

文章编号: 1008-2786-(2017)3-323-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000228

# 基于可靠度分析的甘肃舟曲泄流坡滑坡风险评价

刘东飞<sup>1</sup> 王雄师<sup>2\*</sup> 杨欢<sup>1</sup> 舒和平<sup>1</sup>

(1. 兰州大学 资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 兰州 730000)

**摘 要:** 基于野外勘察与室内试验, 拟以舟曲泄流坡滑坡为研究对象。采用传递系数法对滑坡稳定性进行分析, 利用 Monte Carlo 法得到滑坡不同工况下的失稳概率, 且引入条件概率分析不同诱因下滑坡失稳的年概率; 易损性以承灾体野外调查和统计分析为基础, 运用赋值法估算泄流坡滑坡潜在的财产损失和人口伤亡风险值; 因此建立单体滑坡风险评价模型, 探讨单体滑坡风险评价技术方法。研究结果表明, 泄流坡滑坡在地震加暴雨条件下具有中危险性; 在  $\geq 50$  mm 暴雨条件或者地震条件下具有高危险性, 财产最大风险为 34.75 万元/年, 人口最大风险为 0.03 人/年, 人口风险超过了国际上暂定的社会容许标准, 应采取监测观察、工程治理等相关手段进行风险管理。

**关键词:** 蒙特卡洛法; 失稳概率; 风险评价; 泄流坡滑坡

**中图分类号:** P694

**文献标志码:** A

## 引言

滑坡风险评价已成为国际上研究的热点。早在 70 年代, 国外学者就已初步展开滑坡灾害评价的研究工作, Finlay and Fell<sup>[1]</sup> 研究了澳洲和香港的滑坡风险, 推进了“滑坡风险识别”和“可接受滑坡风险水平”方面的工作。Van Westen<sup>[2]</sup> 提出并完善了滑坡风险评估技术框架, 并在国际上得到推广。国内的滑坡风险评价工作在严峻的滑坡灾害情势威胁下, 发展迅猛。乔建平等<sup>[3]</sup> 提出了滑坡危险度的标准化评价体系, 为滑坡信息库的建立提供了理论基础; 殷坤龙等<sup>[4]</sup> 建立了滑坡时空预测的信息模型和 Verhulst 灰色模型, 并用于鸡鸣寺滑坡模拟研究, 结果表明模型可靠; 汪敏等<sup>[5]</sup> 基于影响斜坡稳定性的不确定性因素分析了滑坡灾害的可接受风险水平, 并建立了滑坡灾害的风险评价体系。通过各位学者努力, 滑坡风险评价的理论框架的形成, 大部分的

工作都集中在了区域滑坡风险评价的研究方面<sup>[6]</sup>, 但对于单体滑坡的风险评价研究相对较少, 单体滑坡的研究较多是滑坡稳定性分析及剩余推力计算方面<sup>[7-9]</sup>。稳定性系数的求解无法从概率论的角度对滑坡稳定性作出分析, 而蒙特卡洛法恰恰弥补这一不足<sup>[10]</sup>。危险性评价核心是确定诱发因素下的滑坡失稳概率及影响范围。在滑坡稳定性分析的基础, 采用蒙特卡洛模拟法对滑坡进行可靠性分析, 计算滑坡失稳概率。本文基于蒙特卡洛法模拟滑坡失稳概率并进行危险性分析, 结合泄流坡滑坡野外资料及相关数据收集开展系统的单体滑坡风险评价, 为当地滑坡灾害的防治提供科学依据。

## 1 研究内容与方法

单体滑坡的风险评价, 需要开展的研究内容主要包括单体滑坡危险性评价、易损性评价以及风险评价。

收稿日期(Received date): 2015-06-16; 改回日期(Accepted date): 2016-11-15。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划项目(2011BAK12B05)。[National Science and Technology Support Program(2011BAK12B05).]

作者简介(Biography): 刘东飞(1988-), 男, 汉族, 湖北松滋人, 硕士研究生, 主要从事滑坡灾害风险评价研究。[Liu dongfei(1988-), male, M. Sc. candidate, major in landslide hazard risk assessment research.] E-mail: liudf13@lzu.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 王雄师(1969-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 副研究员, 主要从事水文资源方面研究。[Wang Xiongshi(1969-), male, born in Jingning county, Gansu, Ph.D. associate professor, research on hydrological resources.] E-mail: 771997308@qq.com

### 1.1 危险性评价方法

#### 1) 传递系数法

针对舟曲泄流坡滑坡的滑面特征,岩土性质及滑体倾角大小,综合考虑采用传递系数法对滑坡做稳定性分析,计算公式如下<sup>[11]</sup>:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} \quad (1)$$

$$\psi_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \varphi_{j+1} \quad (2)$$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \psi_j = \psi_i \psi_{i+1} \psi_{i+2} \cdots \psi_{n-1} \quad (3)$$

$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i l_i \quad (4)$$

式中:  $F_s$  为边坡稳定性系数,  $\psi_j$  为传递系数;  $R_i$ 、 $T_i$  分别为第  $i$  计算条块上抗滑力(kN/m)和下滑力(kN/m);  $\alpha_i$ 、 $l_i$ 、 $c_i$ 、 $\varphi_i$  分别为第  $i$  段滑块的滑面倾角(°)、滑面长(m)、粘聚力(kPa)、内摩擦角(°)。

#### 2) 蒙特卡洛模拟法

Monte Carlo 法是依据统计抽样理论结合计算机来研究随机变量的数值模拟方法<sup>[10,12]</sup>。若已知状态变量的概率分布,对于滑坡工程,基于滑坡稳定性分析的传递系数法,建立稳定性状态函数  $F_s = f(c, \varphi, p, q, \dots) = 1$ ,利用 Monte Carlo 法生产符合状态变量概率分布的一组随机数  $c_1, \varphi_1, p_1, q_1, \dots$  代入状态函数  $F_s = f(c, \varphi, p, q, \dots)$  计算可得状态函数的一个随机数。

均值和标准差分别为:

$$\mu_{F_s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{s(i)} \quad (5)$$

$$\delta_{F_s} = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_{s(i)} - \mu_{F_s})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

研究表明稳定性系数  $F_s$  服从正态分布,若用  $\beta$  表示可靠性指标,并定义:

$$\beta = \frac{\mu_{F_s} - 1}{\delta_{F_s}} \quad (7)$$

则破坏概率:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (8)$$

上式中  $\Phi(\beta)$  为标准正态分布  $P_f$  与  $\beta$  具有一一对应的关系。

滑坡发生破坏年概率的确定方法:滑坡的破坏是各种诱发因素(如降雨、地震、人类活动)主导下的概率事件,假设诱发因素为事件  $A$ 、滑坡事件为  $B$ ,那么该条件下滑坡发生的概率  $P$  表达式为:

$$P = P[A]P[B/A] \quad (9)$$

其中  $P[B|A]$  即为某诱发因素下滑坡发生的条

件概率,也就是前面所计算的滑坡失稳概率  $P_f$ ,下面需要确定诱发因素的概率。当诱发因素为降雨时,该事件的发生与其重现期  $T$  有如下对应关系:

$$P[A] = 1/T \quad (10)$$

### 1.2 易损性评价方法

易损性是指在一定区域和给定时间段内,由于滑坡灾害而导致的该区域内所有人员、财产的潜在最大损失程度<sup>[13]</sup>。易损性是承灾体的属性,其损失程度用 0(无损失)到 1(完全损失)之间的数字来表征,数值的大小即代表了人员或财产的伤亡损失多少。一般根据影响易损性的因素及历史记录采用赋值法确定<sup>[14]</sup>。

### 1.3 滑坡风险计算方法

根据风险度 = 危险度 × 易损度的观点<sup>[13]</sup>,泄流坡滑坡风险计算公式为:

$$R = P_h \times P_{(S,T)} \times V_{(Prop,S)} \times E \quad (11)$$

式中:  $R$ —滑坡风险值,  $P_h$ —滑坡发生的年概率,  $V_{(D,T)}$ —人口的易损性,  $V_{(Prop,S)}$ —财产的易损性,  $P_{(S,T)}$ —承灾体受险的时空概率,  $E$ —承灾体的人口数量或财产价值。

## 2 舟曲泄流坡滑坡概况

舟曲泄流坡滑坡位于舟曲县城东侧 6 km 的白龙江左岸,气候属北亚热带向北温带的过渡区,受大气环流和地形影响,具有垂直气候分带明显和干湿季分明两大特点;多年平均降雨量为 435.8 mm,日最大降雨量为 63.3 mm,小时最大降雨量为 47.0 mm,降雨以连阴雨和暴雨形式出现,降水主要集中在 6—9 月<sup>[15,16]</sup>。

泄流坡沿坪定—化马断裂带发育,受构造、岩性结构、地表水、人类活动等因素影响,该区滑坡成群发育,是滑坡、崩塌灾害高发区。地理坐标为 33°44'53" N, 104°24'8" E。滑坡平面形态呈不规则的长舌状(图 1),上部宽度较大,中下部窄,剖面形态为复合型。主滑方向 285°,滑坡体长约 2 500 m,宽度 500~650 m,厚度 40~55 m,总体积超过  $6000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。无明显滑坡后壁,由于多次反复活动,滑坡表面起伏不平,后部较陡,坡度 17°,中间段较缓,坡度 9°左右,形成向白龙江倾斜的平台,至滑坡前缘受白龙江冲刷而变陡,坡度在 45°以上。滑坡两侧纵向冲沟发育,滑坡后缘高程 2 040~2 200 m,中段高程在 1 600~1 800 m,前缘剪出口高程 1 310~1 320

m,整体呈现出4级高差,相对高差840 m~1 074 m,属于典型的断裂带滑坡(图2)。

滑坡上覆断裂带,处于蠕动滑动状态。断裂带北侧为中泥盆统古道岭组第二岩性段,岩性为炭质板岩和千枚岩等,产状 $55^{\circ}\angle 75^{\circ}$ ;断裂带南侧属中—上石炭统(C2+3),岩性为灰岩、钙质砂岩、板岩,产状 $350^{\circ}\angle 70^{\circ}$ (图3)。两者呈断裂接触,节

理、裂隙发育,风化强烈,岩体结构大部分被破坏,抗剪强度较低。

泄流坡滑坡滑带为质地软弱且易滑的炭质千枚岩、千枚岩及板岩等组成的软弱夹层,节理杂乱、风化严重,多呈鳞片状或泥状,滑带土就发育其中。现场测试结果表明<sup>[17]</sup>,泄流坡滑带实验土天然含水率不高,仅为1.9%,天然密度为 $2.11\text{ g/cm}^3$ ,土颗粒比



图1 泄流坡滑坡图

Fig. 1 Plan view of Xieliupo landslide

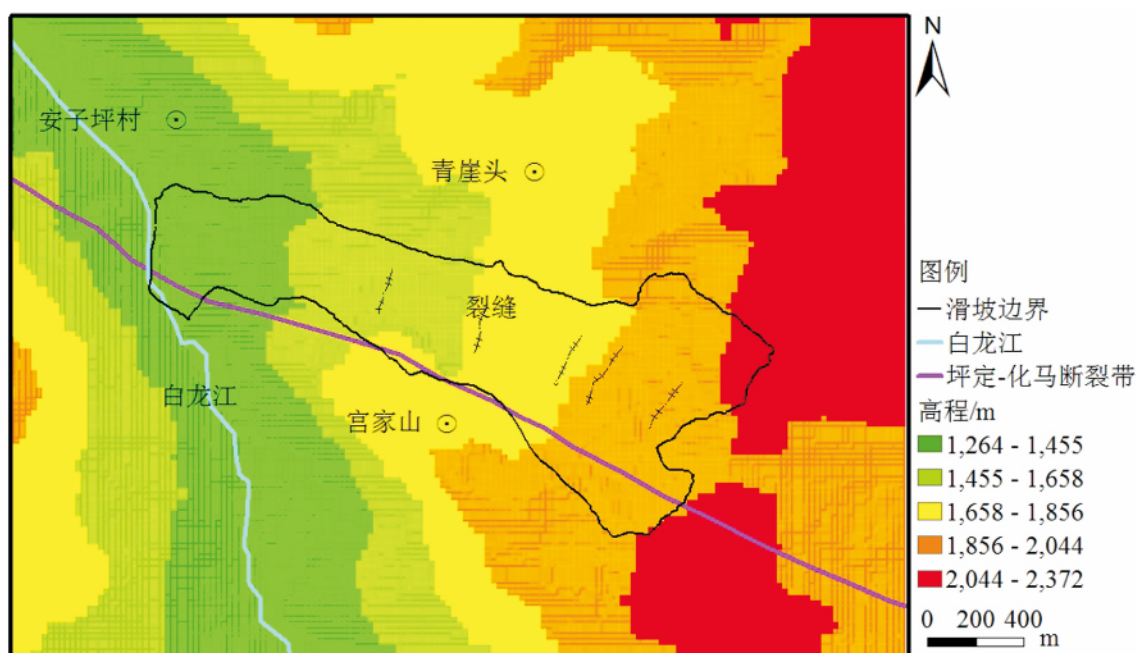


图2 泄流坡滑坡区地形图

Fig. 2 Topographic map of Xieliupo landslide area

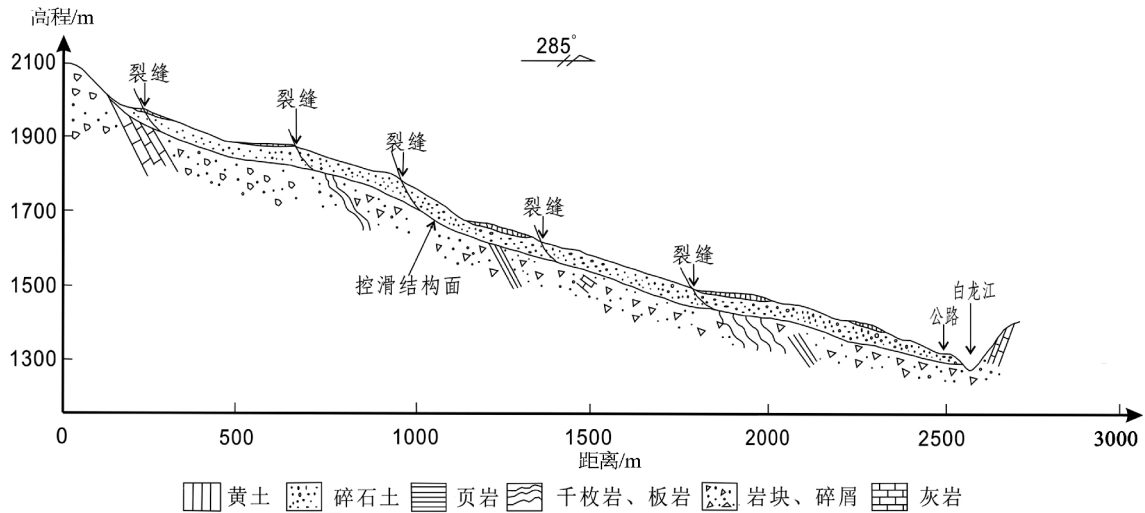


图3 泄流坡滑坡纵剖面图

Fig. 3 Profile of Xieliupo landslide

重均值为  $2.74 \text{ g/cm}^3$ 。

据泄流坡监测站数据,泄流坡滑坡体积超过  $6000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡体前缘早期开始滑动,牵引滑体逐渐向前发展,进而表现出整体前滑的动态。1991–2001 年之间,滑体滑动速率为  $10.6 \sim 33.6 \text{ mm/d}$ 。2002–2010 年为  $6 \sim 15 \text{ mm/d}$ ,滑动速率略微减小,但整体蠕滑从未停止。有学者认为<sup>[12]</sup>,泄流坡滑坡整体失稳堆积体积规模达到  $7200 \times 10^4 \text{ m}^3$  以上。泄流坡可能的失稳模式包括<sup>[18]</sup>,一是白龙江不断冲刷、掏蚀前缘坡脚,削减了滑坡的支撑力;二是降雨入渗滑坡体导致岩土体的抗剪强度降低,同时降雨入渗还会起到软化和润滑滑体的效果;三是地震作用产生的水平地震作用力会使下滑力增强导致滑体失稳。

### 3 结果及讨论

#### 3.1 危险性分析

##### 3.1.1 滑坡稳定性分析

泄流坡滑坡为折线型的滑面特点,采用工程上运用的传递系数法对滑坡做稳定性分析。计算剖面选用泄流坡滑坡主滑方向上的剖面,并对剖面及土层都适当的简化为直线从而得到条分块体的计算模型(图4)。滑体稳定性的计算主要考虑滑体在天然、暴雨、地震、地震加暴雨四种工况。其中,暴雨工况下,降雨强度超过  $50 \text{ mm/h}$ ,持续时间 3 小时以上;地震工况下,滑坡所在区域地震烈度 VIII 度,设计地震加速度为  $0.2g$ 。

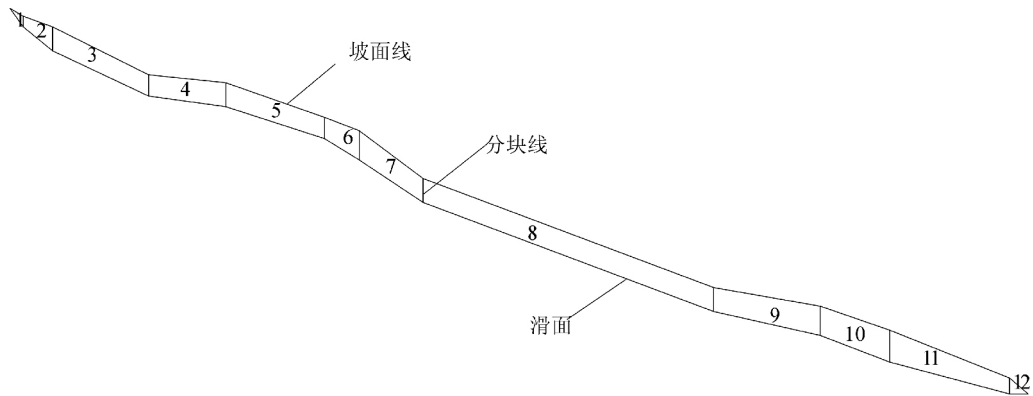


图4 泄流坡滑坡稳定性计算条分块体模型

Fig. 4 Slice method model for Xieliupo slope stability analysis

表 1 泄流坡滑坡稳定性计算参数及结果

Tab. 1 The stability calculation parameter and result of Xieliupo landslide

工况	重度 $\gamma/\text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$	粘聚力 $c/\text{KPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	稳定性系数 $F_s$	稳定状态
天然	20.58	20.0	20.5	1.362	稳定
暴雨	21.30	18.3	15.8	1.035	欠稳定
地震	20.58	20.0	20.5	0.762	不稳定
地震 + 暴雨	21.30	18.3	15.8	0.581	不稳定

表 2 泄流坡滑坡失稳概率计算结果

Tab. 2 Instability probability calculation results of Xieliupo landslide

工况	失稳次数	稳定性均值 $\mu$	稳定性标准差 $\delta$	变异系数	可靠度 $\beta$	失稳概率 $P_f$
天然	225	1.9101	0.4926	0.258	1.848	0.023
暴雨	3772	1.1831	0.5343	0.452	0.343	0.377
地震	4996	1.0144	0.2978	0.294	0.048	0.499
地震 + 暴雨	8787	0.6599	0.2946	0.446	-1.154	0.879

泄流坡滑坡的计算土体参数是在室内直剪试验的基础上结合当地岩土力学参数的经验值考虑,再根据滑坡上发生局部破裂的滑体的实际情况,将其视为滑体将滑未滑的极限状态,运用反分析法,最后综合确定。滑坡防治工程勘察规范(DZ/T0218-2006)》规定当  $F_s < 1.0$  时滑坡体处于不稳定状态,当  $1.0 \leq F_s < 1.05$  时滑坡处于欠稳定状态,当  $1.05 \leq F_s < 1.15$  时滑坡处于基本稳定状态,当  $F_s > 1.15$  时滑坡处于稳定状态。计算可得滑体在 4 种不同工况下的稳定性系数及稳定状态(表 1)。由结果分析可知泄流坡滑坡在天然工况下处于稳定状态,稳定性系数为 1.362;在暴雨工况下处于欠稳定状态,稳定性系数为 1.035;在地震及地震加暴雨工况下,稳定性系数大幅降低,均远小于 1,滑体处于不稳定状态。

3.1.2 滑坡失稳概率计算

根据蒙特卡洛理论及公式,采用 Matlab 编写的滑坡失稳概率计算程序,重复计算 10000 次得到泄流坡滑坡失稳概率结果(表 2)。由表 2 可知,泄流坡滑坡在天然工况下可靠度值较高,达到 1.848,失稳概率极小,仅为 0.023,由此说明天然状态下滑坡破坏的可能性不大,可以认为该状态下滑体是稳定的。在暴雨工况下,滑体处于欠稳定状态,失稳概率为 0.377。在地震工况下模拟 10000 次得到的失稳次数达到 4996 次,滑体的可靠度迅速降低到 0.048,滑坡破坏的可能很大。地震加暴雨工况下,可靠度降低到负值,仅为 -1.154,失稳概率很高,达到 0.879,表明滑体极可能失稳破坏。

3.1.3 滑坡发生破坏年概率的确定

滑坡灾害风险定量分析的时间单位一般以年来衡量,由前面的稳定性分析可知,泄流坡滑坡失稳的诱因主要是暴雨和地震,于是滑坡发生的年概率  $P$  即为该条件下滑坡发生破坏的条件概率,且  $P$  计算公式为:  $P = P[A]P[B|A]$ 。其中,  $P[B|A]$  为某诱发因素下滑坡发生的条件概率,也就是前面所计算的滑坡失稳概率  $P_f$ ,下面需要确定诱发因素的概率。当诱发因素为降雨时,该事件的发生与其重现期  $T$  有如下对应关系:  $P[A] = 1/T$ 。统计分析泄流坡滑坡所在的舟曲县地面气象站点近 40 年逐日实测降雨资料,发现 40 年间出现过 2 次暴雨级别的降水,于是将暴雨重现期定为 20 年,那么  $P[A] = 1/20 = 0.05$ 。当诱发因素为地震时,参照国家地震局完成的 1:400 万《中国地震烈度区划图(1990)》图上标注的烈度值,是指一般场地情况下,可能遭遇超越概率为 10% 的烈度值,滑坡所处的舟曲县地震烈度为 VIII 度,这里将泄流坡滑坡 50 年内的遭遇此烈度值的超越概率作为地震诱发概率,取值为 0.10。由上述分析,结合年概率公式带入相关数据计算,得到泄流坡滑坡发生破坏的年概率  $P_h$ (表 3)。

表 3 泄流坡滑坡发生破坏的年概率

Tab. 3 Xieliupo landslide failure annual probability

失稳条件	失稳概率 $P_f$	诱因概率 $P[A]$	滑坡发生年概率 $P_h\%$
暴雨	0.377	0.05	1.89
地震	0.499	0.10	4.99
暴雨 + 地震	0.879	0.005	0.44

表 4 滑坡不同年概率取值范围对应的危险性半定量标准

Tab. 4 Range of varied annual probability values corresponding to semi-quantitative geohazard standard

年概率取值范围	滑坡危险性	说明
> 1/20	极高	滑坡以≤20 年重现期的概率发生 在某种诱因下 ,滑坡会出现明显的变形蠕变现象
1/100 ~ 1/20	高	滑坡以 20 ~ 100 年重现期发生 ,恰好处于人的生命期及建筑物的有效期内
1/500 ~ 1/100	中等	滑坡以 100 ~ 500 年重现期发生 在人的生命期内发生的概率较小
1/2500 ~ 1/500	低	滑坡以 500 ~ 2500 年重现期发生 ,概率很低
< 2500	极低	滑坡以大于 2500 年重现期发生 ,概率极低

根据滑坡半定量标准<sup>[19]</sup>对滑坡的危险性做出判断(表 4)。泄流坡滑坡在暴雨条件下发生破坏的年概率为 1.89%(表 3),判断滑坡具有高危险性;地震条件下滑坡发生年概率 4.99%,滑坡具有高危险性;地震加暴雨条件下滑坡发生年概率为 0.44%,滑坡具有中等危险性,虽然暴雨加地震条件下滑坡失稳的概率高达 0.879,但由于诱发因素同时满足的概率极低,故滑坡在该条件下的年概率相对最低,危险性也最低。

3.1.4 滑坡影响范围的确定

基于 DAN - W 滑坡运动软件,采用 frictional 和 voellmy 流变模型的复合模型模拟泄流坡滑坡运动特性,得到滑坡堆积形态及堆积体位置分布(图 5),参考文献<sup>[19]</sup>对于 DAN - W 软件对滑坡运动特性的模拟给出了详细的研究过程。在图 5 中观察到堆积体的曲线形态发现后段靠中的位置相对向上隆起,而前段靠河谷的部分相对凹陷的形态,分析原因可能是泄流坡滑坡前、后段滑体失稳次序差异所致,滑体失稳时首先是下段滑体先破坏下滑堆积到河谷区域,下段滑体滑动后,上段滑体失去支撑随之滑动,由于两段滑体的高差悬殊,上段滑体会堆积到下段滑体的上面,摩擦阻力最终形成堆积曲线后端靠

中部位置凸起的形态。结合滑体堆积体的形态位置,对比分析滑体运动路径的宽度,可以大致确定堆积体平面铺展范围,从而判定滑体破坏后第一时间直接威胁到的区域,即圈定出特别需要注意的危险范围,并绘制滑坡危险范围图(图 6)。其底图是滑坡区域的遥感影像图,在遥感影像图的基础上采用常用的目视解译方法,对滑坡区域的承灾体类型经行了解译并显示,红色区域所代表的危险范围涵盖了滑坡堆积体所涉及的范围,同时考虑了处在地势较低的河谷及阶地上的安子坪村,在 Arcgis 软件上计算出来的危险范围面积为 0.87 km<sup>2</sup>。

3.2 易损性分析

实地调查资料显示,泄流坡滑坡体中部偏北处的原泄流坡村村民早已搬迁,现已无人居住,不予考虑。兴建虎家崖水电站时,修筑了电站引水排泄通道,通道从泄流坡对岸山体穿过,如果滑坡失稳堵江后,通道将为排水疏通赢得时间,将可能造成大规模河水壅高,降低对上游舟曲县城的威胁。但是,虎家崖水电站及以下村庄等均会受到堵江后水位上升的威胁。因此,滑坡所影响的人口主要是滑坡前缘处的安子坪村村民。泄流坡滑坡所涵盖的承灾体类型主要有如下:人口(安子坪村村民)、房屋建筑、土地、虎家崖水电站、313 省道、桥、商店、水泥直销处、养猪场等。在对滑坡体所影响范围内的承灾体进行详细的调查统计后,得到了承灾体上财产的统计值,统计结果见表 5。承灾体财产价值以当地实际经济生产情况并结合当地物价估算得出。受影响的安子坪村有 41 户居民,总人口 186 人。

(1) 对于人口的易损性:滑坡影响区的安子坪村基本务农在家,调查表明有 8 人外出打工,春节前后 2 个月基本在家,于是常年在家的人员的受险时间概率为 1,外出务工人员的受险时间概率为 0.17。考虑到该村村民的聚居点位于滑坡主滑方向的侧面,于是对其受险的空间概率取值为 0.5。如果是白

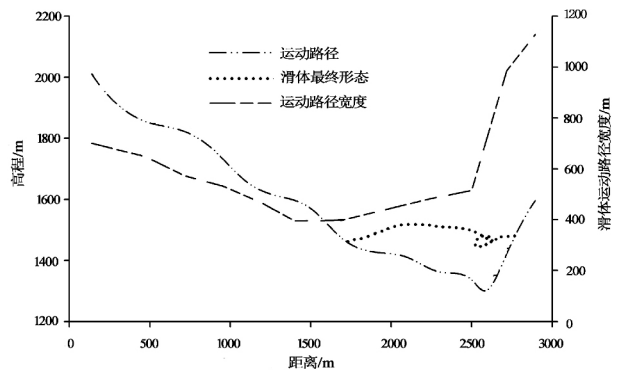


图 5 泄流坡滑坡最终堆积体形态分布

Fig. 5 Final deposition figuration of Xieliupo landslide



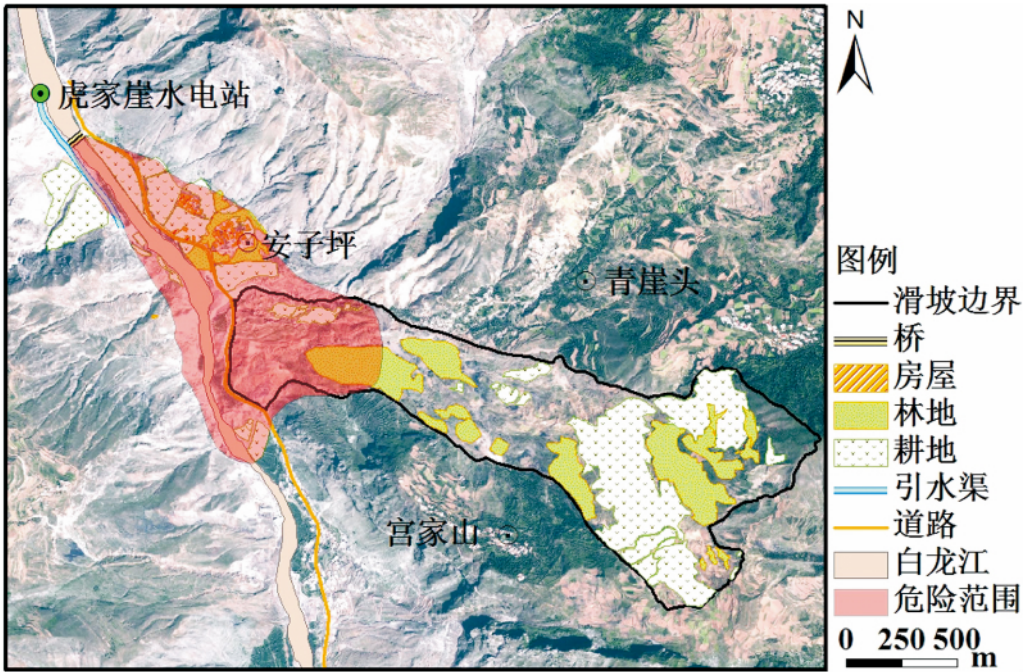


图 6 泄流坡滑坡危险范围  
Fig. 6 Threatening range of Xieliupo landslide

天发生,则会及时转移,风险大大降低,这里考虑夜里发生的风险,则人口受险的时空概率为 $(1 \times 0.5 + 0.17 \times 0.5) \times 0.5 = 0.29$ 。另外该区域老人、小孩占人口的 $1/3$ ,他们躲避灾害的能力较差,对他们的易损性赋值为 $0.02$ ,成年人赋值为 $0.005$ ,于是区域内人员整体的易损性为 $0.01$ 。

(2) 建筑物及室内财产的易损性: 堵江后水位上涨,土木结构房屋基本损毁,其易损性取 $1$ ,砖混结构的防水能力较好,其易损性取 $0.2$ ,室内贵重财物及轻便物件会得到转移,其脆弱性取 $0.5$ 。

(3) 土地及道路易损性: 滑体上的土地在滑坡失稳后,庄稼及林地基本被毁,堵江后,水位上升也会江农田淹没殆尽,考虑到部分存活,易损性取 $0.85$ 。滑坡前缘的 $313$ 省道完全被掩埋,易损性取 $1$ 。

(4) 各种设施: 水利站距离较远,但会受到涨水淹没设备,易损性取 $0.5$ ,公共设施和其他设施都将遭受水淹,损失巨大,易损性取 $0.85$ 。

滑坡影响区域内的承灾体受险的时间概率均为 $1$ ,滑坡体上及危险范围内的承灾体在滑坡破坏时受险的空间概率为 $1$ ,安子坪村及水电站等由于不在滑坡运动路径上,主要受堵江威胁,其空间概率取 $0.5$ 。

3.3 滑坡风险评价

根据滑坡风险评价公式计算得到泄流坡滑坡在

不同工况下滑坡发生滑动的年风险值(表 6)。

表 5 泄流坡滑坡承灾体财产价值统计情况  
Tab. 5 Property value statistics of hazard-affected entities of Xieliupo landslide

承灾体类型		单位	单价/万元	数量	价值/万元
土地	耕地	亩	0.3	728.8	218.6
	林地		0.15	458.3	68.8
水利设施	水电站	个	500	1	500
道路	313 省道	km	300	0.68	204
房屋	土木	间	0.5	107	53.5
	砖混		1.6	81	129.6
室内财产	农村居民	户	3.5	41	143.5
公共设施	商店	个	1	2	2
其他设施	水泥直销处	个	30	1	30
	养猪场		80	1	80

表 6 泄流坡滑坡不同工况下风险计算结果  
Tab. 6 Calculated risk under varied conditions of Xieliupo landslide

工况条件	财产总风险 R 万元/年	人口总风险 R 人/年
暴雨	13.16	0.01
地震	34.75	0.03
暴雨加地震	3.06	0.002

根据计算结果,泄流坡滑坡最大财产风险为34.75万元/年,最大人口风险为0.03/年。泄流坡最大风险并不是出现在暴雨加地震工况下,而是出现在地震工况下,虽然暴雨加地震工况的破坏性强,但是其风险值反而不大,这表明小概率事件的影响虽然巨大,但对居民的日常生活并无太大风险。滑坡破坏所造成的最小人口风险为0.002人/年,与国际上目前暂定的社会容许标准 $10^{-3}$ 相比,处于不可接受区。建议当地政府根据实际情况,采取相应措施进行风险管理,减少人员财产伤亡损失。

## 4 结论

通过对泄流坡滑坡风险评价,探讨了对于承灾体组成单一、便于统计、滑坡影响因素明确的单体滑坡的评价技术研究,得出以下主要结论。

(1) 采用蒙特卡洛模拟法对滑坡进行可靠性分析,利用传递系数法对滑坡做稳定性分析。泄流坡在天然工况下处于稳定状态,地震及地震加暴雨工况下滑体稳定性系数较低,滑体处于不稳定状态,基于不稳定状态的条件;泄流坡滑坡在暴雨工况和地震条件下具有高危险性,在暴雨加地震条件下具有中危险性。

(2) 对泄流坡滑坡承灾体易损性的评价和赋值方法经行探讨,完成了泄流坡滑坡的风险评估,得到滑坡的定量化的风险值,财产最大风险为34.75万元/年,人口最大风险为0.03人/年,其中人口风险超过了社会容许标准,在进行风险管理时,值得当地相关部门高度重视,应修建防治工程,或搬迁、避让,从而达到防灾减灾的目的。

## 参考文献(References)

- [1] FINLAY P J, ROBIN Fell. Landslides: Risk perception and acceptance [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(2): 169 - 188
- [2] VAN WESTEN C, 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
- [3] 乔建平, 赵宇. 滑坡危险度区划研究评述 [J]. 山地学报, 2001, 19(2): 157 - 160 [QIAO Jianping, ZHAO Yu. Review on risk degree regionalization of landslide [J]. Mountain Research, 2001, 19(2): 157 - 160]
- [4] 殷坤龙, 晏同珍. 滑坡预测及相关模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 1 - 8 [YIN Kunlong, YAN Tongzhen. Landslide prediction and relevant models [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(1): 1 - 8]
- [5] 汪敏, 刘东燕. 滑坡灾害风险分析研究 [J]. 工程勘察, 2001, (2): 1 - 6 [WANG Min, LIU Dongyan. Landslide hazard risk analysis and research [J]. Geo-technical Investigation & Surveying, 2001, (2): 1 - 6]
- [6] 何淑军, 张春山, 陈志华, 等. 陕西省宝鸡市渭滨区夏呀河滑坡风险评估 [J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1064 - 1076 [HE Shujun, ZHANG Chunshan, CHEN Zhihua, et al. Risk evaluation for Xiayahelandslide in Wein District, Baoji City, Shanxi Province [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 1064 - 1076]
- [7] 顾宝和, 毛尚志. 滑坡稳定分析传递系数法的讨论 [J]. 工程勘察, 2006, (12): 8 - 11 [GU Baohe, MAO Shangzhi. The discuss of the method of force transfer for the stability analysis of slope [J]. Geo-technical Investigation & Surveying, 2006, (12): 8 - 11]
- [8] 尹光志, 俸锦福, 刘腊美, 等. 向家山滑坡机理及稳定性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2003, 3(1): 167 - 171 [YIN Guangzhi, FENG Jinfu, LIU Lamei, et al. Study on the mechanism and stability of Xiangjiashan Landslide [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2003, 3(1): 167 - 171]
- [9] 穆鹏, 吴玮江, 折学森. 汶川地震重灾区陇南红土坡滑坡稳定性分析与防治对策研究 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 204 - 212 [MU Peng, WU Weijiang, ZHE Xuesen. Stability assessment and treatment for Hongtupo landslide in severe disaster area of southern Gansu induced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 204 - 212]
- [10] 何淑军, 张春山, 吴树仁, 等. 基于蒙特卡洛法的多级黄土滑坡可靠性分析 [J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1822 - 1831 [HE Shujun, ZHANG Chunshan, WU Shuren, et al. Reliability analysis of the multi-layer landslide in loess based on the Monte - Carlo simulating method [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1822 - 1831]
- [11] 方玉树. 滑坡稳定分析传递系数法若干问题探讨 [J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 607 - 611 [FANG Yushu. Some problems in transmitting coefficient method for Landslide stability analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(5): 607 - 611]
- [12] 刘东飞, 马金珠, 田黎明, 等. 基于 DAN - W 模型的舟曲泄流坡滑坡运动特性模拟研究 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 733 - 738 [LIU Dongfei, MA Jinzhu, TIAN Liming, et al. Dynamic characteristics of the Xieliupo landslide in Zhouqu County based on DAN - W [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(5): 733 - 738]
- [13] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险评价 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003, 34 - 37, 47 - 48 [LIU Xilin, MO Duowen. Debris flow risk assessment [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003, 34 - 37, 47 - 48]
- [14] 易云梅. 基于 GIS 的桂林市城区洪水灾害风险评估研究 [D]. 桂林: 广西大学, 2012. [YI Yunmei. Study on risk assessment of flood disaster in guilin area based on Gis [D]. Guilin, Guangxi University, 2012. ]
- [15] 舒和平, 刘东飞, 顾春杰, 等. 中小尺度区域泥石流灾害风险评估 [J]. 山地学报, 2014, 32(6): 754 - 760 [SHU Heping, LIU Dongfei, GU Chunjie, et al. Risk assessment of medium and small-scale regional debris flow [J]. Mountain Research, 2014, 32(6): 754 - 760 ]



- [16] 舒和平, 韩拓, 齐识, 等. 甘肃省南部泥石流运动规律的分析与研究—以甘肃舟曲三眼峪沟为例[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 119–124. [SHU Heping, HAN Tuo, QI Shi, et al. Analysis and research on the law of motion of debris flow in southern Gansu Province—a case study of sanyanyu gully in Zhouqu of Gansu Province [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 119–124, 137]
- [17] 宋丙辉, 谟文武, 吴玮江, 等. 甘肃舟曲泄流坡滑坡带土的抗剪强度特性[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(6): 7–12. [SONG Binghui, CHEN Wenwu, WU Weijiang, et al. Shear strength characteristics of soil in the slide zone of Xieliupo landslide in Zhouqu, Gansu province [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, 47(6): 7–12]
- [18] 余志山. 泄流坡滑坡灾害损失预测及成灾方式研究[J]. 甘肃科技, 2007, 23(12): 72–76. [YU Zhishan. The research about disaster loss prediction and damage forms of Xieliupo landslide [J]. Gansu Science and Technology, 2007, 23(12): 72–76]
- [19] HUNGR O. Some methods of landslide hazard intensity mapping// Cruden D M, Fell R. Landslide Risk Assessment [C]. Proc. Inter workshop on landslide risk assessment, Honolulu, 215–226

## Risk Assessment of Zhouqu Xieliupo Landslide based on Reliability Analysis in Zhouqu County of Gansu Province

LIU Dongfei<sup>1</sup>, WANG Xiongshi<sup>2</sup>, YANG Huan<sup>1</sup>, SHU Heping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Western China's Environment Systems of the Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 73000, China;

2. Geological Disaster Prevention and Control Institute, Gansu Provincial Academy of Sciences, Lanzhou 73000, China)

**Abstract:** Based on field surveys and laboratory experiments, the stability of Xieliupo landslide in Zhouqu County was investigated by transfer coefficient method. The probability of annual unstable landslide was estimated by the Monte Carlo method under different conditions when the conditional probability was introduced. The calculation of the vulnerability depends on the field investigation and statistics of hazard-affected bodies and the assignment method was applied to evaluate the potential risk of economic loss and casualties. The single landslide risk assessment model and its related technologies were established and discussed, respectively. The results suggested that Xieliupo landslide had a middle risk to occur when earthquake and heavy rain occurred simultaneously. However, it would have a high risk when heavy rain (precipitation  $\geq 50$  mm) or earthquake occurred. The maximum property loss was 0.3475 million yuan per year and the maximum deaths was 0.03 person per year, which was more than the current international society standard. Therefore, the risk management by different methods (i.e. monitoring and observation, project management, etc.) should be adopted to avoid it.

**Key words:** Monte Carlo method; instability probability; risk assessment; Xieliupo landslide