



移动阅读

周洪福, 方甜, 韦玉婷, 2023. 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, 43(3): 615–628. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.11011

ZHOU H F, FANG T, WEI Y T, 2023. Research situations and suggestions on earthquake-induced landslides[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 615–628. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.11011

## 国内外地震滑坡研究：现状、问题与展望

周洪福<sup>1,2</sup>, 方甜<sup>1,2</sup>, 韦玉婷<sup>3\*</sup>

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 3. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:** 地震滑坡一直是地学界关注的研究热点之一, 特别是 2005 年 10 月 8 日克什米尔  $M_s$  7.8 地震、2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s$  8.0 地震、2010 年玉树  $M_s$  7.1 地震、2014 年云南鲁甸  $M_s$  6.5 地震、2015 年 4 月 25 日尼泊尔  $M_s$  8.1 地震以及 2017 年 8 月 8 日九寨沟  $M_s$  7.0 地震等一系列强震活动, 都不同程度地触发了大量地震滑坡, 并伴生了许多次生灾害, 从而促进地震滑坡研究进入了新的阶段。本文通过总结国内外地震滑坡研究现状, 归纳了地震滑坡的特征和分布规律、地震动参数与地震滑坡关系、边坡地质条件与地震滑坡关系、地震滑坡的动力响应特征、地震滑坡预测以及地震滑坡危险性与风险区划等 6 方面的研究现状, 在此基础上进一步提出了未来地震滑坡应关注的主要研究方向和重点。

**关键词:** 地震滑坡; 研究现状; 研究趋势与展望; 分布规律; 动力响应特征; 预测评价

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

## Research situations and suggestions on earthquake-induced landslides

ZHOU Hongfu<sup>1,2</sup>, FANG Tian<sup>1,2</sup>, WEI Yuting<sup>3\*</sup>

(1. Shandong University of Science and Technology, College of Earth Resource Sciences and Engineering, Qingdao 266590, China;  
2. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China;  
3. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Earthquake landslides are a hot and difficult point in geosciences research. The Study of earthquake -induced landslides has developed a new stage, especially after the Kashmir  $M_s$  7.8 earthquake on October 8, 2005, the Wenchuan  $M_s$  8.0 earthquake on May 12, 2008, the Yushu  $M_s$  7.1 earthquake on April 14, 2010, the Ludian  $M_s$  6.5 earthquake on August 3, 2014, and the Nepal  $M_s$  8.1 earthquake on April 25, 2015. This paper summarizes the situation on feature and distribution low, dynamic effects and characteristics, forecast evaluation, geo-hazards and risk mapping of landslides triggered by earthquake, and the relationship between earthquake parameter and seismic landslide, slope geological environment and seismic landslide according to field investigation, data collection and literature review. The article puts forward thoughts and suggestions of earthquake-induced landslide in next stage based on research overview.

**Key words:** Earthquake-induced landslides; Research situation; research trends and prospects; distribution characteristics; dynamic response characteristics; forecast evaluation

收稿日期: 2021-01-26; 改回日期: 2021-07-23; 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 周洪福(1980—), 男, 教授级高级工程师, 从事工程地质和地质灾害调查研究工作。E-mail: zhf800726@163.com

通讯作者: 韦玉婷(1982—), 女, 教授级高级工程师, 从事水工环地质研究。E-mail: wei.yuting@163.com

资助项目: 中国地质调查局项目(编号: DD20211379, DD20160272); “第二次青藏高原综合科学考察研究”项目(2019QZKK0904); 四川省重点研发项目(2020YFS0296)

## 0 引言

地震滑坡是由于地震作用或者地震力触发的一种滑坡类型。中国大陆处在东边的西太平洋地震带与西南的地中海-马拉雅地震带之间,受多个板块俯冲、挤压的影响,特别是在青藏高原周缘及周边地区,新构造运动强烈,活动断裂发育,历史上曾发生多次破坏性地震,加之不利的地形地貌条件,密集的人口,复杂的地质环境条件,强烈的人类工程活动,因此这些地震滑坡往往造成相当大的人员伤亡和财产损失。

Keefner(1984)在1984年发表的文章中指出, $M_L \geq 4.0$ 便可触发地震滑坡。随着地震震级的增大,触发的地震滑坡数量和规模也呈逐渐增加的趋势。当地震震级达到一定量级时,地震滑坡的数量和规模将急剧增加。2008年“5.12”汶川 $M_s 8.0$ 级地震一共触发数万处滑坡,由地震滑坡导致的人员死亡约20000人,约占地震死亡人员总数的1/4(黄润秋,2009)。因此在总结前人研究成果的基础上,分析地震与滑坡之间的内在耦合关系,研究地震滑坡成因机理和致灾模式,查明地震滑坡分布规律,评价地震滑坡易发性、危险性和风险性,在此基础上对地震触发滑坡进行精准预测评价,成为了目前地震滑坡研究需要解决的关键科学问题。

## 1 国内外研究现状

滑坡的研究历史最早可以追溯到1882年瑞士学者海姆(A.Heim)发表的关于阿尔卑斯山区滑坡论文,至今也有百余年历史。但是关于地震滑坡的研究却起步较晚。综合目前国内外对于地震滑坡的研究现状,可将主要研究领域归纳为6个方面。

### 1.1 地震滑坡的特征和分布规律

一次强烈地震发生后,同震滑坡的分布特征和规律事关人民的生命财产安全和救援力量的快速进入,是各级政府部门和救援单位极为关注的重点,也是地震滑坡研究的热点之一。

李树德等(1999a, 2001b)从活动断裂分段与地震安全性评价的角度,对我国地震滑坡分布规律与成因进行初步研究,分析了地震滑坡分布与活动断裂之间的相关性,宋立胜(1994)通过调研国内一些典型中强地震诱发滑坡的实例,提出地震诱发滑坡是服务于国民经济建设、拓宽社会服务领域的重

要方向之一。孙崇绍(1997)等收集并整理了从公元1500年到1949年9月30日之间我国134次历史地震诱发地震滑坡的分布规律,研究结果表明在我国南北地震带上地震滑坡分布最为集中。

周本刚等(1994)总结了横断山地区1970年以来11次 $M \geq 6.7$ 级强震触发滑坡的特征,结果表明地震滑坡的空间分布受发震断层影响明显,其密集分布带与发震断层走向基本一致。徐岳仁等(2020)采用地质学“将今论古”原理,对1718年通渭 $M 7.5$ 地震滑坡分布规律研究结果表明,滑坡密集沿通渭断裂分布,与X度等震线吻合。乔建平(1987a, 1992b)对川滇地区 $M \geq 6$ 级的147次地震(时间从公元前26年至1989年)的研究结果表明,区内地震滑坡的分布不仅与地震的强度和频度有关,而且与地震区地质环境条件密切相关。黄润秋等(2008)对“5.12”汶川地震触发地震滑坡分布规律研究结果揭示,在断裂交汇处地震滑坡分布不仅数量多,而且规模更大。刘亢等(2019a, 2019b)研究2015年尼泊尔 $M_s 8.1$ 级地震触发地质灾害发现,589组地震滑坡点主要沿主中央逆冲断裂展布。鲍鹏鹏等(2020)对2018年9月6日发生在日本北海道 $M_w 6.6$ 级地震触发地震滑坡的研究表明,距震中10~12 km范围内地震滑坡分布数量最多,面积最大。杨志华等(2021)基于遥感解译和现场调查发现,巴塘断裂带对区域地质灾害发育分布具有显著的控制作用,地质灾害主要分布在距断裂两侧3 km范围内。蒋瑶等(2014a, 2014b)在2010年青海玉树 $M_s 7.1$ 级地震发生后开展的地质调查中发现13处古地震滑坡,主要集中分布在玉树活动断层两侧5 km范围内,并且80%以上的同震滑坡集中分布在玉树活动断层两侧2 km范围内。刘甲美等(2017)对2017年九寨沟 $M_s 7.0$ 级地震滑坡研究结果表明,大部分同震滑坡分布在发震断层两侧宽约4 km的带状区域内,整体沿北西方向延伸。Zhou et al.(2013)基于斜坡单元,分析研究了2013年芦山地震诱发滑坡发育分布特征。Xu et al.(2020)对1920年海原地震触发同震滑坡发育分布特征及造成的人员伤亡进行详细统计分析后,认为该地震的IX度烈度等震线应进一步向南延伸。Wu et al.(2019)研究了2015年尼泊尔 $M_s 8.1$ 级强震触发同震滑坡分布规律及对中国西藏边境地区的影响。

从前人的研究成果来看,同震滑坡主要分布在

距发震断裂一定宽度的条带状范围内,并且与地震烈度和斜坡地质环境密切相关。

## 1.2 地震滑坡与地震参数关系研究

已有的研究成果表明(Chang et al., 2016),地震滑坡发育和分布特征明显受震级、烈度、震源深度和震中距等地震参数影响。在其他因素相同的情况下,地震震级越大,地震触发滑坡的数量、规模、分布面积、密度等也越大。另外,地震滑坡所在原始斜坡的坡度、岩性以及坡向与地震波传播方向之间的关系与地震滑坡的发育分布、规模等也有着紧密的内在联系(张铎等, 2013)。前人在这方面开展了深入研究,并更多地集中在对“触发滑坡的最小地震震级和地震烈度关系”和“地震滑坡分布面积、震中距与地震震级关系”的定量分析方面。

### (1) 触发滑坡的最小地震震级和地震烈度

从理论上讲,如果一个斜坡或滑坡稳定性处于临界状态,那么一次震级很少的地震就可能触发地震滑坡。而现实中也确实存在这样的例子,如1925年6月22日美国俄亥俄州 Gros Ventre 山谷发生  $M_L \leq 3.5$  级的地震并触发 1 个小规模崩滑。1965年1月9日,加拿大 British Columbia 省 Hope 附近发生了  $M_L=3.1$  地震并触发山崩(李忠生, 2003)。(注:  $M_L$  为 Richter 近震震级,  $M_s$  为 Richter 面波震级,  $M_w$  为矩震级,下同)Keffer 分析了 1958—1977 年间刊登在《United States Earthquakes》上的 300 个地震事件,其中有 1 个地震滑坡是由震级小于 4.0 级地震触发的(Keffer, 1984)。

受地质环境条件、人类活动以及距离震中距离等条件的不同,一次地震虽然震级相同,但是在地震影响范围内的不同区域,其地震烈度却各不相同。周本刚等统计西南地区 1970 年以来  $M_s > 6.7$  的 11 次典型地震触发滑坡后发现,通常在地震烈度 VII 度区才会触发大量地震滑坡,在 VI 度区则可能触发老滑坡再次发生滑动(周本刚和张裕明, 1994)。孙崇绍等(1997)的研究则表明,地震滑坡的数量和规模与地震烈度呈正相关关系,在 VI 度区,地震滑坡逐渐增多,曲线拐点出现在 VII—VIII 度区。

从上述分析可知,通常情况下认为  $M_L=4.0$  级地震或烈度为 VI 度可判断为触发地震滑坡的最小震级和最小烈度。但是从影响建筑物安全性以及危害程度角度考虑,并且基于工程投资、工期等现实可行性,李忠生(2003)和丁彦慧等(1999)将触发

地震滑坡的最小震级定为  $M_L=4.5\sim 4.75$  级或最小烈度 VII 度。

### (2) 地震滑坡分布面积、震中距与地震震级关系

王克鲁等(1983)通过分析公元前 1177—公元 1969 年之间 2000 多次 5.0 级地震触发地震滑坡的分布特征,得到不同地震震级工况下,震级与最远地震滑坡距震中距之间的关系。黄伟亮等(2020)通过对秦岭北麓长约 50 km 古滑坡群的分析,得到地震震级与滑坡面积频度分布的关系。才树华等(1998)根据陕甘宁晋地区总共 80 个黄土地震滑坡的资料,建立了黄土地区地震滑坡最大运动(致灾)距离与地震震级之间的关系。杨涛等(2002)根据四川地区地震崩塌滑坡的基本特征及危险性分区,建立了地震崩滑体分布面积、震中距与地震震级的关系。姚清林(2007)对中国西北黄土地区地震滑坡进行调查分析,得到最大震中距、滑坡分布最大面积与震级之间的对应关系。Chen et al.(2012)统计了中国西南地区震级  $\geq 7.0$  的 38 次地震触发的地震滑坡特征,分析了滑坡影响区面积与震级的关系。

李天池(1979)对中国南部地区(川滇黔藏)以及北方地区(华北和西北)地震滑坡分布面积与地震烈度之间的关系进行了回归分析,得出了单次地震 VII 度以上烈度区的滑坡面积与震级的近似关系:

$$\text{南部地区: } \lg S = 0.9246M_s - 3.1089, R = 0.72 \quad (1)$$

$$\text{北部地区: } \lg S = 1.0719M_s - 3.5899, R = 0.87 \quad (2)$$

上式中:  $M_s$ —地震震级;  $S$  为地震滑坡面积,单位为  $\text{km}^2$ 。

辛鸿博等(1999)的研究成果表明,在地震烈度大于 VI 度区,崩滑体最大面积与震级存在正相关关系:

$$S = 24.061(M_s/4)^{13.252} \quad (3)$$

上式中:  $M_s$ —地震震级;  $S$  为崩滑体最大面积,单位为  $\text{km}^2$ 。

Keffer(1984)通过研究 30 个历史地震的震级与地震滑坡面积、地震滑坡分布范围,表明两者之间具有较好的相关关系:

$$\lg S = M_w - 3.46(\pm 0.4) \quad (4)$$

$$\lg V = 1.44(\pm 0.21)M_w - 2.34(\pm 1.5) \quad (5)$$

上式中:  $S$ —地震滑坡面积,单位  $\text{km}^2$ ;  $V$ —地震滑坡分布范围,单位  $\text{km}^2$ ;  $M_w$ —地震震级。

丁彦慧等(1999)对中国西部地区  $M_s > 4.7$  级的 71 次地震触发的 194 例滑坡进行回归分析, 得到地震震级在 4.7~7.0 之间以及 7.0~8.5 之间时, 地震震级与地震触发滑坡距震中最大距离之间的相关关系:

$$4.7 \leq M_s < 7.0, R_m = 2.26 \times 10^4 M_s^{7.045} \quad (6)$$

$$7.0 \leq M_s < 8.6, R_m = 9.816 \times 10^2 M_s^{3.9442} \quad (7)$$

上式中:  $M_s$ —地震震级;  $R_m$ —地震触发滑坡距震中最大距离, 单位 km。

Papadopoulos 等(2000)收集整理了 1000—1995 年间发生在希腊的  $M_s$  为 5.3~7.9 的 47 次地震触发的地震滑坡, 通过回归分析得到震级与滑坡距离震中最大距离之间的经验关系:

$$\lg R_c = 0.75 M_s - 2.98 \quad (8)$$

上式中:  $M_s$ —地震震级;  $R_c$ —地震触发滑坡距震中最大距离, 单位 km。

李秀珍等(2010)在调查“5·12”汶川地震诱发的 46 个滑坡的基础上, 对滑坡的滑动距离与滑坡体积以及原始斜坡坡角的相关关系进行了统计分析。研究表明地震滑坡的水平滑动距离、垂直滑动距离均与滑坡体积的对数值有良好的相关关系:

$$L_r = 0.5042e^{1.0829 \lg V} (R^2 = 0.8244) \quad (9)$$

$$H = 0.4299e^{1.0275 \lg V} (R^2 = 0.7857) \quad (10)$$

上式中:  $L_r$ —滑坡水平滑动距离, 单位 m;  $H$ —滑坡垂直滑动距离, 单位 m。

基于对国内外相关研究文献的总结, 结合作者对国内近几年几次较大规模地震滑坡的调查发现, 地震触发滑坡的分布面积、单个最大面积、距震中最大距离等与地震的震级、烈度等确实存在着正相关性。但是对前述公式 1-5 以及公式 6-10 分别进行拟合后发现, 各公式形成的曲线离散性较大。究其原因, 应该是统计分析样本分布在不同地方、不同地质环境条件, 导致同一个震级的地震或相同的地震烈度触发的地震滑坡数量、规模也各不相同。这也从一个侧面反映了地震滑坡的复杂性和不确定性。

### 1.3 地震滑坡与边坡地质环境条件关系研究

边坡地质环境条件主要包括边坡的地层岩性、地质构造、地形地貌以及沟谷的发育密度等。其中地形地貌又包括自然斜坡的坡度、坡向、坡高和坡形, 张铎等(2013)认为, 自然斜坡的坡度、坡向、坡高对地震滑坡影响较大, 而坡形对地震滑坡的影

响相对较小。

Davis(1972)在 1971 年对 San Fernando 地震余震的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的放大效应。Celebi(1987)在 1985 年对 Chile 地震触发地震滑坡进行调查后发现, 大部分地震滑坡分布在斜坡中上部, 表明地震波具有地形放大效应。Pailse(2000)和 Ashford et al.(1997)对 1994 年 Northridge 地震触发滑坡与地形坡度和岩性之间的关系进行统计分析发现最严重的破坏发生在陡坡和陡崖处, 且集中在地震影响区的南部, 因此认为地形放大效应具有方向效应。Sato et al.(2006)和 Owen et al.(2008)对 Kashmir 地震诱发的大型滑坡研究结果表明, 地震触发的地震滑坡具有明显的方向效应和坡向效应, 并且该地区的地形地貌、地层岩性、地质构造、人类活动对地震滑坡的分布有着明显的影响控制作用。

“5.12”汶川地震发生后, 国内多位学者对地震滑坡进行了大量、卓有成效的研究, 而且一些研究成果及时应用于灾后重建工作。如黄润秋和李为乐(2008)、许强和李为乐(2010)等对汶川地震触发同震滑坡的研究发现, 地震滑坡具有明显的上下盘效应(发震断裂上盘地震滑坡发育密度明显大于下盘)、地形高位放大效应(单薄山梁和多面临空斜坡顶部地震滑坡多发、频发)、距离效应(约 80% 的大型滑坡分布在发震断裂地表破裂带两侧 5 km 的范围内)、锁固段效应(大型滑坡主要分布在与发震断裂交叉、错列部位)、上下盘效应(70% 以上的大型滑坡都位于断裂上盘)、背坡面效应(地震波传播的背坡面一侧的滑坡发育密度明显大于迎坡面一侧)。祁生文等(2009)对汶川地震触发同震滑坡分布高程的统计结果揭示, 崩滑体最发育的高程集中在 1 200~2 000 m 之间。另外, 吴树仁等(2009)对地震诱发滑坡活动强度进行分析评价, 提出了地质灾害活动强度指标, 该指标用地质灾害分布最大面密度来衡量。

前人针对尼泊尔地震、台湾集集地震和四川九寨沟地震等的地震滑坡与边坡地质环境条件关系, 也开展了一些重要研究。代表性的包括: 陈文龙等(2020)解译 2015 年 4.25 尼泊尔  $M_s$  8.1 级地震触发滑坡时发现, 地震滑坡主要发生在地形坡度  $20^\circ \sim 50^\circ$  之间。Liao and Lee(2010)通过遥感资料统计分析了台湾集集 7.7 级地震触发滑坡与边坡地质环境条件的关系, 研究发现地震滑坡的分布具有

明显的坡面效应,并且滑坡的分布与发震断层的错动方向有一定的关系。李强等(2019)采用机器自动识别的方法研究2017年“8.8”九寨沟地震触发同震滑坡发育特征,结果表明地震滑坡的空间分布与斜坡坡度、地形起伏度呈正相关关系,与地表粗糙度存在负相关关系,滑坡体分布存在明显的断层效应。

#### 1.4 地震滑坡动力响应机制研究

总体来看,通过野外调查、遥感解释等多种手段,目前国内外对强震触发滑坡发育分布规律的研究较为成熟,但是对地震滑坡动力响应机制的研究仍处于探索阶段(李为乐等,2011)。特别是汶川地震触发大的光包滑坡,其成因机理、动力响应特征与传统认知存在着较大不同(黄润秋等,2008a,2008b),引发了大量学者广泛探讨和深入细致的研究。

地震时地震波对斜坡作用以及由此导致的斜坡失稳机制是地震滑坡研究中的热点和难点。国内外许多学者从地震液化、加速效应、累积效应、孔隙水压力等多个方面对自然斜坡在地震工况下的破坏机理进行了分析研究。张倬元等(1993)在《工程地质分析原理》一书中指出,地震动荷载对边坡稳定性的影响主要表现为两个效应:累积效应和触发效应。胡广韬(1995)在《滑坡动力学》中比较系统地分析了滑坡动力机理,提出了边坡动力失稳机制的坡体波动振荡加速效应。周维垣(1990)在《高等岩石力学》中指出地震动荷载对岩质边坡稳定性的影响主要表现在两个方面,一是地震波传播到岩体中的结构面时,地震波会在这些结构面之间发生多次的反射及折射作用,从而导致超压增大;二是地震荷载与水的作用对斜坡岩体的共同破坏。Hartzell et al.(1994)研究了1989年洛马·普雷塔地震导致美国加州 Robinwood 山脊的破坏,发现该山脊发生较大程度破坏的主要因素是地震波在山体内发生的多向反射及散射等复杂作用。

毛彦龙等(2001)认为地震波在斜坡岩体中会产生三个效应:累进破坏效应、启动效应和启程加速效应,这三个效应的共同作用导致斜坡岩体破坏及地震滑坡的形成。Shin Aoi et al.(2008)通过研究 Iwate- Miyagi 地震加速度,提出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,并归纳总结为垂直加速度“蹦床”模型。祁生文(2004)等则认为地震时边坡失稳是由两个原

因导致的:一是地震惯性力作用;二是地震产生的超静孔隙水压力迅速增大和累积效应。卢育霞等(2020)分析了距1920年海原地震震中80 km的西吉-静宁交界的黄土丘陵区地震滑坡发育分布特征,结果表明地层场地效应和地形场地效应联合作用加剧了斜坡地表的地震动放大作用,增加了触发地震滑坡的动力。梁靖等(2021)通过研究汶川地震在大水闸背斜两翼触发的4处大型滑坡,断裂活动与背斜演化对地震滑坡的启动位置有重要的控制作用,并将这种控制类型归纳为“控制侧滑型”“控制底滑型”“控制滑体型”及“控制基座型”。

强震时斜坡岩体破裂模型以及破裂后的运动方式也是地震滑坡动力响应机制研究的一个重要方面。黄润秋和李为乐(2009)总结了强震条件下斜坡岩体的破坏模式,可概括为“拉裂-滑移”,并提出了几类典型的地震滑坡成因模式:拉裂-顺走向滑移型、拉裂-顺(层)倾向滑移型、拉裂-水平滑移型、拉裂-散体滑移型、拉裂-剪断滑移型。殷跃平(2008)认为汶川地震触发的大型高速远程滑坡具有3阶段特征:“地震抛掷”—“撞击崩裂”—“高速滑流”,并指出在高速滑流阶段存在高速气垫效应、碎屑流效应和铲刮效应等3种效应。唐春安等(2009)则从理论上研究了地震加速度倍增效应,采用数值模拟的方式重现了冲击载荷作用下边坡表层岩体散裂和抛射现象。Wang et al.(2018)通过典型案例剖析,提出了高寒高海拔地区地震滑坡动力响应机制以及破坏后运动特征。Zhao et al.(2021)利用钻探、野外调查、物探等技术手段,研究大渡河摩岗岭滑坡下滑破坏过程中的动力效应特征。

#### 1.5 地震滑坡预测分析方法研究

受限于人们目前的认知和技术水平,对于地震滑坡的启动机理、动力响应机制的研究还存在很多难解之谜和未知之处,因此目前对于地震滑坡的精确预测十分困难。但是经过多年来国内外学者的不懈努力,目前已经初步建立了一些基于位移判别法的地震滑坡预测模型,位移判别法大体可以分为3类:拟静力法、有限滑动位移法、数值分析方法和物理模拟方法,其中前面两种方法最具代表性(张铎等,2013)。

拟静力法最早主要应用在研究斜坡稳定性,该方法的基本思想是确定滑面后,将滑体假定为刚体,

计算抗滑力(矩)和下滑力(矩)的比值,评价斜坡稳定性。1948年 Terzaghi 和 Peek(1948)首次应用拟静力法开展了斜坡稳定性分析。Seed(1968)在1968年对地震工况下土体斜坡稳定性采用力多边形法则进行了分析计算。丁彦慧(1999)提出了改进后的谷本系数法,利用该方法得到3个预测地震崩滑的初判准则。并应用于检验1996年2月3日云南省丽江7.0级地震触发的崩滑体。闫东晗等(2019)通过拟静力强度折减的方法对宁夏回族自治区西吉县城西南方向的红土川滑坡的稳定性进行反演分析,计算结果表明滑坡区地震烈度划归为X度更合理。薄景山等(2019)评述了拟静力分析方法的发展历史和存在的问题,认为该方法存在的最大问题是如何准确获取用于计算的岩土体参数和地质模型的可靠性。

拟静力法尽管简单方便,但是由于该方法没有考虑到拟静力的变化性,并且将斜坡岩体假定为绝对刚体,导致其在应用中存在着明显的缺陷,常导致预测结果与实际结果相差较大的问题。为了更为准确地对地震滑坡进行预测分析,Newmark(1965)在1965年提出了一种新的评价斜坡稳定性的方法:用有限滑动位移代替安全系数法来评价斜坡稳定性,并且建立了预测地震滑坡的Newmark法。该方法提出后得到了广泛的应用。但是使用该方法进行地震滑坡预测评价时,斜坡岩体下滑破坏的位移量临界值成为了评价准确性的关键因素。Wieczorek et al.(1985)在1985年通过大量实例和理论研究后,将Newmark法中岩质斜坡位移量的临界值定为5 cm。Jibson and Keefer(1993)在1993年确定基于Newmark法的黏性土斜坡位移量的临界值为10 cm,并且建议使用Arias强度来描述强震特性(Jibson, 1993)。

Ambraseys et al.(1988)在1988年提出使用临界加速度比作为回归方程的变量来估算地震工况时斜坡的永久位移,其中临界加速度比是指地震工况时斜坡体上的临界加速度和地面峰值加速度的比值。但是这种方法使用具有一定的局限性:仅仅在震级大于6.6级并小于7.2级的范围内才有效。钱海涛等(2018)基于振动台试验得到地震滑坡基本单位滑移特征,提出一种地震滑坡永久位移估算方法。Zhao et al.(2012)基于Newmark法进行二重积分,提出了一种估计同震边坡位移的新方法,并用“5.12”汶川地震重灾区地震滑坡对该方法进

行了检验分析,取得较好效果。王余庆等(2002)利用灰色系统方法对天然边坡震害进行了预测分析,取得较好效果。但是该方法对人工路堑边坡震害预测的有效性较低。Zhang et al.(2017)基于Newmark模型引起的边坡位移,预测了鲜水河断裂带再次发震时地震滑坡的分布特征。

由于斜坡岩体的复杂性和不均一性,通常情况很难求解其稳定性的解析解。近年来随着计算机技术的发展,越来越多的学者开始综合利用数值计算方法和神经网络方法对地震滑坡进行分析研究。如Xia et al.(2021)利用DDA方法建立了一种新的联合拉伸破裂模型(UTFM),模拟分析了考虑岩体抗张强度的地震滑坡失效过程。邬爱清等(2008)利用非连续变形法、崔芳鹏(2010)和曹琰波(2011)等利用离散元法对“5.12”汶川地震触发的唐家山滑坡进行了模拟研究,得出了唐家山滑坡的变形破坏过程、形成机制、运动模式和主控因素。高艳平等(2001)运用神经网络方法将影响滑坡的岩土体特性、新构造运动特征、坡高、坡角、年均降雨量以及场地地震烈度输入神经网络并进行计算,将计算值用于预测地震滑坡。樊伟等(2005)建立了灰色神经网络预测模型,该模型综合了灰色预测模型与神经网络预测模型的优势,利用该模型预测地震滑坡稳定性。鲍叶静等(2005)考虑地震的随机性,提出了一种地震诱发滑坡初步预测的概率分析方法。

物理模拟方法主要以量纲分析法和相似性理论为基础,采用振动台或离心机试验研究斜坡模型应力和位移状态,并据此分析斜坡模型在地震工况下失稳机理。常用方法主要有模型试验法、离心试验法和光测弹性法等。如王兰民(2008)等通过现场爆破试验,对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了试验研究,结果对预测评价黄土地区地震滑坡具有参考价值。

### 1.6 地震滑坡危险性和风险区划研究

一次破坏性地震通常会触发数千甚至数万处滑坡,这些地震滑坡往往造成巨大的人员伤亡和财产损失。因此,在活动断裂通过并且人口密集的山区和人类经济活动强烈的区域,需要进行地震滑坡危险性和风险分区评价,用于服务区域防灾减灾和指导城镇以及基础设施规划建设,近年来已经成为地震滑坡研究与应用方面的重点内容之一。

目前对于大型单体地震滑坡危险性和风险评

价主要利用基于地震参数的位移判别方法。如杜鹏(2012)以三峡水电站库区的赵树岭滑坡和萨尔瓦多的滑坡为例,从理论模型研究及实例分析两个角度建立了单体滑坡灾害风险评价体系。刘鑫(2008)选取滑坡失稳概率分析、承灾体易损性分析、承灾体价值损失分析、可接受风险水平等四个指标,探索建立了适用于单体滑坡的风险评价方法。张东辉(2010)利用GIS和RS技术,按“原理与方法—提取与分析—建立与求解—应用与实现”的流程,建立了单体滑坡灾害风险评价的模糊综合评判模型。

针对区域地震滑坡危险性和风险评价,目前主要是利用基于GIS的区域统计方法,常用模型可以分为判别分析模型和机器学习模型两类。

(1)判别分析模型属于半定量化方法,一般选择的研究范围较大。判别分析主要包括信息量模型法、证据权法、概率分析法、灰色关联法等。信息量模型法和证据权法主要是统计各类因子参数与滑坡发生频率间的关系,从而进行地震滑坡危险性评价;概率分析法利用地震超越概率的分布函数估算滑坡的失稳情况;灰色关联法通过地震滑坡灰度的模糊聚类分析滑坡的失稳情况。

判别分析模型简单、易用,但是其缺点也很明显。该方法需要获取野外观测数据并对基础因子进行分级。但是这些数据的获得与调查研究人员的专业经验有很大关系,具有较强的主观性。并且由于地震滑坡发生频率比降雨型滑坡低,因此统计的地震滑坡数据常常不能满足判别分析模型的要求。

(2)机器学习模型以人工智能理论为基础,可以解决调查研究人员对研究区具体的地质构造不明情况下的问题。目前国内机器学习模型包括决策树、逻辑回归模型、神经网络、支持向量机、灰色关联等,其中应用较为普遍的主要有逻辑回归模型和神经网络模型(张铎等,2013)。

许冲等(2013)选择8个影响因子(坡度、坡向、高程、与水系距离、与公路距离、与映秀-北川断裂距离、地震烈度、岩性)进行逻辑回归模型分析,建立了汶川地震滑坡危险性索引图。2010年玉树地震后,选取与地表破裂距离、峰值加速度(PGA)、高程、坡度、坡向、曲率、坡位、与水系距离、岩性、与断裂距离、与公路距离、NDVI等12个因子对玉树地震诱发的2036处滑坡进行危险性评价,正确

率在80%左右(许冲等,2013)。王涛等(2013a,2015)提出广义和狭义地震滑坡危险性评价概念和评估框架,并基于斜坡岩体力学模型对地震滑坡危险性评价方法进行了系统阐述。刘甲美等(2016a,2018b)基于概率地震危险性分析及Newmark累积位移模型,以滑坡概率为危险性指标,提出一种概率性地震滑坡危险性区划新方法,并将该方法用于甘肃天水地区地震滑坡危险性评价。陈晓利等(2012)利基于地震危险性分析,采用综合指标法对地震滑坡危险性进行区划,并将此方法得到的地震滑坡危险性区划与“5.12”汶川地震实际发生的地震滑坡进行对比分析,获得较好的效果。马思远(2019)、陈晓利等(2019)分别基于逻辑回归模型以及Newmark模型对2017年“8.8”九寨沟Ms7.0级地震滑坡开展危险性评价。杨顺等(2020)运用逻辑回归分析方法,拟合得到黄土斜坡地震稳定性的快速评价经验公式。罗路广等(2020)以2017年九寨沟地震诱发的1027处同震滑坡为本底数据,采用贝叶斯概率方法与广义加性统计模型,选取13个影响滑坡的地震、地形、地质和水文因子,对九寨沟地质公园地震滑坡危险性进行评价分析。

Kamp et al.(2008)应用信息量模型对2005年Kashmir地震在喜马拉雅地区触发的数千个滑坡进行了易发性区划,选取的因子有:岩性、断裂、坡度、坡向、高程、土地覆盖类型、河流与公路。Rajabi et al.(2013)在2013年对伊朗进行了地震滑坡危险性区划。Dreyfus et al.(2013)在2013年基于滑块模型对美国Northridge地震触发的地震滑坡进行了危险性区划研究。Wang et al.(2013)基于简化的Newmark位移模型对“5.12”汶川地震灾区地震滑坡危险性进行了快速评价。

对于地震滑坡危险性和风险分区评价研究而言,目前由于人们对于地震滑坡的认知水平不同,并且每个研究学者的理论、技术水平和实践经验也有所差别。即使对同一个地区,相同的地震参数由不同的研究人员进行地震滑坡危险性评价,其评价的结果也可能有所差别,甚至可能得出大相径庭的结论。因此对于区域上地震滑坡预测评价一直是地震滑坡研究的一个热点和难点。以目前的技术水平而言,要想十分精准的预测不同震级地震发生时,某一个区域范围内地震滑坡稳定性以及危险性是十分困难的,也是很难做到的。有鉴于此,对

于区域地震滑坡危险性评价,我们应该更加注重现场调查,不断提高调查的精度和准确性。在此基础上深入开展地震滑坡机理研究,同时辅以各种实验手段,不断完善地震滑坡危险性和风险评价技术方法,从而提高地震滑坡危险性和风险评价准确度。

## 2 讨论

### 2.1 当前研究中存在的主要问题

我国是一个地震地质灾害多发和高发的国家,近年来的几次破坏性地震给人民生命财产安全和基础设施带来巨大损失。在国家领导人提倡的“生命至上,人民至上”的大背景下,有关地震滑坡的研究方兴未艾。特别是在我国西部活动断裂密集发育以及高地震烈度区,对地震滑坡的相关研究显得尤为必要。前人采用多种技术方法手段对地震滑坡进行了大量的研究,取得丰硕的研究成果。但是由于地震滑坡机理的复杂性以及我国地质环境的多样性,有关地震滑坡的研究成果尚不能完全满足国民经济发展和保护人民生命财产安全的需要,仍然存在以下几个方面的问题:

(1)针对地震滑坡事后研究多,事前预测研究较为薄弱的问题

近年来全球范围内发生多次破坏性强震,触发数以千计、甚至数以万计的同震滑坡,大量学者在震后对同震滑坡的分布范围、分布规律、动力特征等进行了广泛研究。但是针对某个地区,特别是人口稠密区和基础设施大量分布区,在不同地震烈度条件下的地震滑坡精准预测评价相对较少,给高地震烈度山区城镇和大型基础设施规划建设带来巨大挑战。

(2)活动断裂(发震断裂)空间展布特征精确定位问题

活动断裂(发震断裂)空间展布特征是研究地震滑坡的基础,直接关系到活动断裂带的避让距离,有利于减少人员和财产损失。目前全国范围内大的活动断裂带或地震带的空间展布位置较为清楚,但是针对某个小区域内活动断裂带的精确定位研究尚显不足,不能完全满足防灾减灾的需求。

(3)大型地震地质灾害早期识别问题

一次破坏性强震触发的大型、特大型甚至巨型地震地质灾害,比如汶川地震触发的老虎嘴滑坡、东河口滑坡、北川老县城滑坡等等,往往带来大量的人员伤亡和财产损失,也给救援工程增加许多困

难。但是目前针对这类大型地震地质灾害早期识别仍处于探索研究阶段,不能完全满足城镇规划、工程建设和避免人员伤亡的需求。

### 2.2 未来发展趋势与展望

日本桐生市 2012 年 11 月举行了地震滑坡国际学术研讨会。2016 年 6 月在意大利 Naples 召开了第 12 届国际滑坡研讨会(the 12th International Symposium on Landslides)。2016 年 8 月底在南非 Cape Town 召开第 35 届国际地质大会(the 35th International Geological Congress)。2018 年 5 月在中国北京召开了 2018 年地震滑坡机理与评估研讨会(马思远和许冲, 2018)。在这些会议上对地震滑坡的特征、分布规律、成因机理、危险性区划以及预测和预警等风险管理内容均进行了广泛的讨论。总的来说,目前国内外对于地震滑坡的各类研究方兴未艾,特别是 2005 年 10 月 8 日克什米尔地震、2008 年 5 月 12 日汶川地震、2015 年 4 月 25 日尼泊尔地震以及 2017 年 8 月 8 日九寨沟地震触发了大量不同类型、不同规模的地震滑坡,为地质工作者研究地震滑坡提供了非常难得的机会。但是随着研究的逐步深入,对于地震滑坡仍然有许多亟待解决的关键问题,这也是值得我们进一步研究和思考的地方:

(1)加强对不同地震工况条件下地震滑坡危险性的更精确预测评价

目前借助现场调查和高精度遥感等手段可以得到强震后地震滑坡的数量、规模、空间分布等详细特征。借助这些数据对强震区地震滑坡危险性进行反演评价相对来说技术方法较为成熟。但是对于地震滑坡的预测研究,特别是小范围(面积小于  $100 \text{ km}^2$ 、甚至小于  $10 \text{ km}^2$ )、高精度、不同地震工况条件下的地震滑坡危险性预测评价,这对于山区城镇的规划建设以及防范地震地质灾害具有重要的现实意义和经济价值。但是遗憾的是,就目前而言,其技术方法还谈不上成熟,评价结果也不能满足工程建设的需求,需要进一步深入研究。

(2)地震滑坡动力学机理和动力效应研究仍需进一步深入

目前对于地震滑坡的动力学机理和动力效应的认识还十分有限,前人通过室内试验和数值模拟进行了初步探索,得到了一些初步成果。这些成果为其他学者对此进行深入研究提供了较好的启示。



(3)加强对地震触发高速远程滑坡早期识别、成因机理以及灾害链效应的研究

强震作用下部分地震滑坡呈现高速远程碎屑化流动的特征,并且这类高速远程滑坡往往形成灾害链效应。虽然目前对于高速远程滑坡现象研究较多,但是目前仍然没有有效的手段对这类滑坡进行早期的精准识别,这给防灾减灾带来巨大的挑战。而对其成因机理大多还停留在概念模型的阶段,缺乏统一的认识,需要进一步深入研究。

(4)深化对地震滑坡各类效应内在耦合因素的深入研究

“5.12”汶川地震后多位学者通过大量研究发现地震滑坡的分布具有“上下盘效应”“锁固段效应”“方向效应”“高位放大效应”“距离效应”,这些效应与地形地貌、断层错动方式和分布特征、地震波的传播有关,但是目前对这些效应的研究仅仅限于统计分析以及少量的数值模拟和物理模拟,对其内在耦合因素的研究程度较低,未来需要进一步深入地分析研究。

### 3 主要结论

本文总结了国内外有关地震滑坡的研究现状,指出了目前研究存在的问题,对下一步研究方向提出了建议,得到以下2点结论:

(1)地震滑坡的分布与活动断裂带空间展布特征密切相关。大量的研究表明,总体而言,距离发震断裂越远,地震滑坡分布越少,地震滑坡密集分布区距离发震断裂的距离从2公里到十几公里不等。

(2)地震滑坡的发育分布既与地震烈度有关,也与原始斜坡的地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质、沟谷发育密度等有关。在相同的地震烈度和地震峰值加速度条件下,对同震滑坡发育分布影响最大的是地形地貌和地质构造。

### References

- Ambraseys N N, Menu J M, 1988. Earthquake-induced ground displacements[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16 (7) : 985 - 1006 .
- Ashford S A, Sitar N, 1997. Topographic amplification in the 1994 Northridge earthquake: Analysis and observation[C]//6th U. S. National conference on earthquake engineering, Oakland: Earthquake Engineering Institute.
- Bo J S, Duan Y S, Chang C Y, et al., 2019. Some problems of study on slope stability under earthquake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 28 (1) : 1 - 8 (in Chinese with English abstract).
- Bao P P, Cui Y L, Xu C, et al., 2020. Analysis of landslide distribution caused by Hokkaido, Japan Mw 6.6 earthquake in 2018[J]. *Journal of Pingdingshan Institute of Technology*, 29 (2) : 33 - 40 (in Chinese with English abstract).
- Bao Y J, Gao M T, Jiang H, 2005. Probabilistic analysis of earthquake-induced landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24 (1) : 66 - 70 (in Chinese with English abstract).
- Cai S H, Wang L M, Yuan Z X, 1998. A preliminary study on the seismic landslide distance in the Shanxi-Gansu-Ningxia-Shanxi loess region[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 20 (4) : 75 - 82 (in Chinese with English abstract).
- Cao Y B, Dai F C, Xu C, et al., 2011. Discrete element simulation of deformation and movement mechanism for Tangjiashan landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30 (s1) : 2878 - 2887 (in Chinese with English abstract).
- Chang Z F, Chen X L, An X W, et al., 2016. Contributing factors to the failure of an unusually large landslide triggered by the 2014 Ludian, Yunnan, China, Ms6.5 earthquake. *Natural Hazards and Earth System Science*, 16 (2) : 497-507.
- Celebi M, 1987. Topographic and geological amplification determined from strong motion and aftershock records of 3 March 1985 Chile earthquake[J]. *Bull Ses Soc Am*, 77: 1141 - 1147 .
- Chen X L, Zhou Q, Ran H, et al., 2012. Earthquake-triggered landslides in southwest China[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12 (2) : 351 - 363 .
- Chen X L, Ran H L, Wang M M, 2012. Hazards zonation for potential earthquake-induced landslide area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55 (4) : 1269 - 1277 (in Chinese with English abstract).
- Chen X L, Shan X J, Zhang L, et al., 2019. Quick assessment of earthquake-triggered landslide hazards: A case study of the 2017 M<sub>s</sub> 7.0 Jiuzhaigou earthquake[J]. *Earth Science Frontiers*, 26 (2) : 312 - 320 (in Chinese with English abstract).
- Cui F P, Hu R L, Yin Y P, et al., 2010. 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*, 29 (2) : 319 - 327 (in Chinese with English abstract).
- Davis M J, 1972. Velocity analysis: An application of deterministic estimation to reflection seismology[J]. *IEEE Trans. Computers*, 21 (7) .
- Dreyfus D, Rathje E M, Jibson R W, 2013. The influence of different simplified sliding block models and input parameters on regional predictions of seismic landslides triggered by the Northridge earthquake[J]. *Engineering Geology*, 163: 41 - 54 .
- Gao Y P, Wang Y Q, Xin H B, 2001. The application of the artificial neural network in prediction of slope seismic stability[J]. *Journal of*

- Liaoning Technical University (Natural Science), 20 (4) : 431 – 433 (in Chinese with English abstract).
- Ding Y H, Wang Y Q, Sun J Z, 1999. Correlation between landslides and seislides and seismic parameters and its application in predicting slope earthquake disaster[J]. Chinese Journal of Geophysics, 42 (S1) : 101 – 107 (in Chinese with English abstract).
- Du J, 2012. Risk assessment of individual landslide[D]. Wuhan: China University of Geosciences, Wuhan.
- Fan W, Yang J, Liu T T, 2005. Grey neural network combination model and its application in landslide prediction[J]. Yangtze River, 36 (11) : 48 – 50 (in Chinese with English abstract).
- Hartzell S H, Carver D L, King K W, 1994. Initial investigation of site and topographic effects at Robinwood ridge, California[J]. Bull Ses Soc Am, 84: 1336 – 1349.
- Huang R Q, Li W L, 2008. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12<sup>th</sup> May, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27 (12) : 2585 – 2592 (in Chinese with English abstract).
- Huang R Q, Li W L, 2009. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 17 (1) : 19 – 28 (in Chinese with English abstract).
- Huang R Q, Pei X J, Li T B, 2008. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 16 (6) : 730 – 741 (in Chinese with English abstract).
- Huang R Q, 2009. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28 (6) : 1239 – 1249 (in Chinese with English abstract).
- Huang R Q, Xu Q, 2008. Catastrophic Landslides in China[M]. Beijing, Science Press.
- Huang W L, Yang Q H, Lv Y, et al., 2020. Relationship between distribution characteristics of prehistoric landslides and seismic activity along Qinling piedmont fault[J]. Journal of Engineering Geology, 28 (6) : 1259 – 1271 (in Chinese with English abstract).
- Hu G T, 1995. Landslide Dynamics[M]. Beijing, Geological Publishing House.
- Jiang Y, Wu Z H, Li J C, et al., 2014. The characteristics of landslides triggered by the Yushu M<sub>7.1</sub> earthquake and its seismogeology implication.[J]. Acta Geologica Sinica, 88 (6) : 1157 – 1176 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Y, Wu Z H, Liu Y H, et al., 2014. The characteristics of palaeo-earthquake landslides along Yushu faulted zone and their ages[J]. Geological Bulletin of China, 33 (4) : 503 – 516 (in Chinese with English abstract).
- Jibson R W, Keefer D K, 1993. Analysis of the seismic origin of landslide: Examples from the New Madrid seismic zone[J]. Geological Society of American Bulletin, 105 (4) : 521 – 536.
- Jibson R W, 1993. 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, DC: Transportation Research Board, 9–17.
- Kamp U, Growley B J, Khattak G A, et al., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. Geomorphology, 101 (4) : 631 – 642.
- Keefer D K, 1984. Landslides caused by earthquakes [J]. Geological Society of America Bulletin, 95 (4) : 406 – 421.
- Papadopoulos G A, Plessa A. Magnitude-distance relations for earthquake-induced landslides in Greece[J]. Engineering Geology, 58 (3-4) : 377–386.
- Li Q, Zhang J F, Luo Y, et al., 2019. Recognition of earthquake-induced landslide and spatial distribution patterns triggered by the Jiuzhaigou earthquake in August 8, 2017[J]. National Remote Sensing Bulletin, 23 (4) : 785 – 795 (in Chinese with English abstract).
- Li S D, 1999. Study on segmentation of active faults[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 35 (6) : 768 – 773 (in Chinese with English abstract).
- Li S D, Ren X S, Yue S Y, et al., 2001. Study of earthquake-landslide[J]. Research of Soil and Water Conservation, 8 (2) : 24 – 25 (in Chinese with English abstract).
- Li T C, 1979. Discussion on the Relationship between Earthquake and Landslide and How to Forecast Earthquake Induced Landslide[C]//The corpus of landslide (The second volume). Beijing: China Railway Publishing House, 127–132.
- Li W L, Wu J, Lv B X, 2011. Research on landslide triggered by earthquake: review and prospect[J]. Journal of Catastrophology, 26 (3) : 103 – 108 (in Chinese with English abstract).
- Li X Z, Kong J M, 2010. Runout distance estimation of landslide triggered by “5.12” Wenchuan earthquake[J]. Advanced Engineering Sciences, 42 (5) : 243 – 249 (in Chinese with English abstract).
- Li Z S, 2003. The state of the art of the research on seismic landslide hazard at home and abroad[J]. Journal of Catastrophology, 18 (4) : 64 – 70 (in Chinese with English abstract).
- Liang J, Cui S H, Pei X J, et al., 2021. Initiation mechanism of earthquake-induced large landsli-des considering structural damage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 43 (6) : 1039 – 1049 (in Chinese with English abstract).
- 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]. (2002–1–13) [2010–10–23].
- Liu J M, Wang T, Shi J S, et al., 2017. Emergency rapid assessment of landslide induced by the Jiuzhaigou M<sub>7.0</sub> earthquake, Sichuan, China[J]. Journal of Geomechanics, 23 (5) : 639 – 645 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Gao M T, Wu S R, 2016. Probabilistic seismic landslide hazard zonation method and its application[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 35 (S1) : 3100 – 3110 (in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Wang T, Shi J S, et al., 2018. The influence of different newmark displacement models on seismic landslide hazard assessment: A case study of Tianshui area, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (1) : 87 – 95 (in Chinese with English abstract).
- Liu K, Sun B T, Li Y G, et al., 2019. Study on the relationship between the earthquake damage distribution and geological structure of the 2015 M<sub>s</sub>8.1 Nepal earthquake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 28 (5) : 59 – 65 (in Chinese with English abstract).
- Liu K, Sun B T, Li Y G, et al., 2019. Landslide distribution pattern in the Himalayan subduction zone based on Mw 7.8 earthquake in Nepal[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93 (10) : 2666 – 2677 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, 2008. Study on Method to Single Lndslide Assessment[D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing.
- Luo L G, Pei X J, Huang R Q, 2020. Earthquake-triggered landslide occurrence probability in strong seismically mountainous areas: a case study of Jiuzhaigou National Geopark[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39 (10) : 2079 – 2093 (in Chinese with English abstract).
- Lu Y X, Wei L, Liu K, et al., 2020. Site effects of ground motions in landslide-concentrated area caused by the Haiyuan earthquake in 1920[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 42 (5) : 1151 – 1158 (in Chinese with English abstract).
- Ma S Y, Xu C, Tian Y Y, et al., 2019. Application of logistic regression model for hazard assessment of earthquake-triggered landslides: A case study of 2017 Jiuzhaigou (China) M<sub>s</sub>7.0 event[J]. *Seismology and Geology*, 41 (1) : 162 – 177 (in Chinese with English abstract).
- Ma S Y, Xu C, 2018. Overview of 2018 Earthquake Landslide Mechanism and Assessment Seminar[J]. *Seismology and Geology*, 40 (3) : 718 – 719 (in Chinese with English abstract).
- Mao Y L, Hu G T, Mao X H, et al., 2001. Mechanism of set-out violent-slide of slope mass during earthquake and its simulation by using discrete element method[J]. *Journal of Engineering Geology*, 9 (1) : 74 – 80 (in Chinese with English abstract).
- Newmark N M, 1965. Effects of earthquake on dams and embankments[J]. *Geotechnique*, 15 (2) : 139 – 160 .
- Owen L A, Kamp U, Khattak G A, et al., 2008. Landslides triggered by the 8 October 2005 Kashmir earthquake[J]. *Geomorphology*, 94: 1 – 9.
- Pailse M, Jibson R W, 2000. 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*, 58: 251 – 270 .
- Qiao J P, Pu X H, 1992. A preliminary study on the distributive regulation of seismic landslide in Sichuan and Yunnan[J]. *Journal of Seismological Research*, 15 (4) : 411 – 417 (in Chinese with English abstract).
- Qiao J P, Pu X H, 1987. An introduction to earthquake landslides in the contiguous area between southwest Sichuan and north Yunnan[J]. *Mountain Research*, 5 (3) : 181 – 186 (in Chinese with English abstract).
- Qian H T, Xiao R H, 2018. An estimation method for permanent displacements of basic earthquake landslide model with full consideration of slid characters from shake table tests[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26 (6) : 1585 – 1592 (in Chinese with English abstract).
- Qi S W, Wu F Q, Liu C L, et al., 2004. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 23 (16) : 2792 – 2796 (in Chinese with English abstract).
- Qi S W, Xu Q, Liu C L, et al., 2009. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5-12 Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 17 (1) : 39 – 49 (in Chinese with English abstract).
- Rajabi A M, Khamchian M, Mahdavi M R, et al., 2013. A time probabilistic approach to seismic landslide hazard estimates in Iran[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 48: 25 – 34 .
- Sato H P, Hasegawa H, Fujiwara S, et al., 2006. Interpretation of landslide distribution triggered by the 2005 Northern Pakistan earthquake using SPOT5 imagery[J]. *Landslides*, 4 (2) : 113 – 122 .
- Seed H B, 1968. Landslides during earthquakes due to soil liquefaction[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94 (SM5) : 1053 – 1122 .
- Song L S, 1994. Historical earthquake and landslide disaster [J]. *Earthquake Research in Shanxi*, 2: 55 – 57 (in Chinese with English abstract).
- Sun C S, Cai H W, 1997. Developing and distributing characteristics of collapses and landslides during strong historic earthquake in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 6 (1) : 25 – 30 (in Chinese with English abstract).
- Shin A, Takashi K, Hiroyuki F, 2008. Trampoline effect in extreme ground motion[J]. *Science*, 322: 727 – 730 .
- Tang C A, Zuo Y J, Qin S F, et al., 2009. Shallow spallation and ejection model of slope in Wenchuan earthquake and its dynamic interpretation. [C]//Proceedings of the 10th National Conference on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: China Electric Power Press, 258–262.
- Terzaghi K, Peek R B, 1948. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley.
- Wang K L, Song H Z, Liu H M, 1983. The earthquake disaster for the earthquakes in China and its implications[J]. *Seismology and Geology*, 5 (1) : 59 – 69 (in Chinese with English abstract).
- Wang L M, Sun J J, Xu S H, et al., 2008. Characteristics of seismic subsidence of loess site induced by blasting ground motion[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 27 (5) : 913 – 921 (in Chinese with English abstract).

- Wang T, Wu S R, Shi J S, et al., 2015. Concepts and mechanical assessment method for seismic landslide hazard: A review[J]. *Journal of Engineering Geology*, 23 (1) : 93 – 104 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Wu S R, Shi J S, et al., 2013a. Application and validation of seismic landslide displacement analysis based on newmark model: A case study in Wenchuan earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87 (S) : 393 – 397.
- Wang T, Wu S R, Shi J S, et al., 2013b. Case study on rapid assessment of regional seismic landslide hazard based on simplified Newmark displacement model: Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 21 (1) : 18 – 26.
- Wang, Y F, Cheng, Q G, Lin, Q W, et al., 2018. Insights into the kinematics and dynamics of the Luanshibao rock avalanche (Tibetan Plateau, China) based on its complex surface landforms[J]. *Geomorphology*, 317: 170 – 183.
- Wang Y Q, Gao Y P, Xin H B, 2002. A research on prediction of seismic stability of slopes by grey clustering method[J]. *Construction*, 32 (6) : 44 – 47 (in Chinese with English abstract).
- Wieczorek G F, Wilson R C, Harp E L, 1985. Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County, California[C]//US Geological Survey. Miscellaneous investigation maps. Reston: USGS, I-1257-E.
- Wu, Z H, Barosh, P. J, Ha G H, et al., 2019. Damage induced by the 25 April 2015 Nepal earthquake in the Tibetan border region of China and increased post-seismic hazards. *Natural Hazards and Earth System Science*, 19 (4) : 873–888.
- Wu S R, Shi J S, Yao X, et al., 2008. Analysis and evaluation of geohazard intensity of the Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27 (11) : 1900 – 1906 (in Chinese with English abstract).
- Wu S R, Shi J S, Wang T, et al., 2009. The principle, method and example of geological disaster activity intensity assessment[J]. *Geological Bulletin of China*, 28 (08) : 1127–1137 (in Chinese with English abstract).
- Xia M Y, Chen G Q, Yu P C, et al., 2021. Improvement of DDA with a New Unified Tensile Fracture Model for Rock Fragmentation and its Application on Dynamic Seismic Landslides. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Xin H B, Wang Y Q, 1999. Earthquake induced landslide and avalanche[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 21 (5) : 591 – 594 (in Chinese with English abstract).
- Xu C, Dai C F, Xu S N, et al., 2013. Application of logistic regression model on the Wenchuan earthquake triggered landslide hazard mapping and its validation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40 (3) : 98 – 104 (in Chinese with English abstract).
- Xu C, Xu X W, Yu G H, 2013. The Yushu earthquake triggered landslide hazard evaluation based on weight of evidence method[J]. *Seismology and Geology*, 35 (1) : 151 – 164 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Li W L, 2010. Distribution of large-scale landslide induced by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 18 (6) : 818 – 826 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y R, Zeng J L, Allen M B, et al., 2020. Landslides of the 1920 Haiyuan earthquake, northern China[J]. *Landslides*.
- Xu Y R, Du P, Li W Q, et al., 2020. A case study on AD 1718 Tongwei M7.5 earthquake triggered landslides—Application of landslide database triggered by historical strong earthquakes on the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63 (3) : 1235 – 1248 (in Chinese with English abstract).
- Yan D H, Bo J S, Li X B, et al., 2019. Simulation analysis of Hongtuchuan landslide in Haiyuan earthquake Quasi-static strength reduction method[J]. *Science Technology and Engineering*, 28 (19) : 50 – 55 (in Chinese with English abstract).
- Yang S, Chang C Y, Li X B, et al., 2020. Quick assessment of the seismic stability of loess slopes based on a logistic regression model[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 42 (2) : 512 – 516 (in Chinese with English abstract).
- Yang T, Deng R G, Liu X L, 2002. The distributing and subarea character of the seismic landslide in Sichuan[J]. *Mountain Research*, 20 (4) : 456 – 460 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z H, Wu R A, Guo C B, et al., 2021. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. *Geology in China*, 49 (2) : 355 – 368 (in Chinese with English abstract).
- Yao Q L, 2007. Distribution characteristics and macroscopic influencing factors of seismic loess landslides in northwest China[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 30 (1) : 41 – 47 (in Chinese with English abstract).
- Yin Y P, 2008. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 16 (4) : 433 – 444 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D H, 2010. Research on disaster risk assessment model of single landslide using GIS and RS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.
- Zhang D, Wu Z H, Li Jia C, et al., 2013. An overview on earthquake-induced landslide research[J]. *Journal of Geomechanics*, 19 (3) : 225 – 241 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Y, Wang S T, Wang L S, 1993. Principles of engineering geological analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Zhang Y S, Yang Z H, Guo C B, et al., 2017. Predicting landslide scenes under potential earthquake scenarios in the Xianshuihe fault zone, Southwest China[J]. *J. Mt. Sci.*, 14 (7) : 1262 – 1278.
- Zhao B, Wang Y S, Wu J F, et al., 2021. The Mogangling giant landslide triggered by the 1786 Moxi M 7.75 earthquake, China [J]. *Natural Hazards*.
- Zhou B G, Zhang Y M, 1994. Some characteristic of earthquake-induced

- landslide in southwestern China[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 16 (1) : 95 - 103 (in Chinese with English abstract).
- Zhou W Y, 1990. *Advanced rock mechanics*[M]. Beijing: China Water & Power Press.
- Zhao H, Song E X, 2012. A method for predicting co-seismic displacements of slopes for landslide hazard zonation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 40: 62 - 77.
- Zhou S H, Fang L G, Liu B C, 2015. Slope unit-based distribution analysis of landslides triggered by the April 20, 2013, Ms7.0 Lushan earthquake [J]. *Arab J Geosci*. 8: 7855-7868.
- ### 附中文参考文献
- 薄景山, 段玉石, 常晁瑜, 等, 2019. 斜坡地震稳定性研究的若干问题[J]. *自然灾害学报*, 28 (1) : 1 - 8.
- 鲍鹏鹏, 崔玉龙, 许冲, 等, 2020. 2018年日本北海道 Mw 6.6级地震滑坡分布分析[J]. *河南城建学院学报*, 29 (2) : 33 - 40.
- 鲍叶静, 高孟潭, 姜慧, 2005. 地震诱发滑坡的概率分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 24 (1) : 66 - 70.
- 才树华, 王兰民, 袁中夏, 1998. 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*, 20 (4) : 75 - 82.
- 曹琰波, 戴福初, 许冲, 等, 2011. 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*, 30 (s1) : 2878 - 2887.
- 陈晓利, 冉洪流, 王明明, 2012. 潜在地震滑坡危险区划方法[J]. *地球物理学报*, 55 (4) : 1269 - 1277.
- 陈晓利, 单新建, 张凌, 等, 2019. 地震诱发滑坡的快速评估方法研究: 以2017年 Mw 7.0级九寨沟地震为例[J]. *地学前缘*, 26 (2) : 312 - 320.
- 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等, 2010. 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*, 29 (2) : 319 - 327.
- 高艳平, 王余庆, 辛鸿博, 2001. 神经网络在预测边坡地震稳定性中的应用[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 20 (4) : 431 - 433.
- 丁彦慧, 王余庆, 孙进忠, 1999. 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]. *地球物理学学报*, 42 (S1) : 101 - 107.
- 杜鹏, 2012. 单体滑坡灾害风险评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 樊伟, 杨军, 刘廷廷, 2005. 灰色神经网络组合模型及在滑坡预测中的应用[J]. *人民长江*, 36 (11) : 48 - 50.
- 黄润秋, 李为乐, 2008. “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*, 27 (12) : 2585 - 2592.
- 黄润秋, 李为乐, 2009. 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*, 17 (1) : 19 - 28.
- 黄润秋, 裴向军, 李天斌, 2008. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. *工程地质学报*, 16 (6) : 730 - 741.
- 黄润秋, 2009. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. *岩石力学与工程学报*, 28 (6) : 1239 - 1249.
- 黄润秋, 许强, 2008. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京, 科学出版社.
- 黄伟亮, 杨虔灏, 吕艳, 等, 2020. 秦岭北麓古滑坡分布特征与地震活动关系研究[J]. *工程地质学报*, 28 (6) : 1259 - 1271.
- 胡广韬, 1995. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社.
- 蒋瑶, 吴中海, 李家存, 等, 2014. 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*, 88 (6) : 1157 - 1176.
- 蒋瑶, 吴中海, 刘艳辉, 等, 2014. 青海玉树活动断裂带的多期古地震滑坡及其年龄[J]. *地质通报*, 33 (4) : 503 - 516.
- 李强, 张景发, 罗毅, 等, 2019. 2017年“8.8”九寨沟地震滑坡自动识别与空间分布特征[J]. *遥感学报*, 23 (4) : 785 - 795.
- 李树德, 1999. 活动断层分段研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 35 (6) : 768 - 773.
- 李树德, 任秀生, 岳升阳, 等, 2001. 地震滑坡研究[J]. *水土保持研究*, 8 (2) : 24 - 25.
- 李天池, 1979. 地震与滑坡的关系及地震滑坡预测探讨[C]//滑坡文集, 第二集. 北京: 中国铁道出版社, 127 - 132.
- 李为乐, 伍霁, 吕宝雄, 2011. 地震滑坡研究回顾与展望[J]. *灾害学*, 26 (3) : 103 - 108.
- 李秀珍, 孔纪名, 2010. “5.12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 42 (5) : 243 - 249.
- 李忠生, 2003. 国内外地震滑坡灾害研究综述[J]. *灾害学*, 18 (4) : 64 - 70.
- 梁靖, 崔圣华, 裴向军, 等, 2021. 考虑岩体构造损伤的强震大型滑坡启动成因[J]. *岩土工程学报*, 43 (6) : 1039 - 1049.
- 刘甲美, 王涛, 石菊松, 等, 2017. 四川九寨沟 Mw7.0级地震滑坡应急快速评估[J]. *地质力学学报*, 23 (5) : 639 - 645.
- 刘甲美, 高孟潭, 吴树仁, 2016. 概率性地震滑坡危险性区划方法及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 35 (S1) : 3100 - 3110.
- 刘甲美, 王涛, 石菊松, 等, 2018. 基于不同位移预测模型的地震滑坡危险性评估研究—以天水地区为例[J]. *地质力学学报*, 24 (1) : 87 - 95.
- 刘亢, 孙柏涛, 李亦纲, 等, 2019. 2015年尼泊尔 Mw8.1地震震害分布与地质构造关系研究[J]. *自然灾害学报*, 28 (5) : 59 - 65.
- 刘亢, 李海兵, 李亦纲, 等, 2019. 基于尼泊尔 Mw7.8地震的喜马拉雅俯冲带滑坡分布规律研究[J]. *地质学报*, 93 (10) : 2666 - 2677.
- 刘鑫, 2008. 单体滑坡风险评价方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 罗路广, 裴向军, 黄润秋, 2020. 强震山区地震滑坡发生概率研究—以九寨沟国家地质公园为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 39 (10) : 2079 - 2093.
- 卢育霞, 魏来, 刘琨, 等, 2020. 1920年海原地震滑坡密集区的地震场效应研究[J]. *地震工程学报*, 42 (5) : 1151 - 1158.
- 马思远, 许冲, 田颖颖, 等, 2019. 基于逻辑回归模型的九寨沟地震滑坡危险性评估[J]. *地震地质*, 41 (1) : 162 - 177.
- 马思远, 许冲, 2018. 2018年地震滑坡机理与评估研讨会概述[J]. *地震地质*, 40 (3) : 718 - 719.
- 毛彦龙, 胡广韬, 毛新虎, 等, 2001. 地震滑坡启程剧动的机理研

- 究及离散元模拟[J]. 工程地质报, 9(1): 74-80.
- 乔建平, 蒲晓虹, 1992. 川滇地震滑坡分布规律探讨[J]. 地震研究, 15(4): 411-417.
- 乔建平, 蒲晓, 1987. 川西南滇北接壤带地震滑坡概述[J]. 山地研究, 5(3): 181-186.
- 钱海涛, 肖锐铨, 2018. 充分考虑振动台实验滑移特征的地震滑坡基本单元体永久位移估算方法研究[J]. 工程地质学报, 26(6): 1585-1592.
- 祁生文, 伍法权, 刘春玲, 等, 2004. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 23(16): 2792-2796.
- 祁生文, 许强, 刘春玲, 等, 2009. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J]. 工程地质学报, 17(1): 39-49.
- 宋立胜, 1994. 历史地震与滑坡灾害[J]. 山西地震, 2: 55-57.
- 孙崇绍, 蔡红卫, 1997. 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, 6(1): 25-30.
- 唐春安, 左宇军, 秦泗风, 等, 2009. 汶川地震中的边坡浅层散裂与抛射模式及其动力学解释[C]//第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 中国电力出版社, 258-262.
- 王克鲁, 宋惠珍, 刘慧敏, 1983. 中国地震震害特征及其意义[J]. 地震地质, 5(1): 59-69.
- 王兰民, 孙军杰, 徐舜华, 等, 2008. 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, 27(5): 913-921.
- 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等, 2015. 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, 23(1): 93-104.
- 王余庆, 高艳平, 辛鸿博, 2002. 用灰色聚类方法预测边坡稳定性研究[J]. 工业建筑, 32(6): 44-47.
- 吴树仁, 石菊松, 姚鑫, 等, 2008. 四川汶川地震地质灾害活动强度分析评价[J]. 地质通报, 27(11): 1900-1906.
- 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等, 2009. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 28(8): 995-1005.
- 辛鸿博, 王余庆, 1999. 岩土边坡地震崩滑及其初判准则[J]. 岩土工程学报, 21(5): 591-594.
- 许冲, 戴福初, 徐素宁, 等, 2013. 基于逻辑回归模型的汶川地震滑坡危险性评价与检验[J]. 水文地质工程地质, 40(3): 98-104.
- 许冲, 徐锡伟, 于贵华, 2013. 基于证据权方法的玉树地震滑坡危险性评价[J]. 地震地质, 35(1): 151-164.
- 许强, 李为乐, 2010. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报, 18(6): 818-826.
- 徐岳仁, 杜朋, 李文巧, 等, 2020. 1718年通渭M7.5地震滑坡特征分析-黄土高原历史强震触发滑坡数据库的应用[J]. 地球物理学报, 63(3): 1235-1248.
- 闫东晗, 薄景山, 李孝波, 等, 2019. 海原特大地震红土川滑坡拟静力强度折减法模拟分析[J]. 科学技术与工程, 28(19): 50-55.
- 杨顺, 常晁瑜, 李孝波, 等, 2020. 基于Logistic回归模型的黄土斜坡地震稳定性快速评判方法[J]. 地震工程学报, 42(2): 512-516.
- 杨涛, 邓荣贵, 刘小丽, 2002. 四川地区地震崩塌滑坡的基本特征及危险性分区[J]. 山地学报, 20(4): 456-460.
- 杨志华, 吴瑞安, 郭家宝, 等, 2021. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. 中国地质, 49(2): 355-368.
- 姚清林, 2007. 中国西北黄土地区地震崩滑的分布与宏观影响因素[J]. 气象与减灾研究, 30(1): 41-47.
- 殷跃平, 2008. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 16(4): 433-444.
- 张东辉, 2010. 采用GIS和RS技术研究单体滑坡灾害风险评估模型[D]. 成都: 成都理工大学.
- 张铎, 吴中海, 李家存, 等, 2013. 国内外地震滑坡研究综述[J]. 地质力学学报, 19(3): 225-241.
- 张俾元, 王士天, 王兰生, 1993. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社.
- 周本刚, 张裕明, 1994. 中国西南地区地震滑坡的基本特征[J]. 西北地震学报, 16(1): 95-103.
- 周维垣, 1990. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社.