang Z J, et al. 2013. Numerical modeling of eastern Tibetan-type margin: Influences of surface processes, lithospheric structure and crustal rheology. *Gondwana Res.*, 24(3-4): 1091-1107.
- Chen Q F, Hua C, Li L, et al. 2015. Viscoelastic simulation of deep tectonic deformation of the Longmenshan fault zone and its implication for strong earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4129-4137, doi: 10.6038/cjg20151120.
- Chen S, Zheng Q Y, Xu W M. 2015. Joint optimal inversion of gravity and seismic data to estimate crustal thickness of the southern section of the north-south seismic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 3941-3951, doi: 10.6038/cjg20151105.
- Chen Y, Zhang Z J, Sun C Q, et al. 2013. Crustal anisotropy from Moho converted Ps wave splitting analysis and geodynamic implications beneath the eastern margin of Tibet and surrounding regions. *Gondwana Res.*, 24(3-4): 946-957.
- Cheng Y Z, Tang J, Chen X B, et al. 2015. Electrical structure and seismogenic environment along the border region of Yunnan, Sichuan and Guizhou in the south of the North-South seismic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 3965-3981, doi: 10.6038/cjg20151107.

- Clark M K, L H Royden. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28(8): 703-706.
- Cui Z Z, Chen J P, Wu L. 1996. A comprehensive study of the Alatai-Taiwan lithospheric geotranssect. // Cui Z Z, Chen J P, Wu L eds. Deep Crustal Structure and Tectonics from Huashixia to Shaoyang (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 49-168.
- Ding Z F, He Q, Sun W J, et al. 1999. 3-D crust and upper mantle velocity structure in eastern Tibetan plateau and its surrounding areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 42(2): 197-205.
- Fang S M, Zhao C B, Chai Z Z, et al. 2009. Seismic evidence of crustal structures in the Yinchuan faulted basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(7): 1768-1775, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.010.
- Flesch L M, Holt W E, Silver P G, et al. 2005. Constraining the extent of crust-mantle coupling in central Asia using GPS, geologic, and shear wave splitting data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 238(1-2): 248-268.
- Gao L J, Zhang J, Dong M. 2015. The study of gravity-magnetic anomaly and tectonic background in Sichuan west region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(8): 2996-3008, doi: 10.6038/cjg20150831.
- Gao R, Ma Y S, Li Q S et al. 2000a. Structure of the lower crust beneath the Songpan block and West Qinling orogen and their relation as revealed by deep seismic reflection profiling. *Geological Bulletin of China*. 25(12): 1361-1367.
- Gao R, Wang H Y, Ma Y S, et al. 2006b. Tectonic Relationships between the Zoigê Basin of the Song-Pan Block and the West Qinling Orogen at Lithosphere Scale: Results of Deep Seismic Reflection Profiling. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(5): 411-418.
- Ge X H, Ma W P, Liu J L, et al. 2009. A discussion on the tectonic framework of Chinese mainland. *Geology in China*. 36(5): 949-965.
- Gui Z Z, Lu D Y, Chen J Pi, et al. 1987. The Deep structural and tectonic features of the crust in Panxi area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 30(06): 566-580.
- Guo B, Liu Q Y, Chen J H, et al. 2004. Seismic tomographic imaging of the crust and upper mantle beneath the Northeastern edge of the Qinghai-Xizang plateau and the Ordos area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47(5): 790-797.
- Guo B, Liu Q Y, Chen J H, et al. 2009. Teleseismic P-wave tomography of the crust and upper mantle in Longmenshan area, west Sichuan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 346-355.
- Guo G H, Zhang Z, Cheng J W, et al. 2015. Seismic anisotropy in the crust in northeast margin of Tibetan Plateau and tectonic implication. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4092-4105, doi: 10.6038/cjg20151117.
- Guo X Y, Gao R, Keller G R, et al. 2013. Imaging the crustal structure beneath eastern Tibetan plateau and implications for the uplift of Longmen Shan range. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 379: 72-80.
- He C S, Santosh M, Chen X H, et al. 2014. Continental dynamics in a multi-convergent regime: a receiver function study from the North-South-Trending Tectonic Zone of China. *Int. Geol. Review*, 56(5): 525-536.
- Hu H X, Lu H X, Wang C Y, et al. 1986. Explosion investigation of the crustal structure in western Yunnan province. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 29(02): 133-144.
- Hu J F, Zhu X G, Xia J Y, et al. 2005. Tidal stress triggering mechanism of earthquakes in Yunnan and related patterns of celestial body positions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48(3): 574-583.
- Hu S B, He L J, Wang J Y. 2000. Heat flow in the continental area of China: A new data set. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179(2): 407-419.
- Huang J L, Zhao D P, Zheng S H. 2002. Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic activity in southwest China. *J. Geophys. Res.*, 107(B10): ESE 13-1-ESE 13-14.
- Huang J L, Zhao D P. 2006. High resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, 111(B9): B09305.
- Huang Z X, Li H Y, Xu Y. 2013. Lithospheric S-wave velocity structure of the North-South Seismic Belt of China from surface wave tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(4): 1121-1131, doi: 10.6038/cjg20130408.
- Huang Z X, Su W, Peng Y J, et al. 2003. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. *J. Geophys. Res.*, 108(B2): 2073, doi: 10.1029/2001JB001696.
- Jiang C S, Wu Z L, Yin F L, et al. 2015. Stability of early-estimation sequence parameters for continuous forecast of the aftershock rate: A case study of the 2014 Ludian, Yunnan $M_s 6.5$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4163-4173, doi: 10.6038/cjg20151123.
- Jiang W W, Jiang D D, Xu Y, et al. 2014. Features of crust and lithosphere velocity structures along the north-south tectonic belt and adjacent regions in China. *Chinese J. Geophys.*, 57(12): 3944-3956, doi: 10.6038/cjg20141208.
- Juliá J, Ammon C J, Herrmann R B. 2000. Joint inversion of receiver function and surface wave dispersion observations. *Geophys. J. Int.*, 143(1): 99-112.
- Kan R J, Hu H X, Zeng R S, et al. 1986. Crustal structure of Yunnan Province, People's Republic of China, from seismic refraction profiles. *Science*, 234(4775): 433-437.
- Kan R J, Lin Z Y. 1986. A preliminary study on crustal and upper mantle structures in Yunnan. *Earthquake Research In China*, 2(4): 50-61.
- Klemperer S L. 2006. Crustal flow in Tibet: Geophysical evidence for the physical state of Tibetan lithosphere, and inferred patterns of active flow. // Law R D, Searle M P, Godin L eds. Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones: an introduction. *Geol. Soc. Lond. Special Publications*, 268(1): 39-70.
- Kong X R, Liu S J, Dou C C, et al. 1987. Electrical conductivity structure in the crust and upper mantle in the region of pan-xi rift. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 30(2): 136-143.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. 2013. Update on CRUST1.0—A 1-degree global model of earth's crust. *Geophys. Res.*, 15: EGU2013-2658.
- Lee S P. 1957. The map of seismicity of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 6(2): 127-158.
- Lei J S, Zhao D P. 2009. Structural heterogeneity of the Longmenshan fault zone and the mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake ($M_s 8.0$). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10(10): Q10010.

- Li B K, Diao G L, Xu X W, et al. 2015. Redetermination of the source parameters of the Zayü, Tibet M8. 6 earthquake sequence in 1950. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4254-4265, doi: 10. 6038/cjg20151130.
- Li D H, Ding Z F, WU P P, et al. 2015. The deep seismogenic environment of the southeastern section of the Xianshuihe fault zone and the 2014 Kangding M_s 6.3 earthquake. *Chinese J. Geophys.*, 58(6): 1941-1953, doi: 10. 6038/cjg20150610.
- Li H Q, Gao R, Wang H Y, et al. 2013. Extracting the Moho structure of Liupanshan by the method of near vertical incidence. *Chinese J. Geophys.*, 56(11): 3811-3818, doi: 10. 6038/cjg20131122.
- Li H Y, Su W, Wang C Y, et al. 2009. Ambient noise Rayleigh wave tomography in western Sichuan and eastern Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 282(1-4): 201-211, doi: 10. 1016/j. epsl. 2009. 03. 021.
- Li H Y, Su W, Wang C Y, et al. 2010. Ambient Noise Love Wave Tomography in the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 491(1-4): 194-204, doi: 10. 1016/j. tecto. 2009. 12. 018.
- Li L, Chen Q F, Niu F L, et al. 2015. Quantitative study of the deep deformation along the southern segment of the Xianshuihe fault zone using repeating microearthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4138-4148, doi: 10. 6038/cjg20151121.
- Li R, Tang J, Dong Z Y, et al. 2014. Deep electrical conductivity structure of the southern area in Yunnan Province. *Chinese J. Geophys.*, 57(4): 1111-1122, doi: 10. 6038/cjg20140409.
- Li S L, Zhang X K, Zhang C K, et al. 2002. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin-Lanzhou-Jingbian by means of deep seismic sounding profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 45(2): 210-217.
- Li Y H, Pan J T, Wu Q J, et al. 2014. Crustal and uppermost mantle structure of SE Tibetan plateau from Rayleigh-wave group-velocity measurements. *Earthq. Sci.*, 27(4): 411-419, doi: 10. 1007/s11589-014-0090-z.
- Li Y H, Wu Q J, An Z H, et al. 2006. The Poisson ratio and crustal structure across the NE Tibetan Plateau determined from receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(5): 1359-1368.
- Li Y H, Wu Q J, Pan J T, et al. 2013. An upper-mantle S-wave velocity model for East Asia from Rayleigh wave tomography. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 377-378: 367-377.
- Li Y H, Wu Q J, Tian X B, et al. 2009. Crustal structure in the Yunnan region determined by modeling receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(1): 67-80.
- Li Y H, Wu Q J, Zhang F X, et al. 2011. Seismic anisotropy of the Northeastern Tibetan Plateau from shear wave splitting analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 304(1-2): 147-157.
- Li Y, Xu G D, Zhou R J. 2005. Isostatic gravity anomalies in the Longmen Mountains and their constraints on the crustal uplift below the mountains on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Regional Geology of China*, 24: 1162-1168.
- Lin F C, Ritzwoller M H, Townend J, et al. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand. *Geophys. J. Int.*, 170(2): 649-666.
- Liu G, Wang Q, Qiao X J, et al. 2015. The 25 April 2015 Nepal M_s 8. 1 earthquake slip distribution from joint inversion of teleseismic, static and high-rate GPS data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4287-4297, doi: 10. 6038/cjg20151133.
- Liu H F, Niu F L. 2012. Estimating crustal seismic anisotropy with a joint analysis of radial and transverse receiver function data. *Geophys. J. Int.*, 188(1): 144-164.
- Liu J H, Liu F T, Wu H, et al. 1989. Three dimensional velocity images of the crust and upper mantle beneath north-south zone in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 32(02): 143-152.
- Liu M, Fu B H, Dong Y F. 2015. Neotectonics of NE-striking fault zones and earthquake risk in the Yunnan-Myanmar block, southeastern margin of the Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4174-4186, doi: 10. 6038/cjg20151124.
- Liu M J, Mooney W D, Li S L, et al. 2006. Crustal structure of the northeastern margin of the Tibetan Plateau from the Songpan-Ganzi terrane to the Ordos basin. *Tectonophysics*, 420(1-2): 253-266.
- Liu Q Y, Li L, Chen J H, et al. 2009. Wenchuan M_s 8.0 earthquake: preliminary study of the S-wave velocity structure of the crust and upper mantle. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 309-319.
- Liu Q Y, van der Hilst R D, Li Y, et al. 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults. *Nat. Geosci.*, 7(5): 361-365.
- Liu S, Wu P. 2015. The effect of water level changes in Zipingpu reservoir on the parameters of shear wave splitting. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4106-4114, doi: 10. 6038/cjg20151118.
- Long M D, Silver P G. 2009. Shear wave splitting and mantle anisotropy: Measurements, interpretations, and new directions. *Surv. Geophys.*, 30(4): 407-461.
- Lou H, Wang C Y, Gang H F. 2002. Three-dimensional seismic velocity tomography of the upper crust in tengchong volcanic area, Yunnan province. *Acta Seismologica Sinica*, 24(3): 243-251.
- Lou H, Wang C Y. Wavelet analysis and interpretation of gravity data in Sichuan-Yunnan region, China. *Acta Seismologica Sinica*, 27: 515-523.
- Lou H, Wang C Y, Yao Z X. 2010. Subsection feature of the deep structure and material properties of Longmenshan fault zone. *Earth Science Frontiers*, 17(5): 128-141.
- Lu L Y, He Z Q, Ding Z F, et al. 2014. Azimuth anisotropy and velocity heterogeneity of Yunnan area based on seismic ambient noise. *Chinese J. Geophys.*, 57(3): 822-836, doi: 10. 6038/cjg20140312.
- Ma H Q, Ding Z F, Chang L J, et al. 2010. Seismic anisotropy of the upper mantle in Ningxia region. *Acta Seismologica Sinica*, 32(5): 507-516.
- McNamara D E, Owens T J, Silver P G, et al. 1994. Shear wave anisotropy beneath the Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 99: 13655-13665.
- McNamara D E, Owens T J. 1993. Azimuthal Shear wave velocity anisotropy in the Basin and Range province using Moho Ps converted phases. *J. Geophys. Res.*, 98: 12003-12017.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia, effects of a continental collision. *Science*, 189: 419-426.
- Owens T J, Zandt G. 1997. Implications of crustal property variations for model of Tibetan Plateau evolution. *Nature*,

- 387: 37-43.
- Pan S Z, Wang F Y, Duan Y H, et al. 2015. Basement structure of southern Yunnan and adjacent areas; The Zhenkang-Luxi deep seismic sounding profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58 (11): 3917-3927, doi:10.6038/cjg20151103.
- Pan J T, Li Y H, Wu Q J, et al. 2015. Phase velocity maps of Rayleigh waves in the southeast Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58 (11): 3993-4006, doi: 10.6038/cjg20151109.
- Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *J. Geophys. Res.*, 117: B04406, doi: 10.1029/2011JB008916.
- Rawlinson N, Reading A M, Kennett B L N. 2006. Lithospheric structure of Tasmania from a novel form of teleseismic tomography. *J. Geophys. Res.*, 111: B02301, doi: 10.1029/2005JB003803.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276: 788-790.
- Ruan A G, Wang C Y. 2002. The upper mantle anisotropy in Yunnan area, China. *Acta Seismologica Sinica*. (in Chinese), 24(3): 260-267.
- Shan X J, Zhang G H, Wang C S, et al. 2015. Joint inversion for the spatial fault slip distribution of the 2015 Nepal M_w 7.9 earthquake based on InSAR and GPS observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58 (11): 4266-4276, doi: 10.6038/cjg20151131.
- Shapiro N, Campillo M, Stehly L, et al. 2005. High-resolution surface wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307: 1615-1618.
- Shen C Y, Yang G L, Tan H B, et al. 2015. Gravity anomalies and crustal density structure characteristics of profile Weixi-Guiyang. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58 (11): 3952-3964, doi:10.6038/cjg20151106.
- Shi L, Lou H, Wang Q S, et al. 2015. Gravity field characteristics and crust density structure in the Panxi region, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58 (7): 2402-2412, doi: 10.6038/cjg20150717.
- Shi Y T, Gao Y, Zhang Y J, et al. 2013. Shear-wave splitting in the crust in Eastern Songpan-Garzê block, Sichuan-Yunnan block and Western Sichuan Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(2): 481-494, doi: 10.6038/cjg20130212.
- Shi Y, Gao Y, Su Y, et al. 2012. Shear-wave splitting beneath Yunnan area of Southwest China. *Earthq. Sci.*, 25: 25-34.
- Silver P G, Chan W W. 1988. Implications for continental structure and evolution from seismic anisotropy. *Nature*, 335: 34-39.
- Silver P G, Chan W W. 1991. Share-wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J. Geophys. Res.*, 96: 16429-16454.
- Silver P G. 1996. Seismic anisotropy beneath the continents; Probing the depths of geology. *Annual Rev. Earth Planet Sci.*, 24: 385-432.
- Song Z H, An C Q, Chen G Y, et al. 1991. Study on 3D velocity structure and anisotropy beneath the west China from the love wave dispersion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 34 (06): 694-707.
- Sun C Q, Lei J S, Li C, et al. 2013. Crustal anisotropy beneath the Yunnan region and dynamic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(12): 4095-4105, doi: 10.6038/cjg20131214.
- Sun H Y, Jiang G Y, He H L, et al. The influence of the 2014 Jinggu M_s 6.6 earthquake on the seismic risk of the Nantinghe fault zone in Yunnan Province, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4197-4206, doi:10.6038/cjg20151126.
- Sun J, Jin G W, Bai D H. 2003. Exploration of the electrical structure in the crust and upper mantle in eastern margin of Tibetan Plateau and its geotectonic implications. *Science in China (Series D)*, 46 (Supp.): 243-253.
- Sun R M, Liu F T, Liu J H. 1991. Seismic tomography of Sichuan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 34(06): 708-719.
- Sun Y, Niu F, Liu H, et al. 2012. Crustal structure and deformation of the SE Tibetan plateau revealed by receiver function data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 349-350: 186-197.
- Tai L X, Gao Y, Liu G, et al. 2015. Crustal seismic anisotropy in the southeastern margin of Tibetan Plateau by ChinArray data: shear-wave splitting from temporary observations of the first phase. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4079-4091, doi:10.6038/cjg20151116.
- Tang J, Zhan Y, Zhao G Z, et al. 2005. Electrical conductivity structure of the crust and upper mantle in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau along the profile Maqên-Lanzhou-Jingbian. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48(5): 1205-1216.
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large scale continental tectonics. *Nature*, 246: 319-324.
- Tommasi A, Gilbert B, Seipold U, et al. 2001. Anisotropy of thermal diffusivity in the upper mantle. *Nature*, 411: 783-786.
- Wan Y G, Sheng S Z, Li X, et al. 2015. Stress influence of the 2015 Nepal earthquake sequence on Chinese mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4277-4286, doi: 10.6038/cjg20151132.
- Wang C Y, Lou H, Wu J P. 2002. Seismological study on the crustal structure of Tengchong volcano-geothermal area. *Acta Seismologica Sinica*, 24(3): 231-242.
- Wang C Y, Chan W W, Mooney W D. 2003. 3-D velocity structure of crust and upper mantle in southwestern China and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 108 (B9): 2442. doi: 10.1029/2002JB001973.
- Wang C Y, Huangfu G. 2004. Crustal structure in Tengchong volcanic-geothermal area, western Yunnan, China. *Tectonophysics*, 380: 69-87.
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. 2007. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 112: B07307. doi: 10.1029/2005JB003873.
- Wang C Y, Flesch L M, Silver P G, et al. 2008. Evidence for mechanically coupled lithosphere in central Asia and resulting implications. *Geology*, 36(5): 363-366, doi: 10.1130/G24450A.1.
- Wang C Y, Lou H, Silver P, et al. 2009a. Crustal structure variation along 30°N in the eastern Tibetan Plateau and its tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 289 (3-4): 367-376, Doi: 10.1026/j. epsl. 2009. 11. 026
- Wang C Y, Lou H, Wang X, et al. 2009b. Crustal structure in Xiaojiang fault zone and its vicinity. *Earthq. Sci.*, 22: 347-356.
- Wang C Y, Zhu L, Lou H, et al. 2010. Crustal thicknesses and Poisson's ratios in the eastern Tibetan Plateau and their tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: B011301, doi:

10.1029/2010JB007527.

- Wang C Y, Flesch L M, Chang L, et al. 2013. Evidence of active mantle flow beneath South China. *Geophys. Res. Lett.*, 40: 5137-5141, doi: 10.1002/gri.50987. 2013.
- Wang C Y, Sandvol E, Zhu L P, et al. 2014. Lateral variation of crustal structure and composition in the Ordos block and surrounding regions, North China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 387: 198-211. doi: 10.1016/j.epsl.2013.11.033.
- Wang F Y, Pan S Z, Liu L, et al. 2014. Wide angle seismic exploration of Yuxi-Lincang profile—The research of crustal structure of the red river fault zone and southern Yunnan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(10): 3247-3258, doi: 10.6038/cjg20141013.
- Wang F Y, Zhao C B, Feng S Y, et al. 2015. Seismogenic structure of the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake revealed by a deep seismic reflection profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(9): 3183-3192, doi: 10.6038/cjg20150914.
- Wang H Y, Gao R, Li Q S, et al. 2014. Deep seismic reflection profiling in the Songpan-west Qinling-Linxia basin of the Qinghai-Tibet plateau: data acquisition, data processing and preliminary interpretations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(5): 1451-1461, doi: 10.6038/cjg20140510.
- Wang H, Gao R, Zeng L, et al. 2014. Crustal structure and Moho geometry of the northeastern Tibetan plateau as revealed by SinoProbe-02 deep seismic-reflection profiling. *Tectonophysics*, 636: 32-39.
- Wang Q, Gao Y, Shi Y T, et al. 2015. Rayleigh wave azimuthal anisotropy on the southeastern front of the Tibetan Plateau from seismic ambient noise. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4068-4078, doi: 10.6038/cjg20151115.
- Wang Q, Zhang P, Freymuller J T, et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positional system measurements. *Science*, 294: 574-577.
- Wang S, Xu X Y, Hu J F. 2015. Review on the study of crustal structure and geodynamic models for the southeast margin of the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4235-4253, doi: 10.6038/cjg20151129.
- Wang S J, Wang F Y, Zhang J S, et al. 2015. The deep seismogenic environment of Lushan $M_s7.0$ earthquake zone revealed by a wide-angle reflection/refraction seismic profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(9): 3193-3204, doi: 10.6038/cjg20150915.
- Wang X C, Ding Z F, Wu Y, et al. 2015. The crustal structure and seismogenic environment in the Ludian $M_s6.5$ earthquake region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4031-4040, doi: 10.6038/cjg20151112.
- Wang X B, Zhu Y T, Zhao X K, et al. 2009. Deep conductivity characteristics of the Longmen Shan, Eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 564-571.
- Wang X S, Lü J, Xie Z J, et al. 2015. Focal mechanisms and tectonic stress field in the North-South Seismic Belt of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4149-4162, doi: 10.6038/cjg20151122.
- Wang X S, Fang J, Hsu Hou-Tse. 2013. 3D density structure of lithosphere beneath northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(11): 3770-3778, doi: 10.6038/cjg20131118.
- Wang Y X, Qian H. 2000. The study of characteristics of crustal structure in the eastern Qinghai. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 7(4): 568-579.
- Wang Y X, Mooney W D, Han G H, et al. 2005. The crustal P-wave velocity structure from altyn tagh to Longmen mountains along the Taiwan-Altay geoscience transect. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48(1): 98-106.
- Wang Y P, Ma J, Li C Y. 2007. The migration characteristics of strong earthquakes on the North-South Seismic Belt and its relation with the south asia seismic belt. *Seismology and Geology* (in Chinese), 29(1): 1-14.
- Wang Z, Zhao D P, Wang J. 2010. Deep structure and seismogenesis of the north-south seismic zone in southwest China. *J. Geophys. Res.*, 115: B12334, doi: 10.1029/2010JB007797.
- Wang Z S, Wang Z Y, Gu J P, et al. 1976. A preliminary investigation of the limits and certain features of the north-south seismic zone of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 19(02): 110-117.
- Wu G, Yu Q F. 1990. Characteristics of the structure of magnetic layer in the North-South Seismic Belt in China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 12(3): 207-214.
- Wu J P, Ming Y H, Wang C Y. 2004. Source mechanism of small-to-moderate earthquakes and tectonic stress field in Yunnan province. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 26(5): 457-465.
- Wu J P, Ming Y H, Wang C Y, et al. 2006. Regional waveform inversion for crustal and upper mantle velocity structure below Chuandian region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(5): 1369-1376.
- Wu J P. 2009. Aftershock distribution of the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around source region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 320-328.
- Wu J P, Yang T, Wang W L, et al. 2013. Three dimensional P-wave velocity structure around Xiaojiang fault system and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(7): 2257-2267, doi: 10.6038/cjg20130713.
- Xiong S B, Teng J W, Yin Z X, et al. 1986. Explosion seismological study of the structure of the crust and upper mantle at southern part of the Panxi tectonic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 29(3): 235-244.
- Xiong W, Tan K, Liu G, et al. 2015. Coseismic and postseismic Coulomb stress changes on surrounding major faults caused by the 2015 Nepal $M_w7.9$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4305-4316, doi: 10.6038/cjg20151135.
- Xu X M, Ding Z, Shi D, et al. 2013. Receiver function analysis of crustal structure beneath the eastern Tibetan plateau. *J. Asian Earth Sci.*, 73: 121-127.
- Xu X M, Ding Z F, Zhang F X. 2015a. The teleseismic tomography study by P-wave traveltimes data beneath the southern South-north Seismic Zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4041-4051, doi: 10.6038/cjg20151113.
- Xu X M, Ding Z F, Ye Q D, et al. 2015b. The crustal and upper mantle structure beneath the South-North seismic zone from the inversion of Love wave phase velocity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 3928-3940, doi: 10.6038/cjg20151104.
- Xu Y, Huang Q R, Li Z W, et al. 2009. S-wave velocity structure of the Longmen Shan and Wenchuan earthquake area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 329-338.

- Xu Q, Zhao J M, Cui Z X, et al. 2009. Structure of the crust and upper mantle beneath the southeastern Tibetan Plateau by P and S wave receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(12): 3001-3008, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.12.009.
- Xu T, Zang M H, Tian X B, et al. 2014. Upper crustal velocity of Lijiang-Qingzhen profile and its relationship with the seismogenic environment of the $M_s 6.5$ Ludian earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(9): 3069-3079, doi: 10.6038/cjg20140932.
- Xuan S B, Shen C Y, Tan H B. 2015. Tectonic implications of images of Bouguer gravity anomaly and its normalized full gradient in Lushan-Kangding area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4007-4017, doi: 10.6038/cjg20151110.
- Yan Q, Zhang G, Hu H, Kan R. 1985. Crustal structure along Simao-Malong DSS profile in Yunnan province. *Seismol. Res.*, 8: 249-280.
- Yan C H, Zhou B, Lu L J, et al. 2015. Focal mechanisms of moderate and small earthquakes occurred after reservoir recharge in the Longtan reservoir region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4207-4222, doi: 10.6038/cjg20151127.
- Yang W C, Hou Z Z, Yu C Q. 2015a. Three-dimensional density structure of the Tibetan Plateau and crustal mass movement. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4223-4234, doi: 10.6038/cjg20151128.
- Yang W C, Hou Z Z, Yu C Q. 2015b. 3D crustal density structure of West Yunnan and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 3902-3916, doi: 10.6038/cjg20151102.
- Yang W C, Sun Y Y, Yu C Q, et al. 2015c. Crustal density deformation zones of Qinghai-Tibet Plateau and their geological implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4115-4128, doi: 10.6038/cjg20151119.
- Yang G L, Shen C Y, Wu G J, et al. 2015. Bouguer gravity anomaly and crustal density structure in Jinchuan-Lushan-Qianwei profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(7): 2424-2435, doi: 10.6038/cjg20150719.
- Yang H Y, Hu J F, Zhao H, et al. 2009. Crust-mantle structure and seismogenic background of Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake in Western Sichuan area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 356-364.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Levshin A L. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophys. J. Int.*, 168(1): 259-274.
- Yang Y J, Zheng Y, Chen J, et al. 2010. Rayleigh wave phase velocity maps of Tibet and the surrounding regions from ambient seismic noise tomography. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11(8): 1-18.
- Yao H J, Beghein C, van der Hilst R D. 2008. Surface wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-II. Crustal and upper-mantle structure. *Geophys. J. Int.*, 173: 205-219.
- Yao H J, van der Hilst R D, Montagner J P. 2010. Heterogeneity and anisotropy of the lithosphere of SE Tibet from surface wave array tomography. *J. Geophys. Res.*, 115(B12307).
- Yao H, van der Hilst R D, de Hoop M V. 2006. Surface-wave tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis: I.-phase velocity maps. *Geophys. J. Int.*, 166, 732-744. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.
- Yao Z X, Wang C Y, Zeng R S, et al. 2014. Crustal structure in western Qinling tectonic belt and its adjacent regions deduced from receiver functions. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 36(1): 119-126, doi: 10.3969/j.issn.0253.3782.2014.01.001.
- Yin Z X, Xiong S B. 1992. Explosion seismic study for the 2-d crustal structure in Xichang-Dukou-Muding region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 35(04): 451-458.
- Zhang G W, Lei J S. 2015. Focal mechanism solutions of moderate-sized aftershocks of the 2015 $M_s 8.1$ Nepal earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4298-4304, doi: 10.6038/cjg20151134.
- Zhang H S, Gao R, Tian X B, et al. 2015. Crustal Swave velocity beneath the northeastern Tibetan plateau inferred from teleseismic Pwave receiver functions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 3982-3992, doi: 10.6038/cjg20151108.
- Zhang J S, Gao R, Li Q S, et al. 2007. A study on Geophysical characteristic and basement in the Songpan-Garze and Western Qinling Orogenic belt. *Geological Review* (in Chinese), 53(2): 261-266.
- Zhang Z J, Yuan X H, Chen Y, et al. 2010. Seismic signature of the collision between the east Tibetan escape flow and the Sichuan Basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 292: 254-264.
- Zhao G Z, Chen X B, Wang L F, et al. 2008. The geomagnetic evidence of crustal channel flow in the eastern margin of Tibetan Plateau. *Science Bulletin* (in Chinese), 53(3): 345-350.
- Zhao G Z, Unsworth M J, Zhan Y, et al. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan $M_w 7.9$ earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40(12): 1139-1142.
- Zhao P P, Chen J H, Liu Q Y, et al. 2015. Fine structure of middle and upper crust of the Longmenshan Fault zone from short period seismic ambient noise. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4018-4030, doi: 10.6038/cjg20151111.
- Zheng S, Sun X, Song X, Yang Y, et al. 2008. Surface wave tomography of China from ambient seismic noise correlation. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9: Q05020, doi: 10.1029/2008GC001981.
- Zheng X, Zhao C P, Zhou L Q, et al. 2015. Three dimensional shear wave velocity structure beneath southeastern Tibetan plateau from ambient noise. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105(3), doi: 10.1785/0120140211.
- Zhou M D, Zhang Y S, Shi Y L, et al. 2006. Three-dimensional crustal velocity structure in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan plateau. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 21(1): 127-134.
- Zhu Y Q, Liu F, Li T M, et al. 2015. Dynamic variation of the gravity field in the Sichuan-Yunnan region and its implication for seismic risk. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4187-4196, doi: 10.6038/cjg20151125.
- Zhu L P, Ben-Zion Y. 2013. Parametrization of general seismic potency and moment tensors for source inversion of seismic waveform data. *Geophys. J. Int.*, 194(2): 839-843.
- Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J. Geophys. Res.*, 105: 2969-2980.
- Zhu L. 2000. Crustal structure across the San Andreas Fault, Southern California from teleseismic converted waves. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 179, 183-190.

附中文参考文献

- 白志明, 王椿镛. 2003. 滇西地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究. 地震学报, 25(2): 117-127.
- 白志明, 王椿镛. 2004. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究. 地球物理学报, 2004, 47((2): 257-267.
- 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 2006. 云南地区 SKS 波分裂研究. 地球物理学报, 49((1): 197-204.
- 常利军, 王椿镛, 丁志峰等. 2008a. 青藏高原东北缘上地幔各向异性研究. 地球物理学报, 51((2): 431-438.
- 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 2008b. 四川及邻区上地幔各向异性研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38((12): 1589-1599.
- 常利军, 丁志峰, 王椿镛. 2010. 2010 年玉树 7.1 级地震震源区横波分裂的变化特征. 地球物理学报, 53: 2613-2619.
- 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 2011. 鄂尔多斯块体及周缘上地幔各向异性研究. 中国科学(D 辑: 地球科学), 41: 686-699.
- 常利军, 丁志峰, 王椿镛. 2015. 南北构造带南段上地幔各向异性特征. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4052-4067, doi:10.6038/cjg20151114.
- 陈九辉, 刘启元, 李顺成等. 2005. 青藏高原东北缘—鄂尔多斯地块地壳上地幔 S 波速度结构. 地球物理学报, 2005, 48(2): 333-342.
- 陈立华, 宋仲和, 安昌强等. 1992. 中国南北带地壳上地幔三维面波速度结构和各向异性. 地球物理学报, 35(5): 574-583.
- 陈棋福, 华诚, 李乐等. 2015. 龙门山断裂带深部构造变形的黏弹性模拟及其与强震活动的关联性探讨. 地球物理学报, 58(11): 4129-4137, doi:10.6038/cjg20151120.
- 陈石, 郑秋月, 徐卫民. 2015. 南北地震带南段地壳厚度重震联合最优反演. 地球物理学报, 58(11): 3941-3951, doi:10.6038/cjg20151105.
- 陈学波, 吴跃强, 杜平山等. 1988. 龙门山构造带两侧地壳速度结构特征. 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. 北京: 地质出版社, 97-113.
- 程远志, 汤吉, 陈小斌等. 2015. 南北地震带南段川滇黔接壤区电性结构特征和孕震环境. 地球物理学报, 58(11): 3965-3981, doi:10.6038/cjg20151107.
- 崔作舟, 陈纪平, 吴苓. 1996. 花石峡—邵阳深部地壳的结构和构造. 北京: 地质出版社, 49-168.
- 崔作舟、卢德源、陈纪平等. 1987. 攀西地区的深部地壳结构与构造. 地球物理学报, 30: 566-580.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康等. 2002. 中国活动构造基本特征, 中国科学 D 辑: 地球科学, 32(12): 1020-1030.
- 丁志峰, 何正勤, 孙卫国等. 1999. 青藏高原东部及其边缘地区的地壳上地幔三维速度结构. 地球物理学报, 42(2): 197-205.
- 董树文, 张岳桥, 李秋生等. 2014. 论大巴山陆内造山带. 北京: 地质出版社, 15-40.
- 方盛明, 赵成彬, 柴炽章等. 2009. 银川断陷盆地地壳结构与构造的地震学证据. 地球物理学报, 52(7): 1768-1775, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.010.
- 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 1985. 地球物理学基础. 北京: 科学出版社, 256-257.
- 高锐, 马永生, 李秋生等. 2000a. 松潘地块与西秦岭造山带下地壳的性质和关系—深地震反射剖面的揭露. 地质通报, 25(12): 1361-1367.
- 高锐, 王海燕, 马永生等. 2006b. 松潘地块若尔盖盆地与西秦岭造山带岩石圈尺度的构造关系—深地震反射剖面探测成果. 地球学报, 27(5): 411-418.
- 高玲举, 张健, 董森. 2015. 川西高原重磁异常特征与构造背景分析. 地球物理学报, 58(8): 2996-3008, doi: 10.6038/cjg20150831.
- 葛肖虹, 马文璞, 刘俊来等. 2009. 对中国大陆构造格架的讨论. 中国地质, 36(5): 949-965.
- 顾功叙. 1983. 中国地震目录(公元前 1831—1969 年). 北京: 科学出版社.
- 郭颢, 刘启元, 陈九辉等. 2004. 青藏高原东北缘—鄂尔多斯地壳上地幔地震层析成像研究. 地球物理学报, 47(5): 790-797.
- 郭颢, 刘启元, 陈九辉等. 2009. 川西龙门山及邻区地壳上地幔远震 P 波层析成像. 地球物理学报, 52(2): 346-355.
- 郭桂红, 张智, 程建武等. 2015. 青藏高原东北缘地壳各向异性的构造含义. 地球物理学报, 58(11): 4092-4105, doi:10.6038/cjg20151117.
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究. 地球物理学报, 29: 133-144.
- 胡家富, 朱雄关, 夏静瑜等. 2005. 利用面波和接收函数联合反演滇西地区壳幔结构. 地球物理学报, 48(5): 1069-1076.
- 黄忠贤, 李红谊, 胥颐. 2013. 南北地震带岩石圈 S 波速度结构的面波层析成像. 地球物理学报, 56(4): 1121-1131.
- 嘉世旭, 刘宝金, 徐朝繁等. 2014. 龙门山中段及两侧地壳结构与汶川地震构造. 中国科学: 地球科学, 44(3): 497-509.
- 江为为, 姜迪迪, 胥颐等. 2014. 南北构造带及邻域地壳、岩石层速度结构特征研究. 地球物理学报, 57(12): 3944-3956, doi:10.6038/cjg20141208.
- 蒋长胜, 吴忠良, 尹凤玲等. 2015. 余震的序列参数稳定性和余震短期发生率预测效能的连续评估——以 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震为例. 地球物理学报, 58(11): 4163-4173, doi:10.6038/cjg20151123.
- 阚荣举, 林中洋. 1986. 云南地壳上地幔构造的初步研究. 中国地震, 1986, 2(4): 50-61.
- 孔祥儒, 刘世杰, 窦秦川等. 1987. 攀西地区地壳上地幔中的电性结构. 地球物理学报, 30: 136-143.
- 李勇, 徐公达, 周荣军等. 2005. 龙门山均衡重力异常及其对青藏高原东缘山脉地壳隆升的约束. 地质通报, 24: 1162-1168.
- 李保昆, 刁桂苓, 徐锡伟等. 2015. 1950 年西藏察隅 M8.6 强震序列震源参数复核. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4254-4265, doi:10.6038/cjg20151130.
- 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍等. 2015. 鲜水河断裂带南东段的深部孕震环境与 2014 年康定 M_s6.3 地震. 地球物理学报, 58(6): 1941-1953.
- 李洪强, 高锐, 王海燕等. 2013. 用近垂直方法提取莫霍面——以六盘山深地震反射剖面为例. 地球物理学报, 56(11): 3811-3818, doi: 10.6038/cjg20131122.
- 李乐, 陈棋福, 钮凤林等. 2015. 鲜水河断裂带南段深部变形的重复地震研究. 地球物理学报, 58(11): 4138-4148, doi:10.6038/cjg20151121.

- 李立, 金国元. 1987. 攀西裂谷及龙门山断裂带地壳上地幔大地电磁测深研究. 物探与化探, 11: 161-169.
- 李清河, 郭建康, 周民都等. 1991. 成县—西吉剖面地壳速度结构. 西北地震学报, 13(增刊): 37-43.
- 李冉, 汤吉, 董泽义等. 2014. 云南南部地区深部电性结构特征研究. 地球物理学报, 57(4): 1111-1122, doi: 10.6038/cjg20140409.
- 李善邦. 1957. 中国地震区域划分图及其说明. 地球物理学报, 6(2): 127-158.
- 李松林, 张先康, 任青芳等. 2001. 西吉—中卫深地震测深剖面及其解释. 地震地质, 23(1): 86-92.
- 李松林, 张先康, 张成科等. 2002. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构初步研究. 地球物理学报, 45(2): 210-217.
- 李英康, 高锐, 高建伟等. 2015. 秦岭造山带的东西向地壳速度结构特征. 地球物理学进展, 30(3): 1056-1069, doi: 10.6038/pg20150309.
- 李英康, 高锐, 米胜信等. 2014. 青藏高原东北缘六盘山—鄂尔多斯盆地的地壳速度结构特征. 地质论评, 60(5): 1147-1157.
- 李永华, 吴庆举, 安张辉等. 2006. 青藏高原东北缘地壳 S 波速度结构与泊松比及其意义. 地球物理学报, 49(5): 1359-1368.
- 李永华, 吴庆举, 田小波等. 2009. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构. 地球物理学报, 52(1): 67-80.
- 李志伟, 胥颐, 黄润秋等. 2011. 龙门山地区的 P 波速度结构与汶川地震的深部构造特征. 中国科学: 地球科学, 41(3): 283-290.
- 林中洋, 胡鸿翔, 张文彬等. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究. 地震学报, 15: 427-440.
- 刘福田, 刘建华, 何建坤等. 2000. 滇西特提斯造山带下扬子地块的俯冲板片. 科学通报, 45: 79-84.
- 刘刚, 王琪, 乔学军等. 2015. 用连续 GPS 与远震体波联合反演 2015 年尼泊尔中部 $M_s 8.1$ 地震破裂过程. 地球物理学报, 58(11): 4287-4297, doi: 10.6038/cjg20151133.
- 刘建华, 刘福田, 何建坤等. 2000. 攀西裂谷的地震成像研究—壳幔结构特征及其演化推断. 中国科学 D 辑, 30(增刊): 9-15.
- 刘建华, 刘福田, 吴华等. 1989. 中国南北带地壳和上地幔的三维速度图象. 地球物理学报, 32(2): 143-152.
- 刘鸣, 傅碧宏, 董艳芳. 2015. 青藏高原东南缘滇缅地块 NE 向走滑断裂带的新构造活动与大地震危险性. 地球物理学报, 58(11): 4174-4186, doi: 10.6038/cjg20151124.
- 刘启民, 赵俊猛, 卢芳等. 2014. 用接收函数方法反演青藏高原东北缘地壳结构. 中国科学: 地球科学, 44: 668-679.
- 刘启元, 李昱, 陈九辉等. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 地震: 地壳上地幔 S 波速度结构的初步研究. 地球物理学报, 52(2): 309-319.
- 刘莎, 吴朋. 2015. 紫坪铺水库水位变化对剪切波分裂参数的影响. 地球物理学报, 58(11): 4106-4114, doi: 10.6038/cjg20151118.
- 楼海, 王椿镛. 1999. 三维连续密度分布的重力计算及应用. 地震学报, 21: 297-304.
- 楼海, 王椿镛, 皇甫岗等. 2002. 腾冲火山区上部地壳三维地震波层析成像. 地震学报, 24(3): 243-251.
- 楼海, 王椿镛. 2005. 川滇地区重力异常的小波分解与解释. 地震学报, 27: 515-523.
- 楼海, 王椿镛, 吕志勇等. 2008. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震的深部构造环境—远震 P 波接收函数和布格重力异常的联合解释. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38: 1207-1220.
- 楼海, 王椿镛, 姚志祥等. 2010. 龙门山断裂带深部构造和物性分布的分断特征. 地学前缘, 17(5): 128-141.
- 鲁来玉, 何正勤, 丁志峰等. 2014. 基于背景噪声研究云南地区面波速度非均匀性和方位各向异性. 地球物理学报, 57(3): 822-836, doi: 10.6038/cjg20140312.
- 马禾青, 丁志峰, 常利军等. 2010. 宁夏地区上地幔地震各向异性特征. 地震学报, 32(5): 507-516.
- 马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 1989.
- 牛之俊, 王敏, 孙汉荣等. 2005. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果. 科学通报, 50(8): 839-848.
- 潘佳铁, 李永华, 吴庆举等. 2015. 青藏高原东南部地区瑞雷波相速度层析成像. 地球物理学报, 2015, 58(11): 3993-4006, doi: 10.6038/cjg20151109.
- 潘素珍, 王夫运, 段永红等. 2015. 滇南及临近地区基底结构—镇康—泸西深地震测深剖面结果. 地球物理学报, 58(11): 3917-3927, doi: 10.6038/cjg20151103.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚等. 1999. 从全球看中国大陆构造—中国及邻区大地构造图纲要说明. 北京: 科学出版社.
- 阮爱国, 王椿镛. 2002. 云南地区上地幔各向异性研究. 地震学报, 24(3): 260-267.
- 单新建, 张国宏, 汪驰升等. 2015. 基于 InSAR 和 GPS 观测数据的尼泊尔地震发震断层特征参数联合反演研究. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4266-4276, doi: 10.6038/cjg20151131.
- 申重阳, 杨光亮, 谈洪波等. 2015. 维西—贵阳剖面重力异常与地壳密度结构特征. 地球物理学报, 58(11): 3952-3964, doi: 10.6038/cjg20151106.
- 石磊, 楼海, 王谦身等. 2015. 攀西地区重力场特征及地壳密度结构. 地球物理学报, 58(7): 2402-2412, doi: 10.6038/cjg20150717.
- 石玉涛, 高原, 张永久等. 2013. 松潘—甘孜地块东部, 川滇地块北部与四川盆地西部的地壳剪切波分裂. 地球物理学报, 56(2): 481-492.
- 宋仲和, 安昌强, 陈国英等. 1991. 中国西部三维速度结构及其各向异性. 地球物理学报, 34(6): 694-707.
- 苏伟, 彭艳菊, 郑月军等. 2002. 青藏高原及其邻区地壳上地幔 S 波速度结构. 地球学报, 23(3): 193-200.
- 苏伟, 王椿镛, 黄忠贤. 2008. 青藏高原及邻区的面波的方位各向异性. 中国科学(D 辑), 38(6): 674-682.
- 孙长青, 雷建设, 李聪等. 2013. 云南地区地壳各向异性及其动力学意义. 地球物理学报, 56(12): 4095-4105.
- 孙浩越, 江国焰, 何宏林等. 2015. 云南景谷 $M_s 6.6$ 地震对南汀河断裂带地震危险性的影响. 地球物理学报, 58(11): 4197-4206, doi: 10.6038/cjg20151126.
- 孙洁, 晋光文, 白登海等. 2003. 青藏高原东缘地壳上地幔电性结构探测及其大地构造意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 33(增刊): 173-180.
- 孙洁、徐常方、江钊等. 1989. 滇西地区地壳、上地幔电性结构与地壳活动的关系. 地震地质, 11: 35-45.
- 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): 708-719.
- 太岭雪, 高原, 刘庚等. 2015. 利用中国地震科学台阵研究青藏高

- 原东南缘地壳各向异性: 第一期观测资料的剪切波分裂特征. 地球物理学报, 58(11): 4079-4091, doi:10.6038/cjg20151116.
- 汤吉, 詹艳, 赵国泽等. 2005. 青藏高原东北缘玛沁—兰州—靖边剖面地壳上地幔电性结构研究. 地球物理学报, 48(5): 1205-1216.
- 滕吉文. 1994. 康滇构造带岩石圈物理与动力学. 北京: 科学出版社.
- 万永革, 盛书中, 李祥. 2015. 2015 年尼泊尔强震序列对中国大陆的应力影响. 地球物理学报, 58(11): 4277-4286, doi:10.6038/cjg20151132.
- 汪一鹏, 马瑾, 李传友. 2007. 南北地震带强震迁移特征及其与南亚地震带的联系. 地震地质, 29(1), 1-14.
- 王椿镛, 王溪莉, 颜其中. 1994. 昆明地震台网下方三维速度结构. 地震学报, 16(2), 167-175.
- 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉等. 2002a. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究. 地震学报, 24(1): 1-16.
- 王椿镛, 楼海, 吴建平. 2002b. 腾冲火山地热区地壳结构的地震学研究. 地震学报, 24(3): 231-242.
- 王椿镛, 吴建平, 楼海等. 2003a. 青藏高原东缘的地壳 P 波速度结构. 中国科学(D 辑), 33(增刊): 181-189.
- 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平等. 2003b. 松潘(甘孜造山带)地壳速度结构. 地震学报, 25(3): 229-241.
- 王椿镛, 吴建平, 楼海等. 2006. 青藏高原东部壳幔结构和地幔变形场的研究. 地学前缘, 13(5): 349-359.
- 王椿镛, 常利军, 吕智勇等. 2007. 青藏高原东部地幔各向异性及相关的壳幔耦合型式. 中国科学(D 辑), 37(4): 495-503.
- 王椿镛, 楼海, 吕智勇等. 2008a. 青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构—下地壳流的深部环境. 中国科学(D 辑), 38: 22-32.
- 王椿镛, 常利军, 苏伟等. 2008b. 青藏高原东部及其邻区力学耦合的岩石圈变形模式. 地学前缘, 15(6): 208-218.
- 王椿镛, 楼海, 姚志祥等. 2010. 龙门山及其邻区的地壳厚度和泊松比. 第四纪研究, 30(4): 652-661.
- 王椿镛, 常利军, 丁志峰等. 2014. 中国大陆上地幔各向异性及壳幔变形模式. 中国科学: 地球科学, 44(1): 98-110.
- 王夫运, 段永红, 杨卓欣等. 2008. 川西盐源—马边地震带上地壳速度结构和活动断裂研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(5): 611-621.
- 王夫运, 潘素珍, 刘兰等. 2014. 玉溪—临沧剖面宽角地震探测—红河断裂带及滇南地壳结构研究. 地球物理学报, 57(10): 3247-3258, doi: 10.6038/cjg20141013.
- 王夫运, 赵成彬, 鄧少英等. 2015. 深反射剖面揭示的芦山 7.0 级地震发震构造. 地球物理学报, 58(9): 3183-3192, doi: 10.6038/cjg20150914.
- 王海燕, 高锐, 李秋生等. 2014. 青藏高原松潘—西秦岭—临夏盆地深地震反射剖面—采集、处理与初步解释. 地球物理学报, 57(5): 1451-1461, doi: 10.6038/cjg20140510.
- 王琼, 高原, 石玉涛. 2015. 青藏高原东南缘基于背景噪声的 Rayleigh 面波方位各向异性研究. 地球物理学报, 58(11): 4068-4078, doi:10.6038/cjg20151115.
- 王帅军, 王夫运, 张建狮等. 2014. 华北克拉通岩石圈二维 P 波速度结构特征—文登—阿拉善左旗深地震剖面结果. 中国科学: 地球科学, 2697-2708.
- 王帅军, 王夫运, 张建狮等. 2015. 利用宽角反射/折射地震剖面揭示芦山 $M_s7.0$ 地震震区深部孕震环境. 地球物理学报, 58(9): 3193-3204, doi: 10.6038/cjg20150915.
- 王苏, 徐晓雅, 胡家富. 2015. 青藏高原东南缘的地壳结构与动力学模式研究综述. 地球物理学报, 58(11): 4235-4253, doi:10.6038/cjg20151129.
- 王晓山, 吕坚, 谢祖军等. 2015. 南北地震带震源机制解与构造应力场特征. 地球物理学报, 58(11): 4149-4162, doi:10.6038/cjg20151122.
- 王新胜, 方剑, 许厚泽等. 2013. 青藏高原东北缘岩石圈三维密度结构. 地球物理学报, 56(11): 3770-3778, doi: 10.6038/cjg20131118.
- 王兴臣, 丁志峰, 武岩等. 2015. 鲁甸 $M_s6.5$ 地震震源区地壳结构及孕震环境研究. 地球物理学报, 58(11): 4031-4040, doi:10.6038/cjg20151112.
- 王绪本, 朱迎堂, 赵锡奎等. 2009. 青藏高原东缘龙门山逆冲构造深部电性结构特征. 地球物理学报, 52(2): 564-571.
- 王有学, Mooney W D, 韩果花等. 2005. 台湾—阿尔泰地质断面阿尔金—龙门山剖面的地壳纵波速度结构. 地球物理学报, 48(1): 98-106.
- 王有学, 钱辉. 2000. 青海东部地壳速度结构特征研究. 地学前缘, 7(4): 568-579.
- 王振声, 王周元, 顾瑾平等. 1976. 中国南北地震带的范围及其活动特征初步探讨. 地球物理学报, 19(2): 110-117.
- 吴刚, 余钦范. 1990. 中国南北地震带磁性层构造特征. 地震地质, 12(3): 207-214.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2004. 云南地区中小地震震源机制及构造应力场研究. 地震学报, 26(5): 457-465.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛. 2006. 川滇地区速度结构的区域波形反演研究. 地球物理学报, 49(5): 1369-1376.
- 吴建平, 黄媛, 张天中等. 2009. 汶川 $M_s8.0$ 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究. 地球物理学报, 52(2): 320-328.
- 吴建平, 杨婷, 王未来等. 2013. 小江断裂带周边地区三维 P 波速度结构及其构造意义. 地球物理学报, 56(7): 2257-2267, doi: 10.6038/cjg20130713.
- 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋等. 1986. 攀西构造带南部地壳与上地幔结构的爆炸地震研究. 地球物理学报, 29: 235-244.
- 熊维, 谭凯, 刘刚等. 2015. 2015 年尼泊尔 $M_w7.9$ 地震对青藏高原活动断裂同震、震后应力影响. 地球物理学报, 58(11): 4305-4316, doi:10.6038/cjg20151135.
- 胥颐, 黄秋润, 李志伟等. 2009. 龙门山构造带级汶川震源区的波速度结构. 地球物理学报, 52(2): 329-338.
- 胥颐, 杨晓涛, 刘建华. 2013. 云南地区地壳速度结构的层析成像研究. 地球物理学报, 56(6): 1904-1914, doi: 10.6038/cjg20130613.
- 徐鸣杰, 王良书, 刘建华等. 2005. 利用接收函数研究哀牢山—红河断裂带地壳上地幔结构. 中国科学 D 辑: 地球科学, 35: 729-737.
- 徐强, 赵俊猛, 崔忠雄等. 2009. 利用接收函数研究青藏高原东南缘的地壳上地幔结构. 地球物理学报, 52(12): 3001-3008.
- 徐涛, 张明辉, 田小波等. 2014. 丽江—清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸 $M_s6.5$ 级地震孕震环境的关系. 地球物理学报, 57(9): 3069-3079, doi: 10.6038/cjg20140932.

- 徐涛, 张忠杰, 刘宝峰等. 2015. 峨眉山大火成岩省地壳速度结构与古地幔柱活动遗迹: 来自丽江 清镇宽角地震资料的约束. 中国科学: 地球科学, 45: 561-576.
- 徐小明, 丁志峰, 张风雪. 2015a. 南北地震带南段远震 P 波走时层析成像研究. 地球物理学报, 58(11): 4041-4051, doi:10.6038/cjg20151113.
- 徐小明, 丁志峰, 叶庆东, 吕苗苗. 2015b. 基于 Love 波相速度反演南北地震带地壳上地幔结构. 地球物理学报, 58(11): 3928-3940, doi:10.6038/cjg20151104.
- 玄松柏, 申重阳, 谈洪波. 2015. 芦山—康定地区布格重力异常及其归一化梯度图像的构造物理涵义. 地球物理学报, 58(11): 4007-4017, doi:10.6038/cjg20151110.
- 闫春恒, 周斌, 陆丽娟等. 2015. 龙滩水库蓄水后库区中小地震震源机制. 地球物理学报, 58(11): 4207-4222, doi:10.6038/cjg20151127.
- 杨光亮, 申重阳, 吴桂桔等. 2015. 金川—芦山—犍为剖面重力异常和地壳密度结构特征. 地球物理学报, 58(7): 2424-2435, doi:10.6038/cjg20150710.
- 杨海燕, 胡家富, 赵宏等. 2009. 川西地区壳幔结构与汶川 $M_s 8.0$ 级地震的孕震背景. 地球物理学报, 52(2): 356-364.
- 杨文采, 侯遵泽, 于常青. 2015a. 青藏高原地壳的三维密度结构和物质运动. 地球物理学报, 58(11): 4223-4234, doi:10.6038/cjg20151128.
- 杨文采, 侯遵泽, 于常青. 2015b. 滇西地壳三维密度结构及其大地构造含义. 地球物理学报, 58(11): 3902-3916, doi:10.6038/cjg20151102.
- 杨文采, 孙艳云, 于常青. 2015c. 青藏高原地壳密度变形带及构造分区. 地球物理学报, 58(11): 4115-4128, doi:10.6038/cjg20151119.
- 姚志祥, 王椿镛, 曾融生等. 2014. 利用接收函数方法研究西秦岭构造带及其邻区地壳结构. 地震学报, 36(1): 119-126, doi:10.3969/j.issn.0253.3782.2014.01.001.
- 易桂喜, 姚华建, 朱介寿等. 2010. 用 Rayleigh 面波方位各向异性研究中国大陆岩石圈形变特征. 地球物理学报, 53(2): 256-268, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.004.
- 殷秀华, 黎益仕, 刘占波. 1998. 南北带北段地壳上地幔密度与磁性结构. 地壳形变与地震, 18(4): 11-17.
- 尹周勋, 熊绍柏. 1992. 西昌—渡口—牟定地带二维地壳结构的爆炸地震研究. 地球物理学报, 35(4): 421-458.
- 詹艳, 赵国泽, 王立凤等. 2014. 西秦岭与南北地震构造带交汇区深部电性结构特征. 地球物理学报, 57(8): 2594-2607, doi:10.6038/cjg20140819.
- 张晁军, 曹建玲, 石耀霖. 2008. 从震后形变探讨青藏高原下地壳黏滞系数. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(10): 1250-1257.
- 张恩会, 楼海, 嘉世旭等. 2013. 云南西部地壳深部结构特征. 地球物理学报, 56(6): 1915-1927.
- 张恩会, 石磊, 李永华等. 2015. 基于抛物线密度模型的频率域三维界面反演及其在川滇地区的应用. 地球物理学报, 58(2): 556-565.
- 张广伟, 雷建设. 2015. 2015 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震中等余震震源机制研究. 地球物理学报, 58(11): 4298-4304, doi:10.6038/cjg20151134.
- 张洪双, 高锐, 田小波等. 2015. 青藏高原东北缘地壳 S 波速度结构及其动力学含义——远震接收函数提供的证据. 地球物理学报, 58(11): 3982-3992, doi:10.6038/cjg20151108.
- 张洪双, 滕吉文, 田小波等. 2013. 青藏高原东北缘岩石圈厚度与上地幔各向异性. 地球物理学报, 56: 459-471.
- 张季生, 高锐, 李秋生等. 2007. 松潘—甘孜和西秦岭造山带地球物理特征及基底构造研究. 地质论评, 53(2): 261-266.
- 张少泉, 武利军, 郭建明等. 1985. 中国西部地区门源—平凉—金堆城地震测深剖面资料的分析解释. 地球物理学报, 28: 460-472.
- 张文佑. 1959. 中国大地构造纲要. 北京: 科学出版社.
- 张先康, 杨卓欣, 徐朝繁等. 2007. 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. 地震学报, 29(6): 592-604.
- 张先康, 嘉世旭, 赵金仁等. 2008. 西秦岭—东昆仑及邻近地区地壳结构—深地震宽角反射/折射剖面结果. 地球物理学报, 51(2): 439-450.
- 张中杰, 白志明, 王椿镛等. 2005a. 三江地区地壳结构及动力学意义: 云南遮放—宾川地震反射/折射剖面的启示. 中国科学(D 辑), 34(4): 314-319.
- 张中杰, 白志明, 王椿镛等. 2005b. 冈瓦纳型和扬子型地块地壳结构: 以滇西孟连—马龙宽角反射剖面为例. 中国科学(D 辑), 34(5): 387-392.
- 赵国泽, 陈小斌, 王立凤等. 2008. 青藏高原东边缘地壳“管流”层的电磁探测证据. 科学通报, 53(12): 345-350.
- 赵国泽, 汤吉, 詹艳等. 2004. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系研究. 中国科学 D 辑, 34: 908-918.
- 赵凌强, 詹艳, 陈小斌等. 2015. 西秦岭造山带(中段)及其两侧地块深部电性结构特征. 地球物理学报, 58(7): 2460-2472, doi:10.6038/cjg20150722.
- 赵盼盼, 陈九辉, 刘启元等. 2015. 龙门山断裂带中上地壳速度结构的短周期环境噪声成像. 地球物理学报, 58(11): 4018-4030, doi:10.6038/cjg20151111.
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁等. 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑. 地球物理学报, 52(5): 1412-1417.
- 周民都, 张元生, 石雅镠等. 2006. 青藏高原东北缘地壳三维速度结构. 地球物理学进展, 21(1): 127-134.
- 祝意青, 刘芳, 李铁明等. 2015. 川滇地区重力场动态变化及其强震危险含义. 地球物理学报, 58(11): 4187-4196, doi:10.6038/cjg20151125.

(本文编辑 胡素芳)