

李秋生, 鄧少英, 白志明, 等. 青藏高原东南缘壳幔结构探测研究新进展[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(6): 757-778.

LI Qiu-sheng, FENG Shao-ying, BAI Zhi-ming, et al. New Research Progress on Crust-upper Mantle Structure in the Southeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(6): 757-778.

青藏高原东南缘壳幔结构探测研究新进展

李秋生¹, 鄧少英², 白志明³, 高原⁴, 高嵩⁵, 熊小松⁶, 王晓冉¹, 郎超¹,
韩如冰¹, 吴庆宇¹, 卢占武¹, 王海燕¹, 李文辉¹, 张洪双¹, 张新彦¹

(1. 中国地质科学院地质研究所 自然资源部深地动力学实验室(建), 北京 100037; 2. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 4. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 5. 成都理工大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610059;
6. 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037)

摘要: 青藏高原东南缘的岩石圈变形特征和动力学过程显著不同于以正向碰撞为主要形式的青藏高原本体。其变形样式在地壳浅部以侧向滑移为主, 并伴随一系列尚待揭示的深部过程。毫无疑问, 青藏高原东南缘的岩石圈结构探测研究是理解青藏高原碰撞造山、深部动力学过程不可或缺的重要环节。而揭示与侧向碰撞变形的深部过程相伴生的成矿带的岩石圈三维结构和深部动力学背景, 对大陆碰撞成矿理论框架的完整性至为关键。通过对青藏高原东南缘的壳幔结构探测研究成果和基本认识进行了较系统的梳理, 重点介绍青藏高原东南缘及邻区深部结构地震学探测研究近十几年的新进展、新认识, 主要涉及壳幔结构的天然地震成像、人工源地震探测剖面 and 深部动力学等研究方向, 供对青藏高原地学研究感兴趣的地质科研人员参考。

关键词: 壳幔结构; 地震学; 深部动力学; 地震成像; 剖面探测; 大陆碰撞造山; 三江成矿带; 青藏高原
中图分类号: P315.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2018)06-0757-22

New Research Progress on Crust-upper Mantle Structure in the Southeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau, China

LI Qiu-sheng¹, FENG Shao-ying², BAI Zhi-ming³, GAO Yuan⁴, GAO Song⁵, XIONG Xiao-song⁶,
WANG Xiao-ran¹, LANG Chao¹, HAN Ru-bing¹, WU Qing-yu¹, LU Zhan-wu¹,
WANG Hai-yan¹, LI Wen-hui¹, ZHANG Hong-shuang¹, ZHANG Xin-yan¹

(1. Key Laboratory of Deep-earth Dynamics (Building) of Ministry of Nature Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, Henan, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China; 5. College of Information Science and Technology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 6. SinoProbe Center-China Deep Exploration Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The deformation feature and dynamic processes of the lithosphere in the southeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau are significantly different from the principal part of the plateau, where forward collision is taking as the main form. The deformation patterns of the lithosphere in

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-11-12 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600302); 国家自然科学基金项目(41574092, 41430213, 41590863);
中国地质调查局地质调查项目(DD20189629, DD20179354)

作者简介: 李秋生(1958-), 男, 河北邢台人, 研究员, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: lqs1958@163.com.

southeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau are mainly characterized by lateral slip on the shallow crust, and accompanied by a series of deep processes to be revealed. Undoubtedly, the exploration and study of lithospheric structure in the southeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau are indispensable to understand the deep dynamic process and collisional orogeny of Qinghai-Tibet Plateau. It is crucial to reveal the three-dimensional structure of the lithosphere and deep dynamic background of metallogenic zone associated with the deep process of lateral collision deformation for the integrity of the theoretical framework of continental collision orogeny and mineralization. The research results and basic knowledge of crust-upper mantle structure detection in the southeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau are systematically sorted out, the recent progress and new understanding of deep structural seismic exploration in the southeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas during recent decades are emphatically introduced, mainly in natural seismic imaging, artificial seismic profile and deep dynamics of the crust-upper mantle structure, which can be used as a reference for researchers interested in geosciences of Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: crustal-upper mantle structure; seismology; deep geodynamics; seismic imaging; profile probing; continental collisional orogeny; Sanjiang metallogenic zone; Qinghai-Tibet Plateau

0 引言

大陆碰撞造山不仅是形成超大陆最重要和最有效的方式,也是大规模金属矿产成矿的重要环境。青藏高原是全球特征最典型、时代最年轻的大陆碰撞造山带。基于目前青藏高原的大量研究,中国学者初步建立了大陆碰撞造山成矿理论框架^[1-5],指导青藏高原冈底斯斑岩型矿床找矿取得重大突破,颠覆了国际上“碰撞难以成大矿”的传统认识。

青藏高原东南缘(云南三江及邻区)处于印度板块与欧亚板块碰撞的侧翼,对大陆碰撞造山成矿理论框架的完整构建不可或缺。三江成矿带(Cu、Zn、Pb、Au、Ag)是中国最重要的成矿区带之一。中国目前最大的铜矿(玉龙铜矿)及其他一批重要矿床均分布于此带内,并集中形成于新生代这一极其短暂的地质历史时期。显然,青藏高原东南缘巨型成矿带的成因跟印度板块与欧亚板块碰撞的深部过程密切相关。大量成果初步勾勒了巨型成矿带的岩石圈结构与动力学背景:青藏高原东南缘岩石圈变形特征显著不同于以正向碰撞为主要形式的青藏高原本体,其变形样式在地壳浅部以侧向滑移为主(图 1),并伴随一系列尚待揭示的深部过程。本文对近十几年来青藏高原东南缘及邻区壳幔结构探测研究的重要进展进行了较系统的梳理,形成了现阶段青藏高原东南缘岩石圈结构特征、动力学背景及其与成矿关系的粗浅认识。

限于篇幅,本文遵循“地域高度关联(Full Cover)、

主题契合(Exact Match)”等基本原则对内容进行取舍,以便读者能在短时间内对青藏高原东南缘的壳幔结构特征及代表性成果有一个梗概性了解,深入研究可循参考文献查阅原文。另外,鉴于大地电磁剖面探测和地壳各向异性的近期成果已收录到《地球物理学报》2017 年第 60 卷第 6 期青藏高原专辑^[6],且受笔者知识局限,本文侧重于地震学探测结果之几何结构和速度结构的介绍。

1 天然地震成像

1.1 层析成像

Aki 等首先提出利用地震台站记录到的 P 波走时来反演地球内部结构^[7]。20 世纪 80 年代,随着计算机技术的飞跃发展,地震层析成像技术使地球物理学家们可以清晰地了解地球内部结构。20 世纪 90 年代以来,全球范围内固定地震台站数量增加,流动台站观测广泛实施,同时新方法不断涌现(或改进),通过高效处理海量的地震观测数据,可以获得更高分辨率的图像,使地球变得越来越透明,大幅度提升了人类对地球内部结构和演化过程的认知水平。

1.1.1 面波层析成像

用层析成像方法了解地球内部结构始于面波。面波周期较长,能量最强,适用于研究全球或各地区大范围的壳幔速度结构^[8]。面波层析成像结果能帮助研究人员更好地理解地幔对流如何驱动板块运动。

Yanovskaya 等给出了亚洲大陆三维结构的瑞利波(Rayleigh)层析成像结果^[9](图 2)。从图 2 可

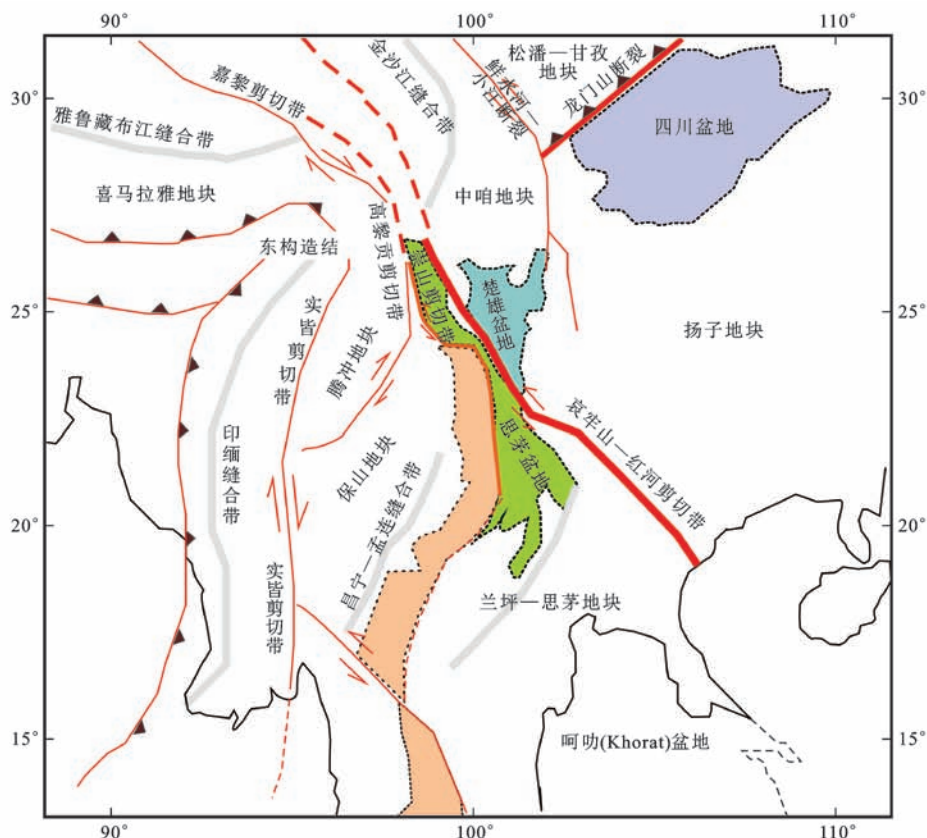


图1 青藏高原东南缘的地质构造简图

Fig. 1 Geological Tectonic Sketch Map of the Southeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau

可以看出:在 50 km 深度平片,东部大陆绝大部分已进入地幔岩石圈,表现为高速特征,而青藏高原呈局部低速特征,表明其地壳厚度超过 50 km;在 100 km 深度平片,包括青藏高原在内的西部大陆以相对均匀低速为特征,表明岩石圈物质组成相对均匀,结构相对完整,而东部大陆总体为 NNE 向低速条带,表明岩石圈遭受了破坏或改造;在 150 km 深度平片,NNE 向低速条带内部出现了速度差异,表明岩石圈破坏程度或动力学机制具有南北差异;在约 300 km 深度平片,东、西部大陆发生了反转,包括青藏高原在内的西部大陆为高速,而东部大陆为低速。以上特征表明,青藏高原的碰撞造山作用-构造变形席卷的深度局限在岩石圈(约 150 km 深度)范围,而亚洲东部大陆边缘的动力学背景主要受控于大于 150 km 的深部地幔热对流。

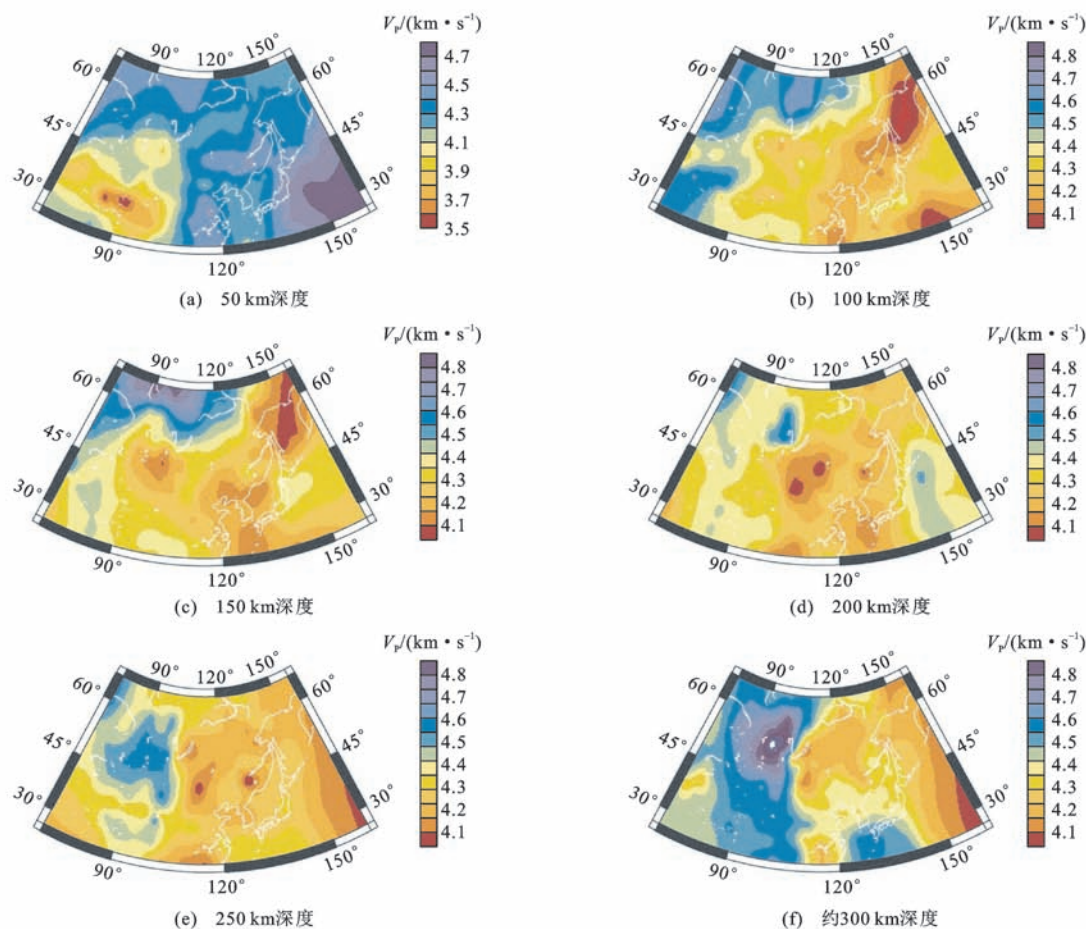
面波层析成像对于台站稀少地域(如青藏高原)壳幔结构的宏观了解发挥了不可替代的作用,但是无论是在垂向上还是横向上,其分辨率都不高,难以与大、中比例尺的区域构造相联系。

面波层析成像分辨率的提高依赖地震观测台站密度的增加。潘佳铁等收集“中国地震科学探测台

阵——南北地震带南段”(ChinArray D)项目 325 个流动宽频带地震观测台站两年远震数据(图 3),用“双台法”反演获得了青藏高原东南缘周期 10~60 s 瑞利波相速度分布图(图 4),横向分辨率达到 50 km^[10]。结果表明:绝大多数地震发生在周期 15 s 相速度分布图上的低速区或高、低速陡变带附近,指示该区的强震活动与中、上地壳速度结构变化有直接关系;周期 20~30 s 相速度变化对中、下地壳速度结构敏感,松潘—甘孜块体和小江断裂位置呈现最显著的低速异常,暗示其地壳不稳定性较强或相对破碎;周期 40~60 s 相速度分布图上,滇西南地区表现为大范围的低速异常,可能暗示该区上地幔顶部温度较高,存在构造-岩浆活动或发生了地幔物质部分熔融;腾冲火山下方在周期 10~60 s 一直是低速,至 60 s 比邻近的任何块体的相速度都低,据此推测该低速至少来自上地幔顶部(深度约 100 km)。

1.1.2 体波走时层析成像

体波波长相对较短,相对于面波具有更高的成像分辨率,更适用于区域、局部壳幔结构的成像。随着固定台站数目的增加和流动观测的兴起,体波走时层析成像得到了空前的发展和广泛应用。



V_P 为 P 波速度; 图件引自文献[9]

图 2 亚洲大陆三维结构的瑞利波层析成像

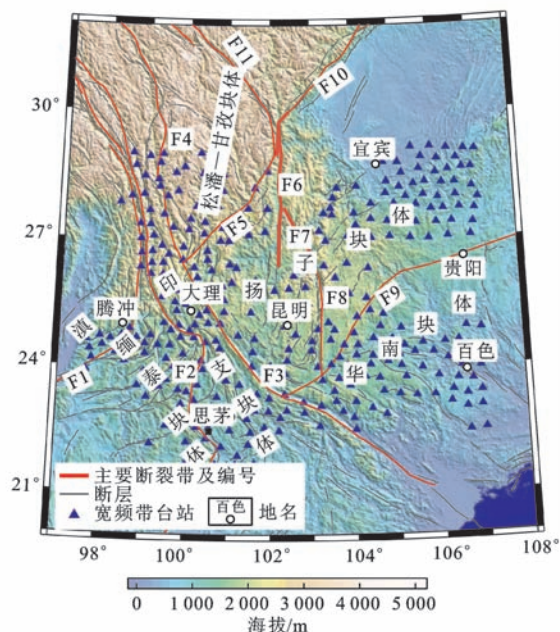
Fig. 2 Photos of Rayleigh Wave Tomography of 3D Structure in Asia Continent

Zhou 等发展了具有较高分辨率的 P1200 全球 P 波速度结构模型^[11], 并给出了青藏高原及邻区的 P 波速度分布图^[12](图 5)。从图 5(e)、(f)可以看出, 在 165~260 km 深度范围, 印度岩石圈近水平俯冲到几乎整个青藏高原之下。从图 5(a)~(c)可以看出, 青藏高原地壳具低速特征, 岩石圈地幔具高速特征。青藏高原之下, 软流圈存在于 120~165 km 深度范围, 位于俯冲的印度岩石圈之上[图 5(d)]。在青藏高原中部, 从地壳尺度直到 310 km 深度存在一低速异常带, 指示地幔物质沿着俯冲岩石圈的薄弱带上涌(板片撕裂?)。Zhou 等认为青藏高原的隆升历史和平缓地势是印度岩石圈近水平俯冲和加热的结果^[12]。

体波走时层析成像中 P 波层析成像起步于 20 世纪 80 年代。由于 S 波是续至波, 走时准确提取较困难, S 波走时层析成像出现稍晚。近年来直接用体波提取走时的技术已经成熟。杨文采等考察了亚洲地幔 S 波速度结构总体特征以及地幔流体

运动模式, 认为上地幔可以用板块构造理论解释^[13]。海南下方的地幔 S 波速度负异常可能反映现代地幔热羽柱。

胥颐等使用来自中国和周边国家及地区 1978~2008 年期间 1 510 个台站记录的地方震和近震 P 波到时, 以及 809 个台站记录远震的 133 189 个 P 波到时, 反演获得了中国西部地区的上地幔 P 波速度结构^[14](图 6)。由图 6 可知, 青藏高原北部至东南缘上地幔顶部 P 波速度普遍偏低[图 6(a)]。随着深度的增加, 低速区分布在羌塘、松潘—甘孜和滇西块体 3 个区域[图 6(b)、(c)], 而青藏高原原缘的印度大陆、塔里木盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地在浅于 170 km 深度均显示出较高的波速[图 6(a)~(c)], 尤其印度大陆一直到 210 km 深度都显示大范围的高速特征, 而塔里木盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地在深于 170 km 深度上为孤立的局部高速异常。其中, 羌塘地区的低速异常被认为反映了青藏高原北部的地幔上涌和局部



F1 为怒江断裂; F2 为澜沧江断裂; F3 为红河断裂; F4 为金沙江断裂; F5 为丽江—宁蒗断裂; F6 为安宁河断裂; F7 为则木河断裂; F8 为小江断裂; F9 为弥勒—师宗断裂; F10 为龙门山断裂; F11 为鲜水河断裂; 图件引自文献[10]

图3 南北地震带南段流动宽频带地震观测台站分布
Fig. 3 Distribution of the Mobile Broadband Seismic Stations in the Southern Margin of South-north Seismic Belt

熔融,起因于印度岩石圈的向北俯冲;松潘—甘孜块体的低速异常与青藏高原东部的深层物质流动及四川盆地刚性岩石圈的阻挡有关;而滇西块体的低速异常可能受到印缅块体向东俯冲作用的影响。以上3个区域构成青藏高原和周边地区的主要地幔异常区。相比之下,印度大陆、塔里木盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地的高速异常反映了大陆构造稳定地区的岩石圈地幔特点。根据速度变化推测,地幔上涌和韧性变形并非贯穿整个青藏高原,而是主要集中在羌塘、松潘—甘孜和滇西块体3个局部区域,这与潘佳铁等基于瑞利波层析成像结果对青藏高原东南缘壳幔速度结构的认识^[10]是一致的。

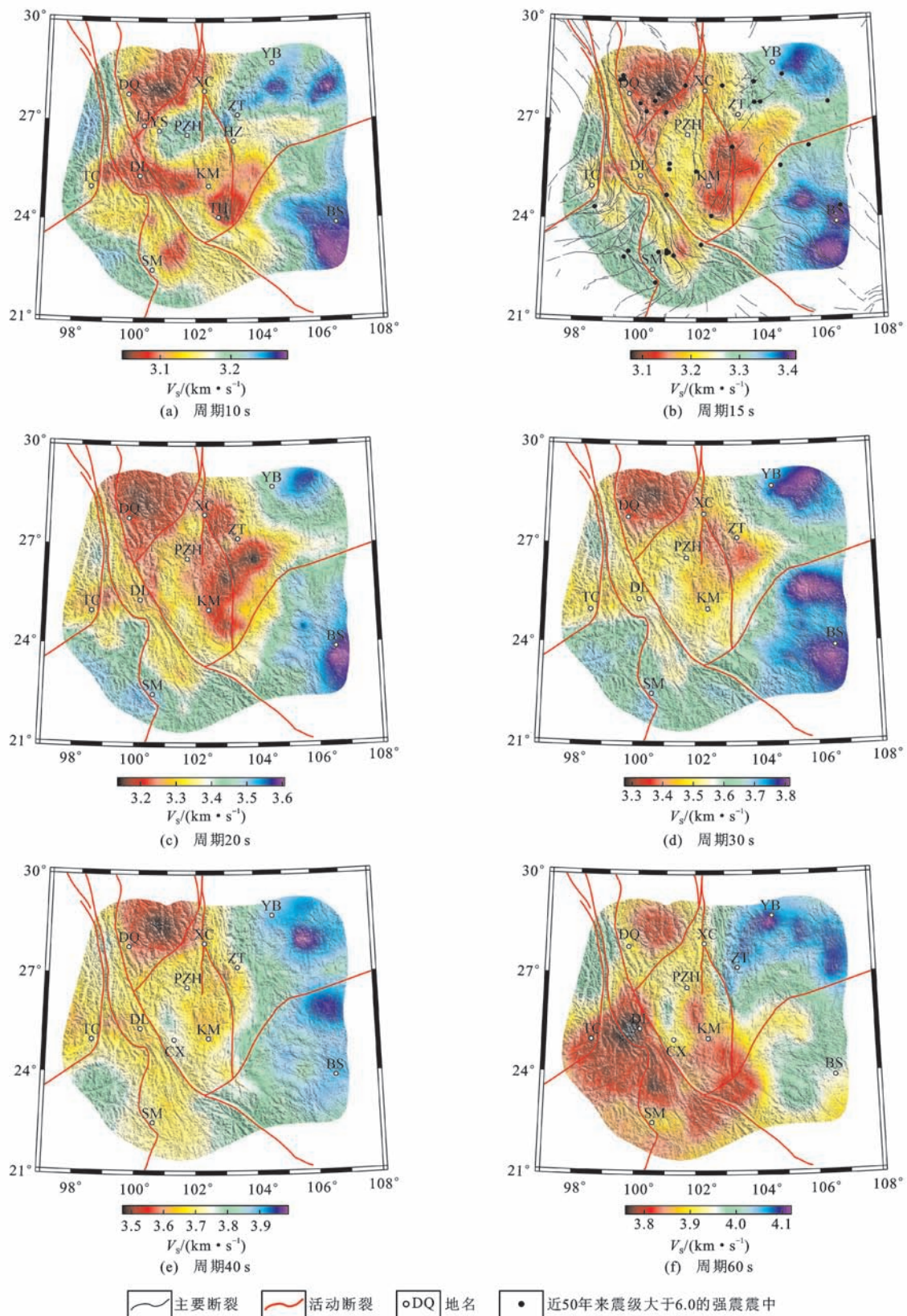
王伟等利用云南、四川固定地震台网记录到3 594个地震事件71 670条P波到时资料,特别是使用了大量穿过上地幔顶部的Pn震相,并采用球坐标系反演求得青藏高原东南缘地壳及上地幔三维速度结构,其结果图像揭示了青藏高原东南缘壳幔结构的更多特征细节(图7)^[15]。在25、45 km深度处,川滇及松潘—甘孜块体中、下地壳低速异常显著,而四川盆地为高速特征[图7(b)、(c)],这意味着如果存在下地壳流动,向东被扬子地块阻挡,处在青藏高原东南缘的三江构造带和扬子地块西缘才是

有利通道。在26°N以南地区,上地幔顶部低速异常明显,结合各向异性结果,认为软流圈物质的流动影响了上地幔顶部的速度结构,并且软流圈热物质的长期流动导致该地区的岩石圈减薄。值得特别关注的是,图7中26°N~28°N和100°E~102°E范围(大致相当于楚雄盆地位置)下方65 km深度存在一个局部高速异常。受此局部高速异常区的阻隔,来自松潘—甘孜块体的低速异常收窄为沿小江断裂西侧分布,并向南延伸,最终与红河断裂西侧的大片低速区汇合到一起。在65 km深度平片上,腾冲地块的局部低速异常似乎与SN向的带状低速异常并不连通。在90 km深度平片上,反映扬子地块岩石圈的高速异常连片显现,其西部边界可达101°E,而主要位于松潘—甘孜和滇南块体的低速异常趋向于收缩为各自独立的低速异常区。

体波走时层析成像方法分辨率很大程度上依赖台站密度。范莉苹等利用最密集的地震台站(固定台站和流动台站共516个)远震P波数据,通过走时层析成像方法获得了青藏高原东南缘深达600 km的三维速度结构图像^[16],发现青藏高原东南缘150 km深度低速异常与高速异常相间分布,200 km以下出现明显的高速异常,这种垂向速度变化被认为与地幔热物质对岩石圈的非均匀侵蚀或岩石圈根的拆沉有关。

1.1.3 全波形伴随的层析成像

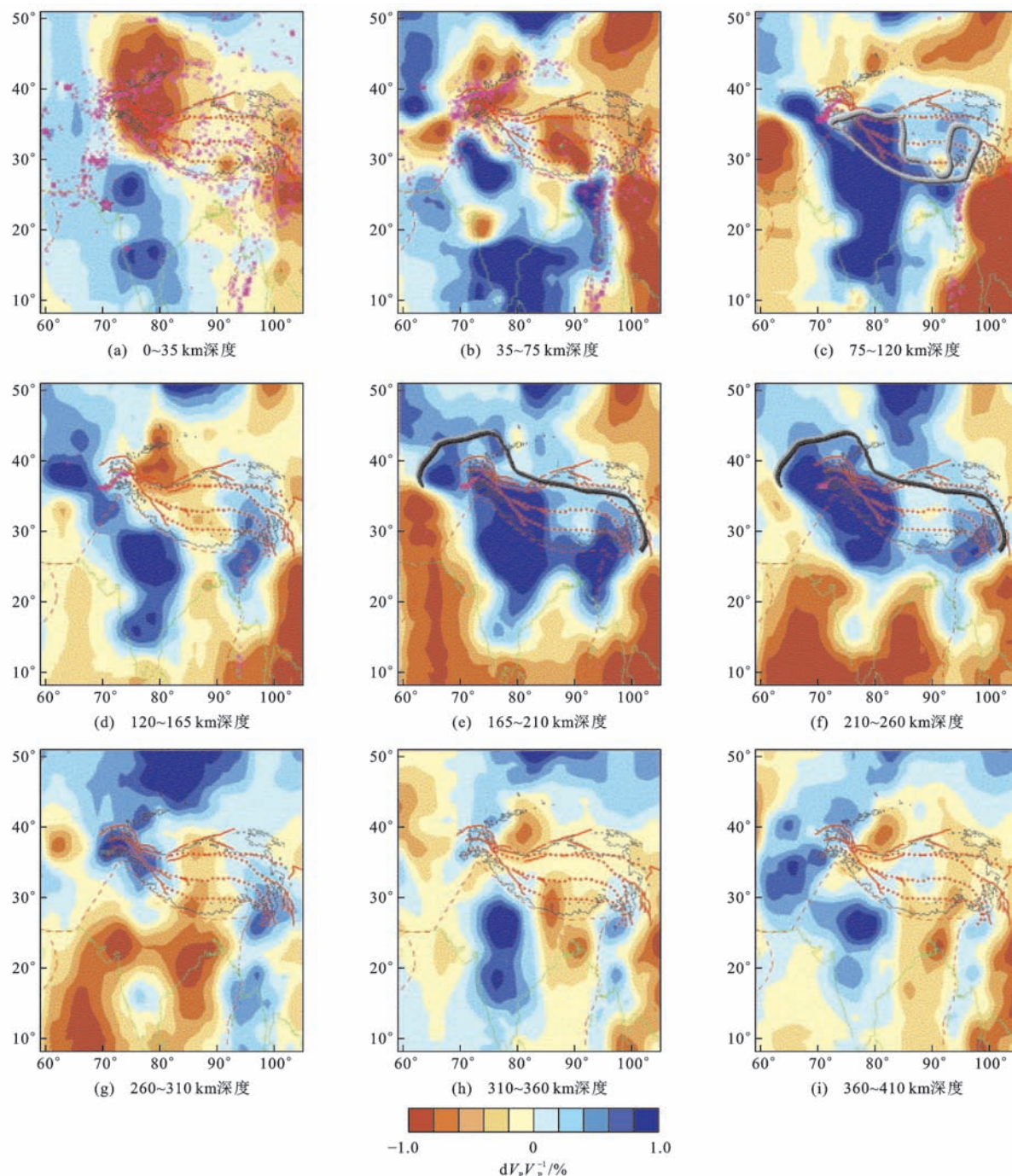
地震波走时层析成像只利用了地震记录中提供的运动学信息,其动力学信息(地震记录的振幅、频率等)未能充分利用。近年来,美国普林斯顿大学发展了一种全波形伴随的层析成像方法,能最大程度地利用地震记录中可提取的信息,包括体波、面波走时和波形信息,因此,可以提高模型的兼容性及其理论波形对数据的整体拟合。利用精确的三维波形敏感核,不仅可以减少非射线穿过区域模型的不确定性,还能反演径向各向异性、方位各向异性与衰减特性,从而建立一个更符合实际的、更好解释观测数据的地球模型。该方法已被用于青藏高原主体结构的成像^[17],其结果以前所未有的高分辨率刻画了印度与亚洲岩石圈碰撞、青藏高原地壳缩短增厚的构造模型(图8)。从图8可知,印度岩石圈与亚洲岩石圈相向俯冲,交汇于班公湖—怒江缝合带与金沙江缝合带之间,导致青藏高原地壳加厚。在青藏高原南部,可能发生了印度岩石圈拆沉作用,岩石圈碎块坠入地幔过渡带(400 km深度以下)。



DQ为迪庆;LJ为丽江;YS为永胜;HZ为会泽;XC为西昌;YB为宜宾;ZT为昭通;PZH为攀枝花;DL为大理;TC为腾冲;SM为思茅;
CX为楚雄;KM为昆明;BS为百色; V_s 为S波速度;图件引自文献[10]

图4 不同周期的瑞利波相速度分布

Fig. 4 Distributions of Phase Velocity of Rayleigh Wave in Different Periods



实线为主要断层;虚线为主要缝合带;十字架和五角星为震点;图(c)曲线勾勒出深达 120 km 以上的青藏高原岩石圈地幔高速部分;

图(e)、(f)中粗线为推断的隐没印度岩石圈地幔边缘;图件引自文献[12]

图 5 青藏高原及邻区 P 波速度分布

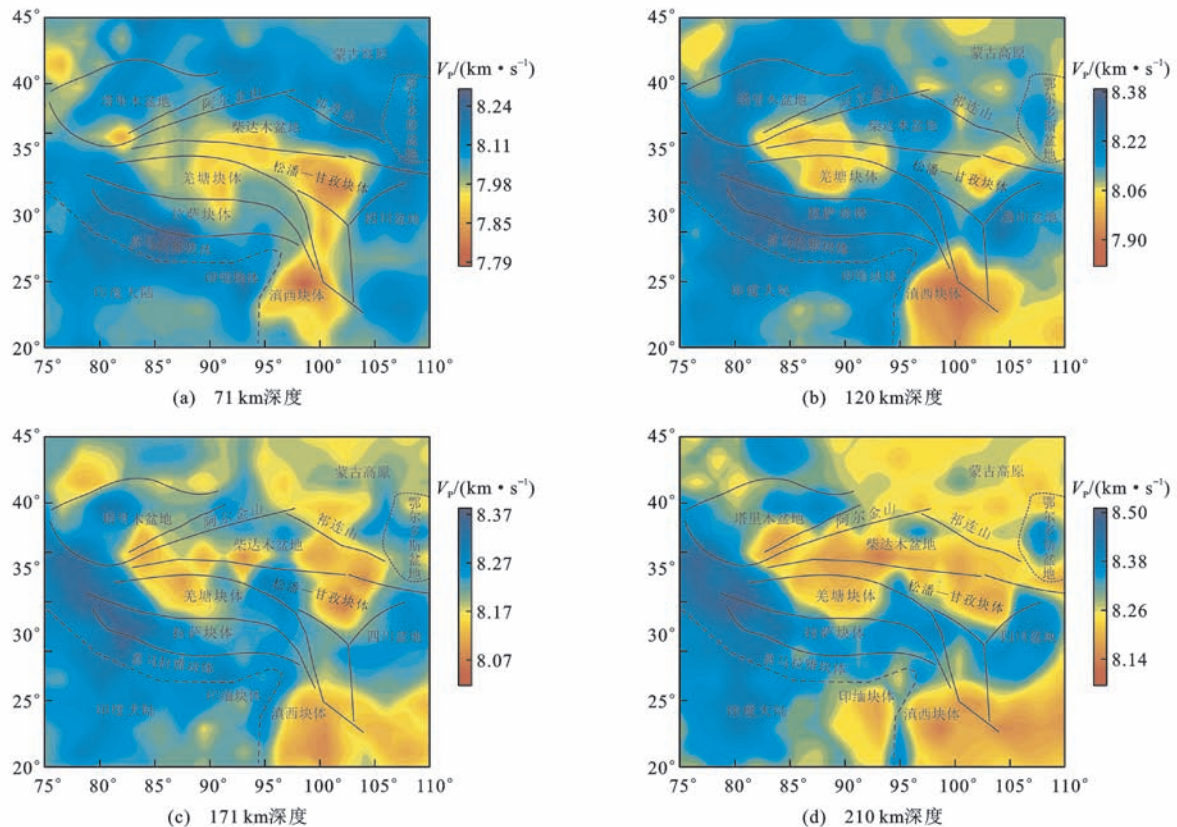
Fig. 5 Distributions of P-wave Velocity in Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Areas

1.2 背景噪声成像

基于地震记录研究地下结构的传统方法主要受到两个条件限制:一是地震台站分布,地震台站通常主要建设在地震多发区域,少震地区地震台站稀疏(如青藏高原和南极、北极)或空白(如大洋地区);二是远距离传播会导致地震面波(瑞利波和 Love 波)高频成分丢失,使面波层析成像对地壳结构的分辨

率不足。这两个条件限制成为利用地震记录进行深部结构成像的瓶颈。

背景噪声(Ambience Noise)成像是 21 世纪出现的最具颠覆性的成像技术。背景噪声是一种持续稳定的天然源,对长时间序列的背景噪声进行互相关计算可以得到台站间的经验格林函数,进而反演壳幔速度结构^[18]。背景噪声成像不仅可作为地震



图件引自文献[14]

图 6 中国西部地区上地幔 P 波速度结构

Fig. 6 P-wave Velocity Structures of the Upper Mantle in Western China

活动性较低地区壳幔结构成像的有效方法,在地震活动性较高的青藏高原东南缘及邻区也不失为一种有益的补充。

Yao 等得到的背景噪声成像与面波联合反演结果^[19-20]显示,青藏高原东南缘下地壳的低速结构与四川盆地及滇中地块的高速形成显著对比[图 9(c)],速度分布与地形变化特征相关。从图 9(e)可见三江构造带的岩石圈具低速特征,华南块体岩石圈具高速特征。

李昱等的背景噪声成像结果(长周期 25~35 s 相速度分布图像)^[21]显示,川滇地块的中、下地壳表现为广泛的明显低速异常,该地壳结构特征被 Zheng 等的高分辨率结果进一步证实,但同时揭示其分布是复杂的^[22]。Zheng 等的研究结果^[22]显示,低速带厚 5~20 km,出现在深度 20~35 km 范围,速度逆转为 5.4%~10.8%,这种分布特征更像地壳物质部分熔融的反映,表明即使存在中、下地壳流动,也是弥漫性的。

1.3 接收函数

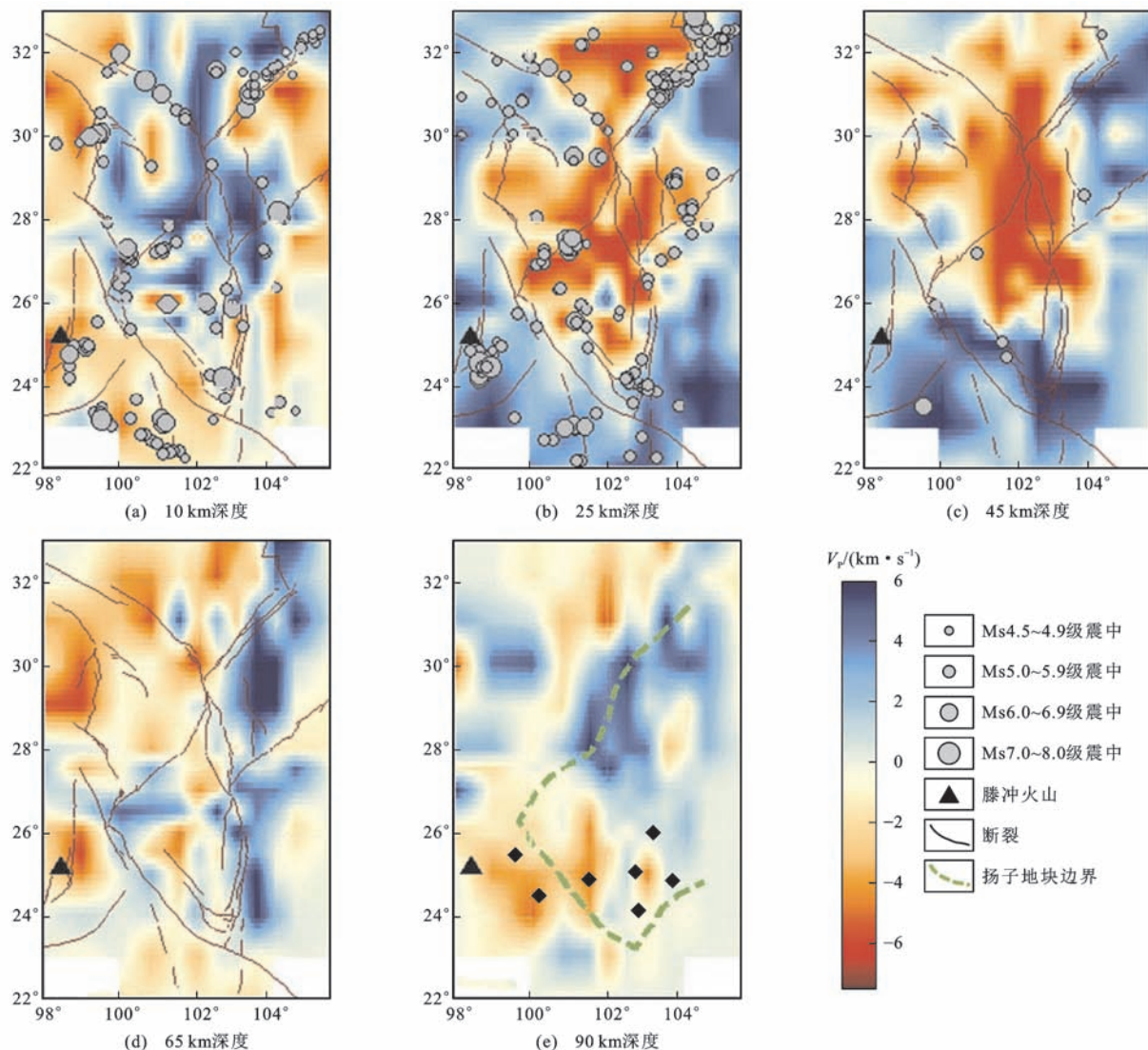
接收函数方法具有简便易行、分辨率高、对速度间断面敏感等特点,主要用于获得壳幔结构的几何

特征。

传统的接收函数是指 P 波接收函数。随着天然地震观测技术向高密度阵列方向发展,以及地球深部结构探测研究对高分辨率壳幔结构认知的迫切需求,近年来又发展了 S 波接收函数。在 S 波接收函数图像上,岩石圈-软流圈界面(LAB)转换震相不受莫霍面多次反射震相的干扰。

贺传松等利用接收函数对云南地区的壳幔结构进行了研究,估算了地壳平均速度与 P 波、S 波速度比^[23-26]。徐鸣洁等发现哀牢山—红河剪切带下方的壳幔边界表现为速度递增的梯度带^[24]。Li 等的接收函数与面波频散联合反演结果^[26]揭示:地壳厚度从云南东南部的 32 km 逐渐加深到西北部的 56 km;中、下地壳存在低速层,尤其在云南西部更为显著,暗示韧性流动存在的可能性;华南地块和云南西南部的 S 波速度略高于其他块体(图 10)。

Bao 等利用中国地震局“喜马拉雅”计划“中国地震科学探测台阵——南北地震带南段”项目两年的观测数据,对青藏高原东南缘的壳幔结构进行了接收函数成像,以及接收函数与面波频散联合反演研究^[27],其结果如图 11 所示。由图 11 可知:Royden 等提出



图中震源深度小于 20 km 的地震投影到 10 km 深度平面上, 20~33 km 地震投影到 25 km 的平面上, 大于 33 km 地震投影到 45 km 的平面上; 扬子地块边界引自文献[28]; 黑色菱形为剪切波分裂快波方向呈 EW 向的测点分布; 图件引自文献[15]

图 7 P 波成像结果平面示意图

Fig. 7 Plan Views of P-wave Imaging Results

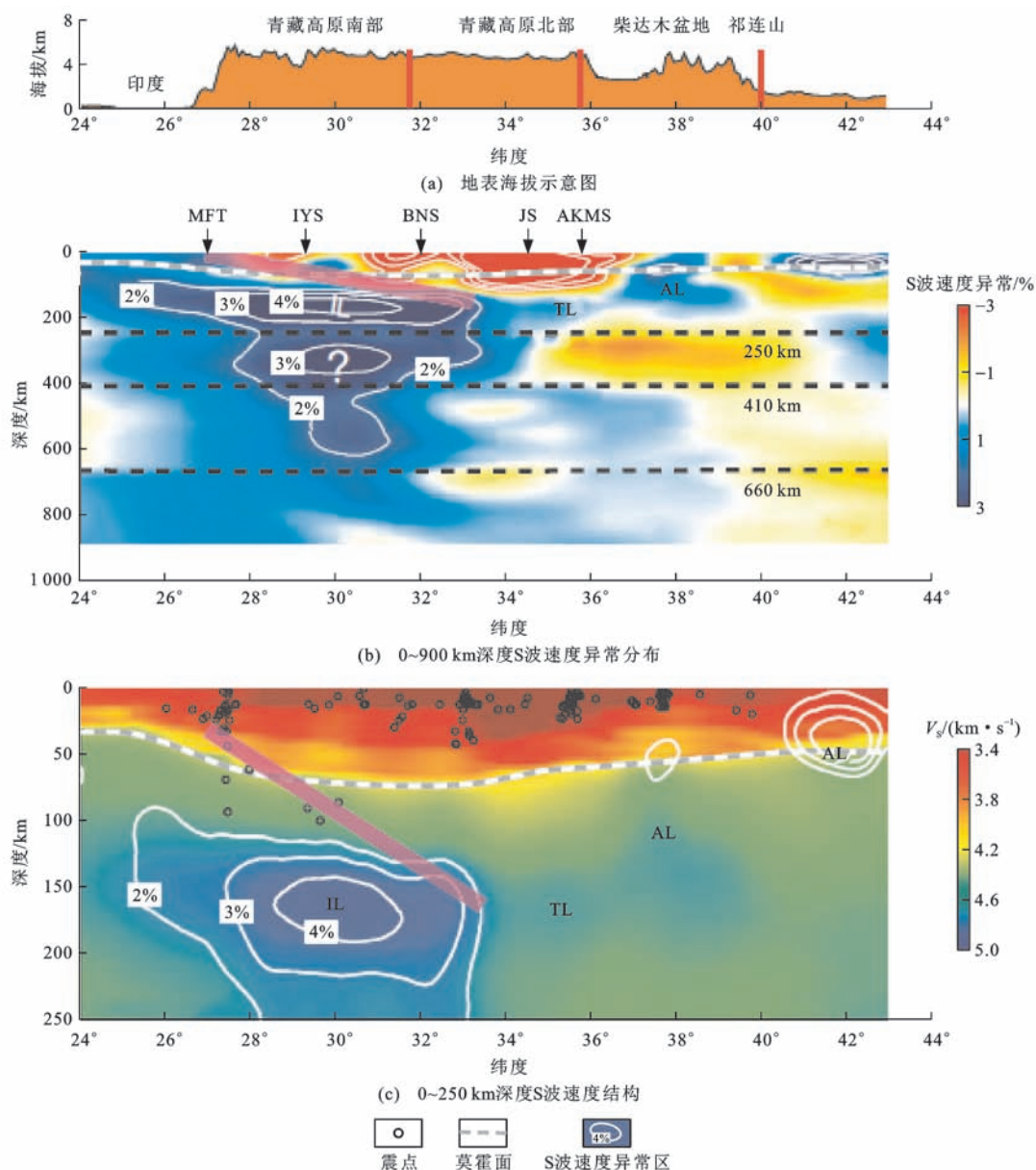
的地壳流(通道流)现象仅可见于中、上地壳深度范围,以 21 km 深度平片表现最为典型;从中、下地壳 31 km 和 41 km 深度平片可以看出,被卷入青藏高原地壳变形的地质单元(如松潘—甘孜地块、中咱地块、三江构造带北段)表现为相对低速异常区,大致以 25°N 为分界,更接近青藏高原的三江构造带北段,地壳增厚与地势抬升的趋势成正相关^[29-32]。

多数体波走时层析成像方法只提取地震波初至走时,忽视了续至震相的利用。续至震相除了能增加射线交叉和覆盖率,提升成像的精度以外,最关键的是能提供续至震相速度界面附近异常体的信息。Tseng 等发展的利用续至震相的虚拟地震剖面法(Virtual Seismic Profile)^[33]近年来得到越来越多的

应用^[34]。

虚拟地震剖面法利用远震信号 S-P 转换波在自由表面(接收器附近)作为一个虚震源,莫霍面上的反射(SsPmp)震相来自直达波 S 在自由表面的反射,平行于 Sp 波,然后从莫霍面反射到观测台站。Liu 等使用虚拟地震剖面法揭示峨眉山大火成岩省内带(大致对应楚雄盆地位置)下方莫霍面之下存在局部的高速异常体(图 12),认为是地幔柱作用对地壳改造的结果^[35]。

然而由于尾波的干扰,续至震相辨别难度大,准确拾取不易,到时精度较低。只有在其他地球物理探测资料(如深地震测深剖面)给出先验信息的情况下,虚拟地震剖面法才能提供界面附近异常体的额



IL 为印度岩石圈; TL 为青藏高原岩石圈; AL 为亚洲岩石圈; MFT 为主逆冲断层; IYS 为印度—雅鲁藏布江缝合带; BNS 为班公湖—怒江缝合带; JS 为金沙江缝合带; AKMS 为阿尼马卿—喀喇昆仑山缝合带; 图件引自文献[17]; 图(c)沿垂直方向放大 4 倍

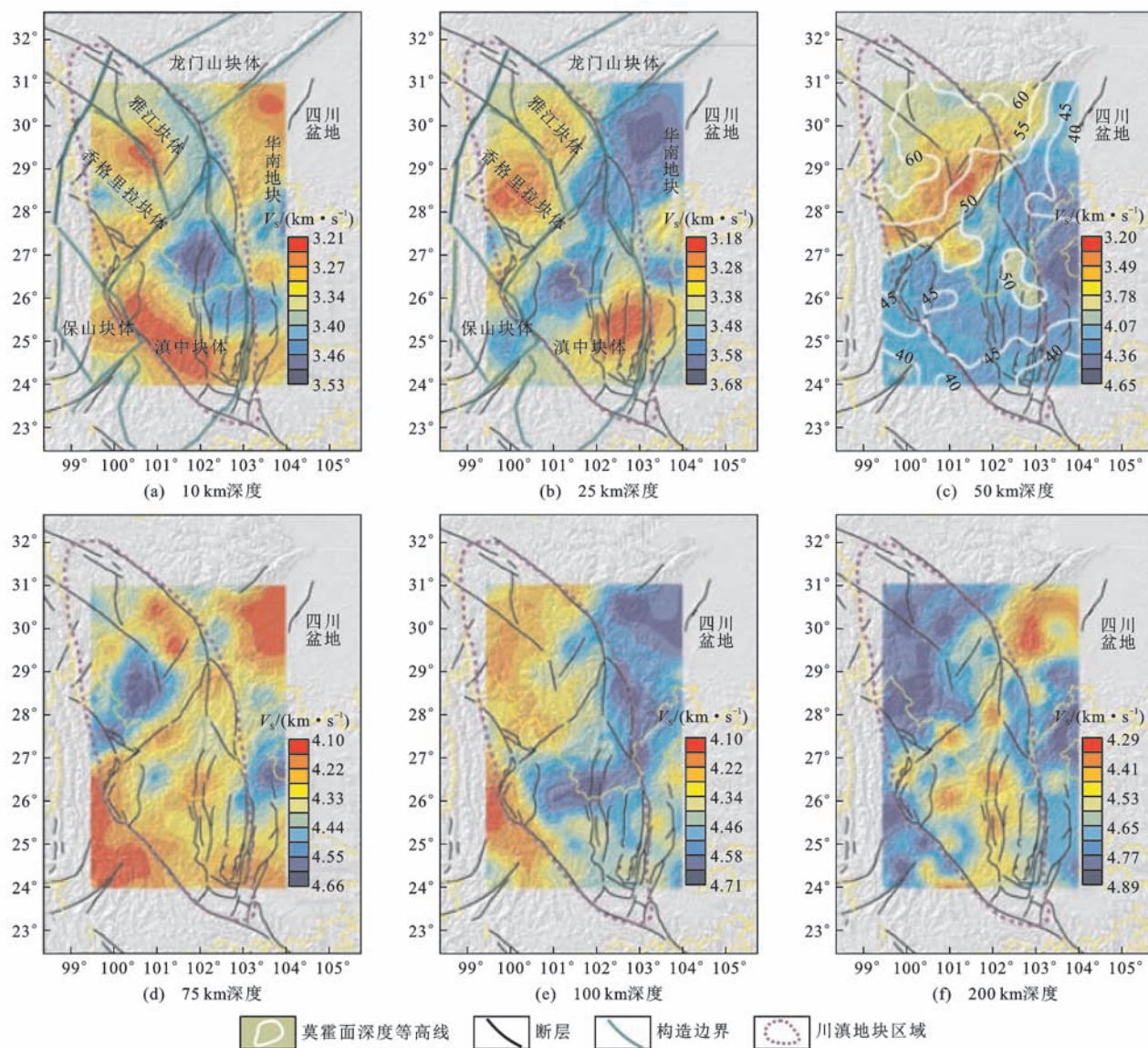
图 8 沿弧形法线剖面的青藏高原壳幔结构

Fig. 8 Crust-upper Mantle Structures of Qinghai-Tibet Plateau Along Arc-normal Profile

外信息,使该方法的应用受到一定局限。

近十多年来,中国宽频带流动观测发展迅速,台站密度在某些特殊关注的地区达到 3~5 km 台间距,使得天然地震成像在提升成像分辨率的同时,揭示了前所未见的深部结构细节,产生了一批有国际影响的研究成果。如通过川西地区的密集宽频带流动观测台站,Liu 等提出了既不同于刚性块体挤出、又有别于 Royden 地壳流的青藏高原地壳物质 SE 向逃逸模式^[36]。目前,基于“中国地震科学探测台阵——南北地震带南段”项目的宽频带地震流动观测台站数据的处理解释成果陆续发表。结果表明:

①在 26°N 以北,地壳厚度总体呈由 NW 向 SE 减薄的趋势,支持青藏高原下地壳物质侧向挤出/流动模式;②根据青藏高原东南缘低速异常分布的深度和不均匀性,如果流动存在,垂向上主要集中于 10~30 km 的中、下地壳;SN 向走滑断裂系统(如小江断裂)可能是青藏高原中、下地壳物质 SE 向逃逸的主要通道,驱使物质逃逸的动力与印度—亚洲大陆碰撞引起的岩石圈变形和小尺度地幔对流有关;③在 26°N 以南地区,上地幔顶部低速异常明显,SKS 快波方向为近 EW 向,目前认为是印缅—巽他俯冲板块的后撤引起的软流圈对流的结果,软流圈热物质



图件引自文献[19]

图 9 相对于相邻算法给出的后平均模型的 S 波速度变化

Fig. 9 Variations in S-wave Velocity Relative to the Posterior Mean Model from the Neighbourhood Algorithm

的长期流动还导致了该地区的岩石圈伸展和地壳减薄,印缅—巽他俯冲动力系统是独立于青藏高原碰撞系统的另一个动力学系统,它还引起腾冲地块的岩浆活动和壳幔热对流活动^[37-39];④印度—亚洲大陆碰撞动力系统及印缅—巽他俯冲动力系统共同控制青藏高原东南缘的岩石圈变形与成矿,两者在 26°N 转换,可能不存在南北贯通的地幔通道流。

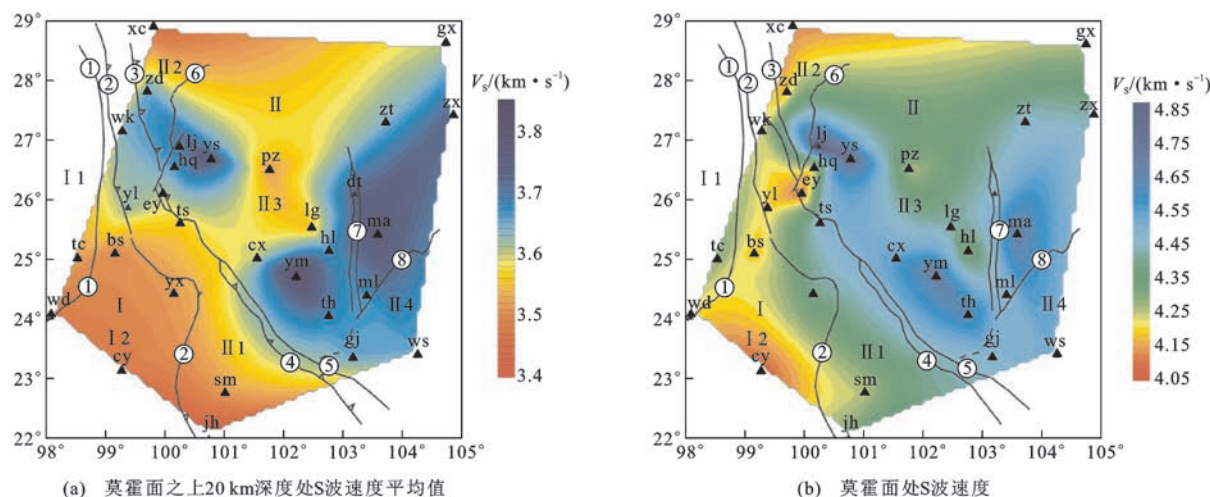
2 人工源地震探测剖面

2.1 深地震测深剖面

深地震测深(宽角反射/折射)剖面是探测岩石圈结构的主要方法之一。其优点在于能够揭示速度和界面同时具有横向变化的地壳结构特征。欧洲从

1997 年到 2003 年间进行了一系列的地壳探测计划,其中,爆破地震宽角反射/折射剖面方法担当了不可替代的角色,为欧洲大陆的构造演化提供了完整的地壳三维图像。

20 世纪 80 年代,中国地震局为编制云南遮放—宾川—孟连—马龙地学断面图,开展了一系列深地震测深剖面探测工作^[40-43]。同期,中国科学院和原地质矿产部针对攀西古裂谷固体矿产资源的深部背景调查,也完成了数条深地震测深剖面^[44-45],发现 101°E~102°E 之间存在数千米厚的壳幔过渡带。2000 年以来,白志明等对早期的宽角反射/折射剖面资料重新处理解释,获得许多新认识^[46-49]。鉴于南北地震带在大陆强震孕震环境研究及震灾防御领



黑色三角为地震观测台站,字母为台站名称;I 为冈瓦那地块;I 1 为腾冲块体;I 2 为保山块体;II 为华南地块;II 1 为思茅块体;II 2 为中甸—印支褶皱带;II 3 为扬子地块;II 4 为滇东南褶皱带;①为怒江断裂;②为澜沧江断裂;③为金沙江断裂;④为哀牢山断裂;⑤为红河断裂;⑥为小金河断裂;⑦为小江断裂;⑧为弥勒断裂;图件引自文献[26]

图 10 接收函数与面波频散联合反演结果

Fig. 10 Joint Inversion Results of Receiver Function and Surface Wave Dispersion

域的重要性,中国地震局进行了新一轮探测^[50-55]。中国科学院也为研究峨眉山大火成岩省的深部背景实施了包括深地震测深剖面在内的综合地球物理探测^[56-57]。这些剖面(图 13)揭示出青藏高原东南缘地壳速度结构的主要特征。

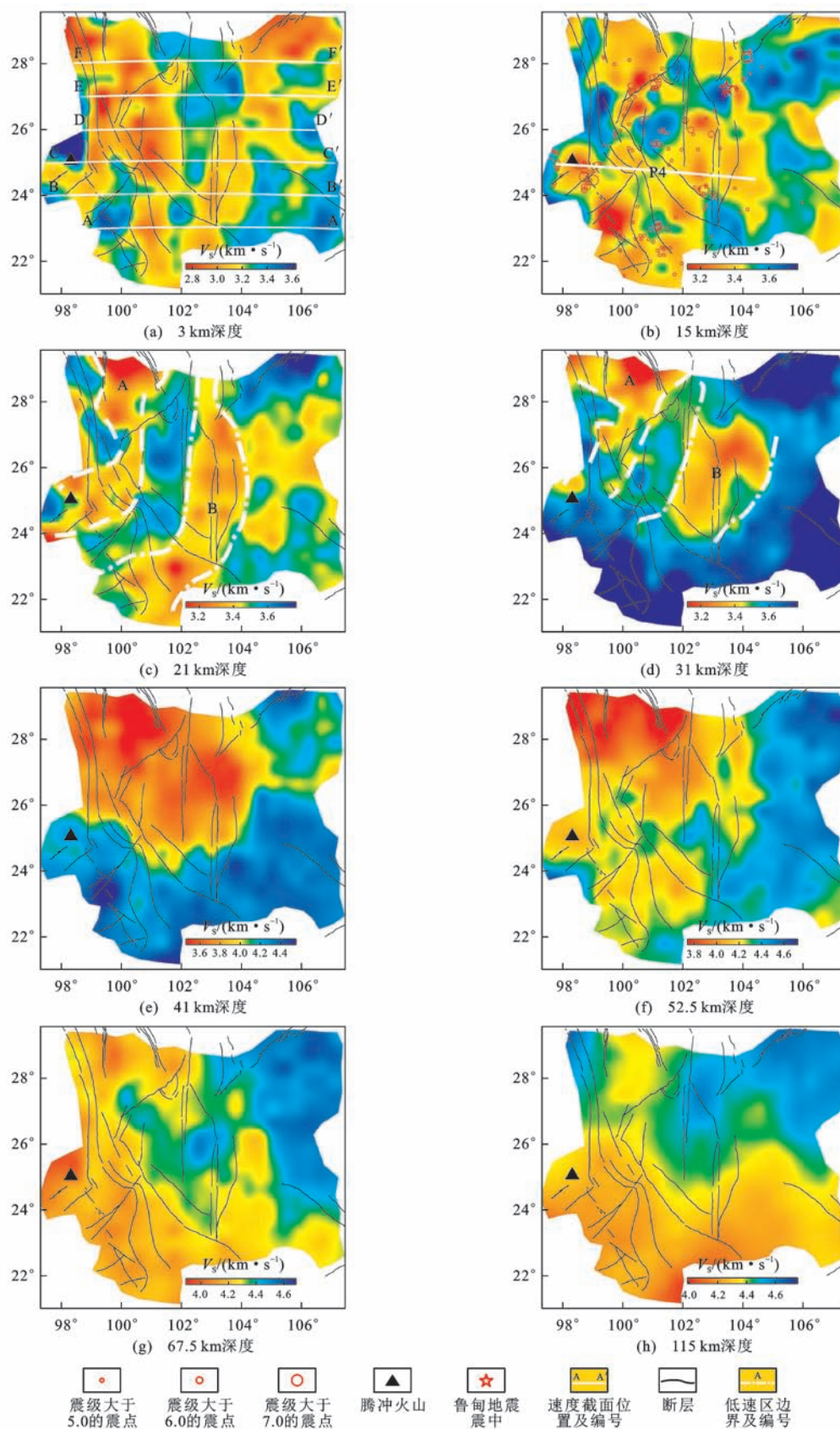
云南思茅—中甸地震宽角反射/折射剖面北起松潘—甘孜地块东南缘,近 SN 向穿过中甸地块和兰坪—思茅地块^[52]。地壳 P 波速度模型揭示:沿测线从北至南地壳厚度从约 50 km 减薄至 35 km 左右,地壳厚度的减薄量主要体现在下地壳,剖面北段下地壳厚度约为 30 km,剖面南段下地壳厚度仅为 15 km 左右,下地壳减薄了一半;剖面沿线地壳内部反射丰富,上地壳底部普遍发育低速层或局部低速体,该层被认为是壳内韧性剪切带,与中、上地壳强震孕育发生有密切联系,这与大地电磁探测所得壳幔电性结构特征一致(上地壳内普遍存在低阻/高导层),表明 SN 向走滑断裂系统可能是深部岩浆侵位和成矿流体通道;上地幔顶部 P 波速度一般为 7.6~7.8 km·s⁻¹,局部 P 波速度偏低,反映出构造活动区的特点;莫霍面强反射出现在澜沧江断裂(景云桥弧形断裂)下方,宽约 50 km,是否与断裂带减压引起的深部岩浆底侵有关,有待进一步研究。

丽江—清镇剖面西端点位于怒江西岸,测线大致沿 27°N 近 EW 向横穿峨眉山大火成岩省的内带、中带和外带。徐涛等的解释结果^[56]显示峨眉山大火成岩省的内带莫霍面深度为 47~53 km,具上拱特征,中带莫霍面深度为 42~50 km,外带莫霍面

深度为 38~42 km,从中带到外带,莫霍面逐渐变浅。峨眉山大火成岩省的下地壳存在显著高速异常体,可能是二叠纪古地幔柱活动导致的岩浆作用底侵的遗迹。

临沧—玉溪剖面大致沿 24°N 布设,近 EW 向跨越金沙江—红河断裂。王夫运等对该剖面的解释结果^[54]显示:以红河断裂为界,西侧保山地块和兰坪—思茅地块的地壳较薄,厚约 34 km,断裂带东侧扬子地块西南缘地壳加厚到 44 km,断裂带两侧地壳厚度相差约 10 km;速度结构也差异较大,断裂带东侧扬子地块西缘地壳的平均速度明显高于断裂带西侧;红河断裂在岩石圈变形中具有巨大调节作用,通过块体的侧向滑移,扬子地块西南缘地壳较少受到西侧挤压应力作用而变形增厚。

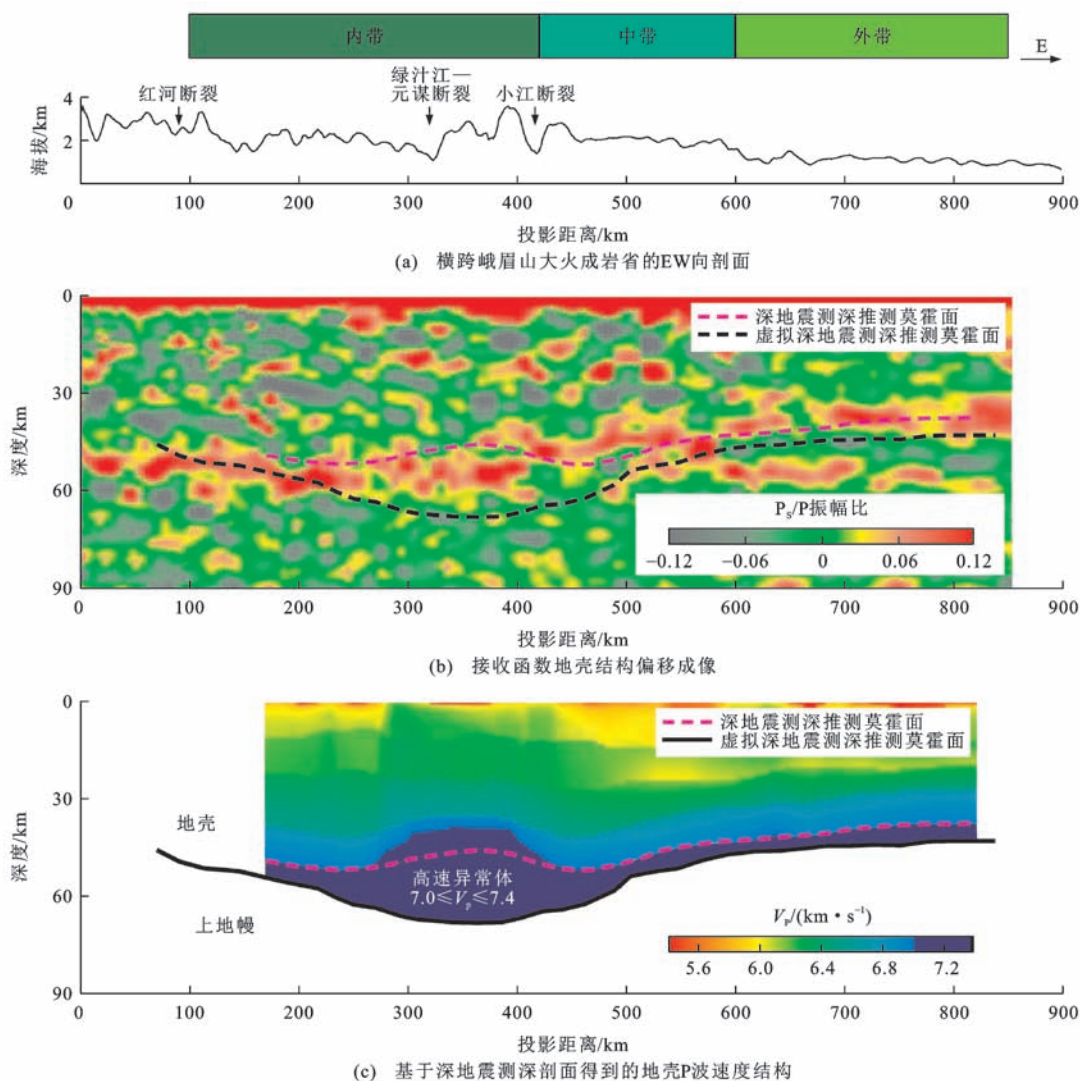
为直观起见,将图 13 所示的 14 条剖面地壳厚度数据数字化,用克里金插值方法绘制了莫霍面深度三维展布形态,如图 14 所示。由图 14 可知,除了与松潘—甘孜地块相邻的中甸地块地壳遭受强烈变形、地壳明显增厚之外,其他地块(如保山地块、兰坪—思茅地块)与扬子地块主体一样,尚未受到青藏高原向外扩展的明显影响。扬子地块保持了地壳厚度和刚性特征,而隔金沙江—红河断裂与之相邻的保山地块、兰坪—思茅地块以侧向滑移和旋扭为主,并以此方式吸收了来自西北部地壳流牵引和来自西部的俯冲—碰撞挤压应力。随着远离西北部的青藏高原本体,印支地块地壳更多表现出弧后伸展或受地幔柱作用减薄的特点,地壳结构与华南(华夏)



图件引自文献[27]

图 11 青藏高原东南缘接收函数与面波频散联合反演结果

Fig. 11 Joint Inversion Results of Receiver Function and Surface Wave Dispersion in the Southeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau



图件引自文献[35];图(b)、(c)沿垂直方向放大3倍

图 12 峨眉山大火成岩省内带上地幔顶部的局部高速异常体

Fig. 12 Local High-velocity Anomalies Beneath Moho Discontinuity in the Inner Zone of Emeishan Large Igneous Province
地块的特征趋于相似,而与青藏高原差异显著。

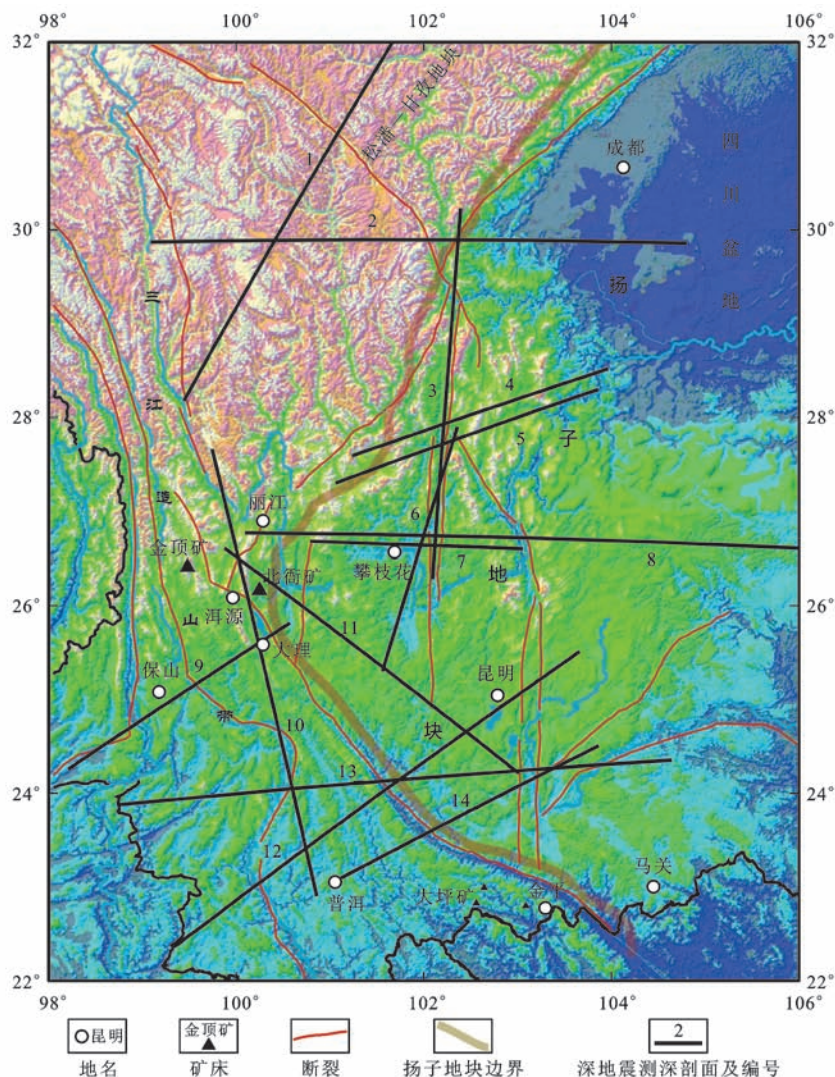
2.2 深地震反射剖面

深地震反射剖面技术是公认的探测地壳精细结构最为有效的技术之一,具有比其他地震学探测方法更高的分辨率。国内外应用该方法在探测地壳结构、发震构造以及浅部活断层等方面取得了许多重要成果。然而,由于深地震反射剖面探测成本较高,加之青藏高原东南缘地形、地质条件复杂和物资保障条件差等不利因素,以致于目前在青藏高原东南缘实施的深地震反射剖面探测屈指可数,只有少量几十千米的短剖面。

中国石化和中国地质调查局等有关单位在宁蒗—盐源盆地等新区进行了地震反射勘探采集-处理实验,确定了工区激发、接收因素及观测系统等施工参数,获得了良好效果,形成了针对南方山地新区

勘探施工方法的初步认识。

为支撑云南西南部地震危险性评价和震害防御工作,“中国地震科学探测台阵——南北地震带南段”项目完成两条深地震反射短剖面 and 一条长剖面,分别为:①南汀河剖面,位于云南省临沧市境内,总体呈 NNW—SSE 向布设,跨南汀河断裂,全长 55.08 km(图 15);②龙陵剖面,主要位于云南省龙陵县和腾冲市境内,跨龙陵—瑞丽断裂,呈 NNW—SSE 向布设,全长 60 km;③峨山—开远剖面,位于云南省玉溪市和红河哈尼族彝族自治州境内,跨小江、红河等断裂(图 16)。通过 3 条剖面探测,旨在获取断裂带深部空间结构形态、性质及深浅结构的关系,揭示被各断裂带分隔的构造块体的变形状态和差异特征,并为研究深部动力学过程及其与地震活动关系提供信息。



1 为奔子栏—唐克(2000 年)^[58]; 2 为竹巴龙—资中(2000 年)^[50]; 3 为长河坝—拉蚌(1984 年)^[45]; 4 为丽江—新市镇(1984 年)^[45];
5 为盐源—马边(2005 年)^[59]; 6 为西昌—渡口(1984 年); 7 为丽江—者海(1984 年)^[44]; 8 为丽江—清镇(2012 年)^[56];
9 为遮放—宾川(1982 年)^[42]; 10 为思茅—中甸(1986 年)^[43]; 11 为洱源—江川(1982 年)^[42]; 12 为孟连—
马龙(1982 年)^[40]; 13 为临沧—玉溪(2010 年)^[54]; 14 为普洱—泸西(2011 年)^[53]; 括号内为完成的年份

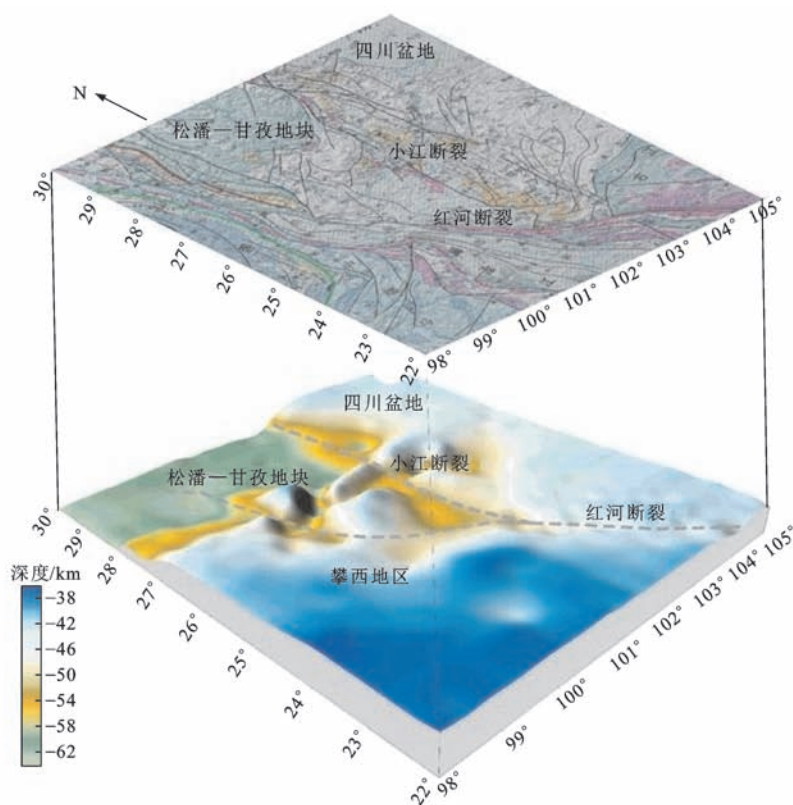
图 13 青藏高原东南缘已有深地震测深剖面分布

Fig. 13 Distribution of Deep Seismic Sounding Profiles in the Southeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau

南汀河断裂作为临沧地块、保山地块的边界断裂,形成于加里东构造运动时期,之后不同地质历史时期的活动控制了断裂带两侧及带内的沉积建造、岩浆活动和区域变质的分布与发育。南汀河断裂东、西两支活动性差异明显。东支第三纪时活动强烈,晚第三纪末至第四纪初已基本停止活动;西支第四纪以来一直活动,沿其发育宽达数十米至上百米的破碎带。

深地震反射剖面近垂直于南汀河断裂布设,南汀河西支断裂位于测线中部约 30 km 处。野外数据采集采用单深井、大药量和长排列接收的各种方式,于 2013 年初完成野外资料采集。经静校正、滤波、去噪和同相叠加等处理步骤,获得如图 17 所示的叠加剖

面^[60]。由图 17 可知,地壳内由浅至深发育几组反射。其中,Rc 反射出现在双程走时 4.0~6.0 s 之间,靠近 6.0 s 处,在剖面 0~20 km(东南段约 1/2)能量较强,在 20~55 km(西北段)能量较弱。下地壳以 SE 倾向的斜反射为主。莫霍面 Rm 反射在东南段以近水平展布的叠层状较强反射为特征,出现于双程走时 10.0~10.6 s 处,西北段的 Rm 反射具有多相位特点,成像于强反射的下地壳底部和弱或空白反射的上地幔顶部,其双程走时略小于东南段,并在 40~45 km 处微向上拱起。这种反射波组合特征往往是莫霍面被深断裂错断的反映,莫霍面之下是无序的弱反射或空白反射区,上地幔顶部反射与莫霍面反射组合特



图件引自熊小松未发表资料

图 14 青藏高原东南缘莫霍面深度三维变化

Fig. 14 3D Variation of Moho Depth in the Southeastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau

征在克拉通盆地内部较为常见。

南汀河深地震反射剖面虽然短,但意义重大。其一是表明前人用深地震测深剖面获得的三江构造带地壳结构基本特征(如地壳厚度等)是可信的;其二是进一步丰富了保山地块和思茅地块地壳莫霍面及壳内结构信息,这对深化理解三江构造带的岩石圈演化过程十分重要。

3 结 语

3.1 几点粗浅认识

21 世纪地球科学的前沿是深化对大陆岩石圈成因和演化的认识。大陆演化的地球动力学过程发生在整个岩石圈尺度。要认识大陆演化的作用过程不仅要了解整个岩石圈,还要关注其下伏的软流圈以及更深部地幔的结构、物理化学性质和动力学特征。通过典型地质单元(如俯冲带、盆地、碰撞带等)的多学科研究再现岩石圈演化的动力学过程是大陆动力学研究的重要课题。了解岩石圈垂向上分层性和横向不均匀性是提高对岩石圈认知程度的有效途径。

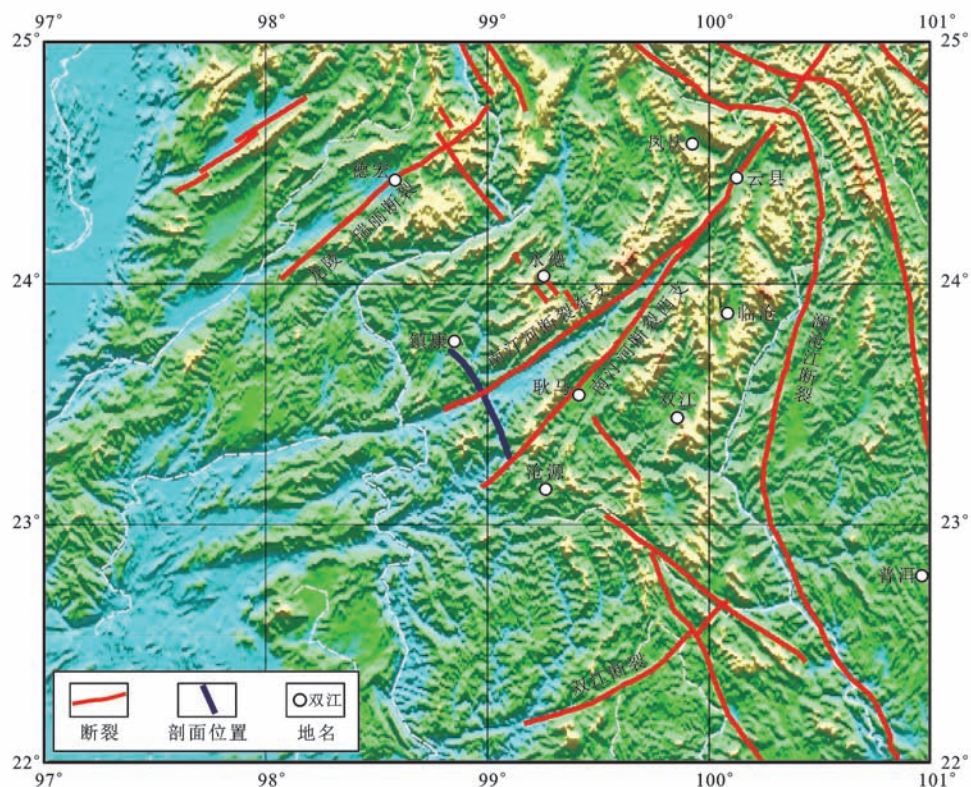
由于大陆岩石圈经历了漫长而复杂的演化历

史,期间不断被热事件和变形事件改造,岩石圈变形在三维空间上都是非均匀的。与处于主碰撞带的拉萨、羌塘地块的岩石圈变形特征(岩石圈叠置、断裂、拆沉,地壳缩短增厚)不同,处于碰撞带侧翼的青藏高原东南缘的岩石圈变形,西北部以较浅层位的大规模侧向滑移为主要特征^[61],东南部以软流层的小尺度对流和岩石圈伸展减薄为主要方式。

新的探测结果表明:青藏高原东南缘上地壳底部—中地壳广泛存在低速异常,但它们并不构成连续的壳内低速层,其分布与某些块体活化和断裂活动密切相关(如松潘—甘孜块体、小江断裂等);上地幔顶部的低速异常则仅局限在松潘—甘孜块体南部和印支地块北部;在川滇地块中心部位,下地壳至上地幔顶部出现的局部高速异常区可能是峨眉山幔柱与岩石圈相互作用的遗迹,事实上也起到了分流地壳流的作用。

印度—亚洲大陆碰撞导致前新生代地块边界断裂活化,诱发软流圈物质上涌,底侵作用促使玄武质的下地壳物质部分熔融,为多金属成矿提供了物质来源,这就可以解释三江构造带为何能在新生代大规模成矿。

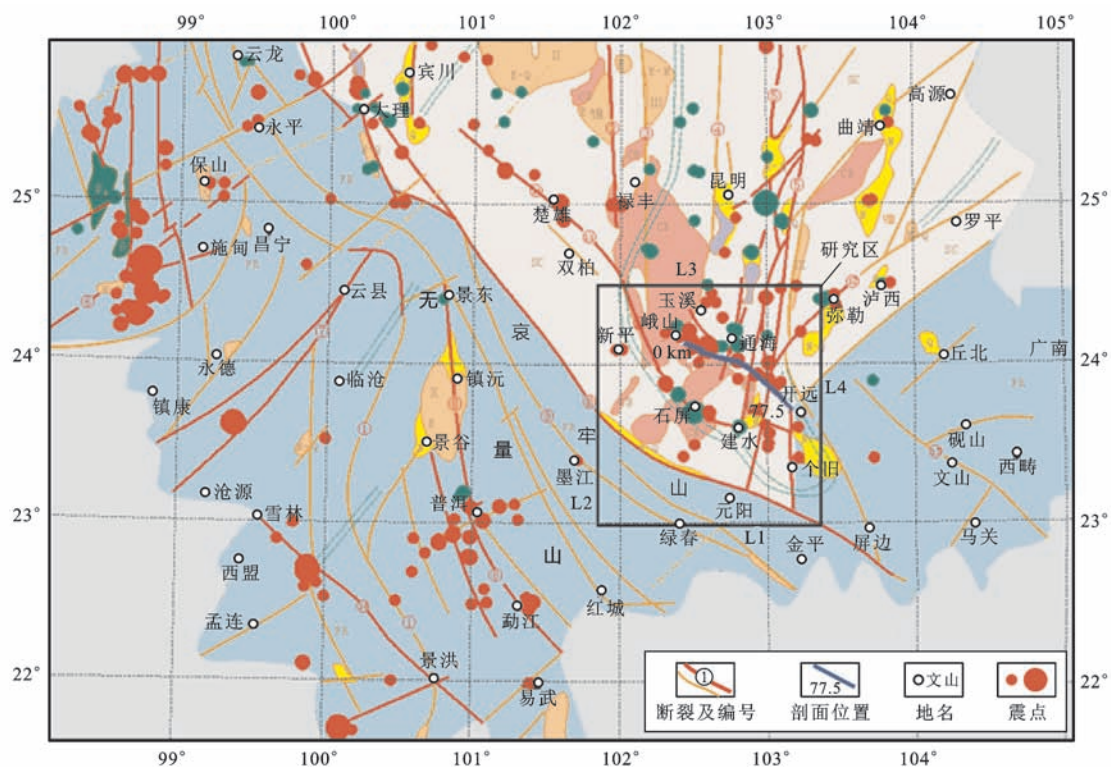
侧向流动可能是青藏高原腹地内上述地质作用



图件引自文献[62]

图 15 南汀河深地震反射剖面位置

Fig. 15 Location of Deep Seismic Reflection Profile in Nantinghe



震点大小不一表示不同震级;图件引自文献[63]

图 16 峨山—开远深地震反射剖面位置及构造背景

Fig. 16 Location and Tectonic Setting of Deep Seismic Reflection Profile in Eshan-Kaiyuan

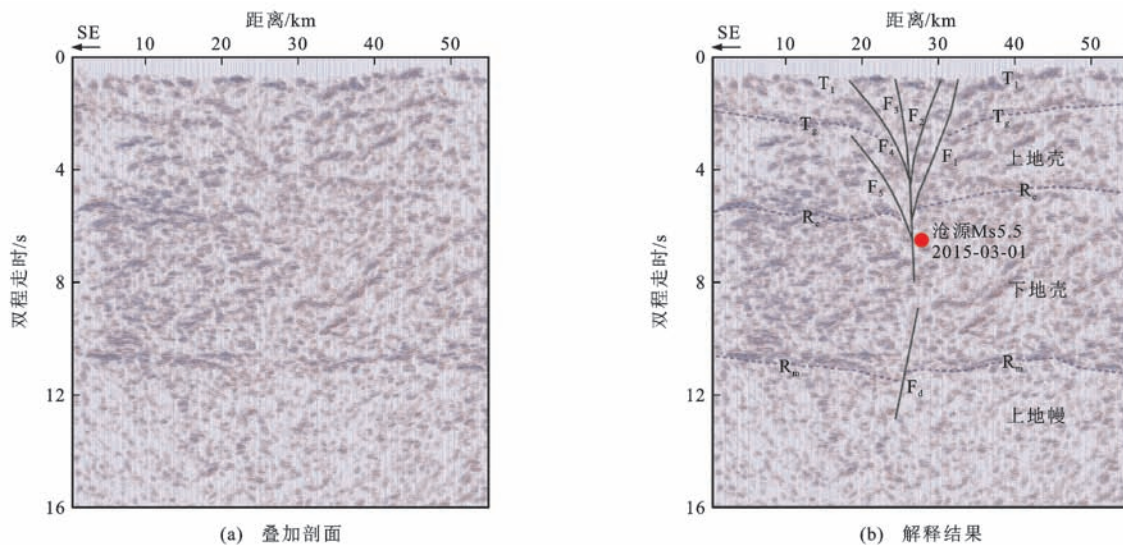


图 17 南汀河深地震反射剖面及解释结果
 R_0 为上、下地壳分界面; R_m 为壳幔分界面; $F_1 \sim F_5$ 为剖面解释中南汀河断裂的 5 个分支; F_d 为切穿下地壳及莫霍面并延伸至上地幔的深大断裂; 图件引自文献[60]

图 17 南汀河深地震反射剖面及解释结果

Fig. 17 Deep Seismic Reflection Profile and Interpretation in Nantinghe

时空变迁的重要原因。然而,与主碰撞带不同,青藏高原东南缘软流层物质上涌则主要受印度板块侧向俯冲、后撤引起的局部地幔对流驱动。无论下地壳物质逃逸^[29,32],还是侧向走滑挤出^[61],都仅仅是青藏高原东南缘浅部岩石圈变形的动力学过程,而印度—亚洲大陆碰撞动力系统和印缅—巽他俯冲动力系统地幔尺度的深部过程时空转换和交替才是造就青藏高原东南缘岩石圈变形如此复杂的真正原因。这些过程包括大洋俯冲板片断离、大陆岩石圈根拆沉、地幔过渡带脱水作用引起的软流圈上涌和小尺度对流等。

3.2 有待解决的问题

由于处于印度板块与欧亚板块碰撞的侧翼,青藏高原东南缘(云南三江及邻区)岩石圈变形与成矿关系的研究对大陆碰撞造山成矿理论框架的完整性构建不可或缺。虽然已有的大量成果初步勾勒了青藏高原东南缘的深部过程和动力学模式的轮廓,但显然还不足以阐明与碰撞造山成矿相关的如下科学问题:①地壳厚度、下地壳结构及低速(高导)层对成矿背景的影响;②岩石圈行为,如俯冲(撕裂/断离)/构造加厚-失稳/底垫、拆沉等深部过程及灾变触发机制;③地幔岩浆的作用是否构成地幔通道流;④印度—亚洲大陆碰撞动力系统和印缅—巽他俯冲动力系统转换的时空位置。

究其原因,一是已有深部探测资料高分辨率的深地震反射剖面太少;二是多种地球物理方法联合运用不多,以至于各种资料解释成果不兼容,造成浅部-深部岩石圈结构与形态、深部构造与浅部成矿的

三维时空关系不明确。因此,进一步运用以深地震反射剖面为先导的地球物理探测新技术,系统查明巨型成矿带的岩石圈结构与动力学背景,特别是岩石圈薄弱带(区)的位置,多学科深入探讨岩石圈结构、深部构造格局及时空演化对巨型成矿区带及大型矿集区形成的制约和影响,对促进大陆动力学发展,完善大陆碰撞造山成矿理论,支撑三江成矿带找矿新突破具有重要的意义。

两位审稿专家提出了中肯意见和建议,使本文的针对性和写作水平都有实质性的提升,在此表示感谢!

参考文献:

References:

- [1] 侯增谦,钟大赉,邓万明. 青藏高原东缘斑岩铜钼金成矿带的构造模式[J]. 中国地质, 2004, 31(1): 1-14.
HOU Zeng-qian, ZHONG Da-lai, DENG Wan-ming. A Tectonic Model for Porphyry Copper-molybdenum-gold Metallogenic Belts on the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 1-14.
- [2] 侯增谦,杨竹森,徐文艺,等. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 337-358.
HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, XU Wen-yi, et al. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: I. Mineralization in Main Collisional Orogenic Setting [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 337-358.
- [3] 侯增谦,潘桂棠,王安建,等. 青藏高原碰撞造山带:

- II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 521-542.
- HOU Zeng-qian, PAN Gui-tang, WANG An-jian, et al. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: II. Mineralization in Late-collisional Transformation Setting[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(5): 521-542.
- [4] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 123-144.
- HOU Zeng-qian, SONG Yu-cai, LI Zheng, et al. Thrust-controlled, Sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu Deposits in Eastern and Northern Margins of Tibetan Orogenic Belt: Geological Features and Tectonic Model [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(2): 123-144.
- [5] HOU Z Q, ZHANG H R. Geodynamics and Metallogeny of the Eastern Tethyan Metallogenic Domain[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 70: 346-384.
- [6] 王绪本, 高原, 王志, 等. 青藏高原东缘深部地球物理与大陆动力学研究进展[J]. 地球物理学报, 2017, 60(6): 2030-2037.
- WANG Xu-ben, GAO Yuan, WANG Zhi, et al. Research Progress on Deep Geophysics and Continental Dynamics in Eastern Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(6): 2030-2037.
- [7] AKI K, LEE W H K. Determination of Three-dimensional Velocity Anomalies Under a Seismic Array Using First P Arrival Times from Local Earthquakes: A Homogeneous Initial Model [J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81(23): 4381-4399.
- [8] 何正勤, 刘志峰, 叶太兰, 等. 中国大陆及其邻域的瑞利波群速度分布图像与地壳上地幔速度结构[J]. 地震学报, 2002, 24(3): 252-259.
- HE Zheng-qin, DING Zhi-feng, YE Tai-lan, et al. The Group Velocity Distribution of Rayleigh Waves and Crustal and Upper Mantle Velocity Structure of the Chinese Mainland and Its Vicinity [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(3): 252-259.
- [9] YANOVSKAYA T B, KOZHEVNIKOV V M. 3D S-wave Velocity Pattern in the Upper Mantle Beneath the Continent of Asia from Rayleigh Wave Data[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 138(3/4): 263-278.
- [10] 潘佳铁, 李永华, 吴庆举, 等. 青藏高原东南部地区雷波相速度层析成像[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 3993-4006.
- PAN Jia-tie, LI Yong-hua, WU Qing-ju, et al. Phase Velocity Maps of Raleigh Waves in the Southeast Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(11): 3993-4006.
- [11] ZHOU H W. A High-resolution P-wave Model for Top 1 200 km of the Mantle [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 27791-27810.
- [12] ZHOU H W, MAICHAEL A M. Tomographic Evidence for wholesale Underthrusting of India Beneath the Entire Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 25(3): 445-457.
- [13] 杨文采, 于常青. 从亚洲 S 波波速结构看地幔流体运动特征[J]. 地质学报, 2011, 85(9): 1399-1408.
- YANG Wen-cai, YU Chang-qing. Movement Features of Mantle Fluid Flows Based on the S-wave Velocity Structure of Asia [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(9): 1399-1408.
- [14] 胥颐, 刘劲松, 黄忠贤, 等. 青藏高原上地幔速度结构及其动力学性质[J]. 地球物理学报, 2014, 57(12): 4085-4096.
- XU Yi, LIU Jin-song, HUANG Zhong-xian, et al. Upper Mantle Velocity Structure and Dynamic Features of the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(12): 4085-4096.
- [15] 韦伟, 孙若味, 石耀霖. 青藏高原东南缘地震层析成像及汶川地震成因探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(7): 831-839.
- WEI Wei, SUN Ruo-mei, SHI Yao-lin. P-wave Tomographic Images Beneath Southeastern Tibet: Investigating the Mechanism of the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 40(7): 831-839.
- [16] 范莉苹, 吴建平, 房立华. 青藏高原东南缘远震 P 波层析成像研究[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(2): 209-223.
- FAN Li-ping, WU Jian-ping, FANG Li-hua. Teleseismic P-wave Tomography in the Southeast Margin of the Tibetan Plateau [J]. CT Theory and Applications, 2015, 24(2): 209-223.
- [17] CHEN M, NIU F L, TROMP J, et al. Lithospheric Foundering and Underthrusting Imaged Beneath Tibet [J]. Nature Communications, 2017, DOI: 10. 1038/ncomms15659.
- [18] 孙进, 高原. 中国大陆背景噪声成像研究及应用前景[J]. 国际地震动态, 2011(3): 12-17.
- SUN Jin, GAO Yuan. Research on Ambient Noise Tomography and Application Prospects on Chinese Mainland [J]. Recent Developments in World Seismology, 2011(3): 12-17.
- [19] YAO H J, BEGHEIN C, VAN DER HILST R D. Surface-wave Array Tomography in SE Tibet from Ambient

- Seismic Noise and Two-station Analysis: II. Crustal and Upper-mantle Structure[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 173(1): 205-219.
- [20] YAO H J, VAN DER HILST R D, DE HOOP M V. Surface-wave Array Tomography in SE Tibet from Ambient Seismic Noise and Two-station Analysis: I. Phase Velocity Maps[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(2): 732-744.
- [21] 李 昱, 姚华建, 刘启元, 等. 川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 842-852.
- LI Yu, YAO Hua-jian, LIU Qi-yuan, et al. Phase Velocity Array Tomography of Rayleigh Waves in Western Sichuan from Ambient Seismic Noise[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(4): 842-852.
- [22] ZHENG X, ZHAO C P, ZHOU L S, et al. 3D Shear-wave Velocity Structure Beneath the Southeastern Tibetan Plateau from Ambient Noise[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(3): 1371-1382.
- [23] 贺传松, 王椿镛, 吴建平. 用远震接收函数研究滇西地区的深部结构[J]. *地震学报*, 2004, 26(3): 238-246.
- HE Chuan-song, WANG Chun-yong, WU Jian-ping. A Study on Deep Structure Using Teleseismic Receiver Function in Western Yunnan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(3): 238-246.
- [24] 徐鸣洁, 王良书, 刘建华, 等. 利用接收函数研究哀牢山—红河断裂带地壳上地幔特征[J]. *中国科学: D辑, 地球科学*, 2005, 35(8): 729-737.
- XU Ming-jie, WANG Liang-shu, LIU Jian-hua, et al. Study on the Crust and Upper Mantle Characteristics of Ailaoshan-Honghe Fault Zone by Using the Receiver Function[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2005, 35(8): 729-737.
- [25] 傅竹武, 刘建华, 胥 颐, 等. 利用接收函数方法研究大盈江断裂两侧 S 波速度结构[J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2007, 29(6): 607-612.
- FU Zhu-wu, LIU Jian-hua, XU Yi, et al. S-wave Velocity Structures in Both Sides of Dayingjiang Fault Inversed by Receiver Function[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Science Edition*, 2007, 29(6): 607-612.
- [26] LI Y H, WU Q J, ZHANG R Q, et al. The Crust and Upper Mantle Structure Beneath Yunnan from Joint Inversion of Receiver Functions and Rayleigh Wave Dispersion Data[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2008, 170(1/2): 134-146.
- [27] BAO X W, SUN X X, XU M J, et al. Two Crustal Low-velocity Channels Beneath SE Tibet Revealed by Joint Inversion of Rayleigh Wave Dispersion and Receiver Functions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 415: 16-24.
- [28] 刘福田, 刘建华, 何建坤, 等. 滇西特提斯造山带下扬子板块的俯冲板片[J]. *科学通报*, 2000, 45(1): 79-84.
- LIU Fu-tian, LIU Jian-hua, HE Jian-kun, et al. The Subduction Slab of Yangtze Continental Block Beneath the Tethys Orogen in Western Yunnan[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(1): 79-84.
- [29] ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, KING R W, et al. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet[J]. *Science*, 1997, 276: 788-790.
- [30] CLARK M K, HANDY R L. Topographic Ooze: Building the Eastern Margin of Tibet by Lower Crustal Flow[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 703-706.
- [31] ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D. The Geological Evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Science*, 2008, 321: 1054-1058.
- [32] BAI D H, UNSWORTH M J, MEJU M A, et al. Crustal Deformation of the Eastern Tibetan Plateau Revealed by Magnetotelluric Imaging[J]. *Nature Geoscience*, 2010, DOI:10.1038/NGED830.
- [33] TSENG T L, CHEN W P, NOWACK R L. Northward Thinning of Tibetan Crust Revealed by Virtual Seismic Profiles [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(24): L24304.
- [34] TIAN X B, CHEN Y, TSENG T L, et al. Weakly Coupled Lithospheric Extension in Southern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 430: 171-177.
- [35] LIU Z, TIAN X B, CHEN Y, et al. Unusually Thickened Crust Beneath the Emeishan Large Igneous Province Detected by Virtual Deep Seismic Sounding [J]. *Tectonophysics*, 2017, 721: 387-394.
- [36] LIU Q Y, VAN DER HILST R D, LI Y, et al. Eastward Expansion of the Tibetan Plateau by Crustal Flow and Strain Partitioning Across Faults [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(5): 361-365.
- [37] 赵慈平, 冉 华, 王 云. 腾冲火山区的现代幔源氦释放: 构造和岩浆活动意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(4): 1189-1204.
- ZHAO Ci-ping, RAN Hua, WANG Yun. Present-day Mantle-derived Helium Release in the Tengchong Volcanic Field, Southwest China: Implications for Tectonics and Magmatism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(4): 1189-1204.

- [38] 胥颐,汪晟,张丽莉,等. 腾冲火山区深部构造研究及其与岩浆活动的关系[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1034-1038.
XU Yi, WANG Sheng, ZHANG Li-li, et al. Crust and Upper Mantle Structure and Its Relations with Magma Activity of the Tengchong Volcanic Area[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1034-1038.
- [39] 白一鸣, 艾印双, 姜明明, 等. 利用P波接收函数研究青藏高原东南缘地幔转换带结构[J]. 地球物理学报, 2018, 61(2): 570-583.
BAI Yi-ming, AI Yin-shuang, JIANG Ming-ming, et al. Structure of the Mantle Transition Zone Beneath the Southeastern Tibetan Plateau Revealed by P-wave Receiver Functions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(2): 570-583.
- [40] YAN Q, ZHANG G, HU H, et al. Crustal Structure Along Simao-Malong DSS Profile in Yunnan Province[J]. Seismological Research Letters, 1985, 8: 249-280.
- [41] 阚荣举, 林中洋. 云南地壳上地幔构造的初步研究[J]. 中国地震, 1986, 2(4): 50-61.
KAN Rong-ju, LIN Zhong-yang. A Preliminary Study on Crustal and Upper Mantle Structure in Yunnan[J]. Earthquake Research in China, 1986, 2(4): 50-61.
- [42] 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 等. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J]. 地球物理学报, 1986, 29(2): 133-144.
HU Hong-xiang, LU Han-xing, WANG Chun-yong, et al. Explosion Investigation of the Crustal Structure in Western Yunnan Province[J]. Acta Geophysica Sinica, 1986, 29(2): 133-144.
- [43] 林中洋, 胡鸿翔, 张文彬, 等. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J]. 地震学报, 1993, 15(4): 427-440.
LIN Zhong-yang, HU Hong-xiang, ZHANG Wen-bin, et al. The Velocity Structure Research of Crust-upper Mantle in Western Yunnan[J]. Acta Seismologica Sinica, 1993, 15(4): 427-440.
- [44] 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋, 等. 攀西构造带南部地壳上地幔结构的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 1986, 29(3): 235-244.
XIONG Shao-bai, TENG Ji-wen, YIN Zhou-xun, et al. Explosion Seismological Study of the Structure of the Crust and Upper Mantle at Southern Part of the Panxi Tectonic Belt[J]. Acta Geophysica Sinica, 1986, 29(3): 235-244.
- [45] 崔作舟, 卢德源, 陈纪平, 等. 攀西地区的深部地壳结构与构造[J]. 地球物理学报, 1987, 30(6): 566-580.
CUI Zuo-zhou, LU De-yuan, CHEN Ji-ping, et al. The Deep Structural and Tectonic Features of the Crust in Panxi Area[J]. Acta Geophysica Sinica, 1987, 30(6): 566-580.
- [46] 白志明, 王椿镛. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 257-267.
BAI Zhi-ming, WANG Chun-yong. Tomography Research of the Zhefang-Binchuan and Menglian-Malong Wide-angle Seismic Profiles in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2): 257-267.
- [47] 张中杰, 白志明, 王椿镛, 等. 三江地区地壳结构及动力学意义: 云南遮放—宾川地震宽角反射/折射剖面的启示[J]. 中国科学: D辑, 地球科学, 2005, 35(4): 314-319.
ZHANG Zhong-jie, BAI Zhi-ming, WANG Chun-yong, et al. The Crustal Structure Under Sanjiang and Its Dynamic Implications Revealed by Seismic Reflection/Refraction Profile Between Zhefang and Binchuan, Yunnan[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2005, 35(4): 314-319.
- [48] ZHANG X, WANG Y H. Crustal and Upper Mantle Velocity Structure in Yunnan, Southwest China[J]. Tectonophysics, 2009, 471(3/4): 171-185.
- [49] 张中杰, 白志明, 王椿镛, 等. 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[J]. 中国科学: D辑, 地球科学, 2005, 34(5): 387-392.
ZHANG Zhong-jie, BAI Zhi-ming, WANG Chun-yong, et al. Crustal Structure of Gondwana- and Yangtze-typed Blocks: An Example by Wide-angle Seismic Profile from Menglian to Malong in Western Yunnan[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2005, 34(5): 387-392.
- [50] 王椿镛, 韩渭宾, 吴建平, 等. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构[J]. 地震学报, 2003, 25(3): 229-241.
WANG Chun-yong, HAN Wei-bin, WU Jian-ping, et al. Crustal Structure Beneath the Songpan-Ganzi Orogenic Belt[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3): 229-241.
- [51] 王椿镛, 杨文采, 吴建平, 等. 南北构造带岩石圈结构与地震的研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 3867-3901.
WANG Chun-yong, YANG Wen-cai, WU Jian-ping, et al. Study on the Lithospheric Structure and Earthquakes in North-south Tectonic Belt[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(11): 3867-3901.
- [52] 张智, 赵兵, 张晰, 等. 云南思茅—中甸地震剖面的地壳结构[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1377-1384.
ZHANG Zhi, ZHAO Bing, ZHANG Xi, et al. Crustal

- Structure Beneath the Wide-angle Seismic Profile Between Simao and Zhongdian in Yunnan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1377-1384.
- [53] 张恩会, 楼海, 嘉世旭, 等. 云南西部地壳深部结构特征[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1915-1927.
ZHANG En-hui, LOU Hai, JIA Shi-xu, et al. The Deep Crust Structure Characteristics Beneath Western Yunnan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6): 1915-1927.
- [54] 王夫运, 潘素珍, 刘兰, 等. 玉溪—临沧剖面宽角地震探测: 红河断裂及滇南地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3247-3258.
WANG Fu-yun, PAN Su-zhen, LIU Lan, et al. Wide Angle Seismic Exploration of Yuxi-Lincang Profile: The Research of Crustal Structure of the Red River Fault Zone and Southern Yunnan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 3247-3258.
- [55] 潘素珍, 王夫运, 段永红, 等. 滇南及邻近地区基底结构: 镇康—泸西深地震测深剖面结果[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 3917-3927.
PAN Su-zhen, WANG Fu-yun, DUAN Yong-hong, et al. Basement Structure of Southern Yunnan and Adjacent Areas: The Zhenkang-Luxi Deep Seismic Sounding Profile[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(11): 3917-3927.
- [56] 徐涛, 张明辉, 田小波, 等. 丽江—清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸 Ms6.5 级地震孕震环境的关系[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 3069-3079.
XU Tao, ZHANG Ming-hui, TIAN Xiao-bo, et al. Upper Crustal Velocity of Lijiang-Qingzhen Profile and Relationship with the Seismogenic Environment of the Ms6.5 Ludian Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(9): 3069-3079.
- [57] 徐涛, 张忠杰, 刘宝峰, 等. 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[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(5): 561-576.
XU Tao, ZHANG Zhong-jie, LIU Bao-feng, et al. Crustal Velocity Structure in the Emeishan Large Igneous Province and Evidence of the Permian Mantle Plume Activity: Constraints from a Wide-angle Seismic Profile of Lijiang-Qingzhen[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(5): 561-576.
- [58] 王椿镛, 吴建平, 楼海, 等. 川西藏东地区的地壳 P 波速度结构[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2003, 33(增): 181-189.
WANG Chun-yong, WU Jian-ping, LOU Hai, et al. P-wave Velocity Structures of Crust in the Western Sichuan and the Eastern Tibet Areas[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2003, 33(S): 181-189.
- [59] 王夫运, 段永红, 杨卓欣, 等. 川西盐源—马边地震带上地壳速度结构和活动断裂研究: 高分辨率地震折射实验结果[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2008, 38(5): 611-621.
WANG Fu-yun, DUAN Yong-hong, YANG Zhuo-xin, et al. Velocity Structure and Active Fault of Yanyuan-Mabian Seismic Zone: The Result of High-resolution Seismic Refraction Experiment[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2008, 38(5): 611-621.
- [60] 鄯少英, 刘宝金, 邓小娟, 等. 南汀河西支断裂深浅构造特征: 来自深地震反射剖面的证据[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 3863-3871.
FENG Shao-ying, LIU Bao-jin, DENG Xiao-juan, et al. Shallow and Deep Structure Characteristics of the Western Branch of the Nantinghe Fault: Evidence from Deep Seismic Reflection Profiling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 3863-3871.
- [61] TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine[J]. Geology, 1982, 10(12): 611-616.
- [62] 中国地震局地球物理勘探中心. 南北地震带中南段深地震反射剖面报告[R]. 郑州: 中国地震局地球物理勘探中心, 2013.
Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration. The Report of Deep Seismic Reflection Profile in the Middle and Southern Margin of North-south Seismic Zone[R]. Zhengzhou: Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, 2013.
- [63] 中国地震局地球物理勘探中心. 峨山—开远深地震反射剖面探测成果报告[R]. 郑州: 中国地震局地球物理勘探中心, 2012.
Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration. Detection Results Report of Deep Seismic Reflection Profile in Eshan-Kaiyuan Area[R]. Zhengzhou: Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, 2012.