

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.135>



基于 OpenQuake 的川滇断层交汇带精细化地震危险性评估

张奕哲¹, 毛无卫^{1,2}, 黄雨^{1,2}, 郑虎^{1,2*}

1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092

2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092

摘要: 为评估复杂构造背景下现有地震动区划图在活跃断裂带地震风险评估中的适用性, 提升地震危险性分析的准确性. 以 2022 年川滇地区 Ms6.8 级泸定地震影响区为研究对象, 基于 OpenQuake 平台开展概率地震危险性分析 (PSHA). 研究通过地震目录处理、震级转换、震源参数估算和断层建模, 构建包含背景地震源与断层源的区域地震模型, 并选取多种适用于活跃浅层地壳构造的地面运动预测方程 (GMPEs), 生成地震动参数和超越概率分布图. 结果表明, OpenQuake 模拟地震动分布与中国第五代地震动区划图基本吻合, 尤其在高峰值加速度 (PGA) 区域表征上更为准确. 随着峰值加速度 (PGA) 阈值的提高, 高超越概率区域逐渐缩小, 并集中于主要断层附近. 以 0.1 为震级档, 避免了五代图在地震矩释放率上的低估问题. 此外, 还表明强震风险主要集中在断层交汇地带, 建议将该区域作为重点监测与防护对象.

关键词: 危险性分析; OpenQuake; 川滇地区; 截断型古登堡—里克特关系; 工程地质学.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2025)10-3997-12

收稿日期: 2025-04-16

Refined Seismic Hazard Assessment of Fault Intersection Zones in Sichuan-Yunnan Region Based on OpenQuake

Zhang Yizhe¹, Mao Wuwei^{1,2}, Huang Yu^{1,2}, Zheng Hu^{1,2*}

1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: This study aims to evaluate the applicability of existing seismic ground motion zoning maps in earthquake risk assessment for active fault zones under complex tectonic settings and improve the accuracy of seismic hazard analysis. Focusing on the affected area of the 2022 Ms 6.8 Luding earthquake in the Sichuan-Yunnan region, probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) was conducted using the OpenQuake platform. Through seismic catalog processing, magnitude conversion, source parameter estimation, and fault modeling, a regional seismic model incorporating both background seismic sources and fault sources was established. Multiple ground motion prediction equations (GMPEs) suitable for active shallow crustal tectonics were selected to generate seismic motion parameter distribution maps and exceedance probability analysis results. The findings demonstrate that OpenQuake-simulated ground motion distributions align fundamentally with China's fifth-generation seismic

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42120104008).

作者简介: 张奕哲 (2000—), 男, 博士研究生, 主要从事地震工程地质研究. ORCID: 0009-0004-1379-2833. E-mail: 2410061@tongji.edu.cn

* **通讯作者:** 郑虎, E-mail: zhenghu@tongji.edu.cn

引用格式: 张奕哲, 毛无卫, 黄雨, 郑虎, 2025. 基于 OpenQuake 的川滇断层交汇带精细化地震危险性评估. 地球科学, 50(10): 3997–4008.

Citation: Zhang Yizhe, Mao Wuwei, Huang Yu, Zheng Hu, 2025. Refined Seismic Hazard Assessment of Fault Intersection Zones in Sichuan-Yunnan Region Based on OpenQuake. *Earth Science*, 50(10): 3997–4008.

ground motion zoning map, particularly showing enhanced accuracy in identifying high peak ground acceleration (PGA) zones. As PGA thresholds increase, high-exceedance probability areas gradually diminish and concentrate near major faults. By adopting 0.1 magnitude increments, this research avoids the underestimation of seismic moment release rates observed in the fifth-generation zoning map. Furthermore, results indicate concentrated strong earthquake risks in fault intersection zones, suggesting these areas should be prioritized for monitoring and protective measures.

Key words: hazard analysis; OpenQuake; Sichuan-Yunnan area; truncated Gutenberg-Richter relation; engineering geology.

0 引言

中国大陆处于全球地震带的交汇区域,地壳运动活跃,频繁发生中强以上等级地震(Han *et al.*, 2022).大地震的发生不仅造成严重的人员伤亡和经济损失,还引发滑坡、泥石流等次生灾害,加剧了灾难的影响范围与持续时间.次生灾害的连锁反应对基础设施、生态环境和社会稳定产生了长期破坏.例如,2022年鲜水河断裂带的泸定地震不仅直接导致房屋倒塌、道路损毁,还诱发了大量地质灾害(范宣梅等, 2022).在此背景下,系统性的地震危险性分析(probabilistic seismic hazard assessment, PSHA)成为地震科学中的关键任务之一.自20世纪中叶起,我国先后制定了5版全国地震烈度区划图或地震动参数区划图(李善邦, 1957; 邓起东等, 1980; 高孟潭, 2016),并从2001版全国地震烈度区划图中就采用了PSHA方法,为国家经济发展和城乡建设提供了重要保障.

PSHA通过量化地震发生的概率及其危害,为决策者提供关键数据支持,以制定有效的防震减灾策略,减少未来地震带来的风险.PSHA的概念由Cornell于1968年提出(Cornell, 1968),迅速成为全球评估地震危险性的标准方法.该方法整合了地震学、地质学和工程学等多学科的数据和方法,以评估特定地点在未来一段时间内,因地震引发的地面运动强度超过某预定水平的概率.

随着计算技术的发展和地震数据的积累,PSHA方法逐渐成熟和完善.20世纪90年代,个人电脑的普及和数值计算能力的提升使PSHA在地震工程和城市规划中得到广泛应用.21世纪,全球对地震风险管理的需求增长显著,尤其在地震活跃区域.2010年,全球地震模型(global earthquake model, GEM)基金会推出了OpenQuake Engine,这一开源软件平台为PSHA的应用提供了新的动力,推动了PSHA从学术研究向实际应用的转变.通过OpenQuake,各地科学家和工程师能够使用这一工

具进行地震危险性分析和风险建模(Pagani *et al.*, 2014).

PSHA的应用实践包括加利福尼亚的地震区划图更新、意大利中部地区的地震风险评估以及日本核电站周边的地震危险性分析.这些实例不仅协助相关地区评估和管理地震风险,还促进了地震安全规范和建筑标准的更新.PSHA从Cornell的理论提出到OpenQuake Engine的开发和广泛应用,展现了地震科学从理论到实践的演进过程,且加强地震危险性评估不仅能优化建筑规范和抗震设计,还能地为地震应急准备和灾后恢复提供科学依据(Baker *et al.*, 2021).

横跨鲜水河断裂带和安宁河断裂带的川滇地区,具有地质构造复杂、断裂带发育,地震活动频发(如2022年泸定6.8级地震)等特点,是我国地震危险性分析(PSHA)的重点研究区.尽管已有学者在该区域研究中取得系列成果,但随着观测数据的积累和工程抗震需求的提升,以下问题可作为深化研究的关键方向:首先,现有研究多采用传统的地震动衰减关系,未充分考虑区域地质构造的复杂性(Liu and Douglas, 2024);其次,研究区域规模较大,对特定区域断层建模的精细化程度不足,未能准确反映活跃断裂带的地震潜势,对工程项目建设难以提供指导与决策;最后,对地震目录的处理和震源参数的估算方法存在改进空间(程佳等, 2020).通过构建更符合区域构造特征的震源模型,可有效降低评估结果的不确定性,为工程抗震和灾害防治提供更精准的科学支撑.

基于川滇地区复杂的构造动力学背景和地震活动特点,以2022年泸定 M_s 6.8级地震影响区为研究区域,利用OpenQuake平台开展概率地震危险性分析(PSHA).通过整合地震目录的清洗与完整性验证、震级转换、震源参数估算和断层建模等多环节,构建包含断层源与背景地震源的区域地震模型,并采用多种地面运动预测方程(ground motion prediction equations, GMPEs)进行计算,生成研究

区域的地震动参数分布图及地震超越概率分析结果,旨在揭示川滇地区主要断裂带的地震风险特征。

1 研究区域构造背景及地震发育情况

川滇地区是青藏高原向东挤压作用最为显著的区域,受到四川盆地的阻挡和地壳流体的影响,该地区的构造活动非常复杂。如图 1 所示选择川滇地区中青藏高原东缘的 2022 年泸定 $M_s6.8$ 级地震的影响区作为研究区,该地区地形陡峭、地震活动频繁,属于高频地震活动区。区域内分布的鲜水河断裂是中国大陆活动性最强的断裂带之一,该断裂带起始于甘孜东谷,呈北西—南东走向,经过炉霍、道孚、乾宁、康定,延伸至泸定磨西南部,并在石棉处与龙门山和安宁河断裂带交汇,形成川西著名的“Y 字形”结构。全长约 350 km,是一条活动强烈的大型左旋走滑断裂带(李彩虹等, 2022),自 1700 年以来该断裂带发生过 20 次以上的 $M_s6.0$ 级及以上地震(Wen *et al.*, 2008),且自 2022 年泸定 $M_s6.8$ 级地震发生后,仅释放了磨西断裂上地震矩亏损的小部分,剩余的能量积累仍具备发生 $M_s6.8$ 级以上的

强震条件(尹力等, 2024)。

研究区域主要断裂带包含鲜水河断裂带、龙门山断裂带、小金河断裂带及小江断裂带,其活动性直接影响到地震活动的分布和性质。如图 2 所示,鲜水河断裂带作为活跃的左旋走滑断裂(Allen *et al.*, 1991),其上的地震活动主要表现为横向滑动,沙滩球多展示剪切应力状态,此种机制表明沿断裂线的地壳块体在东西向受到不均匀的水平应力作用,从而引发相应的地震活动。由于不同断裂带的交汇,此处的地震机制沙滩球显示出多种滑动方式的混合,表明该地区的应力场异常复杂,涉及到多方向的应力重分布和能量释放。小江断裂带则表现为典型的右旋走滑特性,其地震机制沙滩球常显示出南北向的压缩和张力区。

综上所述,川滇地区的构造动力学复杂,不同的断裂带根据其特定的构造环境和应力场,呈现出各异的地震机制。这些分析对于揭示地震的构造背景以及评估未来地震活动的潜在风险具有重要意义,是进行地震预测和相关地质灾害评估的重要基础。基于以上构造背景及地震发育情况,对研究区域($101^{\circ}\sim 104^{\circ}\text{E}$, $28^{\circ}\sim 31^{\circ}\text{N}$)的历史地震分布进行统

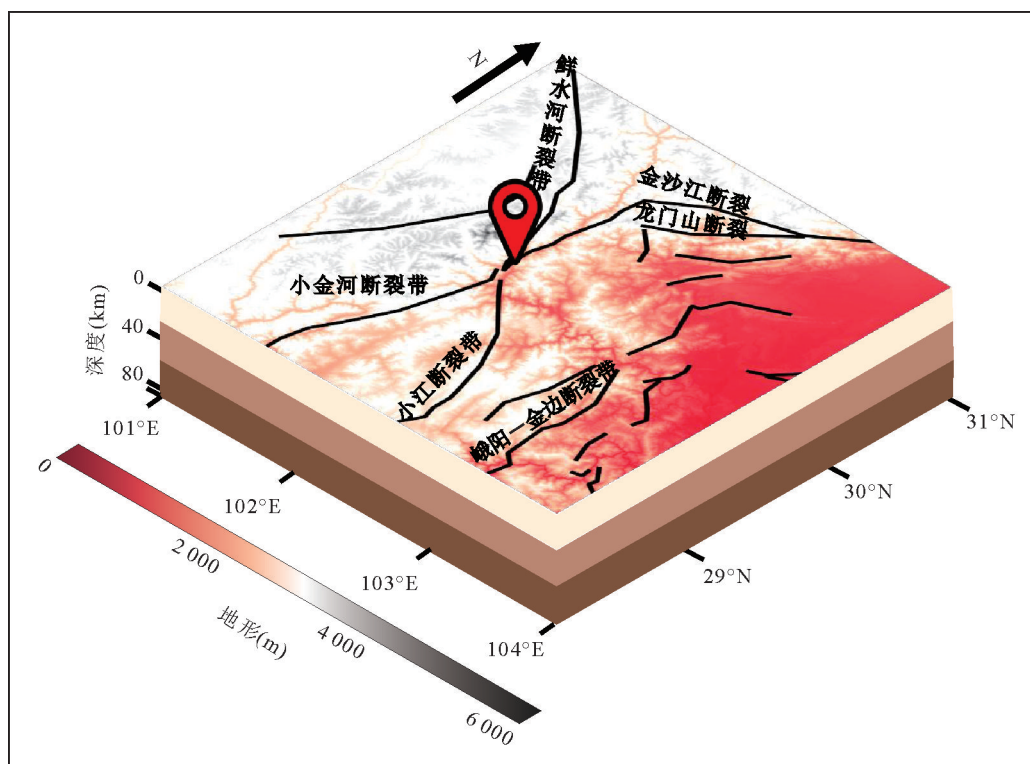


图 1 研究区域地形及断层分布

Fig.1 Topography and fault distribution of the study area

标点处为 2022 年泸定 $M_w6.8$ 地震,断层线的引用数据来源于中国地震灾害防御中心地震活动断层探索数据中心(<https://www.activefault-datacenter.cn>)

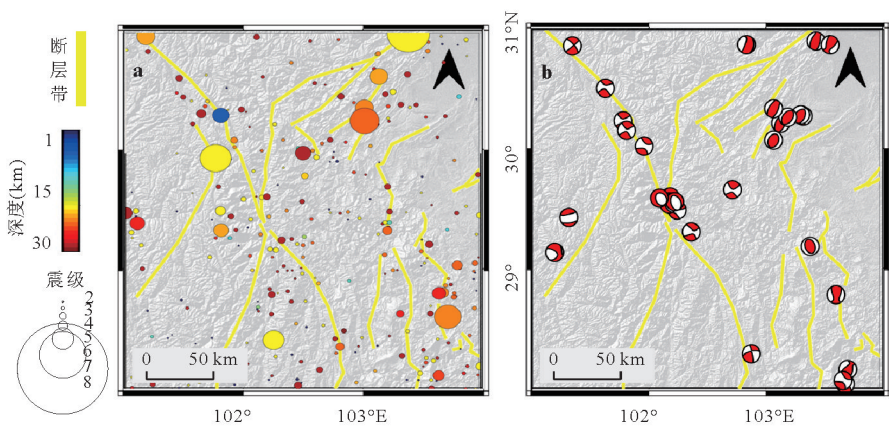


图2 研究区域地震分布情况及机制

Fig.2 Seismic distribution and mechanisms in the study area

a. 研究区域的主要活动断裂带与其地震深度震级分布图,黄色线为活动断裂;b. 研究区域部分地震的震源机制图,沙滩球为1976—2024年 $M_s4.7$ 以上地震震源机制解(www.globecmt.org)

计分析,通过 OpenQuake 平台对研究区域的地震危险性进行评估与分析.

2 OpenQuake 平台应用及震源模型构建流程

OpenQuake 平台由全球地震模型(GEM)基金会开发,整合了概率地震危险性分析(PSHA)的先进算法,涵盖地震危险性评估与灾害分析全流程.其核心模块包括灾害模型工具包(hazard modeller's toolkit, HMTK)、地震动工具包(ground motion toolkit, GMTK)和计算引擎(OpenQuake Engine) (Pagani *et al.*, 2014).HMTK 提供地震目录清洗、断层建模、地震动预测方程(GMPEs)评估等基础功能,支持生成地震危险曲线和地震动分布图,通过数据验证优化模型精度(Albini *et al.*, 2014).OpenQuake Engine 作为计算核心,可处理从单体建筑到国家级(如意大利,人口约 6 000 万,面积约 301 340 km²)的多尺度风险评估(Dolce *et al.*, 2021),结合数据管理平台和 Web 交互界面实现分析结果的可视化,如图 3 所示的泸定地震峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)情景模拟图,情景地震模拟不同于概率地震危险性分析(PSHA),其主要目的是:在已知特定地震事件或设想地震源参数条件下,预测其造成的地震动空间分布,可用于辅助震后快速评估、城市韧性评估与应急响应规划.GEM 基金会通过国际合作推动平台应用,开展在线培训与技术支持,提升全球地震风险

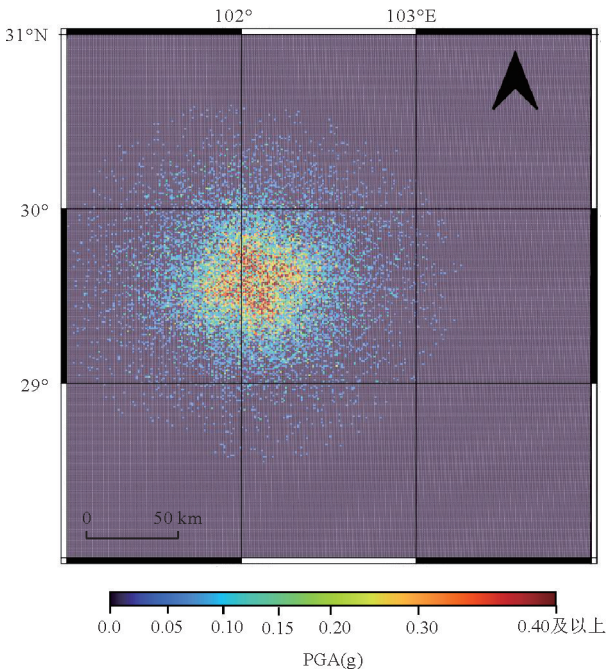


图3 OpenQuake情景地震模拟下的泸定地震PGA分布
Fig.3 PGA distribution of Luding earthquake under Open-Quake scenario seismic simulation

管理能力.该平台兼具科研与工程应用价值,不仅为地震危险性研究提供标准化工具链,还通过开放共享促进全球防震减灾能力的协同发展.

2.1 震级转换

面波震级(M_s)是我国历史地震目录中采用的震级类型,但由于其仅依赖周期面波振幅,对 $M_w > 8.0$ 以上的地震无法准确表征断层总能量释放(如1960年智利地震 $M_s=8.5$, $M_w=9.5$),存在“震级饱

和”现象;而矩震级(M_w)直接关联地震矩,量化了断层破裂的力学本质,可直接标定所有大小地震的震级,不会出现“震级饱和”现象,故在地震危险性分析和地震工程中,一般倾向于使用矩震级(Aki, 1972).因此,统一将其他震级转换为矩震级是进行 PSHA 分析的必要步骤.

通过访问国家科学地震数据中心与 ISC 国际地震中心公报得到了研究区域 1926—2022 年面波震级(M_s)在 3~10 级,震源深度在 0~50 km 的共 902 个地震事件作为地震目录.采用了 Cheng *et al.* (2017)提出的一般正交回归方法来实现传统震级向矩震级的转换,对于 1966—1765 年期间的地震,使用以下经验公式进行转换.当 $M_s \geq 7.0$ 时,

$$M_w = (1.05 \pm 0.27)M_s - (0.90 \pm 2.02). \quad (1)$$

当 $M_s < 7.0$ 时,

$$M_w = (0.62 \pm 0.11)M_s + (2.13 \pm 0.69). \quad (2)$$

而对于 1967 年以后发生的地震,则采用以下公式.当 $M_s \geq 7.0$ 时,

$$M_w = (1.28 \pm 0.20)M_s - (2.42 \pm 1.47). \quad (3)$$

当 $M < 7.0$ 时,

$$M_w = (0.85 \pm 0.03)M_s + (0.59 \pm 0.18). \quad (4)$$

将研究区域历史地震目录信息通过公式(1)~(4)的震级转换,本文到了统一的矩震级地震目录,为研究区域的 PSHA 提供了可靠的数据基础.

2.2 地震目录去聚类及完整性验证

在地震目录的编制中,为了确保地震事件的独立性,采用 Gardner and Knopoff (1974)提出的去聚类算法(公式(5)~(6)).该方法通过固定的时间—距离窗口来识别余震,通过应用此算法,处理得到 309 个独立的地震事件,为后续的概率地震危险性

分析(PSHA)提供了准确的基础数据.图 4a 为研究区域内去除余震的基本情况.

$$\text{distance}(\text{km}) = 10^{0.1238M + 0.983}, \quad (5)$$

$$\text{time}(\text{a}) = \begin{cases} 10^{0.032M + 2.7389} & (M \geq 6.5) \\ 10^{0.5409M - 0.547} & (M < 6.5) \end{cases}. \quad (6)$$

本文基于 Stepp (1972)提出的地震目录完备性分析方法,采用 OpenQuake 平台中的 Stepp 算法模块进行实现.具体计算方法为,将原始地震目录中的事件年份转换为小数年格式,随后按照指定震级区间与时间窗口统计地震事件数及其归一化标准差(σ),并在对数坐标下对 σ 与时间关系进行双线性拟合.拟合过程以泊松过程的理论斜率(-0.5)为前段固定值,通过优化后段斜率与折点位置确定每个震级区间的完备起始年份.所得完备震级及其对应年份汇总形成完备性分析表,图 4b 中红色折线即为该表的可视化结果,其中折线上部区域表示对应震级区间的地震记录满足统计完备性要求.

图中 1970—1990 年段曲线偏低的情况,主要原因在于该时间段内部分震级地震样本数量较少,尚未达到泊松统计意义上的稳定性,因而对应的完备时间判定结果相对滞后.结合前期目录的震级统一转换与余震去聚类处理,最终获得一份具备统计独立性和数据完备性的地震目录,用于后续地震危险性分析.

2.3 区域最大震级和深度分布

本文采用 OpenQuake 平台中实现的 Cumulative Moment 模块,对研究区最大震级进行估算.该方法基于 Makropoulos and Burton (1981)提出的累积地震矩法,通过将地震目录中各次地震的震级数据转换为地震矩,并逐年累计,构建实际累计地震

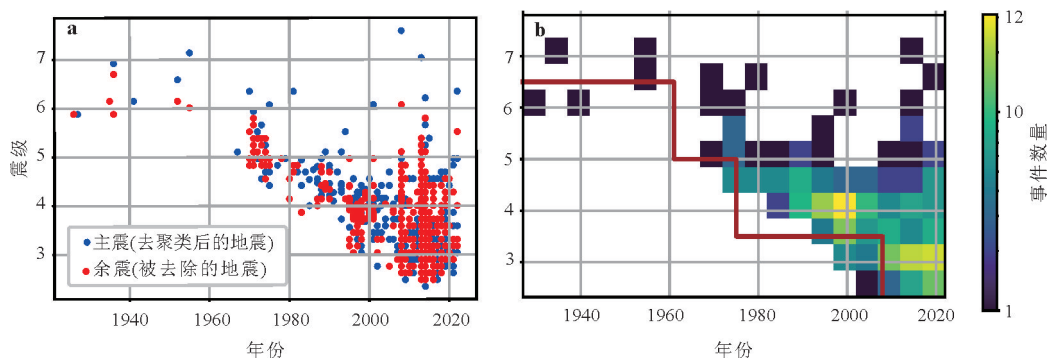


图4 地震目录去聚类及完整性验证

Fig.4 Earthquake catalog declustering and completeness verification

a. 研究区域主要地震事件的震级—时间分布图,蓝色点为主震,红色点余震;b. 研究区域主要地震事件随时间和震级的分布图,中间的红线代表地震完整性分析的边界,用于区分地震目录中数据的完整性和不完整性部分

矩释放曲线.随后以地震矩年均释放率构建期望的线性释放趋势,并据实际与期望累计曲线之间的最大偏差,反推出区域可能发生的最大震级.图中可见,实际累计地震矩曲线因地震活动的非均匀性呈现跳跃式增长,而预期累计地震矩曲线则表现为统计意义上的线性趋势,两者之间的差异反映了地震能量释放过程的非平稳性.此外,为考虑地震目录中震级测量误差对估算结果的不确定性影响,本文采用 Bootstrap 抽样方法对震级序列进行重复模拟,共进行 100 次抽样,最终获得稳健的最大震级估算结果为 7.609.

在进行震源建模之前需要计算地震目录的震源深度分布和概率质量函数(PMF),这种分析可以通过标准化直方图实现,显示每个深度区间中的震源中心百分比.表明震源中心落在各个深度区间的可能性(Lamontagne,2013).

2.4 地震震级—频次关系计算

古登堡—里克特首次提出了地震发生率与地震震级之间的对数关系($G-R$ 关系)(Gutenberg and Richter,1955),这一关系是 PSHA 建模中的核心.由于地震观测历史时间有限,且历史地震震级存在着较大的误差,在计算 $G-R$ 关系时缺少对较大震级地震发生率的控制,使得计算存在较大误差;因此需要在 $G-R$ 关系中设置一个上限,控制区域最

大震级的无限增大,故提出截断型古登堡—里克特关系(Kagan,2002).本研究选用截断型古登堡—里克特关系来定义研究区域的地震发生率,公式如下:

$$N(m)=\frac{1-(\frac{M_c}{M})^\beta}{1-(\frac{M_c}{M_{max}})^\beta}, \tag{7}$$

式中: $M_c \leq M \leq M_{max}$,其中 M_c 是最小完整性震级,由完整性计算得出, M_{max} 是最大震级,由区域最大震级计算得出, β 为地震频度衰减参数,与古登堡—里克特关系中 b 值相关.

为了更精确地估计截断式古登堡—里克特关系中的参数,利用 OpenQuake 软件平台中集成的 b 值最大似然法.该方法基于 Aki(1965)提出的传统统计技术,结合了现代地震目录的变化完整性(Taroni,2020),具体公式如下:

$$b=\frac{\frac{n-1}{n}}{\ln(10)(\frac{\sum_{i=1}^n(M_i-M_c^{(k)})}{n}+\frac{\Delta M}{2})}, \tag{8}$$

式中: n 为地震的数量, M_i 是每个地震的震级, M_c 是最小完整性震级, ΔM 是两个连续记录震级值之间的差.

同时采用了 Weichert(1980)和 McGuire(2004)的方法来计算 a 值,这有助于完善地震活动性模型的精确度.通过综合这些参数的计算,得出研究区域的 $a=3.067(\pm 0.331)$, $b=0.708(\pm 0.096)$.最终,这些数据被用于生成地震发生率模型,如图 5b 所示,其中红色线条表示累计发生率,用于重点关注大震级地震的风险评估;蓝色线条表示增量发生

表 1 震源深度概率质量函数 (PMF) 分布

Table 1 Probability mass function (PMF) distribution of hypocenter depth

深度 (km)	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5
概率	0.279	0.046	0.384	0.228	0.050	0.013

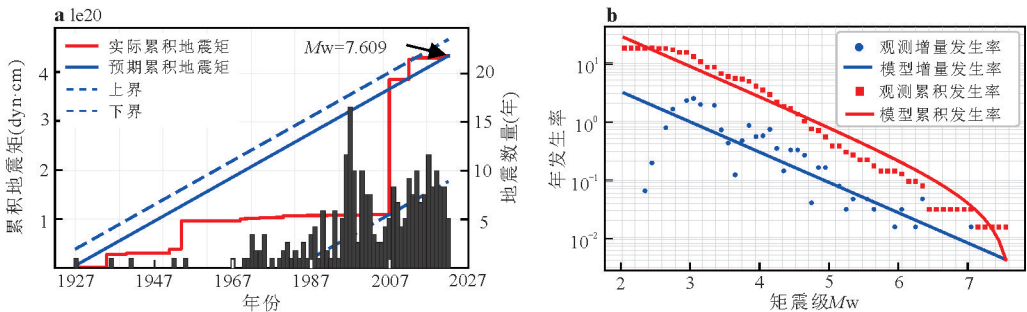


图 5 研究区域最大震级与地震震级—频次关系计算

Fig.5 Maximum magnitude and magnitude-frequency distribution in the study area

a.川滇地区地震最大震级估算的累积地震矩曲线图,其中红色实线为实际累积地震矩,蓝色实线为预测累积地震矩,虚线为上下界,箭头指示最大震级估算值($M_w=7.609$);b.川滇地区地震发生率模型与观测数据对比图,其中蓝色点为观测增量发生率,蓝色实线为模型增量发生率;红色方块为观测累积发生率,红色实线为模型累积发生率

率,更侧重于分析具体震级的发生频率。

2.5 断层源与背景地震源的建立

断层地震通常会产生更为显著且局部的震动,而背景地震可能覆盖更广泛的区域,但震动强度较低,因此区分断层地震与背景地震对于准确评估区域地震风险至关重要(Schwartz and Coppersmith, 1984)。采用程佳等(2020)提出的方法,将地震频度关系分为两部分:一部分源自特定的断层地震活动,另一部分源自背景地震活动。针对背景地震源,应用平滑处理方法,将地震发生概率均匀分布到整个研究区域,以模拟无明确断层信息的地震活动。如图6所示,为平滑处理后的地震发生率,直观地展示了地震活动与地理位置之间的关系。然而,对于已知的断层源,采用断层滑动速率来描述地震发生率的累积特征,利用OpenQuake平台中的截断型古登堡—里克特关系,将滑动速率转化为断层各震级的年发生率。对于中国大陆西部地区,回归结果显示与全球数据(Blaser *et al.*, 2010)的统计结果相似,因此破裂关系仍选择WC94。

3 模型计算结果

基于建立的断层地震源和背景地震源模型,本

文使用OpenQuake计算引擎对川滇地区进行了地震危险性分析,生成了研究区域的PGA分布图和抗震烈度为7级和8级时,研究区域在未来50年内的超越概率空间分布。

本模型使用多个适用于活跃浅层地壳的地面运动预测方程(GMPEs),采用了Dangkua等在对中国大陆PGA的分析后推荐使用的逻辑树模型,即ASK14, BSSA14, CBI4 和 CY14,权重均等于0.25。上述GMPEs基于全球地震数据构建,并包含2008年汶川地震及其余震的中国大陆数据。与第五代地震动参数区划图所采用的Y LX13模型(俞言祥等, 2013)相比,本文所选GMPEs在80 km范围内衰减更缓,在 $M_w=8.0$ 时与实测数据匹配性更高;而Y LX13模型在80 km内PGA偏高,80 km外衰减过快,可能低估远场地震风险。此外,五代图未采用多GMPEs联合建模,缺乏对模型不确定性的定量处理。本研究通过逻辑树加权组合,综合考虑4个GMPEs的差异,提升了模型在近场与远场的预测平衡性与适应性。综上,Dangkua *et al.* (2018)认为该模型不仅在中国大陆具有广泛适用性,亦适用于川滇地区。

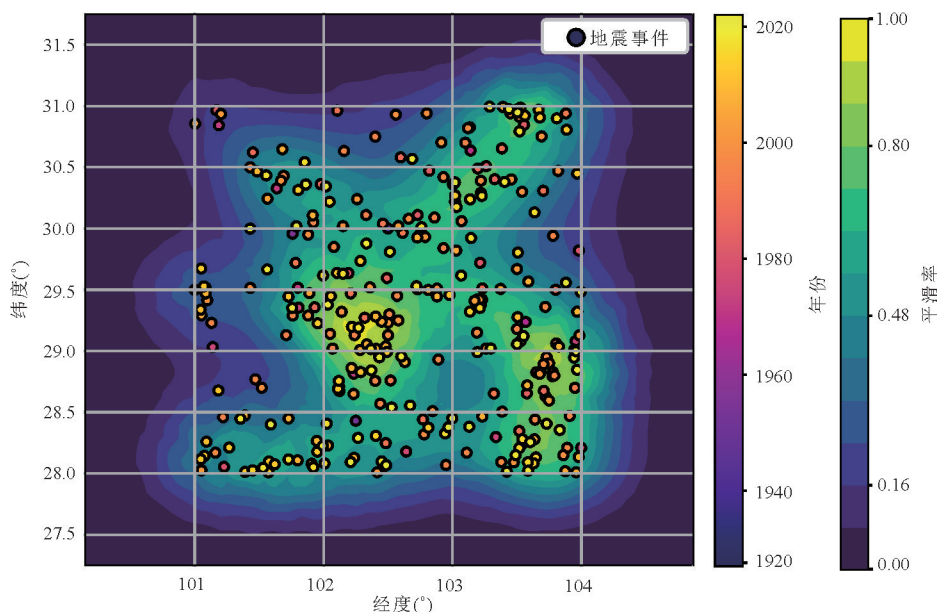


图6 平滑背景地震源的归一化地震发生率等高线

Fig.6 Normalized seismic rate contours for smoothed background seismic sources

图中的左右两个颜色条分别是年份与平滑背景地震源的平滑率。左颜色条表示地震发生的时间,由蓝色到黄色表示年份依次递增;右颜色条表示地震发生概率的空间分布强度,从紫色到黄色依次渐强

在确定地震动衰减关系的同时,使用 $V_{s30}=760$ m/s 的基岩场地条件,计算 PGA(峰值加速度)的过程中,设置了 200 km 的截断最大距离,这是基于浅层地壳活动程度较高地区的地震影响范围估计(Seyhan and Stewart,2014).

图 7 为研究区域内 OpenQuake 计算出的 PGA 分布图与中国第五代地震动分布图的对比.根据 OpenQuake 结果展示出的地震加速度分布图可得,高 PGA 区域可见于鲜水河断裂带、小金河断裂带和小江断裂带,这些区域的地质构造活动性强,断裂带极易发生级联破裂,其周边 PGA 几乎都大于 0.4 g,高 PGA 值正是这些断层应力积聚集中及频繁活动性的直接体现.与五代图的对应区域相比,只有康定段和磨西段北部的 PGA 值最高且大于 0.4 g,鲜水河断层上的其他区域如乾宁段、道孚段区域的 PGA 值则在 0.3~0.4 g 之间.值得一提的是,2022 年泸定 $M_s6.8$ 级地震的震源位置在五代图中对应的 PGA 值仅为 0.2 g,且此次地震仅释放了磨西断裂上地震矩亏损的小部分,剩余的能量积累仍具备发生 $M_s6.8$ 级以上的强震条件.因此对比模拟结果,五代图在反映大地震的潜在危险性方面存在不足,尤其体现在没有准确展示鲜水河断裂带磨西段南部的地震风险.从 PGA 分布图的形状看,五代图结果主要基于潜在震源区,而 OpenQuake 计算结

果是基于断裂错动和背景地震发生率的叠加,因此其结果与断层的吻合程度更高,在高 PGA 区域表征上具有较高的准确性.

PGA 分布图在右上角存在成条状的高 PGA 值区域,主要是由龙门山断裂带的金汤弧形断裂和龙北川—映秀断裂带造成的.金汤弧形断裂是一个具有显著地质活动的逆倾滑加右旋走滑断裂系统,地处四川省松潘县到甘孜县一带,由其处于印度板块与欧亚板块碰撞带的关键位置所驱动(Lei *et al.*, 2016);北川—映秀断裂是一条位于四川省北部穿过汶川县至都江堰市,主要表现为右旋走滑性质的活动断裂.GPS 观测数据表明,金汤弧形断裂的水平滑动速率为 6~7 mm/a,显著高于北川—映秀断裂带的 1 mm/a(徐锡伟等,2003).根据地震矩率理论,断层地震发生率与其滑动速率呈正相关关系,因此滑动速率较高的金汤弧形断裂应具有更强的地震活动性.然而,历史地震记录显示:北川断裂于 2008 年发生矩震级 7.9 的汶川地震,而金汤断裂至今未记录到 $M \geq 7.0$ 事件.这种矛盾暗示断层摩擦本构行为的关键作用,金汤弧形断裂在滑动过程中,可能发生了速度强化现象(Perfettini and Ampuero, 2008),即随着滑动速率的增加,断层间的摩擦系数也在增加,运动状态趋于稳定,抑制了断层应力积累;而北川断裂带上可能发生速度弱化现象

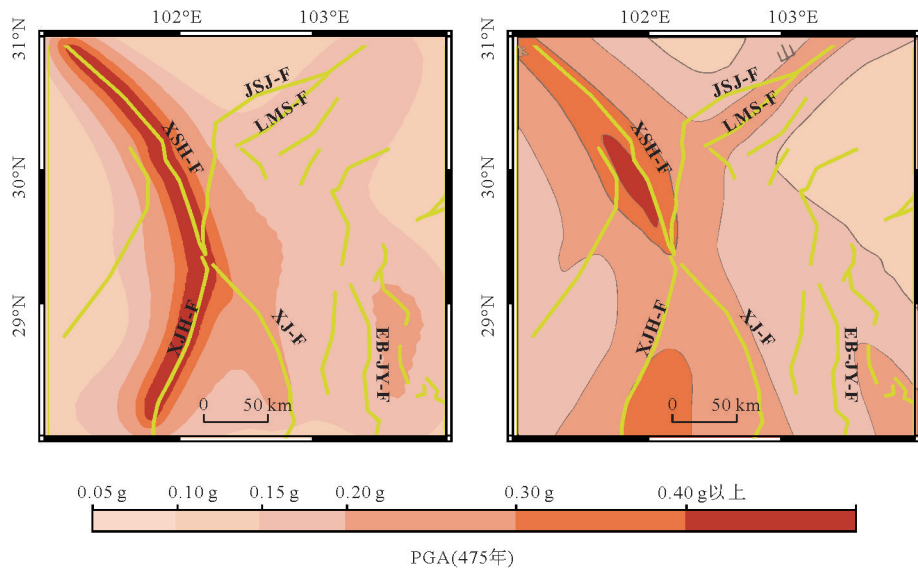


图 7 研究区域的 OpenQuake 的模拟结果的 PGA 分布图与中国第五代地震图对比

Fig.7 Comparison of OpenQuake-simulated PGA distributions with China's fifth-generation seismic zonation map in the study area

XSH-F. 鲜水河断裂带; XJH-F. 小金河断裂带; XJ-F. 小江断裂带; JSJ-F. 金沙江断裂带; LMS-F. 龙门山断裂带; EY-JB-F. 峨边—金边断裂带

(Zhang and He, 2013), 产生了不稳定的粘滑现象, 引发了矩震级为 7.9 的强烈地震. 因此在评估断层地震危险性时, 需综合考量滑动速率与摩擦特性的耦合效应(Li *et al.*, 2023). 单纯依赖滑动速率参数可能低估断层的潜在地震潜势(如北川断裂案例), 或高估蠕滑断层的大震风险(如金汤断裂案例).

超越概率指特定场地在给定时间基准期(本研究采用 50 a)内, 遭遇地震动峰值加速度(PGA)超过预设阈值的概率. 本研究基于概率地震危险性分析(PSHA)方法, 针对预设的 PGA 阈值(0.10 g、

0.15 g、0.20 g、0.30 g), 计算其对应的 50 a 超越概率空间分布. 根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010), 预设的 PGA 阈值相当于场地在 7~8 度的抗震设防烈度. 区别于单纯描述 PGA 幅值的空间变化, 着重揭示不同强度地震动发生的概率特征, 为差异化设防提供量化支撑.

图 8a 展示了 PGA=0.1 g(7 度设防)条件下, 研究区域 50 a 的超越概率分布. 结果显示, 超越概率较高的区域通常位于已知活跃断裂带附近, 如鲜水河断裂带、小金河断裂带. 如图 8b、8c 所示, 随着

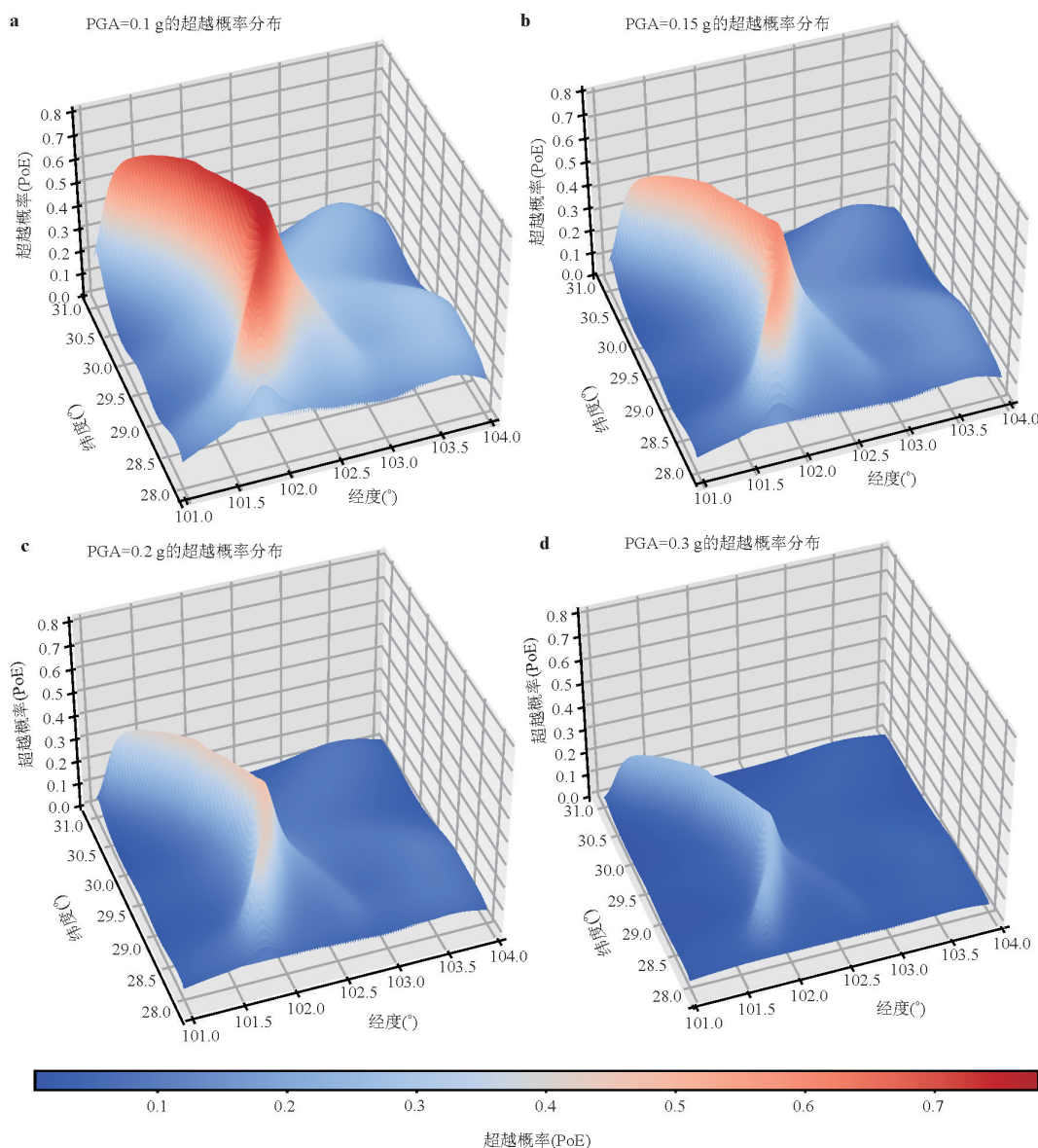


图 8 不同抗震烈度等级下研究区域 50 a 内地震动超越概率的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of seismic motion exceedance probabilities within 50 a under different seismic intensity levels in the study area

a. 抗震烈度等级为 7 级, PGA=0.10 g; b. 抗震烈度等级为 7 级, PGA=0.15 g; c. 抗震烈度等级为 8 级, PGA=0.20 g; d. 抗震烈度等级为 8 级, PGA=0.30 g

PGA 阈值提升至 0.15 g(7 度设防特定地区)和 0.20 g(8 度设防),研究区域内平均超越概率相较于 0.10 g 条件下降低,且概率较高的区域收缩至主要断裂交汇部位(如鲜水河断裂与龙门山断裂交汇带),这些区域在防震减灾工作中应作为关键监测和防护对象.如图 8d 在 PGA=0.3 g(8 度设防特定地区)条件下,整体超越概率显著降低,仅在主要断裂沿线仍存在较高超越概率,特别是在断裂的深部或几何形态突变位置,如鲜水河断裂的某些弯曲段.这表明在极端地震事件下,部分区域仍可能经历剧烈的地震动.

4 结论与展望

本文针对川滇地区复杂的构造背景和高地震活动性,利用 OpenQuake 平台对泸定地震影响的高频地震区进行了精细化建模,开展了概率地震危险性分析(PSHA),探讨了研究区域 PGA 与超越概率的分布特征,并评估了现有地震动区划图在活跃断裂带地震风险评估中的适用性.

(1)通过与中国第五代地震动参数区划图对比发现,现有区划图在震级处理上采用了代表性震级的方法,降低了区域地震矩释放率,未能充分展示潜在的地震危险性,而本研究以 0.1 为震级档,避免了五代图在地震矩释放率上的低估问题,从而复现出更接近现实情况的地震矩释放率.

(2)OpenQuake 模拟 PGA 分布结果表明,鲜水河断裂带、小金河断裂带和小江断裂带等主要活动断裂周边为地震高危区域,PGA 值可达 0.4 g 以上,与五代图相比,模拟的结果在高 PGA 区域表征上具更高的准确性,且更全面地反映了活跃断裂带的潜在风险,尤其是在鲜水河断裂带磨西段南部.且随着 PGA 值的增加,超越概率较大的区域逐渐减少并集中于特定断层线附近及断层交汇处,在防震减灾工作中应重点监测和防护这些区域.

(3)当前模型在断层的区域应力场耦合机制方面存在局限.未来需构建多参数联合约束的断层源(摩擦本构行为、滑动速率),系统解析断层滑动模式(速度强化/弱化)与地震复发规律的动态关联,此类改进将显著提升潜在地震能量评估的物理基础,为韧性防灾规划提供多尺度风险评估框架.

References

- Aki, K., 1965. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N=a-bM$ and Its Confidence Limits. *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, 43: 237–239.
- Aki, K., 1972. Earthquake Mechanism. *Tectonophysics*, 13 (1–4): 423–446. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(72\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(72)90032-7)
- Albini, P., Musson, R. M. W., Rovida, A., et al., 2014. The Global Earthquake History. *Earthquake Spectra*, 30 (2): 607–624. <https://doi.org/10.1193/122013eqs297>
- Allen, C. R., Luo, Z. L., Qian, H., et al., 1991. Field Study of a Highly Active Fault Zone: The Xianshuihe Fault of Southwestern China. *Geological Society of America Bulletin*, 103(9): 1178–1199. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)1031178:fsoaha>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)1031178:fsoaha>2.3.co;2)
- Baker, J., Bradley, B., Stafford, P., 2021. Seismic Hazard and Risk Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Blaser, L., Krüger, F., Ohrnberger, M., et al., 2010. Scaling Relations of Earthquake Source Parameter Estimates with Special Focus on Subduction Environment. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6): 2914–2926. <https://doi.org/10.1785/0120100111>
- Cheng, J., Rong, Y. F., Magistrale, H., et al., 2017. An Mw-Based Historical Earthquake Catalog for Mainland China. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5): 2490–2500. <https://doi.org/10.1785/0120170102>
- Cheng, J., Xu, X. W., Chen, G. H., 2020. A New Prediction Model of Seismic Hazard for the Sichuan–Yunnan Region Based on the Occurrence Rate of Large Earthquakes. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 1170–1182(in Chinese with English abstract).
- Cornell, C. A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 58 (5): 1583–1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>
- Dangkua, D. T., Rong, Y. F., Magistrale, H., 2018. Evaluation of NGA-West2 and Chinese Ground-Motion Prediction Equations for Developing Seismic Hazard Maps of Mainland China. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(5A): 2422–2443. <https://doi.org/10.1785/0120170186>
- Deng, Q. D., Zhang, Y. M., Huan, W. L., et al., 1980. Principles and Methods of Composing the Seismic Zoning Map of China. *Acta Seismologica Sinica*, 2(1): 90–

- 110 (in Chinese with English abstract).
- Dolce, M., Prota, A., Borzi, B., et al., 2021. Seismic Risk Assessment of Residential Buildings in Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(8): 2999–3032. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-01009-5>
- Fan, X. M., Wang, X., Dai, L. X., et al., 2022. Characteristics and Spatial Distribution Pattern of M_s 6.8 Luding Earthquake Occurred on September 5, 2022. *Journal of Engineering Geology*, 30(5): 1504–1516(in Chinese with English abstract).
- Gao, M. T., 2016. New Generation National Seismic Zoning Map and National Social and Economic Development. *City and Disaster Reduction*, (3): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Gardner, J. K., Knopoff, L., 1974. Is the Sequence of Earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian? *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5): 1363–1367. <https://doi.org/10.1785/BSSA0640051363>
- Gutenberg, B., Richter, C. F., 1955. Magnitude and Energy of Earthquakes. *Nature*, 176(4486): 795. <https://doi.org/10.1038/176795a0>
- Han, Y. Y., Zang, Y., Meng, L. Y., et al., 2022. A Summary of Seismic Activities in and around China in 2021. *Earthquake Research Advances*, 2(3): 100157. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100157>
- Kagan, Y. Y., 2002. Seismic Moment Distribution Revisited: I. Statistical Results. *Geophysical Journal International*, 148(3): 520–541. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2002.01594.x>
- Lamontagne, M., 2013. Hypocenter. *Encyclopedia of Natural Hazards*. Springer Netherlands, Dordrecht, 516–517. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_181
- Lei, Q. Y., Zhang, P. Z., Zheng, W. J., et al., 2016. Dextral Strike-Slip of Sanguankou–Niushoushan Fault Zone and Extension of Arc Tectonic Belt in the Northeastern Margin of the Tibet Plateau. *Science China Earth Sciences*, 59(5): 1025–1040. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5272-1>
- Li, C. H., Li, X., Guo, C. B., et al., 2022. Seismic Landslide Hazards Assessment along the Xianshuihe Fault Zone, Tibetan Plateau, China. *Geological Bulletin of China*, 41(8): 1473–1486(in Chinese with English abstract).
- Li, S. B., 1957. The Map of Seismicity of China. *Chinese Journal of Geophysics*, (2): 127–158(in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Zhang, J., Zhao, J., et al., 2023. The Crustal Structure of the Longmenshan Fault Zone and Its Implications for Seismogenesis: New Insight from Aeromagnetic and Gravity Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 14: 1289–1305. <https://doi.org/10.5194/se-14-1289-2023>
- Liu, J. W., Douglas, J., 2024. Comparison and Selection of Ground Motion Prediction Equations for the Sichuan – Yunnan Area, Southwest China. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(5): 2303–2328. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01861-9>
- Makropoulos, K. C., Burton, P. W., 1981. A Catalogue of Seismicity in Greece and Adjacent Areas. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 65(3): 741–762. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb04881.x>
- McGuire, R. K., 2004. Seismic Hazard and Risk Analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, 35–56.
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G., et al., 2014. OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismological Research Letters*, 85(3): 692–702. <https://doi.org/10.1785/0220130087>
- Perfettini, H., Ampuero, J. P., 2008. Dynamics of a Velocity Strengthening Fault Region: Implications for Slow Earthquakes and Postseismic Slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B9): 14237009. <https://doi.org/10.1029/2007JB005398>
- Schwartz, D. P., Coppersmith, K. J., 1984. Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7): 5681–5698. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05681>
- Seyhan, E., Stewart, J. P., 2014. Semi-Empirical Nonlinear Site Amplification from NGA-West2 Data and Simulations. *Earthquake Spectra*, 30(3): 1241–1256. <https://doi.org/10.1193/063013EQS181M>
- Stepp, J. C., 1972. Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. *Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonation*, 2: 897–910.
- Taroni, M., 2020. Back to the Future: Old Methods for New Estimation and Test of the Gutenberg–Richter b -Value for Catalogues with Variable Completeness. *Geophysical Journal International*, 224(1): 337–339. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa464>

- Weichert, D. H., 1980. Estimation of the Earthquake Recurrence Parameters for Unequal Observation Periods for Different Magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70(4): 1337–1346. <https://doi.org/10.1785/bssa0700041337>
- Wen, X. Z., Ma, S. L., Xu, X. W., et al., 2008. Historical Pattern and Behavior of Earthquake Ruptures along the Eastern Boundary of the Sichuan-Yunnan Faulted-Block, Southwestern China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168(1–2): 16–36. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.04.013>
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Zheng, R. Z., et al., 2003. The Latest Structural Change Pattern of Active Blocks in Sichuan and Yunnan Areas and Its Power Source. *Science in China (Ser. D)*, 33(S1): 151–162(in Chinese).
- Yin, L., Zhou, B. G., Ren, Z. K., et al., 2024. Spatial Distribution of Seismic Moment Deficit in Xianshuihe Fault Zone and the 2022 Luding M6.8 Earthquake. *Earth Science*, 49(2): 425–436(in Chinese with English abstract).
- Yu, Y. X., Li, S. Y., Xiao, L., 2013. Development of Ground Motion Attenuation Relations for the New Seismic Hazard Map of China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 8(1): 24–33(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., He, C. R., 2013. Frictional Properties of Natural Gouges from Longmenshan Fault Zone Ruptured during the Wenchuan Mw7.9 Earthquake. *Tectonophysics*, 594: 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.030>
- ### 中文参考文献
- 程佳, 徐锡伟, 陈桂华, 2020. 基于特大地震发生率的川滇地区地震危险性预测新模型. *地球物理学报*, 63(3): 1170–1182.
- 邓起东, 张裕明, 环文林, 等, 1980. 中国地震烈度区划图编制的原则和方法. *地震学报*, 2(1): 90–110.
- 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等, 2022. 2022年Ms6.8级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究. *工程地质学报*, 30(5): 1504–1516.
- 高孟潭, 2016. 新一代国家地震区划图与国家社会经济发展. *城市与减灾*, (3): 1–5.
- 李彩虹, 李雪, 郭长宝, 等, 2022. 青藏高原东部鲜水河断裂带地震滑坡危险性评价. *地质通报*, 41(8): 1473–1486.
- 李善邦, 1957. 中国地震区域划分图及其说明 I. 总的说明. *地球物理学报* (2): 127–158.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等, 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 33(增刊1): 151–162.
- 尹力, 周本刚, 任治坤, 等, 2024. 鲜水河断裂带地震矩亏损的空间分布及2022年泸定M6.8级地震. *地球科学*, 49(2): 425–436.
- 俞言祥, 李山有, 肖亮, 2013. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系. *震灾防御技术*, 8(1): 24–33.