

罗路广, 裴向军, 裴钻, 等. 天山北麓溜砂坡分布特征及易发性研究[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 200–205, 211. [LUO Lu-guang, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. Distribution characteristics and susceptibility of talus slopes in the northern piedmont of Tian-Shan Mountain[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 200–205, 211. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.035.]

## 天山北麓溜砂坡分布特征及易发性研究<sup>\*</sup>

罗路广, 裴向军, 裴 钻, 阳 博, 荆 翔

(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:** 溜砂坡为一种广泛发育于冰缘环境的特殊灾害, 具有自稳性差、突发性高、复发性强等特点, 容易失稳产生危害。通过对天山北麓溜砂坡发育规律与影响因素的关系进行统计分析, 选取地质环境条件、内外营力作用及人类工程活动等3类评价指标, 采用AHP-模糊综合评价法对指标权重定量, 建立溜砂坡易发性评价模型。研究表明: ①溜砂坡主要分布于海拔1 600~2 500 m的冰缘斜坡环境、玄武岩及砂板岩等硬岩、碎块及次块状坡体结构、阴坡或半阴坡中; ②海拔和冻融风化作用是影响溜砂坡易发性最主要的两个因素, 其次是地层岩性; ③实例分析结果显示, 溜砂坡易发性评价模型具有较好的适用性和准确性。

**关键词:** 溜砂坡; 分布特征; AHP-模糊综合评价法; 易发性评价; 天山北麓

**中图分类号:** X43; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)02-0200-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.035

随着西部大开发的实施及“一带一路”战略的提出, 越来越多的大型工程如铁路、隧道、公路于高寒、高海拔、高烈度的“三高”地区建设实施, 然而在我国中西部高寒山区, 如藏东南、甘肃、新疆等地, 广泛分布大量溜砂坡。溜砂坡(又称散粒体斜坡)是指高陡的岩质斜坡, 遭受强烈的物理风化作用而形成大量砂粒和岩屑, 在重力作用下发生多种方式的运动并在坡脚堆积成锥状斜坡的自然演变过程<sup>[1]</sup>。因其具有结构松散、透水性强、无粘聚力等特征, 极易失稳对基础设施的建设及安全运营造成威胁, 针对溜砂坡的分布特征及易发性评价研究对科学选址具有重要的指导意义。

国内外对溜砂坡的研究尚处于探索性阶段, 且主要侧重于溜砂坡的形成条件、失稳机制、演化规律、破坏模式等方面<sup>[2-6]</sup>, 而没有针对其分布特征及规律进行研究。汶川地震引发了大量的地质灾害, 许多学者运用遥感、GIS等技术进行相关统计以探索发育分布特征, 如黄润秋<sup>[7]</sup>利用GIS技术对地震地质灾害的分布与距发震断裂距离、坡度、高程、岩性等因素的关系进行统计分析; 钟秀梅等人<sup>[8]</sup>通过现场调查和遥感解译993处地质

灾害点得出其发育规律及分布特征。由于溜砂坡产生条件及特征与崩滑流等地质灾害有明显的不同, 因此, 有必要对其空间发育特征及影响因素进行研究。此外, 针对地质及自然灾害的易发性、危险性、敏感性评价的研究已比较成熟。如刘洋洋等<sup>[9]</sup>基于AHP-模糊综合评价法实现公路灾害易损性的定量和定性综合评估; 余丰华等<sup>[10]</sup>通过对崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的主要影响因素的敏感性计算, 采用主成分分析法计算得到区域地质灾害易发程度分区; 姚玉增等<sup>[11]</sup>采用层次分析法、统计量法确定了辽宁凌源地区山地灾害危险性评价指标的权重, 利用因子叠置法对危险性进行综合评价。结果表明采用上述评价方法建立的评价模型准确度较高。

基于此, 本文对天山北麓溜砂坡分布特征及易发性进行研究, 对其与海拔、地层岩性、坡体结构、坡向、植被特征等因素的关系进行统计分析, 在此基础上, 采用AHP-模糊综合评价法建立易发性评价模型, 并通过实例进行验证, 评价模型对类似山区具有一定的适用性及参考价值。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2017-08-09 修回日期: 2017-09-26

基金项目: 交通运输部基金项目(2013318800020); 国家创新性群体基金(41521002)

第一作者简介: 罗路广(1992-), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事地质灾害评价及防治研究工作。

E-mail: luolgedut@163.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及工程治理方面的教学与研究工作. E-mail: peixj0119@tom.com

## 1 研究区概况

作为溜砂坡发育典型代表地区的天山, 属于典型的高寒内陆山区, 其主要气候特点为紫外线辐射强烈, 季节和昼夜温差悬殊, 寒冻风化作用强烈, 降水多集中于春夏季, 具有典型内陆大温差气候特点。天山公路沿线地形陡峻, 断裂、褶皱十分发育, 岩体结构复杂, 基岩裸露且岩性复杂多变, 在强烈寒冻风化作用下疏松破碎, 途经奎屯河、库车河等较大河流, 复杂的地质环境条件使得世界上公路所能遇到的病害在这几乎都能遇到, 如崩塌、滑坡、泥石流、雪崩、冻土、水毁得世界上公路所能遇到的病害在这里面几乎都能遇到, 如崩塌、滑坡、泥石流、雪崩、冻土、水毁、溜砂坡等, 被称为“世界地质灾害博物馆”(图1)。

天山北麓主要是指哈希勒根达坂以北地区, 该地区以高山峡谷地形为主, 主要出露地形为板岩、玄武岩、闪长岩和花岗岩等, 岩石在内外动力作用下极易崩解, 滚落堆积于坡脚, 形成溜砂坡。据沿线调查统计, 具有危害性的溜砂坡有 73 处, 分布于天山北麓(k610 ~ k655 段), 分布线密度 1.62 个/km, 影响线路长约 4.28 km。

## 2 溜砂坡分布特征

溜砂坡的发育特征受多种因素控制, 如海拔、地层岩性、坡体结构、坡向及植被特征等, 其形成是多因素叠加的结果。

### 2.1 与海拔的统计关系

溜砂坡灾害点分布数量与海拔之间的统计结果如图2所示。研究区溜砂坡主要分布海拔为 1 600 ~ 2 500 m, 该范围的溜砂坡数量占总数的 74% 左右, 说明该高程更易产生溜砂坡灾害。其中海拔 1 600 ~ 1 900 m 范围内发育 21 个溜砂坡, 占总数的 28.8%, 海拔 1 900 ~ 2 200 m 范围内发育 17 个溜砂坡, 占总数的 23.3%。经调查发现, 天山雪线海拔为 2 700 m 左右, 1 600 ~ 2 500 m 范围为冰缘斜坡环境, 即冻融风化强烈区更易产生溜砂坡, 而海拔 2 700 m 以上为常年积雪区, 温度变化相对较小, 溜砂坡灾害相对较少。

### 2.2 与地层岩性的统计关系

研究区岩性主要有千枚岩、花岗岩、板岩、玄武岩、凝灰岩五大类。地层岩性是影响溜砂坡发育分布的基本条件, 将溜砂坡灾害与岩性进行空间统计分析, 图3为溜砂坡数量随地层岩性的变

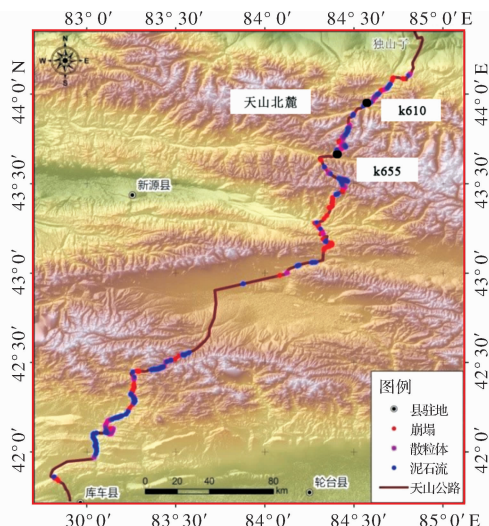


图1 天山公路地质灾害

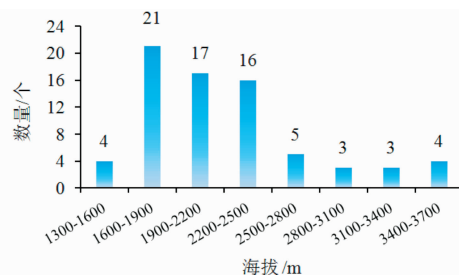


图2 溜砂坡数量与海拔的统计关系

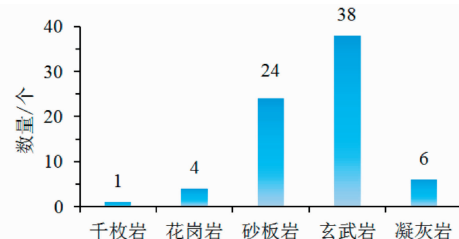


图3 溜砂坡数量与地层岩性的统计关系

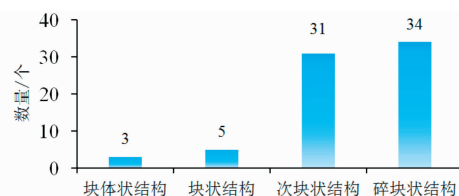


图4 溜砂坡数量与坡体结构的统计关系

化。从图中可以看出, 研究区溜砂坡主要发育于玄武岩及砂板岩等硬岩中, 占总量的 85%, 凝灰岩、花岗岩、千枚岩发育数量依次减小。

### 2.3 与坡体结构的统计关系

边坡的坡体结构是指以结构控制论为基础, 以坡体内部潜在优势结构面为主要研究对象, 并考虑其与不同的结构要素之间的相互组合关系, 它对坡体的浅表生改造及坡体稳定性有着重要影

响<sup>[12]</sup>。图4为溜砂坡数量随坡体结构的变化,从图中可以看出,它主要分布于碎块、次块状结构中,依次占总量46.6%和42.5%;在块体状结构和块状结构中少量发育,依次占总量4.1%和6.8%。

#### 2.4 与坡向的统计关系

坡向定义为坡面法线在水平面上的投影的方向。坡向对溜砂坡的分布也有影响(表1),将0~360°平均分为8个方向,从表中可以看出,正北坡向(67.5~112.5°)的溜砂坡发育有20个,占总数的27%;其次是西北、正西、东北坡向,东北坡向的溜砂坡数量最少,占总数的3%。经调查太阳辐射射入北坡最少,其次为东北坡和西北坡,因此,阴坡寒冻风化作用更为强烈,与其他坡向的斜坡相比,阴坡、半阴坡更容易产生溜砂坡灾害。

表1 溜砂坡分布与坡向的关系

坡向	方位角/(°)	溜砂坡个数	占比/%
N	337.5~22.5	20	27.40
NE	22.5~67.5	8	10.96
E	67.5~112.5	2	2.74
SE	112.5~157.5	7	9.58
S	157.5~202.5	5	6.85
SW	202.5~247.5	3	4.11
W	247.5~292.5	13	17.81
NW	292.5~337.5	15	20.55

#### 2.5 植被特征

除上述因素外,坡表植被也对溜砂坡的发育分布产生影响。天山北麓自然条件恶劣,生态环境脆弱,当其他条件基本相同时,植被覆盖率越低,溜砂坡越容易发生,反之亦然。

### 3 溜砂坡易发性评价模型的建立

#### 3.1 评价方法

地质灾害易发性评估常用的方法(模型)有指数法、层次分析法、概率分析法、聚类分析法、模糊评判法、信息量法等。在统计分析溜砂坡分布与影响因素关系的基础上,采用AHP-模糊综合评价法建立其易发性评价模型。AHP-模糊综合评价法即基于层次分析(AHP)的模糊综合评价法,将AHP法和模糊评价法有机结合<sup>[13]</sup>,具体实现流程见图5。

#### 3.2 评价指标体系建立

评价模型中指标的选取是否合理,将会对评价结果的准确性产生直接影响。由于溜砂坡易发性评价涉及的影响因子错综复杂,且各因素的影响程度也不尽相同,因此将所有影响因子都进行

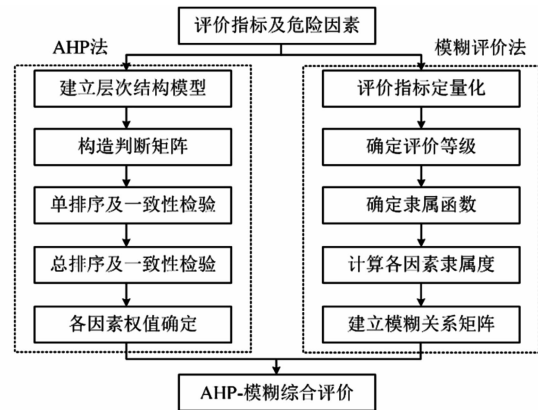


图5 AHP-模糊综合评价法

指标化是不切实际的,在详细分析天山北麓环境地质条件和溜砂坡分布特征后,本文总结分析了3类12项溜砂坡易发性评价的主要影响因素,并将其作为进行AHP-模糊综合评价的评价指标。

##### (1) 地质环境条件因素集( $X_1$ )

地质环境条件主要包括海拔( $Y_1$ )、坡高( $Y_2$ )、坡向( $Y_3$ )、地层岩性( $Y_4$ )、坡体结构( $Y_5$ )、植被特征( $Y_6$ )。除坡高因子外,其它5个因子在章节2已详细分析,在此不再赘述。边坡越高,顶部的拉应力区也越大,砂源区面积越大,越易产生溜砂坡。值得注意的是,研究区边坡坡度多为70°~90°,与溜砂坡的发育数量不存在显著对应关系,因此,本文不予考虑。

##### (2) 内外营力作用因素集( $X_2$ )

###### ① 冻融风化作用( $Y_7$ )

冻融风化作用是天山北麓等寒冻山区冰缘环境斜坡变形破坏的重要外营力之一,改变岩石原有结构及力学性能的过程,引起岩体质量劣化,为溜砂坡提供物源。冻融作用越强烈,岩体崩解损伤越强烈,越容易产生岩屑,溜砂坡就易产生。

###### ② 地震作用( $Y_8$ )

地震是诱发溜砂坡产生的直接因素之一。地震烈度越高,岩体越松动,溜砂坡产生的概率就越大。

###### ③ 降雨融雪作用( $Y_9$ )

降雨、融雪作用是对边坡表生改造的重要影响因素之一。雨水下渗浸泡、软化岩体并产生润滑作用,加速溜砂坡的产生过程。

###### ④ 风载作用( $Y_{10}$ )

风载作用对研究区溜砂坡易发性评价有重要的影响。在不同的风速、风向组合效应下,岩体失稳产生溜砂坡的概率有较大差异。

##### (3) 人类工程活动作用因素集( $X_3$ )

###### ① 人工开挖坡脚( $Y_{11}$ )

人工开挖坡脚使得边坡应力重分布,易产生

失稳、垮塌,不利于边坡的稳定,人工开挖坡脚作用越强,溜砂坡越易产生;反之,溜砂坡越不易产生。

#### ②荷载振动作用( $Y_{12}$ )

车辆、施工等产生的荷载振动作用不可忽视,振动作用越强,溜砂坡越易产生。

以溜砂坡易发性评价为目标层,地质环境条件因素、内外营力作用因素、人类工程活动因素为准则层,12个参评指标为方案层,溜砂坡易发性评价层次结构模型如图6所示。对溜砂坡易发性评价模型中各个评价指标进行量化,根据专家分析判断及前人研究结果,参评指标值越小,溜砂坡易发性越低,将定性指标的分级标准量化赋值为0.1、0.3、0.6、0.9,见表2。

## 4 AHP-模糊综合评价法定量评价

### 4.1 模糊集合的建立

在通过AHP-模糊综合评价法进行溜砂坡易发性评价前,应首先建立评价指标和标准的模糊集合,具体步骤及内容如下所示。

#### (1)一级指标集 $U$

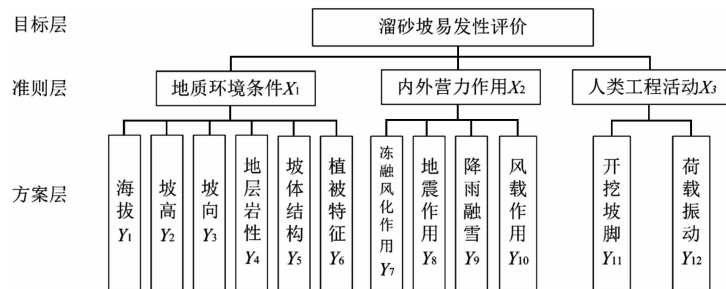


图6 溜砂坡易发性评价层次结构模型

表2 溜砂坡易发性评价指标量化标准

参评指标		评价标准			
一级指标	二级指标	低	中等	较高	极高
地质环境条件	海拔/m	< 800	800 ~ 1 600	1 600 ~ 2 700	> 2 700
	坡高/m	< 50	50 ~ 100	100 ~ 150	> 150
	坡向/(°)	135 ~ 225°	45 ~ 135°	225 ~ 315°	315 ~ 45°
	地层岩性	碎石土(0.1)	软岩(0.3)	中硬岩(0.6)	坚硬岩(0.9)
	坡体结构	块体状(0.1)	块状(0.3)	次块状(0.6)	碎块状(0.9)
	植被特征	好(0.1)	一般(0.3)	较差(0.6)	极差(0.9)
内外营力作用	冻融风化作用	轻微(0.1)	一般(0.3)	严重(0.6)	极严重(0.9)
	地震烈度	< V	V ~ VI	VI ~ VIII	> VIII
	降雨融雪	少(0.1)	一般(0.3)	较多(0.6)	极多(0.9)
	风载作用	小(0.1)	一般(0.3)	较大(0.6)	极大(0.9)
人类工程活动	开挖坡脚	轻微(0.1)	一般(0.3)	严重(0.6)	极严重(0.9)
	荷载振动	弱(0.1)	一般(0.3)	较强(0.6)	极强(0.9)

注:表中括号内的数值为无量纲值,视最大值为1。

$$U = \{X_1, X_2, X_3\}。 \quad (1)$$

#### (2)二级指标集 $Y$

$$Y(X_1) = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6\}; \quad (2)$$

$$Y(X_2) = \{Y_7, Y_8, Y_9, Y_{10}\}; \quad (3)$$

$$Y(X_3) = \{Y_{11}, Y_{12}\}。 \quad (4)$$

#### (3)模糊综合评判集 $M$

$$M = \{M_1, M_2, M_3, M_4\} = \{I, II, III, IV\}。 \quad (5)$$

式中: $M_1$ 表示易发性低; $M_2$ 表示易发性中等; $M_3$ 表示易发性较高; $M_4$ 表示易发性极高。

### 4.2 参评指标权重的确定

权重是权衡各因子相对重要性的指标,它主要用来反映不同指标间重要性程度的大小。本文采用AHP法来确定易发性评价层次结构模型中各指标的权重。

#### (1)构造判断矩阵

本文选用1~9标度法(表3)对溜砂坡易发性评价的各项参评指标的相对重要性进行定量判断,赋予 $U \sim X$ 、 $Y_1 \sim Y_{12}$ 相应的标度值,并构造4个判断矩阵,依次为: $U \sim X$ (表4)、 $X_1 \sim Y(X_1)$ (表5)、 $X_2 \sim Y(X_2)$ (表6)、 $X_3 \sim Y(X_3)$ (表7)。

#### (2)层次单排序及一致性检验

层次单排序是针对上层次中的某个元素,确定

本层次与之有联系的各个元素相对重要性排序的权重值,其目的是计算判断矩阵的特征根和特征向量。针对判断矩阵  $W$ , 计算满足要求的特征根和特征向量:

$$MW = \lambda_{\max} W_i \quad (6)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为  $M$  的最大特征值,  $W$  为对应于  $\lambda_{\max}$  的特征向量;  $W_i$  为对应于  $W$  的分量, 即参评指标层次单排序的权重值。本文采用方根法对其进行求解。计算出各指标层次单排序权重后, 还需对结果进行一致性检验, 以验证矩阵是否满足一致性。随机一致性参数见表 8。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; \quad (7)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

表 3 1~9 标度法及其含义

标度值	两种指标( $a, b$ )相对重要性比较含义
1	$a$ 与 $b$ 同等重要
3	$a$ 比 $b$ 稍微重要
5	$a$ 比 $b$ 明显重要
7	$a$ 比 $b$ 强烈重要
9	$a$ 比 $b$ 极端重要
2, 4, 6, 8	两种指标重要性介于上述标度值之间 倒数 $b$ 比 $a$ 重要

表 4  $U \sim X$  判断矩阵

$U$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$W_i$
$X_1$	1	2	5	0.5815
$X_2$	1/2	1	3	0.3090
$X_3$	1/5	1/3	1	0.1095

$\lambda_{\max} = 3.0037$ ,  $CR = 0.0036 < 0.1$ , 满足一致性要求。

表 5  $X_1 \sim Y(X_1)$  判断矩阵

$X_1$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$W_i$
$Y_1$	1	5	3	1	5	4	0.3452
$Y_2$	1/5	1	1/4	1/2	1	1/2	0.0641
$Y_3$	1/3	4	1	1/2	3	1	0.1497
$Y_4$	1	2	2	1	5	4	0.2768
$Y_5$	1/5	1	1/3	1/5	1	1/2	0.0578
$Y_6$	1/4	2	1	1/4	2	1	0.1064

$\lambda_{\max} = 6.2549$ ,  $CR = 0.0405 < 0.1$ , 满足一致性要求。

表 6  $X_2 \sim Y(X_2)$  判断矩阵

$X_2$	$Y_7$	$Y_8$	$Y_9$	$Y_{10}$	$W_i$
$Y_7$	1	4	3	6	0.5583
$Y_8$	1/4	1	1/2	2	0.1355
$Y_9$	1/3	2	1	3	0.2279
$Y_{10}$	1/6	1/2	1/3	1	0.0783

$\lambda_{\max} = 4.0310$ ,  $CR = 0.0116 < 0.1$ , 满足一致性要求。

表 7  $X_3 \sim Y(X_3)$  判断矩阵

$X_3$	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$W_i$
$Y_{11}$	1	4	0.8
$Y_{12}$	1/4	1	0.2

$\lambda_{\max}$ ,  $CR = 0 < 0.1$  满足一致性要求。

表 8 随机一致性指标值  $RI$ 

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$RI$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

### (3) 层次总排序及一致性检验

计算出  $U \sim X$  等 4 个判断矩阵的层次单排序权重值后, 依次求出溜砂坡易发性评价 12 个参评指标的层次总排序权重值(表 9)。

表 9 参评因子层次总排序权重值

$X \sim Y$ 排序	$U \sim X$ 排序			层次总排序权重
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
	0.5815	0.3090	0.1095	
$Y_1$	0.3452	/	/	0.2007
$Y_2$	0.0641	/	/	0.0372
$Y_3$	0.1497	/	/	0.0871
$Y_4$	0.2768	/	/	0.1609
$Y_5$	0.0578	/	/	0.0336
$Y_6$	0.1064	/	/	0.0619
$Y_7$	/	0.5583	/	0.1725
$Y_8$	/	0.1355	/	0.0419
$Y_9$	/	0.2279	/	0.0704
$Y_{10}$	/	0.0783	/	0.0242
$Y_{11}$	/	/	0.8000	0.0876
$Y_{12}$	/	/	0.2000	0.0219

$CR = 0.0368 < 0.1$ , 说明其具有满意的一致性。

从表 9 可以看出, 海拔和冻融风化作用是影响溜砂坡易发性的最主要的两个因素, 其次是地层岩性。这一评价结果与野外调查结果相吻合。

### 4.3 隶属函数的确定

将每个因子对应的不同溜砂坡易发性等级定义为一个隶属函数, 隶属函数一般包括梯形分布、半梯形分布、矩形分布、抛物线分布等<sup>[14]</sup>。结合溜砂坡实际情况, 本文最终定义隶属函数为降半梯分布函数:

$$b_x(x_m) = \begin{cases} 1, & x_m \leq a_1; \\ \frac{a_2 - x_m}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x_m \leq a_2; \\ 0, & x_m > a_2. \end{cases} \quad (9)$$

$$b_2(x_m) = \begin{cases} 0, & x_m < a_1 \text{ 或 } x_m > a_3; \\ -\frac{a_1 - x_m}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x_m \leq a_2; \\ \frac{a_3 - x_m}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x_m \leq a_3. \end{cases} \quad (10)$$

表 10 评价指标实测值

评价指标	海拔/m	坡高/m	坡向/(°)	地层岩性(0~1)	坡体结构(0~1)	植被特征(0~1)	冻融风化作用(0~1)
实测值	2 343	230	250	坚硬岩(0.7)	次块状(0.55)	较差(0.8)	极严重(0.8)
评价指标	地震烈度(0~1)		降雨融雪(0~1)		风载作用(0~1)	开挖坡脚程度(0~1)	荷载振动(0~1)
实测值	IX(0.9)		较多(0.5)		小(0.1)	严重(0.45)	一般

$$b_3(x_m) = \begin{cases} 0, & x_m < a_2 \text{ 或 } x_m > a_4; \\ -\frac{a_2 - x_m}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x_m \leq a_3; \\ \frac{a_4 - x_m}{a_4 - a_3}, & a_3 \leq x_m \leq a_4. \end{cases} \quad (11)$$

$$b_4(x_m) = \begin{cases} 0, & x_m \leq a_1; \\ \frac{a_2 - x_m}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x_m \leq a_2; \\ 1, & x_m > a_2. \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $x_m$  表示第  $m$  个参评指标的实测值;  $b_n(x_m)$  表示第  $m$  个参评指标对第  $n$  级易发性评价级别的隶属度;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  分别表示第  $m$  个指标(指标越小越不易发)对应  $B_1$  到  $B_4$  级别溜砂坡易发性评价等级的分界值。

#### 4.4 实例应用分析

天山公路 k639 边坡为原生型溜砂坡, 坡脚海拔为 2 343 m, 降雨主要集中在 5~9 月, 年降水量 400~600 mm, 补给区岩性为砂板岩, 次块状结构, 基岩破碎裸露, 中风化。坡高约 230 m, 宽约 340 m, 斜坡坡度约 38°, 坡向 250°。经调查发现, 该边坡常在春季融雪季节发生大规模破坏, 致使坡脚堆积大量块碎石, 挤压挡墙内侧, 块石滚至公路路面堆积厚度可达 5 cm 厚。根据野外调查结果及表 2 对评价指标进行赋值(表 10)。

将表 10 中各评价指标实测值带入公式(9)~(12), 每个指标可得到 4 个隶属函数方程, 可得到溜砂坡易发性评估参评指标的模糊关系总矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.6491 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.2222 & 0.7778 & 1 \\ 0 & 0 & 0.6667 & 1 \\ 0 & 0.1667 & 0.8333 & 1 \\ 0 & 0 & 0.333 & 1 \\ 0 & 0 & 0.333 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.3333 & 0.6667 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.50 & 0.50 & 1 \\ 0.50 & 0.50 & 0 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (13)$$

在上述步骤的基础上, 将参评因子权向量  $U$  和其模糊关系总矩阵  $R$  进行结合, 就可得出最终的溜砂坡易发性模糊综合评判结果  $B$ , 则有:

$$B = U \cdot R [0.0352 \quad 0.1032 \quad 0.5022 \quad 0.8943] \quad (14)$$

根据最大隶属度原则, k639 溜砂坡易发性等级为极高, 与现场调查定性分析法取得的评价结果大体吻合, 说明该方法对高寒山区溜砂坡易发性评价是可行的, 基于此方法建立的评价模型是合理的。在降雨融雪或地震等条件下, 易失稳产生危害, 对天山公路造成威胁, 应注意对其监测。

## 5 结论

本文通过对天山北麓冰缘环境下溜砂坡分布规律与影响因素的关系进行统计分析, 采用 AHP-模糊综合评价法对指标权重定量并建立了溜砂坡易发性评价模型, 主要得到以下结论:

(1) 溜砂坡主要分布在高寒山区冻融风化作用强烈的冰缘环境, 天山北麓(k610~k655 段)发育有 73 个溜砂坡, 分布线密度为 1.62 个/km, 影响线路长约 4.28 km。

(2) 天山北麓溜砂坡空间上主要分布高程为 1 600 m~2 500 m 的冰缘环境; 大多数的溜砂坡主要发育于玄武岩及砂板岩等硬岩中, 占总量的 85%; 与块体状结构和块状结构斜坡结构相比, 更易发育于碎块、次块状结构中; 阴坡寒冻风化作用更为强烈, 溜砂坡更易发育于阴坡、半阴坡环境中。

(3) 将溜砂坡易发性影响因素分析总结为 3 类, 即地质环境条件、内外营力作用、人类工程活动作用共 12 个二级影响因子, 海拔和冻融风化作用是影响溜砂坡易发性的最主要的两个因素, 其次是地层岩性。

(4) 基于 AHP-模糊综合评价法建立的溜砂坡易发性评价模型具有较好的合理性和适用性, 评价结果较为准确。

## 参考文献:

- [1] 张小刚, 杨天军, 陈伟. 藏东南溜砂坡的发育特征与防治[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 47-51.
- [2] Alastair M Curry, Chris J Morris. Late glacial and Holocene talus slope development and rock wall retreat on Mynydd Du, UK[J]. Geomorphology, 2004, 58(1/4): 85-106.
- [3] 吴国雄, 曾榕彬, 王成华, 等. 溜砂坡的形成诱发因素及失稳破坏条件[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 7-12.
- [4] 蒋良淮, 姚令侃, 蒋忠信, 等. 溜砂坡动力学特性实验及防治[J]. 山地学报, 2004, 22(1): 97-103.
- [5] 张元才, 黄润秋, 傅荣华, 等. 溜砂坡大规模失稳动力学机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 65-72.
- [6] 裴钻. 高寒山区散粒体斜坡形成演化过程及灾变机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [7] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [8] 钟秀梅, 陈文凯, 侯景瑞, 等. 汶川地震触发武都区文县地质灾害发育特征研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 356-360.
- [9] 刘洋洋, 李永强, 李有鹏, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的山区丘陵公路灾害易损性研究——以河南省修武县为例[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 32-38.
- [10] 余丰华, 刘正华, 夏跃珍, 等. 基于敏感指数主成分分析法的浙江沿海突发性地质灾害易发区评价[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 64-68.

(下转第 211 页)