

白仙富,杨志全,胡斌,等.区域地震滑坡灾害定量评估研究进展和展望[J].地震工程学报,2023,45(6):1408-1424.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230731003

BAI Xianfu, YANG Zhiqian, HU Bin, et al. Research progress and prospect of the quantitative evaluation of regional earthquake-induced landslide disasters[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(6): 1408-1424. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230731003

综述

区域地震滑坡灾害定量评估研究进展和展望

白仙富¹, 杨志全², 胡斌³, 杨理臣⁴, 戴雨芃⁵, 杨悦¹

(1. 中国地震局昆明地震预报研究所, 云南 昆明 650224; 2. 昆明理工大学应急管理学院, 云南 昆明 650093;
3. 中国地震局成都青藏高原地震研究所, 四川 成都 610095; 4. 青海省地震局, 青海 西宁 810001;
5. 昆明市西山区水务局, 云南 昆明 650118)

摘要: 地震滑坡是最常见的地震次生地质灾害之一, 不仅带来环境恶化, 通常还造成严重的人员伤亡和财产损失, 因此备受关注。为了解地震滑坡研究发展趋势, 凝练地震滑坡定量评估科学问题, 文章对区域地震滑坡定量评估起源、发展现状、存在的问题及未来发展进行了系统总结。研究结果表明: (1) 区域地震滑坡灾害定量评估研究兴起于 20 世纪 80 年代, 经过 50 多年学者的不懈努力, 取得了丰硕的成果。区域地震滑坡灾害定量评估研究面临着新的社会需求。(2) 地震滑坡是地震动力、地质特征和地貌条件等多因素耦合作用的结果, 地震滑坡现象只有考虑成因机理与动力过程方可解释, 地震滑坡成因机理研究主要集中于强震条件下斜坡的动力响应规律分析。(3) 地震滑坡发育特征、成因机理以及数据库建设等基础研究推动了地震滑坡灾害风险定量评估研究。区域地震滑坡灾害风险定量评估包括地震滑坡危险性定量评估、地震滑坡易损性定量评估、地震滑坡危害性定量评估等内容。(4) 在区域地震滑坡灾害定量评估方面, 还需要进一步探索区域地震滑坡灾害形成的系统性和时空分布规律性、改进和完善区域地震滑坡灾害风险定量评估方法、开拓区域地震滑坡灾害防治战略规划。

关键词: 地震滑坡; 定量评估; 风险; 模型

中图分类号: P315.94

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)06-1408-17

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230731003

Research progress and prospect of the quantitative evaluation of regional earthquake-induced landslide disasters

BAI Xianfu¹, YANG Zhiqian², HU Bin³, YANG Lichen⁴, DAI Yuqian⁵, YANG Yue¹

(1. Kunming Institute of Earthquake Prediction, CEA, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

3. Chengdu Institute of the Tibetan Plateau Earthquake Research, CEA, Chengdu 610095, Sichuan, China;

收稿日期: 2023-07-31

基金项目: 地震科技星火计划攻关项目(XH22005C、XH23003C); 云南省重点研发计划(202203AC100003); 云南省 2023 年中青年学术和技术带头人后备人才项目; 中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA2106)

第一作者简介: 白仙富(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事山地灾害防治与环境保育、地震滑坡灾害风险评估基础理论与关键技术研究。E-mail: xf_bai520@163.com。

4. Qinghai Earthquake Agency, Xining 810001, Qinghai, China;

5. Water Resources Bureau of Xishan District of Kunming City, Kunming 650118, Yunnan, China)

Abstract: Earthquake-induced landslides are one of the most common secondary geological hazards, and they not only deteriorate the environment but also result in severe casualties and property losses. Therefore, researchers have long been paying attention to this issue. To understand the development trend of studies on seismic landslides and refine scientific issues related to the quantitative evaluation of seismic landslides, this paper systematically summarizes the quantitative evaluation of regional landslides, including their origin, current state of development, existing problems, and prospects. The research findings indicate that (1) studies on quantitative evaluation of regional landslides emerged in the 1980s, and scholars have attained fruitful achievements after more than 50 years of unremitting efforts. To date, new social demands must be met by the quantitative evaluation of regional earthquake landslides. (2) Seismic landslide results from the coupling effect of multiple factors, including dynamics, geological characteristics, and geomorphic conditions. Seismic landslides can only be explained when the causes and dynamic processes are considered. Research on the causes and mechanisms of seismic landslides mainly focuses on the analysis of the dynamic response law of slopes under strong earthquakes. (3) Fundamental studies on development characteristics, causes and mechanisms, and database construction of seismic landslides have promoted research on the quantitative risk evaluation of landslide disasters, which includes the quantitative assessment of the hazard, vulnerability, and harm of seismic landslides. (4) In the quantitative evaluation of regional landslide disasters, it is necessary to further explore the systematic formation and spatiotemporal distribution patterns of regional landslides, improve and refine the methods for quantitative evaluation of regional landslide risks, and explore the strategies and plans for regional landslide disaster prevention and control.

Keywords: earthquake-induced landslide; quantitative evaluation; risk; model

0 引言

地震是触发滑坡的一种重要因素。在高山峡谷地区,一次强烈地震能在一瞬间诱发大量滑坡。地震滑坡的破坏作用主要表现为:危害人类生命健康,造成不同程度的人员伤亡;毁坏房屋、道路等工程设施,造成不同程度的财产损失;破坏耕地和地下水等资源,造成不同程度的环境恶化。个别情况下,地震滑坡带来的损失甚至大于地震直接作用的影响。因此,地震滑坡灾害定量评估研究一直是地学界关注的研究热点之一^[1]。地震滑坡灾害定量评估研究兴起于 20 世纪 80 年代,经过约半个世纪的不懈努力,特别是近 15 年来的迅猛发展,取得了丰硕成果。系统总结发展成就,概括当前研究趋势,能为研判地震滑坡灾害定量评估科技发展大势、凝练地震滑坡灾害定量评估重要科研问题提供参考。

1 区域地震滑坡灾害定量评估研究的兴起和当前的重大社会需求

在 1958 年到 1977 年的 20 年间,《United

States Earthquakes》杂志刊登了 300 个地震事件的破坏情况。Keefer^[2]提取了这些事件的震级、震中距、烈度与地震滑坡等信息,于 1984 年发表了关于地震滑坡和地震参数关系研究的论文——《Landslides caused by earthquakes》,由此开创了区域地震滑坡灾害定量评估研究的新纪元。Keefer 的另一重要成就是和 Wilson 共同建立了第一个震级与滑坡分布范围的对数统计模型^[3]。这一模型成为后继开展地震滑坡与地震参数内在关系建模研究的发轫,对希腊^[4]、意大利^[5]、中国^[6]乃至全球的震级和地震滑坡到震中最近距离、烈度与地震滑坡数量、地震滑坡的类型和最大密度等方面的进一步研究取得了基本的共识:地震滑坡分布的空间不均匀性和地震参数的横向不均一性存在着高度相关关系。虽受到统计样本和其他条件的影响使得上述研究结果的曲线拟合差距较大,但依然为区域地震滑坡灾害定量评估研究方法和理论的建立提供了有力的地震学支撑。

实质上,地震诱发滑坡及其数量、面积、规模、分

布、类型等不仅取决于地震本身的影响,而且与发震地区的地形、地貌和地质环境密切相关。正断型地震、逆冲型地震、走滑型地震及其他类型地震的动力、断层两侧作用方式以及相应的结构、介质各不相同,加上地震发生地区地形起伏度、沟谷密度、坡度坡形等各不相同^[7],区域地震滑坡灾害环境也不相同。随着世界标准地震台网(World Wide Standard Seismic Network, WWSSN)的建立和数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、遥感(Remote Sensing, RS)、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)等技术的发展和广泛应用,评估不同区域地震滑坡灾害的影响参数标度有了较为统一且更高精度的参照。若干个地震滑坡事件的研究有助于揭示地震滑坡空间分布、强度与地震参数及场地条件之间的内在规律,为地震滑坡的区域性特征和影响因子认识积累了实践、方法和理论基础。

当前,区域地震滑坡灾害定量评估研究面临新的重大社会需求。从国际环境状况看,尼泊尔廓尔喀地震、印度尼西亚帕鲁地震、日本北海道地震等事件诱发的滑坡越来越成为影响公共安全与社会发展的突出问题。从国内看,新时期要推进持久和平、普遍安全、共同繁荣、开放包容、清洁美丽的乡村振兴,需要知道哪些山区不适宜人类居住,哪些山地环境需要修复和保育。那些山高坡陡且地震活动较强的地区,其社会经济发展规划应该和地震滑坡灾害防治紧密结合,以减轻地震滑坡灾害风险和减少地震滑坡灾害损失。

在减轻灾害风险方面,区域地震滑坡灾害定量评估研究能为自然灾害隐患调查和风险评估重大项目实施提供更好的技术支持。从全国自然灾害风险普查工作的实践看,单纯的地震或地质灾害风险普查通常难以厘清地震滑坡灾害风险底数。以2014年鲁甸地震为例,震前地质调查确定的滑坡隐患点不到实际地震滑坡的30%。2021年漾濞地震也表明地震滑坡几乎都不是震前调查圈定的滑坡隐患点。可见,要切实查清区域地震滑坡灾害风险隐患底数、准确评估区域地震滑坡风险防范能力、综合提高区域自然灾害风险管理水平、保障区域经济社会可持续发展,除了传统的野外调查,还要研究地震滑坡灾害定量评估的新理论、新手段和新方法。

如何提升地震灾害损失快速评估的准确性是一个持续引人关注的课题^[8]。应急管理部对震后早期应急阶段人员死亡数量评估的准确性提出误差不能超过50%的新要求。科学评估地震滑坡可能造成

的人员伤亡是提高地震人员伤亡评估的准确性,进而完善地震灾害损失评估体系的关键科学问题之一,同时也是一直困扰地震灾害风险评估和震后高精度快速评估的技术难题之一。在大地震风险山区,应加强地震滑坡造成的死亡人数和道路可通行性快速评估方法等研究,使地震应急辅助决策评估方法更科学、模型更完整、结果更可靠、效果更显著^[9]。

2 区域地震滑坡灾害定量评估相关基础研究

区域地震滑坡灾害定量评估研究进展包括地震滑坡相关概念、发生机理等基础理论问题。

2.1 基本定义

滑坡是一种地质灾害,地震滑坡是滑坡的一种类型,通常定义为由于地震作用或者地震力触发的土石体向下滑动的自然灾害现象^[10],在地震灾害研究中通常将地震滑坡归属为地震次生地质灾害。地质灾害评估的基本概念一般包括四个层面:易发性(Susceptibility)、危险性(Hazard)、易损性(Vulnerability)和风险性(Risk)^[11]。地震次生地质灾害评估的基本概念在表述上与地质灾害评估研究稍有不同,但也有四个方面^[12]:危险性(Susceptibility/Hazard)、易损性(Vulnerability)、危害性(impact)和风险性(Risk)。作为地震次生地质灾害的一种,地震滑坡灾害评估基本概念的体系应尽量与地震地质灾害评估保持一致。即地震滑坡灾害评估研究也应包括四个层面:地震滑坡危险性、地震滑坡易损性、地震滑坡危害性和地震滑坡风险性。地震滑坡危险性指地震滑坡发生可能性或规模大小,是反映地震滑坡物理现象的活动程度和破坏力^[13],通常采用地震滑坡发生概率或易发性指数来定义滑坡危险性大小。一般来说地震滑坡概率/易发性指数越高的地点发生滑坡的可能性越大,反之则发生滑坡的可能性越小。类比地震次生地质灾害评估的基本概念,地震滑坡受灾体易损性是指各种受灾体对潜在地震滑坡的抗御能力及可能破坏程度,反映人类社会应对地震滑坡灾害的能力;地震滑坡危害性是指可能发生的地震滑坡对人类生命财产和土地资源等造成的破坏和损失程度,反映地震滑坡自然属性和社会属性的耦合;地震滑坡风险性通常指未来地震滑坡灾害可能带来的损失程度,反映未来地震滑坡对人类社会影响的可能后果。

2.2 区域历史地震滑坡数据库建设

区域历史地震滑坡数据库建设始于地震滑坡灾

害记录。国外最早对地震滑坡有文字记载的应该是公元前 372 年的希腊地震^[3],最早对地震诱发地质灾害进行系统科学描述的是 1783 年的意大利地震,而第一次对地震滑坡进行简单调查编目的是 1957 年的美国加利福尼亚地震^[14]。之后《United States Earthquakes》逐步刊登了一些震例,其中包含有地震滑坡信息。20 世纪 80 年代以来,空间信息技术的发展使大范围高精度的地震滑坡灾害调查编目成为可能。Harp 等首次对 1976 年危地马拉 M7.5 地震诱发的滑坡进行了大范围的遥感解译编目^[15]。近 30 年来,国际上对 1989 年美国加州洛马·普雷塔 M6.9 地震^[16]、1991 年格鲁吉亚拉恰 M7.0 地震^[17]、1999 年中国台湾集集 M7.5 地震^[18]、2004 年日本新潟县中越 M6.6 地震^[19]、2005 年克什米尔 M7.6 地震^[20]、2015 年尼泊尔廓尔喀 M7.8 地震^[21]和 2018 日本北海道 M6.6 地震^[22]等重大地震诱发的滑坡都进行了详细的调查编目,建立了这些历史地震的滑坡空间数据库。

我国是世界上地震滑坡比较严重的国家之一,有文字记录的地震滑坡可追溯到公元前 780 年 10 月西安一带的地震事件,地震滑坡基础数据库建设起步也较早,走在世界发展的前列。高庆华等老一辈科学家通过对历史地震资料的整理,系统汇集了我 国历史地震地质灾害基础数据库^[23]。这套数据库覆盖我国整个国土空间,时间尺度从公元前 8 世纪到 20 世纪末。由于受当时科学技术和理念的限制,该套数据库主要是一套属性数据,空间信息相对粗犷。1996 年丽江 M7.0 地震后,唐川等^[24]开展了基于现场调查和遥感影像结合的地震滑坡信息提取。随着空间信息技术的进一步发展,大量高精度遥感影像的获取和解译变得更加便捷。从 2008 年汶川地震开始,几乎每一次地震事件的滑坡都有学者开展编目入库工作。除了对近 15 年来的地震滑坡有遥感解译编目外,1920 年海原 M8.5 地震^[25]、1970 年通海 M7.7 地震^[26]等一些早期的历史地震滑坡空间信息也得到了更为详细的补充,进一步丰富了历史地震滑坡数据库。仍需注意的是,高精遥感解译并不能完全取代现场调查工作,现场调查仍然是地震滑坡数据库建设的重要基础工作。从区域的角度看,对一个地区地震滑坡灾害定量评估研究除了进行单次地震滑坡的详细编目外,更需要一个覆盖较长时间尺度的地震滑坡空间数据库,以实现从减少地震滑坡灾害损失向减轻地震滑坡灾害风险转变的跨越和促进地震滑坡灾害评估规范的形成。

为此,白仙富^[27]基于多源异构的信息资料,建立了滇东北地区从公元前 26 年至今的历史地震滑坡灾害空间数据库,并评述了滇东北地区地震滑坡记录的完整性。显然,空间信息技术的进步和多源遥感影像信息获取的快捷,必然促进将来地震滑坡编目的高质量发展。但是针对特定区域,在长时间尺度上基于多源异构信息的地震滑坡空间数据库建设仍然有许多技术困难需要攻克。

2.3 区域地震滑坡发育特征与分布规律

地震滑坡是地震动力、地质特征和地貌条件等多因素耦合作用的结果。区域地震滑坡灾害定量评估从地震滑坡发育特征和分布规律的探究开始。

目前,国内外关于地震滑坡的发育特征和分布规律同地震参数(震级、烈度、震源深度、震中距等)之间的关系研究主要从统计学角度对历史事件进行分析。Keefer 提取 1958—1977 年间 300 个历史地震的震级、震中距、烈度、地震滑坡等信息,发现震级小于 M4.0 的 62 例事件中只有一个触发了滑坡^[2],其后给出了震级与滑坡分布范围公式^[3]。Rodríguez 等^[28]在 Keefer 的基础上,进一步补充统计了 1980—1997 年全球地震滑坡的情况,运用类似的方法分析了地震滑坡的类型、数量、主要分布范围和最大密度。Papadopoulos 等^[4]根据公元 1000—1995 年间希腊 47 次 M5.3~7.9 的地震滑坡统计结果,提出了震级与滑坡到震中最近距离的经验公式。Prestininzi 等^[5]对公元 1992 年前意大利的历史地震资料进行类似统计,探讨了烈度与地震滑坡的数量关系,并给出了两者的图形关系。李天池^[29]则根据我国地质地貌特征的区域性,把研究资料划分成南北片区,分别对两片区的数据进行回归计算,得出了单个地震Ⅶ度以上烈度区滑坡面积与震级的近似关系。康来迅^[30]也指出地震滑坡的规模和数量与地震烈度分布之间存在密切关系。周本刚等^[31]对西南地区 1970 年以来 M6.7 以上的 11 次典型地震进行统计分析后认为,一般在Ⅵ度区内极少存在产生新滑坡的现象。孙崇绍等^[6]对我国 1500—1949 年间 $M > 4\frac{3}{4}$ 的地震资料进行了统计,发现地震引起的滑坡多在Ⅵ度及以上烈度区,Ⅶ度及以上的震区内滑坡的数量显著增大,Ⅷ度以上发生的可能性急剧增大,而其中规模特大、破坏特重的滑坡都发生在Ⅸ度及以上的地区。地震滑坡是黄土分布区的主要震害之一,它的空间分布和危害程度与地震活动强度的关系尤为密切但又与其他地区有明显差别。才树华等^[32]以 80 个震例为样本,初步建立了震级

($M5.5 \sim 8.0$)与黄土地震滑坡最大致灾距的指数关系。即使同属黄土地区,六盘山东西两侧地震滑坡集中区和最大散布区也存在差异。辛鸿博等^[33]通过对典型强震活动中VI度及以上烈度区内的滑坡面积进行计算后发现地震滑坡的面积随着震级的增大而增大,地震滑坡的最大面积与震级之间存在着规律关系,但单个滑坡面积和震级不一一对应。这些研究都表明区域地震滑坡发育的共同性:触发滑坡有一个最低震级或最低烈度,滑坡空间分布与地震参数之间存在规律性关系,但滑坡发育和分布特征与地震参数之间的关系会因地区不同而有差异。

地震滑坡的发育特征同斜坡环境参数(坡度、坡向、岩石类型等)之间的关系研究多是针对单次地震滑坡事件。地震滑坡与边坡环境的关系主要取决于两个方面:边坡的地质特征和地貌条件^[34]。在具体研究中,有的学者侧重某一方面,有些学者则二者同时兼顾。Keefer^[16]采用单因素方差回归分析研究了1989年加州M6.9地震滑坡与坡度、岩性等环境参数关系。Parise等^[35]总结了美国北岭地区地震滑坡的区域特征和该地区地震滑坡与坡度、岩性等影响因素之间的关系。Liao等^[36]统计了集集M7.5地震滑坡与发震断裂、河流/公路的距离、与地层岩性、坡度、坡向之间的关系,发现发震断层上盘的滑坡优势坡向为S和SE向,而下盘的滑坡优势坡向为S、SE和SW向。2004年日本新泻M6.6地震后,Chigira等^[19]指出古滑坡复活和切坡是地震诱发深层滑坡的最主要因素。Sato等^[7]对2005年克什米尔M7.6地震地质灾害研究发现该次地震大型滑坡的主要坡形为凸坡,优势坡向为S和SW向。Owen等^[34]也对克什米尔地震地质灾害进行了研究,印证了地震滑坡灾害的分布受到斜坡环境的地层岩性、坡体结构、地形地貌和人类活动控制的观点。汶川M8.0地震之前,国内单次地震滑坡发育特征与斜坡环境关系的研究主要针对一些特定区域开展。如康来迅^[30]研究了昌马断裂带上的地震滑坡分布特征同斜坡环境参数关系,统计得出昌马断裂带的地震滑坡主要发生在坡度为 $30^\circ \sim 50^\circ$ 和地形高差为100~300 m的斜坡部位。周本刚等^[31]归纳了云南和川西地区典型强震活动诱发滑坡的斜坡环境特征,认为该地区滑坡多发生于第四系堆积层中,其中又以残积层最为发育,且其最容易触发滑坡的坡度为 $35^\circ \sim 45^\circ$,滑坡分布在很大程度上受地震断层的控制,其整体分布主方向和地震断层的方向大致相同。对黄土地区海原地震滑坡的研究发现,

长度为200 m左右的斜坡上当烈度达到X度时,坡度在 3° 以上即可发生滑坡^[37],说明坡长、岩性都对地震滑坡有影响。1996年丽江M7.0地震滑坡造成VIII度及以上烈度区范围内大量公路中断。唐川等^[24]发现,此次地震滑坡主要集中在震中东南部,地形是控制滑坡分布的主导因素,滑坡多发生在坡度超过 60° 斜坡中上部和 $25^\circ \sim 45^\circ$ 的中缓斜坡上。汶川地震后,国内地震滑坡的研究迅猛发展,围绕汶川地震滑坡发育特征和分布规律开展了大量分析研究工作。黄润秋等^[38]对汶川地震滑坡灾害的空间分布规律进行了统计分析,得出了汶川地震滑坡灾害具有沿地震发震断裂呈带状和沿水系呈线状分布以及断层上盘效应显著的认识。汶川地震后,不同学者对2010年青海M7.1地震^[39]、2013年芦山M7.0地震^[40]、2017年九寨沟M7.0地震^[41]等地震滑坡发育特征和空间分布同斜坡环境关系都开展详细统计分析。近年来,国内学者的研究视角不断扩展到国外。在2015年尼泊尔M8.1地震^[42]、2018年日本北海道M6.6地震^[43]等地震滑坡发育特征和空间分布规律的研究上都取得了卓有成效的进展。这些单次地震滑坡案例的研究都表明,地震滑坡发育特征和空间分布规律同斜坡环境参数之间关系密切。由于滑坡本质上属于重力地貌,因此岩性、坡向等影响因子必然通过坡度才能发挥作用。同时,地震滑坡发生是多种因素共同作用的结果,个案分析得到的规律未必能完全外推到其他区域,比如滑坡分布的优势坡向通常会因地震发生地点不同而存在较大变化。

2.4 区域地震滑坡机理及动力学

对区域地震滑坡发育特征和分布规律取得了丰富的认识,但当面对类似汶川地震触发的许多巨型、高速、远程等滑坡现象时只有考虑成因机理与动力过程方可解释。对地震滑坡成因机理的研究,主要集中于强震条件下斜坡的动力响应规律分析。

1971年Davis等美国地质学家在对圣费尔南多地震的余震监测中首次发现了斜坡坡顶的地震动峰值加速度具有明显放大效应^[44]。Geli等^[45]在对地形放大效应进行统计分析的过程中发现,地形放大效应发生在入射波长与地形的坡宽近似相等的坡顶,P波的放大效应比S波大,另外地形放大效应随入射角度的增大而减小,随坡度的增加而增大,但地形放大效应与山脊方位角之间的规律还不明显。Hartzell等^[46]研究了1989年洛马—普雷塔地震对罗宾伍德山脊的破坏,认为该山脊破坏程度较大的

主要因素有三方面:山脊内体波的多向反射及散射、瑞利波与雷夫波的复杂作用、主震源的方向性及波的扩散状态。还有学者基于地震液化来研究强震滑坡的失稳机理,Hutchinson^[47]基于现场滑坡模拟试验以及室内试验,提出了“结构破坏”致使“孔压上升”从而导致土质发生液化形成滑坡的认识。Aoi等^[48]在岩手—宫城地震中发现了强地面垂直加速度现象,提出了垂直强震动现象的“蹦床”模型,即用运动员蹦床的过程来解释地震诱发的强地面垂直加速度不对称现象。刘洪兵等^[44]提出了与 Hartzell等^[46]相同的认识。在黄土地区,低角度黄土-泥岩滑坡在地震荷载作用下地震波水平方向和垂直方向均出现明显的放大效应^[49],这从机理上解释了低坡度黄土斜坡遭遇高烈度袭击时发生滑坡的原因。周维垣^[50]指出,地震动荷载对岩质边坡稳定性的影响主要表现在地震波通过岩层面及岩体结构面时发生的反射及折射作用导致的超压增大以及地震荷载与其他因素对斜坡体的共同破坏。胡广韬^[51]认为斜坡在动力作用下的变形和失稳机制存在一定的差异,并于 1995 年提出了边坡动力失稳机制的坡体波动振荡加速效应假说,其编写的《滑坡动力学》是我国第一部系统阐述滑坡动力机理的专著。张倬元^[52]认为地震对边坡稳定性的影响表现为累积效应和触发效应。毛彦龙等^[53]认为地震时的坡体波动振荡在斜坡岩土体变形破坏过程中逐步产生累进破坏效应、启动效应和启程加速效应。根据这个结论,并不是任何强度地震动都会引起岩土体的破坏,低于某一强度的地震动只有在反复作用下才可能引起滑坡。唐春安等^[54]认为,运用应力波在自由面的人、反射原理和加速度倍增效应,更能从力学的层面解释强震动地表加速现象。对于汶川地震触发的大型高速远程滑坡体的形成机制,殷跃平^[55]认为其具有“地震抛掷”-“撞击崩裂”-“高速滑流”3 阶段。黄润秋等^[56]系统研究了汶川地震边坡动力响应规律,认为强震时大型滑坡失稳破坏最基本的破坏模式可用“拉裂-滑移”来概括。由于地震滑坡机理的复杂性^[12],对地震滑坡动力响应及其运动模式还存在许多未知之处,区域范围内地震滑坡空间分布的预测仍然十分困难。

3 区域地震滑坡灾害风险定量评估

地震滑坡基础研究推动了区域地震滑坡灾害风险定量评估,20 世纪 60 年代末 70 年代初,国际社会开始进行滑坡灾害危险性评估和区划研究,区域

地震滑坡灾害风险评估研究也随之登上历史舞台。到 20 世纪 80 年代中期至 90 年代中期的 10 年时间里,区域地震滑坡灾害风险定量评估研究正式兴起^[57]。21 世纪伊始,特别是 2005 年克什米尔 M7.8 地震和 2008 汶川 M8.0 地震之后,地震滑坡灾害风险定量评估研究迅速跨入全新的高速发展阶段。区域地震滑坡灾害风险定量评估包括地震滑坡危险性定量评估、地震滑坡易损性定量评估、地震滑坡危害性定量评估以及地震滑坡风险性定量评估。

3.1 区域地震滑坡危险性定量评估

区域地震滑坡危险性评估研究包括两个层面:一是区域内各地点发生地震滑坡的可能性研究,国内相关的名词有地震滑坡易发性、地震滑坡敏感性等,使用的英语单词一般为 Susceptibility,偶尔有人使用 Hazard,反映的都是地震滑坡的自然属性;二是在危险性定量评估的基础上进行区域地震滑坡危险性等级划分或区划研究。

3.1.1 区域地震滑坡易发性/敏感性定量评估

区域地震滑坡易发性/敏感性定量评估通常是将研究区划分为相同大小的网格(即像元),评估结果为各网格的地震滑坡概率、密度或滑动距离等。

早期的地震滑坡易发性/敏感性定量研究方法主要继承于气象滑坡敏感性评估研究,使用的方法总体上可分为三大类:拟静力法、有限元滑动位移法和物理模拟法。拟静力法简单实用,Terzaghi 首次将这种分析方法应用于斜坡稳定性评估^[58];丁彦慧等^[59]对这种方法进行了改进,并用于丽江 7.0 级地震滑坡检验。该方法在一些区域地震滑坡的稳定性分析中仍在使用。为了更准确地评估滑坡发生位置,Newmark^[60]提出了用有限元滑动位移代替拟静力法的思路,他认为滑坡位移量达到某个临界值后,边坡便可能失稳,该方法后来用于小范围的地震滑坡危险性评估。1971 年,Cundall^[61]提出离散有限元法;1988 年 Ambrasys 等^[62]基于对 11 次地震的 50 个强震记录数据进行研究,提出把临界加速度比作为回归方程的变量来估算地震时边坡的永久位移。至此,区域地震滑坡位移模型开始与气象型滑坡预测模型有明显差别。Jibson^[63]建议使用阿里亚斯(Arias)强度来描述强震滑坡特性,但由于岩土工程问题具有多样性和复杂性,一般很难求得严密的解析解。为此,黄润秋^[64]进一步提出二维地质过程模拟体系;刘忠玉等^[65]假定滑坡体运动形式连续可变且滑动过程伴随变形能量积累和释放,建立了高速滑坡远程预测的二维块体运动模型;崔芳鹏等^[66]

利用二维离散元方法模拟了纵横波时差耦合作用下的唐家山滑坡过程;曹琰波等^[67]也采用离散元方法对唐家山滑坡进行模拟,提出了唐家山滑坡的运动模式。这类基于地震参数的位移判别法经过多次改进后预测结果较为准确,缺点是模型需要的参数多而细,导致勘察、实验和计算处理的时间较长,应用在一些小范围的滑坡体精细预测上较为合适,对于大范围的地震滑坡易发性评估则存在着时间、人力等成本问题。若要进一步从机理角度评估区域地震滑坡的易发性,最好能建立基于物理模拟的方法。物理模拟方法就是借助设备进行地震滑坡发生条件的模拟实验,其理论基础主要是相似性理论和量纲分析法,可使用的方法包括离心实验法、模型试验法和光测弹性法等。代表性工作有王兰民等^[68]为获取不同地震荷载作用下黄土斜坡动力参数以及黄土滑坡稳定性进行的现场黄土爆破试验。

20世纪90年代中后期,空间信息技术的迅猛发展对地质灾害风险评估方法和技术的进步带来重要影响,特别是GIS技术的发展和普及对地震滑坡易发性评估带来了革命性的推动作用。空间信息技术为地震滑坡环境信息的提取提供了便捷,由此建立了高精度历史地震滑坡空间数据库。空间信息技术还为地震滑坡易发性研究奠定了强大的空间数据基础,基于空间数据,一系列新的定量评估方法得以发展。区域地震滑坡定量评估结果的直观可视化表达也得益于空间信息技术的促进。21世纪以来,特别是几次重大地震事件之后发展起来的地震滑坡易发性定量评估方法基本都以GIS技术和RS技术为基础。这些新的方法除了改进的拟静力法、有限元法等,更主要的是二元统计^[69]、多元回归(主要以逻辑模型为代表)^[70]以及机器学习^[71]这三个大类。新方法在具体的区域地震滑坡易发性评估中,技术层面上开始从一种方法的使用逐步发展为基于几种方法的结合以提高结果的准确性;内容属性上开始从单个地震案例分析反演逐步注重对区域未来状况的预测。

新方法的发展使得区域地震滑坡易发性评估结果的定量化程度越来越高,并呈现出从纯定量向新的定量与定性相结合的趋势。为提高结果准确性,在评估方法上除了发展新的模型外还开始了多种模型的结合应用。空间信息新技术的进步促进区域地震滑坡易发性定量评估方法的发展,新方法离不开新技术的支持。与此同时,区域地震滑坡易发性评估研究有两个方面需要重视:评估模型参数出现越

来越复杂的现象;理念上,强化了地震滑坡的易发性而对“安全岛”的重要性重视不足。

3.1.2 区域地震滑坡危险性区划

区域地震滑坡危险性区划/分区一般在易发性定量评估的基础之上开展,其研究内容主要包括三方面:基于地域单元的经典型地震滑坡危险性区划/分区;基于单次地震的灾区反演型地震滑坡危险性区划/分区;基于地震危险性的预测型地震滑坡危险性区划/分区。区域地震滑坡危险性区划和易发性评估不同之处主要有两方面:一是评估结果通常是地震滑坡危险性等级,二是评估对象的空间形式更加多样,可以是基于像元、行政单元、自然单元等空间的地震滑坡危险性分区。

基于地域单元的地震滑坡危险性区划研究主要从20世纪末开始。1998年,Pachauri等^[72]在喜马拉雅山区使用GIS进行包括地震活动因子在内的滑坡区划。随后,Uromeihy等^[73]利用栅格数据,对伊朗Khorshrostan地区的地震滑坡危险性进行区划。2001年,唐川等^[74]在ARC/INFO支持下,对区域地震滑坡影响因子图层进行权重赋值后叠加计算,编制了云南省地震滑坡危险性等级分布图,开创了国内基于GIS技术的地震滑坡危险性区划研究。高庆华等^[12]基于历史资料,利用GIS进行了我国大陆地区包括地震滑坡在内的地震地质灾害危险性等级区划。GIS成为区域地震滑坡危险性区划的基本工具,在开展地震滑坡危险性区划时不管底层使用什么模型进行危险等级计算,在成果表现上都难以离开GIS技术的支持。

针对地域单元的地震滑坡危险性区划发展的同时,单次地震灾区地震滑坡危险性分区研究也逐步开展。集集地震之后,Lin等^[75]利用此次地震的次生地质灾害报告和一些学者的研究成果,绘制了地震灾区地震滑坡危险性区划图,掀开了以单次地震滑坡事件进行灾区地震滑坡危险性区划的新篇章。汶川地震后,对单次地震灾区进行地震滑坡危险性反演型区划的研究如雨后春笋般涌现,发展了大量的定量评估方法。基于单次震例开展的地震滑坡危险性区划研究主要是根据灾区的地震滑坡分布信息,提取滑坡点的岩性、坡度、高程、距离断层或水系的距离等影响参数,然后采用回归分析法^[76]、层次分析法^[77]、确定性系数法^[78]、模糊数学法^[79]及神经网络法^[80]等方法对地震滑坡和这些影响因子关系进行建模,再用所建模型反演地震灾区的地震滑坡危险性。

个体案例的地震滑坡危险性区划研究推动设定条件或不同地震发生概率下地震滑坡危险性区划发展。对不同地震动参数、不同时段或不同地震发生概率下的预测型地震滑坡危险性区划也成为了区域发展的需求内容之一。高庆华等^[12]以地市(州、地区、盟)为评估单元,将我国地震地质(含地震滑坡)灾害的危险性分为五个类型区:无资料区、无次生灾害区、轻度分布区、中度分布区、重度分布区。类似的是综合地震动时空分布进行特定范围的地震滑坡危险性区划,用低危险、较低危险、较高危险和高危险来表示未来区域遭遇某一超越概率水平的地震动作用下地震滑坡发生的可能程度^[81]。为了满足地震应急评估和年度地震重点危险区地震灾害预测等需求,白仙富等^[82]以汶川地震滑坡数据为样本,建立坡度分级条件下地震滑坡密度(单位面积内的滑坡数量)与烈度、岩性等影响因子之间的回归模型,并据此产出了我国大陆地区遭遇不同烈度下 90 m 栅格的地震滑坡危险性等级预测数据集。该数据集通过国家地震社会服务工程在各省局的地震应急指挥中心推广使用,模型和预测产品数据在使用中持续改进和更新。随着大中城市地震灾害情景构建研究的推进,林高聪等^[83]开展了黄土地区基于历史地震重现时当地地震动衰减特征下的地震滑坡危险性评估,其成果可以构建震级重复场景下的滑坡情景,也能为当地管理部门制定减灾策略提供信息服务。在考虑地震动影响作用下的地震滑坡危险性区划中,和烈度相近的影响因子是地震动峰值加速度,由此,王涛等^[23]进一步发展了考虑地震超越概率下的区域地震滑坡危险性区划方法。

区域地震滑坡危险性区划/分区量化程度的提高离不开地震滑坡灾害数据获取技术的进步和评估方法的发展。多数地震滑坡危险性研究的反演效果一般都较好,但产出预测产品的不多,推广应用到生产实践中的更少。部分地震滑坡危险性定量评估模型过于复杂,其应用到实际工作中不利于参数收集和结果计算。在区域地震滑坡危险性大小的等级划分上缺乏统一参照,对“安全岛”在区划/分区中的重要性 and 实用性认识不足。

3.2 区域地震滑坡受灾体易损性定量评估

地震滑坡能否发生以及灾害程度如何,除了取决于自然条件外,还与社会经济条件密切相关。社会经济条件对区域地震滑坡灾害的影响,除了人类社会经济活动可以促进或削弱地震滑坡灾害活动外,主要是作为受灾体、受灾机会的多少和承受灾害

能力的强弱直接影响区域地震滑坡灾害的破坏和损失程度。通常情况下,受灾体的数量越多、密度越大受灾机会越多,即易损性(或易灾性)越高、灾害损失越严重。在区域地震滑坡灾害定量评估研究中,受灾体易损性定量评估研究发展缓慢,相关的文献报道亦凤毛麟角。

3.2.1 区域地震滑坡受灾体易损性要素及其分级

易损性是指受灾对象的类型、数量、价值及其对灾害的抗御能力。地震滑坡灾害的受灾对象主要包括人口、工程设施、耕地三类,因此受灾易损性亦相应分为人口易损性、工程设施易损性(简称工程易损性)和耕地易损性。

人口易损性是指评估区内人口遭遇地震滑坡灾害时可能发生的死亡、失踪、伤残程度。不同地区人口易损性的高低除了与人口结构和防灾工程有关外,主要取决于人口数量和人口密度。人口数量越多、密度越高,发生人员伤亡的可能性越大,人口易损性越高。因此,根据中国大陆人口平均密度,通常将人口易损性分为高(>300 人/ km^2)、中($10\sim300$ 人/ km^2)、低(<10 人/ km^2)三个等级,并分别赋予 10、5、1 的标度分值。

工程易损性是指评估区内各种工程设施遭遇地震滑坡灾害时可能发生的破坏损毁程度。不同地区工程易损性除了与工程设施类型、结构等有关外,主要取决于工程设施的数量和密度。工程设施越多、密度越大,遭受地震滑坡灾害破坏的可能性越大,工程易损性越高。因此,根据不同地区房屋等工程设施分布情况,通常将工程易损性分为高(城市及重要交通干线沿线,工程设施密集而且有不少重要工程设施)、中(村镇和人口密集的平原、盆地及交通干线沿线,工程设施比较密集)、低(村镇和人口比较稀少的山地、高原、荒漠、草原,工程设施稀少)三个等级,并分别赋予 10、5、1 的标度分值。

耕地易损性指的是评估区内发生地震滑坡灾害时,耕地被淤埋、塌陷等破坏的可能。不同地区耕地易损性的高低主要取决于耕地数量和耕地密度(耕地面积占土地面积的百分比)。耕地数量越多、密度越大,遭受破坏的机会越多,易损性越高。因此,根据不同地区耕地密度将耕地易损性分为高($>50\%$)、中($10\%\sim50\%$)、低($<10\%$)三个等级,并分别赋予 10、5、1 的标度分值。

综合易损性是指评估区域地震滑坡人口易损性、工程易损性、耕地易损性的综合程度。由于不同易损性对综合易损性的影响程度不同,所以在计算

综合易损性时需考虑各自的权重,人口易损性权值为0.5、工程易损性权值为0.3、耕地易损性权值为0.2。在获得上述资料和相应指标后,即可计算出区域评价单元的地震滑坡综合易损性指数。为了更清晰地反映不同地区易损性变化与差异,根据综合易损性指数将综合易损性也分为高(5~10)、中(2~5)、低(<2)三个等级。

3.2.2 我国地震滑坡受灾体易损性分布

中国地震滑坡灾害易损性的区域差异明显,其基本特征是西部内陆地区低,东部沿海地区高。高度易损区主要分布在华北平原、长江中下游平原和杭嘉湖平原地区。中度易损区主要分布在中国东部地区。低度易损区主要分布在中国西部和北部的内蒙古地区。

3.3 区域地震滑坡危害性和风险性定量评估

3.3.1 区域地震滑坡危害性定量评估

理论上,地震滑坡危害性=地震滑坡危险性×地震滑坡易损性。在传统的区域地震滑坡危害性评估中,通常用危害性指数表达危害性程度(危害性指数=危险性指数×易损性指数),并根据其指数值进行危害性等级划分。国际上大多使用这种方法,国内高庆华等^[12]、白仙富等^[84]也使用过类似方法进行过区域地震滑坡危害性评估,评估结果总体上反映了我国的地震滑坡危害性差异,对宏观尺度的国土规划整治和应急救援能力建设投入有重要指导作用。2016年芦山地震后,丁明涛等^[85]首先提取研究区的人口密度、经济密度、道路密度、林地覆盖率、建筑覆盖率和滑坡灾害影响区6个指标因子来构建地震灾区滑坡灾害危害性评估指标体系;然后,分别应用信息量模型和贡献权重叠加模型,进行了芦山地震灾区滑坡的危害性评估。这些评估方法本质上还是半定量化的方式,与实质的定量评估还有一些差别。

近年来,对地震滑坡死亡人数、地震滑坡道路中断风险、地震滑坡-堰塞湖灾害链风险河段等内容的评估方法得到了进一步探索。其中,地震滑坡死亡人数评估是人们最关注的内容。Budimir等^[86]采用多元统计方法对地震死亡人数与地震震级、国内生产总值、坡度、贫困程度、健康状况、城市交通系统、人口暴露程度、建筑质量以及是否引发滑坡进行回归分析。结果表明,地震是否触发滑坡对死亡人数有显著影响。于是,Nowicki等^[87]基于最大地震动加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)与地形坡度、地表地质、高分辨率土地覆盖数据和降水等参

数,建立了一个滑坡概率经验模型,在此基础上提供了地震滑坡可能造成死亡人数的数量级估计数。Zhang等^[88]选取沉积层厚度、建筑物震害、人员疏散和抵抗能力等4类关键因素,基于贝叶斯网络预测方法提出了一种地震滑坡人员脆弱性估算模型,这是一种隐性模型,离开开发系统后很难移植使用。Khalaj等^[89]认为利用贝叶斯网络和Newmark位移的地震滑坡概率在理论上也可以用于地震滑坡人员伤亡和财产损失的风险分析。由此,Jessee等^[90]在滑坡概率计算的基础上,结合全球人口数据预测滑坡暴露指数及人口暴露指数,通过建立多元回归模型来进行地震滑坡人员伤亡的数量级估计。这些研究有一个共同之处,模型本身的内检和外延实用性都未进行统计学测试,可操作性亦不友好。大量的地震滑坡死亡人数统计发现,在全球范围内地震滑坡导致的人员死亡约为地震灾害死亡总人数的17.7%^[91]。统计分析还发现,地震滑坡死亡人数占死亡总人数的比率因地区不同和震级大小悬殊而有较大差别。以我国南北地震带为例,通常情况下,地震人员伤亡的50%~75%由建筑物破坏所导致,25%~50%由地震滑坡次生灾害和其他因素导致^[82];在个别震例中,地震滑坡导致的死亡人数甚至要超过建筑物破坏导致的死亡数量,一些震级较小的死亡人数为1至数人的地震事件,死亡人员可能仅因地震滑坡造成^[92]。可见,科学评估地震滑坡可能造成的人员伤亡数量是提高地震人员伤亡评估准确性和完善地震灾害损失评估体系的重要因素之一。解决这一问题的方案之一是基于GIS和logistic模型的地震滑坡致死人数评估方法开始提出^[93]并逐步完善。该方法包括三个步骤:一是将评估区划分成1 km×1 km的网格单元,把网格内的人口数量作为网格单元的人口属性;二是基于回归的logistic模型,根据网格单元内的地震滑坡危险性属性计算各网格单元的地震滑坡致死率;三是计算各网格单元的地震滑坡致死人数,然后进行研究区的地震滑坡总死亡人数评估。利用这种方法,以2014年“8·3”鲁甸M6.5地震,2012年“9·7”彝良M5.6、M5.7地震和2008年“5·12”汶川M8.0地震的3个地震灾区为例,进行地震滑坡致死人数测试^[94]。其中,鲁甸震例用来构建地震滑坡致死人数快速评估模型并评价其有效性,彝良和汶川震例用来测试模型的外延适用性。基于公里网格单元的地震滑坡死亡数量评估方法建立的初衷是解决应急期地震滑坡死亡总人数快速评估准确性的问题,但对区域地震

滑坡灾害风险死亡总人数评估也能发挥较好作用。更主要的是地震滑坡死亡人数的评估开始从死亡占比的经验型统计开始向设定条件下死亡率和死亡总数的定量计算迈进^[27]。需要注意的是,用该方法进行地震滑坡死亡人数评估时,具体到每个网格的地震滑坡死亡人数评估结果与实际死亡人数之间还是有出现较大离散的可能。

地震滑坡通常会造地面交通系统不同程度的破坏,其损毁程度和现存的功能状态会对整个抗震救灾工作产生重要的影响,如何预测地震滑坡道路可通行性空间分布是快速评估中的另一个难题。基于决策树最大信息增益比的 C4.5 方法对汶川地震高烈度区地震滑坡道路中断风险初步研究显示,可以利用地震滑坡危险性水平预测数据集对道路中断风险进行快速评估^[95]。随后在 C4.5 的基础上提出了一种基于 GIS 和多变量决策树(Multivariate Decision Tree, MDT)的地震滑坡道路可通行性空间分布快速评估方法^[96]。这种方法的基本思路是根据研究区的烈度计算出地震滑坡危险性水平的空间分布,然后统计每条路段两侧 180 m 缓冲区内各滑坡危险性水平像元的数量,将统计结果作为路段的滑坡属性,再用样本数据建立的路段滑坡属性与可通行性之间的 MDT 关系进行地震滑坡道路可通行性空间分布推断。研究表明,MDT 模型计算出的道路可通行性属性值是地震滑坡道路是否中断的良好指标^[97]。在允许一定误差的情况下,MDT 方法可以移植到其他相似山区,可以用于不同震级下地震滑坡造成的道路可通行性空间分布快速评估制图^[98]。这种方法评估的对象是路段单元,尚不能对地震滑坡道路中断的具体位置(点)进行预测。

由地震引发山体滑坡并堵塞河道形成的湖泊称为地震堰塞湖,是地震滑坡灾害链的一种。区域地震滑坡灾害风险定量评估研究应该包括地震滑坡-堰塞湖灾害链风险评估。对地震滑坡-堰塞湖灾害链的定量评估研究进展可分为两个阶段。第一阶段在汶川地震之前。在此阶段,基于大量历史档案资料,按照其形成和造成的灾害将地震滑坡-堰塞湖分为高危型、稳态型和即生即消型三类,聂高众等^[99]论述了各类型堰塞湖的成因特征、危害情况、时空分布,并提出了地震滑坡-堰塞湖灾害链空间位置评估的理论设想。第二阶段从汶川地震之后开始。汶川地震滑坡和鲁甸地震滑坡导致的堰塞湖引起了灾害学者前所未有的关注,相关研究成果也开始涌现。由于地震滑坡-堰塞湖灾害链带来的危害通常滞后

于其形成时间,所以当前对地震滑坡-堰塞湖灾害链风险的定量评估研究主要集中在基于遥感影像的堰塞湖空间信息提取^[100]、堰塞湖变化监测^[101]、堰塞湖特征分析^[102]、堰塞湖潜在危害的分类分级^[103]、堰塞湖发展趋势判定^[104]、堰塞湖处置技术^[105]与防治对策^[106]拟定等方面。同时,也有学者继续沿着早期的研究思路考虑地震风险下的滑坡-堰塞湖灾害链风险河段评估。比如,利用地震滑坡空间分布预测结果和基于历史地震滑坡-堰塞湖灾害链形成条件建立的滇东北地区地震滑坡-堰塞湖灾害链风险河段评估方法^[27]。这是一种全新的判别模型,是对现有地震滑坡-堰塞湖灾害链风险河段位置评估技术的重要补充。识别方法能进行不同烈度遭遇下地震滑坡-堰塞湖灾害链风险位置评估,但其方法和评估结果精度还有待进一步完善和提高。

区域地震滑坡危害性定量评估越来越成为研究热点,需要尽快优化和发展评估方法以满足当前自然灾害风险普查、年度重点危险区损失预测、地震应急辅助决策评估和国土整治规划与开发等需求。

3.3.2 区域地震滑坡风险性定量评估

对历史地震滑坡灾害而言,作为已经出现的确定性事件,其活动程度和破坏损失程度可以通过调查统计后采用活动规模、频次、危害范围、死亡人口、毁坏工程数量、折合经济损失等指标予以反映。对于未来可能发生的地震滑坡灾害,则无法采用这些指标直接反映灾害程度。同其他自然灾害一样,地震滑坡灾害也具有随机性和模糊性特点,所以也可以按照经典的研究方法采用灾害风险程度表示未来地震滑坡灾害的可能危害程度。汶川地震后在我国西部地区开展了基于第四代地震动参数区划图的地震滑坡发生概率、地震滑坡危险性水平、地震滑坡人员伤亡等级、地震滑坡经济损失风险等级以及地震滑坡-泥石流灾害链风险等级评估^[84]。但这类经典方法给出的结果一般是一种半定量的结果(区划图),难以满足新时期的社会经济发展需求。随着地震滑坡危害性定量评估方法的不断发展,对地震滑坡灾害风险性研究也不断向量化评估推进。近年来,利用地震滑坡灾害定量评估新方法开展了滇东北地区未来 50 年、20 年、当年度等不同时间尺度下的地震滑坡发生概率、地震滑坡空间分布范围、地震滑坡死亡人数、地震滑坡道路可通行性空间分布、地震滑坡-堰塞湖风险河段等评估工作^[27]。滇东北地区成为目前开展地震滑坡灾害风险性定量评估研究最深入的区域之一。

4 区域地震滑坡灾害定量评估研究展望

地震滑坡灾害定量评估研究服务于人类福祉,其成果已广泛用于山地社区发展建设选址、山地灾害防治与山地环境保育、区域地震灾害风险分析和应急救援辅助决策评估等。区域地震滑坡灾害定量评估研究仍面临不少困难。其难点不仅在于需要足够翔实的样本数据,还需要先进的理论和方法体系。地震滑坡多发地区是深化区域地震滑坡灾害的区域分异性,完善区域地震滑坡危险性、易损性、危害性、风险性定量评估模型,探索地震滑坡灾害评估关键技术及减灾实践等系列前沿课题的理想场所。由此概括,区域地震滑坡灾害定量评估研究应当考虑三个方面:(1)研究区存在着通过地震滑坡灾害定量评估研究以深化对地震滑坡发生规律认识和构建地震滑坡损失预测方法的重大需求;(2)通过对丰富的地震滑坡灾害记载的评价,研究区可以基本满足地震滑坡灾害风险调查、掌握风险隐患底数等相关研究工作对地震滑坡样本的要求,主要是指涵盖不同地震活动水平的区域地震滑坡灾害记录具有完全性;(3)作为重要地学研究区,与地震滑坡灾害孕育环境相关的背景性研究程度较高。

4.1 区域地震滑坡灾害定量研究存在的不足

综合看,区域地震滑坡灾害定量评估研究存在的不足主要有以下方面:

(1) 对一个多震区域包含较长时间尺度样本数据的系统性地震滑坡灾害定量评估研究不够。21世纪以来,但凡诱发滑坡的震例,都有学者分析了当次地震滑坡的地理学特征或进行地震滑坡易发性/危险性评估模型的构建。这种个案研究是区域地震滑坡灾害定量评估极其重要的基础。然而,地震复发周期通常较长,一两个案例的反演难以概况一个区域未来的地震滑坡灾害风险;加上区域固有的非均匀性,单个地震滑坡案例呈现的特征不能完全代表整个地区的地震滑坡灾害区域性特性。因此,对区域地震滑坡灾害定量评估研究应该尽可能地考虑较长时间尺度的地震滑坡灾害记录,研究区域应该有相对独立的自然环境。如何从系统的观点分析一个区域的地震滑坡发生发展规律、选取什么尺度的地域单元以及如何分析地震滑坡区域性特征的研究都需要进一步深入。

(2) 评估理论和方法都存在一些固有缺陷。理论认识上,对地震滑坡易发性的“隐患点”关注很高,但对“安全岛”重视不足。实际上“安全岛”的评估同

样重要,也正因为理论层面对“安全岛”认识的不够,使得地震滑坡灾害定量评估研究对滑坡空间分布预测方法的探索显得不积极。具体方法上,当前地震滑坡灾害易发性评估模型主要是基于数据驱动方法建立的,这种模型有其固有缺陷,会将那些本来安全的地方识别为高风险区域,在完善现有方法的同时需要积极探索和发展物理评估模型。

(3) 地震滑坡灾害易损性定量评估方法体系发展明显滞后。地震滑坡易损性的量化研究还比较薄弱,这限制着当前地震灾害损失快速评估结果的准确性,也直接限制了地震滑坡灾害风险评估结果服务社会需求的程度。

(4) 地震滑坡灾害链评估方法离现实工作需要还有距离。虽然已经认识到地震滑坡通常以灾害链的形式出现而且潜在危害很大,但地震滑坡灾害链的成灾机理和评估方法研究明显不足。目前包括地震滑坡-堰塞湖风险河段在内的地震滑坡灾害链定量评估主要还是基于GIS技术的空间判别分析,距离灾害风险隐患调查和地震应急评估等实际工作的迫切需求还有不少路程。

(5) 地震滑坡灾害防治战略研究薄弱。这是一个全新的重要课题,当前的区域地震滑坡灾害定量评估研究几乎还没有涉及,在区域地质灾害防治发展战略研究中也缺少对地震滑坡防治的考虑。

4.2 区域地震滑坡灾害定量研究需要解决的重要问题

区域地震滑坡灾害定量评估研究是地震灾害研究中一个重要领域。如上所述,当前取得了丰富的成果,并在地震应急救援辅助决策建议和年度地震重点危险区灾害损失预评估等实践中得到了应用。进入新发展时期,国家和社会越发关注以减轻灾害风险和减少灾害损失为目的的地震滑坡空间分布、地震滑坡人员死亡数量、地震滑坡道路堵塞位置和地震滑坡-堰塞湖灾害链风险河段的准确评估。应急管理部组建后对快速评估的误差在时间和结果上都提出了新要求。这势必将进一步深化区域地震滑坡灾害定量评估方法和评估模型的研究,特别是需求最紧迫的地震滑坡死亡人数评估方法的发展和完善。围绕这些新的需求,要解决如下一些重要问题:

(1) 区域地震滑坡灾害形成的系统性认识问题。即从系统论的角度分析岩石圈、智慧圈等不同圈层和区域地震滑坡灾害之间的相互联系的问题,通过对这些问题的研究,总结孕育地震滑坡灾害的区域地理环境背景。

(2) 区域地震滑坡基础数据库建设问题。涵盖大时段不同震级的地震滑坡样本记录更能总结区域地震滑坡灾害的区域性特征,也更能凝练一个区域未来较长时段内的地震滑坡灾害风险。这需要考虑如何通过有限的文字记录和少量详细的地震滑坡空间数据建立区域历史地震滑坡基础数据库,进而分析地震滑坡灾害空间分布的非均衡性和地震滑坡活动的时间韵律性,以深化区域地震滑坡灾害定量评估的地理时空特征。

(3) 发展和改进区域地震滑坡灾害风险定量评估方法问题。深化地震滑坡危险性定量性评估方法研究,改进现有评估模型存在的不足。发展地震滑坡易损性和危害性定量评估方法,攻坚当前急需提升的地震滑坡死亡人员空间分布和地震滑坡道路堵塞位置评估方法等技术难题。

(4) 探索地震滑坡灾害链定量评估方法体系问题。区域地震滑坡通常能发展演化为次生灾害链,地震滑坡-堰塞湖灾害链是常见的灾害链之一。总体上,地震滑坡灾害链的类型特征、形成机制、发展规律、处置技术等研究都急需推进。

(5) 区域地震滑坡灾害防治战略研究问题。地震滑坡灾害定量评估研究要能更好地服务于人类福祉,要从战略高度提出减轻区域地震滑坡灾害的发展策略。战略研究包括区域地震滑坡灾害防治指导方针、防治目标、战略行动等系列理论及技术问题。区域地震滑坡灾害防治发展战略研究急需开拓。

参考文献(References)

- [1] 周洪福,方甜,韦玉婷.国内外地震滑坡研究:现状、问题与展望[J].沉积与特提斯地质,2023,43(3):615-628.
ZHOU Hongfu, FANG Tian, WEI Yuting. Research situations and suggestions on earthquake-induced landslides[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(3): 615-628.
- [2] KEEFER D K. Landslides caused by earthquakes[J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95: 406-421.
- [3] KEEFER D K, WILSON R C. Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid semi-arid environments [C]// Sadler P M, Morton D M. Landslides in a semi-arid environment with emphasis on the inland valleys of southern California. California: Publications of the Inland Geological Society, 1989.
- [4] PAPADOPOULOS G A, PLESSA A. Magnitude-distance relations for earthquake-induced landslides in Greece[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 377-386.
- [5] PRESTININZI A, ROMEO R. Earthquake-induced ground failures in Italy[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 387-397.
- [6] 孙崇绍,蔡红卫.我国历史地震时滑坡崩塌的发育及分布特征[J].自然灾害学报,1997,6(1):25-30.
SUN Chongshao, CAI Hongwei. Developing and distributing characteristics of collapses and landslides during strong historical earthquake in China[J]. Journal of Natural Disasters, 1997, 6(1): 25-30.
- [7] SATO H P, HASEGAWA H, FUJIWARA S, et al. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT 5 imagery[J]. Landslides, 2007, 4(2): 113-122.
- [8] 姜立新,帅向华,聂高众,等.地震应急联动信息服务技术平台设计探讨[J].震灾防御技术,2011,6(2):156-163.
JIANG Lixin, SHUAI Xianghua, NIE Gaozhong, et al. Discussion on the design of earthquake emergency linkage information service platform[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(2): 156-163.
- [9] 白仙富,戴雨炎,余庆坤,等.彝良“9·07” $M_S5.7$ 、 $M_S5.6$ 地震震亡人员研究[J].中国地震,2014,30(4):571-582.
BAI Xianfu, DAI Yuqian, YU Qingkun, et al. Casualty study of the Yiliang $M_S5.7$ and $M_S5.6$ earthquakes on September 7, 2012[J]. Earthquake Research in China, 2014, 30(4): 571-582.
- [10] 王涛,吴树仁,石菊松,等.地震滑坡危险性概念和基于力学模型的评估方法探讨[J].工程地质学报,2015,23(1):93-104.
WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Concepts and mechanical assessment method for seismic landslide hazard: a review[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 93-104.
- [11] 薛强.对地质灾害易发性危险性易损性和风险性的探讨[J].工程地质学报,2007,15(增刊1):135-139.
XUE Qiang. Discussion on susceptibility, hazard, vulnerability and risk of geological disaster[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(Supp01): 135-139.
- [12] 高庆华,刘惠敏,李晓丽.中国地震次生地质灾害区域风险评估[M].北京:气象出版社,2011.
GAO Qinghua, LIU Huimin, LI Xiaoli. Regional risk assessment of geological disasters caused by earthquakes in China [M]. Beijing, China Meteorological Press, 2011.
- [13] 王通其,周蓝捷,李文惠.地震滑坡危险性评估方法研究综述[J].内蒙古煤炭经济,2020(14):204-206.
WANG Yuqi, ZHOU Lanjie, LI Wenhui. Review of seismic landslide risk assessment methods[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2020(14): 204-206.
- [14] KEEFER D K. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions[J]. Geomorphology, 1994, 10(1/2/3/4): 265-284.
- [15] KEEFER D K. Investigating landslides caused by earthquakes: a historical review[J]. Surveys in Geophysics, 2002, 23: 73-510.
- [16] KEEFER D K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution; the 1989 Loma Prieta, California event [J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 231-249.
- [17] JIBSON R W, PRENTICES C S, BORISSOFF B A, et al. Some observations of landslides triggered by the 29 April 1991

- Racha Earthquake, Republic of Georgia[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 963-973.
- [18] HUANG J J. Chi-Chi earthquake induced landslides in Taiwan [J]. Earthquake Engineering and Engineering seismology, 2000, 2(2): 25-33.
- [19] CHIGIRA M, YAGI H. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan [J]. Engineering Geology, 2006, 82(4): 202-221.
- [20] KAMP U, GROWLEY B J, KHATTAK G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 631-642.
- [21] 许冲, 田颖颖, 沈玲玲, 等. 2015 年尼泊尔廓尔喀 M_w 7.8 地震滑坡数据库[J]. 地震地质, 2018, 40(5): 1115-1128.
- XU Chong, TIAN Yingying, SHEN Lingling, et al. Database of landslides triggered by 2015 Gorkha (Nepal) M_w 7.8 earthquake[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(5): 1115-1128.
- [22] CUI Y L, BAO P P, XU C, et al. Landslides triggered by the 6 September 2018 M_w 6.6 Hokkaido, Japan: an updated inventory and retrospective hazard assessment[J]. Earth Science Informatics, 2021, 14(1): 247-258.
- [23] 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 等. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 21-39.
- WANG Tao, LIU Jiamei, LI Zetong, et al. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning[J]. Geology in China, 2021, 48(1): 21-39.
- [24] 唐川, 黄楚兴, 万晔. 云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 76-84.
- TANG Chuan, HUANG Chuxing, WAN Ye. Lijiang earthquake in Yunnan Province and its characteristics of collapse and landslide disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 1997, 6(3): 76-84.
- [25] 常晁瑜, 杨顺, 薄景山, 等. 黄土地震滑坡卫星影像识别方法[J]. 地震工程学报, 2022, 44(4): 811-818.
- CHANG Chaoyu, YANG Shun, BO Jingshan, et al. Satellite image identification method of loess earthquake landslide[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(4): 811-818.
- [26] CUI Y L, HU J H, XU C, et al. Landslides triggered by the 1970 M_s 7.7 Tonghai earthquake in Yunnan, China: an inventory, distribution characteristics, and tectonic significance[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(6): 1633-1649.
- [27] 白仙富. 滇东北地震滑坡灾害风险定量评估方法研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
- BAI Xianfu. Research on quantitative risk assessment method for earthquake and landslide disasters in northeast Yunnan [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022.
- [28] RODRIGUEZ C E, BOMMER J J, CHANDLER R J. Earthquake-induced landslides: 1980-1997 [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(5): 325-346.
- [29] 李天池. 地震与滑坡的关系及地震滑坡预测的探讨[M]// 滑坡文集(第二集). 北京: 人民铁道出版社, 1979: 127-132.
- LI Tianchi. Discussion on the relationship between earthquake and landslide and the prediction of earthquake landslide[M]// Landslide Anthology (Volume II). Beijing: People's Railway Publishing House, 1979: 127-132.
- [30] 康来迅. 昌马断裂带滑坡之研究[J]. 内陆地震, 1988, 2(4): 376-381.
- KANG Laixun. Study on the characteristics of landslide of Changma fault zone[J]. Inland Earthquake, 1988, 2(4): 376-381.
- [31] 周本刚, 张裕明. 中国西南地区地震滑坡的基本特征[J]. 西北地震学报, 1994, 16(1): 95-103.
- ZHOU Bengang, ZHANG Yuming. Some characteristics of earthquake-induced landslide in southwestern China [J]. Northwestern Seismological Journal, 1994, 16(1): 95-103.
- [32] 才才华, 王兰民, 袁中夏. 陕甘宁晋地区黄土地震滑坡致灾距的初步研究[J]. 西北地震学报, 1998, 20(4): 75-82.
- CAI Shuhua, WANG Lanmin, YUAN Zhongxia. A preliminary study on the seismic landslide distance in the Shaanxi—Gansu—Ningxia—Shanxi loess region[J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20(4): 75-82.
- [33] 辛鸿博, 王余庆. 岩土边坡地震崩滑及其初判准则[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 591-594.
- XIN Hongbo, WANG Yuqing. Earthquake induced landslide and avalanche[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 591-594.
- [34] OWEN L A, KAMP U, KHATTAK G A, et al. Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake[J]. Geomorphology, 2008, 94(1-2): 1-9.
- [35] PARISE M, JIBSON R W. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 251-270.
- [36] LIAO H W, LEE C T. Landslides triggered by the Chi-Chi earthquake, Asian association on remote sensing, Asian conference on remote sensing ACRS 2000 [EB/OL]. (2002-01-13) [2010-10-23]. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts8/hami0007.asp>.
- [37] 黄雅虹. 地震作用下黄土斜坡的稳定性分析预测[J]. 西北地震学报, 1998, 20(3): 52-58.
- HUANG Yahong. Analysis and prediction for stability of loess slope under the effect of earthquakes[J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20(3): 52-58.
- [38] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592.
- HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [39] 蒋瑶, 吴中海, 李家存, 等. 2010 年玉树 7.1 级地震诱发滑坡特征及其地震地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(6): 1157-1176.
- JIANG Yao, WU Zhonghai, LI Jiacun, et al. The characteris-

- tics of landslides triggered by the Yushu $M_s7.1$ earthquake and its seismogeology implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(6): 1157-1176.
- [40] ZHOU S H, FANG L G, LIU B C. Slope unit-based distribution analysis of landslides triggered by the April 20, 2013, $M_s7.0$ Lushan earthquake [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(10): 7855-7868.
- [41] 刘甲美, 王涛, 石菊松, 等. 四川九寨沟 $M_s7.0$ 级地震滑坡应急快速评估[J]. *地质力学学报*, 2017, 23(5): 639-645.
LIU Jiamei, WANG Tao, SHI Jusong, et al. Emergency rapid assessment of landslides induced by the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake, Sichuan, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(5): 639-645.
- [42] WU Z H, BAROSH P J, HA G H, et al. Damage induced by the 25 April 2015 Nepal earthquake in the Tibetan border region of China and increased post-seismic hazards[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(4): 873-888.
- [43] 鲍鹏鹏, 崔玉龙, 许冲, 等. 2018 年日本北海道 $M_w6.6$ 级地震滑坡分布分析[J]. *河南城建学院学报*, 2020, 29(2): 33-40.
BAO Pengpeng, CUI Yulong, XU Chong, et al. Analysis of landslide distribution caused by Hokkaido, Japan $M_w6.6$ earthquake in 2018[J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2020, 29(2): 33-40.
- [44] 刘洪兵, 朱晞. 地震中地形放大效应的观测和研究进展[J]. *世界地震工程*, 1999, 15(3): 20-25.
LIU Hongbing, ZHU Xi. Advance on topographic amplification effects of seismic response [J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 1999, 15(3): 20-25.
- [45] GELI L, BARD P Y, JULLIEN B. The effects of topography on earthquake ground motion: a review and new result [J]. *Bull Ses Soc Am*, 1988, 78(1): 42-63.
- [46] HARTZELL S H, CARVER D L, KING K W. Initial investigation of site and topographic effects at Robinwood Ridge, California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(5): 1336-1349.
- [47] HUTCHINSON J N. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology [C]// *Proceeding of the 5th International Symposium on Landslides*. 1988: 3-35.
- [48] AOI S, KUNUGI T, FUJIWARA H. Trampoline effect in extreme ground motion [J]. *Science*, 2008, 322(5902): 727-730.
- [49] 王会娟, 王平, 李旭东, 等. 地震诱发低角度黄土-泥岩滑坡动力响应及变形分析[J]. *地震工程学报*, 2021, 43(6): 1409-1418.
WANG Huijuan, WANG Ping, LI Xudong, et al. Dynamic response and deformation analysis of low-angle loess-mudstone landslides induced by earthquake [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2021, 43(6): 1409-1418.
- [50] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 71-73.
ZHOU Weiyuan. *Advanced rock mechanics* [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990: 71-73.
- [51] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 9-14.
HU Guangtao. *Landslide dynamics* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 9-14.
- [52] 张俾元. 工程地质分析原理[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 1994: 9-14.
ZHANG Zhuoyuan. *Principles of engineering geological analysis* [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 9-14.
- [53] 毛彦龙, 胡广韬, 毛新虎, 等. 地震滑坡启程刷动的机理研究及离散元模拟[J]. *工程地质学报*, 2001, 9(1): 74-80.
MAO Yanlong, HU Guangtao, MAO Xinhui, et al. Mechanism of set-out violent-slide of slope mass during earthquake and its simulation by using discrete element method [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(1): 74-80.
- [54] 唐春安, 左宇军, 秦泗凤, 等. 汶川地震中的边坡浅层碎裂与抛射模式及其动力学解释[C]// *汶川大地震工程震害调查分析与研究*. 北京: 科学出版社, 2009: 283-287.
TANG Chunan, ZUO Yujun, QIN Sifeng, et al. Shallow slope fragmentation and ejection models and their dynamic interpretation in Wenchuan earthquake [C]// *Investigation and Analysis of Earthquake Damage in Wenchuan Earthquake Project*. Beijing: Science Press, 2009: 283-287.
- [55] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡高速远程特征分析[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(2): 153-166.
YIN Yueping. Rapid and long run-out features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(2): 153-166.
- [56] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 19-28.
HUANG Runqiu, LI Weile. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 19-28.
- [57] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状与问题[J]. *地质通报*, 2004, 23(11): 1078-1082.
HUANG Runqiu, XIANG Xiqiong, JU Nengpan. Assessment of China's regional geohazards: present situation and problems [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(11): 1078-1082.
- [58] 刘立平, 雷尊宇, 周富春. 地震边坡稳定分析方法综述[J]. *重庆交通学院学报*, 2001, 20(3): 83-88.
LIU Liping, LEI Zunyu, ZHOU Fuchun. The evaluation of seismic slope stability analysis methods [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 2001, 20(3): 83-88.
- [59] 丁彦慧, 王余庆, 孙进忠. 地震崩滑与地震参数的关系及其在边坡震害预测中的应用[J]. *地球物理学报*, 1999, 42(增刊 1): 101-107.
DING Yanhui, WANG Yuqing, SUN Jinzhong. Correlation between landslides and seismides and seismic parameters and its application in predicting slope earthquake disaster [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(Suppl01): 101-107.
- [60] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments [J]. *Geotechnique*, 1965, 15(2): 139-160.
- [61] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive

- large scale movements in blocky system[C]// International Proceedings Symposium, ISRM, Nancy, [s.n.], 1971:128-132.
- [62] AMBRASEYS N N, MENU J M. Earthquake-induced ground displacements[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1988, 16(7):985-1006.
- [63] JIBSON R W. Predicting earthquake-induced landslide displacement using Newmarks Sliding Block Analysis[M]// Transportation Research Board Business Office. Transportation research record No. 1411; Earthquake-induced ground failure hazards. Washington D C: Transportation Research Board, 1993:9-17.
- [64] 黄润秋. 灾害性崩滑地质过程的全过程模拟[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1994, 5(增刊1):11-17, 29.
HUANG Runqiu. Full-course simulation of hazardous rock-falls and avalanches [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1994, 5(Suppl01):11-17, 29.
- [65] 刘忠玉, 马崇武, 苗天德, 等. 高速滑坡远程预测的块体运动模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(6):742-746.
LIU Zhongyu, MA Chongwu, MIAO Tiande, et al. Kinematic block model of long run-out prediction for high-speed landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(6):742-746.
- [66] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析: 以北川唐家山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2):319-327.
CUI Fangpeng, HU Ruilin, YIN Yueping, et al. Discrete element analysis of collapsing and sliding response of slope triggered by time difference coupling effects of P and S seismic waves: taking Tangjiashan landslide in Beichuan County for example[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2):319-327.
- [67] 曹琰波, 戴福初, 许冲, 等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增刊1):2878-2887.
CAO Yanbo, DAI Fuchu, XU Chong, et al. Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for Tangjiashan landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Suppl01):2878-2887.
- [68] 王兰民, 孙军杰, 徐舜华, 等. 爆破模拟地震动条件下黄土场地震陷研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(5):913-921.
WANG Lanmin, SUN Junjie, XU Shunhua, et al. Characteristics of seismic subsidence of loess site induced by blasting groundmotion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(5):913-921.
- [69] CHUNG C, FABBRI A G. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1999, 65(12):1389-1399.
- [70] 钱紫玲, 王平, 李娜, 等. 基于信息量和逻辑回归耦合模型的黄土地震滑坡危险性分析[J]. *地震工程学报*, 2023, 45(3):706-715.
QIAN Ziling, WANG Ping, LI Na, et al. Risk analysis of loess seismic landslides based on an information value-logistic regression coupling model[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(3):706-715.
- [71] ZHOU C, YIN K L, CAO Y, et al. Landslide susceptibility modeling applying machine learning methods: a case study from Longju in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Computers & Geosciences*, 2018, 112:23-37.
- [72] PACHAURI A K, GUPTA P V, CHANDER R. Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas[J]. *Environmental Geology*, 1998, 36(3):325-334.
- [73] UROMEIHY A, MAHDAVIFAR M R. Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2000, 58(3):207-213.
- [74] 唐川, 朱静, 张翔瑞. GIS支持下的地震诱发滑坡危险区预测研究[J]. *地震研究*, 2001, 24(1):73-81.
TANG Chuan, ZHU Jing, ZHANG Xiangrui. GIS based earthquake triggered landslide hazard prediction [J]. *Journal of Seismological Research*, 2001, 24(1):73-81.
- [75] LIN M L, TUNG C C. A GIS-based potential analysis of the landslides induced by the Chi-Chi earthquake[J]. *Engineering Geology*, 2004, 71(1-2):63-77.
- [76] 韩继冲, 张朝, 曹娟. 基于逻辑回归的地震滑坡易发性评价: 以汶川地震、鲁甸地震为例[J]. *灾害学*, 2021, 36(2):193-199.
HAN Jichong, ZHANG Hao, CAO Juan. Assessing earthquake-induced landslide susceptibility based on logistic regression in 2008 Wenchuan earthquake and 2014 Ludian earthquake[J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(2):193-199.
- [77] 陈晓利, 叶洪, 程菊红. GIS技术在区域地震滑坡危险性预测中的应用: 以龙陵地震滑坡为例[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(3):333-338.
CHEN Xiaoli, YE Hong, CHENG Juhong. Use of GIS in regional risk assessment of earthquake induced landslides: a case study of earthquake induced landslides in Longling in 1976[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(3):333-338.
- [78] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于GIS与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(1):15-26.
XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS platform and certainty factor analysis method based Wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(1):15-26.
- [79] 陈晓利, 祁生文, 叶洪. 基于GIS的地震滑坡危险性的模糊综合评价研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(3):434-438.
CHEN Xiaoli, QI Shengwen, YE Hong. Fuzzy comprehensive study on seismic landslide hazard based on GIS[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(3):434-438.
- [80] 邱丹丹, 牛瑞卿, 赵艳南, 等. 斜坡单元支持下地震滑坡危险性区划: 以芦山地震为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(5):1470-1478.
QIU Dandan, NIU Ruiqing, ZHAO Yannan, et al. Risk zoning of earthquake-induced landslides based on slope units: a case

- study on Lushan earthquake[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(5): 1470-1478.
- [81] 陈晓利,冉洪流,王明明.潜在地震滑坡危险区区划方法[J].地球物理学报,2012,55(4):1269-1277.
CHEN Xiaoli, RAN Hongliu, WANG Mingming. Hazards zonation for potential earthquake-induced landslide area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4): 1269-1277.
- [82] 白仙富,戴雨茨,余庆坤,等.地震滑坡危险性评估模型及初步应用[J].地震研究,2015,38(2):301-312.
BAI Xianfu, DAI Yuqian, YU Qingkun, et al. Risk assessment modeling of earthquake-induced landslides and its preliminary application[J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(2): 301-312.
- [83] 林高聪,潘书华,叶振南.基于 Newmark 法的设定地震滑坡危险性评估[J].桂林理工大学学报,2021,41(3):525-532.
LIN Gaocong, PAN Shuhua, YE Zhennan. Assessment of landslide risk based on Newmark and preset earthquake[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(3): 525-532.
- [84] 白仙富,戴雨茨.中国西部防震减灾能力地理纲要[M].昆明:云南科技出版社,2015.
BAI Xianfu, DAI Yuqian. A geographic outline of earthquake preparedness and disaster mitigation in West China[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Publishing House, 2015.
- [85] 丁明涛,庙成.基于 GIS 的芦山地震灾区滑坡灾害风险评价[J].自然灾害学报,2014,23(4):81-90.
DING Mingtao, MIAO Cheng. GIS-based risk assessment of landslide hazards in Lushan earthquake-stricken areas[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 81-90.
- [86] BUDIMIR M E A, ATKINSON P M, LEWIS H G. Earthquake-and-landslide events are associated with more fatalities than earthquakes alone[J]. Natural Hazards, 2014, 72(2): 895-914.
- [87] NOWICKI M A, WALD D J, HAMBURGER M W, et al. Development of a globally applicable model for near real-time prediction of seismically induced landslides[J]. Engineering Geology, 2014, 173: 54-65.
- [88] ZHANG S, LI C, ZHANG L M, et al. Quantification of human vulnerability to earthquake-induced landslides using Bayesian network[J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105436.
- [89] KHALAJ S, BAHOOTOROODY F, MAHDI ABAEI M, et al. A methodology for uncertainty analysis of landslides triggered by an earthquake[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 117: 103262.
- [90] NOWICKI JESSEE M A, HAMBURGER M W, FERRARA M R, et al. A global dataset and model of earthquake-induced landslide fatalities[J]. Landslides, 2020, 17(6): 1363-1376.
- [91] DANIELL J E, SCHAEFER A M, WENZEL F. Losses associated with secondary effects in earthquakes[J]. Frontiers in Built Environment, 2017, 3: 30.
- [92] 白仙富,聂高众,戴雨茨,等.基于公里网格单元的地震滑坡人员伤亡率评估模型:以 2014 年鲁甸 $M_S6.5$ 地震为例[J].地震研究,2021,44(1):87-95.
BAI Xianfu, NIE Gaozhong, DAI Yuqian, et al. Modeling and testing earthquake-induced landslide casualty rate based on a grid in a kilometer scale: taking the 2014 Yunnan Ludian $M_S6.5$ earthquake as a case[J]. Journal of Seismological Research, 2021, 44(1): 87-95.
- [93] 白仙富,戴雨茨,叶燎原,等.一种地震滑坡人员死亡数量预测方法及其应用:CN110070234B[P].2020-06-30.
BAI Xianfu, DAI Yuqian, YE Liaoyuan, et al. Earthquake landslide personnel death number prediction method and application: CN110070234B[P]. 2020-06-30.
- [94] 白仙富,聂高众,叶燎原,等.基于 GIS 和 logistic 模型的地震滑坡致死人数快速评估方法[J].地震地质,2021,43(5):1250-1268.
BAI Xianfu, NIE Gaozhong, YE Liaoyuan, et al. A method for rapid assessment of death toll from earthquake-induced landslide based on GIS and the logistic model[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(5): 1250-1268.
- [95] AN J W, BAI X F, XU J H, et al. Prediction of highway blockage caused by earthquake-induced landslides for improving earthquake emergency response[J]. Natural Hazards, 2015, 79(1): 511-536.
- [96] 戴雨茨,白仙富,聂高众,等.一种同震滑坡道路可通行性预测方法及其应用:CN111291941B[P].2020-10-30.
DAI Yuqian, BAI Xianfu, NIE Gaozhong, et al. Homoseism landslide road trafficability prediction method and application: CN111291941B[P]. 2020-10-30.
- [97] 白仙富,戴雨茨,聂高众,等.基于 MDT 的地震滑坡道路可通行性空间分布快速评估方法研究[J].中国地震,2022,38(4):632-650.
BAI Xianfu, DAI Yuqian, NIE Gaozhong, et al. Rapid evaluation of road traffic capacity with influence by earthquake-induced landslide using MDT[J]. Earthquake Research in China, 2022, 38(4): 632-650.
- [98] 白仙富,杨志全,罗伟东,等.基于 GIS 和多变量决策树的地震滑坡道路中断风险应急评估模型[J].地震研究,2023,46(3):343-353.
BAI Xianfu, YANG Zhiqian, LUO Weidong, et al. An emergency evaluation approach to road disruption risk influenced by earthquake-induced landslide using GIS and multivariate decision tree[J]. Journal of Seismological Research, 2023, 46(3): 343-353.
- [99] 聂高众,高建国,邓视.地震诱发的堰塞湖初步研究[J].第四纪研究,2004,24(3):293-301.
NIE Gaozhong, GAO Jianguo, DENG Yan. Preliminary study on earthquake-induced dammed lake[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(3): 293-301.
- [100] PAN S B, LI X T, SONG X N. Using remote sensing data to monitor landslide-dammed lakes caused by Wenchuan earthquake[J]. Geo-Information Science, 2010, 11(3): 299-304.
- [101] 熊金国,王世新,周艺,等.基于雷达和光学遥感数据地震堰塞

- 湖监测方法研究[J].水利水电技术,2012,43(1):44-47,51.
- XIONG Jinguo, WANG Shixin, ZHOU Yi, et al. Study on the monitoring method of landslide dam formed by earthquake based on optical and radar remote sensing data[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(1): 44-47, 51.
- [102] 韩金良, 吴树仁, 何淑军, 等. 5·12汶川8级地震次生地质灾害的基本特征及其形成机制浅析[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 306-326.
- HAN Jinliang, WU Shuren, HE Shujun, et al. Basal characteristics and formation mechanisms of geological hazards triggered by the May 12, 2008 Wenchuan earthquake with a moment magnitude of 8.0[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 306-326.
- [103] 王世新, 周艺, 魏成阶, 等. 汶川地震重灾区堰塞湖次生灾害危险性遥感评价[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 900-907.
- WANG Shixin, ZHOU Yi, WEI Chengjie, et al. Risk evaluation on the secondary disasters of dammed lakes using remote sensing datasets, in the 'Wenchuan earthquake' [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(6): 900-907.
- [104] 崔云, 孔纪名, 吴文平. 地震堰塞湖灾害链成灾演化特征与防灾思路[J]. 科技创新导报, 2010, 7(30): 221-223.
- CUI Yun, KONG Jiming, WU Wenping. Disaster evolution characteristics and disaster prevention ideas of earthquake-stricken lake disaster chain [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2010, 7(30): 221-223.
- [105] 陈金木. 地震堰塞湖应急处置后的管理对策[J]. 水利发展研究, 2008, 8(9): 1-4.
- CHEN Jinmu. Management countermeasures after emergency treatment of earthquake-stricken lakes [J]. Water Resources Development Research, 2008, 8(9): 1-4.
- [106] 马声浩. 四川省地震堰塞湖灾害及其防御对策研究[J]. 四川地震, 2011(2): 17-25.
- MA Shenghao. Study on quake lake disasters and countermeasurements in Sichuan Province [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2011(2): 17-25.

(本文编辑:张向红)

(上接第 1396 页)

- [21] 中国建筑标准设计研究院. 国家建筑标准设计图集: 挡土墙(重力式 衡重式 悬臂式): 04J008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- China Institute of Building Standard Design & Research. National building standard design atlas for retaining wall (gravity counterweight cantilever): 04J008[S]. Beijing: China Planning Press, 2005.
- [22] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
- LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075.
- [23] 国家铁路局. 铁路路基支挡结构设计规范: TB 10025—2019 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of retaining structures of railway earthworks: TB 10025—2019 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [24] 赵静, 姚令侃, 焦方辉. 汶川 8.0 级地震路堑墙震害特征及机理分析[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 54-59.
- ZHAO Jing, YAO Lingkan, JIAO Fanghui. Analysis on characteristics and mechanism of seismic damage of cutting retaining wall in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 54-59.

(本文编辑:赵乘程)