

崔玉龙,刘爱娟.区域边坡地震危险性评价理论研究进展[J].地震工程学报,2022,44(3):518-526.DOI:10.20000/j.1000-0844.20191021001

CUI Yulong, LIU Aijuan. Advances in the theory of seismic hazard assessment of regional slopes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 518-526. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20191021001

## 区域边坡地震危险性评价理论研究进展

崔玉龙<sup>1</sup>, 刘爱娟<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;

2. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 地震滑坡会对自然环境和人民生活带来极大破坏,在大区域范围内对边坡遭受地震影响的程度进行评价判断,主要采用具有预测性质的潜在地震诱发滑坡危险性评估的方法。因此,深入研究边坡地震危险性分析的基本理论并作出符合实际的危险性分布图对工程建设和灾害防治具有较大意义。梳理并阐述具有预测性质的边坡地震危险性分析所需数据资料及各类数据的研究进展,将利用永久位移法进行边坡地震危险性评价所需数据归纳为三种:(1)边坡在地震影响下破坏程度的判定依据;(2)区域地震动参数如峰值加速度、阿里亚斯强度;(3)边坡坡体基本参数如黏聚力、摩擦角、重度、滑块厚度、坡角等。边坡地震危险性评价的准确程度与这三类数据的研究程度与准确性有关。文章对三类数据分别详细阐述各自的研究现状与成果应用,最后分析理论存在的部分问题以及以后的研究方向。

**关键词:** 地震边坡; 地震危险性评价; Newmark 永久位移; 永久位移预测模型; 地震动预测模型

**中图分类号:** TU42

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2022)03-0518-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20191021001

## Advances in the theory of seismic hazard assessment of regional slopes

CUI Yulong<sup>1</sup>, LIU Aijuan<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, Hubei, China)

**Abstract:** Seismic landslides will bring great damage to the natural environment and people's lives. To evaluate and judge the extent of seismic impact on slopes in a large area, the risk assessment method of potential earthquake-induced landslides with predictive properties is mainly adopted. It is of great significance for engineering construction and disaster prevention to deeply study the basic theory of seismic slope hazard analysis and to draw the actual hazard distribution map. The research progress of data for seismic hazard analysis of slopes with predictive properties is reviewed. The data for evaluating slope seismic risk with permanent displacement method can be classified into three types: (1) The judgement basis of slope failure degree under the influence of

收稿日期:2019-10-21

基金项目:安徽省高校自然科学研究项目(KJ2020ZD34);国家自然科学基金资助项目(41807267)

第一作者简介:崔玉龙(1989-),男,主要从事地震滑坡方面的研究工作。E-mail:ylcui@aust.edu.cn。

earthquake; (2) Regional ground motion parameters, such as peak acceleration and Arias intensity; (3) The basic parameters of slope, such as cohesive force, friction angle, gravity, slider thickness, and slope angle. The accuracy of slope seismic risk assessment is related to the depth and accuracy of the three kinds of data. The research status and application of the three types of data are described in detail. Finally, some problems in the theory and the future research directions are analyzed.

**Keywords:** seismic slope; seismic hazard assessment; Newmark permanent displacement; prediction model of permanent displacement; ground motion prediction model

## 0 引言

地震是所有触发滑坡因素中最危险的一种,能量巨大的地震甚至在地貌的改变上起着主导作用。由于技术水平的限制,地震发生后,早期的地质灾害统计工作相对缓慢且不够充分。近年来,人们加强了对地震触发滑坡的统计和编目工作,地震滑坡研究取得了较大进展。

对于大区域边坡地震危险性评价而言,王涛等<sup>[1]</sup>对评价的类型进行了阐述,并着重指出具有预测性质的潜在地震诱发滑坡危险性评估的缺失是目前地震滑坡危险性研究中的主要问题之一。从实际应用角度讲,防患于未然的思想主要体现在预测性边坡地震危险性分析之上,对该问题的深入研究对工程建设和灾害防治具有较大意义。本文主要梳理并阐述具有预测性质的边坡地震危险性分析所需数据资料及各类数据的研究进展。

目前,在区域范围内对地震边坡进行危险性分析与评价主要以边坡的 Newmark 永久位移作为评价参数。国内外已有大量文献求算边坡地震时产生的永久位移或失稳概率进行区域范围内边坡危险性分析与评价<sup>[2-9]</sup>。利用永久位移法进行边坡地震危险性评价所需数据可以归纳为三个方面:(1)边坡在地震影响下破坏程度的判定依据;(2)区域地震动参数如峰值加速度、阿里亚斯强度;(3)边坡坡体基本参数如黏聚力、摩擦角、重度、滑块厚度、坡角等。这三个方面既相互独立,又相互联系,它们各自的准确度均影响着评价结果的精确程度。

## 1 地震边坡破坏判定依据

边坡在地震影响下破坏程度的判定依据以边坡稳定性分析为理论基础。目前地震边坡稳定性分析方法主要有拟静力法、数值分析法和永久位移法。拟静力法和数值分析法需要提供详细的坡体材料和形态参数以及地震动数据,难以应用在大区域分析

中。永久位移法又称 Newmark 位移法,由 Newmark 于 1965 年提出<sup>[10]</sup>。Newmark 位移原本作为一种判断指标应用在堤坝稳定性分析中,后来越来越广泛地应用于边坡稳定性分析。在实际的地震滑坡危险性评价中,为了计算出 Newmark 位移,需要有当地的加速度时程曲线。然而,特定地点的强震记录并不容易获取,所以 Ambraseys 和 Jibson 等在 Newmark 提出的临界加速度比的基础上发展了经验性的回归关系,称为永久位移预测模型,以此作为无强震记录地区地震边坡危险性评估的依据<sup>[6,9,11-13]</sup>。永久位移预测模型主要建立永久位移  $D_N$  与地震动峰值加速度  $PGA$ 、边坡临界加速度  $a_c$  以及阿里亚斯强度  $I_A$  之间的关系,是一种建立在统计学意义上的关系模型。Ambraseys、Jibson 等创立了具有代表性的永久位移预测模型表达形式后,多个国家的研究者也根据所研究地区的实测地震资料做出了符合本地区区域特征的模型表达式<sup>[14-16]</sup>。

利用永久位移预测模型作为计算依据,一部分文献根据数值大小对永久位移进行分级<sup>[3]</sup>,从而判定研究区各位置间地震危险性的相对大小;另一部分文献通过拟合永久位移与实际地震滑坡的关系得到以 Weibull 曲线为表达形式的失稳概率模型<sup>[2,11-12,17-18]</sup>,进而计算研究区的失稳概率并进行危险性分级评价<sup>[8,12,19-20]</sup>。

这种由某次地震诱发滑坡与当地地形与地质条件下的永久位移拟合而得的概率公式具有一定程度的地域性。由于地质状况和地形的差异,同样的地震能量作用下,不同区域的边坡失稳概率未必相同。因此,从理论上讲,某地的失稳概率公式并不适合直接应用于其他地区的地震边坡失稳概率计算与分析。获取通用型的失稳概率公式还需要更广泛和深入的研究。

鲍叶静等<sup>[21]</sup>采用震中距与震级的关系、刘甲美等<sup>[22]</sup>采用 5 cm 临界失稳位移法思路,结合概率地

震危险性分析法,判断了各自研究区边坡的地震失稳概率。虽然都以边坡失稳概率命名,但上述文献中失稳概率计算方法的基本理论不同,失稳概率的判定标准、方法也不相同。

## 2 区域地震动参数

从永久位移预测模型表达式可以看出,峰值加速度和阿里亚斯强度是边坡地震危险性评价过程中采用最多的两种地震动参数。为了建立合理适用、符合实际的峰值加速度和阿里亚斯强度分布图,需分析地震危险性评价方法、地震动衰减关系、因场地效应或地形效应对地震动参数的调整这三类影响峰值加速度和阿里亚斯强度大小的关键因素。目前对震后峰值加速度的分布有一定数量的研究,而对震后阿里亚斯强度分布的研究成果较少,因此本文主要列举地震动峰值加速度预测过程的相关研究成果,对阿里亚斯强度仅做简要叙述。

### 2.1 地震危险性评价方法

在地震未知区域建立可能产生的地震动峰值加速度是一件非常困难的事。目前的地震危险性评价方法主要有确定性地震危险性分析方法(简称确定性方法)、概率地震危险性分析方法(简称概率法)以及有限断层震源模型方法。

SANTI PAILOPLEE 等<sup>[23]</sup>以峰值加速度为评价参数分别用概率方法和确定性方法评价了泰国及邻近地区的地震危险性,结果显示这两种方法得到的峰值加速度结果具有一定相似性,确定性方法得到的地震危险性程度更高,两种方法可分别用于指导不同的工程用途。RODRÍGUEZ-PECES 等<sup>[24]</sup>分别利用概率法和确定性方法做出 Newmark 位移分布图并与已有滑坡分布图进行比较,结果显示依据 475 年和 975 年地震重现期得出的滑坡重合性非常差,依据 2 475 年地震重现期难以得出相应的重合性,而依据确定性方法得出的永久位移结果和已有滑坡具有良好的一致性。确定性方法实现了特定地震场景的模拟实现,由于其不考虑地震复发周期,揭示了沿活动断层带的最高危险水准。

目前,震源参数的设计思想包含设定地震的概念,主要包括设定震源位置与震级。目前,在确定性方法和概率法中,设定地震的思想均有体现。《地震灾害预测及其信息管理系统技术规范》<sup>[27]</sup>将设定地震定义为“预期对某一区域可能产生震害的具体地震,包括震中、震级”。这种设定确切震源位置和震

级等参数的做法也是目前地震危险性评价的发展方向。设定震源位置时,高孟潭等<sup>[28]</sup>、李山有等<sup>[29]</sup>、胥广银等<sup>[30]</sup>、刘博研等<sup>[31]</sup>均强调设定地震与地震构造的一致性,认为未来地震沿断层发生时应均匀分布,可直接在贡献潜源或发震断裂上设置震源。

无论是确定性方法还是概率法,其目的均是预测性地给出某工程场点或者研究区域的地震动参数和规律。在地震危险性评价过程中,应该选用哪种方法,应根据研究目的和需求、区域范围大小、详细地质构造状况等综合确定。

对于区域内具有活断层的地震危险性评价,还有一种基于有限断层用地震学知识建立震源模型的方法<sup>[25-26]</sup>。由于是基于活动断层以及相关数学理论建立的震源模型,需要提供更多的活断层信息如断裂的长度、宽度、埋藏深度、平均错动量等。这种方法虽然对震源的讨论非常细致,但由于对活断层的探查需要大量投入,所以在缺乏强震观测数据的地方应用还不太多。

### 2.2 地震动衰减关系

#### (1) 地震动衰减关系简介

地震动衰减关系也称为地面运动预测方程,指的是某种地震动参数如峰值加速度通过震级、距离、场地等参数表征的关系公式。一般利用具有一定物理意义的关系式与实际地震观测资料做回归分析确定。地面运动预测方程种类很多,自 1964 年至今每年都有新模型或改进模型出现,每种模型的适用条件也不相同。在区域边坡地震危险性评价中,大多使用地震动衰减关系计算获得地震动参数。

由于各地地质条件、场地条件的巨大差异,地震动衰减关系具有很强的地域性。世界上多个国家也都依据相应的地震动数据记录建立了各自区域的衰减关系方程。美国西部地区的下一代衰减关系(NGA West)研究代表了地震动衰减关系的研究前沿。该项目组利用 173 次地震事件的 3 551 条强震记录,拟合出 5 个综合性地震衰减关系模型<sup>[32-36]</sup>。但是,这些利用 NGA 地震数据库所拟合的衰减关系并不能直接应用于我国的地震动参数计算,其主要原因在于:(1)NGA 衰减关系使用的震级和震源机制等地震参数、断层距和剪切波速等场地参数与我国常用的模型不同且表达式组成复杂,计算不便;(2)一般认为不同地区的地震动衰减特点存在差异,如果采用世界上其他地区的衰减关系难以与我国地震区地震环境相符合。

我国地震研究者根据相对齐全的汶川地震和芦山地震实测资料,也建立了各自的衰减模型<sup>[37-41]</sup>。在无其他可用实震资料的情况下,附近地区可以采用这些参数及关系模型做出峰值加速度分布图。

虽然利用地震动峰值加速度和边坡临界加速度可以做出研究区域的永久位移分布图,但按照随机过程观点,加速度峰值在地震时程中的出现并不固定,不宜仅以此参数作为地震动特性的标志。阿里亚斯强度则能够包含全部时程中的地震动信息,很多文献指出阿里亚斯强度能更全面准确表达地震波的能量大小。阿里亚斯强度包含了震动幅度、频率和持时的全部信息,描述了观测场点震动总释放能量,比其他地震动参数更能全面反映地震整体情况。利用阿里亚斯强度作为地震触发滑坡的研究参数,即是利用地震动总强度描述其与滑坡的关系,与实际破坏情况更加吻合。

与峰值加速度衰减理论相比,目前阿里亚斯强度衰减关系研究主要体现在某次地震的衰减规律成果,还不具有通用性。阿里亚斯强度衰减关系表达式已从最简单的阿里亚斯强度与震级和距离的关系<sup>[9,42-48]</sup>到关系中包含场地项以及断层项和  $v_{S30}$  项<sup>[49-52]</sup>。可以看出阿里亚斯强度衰减关系也在不断发展与改进,一定程度上能够体现场地、地形和断层类型对震后阿里亚斯强度分布规律的影响。

#### (2) 衰减公式与权重选取原则

目前已公开发表的地震动衰减关系已有很多,选择合适的衰减关系是获得研究区域相对准确峰值加速度的关键步骤。FABRICE COTTON 等<sup>[53]</sup>给出了7条选择标准:①模型应与研究区具有相似的地质构造;②模型应公开发表;③模型数据来源应充足;④模型建立时间应较新;⑤模型应适合于工程应用;⑥模型表达式应科学合理;⑦回归方法和系数应正确合理。

其中第①条与第⑥条对峰值加速度计算起着关键作用。由于中国地域广大,各区域地层分布与地质构造差别很大,应尽量选取与研究区位置相符合区域或相近区域的关系表达式。衰减关系表达式一般包含震级和距离两个参数,在中等地震和大地震中,近源区存在震级饱和的现象,这种现象一般用  $ae^{bm}$  项进行表述。该表述更加符合近震源处地震动并不随震级增大而显著增加的特点,这也是衰减关系表达式的一种发展与进步。根据文雯等<sup>[54]</sup>的分析,评价潜源近距离处的影响应选用含震级饱和项

的表达式,而评价潜源远距离处的影响则应选用不含震级饱和项的表达式。

根据不同地震动预测方程计算得到的基岩峰值加速度之间存在着不可避免的差异。为了减少这种差异,可采用逻辑树赋予权重的方法综合若干种地震动衰减关系做出研究区域的地震基岩峰值加速度分布图,如文献<sup>[55-58]</sup>。为所选择的地震动衰减关系确定权重时,以上文献主要考虑了与研究区域地理位置的符合情况、衰减关系数据记录来源的数量和可靠性、衰减关系的适用震级范围、地质构造的相似性、衰减关系的表达形式、衰减关系的确立时间等。

权重的选择具有主观性,SABETTA 等<sup>[59]</sup>对衰减关系选取和逻辑树权重选择的研究发现选取合适衰减关系的重要性远远大于权重方案选择。所以建议尽量选取适合于研究区域的衰减关系而把权重判断与分配作为辅助手段。

### 2.3 地震动参数调整

#### (1) 峰值加速度的调整

从原理上讲,基于地震动衰减关系建立的峰值加速度是地震波传至基岩时所呈现出的大小,然而地表不同的场地条件和地形条件对地震动参数起着放大或缩小的作用。实际应用中,可以采取在基岩峰值加速度上乘以系数的方法进行调整。

##### ① 场地效应系数

吕悦军等<sup>[60]</sup>研究发现,峰值加速度的场地效应与多种因素有关,如场地平均剪切波速、基岩输入地震动强度和岩土层的厚度等。

场地效应调整方法,一种为 NGA 预测模型工作组个别学者在建立地面运动预测方程时综合了场地效应,将其以地表 30 m 平均剪切波速  $v_{S30}$  作为自变量列入衰减公式;另一种为利用实测加速度值拟合得到函数表达式,并用于计算连续分布的场地效应系数,主要文献有<sup>[61-64]</sup>。

##### ② 地形效应系数

基岩峰值加速度传至地表,同样会受到地形效应的影响。地形效应的研究方法主要有实际地表监测、物理模拟和数值模拟三种。实际地表监测数据较少,物理模拟主要利用振动台模拟单体边坡,均难以得出通用的函数表达式。BOUCHOVALAS 等<sup>[65]</sup>利用数值模拟方法得出了地形放大系数的表达式,可用于计算区域连续分布的地形效应系数。

##### ③ 连续性 $v_{S30}$ 的计算

场地效应系数和地形效应系数的函数表达式都直接或者间接含有  $v_{S30}$ 。对于区域连续性  $v_{S30}$  的获取,由于无法大范围采用实测手段,可以用数字高程模型 DEM 获得坡角等信息,然后利用地形梯度  $G$  与  $v_{S30}$  的关系互相推求<sup>[20]</sup>。对于地形与  $v_{S30}$  间的关系,一些学者已经做了研究,如 MATSUOKA 等<sup>[66]</sup>等研究发现  $v_{S30}$  与地形梯度、地貌及高程具有较好的相关性;为了得到缺少实测数据区域的  $v_{S30}$  值, WALD 等<sup>[67]</sup>和 ALLEN 等<sup>[68]</sup>通过统计地形梯度与  $v_{S30}$  之间的相关性,提出利用场地地形梯度  $G$  计算  $v_{S30}$  的方法。

## (2) 阿里亚斯强度的调整

目前对于阿里亚斯强度的调整主要出现在衰减关系中,以  $v_{S30}$  项作为反应场地效应对峰值加速度的影响从而造成阿里亚斯强度的改变。

## 3 边坡基本参数

计算 Newmark 永久位移需要用到的边坡参数主要有边坡坡角、重度、黏聚力和摩擦角、Newmark 滑块的假设厚度。在区域范围内,一般应取得区域地质图并根据地层分布确定边坡参数,但取值依据较少、人为主观性过大都严重影响着参数的准确性。为了便于计算,有些文献[3-4]采用了将研究区出现的岩土类别依据岩性进行了合并分组然后赋参数值的方法,这种方法抹杀了一部分岩土体的空间分布差异性,存在着较大主观性与不准确性,其取值与实际参数之间的误差会导致高估或低估边坡的抗震能力。因此,对于区域岩土体参数的统计分析需要更多的实地考察与统计工作。

区域范围内边坡坡角主要利用数字高程模型 (DEM) 通过地理信息软件计算得出,属于相对较容易获得并具有一定准确度的参数。

岩体重度本应由试验得出,然而在区域范围内进行准确的试验非常困难。获取区域范围内不同岩性重度的方法通常根据经验和常用数值综合确定。

岩体抗剪强度参数黏聚力和摩擦角也应通过实测试验得出,但与重度类似,区域范围内难以开展大量实测研究。所以黏聚力和摩擦角也是根据每种岩性的常用数据进行确定。若研究区岩性类别较少,可直接对各岩性赋值,如 Jibson<sup>[9]</sup>、葛华等<sup>[17]</sup>、陈启国等<sup>[2]</sup>直接对不同岩性进行了赋值;若岩性类别较多,可以先分组再取值,如王涛等<sup>[3]</sup>、LIU Jiamei 等<sup>[4]</sup>采用了对岩组先分类后赋值的方法。

滑块厚度代表潜在滑动面的深度,在边坡滑动之前很难预知其大小,而且永久位移计算结果对滑块厚度非常敏感。由于深层滑坡机理更为复杂,主要受深部结构面控制,所以在利用永久位移法判断地震边坡危险性时,通常认为该理论适用于浅表层滑坡。对于浅表层滑坡的滑动深度选取和研究实例主要有以下文献: WIECZOREK 等<sup>[69]</sup>将滑块厚度取 3 m; KHAZAI 等<sup>[70]</sup>发现滑块厚度改变 30.48 cm 会导致临界加速度改变一个量级,因此他建议根据坡度的大小进行选取;陈启国等<sup>[2]</sup>取滑块厚度为 3 m; RODRÍGUEZ-PECES 等<sup>[18]</sup>取滑块厚度为 3 m; 王涛等<sup>[3]</sup>取滑块厚度为 5 m; Kuo-Lung WANG 等<sup>[71]</sup>专门对潜在滑块厚度进行了研究并给出了简单计算方法。对于地震对浅层滑坡的扰动深度,胡志旭等<sup>[72]</sup>通过仪器勘察推论出汶川地震的强扰动深度为 0~5 m,姚令侃等<sup>[73]</sup>对汶川地震Ⅸ度烈度区的调查显示平均崩塌深度为 1.2 m,这些数值均可作为滑块厚度的选取提供依据。所以,建议采用研究区及其附近的岩体强风化和强卸荷深度并参考相关文献的取值范例确定各地层分类的滑块厚度。

抗剪强度参数取值这种主观经验式的赋值方法会使计算出的边坡静力安全系数出现小于 1 的情况,与实际中边坡在自然状态下处于稳定状态不相符合。Jibson 等<sup>[12]</sup>采用对安全系数小于 1 的栅格调整黏聚力的方法以避免此类问题。

## 4 讨论与建议

区域范围预测性质的边坡地震危险性评价是一项融合地震地质、地震工程、岩土工程等多方面知识的综合课题,其结果合理与否取决于这几方面专业知识的研究深度。

(1) 地震边坡破坏判定依据中主要使用的 Newmark 永久位移法在计算边坡永久位移时假设抗剪强度以及安全系数在地震时程中是保持不变的,由此而假定临界加速度也保持不变。但实际上,在地震作用过程中,随着时程的延长,边坡潜在滑动面上的抗剪强度是逐渐减小的。在 1965 年原文文献中,Newmark 意识到了这种保持常量的抗剪强度以及临界加速度是不合理的,他建议在使用该方法计算永久位移时考虑抗剪强度以及临界加速度的变化。不过,这个建议并未被后续的使用者重视并加以研究。

后续研究应注重滑动面参数减小的研究,并将

其应用于预测模型。

(2) 阿里亚斯强度从能量的角度表征地震动强度,比烈度、峰值加速度等目前常用参数与地震诱发滑坡的相关性更高,因此以阿里亚斯强度为参数开展地震滑坡研究更为合理。加强阿里亚斯强度衰减关系及场地效应的深入研究,将使地震边坡危险性区划结果更加科学与实用。

(3) 目前地震动场地效应和地形效应采用两种不同的研究思路并且暂无成熟通用的研究成果,所以,如何把两者结合起来,得到既考虑场地影响又考虑地形影响的,更为准确的地震动参数还需要更多的研究。

(4) 岩土体参数表征了边坡坡体抵抗破坏的能力,在大区域中难以获得精确的数据资料,只能依靠经验给出,在很大程度上影响了永久位移计算结果的准确性。对于岩土体参数的统计和估算,寻求更加合理与更能体现边坡实际性质的参数取值方法对地震危险性评价结果有重要意义,国家地质调查部门可以在全国范围内逐步建立可供参考使用的岩土力学参数数据库。

(5) 一般认为,Newmark 永久位移法的适用范围为地震诱发浅层崩滑灾害与碎屑流,该方法还不能完全模拟出深大滑坡的失稳模式。由于岩土体动力学特性和形成机制之间的差异,浅层崩滑与深大滑坡的位移分析和危险性评估方法也应不同,深大地震滑坡的发生机理与预测方法还需要建立更为有效的判断方案。

## 参考文献(References)

- [1] 王涛,吴树仁,石菊松,等.地震滑坡危险性评估技术框架设计初探[J].地质论评,2013,59(增刊1):1150-1154.  
WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Preliminary study on technical framework design of earthquake landslide risk assessment[J]. Geological Review, 2013, 59 (Suppl01): 1150-1154.
- [2] 陈启国,葛华,周洪福.利用 Newmark 方法进行地震滑坡制图:以映秀研究区为例[J].中国煤炭地质,2011,23(11):44-48,56.  
CHEN Qiguo, GE Hua, ZHOU Hongfu. Mapping of seismic triggered landslide through Newmark method: an example from study area Yingxiu[J]. Coal Geology of China, 2011, 23 (11): 44-48, 56.
- [3] 王涛,吴树仁,石菊松,等.基于简化 Newmark 位移模型的区域地震滑坡危险性快速评估:以汶川  $M_s8.0$  级地震为例[J].工程地质学报,2013,21(1):16-24.  
WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Case study on rap-

- id assessment of regional seismic landslide hazard based on simplified Newmark displacement model: Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21 (1): 16-24.
- [4] LIU J M, GAO M T, WU S R, et al. A hazard assessment method for potential earthquake-induced landslides: a case study in Huaxian County, Shaanxi Province[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2016, 90(2): 590-603.
- [5] KHAZAI B, SITAR N. Landsliding in native ground: a GIS-based approach to regional seismic slope stability assessment [R]. Accessed 20 September 2000.
- [6] AMBRASEYS NN, MENU J M. Earthquake-induced ground displacements[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1988, 16(7): 985-1006.
- [7] 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.
- [8] JIBSON R W, MICHAEL J A. Maps showing seismic landslide hazards in anchorage, Alaska [J]. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 2009(5).
- [9] JIBSON R W. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis[J]. Transportation research record 1411. 1993.
- [10] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Géotechnique, 1965, 15(2): 139-160.
- [11] JIBSON R W, HARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: an example from the Los Angeles, California, area[J]. Open-File Report, 1998.
- [12] JIBSON R W, HARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3-4): 271-289.
- [13] JIBSON R W. Regression models for estimating coseismic landslide displacement[J]. Engineering Geology, 2007, 91 (2-4): 209-218.
- [14] ROMEO R. Seismically induced landslide displacements: a predictive model [J]. Engineering Geology, 2000, 58 (3-4): 337-351.
- [15] HSIEH S Y, LEE C T. Empirical estimation of the Newmark displacement from the Arias intensity and critical acceleration [J]. Engineering Geology, 2011, 122(1-2): 34-42.
- [16] 徐光兴,姚令侃,李朝红,等.基于汶川地震强震动记录的边坡永久位移预测模型[J].岩土工程学报,2012,34(6):1131-1136.  
XU Guangxing, YAO Lingkan, LI Zhaozhong, et al. Predictive models for permanent displacement of slopes based on recorded strong-motion data of Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1131-1136.
- [17] 葛华,陈启国,王德伟.地震滑坡危险性评价及编图:以映秀震

- 中区为例[J].中国地质,2013,40(2):644-652.
- GE Hua, CHEN Qiguo, WANG Dewei. The assessment and mapping of seismic landslide hazards: a case study of Yingxiu area, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 644-652.
- [18] RODRÍGUEZ-PECES M J, GARCÍA-MAYORDOMO J, AZANÓN J M, et al. GIS application for regional assessment of seismically induced slope failures in the Sierra Nevada Range, South Spain, along the Padul Fault[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(7): 2423-2435.
- [19] PAPATHANASSIOU G. Estimating slope failure potential in an earthquake prone area: a case study at Skolis Mountain, NW Peloponnesus, Greece[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71(1): 187-194.
- [20] 刘爱娟, 郑路, 刘铁新, 等. 考虑地震动地形效应的边坡破坏概率: 以金沙江下游新市镇附近边坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 4-12.
- LIU Aijuan, ZHENG Lu, LIU Tiexin, et al. Seismic slope failure probability considering the topography effects: case of slopes near Xinshi Town alongside the lower Jinsha River[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(1): 4-12.
- [21] 鲍叶静, 高孟潭, 姜慧. 地震诱发滑坡的概率分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 66-70.
- BAO Yejing, GAO Mengtan, JIANG Hui. Probabilistic analysis of earthquake-induced landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(1): 66-70.
- [22] 刘甲美. 概率地震滑坡危险性区划方法及应用[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2015.
- LIU Jiamei. Probabilistic seismic landslide hazard zonation method and its application[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, 2015.
- [23] PAILOPLEE S, SUGIYAMA Y, CHARUSIRI P. Deterministic and probabilistic seismic hazard analyses in Thailand and adjacent areas using active fault data[J]. *Earth, Planets and Space*, 2009, 61(12): 1313-1325.
- [24] RODRIGUEZ-PECES M J, GARCIA-MAYORDOMO J, AZANON J M, et al. Regional hazard assessment of earthquake-triggered slope instabilities considering site effects and seismic scenarios in Lorca basin (Spain) [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2011, 17(2): 183-196.
- [25] 王海云. 近场强地震动预测的有限断层震源模型[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2004.
- WANG Haiyun. Finite fault source model for predicting near-field strong ground motion[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2004.
- [26] 刘启方. 基于运动学和动力学震源模型的近断层地震动研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2005.
- LIU Qifang. Studies on near-fault ground motions based on kinematic and dynamic source models[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2005.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化化管理委员会. 地震灾害预测及其信息管理系统技术规范: GB/T 19428—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for earthquake loss estimation and its information management system: GB/T 19428—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [28] 高孟潭, 胥广银. 潜在震源区内部空间非均匀分布地震区划方法在攀西地区和晋中南地区的应用[J]. 中国地震, 1996, 12(增刊1): 24-31.
- GAO Mengtan, XU Guangyin. Application of the methods of seismic zoning with nonhomogeneous spatial distribution in the potential source to the western Panzhihua and the middle and southern Shanxi Province [J]. *Earthquake Research in China*, 1996, 12(Suppl01): 24-31.
- [29] 李山有, 廖振鹏. 基于概率地震危险性分析的重大工程结构设计地震的研究[J]. 工程抗震, 1999, 21(3): 18-21.
- LI Shanyou, LIAO Zhenpeng. A study on the design earthquake for major structures based on probability seismic hazard analysis[J]. *Earthquake Resistant Engineering*, 1999, 21(3): 18-21.
- [30] 胥广银, 高孟潭. 潜在震源区内部非均匀特征研究[J]. 中国地震, 1996, 12(3): 294-299.
- XU Guangyin, GAO Mengtan. The study on the characters of non-uniform earthquake distribution within the potential source areas[J]. *Earthquake Research in China*, 1996, 12(3): 294-299.
- [31] 刘博研, 仲秋, 史保平. 与特征断层结合的地震活动空间光滑模型在衡水市活断层地震危险性评价中的应用[J]. 中国地震, 2015, 31(2): 390-398.
- LIU Boyan, ZHONG Qiu, SHI Baoping. The application of spatially smoothed seismicity model combined with the characteristics of the faults in Hengshui seismic risk evaluation [J]. *Earthquake Research in China*, 2015, 31(2): 390-398.
- [32] ABRAHAMSON N A, SILVA W J. Update of the AS08 ground-motion prediction equations based on the NGA-West2 data set [R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2013.
- [33] BOORE D M, STEWART J P, SEYHAN E, et al. NGA-West2 equations for predicting  $PGA$ ,  $PGV$ , and 5% damped  $PSA$  for shallow crustal earthquakes[J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3): 1057-1085.
- [34] CAMPBELL K W, BOZORGNIYA Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of  $PGA$ ,  $PGV$ , and 5% damped linear acceleration response spectra [J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3): 1087-1115.
- [35] CHIOU B S J, YOUNGS R R. Update of the chiou and youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. *Earthquake Spectra*,

- 2014,30(3):1117-1153.
- [36] IM I. Empirical model for estimating the average horizontal values of pseudo-absolute spectral accelerations generated by crustal earthquakes[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2007:15-27.
- [37] 刘平,罗奇峰.汶川地震峰值加速度多圆组合模型的衰减关系[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(6):2317-2323.  
LIU Ping, LUO Qifeng. Wenchuan earthquake peak acceleration attenuation relationship of multiple circle model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6): 2317-2323.
- [38] 刘浪,李小军.汶川 8.0 级地震地震动峰值加速度衰减特性分析[J].北京工业大学学报,2012,38(2):173-179.  
LIU Lang, LI Xiaojun. Peak ground acceleration attenuation relationship of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(2): 173-179.
- [39] 喻旭,李小军.基于 NGA 模型的汶川地震区地震动衰减关系[J].岩土工程学报,2012,34(3):552-558.  
YU Tian, LI Xiaojun. Attenuation relationship of ground motion for Wenchuan earthquake region based on NGA model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 552-558.
- [40] 姜倩,郭明珠,胡哲明,等.汶川地震余震地震动衰减关系研究[J].防灾科技学院学报,2013,15(2):6-10.  
JIANG Qian, GUO Mingzhu, HU Zheming, et al. Research on attenuation relationship of ground motion for Wenchuan earthquake aftershocks[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention Science and Technology, 2013, 15(2): 6-10.
- [41] 王玉石,李小军,周正华.川滇地区水平向强地震动衰减关系研究[J].地震学报,2013,35(2):238-249.  
WANG Yushi, LI Xiaojun, ZHOU Zhenghua. Research on attenuation relationships for horizontal strong ground motions in Sichuan - Yunnan region[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(2): 238-249.
- [42] WILSON R C, KEEFER D K. Predicting areal limits of earthquake induced landsliding[J]. Geological Survey Professional Paper, 1985, 1360: 317-345.
- [43] KEEFER, D K, WILSON R C. Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments[J]. Landslides in a Semi-Arid Environment, 1989(2): 118-149.
- [44] WILSON R C. Relation of Arias intensity to magnitude and distance in California[R]. U. S. Geological Survey Open-File Report, 1993.
- [45] ABDRAKHMATOV K, HAVENITH H B, DELVAUX D, et al. Probabilistic PGA and Arias intensity maps of Kyrgyzstan (central Asia)[J]. Journal of Seismology, 2003, 7(2): 203-220.
- [46] TRAVASAROU T, BRAY J D, ABRAHAMSON N A. Empirical attenuation relationship for Arias intensity[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32(7): 1133-1155.
- [47] MAHDAVIFAR M R, JAFARI M K, ZOLFAGHARI M R. The attenuation of Arias intensity in Alborz and central Iran [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering. Tehran, Iran: 2007.
- [48] RAJABI A M, KHAMMECHIYAN M, MAHDAVIFAR M R, et al. Attenuation relation of Arias intensity for Zagros Mountains region (Iran) [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(3): 110-118.
- [49] STAFFORD P J, BERRILL J B, PETTINGA J R. New predictive equations for Arias intensity from crustal earthquakes in New Zealand[J]. Journal of Seismology, 2009, 13(1): 31-52.
- [50] SABETTA F, PUGLIESE. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 18(1): 13-23.
- [51] LEE C T, HSIEH B S, SUNG C H, et al. Regional Arias intensity attenuation relationship for Taiwan considering  $v_{S30}$  [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, 102(1): 129-142.
- [52] 李伟,俞言祥,肖亮.阿里亚斯强度衰减关系分析[J].地震学报,2017,39(6):921-929.  
LI Wei, YU Yanxiang, XIAO Liang. Attenuation relationship of Arias intensity[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(6): 921-929.
- [53] COTTON F, SCHERBAUM F, BOMMER J J, et al. Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to central Europe and rock sites [J]. Journal of Seismology, 2006, 10(2): 137-156.
- [54] 文雯,陈宇军,王珏,等.地震安全性评价中地震动衰减关系的类型及其选取[J].地震工程学报,2013,35(3):709-714.  
WEN Wen, CHEN Yujun, WANG Jue, et al. Type and selection of the ground motion attenuation relations during seismic safety evaluation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 709-714.
- [55] VIPIN K S, SITHARAM T G. Delineation of seismic source zones based on seismicity parameters and probabilistic evaluation of seismic hazard using logic tree approach[J]. Journal of Earth System Science, 2013, 122(3): 661-676.
- [56] BOMMER J J. On the use of logic trees for ground-motion prediction equations in seismic-hazard analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(2): 377-389.
- [57] WAHLSTROM R, GRUNTHAL G. Probabilistic seismic hazard assessment (horizontal PGA) for Fennoscandia using the logic tree approach for regionalization and nonregionalization models [J]. Seismological Research Letters, 2001, 72(1): 33-45.
- [58] GRUNTHAL G, WAHLSTRÖM R. Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2001, 5(3): 309-328.
- [59] SABETTA F, LUCANTONI A, BUNGUM H, et al. Sensitivity of PSHA results to ground motion prediction relations and logic-tree weights[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engi-

- neering, 2005, 25(4): 317-329.
- [60] 吕悦军, 彭艳菊, 兰景岩, 等. 场地条件对地震动参数影响的关键问题[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(2): 126-135.  
LÜ Yuejun, PENG Yanju, LAN Jingyan, et al. Some key problems about site effects on seismic ground motion parameters [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(2): 126-135.
- [61] 姜治军, 胡进军, 谢礼立, 等. 中国西部地区场地放大模型[J]. 天津大学学报, 2013, 46(12): 1071-1078.  
JIANG Zhijun, HU Jinjun, XIE Lili, et al. Model of site amplification factor for western China [J]. Journal of Tianjin University, 2013, 46(12): 1071-1078.
- [62] 姜治军, 胡进军, 张齐, 等. 考虑土层非线性效应的四川地区场地放大系数模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1650-1659.  
JIANG Zhijun, HU Jinjun, ZHANG Qi, et al. Site amplification factor model for Sichuan region considering nonlinear soil effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1650-1659.
- [63] 史大成, 温瑞智, 杜春清. 区域性场地  $v_{S30}$  及峰值加速度放大系数估算方法[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4): 40-46.  
SHI Dacheng, WEN Ruizhi, DU Chunqing. Study on regional site  $v_{S30}$  and PGA amplification factor [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(4): 40-46.
- [64] 王良. 场地地震动力变化表征参数研究[D]. 中国地震局兰州地震研究所, 2017.  
WANG Liang. Study on the representative site parameters of ground motion variability [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2017.
- [65] BOUCKOVALAS G D, PAPADIMITRIOU A G. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7-10): 547-558.
- [66] MATSUOKA M, WAKAMATSU K, FUJIMOTO K, et al. Nationwide site amplification zoning using GIS-based Japan engineering geomorphologic classification map [J]. 2005.
- [67] WALD D J, ALLEN T I. Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1379-1395.
- [68] ALLEN T I, WALD D J. On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions ( $v_{S30}$ ) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(2A): 935-943.
- [69] WIECZOREK G F, WILSON R C, HARP E L. Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County, California [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1993, 681(6431): 155-164.
- [70] KHAZAI B, SITAR N. Assessment of seismic slope stability using GIS modeling [J]. Annals of GIS, 2000, 6(2): 121-128.
- [71] WANG K L, LIN M L. Development of shallow seismic landslide potential map based on Newmark's displacement; the case study of Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(4): 775-785.
- [72] 胡志旭, 姚令侃, 王建, 等. 面波测试在汶川强震区土体损伤调查中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(4): 466-470.  
HU Zhixu, YAO Lingkan, WANG Jian, et al. Application of surface wave testing in survey of mountain soil damage in Wenchuan strong earthquake area [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(4): 466-470.
- [73] 姚令侃, 黄艺丹. 山地系统灾变行为自组织临界性研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 313-330.  
YAO Lingkan, HUANG Yidan. Self-organized criticality of mountain system catastrophic behaviors [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 313-330.