

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.01.07

基于函数赋值模型与模糊综合评判法的 单沟泥石流危险性评价

尚 慧¹, 王明轩², 罗东海³, 冯 皎⁴, 王爱军⁵

- (1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北综合勘察设计研究院, 陕西 西安 710003;
3. 中国煤炭地质总局航测遥感局, 陕西 西安 710199; 4. 陕西新财富置业有限公司, 陕西 西安 710200;
5. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: 基于彭阳县丁家渠泥石流前期调查测绘, 查明了泥石流的发育特征, 分析了泥石流的形成条件, 并对其易发程度进行打分综合评判, 得出: 该泥石流为沟谷降雨诱发型泥石流, 易发程度为中等易发, 目前正处于衰退期。构建了包括泥石流规模、发生频率、沟谷流域面积、主沟长度、流域相对高差、流域切割密度及不稳定沟床比例等7个指标的单沟泥石流危险度评价指标体系, 采用关联度分析与层次分析法相结合的最优组合赋权法对函数赋值模型中的权重进行修正, 并运用该模型对丁家渠泥石流进行危险度计算, 为了验证该模型在研究区泥石流危险度评价的准确性, 同时采用模糊综合评判法进行危险度计算, 两种方法得出的危险度等级均为低度危险, 与实地调查结果相符。

关键词: 泥石流; 危险性评价; 函数赋值模型; 模糊综合评判; 最优组合赋权法

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)01-0061-09

Single gully debris flow hazard assessment based on function assignment model and fuzzy comprehensive evaluation method

SHANG Hui¹, WANG Mingxuan², LUO Donghai³, FENG Jiao⁴, WANG Aijun⁵

- (College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an, Shaanxi 710003, China;
3. Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Bureau, Xi'an, Shaanxi 710199, China;
4. Shaanxi New Fortune Real Estate Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710200, China;
5. Center of Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding, Hebei 071051, China)

Abstract: Based on investigation and mapping of Dingjiaqu debris flow in Pengyang County, this paper discussed its development characteristics and formation conditions, judged the probable occurrence level. We reached the conclusion that this debris flow is a precipitation-induced gully debris flow, the probable occurrence level is moderate and currently in a recession stage. We constructed a single gully debris flow hazard assessment index system, including scale of debris flow, occurrence frequency, gully basin area, the length of main gully, relative height difference, cutting density, and unstable gully bed ratio. The weight of

收稿日期: 2018-04-20; 修订日期: 2018-05-24

基金项目: 国家自然科学基金: 煤矿区地表环境演化遥感监测与沉陷机制研究(41702377); 黄土山区城镇化行为过程与地质环境耦合机制(41572287); 中国博士后科学基金: 煤矿区生态环境演化动态监测与沉陷机制研究(2017M623208); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目: 基于多层次遥感的采煤沉陷区地表环境时空演化监测研究(2017JQ4008); 陕西省教育厅专项科研计划项目: 基于遥感的采煤沉陷区地表环境时空演化监测与趋势分析(16JK1503)

第一作者: 尚 慧(1985-), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 讲师, 主要从事岩土体稳定性与地质灾害防治、矿山环境方面研究。E-mail: shanghui_happy@163.com

the function assignment model was modified by the optimal combination weight method combined with the correlation analysis and the analytic hierarchy process, and was used to calculate the risk degree of Dingjiaqu debris flow. In order to verify the accuracy of the modified function assignment model, this paper used fuzzy comprehensive evaluation method to calculate the risk degree too, and the results are the same. The risk level is low degree, which is consistent with the field survey results.

Keywords: debris flow; hazard assessment; function assignment model; fuzzy comprehensive evaluation method; optimal combination weighting method

0 引言

危险性的定量表达即危险度^[1],泥石流的危险度指致灾因子或危险事件发生的可能性。可能性大小即概率,因此泥石流危险度是一个概率概念。对某一沟谷来说,它是指在该沟谷流域内所存在的一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小,危险性只能在 $[0,1]$ 闭区间内取值^[2]。泥石流危险度概念最早于1977年由日本学者提出^[3],但与目前研究的危险度概念不同,仅指泥石流的发生频率。我国学者谭炳炎是较早开始与泥石流危险度有关的研究^[4],正式使用泥石流危险度一词始于1988年^[3],其后在这一领域持续研究的10多年时间里,出现了一系列新成果,张怀珍等^[5]将20世纪90年代初到后期的我国单沟泥石流危险度评价方法分为:分级评分模型、分级赋值模型和函数赋值模型。其中最新的单沟泥石流危险度评价模型(函数赋值模型)由刘希林^[6]提出,确定了包括两个内在因子和5个次要因子的泥石流危险度评价指标体系,并给出单沟泥石流危险度计算公式。近年来,随着对泥石流危险性评价不断的深入研究,逐渐将模糊数学、GIS、可拓层次分析法及灰色系统理论等引入到这一研究领域,如刘厚成等^[7]将可拓层次分析法应用到泥石流危险性评价研究中,对美姑河流域泥石流进行了评价,得到其危险度等级;郭万铭等^[8]确定了沟谷纵坡比、流域相对高差等8个指标作为泥石流危险性评判因子,运用模糊综合评判法对研究区21条泥石流沟做了单沟危险性评价;王常明等^[9]采用模糊c均值聚类-支持向量机法对北京房山区南窑沟泥石流进行危险性分析,取得较好效果;杨小凤等^[10]基于熵值法、层次分析法和灰色关联法三种赋权方法,采用危险性多因子评价模型,得到汶川县七盘沟泥石流的危险性级别,并基于GIS进行研究区的危险分区。该领域研究成果的实用性和可操作性不断加强。

传统的综合评判方法(总分法、加权平均法和判

别分析法等)原理简单、使用方便,但评判结果是用一个数值来表示^[11],而模糊综合评判法对具有模糊特征对象的综合评判很有价值,较为符合泥石流灾害发育的随机性和模糊性特征^[12-13]。鉴于此,论文拟以宁夏彭阳县丁家渠泥石流为研究对象,在分析泥石流的发育特征、形成条件和发展趋势基础上,选取文献(刘希林)中提出的泥石流规模、发生频率、沟谷流域面积等7个评价因子,分别采用模糊综合评判法和函数赋值模型对其进行危险性评价,其中对函数赋值模型进行改进,各因子的权重采用双系列关联度分析与层次分析法相结合的最优组合赋权法确定,对比分析两种方法得出的评价结果。

1 研究区概况

丁家渠泥石流沟位于宁夏东南部的彭阳县罗洼乡政府东南2 km处,行政位置属于彭阳县罗洼乡罗洼村丁家渠组,位于安家川河右岸一级支沟银洞沟右侧的一条支沟内。沟口地理位置E:106°37'29";N:36°14'06"。其相对位置见图1。丁家渠泥石流沟所处地貌单元为黄土梁峁区,附近出露地层有老到新为侏罗系砂岩、第四系更新统离石黄土、全新统黄土状土、堆积土及人工填土(图2)。主沟两侧坡脚处发育有多处小型滑坡和崩塌,坡体上落水洞发育。为防止水土流失,目前主沟内共修筑有5道淤地坝(图3(a))。地质构造属陕甘宁盆地西南部中生代鄂尔多斯西缘坳陷地带,位于青龙山至彭阳逆断层的上盘0.5 km处。构造形迹多隐伏于地下,对该泥石流沟直接影响不大。

该泥石流沟形成区与流通区无明显界线。(1)上游主要受重力地质作用和河流地质作用的影响,坡面松散土体、主沟及小型支沟底部堆积的松散冲洪积物为泥石流的主要物源;(2)中游居民集中,地质环境受人类活动影响强烈,沟谷两侧斜坡中下部为人为地质作用区,变形破坏较严重,坡体上落水洞较多,地形破碎,土体稳定性差,发育多处小型崩塌

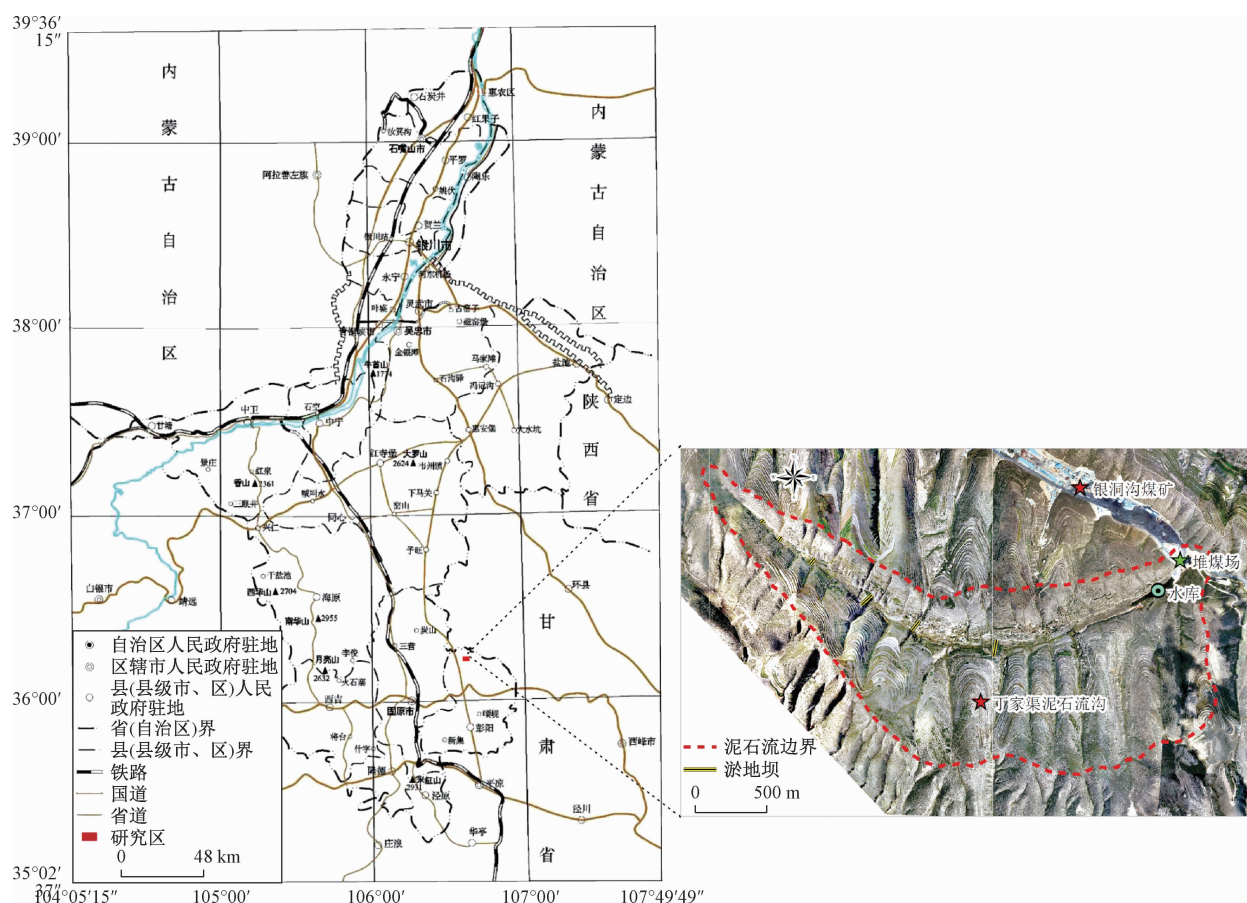


图1 丁家渠泥石流位置图

Fig. 1 Location of Dingjiaqu debris flow

和小型滑坡(图3(b)),共发育滑坡、崩塌及隐患点25个,为泥石流的发育提供了丰富的松散固体物质来源。支沟的侧壁受降水冲蚀变形明显,可见落水洞发育或小型崩塌(图3(c)),部分支沟内曾有居民居住,地貌受人为破坏较严重;(3)沟谷的下游人类工程活动主要集中在冲沟底部,周边黄土斜坡上及小型冲沟内则以重力地质作用和河流地质作用为主。受流水侵蚀作用在沟底发育有深切的“V”型冲沟,沟深10多米,两侧土体呈直立状,发育有大量小型崩塌,局部发育小型滑坡(图3(d)),土体稳定性极差。沟内为一个小型水库,且有蓄水。沟口处新建有土坝,沟口外侧冲沟目前已回填平整,为银洞沟煤矿的堆煤场地(图3(e))。由于水库蓄水的影响及沟口回填,若发生泥石流,堆积区会堵塞,威胁到中游居民的生命财产安全。

2 泥石流形成条件

2.1 地形地貌条件

丁家渠泥石流沟整体呈牛角状,沟口处高程

1 627 m,沟脑处高程1 882 m,高差255 m,冲沟总长3 914 m。沟床平均比降为0.06,小于0.1,其水动力条件较差(图4)。冲沟上部沟底较平缓,主要为草地或旱地,下半部受流水切割形成深约10 m的深切“V”形冲沟,宽度5~45 m,两侧坍塌破坏严重,下游沟口处修有土坝,在深切“V”形沟内形成小型水库(图5)。沟谷两侧有77%的斜坡坡度集中在 $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$,其中 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的斜坡占44%,1.2%的斜坡坡度 $> 50^{\circ}$ 。沟谷北侧黄土斜坡坡度较陡,坡面整体较完整,发育有多条小型冲沟,居民多居住于冲沟中部阳坡的坡脚部位。冲沟南面斜坡较平缓,发育多条深切冲沟,将整个坡面切割成多条细长的近南北走向的黄土梁,发育多条小型支沟,支沟断面形状均呈“V”字型,相对高差在20~50 m。该泥石流沟植被较少,平均植被覆盖率约5%。综上所述,丁家渠沟具有陡坡、沟谷深等特征,由于坡度在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的斜坡易形成滑坡等灾害,该沟两侧发育多处滑坡和崩塌,具有为泥石流形成提供物源的有利地形条件。

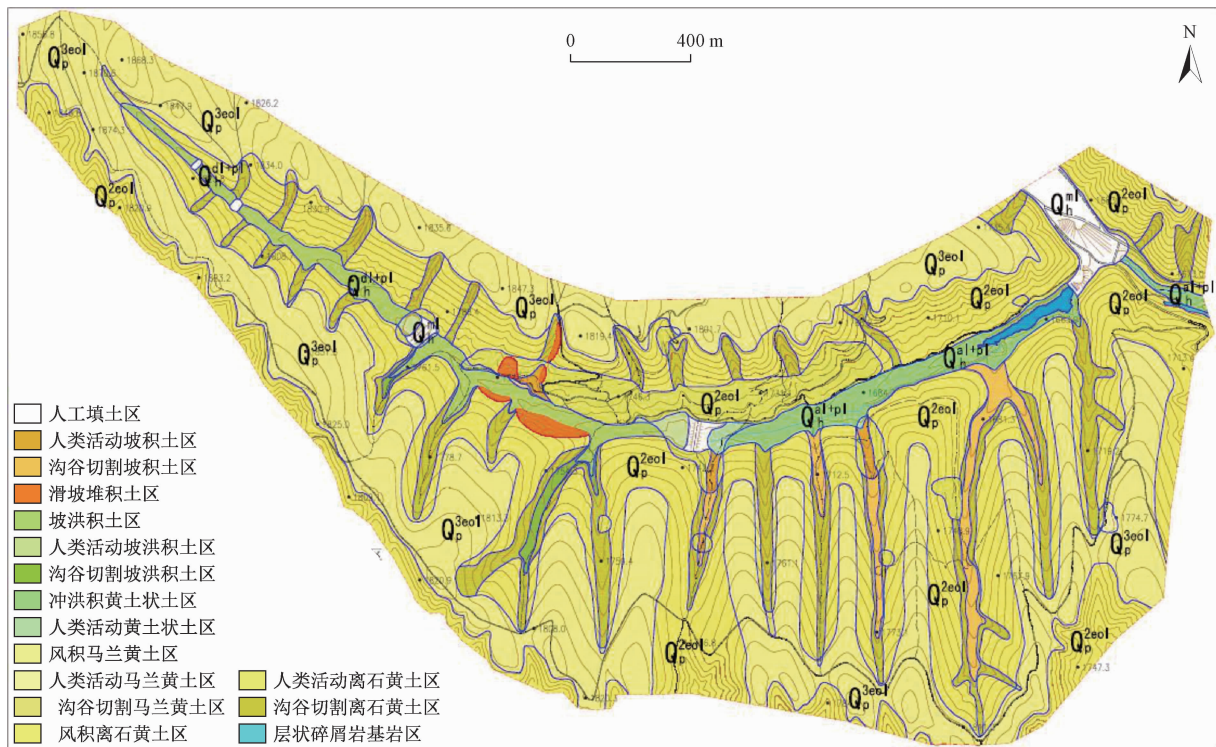


图 2 丁家渠泥石流沟地层分布图

Fig. 2 Stratigraphic map of Dingjiaqu debris flow

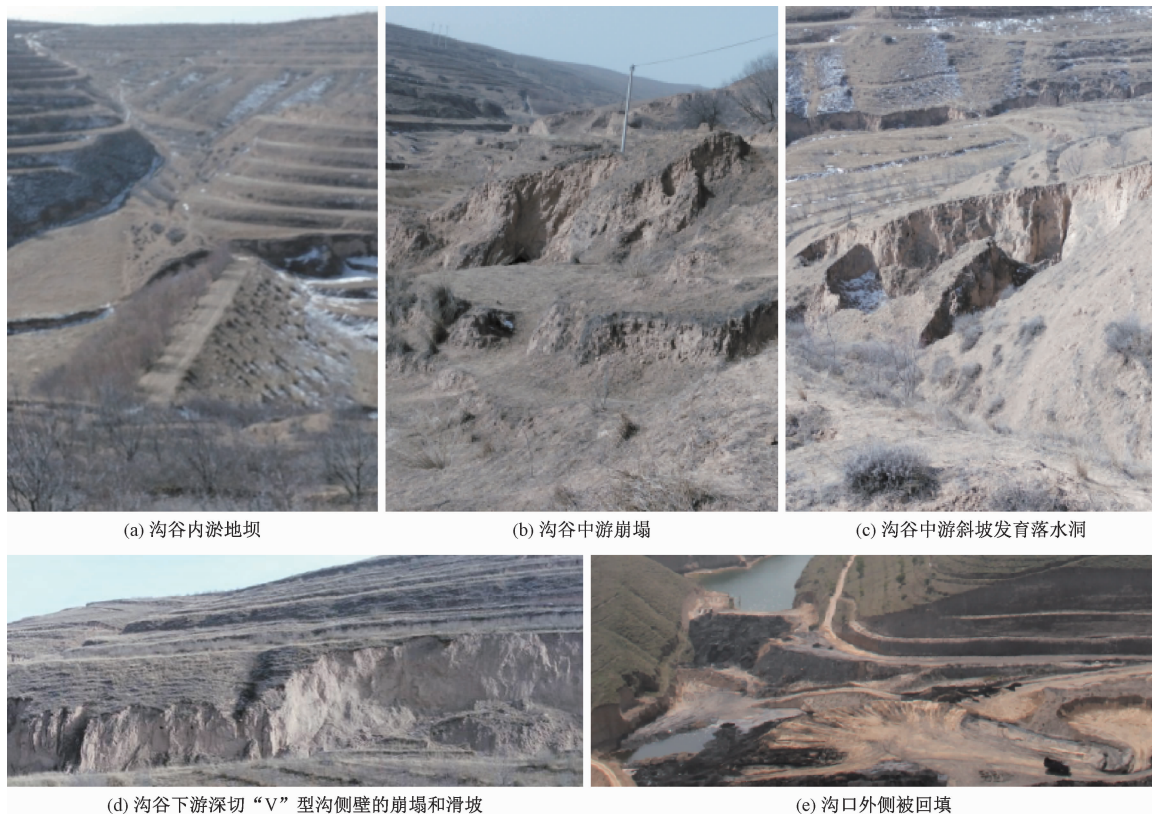


图 3 丁家渠泥石流发育特征

Fig. 3 Development characteristics of Dingjiaqu debris flow

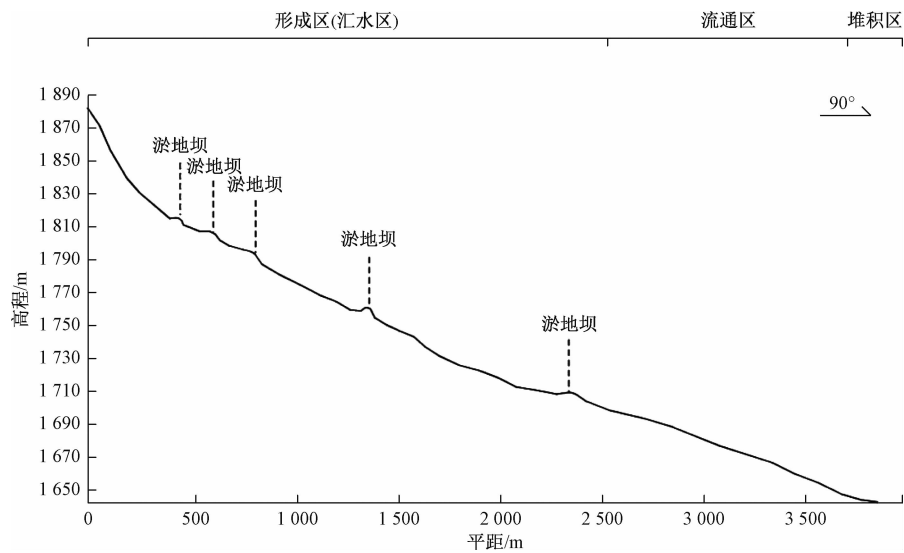


图 4 丁家渠泥石流沟纵坡降图
Fig. 4 Longitudinal gradient map of Dingjiaqu debris flow

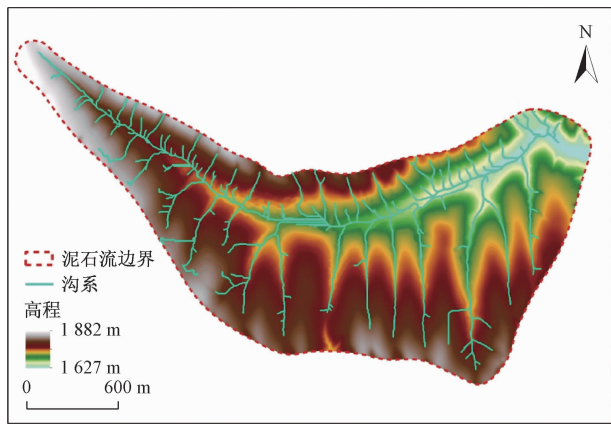


图 5 丁家渠泥石流流域沟系地势图
Fig. 5 Valley system and hypsometric map of
Dingjiaqu debris flow

2.2 水源条件

每年汛期(7~9月)的降雨是丁家渠泥石流的主要诱发条件。丁家渠泥石流沟的汇水面积为 3.6 km^2 。据收集的降雨资料可知,丁家渠泥石流沟所在区域同一年内降水分布极其不均匀,4~9月份降水占全年降水的84%,其中4~6月份占25%,7~9月占55%,是前三个月的2.36倍,分为明显的雨季和旱季,7~9月份月均降雨量为90 mm。降雨常以连阴雨和暴雨的形式出现,且往往相伴而生,暴雨是泥石流形成的主要诱发因素,该区域暴雨(日降水量 $\geq 40\text{ mm}$)平均每年1~2次。文献[14]中当降雨强度为中等时(6 h降雨量

$\geq 20\text{ mm}$),该泥石流沟所在区域为Ⅱ级预警区;当1小时降雨量 $\geq 15\text{ mm}$ 时为Ⅰ级预警区,发生泥石流的可能性极大。每年雨季的高强度降雨能满足丁家渠泥石流的降水条件。

2.3 物源条件

丁家渠泥石流沟附近出露地层主要为第四系滑坡堆积土、冲洪积黄土状土、坡洪积粉土、坡积粉土、风积马兰黄土、风积离石黄土,沟口附近出露有侏罗系砂岩,局部有人工填土,土体较松散。由于人为活动影响,黄土斜坡地表植被发生破坏后,地表松散土体在重力及降水冲蚀作用下,堆积在冲沟的底部,当降雨量较大时会被搬运至冲沟的下游沟谷中形成淤积洼地。沟底均堆积有少量坡积物或坡洪积物,厚度1~2 m。沟谷两侧坡体上落水洞较多,土体稳定性差,发育多处小型崩塌和小型滑坡,为泥石流的发育提供了丰富的松散固体物质来源。因此,该泥石流沟的物源主要为早期堆积的冲洪积物及崩塌、滑坡堆积物。据现场调查,丁家渠泥石流沟物源堆积量为 $2.031 \times 10^5\text{ m}^3$ 。

3 泥石流易发程度评价及危险性分析

3.1 泥石流易发程度评价

通过对丁家渠泥石流沟详细的野外地质调查和工程地质测绘,按《崩塌滑坡泥石流调查评价技术要求(试用版)》附录A6,对泥石流沟进行综合评判及易发程度等级标准确定(表1)。

表 1 丁家渠泥石流沟易发程度综合评判打分表

Table 1 Comprehensive evaluation scoring of probable occurrence level of Dingjiaqu debris flow

序号	影响因素	特征描述	得分
1	崩塌、滑坡及水土流失(自然和人为的)的严重程度	崩塌滑坡发育,多浅层滑坡和小型崩塌,有零星植被覆盖,冲沟发育	16
2	泥砂沿程补给长度比/%	55%	12
3	沟口泥石流堆积活动程度	河形无较大变化	11
4	河沟纵坡降/%	6%	6
5	区域构造影响程度	相对稳定区	5
6	流域植被覆盖率	5%	9
7	河沟近期一次变幅	<0.2 m	1
8	岩性影响	黄土	6
9	沿沟松散物储量/($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$)	2	4
10	沟岸山坡坡度/度	$32^\circ \sim 25^\circ$	5
11	产沙区沟槽横断面	V 型谷	5
12	产沙区松散物平均厚度	2 m	3
13	流域面积/ km^2	3.6 km^2	4
14	流域相对高差/m	443 m	3
15	河沟堵塞程度	轻微	2
16	总分	92	

由表 1 可知,该泥石流易发程度量化得分为 92 分。根据《崩塌滑坡泥石流调查评价技术要求(试用版)》附录 A6,判断该泥石流为中等易发性泥石流。这说明丁家渠泥石流的各项影响因素还有一定的活跃程度,有较大的潜在危险性。但由于目前沟口部位银洞沟已被整体填埋,沟口内侧修建小型水库,且沟内从上游至下游共修建有 6 级淤地坝,沟内正在退耕还林恢复植被,居民已陆续外迁,目前仅有 3 户居民未搬迁,人类工程活动对沟内土体破坏的影响减弱,加之该沟流域面积不大,综合分析该泥石流沟已进入衰退期,其活跃程度会逐渐减小。

3.2 泥石流危险性评价

3.2.1 函数赋值模型危险度计算

函数赋值模型是由我国学者刘希林提出,最新的单沟泥石流危险度评价模型包括 2 个主要评价因子(包括泥石流发生规模 m 和频率 f)和 5 个次要评价因子(包括沟谷流域面积、主沟长度、流域相对高差、流域切割密度及不稳定沟床比例)。次要评价因子是分别对最初提出的 14 个候选次要因子分别与两个主要因子做关联度分析,求得各评价因子的关联度平均值,最终将关联度好的(≥ 0.85)筛选 5 个作为泥石流危险度计算的次要因子。其中,模型中各评价因子的权重取值是基于关联度分析得到的关联序,从平均关联度最小的次要危险因子开始,给定起始权数为基本单位 10^n ($n=0$),以此基本单位为公差,呈等差级数向关联度增大的方向递增次要因子权数。主要因子权数以

最大次要危险因子的权数为基数,以 2 为公比,呈等比级数递增,可得到各因子的权数及权重。最终文献[8]确定的泥石流危险度计算模型为:

$$H_{\text{单}} = 0.29M + 0.29F + 0.14S_1 + 0.09S_2 + 0.06S_3 + 0.11S_6 + 0.03S_9 \quad (1)$$

上式中: $H_{\text{单}}$ ——单沟泥石流危险度(0~1);

M 、 F 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_6 、 S_9 ——分别为 m 、 f 、 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_6 、 s_9 的转换函数值,缺失的编号为淘汰的次要因子。

鉴于以上模型中各评价因子的权重取值只采用了一种方法,存在一定缺陷。此处参考文献[8]给出的关联序,采用关联度分析和层次分析法相结合的最优组合赋权法确定权重。具体过程如下。

设在 n 个评价指标 m 个评价对象的问题中,利用关联度分析法得到的各评价指标权重为:

$$W_1 = (\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1n}), \sum_{j=1}^n \omega_{1j} = 1 \quad (2)$$

利用层次分析法得到的各评价指标权重为:

$$W_2 = (\omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{2n}), \sum_{j=1}^n \omega_{2j} = 1 \quad (3)$$

设最优组合权重为:

$$W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (4)$$

令 $W = xW_1 + (1-x)W_2$, 其中 x 为组合赋权向量的线性表示系数, $0 < x < 1$ 经归一化处理后的各评价指标

构成的矩阵为: $C = (c_{ij})_{n \times m}$, 其中 $\sum_{j=1}^m c_{ij} = 1$ 则第 j 个评价对象的综合评价值为:

$$a_j = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot c_{ij} = \sum_{i=1}^n [x\omega_{li} + (1-x)\omega_{2i}] \cdot c_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

要最大限度地体现不同评价对象的差异, 即让各评价对象之间的方差尽可能大, 最终在于系数 x 的确定。由以上各式可得出:

$$\sum_{j=1}^m a_j = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [x\omega_{li} + (1-x)\omega_{2i}] \cdot c_{ij} = 1 \quad (6)$$

$a_1, a_2, \dots, a_m$ 平均值 $\bar{a}_j = \frac{1}{m}$, 即问题转变为确定 x , 求解最优化问题, 使得:

$$\sum_{j=1}^m (a_j - \bar{a}_j)^2 = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^n [x\omega_{li} + (1-x)\omega_{2i}] \cdot c_{ij} - \frac{1}{m} \right\}^2 \quad (7)$$

取最大值, 其中: $0 < x < 1$ 。运用组合赋权法最终求得各评价指标权重值见表 2 (本文中 $\bar{a}_j = 1/5$, 求得的 x 系数为 0.54)。

表 2 最优组合赋权法确定的指标权重值

Table 2 Weight values of assessment indexed by using potimal combination weighting method

评价因子	文献[8]中各指标权重	层次分析法	最优组合赋权法
泥石流发生规模	0.29	0.27	0.280
泥石流发生频率	0.29	0.27	0.280
沟谷流域面积	0.14	0.18	0.158
主沟长度	0.09	0.07	0.081
流域相对高差	0.06	0.05	0.053
流域切割密度	0.11	0.12	0.114
不稳定沟床比例	0.03	0.04	0.034

由此, 函数赋值模型变为:

$$H_{\text{单}} = 0.280M + 0.280F + 0.158S_1 + 0.081S_2 + 0.053S_3 + 0.114S_6 + 0.034S_9 \quad (8)$$

根据丁家渠泥石流沟的实际数据, 代入上式计算危险度得 $H = 0.281$ 。其中各评价因子初始值及转换值见表 3。根据文献[8]中的分级标准, 得出丁家渠泥石流沟的危险等级为低度危险 ($0.2 < H < 0.4$)。

3.2.2 模糊综合评判危险度计算

模糊综合评判是综合考虑分类对象的各种影响因素及其影响程度, 根据模糊数学中的最大隶属原则对分类对象划分类别的方法。

表 3 丁家渠泥石流沟危险度评价因子转换值

Table 3 Conversion values of hazard evaluation factors of Dingjiaqu debris flow

评价因子	原始值	转换函数	转换值
泥石流发生规模 m	20.31	$M = \lg m / 3$, 当 $1 < m \leq 1\,000$	0.436
泥石流发生频率 f	1	$F = 0$, 当 $f \leq 1$ 时	0
沟谷流域面积 s_1	3.6	$S_1 = 0.245\,8s_1^{0.349\,5}$, 当 $0 \leq s_1 \leq 50$ 时	0.385
主沟长度 s_2	3.914	$S_2 = 0.290\,3s_2^{0.537\,2}$, 当 $0 \leq s_2 \leq 10$ 时	0.604
流域相对高差 s_3	0.443	$S_3 = 2s_3/3$, 当 $0 \leq s_3 \leq 1.5$ 时	0.295
流域切割密度 s_6	3.539	$S_6 = 0.05s_6$, 当 $0 \leq s_6 \leq 20$ 时	0.177
不稳定沟床比例 s_9	0.23	$S_9 = s_9/0.6$, 当 $s_9 \leq 0.6$ 时	0.383

(1) 因素集、评语集的确定

在进行综合评判前, 要从评判对象与其相关因素之间的关系出发, 选择多个与评判对象有较密切关系的评价指标, 组成因素集 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$; 根据研究对象的特点及研究目的, 确定评判结果的类型, 构成评语集 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 。将该方法应用于单沟泥石流的危险性评价, 则相应建立的因素集为: $U =$ (泥石流规模, 泥石流发生频率, 沟谷流域面积, 主沟长度, 流域相对高差, 流域切割密度, 不稳定沟床比例); 评语集即为泥石流危险性等级划分: $V =$ (极低危险, 低度危险, 中度危险, 高度危险, 极高危险)。

(2) 隶属函数的建立

通过单因素评判求得的模糊关系矩阵 $[R]$ 是进行模糊综合评判的基础, 而单因素评判是通过建立各评价参数相对于每个评语等级的隶属函数来实现的。对于不同问题, 所建立的隶属函数是不同的, 无固定的公式可套用, 需要反复实验、修改, 才能找到真正反映评判指标在不同类别中变化特点的隶属函数。丁家渠泥石流沟危险度计算中隶属函数是基于对宁南山区发育的大量泥石流沟的基础数据统计结果分析建立的, 危险度分级界值见表 4。

表 4 丁家渠泥石流沟危险度分级界值表

Table 4 The hazard threshold of evaluation factors of Dingjiaqu debris flow

评价指标	危险分级				
	极低危 险(I)	低度危 险(II)	中度危 险(III)	高度危 险(IV)	极高危 险(V)
泥石流发生规模 $m / \times 10^4 \text{ m}^3$	0.5	5	50	500	1 000
泥石流发生频率 $f / (\text{次}/100 \text{ 年})$	5	25	55	85	100
沟谷流域面积 s_1 / km^2	0.25	5.5	15	27.5	35
主沟长度 s_2 / km	0.5	3	7.5	12.5	15
流域相对高差 s_3 / km	0.20	0.65	1.25	1.75	2
流域切割密度 $s_6 / (\text{km}/\text{km}^2)$	0.5	5.5	12.5	17.5	20
不稳定沟床比例 $s_9 / \%$	7.5	22.5	37.5	52.5	60

各评价指标对于各危险等级的隶属度之和为 1。依据统计数据, 各评价标关于危险度等级的隶属函

数可认为按线性变化,因此,对第 i 级而言的隶属度,可按式计算:

$$\mu(x) = \left(\frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} \right), i = 1, 2, \dots, 4 \quad (9)$$

上式中, x_{i+1} 与 x_i 分别为评价指标相邻两个等级的界限值。如丁家渠泥石流沟发生规模 $m = 2.031 \times 10^5 \text{ m}^3$, 则关于Ⅱ级危险度的隶属度为:

$$\mu_{\text{II}}(20.31) = \frac{50 - 20.31}{50 - 5} = 0.660 \quad (10)$$

于是关于Ⅲ级危险度的隶属度为 $\mu_{\text{III}}(20.31) = 0.340$ 。

对泥石流危险度分别按每个评价指标 ($u_1, u_2, \dots, u_n$) 计算出其相对于每个评语等级的隶属度, 构成模糊

$$\text{关系矩阵: } [R] = \begin{bmatrix} 0 & 0.660 & 0.340 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.362 & 0.638 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.797 & 0.203 & 0 & 0 \\ 0.460 & 0.540 & 0 & 0 & 0 \\ 0.392 & 0.608 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.967 & 0.033 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

(3) 模糊综合评判计算及结果分析各评价指标的权重构成的集合即为权重集, 对丁家渠泥石流沟进行模糊综合评判时权重的选取与函数赋值模型中权重的取值方法一致, 即关联度分析与层次分析结合的最优组合赋权法确定。

权重集 $[A] = (0.280, 0.280, 0.158, 0.081, 0.053, 0.114, 0.034)$, 则模糊综合评判向量: $[B] = [A] \cdot [R] = (0.280, 0.280, 0.158, 0.081, 0.053,$

$$0.114, 0.034) \begin{bmatrix} 0 & 0.660 & 0.340 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.362 & 0.638 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.797 & 0.203 & 0 & 0 \\ 0.460 & 0.540 & 0 & 0 & 0 \\ 0.392 & 0.608 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.967 & 0.033 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.406, 0.481, 0.113, 0, 0)$$

从上述计算结果得出, 隶属度最大值为 0.481, 其对应的危险度等级为Ⅱ级, 即低危险度, 与函数赋值模型的计算结果一致。

4 结论

(1) 丁家渠泥石流沟整体呈牛角状, 流域高差 443 m, 冲沟总长 3 914 m, 沟床平均比降为 0.06, 小于

0.1, 其水动力条件较差。主沟呈“V”形, 冲沟两侧斜坡北陡南缓, 发育多个滑坡及崩塌, 沟深坡陡, 为泥石流形成提供了有利的地形条件; 泥石流沟的流域面积为 3.6 km^2 , 每年汛期 (7-9 月) 为该泥石流沟的易发期; 物源主要为早期堆积的冲洪积物及崩塌、滑坡堆积物, 物源堆积量为 $2.031 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。综合分析得出: 该泥石流沟为降雨诱发型泥石流, 受构造等其他因素影响不大, 由于沟口有水库, 且外侧被回填, 若发生泥石流, 堆积区可能会堵塞, 会对沟内居民的生命财产造成威胁。

(2) 基于泥石流形成条件及野外调查数据的分析, 依据相关规范对各要素进行打分, 综合评判得分 92 分, 易发程度等级为中等易发。但由于从上游至下游共修建有 6 级淤地坝, 沟内正在退耕还林恢复植被, 目前仅有 3 户居民未搬迁, 人类工程活动对沟内土体破坏的影响减弱, 加之该沟流域面积不大, 综合分析认为该泥石流沟已进入衰退期, 其活跃程度会逐渐减小。

(3) 采用关联度分析与层次分析法相结合的最优组合赋权法对函数赋值模型中的权重进行修正, 并基于该模型对丁家渠泥石流沟进行危险度计算, 得出危险度等级为低度危险; 此外, 采用模糊综合评判法对泥石流的危险度计算结果同样为低度危险, 验证了修正的函数赋值模型在研究区泥石流危险度计算的准确性。两种方法的计算结果符合实地调查情况, 能够很好地反映泥石流的危险度, 对类似地区单沟泥石流危险性评价具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 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.
LIU Xilin. Debris flow hazard assessment in China: a review and perspective[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4): 1-8.
- [2] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 1-3.
LIU Xilin, TANG Chuan. Debris flow hazard assessment[M]. Beijing: Science Press, 1995: 1-3.
- [3] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. 灾害学, 1988(3): 12-17.
LIU Xilin. Research on judging for the debris flow hazard[J]. Journal of Catastrophology, 1988(3): 12-17.
- [4] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判

- [J]. 水土保持通报, 1986, 6(1): 51-57.
- TAN Bingyan. Quantitative comprehension evaluation of debris flow severity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1986, 6(1): 51-57.
- [5] 张怀珍, 范建荣, 郭芬芬, 等. 中国单沟泥石流危险度评价模型比较研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 20-26.
- ZHANG Huaizhen, FAN Jianrong, GUO Fenfen, et al. The comparison of single debris flow risk assessment models in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(4): 20-26.
- [6] LIU X L. Assessment on the severity of debris flows in mountainous creeks of southwestern China [C]// Proceedings of International Symposium of Interpraevent. Garmisch-Partenkirchen, 1996(4): 145-154.
- [7] 刘厚成, 谷秀芝. 基于可拓层次分析法的泥石流危险性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 61-66.
- LIU Houcheng, GU Xiuzhi. Hazard assessment of debris flow along highway based on extension AHP [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3): 61-66.
- [8] 郭万铭, 焦金鱼. 基于模糊综合评判法分析的岷县洮河流域单沟泥石流危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(2): 15-18.
- GUO Wanming, JIAO Jinyu. Hazard assessment of single gully debris flows in the Taohe river valley of Min county based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(2): 15-18.
- [9] 王常明, 田书文, 王翊虹, 等. 泥石流危险性评价: 模糊c均值聚类-支持向量机法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1168-1175.
- WANG Changming, TIAN Shuwen, WANG Yihong, et al. Risk assessment of debris flow: a method of SVM based on FCM [J]. Journal of Jilin University (Earth science edition), 2016, 46(4): 1168-1175.
- [10] 杨小凤, 朱军, 曹云刚, 等. 基于不同方法的泥石流危险性评价对比分析——以四川汶川七盘沟泥石流为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 22-29.
- YANG Xiaofeng, ZHU Jun, CAO Yungang, et al. Risk assessment of Qipangou debris flow based on determining weight method and effectiveness analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 22-29.
- [11] 田丰, 张军, 冉有华, 等. 甘肃陇南市泥石流灾害危险性及其影响因子评价[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 197-203.
- TIAN Feng, ZHANG Jun, RAN Youhua, et al. Assessment of debris flow disaster hazard and influence factors in Longnan district [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 197-203.
- [12] 王家柱, 任光明, 余天斌, 等. 四川芦山震区大叶龙沟泥石流发育特征及危险度评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 1-5.
- WANG Jiazhu, REN Guangming, YU Tianbin, et al. Development characteristics and risk assessment of Da Yelong ditch's debris flow in Sichuan Lushan meizoseismal area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 1-5.
- [13] 马鹏辉, 彭建兵, 朱兴华, 等. 陕西蓝田铜鹅沟泥石流发育特征及危险性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 75-81.
- MA Penghui, PEGN Jianbing, ZHU Xinghua, et al. Characteristics and risk analysis of debris flow in Tonge gully in Lantian County, Shaanxi Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 75-81.
- [14] 张黎, 倪万魁, 张钦, 等. 宁夏彭阳县地质灾害[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2010: 1-4.
- ZHANG Li, NI Wankui, ZHANG Qin, et al. Geological hazards in Pengyang, Ningxia [M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 2010: 1-4.