

# 中国单沟泥石流危险度评价模型比较研究

张怀珍<sup>1,2</sup>, 范建容<sup>1</sup>, 郭芬芬<sup>1,2</sup>, 刘飞<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**我国自 20 世纪 80 年代开始泥石流危险度研究, 泥石流危险度研究不断深入; 单沟泥石流危险度评价模型从最初的分级评分模式发展到函数赋值; 单沟泥石流危险度评价的基本原理和技术方法已初步成型并在实践应用中逐步完善与改进。首先将我国不同时期的单沟泥石流危险度评价研究中出现的模型体分为 3 种类型: 分级评分模型, 分级赋值模型和函数赋值模型; 结合云南省 37 条典型泥石流沟的基础数据, 对这 3 种模型的危险度评价结果进行比较分析。结果表明: 在评价因子参数个数不同及存在不确定性的情况下, 3 种模型的危险度评价结果的相似性指数仍大于 0.91; 并进一步对其原因进行了初步分析。

**关键词:** 泥石流; 危险度; 评价模型; 不确定性

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0020-07

## The Comparison of Single Debris Flow Risk Assessment Models in China

ZHANG Huai-zhen<sup>1,2</sup>, FAN Jian-rong<sup>1</sup>, GUO Fen-fen<sup>1,2</sup>, LIU Fei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & MWR, Chengdu 610041, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Since 1980, researchers of China have begun to study the risk of landslides and debris flow hazard. Single debris flow hazard assessment model has become function assignment from grading; and the basic principles and techniques have been initially formed and gradually improved in practical application and improvement. This paper firstly divides single flow risk assessment models appearing in different periods into three types: hierarchical scoring models, classification assignment model and function assignment model; using 37 typical debris flows's basic data in Yunnan; compares these risk assessment results. The results show that the number of parameters in the evaluation of factors and uncertainties in different circumstances, the risk assessment results of the model similarity index are still greater than 0.91, and try to explain the reasons.

**Key words:** debris flow; hazard; assessment model; uncertainty

泥石流是山区常见的一种自然灾害现象。由于泥石流形成过程复杂, 暴发突然, 来势凶猛, 历时短暂, 破坏力极大; 严重危害山区人民的生命财产安全, 制约社会经济的发展。我国山地和高原面积约占国土总面积的 66%; 大部分山区具备泥石流形成的基本条件, 加之人类活动的影响, 是我国成为世界上泥石流灾害最严重的国家之一。据近年统计资料: 我国泥石流的活动区域面积约为 430 万 km<sup>2</sup>, 其中活动强烈的地区达 130 万 km<sup>2</sup>; 有 8 万处泥流活动, 其中严重的有 8 500 处<sup>[1]</sup>。对泥石流进行研究, 对泥石流的活动规模、危害程度等进行评价预测; 对减轻泥石流

灾害造成的间接和直接损害, 保障人民生命财产安全具有重要的意义。

国际上, 日本学者可能是最早涉及到泥石流危险度评价<sup>[2-3]</sup>, 在 1977 年提出了泥石流发生危险度这一概念。在 1981 年美国学者 Hollingsworth 和 Kovacs 提出了基于打分方法的泥石流危险度评价框架, 基本思路是先将岩性、坡度和切割密度 3 个因子分别划分为 5 个等级, 再用因子叠加求和进行危险度评价。这可能是美国最初的, 也是为数不多的涉及到的泥石流危险度的定量评价。我国学者谭炳炎是较早开始泥石流沟严重程度的数量化综合评判和危险度研究

收稿日期: 2010-12-27

修回日期: 2011-01-14

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q03-5-2); 国家科技支撑计划课题(2009BAK56B05)

作者简介: 张怀珍(1985-), 男, 山东东昌府人, 硕士研究生, 主要研究方向: 环境遥感与 GIS 应用。E-mail: zhzh198508@163.com

通信作者: 范建容(1969-), 女, 四川井研人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事遥感与 GIS 应用和山地土壤侵蚀、生态评价研究。E-mail: fjrong@imde.ac.cn

的学者<sup>[4]</sup>。近年来, 广大科研工作者对泥石流危险性评价的研究不断深入, 将灰色系统理论、模糊数学理论和 GIS 技术等引入到泥石流危险性评价中, 使得泥石流危险性评价的研究得到了长足的发展, 研究成果的实用性和可操作性不断加强。

## 1 单沟泥石流危险度评价模型

刘希林曾将我国泥石流危险度评价研究发展分为 4 个阶段时期: (1) 90 年前的最早的单沟泥石流危险度评价; (2) 20 世纪 90 年代初期的单沟泥石流危险度评价; (3) 20 世纪 90 年代中期的单沟泥石流危险度评价; (4) 20 世纪 90 年代后期及以后的最新单沟泥石流危险度评价<sup>[4]</sup>。本文根据这些模型的赋值方法特点, 将其分为 3 种类型: 分级评分模型, 分级赋值模型和函数赋值模型。

### 1.1 分级评分模型

分级评分模型主要是 20 世纪 90 年代前的单沟泥石流危险度评价模型。这种模型出现的最早, 影响较大, 其基本原理和技术方法得到了广泛的应用和认可。基本原理是: 首先根据实地情况选取泥石流危险度评价因子, 依据一定的原理方法和测度(如关联度)确定各危险度评价因子的权重和权数, 再根据一定分级评分方法确定单沟泥石流危险度查找表, 然后计算各危险因子在危险度查找表中的评分总和, 即为单沟泥石流危险度, 其危险度  $W$  计算公式可表达为:

$$W = \sum_{i=1}^n P_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中:  $P_i$  ——第  $i$  个评价因子在危险度查找表中的评分;  $n$  ——评价因子总个数。

### 1.2 分级赋值模型

分级赋值模型主要是 20 世纪 90 年代的单沟泥石流危险度评价模型, 此时分级赋值的赋值结果是在 0~1 之间的小数。此类模型可以划分为两个阶段: (1) 90 年代初期的单沟泥石流危险度评价; (2) 90 年代中期的单沟泥石流危险度评价。

90 年代初期的单沟泥石流危险度评价模型和分级评分模型类似。这个时期的模型已经将危险度评价因子划分为主要因子和次要因子; 在各因子分级赋值时不再是因子评分, 而是其参数大小在其评价因子中的影响比重。在危险度计算中, 突出主要因子的权重和权数。其危险度  $R_d$  计算公式为:

$$R_d = \sum_{i=1}^n G_{si} \times S_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中:  $G_{si}$  ——第  $i$  个评价因子所占的权重;  $S_i$  ——第  $i$  个评价因子在泥石流沟等级评分查算表中的定量赋值;  $n$  ——选取的评价因子总个数。计算得到的危险度

其值介于 0~1。其值的大小能够表示暴发泥石流的的可能性大小, 即可以理解为发生泥石流的概率大小。

90 年代中期的单沟泥石流危险度评价模型是对 90 年代初期模型的改进。最主要的是减少又重复影响的次要评价因子; 选取与主要因子关联度较大的次要因子; 增强主要因子的主导地位。另外, 这一时期的评价模型还增加了评价因子的划分等级, 提高了评价因子取值变化对危险度评价结果的灵敏度。其危险度计算公式与 90 年代早期的模型类似。

这种 90 年代出现的分级概率类模型其基本原理和技术方法基本已经成型, 在四川、云南、北京和贵州等地得到了推广应用<sup>[2]</sup>。刘希林、唐川等在这方面的研究做出了重大贡献。

### 1.3 函数赋值模型

函数赋值模型在 90 年代末期出现, 此类模型是由我国学者刘希林提出, 属于最新的单沟泥石流危险度评价模型<sup>[5-7]</sup>。这类型的最大改进和完善就是危险因子赋值完全脱离危险度分级查找表, 各评价因子采用不同的转换函数(见表 5)采用公式化赋值。转换函数公式化赋值有效避免了采取分级赋值时的赋值结果的间断跳跃性。其危险  $H_d$  计算公式为:

$$H_d = 0.29M + 0.29F + 0.14S_1 + 0.09S_2 + 0.06S_3 + 0.11S_5 + 0.03S_7 \quad (3)$$

式中:  $M, F, S_1, S_2, S_3, S_5, S_7$  分别为  $L_1, L_1, S_1, S_2, S_3, S_5, S_7$  的转换函数赋值(泥石流规模  $L_1$ 、泥石流发生频率  $L_2$ 、沟谷流域面积  $S_1$ 、主沟长度  $S_2$ 、流域相对高差  $S_3$ 、流域切割密度  $S_5$  和不稳定沟床比例  $S_7$ )。

这一类型的危险度评价因子仍分别选定主要因子和次要因子, 但这类模型选定的次要因子个数进一步减少; 选定的次要因子不但关联度要与主要因子较大, 而且这些次要因子的确定性要更加明确。

## 2 单沟泥石流危险度评价应用实例

在泥石流危险度评价研究中不断引入了多种理论和技术, 如灰色系统理论、模糊数学理论、GIS 技术、多元回归分析和神经网络等。其中灰色系统理论和模糊数学理论较为成熟并得到广泛推广, GIS 技术在泥石流危险度研究中的应用会得到不断推广。

本文主要运用基于灰色系统理论的关联度分析方法, 对云南省 37 条典型泥石流沟进行危险度评价。所用基础数据主要参考 1994 年朱静发表的论文“泥石流沟判别与危险度研究”<sup>[8]</sup>和由刘希林、唐川编著 1995 年出版的《泥石流危险性评价》<sup>[9]</sup>。

### 2.1 分级评分模型危险度评价

我国学者朱静在 1994 年以云南泥石流形成环境的区域调查为基础, 收集整理了云南省 40 条典型泥

石流沟的 11 项因素参数<sup>[3]</sup> (表 1, 40 条中的 37 条), 分别为: 流域面积  $S_1(\text{km}^2)$ , 主沟长度  $S_2(\text{km})$ , 流域相对高差  $S_3(\text{km})$ , 主沟平均比降  $S_4$ , 流域切割密度  $S_5(\text{km}^2/\text{km})$ , 松散固体物质储量  $S_6(\text{万 m}^3)$ , 泥砂补给段长度比  $S_7$ , 植被覆盖率  $S_8(\%)$ , 主沟弯曲系数  $S_9$ , 形成区山坡平均坡度  $S_{10}(^\circ)$  和 24 h 最大降雨量  $S_{11}(\text{mm})$ ; 同时也考虑了泥石流最大一次冲出量  $L_1(\text{万 m}^3)$  和泥石流暴发频率  $L_2(\text{次}/100 \text{ a})$ 。

表 1 云南省 37 条典型泥石流沟基础数据<sup>8)</sup>

沟名	$L_1/万 \text{ m}^3$	$L_2(\text{次}/100 \text{ a})$	$S_1/km^2$	$S_2/km$	$S_3/km$	$S_4$	$S_5/(\text{km}^2 \cdot \text{km}^{-1})$	$X_6/万 \text{ m}^3$	$S_7$	$S_8/%$	$S_9$	$S_{10}/(^\circ)$	$S_{11}/mm$
保山白纸房沟	5.1	10	6.13	6.85	0.72	0.11	5.50	135	0.32	32	1.25	32	109.4
保山北老埂河	2.5	10	2.99	4.86	0.62	0.13	5.20	110	0.37	29	1.18	35	109.4
保山化工厂河	3.2	10	4.23	5.08	0.67	0.13	5.30	195	0.33	32	1.14	30	139.4
保山黄龙山河	6.5	8	7.77	5.61	0.61	0.11	4.30	114	0.35	25	1.18	35	109.4
保山黄纸房沟	2.5	12	3.02	5.60	0.61	0.11	4.50	165	0.30	22	1.28	35	109.4
保山仁寿河	4.6	12	5.50	5.86	0.59	0.10	6.50	181	0.62	23	1.05	40	109.4
保山山脚村河	2.4	12	2.14	4.07	0.62	0.15	8.80	218	0.51	30	1.15	30	109.4
保山王官屯河	1.6	10	1.93	2.19	0.32	0.15	4.20	71.8	0.32	31	1.14	35	109.4
保山五郎庙河	1.7	12	2.70	2.70	0.36	0.13	5.90	81.2	0.58	23	1.09	38	109.4
保山小箐河	1.2	10	0.54	1.90	0.37	0.20	3.50	65	0.45	28	1.22	35	109.4
德钦水磨房沟	9.0	15	6.75	10.80	2.05	0.19	6.80	1400	0.30	17	1.28	45	79.0
德钦直溪河	8.0	30	5.90	4.25	0.56	0.13	8.50	1000	0.52	18	1.33	48	75.0
东川达德沟	10.0	20	14.10	8.00	1.94	0.21	17.80	81	0.35	11	1.2	46	100.4
东川达朵沟	12.0	50	58.07	13.75	2.19	0.16	11.20	3811	0.40	14	1.33	46	102
东川大白泥沟	82.0	1200	18.05	11.80	1.66	0.11	22.80	16000	0.72	8	1.39	45	100.4
东川大桥河	105.0	450	53.10	18.35	2.92	0.12	21.20	18000	0.62	18	1.38	48	97.0
东川黑沙沟	5.0	50	3.28	2.30	1.13	0.23	18.00	849	0.78	14	1.28	38	98.0
东川黑水河	1.8	80	4.20	2.10	1.19	0.27	12.30	4000	0.42	10	1.21	42	100.4
东川蒋家沟	195.1	1500	47.10	12.00	2.19	0.14	23.80	75000	0.8	8	1.55	45	102.0
东川深沟	9.0	50	28.32	9.05	2.80	0.17	15.60	700	0.45	15	1.22	19	100.4
东川石羊沟	7.8	17	10.61	4.61	1.66	0.25	12.80	4500	0.40	20	1.22	50	100.4
东川小白泥沟	60.0	1000	12.49	6.00	1.67	0.18	20.50	14000	0.70	8	1.33	44	100.4
东川小海河	10.0	70	28.71	11.60	2.60	0.15	15.30	5000	0.56	14	1.23	50	98.0
东川因民沟	16.0	2	16.80	6.90	1.32	0.10	19.20	6000	0.70	30	1.25	46	118.0
金源大箐沟	19.0	70	19.50	7.50	1.67	0.15	8.20	6400	0.39	17	1.13	42	83.7
金源花沟	9.0	60	8.50	10.20	1.17	0.18	10.10	4700	0.48	18	1.18	36	86.7
金源老干沟	23.0	100	26.50	7.40	1.71	0.14	12.80	8000	0.54	19	1.28	45	86.7
金源沙湾沟	21.0	200	19.40	8.60	1.68	0.20	17.60	12000	0.73	12	1.45	30	86.7
南涧大箐沟	3.2	20	2.91	2.60	0.45	0.17	8.53	520	0.30	25	1.15	55	69.2
南涧观音寺沟	0.4	15	0.15	1.13	0.23	0.18	8.15	65	0.29	20	1.14	45	69.2
宁蒗大鱼坝沟	2.5	25	4.10	3.70	0.77	0.21	5.75	250	0.42	45	1.11	48	85.0
怒江芭蕉河	8.2	4	4.10	3.80	1.67	0.32	6.60	350	0.25	28	1.23	50	82.0
巧家白泥沟	6.0	100	5.60	1.90	0.32	0.17	16.00	2100	0.70	6	1.2	46	92.0
巧家水碾河	14.0	70	83.70	14.00	1.83	0.13	21.00	10000	0.70	10	1.33	46	92.0
巧家银厂沟	22.0	70	102.80	14.00	2.25	0.15	20.00	1300	0.6	12	1.28	48	92.0
漾濞美翁箐	8.0	120	12.02	7.40	1.08	0.15	14.50	10000	0.81	12	1.47	43	80.0
永胜板山河	28.0	100	39.80	16.20	1.40	0.09	12.50	95	0.72	17	1.28	38	109.0

其危险度评价的主要思路是首先把收集到的资料按 4 级分级由轻微—严重分别赋予 1, 2, 3, 4 分值确定各因素与危险度之间的关联性量度, 以确定各因素的关联序, 用来计算各因素在判别泥石流危险度时的权重。采用的是古德曼 (Goodman) 和卡拉斯卡尔 (K uskal) 的  $r$  度量来确定关联性指标与危险度之间的关联性大小,  $r$  的计算公式如下:

$$r=\frac{C-D}{C+D}$$

(4)

$$C=\sum_{i<k} \sum_{j<l} n_{ji} \times n_{kl} \quad (i, j, k, l \text{ 取值范围为 } 1\sim 4)$$

$$D=\sum_{i<k} \sum_{j>l} n_{ij} \times n_{kl}$$

式中:  $C$  ——某因素与一次最大冲出量的样本对在其有序尺度变量  $X$  和  $Y$  上协调时的数目;  $D$  ——某因素与一次最大冲出量的样本对在其有序尺度变量  $X$  和

$Y$  上不协调时的数目<sup>[3]</sup>;  $n_{ij}$ ,  $n_{kl}$  ——在四级分级取值中, 某因素与一次最大冲出量的样本对在其有序尺度变量  $X$  和  $Y$  上协调时取 1; 不协调取 0。

经计算得出各因素的关联序为:

$S_6 \approx S_3 > S_2 \approx S_5 > S_9 > S_8 > S_{10} \approx S_7 > S_{11} > S_4 \approx S_1$

从关联度最小的因素  $S_1$  开始, 给定起始权数为 1, 以此基本单位为公差, 依次以等级数向关联度变大

的方向递增权重, 得到个因素的权重; 经计算可得  $S_1 - S_{11}$  的权重依次为: 0. 022 2, 0. 133 3, 0. 155 6, 0. 222 2, 0. 133 3, 0. 155 6, 0. 066 7, 0. 088 9, 0. 111 1, 0. 066 7, 0. 044 4。由此计算出泥石流危险评价各因子评分表 (表 2)。

最后根据式(1) 计算各条泥石流沟的危险度, 其计算结果见表 6。

表 2 泥石流危险评级因子分级、评分

因素/ 分级	I 级	II 级	III 级	IV 级
松散固体物质储量/万 m <sup>3</sup>	< 200	200~ 5000	5000~ 10000	> 10 000
因素评分 $W_{S6}$	1	8	16	24
流域相对高差/km	< 0. 5	0. 5~ 1. 0	1. 0~ 1. 5	> 1. 5
因素评分 $W_{S3}$	1	8	16	24
沟谷长度/km	< 1	1. 1~ 5	5~ 10	> 10
因素评分 $W_{S2}$	1	7	14	21
流域切割密度/( km • km <sup>- 2</sup> )	< 5	5~ 10	10~ 20	> 20
因素评分 $W_{S5}$	1	7	14	21
河床弯曲系数	< 1. 10	1. 10~ 1. 20	1. 20~ 1. 30	> 1. 30
因素评分 $W_{S9}$	1	6	12	18
植被覆盖率/%	> 50	30~ 50	20~ 30	< 20
因素评分 $W_{S8}$	1	5	10	15
形成区山坡平均坡度/(°)	< 30	30~ 40	40~ 50	> 50
因素评分 $W_{S10}$	1	4	8	12
泥砂补给段长度比	< 0. 2	0. 2~ 0. 4	0. 4~ 0. 6	> 0. 6
因素评分 $W_{S7}$	1	4	8	12
24 h 最大降雨量/mm	< 50	50~ 100	100~ 150	> 150
因素评分 $W_{S11}$	1	3	6	9
主沟比降	< 0. 10	0. 10~ 0. 15	0. 15~ 0. 20	> 0. 2
因素评分 $W_{S4}$	1	2	3	4
流域面积/km <sup>2</sup>	> 10 或< 0. 5	50~ 100	30~ 50	0. 5~ 30
因素评分 $W_{S1}$	1	2	3	4

2. 2 分级赋值模型危险度评价

刘希林、唐川在 1995 年同样以云南省 37 条典型泥石流沟为研究对象<sup>[9]</sup>, 收集整理了 16 项评价因子, 其中包括 2 项主要因素和 14 项次要因子; 主要危险因子为一次泥石流(可能)最大冲出量  $L_1$  和泥石流发生频率  $L_2$ ; 次要危险因子为流域面积  $S_1$ , 主沟长度  $S_2$ , 流域最大相对高差  $S_3$ , 主沟平均比降  $S_4$ , 形成区山坡平均坡度  $S_{10}$ , 流域切割密度  $S_5$ , 主沟床弯曲系数  $S_9$ 、松散固体物质储量  $S_6$ , 泥砂补给段长度比  $S_7$ , 24 h 最大降雨量  $S_{11}$ , 年平均降雨量  $S_{12}$ , 植被覆盖率  $S_8$ , 垦殖指数  $S_{13}$  和流域内人口密度  $S_{14}$ 。其中  $L_1$ 、 $L_2$  与  $S_{14}$  见表 3, 其他参考表 1。

通过对全国范围内劲 100 位泥石流专家学者的通信调查, 采用邓聚龙教授创立的“灰色系统理论”中的灰色统计方法, 成功解决了泥石流主要危险因子确定的关键问题。根据灰色统计方法, 设定关联度阈值 ( $L_1$  0. 85;  $L_2$  0. 83) 最终选取确定主要危险因子为一次  $L_1$  和  $L_2$ ; 次要危险因子为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_5$ 、 $S_9$ 、 $S_7$ 、 $S_{11}$  和

$S_{14}$ 。使用灰色关联分析法, 根据关联度特性和各危险因子的平均关联度确定各危险因子的权数和权重<sup>[9]</sup>。

所谓灰色关联分析就是先用均值化方法把原始数据做无量纲化处理, 求出均值化矩阵; 再计算主导因子序列与各关联因子序列相互比较的差值的绝对值; 找出最大绝对差值和最小绝对差值; 用公式(5) 计算出关联系数  $\xi_j$ ; 再按公式(6) 计算主导因子与关联因子间的关联度  $R$ 。

$$\xi_j = \frac{\Delta \min + K \times \Delta \max}{\Delta(i, j) + K \times \Delta \max} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N ; K \in [0, 1]$$
(5)

$$R(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_j$$
(6)

式中:  $R(j)$  ——主导因子与其他各因子间的关联度;  $N$  ——样本数;  $i$  ——第  $i$  个样本;  $j$  ——第  $j$  个关联因子;  $\Delta(i, j)$  ——主导因子与关联因子比较后的绝对值;  $\Delta \max$  ——所有差值序列中的最大绝对差值;  $\Delta \min$  ——所有差值序列中的最小绝对差值;  $K$  ——经验系数, 只影响关联系数的大小, 不影响关联序列。

表 3 云南省 37 条典型泥石流沟基础数据<sup>91</sup>

沟名	$L_1/$ 万 $m^3$	$L_2$ ( 次/100 a)	$S_{14}/($ 人 $\cdot km^{-2})$	沟名	$L_1/$ 万 $m^3$	$L_2$ ( 次/100 a)	$S_{14}/($ 人 $\cdot km^{-2})$
保山白纸房沟	5.1	35	65	东川蒋家沟	195.1	1500	260
保山北老埂河	2.5	20	75	东川深沟	9.0	50	260
保山化工厂河	3.2	25	80	东川石羊沟	7.8	20	290
保山黄龙山河	6.5	15	60	东川小白泥沟	60.0	1000	0
保山黄纸房沟	2.5	35	60	东川小海河	10.0	70	216
保山仁寿河	4.6	30	85	东川因民沟	26.0	2	420
保山山脚村河	2.4	25	109	金源大箐沟	19.0	90	167
保山王官屯河	1.6	20	65	金源花沟	9.0	90	154
保山五郎庙河	1.7	35	90	金源老干沟	23.0	100	187
保山小箐河	1.2	30	98	金源沙湾沟	21.0	150	209
德钦水磨房沟	9.0	15	38	南涧大箐沟	3.2	30	215
德钦直溪河	8.0	30	40	南涧观音寺沟	0.4	20	266
东川达德沟	10.0	30	310	宁蒗大鱼坝沟	2.5	25	43
东川达朵沟	12.0	50	55	怒江芭蕉河	8.2	13	195
东川大白泥沟	82.0	1200	0	巧家白泥沟	24.0	35	340
东川大桥河	105.0	450	210	巧家水碾河	14.0	70	280
东川黑沙沟	5.0	50	276	巧家银厂沟	22.0	70	270
东川黑水河	1.8	80	318	漾濞美翁箐	8.0	260	187
永胜板山河	28.0	50	190				

经计算可得,  $L_1$  和  $L_2$  的权数为 16, 其权重为 0.235 3;  $S_1, S_2, S_3, S_5, S_9, S_7, S_{11}, S_{14}$  的权数依次为 8, 6, 5, 7, 1, 4, 3, 2; 其权重系数依次为 0.117 6, 0.088 2, 0.073 5, 0.102 9, 0.014 7, 0.058 8, 0.044 1, 0.029 4。各危险因子的取值范围较大, 制定出统一的危险因子等级和危险度标准, 采用对称不等分间隔分割法来划分

泥石流危险因子的等级并赋予定值(表 4)。最后得到危险度计算公式(7), 计算各泥石流沟的危险度  $R_d$ , 计算中所用  $L_1, L_2$  与  $S_{14}$  参考表 3, 其计算结果见表 6。  
$$R_d = 0.2353F_{L1} + 0.253F_{L2} + 0.1176F_{S1} + 0.0882F_{S2} + 0.0735F_{S3} + 0.1029F_{S5} + 0.0147F_{S9} + 0.0588F_{S7} + 0.0441F_{S11} + 0.0294F_{S14} \quad (7)$$

表 4 泥石流危险因子等级及其赋值(1994 年修订)

项目	I	II	III	IV	V	VI
$L_1/10^4m^3$	$\leq 1$	(1) - 5	(5) - 10	(10) - 50	(50) - (100)	$\geq 100$
赋值 $G_{L1}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$L_2$	$\leq 5$	(5) - 10	(10) - 20	(20) - 50	(50) - (100)	$\geq 100$
赋值 $G_{L2}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$S_1/km^2$	$\geq 50$ 或 $\leq 0.5$	(0.5) - 2	(2) - 5	(5) - 10	(10) - 30	(30) - (50)
赋值 $G_{S1}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$S_2/km$	$\leq 0.5$	(0.5) - 1	(1) - 2	(2) - 5	(5) - 10	$\geq 10$
赋值 $G_{S2}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$S_3/km$	$\leq 0.2$	(0.2) - 0.5	(0.5) - 0.7	(0.7) - 1.0	(1.0) - 1.5	$\geq 1.5$
赋值 $G_{S3}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$S_5/(km \cdot km^{-2})$	$\leq 2$	(2) - 5	(5) - 10	(10) - 15	(15) - 20	$\geq 20$
赋值 $G_{S5}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$S_9$	$\leq 1.1$	(1.1) - 1.2	(1.2) - 1.3	(1.3) - 1.4	(1.4) - (1.5)	$\geq 1.5$
赋值 $G_{S9}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$S_7$	$\leq 0.1$	(0.1) - 0.2	(0.2) - 0.3	(0.3) - 0.4	(0.4) - (0.6)	$\geq 0.6$
赋值 $G_{S7}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$S_{11}/mm$	$\leq 50$	(50) - 75	(75) - 100	(100) - 125	(125) - (150)	$\geq 150$
赋值 $G_{S11}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$S_{14}/(人 \cdot km^{-2})$	$\leq 20$	(20) - 50	(50) - 100	(100) - 150	(150) - (200)	$\geq 200$
赋值 $G_{S14}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1

注: 标注 ( ) 表示 < 或 > ; 例  $x : (0.5) - 1$ , 即  $0.5 < x \leq 1$

2.3 函数赋值模型危险度评价

刘希林进一步改进模型, 他首先将 14 个候选次要因子分别与泥石流规模和发生频率进行关联度分析, 再根据每个候选次要因子与泥石流规模和发生频率得出的 2 个关联度的平均值, 确定其与主要因子

关系的密切程度并决定其取舍, 即双系列关联度分析方法。最后选取单沟泥石流危险度评价的 7 个因子: 泥石流规模  $L_1$ 、泥石流发生频率  $L_2$ 、沟谷流域面积  $S_1$ 、主沟长度  $S_2$ 、流域相对高差  $S_3$ 、流域切割密度  $S_5$  和不稳定沟床比例  $S_7$ , 并提出了最新沟谷泥石流危险

度  $H_d$  计算公式(3)<sup>[5-6]</sup>。依此计算云南省 37 条典型泥石流沟的危险度  $H_d$ (表 6)。其中计算过程中所用  $L_1$  与  $L_2$  参考表 3。

表 5 单沟泥石流危险度评价因子的权重系数及转换函数				
转换 赋值	权重 数	权重 系数	转换公式	
$M$	10	0.29	$M = 0$	$L_1 \leq 1$
			$M = \lg L_1 / 3$	$1 < L_1 \leq 1000$
			$M = 1$	$L_1 > 1000$
$F$	10	0.29	$F = \lg L_2 / 2$	$1 < L_2 \leq 100$
			$F = 1$	$L_2 > 100$
$S_1$	5	0.14	$S_1 = 0.2458 \times S_1^{0.3495}$	$0 \leq S_1 \leq 50$
			$S_1 = 1$	$S_1 > 50$
$S_2$	3	0.09	$S_3 = 0.2903 \times S_2^{0.5372}$	$0 \leq S_2 \leq 10$
			$S_3 = 1$	$S_2 > 10$
$S_3$	2	0.06	$S_3 = 2 \times S_3 / 3$	$0 \leq S_3 \leq 1.5$
			$S_3 = 1$	$S_3 > 1.5$
$S_5$	4	0.11	$S_5 = 0.05 \times S_5$	$0 \leq S_5 \leq 20$
			$S_5 = 1$	$S_5 > 20$
$S_7$	1	0.03	$S_7 = S_7 / 60$	$0 \leq S_7 \leq 60$
			$S_7 = 1$	$S_7 > 60$

### 3 评估模型比较分析

#### 3.1 模型比较

分级评分模型的不足之处主要是难以获取的泥石流内在因子较多,降低了评价方法的可操作性,未能突出发生频率的主要因子地位。但朱静根据实际情况,以云南泥石流形成环境的区域调查为基础,选取确定了泥石流沟危险度判定的 11 项因子,采用的是古德曼(Goodman)和卡拉斯卡尔(Kuskal)的  $r$  度量来确定关联性指标与危险度之间的关联性大小。经过实际应用,该方法具有较高的可靠性和实用性<sup>[2]</sup>。

分级赋值模型选取多项因子用来评价泥石流的危险度,开始采用标准化量值,在标准化方面有了较大进步,得到了较广的应用。刘希林、唐川等在 90 年代中期对模型进行了改进,选取了 10 项因子,去除具有重复意义的因子,在各因子权重分配时突出主要因子的权重。其对模型的改进主要是将评价因子等级的 4 级划分改为 6 级划分,提高了评价因子取值变化的灵敏度;调整了大部分评价因子取值的上下限,使其更符合实际情况;明确了各等级间的取值界限,避免了评价因子取值界限模糊而导致的危险度取值的可变性。由于因子减少,准确度提高,获得了较为广泛的认同和引用,在我国四川、云南、北京、贵州和辽宁等地推广应用<sup>[2]</sup>。

函数赋值模型是对分级赋值模型做的进一步改

进,泥石流危险度评价因子减少至 7 个;因子的确定性更加明确。采用函数公式计算评价因子的转换值,使评价因子的转换值连续变化于 0~1 之间,避免了评价因子分级结合点出现转换值的跳跃式变化<sup>[2,5]</sup>。

#### 3.2 基础数据比较

对云南省同样的 37 条泥石流沟的基础数据进行对比,朱静和刘希林、唐川获取的部分(危险度评价)因子参考数据存在差异,主要是泥石流发生频率、松散固体物质储量和植被覆盖率。部分泥石流沟在其他评价因子参数方面也存在差异,其中一次泥石流(可能)最大冲出量存在较大差异的有东川因民沟和巧家白泥沟。存在较多差异的评价因子参数有着不同的计算方法,这些方法有间接性的,也有直接性的;不确定性较大。例如,一次泥石流(可能)最大冲出量  $L_1$  的间接计算公式<sup>[1]</sup>之一:

$$L_1 = -2 + 0.26S_1 + 0.41S_5 + 0.0021S_6 \quad (8)$$

计算泥石流发生频率  $L_2$  的间接计算公式<sup>[1]</sup>为:

$$L_2 = -80.6593 - 2.8302S_1 + 12.138S_5 + 0.0209S_6 \quad (9)$$

#### 3.3 危险度评价结果比较

泥石流危险度是遭受到泥石流危害的可能性大小;故泥石流沟危险度是一个概率<sup>[9]</sup>。分级赋值模型和函数赋值模型的泥石流危险度的计算过程正是基于概率,其值 0~1 之间,可以理解为发生泥石流的可能性大小。分级评分模型基于泥石流沟危险因子等级评分表,得分越高,遭遇泥石流危害的可能性越大。理论上,如果各危险因子都是最高评分,即得到最高评分,那么它的危险度应该为 1。将其转换为概率度量,其转化公式为:

$$W_d = \frac{W}{W_{\max}} \quad (10)$$

式中:  $W_d$ ——转化后危险度;  $W$ ——原始危险度评分;  $W_{\max}$ ——最大危险度评分;朱静所采用危险因子评分表最大评分为 164。

3 种模型对云南省 37 条典型泥石流沟危险度进行评价的结果如表 6 所示。为更直观观察 3 种模型的评价结果,绘制了 3 种结果的统计图(图 1)。对 3 类模型危险度评价结果作相关性分析,3 种模型危险度评价结果之间的 Pearson correlation(皮尔逊相关系数)极高;其中  $W_d$  与  $R_d$  之间的相关系数为 0.919;  $W_d$  与  $H_d$  之间的相关系数为 0.941,  $H_d$  与  $R_d$  之间的相关系数为 0.958。研究结果表明,3 种模型的危险度评价结果具有较高的相似程度。朱静曾对模型危险度评价结果进行验证,选取 40 条泥石流沟,其吻合率达 80%,其余 20% 的判定值高于实际值一个量级,其验证结果表明其模型具有较好的可靠性。

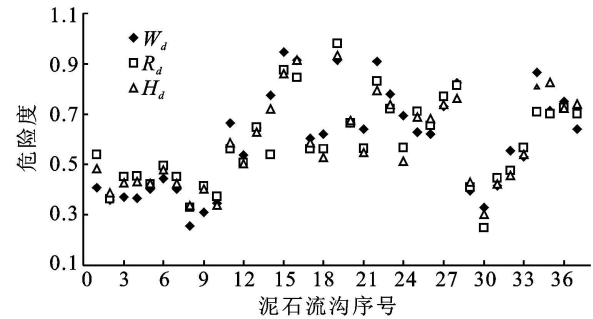


图 1 3 种模型危险度结果对比图

表 6 云南省 37 条典型泥石流沟危险度评价结果

编号	沟名	W	W <sub>d</sub>	R <sub>d</sub>	H <sub>d</sub>
1	保山白纸房沟	67	0.40854	0.54106	0.48338
2	保山北老埂河	59	0.35976	0.36462	0.38826
3	保山化工厂河	61	0.37195	0.45284	0.42706
4	保山黄龙山河	60	0.36585	0.45578	0.43286
5	保山黄纸房沟	66	0.40244	0.42344	0.42485
6	保山仁寿河	73	0.44512	0.49694	0.47851
7	保山山脚村河	66	0.40244	0.45284	0.42572
8	保山王官屯河	42	0.25610	0.32934	0.33795
9	保山五郎庙河	51	0.31098	0.41462	0.40400
10	保山小箐河	57	0.34756	0.37346	0.33883
11	德钦水磨房沟	109	0.66463	0.56162	0.58645
12	德钦直溪河	88	0.53659	0.50872	0.50395
13	东川达德沟	106	0.64634	0.6469	0.62706
14	东川达朵沟	127	0.77439	0.54106	0.72227
15	东川大白泥沟	155	0.94512	0.8763	0.85959
16	东川大桥河	150	0.91463	0.84692	0.91538
17	东川黑沙沟	99	0.60366	0.56162	0.58619
18	东川黑水河	102	0.62195	0.56164	0.52756
19	东川蒋家沟	150	0.91463	0.97922	0.93365
20	东川深沟	109	0.66463	0.66454	0.67403
21	东川石羊沟	105	0.64024	0.56456	0.54842
22	东川小白泥沟	149	0.90854	0.8322	0.79393
23	东川小海河	128	0.78049	0.72042	0.73760
24	东川因民沟	114	0.69512	0.56748	0.51240
25	金源大箐沟	103	0.62805	0.71162	0.69031
26	金源花沟	102	0.62195	0.65574	0.68116
27	金源老干沟	120	0.73171	0.77044	0.73731
28	金源沙湾沟	135	0.82317	0.81454	0.76168
29	南涧大箐沟	65	0.39634	0.41168	0.42923
30	南涧观音寺沟	54	0.32927	0.24994	0.30245
31	宁蒗大鱼坝沟	68	0.41463	0.44696	0.42249
32	怒江芭蕉河	91	0.55488	0.47636	0.45667
33	巧家白泥沟	87	0.53049	0.56754	0.53917
34	巧家水碾河	142	0.86585	0.70868	0.80833
35	巧家银厂沟	117	0.71341	0.7028	0.82731
36	漾濞美翁箐	123	0.75000	0.72632	0.72284
37	永胜板山河	105	0.64024	0.70278	0.74084

3 类模型危险度评价因子参数存在不确定性,但其结果差相似程度极高,笔者认为主要原因是在泥石流沟危险度评价时,朱静选用了 11 种评价因子,其中松散固体物质储量  $S_6$  和植被覆盖率  $S_8$  所占权重只有 0.155 6、0.088 9,减少了不确定性产生的误差,刘

希林和唐川运用分级赋值类模型时只选取了泥石流发生频率,并突出了主要因子的权重,不确定性产生的误差也减小;函数赋值模型也只选取了泥石流发生频率,且选用了确定性较强的因子,有效减小了不确定性因子的影响。

分级赋值模型和函数赋值模型通过计算关联度,选取影响较大的评价因子。但泥石流是一个复杂的过程,其影响因子较多,不同环境下的泥石流,各影响因子的作用各异。如云南省 37 条典型泥石流沟的 14 项危险因子与一次泥石流(可能)最大冲出量  $L_1$  和泥石流发生频率  $L_2$  的平均关联度均大于 0.824 2。

4 结语与展望

泥石流的产生和形成是一个十分复杂的过程,其影响因素较多且复杂。运用不同的方法选取主要因子和增加主要因子的权重是可行的;通过对 3 类模型的运用实例和结果分析,表明次要因子同样对泥石流危险度评价有影响,多种次要因子共同的作用对危险度的评价具有较大的影响<sup>[10-11]</sup>。如朱静选择 11 项评价因子(次要因子)的评价结果与刘希林等选择主要因子并突出主要因子权重的评价结果有较高的相似性,即:次要因子的影响不可完全忽视。

近年来,科研人员对泥石流研究的不断深入,多种科学理论的不断引入。泥石流沟危险度评价已经有定性化发展成定量化评价;并且评价因子的赋值也公式化,避免了跳跃性。模型的实用性和准确性会不断提高<sup>[12]</sup>。笔者认为,单沟泥石流沟的危险度评价具有时间性。泥石流多发于雨季,一定时间内的降雨量是泥石流暴发的激发因素。同一地区雨季与非雨季的泥石流危险度不同,一般情况下,非雨季时泥石流暴发的机率极小;当部分危险因子发生巨变时可能激发泥石流。笔者认为泥石流危险度评价可以为:

$$W_d = \mu \sum G_i P_j + \varphi(t) + \varphi(t) \quad (10)$$

式中:  $\sum G_i P_j$  ——主要影响因子计算得到危险度;  $\varphi(t)$  ——随时间变化较大的评价因子(如降雨量)计算得到危险度;  $\varphi(t)$  ——突发事件产生的巨变影响(如地震);  $\mu$  ——修正系数。具体的评价模型需要进一步的研究确定。

现在,遥感技术已经迅猛发展,遥感定量化有了较大进步,可靠性不断增强。通过遥感影像定量提取泥石流危险度评估因子参数的可操作性、直观性会不断增强。如,一次最大冲出物,松散固体物储量及泥石流发生频率等。今后,遥感技术能够为泥石流灾害防治和灾害实时监测等提供更加有效准确的科学数据依据。

(下转第 31 页)

呼市新城区、赛罕区 5 个不同的旗县区。由于各旗县区的水土流失补偿费在征收过程中依行政属地管理, 确定损坏的水土保持设施在各个旗县区的面积、数量, 为各旗县区水行政主管部门开展水土保持监督执法, 合理征收水土流失补偿费提供依据。从而能促进水土保持功能面积占补平衡, 增强生产建设单位水土保持意识, 减少土地征占、地表扰动和植被破坏面积, 减少生产建设过程中的水土流失, 保护土壤资源和土地生产力。

5 结 论

(1) 在高速公路水保方案编制过程中, 三种节点具有不同的控制作用: 运用隧道、桥梁等工程节点分段进行土石方平衡计算, 可以最大限度提高土石方利用率; 根据自然节点间分段进行防治分区, 并对不同分区的特点建立针对性较强的防治措施体系, 最大限度减少工程建设所造成的水土流失; 依据行政节点分别确定各个旗县区的水土流失补偿费, 有助于水土保持补偿费的征收及管理。

(2) 结合呼和浩特—集宁高速公路水土保持方案

编制的工作实践, 应用三种节点的控制作用, 准确把握水土保持方案编制过程中土石方平衡、防治分区及防治体系确立、补偿费征收额度, 对高速公路水土保持方案的编制具有较强的指导意义。

参考文献:

[1] 郑国相. 高速公路水土保持方案编制的探索[J]. 水土保持科技情报, 2000(2): 45-47.

[2] 刘朝晖, 张映雪. 公路线性与环境设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 65.

[3] 陈昌军, 林红. 公路建设项目水土保持方案编制中土石方平衡方法的探讨[J]. 水土保持科技情报, 2004(7): 9-10.

[4] 金怀立. 分段土石方平衡方法在公路环评中的应用[J]. 山西建筑, 2008, 34(22): 271-272.

[5] 王坚. 浅议高速公路建设项目的水土保持[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(4): 96-97.

[6] 李冰. 水土流失防治费与水土保持设施补偿费[J]. 水利科技和经济, 2003, 9(3): 217.

[7] 牛崇桓, 柳长顺, 赵爱军. 关于完善生产建设项目水土保持补偿费制度的几点认识[J]. 水利发展研究, 2008(4): 42-45.

(上接第 26 页)

参考文献:

[1] 康志成, 李焯芬, 马霭乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 5-16.

[2] 刘希林. 我国泥石流危险度评价研究: 回顾与展望[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 1-8.

[3] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. 灾害学, 1988, 3(3): 10-151.

[4] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合判别[J]. 水土保持通报, 1986, 6(1): 51-57.

[5] 刘希林. 沟谷泥石流危险度计算公式的由来及其应用实例[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(3): 241-245.

[6] Liu X L. Assessment on the severity of debris flows in mountainous creeks of southwest China. Proceedings of International Symposium of Inter prevention[C] // Gao-mish-

Pa tenki enchen, Germany, 1996: 145-154.

[7] LIU Xilin, ZHANG Dan. Comparison of Two Empirical Models for Gully-Specific Debris Flow Hazard Assessment in Xiaojiang Valley of Southwest China[J]. Natural Hazards, 2004, 31: 157-175.

[8] 朱静. 泥石流沟判别与危险度研究[J]. 干旱区地理, 1995, 18(3): 63-71.

[9] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 1-26.

[10] 李泳. 泥石流危险性评价的问题[J]. 山地学报, 1999, 17(4): 305-312.

[11] 刘希林. 泥石流风险评估中若干问题的探讨[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 341-345.

[12] 侯兰功, 崔鹏. 单沟泥石流灾害危险性评价研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 125-128.