

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.037>



# 基于蒙特卡洛模拟的概率断层位错危险性分析

吴 果,冉洪流,周 庆

中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室,北京 100029

**摘 要:** 同震位错对川藏铁路等跨断层工程的安全造成严重威胁,合理评价活断层的位错参数具有重要的应用价值.由于传统的确定性评价方法存在无法区分工程场点的重要程度和其在断层上的相对位置等缺陷,越来越多的学者推荐采用概率断层位错危险性分析(PFDHA).然而基于经典的概率性方法开展PFDHA原理复杂且实现困难,不利于吸收断层地震活动性研究的最新成果,也有碍于PFDHA的普及和推广.相比经典的概率性方法,蒙特卡洛模拟具备逻辑清晰易懂、程序易于实现且兼容性和扩展性好的优点.本研究基于蒙特卡洛模拟实现了概率断层位错危险性分析的一般性算法,并将该方法应用于鲜水河断裂带的炉霍段.结果显示,PFDHA的结果随着超越概率水准或工程场点在断层上的相对位置的不同而显著变化.适当考虑最大同震位错和地表破裂长度的不确定性得到的位错参数更加合理.超越概率大于等于100年2%时,PFDHA的结果显著小于确定性方法的结果.然而随着断层活动性的提高,100年超越概率1%的结果可能会大于确定性方法的结果.按照不同类型工程的抗震设防水准选择相应的PFDHA评价结果,既有利于工程的安全,也有助于大多数工程节约成本.PFDHA相比确定性方法具备多种优势,有望为川藏铁路等重大工程的抗断参数评估提供技术支撑.

**关键词:** 活动断层;概率断层位错危险性分析;蒙特卡洛模拟;炉霍断裂;地震学.

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2022)03-844-12

收稿日期: 2022-01-05

## Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis Based on Monte Carlo Simulation

Wu Guo, Ran Hongliu, Zhou Qing

Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

**Abstract:** Coseismic displacement poses a serious threat to the safety of cross-fault projects such as the Sichuan-Tibet Railway, and a reasonable evaluation of the displacement parameters of active faults has important application value. Because traditional deterministic evaluation methods cannot distinguish the importance of engineering sites and their relative positions on the fault, more and more scholars recommend the use of probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). However, the principle of PFDHA based on classic probabilistic method is complicated and difficult to implement, which is not conducive to application of the latest results of fault seismic activity research, and it also hinders the popularization and promotion of PFDHA. Compared with the classic probabilistic method, Monte Carlo simulation has the advantages of clear and easy-to-understand logic, easy implementation, and good compatibility and scalability. In this study, a general algorithm for probabilistic fault displacement hazard analysis is realized based on Monte Carlo simulation, and the method is applied to the Luhuo section of the Xianshuihe fault zone. The results show that the results of PFDHA vary significantly with the level of

**基金项目:** 国家重点研发项目(No. 2021YFC3000605);中国地震局地质研究所科研启动项目(No. JB-18-23).

**作者简介:** 吴果(1987-),男,助理研究员,博士,从事地震活动性和地震危险性分析研究. ORCID: 0000-0002-7156-8600. E-mail: wgfirst@foxmail.com

**引用格式:** 吴果,冉洪流,周庆,2022.基于蒙特卡洛模拟的概率断层位错危险性分析.地球科学,47(3):844-855.

**Citation:** Wu Guo, Ran Hongliu, Zhou Qing, 2022. Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis Based on Monte Carlo Simulation. *Earth Science*, 47(3): 844-855.

exceeding probability or the relative position of engineering site points on the fault. The displacement parameters obtained by properly considering the uncertainty of the maximum displacement and surface rupture length are more reasonable. When the probability of exceedance is greater than or equal to 2% in 100 years, the results of PFDHA are significantly smaller than that of the deterministic method. However, as the fault activity increases, the result of 1% probability of exceeding in 100 years may be larger than that of the deterministic method. Selecting the corresponding PFDHA evaluation results according to the seismic fortification standards of different types of projects is not only beneficial to the safety of the project, but also helps to reduce the costs of most projects. Compared with the deterministic method, PFDHA has many advantages, and is expected to provide reasonable fault displacement parameters for major projects such as the Sichuan-Tibet Railway.

**Key words:** active fault; probabilistic fault displacement hazard analysis; Monte Carlo simulation; Luhuo fault; seismology.

## 0 引言

一般而言工程选址会遵循避让活动断层的原则,然而川藏铁路、“西气东输”油气管线、水电站引水隧道等长线路工程经常无法完全避让活动断层.活动断层的两种运动方式都能产生永久地表位移,即持续的缓慢运动(蠕滑)和地震直接触发的同震位错(冉洪流和周本刚,2004a),其中后者更具突发性和破坏力.1906年美国旧金山地震、1999年我国台湾省集集地震和2008年汶川地震等历史震例表明,一旦大桥、隧道等工程结构被断层错动,将造成灾难性的、短期难以恢复的破坏(苏经宇等,1993;王丽萍等,2018).2022年1月8日发生的青海门源M6.9地震直接错断了“兰新铁路”的大梁隧道约2 m,使我国铁路设计部门和工程地震界进一步认识到了断层同震位错的严重危害性.因此,合理评价活动断层的位错参数具有重要的理论意义和应用价值.

目前我国工程地震界普遍采用确定性的方法评价活断层的同震位错,即用活断层的最大潜在地震震级估算对应的最大位错,并且假设最大位错沿着断层均匀分布.然而实际震例中位错量是沿断层走向变化的,例如2008年汶川地震在北川段产生的平均垂直位错是3~4 m,而最大位错是 $6.5 \pm 0.5$  m(Xu *et al.*, 2009).此外,确定性方法未考虑震级分布、最大位错、破裂长度等关键因素的不确定性,这与现行地震危险性分析中普遍采用的概率性思路不符,也无法根据工程的重要程度和设计使用寿命提供不同的抗断参数(孙建宝,2002).因此,确定性方法多导致工程抗断处理时偏于保守,耗费不必要的人力、物力和财力.

基于以上原因,许多学者开始探索对断层的位错参数进行概率性评价.Youngs *et al.*(2003)基于经典的概率地震危险性分析(probabilistic seismic haz-

ard analysis,简称PSHA)理论,提出了概率断层位错危险性分析(probabilistic fault displacement hazard analysis,简称PFDHA)的概念,拟合了适用于正断层的地表位错预测模型.Petersen *et al.*(2011)将PFDHA扩展到了走滑断层,并在模型中考虑了断层迹线定位不确定性.Chen and Petersen(2011)将预测的位错分配给了在一定面积内展布的分支断裂.国际原子能机构在修订的规范(DS507)中明确指出,对于不能完全排除有能力破裂至地表的断裂,推荐采用PFDHA方法评价其危险性(Valentini *et al.*, 2021).

我国学者早在1993年即提出用概率性方法估计断层位错风险的设想,并且讨论了断层边界效应对结果的影响(苏经宇等,1993).孙建宝(2002)基于GIS系统初步建立了地震活动断层段潜在地表位错概率评价的框架.冉洪流和周本刚(2004b)在定量评估怀涿盆地北缘断裂的同震位错危险性时,引入了时间相依的强震复发模型.赵纪生等(2008)基于我国第4代地震动参数区划图的潜在震源区参数,给出了博罗克努-阿齐克库都克断裂北西段的永久位移概率估计.刘艳琼(2013)将设定地震引入近断层场地的最大永久位移估算.荆旭(2019)基于地震活动性模型和地表破裂预测模型,计算了则木河断裂地表迹线上的永久位移危险性曲线.这些工作在指导跨断层设施的抗震设防中发挥了重要的作用,为进一步开展深入研究奠定了坚实的基础.

然而,基于经典的PSHA思路开发的PFDHA算法,往往需要用到复杂的数学推导和多重数值积分,对开发者的数学基础有较高的要求(苏经宇等,1993;刘艳琼,2013).此外,受限于目前人类对地震的认识水平(徐锡伟等,2019),PFDHA中涉及到的关键环节,如地震复发模型、震级与破裂尺度的经验关系以及地震的位错分布等都种类繁多且不断更新(Schwartz and Coppersmith, 1984; Wells and

Coppersmith, 1994; Wesnousky, 2008; Cheng *et al.*, 2020; 崔华伟等, 2021; 刘兴旺等, 2021). 这导致前人的 PFDHA 算法虽然各有特色, 但兼容性和灵活性有所不足(冉洪流和周本刚, 2004b). 上述问题不利于开展 PFDHA 时吸收最新的断层活动性研究成果, 也有碍于 PFDHA 的普及和推广.

相较于经典的 PSHA 思路, 蒙特卡洛模拟具备逻辑清晰易懂、程序易于开发且兼容性和扩展能力强等优点(Musson, 2000). 随着近年来计算机计算能力的大幅提高, 蒙特卡洛模拟已经被越来越多地用于地震、滑坡、洪水、台风等领域的危险性分析(Bayraktar and Ozer Sozdinler, 2020; Nguyen and Kim, 2020). 本研究基于蒙特卡洛模拟实现了 PFDHA 的一般性算法, 该算法可以灵活调整多个关键环节的函数形式. 重点吸收了国际上对同震位错分布的最新研究成果, 同时采用三角形、椭圆和正弦 3 种函数来考虑其不确定性. 最后, 将本文的方法应用于著名的鲜水河断裂带的炉霍段, 给出其不同超越概率水准下的位错量评价结果. 通过与确定性方法的结果对比, 并分析不确定性的影响, 给出了本方法的使用建议. 本研究有望为川藏铁路等跨断层工程的抗断参数评价提供理论支撑和参考.

## 1 概率断层位错危险性分析的原理

在目前的科学认识水平下, 地震的发生及地震动特性都具有一定的不可预见性. 因此, 以概率的方式对未来地震及其地震动进行预测, 称为概率地震危险性分析(PSHA)(胡聿贤, 1988). 概率地震危险性分析自 20 世纪 60 年代提出至今, 经过数十年来的理论研究和实践已经发展成为国内外评价地震危险性的主体方法(潘华和李金臣, 2006; 潘华等, 2013; Petersen *et al.*, 2020). PSHA 的思路也被广泛用于评价滑坡、泥石流、砂土液化等地震地质灾害(许冲等, 2011, 2019; Ma and Xu, 2019).

PSHA 包括 4 个基本步骤: (1) 划定地震震源; (2) 建立每个地震震源的地震复发模型; (3) 建立地震动衰减关系模型; (4) 计算场点的地震危险性. 在 PSHA 中, 地震危险性被定义为场址地震动的年超越概率, 也可表示为特定重现期内被超越的地震动.

概率断层位错危险性分析(PFDHA)是由 PSHA 的理论直接演化而来的(Youngs *et al.*, 2003). 对于单条目标断层, 地震震源即该断层, 地震震源的地震复发模型相应地简化为该断层

的地震复发模型. 二者的关键区别在于 PFDHA 需要用到同震位错分布模型, 而不是 PSHA 的地震动衰减关系模型. 这是因为沿断层迹线展布的同震位错是地震破裂在传播过程中直接产生的, 而不是由最大同震位错衰减得到的. 进而按以下步骤推导 PFDHA 的表达形式:

假设断层的起算震级和震级上限分别为  $m_0$  和  $m_u$ . 将断层的震级域 ( $m_0 \sim m_u$ ) 按照一定的震级间隔划分成  $N$  个震级档. 那么, 将震级档  $m_i$  的地震在断层上任意目标点产生的位错记为  $d$ , 其大于等于预设位错值  $d_0$  的年发生率为

$$\lambda(d \geq d_0 | m_i) = \lambda_1(m_i).$$

$$\int \int \int_{D_m S l} \Delta(d(D_m, S, l), d_0) \cdot f(D_m) \cdot f(S) \cdot f(l) dD_m dS dl, \quad (1)$$

式中,  $\lambda_1(m_i)$  为震级档  $m_i$  的地震年发生率;  $D_m$  和  $S$  分别为震级  $m_i$  产生的最大同震位错和地表破裂长度, 二者可以用其与震级的经验关系进行计算(Wells and Coppersmith, 1994; Cheng *et al.*, 2020). 概率性方法中需要考虑  $D_m$  和  $S$  的随机性, 其来源于经验关系的统计方差, 因此式中用  $f(D_m)$  和  $f(S)$  表示其概率密度函数;  $l$  表示地震震中在断层上的位置,  $f(l)$  是断层上任意发生一个地震的震中位于  $l$  处的概率; 已知  $D_m$ 、 $S$  和  $l$  的条件下, 可以由同震位错分布模型计算出该地震在目标点处产生的位错量  $d(D_m, S, l)$ ;  $\Delta$  是一个特殊的符号函数, 其值取决于  $d(D_m, S, l)$  和预设位错值  $d_0$  的大小比较:

$$\Delta = \begin{cases} 1 & \text{当 } d \geq d_0; \\ 0 & \text{当 } d < d_0; \end{cases} \quad (2)$$

基于不同震级档地震之间相互独立的假设, 进一步采用全概率公式可以得到所有震级档的地震在目标点处产生的位错  $d$  大于等于预设位错值  $d_0$  的年发生率:

$$\lambda(d \geq d_0) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - \lambda(d \geq d_0 | m_i)]. \quad (3)$$

由以上分析可知, 式(1)的形式复杂, 且涉及到地震复发模型、地表破裂长度、最大同震位错、同震位错分布模型等众多环节. 如果基于经典的 PSHA 思路开发 PFDHA 算法, 往往需要用到复杂的数学推导(苏经宇等, 1993; 刘艳琼, 2013), 其原理和过程难以为大同行所理解. 同时, 由于式(1)没有解析解, 因此还需要用到多重数值积分, 对开发者的数学基础要求较高. 受以上因素影响,

前人基于经典的PSHA思路开发的PFDHA算法往往各具特色(冉洪流和周本刚, 2004b; 赵纪生等, 2008),但兼容性和灵活性有所不足.

## 2 蒙特卡洛模拟过程

蒙特卡洛模拟与经典的概率地震危险性分析方法等效,但其逻辑更加清晰易懂(Musson, 2000).与此同时,基于蒙特卡洛模拟的程序开发难度更低,且兼容性和扩展性更具优势.基于以上原因,本研究实现了基于蒙特卡洛模拟的概率断层位错危险性分析的一般性方法.如图1所示,本方法可归纳为以下7个步骤.

步骤1:断层的地震复发模型用于描述该断层的起算震级 $M_0$ 、震级上限 $M_u$ ,以及 $M_0$ 到 $M_u$ 之间各震级的年发生率.受限于目前的地震科学发展水平,人类对断层的地震复发模型尚没有统一的认识.目前应用最广泛的是特征地震模型,其假设震级相近的地震在相同断层段上近似准周期地发生并产生近似的滑动量(Schwartz and Coppersmith, 1984).然而Ben-Zion(2008)指出断层的发震模式与断层的成熟度、结构复杂度等条件相关,只有部分断层符合特征地震模型.此外,

特征地震模型的地震复发时间还有时间独立模型和时间相依模型2种选择(冉洪流和周本刚, 2004b).如果考虑级联破裂、多学科因子联合反演(Cheng *et al.*, 2021),则情况更为复杂.

鉴于断层的地震复发模型种类繁多且适应性因断层而异,本研究选择将地震复发模型的选择、求解过程与本程序分离开,从而保证本程序的兼容性和适应能力.如图1所示,程序中地震复发模型的输入参数直接定义为 $\lambda_1(M)$ ,即以0.1个震级单位为间隔的各个震级档的年发生率.研究者根据目标断层的实际情况选定适当的模型或者模型组合,可以进一步求解出 $\lambda_1(M)$ .此外,对于断层的起算震级 $M_0$ ,通常认为只有6.5级以上地震能有效产生地表破裂(Stirling and Gerstenberger, 2018).出于安全考虑,本研究将起算震级定为6.0.断层的震级上限 $M_u$ 需要根据历史和仪器地震记录、破裂参数与震级的经验关系、构造类比等数据和方法综合分析得出.

步骤2:一般工程抗震设防中需要用到的超越概率水准为50年超越概率10%、2%和100年超越概率2%、1%等,对应目标时段的时长分别为50年和100年.由于后续生成人工地震目录时是以目标时段的时长为单位,因此需要预先将震级档 $M$ 的年

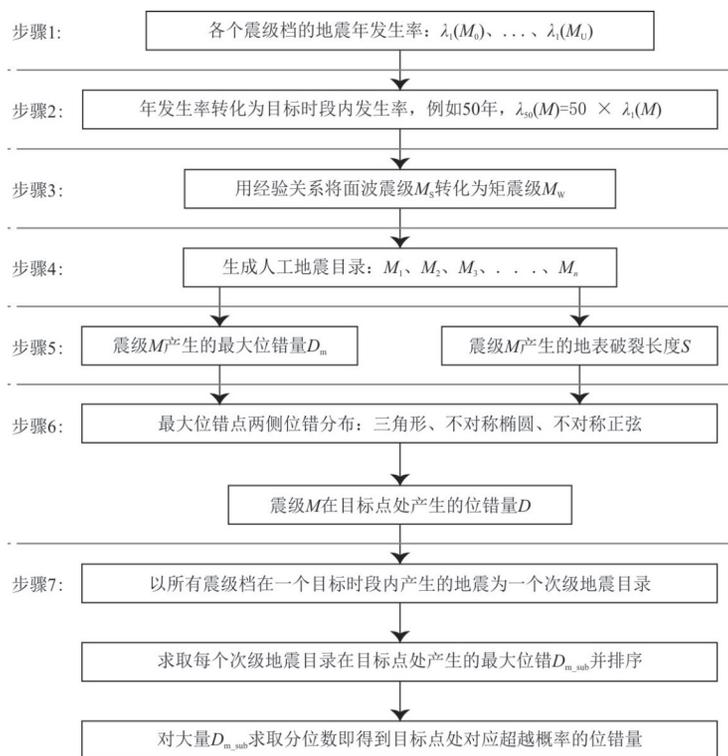


图1 基于蒙特卡洛模拟的概率断层位错危险性分析流程

Fig.1 Flow chart of probabilistic fault displacement hazard analysis based on Monte Carlo simulation

发生率转化为目标时段内的发生率,以 50 年为例有:

$$\lambda_{50}(M)=50\times\lambda_1(M). \quad (4)$$

步骤 3: 国内工程地震界常用的震级标度为面波震级 ( $M_s$ ), 而国际上常用的震级与破裂参数的经验关系大都基于矩震级 ( $M_w$ ). 因此需要用经验关系将面波震级转换成对应的矩震级. 这里采用 Cheng *et al.* (2017) 拟合的适用于中国大陆地区的成果. 当  $M_s < 7.0$  时有:

$$M_w=0.59+0.86M_s, \sigma=0.14, R^2=0.72, \quad (5)$$

当  $M_s \geq 7.0$  时有:

$$M_w=-2.42+1.28M_s, \sigma=0.14, R^2=0.61, \quad (6)$$

式中,  $\sigma$  为标准差;  $R^2$  为相关系数.

步骤 4: 泊松模型 (Poisson model) 是现行概率地震危险性分析的基础模型, 本研究基于其生成人工地震目录. 假设断层上震级档  $M$  在目标时段内的发生率为  $\lambda$  (式 4), 则实际发生的地震数  $X$  为  $k$  次的概率为:

$$P(X=k)=\frac{\lambda^k}{k!}e^{-\lambda}, k=0, 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

该式的实现直接用程序生成服从泊松分布的随机数即可.  $X=0$  代表目标时段内无震级档  $M$  的地震发生,  $X=k$  代表目标时段内有  $k$  次震级档  $M$  的地震发生.

步骤 5: 针对人工地震目录中的每一个地震, 都要求解其对应的最大同震位错和地表破裂长度. 最大同震位错  $D_m$  (maximum displacement, 单位 m) 一般根据震级与最大同震位错的经验关系估算. 以国际上应用最广泛的 Wells and Copper-smith (1994) 经验关系式为例, 对于走滑断层有:

$$\lg(D_m)=-7.03+1.03M, \sigma=0.34, R^2=0.90. \quad (8)$$

同样, 地表破裂长度  $S$  (surface rupture length, 单位 km) 一般根据震级与地表破裂长度的经验关系估算. 仍然以 Wells and Copper-smith (1994) 经验关系式为例, 对于走滑断层有:

$$\lg(S)=-3.55+0.74M, \sigma=0.23, R^2=0.91. \quad (9)$$

通常假设式 (8) 和式 (9) 中的误差服从正态分布. 因此考虑其不确定性, 直接用程序生成服从正态分布的随机数即可. 对最大同震位错还需要做进一步的假设. 首先, 当现有资料无法区分地震活动随着断层走向的变化时, 一般假设地震活动沿断层均匀分布, 即震中位于断层上任意位置的概率相等. 其次, 前人的研究显示最大同震位错的出现点 (最大位错点) 往往不在震中处 (Wesnousky, 2008). 但是由于事先无法预判最大位错点的位置, 一般仍然假设最大位错点在震中处 (冉洪流和周本刚, 2004b; 荆旭, 2019), 即图 2 中  $O$  点.

对地表破裂长度也需要做进一步的假设. 首先, 借鉴前人的做法, 假设地表破裂以震中为中心, 两侧等长分布 (图 2a). 其次, 虽然苏经宇等 (1993) 讨论了允许地表破裂突破已有的断层端点的情形, 但是现行的地震危险性分析中普遍不允许该情形发生 (Petersen *et al.*, 2020). 因此, 当根据式 (9) 算得的地表破裂长度 ( $S$ ) 的一半小于等于震中到断层近端点的距离时, 震中两侧破裂长度和位错对称分布 (图 2a). 当  $S$  的一半大于震中到断层近端点的距离时, 将破裂在断层近端点处截断, 相应的位错值取 0 (图 2b).

步骤 6: Wesnousky (2008) 收集了全球多个地震的地表破裂数据, 利用 6 种曲线拟合同震位错沿断层走向的分布. 前 3 种为对称曲线, 分别为水平直线、正弦和椭圆, 后 3 种为非对称曲线, 分别为非对称三角形、非对称正弦和非对称椭圆. 拟合结果显示, 不同地震事件的同震位错分布适用于不同的曲线, 非对称曲线总体优于对称曲线. 因此, 本研究同时选用三角形、椭圆、正弦 3 种模型以考虑位错分布不确定性 (图 3). 图 3 所示的情况与图 2b 相同, 即地表破裂长度的一半大于震中到断层近端点的距离, 此时曲线左右两侧表现为非对称形式. 当出现图 2a

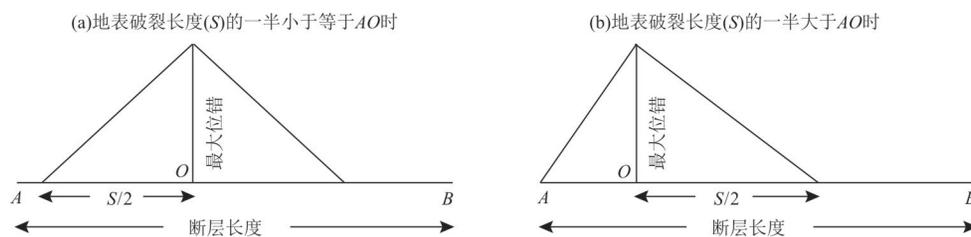


图 2 破裂长度与震中到断层近端点距离的关系

Fig.2 Diagram of the relationship between the rupture length and the distance from the epicenter to its nearest end of the fault

图中  $O$  点为震中位置,  $S$  为根据式 (9) 算得的地表破裂长度

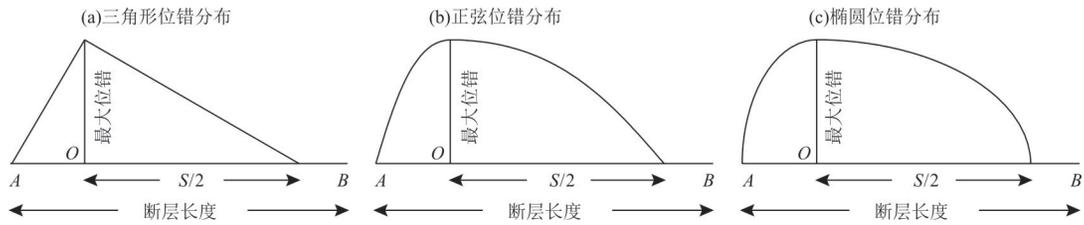


图3 不同模型的位错分布示意

Fig.3 Schematic diagram of displacement distribution of different models

图中O点为震中位置,S为根据式(9)算得的地表破裂长度

中的情况,即地表破裂长度的一半小于等于震中到断层近端点的距离时,图3中曲线左右两侧会自动变成对称形式.已知最大同震位错(式8)、地表破裂长度(式9),根据图3中的位错分布模型可以很方便地求出任意目标点的位错量.

步骤7:将所有震级档(从 $M_0$ 到 $M_u$ )在一个目标时段内生成的地震当做一个次级地震目录.本研究为了保证计算结果的精度,每次计算时生成10万个次级地震目录.首先求出每个次级地震目录中的地震在目标点处产生的最大位错,记为 $D_{m\_sub}$ .再对10万个 $D_{m\_sub}$ 由大到小排序,进而求出某分位数的值即目标点处相应超越概率的位错分析结果.以100年超越概率1%为例,从10万个由大到小排序的 $D_{m\_sub}$ 中取1%分位数即可,对应第1001个值.

### 3 炉霍断裂

#### 3.1 地震构造背景

下文将本文提出的方法应用于鲜水河断裂带的炉霍段,并分析其结果.鲜水河断裂带是青藏高原内部强烈活动的巴颜喀拉次级块体的东南边界断裂带,在青藏高原东缘的构造演化和现今的活动样式中承担着重要角色(图4)(梁明剑等,2020).自1700 AD以来,沿着鲜水河断裂带共有8次7级以上地震、15次6.5级以上地震被记录下来.这些地震产生的地表破裂带几乎覆盖了整条断裂带,因此鲜水河断裂带成为地震预测和灾害研究的热点对象之一(徐锡伟等,2017).

炉霍断裂是鲜水河断裂带北西段的次级断裂(图4中炉霍段),历史上曾发生1816年 $7\frac{1}{2}$ 级和1973年7.6级两次大地震,地震活动十分活跃.此外,炉霍断裂在过去3千年的平均水平滑动速率高达8.4 mm/a,还表现出应变异常快速释放的特征(梁明剑等,2020).因此,研究炉霍断裂的地震危险性具有重要的理论和应用价值.

本文采用的估算最大同震位错和地表破裂长度的经验关系式引自Wells and Coppersmith(1994)(式8和式9).前人已经验证了该关系式在包含鲜水河断裂带在内的川滇菱形块体东边界各断层段的适用性(Cheng *et al.*, 2011).本文对其补充验证如下:1973年炉霍7.6级地震产生的最大同震位错和地表破裂长度分别为3.6 m和83 km.采用式(6)估算该地震对应的矩震级为7.31,进而采用式(8)和式(9)估算其最大同震位错和地表破裂长度分别为3.2 m和73 km,与野外调查结果较为接近.

#### 3.2 地震复发模型

古地震和历史地震研究显示鲜水河断裂各段落的大地震复发行为不遵循周期性或准周期性模式,主要表现为丛集行为(Wen *et al.*, 2008; 梁明剑等, 2020).因此,本研究不采用特征地震模型,而是借鉴前人的做法,直接从我国第五代地震动参数区划图中提取断裂的活动参数(孙建宝, 2002; 赵纪生等, 2008).这样处理可以与我国现行概率地震危险性分析的理论 and 参数保持一致,同时有利于在更多研究程度不同的断裂带上开展该类工作.

按照我国地震区划图的假设,地震统计区内震级分布满足截断的G-R关系.将震级域离散成多个震级档, $m_j$ 为第 $j$ 个震级档 $m_j - 0.5\Delta m \leq m_j \leq m_j + 0.5\Delta m$ 的中心值, $\Delta m$ 为震级间隔,通常取0.1.因此可以得到地震统计区内震级档 $m_j$ 的地震年发生率:

$$\lambda_{1z}(m_j) = \nu_4 \cdot \frac{2 \exp[-\beta(m_j - m_{0z})]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz} - m_{0z})]}$$

$$\text{sh}\left(\frac{\beta}{2}\Delta m\right), \quad (10)$$

式中, $\nu_4$ 为地震统计区内 $M_{4.0}$ 以上地震年发生率; $\beta = b \ln 10$ ,其中 $b$ 为G-R关系中的系数 $b$ 值; $m_{0z}$ 和 $m_{uz}$ 分别为地震统计区的起算震级和震级上限,一般 $m_{0z}$ 取 $M_{4.0}$ .

如图4所示,炉霍断裂在我国第5代地震动参数区划图中位于炉霍潜在震源区,而炉霍潜在震源

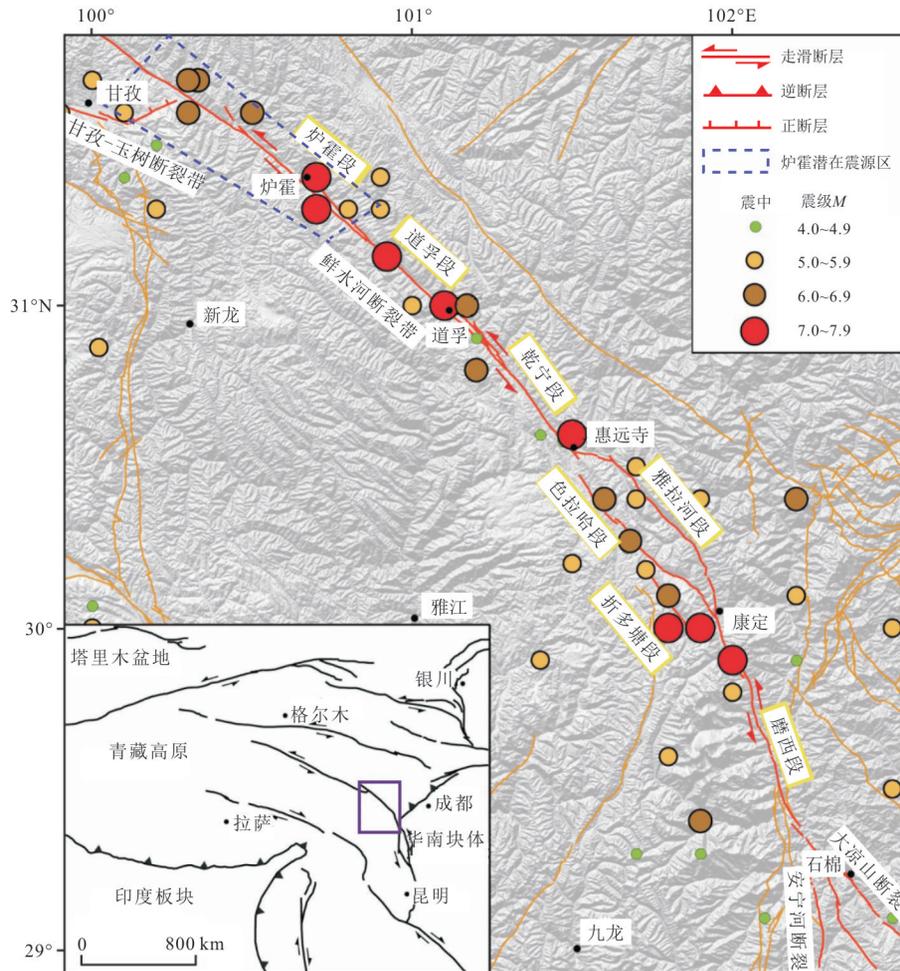


图 4 鲜水河断裂的几何展布及其强震分布图(底图改自梁明剑等, 2020)

Fig. 4 The geometry and strong earthquakes distribution of the Xianshuihe fault (revised from Liang *et al.*, 2020)

表 1 炉霍潜在震源区的空间分布函数

Table 1 The spatial distribution function of the potential source area of Luhuo

震级档	M4.0~4.9	M5.0~5.4	M5.5~5.9	M6.0~6.4	M6.5~6.9	M7.0~7.4	M7.5以上
空间分布函数	0.006 64	0.004 86	0.007 55	0.005 10	0.008 34	0.025 81	0.064 07

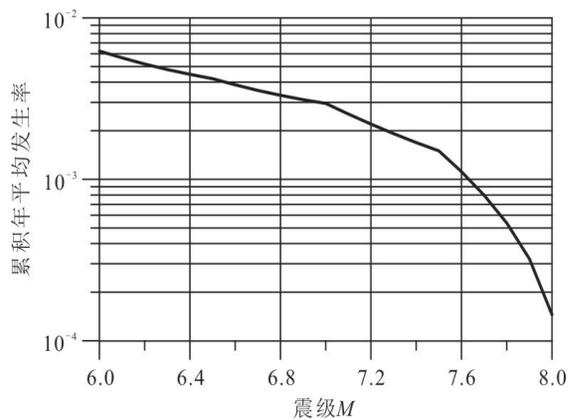


图 5 炉霍断裂的震级-频度关系

Fig.5 The magnitude-frequency relationship of the Luhuo fault

区位于鲜水河-滇东地震统计区内. 已知鲜水河-滇东地震统计区的  $v_1$  和  $b$  值分别为 32 和 0.85, 震级上限  $m_{uz}$  为 M8.0, 由式 (10) 可得各震级档的地震年发生率  $\lambda_{iz}(m_j)$ . 进一步可以得到炉霍断裂各震级档的地震年发生率:

$$\lambda_1(m_j) = \lambda_{iz}(m_j) \cdot f_{mj}, \quad (11)$$

式中,  $f_{mj}$  为炉霍潜在震源区的空间分布函数(表 1). 根据上述原理, 计算得到炉霍断裂的震级-频度关系如图 5 所示.

## 4 结果和讨论

基于前述原理(图 1)和炉霍断裂的地震活动参

表 2 炉霍断裂的概率断层位错危险性分析结果

Table 2 The results of probabilistic fault displacement hazard analysis of Luhuo fault

超越概率	目标点 位置	(1)考虑不确定性时的位错值(m)				(2)不考虑不确定性时的位错值(m)			
		三角形	正弦	椭圆	均值	三角形	正弦	椭圆	均值
50年2%	A	3.522 3	4.485 2	5.191 6	4.399 7	3.763 8	4.726 1	5.434 7	4.641 5
	B	2.899 4	3.806 7	4.635 0	3.780 4	3.047 6	4.085 2	4.927 1	4.020 0
	C	Nan	Nan	0.014 0	Nan	Nan	Nan	0.015 0	Nan
100年2%	A	5.378 9	6.750 4	7.562 5	6.563 9	5.612 7	7.227 5	7.568 4	6.802 9
	B	4.660 7	5.908 1	6.966 6	5.845 1	4.531 7	5.708 7	7.289 0	5.843 1
	C	Nan	0.000 1	0.022 6	Nan	Nan	0.000 1	0.021 3	Nan
100年1%	A	7.091 9	8.779 4	9.643 1	8.504 8	6.915 6	8.436 0	9.639 6	8.330 4
	B	6.361 4	7.844 7	8.904 5	7.703 5	6.252 8	7.600 7	8.108 5	7.320 7
	C	0.000 1	0.000 2	0.032 4	0.010 9	0.000 1	0.000 1	0.029 8	0.010 0

注:目标点位置 A、B 和 C 分别代表断层中点处、断层长度 1/4 处和近断层端点处。Nan 表示无有效计算结果,此时 3 个模型的均值也记为 Nan。

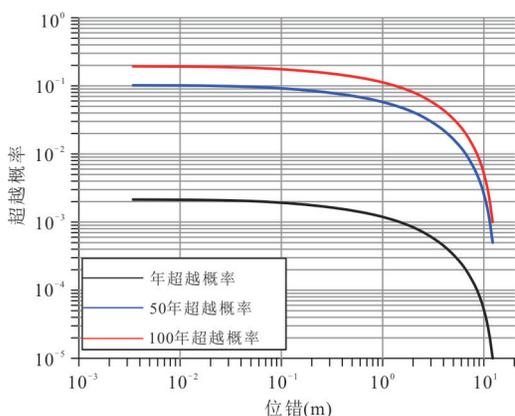


图 6 炉霍断裂中点处的位错均值超越概率曲线

Fig.6 Exceeding probability curve of average displacement at the midpoint of Luhuo fault

数(图 5),对炉霍断裂开展概率断层位错危险性分析,结果见表 2.为了观察不同参数设置对结果的影响,表 2 中展示了 3 个超越概率水准、3 个目标点位置以及 3 种位错分布模型的结果.此外,在概率性方法中通常需要考虑最大同震位错(式 8)和破裂长度(式 9)的不确定性,但少数前人的工作并未考虑该不确定性.因此,表 2 中特意提供了不考虑不确定性时的结果以作为对比.炉霍断裂中点处(表 2 中 A)的位错均值超越概率曲线见图 6.

4.1 不同参数设置下的结果对比

共计算了 3 个超越概率水准的结果,分别为 50 年 2%、100 年 2% 和 100 年 1%(表 2),对应的重现周期分别为 2 475 年、4 950 年和 9 950 年.结果显示,断裂的位错值随超越概率的降低而增大,该规律与经典的概率地震危险性分析一致.此外,以断层中点处为例,3 个超越概率水准对应的位错均值依次

为 4.4 m、6.6 m 和 8.5 m,相邻结果之间的差距十分明显.这说明如果根据工程的重要程度和设计使用寿命选择相应超越概率的抗断参数,既有利于工程的安全,同时还可能大幅降低工程的抗断设防成本.

图 6 显示当位错量降低到一定程度时,超越概率曲线自动截断(图 6),这与常见的地震动超越概率曲线不同.这是由于单条断层的地震年发生率较低(图 5),加上目标点位置和断层位错分布模型等因素的影响,会出现位错发生率达不到较高超越概率水准的情形.此时无效计算结果,在表 2 中记为 Nan.

选择断层中点、断层长度 1/4 处和靠近断层端点处作为代表性的目标点位置,分别对应表 2 中 A、B 和 C.结果显示,断层中点处的位错值略大于断层长度 1/4 处,这是由于断层中点处更容易受到两侧地震破裂的影响.此外,靠近断层端点处的位错值明显小于另 2 个位置,这与本研究采用的位错分布模型相一致(图 2 和图 3).

本文共采用了三角形、正弦和椭圆 3 种位错分布模型(图 3).结果显示,3 者中位错最大的是椭圆,其次是正弦,最次是三角形(表 2).这与 3 种位错分布模型的位错“衰减速度”相一致,其中椭圆最慢,其次是正弦,三角形最快(图 3).值得注意的是,由于椭圆的自身特点,其最有利于在近断层端点处产生位错.因此,在具体工程实践中,可以对 3 种位错分布模型进行适当的取舍.

4.2 考虑不确定性的影响

表 2 中的第一组结果考虑了最大同震位错和地表破裂长度的不确定性,第二组结果未考虑.为了

防止不确定性被不合理地放大,本文对其做了如下限制:首先,基于式(8)和式(9)计算最大同震位错和地表破裂长度时,本文参考国际上概率地震危险性分析的通常做法,将结果限制在3倍标准差以内.此外,历史上我国西部地区的最大同震位错为14 m,由1931年新疆富蕴8级地震产生(新疆维吾尔自治区地震局,1985).该位错量在全球范围内也属罕见(Wells and Coppersmith, 1994; 冉洪流, 2011).因此本文将最大位错量限制在14 m以内,程序一旦产生超过14 m的值则自动重新抽样.

对比表2中考虑不确定性与否的两组结果发现,当超越概率为50年2%时第二组结果更大.随着超越概率减小,第一组结果逐渐超过第二组.当超越概率为100年1%时,在断层长度1/4处第一组的位错均值比第二组的大0.4 m左右.此外,如果在程序中不设置最大位错在14 m以内的限制,计算结果可能会偏离实际.以100年超越概率1%时的断层中点处为例,椭圆位错分布模型的计算结果在限定前后分别为14.7 m和9.6 m,前者在一定程度上超出了合理范围.由于采取了上述限制,断层中点处的位错均值在趋近14 m时,相应的超越概率趋近于零(图6).

上述分析说明,当超越概率较低时,出于工程安全考虑有必要考虑最大同震位错和地表破裂长度的不确定性.然而,必须采取合理的限制以避免不确定性被过分放大.

#### 4.3 与确定性方法结果的对比

炉霍断裂的震级上限为面波震级 $M_s 8.0$ ,对应矩震级为 $M_w 7.82$ (式6),进一步求得其确定性方法结果为10.6 m(式8).该值显著大于概率性方法中50年超越概率2%和100年超越概率2%的均值结果,尤其是在断层长度1/4处(表2中B)和靠近断层端点处(表2中C).由于大部分工程的抗震设防水平不超过100年超越概率2%,所以确定性方法对于大多数工程可能过于保守.

当超越概率为100年1%时,断层中点处(表2中A)的位错均值为8.5 m,仍然低于确定性方法结果.但是椭圆位错分布模型的结果为9.5 m,已经接近确定性方法结果.如果断层的地震活动性参数进一步提高,100年超越概率1%的结果是有可能超过确定性评价结果的.这说明通常印象中确定性方法相对保守的认识并不完全正确.

## 5 结论

本文在总结和吸收前人研究成果的基础上,采用蒙特卡洛模拟实现了概率断层位错危险性分析的一般性方法.本文将蒙特卡洛模拟过程归纳为7个步骤,详细论述了每个步骤的原理和方法.最终将本方法应用于炉霍断裂,系统分析了不同参数设置对结果的影响.主要结论如下:

(1) PFDHA提供的不同超越概率下的位错参数差异明显,因此按照不同类型工程的实际需求选择相应超越概率的抗断参数既有利于工程的安全,也有助于节约工程成本.

(2) 相同超越概率下断层中点处的位错参数小幅大于断层长度1/4处,靠近断层端点处的位错参数明显小于前两处.

(3) 三角形、正弦和椭圆3种位错分布模型中椭圆产生的位错量最大,且椭圆在断层近端点处产生的位错量明显大于另两个.

(4) 考虑最大同震位错和破裂长度的不确定性时,必须采取适当的约束以避免不确定性被不合理地放大.当超越概率为100年1%时,考虑上述不确定性时的结果更加保守.

(5) 确定性方法结果显著大于概率性方法中100年超越概率2%的结果,这说明确定性方法对于大部分工程而言可能过于保守.如果断层的地震活动性参数进一步增大,100年超越概率1%的概率性方法结果可能会大于确定性方法结果,因此在特殊条件下确定性方法结果可能偏于不安全.

综上,相比传统的确定性方法,PFDHA可以提供不同超越概率水准、沿断层走向变化的位错评价结果,并且在低超越概率下PFDHA的结果可能更保守,因此本研究推荐对其开展实验性应用.由于断层地震活动特征的高度复杂性,本文在建立模型时做了相应的假设和简化.例如,断层在基岩中的破裂能在多大程度传导到地表与覆盖层的厚度和土层性质等因素相关(薄景山等,2019);本研究默认震位错沿着主断裂分布,实际上其在地表可能会分散到多条次级断裂(Chen and Petersen, 2011).本研究的上述不足有待更深入的研究.

## References

- Bayraktar, H. B., Ozer Sozdinler, C., 2020. Probabilistic Tsunami Hazard Analysis for Tuzla Test Site Using Monte Carlo Simulations. *Natural Hazards and Earth*

- System Sciences*, 20(6): 1741–1764. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1741-2020>
- Ben-Zion, Y., 2008. Collective Behavior of Earthquakes and Faults: Continuum - Discrete Transitions, Progressive Evolutionary Changes, and Different Dynamic Regimes. *Reviews of Geophysics*, 46(4): RG4006. <https://doi.org/10.1029/2008rg000260>
- Bo, J. S., Huang, J. Y., Zhang, J. Y., et al., 2019. A Prediction Method of Surface Rupture in Strong Earthquakes Based on Logistic Regression Analysis. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 39(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Chen, R., Petersen, M. D., 2011. Probabilistic Fault Displacement Hazards for the Southern San Andreas Fault Using Scenarios and Empirical Slips. *Earthquake Spectra*, 27(2): 293–313. <https://doi.org/10.1193/1.3574226>
- Cheng, J., Liu, J., Gan, W. J., et al., 2011. Characteristics of Strong Earthquake Evolution around the Eastern Boundary Faults of the Sichuan-Yunnan Rhombic Block. *Science China Earth Sciences*, 54(11): 1716–1729. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4290-2>
- Cheng, J., Rong, Y. F., Magistrale, H., et al., 2017. An  $M_w$ -Based Historical Earthquake Catalog for Mainland China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5): 2490–2500. <https://doi.org/10.1785/0120170102>
- Cheng, J., Rong, Y. F., Magistrale, H., et al., 2020. Earthquake Rupture Scaling Relations for Mainland China. *Seismological Research Letters*, 91(1): 248–261. <https://doi.org/10.1785/0220190129>
- Cheng, J., Chartier, T., Xu, X. W., 2021. Multisegment Rupture Hazard Modeling along the Xianshuihe Fault Zone, Southeastern Tibetan Plateau. *Seismological Research Letters*, 92(2A): 951–964. <https://doi.org/10.1785/0220200117>
- Cui, H. W., Wan, Y. G., Wang, X. S., et al., 2021. Characteristic of Tectonic Stress Field in Source Region of 2018  $M_w$ 7.6 Palu Earthquake and Sulawesi Area. *Earth Science*, 46(7): 2657–2674 (in Chinese with English abstract).
- Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1985. Fuyun Seismogenic Fault Zone. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Hu, Y. X., 1988. Earthquake Engineering. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Jin, X., 2019. Study on Prediction Model of Surface Permanent Displacement of Strike-Slip Faults. *World Earthquake Engineering*, 35(2): 18–23 (in Chinese with English abstract).
- Liang, M. J., Chen, L. C., Ran, Y. K., et al., 2020. Late-Quaternary Activity of the Yalaha Fault of the Xianshuihe Fault Zone, Eastern Margin of the Tibet Plateau. *Seismology and Geology*, 42(2): 513–525 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., 2013. Study on Surface Permanent Displacement of Active Faults (Dissertation). Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. W., Wu, Z., Liang, M. J., et al., 2021. Paleoseismicity Characteristics of Jiayuguan Fault and Its Seismic Risk. *Earth Science*, 46(10): 3796–3806 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S. Y., Xu, C., 2019. Assessment of Co-Seismic Landslide Hazard Using the Newmark Model and Statistical Analyses: A Case Study of the 2013 Lushan, China,  $M_w$ 6.6 Earthquake. *Natural Hazards*, 96(1): 389–412. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3548-9>
- Musson, R. M. W., 2000. The Use of Monte Carlo Simulations for Seismic Hazard Assessment in the U.K. *Annals of Geophysics*, 43(1): 1–9. <https://doi.org/10.4401/ag-3617>
- Nguyen, V. B. Q., Kim, Y. T., 2020. Rainfall-Earthquake-Induced Landslide Hazard Prediction by Monte Carlo Simulation: A Case Study of Mt. Umyeon in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(1): 73–86. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0963-8>
- Pan, H., Gao, M. T., Xie, F. R., 2013. The Earthquake Activity Model and Seismicity Parameters in the New Seismic Hazard Map of China. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 8(1): 11–23 (in Chinese with English abstract).
- Pan, H., Li, J. C., 2006. Study on Uncertainties of Seismicity Parameters  $b$  and  $v_i$  in Seismic Statistical Zones. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 1(3): 218–224 (in Chinese with English abstract).
- Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., et al., 2011. Fault Displacement Hazard for Strike-Slip Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(2): 805–825. <https://doi.org/10.1785/0120100035>
- Petersen, M. D., Shumway, A. M., Powers, P. M., et al., 2020. The 2018 Update of the US National Seismic Hazard Model: Overview of Model and Implications. *Earthquake Spectra*, 36(1): 5–41. <https://doi.org/10.1177/8755293019878199>
- Ran, H. L., 2011. Empirical Relations between Earthquake Magnitude and Parameters of Strike-Slip Seismogenic Active Faults Associated with Historical Earthquakes in Western China. *Seismology and Geology*, 33(3): 577–585 (in Chinese with English abstract).

- Ran, H. L., Zhou, B. G., 2004a. Probabilistic Assessment of Potential Ground Offset along Strike-Slip Engineering Active Fault. *Journal of Engineering Geology*, 12(1): 93–97 (in Chinese with English abstract).
- Ran, H. L., Zhou, B. G., 2004b. Research on the Probabilistic Assessment of Potential Ground Offset along Active Fault. *Seismology and Geology*, 26(1): 133–140 (in Chinese with English abstract).
- 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>
- Stirling, M., Gerstenberger, M., 2018. Applicability of the Gutenberg - Richter Relation for Major Active Faults in New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2): 718–728. <https://doi.org/10.1785/0120160257>
- Su, J. Y., Zhou, X. Y., Fan, S. R., 1993. Seismic Hazard Analysis Method for Fault Rupture and Dislocation. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(4): 14–21 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. B., 2002. A GIS-Based System for Probability Evaluation of Potential Surface Displacement on Active Fault Segments Associated with Earthquakes - Theory and Practice (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Valentini, A., Fukushima, Y., Contri, P., et al., 2021. Probabilistic Fault Displacement Hazard Assessment (PFDHA) for Nuclear Installations According to IAEA Safety Standards. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(5): 2661–2672. <https://doi.org/10.1785/0120210083>
- Wang, L. P., Zhang, W., Luo, W. W., et al., 2018. Seismic Hazard Analysis Method for Fault Rupture and Dislocation Based on Regional Seismicity Parameters. *Journal of Natural Disasters*, 27(4): 166–170 (in Chinese with English abstract).
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974–1002
- 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>
- Wesnousky, S. G., 2008. Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic - Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4): 1609–1632. <https://doi.org/10.1785/0120070111>
- Xu, C., Dai, F. C., Xu, X. W., 2011. Earthquake Triggered Landslide Susceptibility Evaluation Based on GIS Platform and Weight-of-Evidence Modeling. *Earth Science*, 36(6): 1155–1164 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Xu, X. W., Zhou, B. G., et al., 2019. Probability of Coseismic Landslides: A New Generation of earthquake - Triggered Landslide Hazard Model. *Journal of Engineering Geology*, 27(5): 1122–1130 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Yu, G. H., et al., 2009. Coseismic Reverse- and Oblique-Slip Surface Faulting Generated by the 2008  $M_w$  7.9 Wenchuan Earthquake, China. *Geology*, 37(6): 515–518. <https://doi.org/10.1130/g25462a.1>
- Xu, X. W., Wu, X. Y., Yu, G. H., et al., 2017. Seismological Signatures for Identifying  $M \geq 7.0$  Earthquake Risk Areas and Their Preliminary Application in Mainland China. *Seismology and Geology*, 39(2): 219–275 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Bai, L. X., Wei, L. M., et al., 2019. Discussion on Initiation Time of the Latest Tectonic Movement in Break - Up Region of the North China Craton. *Earth Science*, 44(5): 1647–1660 (in Chinese with English abstract).
- Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., et al., 2003. A Methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra*, 19(1): 191–219. <https://doi.org/10.1193/1.1542891>
- Zhao, J. S., Liu, Y. Q., Shi, L. J., et al., 2008. A Probabilistic Approach to Evaluate Permanent Displacement Crossing Fault by 4th Generation Seismic Zoning Map of China. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 28(4): 22–27 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 薄景山, 黄静宜, 张建毅, 等, 2019. 基于逻辑回归分析的强震地表破裂预测方法. *地震工程与工程振动*, 39(4): 1–7.
- 崔华伟, 万永革, 王晓山, 等, 2021. 2018年帕卢  $M_w$  7.6地震震源及苏拉威西地区构造应力场特征. *地球科学*, 46

- (7): 2657—2674.
- 新疆维吾尔自治区地震局, 1985. 富蕴地震断裂带. 北京: 地震出版社.
- 胡聿贤, 1988. 地震工程学. 北京: 地震出版社.
- 荆旭, 2019. 走滑型断层地表永久位移预测模型研究. 世界地震工程, 35(2): 18—23.
- 梁明剑, 陈立春, 冉勇康, 等, 2020. 鲜水河断裂带雅拉河段晚第四纪活动性. 地震地质, 42(2): 513—525.
- 刘艳琼, 2013. 活动断层的地震地表永久位移研究(博士学位论文). 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 刘兴旺, 吴赵, 梁明剑, 等, 2021. 嘉峪关断裂古地震活动特征及其强震危险性影响. 地球科学, 46(10): 3796—3806.
- 潘华, 高孟潭, 谢富仁, 2013. 新版地震区划图地震活动性模型与参数确定. 震灾防御技术, 8(1): 11—23.
- 潘华, 李金臣, 2006. 地震统计区地震活动性参数 $b$ 值及 $v_d$ 不确定性研究. 震灾防御技术, 1(3): 218—224.
- 冉洪流, 2011. 中国西部走滑型活动断裂的地震破裂参数与震级的经验关系. 地震地质, 33(3): 577—585.
- 冉洪流, 周本刚, 2004a. 地表潜在断错位移的概率评价方法. 工程地质学报, 12(1): 93—97.
- 冉洪流, 周本刚, 2004b. 断层地表潜在突发位移的概率评价初探. 地震地质, 26(1): 133—140.
- 苏经宇, 周锡元, 樊水荣, 1993. 断层错动的危险性分析方法. 地震工程与工程振动, 13(4): 14—21.
- 孙建宝, 2002. 地震活动断层段潜在地表位移概率评价及基于GIS的系统设计(硕士学位论文). 北京: 中国地震局地质研究所.
- 王丽萍, 张伟, 罗文文, 等, 2018. 基于区域地震活动性参数的断层错动量概率分析方法. 自然灾害学报, 27(4): 166—170.
- 许冲, 戴福初, 徐锡伟, 2011. 基于GIS平台与证据权的地震滑坡易发性评价. 地球科学, 36(6): 1155—1164.
- 许冲, 徐锡伟, 周本刚, 等, 2019. 同震滑坡发生概率研究: 新一代地震滑坡危险性模型. 工程地质学报, 27(5): 1122—1130.
- 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 等, 2017. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用. 地震地质, 39(2): 219—275.
- 徐锡伟, 白鸾曦, 魏雷鸣, 等, 2019. 华北克拉通破坏区最新构造运动起始时间讨论. 地球科学, 44(5): 1647—1660.
- 赵纪生, 刘艳琼, 师黎静, 等, 2008. 基于第四代地震区划的跨越发震断层永久位移概率分析方法. 地震工程与工程振动, 28(4): 22—27.