DOI: 10. 16031/j. cnki. issn. 1003-8035. 2019. 06. 06

基于灰色可拓模型的洮河下游泥石流易发性评价

崔传峰1 王俊豪2 准志超1 潘国营1

(1. 河南理工大学资环学院,河南 焦作 454000; 2. 中国地质环境监测院,北京 100081)

摘要: 泥石流易发性评价对其工程防治有重要意义,以往评价中,由于主观因素过多和缺乏足够数据的定量评价,对实际情况的分析还不尽完善。为此本文选取洮河流域下游地区作为研究对象 根据泥石流的地域特点、成因和其它影响因子 在可拓学基础上建立一种泥石流易发性的评价模型 运用灰色关联度分析法定量化的分析影响因子的权重值,对研究区泥石流沟进行易发性评价。结果表明 选取的 11 条具有代表性的泥石流沟,有 2 条易发程度较高 4 条易发程度中等 5 条易发程度低 高易发和中易发泥石流沟在强降雨时期,易爆发泥石流,据此确定泥石流的重点防治区域,为研究区泥石流治理提供参考依据。

关键词: 泥石流; 洮河流域; 灰色关联度; 可拓学; 易发性

中图分类号: P642.23 文献标识码: A 文章编号: 1003-8035(2019)06-0040-09

Evaluation of debris flow susceptibility in the lower reaches of Taohe River based on grey extension model

CUI Chuanfeng¹, WANG Junhao², CUI Zhichao¹, PAN Guoying¹ (1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: The susceptibility evaluation of debris flow is of great significance to its engineering prevention and control, and in previous evaluations, due to the excessive subjective factors and the lack of quantitative evaluation of sufficient data, the analysis of the actual situation is not perfect. In this paper, the downstream area of Taohe Basin is selected as the study area, according to the regional characteristics, causes and other influencing factors of debris flow, an evaluation model of debris flow susceptibility is established on the basis of Extenics, and the weight value of the influence factor is analyzed by using the grey relational degree analysis. The results show that 2 of the 11 representative debris flow trenches are more prone, 4 are medium 5 are prone to low degree, debris flow are very likely to outbreak in high prone and middle prone debris flow ditches during rainfall, the key prevention and control areas of debris flow are determined according to the results, which provides reference for debris flow control in the study area.

Keywords: debris flow; Taohe River Basin; grey correlation degree; extenics; susceptibility

收稿日期: 2018-12-11; 修订日期: 2019-03-11

基金项目: 中国地质环境监测院地质调查与地质监测项目(中国地环[2017]DD0402); I48E002007 幅地质灾害调查评价(中国地质调查局地质调查项目经费)

第一作者: 崔传峰(1992-) ,男 ,河南周口人,硕士 ,主要从事灾害地质、水工环地质等方面的研究工作。E-mail: 1124509293@ qq. com 通讯作者: 王俊豪(1987-) ,男 ,河南安阳人 ,地质工程专业 ,硕士 ,主要从事灾害地质、水工环地质等方面的研究工作。E-mail: wangjh@ cigem. cn

0 引言

泥石流是黄土地区常见的一种灾害地质现象 我 国西北部黄土地区的土质相对松散 植被覆盖率较低, 人类活动对地质环境的影响较为强烈,存在的环境地 质问题较为突出。在强降雨条件下,崩塌和滑坡失稳 从而为泥石流提供物源,提高了泥石流的易发程 度[1]。泥石流地质灾害具有很大的破坏性,对泥石流 灾害采取有效的防灾减灾工程 必须要对泥石流灾害 发生的可能性、影响程度和范围、危险性做一个系统的 评价[2-3]。泥石流危险性评价的前提是对泥石流易发 性的评价 对调查区域泥石流地质灾害发生的可能性, 是通过对泥石流形成条件以及对各影响因子的分析评 价来确定的[4-5]。在地质灾害调查与评价的过程中, 易发性评价方法和模型有许多种[6] 泥石流地质灾害 的影响因子存在着不确定性、局域性和评判标准的差 异性,以及泥石流的形成受人为工程地质的影响较大, 并且泥石流的运动也具有复杂性 因此 对泥石流的易 发性评价没有公认的方法[7]。目前采用的泥石流危 险性评价方法有很多种 如模糊综合评判法、层次分析 法、人工神经网络法、规范法和可拓法等[8-11]。王念 秦等[8] 将模糊数学的方法用来进行泥石流危险性的 评价; 王学武等[9] 将多级模糊评价方法应用于泥石流 危险度评价中; 赵源等[10] 运用神经网络的方法对泥石 流进行风险评估; 韦方强等[11] 运用信息论中信息概念 和模糊数学中模糊评判的方法对泥石流危险度进行区 分。这些评价方法存在着较大的主观因素,有人为倾 向的缺陷 得到的评价结果与实际情况有一定的差异。

对黄土地区洮河流域泥石流易发性评价,可针对泥石流地质灾害的影响因子和形成的特点,利用可拓方法来解决泥石流地质灾害的易发程度和各影响因子的关联度[12-17]。建立灰色关联分析模型,利用灰色的关联分析方法求各影响因子的权重[18]。结合灰色关联分析方法与可拓法,对洮河流域下游地区泥石流地质灾害进行易发性进行评价。根据评价结果的易发性的等级,来确定重点的防治区域。

1 研究区概况

研究区地处陇中黄土高原西南的洮河流域下游,临夏盆地与临洮黄土高原西缘。深切黄土沟壑区,自然条件较差,生态环境较脆弱。洮河流域下游区域属于陇西旋卷构造体系和祁吕贺山字型构造的复合部位,为祁吕贺兰"山字型"构造体系前缘西翼东南端的临

夏-临洮凹断束的一部分。实质上是为以前加里东旋回中期的侵入岩为基底和震旦系变质岩的新生代盆地,那勒寺一带是为盆地中心位置。盆地区内构造相对较为简单。主要为洮河西岸的黑山断裂。该断层与洮河大致近为平行,北西向展布于中新生代地层与加里东期花岗岩之间,能统计到的可见长度约 16 km。该断层为逆断层。断层面倾向北东,倾角在 50°~65°,在隐伏的横向断层的影响下分为南北两段,但断层面呈坡状形态的在北端有出现,倾向为北西方向。表现为正断层性质[19](图1)。

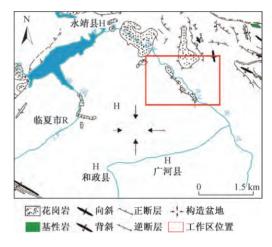


图 1 区域地质构造纲要图

Fig. 1 Outline map of regional geological structure

研究区处于祁吕贺兰"山字型"构造体系的西翼, 第四系广泛分布 前第四系主要出露新近系、白垩系、 三叠系、二叠系、震旦系及前震旦系等。由于受到河西 系的穿插,呈现北西向隆起与凹陷相间排列的多字型, 往往把上述构造体系中的构造形迹割裂成互不相连的 段落。两个截然不同的构造体系彼此复合 相互产生 强烈的干扰和影响,使构造形迹更加复杂,"山字型" 构造体系为纵贯研究地区的主要构造体系,"山字型" 的南缘与秦岭东西复杂构造带复合,构造形迹复 杂[22]。流域内沟道及两侧存在大量的松散物源,若遇 暴雨 往往形成破坏性强的泥石流 给沟道内及泥石流 堆积区的人民群众的生命财产和生产建设造成严重的 灾害。历史上,1976年、1986年、1987年、1997年、 1998年、2002年及2008年,该区曾发生洪水、泥石流 灾害 毁坏房屋、农田、冲断公路及桥梁。如红旗乡出 不拉沟 ,1980 年 8 月发生了小型泥石流 ,死亡 1 人 ,损 毁房屋 15 间; 达板镇红石沟 ,1986 年 5 月发生了小型 泥石流 死亡 1 人 损毁房屋 25 间 中断交通 70 小时; 在其他乡镇发生泥石流均有死亡及较大的财产损失。

2 研究方法

2.1 评价方法

可拓学是基元表示为 R = (N, C, V) ,在式中 N 表示为研究事物的学称 C 表示为特征值 N 是表示为的量值 C 是表示为的量值 C 是有不同的量值 因此 ,物元可以表示成 C 维的形式: C C C D

$$R = (N, C, V) = \begin{pmatrix} N & C_1 V_1 \\ & C_2 V_2 \\ & \cdots \\ & & C_n V_n \end{pmatrix}$$
 (1)

式中: N-----待评价单元;

*C*_n-----影响因素;

 V_n ——影响因素数量化后所对应的量值。

2.2 确定经典域

首先设定 N_{ag} 为标准事物 按照研究对象的科学评价级别和标准 将评价泥石流的易发性分成 G 种等级 因此泥石流的易发性评价的经典域物元 $R_{ag}=[N_{ag}\ C\ N_{ag}\]$:

$$R_{ag} = \begin{pmatrix} N_{ag} & C_1 & \langle O_{ag1} & P_{ag1} \rangle \\ & C_2 & \langle O_{ag2} & P_{ag2} \rangle \\ & & \dots \\ & C_n & \langle O_{agn} & P_{agn} \rangle \end{pmatrix}$$
(2)

式中: N_{aa} 一一待评价的类别:

 C_n ——决定待评价类别的指标;

 V_{ag} 一一待评价类别 N 相对于决定评价类别的指标所确定的量值的范围。

2.3 确定节域

设定 R_t 为评价节域物元: $Rt = [N_t, C_t, V_t]$

$$R_{t} = \begin{pmatrix} N_{t} & C_{1} & \langle a_{t1} & b_{t1} \rangle \\ & C_{2} & \langle a_{t2} & b_{t2} \rangle \\ & & \dots \\ & C_{n} & \langle a_{tn} & b_{tn} \rangle \end{pmatrix}$$
(3)

式中: $V_{ii} = a_{ii}$ b_{ii} 一节域物元关于特征的相应标准所对应的量值的范围。并有

(
$$O_{agi}$$
 P_{agi}) \subset (a_{ii} b_{ii}) (i = 1 2 3 \not , n)

2.4 确定待评价的物元

对于泥石流易发性的等级,根据对于研究区的实地调查情况对某物质单元 N_j ($j=1,2,3,4,\cdots,m$) 的各种相应的特征值做出评价,并对给出的评定的标准来进行评分,从而获得持评物元: $R_i=[N_i,C,V_i]$

$$R_{j} = \begin{pmatrix} N_{j} & C_{1} & \langle a_{j1} & b_{j1} \rangle \\ & C_{2} & \langle a_{j2} & b_{j2} \rangle \\ & & \cdots \\ & C_{n} & \langle a_{in} & b_{in} \rangle \end{pmatrix}$$
(4)

式中: V_j 一 获取到调查区待评单元体对应于 C_n 的具体取值。

2.5 确定各评价指标关于各类别等级的关联度 单项评价因子 N_i 关于各类别等级 t 的关联函数:

$$K_{i}(v_{i}) \begin{cases} -\frac{-p(v_{i}, V_{ij})}{V_{ij}}, & v_{i} \in V_{ij} \\ \frac{p(v_{i}, V_{ij})}{p(v_{i}, V_{pj}) - p(v_{i}, V_{ij})}, & v_{ii} \notin V_{ij} \end{cases}$$
(5)

式中:
$$p(v_i, V_{ij}) = v_i - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2}$$

$$V_{ij} = b_{ij} - a_{ij}$$

$$p(v_i, P_i) = \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2}$$

 $K_i(v_i)$ ——第j 个物质单元的第i 个特征关于标准物元等级t 的关联度。

2.6 确定待评物元各评价指标的关联度

对于每个特征 C_i 取权系数 W_i ,则某物质单元 N_j 关于等级 t 的关联度 k_i (N_i) 如下式:

$$k_{ii}(N_i) = \sum W_i k_{ii}(V_i)$$
 (6)

式中: W_i ——各评价指标的权系数 $\Sigma_i W_i = 1$ 。

2.7 确定评价等级

根据 $k_{ij}(N_j)$ 计算出的结果取最大值从而确定此物质单元等级为 t_0 ,则:

$$K_{ij}(N_j) = \max(k_{ij}(N_j))$$
 (7)

$$K_{t}(p) = \frac{K_{t}(p) - \min K_{t}(p)}{\max K_{t}(p) - \min K_{t}(p)}$$
 (8)

$$t^* = \frac{\sum_{i=1}^{t} tKt(p)}{\sum_{i=1}^{t} Kt(p)}$$
 (9)

则称 t^* 为 p 的等级变量特征值。例如: $t_0 = 2$ 时,而 $t^* = 1.6$ 则表示这属于第 2 级,从 t^* 的数值可以看出待评事物 p 偏向另一级的程度。

3 实例分析

根据洮河流域下游泥石流沟谷勘察资料,调查区内主要为黄土覆盖区,出露有泥岩、砂岩及加里东时期的花岗岩;选取11条有代表性的泥石流沟,进行分析评价,泥石流沟编号及名称分别为:1(石拉泉沟)、2

(池长沟)、3(小圈沟)、4(出不拉沟)、5(张家沟)、6 (塔石沟)、7(站沟)、8(泉沟)、9(火烛光沟)、10(张尕 拉沟)、11(砂沟),所示泥石流的活动性与岩性有很大 的关系,人类活动使岩体较为破碎,为泥石流提供大量的物源,调查泥石流沟的位置如图 2 所示。

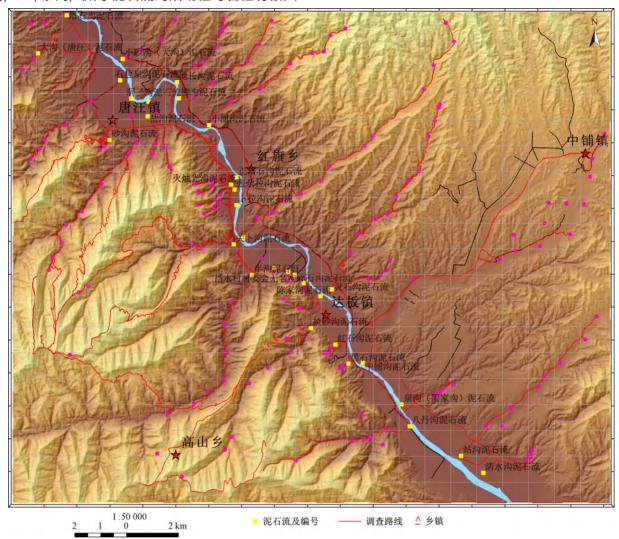


图 2 泥石流位置示意图

Fig. 2 Location map of debris flows gullies

3.1 影响因子分析与等级划分

3.1.1 地形地貌条件

研究区的泥石流沟位于洮河下游的两岸,从泥石流沟的走向来看,大都呈现出东西方向的展布,地势上呈现出由物源区向洮河方向,地势逐渐的降低,形成区和流通区地处中山地貌,泥石流沟长较长,由于泥石流沟大部分在海拔1750~2500 m,海拔最高的董岭乡董家岭为2577.7 m,最低的洮河边缘海拔1735 m。区内海拔在1850~2450 m,相对高差100~600 m。由于泥石流沟两侧的山体存在着较大的高差(图3)和丰富的松散坡积物,分布广泛,岩体在长期受到风化和降雨侵蚀后,很容易从泥石流沟的两侧坡体上滑落下

来形成物源 给泥石流的形成提供了有利条件。

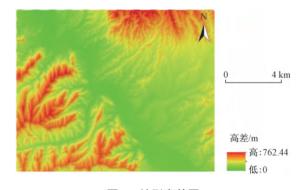


图 3 地形高差图

Fig. 3 Terrain height difference map

研究区山体坡度较大,一般20°~40°,坡面冲沟相对发育,深度一般在30~70 m,宽度大部分在30~50 m。在洮河的西岸,泥石流沟两侧坡体坡度较大,有部分坡度大于40°(图4) 坡积物和风化后的岩体很容易从泥石流沟两侧的坡体上滑落下来,对沟道具造成堵塞,在降水时期,泥石流沟道具内容易形成积水,当水量达到一定的程度,就会促使泥石流地质灾害的发生。

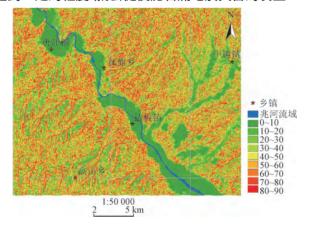


图 4 山体坡度图 Fig. 4 Mountain slope map

3.1.2 降雨与植被条件

平均年降水量 539.6 mm,24 h 的最大降水为 143.8 mm,1 h 最大降水为 45 mm,降水主要集中在 6 月至 9 月(图 5),占全年降水总量的 70%,多年统计的 平均年蒸发量为 1 421.2 mm,大约是年均降水量的 2.6 倍。年均暴雨天数2.9 d,最长的连续降雨天数可达到 15 d^[20-21]。泥石流沟两侧的坡体坡度较大,坡积物相对较松散,在没有充足植被的保护下,坡体受到降水的冲蚀能力较大,松散的坡体覆盖物会被冲入沟内,当冲入沟道内的堆积物过多时,会堵塞沟道,影响水和物质的流通,当累积到一定的程度,就会形成大流量急流,爆发泥石流地质灾害。

3.1.3 物源条件

泥石流沟的流域面积相对较大,物源的补给也较

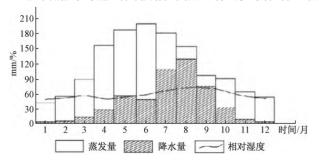


图 5 研究区气象要素图

Fig. 5 Meteorological elements diagram of the study area

为丰富,在泥石流沟的清水区部分,植被覆盖率较高, 降水很少冲蚀坡体 几乎不提供物源 有时只提供较少 的黏粒物质; 在泥石流物源区的上段和中段, 由于坡体 的植被发育相对较好,有45%的覆盖率,坡体的风化 程度较为一般 坡体的风化松散程度相对很弱 在降雨 时期 雨水会带有少量的黏粒物质 而坡体上会有大块 的碎石在泥石流沟内堆积,碎石粒径大于40 cm,碎石 的含量占此段物源的80%以上,而粘粒的含量不足 10%; 在泥石流物源区的中下段和流通区地段, 由于两 侧的坡体受到人类活动的影响 植被发育较差 大约有 30%覆盖率 此段的坡体风化程度较为严重 在降雨时 期 此段的物源补给量较为丰富 物源补给的主要类型 为细粒碎石和从坡体上冲蚀下来的松散物的黏粒 松 散物质的含量占50%以上,另有一些从上游冲蚀下来 的碎石物质。物源补给品的丰富程度与泥石流的流域 面积、补给段长度比和泥石流沟床纵降比有很大的关 系 泥石流沟床纵降比相对较大 并且泥石流沟的流域 面积较大 物源补给会相对较为丰富 物源补给段在泥 石流沟长中占很大的比例,也为泥石流的发生提供了 充足的物源,但在不同的流域内,有一定的差异。在单 泥石流沟流域内 发育有支沟及一些发育规模不大的 冲沟 "泥石流的断面多呈"V"字型 ,沟谷的切割相对较 深 坡体陡峭 形成的良好的沟谷汇水面 由于较大的 纵降比 在降雨时期 松散的坡积物很容易从坡体上冲 入沟内,为泥石流形成提供有利的条件。

3.2 评价指标选择与等级划分

对干评价指标的选取要有明确的物理意义,要做 到尽量相互独立,且容易获取及量化处理[13]。研究区 土壤类型较多 差异性较大 部分交错分布 且大部分 处于陡坡地段 质地松散 固结能力差 抗侵蚀能力弱, 易被水流冲刷流失。对于一些大流域面积的泥石流 沟 由于纵降比相对较大,沟两侧的山体高差较大,物 源区的山体坡度较大 植被覆盖率相对较差 泥石流沟 的物源补给段较长 物源相对较为丰富 并且在一定的 时期内 泥石流地质灾害的分布密集区是与降水集中 区相对应的 而且地质灾害的发生时间与降水周期也 是相吻合的。因此,对于不同的研究区域,评价泥石流 地质灾害的易发性,对评价因子的选取也是有所变化。 而对泥石流易发性的影响因子有很多 参照前人提出 的泥石流易发性评价评价方法[16] 结合本地区的实际 调查情况、针对所调查的各种影响泥石流爆发的因子 中 选取影响最为重要的 7 个因素作为评价指标 ,评价 因子分别为: 补给段长度比 $C_1(\%)$,主沟纵坡 $C_2(\circ)$, 山体坡度 C_3 (°),流域面积 C_4 (km²),相对高差 C_5 (m) 植被覆盖率 C_6 (%) 24 h 最大降雨量 C_7 (mm)。

研究调查区内获取 11 条泥石流沟的指标实测数据如表 1 所示 根据工程研究特性 把泥石流易发性评价因子划分一定的等级标准如表 2 所示[16]。

表 1 各评价指标实测值表

Table 1 The measured values of each evaluation factor

名称	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
 石拉泉沟	70	5	42	9. 7	570	40	64. 7
池长沟	65	7	56	3. 7	430	48	143.8
小圈沟	62	4	50	8. 6	720	65	143.8
出不拉沟	53	2	45	21.6	625	50	143.8
张家沟	65	13	42	2. 5	620	40	64. 7
塔石沟	42	14	55	1. 3	260	25	44. 5
站沟	72	4	47	11.0	460	7	143.8
泉沟	53	8	44	23. 0	370	8	143.8
火烛光沟	65	14	55	0.6	354	70	64. 7
张尕拉沟	62	14	45	0. 7	430	65	64. 7
砂沟	68	17	38	0.9	620	48	44. 5

表 2 泥石流易发性划分指标等级

Table 2 Index classification of debris flow susceptibility

评价价		易发等级			
指标 C	低易发	中易发	高易发	极易发	
C_1	≤10	10 ~ 30	30 ~60	≥60	
C_2	≤ 3	3 ~ 6	6 ~ 12	≥12	
C_3	≤15	15 ~ 25	25 ~ 32	≥32	
C_4	≤ 5	5 ~ 10	10 ~ 100	≥100	
C_5	≤100	100 ~ 300	300 ~ 500	≥500	
C_6	≥60	30 ~60	10 ~ 30	≤10	
C ₇	≤25	25 ~ 50	50 ~ 100	≥100	

3.3 物元的构造

根据调查区的调查资料,对于泥石流易发性评价的等级,可将泥石流易发性等级分为: 不易发、中等易发、易发、极易发,其易发等级分别记为 N_{ag1} 、 N_{ag2} 、 N_{ag3} 、 N_{ag4} ,则根据表 1、表 2 可以构造出的泥石流易发性评价的经典物元的各等级为:

$$R_{ag1} = \begin{bmatrix} N_{ag1} & C_1 & \langle 0 - 10 \rangle \\ C_2 & \langle 0 - 3 \rangle \\ C_3 & \langle 0 - 15 \rangle \\ C_4 & \langle 0 - 5 \rangle \\ C_5 & \langle 0 - 100 \rangle \\ C_6 & \langle 60 - 100 \rangle \\ C_7 & \langle 0 - 25 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{ag2} = \begin{bmatrix} N_{ag2} & C_1 & \langle 10 - 30 \rangle \\ C_2 & \langle 3 - 6 \rangle \\ C_3 & \langle 15 - 25 \rangle \\ C_4 & \langle 5 - 10 \rangle \\ C_5 & \langle 100 - 300 \rangle \\ C_6 & \langle 30 - 60 \rangle \\ C_7 & \langle 25 - 50 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{ag3} = \begin{bmatrix} N_{ag3} & C_1 & \langle 30 - 60 \rangle \\ C_2 & \langle 6 - 12 \rangle \\ C_3 & \langle 25 - 32 \rangle \\ C_4 & \langle 10 - 100 \rangle \\ C_5 & \langle 300 - 500 \rangle \\ C_6 & \langle 10 - 30 \rangle \\ C_7 & \langle 50 - 100 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{ag4} = \begin{bmatrix} N_{ag4} & C_1 & \langle 60 - 100 \rangle \\ C_2 & \langle 12 - 18 \rangle \\ C_3 & \langle 32 - 60 \rangle \\ C_4 & \langle 100 - 200 \rangle \\ C_5 & \langle 500 - 800 \rangle \\ C_6 & \langle 0 - 10 \rangle \\ C_7 & \langle 100 - 150 \rangle \end{bmatrix}$$

则泥石流易发性评价的节域物元为:

$$R_{T} = \begin{bmatrix} T & C_{1} & \langle 0 - 100 \rangle \\ C_{2} & \langle 0 - 18 \rangle \\ C_{3} & \langle 0 - 60 \rangle \\ C_{4} & \langle 0 - 200 \rangle \\ C_{5} & \langle 0 - 800 \rangle \\ C_{6} & \langle 0 - 100 \rangle \\ C_{7} & \langle 0 - 200 \rangle \end{bmatrix}$$

待评价的泥石流沟的易发性评价的物元为:

$$R_{j} = \begin{bmatrix} N_{j} & C_{1} & v_{1} \\ & C_{2} & v_{2} \\ & C_{3} & v_{3} \\ & C_{4} & v_{4} \\ & C_{5} & v_{5} \\ & C_{6} & v_{6} \\ & C_{7} & v_{7} \end{bmatrix}$$

在上式中: v_1 v_2 \cdots v_7 是为待评价泥石流沟的各评价因子的数值 ,其值在表 1 中可查阅。计算待评泥

石流沟的关联函数值,对于石拉泉沟泥石流沟 根据关 联函数计算公式,可以计算得到其关联函数值见表3。 根据其计算方法,依次可以计算出其他泥石流沟的关联函数值。

表 3 石拉泉沟泥石流沟关联函数值

Table 3 Value of the correlation function of the debris flow ditch in Shilaquan

$K_1(v_1) = -2/3$	$K_2(v_1) = -4/7$	$K_3(v_1) = -1/4$	$K_4(v_1) = 1/4$
$K_1(v_2) = -2/7$	$K_2(v_2) = 1/3$	$K_3(v_2) = -1/6$	$K_4(v_2) = -7/12$
$K_1(v_3) = -3/5$	$K_2(v_3) = -17/35$	$K_3(v_3) = -5/9$	$K_4(v_3) = 5/14$
$K_1(v_4) = -47/144$	$K_2(v_4) = 3/50$	$K_3(v_4) = -0.03$	$K_4(v_4) = -0.903$
$K_1(v_5) = -47/70$	$K_2(v_5) = -17/40$	$K_3(v_5) = -7/30$	$K_4(v_5) = 7/30$
$K_1(v_6) = -1/3$	$K_2(v_6) = 1/3$	$K_3(v_6) = -1/5$	$K_4(v_6) = -3/7$
$K_1(v_7) = -397/1 044$	$K_2(v_7) = -147/794$	$K_3(v_7) = 147/500$	$K_4(v_7) = -353/1000$

3.4 对于评价权重的确定

由于权重的确定对泥石流易发性评价结果的准确性有很大的影响,各参评因子在灾害泥石流易发性的表现程度不同,对其影响的重要程度不同。在对泥石流易发性评价时,由于评价的目的和评价的重点有所不同。因此。在进行灾害泥石流的易发性危险评价时,除了确定评价因子外,还要确定评价的核心。既是各评价因子的权重。在灾害泥石流易发性的评价中,因子的权重确定普遍采用的有经验值法,用此方法确定的权重存在一些较大的主观性,对于实际的情况不能客观的反映出来,为了能够较为有效的反映各评价因子在灾害泥石流易发性评价中所表现的重要程度,以及克服评价中的主观因素和难操作性,本文的评价通过相比较,采用灰色关联度来确定各评价因子权重。利用灰色关联方法确定评价因子的权重[18],由文献[18]和表2得到各评价因子。1~6。的权重分别为:

$$\lambda_1 = 0.1745 \ \lambda_2 = 0.1460 \ ,$$

$$\lambda_3 = 0.1791 \ \lambda_4 = 0.1449 \ ,$$

$$\lambda_5 = 0.0944 \ \lambda_6 = 0.1300 \ \lambda_7 = 0.1311$$

根据上述公式(7)、表1和表2得到关于各泥石流沟对各易发性等级的关联度见表4。

对于待评价的泥石流沟 k[#]易发性的程度,取最大 关联度对应的易发程度,即满足下式:

$$k_i = \max K_i(k^*) \tag{10}$$

则待评价泥石流沟 k^* 的易发性程度为最大关联度 k_i 对应的易发程度。根据式(10) 和表 4 得到各条泥石流沟的易发性程度,评价结果与实地勘查情况相吻合。

3.5 结果分析

依据上述评价计算方法 对另外的 10 条泥石流沟 进行同等的评价,评价结果表明见表 5。洮河流域调查区内选取的 11 条具有代表性的泥石流冲沟 在本文的易发性评价方法中有 2 条易发程度较高,中等易发

程度的有4条、低易发程度的有5条。分析结果显示,评价区内泥石流冲沟多为中等易发和低易发、且多为沟谷型泥石流、主要对沟口公路、村庄和农田有一定程度的危害。影响程度较大、对居民的生活造成很大的威胁。

表 4 各泥石流沟对各易发性等级的关联度

Table 4 Correlation degree of each debris flow ditch to and each susceptibility grade

			., 6	
泥石流	关联度			
编号 <i>k</i> #	K ₁ (k [#])	$K_2(\mathbf{k}^*)$	$K_3(k^*)$	K ₄ (k [#])
1	-0.4664	-0.1504	-0.1739	-0.046 3
2	-0.480 3	-0.3973	-0.359 5	-0.1106
3	-0.5040	-0.337 0	-0.444 1	-0.096 5
4	-0.438 5	-0.424 3	-0.3124	-0.078 3
5	-0.3903	-0.373 2	-0.243 9	-0.0889
6	-0.435 1	-0.3649	-0.255 5	-0.268 2
7	-0.6159	-0.4510	-0.3303	0.053 1
8	-0.5957	-0.4694	-0.0742	0.0102
9	-0.4123	-0.5378	-0.3670	-0.2165
10	-0.450 3	-0.3835	-0.4144	0. 148 8
11	-0.385 1	-0.469 1	-0.1387	0. 143 7

表 5 各待评泥石流沟易发性等级的评价结果

Table 5 Evaluation results of the vulnerability levels of debris flow trenches

泥石流沟编号 $k^{\#}$	最大关联度 $K_{\rm i}$	t* 的取值	评价结果
1	-0.046 3	0. 7	低易发
2	-0.1106	1.3	中易发
3	-0.096 5	1. 1	中易发
4	-0.078 3	0.8	低易发
5	-0.0889	0. 9	低易发
6	-0.255 5	3. 1	高易发
7	0.053 1	0.8	低易发
8	0.0102	0. 5	低易发
9	-0.2165	2. 9	高易发
10	0. 148 8	2. 3	中易发
11	0. 143 7	2. 1	中易发

4 结论

(1) 洮河流域调查区内选取的 11 条具有代表性的泥石流冲沟 ,其分析结果表明 ,有 2 条易发程度较高 ,中等易发程度的有 4 条 ,低易发程度的有 5 条 ,对

于高易发性和中易发性泥石流沟在强降雨时期,极易 爆发泥石流,在工程上应该重点治理和监测。

- (2) 引起泥石流的爆发因素有很多种,本文研究 区域的泥石流地质灾害,在灰色可拓法的评价基础上,构造关联函数时,在排除了主观因素影响后,有较高的可行性,并且灰色可拓方法对评价因子不用重新赋值,并且选取指标较少,避免了许多的人为因素的影响,针对其特有的地域性特点来进行易发性评价,得到的评价结果更加的符合实际情况,使评判结果具有客观性和科学性,对泥石流的发展进行预判,并为防灾工作提供一定的依据。
- (3) 灰色可拓方法的数学计算较为简单可行,在权重分析时更为有效的保留了原始的调查数据,可得到相应准确的评价结果,使评价结果较为确切,在泥石流易发性评价上提供更为有效的方法,对洮河流域下游两侧的泥石流沟有一定的易发性预测,为该研究区的地质灾害预防工作有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 张晨 汪清 陈剑平 ,等. 金沙江流域泥石流的组合 赋权法危险度评价 [J]. 岩土力学 ,2011 ,32(3): 831-836.
 - ZHANG Chen ,WANG Qing ,CHEN Jianping ,et al. Risk assessment of the combined empowerment method of debris flow in Jinsha River basin [J]. Geotechnical Mechanics 2011 32(3):831-836.
- [2] LIU X ,LEI J. A method for assessing regional debris flow risk: an application in Zhaotong of Yunnan Province (SW China) [J]. Geomorphology ,2003 ,52 (3):181-191.
- [3] 侯兰功 准鹏. 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. HOU Langong CUI Peng. Study on risk assessment of debris flow disaster in single [J]. Soil and Water Conservation Studies 2004 ,11(2):125-128.
- [4] SU F, CUI P, ZHANG J, et al. Susceptibility assessment of landslides caused by the Wenchuan earthquake using a logistic regression model [J].

 Journal of Moutain Science 2010 7(3):234-245.
- [5] 朵天惠,王永利,陈鹏飞,等.茶园沟泥石流易发性综合评价[J]. 防灾减灾学报,2010,26(4):41-44.

 DUO Tianhui, WANG Yongli, CHEN Pengfei, et al. Comprehensive evaluation of the susceptibility of chayuangou debris flow [J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction 2010,26(4):41-44
- [6] CAN T , NEFESLIOGLU H A , GOKCEOGLU C , et al.

- Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses [J]. Geomorphology 2005, 72(1-4):250-271.
- [7] 蒋小鹏 李少莉 ,翟明 ,等. 基于可拓学理论对泥石 流危险度的评价 [J]. 中国公路 ,2012 (增刊 1): 44-47.
 - JIANG Xiaopeng, LI Shaoli, ZHAI Ming, et al. Evaluation of debris flow risk based on extenics theory [J]. China Highway 2012(S1): 44-47.
- [8] 王念秦 姚勇. 基于模糊数学和权的最小平方法的 泥石流易发性评价方法 [J]. 灾害学 2008 23(2): 5-9.
 - WANG Nianqin, YAO Yong. Evaluation method of debris flow susceptibility based on fuzzy mathematics and the minimum plane method of power [J]. Disaster Science 2008 23(2):5-9.
- [9] 王学武 石豫川 横润秋 等. 多级模糊综合评判方法在泥石流评价中的应用[J]. 灾害学 ,2004 ,19 (2):1-6.
 - WANG Xuewu SHI Yuchuan HUANG Runqiu et al. Application of multistage fuzzy comprehensive evaluation method in debris flow evaluation [J]. Disaster Science 2004, 19(2):1-6.
- [10] 赵源 刘希林. 人工神经网络在泥石流风险评价中的应用[J]. 地质灾害与环境保护 ,2005 ,16(2): 135-138.
 - ZHAO Yuan ,LIU Xilin. Application of artificial neural network in debris flow risk assessment [J]. Geological Hazards and Environmental Protection 2005,16 (2): 135-138.
- [11] 韦方强,谢洪,钟敦伦.四川省泥石流危险度区划[J].水土保持学报 2000, 14(1):59-63.
 WEI Fangqiang, XIE Hong, ZHONG Dunlun. Risk zoning of debris flow in Sichuan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation 2000, 14(1):59-63.
- [12] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 科学技术文献出版 社 ,1994. CAI Wen. Matter element model and its application [M]. Science and Technology Literature Publishing House ,1994.
- [13] 蔡文. 可拓论及其应用 [J]. 科学通报 ,1999 ,44 (7):673-682.

 CAI Wen. Extension theory and its application [J]. Scientific Bulletin ,1999 ,44(7):673-682.
- [14] BABAKHANI A ,HAERIAN A ,GHAMBRI M. Effect of heat treatment ,lubricant and sintering temperature on dry sliding wear behavior of medium alloyed chromium PM steels [J]. Journal of Materials

- Processing Technology 2008, 204(1-3):192-198.
- [15] 匡乐红 徐林荣 刘宝琛. 基于可拓方法的泥石流危险性评价[J]. 中国铁道科学 2006 27(5):1-6.

 KUANG Yuehong ,XU Lingrong ,LIU Baochen. Risk assessment of debris flow based on extension method [J]. China Railway Science 2006 27(5):1-6.
- [16] 匡乐红,刘宝琛,姚京成.基于模糊可拓方法的泥石 流危险度区划研究[J]. 灾害学 2006 21(1):68 -72. KUANG Yuehong, LIU Baochen, YAO Jingcheng. Study on the risk zoning of debris flow based on fuzzy extension method [J]. Disaster Science 2006 21(1):
- [17] 谷复光 汪清 涨晨. 基于投影寻踪与可拓学方法的 泥石流危险度评价 [J]. 吉林大学学报(地球科学 版), 2010 40(2): 373 – 377. GU Fuguang, WANG Qing, ZHANG Chen. Risk assessment of debris flow based on projection tracing and extenics method [J]. Journal of Jilin University
- [18] 郑立峰 唐见兵. 基于灰色关联分析的系统仿真因素权重确定[J]. 计算机仿真 2007 24(9):76-78. ZHENG Lifeng ,TANG Jignbing. Determination of the weight of system simulation factors based on grey

(Earth Science Edition) 2010 40(2):373 - 377.

- correlation analysis [J]. Computer Simulation 2007 24 (9):76 78.
- [19] 张廷. 基于 DEM 的洮河流域构造地貌分析 [D]. 北京: 中国地质大学 2010.

 ZHANG Ting. Structural geomorphology analysis of Taohe River basin based on DEM [D]. Beijing: China

University of Geology 2010.

1259 - 1266.

- [20] 李常斌,王帅兵,杨林山,等. 1951—2010 年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. 冰川冻土, 2013,35(5):1259-1266.

 LI Changbin, WANG Shuaibing, YANG Linshan, et al. Temporal and spatial characteristics of the changes of hydrometeorological elements in the Taohe basin in the 1951—2010 [J]. Glacierpermafrost 2013, 35(5):
- [21] 冯尊斌. 基于 GIS 的兰州泥石流危险性评价 [D]. 兰州理工大学 2018. FENG Zunbin. Risk assessment of debris flow in Lanzhou based on GIS [D]. Lanzhou University of Technology 2018.
- [22] 曹兴山. 甘肃的第四系 [J]. 甘肃地质 ,1997 (2): 1-51.

 CAO Xingshan. The fourth system of Gansu [J].

 Gansu Geology ,1997 (2):1-51.

(上接第39页)

68 - 72.

- CUI Peng , MA Dongtao , CHEN Ningsheng , et al . The initiation , motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst [J]. Quaternary Sciences 2003 ,23 (2):41-49.
- [10] 刘伟. 西藏典型冰湖溃决型泥石流的初步研究[J]. 水文地质工程地质,2006(3):88-92.

 LIU Wei. Preliminary study on debris flow induced by glacier lake outburst in Tibet [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2006(3):88-92.
- [11] 吴积善,程尊兰,耿学勇. 西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J]. 山地学报,2005,23(4): 399-405.
 WU Jishan, CHENG Zunlan, GENG Xueyong. The
 - forming mechanism of debris-flow dam in southeast Tibet [J]. Journal of Mountain Research, 2005, 23 (4): 399-405.
- [12] 游勇,程尊兰. 西藏波密米堆沟泥石流堵河模型试验[J]. 山地学报,2005,23(3): 288-293.
 YOU Yong, CHENG Zunlan. Modeling experiment of debris flow in Midui gully, Tibet [J]. Journal of

- Mountain Science, 2005, 23(3): 288-293.
- [13] 程尊兰,朱平一,党超,等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势[J]. 冰川冻土,2008,30(6):954-959.
 CHENG Zunlan, ZHU Pingyi, DANG Chao, et al.
 - CHENG Zunlan, ZHU Pingyi, DANG Chao, et al. Hazards of debris flow due to glacier-lake outburst in southeastern Tibet [J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2008, 30(6): 954-959.
- [14] 乐茂华,唐川,张丹丹,等.基于逻辑回归法的西藏地区冰湖溃决危险性预测模型[J].自然灾害学报,2014,23(5):177-184.

 LE Maohua, TANG Chuan, ZHANG Dandan, et al. Logistic regression model-based approach for predicting the hazard of glacial lake outburst in Tibet [J]. Journal
- [15] 王绍武,董光荣. 中国西部环境特征及其演变[M]. 北京:科学出版社,2002. WANG Shaowu, DONG Guangrong. Environmental characteristics and evolution of the Chinese western regions[M]. Beijing: China Science Press, 2002.

of Natural Disasters, 2014, 23(5): 177 - 184.