

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.04.01

汶川地震扰动区小流域滑坡泥石流风险评估 ——以都江堰白沙河流域为例

乔建平^{1,2}, 王萌^{1,2}, 吴彩燕³, 樊晓一³

(1. 中国科学院地表过程与山地灾害重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 西南科技大学, 四川 绵阳 621000)

摘要: 本文采用风险区划、风险概率、风险受损率、风险防御工程效益4要素,以汶川大地震极震扰动区的都江堰白沙河为研究区,开展了典型小流域滑坡泥石流风险综合评估研究,建立了综合要素评估模型。评估结果显示,高、较高风险区面积占全区的15.76%;在大暴雨条件下,发生风险的概率>0.85;占全区65%固定资产的风险受损率>1;当进行有效工程治理后风险损失将得到折减,高风险区为37%,较高风险区为32%。综合要素评估法能够更准确预测评估区可能遭受的损失情况,为风险管理提供参考依据。

关键词: 地震;小流域;滑坡;泥石流;风险评估

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)04-0001-09

Landslide and debris flow risk assessment for small water sheels in the Wenchuan earthquake disturbance area: taking the Baishahe River Basin in Dujiangyan as an example

QIAO Jianping^{1,2}, WANG Meng^{1,2}, WU Caiyan³, FAN Xiaoyi³

(1. *The Surface Process of the Chinese Academy of Sciences and the Key Laboratory of Mountain Disasters, Chengdu, Sichuan 610041, China*; 2. *Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China*; 3. *The Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000, China*)

Abstract: In this paper, the risk zoning, risk probability, risk damage ratio and risk defense engineering benefit are used to evaluate the landslide risk of typical small watershed landslide in Dujiangyan area of the Wenchuan earthquake, and a comprehensive factor assessment model is established. As a result of the assessment, the area of high and higher risk areas accounts for 15.76 % of the total area; Under heavy rain conditions, the probability of risk > 0.85; The risk loss rate of 65 % of the fixed assets in the region > 1; Risk losses will be reduced when effective engineering governance is in place, with 37 per cent in high-risk areas and 32 per cent in higher-risk areas. The comprehensive factor assessment method can predict the possible loss in the assessment area more accurately, and provide a reference basis for risk management.

Keywords: earthquake zone; small watershed; landslide; debris flow; risk assessment

收稿日期: 2018-05-08; 修订日期: 2018-05-24

基金项目: 四川省科技计划重大前沿项目(18YYJC0168)

第一作者: 乔建平(1953-), 男, 四川成都人, 研究员, 博导, 研究方向为滑坡规律、滑坡机理与滑坡危险度区划、地震滑坡。

E-mail: jpqiao@imde.ac.cn

0 引言

作者在参考文献[1]中,已给出了地震扰动区及小流域滑坡泥石流概念的定义,并进行了地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划研究。根据作者在文献[1]对滑坡泥石流风险分类的原则,风险区划(风险评价、风险分析)仅仅完成风险研究的初期阶段工作。风险评估才是对风险研究的最终结果^[2]。因为风险评估的综合性更强,不但需要涉及到风险区划(风险评价、风险分析)问题,还将要涉及风险概率、风险损失、风险防御效益等内容。所以风险评估阶段涵盖的因素更多,包括的内容更全面。作者参考文献[2]已介绍,国外研究者对滑坡泥石流风险的定义比较完整,不同阶段的风险研究应该具有不同功能作用。而国内学者对滑坡泥石流风险评估的认识还存在一些差异,没有明确的阶段性和功能性划分^[3-11],基本都将风险区划(风险评价、风险分析)与评估混同。作者在汶川地震扰动区都江堰白沙河小流域风险区划的基础上^[12-13],进一步统计分析了风险发生概率和风险防御工程实施效益,采用风险区划(R_s)、风险概率(R_p)、风险受损率(R_h)、风险防御工程效果(R_{dp})4项指标综合评估区域的风险状态。这样的评估结果才能更好地服务于管理部门管控和处理风险。

1 评估模型

经过滑坡泥石流风险区划、风险概率统计、风险受损率预测、风险防御工程效益评价、4个阶段要素层工作之后,才能满足地震扰动区小流域滑坡泥石流风险综合评估条件。4个独立阶段层的统计分析结果,基本构建了滑坡泥石流风险评估结构框图(图1)。按照图1风险综合评估4阶段要素层原则,可以建立以下风险评估模型:

$$\bar{R} = f(R_s, R_p, R_h, R_{dp}) \quad (1)$$

式中: R_s ——风险区划(分布);

R_p ——风险概率;

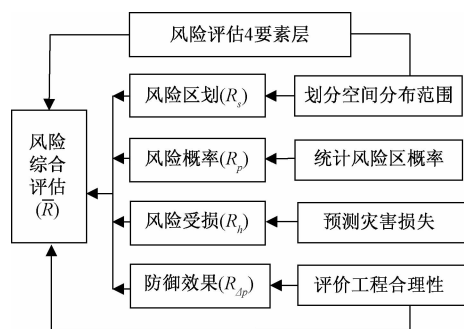


图1 滑坡泥石流风险综合评估结构框图

Fig. 1 Landslide and debris flow risk comprehensive assessment structure diagram

R_h ——风险受损率;

R_{dp} ——风险防御效果。

式(1)的模型表示,评估应该首先确定风险的分布状况,同时针对不同等级风险区分析发生风险的可能性(概率),其次预测各类风险区可能遭受危害损失量,最后评价防御工程的综合效益。这种的多要素组合分析模型,才能达到综合评估风险的效果。

2 风险区划(R_s)

研究区位于“5·12”汶川大地震的都江堰白沙河流域,属长江流域岷江水系,系岷江一级支流。流域面积364 km²,微流域共16条,其中无人区面积占310 km²,灾后重建的集中安置区面积仅51.57 km²,符合小流域的划分标准。该区位于极震区,距震中汶川映秀仅8.6 km,地震烈度为XI度(图2)。根据实地调查和遥感判译,白沙河流域的崩塌滑坡泥石流总数达到6119处,分布密度达到了16.8处/km²,全流域地表破坏总面积达到39.7 km²,占流域总面积的10.9%,这个比例在汶川地震灾区已属于高水平分布(图3)。作者选择灾后重建集中安置区51.57 km²范围,并按5级风险区等级标准(即:高、较高、中等、较低、低风险

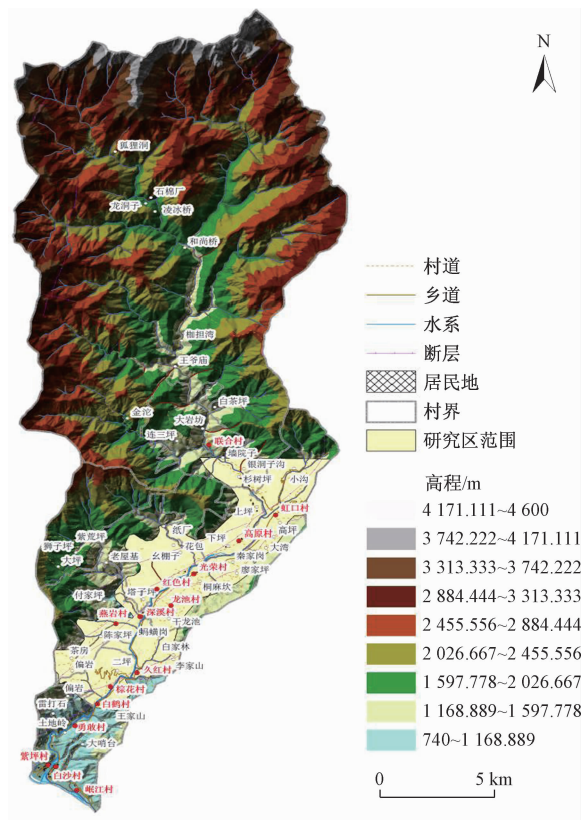


图2 白沙河小流域及研究区位置图

Fig. 2 Location map of the small river basin and research area in the small watershed of Baisha River

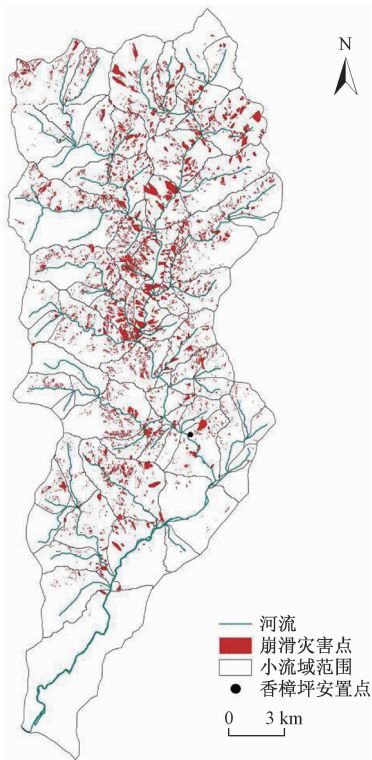


图 3 白沙河小流域滑坡泥石流分布图
Fig. 3 Distribution map of landslide and debris flow in the small watershed of Baisha River

险区),完成了滑坡泥石流风险区划(图 4、表 1)^[1]。

表 1 白沙河小流域下游集中安置区滑坡泥石流风险区划统计
Table 1 The statistical analysis of the risk area of landslide and debris flow in the downstream concentrated settlement area in the small watershed of Baisha River

风险等级	风险等级	面积/km ²	比例/%	分布范围
I _R	低	9.158	17.76	白沙河中游左岸大部区域,以及下游左右岸大部区域,包括高原村、庙坝村部分范围,虹口场镇、燕岩村、久红村、棕花村大部区域
II _R	较低	19.445	37.7	白沙河中游左岸大部区域,以及下游左右岸大部区域,包括高原村、庙坝村部分范围,虹口场镇、燕岩村、久红村、棕花村大部区域
III _R	中等	14.841	28.78	白沙河中游右岸区域,包括联合村、高原村、庙坝村部分范围
IV _R	较高	3.927	7.61	白沙河中、下游右岸部分区域,包括联合村、高原村、庙坝村、深溪沟村部分范围
V _R	高	4.206	8.15	白沙河中、下游右岸部分区域,包括联合村、高原村、庙坝村、深溪沟村部分范围
总计	5 级划分	51.577	100	-

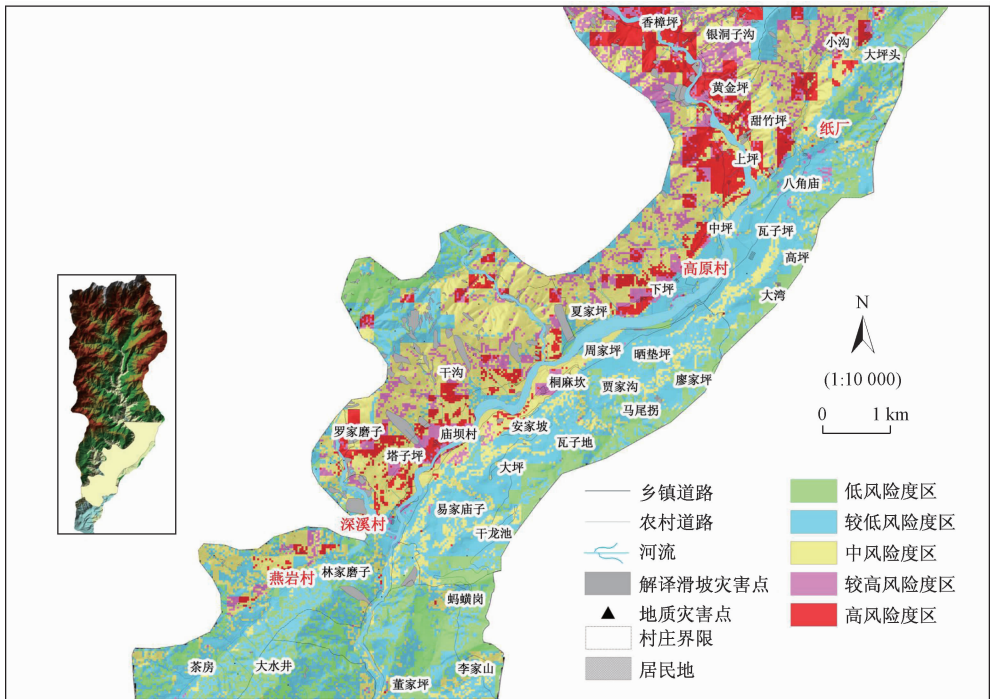


图 4 白沙河小流域下游集中安置区滑坡泥石流风险区划图
Fig. 4 The risk zoning map of landslide and debris flow in the downstream concentrated resettlement area in the small watershed of Baisha River

3 风险概率 (R_p)

作者在参考文献[12]中,已采用 Logistic 回归模型对研究区不同级别的风险区发生概率进行了统计分析,分别给出了在降雨条件影响下灾害可能发生的时间(图5、表2)及空间(图6、表3)概率预测结果,即:

$$P = \frac{\exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m)}{1 + \exp(\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_m x_m)} \quad (2)$$

式中: P ——统计概率;

x ——统计变量;

α ——常数;

β ——逻辑回归系数。

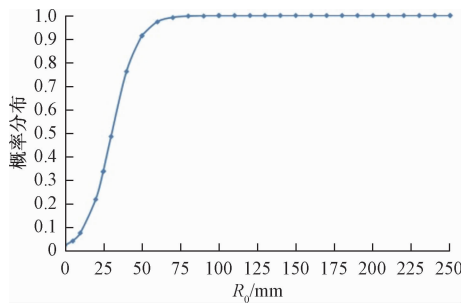


图5 白沙河小流域当日降雨量诱发灾害时间概率分布图

Fig. 5 The probability distribution map of rainfall in the small watershed of Baisha River

表3 当日降雨条件下白沙河小流域不同风险区诱发灾害概率统计表

Table 3 The statistical table of hazard probability of different areas in the small watershed of Baishhe River under the conditions of rainfall

雨量标准	当日降雨量/ mm	发生概率			
		高风险区	较高风险区	中等风险区	较低风险区
小雨	< 10	< 0.11	< 0.10	< 0.07	< 0.03
中雨	10 ~ 24.9	0.11 ~ 0.24	0.10 ~ 0.20	0.07 ~ 0.18	0.03 ~ 0.10
大雨	25 ~ 49.9	0.24 ~ 0.61	0.20 ~ 0.52	0.18 ~ 0.38	0.10 ~ 0.26
暴雨	50 ~ 99.9	0.61 ~ 0.91	0.52 ~ 0.86	0.38 ~ 0.66	0.26 ~ 0.47
大暴雨	100 ~ 249.9	0.91 ~ 0.93	0.86 ~ 0.90	0.66 ~ 0.80	0.47 ~ 0.67
特大暴雨	> 250	0.93 ~ 1	0.90 ~ 0.92	0.80 ~ 0.84	0.67 ~ 0.72

因低风险区发生滑坡泥石流灾害的可能性极小,所以可不统计风险概率。

4 受损率 (R_h)

受损率是评价各级风险区滑坡泥石流灾害直接威胁的固定资产量与风险区面积的比例关系。受损率相对承载体的易损度更直接和具体,可以选用参考文献[13]的损失率和损失程度2项指标组成。

4.1 损失率

损失率表示5级风险区固定资产可以达到的损失

表2 当日降雨条件下白沙河小流域灾害发生时间概率统计表

Table 2 Statistical table of time probability in small watershed disaster in the small watershed of Baisha River under rainfall conditions

雨量等级	当日降雨量/mm	灾害发生概率
小雨	< 10	< 0.1
中雨	10 ~ 24.9	0.1 ~ 0.3
大雨	25 ~ 49.9	0.3 ~ 0.5
暴雨	50 ~ 99.9	0.5 ~ 0.7
大暴雨	100 ~ 249.9	0.7 ~ 0.9
特大暴雨	> 250	> 0.9

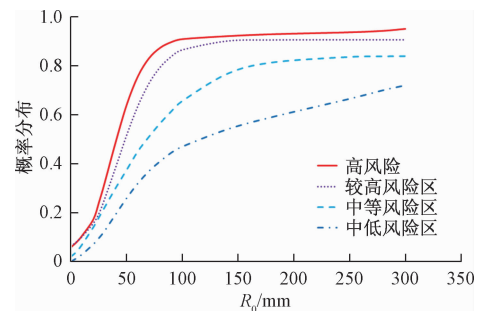


图6 当日降雨条件下白沙河小流域不同风险区滑坡泥石流概率分布图

Fig. 6 Probability distribution of landslide and debris flow in different area in the small watershed of Baishhe River basin under the conditions of rainfall

比例。损失率不代表在评估区域内就一定会造成同比重的固定财产损失,而是预测损失的可能性,或者是预测损失概率。如果某一级风险区的损失率越高,遭受财产损失的风险就越大,但不能表示就一定会遭到损失。关键还要取决于各类风险区的等级标准。风险等级越高,损失的可能性越大。风险等级与损失的可能性成正比关系。评价模型如下:

$$R_{h(LF)_i}(100\%) = \frac{v_i}{V}(100\%) \quad (i = 1 \cdots 5 \text{ 级风险区}) \quad (3)$$

式中： $R_{h(LF)}$ ——损失率(L为滑坡、F为泥石流)；
 v ——单级风险区固定财产价值(万元)；
 V ——全区固定总财产价值(万元)。

4.2 损失度

评价不同风险类型区的损失程度,可以采用单位面积(小流域中一般取单位面积为 km^2)的固定财产损失量作为一种标准。因为损失率只能描述不同风险类型区占整体固定财产的损失比重,不能说明单位面积内可能遭受的损失程度。甚至可能出现低风险区面积大,总损失总量也大,在全区固定财产损失的比重也会出现随之增高的结果。单位面积损失量可以检验每平方公里内,固定财产的损失情况。这样才能真实反映出不同风险类型区可能遭受的损失程度。一般而言,单位面积内受损程度越高,说明该类型区受损的风险越大。首先建立损失量评价模型,即:

$$R'_{h(LF)i} = \frac{\sum_{i=1}^5 (B_{Li} + B'_{Fi})}{S_j} \quad (j, i = 1 \cdots 5 \text{ 级风险区}) \quad (4)$$

式中： $R'_{h(LF)}$ ——单位面积固定财产损失量/(万元· km^{-2})；

B_{Li} ——滑坡损失量/万元；

B_{Fi} ——泥石流损失量/万元；

S_j ——风险类型区面积/ km^2 。

将式(4)结果进行均值化处理,可建立损失度指数模型,即:

$$R''_{h(LF)} = \frac{R'_{h(LF)i}}{\sum_{i=1}^5 R'_{h(LF)i}} \quad (i = 1 \cdots 5 \text{ 级风险区}) \quad (5)$$

式中： $R''_{h(LF)}$ ——损失度指数。

式(5)统计各类风险区损失程度指数,能够真实反映可能遭受风险损失的强度。

4.3 受损率

将损失率与损失程度两项指标相加,得到受损率统计模型,即:

$$R_h = R_{h(LF)} + R''_{h(LF)} \quad (6)$$

研究区固定财产总价值为 2.647 0 亿元,采用式

(3)、式(5)可以获得研究区的受损率结果(表 4):

表 4 白沙河小流域集中安置区受损率统计

Table 4 Statistics of damage rate of concentrated resettlement area in the small watershed of Baishhe River					
受损率	高风险区	较高风险区	中风险区	较低风险区	低风险区
固定财产总量	12 466.96	4 949.98	7 104.98	1 932.83	14.83
损失率($R_{h(LF)}$)	0.47	0.18	0.26	0.07	0.000 5
损失量($R'_{h(LF)}$)	2 964.09	1 260.50	478.74	99.40	1.62
损失度($R''_{h(LF)}$)	0.616 9	0.262 3	0.099 6	0.020 6	0.003 3
受损率(R_h)	1.086 9	0.442 3	0.359 6	0.073 3	0.003 8

5 防御工程效果($R_{\Delta P}$)

5.1 抗风险能力

根据参考文献[14][15],区域滑坡泥石流风险处理中,一般只对有直接危害对象的滑坡泥石流进行工程防御。如果防御工程数量比例越高,区内整体抗风险能力越强。反之亦然,防御工程比例越低,区内整体抗风险能力越弱。据此原理,可以建立区域地质灾害抗风险能力统计模型,即:

$$EC_i(100\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [\lambda_1(CE_i) + \lambda_2(EW_i)](100\%) \quad (i = 1 \cdots 5, \text{风险等级区}) \quad (7)$$

式中： EC_i ——抗风险能力；

λ ——工程级别系数；

CE_i ——实施工程措施数；

EW_i ——实施非工程措施数；

N ——灾害总数。

区域整体抗击风险能力既要体现区内防御工程的实施率和类型,还应体现工程投资量。采用式(7),统计研究区抗风险能力结果见表 5。

表 5 白沙河小流域集中安置区抗风险能力统计

Table 5 Statistics of the anti-risk ability in the small watershed of Baisha River					
抗风险能力	高风险区	较高风险区	中风险区	较低风险区	低风险区
$EC_i(\%)$	0.62	0.42	0.33	0.35	/

5.2 风险折减率

根据参考文献[14][15],通常只要是实施了防御工程措施和非工程措施的区域,地质灾害风险损失都应该小于之前的风险损失,即风险损失折减。风险损失折减率可能性有多大,可以采用防御工程实施率(抗风险能力)与防御工程风险受损率的概率关系表达,即:

$$P \rightarrow f(\bar{P} \cap \bar{P} \cap EC) \quad (8)$$

式中: P ——防御工程后风险折减率;

$\bar{P}$ ——防御工程前不产生风险损失概率;

$\bar{P}$ ——防御工程前风险损失概率;

EC ——有效防御工程措施实施率(抗风险能力)。

风险折减率代表风险损失降低的可能性,这个可能性的概率关系式为 $P(A/B)$,即“在 B 条件下 A 的概率”,即:

$$P(A/B) = P(AB)/P(B) \quad (P(B) > 0) \quad (9)$$

式中:事件 $A = \bar{P}$, $B = EC$,两项结果的乘积,可获得实施防御工程后风险损失折的概率。根据式(8)的原理,将防御工程前风险损失概率 $P(\bar{P})$ 及防御工程实施率 $P(EC)$ 代入式(9),可得:

$$\begin{aligned} P(C) &= P(A) \cdot P(B) = P(\bar{P}) \cdot P(EC) \\ &= P(1 - \bar{P}) \cdot P(EC) \end{aligned}$$

或

$$P_{i-j} = \bar{P} \cdot EC = (1 - \bar{P}) \cdot EC \quad (10)$$

式中: P_{i-j} ——防御工程后风险损失折减概率($i = 1 \cdots 5$ 级风险区, $j = 1 \cdots 3$ 级降雨类型);

$\bar{P}$ ——防御工程前不产生风险损失的概率($\bar{P} = (1 - \bar{P})$);

$\bar{P}$ ——防御工程实施前产生风险损失概率($\bar{P} = P_p \cdot R_h$)。

式(10)表明当防御工程实施前的不产生风险损失概率 $\bar{P}$ 与防御工程实施率 EC 相乘,不产生风险损失可能性将提高,同理风险损失概率相对实施防御工程前损失概率将获得折减。

将式(7)代入式(10),得到式(11):

$$P_{i-j} = \bar{P} \cdot EC = (1 - \bar{P}) \cdot EC = (1 - P_p \cdot R_h) \cdot \left\{ \frac{1}{N} [\lambda_1(CE) + \lambda_2(EW)] \right\} \quad (11)$$

式中: P_p ——地质灾害发生概率^[12];

R_h ——损失概率。

利用式(8)可以计算防御工程实施后的风险损失折减率。

由于研究区主要以泥石流灾害为主,所以还应该考虑不同降雨量条件下防御工程的损失折减概率。采用式(11)分别获得特大暴雨 Q_1 、大暴雨 Q_2 、暴雨 Q_3 的风险折减概率(表6)。

表6 白沙河小流域各风险类型区风险折减概率统计

Table 6 Statistics of risk reduction probability of various risk profiles in the small watershed of Baisha River

雨型 (Q_i)	高风险区				较高风险区				中等风险区				较低风险区			
	P_{p1}	P_h	EC_1	P_{1-j}	P_{p2}	P_h	EC_2	P_{2-j}	P_{p3}	P_h	EC_3	P_{3-j}	P_{p4}	P_h	EC_4	P_{4-j}
Q_1	0.93	0.47	0.62	0.34	0.90	0.18	0.42	0.35	0.80	0.26	0.33	0.25	0.67	0.07	0.35	0.33
Q_2	0.91	0.47	0.62	0.35	0.86	0.18	0.42	0.35	0.66	0.26	0.33	0.27	0.47	0.07	0.35	0.33
Q_3	0.61	0.47	0.62	0.44	0.52	0.18	0.42	0.38	0.38	0.26	0.33	0.29	0.26	0.07	0.35	0.34

表中的三种降雨条件的平均风险损失折减概率为:高风险区 $\bar{P}_{1-j} = 0.37$;较高风险区 $\bar{P}_{2-j} = 0.32$;中等风险区 $\bar{P}_{3-j} = 0.25$;较低风险区 $\bar{P}_{4-j} = 0.30$ 。可以明显看出,高风险区、较高风险区的风险损失折减概率最大。

5.3 风险折减效果评价

当统计完各级风险区损失折减概率后,还应该对折减的效果评价,以此证明防御工程的效益。根据概率乘法定律,当折减概率 P 与防御工程实施前产生风险损失概率 $\bar{P}$ 相乘时,可以得到防御工程实施后的风险损失概率,即:

$$P_0 = \bar{P} \cdot P_{i-j} \quad (12)$$

式中: P_0 ——风险防御工程实施后的风险损失概率。

因此风险折减概率效益可以采用防御工程实施前风险损失概率 $\bar{P}$ 与防御工程实施后风险损失概率 P_0

差值进行评价,即:

$$R_{\Delta P} = (\bar{P} - P_0) \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)可变为:

$$R_{\Delta P} = (\bar{P} - P_0) = (\bar{P} - \bar{P} \cdot P_{i-j}) = \bar{P}(1 - P_{i-j}) \quad (14)$$

式中: $R_{\Delta P}$ ——风险折减效果评价模型。

采用式(14)对表6数据进行效果评价计算,获得表7结果:

按照防御工程三级效益评价标准^[14-15]:效果好(A)、效果较好(B)、效果一般(C)。统计结果如表8:

高风险区的地质灾害数量占全区总数的38%,威胁的人数及财产数量最多,承担的风险损失概率最大,通过10处直接危害人民生命财产安全的地灾工程治理,明显折减了原有的风险损失可能性。所以高风险区风险损失折减效果最好,防御工程效益为A级最多。

表 7 白沙河小流域风险折减效果评价

Table 7 Statistics of risk reduction of small watershed in Baisha River

雨型	高风险区			较高风险区			中等风险区			较低风险区		
	$\bar{P}_1$	P_{01}	$R_{\Delta P_1}$	$\bar{P}_2$	P_{02}	$R_{\Delta P_2}$	$\bar{P}_3$	P_{03}	$R_{\Delta P_3}$	$\bar{P}_4$	P_{04}	$R_{\Delta P_4}$
Q_1	0.43	0.146	0.284	0.16	0.056	0.104	0.20	0.05	0.15	0.04	0.013	0.027
Q_2	0.42	0.149	0.271	0.15	0.054	0.096	0.17	0.04	0.13	0.03	0.009	0.021
Q_3	0.28	0.126	0.154	0.09	0.035	0.055	0.09	0.02	0.07	0.01	0.003	0.007

表 8 白沙河小流域风险折减效果评价表

Table 8 Evaluation table of risk reduction in small watershed of Baisha River

雨型	高风险区	较高风险区	中等风险区	较低风险区
	$R_{\Delta P_1}$	$R_{\Delta P_2}$	$R_{\Delta P_3}$	$R_{\Delta P_4}$
Q_1	A	B	B	C
Q_2	A	B	B	C
Q_3	B	C	C	C

因其它风险类型区的防御工程的类型和投入量相对较低,承担的风险损失概率也相对较低,因此防御工程效果相对较差,评价结果分别为 B 和 C 级。

6 风险综合评估

当获得以上的各阶段统计计算成果后,根据式(1)的关系式,转化为综合风险指数进行工程防御前、后的小流域滑坡泥石流风险评估,即:

工程防御前

$$\bar{R}_i = \frac{R_{pi} + R_{hi}}{\sum_{i=1}^n (R_{pi} + R_{hi})} \quad (i = 1 \cdots 4) \quad (15)$$

工程防御后

$$\bar{R}'_i = \frac{R_{pi} + R_{hi}}{\sum_{i=1}^n (R_{pi} + R_{hi})} \times R_{\Delta Pi} \quad (16)$$

式中: $\bar{R}_i$ ——工程防御前的综合风险指数;

$\bar{R}'_i$ ——工程防御后的综合风险指数。

因当地政府已实施白沙河流域集中安置区的滑坡泥石流防御工程措施,所以评估内容包括风险折减效果。根据图 1、式(15)、(16)的综合评估模型,可以给出白沙河小流域下游集中安置区(1:1 万比例图件)风险综合评估结果(表 9)。

表 9 白沙河小流域下游滑坡泥石流风险综合评估表

Table 9 Comprehensive assessment of risk landslide and and debris flow in the lower reaches of Baisha River

统计项目	评估类型		
	风险分布 R_s	风险概率 R_p	风险受损率 R_h
风险基本要素	白沙河下游集中安置区面积 51.577 km ² ;	当日降雨量达到特大暴雨级时 (Q_1),发生滑坡、泥石流的概率最大:	白沙河下游集中安置区受到滑坡泥石流风险区威胁的固定资产总价值量约为 2.647 0 亿元:
	①高风险区面积 $R_{s1} = 4.206 \text{ km}^2$	①高风险区概率 $R_{p1} = 0.93 \sim 1$	①高风险区 $R_{h1} = 1.086$
	②较高风险区面积 $R_{s2} = 3.927 \text{ km}^2$	②较高风险区概率 $R_{p2} = 0.90 \sim 0.92$	②较高风险区 $R_{h2} = 0.442 \text{ 3}$
	③中等风险区面积 $R_{s3} = 14.841 \text{ km}^2$	③中风险区概率 $R_{p3} = 0.80 \sim 0.84$	③中风险区 $R_{h3} = 0.359 \text{ 6}$
	④较低风险区面积 $R_{s4} = 19.445 \text{ km}^2$	④较低风险区概率 $R_{p4} = 0.67 \sim 0.72$	④较低风险区 $R_{h4} = 0.073 \text{ 3}$
	⑤低风险区面积 $R_{s5} = 9.158 \text{ km}^2$		⑤低风险区 $R_{h5} = 0.003 \text{ 8}$
	①高风险区:灾害点 30 处,治理 11 处,平均风险折减率达到 $\bar{P}_{1-1.2.3} = 37\%$,减灾效果为 A~B 级;		
	②较高风险区:灾害点 15 处,治理 6 处,平均风险折减率达到 $\bar{P}_{2-1.2.3} = 32\%$,减灾效果为 B~C 级;		
	③中风险区:灾害点 23 处,治理 4 处,平均风险折减效果达到 $\bar{P}_{3-1.2.3} = 25\%$,减灾效果为 B 和 C 级;		
	④较低风险区:灾害点 9 处,治理 2 处,平均风险折减效果达到 $\bar{P}_{4-1.2.3} = 30\%$,减灾效果均为 C 级。		
风险防御工程 $R_{\Delta P}$	工程治理前 $\bar{R}$	工程治理后 $\bar{R}'$	风险下降率/%
	①高风险区 0.383	0.141	36
	②较高风险区 0.255	0.081	32
	③中风险区 0.220	0.055	25
	④较低风险区 0.141	0.042	29
综合风险指数评估 $\bar{R}_i$			

7 结论

(1)小流域滑坡泥石流风险综合评估将精细化空间的大类数据进行区类统计划分,能够较全面地掌握风险可能存在的各类信息,克服了以往单一指标因素评估的片面性;

(2)评估结果,占全区 15% 面积的高风险区和较高风险区将可能承担全区 57% 风险受损率。在大暴雨、特大暴雨条件下,发生风险损失的可达 85% 以上,所有应该是评估区主要风险防范区域范围;

(3)小流域滑坡泥石流风险综合要素评估方法的优点是:针对各种类型风险区实际情况,通过定量统计、数据分析,均给出了具体的概率、受损率、工程防御效果评估结果,可以更客观反映受灾损失的特点,为风险管理提供更准确的参考依据;不足是对参加统计的资料数据多源性、可靠性、准确性要求较高,因此实际应用该方法存在一定难度。

参考文献:

- [1] 乔建平,王萌,吴彩燕.汶川地震扰动区小流域滑坡泥石流风险区划[J].灾害学,2016,31(2):1-5.
QIAO Jianping, WANG Meng, WU Caiyan. Landslide and debris flow risk zonation at small watershed scale in Wenchuan earthquake disturbed area[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2):1-5.
- [2] 乔建平,王萌.滑坡风险的类型与层次链[J].工程地质学报,2010,18(1):84-90.
QIAO Jianping, WANG Meng. Landslide risk types and hierarchical knowledge[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1):84-90.
- [3] 王启亮,孟朝霞.地震滑坡风险分析研究[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(3):14-16.
WANG Qingliang, MENG Zhaoxia. Study on risk analysis of earthquake landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3):14-16.
- [4] 韩金良,燕军军,吴树仁.四川汶川 M₈ 级地震触发的典型滑坡的风险指标反演[J].地质通报,2009,28(8):1146-1155.
HAN Jinliang, YAN Junjun, WU Shuren. The risk index of the typical landslide triggered by the M8 earthquake in Sichuan Wenchuan [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8):1146-1155.
- [5] 胡凯衡,丁明涛.滑坡泥石流风险评估框架体系[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(2):26-30.
HU Kaiheng, DING Mingtao. The framework of risk assessment of landslide debris flow [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2):26-30.
- [6] 刘力维,程传周.基于 GIS 的滑坡泥石流风险评估及其应用[J].地理空间信息,2014,03 期:8-10.
LIU Liwei, CHENG Chuazhou. GIS based landslide risk assessment and its application [J]. Geospatial Information, 2014-03:8-10.
- [7] 徐娟,方兴.保山市滑坡泥石流风险评估方法研究[J].中国城市经济,2011,24 期:311-321.
XU Juan, FANG Xing. Study on risk assessment of landslide debris flow in Baoshan City [J]. China Urban Economy, 2011, 24:311-321.
- [8] 孟庆华.秦岭山区地质灾害风险评估方法研究[D].中国地质科学院,2011,1-163.
MENG Qinghua. Study on the method of risk assessment of geological hazards in Qinling Mountains [D]. Chinese Academy of Geological Sciences, 2011, 1-163.
- [9] 牛全福.基于 GIS 的地质灾害风险评估方法研究[D].兰州大学,2011,1-159.
NIU Quanfu. Study on geological hazard risk assessment based on GIS [D]. Lanzhou University, 2011. 1-159.
- [10] 李彦宝.基于 GIS 的地质灾害风险评估系统开发与应用[D].中国地质大学(北京),2008:1-78.
LI Yanbao. Development and application of geological hazard risk assessment system based on GIS [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2008:1-78.
- [11] 徐继维,张茂顺,范仲杰.基于强度理论的单沟泥石流风险评估[J].水土保持通报,2014,34(3):145-149.
XU Jiwei, ZHANG Maoshun, FAN Zhongjie. The risk assessment of single-channel debris flow based on strength theory [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2014, 34(3):145-149.
- [12] 薛志航,邓创,樊晓一,等.汶川地震扰动区小流域地质灾害风险概率问题[J].灾害学,2016,31(3):39-25.
XUE Zhihang, DENG Chuang, FAN Xiaoyi, et al. Risk probability of geological disaster in small watershed in Wenchuan earthquake disturbed area [J]. Disaster Science, 2016, 31(3):39-25.
- [13] 乔建平.第 10.2.3 节 地震滑坡风险受损[M].大

- 地震诱发滑坡分布规律及危险性评价方法,科学出版社,2014:357-361.
- Editor of QIAO Jianping Section 10.2.3. The risk of earthquake landslide [M]. earthquake induced landslide distribution law and risk assessment method, Science Press, 2014:357-361.
- [14] 乔建平,王萌,吴彩燕. 基于概率方法的区域地质灾害风险防御工程效益评估[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017,28(2):131-136.
- QIAO Jianping, WANG Meng, WU Caiyan. Regional geological disaster risk defense engineering benefit assessment based on probabilistic methods [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(2):131-136.
- [15] 乔建平,黄栋,王萌,等. 滑坡泥石流风险防御工程效益评估的最优值距模型[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017,28(3):80-86.
- QIAO Jianping, HUANG Dong, WANG Meng, et al. Optimum distance method based risk effectiveness evaluation of engineering prevention countermeasures for landslides and debris flows [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(3):80-86.

封面照片说明

云南省文山州富宁县阿用乡小桥滑坡堰塞湖

2018年8月6日凌晨,受当地前期连续降雨影响,云南省文山州富宁县阿用乡阿用河右岸一级支流发同河下游河段右岸发生顺层岩质滑坡,堵塞河道形成堰塞湖。滑坡前缘高程721 m,后缘高程871 m,主滑方向219°。滑坡长约200 m、宽约100 m,滑体厚约2~15 m,滑坡总体积约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。滑坡形成的堰塞体坝顶长64 m,顶宽20 m,底宽约140 m,断面呈不规则的倒梯形,堰塞体体积约 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堰塞湖面宽40~70 m,长约350 m,水深10~15 m,库容约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。8月10日,开展堰塞体应急处置。通过在滑坡堆积体对面斜坡开挖4 m宽泄洪槽开始泄洪。截止8月11日,水位下降4 m,泄洪量约 1.0×10^5 ,堰塞湖险情已经解除。

(中国地质环境监测院 王立朝 供稿)

敬告作者和读者

为适应我国科技信息化建设的需要,扩大作者、读者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》及《中文科技期刊数据库》。今后,本刊将作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如果作者不同意将文章编入上述数据库,请在投稿时声明,本刊将作适当处理。谢谢!

《中国地质灾害与防治学报》编辑部