

基于离散元 Runout 预测的张家湾滑坡风险评估

董阳丹¹, 魏占玺^{2,3}, 董建辉^{4,5}

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 青海省环境地质重点实验室, 西宁 810007;

3. 青海省地质环境保护与灾害防治工程技术研究中心, 西宁 810007;

4. 四川省非饱和土力学特性及工程技术省高校工程研究中心, 成都 610106;

5. 成都大学建筑与土木工程学院, 成都 610106)

摘要: 滑坡是我国最重要的地质灾害之一, 其每年造成大量的人员伤亡和财产损失, 故滑坡风险评估对防治滑坡灾害、降低社会经济损失具有重要意义。基于现场野外调查, 利用离散元软件 UDEC 对西宁市张家湾滑坡进行 Runout 预测分析, 结合动力分析与条件分析法对张家湾滑坡进行风险评估。结果表明: 张家湾滑坡在天然工况下为稳定状态, 在暴雨工况下为欠稳定状态, 其最远移距为 55 m, 最大影响范围为 $1.106 \times 10^5 \text{ m}^2$; 张家湾滑坡在暴雨工况下的失稳概率为 0.459; 张家湾滑坡一旦在暴雨情况下发生失稳, 人员伤亡风险值为 46 人, 根据滑坡灾害社会接受水平曲线判定其属于不可接受范围; 经济损失风险值为 5 180.88 万元。根据经济损失风险等级进行判断其属于第 5 等级。

关键词: 张家湾滑坡; 风险评估; 离散元; Runout

中图分类号: P642.22; P694; X4 **文献标识码:** A

QUANTITATIVE EVALUATION OF LANDSLIDE RISK IN ZHANGJIAWAN BASED ON DISCRETE ELEMENT RUNOUT PREDICTION

DONG Yang-dan¹, WEI Zhan-xi^{2,3}, DONG Jian-hui^{4,5}

(1. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Key Laboratory of Environmental Geology of Qinghai Province, Xining 810007, China;

3. Qinghai Geological Environment Protection and Disaster Prevention Engineering Technology Research Center, Xining 810007, China;

4. Sichuan Engineering Research Center for Mechanical Properties and Engineering Technology of Unsaturated Soils, Chengdu 610106, China;

5. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: Landslide is one of the most important geological disasters in China, which causes a large number of casualties and property losses every year, so landslide risk assessment is of great significance to prevent and control landslide disasters and reduce social and economic losses. Based on field investigation, Runout prediction analysis of Zhangjiawan landslide in Xining City is carried out by using discrete element software UDEC, and the risk assessment of Zhangjiawan landslide is carried out by combining dynamic analysis and

conditional analysis. The results show that the Zhangjiawan landslide is basically stable under natural conditions and understable under heavy rain conditions, with the maximum displacement of 55 m and the maximum influence range of $1.106 \times 10^5 \text{ m}^2$. The instability probability of Zhangjiawan landslide under rainstorm condition is 0.459. Once Zhangjiawan landslide is unstable under heavy rain, the risk value of casualties is 46 people, and according to the curve of social acceptance level of landslide disaster, it belongs to the unacceptable range. The risk value of economic loss was 51,808.8 million yuan. According to the risk level of economic loss, it belongs to level 5.

Key words: Zhangjiawan landslides; risk assessment; Discrete element; Runout

自 1960 年张家湾滑坡发生以来,由于人类工程活动频繁,老滑坡后壁及侧壁次生多次多级滑坡,先前已有学者对张家湾滑坡的时空特征、结构变形特征以及成因机制做了相关调查研究^[1,2],面对能够经济有效地进行防灾减灾的需要,应在已有研究的基础上补充对张家湾滑坡的风险评估。

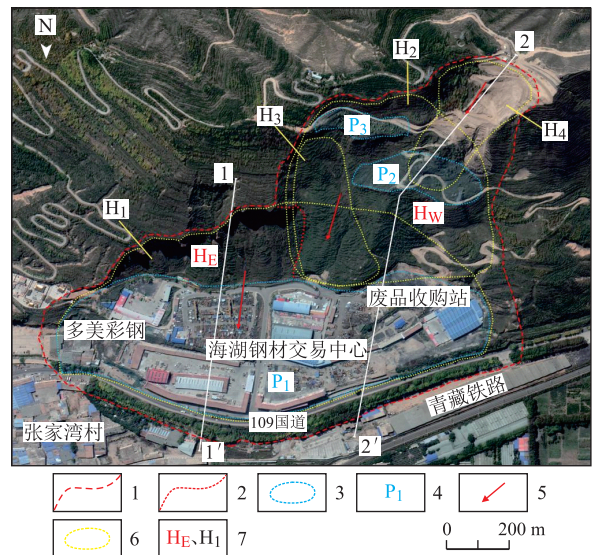
根据 Varnes 对风险的定义可知^[3],滑坡灾害风险评估是指在一定时间段中某一区域范围内对可能导致的人员伤亡以及财产损失进行分析评价。Van Westen, et al(2005)在风险量化问题的基础上,较为完整地总结了滑坡灾害风险评估的理论技术框架^[4]。其中危险性评价主要包括滑坡 Runout 预测、滑坡失稳概率确定两个主要内容^[5]。目前,确定滑坡失稳概率可以通过建立滑坡 M-F 关系、分析滑坡与诱发因素的相关性以及确定性法等^[6,7],其中利用确定性法中的动力分析法是目前较为理想的确定失稳概率的方法^[8];而滑坡 Runout 预测主要有经验法、简化分析法及数值模拟法^[9,10],其中数值模拟法主要包括基于连续介质分析的有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)以及基于非连续介质分析的离散元法(DEM)等。易损性评价是风险评估的核心环节,但易损性的定量分析一直是风险评价的难点。目前常见的方法有历史资料反演法、综合评判法以及模型试验法^[11]。

在此之前,孙长明结合信息量和人工神经网络模型已对西宁市区域滑坡进行了易发性评价^[12]。为了保护张家湾前缘附近居民的人身安全及财产安全,本文主要基于现场野外调查,利用离散元软件 UDEC 对西宁市张家湾滑坡进行 Runout 预测分析,结合动力分析与条件分析法对张家湾滑坡进行风险评估。

1 张家湾滑坡概况

张家湾滑坡地处张家湾村海湖钢材市场以南,滑坡后壁呈陡崖,前缘剪出口至解放渠为界,滑坡后

缘高程为 2 620 m,前缘坡脚高程 2 295 m,坡高 325 m,平均坡度 30° 。平面形态呈不规则“舌形”,剖面形态呈凹型,并有三级阶梯状平台,为滑坡多次滑动形成,根据滑坡形态、滑面、剪出口、滑覆体特征,将滑坡分为四期分级滑动,并形成三级平台(图 1)。滑坡平面面积为 $4.64 \times 10^5 \text{ m}^2$,主滑方向 20° ,其中西侧滑坡方向 32° ,滑体平均厚度约 28 m,属缓倾层状岩质十土质复合滑坡。张家湾滑坡以西侧滑坡区(H_w)为主体滑动,主要变形区位于西侧滑坡区(H_E)后部,主要表现为拉裂变形。

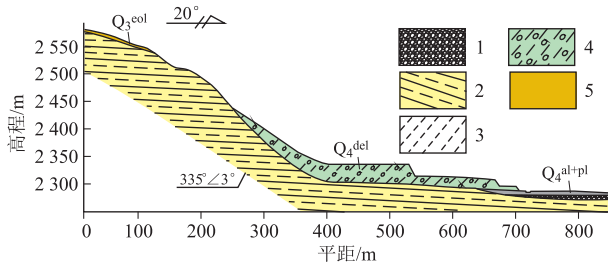


1. 滑坡边界;2. 滑坡分期界线;3. 滑坡平台界线;4. 平台分级编号;5. 滑动方向;6. 滑坡分区界线;7. 分区、分期编号

图 1 张家湾滑坡平面形态特征

张家湾古滑坡为典型的推移式滑坡,研究区前缘阻滑段开挖以及降雨入渗至滑坡后缘的张拉裂缝使滑带泥化软化,最终导致诱发失稳破坏。另外,研究区属西宁市城镇建设区,周围有 G109 国道和青藏铁路等重要交通设施以及各种厂房等公共建筑物。其中 G109 国道距离勘查区约 220 m,且有巡山道路可从 G109 国道直达张家湾滑坡后缘。故滑坡

发生可能直接危害到 G109 国道。基于张家湾滑坡早期识别标志和历史变形特征,确定斜坡高危剖面的位置为 1-1',其工程地质剖面图如图 2 所示。



Q₃^{col}. 上更新风积黄土; Q₄^{del}. 全新统滑坡堆积物; Q₄^{al+pl}. 第四系冲洪积; N₁. 新近系泥岩; 335°∠3°. 岩层产状; 1. 砂卵砾石; 2. 泥岩; 3. 粉土; 4. 粉质黏土; 5. 黄土

图 2 1-1'工程地质剖面图

2 滑坡灾害风险评估关键方法

2.1 离散元法

离散元法 (DEM) 将岩体看作一种不连续的离散介质,其内部可存在大位移、旋转和滑动乃至块体的分离,从而能够更加真实地模拟节理岩体中的非线性大变形特征弥补了有限元法或边界元法的介质连续和小变形的限制。本文研究对象为张家湾滑坡的某一危险滑面,故选用二维离散元程序 UDEC 进行平面应变分析,计算程序见图 3。

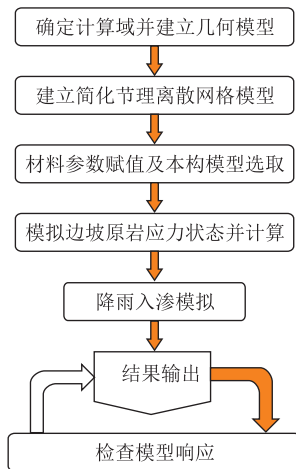


图 3 UDEC 边坡稳定性计算程序图

2.2 动力分析与条件分析法

本研究采用动力分析与条件分析法对张家湾滑坡失稳概率进行分析,通过对滑坡的形成条件与稳定性状态分析,间接地确定它们发生滑坡的概率。首先,利用 UDEC 对滑坡进行天然工况和暴雨工况的数值分析,将得出的稳定性系数根据滑坡致滑概率确定标准(表 1)按照数学差分法计算张家湾滑坡

在不同诱发因素条件下的致滑概率,再结合诱发因素的发生概率依据公式(1)来确定滑坡失稳概率。

$$PH = P[A] \cdot P[B|A] \quad (1)$$

式中,PH 为滑坡发生概率;P[A]为诱发因素概率;P[B|A]为滑坡致滑概率。

表 1 滑坡致滑概率确定标准^[13]

等级	稳定系数	致滑概率
I	<1.00	0.50~1.00
II	1.00~1.10	0.40~0.50
III	1.10~1.20	0.30~0.40
IV	1.20~2.00	0.10~0.30

3 危险性分析

根据张家湾滑坡成因机制可知,降雨对滑坡体的影响较大,故本研究对于张家湾滑坡的稳定性因素考虑了天然以及暴雨两个工况的情况。并根据前期野外调查研究,采取滑坡的高危滑动面 1-1'作为研究剖面,并将最危险滑动面的数据结果作为风险评估的计算数据。

3.1 滑坡失稳过程数值分析

3.1.1 地质模型建立与参数选取

根据张家湾滑坡的地质构造、地层岩性等特点构建滑坡简化模型,并按照地层岩性来划分结构单元。根据边坡边界效应原理设置斜坡边界条件,将下端和左右的位移锁住,认为计算区域以外没有应力变化和位移,在上部和左右两端设置岩体自重应力 σ_v 和水平应力 σ_x 用于模拟原岩应力状态。

结合本研究研究的问题以及材料特性的特点,选取 M-C 塑性模型作为岩体的本构模型,考虑塑性特性,并选取库伦滑动模型作为结构面的本构模型,为完全弹塑性模型。结合室内试验、现场勘察数据以及工程地质手册综合考虑,得出 UDEC 计算程序中岩土体和结构面所需参数(表 2、表 3)。其中结构面的法向刚度和切向刚度是根据 Mohr-Coulomb (M-C) 准则和 Bandis 经验公式法计算得出理论值后,再结合现场实测数据以及 UDEC 软件中的节理接触嵌入度进行调整;而岩土体参数中的体积模量与剪切模量是根据公式(2)、(3)所得:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3)$$

式中,K 为体积模量;G 为剪切模量; μ 为泊松比;E 为弹性模量。

表2 岩土体物理力学参数

岩土体	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /°	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	密度 /g·cm ⁻³
Q ₄ ^{del}	8	22	0.07	0.01	1.58
N ₁	190	32	5.33	1.14	2.10
Q ₃ ^{col}	13	28	0.14	0.02	1.55
Q ₄ ^{al-pl}	—	38	0.16	0.08	2.25

表3 结构面物理力学参数

材料	内摩擦角 /°	粘聚力 /kPa	法向刚度 /GPa·m ⁻¹	切向刚度 /GPa·m ⁻¹
滑面	18.6	10.7	1	0.5
Q ₃ ^{col}	28.75	2.6	28	12
N ₁	6.25	38	3	1
Q ₄ ^{del}	3.75	1.6	1.5	0.5
Q ₄ ^{al-pl}	60	—	28	12

3.1.2 计算结果分析

根据上述确定的地质模型与参数分别对滑坡在天然和暴雨工况下进行模拟计算得到稳定性系数和Runout 预测结果。

(1) 稳定性系数结果(表4)

表4 滑坡稳定性系数结果

计算剖面	工况	稳定系数	稳定状态
1-1'	天然	1.31	稳定
	暴雨	1.046	欠稳定

根据《滑坡防治工程勘查规范》(DZ/T 0218-2006),将稳定性系数结果进行稳定状态划分^[14],见表5所示。

表5 滑坡稳定状态划分

滑坡稳定系数 F_s	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
$F_s < 1.00$	1.00 ≤ $F_s < 1.05$	1.05 ≤ $F_s < 1.15$	1.15 ≤ F_s	

由表5的稳定性系数结果可知,天然工况下两剖面滑坡均处于基本稳定状态,而暴雨工况下两剖面均处于欠稳定状态,需要进行进一步分析。

(2) Runout 预测结果

由上述稳定性系数结果可知,张家湾滑坡在天然工况下处于稳定状态,在暴雨工况下处于欠稳定状态,故结合暴雨工况下的位移矢量图和塑性区图综合分析张家湾滑坡的发生机理和运移过程。1-1'剖面模拟结果图见图4、图5。

由迭代计算后的位移矢量图(图4)可知,在降雨作用下,位移主要集中在滑坡体后缘,均为从后缘至前缘逐渐降低,表明滑坡上部出现较大位移,并对前缘推挤作用明显,为典型的推移式滑坡。

由迭代计算后的塑性区图(图5)可知,1-1'剖面最远滑距为55m,当1-1'剖面发生滑动时,对滑坡

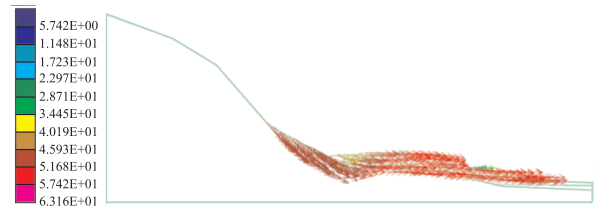


图4 1-1'剖面位移矢量图

体上的道路以及钢材市场等造成直接伤害,对临界处的铝厂以及临近的张家湾村具有危险隐患。

根据1-1'剖面的最大滑移距离和滑坡边界范围来划出张家湾滑坡失稳影响范围为 $1.106 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。

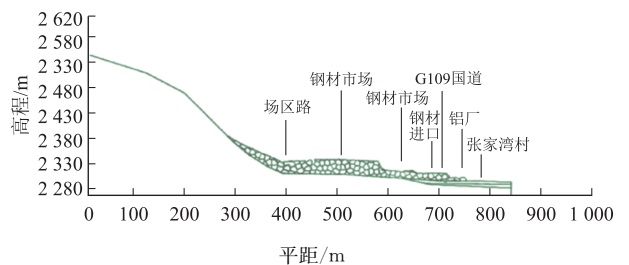


图5 1-1'剖面塑性区图

3.2 滑坡失稳概率分析

根据离散元数值计算结果可知天然状态下滑坡处于稳定状态,暴雨状态下滑坡处于欠稳定状态,故根据数值计算出的稳定性系数结合动力分析与条件分析法确定暴雨工况下的失稳概率。

首先根据滑坡致滑概率确定标准(表1),通过数学差分法,计算出张家湾滑坡的致滑概率。再结合条件概率计算滑坡失稳概率,由于研究区降水多集中于夏季,并且每年以暴雨的形式发生,故将降雨条件概率设置为1,计算得出滑坡失稳概率为0.459。

4 承灾体易损性分析

经现场调查结合滑坡失稳影响范围可知,主要承灾体有居民、建筑物及道路。

4.1 时空概率分析

空间概率是根据承灾体位置与滑坡体的位置以及滑坡滑移路径的相对关系共同来确定的。由于承灾体的位置均位于滑坡前缘,属于在滑坡体之上,故在暴雨情况下,承灾体的空间承灾概率均为1。

建筑物及道路均为静态承灾体,则可认为其遭受损失的时间概率为1,而人作为动态承灾体将分为老人、小孩以及青壮年来进行分析。滑坡影响范

围内的建筑物多是钢材厂房或钢材市场,是青壮年人工作区域,一般情况下,青壮年每年工作 10 个月,每天工作 12 h,故青壮年的时间概率为 0.417;一般情况下,老人小孩待在自己家中即附近的张家湾村的建筑物中时间为 15 h,且占据 1 a 中的 12 个月,故老人小孩的时间概率为 0.625。

4.2 承灾体价值损失率计算

斜坡失稳后承灾体的破坏损失率是指承灾体遭到破坏后的价值与遭受破坏前的价值的比值,将其分为人员承灾体价值损失率和其他承灾体价值损失率,承灾体的损失率由承灾体的损坏程度与损失率的对应关系来确定(表 6)。

表 6 价值损失率确定

损坏等级	平均价值损失率/%
完好	0
轻微损坏	15
中等损坏	50
严重损坏	85
完全损坏	1

故根据不同人员在不同伤情下的损失率取值(表 7)结合调查结果得出不同人员在暴雨工况下的价值损失率(表 8)。

表 7 不同人员的价值损失率^[15]

伤情人员	轻伤	重伤	死亡
老人小孩	0.15~0.5	0.5~0.9	1
青壮年	0~0.5	0.5~0.85	1

表 10 人员风险值确定

滑坡失稳概率	人员分类	承灾体空间概率	承灾体时间概率	人员损失率	人员数量	人员风险值/人	总人员风险值/人
0.459	老人小孩	0.5	0.625	0.9	106	13.684	46
	青壮年	1	0.417	0.85	198	32.213	

表 11 其他承灾体风险值

滑坡失稳概率	其他承灾体分类	空间概率	时间概率	其他承灾体损失率	承灾体价值/万元	承灾体风险值/万元	承灾体总风险值/万元
0.459	建筑物 1 类	1	1	1	1 201.28	1 201.28	5 180.88
	建筑物 2 类	1	1	0.85	3 129.6	2 660.16	
	建筑物 3 类	1	1	0.5	2 541.44	1 270.72	
	公路	1	1	1	24.36	24.36	

根据经济损失风险等级划分(表 12)可知,张家湾滑坡的经济损失风险等级为 5 级。

表 12 经济损失风险等级划分

1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
<20 万	20~50 万	50~100 万	100~500 万	>500 万

6 结论

(1) 通过离散元软件 UDEC 对张家湾滑坡进

表 8 暴雨工况下不同人员的价值损失率

承灾体/人	老人及小孩	青壮年
完全损坏	0.9	0.85

其他承灾体主要包括道路与建筑物。其他承灾体的价值损失率是根据承灾体与滑坡的位置关系来确定的。当其他承灾体位于滑坡体上时,其损失率为 1,结果见表 9。

表 9 其他承灾体的价值损失率确定

承灾体类型	与滑坡的相对位置关系	价值损失率/%
建筑物 1 类	滑坡体上	1
建筑物 2 类	滑坡影响范围以内	0.85
建筑物 3 类	滑坡体影响范围边界	0.5
道路	滑坡体上	1

5 风险评估结果

本研究所采用的风险性评估方法是对单体滑坡风险评估时常用的计算公式计算^[16],即风险值等于滑坡失稳概率、承灾体的空间概率和时间概率、承灾体损失率、承灾体价值五者相乘值。

根据前期调查统计结果得到人员伤亡数量及承灾体价值,结合前文计算结果得出张家湾滑坡在暴雨情况下的人员伤亡风险值和除人员以外的其他承灾体经济价值损失风险值,结果见表 10、表 11。

对比滑坡灾害社会接受水平曲线(李红英,2013)(图 6)可知,张家湾滑坡发生所造成的人员伤亡程度属于不可接受。

行 Runout 预测分析,滑坡在天然工况下为稳定状态,在暴雨工况下为欠稳定状态,其最远滑移距离为 55 m,最大影响范围为 $1.106 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。

(2) 利用动力分析及条件分析法,得出张家湾滑坡在暴雨工况下的失稳概率为 0.459。

(3) 通过对张家湾滑坡的风险评价得出其在暴雨工况下,人员伤亡风险值为 46 人,根据滑坡灾害社会接受水平曲线判定其属于不可接受范围;经济

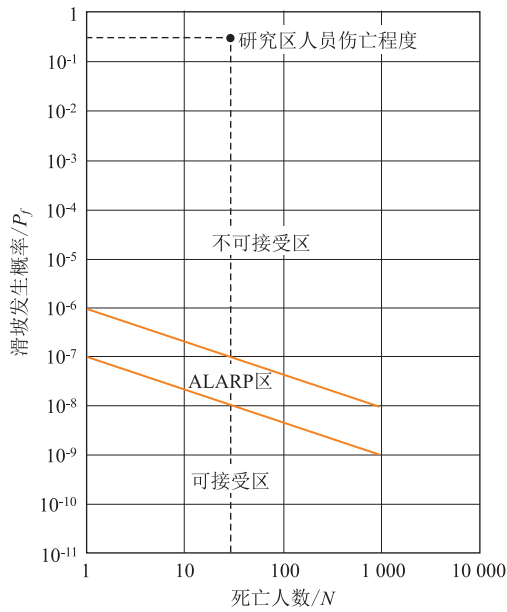


图6 滑坡灾害社会接受水平曲线^[17]

损失风险值为5 180.88万元,属于第5等级。

参考文献

- [1] 白朝能,彭亮,沈远,等. 西宁张家湾特大滑坡特征及机理[J]. 科学技术与工程,2021,21(3):927-934.
- [2] 彭亮,杜文学,田浩,等. 西宁市特大滑坡监测预警示范[J]. 科学技术与工程,2021,21(18):7806-7813.
- [3] The Principles and practice of landslide hazard zonation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,1981,23(1):13-14.
- [4] Van Westen C J, Van Asch T W J, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult? [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2005,65(2):167-184.
- [5] 胡瑞林,范林峰,王珊珊,等. 滑坡风险评价的理论与方法研究[J]. 工程地质学报,2013,21(1):76-84.
- [6] Dai F, Lee C. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides[J]. Engineering Geology,2001,59(3):253-266.
- [7] Caine N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows[J]. Geografiska annaler; series A, physical geography,1980,62(1-2):23-27.
- [8] Corominas J, Moya J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes[J]. Engineering Geology,2008,102(3-4):193-213.
- [9] Corominas J. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides[J]. Canadian Geotechnical Journal,1996,33(2):260-271.
- [10] Sassa K, Wang G, Fukuoka H, et al. Landslide risk evaluation and hazard zoning for rapid and long-travel landslides in urban development areas[J]. Landslides,2007,1(3):221-235.
- [11] Fuchs S, Heiss K, Hubl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2007,(7):495-506.
- [12] 孙长明,马润勇,尚合欣,等. 基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价[J]. 水文地质工程地质,2020,47(3):173-181.
- [13] 罗元华. 地质灾害风险评估方法[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 滑坡防治工程勘查规范(DZ/T 0218-2006)[S]. 2016.08.29.
- [15] 刘鑫. 单体滑坡风险评价方法研究[D]. 北京:中国地质大学,2008.
- [16] 何淑军. 陕西宝鸡市渭滨区地质灾害风险评估研究[D]. 北京:中国地质科学院,2009.
- [17] 李红英,谭跃虎. 滑坡灾害风险可接受准则计算模型研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(202):2047-2052.

作者简介: 董阳丹(1999—),女,硕士研究生,主要从事地质灾害与防治研究。E-mail:1351063856@qq.com

通信作者: 董建辉(1984—),男,教授,博士,主要从事岩土体稳定性评价及监测预警研究。E-mail:dongjianhui@cdu.edu.cn