中国科学: 地球科学 2023 年 第 53 卷 第 6 期: 1353 ~ 1372
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

从活动断层分段到地震地质灾害与财产人口损失风险——以鲜水河-小江断裂带为例

程佳[1,2*], 许冲[1,2], 马健[3], 徐锡伟[1,4], 朱鹏宇[1,2]

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;
2. 应急管理部复合链生自然灾害动力学重点实验室, 北京 100085;
3. 中国地震局地震工程力学研究所, 哈尔滨 150080;
4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083
* 通讯作者, E-mail: chengjiajc@gmail.com

收稿日期: 2022-09-05; 收修改稿日期: 2022-12-09; 接受日期: 2023-02-13; 网络版发表日期: 2023-05-19
国家自然科学基金项目(批准号: 41941016、42074064、U2039201)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(编号: ZDJ2020-14)资助

摘要 活动断层是强震的孕育场所, 强震通过地震动对周边地震地质灾害源、房屋等进行作用从而引起地震滑坡、财产损失和人口伤亡. 通过分析活动断层分段和危险性给出强震的地点和震级以及危险概率, 这是目前地震预测最可行的方法之一, 并且该方法可以给出潜在地震作用下的地震地质灾害与财产人口损失风险. 本文通过计算滑动速率和震级-频度关系约束下的鲜水河-小江断裂断层分段以及级联破裂地震发生率, 给出了鲜水河-小江断裂11个级联破裂和单独破裂危险段, 以及它们的概率分布. 针对上述11个设定地震, 本文计算了这些地震可能引起的潜在居民住宅财产损失, 其中损失最大的是安宁河断裂F19段引起的76.5亿人民币潜在居民住宅损失. 根据深度学习神经网络方法和历史地震的伤亡人口数据, 预测出的11次潜在地震可能伤亡人口, 显示安宁河断裂F29段和F30段级联破裂的潜在伤亡人口最多, 约为279~317人. 对于地震滑坡灾害预测显示, 现今挤压作用强烈的地区滑坡不稳定度高, 潜在地震可能引起的地震滑坡概率较高, 如玉科断裂南段、鲜水河断裂南段、大凉山断裂南段与莲峰断裂交错部位, 其概率高值均为10%. 研究结果为活动断层资料在地震地质灾害与财产人口损失方面的应用提供新的有效途径, 也为防震减灾和应急救援准备提供科学路径.

关键词 鲜水河-小江断裂带, 断层分段, 级联破裂, 滑坡概率分布, 财产损失

1 引言

2022年9月5日, 鲜水河断裂带发生了泸定M_S6.8级地震(图1), 使得鲜水河-小江断裂带的地震危险性又一次得到关注. 鲜水河-小江断裂带具有高速左旋走滑速率, 是青藏高原东南缘与巴颜喀拉块体以及华南块体的边界断裂. 这条断裂上自1327年以来发生了18次7级以上历史地震(图1), 其中包括了1786年康定7.8级地震、1833年嵩明8级地震和1850年西昌7.5级地震(Wen等, 2008; 程佳等, 2011, 2012). 鲜水河-小江断裂带包

中文引用格式: 程佳, 许冲, 马健, 徐锡伟, 朱鹏宇. 2023. 从活动断层分段到地震地质灾害与财产人口损失风险——以鲜水河-小江断裂带为例. 中国科学: 地球科学, 53(6): 1353–1372, doi: 10.1360/SSTe-2022-0280
英文引用格式: Cheng J, Xu C, Ma J, Xu X, Zhu P. 2023. From active fault segmentation to risks of earthquake hazards and property and life losses—A case study from the Xianshuihe-Xiaojiang fault zone. Science China Earth Sciences, 66(6): 1345–1364, https://doi.org/10.1007/s11430-022-1076-y

© 2023 《中国科学》杂志社

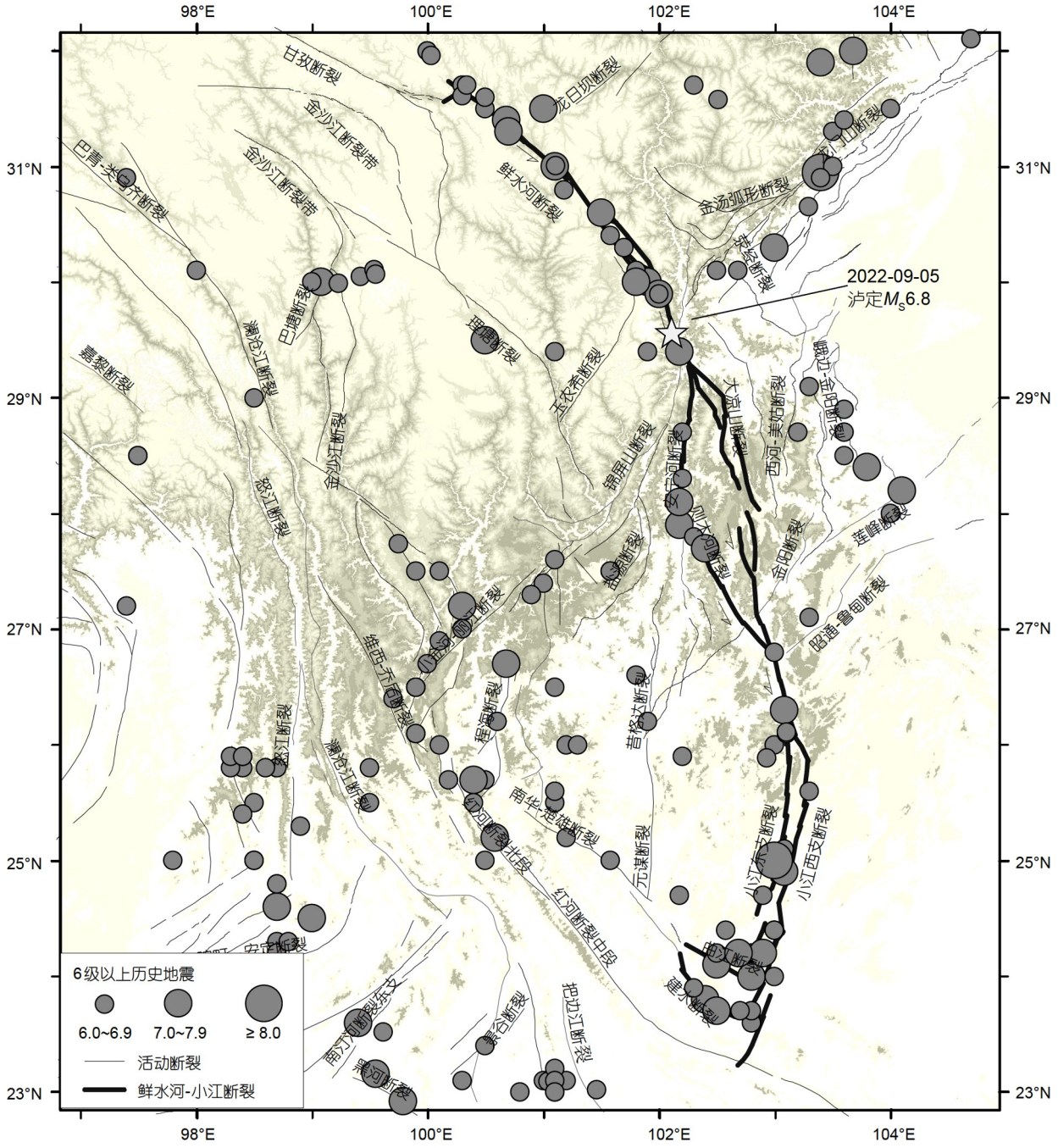

图 1　鲜水河-小江断裂带及其周边历史强震分布和断层分段

断层数据为徐锡伟等(2016)给出的中国陆地1:250万活动断裂数据; 历史地震数据来源于Cheng等(2017)

括了鲜水河断裂、安宁河断裂、则木河断裂、大凉山断裂和小江断裂, 其中鲜水河断裂在1893~1981年期间发生了7次6.8级以上地震, 平均间隔不到20年, 该断裂的地震危险性引起了极大的关注(Allen等, 1991; 闻学泽, 1993; 程佳等, 2011; Guo等, 2018; Bai等, 2021). 安宁河断裂北段和南段在1480年和1536年分别发生了1次7.5级地震, 离逝时间已达500a, 1977年以来在断层周边形成了4级以上地震空区(闻学泽等, 2008), 是中

国中长期强震危险地段之一(*M*7专项工作组, 2011). 小江断裂发生了3次7.5级以上历史强震(闻学泽, 1993), 其中段的东、西两支活动性均较强, 分别发生过1500年宜良7.5级地震和1833年嵩明8级地震, 该断裂现今的危险性仍然需要重点关注. 鲜水河-小江断裂带的强震危险性是中国地震科学研究需要密切关注的问题之一.

在鲜水河-小江断裂带的地震危险性研究中, 主要基于古地震、地震学和大地测量学资料展开, 包括破裂分段上古地震研究(闻学泽, 2000; 冉勇康等, 2008; Wang等, 2017)、大地测量数据对断层滑动速率和地震危险性的研究(王阎昭等, 2008; 赵静等, 2015; Wang等, 2015; Jiang等, 2015; Pan和Shen, 2017)、小震时空分布特征(易桂喜和闻学泽, 2007; 易桂喜等, 2008; 闻学泽等, 2008)、库仑应力模拟与预测(Papadimitriou等, 2004; 周仕勇, 2008)等. 通过活动断层分段来精细研究各段地震危险性和灾害性是定量预测强震危险性的重要方法. 在断层分段和地震危险性研究方面, Wen等(2008)系统性地分析了鲜水河-小江断裂带的分段特征, 给出了各个阶区被强震破穿形成级联破裂的可能性; 闻学泽(2000)和闻学泽等(2008)根据历史地震地表破裂分段总结了鲜水河断裂特征地震空区特征; 程佳等(2011)利用GPS数据对鲜水河-小江断裂带地震破裂分段滑动速率反演后, 认为鲜水河断裂塔公段, 安宁河断裂北段, 小江断裂蒙姑-东川段、东川-寻甸段和宜良-澄江段均超过了平均复发间隔, 强震危险性较高. 在对鲜水河-小江断裂带特大级联破裂危险性预测方面, 冉洪流和何宏林(2006)使用蒙特卡罗方法对鲜水河断裂带强震进行了模拟, 给出了断层段单独破裂和组合破裂的发生概率. 他们在模拟过程中将相邻两个破裂段都达到复发间隔作为级联破裂, 这与震级-破裂长度(或面积)等对数线性关系并不符合, 即级联破裂释放能量大于各断层段分别破裂释放能量之和, 这其中蕴含着断层是否积累足够能量破穿两段之间阶区的信息. Cheng等(2021a, 2021b, 2021c)分别对鲜水河断裂、安宁河-则木河-大凉山断裂区、小江断裂进行了断层几何分段, 在滑动速率转换成的震级-频度关系约束下计算出级联破裂和单独破裂的地震发生率. 然而, 这一工作只给定了主要断层的级联破裂组合方式可能性和概率危险性结果, 未明确给出鲜水河-小江断裂带具体危险段落及可能地质灾害情况. 在活动断层分段以及级联破裂地震危险性基础上, 给出鲜水河-小江断裂带潜在危险源, 并计算设定地震下的地震动分布特征, 分析可能引起的地质灾害概率危险性、财产和人口损失风险, 是目前地震灾害研究中很少涉及的一环, 也是本文的研究目的之一.

本文在Cheng等(2021a, 2021b, 2021c)断层分段和级联破裂危险性评估基础上, 给出鲜水河-小江断裂带断层分段和级联破裂危险段落, 并分析给出这些设定地震动作用下地震滑坡概率分布、财产损失和伤亡人口预测. 这一结果为后续进行地震危险性、地震滑坡灾害风险、震害防御和应急救援准备提供科学可靠的方法和结果, 是地震危险性预测预报的重要方向.

2　数据与方法

2.1　鲜水河-小江断裂带几何分段与级联破裂危险性预测

鲜水河-小江断裂带是中国活动断层研究程度较高的断裂. 在该断裂带的断层分段研究上, 闻学泽(1993, 2000)分别对小江断裂和鲜水河-安宁河-则木河断裂的地震破裂分段进行了划分; 宋方敏等(1998)、何宏林等(2008)、魏占玉等(2012)、Sun等(2019)分别对大凉山断裂分段的古地震和滑动速率进行了系统性研究; 何宏林等(1993)、宋方敏等(1998)、Shen等(2003)、李西等(2018)则对小江断裂带活动断层分段、地震破裂和古地震进行了分析. 在上述工作基础上, Cheng等(2021a, 2021b, 2021c)分别给出了鲜水河断裂、安宁河-则木河-大凉山断裂区、小江断裂活动断层分段及级联破裂方案(图2及网络版附表S1, http://earthcn.scichina.com).

在鲜水河断裂分段上, Cheng等(2021a)根据历史破裂分成了16个几何分段, 强震几乎破裂了所有的几何分段. F2段和F3段区间上发生过1816年*M*7.5和1973年M_W7.4/M_S7.6地震, 从烈度图上看1973年M_W7.4地震的震级更强, 因此Wen等(2008)认为前者为F3段, 后者则为F2段和F3段级联破裂. F6段发生过1893年*M*7.3地震, 李天裙等(1997)在描述1893年地震破裂时, 将东西向中古段(F7)在与乾宁断裂(F6)相交部位的地裂缝归为地震破裂, 认为中古段(F7)发生了破裂. F8段则可能是1700年地震的破裂段(Wen等, 2008). F11~F13段(色拉哈断裂)发生过1725年*M*7地震、1748年*M*6.8地震和

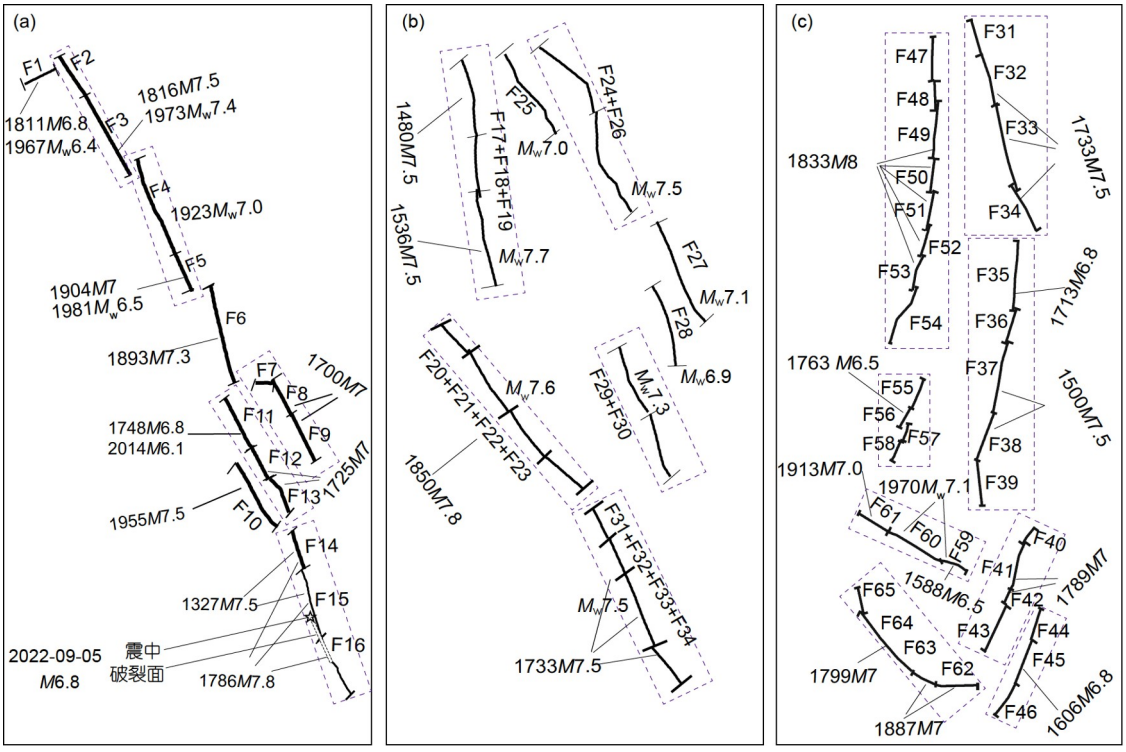

图 2　鲜水河-小江断裂带级联组合破裂模型

(a) 鲜水河断裂带级联组合破裂模型(Cheng等, 2021a); (b) 安宁河-则木河-大凉山断裂带级联组合破裂模型(Cheng等, 2021b); (c) 小江断裂带级联组合破裂模型(Cheng等, 2021c), 其中虚线框内为可能的级联组合破裂方案

2014年康定M_W6.3, 需要关注该段落的地震危险性.

安宁河断裂F17和F18段在1480年发生了破裂, 而1536年M7.5地震则破裂了F19段(冉勇康等, 2008); 则木河断裂在1850年地震是否发生了全段破裂存在着很大的争议(任金卫和李玶, 1993; Wen等, 2008; Ren和Lin, 2010). 大凉山断裂是该区域新生的一条左旋走滑断裂(何宏林等, 2008; Sun等, 2019), 地震主要发生在断裂的两端, 中间部分则鲜有中等以上地震发生. 根据前人研究(何宏林等, 2008; 魏占玉等, 2012; 高伟等, 2016; Sun等, 2019), 大凉山断裂可分为7段, 即公益海段(F25)、竹马段(F24)、越西段(F26)、普雄段(F27)、布托段(F28)、交际河北段(F29)和交际河南段(F30).

小江断裂由三个大段构成, 断裂北部主要包括F31~F34段, 1733年M7.5地震破裂了F32~F34段(Wen等, 2008). 断裂中段由东支断裂和西支断裂两条分支断裂组成, 两条分支断裂平行且相距约15km, 两条分支间分布有小规模的NE向断裂(Shen等, 2003). 西支断裂和东支断裂均发生过级联破裂型历史强震, 其中西支在1833年M8地震中破裂了5个断层分段, 总长度约126km; 东支在1500年M7.5地震中破裂了2个断层分段, 全长82km(宋方敏等, 1998; Wen等, 2008). 小江断裂南部断层趋于复杂, 存在多条小断层, 其分段参照了韩竹军等(2017)和何宏林等(1993). NW向建水断裂和曲江断裂分段主要来自于王洋等(2015)、韩新民和毛玉平(1993)的结果. Cheng等(2021c)模拟出的地震发生率显示小江断裂东、西两支的各段呈现相似的震级-频度关系特征, 即中等地震较少、能量释放以大地震为主.

针对鲜水河级联破裂的可能性方案, Cheng等(2021a)根据历史地震破裂特征、断层间阶区宽度小于5km的阈值、F6段与F11段之间挤压阶区的限制作用等, 给出了鲜水河断裂带5种级联破裂可能性方案, 包括了鲜水河断裂F1~F6段级联破裂、F11~F16段级联破裂、以上南北两部分整段级联破裂、历史地震破裂组合(图2a)以及历史破裂中F7段是否与F6段级联破裂形成1893年M7.3地震. 针对安宁河-则木河-大凉山

断裂区的级联破裂可能性方案，Cheng等(2021b)考虑到历史地震破裂(图2b)、安宁河断裂会否与则木河断裂发生同时破裂，以及大凉山北段是否会发生F24~F26段挤压走滑性级联破裂或者更大的F24~F27段级联破裂等情况，给出了4种级联破裂可能性方案. 其中古地震调查认为安宁河断裂南段可能参与了1850年西昌M7.8地震的破裂(Wang等, 2018)，而走向差28°以上被认为是可以阻断地震的破裂传播(Biasi和Wesnousky, 2017). 在小江断裂带的级联破裂可能性方案上，主要考虑了历史地震级联破裂组合(图2c)、走向差28°的F34与F35段会否发生级联破裂、小江断裂东支(F31~F39)发生整体级联破裂，以及西支会否突破F54段和F55段之间10km宽的阶区形成整个西支级联破裂等4种可能性方案(Cheng等, 2021c).

根据上述可能性方案，Cheng等(2021a, 2021b, 2021c)基于活动断层分段和级联破裂组合方案，使用了震级-频度关系(如G-R关系: Gutenberg和Richter, 1944; Y-C关系: Youngs和Coppersmith, 1985)约束下进行最大震级迭代方法来消耗断层段滑动速率的方法(Chartier等, 2017, 2019)，给出了鲜水河断裂、安宁河-则木河-大凉山断裂和小江断裂不同断层段单独破裂和可能组合破裂的地震发生率(图3a). 其中部分断层段的滑动速率不能完全消耗，其剩余部分作为非主震滑动则通过余震活动、无震释放等方式释放，非主震滑动速率(non-mainshock slip, NMS)比例大于30~40%则可能是级联破裂组合方案与历史地震震级-频度关系不符合(图3b)，或者可能存在着部分段落蠕滑段以及断层模型端部效应(Chartier等, 2017, 2019). 这些级联破裂和单段破裂的最大震级由震级-频度关系给出(如Wells和Coppersmith, 1994; Cheng等, 2020). Cheng等(2021a, 2021b, 2021c)给出的鲜水河断裂、安宁河-则木河-大凉山断裂区和小江断裂迭代结果均显示，根据历史地震破裂的级联组合模型(图2)在迭代过程中消耗滑动速率较其他模型更为彻底，其NMS比例均小于40%的阈值，因此认为根据历史地震给出的级联破裂组合方案与滑动速率、历史地震发生率最为吻合，并给出了这些级联破裂组合方案下模拟地震发生率可能引起的未来475年地震动预测结果. 在Cheng等(2021a, 2021b, 2021c)给出的级联破裂组合方案和地震发生率结果基础上，本文对这些断层段的地震危险性进行了分析，而对于安宁河-则木河-大凉山断裂的部分断层段的滑动速率也进行了更新，使得计算结果更为可靠. 详细的断层分段见网络版附表S1，地震发生率和NMS分配见网络版附图S1.

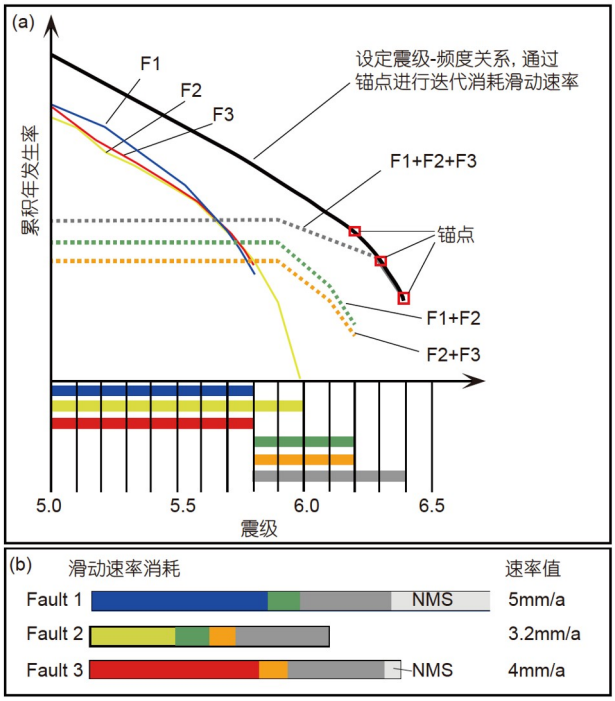

图 3　地震发生率迭代示意图及消耗特征

(a) 滑动速率和震级-频度关系约束下的级联破裂和单独破裂地震发生率迭代示意图，其中黑色粗线为滑动速率转换成的震级-频度关系，灰色、绿色和橙色虚线分别为F1+F2+F3、F1+F2和F2+F3级联破裂型地震发生率，蓝色、黄色和红色实线分别为F1、F2、F3段单独破裂震级-频度关系; (b) 断层地震发生率消耗特征(修改自Chartier等, 2017)，其中不同颜色代表对应组合消耗的滑动速率，NMS为非主震消耗的速率

2022年9月5日泸定M_S6.8/M_W6.6地震震中位置为(102.08°E, 29.59°N)，位于安宁河断裂北延与鲜水河断裂的交汇处. 从余震分布看(房立华, 2022, 个人通讯)，只破裂了F16段北部约20km的断层，并沿着该断层段向北延伸10km左右，破裂了与F15段平行断裂(图4). 基于余震分布特征和发震断层并未破裂F16段的特征，本文认为该地震并不能完全降低F16段的地震危险性，但可能会推迟F16段的地震危险时间.

2.2　基于几何分段与级联破裂的强震危险概率

在地震发生率基础上，本文给出了鲜水河-小江断

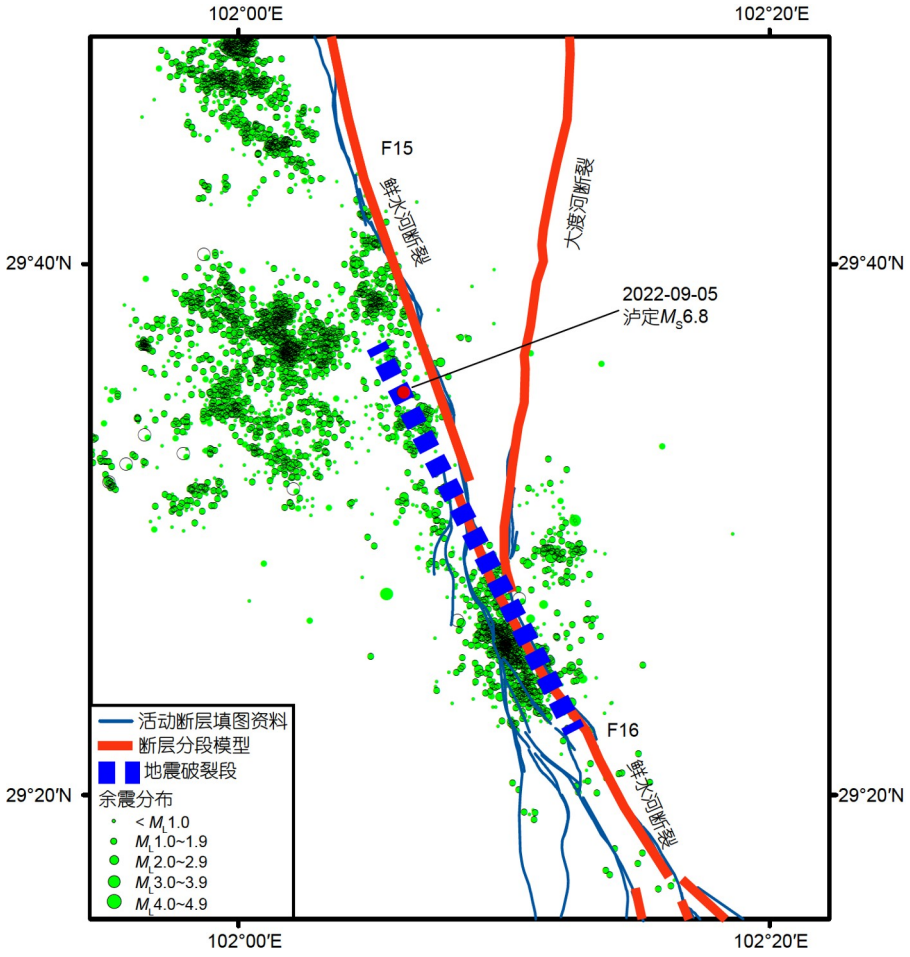

图 4　2022年9月5日泸定6.8级地震余震展布特征与发震断层

蓝色虚线为发震断层位置, 红色为断层分段模型, 其断层数据来源于Chen等(2016); 余震重新定位数据来源于中国地震局地球物理研究所(房立华, 2022, 个人通讯)

裂各断层段的平均复发周期(网络版附表S1). 在鲜水河-小江断裂带的地震危险区段判断上, 本文使用了离逝时间是否达到计算出的复发间隔作为这些断层段危险性判定依据, 图4给出了实线断层段为离逝时间达到或超过复发间隔的断层段和级联破裂组合. 本文也计算了其断层在离逝时间内积累的地震矩与特征地震矩之比R_{m0}(公式(1))来反映这些断层段目前的地震能量积累情况. 断层宽度采用了断层发震层深度/倾角余弦值的值, 而发震层深度20km依据了安宁河断裂上小震重新定位结果(闻学泽等, 2008).

$$R_{m0}=\frac{\dot{M}_0 t}{M_{M_{max}}}=\frac{kLWvt}{M_{M_{max}}}, \tag{1}$$

其中, k为刚度系数, L、W为断层段长度和宽度, v是断层段滑动速率, t为离逝时间, $M_{M_{max}}$为断层段或级联破裂最大矩震级M_{max}的地震矩, 可由公式(2)(Hanks和Kanamori, 1979; Lasocki, 2014)得到, 式中地震矩单位为N m.

$$M_{M_{max}}=10^{1.5\times(M_{max}+6.0333)}. \tag{2}$$

本文也根据各断层段发生不同震级的平均复发间隔计算未来30年强震发生的条件概率等. 在计算断层概率时, 使用了布朗过程时间模型(BPT模型)(Matthews等, 2002; 冉洪流和周本刚, 2004), 其概率分布函数(公式(3))和累积分布函数(公式(4))如下:

$$f(t;\mu,\alpha)=\left(\frac{\mu}{2\pi\sigma^2t^3}\right)^{1/2}\cdot\exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu\alpha^2t}\right\},\ t\geqslant 0, \tag{3}$$

$$F(t)\triangleq P(T\leqslant t)=\int_0^t f(\tau)\mathrm{d}\tau$$
$$=\Phi[u_1(t)]+\mathrm{e}^{2/\alpha^2}\Phi[-u_2(t)], \tag{4}$$

其中,

$$u_1(t)=\alpha^{-1}[t^{1/2}\mu^{-1/2}-t^{-1/2}\mu^{1/2}], \tag{5}$$

$$u_2(t)=\alpha^{-1}[t^{1/2}\mu^{-1/2}+t^{-1/2}\mu^{1/2}], \tag{6}$$

$$\Phi(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^t\mathrm{e}^{-x^2/2}\mathrm{d}x, \tag{7}$$

式中, t为离逝时间, μ为平均复发间隔, α为变异系数. 此处α使用了郭星和潘华(2015)给出的中国陆地平均值0.34.

未来Δt时间内发生特征强震的条件概率为

$$P(\Delta t,t)=\frac{\int_t^{t+\Delta t}f(t)\mathrm{d}t}{\int_t^{\infty}f(t)\mathrm{d}t}=\frac{F(t+\Delta t)-F(t)}{1.0-F(t)}. \tag{8}$$

在离逝时间上, 对于未有历史地震记录的断层段, 主要参考了该断层大规模历史地震记录的开始时间, 如鲜水河断裂为1700年M7地震, 安宁河-则木河-大凉山断裂为1480年M7.5地震, 小江断裂为1500年M7.5地震.

图5展示了鲜水河断裂、安宁河-则木河-大凉山断裂、小江断裂的地震发生概率, 网络版附表S1给出了断层活动参数和计算出的断层单独破裂和级联破裂的平均复发间隔等. 在鲜水河断裂带, 1893年以来的强震主要集中在北部(F1~F6), 而南段的特征地震离逝时间较长(图2a、表1和网络版附表S1), 鲜水河断裂地震危险段主要集中在南部. F12~F16段积累地震矩和复发间隔均超过断层段特征地震对应值; 从可能的级联破裂看, F15和F16段同时破裂时破裂长度为71km, 对应的震级为M_{W}7.0, 两段R_{m0}分别为1.36和1.00, 未来30年条件概率分别为15.37%和63.50%, 可认为F15和F16段近年内有级联破裂的潜在危险. F14~F16级联破裂长度为93km, 震级为M_{W}7.3; F14段、F15段和F16段对应此震级的平均复发周期分别为(631±98)、(631±143)和(707±291)a, 远大于1786年M7.8地震以来的离逝时间236a, 现今发生该震级地震的可能性较低; 但F14和F15两段组合级联破裂具有一定危险性, 其中F15段积累的相应R_{m0}为1.62, 未来30年条件概率为18.11%, 而F14段相应R_{m0}为0.87, 其未来30年条件概率为7.20%. F12和F13段也具有发生级联破裂的可能, 两端发生级联破裂的复发周期分别为(235±64)和(341±95)a, R_{m0}分别为2.16和2.40, 未来30年条件概率分别为35.85%和18.95%. F8段和F9段级联破裂也具有一定的危险性, Wen等(2008)给出的1700年M7地震的破裂长度看, 该地震只破裂了F8段, F9段的历史地震离逝时间更长, 不能排除F9段单独破裂或者与F8段发生级联破裂的可能性. 因此本文给出了4个设定级联破裂型地震来模拟分析地震地质灾害与财产人口损失风险.

对于安宁河-则木河-大凉山断裂区域, 本文的预测结果显示安宁河断裂的3段(F17~F19)、大凉山断裂F29段和F30段的危险程度较高, 这些断层段具有发生单独破裂的危险. 在级联破裂方面, F17和F18段发生级联破裂的破裂长度为94km, 震级为M_{W}7.25, 两段发生这一震级的复发周期为(389±101)和(480±131)a, R_{m0}分别为0.90和0.70, 未来30年发生该地震的概率为24.45%和17.85%, 危险程度较高. F18和F19段同时破裂的复发周期为(480±131)和(876±242)a, 两段离逝时间分别为542和486a, R_{m0}分别为0.49和0.70, 因此F18段和F19段发生级联破裂的可能性较小, 在设定地震中仅考虑了F19段单独破裂而没有考虑F18和F19段的级联破裂. 大凉山断裂F29段和F30段积累地震矩均超过单独破裂的需求量, 两者级联破裂长度约为92km, 震级约为M_{W}7.3; 根据何宏林(2014)大凉山断裂填图工作开挖的探槽显示其F30段最近一次7级以上大地震的时间约为1520~1950a BP, 离逝时间约为1800a, 根据震级看可能是一次F29段和F30段的共同破裂; F29段和F30段对应的R_{m0}分别为1.81和1.66, 而计算出的平均复发间隔分别为(2292±488)和(2297±493)a, 未来30年的条件概率分别为0.04%和2.49%. 虽然本文计算的F29段发生级联破裂的R_{m0}尚未达到, 但考虑到滑动速率误差、计算误差等, 并不能排除这两端发生级联破裂的可能性, 因此本文在计算地震地质灾害概率时, 也考虑了F29段和F30段的级联破裂情况.

小江断裂带北段F31~F33段在安宁河-则木河-小江断裂(图5b)和小江断裂(图5c)的预测中危险性均较高, 这3段均具有发生单独破裂的可能性. 以图5c给出的小江断裂结果为例, F31段未有历史破裂记载(Wen等, 2008), 最近强震可能也早于小江断裂记载较早的

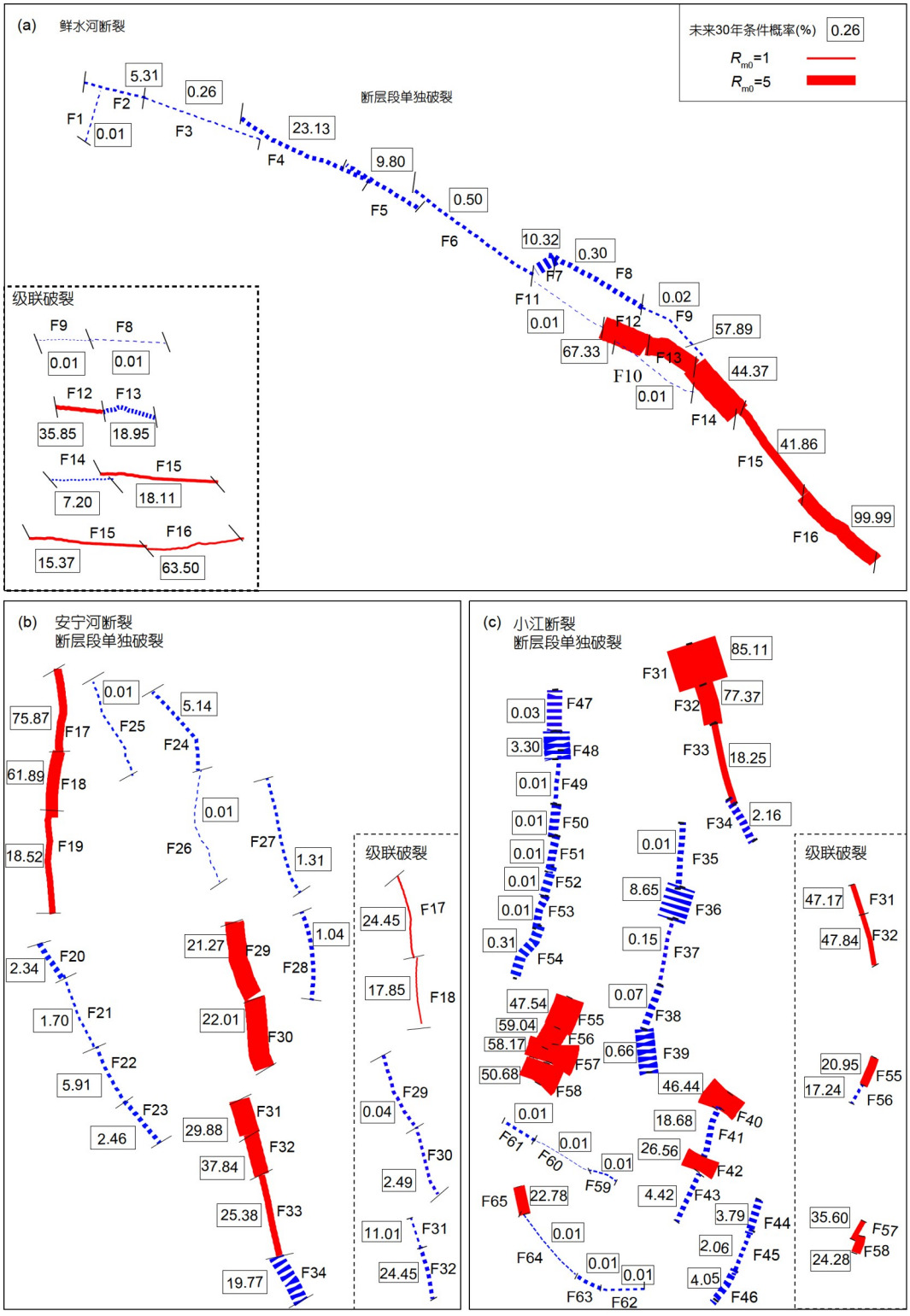

图 5　基于几何分段的鲜水河-小江断裂带地震危险性概率预测结果

红色实线为离逝时间大于模拟地震复发周期的断层段; 蓝色虚线为离逝时间小于模拟地震复发周期的断层段; 方框内数字为未来30年条件概率百分数, 断层粗细程度代表断层积累地震矩与特征地震矩之比R_{m0}的大小; 其中虚线框为级联破裂的各分段发生的条件概率

表 1　主要危险段落地震破裂参数

断裂名	断层段	破裂参数		震源深度(km)	倾向	倾角(°)	震级(M_W)	最大烈度
		长度(km)	宽度(km)					
鲜水河断裂	F8+F9	66	20	10	NE	80	7.0	Ⅸ (9.3)
	F12+F13	38	20	10	NE	80	6.7	Ⅹ (9.8)
	F14+F15	63	20	10	NE	80	7.0	Ⅹ (9.7)
	F15+F16	71	20	10	NE	80	7.1	Ⅸ (9.4)
安宁河断裂	F17+F18	94	20	10	W	80	7.4	Ⅹ (9.6)
	F19	65	20	10	W	80	7.0	Ⅸ (9.0)
大凉山断裂	F29+F30	92	20	10	SW	80	7.3	Ⅹ (9.8)
小江断裂	F31+F32	55	20	10	E	80	6.9	Ⅸ (9.4)
	F33	54	20	10	E	80	6.9	Ⅸ (9.2)
	F55+F56	33	19	10	E	80	6.5	Ⅸ (9.0)
	F57+F58	25	15	10	E	80	6.3	Ⅷ (8.0)

1500年宜良M7.5地震，而F32段被1733年东川M7.8地震错断，离逝时间为289a; F31段和F32段发生M_W6.9级联破裂的复发周期分别为(223±50)和(199±54)a，具有级联破裂危险性．F32段和F33段级联破裂的复发周期分别为(336±65)和(376±50)a，均大于289a的离逝时间; 综合认为F31~F33段的危险性较高，其中F31段和F32段易发生组合级联破裂，F33段发生单独破裂．小江断裂带的危险段还有F55~F58段，其中F55~F56段与F57~F58段之间存在一个3km宽的阶区，因此在级联破裂危险性上，可认为，这2组级联破裂均具有危险性后才能引发更大规模的破裂．F55段和F56段发生级联破裂的复发周期分别为(434±81)和(328±62)a，其中F56段在1763年发生过M6.5地震，其离逝时间为259a，而F55段未有历史地震记载，不能排除F55段和F56段级联破裂的可能性．F57~F58段级联破裂平均复发周期分别为(278±57)和(386±102)a，这两段未有历史地震记载，因此危险性较高．F40、F42、F65等3个危险段长度分别为13、11和17km，对应震级分别为M_W5.9、M_W5.7和M_W6.1(Cheng等, 2020)，相对较小，因此在计算设定地震时未考虑这几段.

2.3　基于断层分段的强震危险源地震动模拟与地震风险

在地震动模拟和地震风险方面，主要包括了基于地震动预测方程(Ground Motion Prediction Equations, GMPEs)的统计预测结果和基于断层破裂地震波传播引起的场地预测结果．其中基于地震动预测方程的统计预测结果以其计算快速性和普遍适用性被广泛应用于地震动预测(如俞言祥等, 2013; Gregor等, 2014)．地震动预测方程为了增加样本数量采用了区域甚至全球地震动观测数据，但忽略了震源、传播路径和记录地点条件相关的具体影响(Xin和Zhang, 2021)，其一般只能代表区域的总体地震动特征．基于断层破裂地震波传播引起的场地预测结果则通过断层凹凸体状态、弯曲和粗糙程度，考虑地壳三维速度结构、传播路径特殊性来给出更为精细可靠的时间、空间和不同频率精细化地震动场特征(Zhang等, 2017; Zhang等, 2019); 对于震源如何破裂方面，断层初始破裂点和破裂过程则通过构造初始应力、摩擦本构关系、地壳速度结构特征等模拟给出(Yang等, 2012; Zhang等, 2017; Yao和Yang, 2023)．此处我们使用了地震动预测方法来快速统一地获取鲜水河-小江断裂带11个潜在地震危险源可能引起的地震动场特征及其灾害风险.

针对潜在地震危险源可能引起的强地面运动，本文使用了OpenQuake软件来计算这些特征地震和级联破裂所引起的近断层强地面运动特征(Monelli等, 2012; Pagani等, 2014)．在设定地震的地震动模拟中，主要根据震源破裂模型和地震动预测方程来计算地震动场，并可评估地震引起的财产损失．在计算地震动时，震源参数为破裂几何面大小、震级，并可将断层面破裂拆分为多个小断层块的子事件，来计算其对周边场地地震动的影响；本文计算中，断层被拆分为

2km×2km的网格，影响区域也使用了2km×2km网格; 在GMPEs上使用了Dangkua等(2018)给出的中国陆地地震动逻辑树模型，即以ASK14(Abrahamson等, 2014)、BSSA14(Boore等, 2014)、CB14(Campbell和Bozorgnia, 2014)、CY14(Chiou和Youngs, 2014)4个地震动预测方程等权重的逻辑树. 在我们的计算过程中, 使用了1σ不确定性的计算结果.

图6为地震动计算结果. 在断层破裂参数上，只考虑了断层走滑作用的影响, 滑动角为0°. 在断层破裂是否切穿整个发震层形成地表破裂型地震的判断上, Cheng等(2020)根据中国陆地地震统计结果发现, M_W6.7地震破裂面长度统计均值为39km, 宽度为20km, 大于这一震级的地震破裂在断层面宽度上变化不大, 可作为判定地震能否切穿整个破裂面形成地表破裂型的标志震级. 本文根据这一统计结果认为, 除小江断裂带F55+F56段级联破裂和F57+F58段级联破裂未破裂至地表外, 其他均为地表破裂型地震; 其中F55+F56段级联破裂的震源深度设置为10km，破裂面深度为19.5~0.5km的矩形断层面上；F57+F58段级联破裂面深度则为15~5km. 从计算结果看，基本上反映了断层左旋走滑作用的特征；其中鲜水河断裂F12段和F13段级联破裂震级为M_W6.7, 模拟最大烈度为9.8, 这一相对较强的烈度可能与F13段地表迹线不平直有关. 鲜水河断裂南端、安宁河断裂、大凉山断裂与小江断裂交汇处以及小江断裂南端是预测地震动峰值加速度(PGA)的高值区域，潜在地震如果发生将会引起高风险地区的滑坡灾害和财产人口损失，亟须进行滑坡灾害风险评估和财产及人员伤亡预测.

(1) 居民住宅财产损失预测

在地震危险段设定地震基础上，可结合暴露模型和易损性模型来分析潜在地震影响区域内财产损失的空间分布特征. 暴露模型是地震危险性与风险模型的重要桥梁，是研究地震风险的重要组成部分，其主要包括了人口、资产(已建成)的空间分布和必要结构属性(Yepes-Estrada等, 2017). Ma等(2021)构建了中国陆地乡镇街道尺度住宅暴露模型，其主要基于中华人民共和国第六次人口普查数据(国务院第六次全国人口普查办公室和国家统计局人口和就业统计司, 2010)、《世界住房百科全书》(*World Housing Encyclopedia*, 见https://db.world-housing.net)、文献调研和专家分析结果. 模型中包括人口、位置、结构类型、建设年代、抗震能力、层数、居住人口、住宅数量、平均建筑面积以及重置成本等信息.

在重置成本的处理过程中，首先通过建筑分类构建宏观分类暴露模型，再根据专家意见、文献检索和建筑年代等细化结构分类映射方案来精细化分类暴露模型; 在假设每层户数基础上估算建筑数量, 根据抗震规范演化估计建筑物抗震能力，每户平均人口和人均住房面积来估算总建筑面积和重置成本；最后在人口分布基础上，将暴露模型从市县级尺度映射到乡镇街道尺度暴露模型. 在建筑物抗震能力上，依据人口普查数据中的建筑属性信息，将建筑物分为没有抗震能力(DNO)、低抗震能力(DUL)、中等抗震能力(DUM)和高抗震能力(DUH); 在此基础上, 通过居民人数除以楼层数与每层居民数的乘积得到建筑物数量. 根据不同类型典型结构的易损性模型和脆弱性模型来分析预测四川和云南地区影响区域内的造成住宅损失空间分布特征. 在易损性模型方面, 采用马健(2022)构建的中国住宅易损模型数据进行住宅易损性模拟，其主要根据Martins和Silva(2020)给出的全球建筑能力曲线相关参数结合中国住宅建筑分类建立了中国住宅能力曲线参数数据库，并根据能力曲线参数和结构体系选择相应的能力曲线模型构建了等效单自由度模型，通过对地震危险性分解成不同震级、不同震中距等结果，选择了300条地震动，最终通过云图法构建了中国陆地住宅脆弱性和易损性模型(马健, 2022).

通过叠加地震动空间分布、影响区域内的暴露模型和易损性模型进行了100次模拟，所得评估结果如图7所示. 在鲜水河断裂潜在地震居民住宅损失评估上，F8段和F9段级联破裂造成的损失均值为8.63亿人民币，损失最大县域为康定，其次为泸定、道孚两县(图7a)；F12段和F13段级联破裂可能造成的损失均值为5.65亿人民币，损失最大县域为康定，其次为泸定和道孚(图7b)；F14段和F15段级联破裂造成的损失均值为12.8亿人民币，其损失最大的县域包括康定、泸定，其次石棉、汉源两县损失也较大(图7c)；F15段和F16段级联破裂造成的居民住宅损失均值为18.8亿人民币，但这部分损失值仅包括住宅部分，其造成损失最大县域包括泸定和石棉，另外汉源、泸定的损失也较大(图7d). 从安宁河断裂设定地震居民住宅损失看，F17段和F18段级联破裂造成的损失均值为43.5亿人民币，损失最大的县域为冕宁，其次为石棉、越

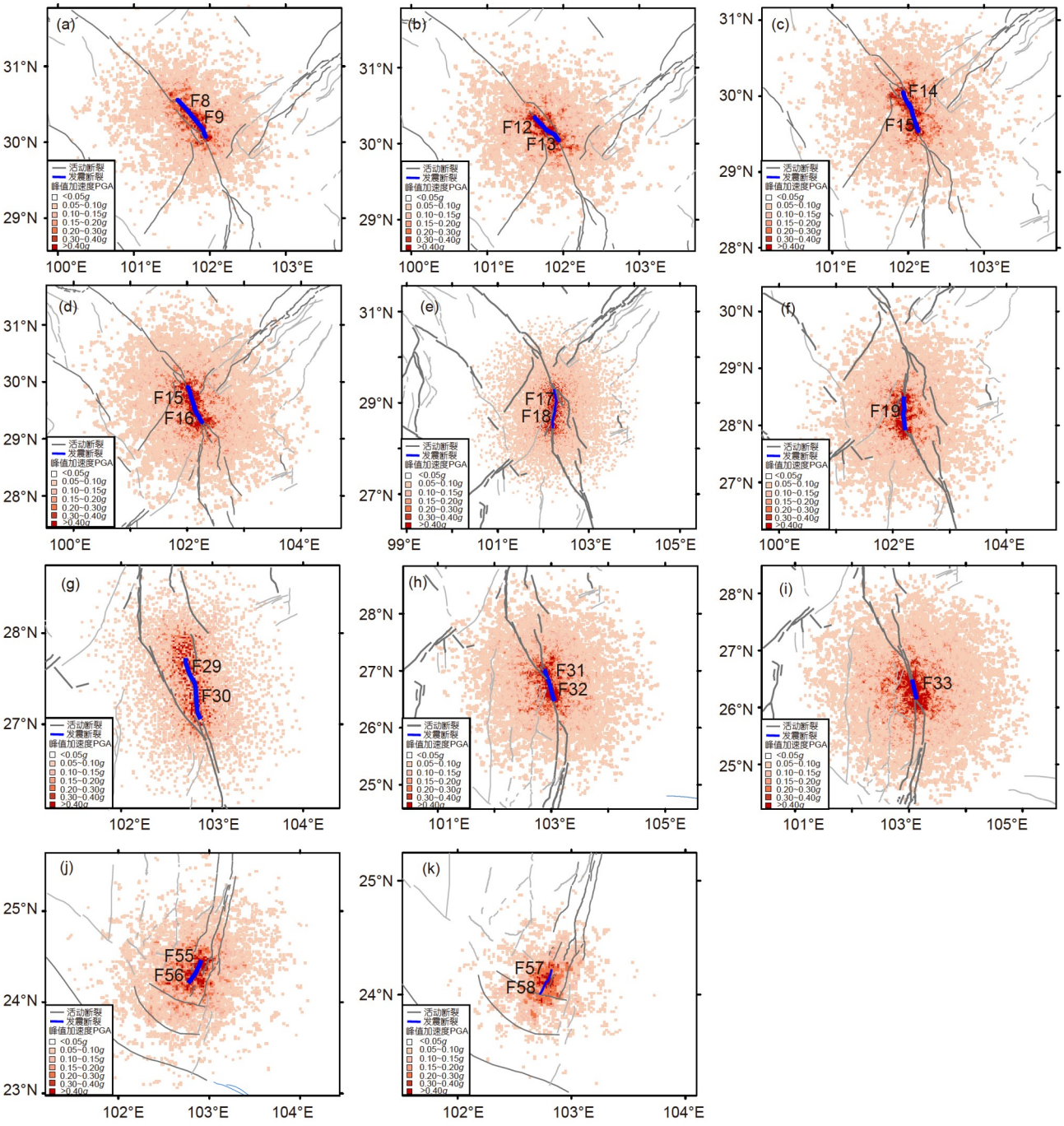

图 6　鲜水河-小江断裂带设定地震下的峰值加速度PGA分布

活动断层数据来源于徐锡伟等(2016), 蓝色线段为发震断层

西、汉源、喜德等(图7e); F19段破裂造成的损失均值为76.5亿人民币, 其中损失最大的县域为冕宁和西昌, 其次是喜德、越西和昭觉(图6f); 大凉山断裂F29段和F30段级联破裂造成的损失均值为55.0亿人民币, 损失较大的县域为巧家、宁南、普格、布拖、昭觉等(图7f). 小江断裂上, F31段和F32段级联破裂引起的居民住宅损失均值为45.5亿人民币, 其中损失最大县域为巧家, 其次是宁南、会东、会泽等(图7g); F33段破裂

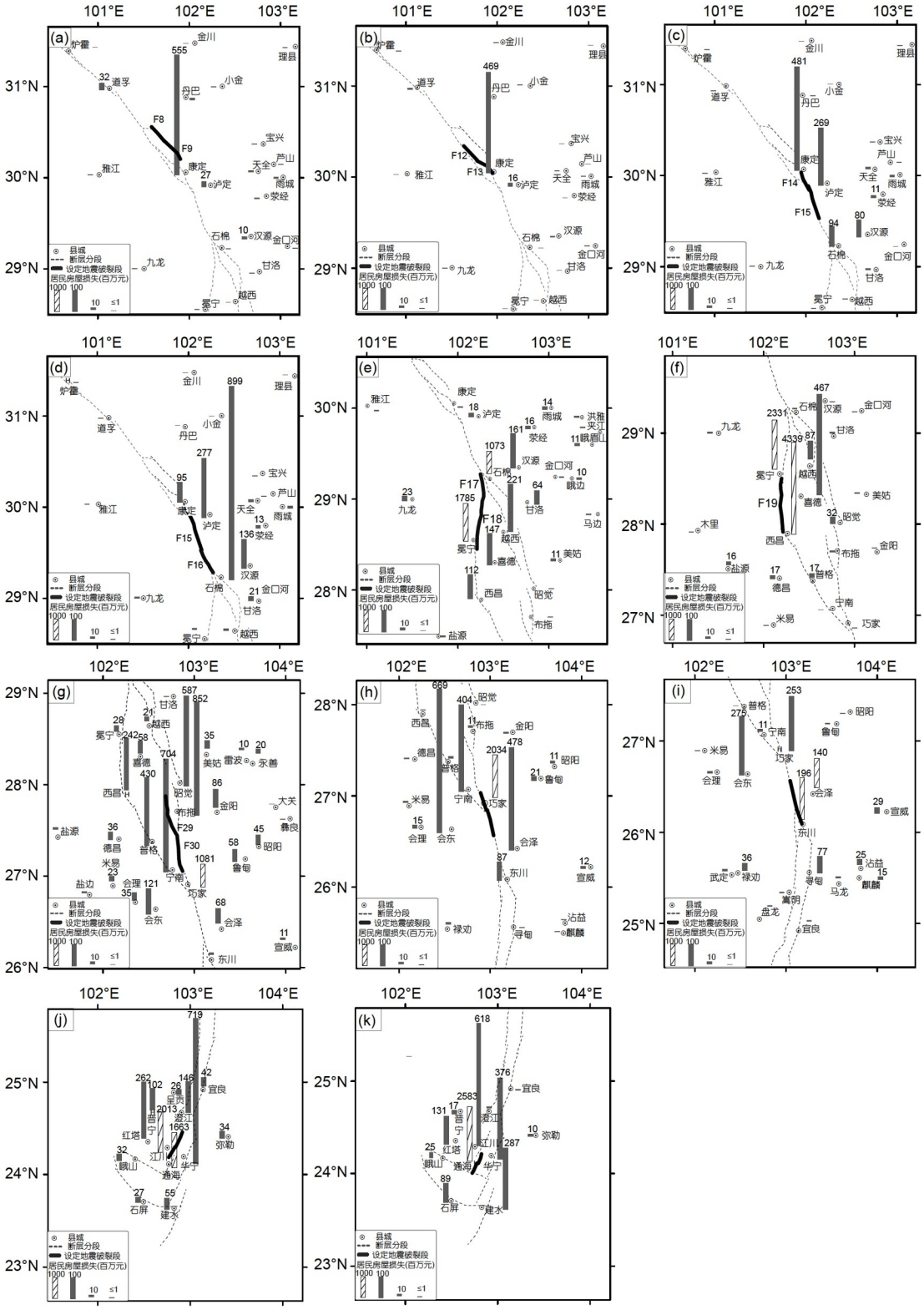

图 7　设定地震引起的住宅损失分布

黑色线段为发震断层, 灰色柱子为住宅损失

引起的居民住宅损失均值为50.5亿人民币，其中损失最大的县域为会泽和东川，其次是会东、巧家(图7h)；F55段和F56段级联破裂引起的居民住宅损失均值为50.6亿人民币，其中损失最大县域为江川和通海，其次是华宁、玉溪、晋宁、澄江(图7i)；F57段和F58段级联破裂引起的居民住宅损失均值为31.9亿人民币，其中损失最大县域为通海，其次是江川、华宁、建水、玉溪(图7j).

(2) 地震引起的伤亡人口估计

地震伤亡人口的预测，不仅需要地震破裂特征本身，还需要考虑人口分布及其生活环境等特征，是一个典型的复杂预测系统. 朱鹏宇等(2022)根据中国陆地1975~2020年84个地震伤亡事件，使用深度学习神经网络针对地震破裂中的发震年代、发震时间(夜晚时间18:00~8:00、白天时间8:00~18:00)、Ⅵ度及以上烈度区受灾面积、受灾人口、震源深度、破裂滑动角、极震区最大烈度等7个参数，通过训练其中的78次地震伤亡事件，给出了中国陆地人口伤亡预测参数，并针对2005年以来的9次地震事件的伤亡人口给出了预测结果. 该方法预测结果准确性较高，是对地震造成人口伤亡这种复杂系的有效预测手段.

本文在潜在地震的地震动基础上，使用上述深度学习神经网络方法对潜在地震可能造成的伤亡人口进行评估. 在烈度关系上，使用了GB/T 17742~2020《中国地震烈度表》(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会，2020)中的经验关系(公式(9))，将PGA转换成地震动烈度，用于给出Ⅵ度区的受灾面积. 在人口数据上，使用了2010年全国各乡镇以上行政单位人口分布图(国务院第六次全国人口普查办公室和国家统计局人口和就业统计司，2010). 震源深度设置为断层发震层深度20km的中间值10km处.

峰值加速度PGA与烈度I_A之间的关系:

$$I_A = 3.17\log_{10}(\mathrm{PGA}) + 6.59. \tag{9}$$

根据上述数据，本文给出了伤亡人口情况，见表2.

从预测结果看，地震死亡人口预测超过50人的潜在地震包括了鲜水河断裂F12段和F13段级联破裂、鲜水河断裂F14段和F15段级联破裂、安宁河断裂F17段和F18段级联破裂、安宁河断裂F19段、安宁河断裂F29段和F30段级联破裂. 其中鲜水河两次潜在级联破裂烈度高且破裂临近甘孜州府康定，因此其伤亡人口较高；安宁河断裂3次潜在破裂的人口密度较高，因此预测伤亡人口多. 从白天和夜晚的预测结果看，除F8段和F9段级联破裂外，其他潜在地震的白天死亡人口预测值均小于夜晚预测值. 总体而言，鲜水河-小江断裂11次潜在地震预测死亡人口较多，需要重点关注和进行相关应急救援准备工作.

(3) 地震动作用下的滑坡灾害概率预测

在地震动模拟基础上，同样可得到设定地震作用下地震滑坡发生概率. 本文主要使用了许冲等(2019)给出的机器学习方法建立了地震滑坡发生概率模型. 该方法主要以中国及周边地区9次强震(1999年中国台湾集集M_S7.6地震、2005年克什米尔M_S7.6地震、2008年中国汶川M_S8.0地震、2010年中国玉树M_S7.1地震、2013年中国芦山M_S7.0地震、2013年中国岷县M_S6.6地震、2014年中国鲁甸M_S6.5地震、2015年尼泊尔M_S8.1地震、2017年中国九寨沟M_S7.0地震)共306435处地震滑坡记录作为分析样本，选取绝对高程、相对高差、坡度、坡向、斜坡曲率、坡位、地形湿度指数、土地覆盖类型、植被覆盖度、与断层距离、地层、年均降水量、地震动峰值加速度共13个地震滑坡影响因子.

基于上述方法，本文给出了鲜水河-小江断裂11个潜在地震作用下引起的地震触发滑坡发生概率分布(图8). 图8a为鲜水河断裂F8段和F9段级联破裂作用下的地震触发滑坡的概率分布特征，显示该潜在级联破裂可能引起的滑坡灾害主要集中在玉科断裂南侧地区，该地区地震滑坡发生概率高值集中在NNE向条带上，向南延伸到龙门山断裂直至与鲜水河断裂交会处，概率最大处超过10%；在F9段沿线及以南也有部分高值区. 与F8段和F9段级联破裂空间分布类似，但F12和F13段级联破裂引起的滑坡灾害概率高值更为明显(图8b)，高值区位于F9段和F13段之间，超过10%的概率高值区更为明显. 该地区曾在1786年康定7.8级地震后发生过摩岗岭大滑坡，表明该地区地震滑坡易发性强，概率高. 图8c为F14段和F15段级联破裂引起的地震滑坡概率分布，高值区也位于玉科断裂南段到龙门山断裂处，在鲜水河断裂F14段和F15段附近也有小范围概率高值分布. 图8d显示沿着鲜水河断裂F15和F16段的滑坡概率危险性较高，这可能与这一地区构造挤压强烈(徐锡伟等，2003)导致的滑坡不稳定性较高有关，而玉科断裂南段也有部分高危险性的滑坡，也可能与该地区强烈挤压有关. 图8e中F17段和F18段级联破裂引起

表 2　鲜水河-小江断裂设定地震伤亡人口预测结果

名称	震级(M_W)	最大烈度	Ⅵ区面积(km^2)	Ⅵ区人口(人)	震源深度(km)	死亡人数预测(人)		受伤人数预测(人)	
						夜晚	白天	夜晚	白天
F8+F9	7.0	Ⅸ (9.3)	32370	370554	10	27	27	435	399
F12+F13	6.7	Ⅹ (9.8)	2830	380904	10	138	112	746	724
F14+F15	7.0	Ⅹ (9.7)	45280	123659	10	63	43	545	498
F15+F16	7.05	Ⅸ (9.4)	45610	208788	10	28	25	412	390
F17+F18	7.4	Ⅹ (9.6)	41000	2806495	10	243	186	775	606
F19	7.0	Ⅸ (9.0)	37790	2974563	10	72	62	865	741
F29+F30	7.3	Ⅹ (9.8)	33800	4690945	10	317	279	1401	1329
F31+F32	6.9	Ⅸ (9.4)	35080	316410	10	32	31	458	426
F33	6.9	Ⅸ (9.2)	37370	443271	10	21	16	378	365
F55+F56	6.5	Ⅸ (9.0)	14750	558415	10	15	8	338	328
F57+F58	6.3	Ⅷ (8.0)	8062	481284	10	1	0	86	43

的滑坡概率高值主要沿着F16段分布, 另一高值区在锦屏山断裂南段以及金河-箐河断裂与盐源断裂之间, 这一高值区也可能与地壳挤压作用强烈有关. 图8f中F19段破裂引起的地震滑坡概率高值区, 也主要集中在锦屏山断裂南段以及金河-箐河断裂与盐源断裂之间的区域, 而在F19段两侧概率高值点相对较少. 图8g为F29段和F30段级联破裂引起的地震滑坡概率空间分布; 其中沿F29段和F30段高值明显, 另外沿莲峰断裂、金阳断裂、峨边-金边断裂和昭通-鲁甸断裂附近概率危险性也较高, 可能也与这几条断裂的挤压作用明显. 图8h和8i分别为小江断裂北部F31段和F32段级联破裂、F33段破裂引起的滑坡概率分布; 两者滑坡概率高值主要集中在破裂段两侧, 而在莲峰断裂、普渡河断裂两侧也有高值区分布. 小江断裂南段现今拉张作用较高(闻学泽等, 2013), 而图8j和8k给出的小江断裂南部2次潜在破裂引起的滑坡概率高值点相对较少, 仅有少量概率>1%的分布, 主要沿着红河断裂南段和建水断裂. 综合上述特征, 本文认为挤压作用强烈的区域, 可能是未来地震滑坡概率危险性较高的重要条件, 而在地震动作用下这些区域的地震滑坡概率危险性较高.

3　讨论与结论

地震引起地震滑坡灾害和财产人口损失是一个复杂系统上各种内外力和环境共同作用的结果. 本文基于断层分段出发, 给出了鲜水河-小江断裂带级联破裂危险段预测结果及其可能引起的地震滑坡灾害与财产人口损失情况, 是一种行之有效的方法.

在上述过程中, 如何寻找到最危险断层段是研究关键所在, 即如何得到断层段单独破裂和级联破裂的复发周期. 断层段危险性预测本身存在着诸如特征地震模型、丛集发生模式和随机发生模式等不同模式; 这种不确定性一方面来源于断层滑动速率本身存在着一定的波动, 另一方面则是断层之间存在着相互作用等. 同样, 断层段之间也存在着可变滑动模式, 并非每次都固定在某个特定的断层段上(Schwartz和Copper-smith, 1984), 而级联破裂模型则是可变滑动模型与断层分段的结合. 与空间分布的非固定性类似, 地震的发生在时间上也存在着非周期性; 如Xu和Deng(1996)对中国陆地不同构造分区内古地震研究后认为地震复发模式有准周期的等间隔型、复发间隔逐渐缩短的对数型(图9a)、活跃与平静相间的阶梯型等三种, 其中对数型是阶梯型的特例, 是从活跃期开始的阶梯型(图9b). 对于断层而言, 如图9a中鲜水河断裂带1893年乾宁7.3级地震丛集现象, 断层上的活跃期一方面可能是断层几年至上百年时间内自身滑动速率相对较高, 这种较高的滑动速率引起地震的丛集现象也可能存在着一定时间的滞后性. 同时, 还存在着断层各段发生地震间相互作用使得地震丛集现象复杂化, 如程佳和徐锡伟(2018)在对巴颜喀拉块体的地震间相互作用扣除后显示更为显著的地震丛集活动现象. 对于断层段来说,

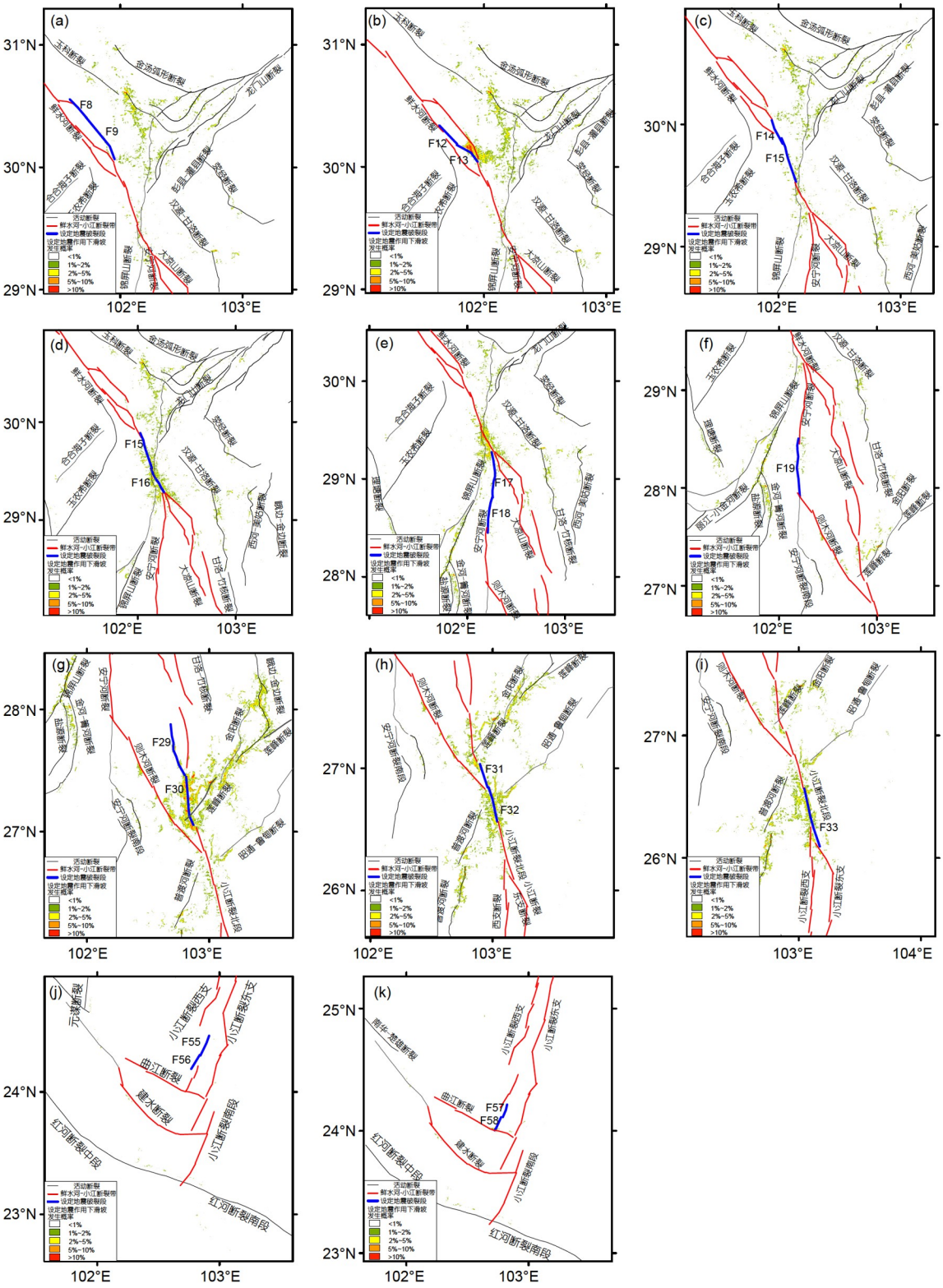

图 8　**鲜水河-小江断裂带潜在地震危险段引起的地震地质灾害概率预测结果**

灰色线段为活动断裂带(徐锡伟等, 2016), 红色线段为鲜水河-小江断裂带, 蓝色线段为发震断层

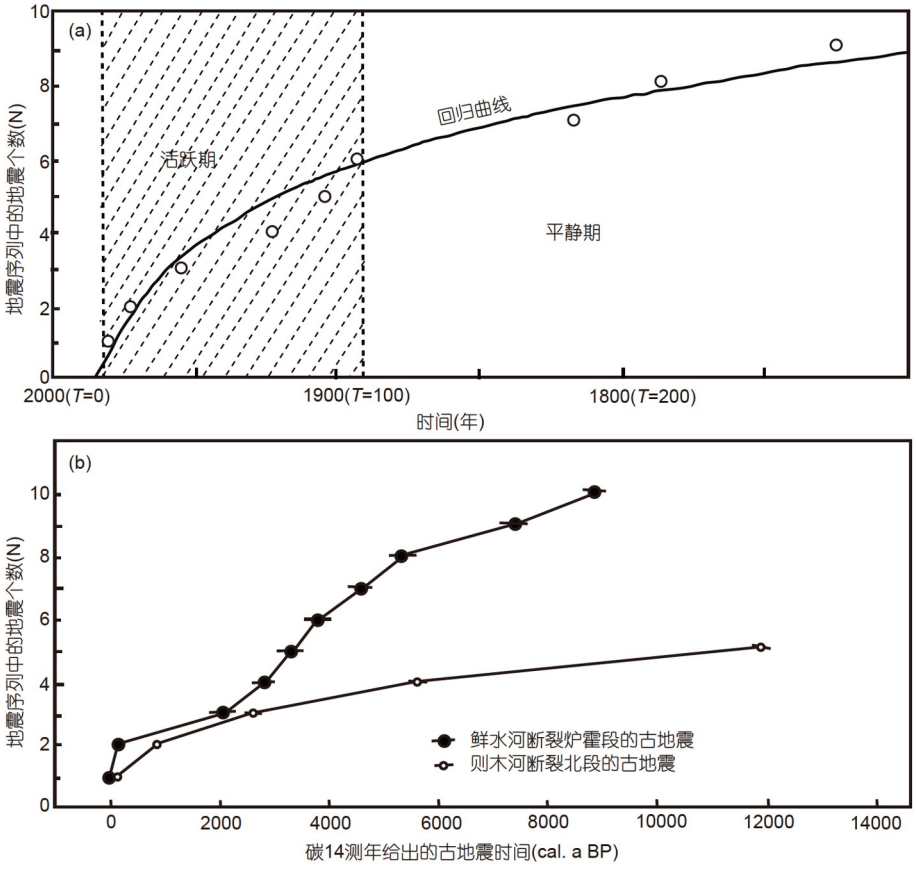

图 9　古地震复发时间特征

(a) 古地震显示的鲜水河断裂6.9级以上地震复发时间特征, 其中虚线框内为活跃期, 其他时间段为平静期; (b) 鲜水河断裂带炉霍段和则木河断裂北段古地震显示的时间复发特征, 修改自Xu和Deng(1996)

断层段之间的级联破裂则可能是其某个地震周期复发时间较长的主要原因; 如某个断层段长60km, 其破裂震级约为M_W7.0(Cheng等, 2020), 断层附近地震活动性(G-R关系)参数a值为4.0, b值为1.0, 其M_W7.0级以上地震复发间隔大致在1000a左右, 而发生M_W7.5级联地震复发周期约为3200a, 远大于其单独破裂的地震周期. 因此, 滑动速率和断层段间级联破裂可能是影响前人地震发生模式的重要因素.

本文使用了滑动速率约束下的级联破裂危险性预测结果, 是对特征地震模式的一种改进和提高, 通过断层分段及其组合来重新给出断层破裂的震级和发生率. 其中断层滑动速率的波动性、野外滑动速率测量误差等不可避免, 这也是研究地震危险性中普遍存在的问题, 这一部分现今很难解决. 断层可能还存在着包括震后余滑、蠕滑等消耗滑动速率的部分, 虽然本文在模拟级联破裂发生率时, 考虑了这部分作用的影响, 但实际情况可能更为复杂, 也需要更多数据的对比分析, 如采用InSAR和GPS联合反演断裂带的闭锁特征(Jiang等, 2015)、小震重新定位b值分析凹凸体的分布特征(易桂喜等, 2008)等. 综合而言, 断层危险性亟需多学科综合研究, 而本文给出的鲜水河-小江断裂危险断层段是未来一段时间内上述各方面研究需要重点关注的区段.

另外, 在地震动作用下的滑坡灾害预测以及地震灾害损失和伤亡人口预测环节, 不可避免地存在着误差, 其中既包括了参数选取上的偶然误差, 又包括了认知不确定性带来的误差. 其中在地震动预测方面本文选取了成熟的统计学方法, 其在每个统计学环节都存在着偶然误差, 包括了震源误差、传播路径误差以及缺少对场地效应的考虑. 震源方面本文使用了断层上的均匀位错破裂模型, 而实际破裂可能是凹凸体处受力最强并发生破裂产生最大位错; 路径方面则需要

考虑三维地壳结构的影响; 场地特征可能会在局部地区产生较大的放大效应. 以上地震动方面的误差亟需开展基于超算设备和并行算法不断精细化断层凹凸体模型、三维速度结构模型和近地表沉积物特征, 得到更符合实际的不同频率特征地震动场特征. 在地震灾害损失方面, 住宅暴露模型和易损性模型的精度直接导致了损失评估结果的不确定性. 其中住宅暴露模型方面, 将第六次人口普查数据作为主要数据源来细化暴露模型, 不可避免地引入了主观判断和假设. 日渐增大的人口流动性和高速更新的建筑物特征造成了模型与实际居住人口和房屋特征偏差较大, 上述偏差在未来可通过结合中国第一次自然灾害综合风险普查数据、卫星遥感数据、土地利用数据、移动热点数据等改善模型. 在易损性模型方面, 基于等效单自由度体系对结构进行了简化, 可能导致与实际破坏状态存在差异, 也需要通过实际震害数据校正易损性和脆弱性模型. 地震滑坡概率预测和地震伤亡人口预测上, 本文选择了基于样本事件的机器学习方法来进行分析, 这是因为这两种灾害是复杂体系多因素作用共同导致的结果, 其本身就存在着认知不确定性带来的误差. 解决的办法依赖于观测样本事件的增多和分析算法的提高. 综上, 地震危险性和风险预测模型是目前防灾减灾工作亟须发展的学科方向, 而本文基于断层危险源分析的风险预测模型为后续进一步开展相关工作提供了一条有效途径.

在上述工作基础上, 本文得到如下结论.

(1) 通过计算滑动速率和震级-频度关系约束下的鲜水河-小江断裂断层分段以及级联破裂地震发生率, 给出了鲜水河-小江断裂11个级联破裂和单独破裂强震危险段, 其中鲜水河断裂4个相邻两段级联破裂危险段、安宁河断裂1个相邻两段级联破裂危险段和1个单独破裂危险段、大凉山断裂1个相邻两段级联破裂危险段、小江断裂3个相邻两段级联破裂危险段和1个单独破裂危险段. 并给出了这些危险段的未来30年条件概率分布.

(2) 鲜水河-小江断裂11个危险断层区段可能引起的居民住宅灾害损失预测: 鲜水河断裂4次潜在事件的居民住宅损失相对较小, 最大为F15段和F16段级联破裂居民住宅损失, 其均值为18.8亿人民币; 安宁河断裂、大凉山断裂、小江断裂上的潜在地震居民住宅损失均值都超过30亿人民币, 其中最大为F19段引起的76.5亿人民币潜在居民住宅损失.

(3) 根据深度学习神经网络方法和历史地震的伤亡人口数据, 预测潜在地震伤亡人口最多的是安宁河断裂F29段和F30段级联破裂, 其受伤和死亡人口预测值分别为1329~1401人和279~317人.

(4) 对于地震滑坡灾害预测显示, 现今挤压作用强烈的地区滑坡不稳定性高, 潜在地震可能引起的地震滑坡概率较高, 如玉科断裂南段、鲜水河断裂南段、大凉山断裂南段与莲峰断裂交错部位, 其概率值均大约10%. 研究结果为活动断层资料在地震地质灾害与财产人口损失方面的应用提供新的有效途径, 也为防震减灾和应急救援准备提供科学支撑.

致谢　主编、责任编委和两位审稿人给出了宝贵的审稿意见, 中国地震局地质研究所孙浩越博士、云南地震局李西博士提供了断层古地震数据, 中国科学院南海海洋研究所杨晓东研究员和应急管理部国家自然灾害防治研究院任俊杰研究员对初稿给出审阅意见, 南方科技大学信丹华博士提供地震伤亡人口预测数据, 在此一并致谢.

参考文献

程佳, 刘杰, 甘卫军, 余怀忠, 李纲. 2011. 川滇菱形块体东边界各断层段强震演化特征研究. 中国科学: 地球科学, 41: 1311–1326

程佳, 徐锡伟, 甘卫军, 马文涛, 陈为涛, 张勇. 2012. 青藏高原东南缘地震活动与地壳运动所反映的块体特征及其动力来源. 地球物理学报, 55: 1198–1212

程佳, 徐锡伟. 2018. 巴颜喀拉块体周缘强震间应力作用与丛集活动特征初步分析. 地震地质, 40: 133–154

高伟, 何宏林, 孙浩越, 魏占玉. 2016. 大凉山断裂带中段普雄断裂晚第四纪古地震. 地震地质, 38: 797–815

国务院第六次全国人口普查办公室, 国家统计局人口和就业统计司. 2011. 2010年第六次全国人口普查主要数据. 北京: 中国统计出版社

国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2020. 中国地震烈度表(GB/T 17742-2000). 1–10

郭星, 潘华. 2015. 强震复发间隔变异系数的一种计算方法. 地震学报, 37：411–419

韩新民, 毛玉平. 1993. 石屏-建水断裂带未来三十年内七级以上大地震危险性分析. 地震研究, 16: 52–59

韩竹军, 董绍鹏, 谭锡斌, 毛泽斌, 袁仁茂, 呼楠, 郭鹏. 2017. 小江断裂带南段全新世活动的地质地貌证据与滑动速率. 地震地质, 39: 1–19

何宏林, 方仲景, 李玶. 1993. 小江断裂带西支断裂南段新活动初探. 地震研究, 16: 291–298

何宏林, 池田安隆, 何玉林, 东乡正美, 陈杰, 陈长云, 田力正好, 越後智雄, 冈田真介. 2008. 新生的大凉山断裂带——鲜水河-小江断裂系中段的裁弯取直. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 564–574

何宏林. 2014. 我国地震重点监视防御区活动断层地震危险性评价项目——川西大凉山断裂带条带状地质填图验收报告. 1–191

李天祁, 杜其方, 游泽李, 张成贵. 1997. 鲜水河活动断裂带及强震危险性评估. 成都: 成都地图出版社. 23–24

李西, 冉勇康, 吴富峣, 马兴全, 张彦琪, 曹筠. 2018. 小江断裂带西支晚第四纪强震破裂特征. 地震地质, 40: 1179–1203

马健. 2022. 区域概率地震风险模型构建及敏感性研究. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学. 1–158

*M*7专项工作组. 2011. 中国大陆大地震中-长期危险性研究. 北京: 地震出版社. 20–49

冉洪流, 何宏林. 2006. 鲜水河断裂带北西段不同破裂源强震震级(*M*≥6.7)及复发间隔研究. 地球物理学报, 49: 153–161

冉洪流, 周本刚. 2004. 布朗模型在北京西北地区的应用. 地震学报, 26(增刊): 96–102

冉勇康, 陈立春, 程建武, 宫会玲. 2008. 安宁河断裂冕宁以北晚第四纪地表变形与强震破裂行为. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 543–554

任金卫, 李玶. 1993. 四川西昌1850年地震地表破裂特征研究. 地震地质, 15: 97–106

宋方敏, 汪一鹏, 俞维贤, 曹忠权, 申旭辉, 沈军. 1998. 小江活动断裂带. 北京: 地震出版社. 53–205

王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 王敏, 甘卫军, 乔学军, 孟国杰, 李铁明, 陶玮, 杨永林, 程佳, 李鹏. 2008. 基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 582–597

王洋, 张波, 侯建军, 艾晟. 2015. 曲江断裂晚第四纪活动特征及滑动速率分析. 地震地质, 37: 1177–1192

魏占玉, 何宏林, 石峰, 徐岳人, 毕丽思, 孙浩越. 2012. 大凉山断裂带南段滑动速率估计. 地震地质, 34: 282–293

闻学泽. 1993. 小江断裂带的破裂分段与地震潜势概率估计. 地震学报, 15: 322–330

闻学泽. 2000. 四川西部鲜水河-安宁河-则木河断裂带的地震破裂分段特征. 地震地质, 22: 239–249

闻学泽, 杜方, 易桂喜, 龙锋, 范军, 杨攀新, 熊仁伟, 刘晓霞, 刘琦. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景. 地球物理学报, 56: 3361–3372

闻学泽, 范军, 易桂喜, 邓一唯, 龙锋. 2008. 川西安宁河断裂上的地震空区. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 797–807

许冲, 徐锡伟, 周本刚, 沈玲玲. 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: 1122–1130

徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平, 张世民, 于贵华, 周本刚, 李峰, 马保起, 陈桂华, 冉永康. 2016. 中国及邻近地区地震构造图. 北京: 地震出版社

徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 马文涛, 宋方敏, 于贵华. 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): 151–162

易桂喜, 闻学泽. 2007. 多地震活动性参数在断裂带现今活动习性与地震危险性评价中的应用与问题. 地震地质, 29: 254–271

易桂喜, 闻学泽, 苏有锦. 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研究. 地球物理学报, 51: 1719–1725

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: 24–33

赵静, 江在森, 牛安福, 刘杰, 武艳强, 魏文薪, 刘晓霞, 闫伟. 2015. 川滇菱形块体东边界断层闭锁程度与滑动亏损动态特征研究. 地球物理学报, 58: 872–885

周仕勇. 2008. 川西及邻近地区地震活动性模拟和断层间相互作用. 地球物理学报, 51: 165–174

朱鹏宇, 程佳, 杜龙. 2022. 基于深度学习神经网络方法的中国大陆地震伤亡预测模型. 中国地震, 38: 651–661

Abrahamson N A, Silva W J, Kamai R. 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. Earthq Spectra, 30: 1025–1055

Allen C R, Luo Z, Qian H, Wen X, Zhou H, Huang W. 1991. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China. Geol Soc Am Bull, 103: 1178–1199

Bai M, Chevalier M, Leloup P H, Li H, Pan J, Replumaz A, Wang S, Li K, Wu Q, Liu F, Zhang J. 2021. Spatial slip rate distribution along the SE Xianshuihe Fault, Eastern Tibet, and earthquake hazard assessment. Tectonics, 40: e2021TC006985

Biasi G P, Wesnousky S G. 2017. Bends and ends of surface ruptures. Bull Seismol Soc Amer, 107: 2543–2560

Boore D M, Stewart J P, Seyhan E, Atkinson G M. 2014. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. Earthq Spectra, 30: 1057–1085

Campbell K W, Bozorgnia Y. 2014. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. Earthq Spectra, 30: 1087–1115

Chartier T, Scotti O, Lyon-Caen H, Boiselet A. 2017. Methodology for earthquake rupture rate estimates of fault networks: Example for the western Corinth rift, Greece. Nat Hazards Earth Syst Sci, 17: 1857–1869

Chartier T, Scotti O, Lyon-Caen H. 2019. SHERIFS: Open-source code for computing earthquake rates in fault systems and constructing hazard models. Seismol Res Lett, 90: 1678–1688

Chen G H, Xu X W, Wen X Z, Chen Y G. 2016. Late Quaternary slip-rates and slip partitioning on the southeastern Xianshuihe fault system, eastern Tibetan Plateau. Acta Geol Sin-Engl Ed, 90: 537–

554

Cheng J, Chartier T, Xu X. 2021a. Multisegment rupture hazard modeling along the Xianshuihe fault zone, southeastern Tibetan Plateau. Seismol Res Lett, 92: 951–964

Cheng J, Rong Y, Magistrale H, Chen G, Xu X. 2017. An M_w-based historical earthquake catalog for mainland of China. Bull Seismol Soc Amer, 107: 2490–2500

Cheng J, Rong Y, Magistrale H, Chen G, Xu X. 2020. Earthquake rupture scaling relations for mainland of China. Seismol Res Lett, 91: 248–261

Cheng J, Xu X, Yao Q, Yang X, Chen H. 2021b. Seismic hazard of multi-segment rupturing for the Anninghe-Zemuhe-Daliangshan fault region, southeastern Tibetan Plateau: Constraints from geological and geodetic slip rates. Nat Hazards, 107: 1501–1525

Cheng J, Xu X, Ren J, Zhang S, Wu X. 2021c. Probabilistic multi-segment rupture seismic hazard along the Xiaojiang fault zone, southeastern Tibetan Plateau. J Asian Earth Sci, 221: 104940

Chiou B S J, Youngs R R. 2014. Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. Earthq Spectra, 30: 1117–1153

Dangkua D T, Rong Y, Magistrale H. 2018. Evaluation of NGA-West2 and Chinese ground-motion prediction equations for developing seismic hazard maps of mainland of China. Bull Seismol Soc Amer, 108: 2422–2443

Gregor N, Abrahamson N A, Atkinson G M, Boore D M, Bozorgnia Y, Campbell K W, Chiou B S J, Idriss I M, Kamai R, Seyhan E, Silva W, Stewart J P, Youngs R. 2014. Comparison of NGA-West2 GMPEs. Earthq Spectra, 30: 1179–1197

Guo R, Zheng Y, Tian W, Xu J, Zhang W. 2018. Locking status and earthquake potential hazard along the middle-south Xianshuihe fault. Remote Sens, 10: 2048

Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California. Bull Seismol Soc Amer, 34: 185–188

Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale. J Geophys Res, 84: 2348–2350

Jiang G, Xu X, Chen G, Liu Y, Fukahata Y, Wang H, Yu G, Tan X, Xu C. 2015. Geodetic imaging of potential seismogenic asperities on the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault system, southwest China, with a new 3-D viscoelastic interseismic coupling model. J Geophys Res-Solid Earth, 120: 1855–1873

Lasocki S. 2014. Transformation to equivalent dimensions—A new methodology to study earthquake clustering. Geophys J Int, 197: 1224–1235

Ma J, Rao A, Silva V, Liu K, Wang M. 2021. A township-level exposure model of residential buildings for mainland of China. Nat Hazards, 108: 389–423

Martins L, Silva V. 2020. Development of a fragility and vulnerability model for global seismic risk analyses. Bull Earthq Eng, 19: 6719–6745

Matthews M V, Ellsworth W, Reasenberg P. 2002. A Brownian model for recurrent earthquakes. Bull Seismol Soc Amer, 92: 2233–2250

Monelli D, Pagani M, Weatherill G, Silva V, Crowley H. 2012. The hazard component of OpenQuake: The calculation engine of the Global Earthquake Model. Lisbon: Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering. 1–8

Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, Henshaw P, Butler L, Nastasi M, Panzeri L, Simionato M, Vigano D. 2014. OpenQuake Engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model. Seismol Res Lett, 85: 692–702

Pan Y, Shen W B. 2017. Contemporary crustal movement of southeastern Tibet: Constraints from dense GPS measurements. Sci Rep, 7: 45348

Papadimitriou E, Wen X, Karakostas V, Jin X. 2004. Earthquake triggering along the Xianshuihe fault zone of western Sichuan, China. Pure Appl Geophys, 161: 1683–1707

Ren Z, Lin A. 2010. Deformation characteristics of co-seismic surface ruptures produced by the 1850 *M*7.5 Xichang earthquake on the eastern margin of the Tibetan Plateau. J Asian Earth Sci, 38: 1–13

Schwartz D P, Coppersmith K J. 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones. J Geophys Res, 89: 5681–5698

Shen J, Wang Y, Song F. 2003. Characteristics of the active Xiaojiang fault zone in Yunnan, China: A slip boundary for the southeastward escaping Sichuan-Yunnan Block of the Tibetan Plateau. J Asian Earth Sci, 21: 1085–1096

Sun H, He H, Ikeda Y, Wei Z, Chen C, Xu Y, Shi F, Bi L, Shirahama Y, Okada S, Echigo T. 2019. Paleoearthquake history along the southern segment of the Daliangshan fault zone in the southeastern Tibetan Plateau. Tectonics, 38: 2208–2231

Wang H, Ran Y, Chen L, Li Y. 2017. Paleoearthquakes on the Anninghe and Zemuhe fault along the southeastern margin of the Tibetan Plateau and implications for fault rupture behavior at fault bends on strike-slip faults. Tectonophysics, 721: 167–178

Wang H, Liang M, Gao S, Ran Y, Chen L. 2018. Reevaluation of coseismic surface ruptures produced by the 1850 *M*7.5 Xichang earthquake on the southeastern margin of the Tibetan Plateau and implications for rupture propagation at bends on strike-slip faults. Bull Seismol Soc Amer, 108: 101–115

Wang F, Wang M, Wang Y, Shen Z K. 2015. Earthquake potential of the Sichuan-Yunnan region, western China. J Asian Earth Sci, 107: 232–243

Wells D, Coppersmith K. 1994. New empirical relationships among

magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull Seismol Soc Amer, 84: 974–1002

Wen X, Ma S, Xu X, He Y. 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China. Phys Earth Planet Inter, 168: 16–36

Xin D, Zhang Z. 2021. On the comparison of seismic ground motion simulated by physics-based dynamic rupture and predicted by empirical attenuation equations. Bull Seismol Soc Amer, 111: 2595–2616

Xu X, Deng Q. 1996. Nonlinear characteristics of paleoseismicity in China. J Geophys Res, 101: 6209–6231

Yang H, Liu Y, Lin J. 2012. Effects of subducted seamounts on megathrust earthquake nucleation and rupture propagation. Geophys Res Lett, 39: 2012GL053892

Yao S, Yang H. 2023. Towards ground motion prediction for potential large earthquakes from interseismic locking models. Earth Planet Sci Lett, 601: 117905

Yepes-Estrada C, Silva V, Valcárcel J, Acevedo A B, Tarque N, Hube M A, Coronel G, María H S. 2017. Modeling the residential building inventory in South America for seismic risk assessment. Earthq Spectra, 33: 299–322

Youngs R, Coppersmith K. 1985. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. Bull Seismol Soc Amer, 75: 939–964

Zhang W, Zhang Z, Fu H, Li Z, Chen X. 2019. Importance of spatial resolution in ground motion simulations with 3-D basins: An example using the Tangshan Earthquake. Geophys Res Lett, 46: 11915–11924

Zhang Z, Zhang W, Chen X, Li P, Fu C. 2017. Rupture dynamics and ground motion from potential earthquakes around Taiyuan, China. Bull Seismol Soc Amer, 107: 1201–1212

(责任编委: 郑勇)