

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.03.05

地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析

刘德玉^{1,2}, 贾贵义^{1,2}, 李松^{1,2}, 丛凯^{1,2}, 张伟^{1,2}

(1. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃兰州 730050;

2. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃兰州 730050)

摘要: 白龙江流域甘肃段是我国四大泥石流灾害多发地区之一, 其中地形条件是形成泥石流的关键因素。文章在实地调查研究区内发育的1 008条泥石流沟的基础上, 通过统计分析沟床比降、沟坡坡度、流域面积和相对高差4个主要地形因素数据与泥石流灾害的类型及易发程度的关系, 研究其对泥石流灾害形成的影响。通过熵权法计算4个因素的权重, 由权重大小排序分析了它们对泥石流灾害形成的贡献程度。结果表明: 在200‰~400‰区间内的沟床比降、坡度大于30°的沟坡、相对高差大于300 m的山体、小于10 km²的流域面积对泥石流的形成和运动最为有利; 对泥石流灾害形成贡献程度最大的为沟床比降, 其次为相对高差和流域面积, 最小的为沟坡坡度。该研究结果对此区域内泥石流灾害的监测预警及防治有一定指导意义。

关键词: 地形; 白龙江流域; 泥石流; 熵权法; 地质灾害

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)03-0033-07

Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin

LIU Deyu^{1,2}, JIA Guiyi^{1,2}, LI Song^{1,2}, CONG Kai^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}

(1. Gansu Institute of Geological Environment Monitoring, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources in Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The Gansu segment of the Bailongjiang River is one of the four major debris flow disaster areas in China. Topography is the key factor for the formation of debris flows. In this paper, the impacts of topographical factors on debris flows at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin are examined based on a statistical analysis of the relationship between the main topographical factors, such as the groove gradient, gully slope, relative elevation difference, drainage area and the debris flows' types, and the susceptibility by investigation of 1 008 debris flows in the study area. The contribution degree to the formation of debris flows is analyzed by ranking the weights of the 4 factors which are calculated by the entropy method. The results show that the groove gradient in the range of 200‰–400‰, slope greater than 30 degrees, relative elevation difference greater than 300 m, less than 10 km² of drainage area are beneficial to the formation and movement of debris flows. The greatest contribution degree to the formation of debris flows is the groove gradient, followed by the relative elevation difference and drainage area, and the smallest is the gully slope. The results of this study are of guided significances for the monitoring, warning and prevention of debris flow disasters in this area.

Keywords: topography; Bailongjiang River Basin; debris flow; entropy method; geological hazard

收稿日期: 2018-09-13; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“洮河流域下游地质灾害调查评价”(DD20160280)

第一作者: 刘德玉(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事工程地质方面的研究工作。E-mail: ldeyu2010@163.com

泥石流是山区特有的一种自然地质现象,它是由于降水(暴雨、融雪、冰川)而形成的一种夹带大量泥沙、石块等固体物质的特殊洪流,具有暴发突然、历时短暂、来势凶猛、破坏力强的特点。泥石流的形成必须具备三大条件:一定地形、充足的松散固体物质(主要由地质条件决定)和丰富的水源。其中地形条件是泥石流发生的根本条件或称为决定性条件。凡是具备泥石流发育之地形条件的沟谷都有可能发生泥石流。反之,地形条件若不具备,无论其沟谷内固体物质再丰富,降雨强度再大,也难以甚至根本不会形成泥石流^[1]。因此,地形条件是形成泥石流的关键因素,它制约着泥石流的形成和运动,影响着泥石流的规模 and 特性^[2-3],研究地形条件对泥石流的控制作用对于泥石流灾害的预防和防治具有重要意义。

与泥石流形成有关的地形条件包括沟床比降、沟坡坡度、流域面积、相对高差、沟壑密度、流域形态等因素,其中又以前四个因素占主导地位。目前国内学者在该方面的研究主要集中在结合典型的泥石流沟来分析地形因素对泥石流发育的控制作用^[4-6],或者选取部分地形因子来预测泥石流的发生概率^[7-8]及评价其易发性^[9]、危险性^[10]。对比较沟床比降、沟坡坡度、流域面积、相对高差这4个主导因素对泥石流的相对重要性和贡献程度方面的研究程度很低,仅有的一些研究成果又存在着比较因素单一或者研究样本数量过少的问题,缺乏全面性和科学性^[11-12]。本文在对研究区内发育的1008条泥石流沟进行实地调查的基础上,分析了沟床比降、沟坡坡度、流域面积和相对高差这4个主要地形因素对泥石流的影响作用;采用大样本数据统计比较了不同地形数值区间对应的泥石流灾害类型及易发程度,确定了对泥石流发育最有利的优势区间;最后采用基于信息熵理论的熵权法计算了这4个因素的权重,定量确定它们对泥石流灾害的相对重要性和贡献程度。

1 研究区概况

1.1 自然地理条件

白龙江是嘉陵江的上游源区,发源于甘肃省碌曲县郎木寺乡,河流全长576 km,集水面积31 808 km²。其中,白龙江在甘肃省境内长381.5 km,占总流程的66.23%。流域范围包括甘肃省南部的文县、舟曲、迭部、宕昌、武都及康县6个县区(图1),流域面积达17 846.3 km²。武都—文县属亚热带气候区,宕昌、舟曲、康县属暖温带气候区,迭部属高寒气候区。降水量具有年内分配不均、时空分布区域差异性较大的特征。多年平均降雨量436~778 mm,年内降雨多集中在

5—9月,约占全年降雨量的70%。

1.2 地质环境条件

白龙江流域甘肃段位于秦岭西段,地处青藏高原、黄土高原和四川盆地交汇处,地势总体西北高、东南低。流域最高点为迭山主峰,海拔4 920 m;最低点为文县罐子沟,海拔550 m^[13]。区内地貌类型有4种:河谷阶地区、低中山区、高中山区及高山区。其中,河谷阶地区约占全区面积的6.3%;低中山区占28.8%;高中山区占55.3%;高山区占9.6%,以高中山区为主。研究区的地层岩性比较复杂,从老到新均有出露,主要有志留系、泥盆系、石炭系及二叠系的碎屑岩、板岩、千枚岩、灰岩;三叠系、侏罗系及白垩系的板岩、砂岩、页岩和砾岩;新近系、第四系的红色砂岩、砾岩、泥岩和黄土等^[14]。研究区内的新构造运动十分活跃,受喜马拉雅运动的影响,山地强烈隆升,流水急剧下切,形成典型的高山峡谷地形,相对高差多在1 000 m以上。峰尖坡陡,沟壑密集,沟谷多呈狭窄的“V”字型,沟床纵比降大,为泥石流的形成奠定了基础。

研究区位于我国南北地震带中北段,地震强烈而频发,其地震裂度为Ⅶ~Ⅷ度,历史有记载的地震多达百余次。其中,2008年5月12日,四川汶川县发生8.0级特大地震,引发了研究区内多次余震,直接松动和破坏了白龙江流域的岩土体结构和斜坡稳定性,产生了大量的松散固体物质,为泥石流活动创造了更为有利的物源条件^[15]。

1.3 泥石流发育情况

研究区内山高谷深,沟壑纵横,岩体破碎,软弱岩土广泛分布,降雨集中且多暴雨,地表裸露、生态环境脆弱,再加上不合理的人类活动,使得该区成为我国四大泥石流灾害多发区之一^[15]。

根据本次调查,研究区内共发育1 008条泥石流。其中,文县境内分布246条,占总数的24.4%;武都区境内分布235条,占总数的23.3%;迭部县境内分布194条,占总数的19.2%;宕昌县境内分布191条,占泥石流总数的19.0%;舟曲县境内分布87条,占总数的8.6%;康县境内分布55条,占总数的5.5%。近些年来,研究区内发生的规模最大,危害最严重的泥石流灾害为2010年舟曲县“8·8”泥石流,共造成了1 471人死亡,294人失踪,20 227人受灾,毁埋农田1 417亩,房屋5 508间。泥石流堆积物堵塞白龙江形成的堰塞湖使近1/3的城区被淹,县城道路交通、供水、供电、通讯系统陷入瘫痪^[16]。

1.4 泥石流类型及特征

按照泥石流流体的物质组成不同可将泥石流划分为泥流、泥石流及水石流3种类型。其中,研究区内发

育泥流 42 条, 占总数的 4.2%; 泥石流 882 条, 占总数的 87.5%; 水石流 84 条, 占总数的 8.3%。

泥流是一种含有大量泥沙的洪流, 其固体物质主要由黏粒和粉粒组成, 含石块和圆砾, 其含量一般不超过固体物质总量的 10%。泥流在宕昌县境内分布有 29 条, 在武都区境内分布有 11 条, 在康县、文县境内各分布有 1 条。区内泥流的物质来源主要是黄土滑坡、泻溜以及沟岸坍塌等, 另外陡坡耕种垦殖而产生的面蚀也是重要的固体物质来源之一。泥流规模多为中小型, 以冲蚀和淤埋的形式威胁沟口堆积区附近的村庄, 堆积扇不明显, 危害程度相对较轻。

泥石流流体物质由大量黏性土和粒径不等的砂砾、石块组成, 广泛分布于白龙江流域的六个县区, 是研究区内最常见的灾害类型。泥石流在武都区境内分布 224 条, 文县境内分布 208 条, 迭部县境内分布 192 条, 宕昌县境内分布 147 条, 舟曲县境内分布 87 条, 其余 24 条

分布在康县境内。泥石流的物质来源主要是沟谷中的滑坡、崩塌等重力堆积物和沟道堆积物再搬运, 另外大规模的采矿、修路弃渣弃土也是重要的物质来源之一。大型沟谷及其支沟往往是泥石流发育的地区, 规模多为中小型, 爆发突然, 搬运能力强大, 多携带漂石, 在沟口常形成规模较大的堆积扇, 危害程度相对较严重。

水石流是由水和砂、砾石组成的特殊流体, 其黏粒含量小于泥石流和泥流, 它的性质和形成特征类似山洪。水石流主要集中分布在宕昌县、康县和文县 3 个县区植被覆盖良好、水土流失较轻的地区, 其中文县境内分布 37 条, 康县境内分布 30 条, 宕昌县境内分布 15 条, 剩余 2 条分布在迭部县境内。区内水石流的固体物质来源主要为风化堆积、坡积及重力堆积碎块石等, 泥质含量少。规模以中小型居多, 爆发频率低, 加之水石流堆积物分选较好, 搬运能力相对较弱, 以冲蚀危害为主, 危害程度相对较轻。

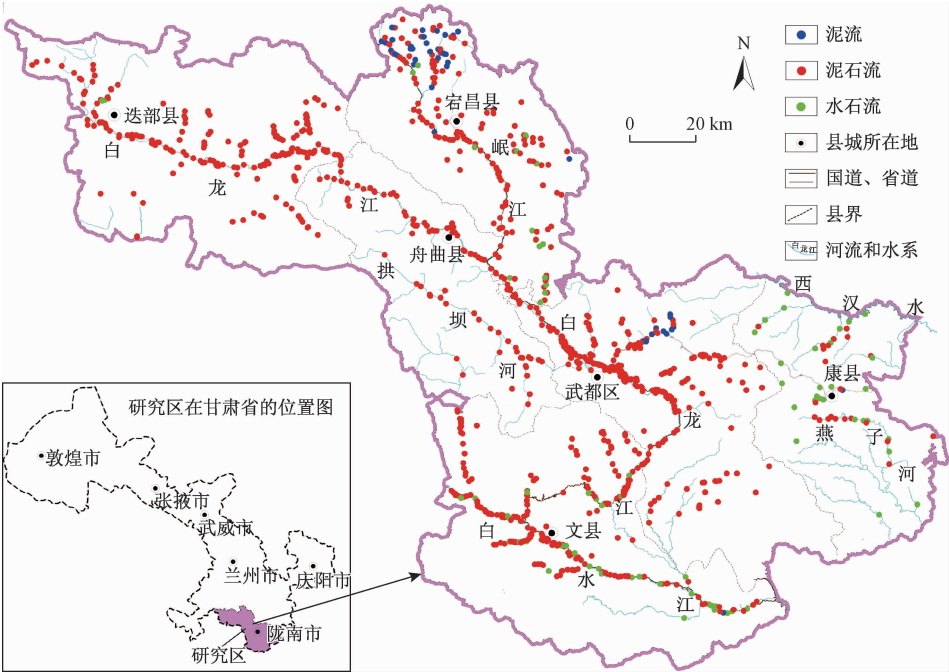


图 1 研究区位置及泥石流分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of debris flows

1.5 泥石流易发性等级

参照《泥石流灾害防治工程勘查规范 (DZ/T0220—2006)》^[18]中推荐的“泥石流沟易发程度数量化评分标准表”对研究区内 1 008 条泥石流沟的流域面积、流域相对高差、沟岸山坡坡度等 15 项因子逐个打分, 然后求和计算每条泥石流沟的总分, 按照该规范 (表 1) 划分泥石流的易发性等级。评价结果显示: 高易发泥石流沟有 63 条, 占总数的 6.2%; 中易发泥石流沟有 552 条, 占总数的 54.8%; 低易发泥石流沟有

393 条, 占总数的 39.0%; 总体来看, 研究区内的泥石流易发性等级以中—低易发为主, 高易发次之。

表 1 泥石流沟易发程度数量化综合评判等级标准
Table 1 Standards for quantitative comprehensive evaluation grade of the debris flow susceptibility

易发性等级及 得分	高易发 116 ~ 130	中易发 87 ~ 115	低易发 44 ~ 86	不易发 15 ~ 43
研究区评价结果/条	63	552	393	0
占比	6.2%	54.8%	39.0%	0

2 地形因素对泥石流形成的影响

2.1 沟床比降(J)

沟床比降是泥石流物质由势能转化为动能的重要条件,也是影响泥石流形成和运动的重要因素。沟床比降既表现沟谷坡面侵蚀与沟道侵蚀的相互关系,又反映出泥石流沟的发育状况^[3]。通过对区内泥石流沟谷的沟床比降进行统计分析发现(表2):沟床比降在200‰~400‰的区间内集中发育各类泥石流沟550条,占总数的54.56%,发育类型以泥石流为主;该区间内高易发泥石流有43条,中易发的有348条,低易发的有159条,以中易发泥石流为主。以上数据说明此区间内的沟床比降对泥石流的形成和运动最为有利,泥石流活动较为频繁。

表2 研究区泥石流沟床比降

Table 2 Statistics of the groove gradient for debris flows in the study area

沟床比降 $J/\%$	各类型泥石流的数量/条			各易发性等级的数量/条		
	泥流	泥石流	水石流	低易发	中易发	高易发
$J \leq 100$	16	147	7	113	56	1
$100 < J \leq 200$	18	128	8	82	64	8
$200 < J \leq 300$	2	252	31	85	173	27
$300 < J \leq 400$	5	234	26	74	175	16
$J > 400$	1	121	12	39	84	11
总计	42	882	84	393	552	63

2.2 沟坡坡度(S)

沟坡坡度对泥石流的影响主要表现在两方面:(1)流域两侧沟坡的陡缓直接影响到泥石流的规模和固体物质的补给方式与数量;(2)流域的沟坡坡度越大,坡面流速和沟道汇流速度越快,降雨形成洪峰所需的时间越短,从而使泥石流具备成灾的水源条件^[3]。通过对区内泥石流沟谷的沟坡坡度数据进行统计分析发现(表3):坡度大于30°的沟坡所发育的各类泥石流数目最多,共计838条,占总数的83.13%,发育类型以泥石流为主;该区间内高易发泥石流有47条,中易发的有419条,低易发的有362条,以中易发泥石流为主。

表3 研究区泥石流沟坡坡度

Table 3 Statistics of the gully slope for debris flows in the study area

坡度区间 $S/(\circ)$	各泥石流类型的数量/条			各易发性等级的数量/条		
	泥流	泥石流	水石流	低易发	中易发	高易发
$S \leq 10$	1	1	0	0	2	0
$10 < S \leq 20$	4	19	1	4	18	2
$20 < S \leq 30$	12	115	17	27	103	14
$30 < S \leq 40$	18	433	43	203	262	29
$S > 40$	7	314	23	159	167	18
总计	42	882	84	393	552	63

2.3 相对高差(H)

相对高差主要体现泥石流流域的地形起伏程度和切割侵蚀强度,与沟床比降的关系密切。经统计分析(表4):区内各类泥石流集中发育在山体相对高差大于300 m的区间,共计915条,占总量的90.77%,发育类型以泥石流为主;该区间内高易发泥石流有63条,中易发的有514条,低易发的有338条,以中易发泥石流为主。

表4 研究区泥石流相对高差

Table 4 Statistics of the relative elevation difference for debris flows in the study area

相对高差 H/m	各泥石流类型的数量/条			各易发性等级的数量/条		
	泥流	泥石流	水石流	低易发	中易发	高易发
$H \leq 100$	1	2	0	3	0	0
$100 < H \leq 200$	7	44	1	30	22	0
$200 < H \leq 300$	4	33	1	22	16	0
$300 < H \leq 400$	5	89	5	50	41	8
$400 < H \leq 500$	15	102	6	61	57	5
$500 < H \leq 600$	2	133	14	55	85	9
$600 < H \leq 700$	1	111	13	39	79	7
$700 < H \leq 800$	3	121	10	46	75	13
$800 < H \leq 900$	2	128	20	43	95	12
$H > 900$	2	119	14	44	82	9
总计	42	882	84	393	552	63

2.4 流域面积(A)

流域面积是反映泥石流沟谷发育程度的重要参数^[18],泥石流大多形成于流域面积较小的沟谷内^[3],通常沟谷的流域面积较小时,说明沟谷正处于河谷地貌发育的初级乃至旺盛阶段,易于泥石流的形成和活动。但是随着流域面积的增大,沟谷发育越成熟,其相对切割程度和沟床纵比降也随之降低,沟谷发育泥石流的能力会显著降低。经统计分析:区内流域面积在10 km²之内所发育的各类泥石流数目最多,共有789条,占总数的78.27%,发育类型以泥石流为主;该区间内高易发泥石流有50条,中易发的有419条,低易发的有320条,以中易发泥石流为主(表5)。

3 影响因素的权重

3.1 权重计算方法

为了分析不同地形影响因素对泥石流灾害形成的贡献大小,本次研究采用熵权法计算4个影响因素的权重,由它们的权重大小排序来反映它们对泥石流灾害形成的贡献程度。

与传统的专家打分法及层次分析法确定权重不同,熵权法是采用信息熵的原理及方法确定指标的权重分配。该方法的最大优点在于克服了权重确定的主

表5 研究区泥石流流域面积
Table 5 Statistics of the drainage area for debris
flows in the study area

流域面积 A/km^2	各泥石流流类型的数量/条			各易发性等级的数量/条		
	泥石流	泥石流	水石流	低易发	中易发	高易发
$A \leq 10$	32	694	63	320	419	50
$10 < A \leq 20$	0	22	0	11	11	0
$20 < A \leq 30$	1	11	3	7	7	1
$30 < A \leq 40$	1	26	2	10	19	0
$40 < A \leq 50$	2	18	4	7	13	4
$50 < A \leq 60$	1	22	2	8	16	1
$60 < A \leq 70$	1	24	5	8	21	1
$70 < A \leq 80$	1	12	2	8	5	2
$80 < A \leq 90$	2	26	0	6	21	1
$90 < A \leq 100$	0	16	2	6	9	3
$100 < A \leq 110$	0	4	0	1	3	0
$110 < A \leq 120$	0	3	0	1	2	0
$130 < A \leq 140$	1	3	0	0	4	0
$A > 140$	0	1	1	0	2	0
总计	42	882	84	393	552	63

观性,有效避免了人为因素的干扰,从而使结果更为客观和准确。信息熵是信息论中用于度量信息量的一个概念,反映系统有序化程度。一个系统越是混乱,信息熵就越高,反之,越是有序,信息熵就越低。如果指标的信息熵越小,该指标提供的信息量就越大,在综合评价中所起作用越大,权重也应该越高。其主要的计算步骤如下:

(1)假定评价对象有 m 个,每个对象的评价指标有 n 个,构建判断矩阵 R :

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2)将判断矩阵 R 进行归一化,得到归一化判断矩阵 B :

对于越大越优型指标而言,有:

$$b_{ij} = (r_{ij} - r_{\min}) / (r_{\max} - r_{\min}) \quad (2)$$

对于越小越优型指标而言,有:

$$b_{ij} = (r_{\max} - r_{ij}) / (r_{\max} - r_{\min}) \quad (3)$$

根据传统的熵概念可定义各评价指标的熵为:

$$H_j = - \left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) / \ln m \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$\text{其中, } f_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^m b_{ij} \quad (5)$$

显然当 $f_{ij} = 0$ 时, $\ln f_{ij}$ 无意义,因此对 f_{ij} 的计算加以修正:

$$f_{ij} = (1 + b_{ij}) / \sum_{j=1}^m (1 + b_{ij}) \quad (6)$$

(3)计算各评价指标的熵权 W :

$$W = (\omega_j)_{1 \times n} \quad (7)$$

$$\omega_j = (1 - H_j) / (n - \sum_{j=1}^n H_j), \text{且满足 } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$$

3.2 权重计算

对研究区内发育的 1 008 个泥石流灾害样本数据按照式(1)~(7)计算各影响因素的权重,其中 $m = 1\,008, n = 4$,构造出判断矩阵。通过上文中地形因素对泥石流灾害形成的影响分析,沟床比降、沟坡坡度、相对高差为越大越优型指标,流域面积为越小越优型指标,按照式(2)~(3)对判断矩阵进行归一化,得到归一化矩阵。按照式(4)~(6)计算各指标的熵 H_j ,按照式(7)确定各指标的熵权 W_j ,计算出的熵 H_j 及熵权 W_j 见表 6。

表6 各影响因素的熵及熵权值
Table 6 Calculation of the entropy and entropy weight
for each influence factor

影响因素	沟床比降	沟坡坡度	流域面积	相对高差
熵 H_j	0.997 60	0.999 28	0.999 26	0.998 30
熵权 W_j	0.431 34	0.130 06	0.132 83	0.305 77

3.3 权重排序

由计算结果可看出,信息熵最大的为沟坡坡度,最小的为沟床比降,中间依次为流域面积及相对高差。按照信息熵理论,如果指标的信息熵越小,则该指标提供的信息量越大,在综合评价中所起作用越大,权重也应该越高。本文最终计算出的熵权也符合该理论,即沟床比降所占的权重最大,为 0.431 34;其次为相对高差,权重为 0.305 77;流域面积所占的权重比沟坡坡度略大一些,分别为 0.132 83 和 0.130 06。由此说明在这 4 个影响因素中,对泥石流灾害形成贡献程度最大的为沟床比降,其次为相对高差和流域面积,最小的为沟坡坡度。将本文排序结论与相关研究成果^[11-12]对比,基本一致,验证了该方法的合理性及可靠性。

4 结论及建议

(1)通过统计分析区内 1 008 条泥石流沟的沟床比降、沟坡坡度、流域面积和相对高差数据对泥石流形成的影响,得出:在 200‰~400‰ 区间内的沟床比降、坡度大于 30° 的沟坡、相对高差大于 300 m 的山体、小于 10 km² 的流域面积对泥石流的形成和运动最为有利,泥石流活动较为频繁,发育类型以泥石流为主。

(2)通过熵权法计算出 4 个影响因素的权重,得出对泥石流的形成贡献程度最大的为沟床比降,其次为相对高差和流域面积,最小的为沟坡坡度。该结论与相关研究成果基本一致,验证了本文方法的合理性及可靠性。

(3)建议在白龙江流域开展泥石流灾害调查时,应加强对沟床比降、相对高差、流域面积以及沟坡坡度等要素的调查力度和描述,为今后泥石流防治提供详细的基础数据。

参考文献:

- [1] 朱渊,余斌,亓星,等. 地形条件对泥石流发育的影响——以岷江流域上游为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(1): 268 – 277. [ZHU Y, YU B, QI X, *et al.* Topographical factors in the formation of gully type debris flows in the upper reaches of Mingjiang River [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(1): 268 – 277. (in Chinese)]
- [2] 赵忠海,朱红军. 基于 GIS 的北京山区泥石流影响因素及发生概率评价[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(4): 412 – 415. [ZHAO Z H, ZHU H J. Occurrence probability evaluation and influencing factors of debris flow in Beijing mountainous area based on GIS [J]. Resources Environment and Engineering, 2010, 24(4): 412 – 415. (in Chinese)]
- [3] 伦国星,周斌,等. 地形条件对兰州市泥石流灾害形成影响分析[J]. 甘肃地质, 2011, 20(4): 65 – 70. [LUN G X, ZHOU B, *et al.* Impact of landform to debris flow disasters in Lanzhou [J]. Gansu Geology, 2011, 20(4): 65 – 70. (in Chinese)]
- [4] 薛强,曾庆铭,徐继维. 都江堰市龙池镇煤炭坪泥石流形成条件及特征[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(2): 115 – 121. [XUE Q, ZENG Q M, XU J W. Formation conditions and characteristics of Meitanping gully debris flow in Longchi Town, Dujiangyan City [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(2): 115 – 121. (in Chinese)]
- [5] 冯茵,杨武年,张林等. 岷江上游地貌侵蚀对泥石流发育的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 16 – 25. [FENG Y, YANG W N, ZHANG L, *et al.* Influence of geomorphology erosion on debris flow development on upperstream of Minjiang River [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2): 16 – 25. (in Chinese)]
- [6] 杨东旭,游勇,陈晓清,等. 汶川震区狭陡型泥石流典型特征与防治[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 146 – 153. [YANG D X, YOU Y, CHEN X Q, *et al.* Typical characteristics and mitigation of debris flow in narrow-steep gullies in the Wenchuan earthquake areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 146 – 153. (in Chinese)]
- [7] 余斌,王涛,朱渊. 浅层滑坡诱发沟谷泥石流的地形和降雨条件[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 542 – 550. [YU B, WANG T, ZHU Y. Research on the topographical and rainfall factors of debris flows caused by shallow landslides [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 542 – 550. (in Chinese)]
- [8] 张鹏丽,李育. 地形要素对西北干旱区河谷型城市泥石流的影响[J]. 兰州大学学报(自然资源版), 2017, 53(5): 593 – 597. [ZHANG P L, LI Y. Influence of topographical factors on debris flow in valley cities in northwest China [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2017, 53(5): 593 – 597. (in Chinese)]
- [9] 张以晨,秦胜伍,翟健健,等. 基于信息量的长白山地区泥石流易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 150 – 158. [ZHANG Y C, QIN S W, ZHAI J J, *et al.* Susceptibility assessment of debris flow based on GIS and weight information for the Changbai mountain area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 150 – 158. (in Chinese)]
- [10] 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 Q H, XU C L, XIANG Y B, *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 Environment Preservation, 2010, 21(3): 72 – 78. (in Chinese)]
- [11] 朱云波,余斌,王治兵,等. 四川德昌茨达“8·24”群发性滑坡泥石流之地形条件[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 108 – 115. [ZHU Y B, YU B, WANG Z B, *et al.* Topographic research of group-occurring landslide-induced debris flow in Dechang, Sichuan [J]. Mountain Research, 2015, 33(1): 108 – 115. (in Chinese)]
- [12] 马煜,李彩侠. 地形因子对四川龙溪河流域泥石流发生的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 16 – 25. [MA Y, LI C X. Effect of topographic factor on the formation of debris flows in Longxi River area, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 16 – 25. (in Chinese)]
- [13] 贾贵义,全永庆,黎志恒,等. 基于组合赋权法的白龙江流域甘肃段地质灾害危险性评价[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1227 – 1236. [JIA G Y, QUAN Y Q, LI Z H, *et al.* Geo-hazards assessment

- for the Gansu segment in Bailongjiang River basin based on combination weighting method [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1227 – 1236. (in Chinese)]
- [14] 韩金华. 基于 GIS 的白龙江流域泥石流危险性评价研究[D]. 兰州:兰州大学, 2010. [HAN J H. Study on GIS-based risk assessment on debris flows of Bailong Basin [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. (in Chinese)]
- [15] 赵艳萍. 白龙江流域泥石流分布规律及其影响因素研究[D]. 兰州:兰州大学, 2013. [ZHAO Y P. Study on the regularity of debris flow distribution and influence factors in Bailong River Basin. [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)]
- [16] 胡向德, 黎志恒, 魏洁, 等. 舟曲县三眼峪沟特大型泥石流的形成和运动特征 [J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(4): 82 – 87. [HU X D, LI Z H, WEI J, *et al.* Formation and kinematic characteristics of the debris flow disaster at the Sanyanyu gully, Zhouqu County of Gansu Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(4): 82 – 87. (in Chinese)]
- [17] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘察规范: DZ/T 0220—2006 [S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2006. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Code for Investigation of Mitigation and Prevention Engineering of Debris Flow: DZ/T0220—2006 [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2006. (in Chinese)]
- [18] 韩征, 徐林荣, 苏志满, 等. 基于流域形态完整系数的泥石流容重计算方法 [J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(2): 100 – 105. [HAN Z, XU L R, SU Z M, *et al.* Research on the method for calculating the bulk density of debris flow based on the integrity coefficient of watershed morphology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2): 100 – 105. (in Chinese)]

编辑:汪美华

(上接第 32 页)

- [6] MALVICINI C F, STEENHUIS T S, WALTER M T, *et al.* Evaluation of spring flow in the uplands of Matalom, Leyte, Philippines [J]. *Advances in Water Resources*, 2005, 28(10): 1083 – 1090.
- [7] 黄敬熙. 流量衰减方程及其应用——以洛塔岩溶盆地为例 [J]. *中国岩溶*, 1982, 1(2): 41 – 49. [HUANG J X. Recession equation and its application-case history of Luota karst basin [J]. *Carsologica Sinica*, 1982, 1(2): 41 – 49. (in Chinese)]
- [8] 缪钟灵, 缪执中. 指数衰减方程在地下水研究中的运用 [J]. *勘察科学技术*, 1984(5): 1 – 6. [MIAO Z L, MIAO Z Z. Application of recession equation in groundwater studies [J]. *Investigation Science and Technology*, 1984(5): 1 – 6. (in Chinese)]
- [9] 劳文科, 蓝芙宁, 蒋忠诚, 等. 石期河流域岩溶水系统及其水资源构成分析 [J]. *中国岩溶*, 2009, 28(3): 255 – 262. [LAO W K, LAN F N, JIANG Z C, *et al.* Analysis on karst groundwater system and its water resources composition in Shiqihe basin [J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(3): 255 – 262. (in Chinese)]
- [10] 尹德超, 罗明明, 周宏, 等. 鄂西岩溶槽谷区地下河系统水资源构成及其结构特征 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 13 – 18. [YIN D C, LUO M M, ZHOU H, *et al.* Water resources composition and structure characteristics of the underground river system in the karst ridge-trough in the Western Hubei Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 13 – 18. (in Chinese)]
- [11] 罗明明, 陈植华, 周宏, 等. 岩溶流域地下水调蓄资源量评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 14 – 20. [LUO M M, CHEN Z H, ZHOU H, *et al.* Assessment of regulating groundwater resources in karst watersheds [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 14 – 20. (in Chinese)]
- [12] 常勇, 吴吉春, 刘玲, 等. 岩溶泉流量衰减曲线分析 [J]. *水文*, 2016, 36(1): 15 – 21. [CHANG Y, WU J C, LIU L, *et al.* Analysis on recession curve of karst spring [J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(1): 15 – 21. (in Chinese)]
- [13] 林敏. 泉流量衰减方程中 α 系数物理意义的探讨 [J]. *勘察科学技术*, 1984(5): 6 – 10. [LIN M. Discussion for physical significance of coefficient in spring flow atenuation [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1984(5): 6 – 10. (in Chinese)]

编辑:张若琳