

# 基于强度理论的单沟泥石流风险评估

徐继维<sup>1</sup>, 张茂省<sup>2</sup>, 范仲杰<sup>1</sup>, 贾俊<sup>2</sup>, 高波<sup>2</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 国土资源部 黄土地质灾害重点实验室 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以陕西省商洛市山阳县红椿沟作为研究对象, 采用定量计算和数据归一化处理的方法, 提出强度指数的概念, 对泥石流风险计算公式进行了拓展, 使其可以表征泥石流规模及可能破坏能力。同时对不同降雨条件下的红椿沟泥石流风险进行了评估。研究表明, 6 h 降雨量达到 198.4 mm 及以上时红椿沟发生泥石流的概率为 100%。日降雨量  $r=37.19$  mm, 泥石流风险低;  $r=64.34$  mm, 泥石流风险中;  $r=104.94$  mm, 泥石流风险高;  $r=282.74$  mm, 泥石流风险很高。

**关键词:** 泥石流; 强度指数; 危险性; 风险; 红椿沟

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0145-05

中图分类号: P642.23

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.028

## Risk Assessment of Single Debris Flow Based on Intensity Theory

XU Ji-wei<sup>1</sup>, ZHANG Mao-sheng<sup>2</sup>, FAN Zhong-jie<sup>1</sup>, JIA Jun<sup>2</sup>, GAO Bo<sup>2</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geometry, Chang'an University,

Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area,

MLR/Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** Risk assessment of debris flow in the Hongchun Gully of Shanyang County, Shangluo City, Shaanxi Province was studied. Risk assessment of debris flow under different rainfall conditions was carried out by employing the methods of quantitative calculation and data normalization. Intensity index was introduced to characterize the scale and potential ability of damage. Results show that the probability of debris flow occurrence is 100% when rainfall reaches 198.4 mm or more in 6 h. The level of debris flow risk is low when daily rainfall ( $r$ ) reaches 37.19 mm; the level is middle when the  $r$  is 64.34 mm; the level is high when the  $r$  is 104.94 mm; and the level is very high when the  $r$  is 282.74 mm.

**Keywords:** debris flow; intensity index; hazard; risk; Hongchun Gully

风险管理是一门新兴的管理学科,在国际上蓬勃发展<sup>[1-2]</sup>。风险评估作为风险管理的重要组成部分,对地质灾害的研究有着深远意义。1991年联合国公布了自然灾害风险的评估方法,将地质灾害风险定义为危险性与易损性乘积<sup>[3]</sup>。随后,唐川等<sup>[4]</sup>提出,泥石流风险评估应根据山地斜坡的环境条件和灾害史划分危险等级并评估泥石流对人类和财产可能造成损失的程度。进入21世纪,泥石流风险评估有了进一步的发展。国内研究中刘希林等<sup>[5]</sup>提出了用人口经济和土地资源代表自然环境的综合评估泥石流灾害风险的复合函数模型;国外研究中 Jonkman S N 等<sup>[6]</sup>提出按照生命风险、经济风险、环境风险总结出

的生命和财产损失风险表达的思路;随后, Fell R 等<sup>[7]</sup>在国际会议中提出泥石流灾害财产风险的定量计算公式:

$$R = P(L) \times P(T : L) \times P(S : T) \times V \times E \quad (1)$$

式中:  $P(L)$ ——泥石流发生概率;  $P(T : L)$ ——泥石流到达承灾体的概率;  $P(S : T)$ ——时空概率;  $V$ ——易损性;  $E$ ——承灾体价值。本文以此公式为基础,引入强度的概念对其进行拓展,以红椿沟为例,从强度角度分析不同降雨条件下泥石流的危险性和危害性并对其进行评估。研究基于强度的风险评估方法的适应性,为泥石流风险评估提供一种新的思路。

收稿日期: 2013-12-07

修回日期: 2013-12-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“高山峡谷区域暴雨泥石流成灾临界阈值研究”(41302224); 国土资源大调查项目“陕西省重要城镇地质灾害风险评估”(12120113008900)

作者简介: 徐继维(1987—),男(汉族),辽宁省阜新市人,硕士研究生,研究方向为地质灾害和风险评估。E-mail: xujiwei@chd.edu.cn。

通信作者: 张茂省(1962—),男(汉族),陕西省咸阳市人,博士,研究员,主要从事水工环地质调查与研究。E-mail: zazmaosheng@cgs.gov.cn。

## 1 红椿沟概况

红椿沟位于秦岭南麓,陕西省商洛市山阳县城关镇南部,地质结构属秦祁地槽型东秦岭褶皱系,主要受东西向深大断裂(牛耳川—银花断裂)及印支褶皱影响,构造活动强烈。出露的地层岩性以泥盆系灰岩、第三系砂砾岩等沉积岩为主,夹杂部分侵入岩。

### 1.1 地形地貌

红椿沟位于牛耳川—银花断裂下盘抬升区,次级构造发育,分支断裂沿沟头和沟口近东西向展开。地势上南高北低,切割强烈,“V”字型沟谷异常发育,为强烈侵蚀的中、低山峡谷地貌。区内水域宽衍,汇水面积达 3.24 km<sup>2</sup>,主沟长约 2.45 km,相对高差约 812 m。顶部两条支沟平均坡度分别为 53°,51°,中部沟道顺直,整体呈“Y”型。这种地形地貌极利于降雨短时间汇集,形成泥石流。根据流域地形地貌特征,将红椿沟进行分区(表 1)。

### 1.2 物源条件

红椿沟内物源丰富,主要由天然物源和人为物源两部分组成。

#### 1.2.1 天然物源 受构造运动及风化作用的影响,



a 沟道堆积型物源

区内岩体结构松散、完整性差。破碎岩土体绝大部分披覆于沟谷内及岸坡表部,少部分在面流及重力作用下被运移到沟谷缓坡地段储存(图 1)。进行颗分试验对红椿沟物源特征分析,结果表明,物源的透水性大,压缩性小,颗粒间黏结差。

表 1 红椿沟各功能区地形特征统计

功能区	沟长/ m	坡度/ (°)	高程范围/ m	高差/ m	平均纵 坡降/‰
形成区	1 317(东)	51	1 080~1 674	594	423.69
	939(西)	53	1 080~1 638	558	632.58
流通区	1 133	23	862~1 080	218	267.43
堆积区	1 635	8	655~862	207	80.36

1.2.2 人为物源 红椿沟内人类工程活动强烈,共有 4 处采石场,大量废弃石料堆积。且持续的爆破开采导致岩体松动,结构面贯通,加剧了岸坡岩体的崩落。

大量的松散固体物质构成了红椿沟泥石流的潜在物源。根据调查统计,流域内固体物质总量为 4.88 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,动储量为 1.00 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,占总量的 20.51%,主要为沟道内采石场废料堆积体。



b 坡面侵蚀型物源

图 1 红椿沟流域堆积物形态特征

### 1.3 水文条件

红椿沟属于季风性半湿润山地气候,降雨丰富。年平均降雨量 709 mm,最大降雨量 1 131.8 mm(1964 年),其次为 1 120.7 mm(1983 年),最小降雨量 473.2 mm(1978 年)。降雨主要集中在 7,8,9 月,其次为 5,6,10 月,5—10 月是主要降雨期,也是泥石流灾害高发期。统计 42 a 的降雨数据,降大雨暴雨 271 次,年平均 6.5 次,连阴雨 66 次,年平均 1.6 次,最多的 5 次(1964 年),最少的 0 次(1962 年,1977 年,1980 年,1997 年,2001 年)。秋季连阴雨最多,共 50 次,占总次数的 75%,春季次之(图 2)。

依据当地气象资料及灾害史预测可能发生泥石流的固体冲出量。按照《泥石流灾害防治工程勘察规范》中雨洪法计算泥石流流量及一次最大冲出量,得出不同降雨频率下泥石流体积(表 2)。

### 1.4 灾害史及损失

1964 年 7 月 19 日,6 h 降雨量达 123.2 mm,红椿沟发生泥石流。泥石流摧毁沟道部分房屋,堆积沟道内部,造成沟道中部农田被毁。由于当时人口较少,并无人员伤亡。

1983 年 7 月 28 日,7 h 降雨量达 131.4 mm,红椿沟再次发生泥石流。泥石流造成上游沟道两侧民

房设施被毁。同时,1964 年泥石流后堆积区上开垦的农田被全部掩埋,沟道中房屋部分被淤埋。相关部

门统计,经济损失约 148 万,但无人员伤亡。与 1964 年相比,该次泥石流造成的经济损失更大。

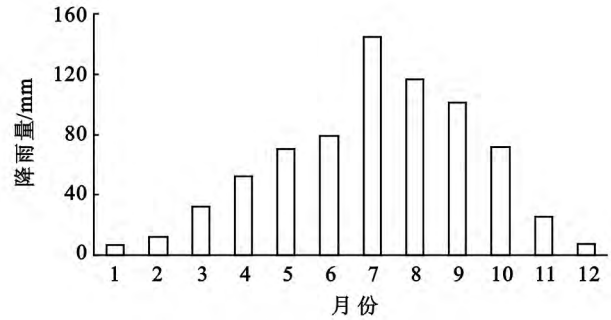
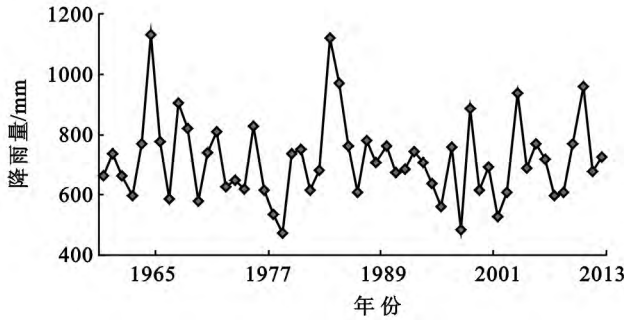


图 2 山阳县年降雨量和月降雨量

表 2 红椿沟不同降雨条件下泥石流暴发总量预测

流域面积/ km <sup>2</sup>	降雨频率/ %	1 h 暴雨量/ mm	6 h 降雨量/ mm	暴雨设计流量/ (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	洪峰流量/ (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	泥石流体积/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
3.24	20	37.80	65.66	27.24	98.27	3.136
	10	48.44	84.28	34.90	125.94	5.425
	5	59.36	102.90	42.77	154.33	8.849
	2	73.36	126.42	52.86	190.72	14.301
	1	84.28	145.04	60.73	219.11	23.841
	0.5	94.92	163.66	68.40	246.78	41.379

## 2 泥石流灾害风险评估

从物理学的基本定义分析,泥石流强度( $I$ )指单次泥石流事件所爆发出来的能量大小。强度作为分析泥石流破坏能力的指标,对泥石流风险评估具有重要意义,其影响因子包括体积方量、流域面积、主沟长度、纵坡降、降雨量等<sup>[5]</sup>。但就单沟泥石流而言,流域面积、主沟长度、纵坡降等是固定不变的。因此,本文仅用泥石流体积大小和降雨量的乘积来表征单沟泥石流灾害的强度指数。

$$I = V \times r \quad (2)$$

式中: $V$ ——泥石流体积方量大小(m<sup>3</sup>); $r$ ——降雨量(mm)。下同。

强度分析的目的在于评估泥石流的风险。拓展风险计算公式<sup>[7]</sup>为:

$$R = I \times P(L) \times P(T : L) \times P(S : T) \times V \times E \quad (3)$$

式中: $I$ ——泥石流灾害强度指数。

$I \times P(L) \times P(T : L) \times P(S : T)$  相当于泥石流灾害对生命或财产产生不利影响的可能性,即危险性, $V \times E$  相当于危害程度的度量,即危害性。故风险又表达为

$$R = H \times D \quad (4)$$

式中: $H$ ——泥石流的危险性; $D$ ——泥石流的危害性。

### 2.1 泥石流灾害危险性评估

泥石流危险性是泥石流灾害对某一范围内产生某种破坏的可能性,是一个空间、发生概率、规模(强度)的综合概念。因此评估泥石流危险性,首先要对泥石流的致灾范围、发生概率、强度进行评估。

2.1.1 泥石流致灾范围 红椿沟堆积区处于两座低山之间,泥石流的致灾范围具有沟道的特殊性。根据山阳县城周边 15 条泥石流沟的致灾历史及沟道特征,总结出经验公式,分别用来计算泥石流堆积体的长度( $L$ )、宽度( $B$ )、高度( $H$ )。从而计算出泥石流堆积范围。

$$L = 9.746V^{1/3} + 475 \quad (5)$$

$$B = 0.116V^{1/3} + 32 \quad (6)$$

$$H = 0.141V^{1/3} + 2.21 \quad (7)$$

式中: $V$ ——泥石流堆积体体积(m<sup>3</sup>)。

2.1.2 泥石流发生概率 泥石流发生概率是计算泥石流危险性的必要条件。降雨作为泥石流的诱发条件和启动因子,对泥石流的发生概率有着决定性的影响。本文用一定历时某种强度降雨的降雨量的相关函数来表征泥石流的发生概率 $[P(L)]$ 。依据山阳县的气象及灾害资料,山阳县城南共发生泥石流 31 次(1964 年 8 次,1967 年 4 次,1983 年 10 次,1998 年 6 次,2003 年 3 次),通过对资料的统计可以看出,当 6 h 降雨量达到 198.4 mm 以上时,泥石流的发生概率为

100%；当 6 h 降雨量低于 198.4 mm 时，泥石流发生概率随着降雨量的减小而减小。结合数据统计，得出降雨量与泥石流发生概率的函数关系。

$$P(L) = \begin{cases} 0.051e^{0.015qt} = 0.051e^{0.015r} & [P(L) < 1] \\ 1 & [P(L) \geq 1] \end{cases} \quad (8)$$

式中： $q$ ——降雨强度(mm/s)； $t$ ——降雨持续时间(s)； $r$ ——降雨量(mm)。

2.1.3 泥石流强度指数 由于体积与降雨量在数值和量纲上有显著差异，为确保计算结果的真实性与可靠性，采用归一化处理方法将数据处理到(0.1,0.9)区间内。处理后的泥石流方量指标、降雨量指标和强度指数如表 3 所示。为方便计算，对强度进行分级：当  $I > 0.2$  时，强度很高；当  $0.1 < I < 0.2$  时，强度高；当  $0.05 < I < 0.1$  时，强度中；当  $I < 0.05$  时，强度低。

表 3 红椿沟泥石流强度指数

泥石流编号	发生概率	方量/ $10^4 \text{ m}^3$	方量指标	降雨量/mm	降雨指标	强度指数
①	0.017 8	3.135 8	0.100 0	37.19	0.100 0	0.010 0
②	0.013 4	5.424 9	0.147 9	64.34	0.147 9	0.021 9
③	0.012 3	8.848 6	0.219 5	104.94	0.219 5	0.048 2
④	0.013 0	14.301 0	0.333 6	169.61	0.333 6	0.111 3
⑤	0.010 0	23.841 0	0.533 1	282.74	0.533 1	0.284 2
⑥	0.005 0	41.379 0	0.900 0	490.74	0.900 0	0.810 0

2.1.4 泥石流危险性 泥石流危险性的计算公式为：

$$H = I \times P(L) \times P(T : L) \times P(S : T)$$

要确定危险性，还需确定泥石流的到达概率与时空概率。可以认为堆积范围内泥石流的到达概率和时空概率均为 1。则将泥石流危险性计算公式简化为泥石流发生频率与强度指数的乘积，即  $H = P(L) \times I$ 。对危险性进行分级：当  $H > 0.02$  时，危险性很高；当  $0.01 < H < 0.02$  时，危险性高；当  $0.005 < H < 0.01$  时，危险性中；当  $H < 0.005$  时，危险性低。

2.2 泥石流灾害危害性评估

按照不同降雨条件下的泥石流堆积范围对危险区内的承灾体进行调查，确定承灾体价值。同时，将承灾体分为建筑和人员两大类，给出不同强度下的易损性(表 4)。(0,0.3]为轻度损坏，(0.3,0.6]为中度损坏，(0.6,0.9]为高度损坏，(0.9,1]为完全损坏。危害性分级：当  $D \leq 3$  人或  $D \leq 100$  万元时，为一般级；当  $3 \text{ 人} < D \leq 10 \text{ 人}$  或  $100 \text{ 万元} < D \leq 500 \text{ 万元}$ ，为较大级；当  $10 \text{ 人} < D \leq 50 \text{ 人}$  或  $500 \text{ 万元} < D \leq 1000 \text{ 万元}$  时，为重大级；当  $D > 50 \text{ 人}$  或  $D > 1000 \text{ 万元}$  时，为特大级。

表 4 红椿沟承灾体分类及其易损性

泥石流强度	承灾体建筑							承灾体人员		
	楼房	民房	采石场	公路	通讯电缆	输电线路	耕地	变电所	老人孩子	青壮年
很高	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0	0.7
高	0.6	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.5
中	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3
低	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	0.1

2.3 泥石流风险评估

根据危险性和危害性将泥石流风险进行分级(表 5)。VH 为风险很高，H 为风险高，M 为风险中，L 为风险低。

表 5 泥石流风险分级

危险性	特大级	重大级	较大级	一般级
很高	VH	VH	H	M
高	VH	H	H	M
中	H	H	M	L
低	M	M	L	L

根据野外调查及泥石流堆积范围计算，得到不同强度下的红椿沟承灾体的危害性。综合考虑泥石流的危险性与危害性，得出红椿沟在不同降雨条件下的风险(表 6)。

从表 6 中可知，随着降雨的增加，泥石流的危险性增大；在危险性相同的降雨条件下，降雨大的泥石流规模远大于降雨小的泥石流规模(如 ① 与 ②，⑤ 与 ⑥)。

表6 不同降雨条件下红椿沟泥石流风险

泥石流 编号	体积/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	降雨量/ (mm·d <sup>-1</sup> )	一次淤积最长 距离/m	危害性 <i>D</i>		危险性 <i>H</i>		风险等级
				<i>D</i> 值	等级	<i>H</i> 值	等级	
①	3.136	37.19	782.33	402	较大级	0.000 89	低	低
②	5.425	64.34	843.94	551	重大级	0.002 93	低	中
③	8.849	104.94	909.30	620	重大级	0.011 86	中	高
④	14.301	169.61	984.67	709	重大级	0.072 25	高	高
⑤	23.841	282.74	1 079.32	861	重大级	0.284 22	很高	很高
⑥	41.379	490.74	1 201.25	1 100	特大级	0.810 00	很高	很高

### 3 结论

(1) 本文将泥石流强度引入到风险计算公式,推导出基于强度指数的泥石流危险性计算公式  $H = P(L) \times I$ , 可以表征泥石流的规模和可能破坏能力。

(2) 山阳县城,当 6 h 降雨量达到 198.4 mm 以上时,红椿沟发生泥石流的概率为 1,当 6 h 降雨量小于 198.4 mm 时,泥石流发生概率递减。同时提出山阳县城周边泥石流的发生概率公式为  $P(L) = 0.051e^{0.015r}$ , 可以按照降雨量计算泥石流的发生概率。

(3) 根据危险性与危害性确定不同降雨条件下红椿沟风险: $H = 0.000 89, D = 402$ , 风险低; $H = 0.002 93, D = 551$ , 风险中; $H = 0.011 86, D = 620$ , 风险高; $H = 0.072 25, D = 709$ , 风险高; $H = 0.284 22, D = 861$ , 风险很高; $H = 0.81, D = 1 100$ , 风险很高。

(4) 泥石流强度指数没有提及地震等地质因素,希望在以后的研究中进一步完善。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吴树仁,石菊松,张春山,等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 8(8): 995-1005.
- [2] 张茂省,唐亚明. 地质灾害风险调查方法与实践[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1205-1216.
- [3] United Nations Department of Humanitarian Affairs. Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options: A Manual for Policy Makers and Planners [M]. New York: United Nations, 1991: 1-164.
- [4] 唐川, Jorg Grunert. 滑坡灾害评价原理和方法研究[J]. 地理学报, 1998, 53(S): 149-157.
- [5] 刘希林,莫多闻. 泥石流风险评价[M]. 成都: 科学技术出版社, 2003: 1-100.
- [6] Jonkman S N, van Gelder P H A J M, Vrijling J K. An Overview of Quantitative Risk Measures for Loss of Life and Economic Damage [J]. Hazardous Materials, 2003, 99(1): 1-30.
- [7] Fell R, Ho K K S, Lacasse S, et al. A Framework for Landslide Risk Assessment and Management[C]//Landslide Risk Management. Vancouver, Canada: A A Balkema Publishers, 2005.
- [5] 杨亮洁,牟乃夏,薛重生. 城市遥感图像的地理分析与空间格局演变研究[J]. 测绘科学, 2005, 30(3): 70-72.
- [6] 陈本清,徐涵秋. 城市扩展及其驱动力遥感分析:以厦门市为例[J]. 经济地理, 2005, 25(1): 79-83.
- [7] 曾磊,宗勇,鲁奇. 保定市城市用地扩展的时空演变分析[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 96-103.
- [8] 汪小钦,徐涵秋,陈崇成. 福州市城市时空扩展的遥感监测及其动力机制[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2000, 28(2): 111-115.
- [9] 范作江,承继成,李琦. 遥感与地理信息系统相结合的城市扩展研究[J]. 遥感信息, 1997(3): 12-16.
- [10] Bonham-Carter G F. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS[M]. Ontario: Pergamon Press, 1994.
- [11] Yeh A G O, Li X. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, 67(1): 83-90.
- [12] Almeida C M, Monteiro A M V, Mara G, et al. GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(4): 759-774.
- [13] Kumar J A V, Pathan S K, Bhanderi R J. Spatio-temporal analysis for monitoring urban growth: A case study of Indore City[J]. Journal of Indian Society of Remote Sensing, 2007, 35(1): 11-20.
- [14] 郭凯,孙培新,李卫国. 利用 ERDAS IMAGINE 从遥感影像中提取植被指数[J]. 西部探矿工程, 2005(6): 210-212.
- [15] Fried M A, Brodeley C E. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(3): 399-409.
- [16] Loh W Y, Shih Y S. Split selection methods for classification trees[J]. Statistica Sinica, 1997(7): 815-840.

(上接第 120 页)