

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.020>



# 从反射地震剖面认识龙门山断裂带 彭灌杂岩深部结构

于明羽<sup>1,2</sup>, 于常青<sup>2\*</sup>, 瞿辰<sup>2</sup>, 王琪<sup>3</sup>, 曾祥芝<sup>2</sup>, 田镇瑜<sup>2,4</sup>, 郑晓杰<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
3. 中石油东方地球物理公司, 河北涿州 072750
4. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083

**摘要:** 彭灌杂岩位于龙门山断裂带中段, 是龙门山区域地质构造重要组成部分. 通过对一条穿过彭灌杂岩中部的深地震反射剖面进行分析解释, 描述该区域彭灌杂岩深部结构特征及形成机制. 地震反射剖面分析表明彭灌杂岩在纵向上存在分层结构, 且彭灌杂岩存在底界面, 在该区域表现出无根特征, 参考岩体层倾向推断原岩应来自现位置西北方向更深部; 同时剖面能量图上映秀-北川深部断裂位置发育在彭灌杂岩体不同分层间隙, 未破坏彭灌杂岩主岩体深部结构, 彭灌杂岩体浅部的断层发育与龙门山地表断裂系统一致, 表明彭灌杂岩成岩时间早于龙门山构造运动; 综合岩性及成岩时间推断彭灌杂岩源于现有位置的西北方向大陆基底, 由印支期板块运动中松潘陆块基底物质多期次上涌形成, 并在喜山运动期受到西北方向应力推覆隆起到达目前位置.

**关键词:** 彭灌杂岩; 龙门山断裂带; 深地震反射剖面; 构造运动; 构造地质.

中图分类号: P31

文章编号: 1000-2383(2021)05-1737-12

收稿日期: 2020-06-11

## Deep Structural Characteristics of Pengguan Complex in Longmenshan Fault Zone Derived from Seismic Reflective Profile

Yu Mingyu<sup>1,2</sup>, Yu Changqing<sup>2\*</sup>, Qu Chen<sup>2</sup>, Wang Qi<sup>3</sup>, Zeng Xiangzhi<sup>2</sup>, Tian Zhenyu<sup>2,4</sup>, Zheng Xiaojie<sup>2</sup>

1. Hubei Key Laboratory of Subsurface Multi-Scale Imaging, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
3. PetroChina Oriental Geophysical Company, Zhuozhou 072750, China
4. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** Pengguan complex is located in the middle part of Longmenshan fault zone, which is an important part of Longmenshan regional tectonics. In this paper, the deep seismic reflection profile through the long axis of Pengguan complex is analyzed and interpreted, and the deep structural characteristics and formation mechanism of Pengguan complex are described. The analysis of seismic reflection profile shows that Pengguan complex is stratified in depth, with a bottom interface, and Pengguan complex shows rootless characteristics. Based on the analysis of its structural characteristics, it can be inferred that the in-situ rocks come from deeper and more western locations. The development of faults in the shallow part of Pengguan complex is consistent with the

**基金项目:** 国际(地区)合作与交流项目(No.41761134096).

**作者简介:** 于明羽(1993-), 女, 博士, 主要研究方向为地震方法反演及地震数据处理. ORCID: 0000-0001-9594-8205. E-mail: ymy\_2016@126.com

**\*通讯作者:** 于常青, E-mail: geoyucq@qq.com

**引用格式:** 于明羽, 于常青, 瞿辰, 等, 2021. 从反射地震剖面认识龙门山断裂带彭灌杂岩深部结构. 地球科学, 46(5):1737-1748.

surface fault system of Longmenshan Mountain, which indicates that the diagenesis time of Pengguan complex is earlier than that of Longmenshan tectonic movement. At the same time, the Yingxiu-Beichuan fault in the deep part of the section energy map develops stratified gaps in different stages of Pengguan complex rock mass, which means it did not destroy the deep structure of Pengguan complex main rock mass. Referring to lithology and diagenetic time, it is inferred that Pengguan complex originated from the Songpan block basement material which was upwelled by compression during the Indosinian movement, the basement magma upwelled several times during the plate movement, and was uplifted by stress nappe in the northwest direction during the Himalayan movement to its present position.

**Key words:** Pengguan complex; Longmenshan fault zone; deep seismic reflection profile; tectonic movement; tectonics.

## 0 引言

龙门山构造带位于松潘陆块与扬子陆块之间,晚三叠纪印支运动造成松潘—甘孜褶皱带褶皱回返挤压,在这一区域形成一系列逆冲推覆构造带.彭灌杂岩处于松潘陆块向扬子陆块推进的相接区域,主要分布于汶川—茂县断裂与映秀—北川断裂之间,属于龙门山中部的的重要组成部分,因其主成分为花岗岩,加之临近彭县(现彭州)与灌县(现都江堰),在地质填图中以彭灌杂岩命名.它在地面上呈透镜形分布,北东—南西向长约为 105 km,南东—北西向宽约为 30 km,总面积在 1 500 km<sup>2</sup> 以上.2008 年 5 月 12 日中国汶川映秀发生 Ms8.0 级大地震,震源位于龙门山中段的彭灌杂岩体东南与映秀—北川断裂相接处,将研究者的目光再次聚焦于此.

早在 20 世纪末,就有不同的研究学者采用不同方法对彭灌杂岩进行研究,研究包括重力方法、航磁方法、钻孔岩心、岩石年龄测定等(林茂炳和马永旺, 1995;马永旺等, 1996;马永旺和杨尽, 2001;胡元鑫等, 2010; Li *et al.*, 2014a).2008 年汶川地震后,随着龙门山构造带科学钻探岩心的采集以及更多地质研究手段进一步加深了研究者们对这一区域的了解和认识.汶川地震断裂带科学钻孔(WFSD-2)岩心穿过彭灌杂岩东南边界位置,岩心中出现彭灌杂岩体与三叠系须家河组互层结构(李海兵等, 2009; Li *et al.*, 2014a; 吴婵, 2014);彭灌杂岩构造解析认为彭灌杂岩是在深部北西倾向的多个岩体嵌合而成的外来岩体(马永旺等, 1996;马永旺和杨尽, 2001;刘春平和林娟华, 2008; Ma *et al.*, 2014),磁化率各向异性分析和重力模拟研究则表明彭灌杂岩为无根的外来推覆体,并由相似特征推断其原岩地系位于西北方大陆基底(杨钻云等, 2009; Cui *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014);此外地球化学特征对彭灌杂岩成因也进行了新的推断认为彭灌杂岩原岩物质为可

能是底侵的幔源岩浆与下地壳熔融产物混合的结果(张沛等, 2008; Li *et al.*, 2014b).

已有研究成果解释了彭灌杂岩出露区域和近地面构造形态及岩性特征,并推断彭灌杂岩成因模式,但是缺少彭灌杂岩整体发育特征的资料,不能完全支撑其是否属于无根的外来岩体的论证结果,彭灌杂岩内部形态以及底界面是否存在仍然没有确切结论.

## 1 研究区域地质概况及测线位置

施工区域位于四川盆地西北边缘,地理坐标范围为 103°00′~104°00′E, 30°50′~31°30′N,测线南东—北西向依次经过川西前陆盆地和龙门山构造带.工区内地形以山地为主,整体西北高东南低,东南至西北分别是平原地貌、高山地貌和高原地貌,在不到 50 km 的范围内地形高差约达 4 000 m,其中地势最高的九顶山海拔在 4 200 m 左右.山区出露大都属于前震旦纪古老变质杂岩及震旦纪一早中三叠世海相沉积岩,平原地区出露为第四系砾石及砾石上覆浮土层.

施工区域构造包含彭灌杂岩及龙门山构造带的 3 条主断裂,汶川—茂县断裂(龙门山后山断裂)、映秀—北川断裂(龙门山中央断裂)、安县—灌县断裂(龙门山后山断裂),工区内龙门山断裂带埋藏较深,3 条主断裂发育,地层破碎严重,地表破裂带明显,地质情况复杂.勘探主体彭灌杂岩源于印支期造山活动中松潘—甘孜褶皱带向南推覆于扬子地块之上,龙门山中央断裂和后山断裂之间的中晚元古代结晶基底被韧性挤出形成(林娟华和刘春平, 2009; Hubbard and Shaw, 2009).彭灌杂岩是龙门山构造带展布面积最大的杂岩体,北东—南西向约为 105 km,南东—北西向约为 30 km,总面积在 1 500 km<sup>2</sup> 以上.

本次的深部反射地震勘探测线是一条南东—

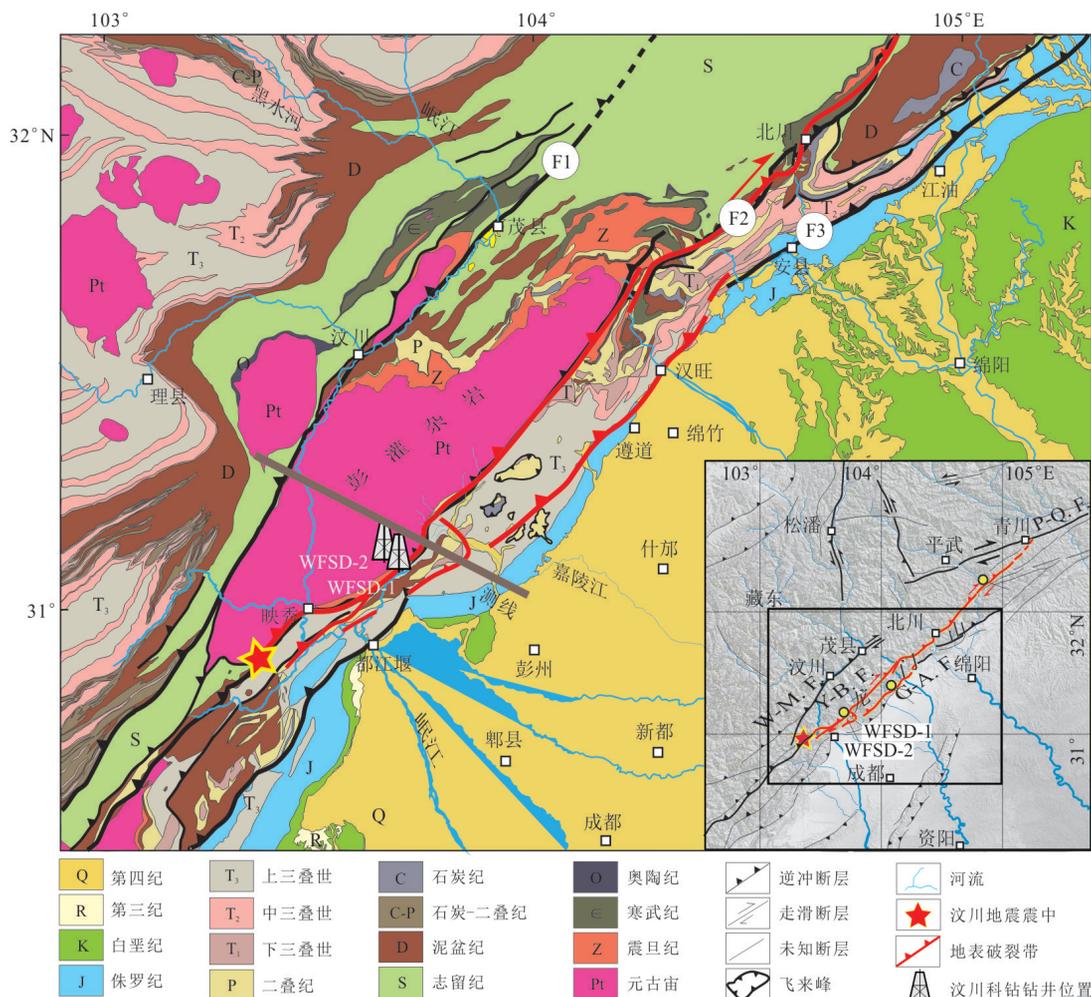


图1 工区构造带主体区域地质及测线位置

Fig.1 Geological and line location map of the main area of the structural belt in the work area

图1 改自李海兵等(2009). F1. 汶川-茂县断裂; F2. 映秀-北川断裂; F3. 安县-灌县断裂; WFSFD-1. 汶川科钻一号井; WFSFD-2. 汶川科钻2号井

北西向穿过彭灌杂岩及龙门山3条主断裂带的测线(图1),长度为47.5 km,共涉及四川省3个地区、5个县市,包括阿坝州的理县、汶川县,成都地区的都江堰、彭州市.测线近似垂直施工区出露的彭灌杂岩长轴方向,对位于测线中部的映秀-北川断裂带覆盖相对完整,该断裂也是本次勘探研究的重点之一.测线穿过映秀-北川断裂与安县-灌县断裂在2008汶川大地震产生的同震地表破裂带(李海兵等,2009; Cui *et al.*, 2014),它们是迄今为止空间上分布最为复杂、长度最大的逆冲型同震地表破裂带(王焕,2015),同时大地震造成这一区域极易发生山体滑坡和泥石流等现象,给勘探造成巨大困难.

## 2 数据采集和资料处理

### 2.1 资料采集

本次数据采集的测线长度为47.5 km,呈NW-SE向横穿彭灌杂岩短轴.针对工区内构造带地表地形因素以及复杂的地下结构,本次勘探采用了小道距、高覆盖、长排列、中小炮结合并在断裂带位置加密炮点的野外布设设置.观测系统道间距为20 m,接收炮距小炮100 m,中炮500 m,接收道为1500,覆盖次数为150~160次,断层部位2 km范围内将炮点距加密成80 m.此外结合工区地表和地下深层地质结构的特点,在工区内划分山体区、丘陵区、平原区、河沟区,通过系统激发试验优选激发参数,对山体、丘陵区采用小炮:1口×20 m×16 kg、中炮:2口×20 m×16 kg;平原区采用小炮:1口×15 m×

16 kg、中炮:2口 $\times$ 15 m $\times$ 16 kg;河道砾石区采用小炮:3口 $\times$ 5 m $\times$ 6 kg、中炮:5口 $\times$ 5 m $\times$ 6 kg的中小炮不同区域不同药量组合.同时地震波接收采用了具有严格允差范围小于2.5%和失真率低于0.1%的SN7C-10HZ超级地震检波器,半径为1 m的圆形面积组合,平原组合高差 $\Delta H < 1$  m,山区 $\Delta H < 3$  m.野外数据采集采样率2 ms,记录长度为30 s.这些技术设施以及观测系统设置是采集资料质量的重要保证.

本次数据采集难度较高,因此需要在满足地质目的前提下,避开高陡地形,降低施工安全风险,提高项目可实施性.其中测线中西部位于九顶山区域,九顶山山高谷深,沟壑纵横,断崖立地形极其复杂,落石伤人、人员坠落发生几率大,施工风险仍然巨大,故这一位置表层测线布置存在缺口,但由于周边炮点加密以及观测系统的大偏移距设置,因此未对深部信息造成影响,浅部信息将参考周边工区已有资料进行补充.

## 2.2 数据处理

本次数据处理采用了深地震反射剖面数据处理常规的共中心点反射地震资料处理方法.主要处理流程包括:基准面静校正、叠前多域去噪、振幅补偿、地表一致性反褶积,速度分析和动校正、多次迭代剩余静校正、叠后反褶积、叠后剖面去噪等,具体地震资料的处理流程如图2所示.

地震反射资料需要进行定性、定量分析(冯杨

洋等,2016),通过对原始资料分析后采取相应的方法及参数进行后续流程处理.定性分析通过分频扫描进行能量及频率分析;定量分析对原始资料主要目的层进行能量分析、频谱分析以及信噪比估算分析.本次地震反射数据采集的资料由于近地表特征横向变化剧烈,静校正问题非常突出;此外山体区原始资料信噪比较低,工区内构造复杂,速度变化剧烈,速度建模及成像困难,叠加速度及偏移速度选取难度大.针对这些处理难点和重点,在本次处理的静校正方面进行静校正方法试验(折射、层析静校正)和替换速度试验确定折射静校正方法,以山区为重点初步解决野外静校正,进一步通过地表一致性剩余静校正、全局寻优剩余静校正提高静校正精度,改善成像效果;在保幅去噪方面,使用组合噪音衰减、异常振幅压制等特色技术进行压噪处理,针对噪声特点,多域、多次迭代去噪,逐步提高资料信噪比;在构造复杂部位加密速度控制点,结合剩余静校正以及常速扫描和变速扫描,逐步提高速度分析精度,得到合理叠加速度,结合地质解释,认真分析剖面的偏移效果及合理性,提高偏移成像精度.

资料分析和处理采用GEOEAST处理软件和KLseis方法论证软件,采用人机交互的处理方式,提高了数据处理的效率并保证了对处理结果的精度和质量控制.同时与地质解释紧密结合,针对本区复杂构造,通过参数选取和方法优化的一系列处理保证构造空间归位,使剖面成像准确.

## 3 深地震能量反射特征

采集数据经过处理后得到双程旅行时20 s记录的能量剖面信息(图3b),包含不同深度反射能量,剖面图中反射能量的强弱变化与连续性差异反映了地震波速度差异,进而代表了地下不同结构的构造信息,是分析地下构造形态的依据.

测线呈南东—北西向展布,依次经过四川盆地前缘、安县—灌县断裂、映秀—北川断裂、汶川—茂县断裂.根据能量剖面上的不同反射特征,按照CDP将反射结构特征分段刻画.测线CDP号数前段(CDP号586~1700)对应四川盆地前缘位置,能量同相轴在水平上连续且稳定,分界面清晰,表明沉积层结构稳定,地层发育平缓,符合四川盆地属于稳定克拉通地壳结构相对稳定分层的结构特征(Burchfiel *et al.*, 1995; 嘉世旭等, 2014).CDP号

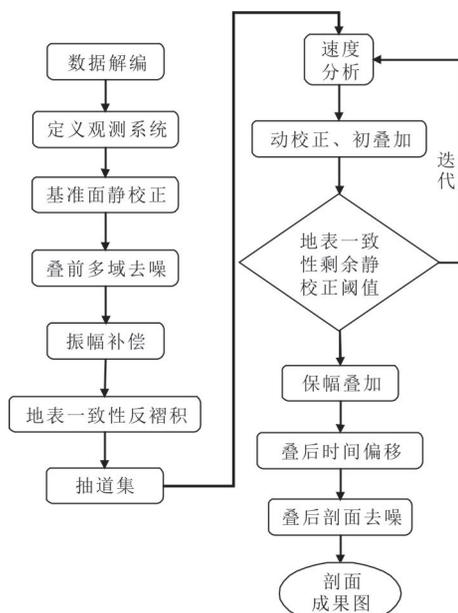


图2 采集资料处理流程

Fig. 2 Flow chart of data acquisition and processing

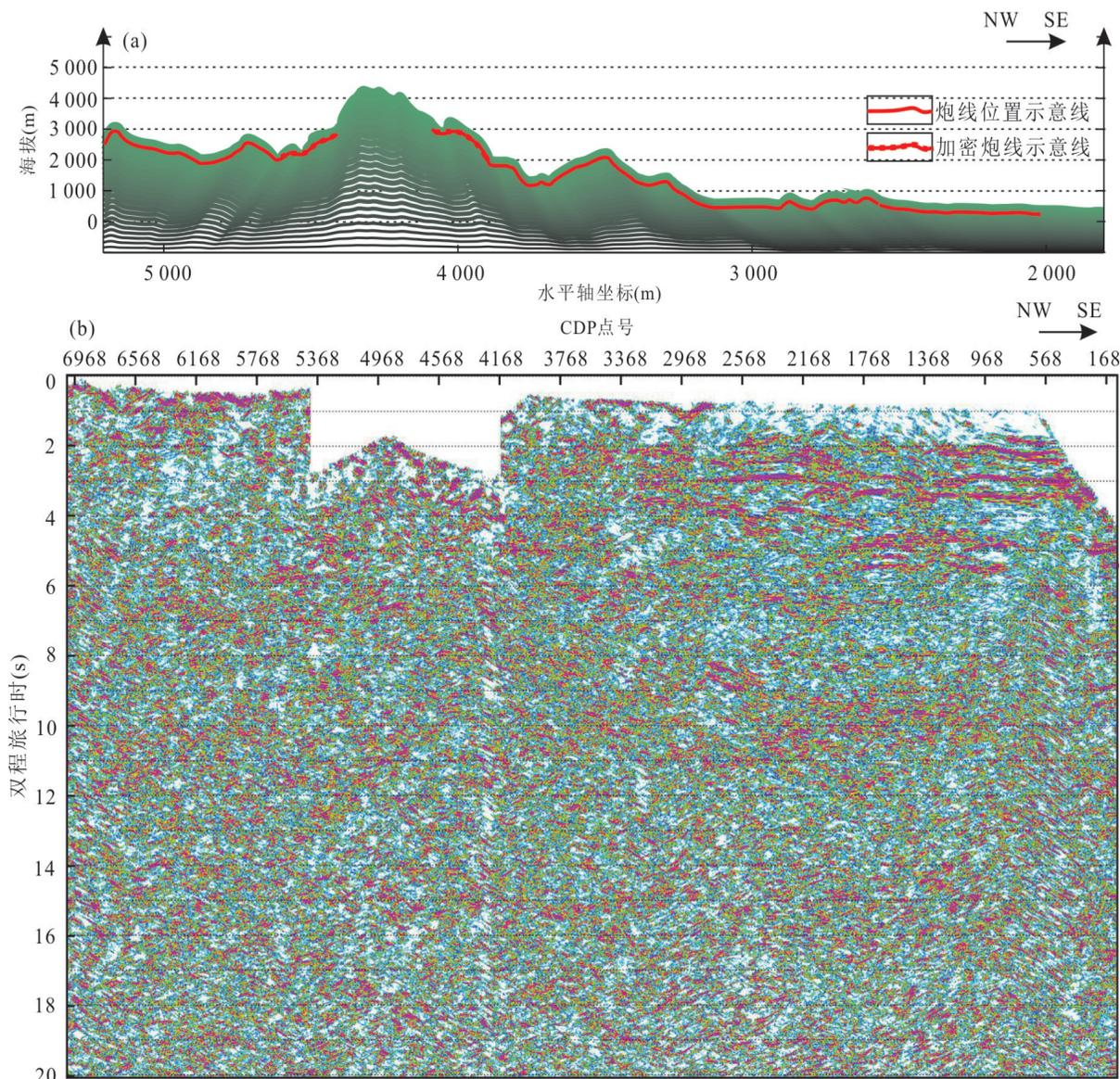


图 3 炮线高程示意图及地震记录反射能量图

Fig. 3 Mapping of elevation of survey line and reflection energy profile of record  
a. 研究区高程及测线炮线布设示意; b. 测线对应 20 s 记录长度的反射能量剖面

1400~2600 对应安县—灌县断裂与映秀北川断裂区域,该区域部分同相轴错断明显,界面上起伏和厚度变化变大,对应沉积地层的褶皱和错断,符合该区龙门山构造带向四川盆地推覆的前缘位置发育一系列逆冲推覆构造特征 (Clark and Royden, 2000; Li *et al.*, 2014a). CDP 号 2700~5400 对应本次勘探的主体构造彭灌杂岩出露区. 该区域在能量反射剖面表现为反射能量强弱变化明显,在能量剖面图上表现为能量同相轴连续性差,能量强弱变化大,凹陷和隆起相间,不再具有水平向连续的能量同相轴,取而代之的是

起伏断续的能量同相轴,对应经过剧烈构造变动的非稳定地层. 彭灌杂岩区域反射与南东位置的均匀沉积层有明显形态差异,表明这一区域经历了复杂的构造运动并与附近的各沉积层界面之间具有明显的构造不连续和岩性差异.

### 3.1 彭灌杂岩体剖面反射特征

彭灌杂岩体在地表表现为南西—北东向展布,在测线上的出露范围为 CDP 号 2700 到 CDP 号 5400 位置,截取反射能量剖面的前 10 s 记录进行处理得到图 4 所示的地震反射能量剖面. 在反射能量剖面上黑色虚线标示范围,强能量反射轴呈断续状

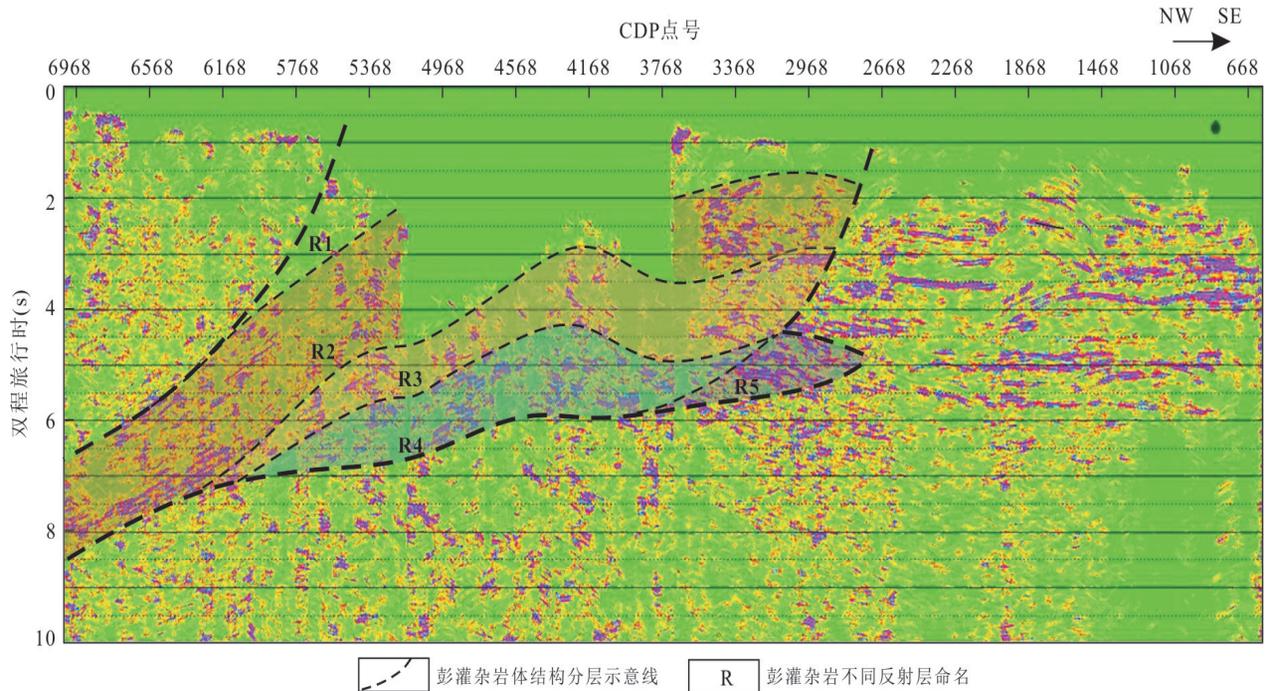


图4 彭灌杂岩内部结构层示意

Fig. 4 Internal layer structure of Pengguan complex

连续且有明显起伏,反射能量相对其左侧区域表现为同相轴能量强弱变化明显,相对其右侧区域表现为能量同相轴形态更加破碎,根据能量轴强度和能量轴连续性判断该区域内部应属于同一类构造岩性能量反射.参考彭灌杂岩地表初露位置,判定该区域为彭灌杂岩体反射区域.

在彭灌杂岩体反射区域内,反射能量强度近似,反射轴连续性差异不大,但不同深度和位置的反射能量轴存在相对明显的形态差异,推测彭灌杂岩内部具有成层结构.前人在浅部钻孔岩心研究中也发现过不同深度和厚度的彭灌杂岩体出现在同一段岩心的现象(吴婵, 2014),但深部结构上的成层性属于新发现.参考能量反射剖面的同相轴形态差异,本文将彭灌杂岩分为5个层位,分别是R1、R2、R3、R4、R5. R2、R3和R4三层形态类似,与受到挤压应力的褶皱状起伏地层近似,轴心倾向北西,自北西向南东形变变小,推测彭灌杂岩极可能受到西北向挤压应力,参考区域地质构造史,符合松潘陆块向四川盆地运动的挤压应力.

彭灌杂岩区域内能量反射轴以及底界面能量轴形态不与周边的能量轴相似或相接,这一特征表明彭灌杂岩与周边地质结构存在地震波速度差异,代表了彭灌杂岩不同于周边区域的岩性,间接表明彭灌杂岩在该区域属于无根的外来岩体,符合航磁

异常及重力异常得到的彭灌杂岩体在地下无根的结论(刘春平和林娟华, 2008; 张沛等, 2008; Xu *et al.*, 2009).彭灌杂岩在深部延伸中到达双程旅行时 $\sim 7$  s位置,参考彭灌杂岩主岩性成分花岗岩速度判断,彭灌杂岩体底界面深度 $\sim 18$  km.彭灌杂岩底界面由北西向南东方向由深变浅,整体倾向为北西向,参考龙门山构造带运动模式,彭灌杂岩体应参与了北西-南东向的逆冲推覆运动,据此推断彭灌杂岩来源于现有位置的西北方向,原岩系应位于现位置更西、更深部,这一结论与已有研究相互印证(林茂炳和马永旺, 1995; 林娟华和刘春平, 2009).

### 3.2 彭灌杂岩区域断裂特征

本次测线北西-南东向经过龙门山3条主断裂带:安县-灌县断裂、映秀-北川断裂、汶川-茂县断裂,通过对反射能量剖面的前10 s记录的处理,参考地表出露位置以及剖面上能量轴的错断和不连续进行断层构造的划分,得到如图5所示3条断裂的剖面形态.其中汶川-茂县断裂与映秀-北川断裂位于彭灌杂岩出露位置的边界处,反映在剖面图上的5400号CDP位置F1和CDP号2700位置F2,安县-灌县断裂则反映在剖面上的CDP号1400位置的F3. F1、F2、F3是一系列发育特征近似的逆冲推覆断裂系统,近地表位置倾角在 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,北西倾向,其中F1在垂直深度 $\sim 10$  km后倾向不变,倾角变

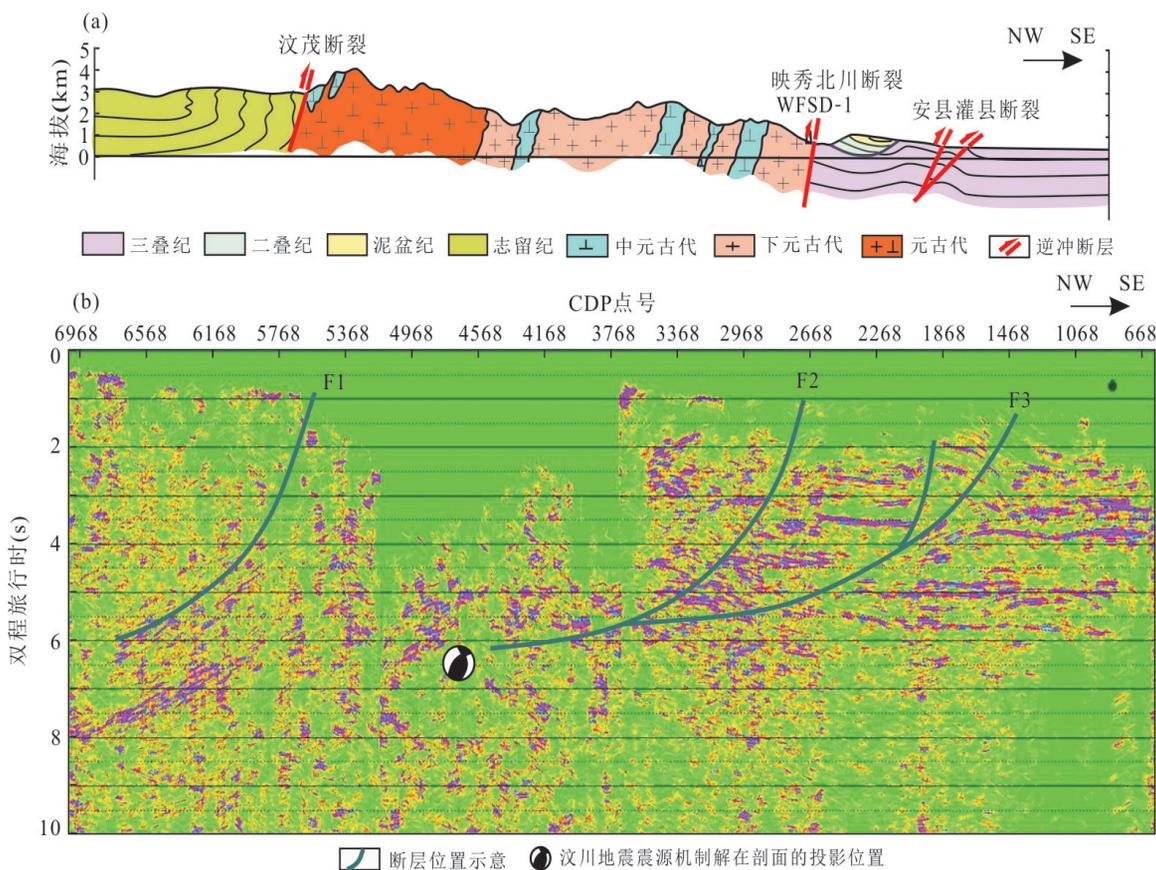


图 5 区域地质填图与截取 10 s 的反射能量剖面断层构造示意

Fig. 5 Mapping of geological structures and diagram of 10 s reflection profile with fault structure intercepted  
a. 测线对应区域地质构造图(参考李海兵等, 2009); b. 龙门山断裂带彭灌杂岩区域断层特征图

小,倾向形态上表现为早期韧性形变叠加晚期脆性形变的特征;F2向深部延伸一定距离(~12 km)后倾角变缓,垂直深度~15 km后在彭灌杂岩体内深部发育缓倾角的韧性断裂,这一形态符合断裂系统早期韧性变形为主,叠加后期脆性改造的特征(林茂炳和马永旺, 1995; Nadeau and McEvilly, 1999);F3倾角在不到 10 km 深度位置变缓,并与 F2 在~16 km 深度的位置相连成一条断裂.参考汶川地震震中在剖面的投影位置,能量反射剖面上的 F3 与 F2 在震源以上深度合并为一条断裂,与汶川大地震发生后映秀—北川断裂与安县—灌县断裂同时期产生了同类型逆冲型同震地表破裂带相印证(Sibson, 1992; Wu *et al.*, 2014).

结合区域地质填图研究中所显示彭灌杂岩体浅部发育一系列倾角近似、运动方向相同的逆断层(图 5a),在倾向和走向上与 F1、F2 近似,在深度和变形程度上弱于 F1、F2,判断其与 F1、F2 属于同一构造时期发育的断裂,推断彭灌杂岩成岩时间早于周边构造变形,它受断裂构造影响,导致剪切变形

产生了从韧性到脆性的破裂形变.考虑青藏高原内松潘—甘孜地块向东和东南的运移,龙门山中段几乎为纯逆冲特征,主压应力方向一致(Yong *et al.*, 2003; 高原等, 2013, 2018),因此位于龙门山中段的彭灌杂岩对该区域应力场影响不大.但彭灌杂岩主岩体组成是中晚元古代的花岗岩组成,在岩石物理上花岗岩体剪切强度和摩擦强度都远大于周边沉积地层(陶晓风, 1992; 林仿和余团, 1998),即同等构造应力条件下,彭灌杂岩体表现为更不易破裂和滑动.因此彭灌杂岩的岩体组成在一定程度上减弱了松潘地块挤压应力向四川盆地的传递,但持续外力积累到一定极限,剪切应力达到摩擦强度(牛露等, 2018),强岩体会释放出巨大的能量并迅速向周边传播,造成巨大破坏.所以了解目前彭灌杂岩的深部结构特征,判断彭灌杂岩的主岩体状态,具有重大意义.能量反射剖面图显示彭灌杂岩体深部~15 km 位置发育的映秀—北川韧性断裂位于两层彭灌杂岩岩层之间,并未断开彭灌杂岩中深部岩体主体部分(图 4, 图 5b),可判断该区域彭灌杂岩

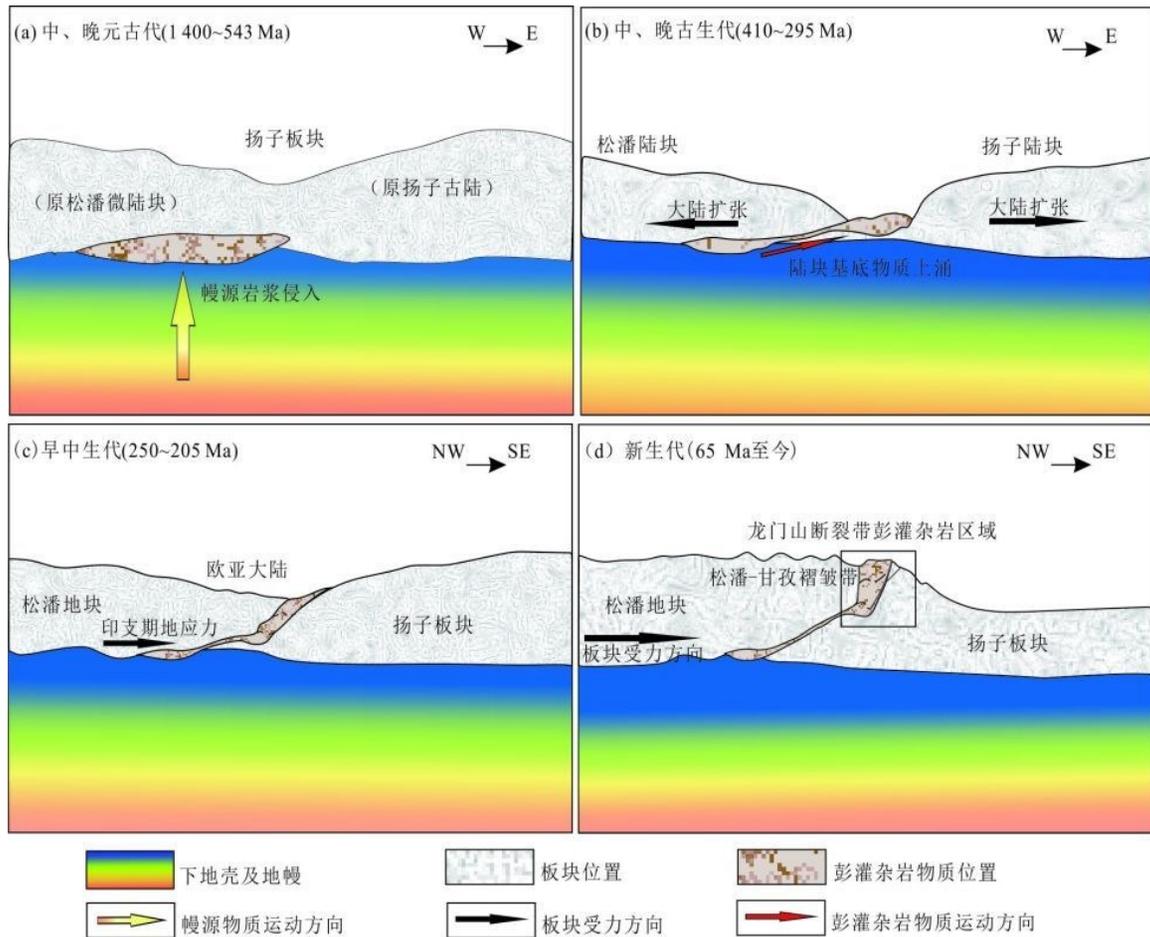


图 6 彭灌杂岩形成过程示意

Fig. 6 Diagram of establishment of Pengguan complex

a. 岩浆底侵期示意图; b. 大陆扩张期示意图; c. 印支运动期示意图; d. 喜山运动期示意图

主岩体并未完全破裂,可继续为四川盆地对抗松潘地块的挤压应力及较大破坏性构造运动。

### 3.3 彭灌杂岩形成机制分析

综合彭灌杂岩岩性成分及产状特征和岩体内断裂发育情况,本文推断彭灌杂岩原岩形成后参与古生代至新生代的一系列构造运动造成现阶段构造形态并推覆至现阶段所处位置,其过程可分为 4 个阶段(图 6)。

第一阶段发生在中晚元古代,晋宁运动后松潘微陆块与扬子古陆及周边板块统一为稳定的扬子板块(杨树锋等, 2019)。彭灌杂岩的岩石地球化学特征显示为新元古代侵入的杂岩体,主要由中酸性侵入岩组成,主成分属于钙碱性花岗岩类,该特征对应彭灌杂岩可能是底侵的幔源岩浆与下地壳熔融产物混合的结果(张沛等, 2008)。推测该阶段发生幔源岩浆底侵并与扬子板块下地壳熔融形成彭灌杂岩原岩,此时期的原岩位于构造活动

活跃的扬子板块西部边缘位置(图 6a)。

第二阶段是古生代晚期的大陆扩张运动。古生代中晚期大陆边缘扩张,长期处于扬子陆块西缘不稳定构造环境的松潘陆块与扬子陆块分离,大陆扩张造成地壳隆起(Li *et al.*, 2014c; 孔令耀等, 2017),位于松潘陆块深部塑性流变彭灌杂岩原岩体在松潘陆块与扬子陆块间隙中上涌,这一区域即早期的龙门山凹陷(图 6b)。

第三阶段印支期龙门山区域地台由沉积环境变为造山环境,剧烈的地壳运动使龙门山褶皱隆升并不断向扬子地块挤压(林娟华和刘春平, 2009; Wang *et al.*, 2014)。这一时期基底物质呈不同期次上涌并发育分层,彭灌杂岩上涌岩层参与了褶皱回返挤压的多期次活动,这在能量剖面上反映为彭灌杂岩岩层的似褶皱形态(图 6c)。杂岩体强应变带内云母定年显示杂岩叠置时间在 166~120 Ma,松潘—甘孜褶皱带内

老君沟等岩体在 166 Ma 左右同样发生了快速的抬升冷却,间接表明松潘—甘孜褶皱带基底岩片在这期间逆冲叠置(Xue *et al.*, 2017)。

最后阶段是喜山运动期,这一时期彭灌杂岩主要处于抬升阶段。始新世末到渐新世初,印度板块向欧亚板块俯冲相碰,青藏高原地区迅速抬升并向东部推进(Royden, 1997; Zhang *et al.*, 2018; 张泽明等, 2019),龙门山构造带遭受青藏高原挤压应力向上收缩并向四川盆地方向推进,位于松潘—甘孜褶皱带前缘位置的彭灌杂岩不断受到挤压推覆抬升,到达目前出露位置(图 6d),这一过程表现在能量剖面图上为彭灌杂岩的北西倾向形态并在内部及周边发育有逆冲推覆构造特征的断裂系统。

## 4 结论与认识

本次研究采用深地震探测方法对测线区域进行数据采集,通过对处理后得到的深地震能量反射剖面进行构造特征的分析 and 解释。采用地震能量特征剖面对彭灌杂岩的形态及结构特征进行研究,综合得到如下结论:

(1)彭灌杂岩体在反射能量剖面上有不同层的相似形态反射证明了彭灌杂岩不是一个整体而是在纵深上存在分层特征,岩体层受到构造挤压应力变形,形态倾向北西。彭灌杂岩在反射能量剖面上底界面位于双程旅行时 $\sim 7$  s 位置,对应其底界面深度 $\sim 18$  km 位置,与周边区域同相轴形态不相似或相接,在该区域属于无根的外来岩体。参考龙门山构造带运动模式,推断彭灌杂岩来源于现有位置的西北方向,原岩系应位于现位置更西更深部。

(2)通过对彭灌杂岩深度反射剖面的分层特征分析,参考地质构造运动过程,推断彭灌杂岩的成岩过程经历了一定的时间跨度,并非一次成型而是多期次基底物质上涌形成分层特征。同时参考地球化学特征分析以及地质构造史,推断彭灌杂岩属于松潘陆块基底物质在印支运动期受到挤压上涌形成,并在喜山运动期受到西北方向应力推覆隆起到达目前位置。

(3)彭灌杂岩体地质填图资料可见浅部发育一系列浅断层,与边界汶川—茂县断裂和映秀—北川断裂倾向和走向一致,应属于同时期构造运动的产物,表明彭灌杂岩形成时间早于周边构造运动时期并参与了逆冲推覆构造运动。同时能量深度剖面显示深部的映秀—北川断裂位置发育在不同期次彭

灌杂岩体层间隙,并未断开彭灌杂岩中深部岩体主体部分。彭灌杂岩主体岩仍处于相对完整状态,可在一定程度上继续支撑四川盆地对抗松潘地块挤压应力及较大破坏性构造运动。

致谢:感谢本文编辑和审稿专家针对本文提出的建设性意见和建议,感谢中国地质科学院地质研究所李海兵研究员、崔君文研究员以及中国地震局赤峰地震台冯杨洋在本文研究过程中给予的指导和帮助,特此致谢!

## References

- Burchfiel, B. C., Chen, Z., Yupinc, L., et al., 1995. Tectonics of the Longmen Shan and Adjacent Regions, Central China. *International Geology Review*, 37(8): 661–735. <https://doi.org/10.1080/00206819509465424>
- Clark, M. K., Royden, L. H., 2000. Topographic Ooze: Building the Eastern Margin of Tibet by Lower Crustal Flow. *Geology*, 28(8): 703–706. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28703:tobtem>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28703:tobtem>2.0.co;2)
- Cui, J. W., Lin, W. R., Wang, L. J., et al., 2014. Determination of Three-Dimensional In Situ Stresses by Anelastic Strain Recovery in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, 619/620: 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.09.013>
- Feng, Y. Y., Yu, C. Q., Fan, Z. G., et al., 2016. Fine Crustal Structure of the Lushan Area Derived from Seismic Reflection Profiling. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(9): 3248–3259 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Shi, Y. T., Chen, A. G., 2018. Crustal Seismic Anisotropy and Compressive Stress in the Eastern Margin of the Tibetan Plateau and the Influence of the Ms8.0 Wenchuan Earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 63(19): 1934–1948 (in Chinese).
- Gao, Y., Wang, Q., Zhao, B., et al., 2013. A Rupture Blank Zone in Middle South Part of Longmenshan Faults: Effect after Lushan Ms7.0 Earthquake of 20 April 2013 in Sichuan, China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 43(6): 1038–1046 (in Chinese).
- Hu, Y. X., Liu, X. R., Xu, H., et al., 2010. Multiple Linear Regression Models to Predict the Uniaxial Compressive Strength and the Elastic Modulus of Pengguan Complex. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 38(12): 15–21 (in Chinese with English abstract).

- 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. <https://doi.org/10.1038/nature07837>
- Jia, S. X., Liu, B. J., Xu, Z. F., et al., 2014. The Crustal Structures of the Central Longmenshan along and Its Margins as Related to the Seismotectonics of the 2008 Wenchuan Earthquake. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 44(3):497–509 (in Chinese).
- Kong, L. Y., Mao, X. W., Chen, C., et al., 2017. Chronological Study on Detrital Zircons and Its Geological Significance from Mesoproterozoic Dagushi Group in the Dahongshan Area, North Margin of the Yangtze Block. *Earth Science*, 42(4): 485–501 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B., Wang, Z. X., Fu, X. F., et al., 2009. Slip Characteristics, Maximum Slip and Tectonic Significance of the Surface Rupture Zone of Wenchuan Earthquake ( $M_s 8.0$ ) on 12 May 2008. *Quaternary Research*, 29(3): 387–402 (in Chinese with English abstract).
- Li, H., Xu, Z., Niu, Y., et al., 2014a. Structural and Physical Property Characterization in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project -Hole 1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, 619/620: 86–100. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.022>
- Li, Y., Li, H. B., Zhou, R. J., et al., 2014b. Crustal Thickening or Isostatic Rebound of Orogenic Wedge Deduced from Tectonostratigraphic Units in Indosinian Foreland Basin, Longmen Shan, China. *Tectonophysics*, 619/620: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.031>
- Li, Y., Yan, Z. K., Liu, S. G., et al., 2014c. Migration of the Carbonate Ramp and Sponge Buildup Driven by the Orogenic Wedge Advance in the Early Stage (Carnian) of the Longmen Shan Foreland Basin, China. *Tectonophysics*, 619/620: 179–193. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.011>
- Lin, F., Yu, T., 1998. Microstructure and Deformation Condition of Tectonite in Suopodian Fracture Zone in Pengguan Complex. *Acta Geologica Sichuan*, 18(2): 18–24 (in Chinese with English abstract).
- Lin, J. H., Liu, C. P., 2009. Study on the Forming Model of Pengguan Complex of the Longmenshan Orogenic Belt. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 16(4): 41–43 (in Chinese with English abstract).
- Lin, M. B., Ma, Y. W., 1995. A Discussion on the Tectonic Characteristics of Peng - Guan Complex in Longmen Mountains. *Journal of Chengdu University of Technology*, (1): 42–46 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. P., Lin, J. H., 2008. Study on the Forming Model of Pengguan Complex of the Longmenshan Orogenic Belt. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 34(19): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X. J., Wu, Z. L., Jiang, C. S., 2014. ‘Repeating Earthquakes’ Associated with the WFSD-1 Drilling Site. *Tectonophysics*, 619/620: 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.017>
- Ma, Y. W., Wang, G. Z., Hu, X. W., 1996. Tectonic Deformation of Pengguan Complex as a Nappe. *Acta Geologica Sichuan*, 16(2): 110–114 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. W., Yang, J., 2001. Tectonic Deformation of the Nappe Tectonic in the Middle Longmen Mountains. *Journal of Chengdu University of Technology*, 28(3): 236–240 (in Chinese with English abstract).
- Nadeau, R. M., McEvilly, T. V., 1999. Fault Slip Rates at Depth from Recurrence Intervals of Repeating Microearthquakes. *Science*, 285(5428): 718–721. <https://doi.org/10.1126/science.285.5428.718>
- Niu, L., Zhou, Y. S., Yao, W. M., et al., 2018. Experiments on the Strength of Pengguan Complex under High Temperature and High Pressure and Its Implication to Seismogenic Mechanism of the Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(5): 1728–1740 (in Chinese with English abstract).
- Royden, L. H., 1997. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet. *Science*, 276(5313): 788–790. <https://doi.org/10.1126/science.276.5313.788>
- Sibson, R. H., 1992. Implications of Fault-Valve Behaviour for Rupture Nucleation and Recurrence. *Tectonophysics*, 211(1–4): 283–293. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90065-e](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90065-e)
- Tao, X. F., 1992. The Microstructural Characteristics of Yingxiu Thrust Fault in Pen-Guan District, Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Editon)*, (1): 18–24, T001 (in Chinese).
- Wang, H., 2015. Study on Seismic Fault Mechanism of Longmen Shan Tectonic Belt (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. B., Zhang, G., Fang, H., et al., 2014. Crust and Upper Mantle Resistivity Structure at Middle Section of Longmenshan, Eastern Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 619/620: 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.09.011>

- Wu, C., 2014. Deep Geological Structure of Longmen Shan Tectonic Belt and Its Restriction on Surface Rupture Zone of Wenchuan Earthquake (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wu, C., Li, H. B., Leloup, P. H., et al., 2014. High-Angle Fault Responsible for the Surface Ruptures along the Northern Segment of the Wenchuan Earthquake Fault Zone: Evidence from the Latest Seismic Reflection Profiles. *Tectonophysics*, 619/620: 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.09.015>
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Yu, G. H., et al., 2009. Coseismic Reverse- and Oblique-Slip Surface Faulting Generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake, China. *Geology*, 37(6): 515–518. <https://doi.org/10.1130/g25462a.1>
- Xue, Z. H., Martelet, G., Lin, W., et al., 2017. Mesozoic Crustal Thickening of the Longmenshan Belt (NE Tibet, China) by Imbrication of Basement Slices: Insights from Structural Analysis, Petrofabric and Magnetic Fabric Studies, and Gravity Modeling. *Tectonics*, 36(12): 3110–3134. <https://doi.org/10.1002/2017tc004754>
- Yang, S. F., Chen, H. L., Gong, G. H., et al., 2019. Sedimentary Characteristics and Basin-Orogen Processes of the Late Early Paleozoic Foreland Basins in the Lower Yangtze Region. *Earth Science*, 44(5): 1494–1510 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. Y., Qiu, R. X., Qin, S. K., et al., 2009. The Proterozoic VMS Copper Deposit in Longmen Mountain Area of Chuanxi: Evidence from Sulphide Trace Element and Sulfur Isotope. *Geological Science and Technology Information*, 28(4): 59–64 (in Chinese with English abstract).
- Yong, L., Allen, P. A., Densmore, A. L., et al., 2003. Evolution of the Longmen Shan Foreland Basin (Western Sichuan, China) during the Late Triassic Indosinian Orogeny. *Basin Research*, 15(1): 117–138. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.2003.00197.x>
- Zhang, F. X., Wu, Q. J., Li, Y. H., et al., 2018. Seismic Tomography of Eastern Tibet: Implications for the Tibetan Plateau Growth. *Tectonics*, 37(9): 2833–2847. <https://doi.org/10.1029/2018tc004977>
- Zhang, P., Zhou, Z. Y., Xu, C. H., et al., 2008. Geochemistry of Pengguan Complex in the Longmenshan Region, Western Sichuan Province, SW China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 105–116 (in Chinese with English abstract)
- Zhang, Z. M., Ding, H. X., Dong, X., et al., 2019. Two Contrasting Eclogite Types in the Himalayan Orogen and Differential Subduction of Indian Continent. *Earth Science*, 44(5): 1602–1619 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 冯杨洋, 于常青, 范柱国, 等, 2016. 从反射地震剖面中认识芦山地区的地壳精细结构和构造. *地球物理学报*, 59(9): 3248–3259.
- 高原, 石玉涛, 陈安国, 2018. 青藏高原东缘地震各向异性、应力及汶川地震影响. *科学通报*, 63(19): 1934–1948.
- 高原, 王琼, 赵博, 等, 2013. 龙门山断裂带中南段的一个破裂空段: 芦山地震的震后效应. *中国科学(D辑:地球科学)*, 43(6): 1038–1046.
- 胡元鑫, 刘新荣, 徐慧, 等, 2010. 彭灌杂岩单轴抗压强度和弹性模量的多元线性回归预测模型. *工程勘察*, 38(12): 15–21.
- 嘉世旭, 刘保金, 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(D辑:地球科学)*, 44(3): 497–509.
- 孔令耀, 毛新武, 陈超, 等, 2017. 扬子北缘大洪山地区中元古代打鼓石群碎屑锆石年代学及其地质意义. *地球科学*, 42(4): 485–501.
- 李海兵, 王宗秀, 付小方, 等, 2009. 2008年5月12日汶川地震(Ms8.0)地表破裂带的分震同震滑移特征、最大滑移量及构造意义. *第四纪研究*, 29(3): 387–402.
- 林仿, 余团, 1998. 龙门山彭灌杂岩体中梭坡店断裂带显微构造及变形环境分析. *四川地质学报*, 18(2): 18–24.
- 林娟华, 刘春平, 2009. 龙门山造山带彭灌杂岩体形成模式. *油气地质与采收率*, 16(4): 41–43.
- 林茂炳, 马永旺, 1995. 论龙门山彭灌杂岩体的构造属性. *成都理工学院学报*, (1): 42–46.
- 刘春平, 林娟华, 2008. 龙门山造山带彭灌杂岩体形成模式研究. *内蒙古石油化工*, 34(19): 1–4.
- 马永旺, 王国芝, 胡新伟, 1996. “彭灌杂岩”推覆体的构造变形特征. *四川地质学报*, 16(2): 110–114.
- 马永旺, 杨尽, 2001. 龙门山中段推覆构造的变形特征. *成都理工学院学报*, 28(3): 236–240.
- 牛露, 周永胜, 姚文明, 等, 2018. 高温高压条件下彭灌杂岩的强度对汶川地震发震机制的启示. *地球物理学报*, 61(5): 1728–1740.
- 陶晓风, 1992. 四川彭灌地区映秀断裂带的显微构造特征. *成都地质学院学报*, (1): 18–24, T001.
- 王焕, 2015. 龙门山构造带地震断裂机制研究(博士学位论文). 北京:中国地质科学院.
- 吴婵, 2014. 龙门山构造带深部地质结构及其对汶川地震地表破裂带的制约(博士学位论文). 北京:中

国地质科学院 .  
 杨树锋, 陈汉林, 龚根辉, 等, 2019. 下扬子地区早古生代晚期前陆盆地沉积特征与盆山过程. 地球科学, 44(5): 1494–1510.  
 杨钻云, 邱仁轩, 秦术凯, 等, 2009. 川西龙门山地区元古代 VMS 铜矿床: 硫化物微量元素和硫同位素证据. 地质科技情报, 28(4): 59–64.

张沛, 周祖翼, 许长海, 等, 2008. 川西龙门山彭灌杂岩地球化学特征: 岩石成因与构造意义. 大地构造与成矿学, 32(1): 105–116.  
 张泽明, 丁慧霞, 董昕, 等, 2019. 喜马拉雅造山带两种不同类型榴辉岩与印度大陆差异性俯冲. 地球科学, 44(5): 1602–1619.

\*\*\*\*\*

## 《地球科学》

2021年6月 第46卷 第6期 要目预告

冈底斯复合造山带铜钼金多金属成矿作用与成矿系列·····郑有业等  
 西藏隆格尔铁矿床成岩成矿时代及对区域多期铁成矿作用的启示·····高顺宝等  
 基性岩侵入对页岩矿物学特征的影响·····王 岩等  
 塔里木盆地顺托果勒低隆起北部中下奥陶统储层方解石脉成因及形成时间·····杨 毅等  
 伊犁板块南缘高 T/P 变质岩系·····夏 彬等  
 下扬子皖南宣泾地区二叠系海相页岩特征及其沉积环境·····白卢恒等  
 扬子克拉通黄陵背斜南部~860 Ma 岩墙的成因及地质意义·····蒋幸福等  
 沙捞越古晋地区伦杜基性岩的形成时代、地球化学特征及其地质意义·····房旭东等