



熊坡背斜南段地震构造研究

薛 雪, 文万章

Study on the seismic structure in the southern section of the Xiongpo anticline

Xue Xue and Wen Wanzhang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2025-062>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多地震序列震源机制解的盈江区域构造应力场研究

Study on tectonic stress field in Yingjiang area based on multi-focal mechanism solution sequence

地震科学进展. 2021, 51(3): 97-105

2022年青海门源 M_S 6.9地震震源机制解

Focal mechanism of 2022 Menyuan M_S 6.9 earthquake in Qinghai Province

地震科学进展. 2022, 52(2): 49-54

基于震源机制分析中国东北地区现今构造动力学背景

Analysis of present tectonic dynamic background in Northeast China based on focal mechanism

地震科学进展. 2024, 54(4): 258-264

2020年6月9日中卫 M_L 3.4地震的震源机制及其中心解的测定

Determination on the focal mechanism and central focal mechanism of Zhongwei M_L 3.4 earthquake on June 9, 2020

地震科学进展. 2021, 51(6): 258-265

2020年西藏尼玛 M_S 6.6和 M_S 4.8地震震源机制测定

Focal mechanism determination of Nima M_S 6.6 and M_S 4.8 earthquakes in Tibet in 2020

地震科学进展. 2021, 51(5): 234-240

皎口水库地震精定位、震源机制及发震机理探讨

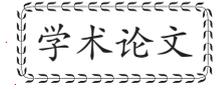
Discussion on precise location, focal mechanism and seismogenic mechanism of Jiaokou reservoir earthquakes

地震科学进展. 2023, 53(3): 97-107



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

薛雪, 文万章. 熊坡背斜南段地震构造研究 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(12): 659-667, 677. doi:10.19987/j.dzcxjz.2025-062
Xue X, Wen W Z. Study on the seismic structure in the southern section of the Xiongpo anticline[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(12): 659-667, 677. doi:10.19987/j.dzcxjz.2025-062



熊坡背斜南段地震构造研究

薛雪^{1)*} 文万章²⁾

- 1) 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川成都 610059
2) 安徽惠洲地质安全研究院股份有限公司, 安徽合肥 230088

摘要 2022年3月29日, 四川省眉山市丹棱县发生 $M_S4.3$ 地震, 此次地震发生在四川盆地南缘的熊坡背斜附近, 震源深度为3.5~5.5 km, 矩震级范围为4.06~4.15。为研究本次地震的发震构造, 研究综合分析了区域历史地震、主要断裂活动性, 并参考了四川省地震局提供的震源机制解反演结果, 剖析地震破裂特征与应力场方向, 同时结合高精度卫星图、DEM数据分析地震区域构造变形与断层活动特征, 还通过地震剖面数据识别关键断裂带, 明确其几何与运动学特征。研究揭示: 2022年3月29日 $M_S4.3$ 地震的震源机制解显示为左旋走滑型破裂, 节面I(NW走向, 倾角 $79^\circ\sim 87^\circ$)为更可能的发震面, 其走向与区域主体构造(NE向熊坡背斜—蒲江—新津断裂)近垂直, 是一条呈高角度垂直的走滑断层, 其形成与2008年汶川地震和2013年芦山地震后应力传递引发两侧逆冲体差异滑动有关。余震空间展布显示丹棱地震可能激活蒲江—新津断裂局部应力调整。该地震揭示了板内构造环境下, 造山带前缘应力传递对隐伏断裂活动的控制作用, 为评估盆地边缘地震风险提供了新依据。

关键词 丹棱地震; 震源机制解; 成都盆地; 熊坡背斜; 应力传递; 断层

中图分类号: P315.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2025)12-0659-09

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2025-062

Study on the seismic structure in the southern section of the Xiongpo anticline

Xue Xue¹⁾, Wen Wanzhang²⁾

- 1) College of Earth and Planetary Science, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China
2) Anhui Huizhou Geology Security Institute Co., Ltd., Anhui Huizhou 230088, China

Abstract On March 29, 2022, an $M_S4.3$ earthquake occurred in Danling County, Meishan City, Sichuan Province. This event took place near the Xiongpo anticline at the southern margin of the Sichuan basin, with a focal depth of 3.5~5.5 km and a moment magnitude (M_W) range of 4.06~4.15. To investigate the seismogenic structure of this earthquake, we conducted integrated analyses of the regional historical seismicity and major fault activity. We referenced the focal mechanism solutions inverted by the Sichuan Earthquake Agency, examined seismic rupture characteristics and stress field orientation, and combined high-resolution satellite imagery with Digital Elevation Model (DEM) data to analyze tectonic deformation and fault activity. The seismic profile data were also used to identify key fault zones and

收稿日期: 2025-05-21; 采用日期: 2025-09-05。

* 通信作者: 薛雪(1999-), 女, 硕士研究生, 专业为第四纪地质学。E-mail: 2416513958@qq.com。



delineate their geometric and kinematic features. The research revealed that the focal mechanism solution of the March 29, 2022, M_s 4.3 earthquake indicates left-lateral strike-slip faulting. Nodal Plane I (NW-striking, dip angle $79^\circ \sim 87^\circ$) is considered to be the more probable seismogenic plane, the orientation of which is nearly perpendicular to the regional dominant structure, the NE-trending Xiongpo anticline-Pujiang-Xinjin fault. This plane represents a high-angle, near-vertical tear fault (strike-slip fault), formed by differential thrusting of adjacent blocks due to stress transfer following the 2008 Wenchuan earthquake and the 2013 Lushan earthquake. The spatial distribution of the aftershocks provides evidence to indicate that the Danling earthquake probably activated local stress adjustments along the Pujiang-Xinjin fault. This event highlights the control of stress transfer in orogenic forelands over the activity of hidden faults in intraplate tectonic settings, thereby providing new insights for assessing seismic hazards at basin margins.

Keywords Danling earthquake; focal mechanism solution; Chengdu basin; Xiongpo anticline; mechanism of stress transmission; tear fault

0 引言

据中国地震台网 (<https://news.ceic.ac.cn/CC20220329052509.html>) 测定, 2022年3月29日5时25分在四川省眉山市丹棱县 (30.03°N , 103.41°E) 发生 M_s 4.3 地震 (简称丹棱地震), 震源深度 10 km, 震源机制解反演结果显示, 本次地震为一次走滑型破裂。此次地震震中 5 km 范围内平均海拔约 660 m; 震中距丹棱县 10 km、距洪雅县 13 km、距蒲江县 21 km、距名山区 29 km、据夹江县 36 km。本次地震周边 5 km 内的村庄有包山地、梅山、双土地、老林山、张山、自然村、幸福村、罗沟村、大石盘、中山村; 29 km 内的乡镇有顺龙乡、张场镇、仁美镇、中隆乡、唐河乡、杨场镇、新庙乡、仁兴乡、联合乡、王场乡。本次地震周边人口多, 且地震活动及地球物理监测能力较好。过去 5 年 (2017 年 3 月 29 日—2022 年 3 月 29 日), 震中周边 100 km 内共发生 3 级以上地震 11 次, 其中 3.0~3.9 级 9 次, 4.0~4.9 级 2 次。

熊坡背斜作为龙门山前陆盆地核心构造单元, 吸引了国内外大量学者对其研究的兴趣。例如, 李敬波等^[1]基于地震剖面解释、数字高程模型及历史地震数据, 揭示了熊坡背斜的构造特征和成因机制, 发现其与蒲江—新津断裂具有较强的空间一致性, 并表现出断层传播褶皱模型。姜大伟^[2]对青衣江流域的河流地貌面序列分析, 结合地貌面的测年数据, 建立了熊坡背斜的构造变形时间尺度。郑文俊等^[3]2008 年的研究讨论了蒲江—新津断裂的活动特征, 指出第四纪早期活动, 晚期减弱。李勇等^[4]进一步证实汶川地震和芦山地震后, 大邑断裂、蒲江—新津断裂及龙泉山断裂均未发现同震地表破裂。李勤勤^[5]采用平衡剖面和物理模拟实验, 提到熊坡背斜构造变形分上下层, 基底隆起走向与龙门山一致, 其主控应力为龙

门山向扬子克拉通的 NW-SE 向挤压。此外, 贾营营等^[6]通过青衣江流域的砾石层沉积物物源分析, 重建了古青衣江的水系变迁, 并指出熊坡背斜的隆起对古河道的改道具有重要影响。

熊坡背斜位于成都盆地东缘, 是区域地质构造中的重要单元, 其特殊的地质结构和活跃的地震活动一直备受学界关注。作为典型的背斜构造, 熊坡背斜不仅记录了区域构造演化历史, 也是地震频发区域, 但前人大多对其构造演化、热年代学、地貌响应、水系演化等方面进行了详细研究, 也取得了一系列认识, 但是并未对应力传递机制进行分析, 本文将研究熊坡背斜的地震特征和活动规律, 对于理解区域构造动力学、评估地震风险以及制定防灾减灾策略都具有重要意义。

1 研究区地质背景

龙门山位于成都盆地的西侧, 具有典型的前展式逆冲推覆构造特征, 活动构造的研究表明, 中生代龙门山断裂带具有逆冲-左旋走滑作用, 新生代龙门山断裂带具有逆冲-右旋走滑作用, 其间存在着反转^[7-11]。龙泉山褶隆带位于成都盆地东侧, 主体构造为龙泉山背斜, 现代地震和大地测量均显示龙泉山褶隆带是一个正在上升的隆起, 是现今龙门山冲断带的前缘隆起, 且变形特征显示了龙门山冲断带在此消失^[12-13]。

成都盆地是四川盆地西部冲积平原的一部分, 是龙门山前陆盆地在地表的地貌表现, 前人分别将其称为前缘凹陷带、川西前陆盆地和前缘向斜带, 位于龙门山冲断带和龙泉山褶隆带之间, 呈现出“两山夹一盆”的构造格局^[8, 11](图 1)。成都盆地的地质构造具有显著西倾特征, 其地形自西向东呈现出陡峭至平缓的渐变格局。李勇等^[12]指出盆地内部的构造

主要为背斜, 东面为龙泉山背斜和熊坡背斜(图 2)。从双石一大川断裂到龙泉山构造带, 发育了一系列平行或斜列的断层相关褶皱, 它们均以中-下三叠统

富膏岩层为底部滑脱面。中-下三叠统富膏岩层以下, 则很好地保存了先期的垒-堑式张性构造, 相关研究表明这些构造在晚新生代依然活动^[11, 14-16]。

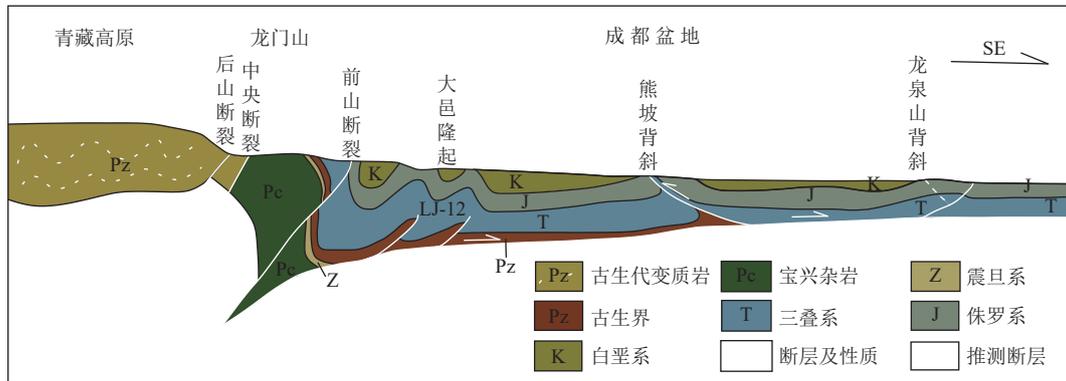
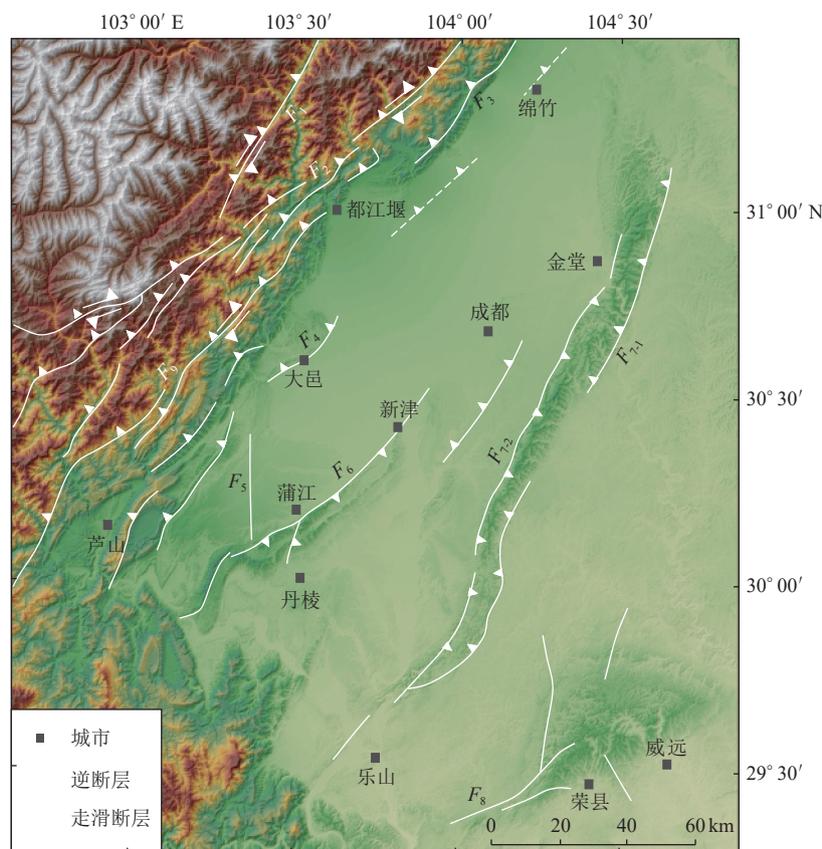


图 1 龙门山南段及前缘地区变形模式图(据文献 [17] 修改)

Fig. 1 Deformation pattern diagram of the southern section of Longmen Mountain and its foreland area (modified from Ref.[17])



F₁: 茂汶断裂; F₂: 北川断裂; F₃: 彭灌断裂; F₄: 大邑断裂; F₅: 大塘断裂; F₆: 蒲江—新津断裂; F₇₋₁: 龙泉山东坡断裂; F₇₋₂: 龙泉山西坡断裂; F₈: 长山镇断裂; F₉: 双石一大川断裂
12.5 m 精度的 DEM 数据来自 <https://search.asf.alaska.edu/#/>, 断层数据来自于四川省地震局

图 2 成都盆地构造格架图

Fig. 2 Structural framework of the Chengde basin

成都盆地南缘地区发育有邛西构造和熊坡背斜等一系列的断层相关褶皱, 与之相关的断层分别为

大塘断裂和蒲江—新津断裂。熊坡背斜是龙门山推覆构造向东推挤进入四川盆地内部的一个构造变形

区域,背斜由侏罗系、白垩系组成,最主要的一条断裂为蒲江—新津断裂,其具有与熊坡背斜共生的特点,背斜南部窄陡北部宽缓,断层南段出露北段隐伏^[3]。在新津一带,熊坡背斜的海拔骤然下降,隐没于成都平原,相关研究表明,蒲江—新津断裂沿熊坡背斜轴部及其北出露,新津—成都—德阳段则隐伏于成都平原之下,呈右阶羽列状排布^[18-20]。

2 熊坡背斜及蒲江—新津断裂

熊坡背斜(图3)位于成都平原的南段,背斜自洪雅县以西起,向北北东延伸到蒲江后转向北东,经过回龙—新津一带,轴部长约90 km,背斜宽度约为10~15 km,在成都平原的东南部还发育有一系列与龙泉山构造带平行的背斜构造,背斜主要由侏罗系、白垩系组成,西陡东缓,南部陡窄,北部宽缓,其主断裂分布于背斜的西北翼,也是成都盆地东缘构造带的一部分,其最主要的一条断裂为蒲江—新津断裂,与其伴生的褶皱为熊坡背斜。熊坡背斜并非为均匀应力下所形成的,而是断层活动时所导致的快速

抬升,但是由于滑脱层的存在,其形变则是以褶皱的形式吸收,并不直接发生错断^[1]。

蒲江—新津断裂是控制成都盆地第四纪沉降中心东缘的一条主要断裂,该断裂南西端始于蒲江以南,沿蒲江—新津—双流—茶店子—天回镇—新都—德阳一线呈北东向展布,全长约为180 km,断层面倾向SE,断裂走向为N30°~N40°,倾角不定,其控制了成都盆地的东南边界,导致了断层两侧第四系数十米的厚度差异^[12]。根据前人的研究表明,该断裂具有一定的晚第四纪活动性,且表现出明显的不连续性和分段的特点,至今仍然处于活动状态,现今仍小震频繁,据有史以来,蒲江—新津断裂曾经发生过6次大于3级的地震,最大的2次分别为1734年的蒲江5.0级地震以及1962年的洪雅5.1级地震,这2次中强震都发生于该断裂在新津以南的南段,而北段没有发生过大于4.7级地震的记载,但是仍有一系列零星的小震发生(图4)。根据该断裂第四纪以来的活动地貌表现及深部构造背景上的差异性,可以将此断裂以新津为界分为南北两段^[1, 12, 21]。

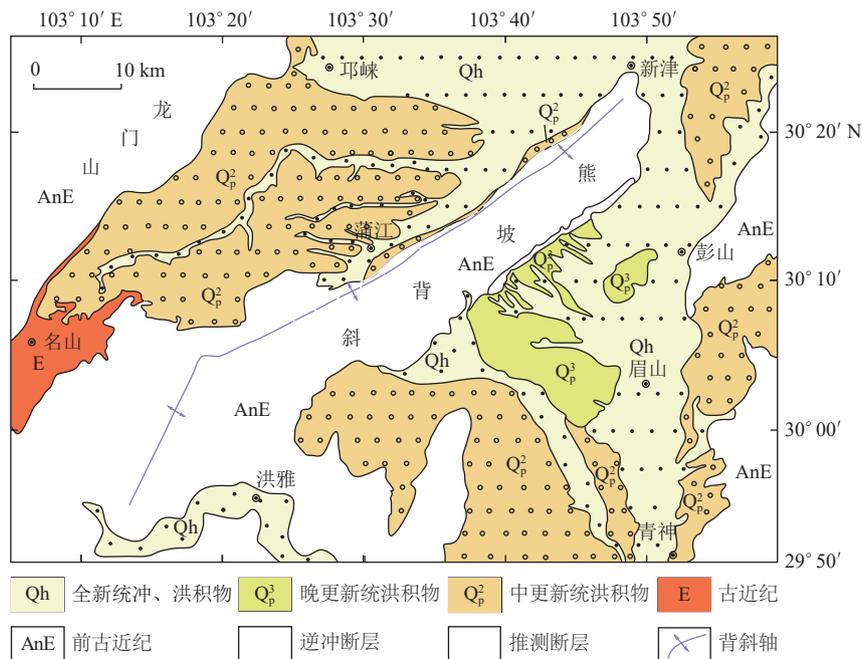


图3 熊坡背斜及蒲江—新津断裂展布图(据文献[3]修改)

Fig. 3 Distribution of the Xiongpo anticline and the Pujiang-Xinjin fault (modified from Ref.[3])

3 熊坡背斜发震构造分析

前人曾研究过造山带内出露的与造山主构造线相垂直的调节性断层,称之为捺断层^[22],捺断层是在逆掩岩片或滑动块体中由于差异运动而形成的走向

滑动断层,其走向常常和逆冲断层几乎直交,并几乎是直立的,出现在褶皱作用强弱交界区附近,即断层让位给倒转褶皱的部位^[22-23]。

3.1 震源参数分析

利用震源机制解^[24]来分析现代构造应力场是研

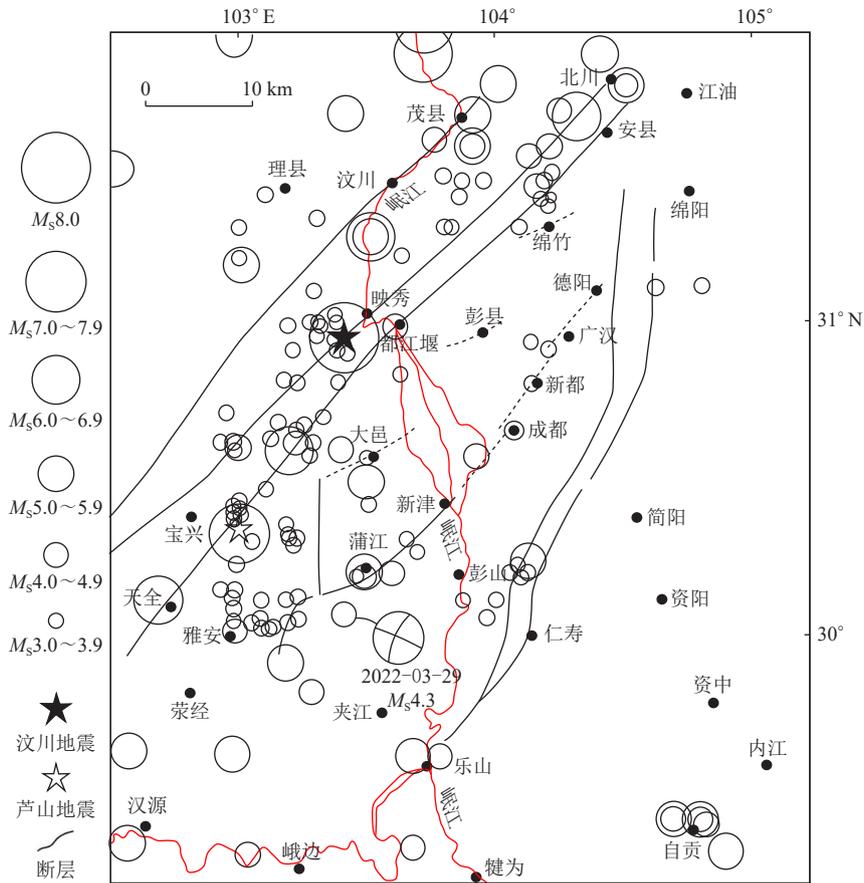


图 4 研究区域历史地震分布图(据文献 [11, 25] 修改)

Fig. 4 Distribution map of historical earthquakes in the study area (modified from Ref.[11, 25])

究现代构造应力场的一种方法, 该方法通过分析地震时断层的破裂方式和几何特征, 能够有效揭示地震发生区域的现代构造应力状态。因此, 诸多的学者使用该方法来反演地震分布区域的构造应力场。

2022 年 3 月 29 日丹棱地震后, 四川省地震局给出的丹棱地震的震源机制解和震源矩心深度(表 1)。该数据是根据 4 种不同速度模型得出的, 其中震源矩心深度对于研究该地震的发震构造以及如何进一步评估该区域未来的强震活动趋势具有重要的意

义 [26]。基于 4 种速度模型的丹棱地震震源机制解分析表明: 震级参数一致性较高, Lqs、Wzr、SCBB、Lms 模型反演矩震级 (M_w) 分别为 4.07、4.06、4.15、4.11; 矩心深度呈东西分异, Lqs 和 Wzr 模型为 3.5 km, SCBB 和 Lms 模型分别为 5.5 km、5.0 km; 且 4 种模型 P 轴方位角集中分布于 $67^\circ \sim 69^\circ$, 这充分反映出该次地震受到了北东东向水平挤压应力的控制。

根据 4 个速度模型反演结果对震源机制解的两个节面进行分析: 当以节面 I 为破裂面, 除 Lms 速

表 1 基于不同速度模型的丹棱地震震源机制解和震源矩心深度(由四川省地震局提供)

Table 1 Focal mechanism solution and focal centroid depth of the Danling earthquake based on different velocity models (from Sichuan Earthquake Agency)

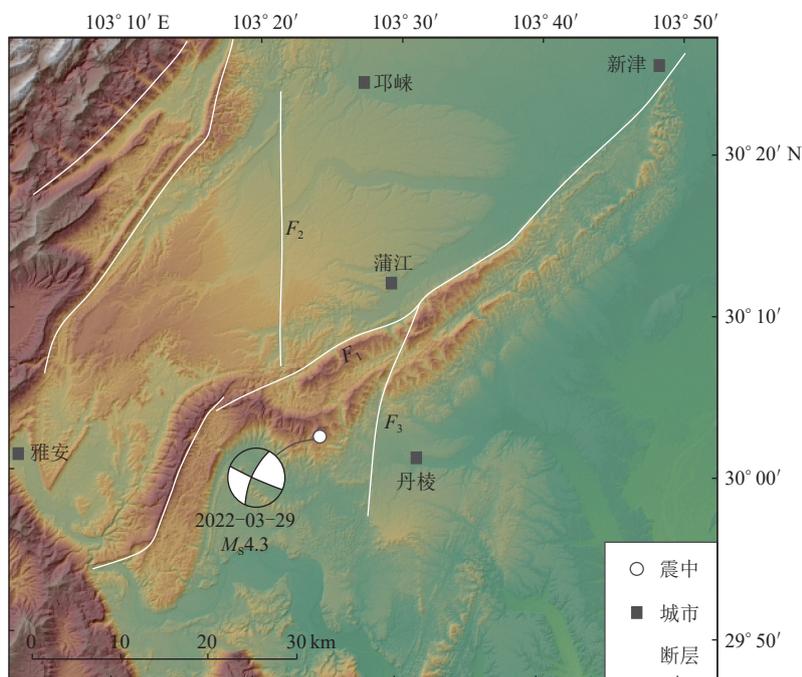
速度模型	震级 (M_w)	矩心深度/km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴	
			走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	走向/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	滑动角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$
Lqs	4.07	3.5	294	79	16	201	74	169	67	3	158	19	328	71
Wzr	4.06	3.5	296	82	14	204	76	172	69	4	161	16	325	74
SCBB	4.15	5.5	294	86	20	203	70	176	67	11	160	17	305	70
Lms	4.11	5.0	113	87	-16	204	74	-177	67	13	160	9	283	74

注: Lqs: 龙泉山断裂带区域模型 [27]; Wzr: 荣县—威远速度模型 [28]; SCBB: 川东模型 [29]; Lms: 龙门山模型 [30]

度模型走向为 113° 外,其余3个速度模型走向为 $294^{\circ}\sim 296^{\circ}$,即NW向节面为破裂面,倾角为 $79^{\circ}\sim 87^{\circ}$,滑动角为 16° 、 14° 、 20° 以及 -16° ,具有高角度左旋走滑特征;选取节面II时,各模型走向为 $201^{\circ}\sim 204^{\circ}$,即NE向节面为破裂面,倾角为 $70^{\circ}\sim 76^{\circ}$,滑动角为 169° 、 172° 、 176° 以及 -177° ,表现高角度右旋走滑性质。两种节面解均支持该地震受区域北东东向挤压应力场主导的走滑型破裂机制。

若选定节面I即NW向节面为破裂面,则此次丹棱地震的发震断裂,与震区主体构造的熊坡背斜、

蒲江—新津断裂呈高角度垂直。根据震源机制解显示,该断裂为陡倾的左旋走滑断裂,和造山带内掀断层的运动模式高度契合。据DEM图显示,熊坡背斜与蒲江—新津断裂在该断裂处构造变异明显。石桥坊断层处于震中以东,断面倾向南东东,倾角 69° 至直立,具东升西降的逆冲特征。此前,学者依据邛崃幅地质资料判定其南段被第四系所掩覆,但高精度DEM揭示该断层已向南延伸至丹棱县的西南部(图5),延伸长度较原认知增加5 km,证实了晚第四纪构造活动的持续性。



F_1 : 蒲江—新津断裂; F_2 : 大塘断裂; F_3 : 石桥坊断裂

图5 丹棱地震的区域构造格架图

Fig. 5 Regional tectonic framework of the Danling earthquake

若选择节面II即NE向节面为破裂面,则此次丹棱地震的发震断裂与震中区NE向主体构造(熊坡背斜—蒲江—新津断裂)呈平行展布,且根据震源机制解给出的倾角和滑动角以及深度,表现断层呈高角度右旋走滑性质,以此判断此次丹棱地震并非蒲江—新津断裂活动引起的,可能是与熊坡背斜相关的高角度的隐伏走滑断层,在北东东向的水平挤压应力作用下错动所导致的。

3.2 基于地震反射剖面分析

为厘定本次地震的发震构造,基于震源区附近的一条NE-SW走向的地震剖面进行了解译(图6)。解译结果清晰揭示了两条关键断裂:石桥坊断层以及高角度走滑型掀断层(图7)。综合研究表明,后者

为丹棱地震主控构造,其显著特征表现为与区域主体构造近垂直的走滑断裂系统。该断层位于剖面左侧,初步分析认为其形成很可能与2008年汶川地震后,区域构造应力持续向四川盆地传递密切相关。具体机制表现为:龙门山断裂带在应力释放过程中,通过差异应变传递方式将应力传递至盆地区域,导致该掀断层两盘运动速率差异,从而诱发断裂活动。这种差异运动不仅控制着掀断层的孕震机制,而且可能导致了熊坡背斜在此处的形态上的转变。

4 讨论

依据数值模拟结果的动力学分析(图8),初步解译发震断层面走向为NE-SW向,该结论与掀断层的

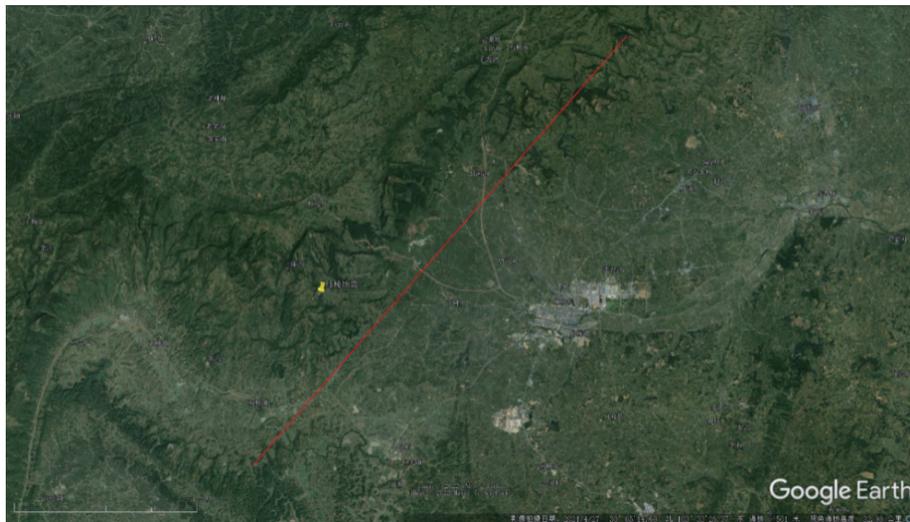


图 6 地震测线的位置(底图来自 Google Earth)

Fig. 6 Location of the seismic survey line (bottom map from Google Earth)

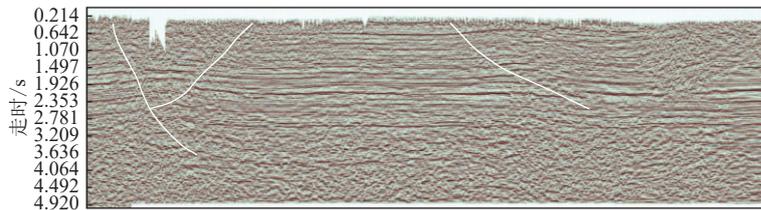


图 7 NE-SW 向的地震剖面解释(红线为断层)

Fig. 7 Interpretation of the NE-SW seismic profile (red lines represent the faults)

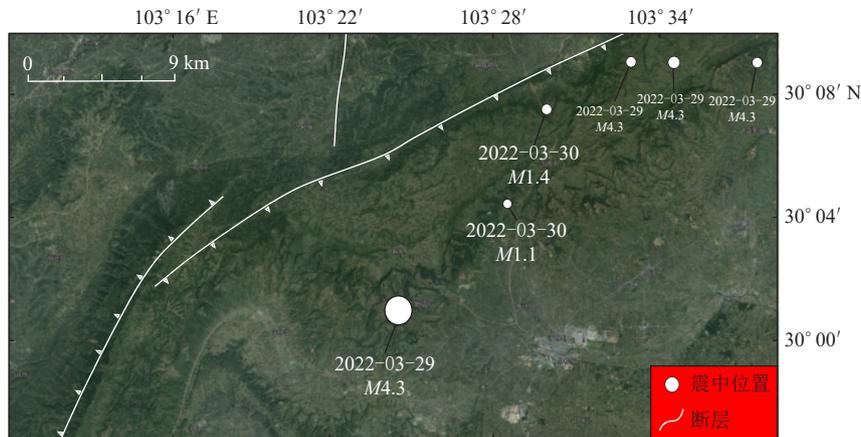


图 8 2022 年 3 月 29 日丹棱地震模拟计算结果(底图来自 Google Earth)

Fig. 8 Simulation results of the Danling earthquake on March 29, 2022 (bottom map from Google Earth)

理论存在矛盾。一般来说, 掀断层通常表现为与区域主构造线(NE 向)近正交的 NW 向展布特征, NW 向断裂才符合掀断层的运动学特征。从模拟计算图可以看出, 继 2022 年 3 月 29 日主震沿 NE 方向陆续发生一系列小震, 这些小震都位于蒲江—新津断裂的上盘且紧邻断层线。尽管受限于小震震级($M_L < 3.0$)无法获取精确震源机制, 但其空间展布特征表明可

能是主震触发断裂带局部应力调整所致。该现象揭示丹棱地震可能通过库仑应力传递激活相邻断层段, 即此次丹棱地震诱发了蒲江—新津断裂的活动。

关于该掀断层的区域动力学, 笔者认为自 2008 年汶川地震以及 2013 年芦山地震后, 区域应力场向着四川盆地内部传递过程中, 因应力分布不均衡, 从而引发了两侧逆冲体之间的差异滑动, 从而形成了

该断裂。

5 结论

通过对于震源机制解、高精度卫星图、DEM 高程数据和地震剖面的分析,得出以下结论。

(1)本次地震位于蒲江—新津断裂带附近,基于4种不同速度模型的震源机制解显示出此次地震的地震矩级为4.06~4.15级,震源深度为3.5~5.5 km,丹棱地震的发震构造为与熊坡背斜—蒲江—新津断裂高角度垂直的左旋走滑断层,震源机制解显示P轴方位角集中于67°~69°,受北东东向水平挤压应力控制。

(2)鉴于目前难以确定此次地震的最适节面,本文对两个可能的节面均展开了深入分析。笔者认为节面I的可能性更高,龙门山向四川盆地的逆冲扩

展过程中,两侧逆冲体差异滑动引发局部应力集中,形成该断层。汶川地震后区域应力场调整进一步触发其活动,余震空间展布显示可能激活蒲江—新津断裂局部应力释放。

(3)模拟计算显示,在丹棱地震后发生一系列沿NE方向展布的小震,尽管受限于小震震级($M_L < 3.0$)无法获取精确震源机制,无法判断这些小震为走滑还是逆冲,但其空间展布特征表明可能是主震触发断裂带局部应力调整所致。该现象揭示丹棱地震可能通过库仑应力传递激活相邻断层段,即此次丹棱地震诱发了蒲江—新津断裂的活动。这一发现提醒在监测和预测地震活动时需要考虑周边断层的响应和影响。深入研究这些小震的特征和规律,或许能更好地理解地震活动背后的机制,为地震预警和风险管理提供更准确的依据。

参考文献

- [1] 李敬波, 李勇, 赵国华, 等. 四川盆地熊坡背斜构造特征及其成因机制[J]. 现代地质, 2014, 28(4): 761-771
Li J B, Li Y, Zhao G H, et al. Structural features and genetic mechanism of Xiongpo anticline in Sichuan basin[J]. Geoscience, 2014, 28(4): 761-771
- [2] 姜大伟. 龙门山南段及其前陆区晚第四纪构造变形的河流地貌研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2017
Jiang D W. A fluvial geomorphology research about the Late Quaternary deformation of the southern Longmen Shan and its foreland basin[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2017
- [3] 郑文俊, 王伟涛, 李传友, 等. 熊坡背斜构造变形与蒲江—新津断裂活动特征[J]. 地震地质, 2008, 30(4): 957-967
Zheng W J, Wang W T, Li C Y, et al. The deformation of the Xiongpo anticline and the activity of Pujiang-Xinjin fault[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4): 957-967
- [4] 李勇, 周荣军, 赵国华, 等. 龙门山前缘的芦山地震与逆冲-滑脱褶皱作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(4): 353-363
Li Y, Zhou R J, Zhao G H, et al. Thrusting and detachment folding of Lushan earthquake in front of Longmenshan Mountains[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(4): 353-363
- [5] 李勤勤. 川西拗陷南段熊坡背斜构造特征及成因机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021
Li Q Q. Study on the structural characteristics and genesis mechanism of the Xiongpo anticline in west Sichuan depression[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021
- [6] 贾营营, 付碧宏, 王岩, 等. 青藏高原东缘龙门山断裂带晚新生代构造地貌生长及水系响应[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 825-836
Jia Y Y, Fu B H, Wang Y, et al. Late Cenozoic tectono-geomorphic growth and drainage response in the Longmen Shan fault zone, east margin of Tibet[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(4): 825-836
- [7] 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 1994, 68(2): 101-118
Liu H F, Liang H S, Cai L G, et al. Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(2): 101-118
- [8] 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 等. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式: 以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 177-186
Liu S G, Luo Z L, Zhao X K, et al. Coupling relationships of sedimentary basin-orogenic belt systems and their dynamic models in West China: A case study of the Longmenshan orogenic belt-West Sichuan foreland basin system[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 177-186
- [9] 金文正, 汤良杰, 杨克明, 等. 川西龙门山褶皱冲断带分带性变形特征[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1072-1080

- Jin W Z, Tang L J, Yang K M, et al. Deformation and zonation of the Longmenshan fold and thrust zone in the western Sichuan basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1072-1080
- [10] 李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 龙门山冲断带分段-分带性构造格局及其差异变形特征 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(4): 440-454
- Li Z W, Liu S G, Chen H D, et al. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt, West Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2008, 35(4): 440-454
- [11] 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 21-26
- Li Y, Zhou R J, Densmore A L, et al. Continental dynamic process and geological response in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 21-26
- [12] 李勇, 周荣军, 闫亮, 等. 龙门山构造地貌与表面过程 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 33-81
- Li Y, Zhou R J, Yan L, et al. Tectonic geomorphology and surface process of Longmen Shan[M]. Beijing: Science Press, 2017: 33-81
- [13] 孙肇才, 邱蕴玉, 郭正吾. 板内形变与晚期次生成藏: 扬子区海相油气总体形成规律的探讨 [J]. 石油实验地质, 1991, 13(2): 107-142
- Sun Z C, Qiu Y Y, Guo Z W. On the relationship of the intraplate deformation and the secondary formation of oil/gas pools: The general regularities of the oil/gas formation in marine environment of the Yangtze area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1991, 13(2): 107-142
- [14] 刘树根, 赵锡奎, 罗志立, 等. 龙门山造山带—川西前陆盆地系统构造事件研究 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(3): 221-230
- Liu S G, Zhao X K, Luo Z L, et al. Study on the tectonic events in the system of the Longmen Mountain-West Sichuan foreland basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2001, 28(3): 221-230
- [15] 王凤林, 李勇, 李永昭, 等. 成都盆地新生代大邑砾岩的沉积特征 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(2): 139-146
- Wang F L, Li Y, Li Y Z, et al. Sedimentary characteristics of the Cenozoic Dayi conglomerate in Chengdu basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2003, 30(2): 139-146
- [16] 刘树根, 李智武, 曹俊兴, 等. 龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征 [J]. 地质科学, 2009, 44(4): 1151-1180
- Liu S G, Li Z W, Cao J X, et al. 4-D textural and structural characteristics of Longmen intracontinental composite orogenic belt, southwest China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2009, 44(4): 1151-1180
- [17] Burchfiel B C, Royden L H, van der Hlist R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China[J]. *GSA Today*, 2008, 18(7): 4-11
- [18] 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京: 地震出版社, 1993
- Tang R C, Han W B. Active faults and earthquakes in Sichuan [M]. Beijing: Seismological Press, 1993
- [19] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学 [J]. 地震地质, 1994, 16(4): 389-403
- Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16(4): 389-403
- [20] 李汉武, 陶晓风. 蒲江地区熊坡断层特征及活动性研究 [J]. 四川地质学报, 2010, 30(4): 383-385, 389
- Li H W, Tao X F. Characteristics and activity of the Xiongpo fault in Pujiang[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2010, 30(4): 383-385, 389
- [21] 何银武. 试论成都盆地(平原)的形成 [J]. 中国区域地质, 1987, 6(2): 169-176
- He Y W. On the formation of the Chengdu basin (plain)[J]. *Regional Geology of China*, 1987, 6(2): 169-176
- [22] Dennis E G. International tectonic dictionary, English terminology[M]. Tulsa, Okla: American Association of Petroleum Geologists, 1967
- [23] Stone D S. New interpretations of the piney creek thrus and associated Granite Ridge tear fault, north eastern Bighorn Mountains, Wyoming[J]. *Rocky Mountain Geology*, 2003, 38(2): 205-235
- [24] 梁姗姗, 邹立晔, 刘艳琼, 等. 2024 年 7—12 月中国大陆地区 $M \geq 4.0$ 地震震源机制解测定 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(3): 172-178
- Liang S S, Zou L Y, Liu Y Q, et al. Determination of focal mechanism solutions of the earthquakes with $M \geq 4.0$ occurred in the mainland of China during July to December 2024[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2025, 55(3): 172-178

- Earthquake, 1994, 14(1): 65-72
- [29] Manga M, Beresnev I, Brodsky E E, et al. Changes in permeability caused by transient stresses: Field observations, experiments, and mechanisms[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): RG2004
- [30] Liao X, Wang C Y, Liu C P. Disruption of groundwater systems by earthquakes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(22): 9758-9763
- [31] Rojstaczer S, Wolf S. Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California[J]. *Geology*, 1992, 20(3): 211-214
- [32] Elkhoury J E, Brodsky E E, Agnew D C. Seismic waves increase permeability[J]. *Nature*, 2006, 441(7097): 1135-1138
- [33] 刘春平. 地壳应力与地下水动力响应[M]. 北京: 地震出版社, 2017
Liu C P. Crustal stress and groundwater dynamic response[M]. Beijing: Seismological Press, 2017
- [34] 岳冲, 屈春燕, 牛安福, 等. 玛多 $M_S7.4$ 地震对周边断层的应力影响分析[J]. *地震地质*, 2021, 43(5): 1041-1059
Yue C, Qu C Y, Niu A F, et al. Analysis of stress influence of Qinghai Maduo $M_S7.4$ earthquake on surrounding faults[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(5): 1041-1059
- [35] 徐芳, 鲁人齐, 王帅, 等. 基于多元约束方法的 2020 年四川青白江 $M_S5.1$ 地震构造研究[J]. *地震地质*, 2022, 44(1): 220-237
Xu F, Lu R Q, Wang S, et al. Study on the seismotectonics of the Qingbaijiang $M_S5.1$ earthquake in Sichuan Province in 2020 by multiple constraint method[J]. *Seismology and Geology*, 2022, 44(1): 220-237
- [36] 张致伟, 龙锋, 石富强, 等. 2022 年 6 月 1 日四川芦山 $M_S6.1$ 地震的发震构造与力学机制探讨[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(10): 4095-4110
Zhang Z W, Long F, Shi F Q, et al. Discussion on seismogenic structure and mechanical mechanism of the 1 June 2022 $M_S6.1$ Sichuan Lushan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(10): 4095-4110

=====

(上接第 667 页)

- [25] 方和第. 成都地区的地震灾害及其防御对策[J]. *四川地震*, 1989(2): 55-58
Fang H D. Earthquake disaster in Chengdu area and its prevention countermeasures[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1989(2): 55-58
- [26] 汪贞杰, 郭祥云. 2022 年 9 月 5 日四川泸定 $M_S6.8$ 地震矩心矩张量解[J]. *地震科学进展*, 2022, 52(10): 482-486
Wang Z J, Guo X Y. The centroid moment tensor solution of 2022 Luding $M_S6.8$ earthquake in Sichuan Province[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2022, 52(10): 482-486
- [27] Zhao M, Long F, Yi G, et al. Focal mechanism and seismogenic structure of the $M_S5.1$ Qingbaijiang earthquake on February 3, 2020, southwestern China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 644142
- [28] 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 四川盆地荣县—威远—资中地区发震构造几何结构与构造变形特征: 基于震源机制解的认识和启示[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(9): 3275-3291
Yi G X, Long F, Liang M J, et al. Geometry and tectonic deformation of seismogenic structures in the Rongxian-Weiyuan-Zizhong region, Sichuan Basin: Insights from focal mechanism solutions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(9): 3275-3291
- [29] 赵珠, 张润生. 四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究[J]. *地震学报*, 1987, 9(2): 154-166
Zhao Z, Zhang R S. Primary study of crustal and upper mantle velocity structure of Sichuan Province[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1987, 9(2): 154-166
- [30] 易桂喜, 龙锋, 乔慧珍, 等. 青藏高原东缘龙门山断裂带南西段地震危险性分析[J]. *国际地震动态*, 2012(6): 97
Yi G X, Long F, Qiao H Z, et al. Earthquake risk assessment for the southwestern Longmenshan fault zone along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2012(6): 97