

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.03

基于 Rockfall 的危岩体危险范围预测及风险评价 ——以九寨沟景区悬沟危岩体为例

何宇航,裴向军,梁 靖,谷 虎

(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,四川 成都 610059)

摘要: 2017 年 8 月 8 日九寨沟 Ms 7.0 级地震诱发了数以千计的崩滑地质灾害,造成景区内道路阻塞,设施损毁,严重威胁到了来往游客及景区内住民的生命财产安全。因此对景区进行地质灾害风险性评价尤为重要。本文以景区内悬沟崩塌危岩体为研究对象,通过分析危岩威胁范围、可能造成的危害程度,承灾体的抗灾能力以及流动承灾体受损情况,建立风险评价模型,将风险评价进行量化。评价结果表明,危岩带 1、危岩体 1 为低风险。危岩带 3 为中等风险;危岩带 2 为高风险,严重威胁到了坡脚公路及来往游客的生命财产安全,要高度重视,尽快着手防护措施设计,避免造成更大的损失。

关键词: 危岩体;稳定性评价;Rockfall;危险范围;风险评价

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0024-10

Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on rockfall: a case study of the Xuangou Collapse

HE Yuhang, PEI Xiangjun, LIANG Jing, GU Hu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu
University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: On August 8, 2017, the Ms 7.0 earthquake in Jiuzhaigou triggered thousands of landslide disasters, resulting in blocked roads and damaged facilities in the scenic area, seriously threatening the life and property safety of tourists and residents in the scenic area. Therefore, it is particularly important to evaluate the risk of geological hazards in this area. In this paper, the suspended ditch dangerous rock mass in the scenic area is studied. By analyzing the threat range of dangerous rock, the possible harm degree, the disaster resistance ability of the disaster bearing body and the damage situation of the floating disaster bearing body, the risk evaluation model is established and the risk evaluation is quantified. The evaluation results show that the dangerous rock zone 1 and dangerous rock mass 1 are of low risk. Danger zone 3 is of medium risk. The dangerous rock zone 2 is of high risk, which seriously threatens the life and property safety of the road and tourists. Therefore, we should attach great importance to the design of protective measures as soon as possible to avoid greater losses.

Keywords: rock mass; stability evaluation; rockfall; danger range; risk assessment

收稿日期: 2019-07-14; 修订日期: 2019-08-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501002)

第一作者: 何宇航(1995-),女,重庆涪陵人,硕士研究生,研究方向为地质灾害评价与预测。E-mail:835978885@qq.com

通讯作者: 裴向军(1970-),男,内蒙古赤峰人,教授,博士生导师,主要从事地质灾害、工程边坡稳定性评价级工程治理方面教学与研究工作。E-mail:peixj0119@tom.com

0 引言

崩塌是较陡峭斜坡上的岩土体,在内、外力的支配下,突然脱离母岩而剧烈倾倒呈翻滚、跳跃状的一种破坏^[1]。由于崩塌灾害具有发生时间不确定性、运动速度极快等特点,可在较短时间内造成巨大危害,给人民生命和财产安全带来极大威胁。

崩塌灾害的风险,是指对生命、财产或环境遭受崩塌所带来不利影响的可能性和严重程度大小^[2]。国外崩塌风险评估研究开始较早,并取得一定的成绩。国外学者于20世纪30年代就开始分析和研究风险评价,地质灾害风险的概念由Varnes最早提出,联合国人道主义事业部(UNDHA)在其基础上提出风险是在特定区域和时间内,由某种自然灾害造成的人们生命财产损失和社会经济失调的期望值,并提出了“风险度(risk) = 危险度(hazard) × 易损度(vulnerability)”的表达式,该方法得到了国内外学者的认可、发展和补充完善^[3-4]。美国学者PIERSON等^[5]据经验评分系统建立了最为简单的崩塌发生地点预测评价模型,并在1993年提出了Rockfall Hazard Rating System(RHRS)的公路崩塌灾害的评级方法。CROSTA等^[6]利用空间分布方法研究了崩塌滚石到达的概率和崩塌的密度,为崩塌危险性评估和分区奠定了良好的基础。国内研究起步较晚,但在理论和实践方面也取得了一定的成果。国内学者如胡厚田^[7]对各类落石的速度、崩落距离和运动轨迹进行了计算;张路青等^[8-9]研究分析了川藏公路滚石的发生频率,分析了遭遇滚石的概率、承灾体的易损性,以及经过不同滚石区时车辆和行人遭遇滚石的风险,同时提出了困难条件下公路沿线滚石发生频率的经验估计方法。许强等^[10]基于蒙特卡罗法原理,编制了可靠度分析程序,计算了危岩体在不同工况下的失稳概率,进而通过危岩体威胁范围以及承灾体易损性进行风险评价。

以上研究极大的丰富了风险评价内容和方法,但大多数崩塌的风险评估主要集中于对小比例尺区域性风险评估,对崩塌灾害点的研究较少,而考虑到流动承灾体的风险评价更少,其次很多风险评价都是定性评价,因风险具有随机、易变等特性,易定性难定量。导致目前的危岩体风险评估缺乏全面的研究分析体系,所得成果所具有的实践、推广能力不强,特别是增强流动承灾体易损评价,这在未来的崩塌风险评估中将会着重分析。

基于“8·8”地震在九寨沟景区内引发了大量的崩

塌灾害,对人员、交通、房屋和旅游基础设施都造成严重危害。本文将选取发生在景区内重点景点下季节海的悬沟崩塌为研究对象,其崩塌现场非常典型,现场资料较全,是开展崩塌风险定量研究的很好实例。

1 悬沟崩塌危岩体特征及稳定性分析

1.1 工程地质条件

悬沟位于九寨沟国家级自然保护区重要景点下季节海内,地理坐标 E103°54′48.60″, N33°07′06.56″,属构造剥蚀及河流侵蚀切割中山河谷地貌,地势总体北高南低,最高海拔约3 050 m,最低约2 590 m,相对高差近460 m。上部为陡崖,为危岩的主要发育区域;下部为中缓坡,坡脚为景区公路及重要景点下季节海子。出露地层岩性主要为泥盆系益硅沟组(Dcy)的灰岩,颜色灰黑色,分布于斜坡上部危岩区。中下部表层为第四系崩坡积层(Q_4^{col+ml})。

“8·8”地震中悬沟崩塌崩落岩体约10 000 m³,造成拦石墙及公路护栏损毁(图1、图2),崩塌滚石掩埋公路,严重威胁到过往游客的生命安全。



图1 “8·8”地震中损毁的拦石墙

Fig.1 Unilateral dike damaged in the “8·8” earthquake

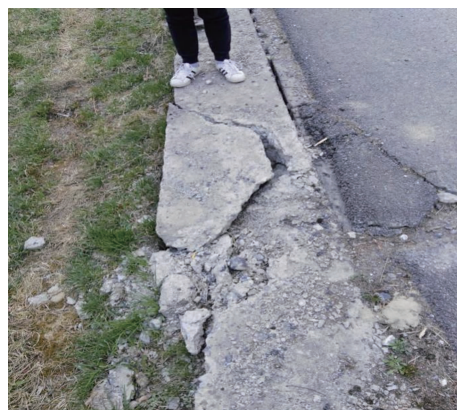


图2 “8·8”地震中损毁的公路

Fig.2 Damaged roads in the “8·8” earthquake

1.2 危岩体分布及特征

危岩体分布在斜坡中上部,南侧为冲沟、北侧悬沟,平面形态呈带状,分布高程 2 840 ~ 2 950 m,相对高差约 110 m,面积约为 $5.12 \times 10^4 \text{ m}^2$,坡度 $65^\circ \sim 80^\circ$,主崩方向 105° 。岩性为泥盆系益硅沟组的灰岩,表层风化较严重,内部裂隙极为发育。岩层产状 $252^\circ \angle 46^\circ$,主要发育三组陡倾裂隙。在三组主要结构面与层面组合切割下,岩体被切割成 0.5 ~ 3.3 m 不等的块体,且临空条件好。

根据现场调查,大致将危岩体分为 3 块危岩带 WY1、WY2、WY3 及一块危石 W1(图 3、图 4)。

其中 WY1 位于斜坡南侧,高约 80 m,宽约 75 m,平均厚度 1.5 m,体积约 $9\,000 \text{ m}^3$ 。WY2 于坡顶展布,



图 3 物源区内典型危岩

Fig. 3 Typical unstable blocks in rockfall provenance

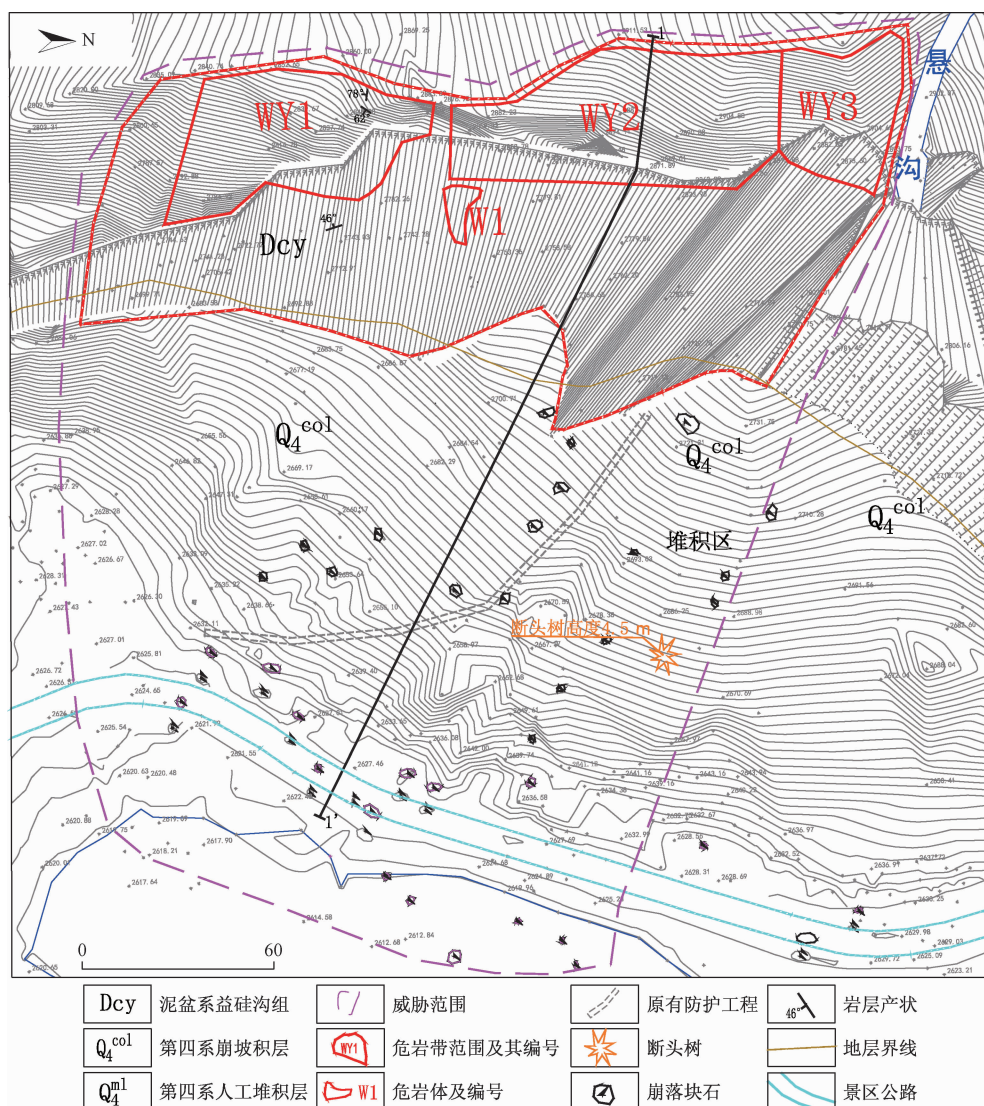


图 4 悬沟崩塌平面图

Fig. 4 Plane map of Xuangou Rockfall

高约 60 m, 宽约 110 m, 平均厚度 4 m, 体积约 26 400 m³; W1 位于 WY2 下方, 高约 18 m, 宽约 14 m, 平均厚度 1.0 m, 体积约 252 m³。WY3 位于斜坡北侧, 高约 50 m, 宽约 25 m, 平均厚度 2.2 m, 体积约 2 750 m³。危岩总体积约 3.84 × 10⁴ m³。

1.3 危岩体稳定性分析与评价

危岩的自稳能力和致灾能力是其产生灾害的两个先决条件。因此, 先判定危岩的自稳能力。

1.3.1 定性分析

利用岩体结构面的赤平投影图进行定性分析。根据现场实际调查及三维激光扫描数据, 边坡产状为 252°∠46°。危岩主要发育三组裂隙: ①组: 104°~124°∠55°~63°, 与坡向平行; ②组: 186°~188°∠78°, 与坡向斜交; ③组: 10°∠82°, 与坡向斜交。各

个危岩赤平投影见图 5。
根据赤平投影图分析, 裂隙①、裂隙②(裂隙③)与主要结构面共同切割边坡。两条裂隙的交线倾向与坡向一致, 倾角小于坡角, 不利于危岩稳定性。根据各个危岩带裂缝贯穿程度分析, WY1、W1 处于基本稳定状态, WY2、WY3 处于欠稳定状态。

1.3.2 定量分析

根据现场调查及定性分析可知, 研究区内危岩体失稳模式整体以滑移式为主, 局部凹腔处以坠落破坏为主。根据裂隙发育情况, 整体滑移破坏可能性较低, 主要是局部坠落式破坏。本文采用陈洪凯^[11]推荐的公式进行计算。根据大量工程实例, 结合规范要求, 主要考虑 3 种工况和荷载组合: ①天然工况(自重); ②暴雨饱和工况(饱和自重 + 裂隙水压, 其中裂隙充水

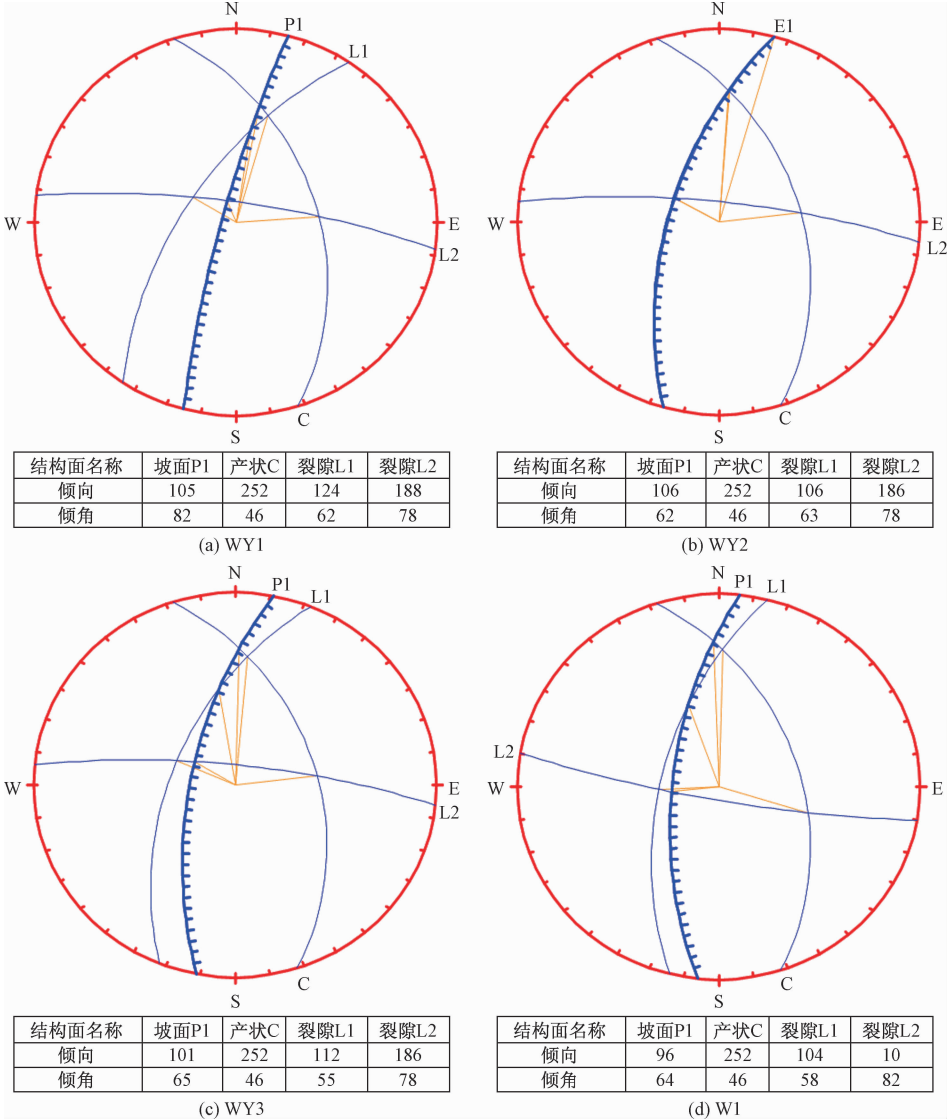


图 5 赤平投影结果
Fig. 5 The stereographic projection result

高度取 h_w 取裂隙深度 h 的 $1/2$);③地震工况(自重 + 地震力)。根据类比相似工程取参数值。

根据《滑坡防治工程勘察规范》(DZ/T 0218—2006)取安全系数值。最终稳定性计算分析结果见表 1。

表 1 危岩稳定性系数及稳定性评价结果

Table 1 Stability coefficients and stability evaluation results of dangerous rocks

工况 危岩	破坏 模式	稳定系数			安全 系数	稳定性评价		
		天然	暴雨	地震		天然	暴雨	地震
WY1	坠落	2.67	2.03	1.73	1.8	稳定	稳定	基本稳定
WY2		1.94	1.40	1.28		稳定	欠稳定	欠稳定
WY3		2.42	1.48	1.42		稳定	欠稳定	欠稳定
W1		1.80	1.62	1.70		稳定	基本稳定	基本稳定

2 危岩体危险范围预测与危险性评价

判断了危岩的自稳能力后,再对危岩的致灾能力进行分析评价。针对研究区崩塌灾害特点,选取三要素法(图 6)对危岩体进行危险性评价。三要素法评价指标^[12]有:①危岩体的稳定性②崩塌体的运动轨迹③崩塌体的规模。其中,危岩体稳定性评价详见 1.3 节,危岩体的运动轨迹采用 Rocscience Rockfall 软件进行模拟分析。

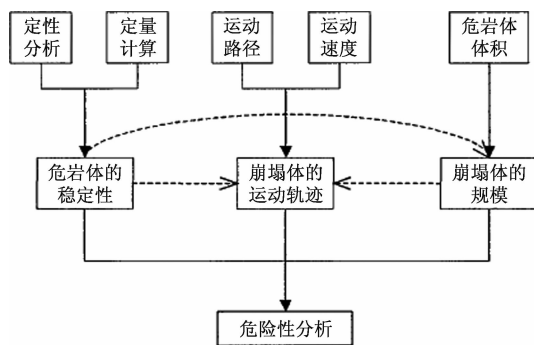


图 6 危险性分析流程图

Fig. 6 Hazard analysis flow chart

2.1 危岩体失稳后运动特征

基于崩塌区典型剖面图(图 7)和已有落石轨迹,结合危岩体发育特征分析可知,危岩体失稳后运动主要有三个阶段:失稳启动阶段,运动阶段,堆积阶段。其中失稳启动阶段,主要发生在斜坡上部的危岩体下方临空区。启动方式主要为自由坠落;运动阶段,主要表现为碰撞弹跳、滑滚。当陡坡段,多为碰撞、滚跳;较缓坡段,主要为滑滚;堆积阶段,滚石由于能量消耗及下方植被及堆积物的阻挡作用,停止运动后堆积于斜坡下部或坡脚区域。部分携带能量较大的块石会向下

运动到公路及下季节海中。

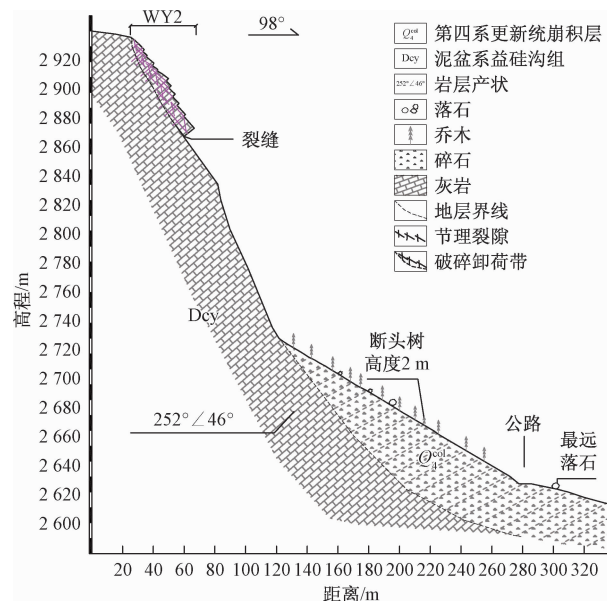


图 7 悬沟崩塌工程地质剖面图

Fig. 7 Engineering geological section of Xuangou Rockfall

使用 Rocscience Rockfall 软件对滚石的运动路径、速度、落石终点进行模拟,分析滚石是否威胁到公路,并计算受威胁路段的长度。将崩塌的剖面图适当简化成上陡下缓的折线型坡。根据现场勘查结果及铁道部运输局推荐的法向和切向恢复系数的取值选取 R_n , R_t 。其中斜坡陡峭段: $R_n = 0.35$, $R_t = 0.85$,下方堆积体及植被覆盖的平缓区: $R_n = 0.32$, $R_t = 0.83$ 。斜坡摩擦角 φ 取 30° 。根据裂隙发育情况及已有落石的统计信息,取落石典型尺寸为 $2.3\text{ m} \times 2.3\text{ m} \times 2.3\text{ m}$,密度取 2630 kg/m^3 ,样本数 20。现分别针对各个危岩带的启动高程 2875 m(WY1)、2890 m(WY2)、2931 m(WY3)、2842 m(W1)进行典型落石的路径模拟。最后根据杨威^[12]推荐公式利用滚石运动斜长求滚石威胁范围,景区内是二级公路,偏移比取 0.3。威胁范围 = 滚石运行斜长 $\times$ 运动偏移比。

WY1 落石运动轨迹(图 8)和落石终点水平位置图(图 9)表明,WY1 下方水平距离约 193 m 处为公路,落石最终落于水平距离 165 ~ 205 m 范围内。最大概率的崩落位置在 195 ~ 200 m 处。有大部分落石可以到达公路。滚石运动斜长 286 m,求得威胁范围长 86 m。

WY2 落石运动轨迹(图 10)和落石终点水平位置图(图 11)表明,WY2 下方水平距离约 218 m 处为公路,落石最终落于水平距离 232 ~ 237 m 范围内。最大概率的崩落位置在 235 m 处。落石可以到达公路。滚

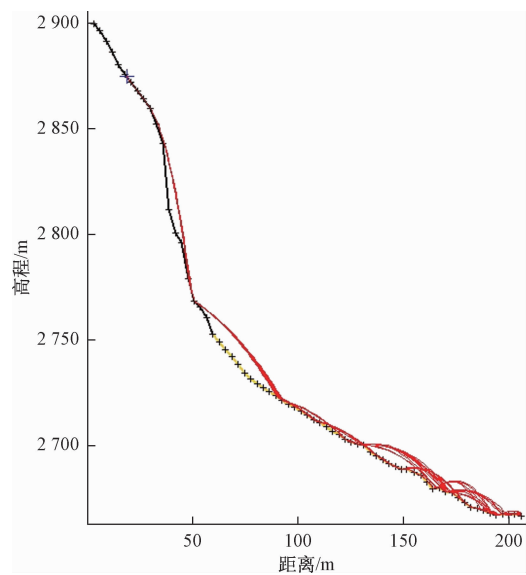


图 8 WY1 落石运动路径
Fig.8 Movement path of WY1 Rockfall

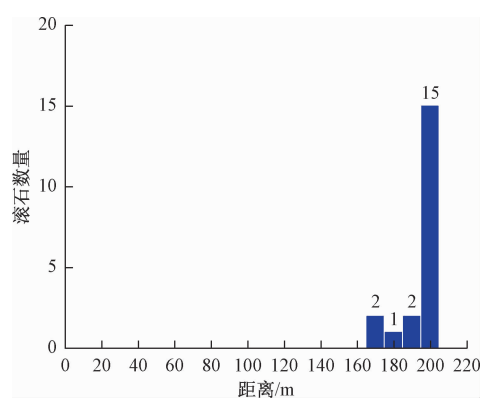


图 9 WY1 落石终点水平位置
Fig.9 Final position of WY1 Rockfall

石运动斜长 322 m,求得威胁范围长 97 m。

WY3 落石运动轨迹(图 12)和落石终点水平位置图(图 13)表明,WY3 下方水平距离约 236 m 处为公路,落石最终落于水平距离 85 ~ 250 m 范围内。最大概率的崩落位置在 245 ~ 250 m 处。有大部分落石可以到达公路。滚石运动斜长 361 m,求得威胁范围长 108 m。

W1 的落石运动轨迹(图 14)和落石终点水平位置图(图 15)表明,W1 下方水平距离约 193 m 处为公路,落石最终落于水平距离 145 ~ 205 m 范围内。最大概率的崩落位置在 145 ~ 153 m 处。有大部分落石可以到达公路。滚石运动斜长 264 m,求得威胁范围长 79 m。

2.2 危岩体危险性分析

根据景区实际情况,由于受灾体大多数是游客,考虑到人的承受力的脆弱性,本文把 100 kg 以上的危岩体称为中大型规模危岩体。根据已有落石的统计信

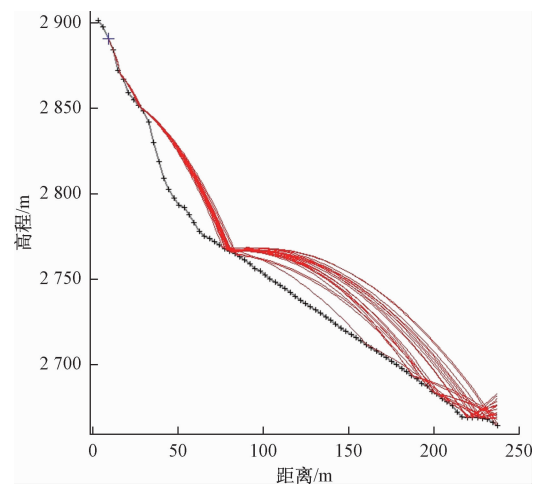


图 10 WY2 落石运动路径
Fig.10 Movement path of WY2 Rockfall

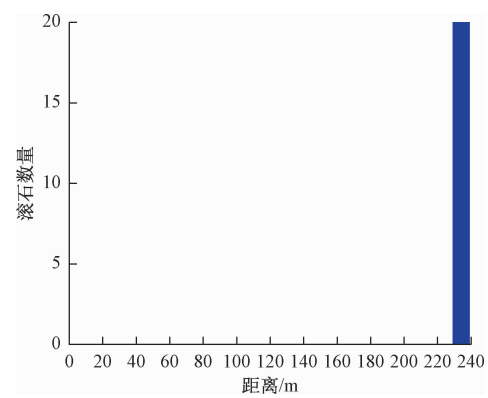


图 11 WY2 落石终点水平位置
Fig.11 Final position of WY2 Rockfall

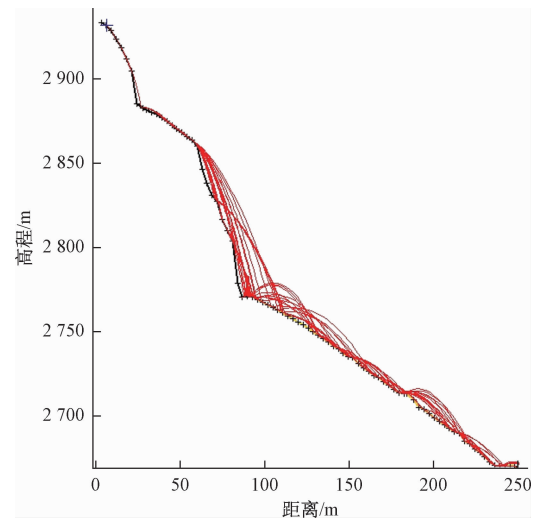


图 12 WY3 落石运动路径
Fig.12 Movement path of Rockfall WY3

息,崩塌区一般块径危岩体重量都超过 100 kg,属于中

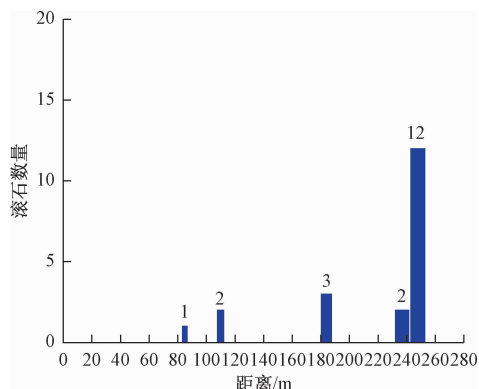


图 13 WY3 落石终点水平位置

Fig. 13 Final position of Rockfall WY3

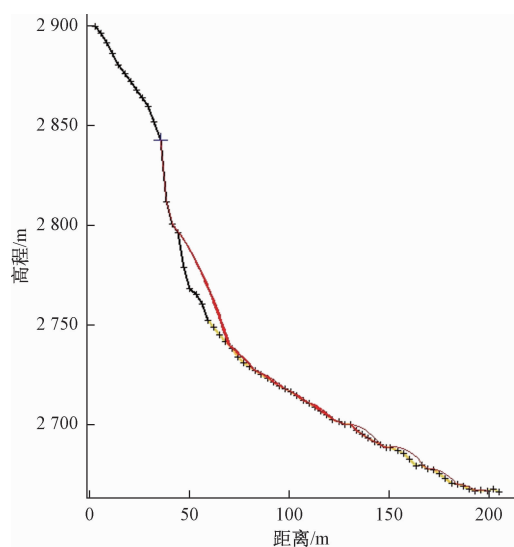


图 14 W1 落石运动路径

Fig. 14 Movement path of W1 Rockfall

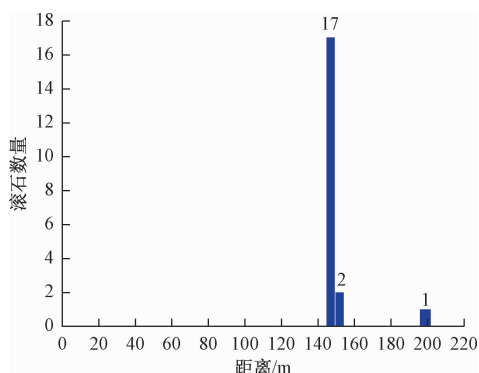


图 15 W1 落石终点水平位置

Fig. 15 Final position of W1 Rockfall

大型规模。根据三要素法(表 2)对各个危岩进行危险性分级,其中危险性大,等级 I,赋值 3 分;危险性中等,等级 II,赋值 2 分;危险性小,等级 III,赋值 1 分。评价结果如表 3。

表 2 危险性等级评价标准表(三要素法)

Table 2 Risk level evaluation standard table (three-element method)

危险性等级 稳定状态	崩塌体的运动路径是否能到达威胁区		
	能	可能	不能
不稳定	I	I	I
欠稳定	II	II	II
稳定及基本稳定	III	III	III

表 3 危岩危险性分级

Table 3 Risk classification of dangerous rock

危岩体 编号	三要素指标		危险性评价结果		
	规模	稳定状态	落石是否能到达公路	危险等级	危险等级分值
WY1	大型	基本稳定	能	III	1
WY2	大型	欠稳定	能	II	2
WY3	大型	欠稳定	能	II	2
W1	大型	基本稳定	能	III	1

3 危岩崩塌灾害易损性评价

易损性是指在一定区域内由于自然灾害可能造成的损失程度,取值范围在 0~1。易损性评价是承灾体属性的表现,没有易损性,也就没有灾难。评价区主要受灾体为:固定承灾体景区公路,流动承灾体过往车辆及游客。运用概率计算公路受损程度,并把固定受损运用到流动受损中,计算出最终的易损性。

3.1 固定承灾体易损性分析

易损性评价目的是确定承灾体受损的可能性。在计算固定承灾体公路易损性时选取冲击力作为崩塌灾害的强度指标。选取常用的日本道路公团公式^[13]计算滚石冲击力。

落石冲击力 I:

$$I = 2.108m^{\frac{2}{3}}\lambda^{\frac{2}{5}}H^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

式中: m ——落石质量/t;

λ ——拉梅系数,建议取 1 000 kPa;

H ——落石坠落的垂直高度/m;

根据王林峰在滚石冲击作用下公路破坏机制研究,结合其提出的极限承载力计算方法,计算公路极限承载力:

$$Q = 0.4\gamma_2 b_2 N_r + qN_q + 1.2CN_c \quad (2)$$

$$b_2 = b_1 + 2h_1 \tan\theta \quad (3)$$

式中: γ_2 ——路基容重;

b_2 ——危岩宽度;

N ——承载力系数,参照《建筑地基基础设计规范》GB50007—2011;

q ——超载;

C ——路基黏聚力;
 h_1 ——路面宽度;
 θ ——扩散角。

根据吴越等^[14]的承灾体易损性评价模型可知:将承灾体破坏状态划分标准推广为:

$$V = \begin{cases} 1 - \frac{Q}{I}, & Q \leq I \\ 0, & Q > I \end{cases} \quad (4)$$

景区混凝土路面厚 0.25 m,容重 24 kN/m³,应力扩散角 45°,抗拉强度为 3.2 MPa,路基土的黏聚力为 30 kPa,内摩擦角 18°,容重 20 kN/m³,高度 6 m。根据公式计算冲击力和易损性值。损性等级评价标准见表 4。各个危岩的固定易损性值见表 5。

表 4 易损性等级评价标准表

Table 4 Vulnerability rating criteria table

等级	极高	高	中	低	极低
易损性值	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	(0.2,0.4]	(0,0.2]

表 5 固定承灾体易损性值

Table 5 Fixed vulnerability value of disaster bearing body

危岩	冲击/kPa	承载力 Q	易损性 V	易损性等级
WY1	50 10.09	3 115.69	0.38	低易损性
WY2	8 580.93	4 328.98	0.50	中易损性
WY3	5 175.55	3 642.90	0.30	低易损性
W1	7 643.60	4 750.79	0.38	低易损性

根据现场勘查,8·8地震崩塌发生后,崩塌下方公路上有多处滚石碰撞的痕迹,但是不影响公路的正常使用。本次计算结果比较符合实际。

3.2 流动承灾体易损性分析

参考 Bounce(1997)和 Peila(2008)利用概率计算崩塌发生后 8 种可能性事件的概率。8 种可能性事件见图 16。

本次考虑概率事件的前提是景区正常营业状况。

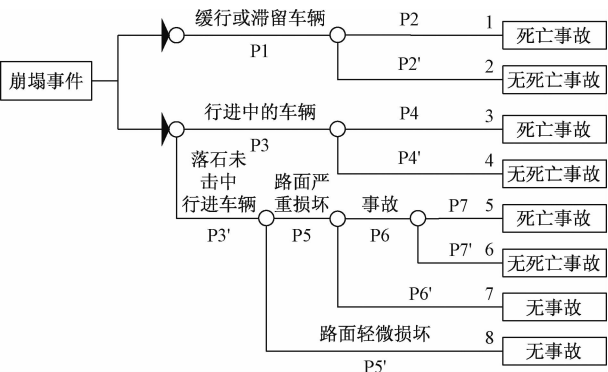


图 16 事件树分布图

Fig.16 Event tree distribution

根据 2017 年地震前景区每日进沟人数估计平均日车流量约有 4 000。景区内限速 40 km/h。所以当车流量过大或景点人较多,车辆在行进、缓行或停滞,都有可能发生事故。当落石没有击中行进中的车辆,停留在路面穿过路面时,因车速过小,撞上去可能性太小,不单独考虑,这里整体考虑路面损坏情况,严重时车辆可能发生事故,这里路面损坏情况参照前面的公路易损性值。

本次概率计算假设车辆在时间和空间上均匀分布并和崩塌相独立。假设所有的车辆具有相同的长度和款式。假设崩塌在崩塌威胁区的时间和空间上均匀分布并和交通情况相独立。根据 Peila 和 Guardini 研究,车辆被落石击中后的死亡概率 0.2。下面以危岩带 WY2 为例,计算流动承灾体的易损性值。

(1)车辆在威胁区缓行或滞留被砸中的概率:参考 Bounce 对堵塞半个小时的一辆车被砸概率计算。岩石滚石时,车辆在威胁范围内时间概率为停滞半个小时占全年时间比值,即 $0.5/8\ 760 = 5.7 \times 10^{-5}$,空间上被击中的概率为单辆车长度(理想体 4.5 m)与车所占道路长度的(车间距 1.5 m)比值 $4.5/(4.5 + 1.5) = 0.75$,本文设崩塌次数为 1 次。将时间概率和空间概率相乘可算出车辆在威胁区内半个小时被落石击中的概率为:

$$P_{\text{停滞}} = \frac{\text{停滞时间}}{\text{全年小时数}} \times \left[1 - \left(1 - \frac{\text{平均车长}}{\text{停滞时车占长度}} \right)^{\text{年崩塌次数}} \right] \quad (5)$$

即 $P_{\text{停滞}} = 5.7 \times 10^{-5} \times 0.75 = 4.28 \times 10^{-5}$

(2)车辆穿过威胁区行进过程中被击中的概率。这一事件是两个并列时间的函数。落石和车辆在空间和时间上一致。

空间一致概率:假设落石在危岩带内分布均匀,这时候空间一致概率这取决于车辆长度和威胁区长度的关系。为计算简便,假设每年到达公路的岩块数量为 1。WY2 威胁长度为 97 m。则 $4.5/97 = 4.64 \times 10^{-2}$ 。

时间一致概率:根据 Peila 和 Guardini 假设,落石和行进中的车辆时间一致的年概率等于单辆车通过威胁区所用的时间占全年时间的比例。危岩带 2 威胁长度 97 m,车速为 40 km/h,故年概率是 $(0.097/40)/8\ 760 = 2.77 \times 10^{-7}$ 。

则单辆车被击中的年概率:

$$P_{\text{单车单程被击中}} = \frac{\text{威胁长度}}{\text{车速}} \times \frac{1}{\text{全年小时数}}$$

$$\left[1 - \left(1 - \frac{\text{平均车长}}{\text{威胁长度}}\right)\right]^{\text{年崩塌次数}} \quad (6)$$

行进中车辆被击中的年概率(P_3)为一辆车年概率与该公路每年通过的车辆数的乘积。则 $P_3 = P_{\text{单车单程被击中}} \times \text{日均车流量} \times 365 \text{ 天} = 4.64 \times 10^{-2} \times 2.77 \times 10^{-2} \times 4\,000 \times 365 = 1.88 \times 10^{-2}$

(3) 落石没有击中车辆但击中公路面的年概率 $P'_3 = 1 - P_3 = 0.981\,2$ 。当公路严重损坏时,车辆路过时可能导致事故。其中公路严重损坏的概率 P_5 根据固定承灾体量化计算中的公路易损性取值。危岩带 2 下 $P_5 = 0.50$ 。

(4) 路面严重损坏导致事故的概率根据 Peila 和 Guardin(2008)的对意大利道路事故统计分析结果取事故概率为 1.11×10^{-2} , 死亡事故为 4.9×10^{-2} 。

(5) 根据 Peila 和 Guardini 的假设取事故后有人死亡的年概率是 0.2。

(6) 根据每个事件的概率值计算每条路径的概率值,得到死亡事故概率、无死亡事故概率及无事故概率。例如路径 3 发生死亡事故的的概率为落石击中车辆的概率(P_3)乘以此事件导致人员死亡的概率(P_4): $P(\text{路径 } 3) = P_3 \times P_4 = 1.88 \times 10^{-2} \times 0.2 = 0.376 \times 10^{-2}$

根据以上算法计算出各个危岩的最终易损性值(表 6)。

表 6 易损性计算结果

Table 6 Vulnerability calculation results

危岩 结果	P_1	P_3	P (死亡事故)	P (无死亡事故)	P (无事故)
WY1	4.28×10^{-5}	1.87×10^{-2}	3.95×10^{-3}	1.89×10^{-2}	9.77×10^{-1}
WY2	4.28×10^{-5}	1.88×10^{-2}	4.04×10^{-3}	2.03×10^{-2}	9.76×10^{-1}
WY3	4.28×10^{-5}	1.84×10^{-2}	3.85×10^{-3}	1.79×10^{-2}	9.78×10^{-1}
W1	4.28×10^{-5}	1.87×10^{-2}	3.95×10^{-3}	1.89×10^{-2}	9.77×10^{-1}

根据 Bounce 得出的可接受的个人年死亡概率范围为 1×10^{-4} 到 1×10^{-5} 。经计算本区的年死亡率都高于这个可接受的值。根据危岩区所有危岩体计算数据,将死亡概率分为 3 个区域,分级标准见表 7。最终 WY2 易损性结果为 I 级,得分 3 分。WY1、WY3、W1 易损性结果为 II 级,得分 2 分。

表 7 危岩体易损性分值表

Table 7 Vulnerability score table of dangerous rock mass

级别	易损性分区	分值
高易损 I	$4 \sim 6 \times 10^{-3}$	3
中等易损 II	$2 \sim 4 \times 10^{-3}$	2
低易损 III	$0 \sim 2 \times 10^{-3}$	1

4 崩塌灾害的风险性评价

UNDHA 公布的自然灾害风险的定义为:“风险是在一定区域和时段内,由于自然灾害而导致的人们生命财产和经济活动的损失值”。国际上普遍承认的风险性评价模型:

$$\text{Risk(风险)} = \text{Vulnerability(易损)} \times \text{Hazard(危险)}$$

本文选择以灾害的危险性为列,以灾害的易损性为行,组成风险评价矩阵评价危岩体的风险性。矩阵中的各个元素被称为风险指数。计算结果见表 8。

$$R = HV = \begin{Bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 4 & 6 \\ 3 & 6 & 9 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

表 8 危岩体风险性评价矩阵

Table 8 Risk assessment matrix of dangerous rock mass

危险性	易损性		
	低易损 III	中等易损 II	高易损 I
危险性小 III	1	2	3
危险性中等 II	2	4	6
危险性大 I	3	6	9

根据计算所得风险指数 $R_{i,j}$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$) 对危岩体灾害的风险性进行分级(表 9)。

表 9 危岩风险性分级

Table 9 Risk classification of dangerous rock

编号	风险性等级	风险性指数
I	极高风险	9
II	高风险	6 ~ 8
III	中等风险	3 ~ 5
IV	低风险	1 ~ 2

最终风险评价如下: WY1、W1 分值 2, 为低风险。WY3 分值 6, 为高风险。WY2 分值 9, 为极高风险。

5 结论

(1) 本文在危岩发育环境、自身特征的基础上,通过计算危岩体稳定性→失稳后运动轨迹及威胁范围预测→固定及流动承灾体易损性分析来完成危岩崩塌风险评价。

(2) 悬沟崩塌灾害发育 3 个典型危岩带和 1 个危岩体。崩塌的失稳模式主要以整体滑移式和局部凹腔坠落为主。通过定性定量分析危岩的稳定状态。最终结果, WY2、WY3 在天然工况下处于稳定状态, 在暴雨、地震工况下处于欠稳定状态。WY1、W1 在天然工况下处于稳定状态, 在暴雨、地震工况下处于基本稳定状态。

与现场实际调查结果相符。运用 Rockfall 模拟失稳后滚石运动轨迹,得到最远水平运动距离及威胁宽度。

(3) 针对危岩失稳后形成的落石,采用 Rockfall 对落石运动轨迹进行模拟,确定滚石的威胁范围。根据三要素法确定危岩危险性等级。最终评价结果为: WY1、W1 危险性等级Ⅲ,得1分。WY2、WY3 危险性等级Ⅰ,得3分。

(4) 使用 Peila 和 Guardini 事件树概率分析计算固定承灾体(公路)与流动承灾体(来往游客)的易损性值。将固定承灾体的易损性值运用到流动承灾体中,计算出每年事故死亡率。根据死亡率来区分易损性高低。最终 WY2 易损性等级Ⅰ,得分3分。WY1、WY3、W1 易损性等级Ⅱ,得分2分。

(5) 根据危险性与易损性分析,建立风险评价矩阵,最终 WY1、W1 风险分值2,为低风险。WY3 风险分值6,为高风险;WY2 风险分值9,为极高风险,均要高度重视,尽快着手防护措施设计,避免造成更大的损失。

参考文献:

- [1] 胡厚田. 崩塌落石研究[J]. 铁道工程学报, 2005, 22(增刊1): 387-391. [HU H T. Research on the collapse and falling stone[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22(Sup1): 387-391. (in Chinese)]
- [2] FELL R, COROMINAS J, BONNARD C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. Commentary [J]. Engineering Geology, 2008, 102: 99-111.
- [3] EINSTEIN H H. Landslide risk-Systematic approaches to assessment and management[M]//Landslide Risk Assessment. In: Cruden D. and Fell R. (eds.), : Routledge, 2018: 25-50.
- [4] FELL R, HARTFORD D. Landslide risk management [M]//Landslide Risk Assessment. In: Cruden D. and Fell R. (eds.), : Routledge, 2018: 51-109.
- [5] PIERSON L A, DAVIS S A, VAN VICKLE. Rockfall Hazard Rating System: Implementation Manual [R]. Federal Highway Administration Publication SA-93-057, 1990: 172.
- [6] CROSTA G B, AGLIARDI F. A methodology for physically based rockfall hazard assessment [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2003, 3(5): 407-422.
- [7] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989. [HU H T. Collapse and rockfall [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989. (in Chinese)]
- [8] 张路青, 杨志法, 张英俊. 公路沿线遭遇滚石的风险分析——方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5543-5548. [ZHANG L Q, YANG Z F, ZHANG Y J. Risk analysis of encountering rockfalls on highway and method study [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup2): 5543-5548. (in Chinese)]
- [9] 张路青, 杨志法. 公路沿线遭遇滚石的风险分析——案例研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3700-3708. [ZHANG L Q, YANG Z F. Risk analysis of encountering rockfalls on a highway—a case study [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3700-3708. (in Chinese)]
- [10] 许强, 陈伟. 单体危岩崩塌灾害风险评价方法——以四川省丹巴县危岩崩塌体为例[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1039-1046. [XU Q, CHEN W. Risk assessment method for single rockfall geo-disaster: a case study on the rockfall in Danba County, Sichuan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 1039-1046. (in Chinese)]
- [11] 陈洪凯, 唐红梅, 王蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 614-619. [CHEN H K, TANG H M, WANG R. Calculation method of stability for unstable rock and application to the Three Gorges reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 614-619. (in Chinese)]
- [12] 杨威. 危岩落石灾害危险性评价及防治决策方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011. [YANG W. Study on risk assessment and mitigation decision-making method of rockfall [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)]
- [13] KAWAHARA S, MURO T. Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rockfall [J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(3): 329-340.
- [14] 吴越, 刘东升, 陆新, 等. 承灾体易损性评估模型与滑坡灾害风险度指标[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2487-2492. [WU Y, LIU D S, LU X, et al. Vulnerability assessment model for hazard bearing body and landslide risk index [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2487-2492. (in Chinese)]