

武振波, 邹昆, 苏金蓉等. 2024. 利用双差走时成像研究青藏高原东缘地壳速度结构. 地球物理学报, 67(3): 871-888, doi: 10.6038/cjg2024R0746.

Wu Z B, Zou K, Su J R, et al. 2024. Crustal velocity structure beneath the eastern Tibetan Plateau derived from double-difference travel-time tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 67(3): 871-888, doi: 10.6038/cjg2024R0746.

利用双差走时成像研究青藏高原东缘地壳速度结构

武振波^{1,2}, 邹昆¹, 苏金蓉³, 滑玉珽⁴, 李萍萍³, 徐涛^{5,6*}

1 成都理工大学地球物理学院, 成都 610059

2 成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059

3 四川省地震局, 成都 610041

4 太原理工大学矿业工程学院, 太原 030024

5 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

6 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

摘要 青藏高原东缘断裂密布, 强震频发, 是研究高原侧向挤出及深部孕震环境的理想实验室. 为了解龙门山次级块体及其西界龙日坝断裂带在青藏高原东缘隆升过程中的作用, 我们基于四川地震台网 64 个宽频带地震台在 2008 年 1 月至 2015 年 12 月期间记录的震级 ≥ 3.0 地震事件波形, 利用双差层析成像方法揭示了四川盆地及青藏高原东缘的地壳速度结构. 结果表明: 夹持于龙门山断裂带(LMSF)与龙日坝断裂带(LRBF)之间的龙门山次级块体, 相对东侧龙门山断裂带和四川盆地呈现明显的低速特征. 结合该区域的低阻、低密度结构特征, 以及块体内部、特别是龙日坝断裂带现今地震活动缺乏, 我们推测这是因为该块体“相对较软”, 不易脆性破裂产生地震, 在青藏高原东缘与扬子块体西缘强烈相互作用过程中, 该块体主要通过地壳缩短增厚和地表隆升吸收板块挤压造成的累积应变能. 依据本文获得的速度等值线变化特征及已有地球物理剖面探测结果, 推测龙日坝断裂带为深部向南东倾斜且向下切入基底, 该断裂倾角较陡, 主要以走滑运动调节应变能, 而东侧龙门山断裂带倾角较缓, 表现为逆冲运动导致的地壳缩短是其调节应变能的主要形式. 此外, 据本文多条速度剖面及已有电性剖面、重力异常的联合约束, 我们推测鲜水河、安宁河断裂带均以较大倾角向南东倾斜, 至少延伸至中下地壳.

关键词 青藏高原东缘; 双差层析成像; 龙门山次级块体; 龙日坝断裂带

doi: 10.6038/cjg2024R0746

中图分类号 P313, P315

收稿日期 2023-11-07, 2024-02-08 收修定稿

Crustal velocity structure beneath the eastern Tibetan Plateau derived from double-difference travel-time tomography

WU ZhenBo^{1,2}, ZOU Kun¹, SU JinRong³, HUA YuJin⁴, LI PingPing³, XU Tao^{5,6*}

1 College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 Key Laboratory of Earth Exploration and Information Techniques (Chengdu University of Technology), Ministry of Education, Chengdu 610059, China

3 Sichuan Earthquake Administration, Chengdu 610041, China

4 College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

5 Key Laboratory of Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

6 Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract The eastern margin of the Tibetan Plateau is covered by dense faults, with actively

基金项目 国家自然科学基金(42174077, 42104102, 42374060, 42130807)联合资助.

第一作者简介 武振波, 女, 1988 年生, 副教授, 主要从事地震学研究. E-mail: wuzhenbo@cdut.edu.cn

*** 通讯作者** 徐涛, 男, 1978 年生, 研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: xutao@mail.iggcas.ac.cn

destructive earthquakes, which makes it a natural laboratory to study lateral extrusion mechanism of Tibetan Plateau and deep seismogenic environment. In order to understand the role of the Longmenshan subblock and its western boundary, the Longriba fault zone (LRBF), in the uplift of eastern Tibetan Plateau, we use double-difference tomography to reveal the crustal velocity structure beneath the Sichuan Basin and eastern Tibetan Plateau based on the event waveforms with magnitude ≥ 3.0 recorded by 64 broadband seismic stations between Jan. 2008 and Dec. 2015. The results show that the Longmenshan subblock, sandwiched between the Longmenshan fault zone (LMSF) and the LRBF, has obvious low crustal velocity characteristics compared with the LMSF itself and the Sichuan Basin to the east. Considering the low-resistance and low-density structure, as well as lack of seismicity within this block, especially in the LRBF, we speculate that this block is “relatively soft” to hardly produce brittle earthquake. During the strong interaction between the eastern edge of the Tibetan Plateau and the western edge of the Yangtze Block, this block absorbs the accumulated strain energy caused by plate extrusion mainly through crustal shortening and thickening and surface uplift. According to the velocity contour changes, we infer that the LRBF steeply dips southeastward in the deep and cuts into the basement, which probably releases its strain energy mainly by strike-slip movement. In contrast, the LMSF has a lower inclination angle leading to crustal shortening mainly by thrusting. In addition, according to the joint constraints of multiple velocity structures in this study, electrical and gravity anomalies revealed by other studies, we speculate that the Xianshuihe and Anninghe fault zones are also inclined to the southeast with a relatively large inclination angle, both of which extend at least into the middle-lower crust.

Keywords Eastern margin of the Tibetan Plateau; Double-difference tomography; Longmenshan subblock; Longriba fault zone

0 引言

青藏高原东缘与扬子块体西缘接合带具有复杂的演化历史与鲜明的地貌特征,经历了多个块体相互作用,发育不同规模、不同方向的断裂构造,使得该地区成为研究青藏高原侧向生长机制、不同块体相互作用及孕震环境的天然实验场。

目前,基于不同研究方法和数据已有很多学者在青藏高原东缘开展了地球物理深部结构探测,揭示出该区域深部结构特征整体上以龙门山—雅砻江构造带为界或过渡区,重力异常(李丹丹等,2023)、莫霍面深度(姜永涛等,2015)、速度结构(王志等,2021)以及电阻率参数(张乐天等,2012;闵刚等,2017)均存在明显的东西向差异。然而,已发表结果很多将松潘—甘孜块体作为一个整体研究对象,聚焦于上述构造接触带的讨论,尤其重点关注龙门山断裂带区域,而对松潘—甘孜块体内部及重要次级活动断裂——龙日坝断裂带的关注度明显不足。

如图 1 所示,研究区内块体包括阿坝次级块体、

龙门山次级块体、川滇块体、大凉山次级块体。龙日坝断裂带作为龙门山次级块体的西界,相比于周围岷江、虎牙及龙门山断裂带,该断裂带明显缺乏现代地震记录;有研究发现其上发生过古地震且现今仍具备发震所需的活动构造及动力条件(徐锡伟等,2008;任俊杰,2013;刘昭歧,2019)。大凉山次级块体内部有多条中小型活动断裂,但仅记录到 3 次 5.0 级以上中强地震且无 6.0 级以上历史强震记录(易桂喜等,2016),不过其西边界安宁河—则木河断裂带及东边界荣经—马边—盐津断裂带上均发生过 6.5 级以上历史强震(雷蕙如等,2022)。李姜一等(2020)根据 GPS 研究认为大凉山断裂带南段布拖、交际河断裂积累的能量分别能够发生一次 $M_w 7.5$ 地震且离逝时间已接近地震平均复发间隔,其潜在地震危险性不容忽视。

在地貌上,青藏高原东缘与四川盆地的边界为龙门山断裂带(张培震等,2002);东南缘与华南块体的边界为川滇块体内部总体呈北东—南西走向的金河—箐河断裂带(吴贵灵等,2019),早期研究认为该段是龙门山断裂带的南延,后因鲜水河断裂带左旋

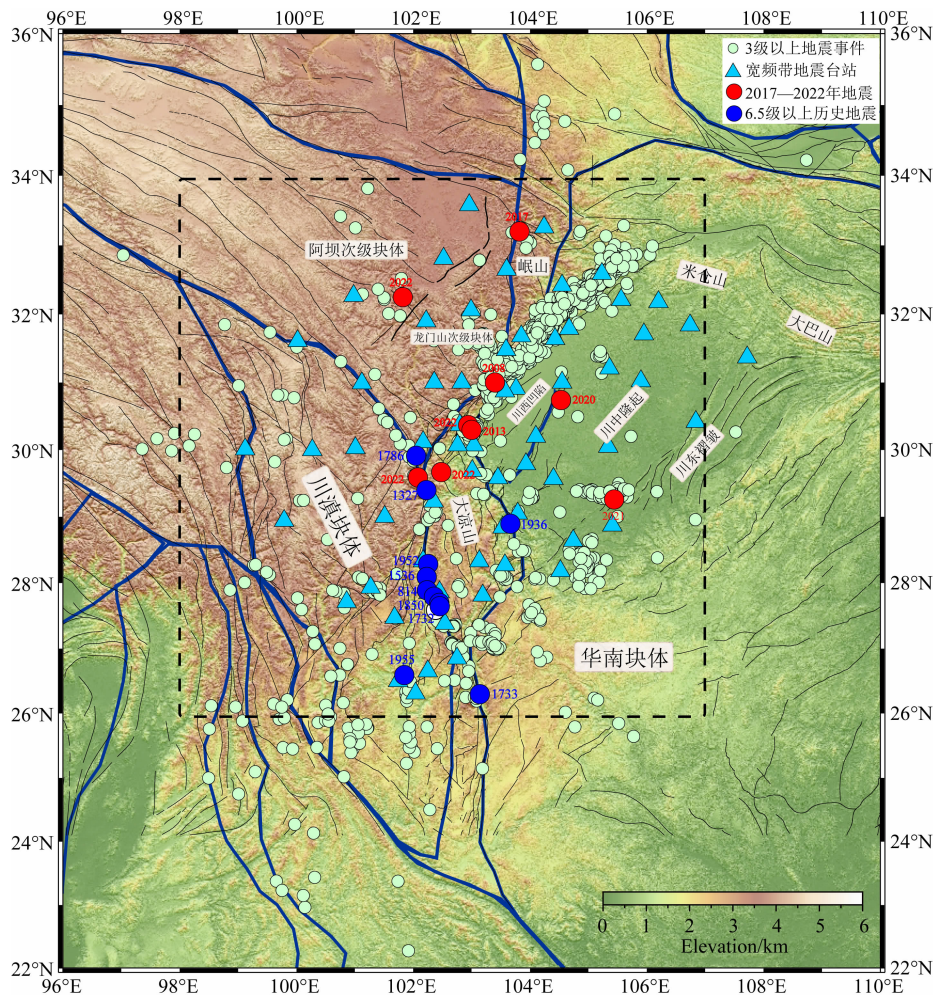


图 1 研究区构造简图

红色圆圈代表 2008 年汶川、2013/2022 年芦山、2017 年九寨沟、2020 年成都青白江、2021 年泸县、2022 年汉源/马尔康/泸定地震；蓝色圆圈代表震级 6.5 及以上历史地震(雷蕙如等,2022)；青色圆点代表本文所用震级 ≥ 3.0 地震事件(来源中国地震台网中心；孔雀蓝三角形代表宽频带地震台；深蓝色粗线为块体边界(邓起东等,2002)。

Fig.1 Schematic illustration of tectonics in the study region

Red dots indicate 2008 Wenchuan, 2013/2022 Lushan, 2017 Jiuzhaigou, 2020 Chengdu Qingbaijiang, 2021 Luxian, 2022 Hanyuan/Maerkang/Luding earthquakes; Blue dots indicate historical earthquakes with magnitude 6.5 and above (Lei et al., 2022); Cyan dots indicate earthquakes with magnitude ≥ 3.0 used in this study (Source:China Earthquake Networks Center); The peacock blue triangles indicate broad-band seismic stations; The dark blue thick lines represent block boundaries (Deng et al., 2002).

走滑被错断(Burchfiel et al., 1995; 许志琴等, 2007). 在深部结构上,地球物理探测发现莫霍面深度在龙门山断裂带(Zhang et al., 2009)、木里—金河—箐河断裂带两侧均存在差异(黄周传等,2021). 由此可见,青藏高原东缘复杂的断裂系统、块体相互作用、地表高程及莫霍面深度差异等对该区域的深浅介质变形及构造动力学过程有重要调节作用.

为进一步探讨扬子块体与青藏高原构造接合带内地震灾害频发的构造环境,以及包括龙日坝断裂带在内的活动断裂深部结构特征,我们利用四川地震台网 64 个宽频带地震台在 2008 年 1 月至 2015 年 12

月记录的震级 ≥ 3.0 事件波形数据和 PhaseNet 算法(Zhu and Beroza, 2019),获得高精度 P 波到时;其次,使用 VELEST(Kissling et al., 1994)程序包对地震进行绝对定位和反演研究区初始一维速度模型;然后,采用 Zhang 和 Thurber(2003)提出的双差层析成像方法反演四川盆地及邻区(100°E — 106°E , 26°N — 33°N)地壳 P 波速度结构;最后,根据本文反演结果、构造地质和该区域已开展地球物理探测等资料进行综合分析,探讨了上述结果的地质意义,为进一步认识上述科学问题提供更多深部结构约束.

1 构造背景

图 1 展示了研究区主要构造单元,包括阿坝次

级块体、龙门山次级块体、川滇块体、大凉山次级块体及相邻的四川盆地和华南块体. 图 2 显示了该区域主要活动断裂带,主要包括:龙日坝、岷江、虎牙、鲜水河—安宁河—则木河、龙门山、大凉山、峨边—金

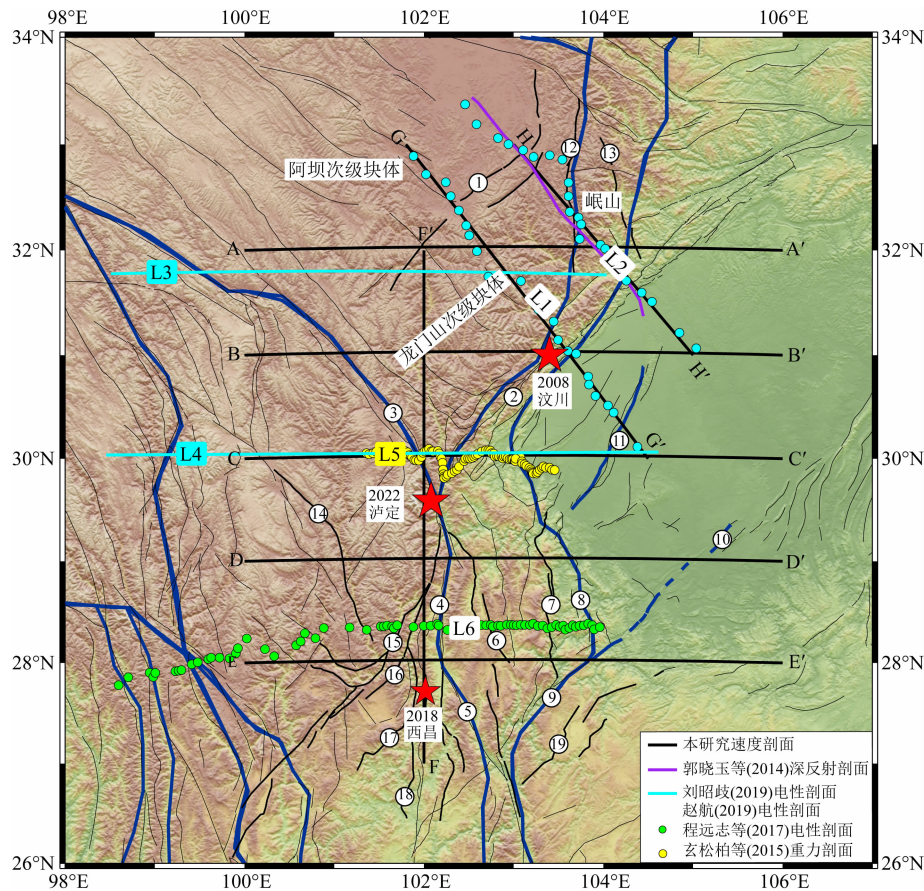


图 2 本研究速度剖面以及该区域已有地球物理探测剖面位置

AA'—HH'黑线对应本研究获取的速度剖面;与 HH'重合的紫色为郭晓玉等(2014)实施的人工源深地震反射剖面;L3 和 L4 青色实线分别为刘昭歧(2019)、赵航(2019)的大地电磁剖面;青色圆点表示的 L1 和 L2 为 Zhao 等(2012)实施的大地电磁剖面,黄色圆点表示的 L5 为玄松柏等(2015)的重力剖面,绿色圆点表示的 L6 为程远志等(2017)的大地电磁剖面;红色五角星分别为 2008 年汶川($M_s8.0$)、2022 年泸定($M_s6.8$)和 2018 年西昌($M_s5.1$)地震。①龙日坝断裂带(LRBF);②龙门山断裂带(LMSF);③鲜水河断裂带(XSF);④安宁河断裂带(ANF);⑤则木河断裂带(ZMF);⑥大凉山断裂带(DLSF);⑦峨边—金阳断裂带(EBF);⑧荣经—马边—盐津断裂带(MBF);⑨莲峰断裂带(LFF);⑩华蓥山断裂带(HYSF);⑪龙泉山断裂带(LQSF);⑫岷江断裂带(MJF);⑬虎牙断裂带(HYF);⑭理塘断裂带(LTF);⑮锦屏山断裂带(JPSF);⑯小金河—丽江断裂带(XJH-LJF);⑰金河—菁河断裂带(JJF);⑱得力铺断裂带(DLPF);⑲昭通—鲁甸断裂带(ZLF)。

Fig. 2 The velocity profiles in this study and the profiles already conducted by others in this region
The solid black lines AA'—HH' correspond to the velocity profile obtained in this study; The solid purple line overlapping on the HH' is the active source seismic deep reflection profile implemented by Guo et al. (2014). L3 and L4 shown with cyan solid lines represent two magnetotelluric (MT) profiles respectively deployed by Liu (2019) and Zhao (2019), L1 and L2 shown with cyan dots are the MT profiles deployed by Zhao et al. (2012), L5 shown as yellow dots is the gravity survey profile from Xuan et al. (2015), L6 shown as green dots is the MT profile from Cheng et al. (2017); The red stars indicate 2008 Wenchuan ($M_s8.0$), 2022 Luding ($M_s6.8$), and 2018 Xichang ($M_s5.1$) earthquakes. ① Longriba fault zone (LRBF); ② Longmenshan fault zone (LMSF); ③ Xianshuihe fault zone (XSF); ④ Anninghe fault zone (ANF); ⑤ Zemuhe fault zone (ZMF); ⑥ Daliangshan fault zone (DLSF); ⑦ Ebian-Jinyang fault zone (EBF); ⑧ Yingjing-Mabian-Yanjin fault zone (MBF); ⑨ Lianfeng fault zone (LFF); ⑩ Huayingshan fault zone (HYSF); ⑪ Longquanshan fault zone (LQSF); ⑫ Minjiang fault zone (MJF); ⑬ Huya fault zone (HYF); ⑭ Litang fault zone (LTF); ⑮ Jinpingshan fault zone (JPSF); ⑯ Xiaojinhe-Lijiang fault zone (XJH-LJF); ⑰ Jinhe-Jinghe fault zone (JJF); ⑱ Delipu fault zone (DLPF); ⑲ Zhaotong-Ludian fault zone (ZLF).

阳、荣经—马边—盐津等断裂带。

龙日坝断裂带在青藏高原东缘的研究中一直未受到重视,直到 Shen 等(2005)发现其两侧 GPS 测站速度有差异,而后徐锡伟等(2008)通过野外考察和卫星图像识别确认了它的真实存在。这条断裂带将松潘—甘孜块体分为阿坝和龙门山两个次级块体(图 2),其北段由龙日曲(西)和毛尔盖(东)2 条分支断裂组成,南段只包含西支断裂;龙日曲断裂以右旋走滑为主兼具南东方向的逆冲(任俊杰,2013);毛尔盖断裂为纯右旋走滑(徐锡伟等,2008),但 Ansberque 等(2018)认为毛尔盖断裂向南东倾斜,为龙门山逆冲推覆构造的反冲断裂。从地貌及地表形变特征上看,阿坝次级块体表现为相对平缓的高原且 GPS 观测到的地表形变以水平运动为主,而龙门山次级块体主要表现为山体隆升和地表褶皱(任俊杰,2013)。郭晓玉等(2014)人工源地震剖面显示龙门山次级块体下方基底断层发育。姜永涛等(2015)发现龙门山次级块体的自由空气重力异常值大于其东、西两侧块体,推测该块体是一个深部物质重新分异、调整和能量强烈交换的地带。

图 2 中岷山隆起近南北向,该断块地貌特征与两侧不同,在深部则隶属我国以南北地震带分界的东西部地壳厚度陡变带上(任俊杰,2013)。岷江断裂带为岷山断块的西边界,总体走向近南北,倾向 NW,倾角存在横向变化,研究表明它是一条全新世活动断裂。虎牙断裂带是岷山断块的东边界,第四纪以来表现为逆冲兼走滑运动,2017 年九寨沟地震就发生在这条断裂带上,1976 年其上已发生过两次 7 级以上地震,暗示该条断裂在全新世活动强烈(易桂喜等,2017)。龙门山断裂带主要由后山、中央、前山和山前隐伏等断裂组成(邓起东等,1994),其中央断裂中段为 2008 年汶川地震的发震构造,而中央断裂南段的大双—双石断裂、山前隐伏断裂则孕育了 2013 年芦山地震(邵崇建,2019);龙门山断裂带横向上存在分段性特征,北段以右旋走滑为主,中南段以逆冲推覆为主且构造变形已向东扩展到四川盆地内部龙泉山背斜(黄伟和江娃利,2012),抑或进一步向东至威远背斜一带(Hubbard and Shaw, 2009;李勇等,2011)。

大凉山次级块体位于川滇菱形块体与四川盆地之间,西界为安宁河—则木河断裂带,东界为荣经—马边—盐津断裂带,南界包含莲峰、昭通—鲁甸断裂带,内部还发育有大凉山、汉源—甘洛、西河—美姑等一系列 NW-SE 向断裂带,这些 NW-SE 向断裂带

在北端被 NE-SW 走向的龙门山断裂带南段截切。该区域作为青藏高原与扬子块体构造接合带的中段,与北部以逆冲为主的龙门山构造带、南部以左旋走滑为主的小江断裂带展现的“线性”边界不同,表现为从造山带延伸到盆地的弥散性变形,区域内多条活动断裂带兼具逆冲与走滑双重运动学性质(周荣军等,2003;赵高平,2016),单条断裂带变形也存在横向分段性(张芹贵等,2019;李姜一等,2020;冯嘉辉等,2021),反映出该区域复杂的构造应力场和独特的孕震环境。从图 1 来看,大凉山块体内部现今表现为弱地震活动,强震主要分布在边界断裂带上。有研究表明,历史上昭觉、美姑、越西、西昌均发生过 5.0 级以上地震,探槽研究揭示出大凉山断裂带曾多次发生 7.0 级以上强震(宋方敏等,2002;冯嘉辉等,2021);2014 年鲁甸 6.3 级、越西 5.1 级地震也说明该地区具备发生中强地震的构造条件,应当予以关注。

综上所述,青藏高原东缘与扬子块体西缘接合地区,构造变形强烈,活动断裂密布且运动学性质复杂,自 2008 年汶川地震之后该区域地震活动持续性增强,对四川盆地、大凉山及龙门山次级块体等都产生了日益显著的影响。

2 数据和方法

2.1 数据预处理

从中国地震台网中心下载研究区域(100°E — 106°E , 26°N — 33°N)内 2008 年 1 月至 2015 年 12 月期间震级 ≥ 3.0 的地震事件目录,波形数据来源于四川省地震台网 64 个宽频带台站。主要处理步骤包括:首先,基于 PhaseNet 算法(Zhu and Beroza, 2019)和人工抽检质控获得了 31416 个清晰的 P 波震相到时,该机器学习算法相较于人工拾取震相到时稳定性更高、分析速度更快、数据误差更小。之后,采用 VELEST 程序对地震事件进行绝对定位,共重定位 1777 个有效事件。为了进一步控制数据质量,本文对 VELEST 绝对定位后的走时数据进行了严格筛选,标准为:(1)设置地震对时,限定地震对与台站之间的距离小于 900 km,每个台站对之间的距离小于 15 km;(2)每个地震最多同时与另外 30 个地震组成地震对;(3)每个地震事件高质量 P 波走时记录不低于 8 个,同时剔除偏离地震波走时曲线较大的震相数据。最后,得到 1572 个地震事件的 29944 个 P 波绝对走时和 206154 个 P 波相对走时数据。图

3b—c 分别展示了两个 $M_s3.1$ 地震事件的原始波形,红色竖线为拾取的 P 波初至;图 3a 则显示出 P 波震相走时随震中距呈现良好的一致性变化,高质量走时数据集有效保障了双差层析成像结果的可靠性.

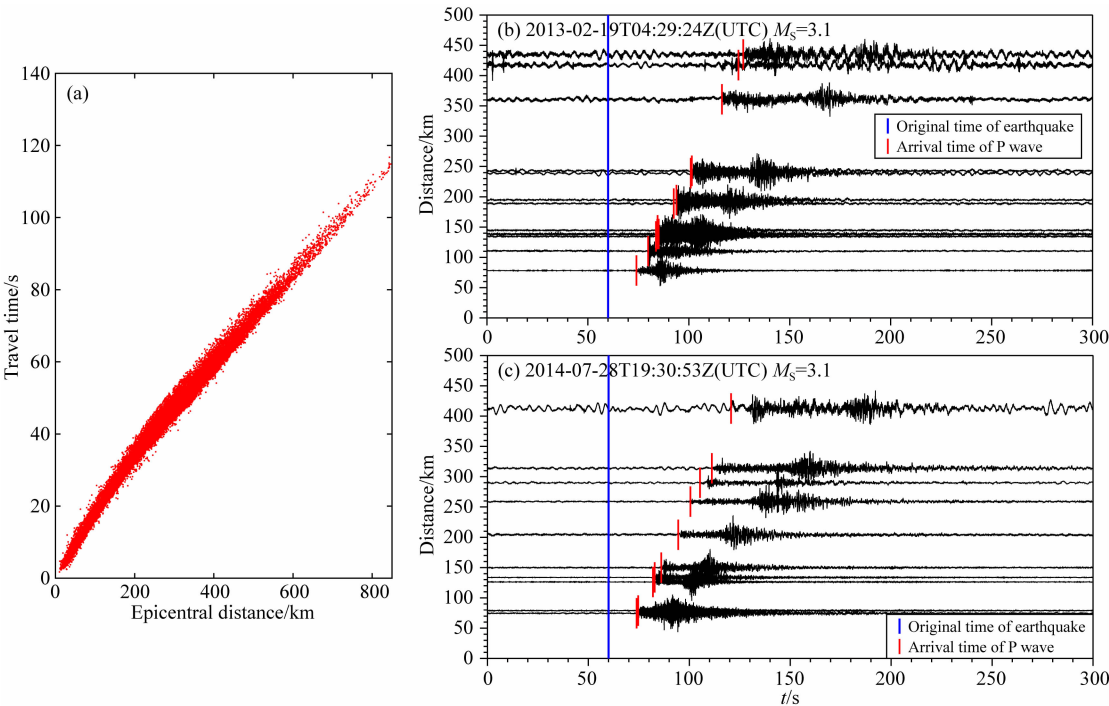


图 3 (a) P 波震相走时-震中距关系图; (b)、(c) 分别为两个 $M_s3.1$ 地震事件按震中距排列的地震波形与到时拾取

Fig. 3 (a) Travel time-epicentral distance curve of the P wave; (b) and (c) respectively show the waveforms and phase picking of two $M_s3.1$ events in different epicentral distances

2.2 初始速度模型及反演参数选择

一般而言,地震波到时与台站位置、震源参数以及速度模型之间存在非线性关系(Thurber, 1992; Kissling et al., 1994). Kissling 等(1994)提出了一种联合反演震源参数与速度结构的方法:首先给定一个初始速度模型,通过对台站及震源参数的校正来修正初始模型,然后多次迭代,求得均方根残差最小的解即为反演的最优一维速度模型. 为保证数据对研究区进行均匀性覆盖,本研究只选取了震级 ≥ 3.6 、方位分布较均匀的 423 个事件且每个事件至少有 10 个震相记录作为输入数据. 由于 VELEST 算法只对每层速度进行校正,而不改变层数和层厚,经不断调试,最终将各层深度设置在 $-30\text{ km}, 0\text{ km}, 5\text{ km}, 10\text{ km}, 15\text{ km}, 20\text{ km}, 25\text{ km}, 30\text{ km}, 40\text{ km}, 50\text{ km}, 100\text{ km}$, 水平网格设置为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. 参考研究区域内多个已发表速度结构(邓文泽等, 2014; 刘伟等, 2019; 蒋一然等, 2021; 邓山泉等, 2021)作为初始输入,经反复测算和残差分析,本文选择了走时均方根残差(RMS)最小时对应的反演结果作为后续双差层析成像的一维初始速度模型(如表 1).

表 1 基于 VELEST 反演获得的研究区域一维初始速度模型

Table 1 1D initial velocity model updated by VELEST Package for the study region	
P 波速度 ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	顶界面深度 (km)
4.60	-30.00
4.96	0.00
5.56	5.00
5.98	10.00
6.11	15.00
6.24	20.00
6.31	25.00
6.61	30.00
7.05	40.00
7.24	50.00
8.11	100.00

2.3 双差层析成像

Zhang 和 Thurber(2003)在双差定位方法基础上进一步提出了双差层析成像方法,可以同时获得重定位地震位置和三维速度模型. 针对同一个地震台(k)接收到的两个射线路径相似的相邻地震对(i 和 j),其中地震 i 从震源到观测台站 k 的到时可以表示为:

$$T_k^i = \tau^i + \int_i^k \mathbf{u} \, ds, \tag{1}$$

其中, τ^i 为地震 i 的发震时刻, \mathbf{u} 为慢度矢量, ds 代表射线路径微元. 由于地震到时与发震位置、发震时刻之间为非线性关系, 利用 Taylor 级数将式(1)进行线性化处理, 到时观测值 $(T_k^i)^{obs}$ 与理论值 $(T_k^i)^{cal}$ 的残差可以近似表示为发震位置和发震时刻的变化量:

$$r_k^i = (T_k^i)^{obs} - (T_k^i)^{cal} = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \Delta u \, ds, \tag{2}$$

其中, Δx_l^i 代表震源位置扰动, $\Delta \tau^i$ 代表发震时刻扰动, Δu 为慢度扰动. 同理, 可以类似表示地震 j 到台站 k 的观测与理论到时差. 然后, 将两个地震(i 和 j) 到台站 k 的到时残差再相减, 可得:

$$r_k^i - r_k^j = \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^i}{\partial x_l^i} \Delta x_l^i + \Delta \tau^i + \int_i^k \Delta u \, ds - \sum_{l=1}^3 \frac{\partial T_k^j}{\partial x_l^j} \Delta x_l^j - \Delta \tau^j - \int_j^k \Delta u \, ds, \tag{3}$$

(3)式也可表示成:

$$r_k^i - r_k^j = (T_k^i - T_k^j)^{obs} - (T_k^i - T_k^j)^{cal}, \tag{4}$$

其中, $(T_k^i - T_k^j)^{obs}$ 为地震对到同一个台站的观测到时差, 可通过地震目录绝对到时数据构建或波形互相关技术求取; $(T_k^i - T_k^j)^{cal}$ 为地震对理论到时差, 可通过给定速度模型正演计算. 对于相邻地震对, 由于到达同一个地震台站的射线路径在源区外几乎重合, 它们的走时差主要反映了源区内速度模型的影响.

双差层析成像方法同时使用地震绝对走时和相对走时数据来实现三维速度结构和震源参数的联合反演. 在迭代初期, 设置绝对走时数据较大权重, 用来约束地震绝对位置及大尺度速度结构; 后期则给定到时差数据较大权重, 用来约束地震相对位置和源区内的速度结构. 反演过程采用阻尼最小二乘 (LSQR) 算法 (Paige and Saunders, 1982) 求解, 该方法需要设定合适的阻尼 (damp) 因子和平滑 (smooth) 因子, 后者用来约束慢度变化量, 前者同时约束地震位置 and 慢度变化量. 经反复测试, 根据相应参数的均衡曲线, 本研究最终选择的阻尼因子和平滑因子分别为 150 和 15 (图 4a, b). 经过多次迭代反演, 走时残差由初始 0.16 s 降低为 0.04 s (图 4c).

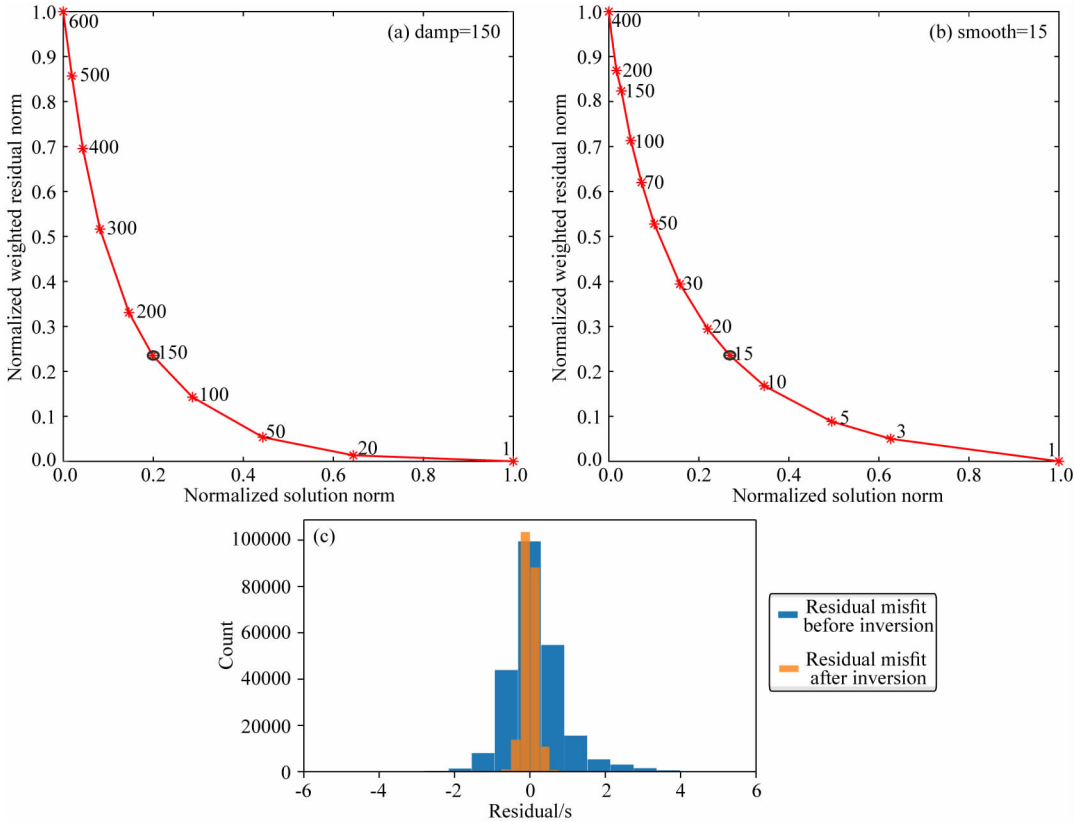


图 4 (a)和(b)分别为阻尼参数、平滑因子均衡曲线,(c)为反演前后的走时残差变化.

反演过程中阻尼和平滑因子两个参数的取值分别为 150 和 15

Fig. 4 (a) and (b) show the equalization curves respectively corresponding to damp and smooth factors. (c) shows the travel-time residual before and after the inversion. The damp factor and smooth factor are respectively set to be 150 and 15 in the inversion

2.4 检测板分辨率测试

在进行速度反演之前,我们对成像结果进行了分辨率模型测试。一般而言,首先设定理论速度模型,按照实际地震射线分布计算理论走时,然后再对理论速度模型施加一定程度的扰动,再次正演计算的走时视为观测走时,选择合适的参数进行反演,通过观察反演结果对扰动后模型的恢复程度来评估模型分辨率。本研究中,设定水平网格大小为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,然后在

网格点施加 $\pm 5\%$ 的速度扰动,按照实际射线路径进行反演。检测板恢复情况如图 5 所示,15 km、20 km、30 km、40 km、50 km 深度上速度模型在射线集中区域(四川盆地及其邻近的龙门山、大凉山次级块体)恢复良好。相比之下,5 km、10 km 及 25 km 深度处模型恢复效果较差,可能由于射线较少或不均匀分布所致。整体来看,根据本文数据集可以对研究区 15~50 km 深度范围内地壳速度结构进行有效约束。

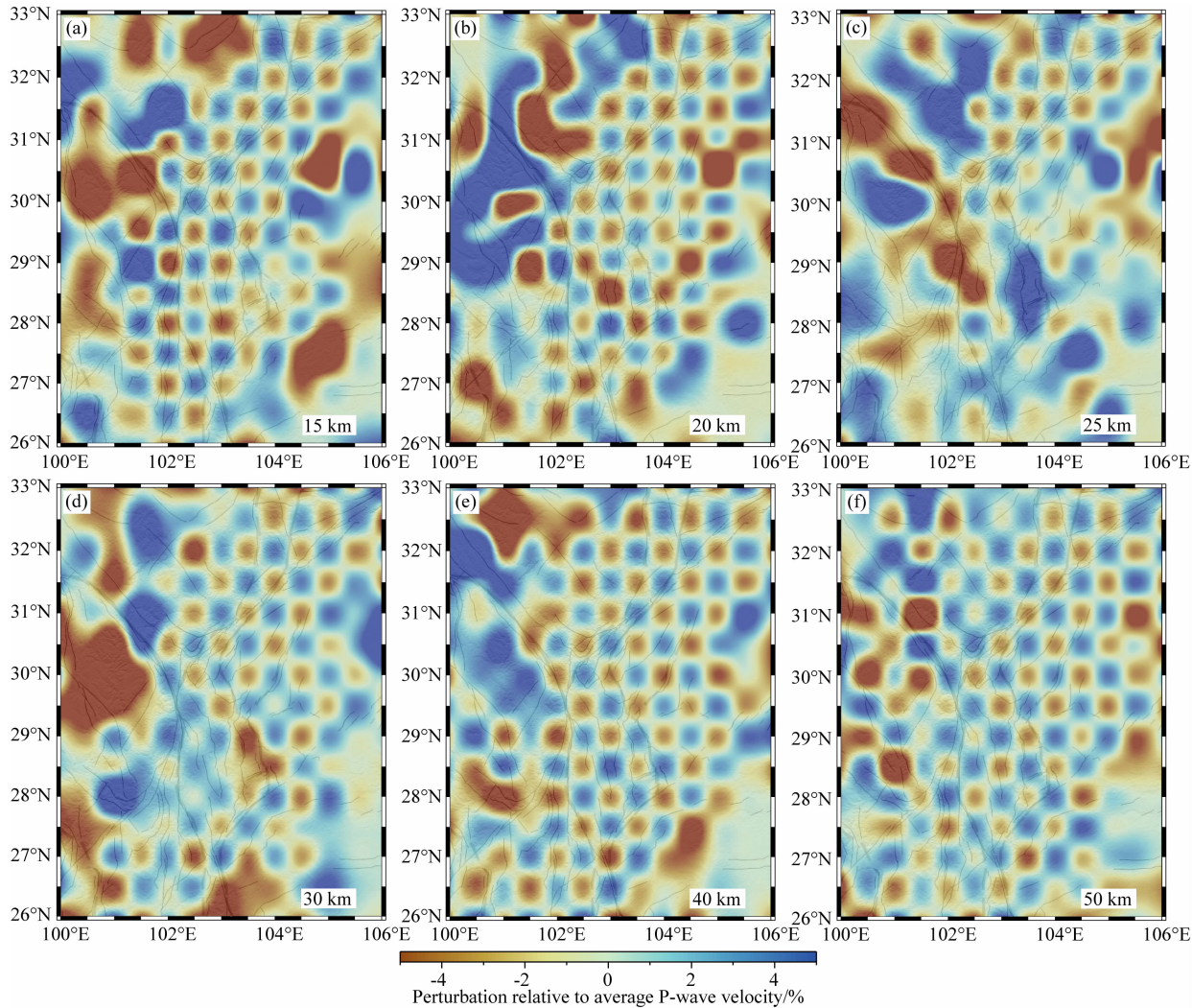


图 5 不同深度检测板恢复测试结果

Fig. 5 Checkboard test results at different depths

3 反演结果

3.1 不同深度 P 波速度结构

图 6 为双差层析成像获得的不同深度处 P 波速度结构。深度 15 km 的速度结构主要反映了上地壳特征,通常与沉积层和造山带分布相关。据航磁、地震和区域地质资料,四川盆地基底在平面上具有三

分性:位于龙门山断裂带和龙泉山断裂带之间的川西凹陷、龙泉山至华蓥山断裂带之间的川中隆起及华蓥山至齐耀山断裂带之间的川东褶皱。其中,川西凹陷基底埋深 7~11 km,川中隆起基底埋深变浅且在威远背斜处最浅(~4 km),而川东褶皱区的基底埋深为 8~11 km(罗志立,1998)。图 6a 中川西地区的低速应该由较厚沉积层导致,而龙泉山和威远背斜附近由于沉积层减薄,基底隆起表现为高速异常。

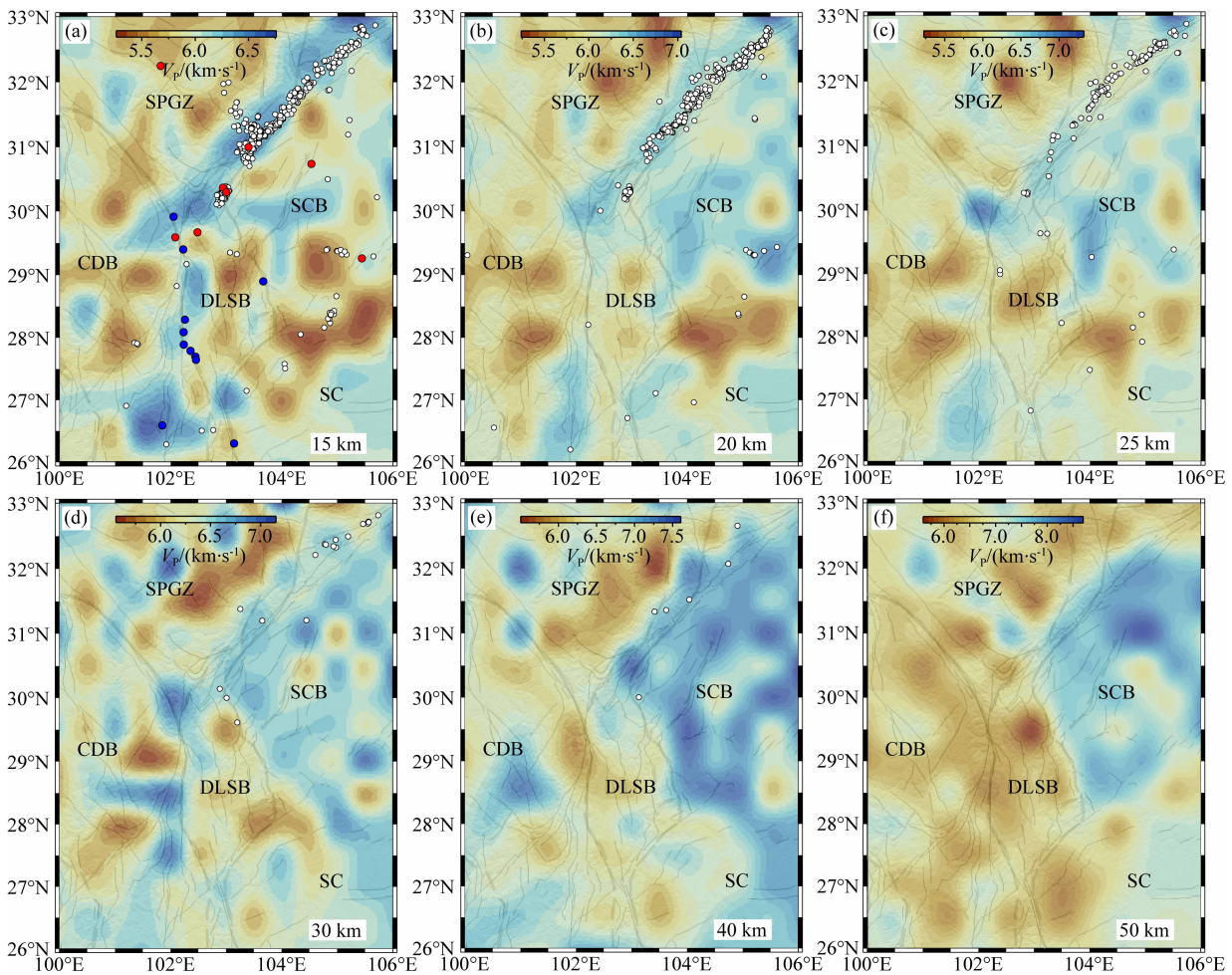


图6 反演获得的不同深度P波速度结构

(a) 红色和蓝色圆圈代表地震,具体参考图2;(a)–(f) 灰白色圆圈代表此深度±5 km 范围内重定位后的地震。
SPGZ:松潘—甘孜块体;CDB:川滇块体;SCB:四川盆地;DLSB:大凉山次级块体;SC:华南块体。

Fig. 6 Horizontal slices of P-wave velocity image at different depths

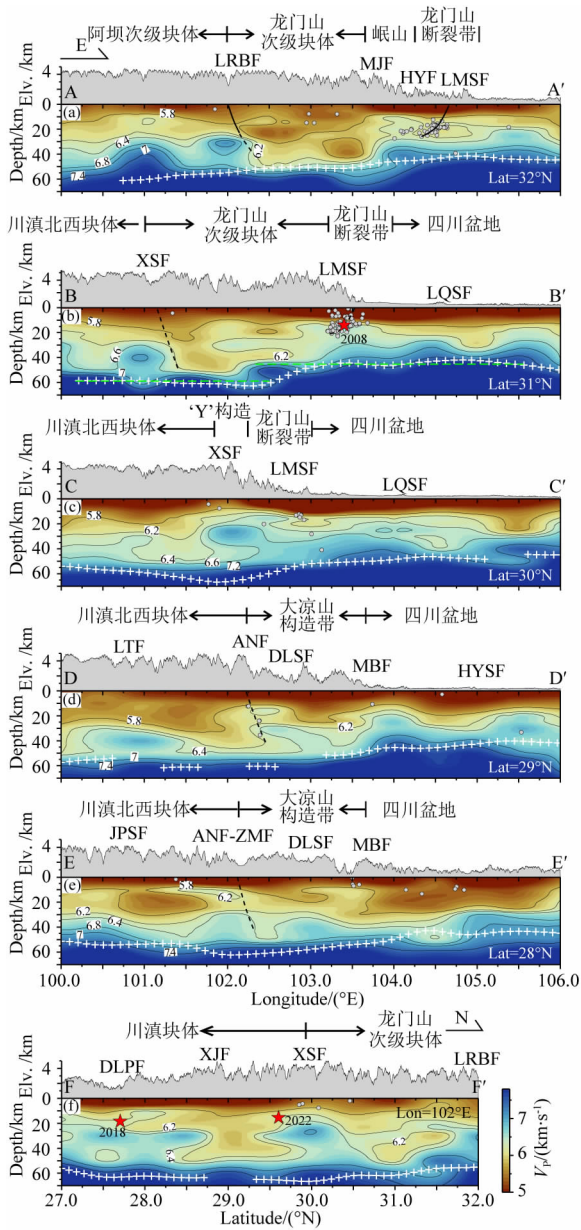
(a) The red and blue dots represent earthquakes, referring to Fig. 2; The off-white circles in (a)–(f) represent relocated earthquakes within ±5 km vertically around that depth. SPGZ: Songpan-Garze Block; CDB: Chuandian Block; SCB: Sichuan Basin; DLSB: Daliangshan subblock; SC: South China Block.

地质研究表明,龙门山—锦屏山造山带出露有大面积前震旦纪变质杂岩,由南至北包括轿子顶杂岩、彭灌—宝兴杂岩以及康定—冕宁—攀枝花一带的杂岩(许志琴等,2007),它们主要由岩浆岩-变质岩组成,岩石物理上其剪切、摩擦强度均远大于周边沉积层,在图6a中表现为沿龙门山—鲜水河—安宁河断裂带附近展布的高速异常条带,该高速异常带向下延伸至中下地壳~30 km(图6b—d).四川盆地内部的低速异常随深度增加逐渐减小,相比之下大凉山、龙门山次级块体整体表现为低速异常,但龙门山次级块体因局部出露花岗岩而致使地震波在中上地壳出现局部高速.

深度40~50 km的速度图主要反映了下地壳至上地幔顶部结构特征.与中上地壳速度分布不同,

西侧以龙门山断裂带、南侧以荣经—马边—盐津断裂带为界,四川盆地整体表现为中下地壳高速异常,而与其相邻的龙门山次级块体和大凉山次级块体对应为低速异常.接收函数结果表明,地壳厚度在四川盆地下方分布在40~50 km范围内且横向变化平缓(Wang et al., 2018),向西越过龙门山断裂带在松潘—甘孜块体下方加深至50~60 km(Zhang et al., 2009;郭晓玉等,2014;Wang et al., 2018),可见图6e—f展示的速度结构与该区域地壳厚度分布存在良好一致性.在深度50 km速度图上,青藏高原由于地壳加厚而相对于同深度的四川盆地岩石圈地幔呈现为整体低速.为进一步讨论青藏高原东缘不同块体变形、接触关系及断裂带特征等,我们绘制了图2中不同剖面下方的垂向速度剖面,如图7所

示,其中圆点代表垂直剖面 20 km 横向宽度范围内的地震事件投影,白色十字代表来自 SWChinaCVM-2.0 模型的莫霍面深度(刘影等,2023).



3.2 不同块体及边界断裂带下方的速度结构

图 7a—f 为本文获得的沿不同纬度方向以及沿 102°E 的 P 波速度剖面,剖面位置为图 2 中 AA'—

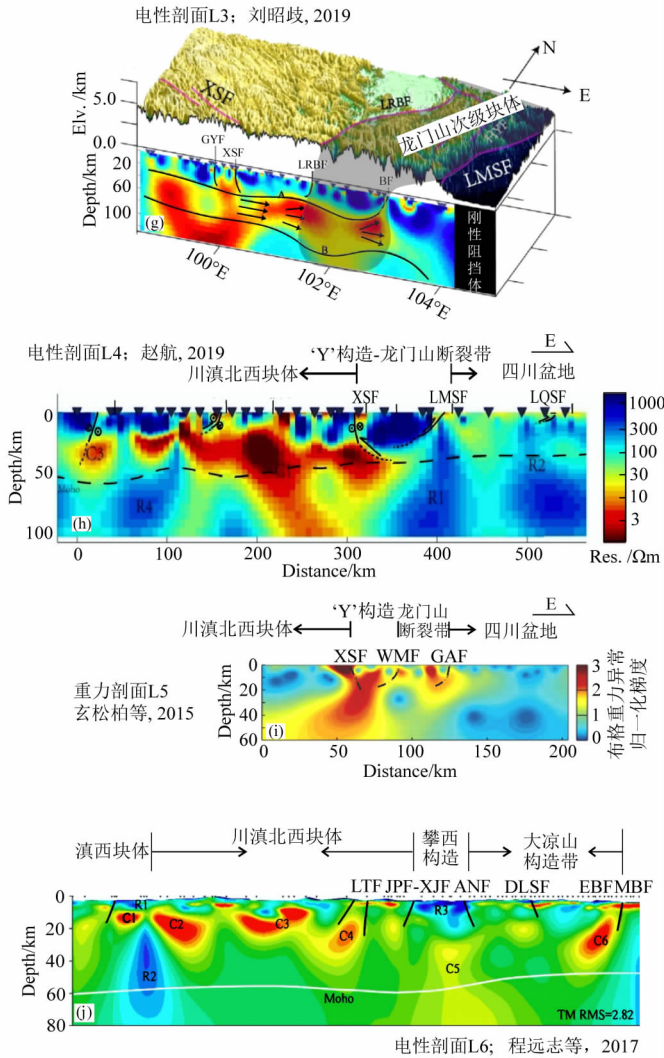


图 7 (a)—(f)分别为本文获得的图 2 中 AA'—FF'剖面下方的 P 波速度结构;(g)为刘昭歧(2019)获得的电性结构,剖面为图 2-L3;(h)和(i)分别为赵航(2019)获得的电性结构、玄松柏等(2015)获得的重力异常梯度结构,剖面为图 2-L4、L5;(j)为程远志等(2017)获得的电性结构,剖面为图 2-L6

(a)—(f)中白色十字代表莫霍面深度(参考 SWChinaCVM-2.0),灰色圆点代表沿剖面横向 20 km 范围内地震事件投影;
(b)中红色五角星为 2008 年汶川地震;(f)中红色五角星分别为 2018 年西昌(左)、2022 年泸定(右)地震.

Fig. 7 (a)—(f) plots respectively show the P wave velocity structure below the AA'—FF' profiles in Fig. 2 obtained in this study; (g) shows the resistivity structure from Liu (2019), corresponding to profile Fig. 2-L3; (h) and (i) respectively show the resistivity structure from Zhao (2019), and the gravity anomaly gradient structure from Xuan et al. (2015), corresponding to profiles Fig. 2-L4, L5; (j) shows the resistivity structure from Cheng et al. (2017), corresponding to profile Fig. 2-L6

The white crosses in (a)—(f) represent Moho structure (referring to SWChinaCVM-2.0), gray dots represent projected seismic events within 20 km distance along the transverse direction for each profile; The red star in (b) indicates 2008 Wenchuan earthquake, and two stars in (f) respectively indicate 2018 Xichang (left) and 2022 Luding (right) earthquakes.

FF'. 整体上看,壳幔速度结构具有分块性特征且与区域构造地质基本一致;SWChinaCVM-2.0 模型(刘影等,2023)给出的莫霍面深度与速度等值线 $\sim 7.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 吻合较好;四川盆地表现为上地壳低速、低阻,下地壳高速、高阻的二层结构,反映出上覆沉积盖层与下伏稳定的克拉通结晶基底的构造特征;龙门山断裂带下方也显示地壳浅部为低速、深部为高速,前者与断裂带活动有关,后者对应扬子块体结晶基底,整体反映出其由西向东的逆冲推覆特征。

沿 32°N 剖面 AA' 横跨松潘—甘孜块体、龙门山断裂带,向东伸入四川盆地,图 7a 为其对应速度剖面,明显特征是龙门山次级块体下方速度结构复杂,且相比于两侧块体速度值明显偏低;图 7g 展示了一条紧挨 AA' 南侧的电性结构剖面(L3),指示松潘—甘孜块体存在显著中下地壳低阻层,该低阻层在龙门山次级块体下方存在“大肚”现象,在接近龙门山断裂带时浅部向上抬升、深部向下加深(刘昭歧,2019),与本文速度结构表现一致。一般情况下,断裂在深部表现为速度结构的突变,以串珠状、倾斜舌状低速或变换强烈的横向速度梯度带为标志(王夫运等,2008;侯爵等,2023)。从图 7a 看,中下地壳速度等值线在龙日坝断裂带(LRBF)和龙门山断裂带(LMSF)下方均发生抬升,由变化趋势判断龙日坝断裂带深部倾向南东,向下至少延伸到 $20 \sim 25 \text{ km}$;龙门山断裂带倾向北西,向下也延伸至此深度范围,与地震分布一致。

沿 31°N 剖面 BB' 横跨川滇北西块体、龙门山次级块体、龙门山断裂带和四川盆地,图 7b 为其对应速度剖面。该剖面显著特征之一是下地壳速度等值线变化最剧烈的地方位于龙门山断裂带以西约 102.5°E 附近,SWChinaCVM-2.0 模型给出的莫霍面深度在此处也开始抬升,该界线以西地壳厚度约 $55 \sim 60 \text{ km}$,东边龙门山断裂带和四川盆地下方地壳厚度减小到 $40 \sim 45 \text{ km}$ 。沿 30°N 剖面 CC' 横跨川滇北西块体、“Y”字型构造,伸入四川盆地内龙泉山背斜以东,图 7c 为对应速度剖面,图 7h—i 分别为赵航(2019)获得的电性结构和玄松柏等(2015)获得的重力异常梯度结构(剖面位置为图 2-L4, L5)。不难看出,西段川滇北西块体存在明显中下地壳低速、低阻异常,东段龙门山断裂带及四川盆地中下地壳为高速、高阻异常,两者之间“Y”字型构造带下方为介质性质(速度、电阻率及重力异常)发生转换的过

渡带或梯度带;根据图 7b—c 中速度等值线变化,推测鲜水河断裂带(XSF)以较陡倾角向南东倾斜,向下至少延伸到中下地壳,表明其是分割块体的深大边界断裂(王椿镛等,2003;Bai et al., 2010)。

图 7d 和 e 分别为沿 29°N 、 28°N 剖面下方的垂向速度结构,对应剖面 DD' 和 EE' 自西向东横跨川滇北西块体、大凉山次级块体及四川盆地;图 7j 为剖面 L6 下方的电性结构(程远志等,2017),与 DD'、EE' 平行且位于两者之间;结果同样显示川滇北西块体存在壳内低速、低阻异常区,大凉山次级块体中上地壳也表现为低速;速度等值线在大凉山次级块体东西两侧边界断裂带下方存在突然变化,依据变化趋势推测安宁河断裂带(ANF)深部以陡倾角向南东倾,马边断裂带(MBF)倾角也较大但向北西倾斜;大凉山断裂带(DLSF)下方 20 km 以浅存在东倾的舌状低速异常,电性剖面对应位置处呈现为低阻异常。王夫运等(2008)沿盐源—西昌—马湖一线实施的人工源深地震测深实验,同样揭示安宁河、大凉山断裂带深部均向东倾斜且为规模较大的基底断裂。图 7f 为沿 102°E 剖面 FF' 下方的速度结构,显示以鲜水河断裂带为界,以南川滇北西块体、以北龙门山次级块体地壳呈现明显低速;小金河断裂带(XJF)和鲜水河断裂带(XSF)下方速度等值线发生明显变化,暗示两者均延伸到地壳深部。

3.3 速度图上地震分布特征

地震孕育的深部构造背景一直是地球科学关注的热点问题之一。从地球物理探测揭示的深部结构来看:地震多发生在地震波速(窦立婷等,2021)、电阻率(王绪本等,2017)、重力异常(姜永涛等,2015)及大地热流(唐晗晗等,2020)等介质物性参数发生变化的过渡带或梯度带上,位于断裂带内部或附近区域。本文研究区域内的龙门山断裂带、鲜水河—安宁河断裂带、虎牙断裂带等多条活动断层都是发震构造,从 7b、f 展示的速度剖面上看,2008 年 $M_s 8.0$ 汶川、2018 年 $M_s 5.1$ 西昌及 2022 年 $M_s 6.8$ 泸定地震均发生在高-低速过渡区。汶川地震的发震断层为龙门山中央断裂带(陈运泰等,2013),泸定地震的发震断层为鲜水河断裂带(徐泰然等,2022)。西昌地震的发震断层可能为金河—菁河断裂带与安宁河断裂带之间的得力铺断裂(DLPF),该断裂走向近南北、以陡倾角向西倾斜,运动学性质为左旋走滑(魏娅玲等,2020),从图 7f 速度结构推测其向下延伸至地壳介脆-韧性转换深度范围 $15 \sim 20 \text{ km}$ 。

4 讨论

龙门山断裂带和龙日坝断裂带构成龙门山次级块体东、西边界。目前有关青藏高原东缘隆升变形模式大多着眼于龙门山断裂带的重要性,而忽视了龙门山次级块体及龙日坝断裂带在构造变形、应变分配及传递中的作用。图 7a 速度结构表明龙门山次级块体相比于邻近块体地壳速度整体偏低。为进一步探讨导致这一现象的原因,我们沿 Zhao 等(2012)实施的两条大地电磁剖面位置(图 2-L1, L2)绘制了相应速度

剖面(图 2-GG', HH'),其中 HH'剖面位置与 Guo 等(2015)实施的人工源深地震反射剖面近乎重合。图 8a—b、c—d 分别对应 L2、L1 剖面下方的速度和电性结构。HH'和 GG'在姜永涛等(2015)川滇地区剩余重力异常图上的位置如图 9b 所示,揭示两条剖面下方龙门山次级块体地壳介质密度异常偏低。综合速度、电性和密度特征,可以得出:龙门山次级块体相比于东侧龙门山断裂带和四川盆地地壳呈现显著低速、低阻、低密度特征。此外,图 8a、d 中速度等值线变化趋势指示龙日坝断裂带深部向南东倾斜、龙门山断裂带则向北西倾斜,与前述观测现象一致。

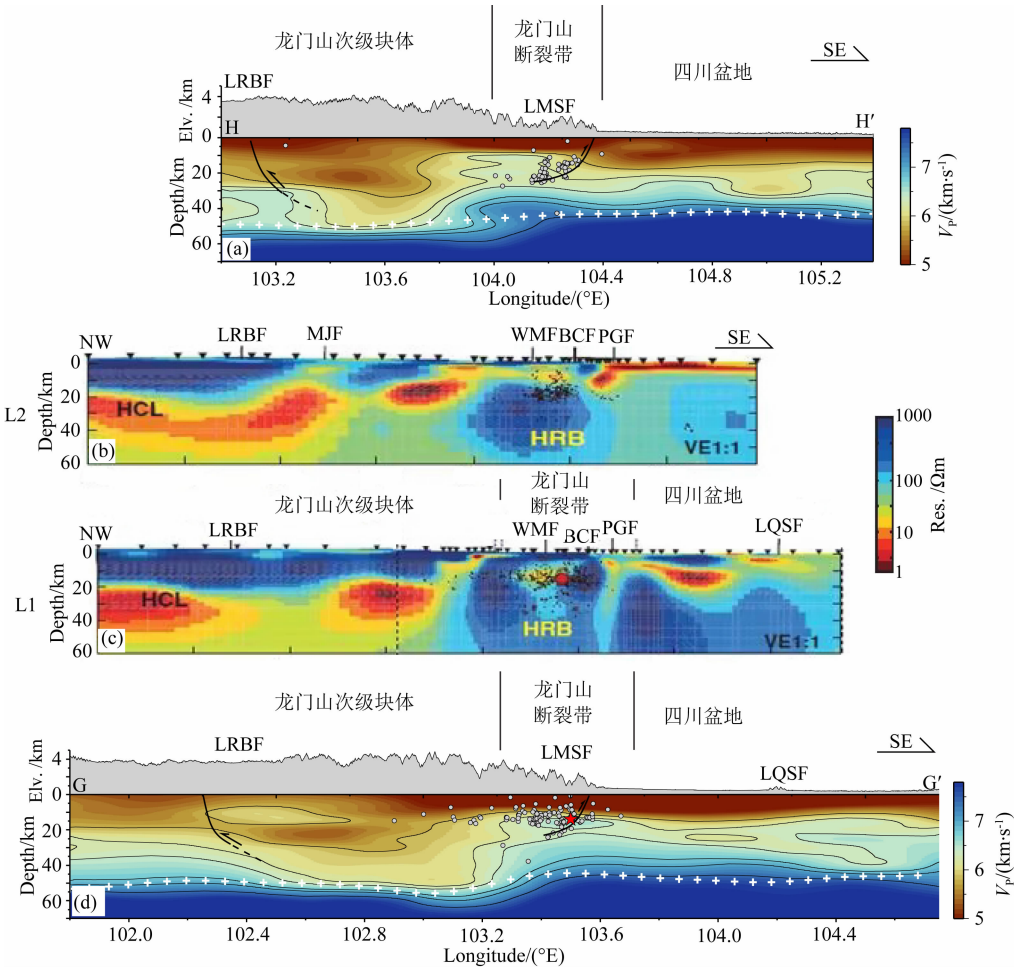


图 8 (a)和(d)分别为图 2 中 HH' 和 GG'剖面下方的 P 波速度结构,(b)和(c)为 Zhao 等(2012)获得的类似剖面位置(图 2-L2, L1)下方的电性结构

(c)、(d)中红色五角星为 2008 年汶川地震。LRBF:龙日坝断裂带;LMSF:龙门山断裂带;LQSF:龙泉山断裂带。

Fig. 8 (a) and (d) show the P wave velocity structures respectively under HH' and GG' profiles in Fig. 2, (b) and (c) show the resistivity structures obtained by Zhao et al. (2012), the profile locations are Figs. 2-L2, L1 The red star in (c) and (d) represents 2008 Wenchuan earthquake. LRBF: Longriba fault zone; LMSF: Longmenshan fault zone; LQSF: Longquanshan fault zone.

根据 GPS 研究(图 9a),块体水平运动速率向东跨过龙日坝断裂带后,在龙门山次级块体明显减小(Liang et al., 2013)。姜永涛等(2015)对川滇地区

开展了重力学研究,结果发现(1)龙门山次级块体地形低于阿坝次级块体,但其自由空气重力异常值却比西侧阿坝次级块体高;(2)剩余重力异常(将

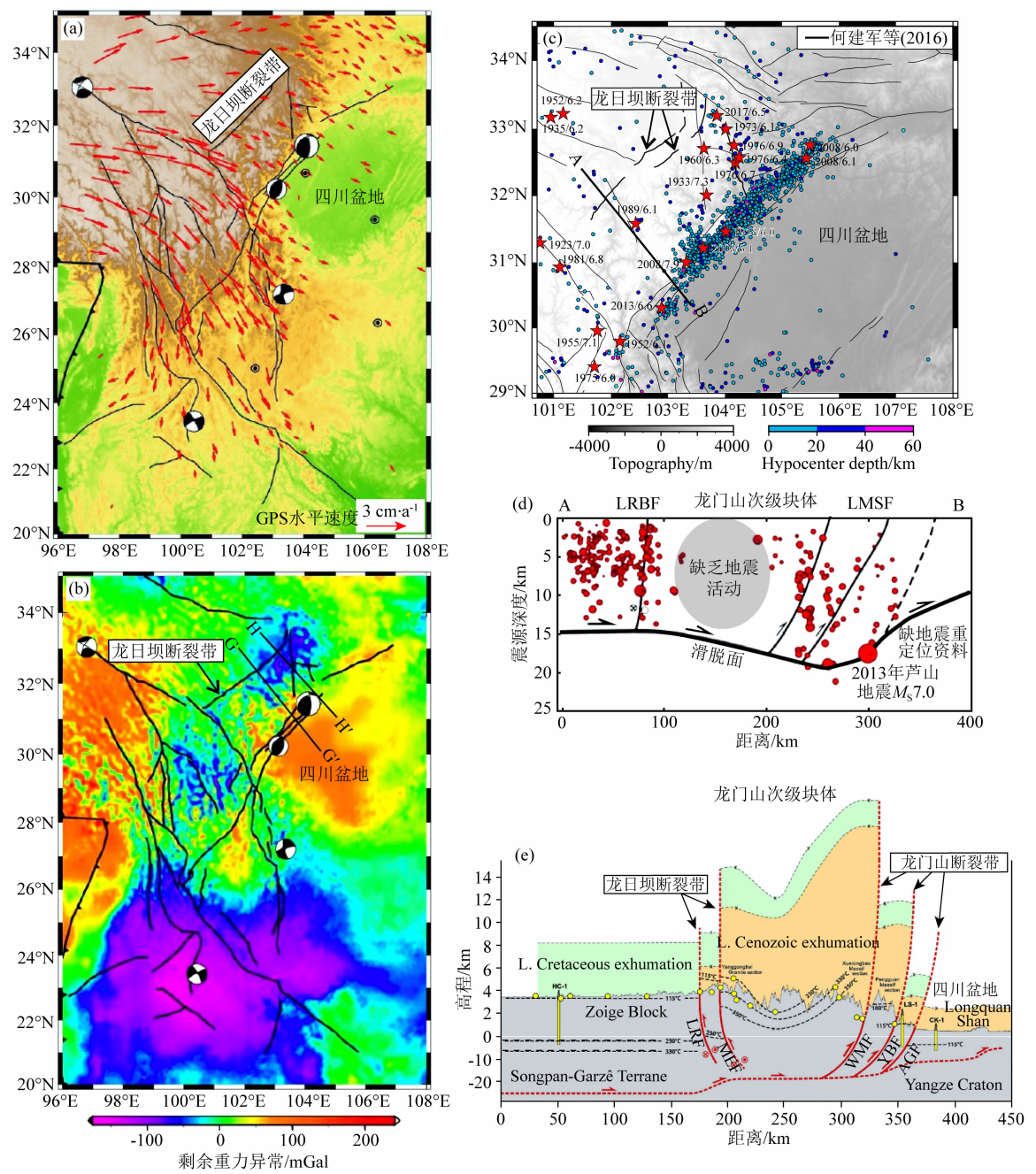


图 9 (a) 1999—2013 年测量的 GPS 水平运动速率向东跨过龙日坝断裂带,在龙门山次级块体发生了明显减小(Liang et al. , 2013); (b) 川滇地区剩余重力异常(姜永涛等,2015); (c) 扬子块体西缘与青藏高原东缘构造接触带内地震活动性分布(震级 ≥ 3.0 ;来源美国地质调查局); (d) 沿图(c)中 A-B 线地震重定位深度剖面(何建军等,2016); (e) 根据低温热年代学资料绘制的青藏高原东部“双向造山楔”示意图 (Li et al. , 2023)

Fig. 9 (a) The GPS horizontal velocity measured during 1999—2013 has noticeably decreased within the Longmenshan subblock to the east of Longriba fault zone (Liang et al. , 2013); (b) The residual gravity anomaly in Sichuan-Yunnan region (Jiang et al. , 2015); (c) The earthquake activity distribution in the conjunction zone between the western margin of the Yangtze Block and the eastern margin of the Tibetan Plateau (Magnitude ≥ 3.0 ; Source: United States Geological Survey); (d) The hypocenter depth beneath the AB profile in panel (c) (He et al. , 2016); (e) The sketch of doubly-vergent wedge structure of the eastern Tibetan Plateau derived from low-temperature thermochronology data (Li et al. , 2023)

Moho 起伏引起的地表重力异常从区域布格重力异常中去掉)在龙日坝断裂带两侧存在差异,在龙门山次级块体内部存在南北分异性. 一般而言,地形越高对应自由空气重力异常值越大,剩余重力异常则反映了地壳介质密度异常. 如图 9b 所示,龙门山次级块体北部为负异常,表示介质密度低,与观测到的低

速、低阻特征相吻合;南部为正异常,表明介质密度异常相比于北部偏高,可能反映了龙门山次级块体南部构造挤压更为强烈,造成介质密度增加。据研究,以北川—安县一线为界,沿走向可以将龙门山断裂带分为南、北两段,两者在断层倾角、运动学性质、地震活动性、构造演化历史等方面均有差异(李智武等,2008;邵崇建,2019),表现为南段新生代构造变形更为强烈,逆冲推覆作用一直向东扩展至四川盆地内部,造成大邑、熊坡、龙泉山、威远等一系列背斜褶皱及伴生断裂。龙门山断裂带南北分段性特征,可能与西侧龙门山次级块体南北地壳介质的密度分异有关,密度增加的介质使得青藏高原向东运动的推覆力更容易传递到龙门山断裂带且传播距离也更远。

青藏高原东缘地震活动性如图 9c 所示,地震目录参考 USGS-NEIC (United States Geological Survey-National Earthquake Information Center, 美国地质调查局-国家地震信息中心),震级 ≥ 3.0 , 时间范围 1908—2021 年,可见地震活动集中分布在岷山断块—龙门山断裂带。四川盆地具有稳定克拉通基底,历史地震活动性本也不高,但龙门山次级块体处于青藏高原东缘与扬子块体西缘强烈碰撞挤压区,现今块体内部地震活动性明显偏弱,尤其是龙日坝断裂带作为一条重要的活动断裂带,却没有现代地震记录。图 9d 为何建军等(2016)地震重定位研究获得的图 9c-AB 剖面附近垂向地震分布,可以更清楚的看到龙门山次级块体缺乏地震活动,龙日坝断裂带(LRBF)仅有一些小震分布且指示该条断裂带倾角很陡。根据本文速度结构及前述内容,我们推测该地区介质力学性质相对较弱,累积应变能主要被地层褶皱和地壳缩短吸收从而造成中强地震缺失。Li 等(2023)根据低温热年代学研究,发现龙日坝断裂带与汶川—茂县断裂之间(即龙门山次级块体)容纳了宽达 ~ 150 km 的晚新生代快速剥露带,最大剥露幅度超过 15 km,说明晚新生代该块体发生过快速隆升;他们提出龙日坝断裂带(包括西支龙日曲断裂和东支毛尔盖断裂)在深部应该为倾向南东的反冲构造,与倾向北西的龙门山构造带组成了“双向造山楔”构造模式(图 9d),共同调节晚新生代青藏高原东缘隆升变形,显然本文速度结构也支持这种断裂几何学特征。

综上所述,我们认为龙门山次级块体地壳低速可能与该区域构造挤压强烈、介质密度分异调整有关。该块体地壳介质相比于四川盆地相对较软,不易

发生脆性破裂导致现今缺乏地震活动,转而在遭受晚新生代青藏高原向东运动遭遇扬子克拉通阻挡后以垂向地壳缩短增厚、地表褶皱隆升变形为主要特征。除龙门山断裂带外,龙日坝断裂带在青藏高原东缘应变分配中也应起重要作用,两者倾角不同在应变分配过程中承担的角色也不同:龙门山断裂带因倾角较缓以逆冲运动为主要特征,调节吸收地壳缩短量,而龙日坝断裂带因倾角较陡主要吸收水平走滑变形。

5 结论

(1)龙门山次级块体相比于龙门山断裂带和四川盆地呈现低速特征,结合该区域低阻、低密度、地震活动性缺乏等特征,推测该块体地壳介质岩石力学性质“相对较软”,不易脆性破裂产生地震,其累积应变能释放的主要形式为地壳缩短、地表隆升变形。

(2)根据速度等值线变化,推测龙日坝断裂带深部向东南倾斜且倾角较陡,为倾向北西的龙门山推覆构造系统的反冲构造,两者在调节青藏高原东缘晚新生代构造隆升变形中都起重要作用。其中,龙门山断裂带倾角较缓,主要以逆冲运动导致地壳缩短和山体隆升;龙日坝断裂带倾角较陡,主要以走滑运动吸收块体之间的水平运动差异。

(3)根据该区速度剖面、电性剖面及重力异常的联合约束,推测鲜水河、安宁河断裂带均以较大倾角向东倾斜,至少延伸至中下地壳;大凉山、得力铺断裂带向下延伸至少达 15~20 km 深度。

致谢 谨以此文祝贺滕吉文先生 90 华诞暨从事地球物理工作 70 年。感谢中国科学院地质与地球物理研究所苗来成研究员和白志明副研究员对本文提出的宝贵建议。

References

- Ansberque C, Godard V, Olivetti V, et al. 2018. Differential exhumation across the Longriba fault system: Implications for the Eastern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 37(2): 663-679, doi: 10.1002/2017TC004816.
- Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nature Geoscience*, 3(5): 358-362, doi: 10.1038/ngeo830.
- Burchfiel B C, Chen Z L, Liu Y P, et al. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, Central China. *International Geology Review*, 37(8): 661-735, doi: 10.1080/00206819509465424.

- Chen Y T, Yang Z X, Zhang Y, et al. 2013. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake. *Scientia Sinica Terrae* (in Chinese), 43(6): 1064-1072.
- Cheng Y Z, Tang J, Cai J T, et al. 2017. Deep electrical structure beneath the Sichuan-Yunnan area in the eastern margin of the Tibetan plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2425-2441, doi: 10.6038/cjg20170631.
- Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. 1994. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 16(4): 389-403.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. 2002. Basic characteristics of active tectonics of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(4): 356-372, doi: 10.1360/03yd9032.
- Deng S Q, Zhang W B, Yu X W, et al. 2021. Three-dimensional P-wave velocity structure in Sichuan-Yunnan area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 36(3): 863-876, doi: 10.6038/pg2021EE0254.
- Deng W Z, Chen J H, Guo B, et al. 2014. Fine velocity structure of the Longmenshan fault zone by double-difference tomography. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(4): 1101-1110, doi: 10.6038/cjg20140408.
- Dou L T, Yao H J, Fang L H, et al. 2021. High-resolution crustal velocity structure in the Shanxi rift zone and its tectonic implications. *Science China Earth Sciences*, 64(5): 728-743.
- Feng J H, Chen L C, Wang H, et al. 2021. Paleoseismologic study on the Shimian Fault in the northern section of the Daliangshan fault zone. *Seismology and Geology* (in Chinese), 43(1): 53-71.
- Guo X Y, Gao R, Keller G R, et al. 2014. Integrated geophysical study on the tectonic feature of the Longriba fault zone, eastern Tibetan Plateau, and the tectonic implications. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(5): 2004-2012, doi: 10.6038/pg20140503.
- Guo X Y, Gao R, Xu X, et al. 2015. Longriba fault zone in eastern Tibet: An important tectonic boundary marking the westernmost edge of the Yangtze block. *Tectonics*, 34(5): 970-985, doi: 10.1002/2015TC003880.
- He J J, Ren J J, Ding R, et al. 2016. Late Quaternary activity of the southern segment of Longriba fault zone in Eastern Tibet and its tectonic implications. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 11(4): 707-721.
- Hou J, Pan J T, Li Y H, et al. 2023. Crustal S-wave velocity structure in the western and central North China Craton and its geological significance. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 66(5): 1960-1975, doi: 10.6038/cjg2022Q0287.
- Huang W, Jiang W L. 2012. Discussion on the Late Quaternary activity and earthquake risk potential of Longquanshan fault in Sichuan. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 34(1): 50-56.
- Huang Z C, Ji C, Wu H T, et al. 2021. Review on the crustal structures and deformations in the southeastern margin of the Tibetan Plateau. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics* (in Chinese), 52(3): 291-307.
- Hubbard J, Shaw J H. 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan ($M=7.9$) earthquake. *Nature*, 458(7235): 194-197, doi: 10.1038/nature07837.
- Jiang Y R, Ning J Y, Li C L. 2021. The earthquake distribution and crustal velocity structure in Sichuan-Yunnan region from double-difference seismic tomography. *North China Earthquake Sciences* (in Chinese), 39(2): 17-26.
- Jiang Y T, Zhang Y Z, Wang L M, et al. 2015. The characteristics of gravity fields in Sichuan-Yunnan region and its relationship with regional earthquakes. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(5): 1990-1994, doi: 10.6038/pg20150502.
- Kissling E, Ellsworth W L, Eberhart-Phillips D, et al. 1994. Initial reference models in local earthquake tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10): 19635-19646, doi: 10.1029/93JB03138.
- Lei H R, Zhou Y S, Yao W M, et al. 2022. Earthquake nucleation conditions of Anninghe Fault: constraints from frictional experiments on natural granite gouge. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 65(3): 978-991, doi: 10.6038/cjg2022P0248.
- Li D D, Tang X G, Xiong Z T. 2023. Crustal density structure of the eastern Tibetan Plateau and its geodynamic implications. *Seismology and Geology* (in Chinese), 45(4): 936-951.
- Li J Y, Zhou B G, Li T M, et al. 2020. Seismogenic depths of the Anninghe-Zemuhe and Daliangshan fault zones and their seismic hazards. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(10): 3669-3682, doi: 10.6038/cjg2020N0201.
- Li Y, Su D C, Dong S L, et al. 2011. The recognition of the basal unconformity in the Longmenshan foreland basin: Transition from passive continent margin to foreland basin. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 27(8): 2413-2422.
- Li Z W, Kamp P J J, Liu S G, et al. 2023. Late Cretaceous-Cenozoic thermal structure and exhumation of the Eastern Tibetan Plateau margin: A doubly-vergent orogenic wedge. *Earth-Science Reviews*, 238: 104319, doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104319.
- Li Z W, Liu S G, Chen H D, et al. 2008. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt, West Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 35(4): 440-454.
- Liang S M, Gan W J, Shen C Z, et al. 2013. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(10): 5722-5732, doi: 10.1002/2013JB010503.
- Liu W, Wu Q J, Zhang F X. 2019. Crustal structure of southeastern Tibetan Plateau inferred from double-difference tomography. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 41(2): 155-168.
- Liu Y, Yu Z Y, Zhang Z Q, et al. 2023. The high-resolution community velocity model V2.0 of southwest China, constructed by joint body and surface wave tomography of data recorded at temporary dense arrays. *Science China Earth Sciences*, 66(10): 2368-2385, doi: 10.1007/s11430-022-1161-7.

- Liu Z Q. 2019. Study on electrical structure in the southern and surrounding areas of Songpan-Ganzi Block [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Lou Z L. 1998. New recognition of basement in Sichuan Basin. *Journal of Chengdu University of Technology* (in Chinese), 25(2): 191-201.
- Min G, Wang X B, Xia S B, et al. 2017. Electrical structure of middle and upper crust beneath the Minshan uplift zone and central section of the West Qinling orogenic zone. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2397-2413, doi: 10.6038/cjg20170629.
- Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8(1): 43-71, doi: 10.1145/355984.355989.
- Ren J J. 2013. Late Quaternary activity of the Longriba fault zone and its kinematic relations with adjacent faults [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration.
- Shao C J. 2019. Study on the tectonic geomorphology feature and the strain differential transfer mechanism of the Longmenshan [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Shen Z K, Lü J N, Wang M, et al. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110 (B11): B11409, doi: 10.1029/2004JB003421.
- Song F M, Li R C, Xu X W. 2002. Preliminary results of the investigation of paleo-earthquakes along the Daliangshan fault zone, Sichuan Province, China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 24 (1): 27-34.
- Tang H H, Guo L H, Fang Y. 2020. Estimation of heat flow in southeastern margin of Tibetan Plateau and its analysis of the correlation with earthquake activity. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(3): 1056-1069, doi: 10.6038/cjg2019N0045.
- Thurber C H. 1992. Hypocenter-velocity structure coupling in local earthquake tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 75 (1-3): 55-62, doi: 10.1016/0031-9201(92)90117-E.
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. 2003. Crustal structure beneath the Songpan-Garze orogenic belt. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 25(3): 229-241, doi: 10.3321/j.issn:0253-3782.2003.03.001.
- Wang F Y, Duan Y H, Yang Z X, et al. 2008. Velocity structure and active fault of Yanyuan-Mabian seismic zone—The result of high-resolution seismic refraction experiment. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(9): 1284-1296.
- Wang X B, Yu N, Gao S, et al. 2017. Research progress in research on electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of the Tibetan plateau. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(6): 2350-2370, doi: 10.6038/cjg20170626.
- Wang X, Chen L, Ai Y S, et al. 2018. Crustal structure and deformation beneath eastern and northeastern Tibet revealed by P-wave receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 497 (1): 69-79, doi: 10.1016/j.epsl.2018.06.007.
- Wang Z, Wang J, Fu X G. 2021. Deep structure and crustal deformation in the Tethys tectonic domain of the eastern Xizang (Tibetan) margin—Yangtze Platform. *Geological Review* (in Chinese), 67(1): 1-13.
- Wei Y L, Cai Y C, Lou S, et al. 2020. Study on seismic structure of Xichang $M_{5.1}$ earthquake in Sichuan Province. *Earthquake Research in Sichuan* (in Chinese), (3): 40-46.
- Wu G L, Zhu C Y, Wang G C, et al. 2019. Demarcation of the geomorphological boundaries of southeastern Tibet: Implications for expansion mechanisms of the plateau edge. *Seismology and Geology* (in Chinese), 41(2): 281-299.
- Xu T R, Dai D Q, Yang Z G, et al. 2022. Preliminary study of emergency production and source parameters of the $M_{6.8}$ Earthquake on September 05, 2022 in Luding, Sichuan Province. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 38(3): 412-424.
- Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. 2008. The $M_{8.0}$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 30(3): 597-629.
- Xu Z Q, Li H Q, Hou L W, et al. 2007. Uplift of the Longmen-Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Large-scale detachment faulting and extrusion mechanism. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 26 (10): 1262-1276.
- 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 Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(11): 4007-4017, doi: 10.6038/cjg20151110.
- Yi G X, Long F, Liang M J, et al. 2017. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017 $M_{7.0}$ Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 4083-4097, doi: 10.6038/cjg20171033.
- Yi G X, Long F, Zhao M, et al. 2016. Focal mechanism and seismogenic structure of the $M_{5.0}$ Yuexi Earthquakes on 1 Oct. 2014, southwestern China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 38(4): 1124-1136.
- Zhang H J, Thurber C H. 2003. Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5): 1875-1889, doi: 10.1785/0120020190.
- Zhang L T, Jin S, Wei W B, et al. 2012. Electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of the Tibetan plateau and the Sichuan basin. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(12): 4126-4137, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.025.
- Zhang P Z, Wang Q, Ma Z J. 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 9(2): 442-450.

Zhang Q G, Peng X H, Zhu J H. 2019. Characteristics and activity of the Mabian-Leibo-Ebian-Jinyang major fault. *Acta Geologica Sichuan* (in Chinese), 39(1): 30-33.

Zhang Z J, Wang Y H, Chen Y, et al. 2009. Crustal structure across Longmenshan fault belt from passive source seismic profiling. *Geophysical Research Letters*, 36(17): L17310, doi: 10.1029/2009GL039580.

Zhao G P. 2016. Structure character research of the Daliang mountain in the southern margin of Sichuan basin [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.

Zhao G Z, Unsworth M J, Zhan Y, et al. 2012. Crustal structure and rheology of the Longmenshan and Wenchuan $M_w7.9$ earthquake epicentral area from magnetotelluric data. *Geology*, 40(12): 1139-1142, doi: 10.1130/G33703.1.

Zhao H. 2019. Study on the electrical structure of crust-mantle in the western Sichuan Plateau and Sichuan Basin [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).

Zhou R J, Li X G, Huang Z Z, et al. 2003. Average slip rate of Daliang mountain fault zone in Sichuan in Late Quaternary period. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 26(2): 191-196.

Zhu W Q, Beroza G C. 2019. PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophysical Journal International*, 216(1): 261-273, doi: 10.1093/gji/ggy423.

附中文参考文献

陈运泰, 杨智娴, 张勇等. 2013. 从汶川地震到芦山地震. 中国科学: 地球科学, 43(6): 1064-1072.

程远志, 汤吉, 蔡军涛等. 2017. 青藏高原东缘川滇构造区深部电性结构特征. 地球物理学报, 60(6): 2425-2441, doi: 10.6038/cjg20170631.

邓起东, 陈社发, 赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. 地震地质, 16(4): 389-403.

邓起东, 张培震, 冉永康等. 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学(D辑), 32(12): 1020-1030.

邓山泉, 章文波, 于湘伟等. 2021. 川滇地区三维 P 波速度结构研究. 地球物理学进展, 36(3): 863-876, doi: 10.6038/pg2021EE0254.

邓文泽, 陈九辉, 郭飏等. 2014. 龙门山断裂带精细速度结构的双差层析成像研究. 地球物理学报, 57(4): 1101-1110, doi: 10.6038/cjg20140408.

窦立婷, 姚华建, 房立华等. 2021. 山西断陷带地区高分辨率地壳速度结构及其构造演化意义. 中国科学: 地球科学, 51(5): 709-724.

冯嘉辉, 陈立春, 王虎等. 2021. 大凉山断裂带北段石棉断裂的古地震. 地震地质, 43(1): 53-71.

郭晓玉, 高锐, Keller G R 等. 2014. 综合地球物理资料揭示青藏高原东缘龙日坝断裂带构造属性和大地构造意义. 地球物理学进展, 29(5): 2004-2012, doi: 10.6038/pg20140503.

何建军, 任俊杰, 丁锐等. 2016. 青藏高原东缘龙日坝断裂带南段晚第四纪活动及其构造意义. 震灾防御技术, 11(4): 707-721.

侯爵, 潘佳铁, 李永华等. 2023. 华北克拉通中西部地壳 S 波速度结构及其地质意义. 地球物理学报, 66(5): 1960-1975, doi: 10.6038/cjg2022Q0287.

黄伟, 江娃利. 2012. 四川龙泉山断裂带及其活动性与潜在地震危险性讨论. 西北地震学报, 34(1): 50-56.

黄周传, 吉聪, 吴寒婷等. 2021. 青藏高原东南缘地壳结构与变形机制研究进展. 地球与行星物理理论评, 52(3): 291-307.

姜永涛, 张永志, 王丽美等. 2015. 川滇地区重力场特征及其与区域强震的关系. 地球物理学进展, 30(5): 1990-1994, doi: 10.6038/pg20150502.

蒋一然, 宁杰远, 李春来. 2021. 川滇地区地震分布及地壳结构的双差地震层析成像. 华北地震科学, 39(2): 17-26.

雷惠如, 周永胜, 姚文明等. 2022. 安宁河断层地震成核条件研究——来自天然花岗岩断层泥摩擦实验的启示. 地球物理学报, 65(3): 978-991, doi: 10.6038/cjg2022P0248.

李丹丹, 唐新功, 熊治涛. 2023. 青藏高原东缘地壳密度结构及其地球动力学意义. 地震地质, 45(4): 936-951.

李姜一, 周本刚, 李铁明等. 2020. 安宁河—则木河断裂带和大凉山断裂带孕震深度研究及其地震危险性. 地球物理学报, 63(10): 3669-3682, doi: 10.6038/cjg2020N0201.

李勇, 苏德辰, 董顺利等. 2011. 龙门山前陆盆地底部不整合面: 被动大陆边缘到前陆盆地的转换. 岩石学报, 27(8): 2413-2422.

李智武, 刘树根, 陈洪德等. 2008. 龙门山冲断带分段-分带性构造格局及其差异变形特征. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 440-454.

刘伟, 吴庆举, 张风雪. 2019. 利用双差层析成像方法反演青藏高原东南缘地壳速度结构. 地震学报, 41(2): 155-168.

刘影, 于子叶, 张智奇等. 2023. 基于密集流动台阵构建的川滇地区高分辨率公共速度模型 2.0 版本. 中国科学: 地球科学, 53(10): 2407-2424, doi: 10.1360/SSTe-2022-0394.

刘昭歧. 2019. 松潘—甘孜地块南部及周边区域电性结构研究[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).

罗志立. 1998. 四川盆地基底结构的新认识. 成都理工学院学报, 25(2): 191-201.

闵刚, 王绪本, 夏时斌等. 2017. 岷山隆起带与西秦岭构造带中段中上地壳电性结构特征. 地球物理学报, 60(6): 2397-2413, doi: 10.6038/cjg20170629.

任俊杰. 2013. 龙日坝断裂带晚第四纪活动及其周边断裂的运动学关系[博士论文]. 北京: 中国地震局地质研究所.

邵崇建. 2019. 龙门山构造地貌特征与应变差异传递机制研究[博士论文]. 成都: 成都理工大学.

宋方敏, 李如成, 徐锡伟. 2002. 四川大凉山断裂带古地震研究初步结果. 地震地质, 24(1): 27-34.

唐哈哈, 郭良辉, 方圆. 2020. 青藏高原东南缘热流估算及与地震活动相关性分析. 地球物理学报, 63(3): 1056-1069, doi: 10.6038/cjg2019N0045.

王椿镛, 韩渭宾, 吴建平. 2003. 松潘—甘孜造山带地壳速度结构. 地震学报, 25(3): 229-241, doi: 10.3321/j.issn:0253-3782.2003.03.001.

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——高分辨率地震折射实验结果. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(5): 611-621.

王绪本, 余年, 高嵩等. 2017. 青藏高原东缘地壳上地幔电性结构研究进展. 地球物理学报, 60(6): 2350-2370, doi: 10.6038/cjg20170626.

王志, 王剑, 付修根. 2021. 青藏高原东缘—扬子特提斯构造域深部结构与地壳形变研究. 地质论评, 67(1): 1-13.

魏娅玲, 蔡一川, 罗松等. 2020. 四川西昌 $M_s5.1$ 地震构造研究. 四川地震, (3): 40-46.

吴贵灵, 祝成宇, 王国灿等. 2019. 青藏高原东南缘地貌边界性质的界定及其对高原东南缘扩展模式的启示. 地震地质, 41(2): 281-299.

徐泰然, 戴丹青, 杨志高等. 2022. 2022 年 9 月 5 日四川泸定 6.8 级地震初步研究结果. 中国地震, 38(3): 412-424.

徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 30(3): 597-629.

许志琴, 李化启, 侯立炜等. 2007. 青藏高原东缘龙门—锦屏造山带的崛起——大型拆离断层和挤出机制. 地质通报, 26(10): 1262-1276.

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.

易桂喜, 龙锋, 梁明剑等. 2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M7.0$ 地震及余震震源机制解与发震构造分析. 地球物理学报, 60(10): 4083-4097, doi: 10.6038/cjg20171033.

易桂喜, 龙锋, 赵敏等. 2016. 2014 年 10 月 1 日越西 $M5.0$ 地震震源机制与发震构造分析. 地震地质, 38(4): 1124-1136.

张乐天, 金胜, 魏文博等. 2012. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究. 地球物理学报, 55(12): 4126-4137, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.025.

张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场. 地学前缘, 9(2): 442-450.

张芹贵, 彭向辉, 祝建华. 2019. 马边—雷波峨边—金阳大断裂构造特征及活动性. 四川地质学报, 39(1): 30-33.

赵高平. 2016. 四川盆地南缘大凉山地区构造特征研究[硕士论文]. 成都: 成都理工大学.

赵航. 2019. 川西高原及四川盆地壳幔电性结构研究[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).

周荣军, 黎小刚, 黄祖智等. 2003. 四川大凉山断裂带的晚第四纪平均滑动速率. 地震研究, 26(2): 191-196.

(本文编辑 何燕)