

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.05

青海某沟谷“8·21”泥石流发育特征及危险性评价

常文娟^{1,2}, 任光明², 李 畅², 刘 腾²

(1. 陕西秋海汲清石油科技有限公司, 陕西 西安 710000;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要: 泥石流是山区常见的地质灾害类型之一。位于青海省黄河右岸的某沟谷于2016年8月21日暴发一定规模泥石流, 严重威胁流域内生产运营与沟口附近人民生命财产安全。通过现场调查、试验与计算, 详细分析了本次泥石流的形成条件、发育特征、激发雨量及形成机制, 评价了相关的动力学特征; 在此基础上, 参照单沟泥石流危险性评价中的评价因子, 增加了24 h最大降雨量作为本次泥石流危险性评价指标, 采用熵权法对该沟谷泥石流危险性进行了评价。研究表明: “8·21”泥石流容重为 1.635 t/m^3 , 为稀性泥石流, 一次泥石流冲出总量为 $3.89 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属中型泥石流, 泥石流危险性值为0.57, 属于中度危险。考虑最大降雨量这一影响因子能较合理揭示泥石流的危险性。

关键词: 泥石流; 发育特征; 形成条件; 危险性评价

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)06-0033-07

Development characteristics and risk assessment of “8·21” debris flow in a gully in Qinghai Province

CHANG Wenjuan^{1,2}, REN Guangming², LI Chang², LIU Teng²

(1. Shaanxi Qiuhaizhiqing Petroleum Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Debris flow is one of the common types of geological disasters in mountain areas. In a gully located on the right bank of the Yellow River in Qinghai Province, a large-scale debris flow broke out on August 21, 2016, which seriously threatened the production operation in the basin and the safety and property of local people. Through field investigation, experiment and calculation, the formation conditions, development characteristics, excitation rainfall and formation mechanism of the debris flow are analyzed in detail, and the related dynamic characteristics are evaluated. On this basis, referring to the evaluation factors of single-ditch debris flow risk assessment, the 24 hours maximum rainfall is added as the risk evaluation index, and the entropy weight method is used to evaluate the risk of debris flow. The research results show that the “8·21” debris flow has a bulk density of 1.635 t/m^3 , which is a diluent debris flow. The total volume of debris flow is $3.89 \times 10^4 \text{ m}^3$, which is a medium-sized debris flow. The risk value of debris flow is 0.57, belongs to moderate risk debris flow. It is more reasonable to reveal the risk of debris flow by considering the maximum rainfall.

Keywords: debris flow; development characteristics; formation conditions; risk assessment

收稿日期: 2018-04-03; 修订日期: 2018-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072229)

第一作者: 常文娟(1984-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害评价与预测。E-mail: 282552316@qq.com

通讯作者: 任光明(1964-), 男, 四川西充人, 教授, 主要从事工程地质、岩土工程与地质灾害等方面的教学与研究工作。E-mail: rengmgcr@163.com

0 引言

泥石流是指由于降雨(暴雨、冰川、积雪融化水)在沟谷或山坡上产生的一种挟带大量泥砂、石块或巨砾等固体物质的特殊洪流^[1],其特征是形成、运动机理复杂、影响因素众多、暴发突然、历时短、危害性大;其危险性是潜在泥石流发生的可能性大小^[2],对泥石流危险性评价是泥石流灾情评估、监测预警和减灾防灾工作中的重要内容和决策基础,现已成为国内外泥石流研究的热点问题之一^[3]。自1976年美国联邦地质调查局的 VARNES D J 开始进行泥石流危险性研究以来^[4],泥石流危险性评价工作不断深入,并取得了丰硕的研究成果^[5-12],灰色理论、神经网络、模糊数学、可拓理论、层次分析等多种方法被应用于泥石流的危险性评价。近年来,通过数值模拟、GIS 技术等方式开展泥石流危险性评价也大大提高了泥石流危险性评价的精度与可靠性,更加促进了该研究领域的发展。

位于青海的某沟谷属黄河右岸的一大型冲沟,沟口扇形地明显。早期泥石流堆积扇发育深切冲

沟,冲沟侧壁上揭露多期泥石流的堆积特征,揭示了该沟谷在历史上曾多次暴发规模较大的泥石流。最新一次发生于2016年8月21日凌晨,冲毁了沟谷中矿产开采的部分设备,直接威胁流域内厂矿驻地、沟口的乡村公路与居民的安全。由于该流域内植被稀少、岩体风化卸荷强烈、人类工程活动频繁、物源丰富,在强降雨的作用下具有再次暴发泥石流灾害的可能。因此,分析本次泥石流的发育特征、评价其危险性对该区域泥石流的预警预报、防治等具有重要的指导意义。

1 泥石流的形成条件

1.1 基本地质条件

研究区位于黄河上游青海省同德县境内,属深切侵蚀高山地貌类型。流域出露地层岩性主要为三叠系中统隆务河组(T_2^d)板岩、粉砂质板岩、砂岩以及第四系(Q)砂砾石层、冲洪积及泥石流堆积物等(图1)。此外,区内断裂、褶皱较发育,岩体较破碎、完整性较差,有利于形成松散固体物源的基础地质条件。

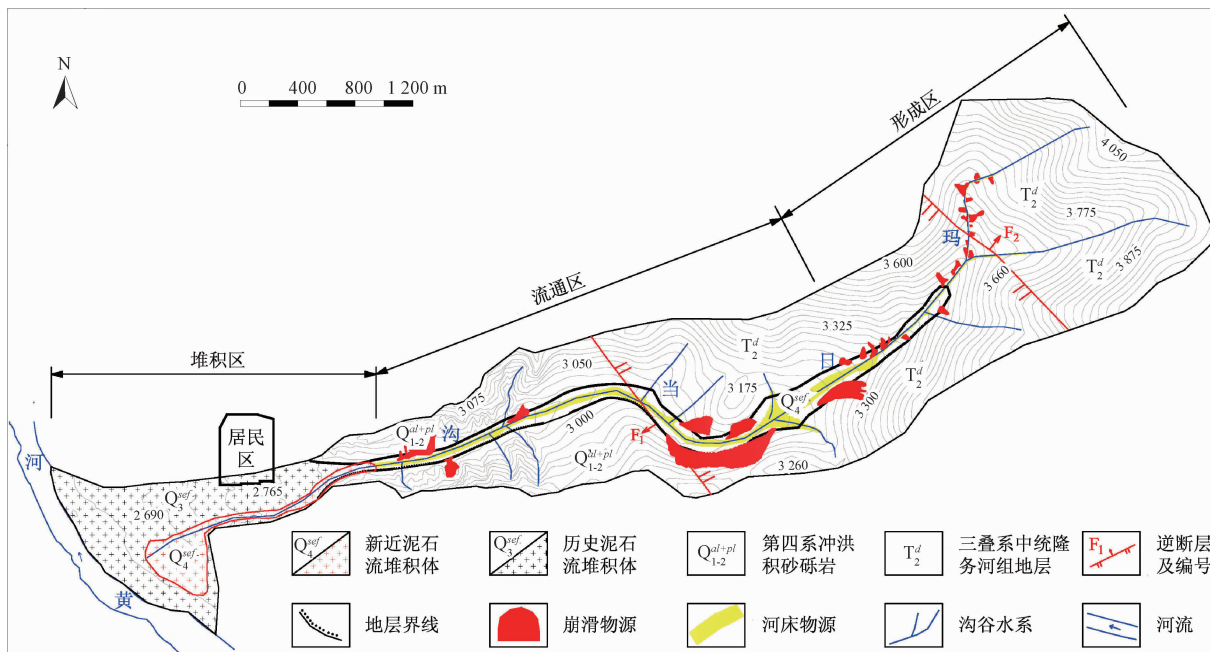


图1 研究区地质简图与泥石流活动分区图

Fig.1 Geological sketch and debris flow activity zoning map of the research area

1.2 泥石流的形成条件

1.2.1 地形条件

该沟谷为深切侵蚀高山地貌,地势北东高、南西低,沟源最高处山脊高程4 075 m,堆积扇前缘高程

2 667 m,相对高差1 408 m,流域面积7.78 km²;主沟沟长8.27 km,总体走向为NE65°~75°,沟谷纵比降162‰,流域完整性系数为0.114,形状呈长条形,属于易发型泥石流沟谷^[13](图1)。

在泥石流的形成区,沟谷长度 2 655 m,相对高差 768 m,平均沟谷纵比降为 289.3‰,沟谷形态呈“V”字型,沟底宽度约 5~25 m,沟谷两岸坡度较陡,约 30°~75°,主要为基岩出露区,植被覆盖率较低,有利于地表水的汇集。较大的高差与沟谷纵比降为沟道径流提供了有利的势能,为泥石流的启动奠定了较好的地形条件。

1.2.2 降雨条件

研究区属于典型的高原大陆性气候。区内多年降雨资料统计表明,多年平均降水量为 247.85 mm,一般为 59.4~337.6 mm。但降雨量分布不均匀,降雨多集中在 5~9 月,尤其是 6~9 月降水量最多,这 4 个月多年平均降雨量均在 101.3~166 mm,10 min 最大降雨量达 36 mm。对泥石流发生前的降雨资料的统计,“8·21”泥石流发生前累积降雨量 69.9 mm(图 2),根据前期有效降雨量计算公式(式 1)获得“8·21”泥石流发生的前期有效降雨为 34.28 mm,其中 8 月 20 日的降雨 20.6 mm,降雨历时 7 小时。本次泥石流的产生是在长时间的前期降雨与短历时的强降雨的共同作用下而诱发的,具有慢速激发的特征^[14]。

$$P_a = \sum_{i=1}^n K^i P_i \quad (1)$$

式中: P_a ——前期有效降雨量,mm;

P_i ——泥石流发生前 1~ n 天中各日降雨量,mm;

K ——衰减系数,取值范围为 0.78~0.85。

通过类比分析、以及相关的计算检验,取 0.84 时计算效果较好^[15]。一般而言,一次降雨量逐日衰减,一般经历 20 天左右基本耗尽,故 n 取 20^[16]。

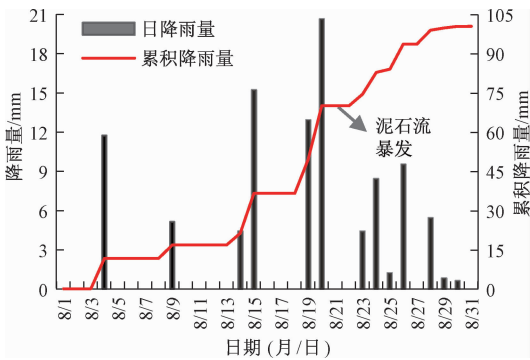


图 2 2016 年 8 月降雨统计

Fig.2 August 2016 rainfall statistics

1.2.3 物源条件

松散固体物源量的大小决定着泥石流规模、流体性质、破坏强度等,是泥石流暴发的物质基础^[17]。现

场调查、统计表明,流域内松散固体物源有:沟谷两岸不同规模的崩滑堆积物、沟床堆积物以及坡面侵蚀物源及少量人工开挖弃渣(图 3),这些物源多集中于沟道干、支沟沟床及两侧斜坡地带,统计的各类主要物源见表 1。显然,流域内松散物源丰富,易在强降雨作用下形成泥石流。

表 1 流域内主要物源特征

Table 1 Provenance characteristics in the basin

类型	不稳定物源/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	潜在不稳定物 源/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	物源总量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	百分含量/ %
崩滑堆积物	25.84	108.49	134.33	32.12
沟床堆积物	39.02	240.91	279.93	66.94
坡面侵蚀物源	3.89		3.89	0.93
合计储量	68.75	349.4	418.15	100



(a) 崩滑物源



(b) 沟床物源

图 3 流域物源特征

Fig.3 Characteristics of provenance in the basin

1.2.4 泥石流形成机制分析

现场的调查分析表明,“8·21”泥石流的形成为长时间的降雨与短历时的强降雨造成。如前所述,该流域内松散固体物源丰富,沟床比降大,前期累积降雨 69.9 mm,前期有效降雨 34.28 mm,其中 8 月 20 日的降雨量为 20.6 mm,降雨历时 7 小时,于 8 月 21 日

凌晨形成泥石流。

长时间的前期降雨使松散堆积体内含水量逐渐增加、强度降低,在短历时强降雨到来之前,沟道与坡面物源含水量已达到最大甚至饱和,此时松散土体的入渗率已经降至最低值或达到饱和,强度值亦降低至最低值或临界值。在短时间的强降雨开始后迅速形成坡面径流,同时携带已被软化、饱和的松散土体向沟道汇集,增加了沟道径流的物源量。尤其在后缘右侧支沟沟底高程约 3 600 m 附近、沟谷右岸发育一规模较大的滑坡(图 3(a)),其部分堆积体直接堆积于沟道内。暴雨作用下,降雨使坡面滑坡体饱水、软化,滑坡前缘部分堆积体发生失稳并堆积在沟道内形成滑坡堰塞体,沟道上游地表水及携带的固体径流逐渐淤积于沟道内,形成堰塞湖。随着地表水的不断汇集,堰塞湖的水位不断抬升,在湖水压力以及堰塞体底部堆积物饱水、软化等共同作用,最终导致堰塞体溃决。由于溃决后的放大效应,沟道径流流量陡增,从而继续侵蚀、冲刷下游沟道,沟道内及沟道两侧的堆积物被掀起、揭底,沟道径流的流量与流速在此过程中也不断地增加;不断掏蚀、搬运沟道两侧的崩滑物源,沟道径流的含沙量超过携带水流的含沙量,从而形成泥石流。另外,在流通区的中部高程约 3 070 m 一带,由于沟床地形变窄、流水对沟道松散堆积物的冲刷以及人类工程活动产生的松散土石也导致部分沟道堵塞,泥石流在该处产生短暂的淤积、形成小规模堰塞体溃决后,再次产生放大效应,泥石流的流速与流量进一步增大,从而在短时间内产生了此次“8·21”泥石流。因而,该次泥石流属于堵溃特征的降雨启动型沟谷稀性泥石流。

2 泥石流特征的计算

2.1 泥石流的容重

泥石流性质主要由松散碎屑物质中黏粒决定^[18]。为确定该沟谷流域泥石流的性质,结合“8·21”泥石流颗粒分布特点(图 4),采用式(2)计算本次泥石流的容重^[19],计算结果见表 2。

$$\gamma_c = P_{05}^{0.35} P_2 \gamma_v + \gamma_x \quad (2)$$

式中: γ_c ——泥石流容重(t/m^3);

P_{05} ——小于 0.05 mm 的细颗粒的百分含量(小数表示);

P_2 ——大于 2 mm 的粗颗粒的百分含量(小数表示);

γ_v ——黏性泥石流的最小容重,取 $2.0 \text{ t}/\text{m}^3$;

γ_x ——泥石流的最小容重,取 $1.4 \text{ t}/\text{m}^3$ 。

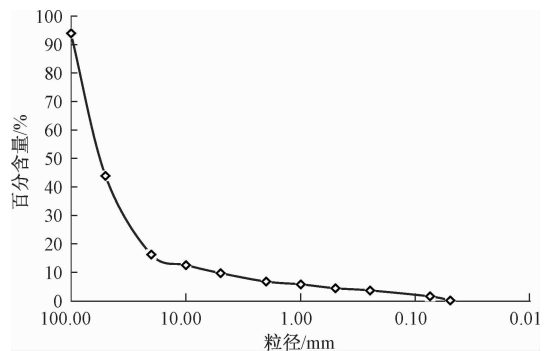


图 4 泥石流颗分曲线

Fig. 4 The gradation curve of debris flow

通过式(2)计算“8·21”泥石流容重为 $1.635 \text{ t}/\text{m}^3$,参照相关泥石流的分类规范^[1],属稀性泥石流。

表 2 泥石流容重计算

Table 2 Calculation of debris flow density

取样位置	P_2	P_{05}	$\gamma_c/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$
沟底高程 2 814 m 处	0.931 8	0.002 7	1.635

2.2 泥石流流速

根据现场调查本次泥石流洪痕断面特征,选用铁一院建立的西北地区泥石流流速计算公式(3)~(4)对“8·21”泥石流流速进行计算^[1],结果见表 3。

$$V_c = (15.3/a) H_c^{2/3} I_c^{3/8} \quad (3)$$

$$a = \left[\frac{\gamma_H(\gamma_c - 1)}{\gamma_H - \gamma_c} + 1 \right]^{1/2} = [\gamma_H \phi + 1]^{1/2} \quad (4)$$

式(3)~(4)中: V_c ——泥石流流速, m/s ;

γ_H ——泥石流中固体颗粒容重, t/m^3 ,
通过室内试验确定该值为 $2.548 \text{ t}/\text{m}^3$;

γ_c ——泥石流容重, t/m^3 ;

H_c ——水力半径, m ;

I_c ——泥石流水力坡度;

a ——阻力系数;

ϕ ——泥沙修正数。

从表 3 可见,“8·21”泥石流的流速为 $3.79 \text{ m}/\text{s}$ 。

表 3 泥石流流速计算

Table 3 Calculation of debris flow velocity

$\gamma_c/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_H/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	ϕ	a	H_c/m	I_c	$V_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1.635	2.548	0.696	1.665	0.94	0.105	3.79

2.3 泥石流流量

泥石流流量采用雨洪法与泥痕断面法进行评价。雨洪法计算的沟谷泥石流流量,一方面可以表示沟谷

不同降雨频率下泥石流的峰值流量;二是根据现场调查泥石流的洪痕特征,可以对不同洪痕泥石流发生的暴雨频率进行对比分析。

(1)雨洪法:采用雨洪法计算泥石流峰值流量,首先需要通过暴雨频率推求设计洪峰流量,并结合泥石流特征计算泥石流流量^[18]。

洪峰设计流量计算公式如下:

$$Q_B = 0.278 \left(\frac{S_p}{\tau^n} - \mu \right) F \quad (5)$$

泥石流峰值流量计算公式如下:

$$Q_c = Q_B (1 + \phi) D_c \quad (6)$$

式中: Q_B ——设计洪水流量(m^3/s);

S_p ——暴雨雨力(mm/h);

τ ——汇流时间(h);

n ——暴雨公式指数;

F ——流域面积(km^2);

Q_c ——泥石流断面峰值流量(m^3/s);

ϕ ——泥石流修正系数;

D_c ——沟道堵塞系数。

采用上式、沟道堵塞系数 D_c 取 1.8,计算不同降雨频率下泥石流峰值流量结果见表 4。

表 4 不同频率下泥石流流量特征

Table 4 Characteristics of debris flow discharge at different frequencies

频率/%	$Q_B/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_c/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q/\times 10^4 \text{m}^3$	$Q_H/\times 10^4 \text{m}^3$
10	50.77	134.33	4.25	1.74
5	58.54	154.88	4.90	2.01
3.3	64.12	169.65	5.37	2.20
2	68.46	181.13	5.74	2.35
1	76.27	201.79	6.39	2.62

(2)洪痕法:采用形态调查法进行泥石流流量计算,计算公式为:

$$Q_c = W_c \cdot V_c \quad (7)$$

式中: Q_c ——泥石流断面峰值流量, (m^3/s);

W_c ——泥石流过流断面面积, (m^2),采用调查测绘获取的沟道形态参数;

V_c ——泥石流断面平均流速, (m/s),计算结果见表 5。

表 5 “8·21”泥石流流量计算

Table 5 Calculation of “8·21” debris flow discharge

断面位置	$W_c/$ m^2	$V_c/$ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_c/$ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q/$ $\times 10^4 \text{m}^3$	$Q_H/$ $\times 10^4 \text{m}^3$
沟底高程 2 894 m	32.41	3.79	122.83	3.89	1.60

2.4 一次泥石流总量及固体物质冲出量

根据现场泥石流洪痕实测参数,由下式计算一次泥石流总量及一次固体物质冲出量:

$$Q = 19TQ_c/72 \quad (8)$$

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w)/(\gamma_H - \gamma_w) \quad (9)$$

式中: Q ——泥石流一次过流总量, m^3 ;

T ——泥石流历时, s ;

Q_c ——泥石流断面峰值流量, m^3/s ;

Q_H ——一次泥石流冲出固体物质总量, m^3 ;

γ_c ——泥石流容重, t/m^3 ;

γ_H ——泥石流中固体颗粒容重, t/m^3 ;

γ_w ——水的重度(t/m^3),取 $1.0\text{t}/\text{m}^3$ 。

按式(8)~(9)对“8·21”泥石流的冲出量计算结果也列于表 5 中。

对比表 4、表 5 可见,新近暴发的“8·21”泥石流暴发频率低于 $P=10\%$,一次泥石流堆积总量为 $3.89 \times 10^4 \text{m}^3$,属于中型泥石流。

3 泥石流危险性评价

3.1 评价因子选取

特定的流域形态、丰富的松散固体物源以及集中的水源驱动是泥石流发生的三个必要条件,而这些条件均受控于地形地貌、地质条件、水文条件与人类工程活动等因素及其组合状态。因此,泥石流危险性评价因子的选择必须遵循以下四个原则^[20]:①所选取的因子必须具有代表性与明确的物理意义;②各个因子间尽量要相对独立;③因子容易获取并易于量化;④因子数量适中。

刘希林所提出的单沟泥石流危险性评价方法是应用较为广泛的一种方法,但该方法中未考虑泥石流产生中的降雨条件。因此,依据上述原则同时参考刘希林单沟泥石流危险性评价因子^[21],并针对该方法中的不足,补充 24 小时最大降雨量作为泥石流危险性评价的一项重要评价因子,初步选取以下 8 项作为泥石流危险性评价因子,即:泥石流规模 X_1 ($\times 10^3 \text{m}^3$)、发生频率 X_2 (次/百年)、流域面积 X_3 (km^2)、主沟长度 X_4 (km)、流域相对高差 X_5 (km)、流域切割密度 X_6 (条/km)、不稳定沟床比例 X_7 (%)、24 小时最大降雨量 X_8 (mm)。

3.2 泥石流危险性评价

由于地质灾害往往是多种因素共同作用的结果,这些因素错综复杂,危险性评价时所选取的各影响因

素的客观数据常有不确定性。因此,可将地质灾害系统看成是一个具有某种混乱程度的非线性的开放系统,借助熵理论就可以表达系统因子的效用价值,从原始数据本身出发计算得到各影响因素的权重^[22],计算过程如下:

(1) 计算熵权前为了消除各因子间单位量纲不同,需要先进行无量纲化处理:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(j)}{\max(j) - \min(j)} \quad (10)$$

式中: r_{ij} ——无量纲化处理后的数据;

$\min(j)$ —— j 项因子中最小值;

$\max(j)$ —— j 项因子中的最大值;

x_{ij} ——原始数据。

(2) 熵值的建立:根据下式建立信息熵:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (11)$$

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad (12)$$

式中: E_j ——第 j 项因子熵值;

P_{ij} ——第 j 项指标下第 i 个样本中该指标值的比重, $r_{ij}=0$ 时, $P_{ij} \ln P_{ij}=0$;

m ——样本的个数;

n ——因子的个数。

(3) 评价指标权重计算:信息熵计算权重是利用该指标的信息效用值来评价其对泥石流灾害形成的重要性,其值越大,表明该指标越活跃,越容易触发泥石流灾害。第 j 项评价指标权重 $W(j)$ 计算公式如下,计算结果见表 6。

$$W(j) = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n 1 - E_j} \quad (13)$$

表 6 各评价因子权重值

Table 6 Weight values of each evaluation factor

评价因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
$W(j)$	0.11	0.19	0.09	0.11	0.10	0.19	0.13	0.08

(4) 沟谷泥石流的危险性评价:计算出各项指标的权重后,按下式计算每个样本的危险性值 $F(i)$,其值越大,表明发生泥石流的可能性越大。

$$F(i) = \sum_{j=1}^n W_j r_{ij} \quad (14)$$

利用式(14)计算的“8·21”泥石流的危险性值为 0.57,按泥石流危险性分级标准(表 7)可知,该沟谷泥

石流为中度危险。若不考虑降雨对泥石流的影响,采用刘希林单沟泥石流危险性评价方法对本次泥石流进行危险性评价,得到的泥石流危险性值为 0.429,属于中度危险性泥石流。虽然通过两种方法均得到了相同的结果,但从泥石流危险性值来说,采用熵权法并考虑降雨的影响所得到的值高于采用单沟泥石流危险性评价所得到的值,由此也表明考虑降雨的影响能更合理地揭示泥石流的危险性。

表 7 泥石流危险性分级

Table 7 Risk classification of debris flow

危险性	极低危险	低度危险	中度危险	高度危险	极高危险
危险性值	0.0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0

4 结论

通过现场调查、室内综合研究,得到如下结论与认识:

(1) 流域内松散固体物源丰富,主要为崩滑物源、沟道堆积物源和坡面侵蚀物源,总的物源量约 $4.1815 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中可参加泥石流的不稳定物源量约 $6.875 \times 10^5 \text{ m}^3$,占总储量的 16.44%。

(2) “8·21”泥石流为长时间的前期降雨与短历时的强降雨造成,其中前期累积降雨 69.9 mm,前期有效降雨 34.28 mm,其中 8 月 20 日的降雨量为 20.6 mm 激发了该次泥石流。

(3) “8·21”泥石流为一具有堵溃特征的降雨启动型沟谷稀性泥石流,其容重为 1.635 t/m^3 ,流速为 3.79 m/s ,一次泥石流堆积总量为 $3.89 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于中型泥石流。该次泥石流暴发频率与 $P=10\%$ 接近。

(4) 利用熵权法、并考虑最大降雨量因子对“8·21”泥石流危险性评价结果表明,该次泥石流危险性为中度危险。通过与刘希林单沟泥石流危险性评价结果进行对比表明考虑降雨量这一指标能够较合理地揭示该沟谷泥石流的危险性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范: DZ/T 0220-2006[S]. 2006.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T 0220-2006[S]. 2006.
- [2] 宁娜, 舒和平, 刘东飞, 等. 基于熵权和模糊评判的单沟泥石流危险性评价[J]. 兰州大学学报(自

- 然科学版), 2014, 50(3):369-375.
- NING Na, SHU Heping, LIU Dongfei, et al. Hazard assessment of debris flow based on the entropy weight method and fuzzy evaluation method[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(3):369-375.
- [3] 李阔, 唐川. 泥石流危险性评价研究进展[J]. 灾害学, 2007, 22(1):106-111.
- LI Kuo, TANG Chuan. Progress in research on debris flow hazard assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1):106-111.
- [4] CANNON S H, GARTNER J E, RUPERT M G, et al. Predicting the probability and volume of post wildfire debris flows in the intermountain western United States [J]. Geological Society of America Bulletin, 2010, 122:127-144.
- [5] BORGA M, STOFFEL M, MARCHI L, et al. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems; Flash floods and debris flows[J]. Journal of Hydrology, 2014, 518(4):194-205.
- [6] HSU S M, CHIOU L B, LIN G F, et al. Applications of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: a case study in Hualien County, Taiwan. [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2010, 10(3):535-545.
- [7] STALEY D M, NEGRI J A, KEAN J W, et al. Prediction of spatially explicit rainfall intensity-duration thresholds for post-fire debris-flow generation in the western United States [J]. Geomorphology, 2016:278.
- [8] 王维早, 王滨, 许强. 基于灰色关联度理论的河北省太行山区下瓦岔泥石流灾害危险性评估研究[J]. 地球与环境, 2012, 40(1):121-125.
- WANG Weizao, WANG Bin, XU Qiang. Study on the risk assessment of Xiawacha debris flow in the Taihang mountain area of Hebei province based on the theory of grey correlation[J]. Earth and Environment, 2012, 40(1):121-125.
- [9] 李秀珍, 孔纪名, 李朝凤. 基于 Matlab 的 BP 神经网络在泥石流危险性评价中的应用[J]. 工程勘察, 2010, 38(1):47-50.
- LI Xiuzhen, KONG Jiming, LI Zhao Feng. Application of BP neural network to the hazard assessment of debris flow based on Matlab [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(1):47-50.
- [10] 苏经宇, 周锡元, 樊水荣. 泥石流危险等级评价的模糊数学方法[J]. 自然灾害学报, 1993(2):83-90.
- SU Jingyu, ZHOU Xiyuan, FAN Shuirong. A fuzzy set evaluation method of hazard assessment of debris flow[J]. Journal of Natural Disasters, 1993(2):83-90.
- [11] 曾群华, 徐长乐, 向云波, 等. 泥石流沟地形因素危险性的可拓学评价——以重庆市北碚区为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(3):72-78.
- ZENG Qunhua, XU Changle, XIANG Yunbo, et al. The extension assessment of the terrain factor of debris flow hazard—a case study in Beibei Chongqing[J]. Journal of Geological Hazards and Environmental Preservation, 2010, 21(3):72-78.
- [12] 王学良, 李建一. 基于层次分析法的泥石流危险性评价体系研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(10):113-117.
- WANG Xueliang, LI Jianyi. Study on indexes for assessing debris flow risk based on AHP[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(10):113-117.
- [13] 周必凡. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991:16-17.
- ZHOU Bifan. Debris flow prevention guide [M]. Beijing: Science Press, 1991:16-17.
- [14] 周伟, 唐川, 周春花. 汶川震区暴雨泥石流激发雨量特征[J]. 水科学进展, 2012, 23(5):650-655.
- ZHOU Wei, TANG Chuan, ZHOU Chunhua. Critical rainfall characteristics for rainfall-induced debris flows in Wenchuan earthquake affected areas[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5):650-655.
- [15] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1):2808-2812.
- CONG Weiqing, PAN Mao, LI Tiefeng, et al. Quantitative analysis of critical rainfall-triggered debris flows[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1):2808-2812.
- [16] 徐黎明, 王清, 陈剑平. 资料缺乏地区诱发泥石流临界降雨量预测[J]. 铁道勘察, 2014, 40(2):75-78.
- XU Liming, WANG Qing, CHEN Jianping. Study of rainfall threshold of debris flow forewarning in areas without data [J]. Railway Investigation and Surveying, 2014, 40(2):75-78.
- [17] 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.