

doi: 10.12029/gc20220305

王高峰,高幼龙,姚亚辉,田运涛,徐友宁,孙秀娟,李瑞冬,何元宵,邓兵,叶振南,陈宗良,郭宁. 2022. 甘肃省白龙江流域降雨型潜在泥石流危险性预报模型[J]. 中国地质, 49(3): 732-748.

Wang Gaofeng, Gao Youlong, Yao Yahui, Tian Yuntao, Xu Youning, Sun Xiujian, Li Ruidong, He Yuanxiao, Deng Bing, Ye Zhennan, Chen Zongliang, Guo Ning. 2022. Prediction model of potential debris flow hazard of rainfall type in Bailong River Basin, Gansu Province[J]. Geology in China, 49(3): 732-748(in Chinese with English abstract).

## 甘肃省白龙江流域降雨型潜在泥石流危险性预报模型

王高峰<sup>1,2</sup>,高幼龙<sup>2</sup>,姚亚辉<sup>2</sup>,田运涛<sup>2</sup>,徐友宁<sup>3</sup>,孙秀娟<sup>2</sup>,李瑞冬<sup>4</sup>,  
何元宵<sup>5</sup>,邓兵<sup>2</sup>,叶振南<sup>2</sup>,陈宗良<sup>2</sup>,郭宁<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院,北京 100084;2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051;3. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710061;4. 甘肃省地质环境监测院,甘肃 兰州 730050;5. 四川省地质调查院,四川 成都 610081)

**摘要:**【研究目的】泥石流灾害是白龙江流域分布广泛并常引起群死群伤的重大地质灾害,准确评价泥石流活动规模及其危险度,是泥石流危险性预警预报的前提,合理构建危险性预报模型是泥石流防灾减灾的关键。【研究方法】本文以研究区历史泥石流案例和对应降雨资料为基础数据,采用统计分析方法,通过分析形成泥石流关键地质环境条件及其相互关系,构建了白龙江流域潜在泥石流危险度定量评价模型,提出了两类泥石流危险级别临界判别模式。【研究结果】结果表明:(1)以泥石流活动规模、沟床平均比降、流域切割密度、不稳定沟床比例为判断因子的泥石流危险度动态定量计算模型,能快速准确预测未来不同工程情景和降雨频率工况下泥石流危险度;(2)影响降雨型泥石流发生的地形条件由流域面积、10°~40°斜坡坡度面积比、沟床平均纵比降等组成,降雨条件主要由泥石流爆发前的 24 h 累积降雨量、触发泥石流 1 h 降雨量或 10 min 降雨量等组成;(3)依据 30 条典型泥石流沟危险度计算结果,获得泥石流危险性临界判别值,提出了降雨型潜在泥石流危险性 1 h 预报模型(I 类)和 10 min 预报模型(II 类),其中 I 类模型高危度以上泥石流预测精度大于 87.5%,II 类模型中等危险度以上泥石流预测精度大于 80%,而两类预报模型验证准确率为 83.3%。【结论】研究成果为泥石流精准预警预报提供了技术支撑,对建立中小尺度泥石流实时化预警系统具有一定参考意义。

**关键词:**泥石流;危险性预报模型;地形条件;降水条件;地质灾害调查工程;白龙江流域;甘肃省

**创新点:**通过确定与泥石流相对应关键地质环境因子,构建了泥石流危险度动态定量评价模型,依据泥石流危险性 1 h 和 10 min 临界判别模式可准确实现潜在泥石流预警预报。

中图分类号: P642.23 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)03-0732-17

## Prediction model of potential debris flow hazard of rainfall type in Bailong River Basin, Gansu Province

WANG Gaofeng<sup>1,2</sup>, GAO Youlong<sup>2</sup>, YAO Yahui<sup>2</sup>, TIAN Yuntao<sup>2</sup>, XU Youning<sup>3</sup>, SUN Xiujian<sup>2</sup>,  
LI Ruidong<sup>4</sup>, HE Yuanxiao<sup>5</sup>, DENG Bing<sup>2</sup>, YE Zhennan<sup>2</sup>, CHEN Zongliang<sup>2</sup>, GUO Ning<sup>2</sup>

收稿日期:2020-04-29;改回日期:2020-06-11

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160281、DD20190646、DD20221747)资助。

作者简介:王高峰,男,1984年生,博士生,高级工程师,主要从事地质灾害调查评价工作;E-mail:wgf\_cgcs303@163.com。

通讯作者:姚亚辉,男,1990年生,工程师,主要从事工程地质、地热地质调查研究工作;E-mail:yaoyahui@mail.cgs.gov.cn。

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100084, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geology Survey, Baoding 071051, Hebei, China; 3. Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 4. Geo-Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China; 5. Sichuan Geological Survey Institute, Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** This paper is the result of geological hazard survey engineering.

**[Objective]** Debris flow is a major geological disaster widely distributed in Bailong River Basin and often causes mass casualties. Accurate evaluation of the scale and risk of debris flow is the premise of the early warning and prediction of debris flow. Reasonable construction of risk prediction model is the key to debris flow disaster prevention and reduction. **[Method]** Based on the reported debris flow cases and corresponding rainfall data in the study area, the quantitative evaluation model of potential debris flow risk in Bailong River Basin is constructed by analyzing the key geological environmental conditions and their relationship, and two kinds of critical discrimination models of debris flow risk level are proposed. **[Results]** The results show that: (1) The dynamic quantitative calculation model of debris flow risk degree with debris flow activity scale, average gradient of gully bed, watershed cutting density and unstable gully bed ratio can be used as judgment factors to quickly and accurately predict the risk degree of debris flow under different engineering scenarios and rainfall frequencies in the future; (2) The topographic conditions affecting the occurrence of rainfall type debris flow are composed of watershed area, slope area ratio of  $10^{\circ}$ – $40^{\circ}$ , average longitudinal ratio of gully bed, etc; the rainfall conditions are mainly composed of 24 h cumulative rainfall before the outbreak of debris flow, 1 h rainfall or 10min rainfall triggering debris flow, etc; (3) Based on the risk calculation results of 30 typical debris flow gullies, the critical discrimination value of debris flow risk is obtained, and the 1h prediction model and 10min prediction model of potential debris flow risk of rainfall type are proposed. Among them, the prediction accuracy of debris flow above high risk of class I model is greater than 87.5%, the prediction accuracy of debris flow above medium risk of class II model is greater than 80%, and the verification accuracy of the two prediction models is 83.3%. **[Conclusions]** The research results provide technical support for the accurate early warning and prediction of debris flow, and have a certain reference significance for the establishment of small and medium-sized debris flow real-time early warning system.

**Key words:** debris flow; hazard prediction model; topographic conditions; rainfall conditions; geological hazard survey engineering; Bailong River basin; Gansu Province

**Highlights:** By determining the key geological environmental factors corresponding to debris flow, a dynamic quantitative evaluation model of debris flow risk is constructed. According to the critical discrimination model of debris flow risk for 1h and 10min, the early warning and prediction of potential debris flow can be realized accurately.

**About the first author:** WANG Gaofeng, male, born in 1984, senior engineer, doctor candidate, mainly engaged in geological disaster investigation and evaluation; E-mail: wgf\_cgcs303@163.com.

**About the corresponding author:** YAO Yahui, male, born in 1990, engineer, mainly engaged in the research of engineering geology and geothermal geology; E-mail: yaoyahui@mail.cgs.gov.cn.

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey (No. DD20160281, No. DD20190646, No. DD20221747).

## 1 引言

泥石流预警预报是自20世纪80年代以来地质灾害领域的研究热点之一,并已成为世界各国防灾减灾战略体系的重要组成部分。从研究区域可见中国在泥石流预警预报研究主要分布在西南山区(王治华等,2011;唐川等,2014;张永双等,2016;许强等,2018;温铭生等,2019)及北京地区(魏永明等,1997;白利平等,2008;丁桂伶等,2017),并形成较为详细的预警预报体系。这些区域和单沟泥石

流预警预报模型研究都是在泥石流形成理论的指导下构建,首先获取泥石流的易发性或危险性,建立相应的数学表达式,最终形成以降雨因素为诱发条件的降雨型泥石流预报模型。

从1970年开始,国内诸多学者针对白龙江流域泥石流开展了大量的调查、评价、监测和理论研究,并建立了相关野外观测站,取得了丰硕的成果和积累了大量的野外调查监测资料,为后续研究工作提供了真实可靠的基础数据和相应的防灾减灾管理依据。白龙江流域早期已对地质灾害气象风险预警及

降雨诱发泥石流灾害指数特征等方面开展了研究(王锡稳等,2004;王志禄等,2005),特别是近年来,有学者进行了不同尺度泥石流爆发临界降雨阈值的研究工作。在大比例尺区域方面,通过对降雨对泥石流、滑坡关系分析,分类型建立了甘肃省泥石流、滑坡24h实时降雨预报模型(郭富赞等,2015);以陇南山区地质灾害敏感性为依据,并结合有效降雨量提出了适合陇南地区的地质灾害风险预警模型(罗鸿东等,2019)。针对单沟泥石流方面,以三眼峪泥石流为例,研究了不同条件下触发不同预警级别泥石流的降雨强度与历时的关系,认为诱发舟曲泥石流灾害降雨特征为两种即短历时强降雨和持续性小雨强降雨,并将降雨预警级别划分为4级和两个预备预警级别(高波等,2016;许继维等,2017)。

然而陡峻的地形、丰富的不稳定物源和充足的水源是泥石流发生的3大必备条件。根据泥石流形成条件,专家学者建立了泥石流易发程度判别关系式(谭炳炎,1990),并提出泥石流综合风险评价概念模型(刘希林,2010)。随着科技的进步,逐渐形成了基于专家经验和地形特征定性分析法、基于原始样本数据统计学模型分析法及基于物理动力学确定性模型的众多泥石流危险度评价模型和方法(杨艳等,2012;解咏平等,2016;杨小凤等,2017;王一鸣等,2018;尚慧等,2019)。实际中流域的地形条件在一定时间内是相对稳定的,而物质条件受地震和人为因素的影响具有时变性,降雨往往是激发泥石流活动最为活跃的主导因素,此外,泥石流危险性大小还与泥石流沟道堵塞情况有关。因此,在泥石流灾害评价研究中,多针对上述3大条件中的主要控制因素来评判泥石流发生的危险性程度。由于形成泥石流的地理环境条件复杂,泥石流潜在危险性受多种内外因素影响,因而泥石流危险度研究的关键为评价因子选取及其权重确定。故应综合考虑泥石流孕育及爆发过程中各因素之间的相互关系,将各因素内部相互关联较强的一些因子归并为少数几个综合因子,建立指标参数对快速准确获取、物理意义明确及关系清晰的普适性泥石流危险度评价模型具有重要意义。

上述成果主要集中于对单体或区域尺度,而关

于小区域或小流域降雨诱发下的泥石流危险性预警预报研究甚少,目前仍然缺乏具体灾点泥石流防治必需的气象预警预报成果地图。且已有的危险度评价因子过多,未考虑工程情景不同降雨频率下泥石流活动动态变化,因此,需要寻找新的科学有效的技术方法构建降雨型泥石流潜在危险度预测模型。此外,区域研究比例尺较大,预测预报模型大多基于统计学分析,对具体某一灾点的详细信息获取过于粗糙,难以应用到单沟泥石流临灾预案制定。同时由于白龙江流域所处的孕灾环境和气候条件特殊,泥石流发育规律独具区域特色,其他地区的单沟泥石流预警研究成果,由于使用条件局限性大,未必完全适用于白龙江流域降雨型泥石流的预警预报。因小区域泥石流危险性预测评价结果准确可靠、精度较高、实用性强,能获得优质的地图产品,可为泥石流防治和山区城镇化建设精细化风险管控提供更为可靠的依据,同时能有效提升泥石流普适性监测预警覆盖面和预警精度,更大程度掌握泥石流孕育发生条件和发展演化规律,提高对泥石流灾害机理认识和防灾减灾能力。从泥石流的防灾减灾及监测预警需求出发,认为中小尺度泥石流潜在危险度预测预报更有社会服务应用意义。

白龙江流域地层岩性多样、地质条件特殊,由此引发的地质灾害发育与分布广泛,是甘肃省地质灾害最为频繁的地区,每年造成的经济损失巨大,其中泥石流灾害的严重性亦是众所周知。特别是2010年“8.7”舟曲特大山洪泥石流灾害,灾害造成1765人遇难和失踪,其规模及造成的人员财产损失为全国之最(余斌等,2010)。这些泥石流事件在形成机理上属降雨诱发沟床起动型,是造成重大泥石流灾害发生的重要原因,开展这类泥石流的预测预报工作,是减轻泥石流事件造成生命财产损失的有效手段。因此,本文选取白龙江流域泥石流灾害高易发区石门乡至外纳乡地段共30条典型泥石流沟为研究对象。分析泥石流形成的地形、地质和降雨三大条件,建立了因子关系清晰的泥石流危险度计算公式。并引入泥石流流域地形因子和综合地质因子,在以往研究泥石流降雨预测成果的基础上,剖析地形地质因子与降雨因子之间的关系,提出该类控灾因子下泥石流危险度分区的临界条件。以支撑泥石流防灾减灾规划,为构建降雨

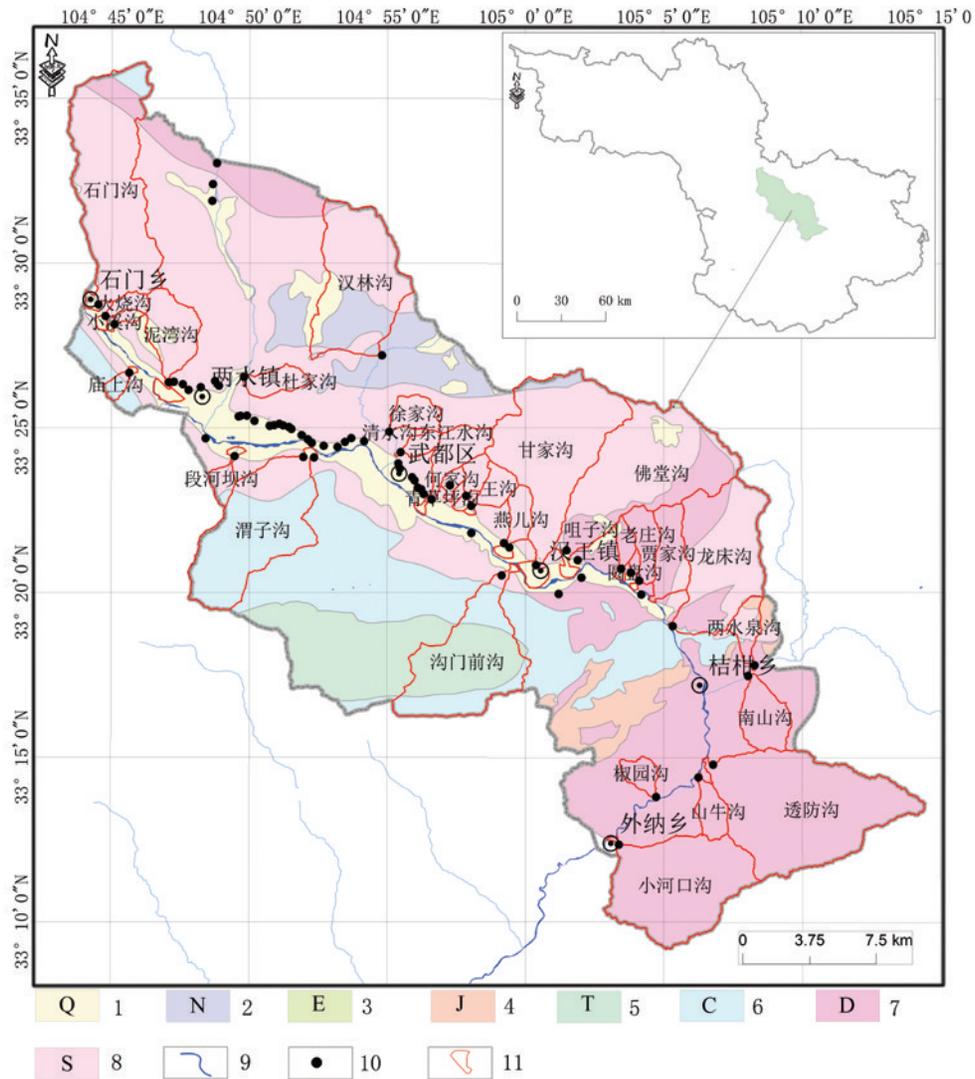


图1 研究区典型泥石流沟分布及地层岩层示意图

1—第四系;2—新近系;3—古近系;4—侏罗系;5—三叠系;6—石炭系;7—泥盆系;8—志留系;9—水系;10—泥石流点;11—典型泥石流沟范围

Fig. 1 Distribution of typical debris flow gullies and strata in the study area

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Paleogene; 4—Jurassic; 5—Triassic; 6—Carboniferous; 7—Devonian; 8—Silurian; 9—Water system; 10—Debris flow point; 11—Typical debris flow gullies coverage

型泥石流预报模型奠定基础。

## 2 研究区环境概况

研究区位于白龙江流域甘肃段中下游石门乡至外纳乡段,面积956.2 km<sup>2</sup>(图1),地理坐标:104°43'24.4"~105°14'27.3"E,33°09'12.7"~33°36'06.3"N。

地形地貌上属秦岭山地西缘,区内最高海拔3410 m,最低868 m,最大相对高差2542 m,泥石流沟床平均比降在130‰~750‰,形成区多发育“大肚

子”状地貌特征,易于降水汇集和泥石流输移。本区位于南秦岭褶皱带和松潘—甘孜褶皱带两个不同构造体系的交汇部位,发育一系列活动的逆冲断裂和走滑断裂,且局部次级断裂和小型褶皱集中发育,新构造运动强烈和地震活动频繁(李淑贞等,2015)。其中北部主要受NWW向的光盖山迭山断裂和近E向两当—江洛断裂影响,哈南—青山湾—稻畦子断裂近东西向穿越研究区南部。特殊的地质条件导致岩体风化破碎,为泥石流形成提供了丰

富的物源条件,同时该区复杂的构造又为泥石流孕育提供了良好的地形地貌条件。该区地层岩性多样,从志留系到第四系均有出露,尤其以志留系、泥盆系等软弱浅变质岩分布最为广泛,是区内重力型物源易发多发岩组。该区属于亚热带向北温带的过渡区,多年平均降雨量在436~778 mm,气候垂向上随海拔变化差异悬殊,在时空分布上降水分布不均匀且小气候现象明显(王高峰等,2019)。

### 3 降雨型泥石流危险性预报概念模型及数据来源

#### 3.1 概念模型构建

暴雨泥石流预报必须具备4个条件,即泥石流发生的场地基础危险性、发生的判定依据及判定指标以及可靠的雨情信息。针对区域或单沟泥石流预测预报基本思路是主要依据泥石流灾害孕灾环境和诱发泥石流事件雨量(一般为24 h雨量和前期有效降雨量),采用统计分析方法或非线性数学模型,分别确定泥石流的易发性和激发降雨阈值,根据灾害事件的位置和时间,建立研究区泥石流预测预报经验公式。特别是近年来一些地区利用智能化地质灾害动态监测网络,在基于灾害调查及其动力过程分析的基础上,对预警模型进行新的修正,使得预警区划结果更加切合实际。

根据泥石流预警预报思路,关于降雨型泥石流预测模型,目前已有多个区域性或单体的降雨阈值公式。由于白龙江流域沟谷泥石流主要形成机理为沟床起动类泥石流,即在短历时强降雨作用下,大量降水在山坡坡面形成渗流及地表径流,后汇集

于主沟道并形成强大的山洪,强烈冲蚀沟道内松散固体物质,继而揭底参与泥石流活动。此外,以往构建的沟床启动型泥石流预报模型是不完全属于样本统计模型,而是建立在泥石流形成机理上的模型。故本文以小区域暴雨泥石流预测模型(王治华等,2012)和沟床启动型泥石流预报模型(余斌等,2014)为指导,来构建白龙江流域中小尺度降雨型泥石流潜在危险性预测预报模型,公式如下:

$$D = \left( \frac{R_1}{R_{1\text{临}}} + \frac{R_{24}}{R_{24\text{临}}} \right) \times (M_i \times T_i), (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

$$P = RT^{0.2}/G^{0.5} \geq C_r \quad (2)$$

式(1)为小区域暴雨泥石流预测概念模型,其中 $R_1$ 为最大1 h降雨量(mm); $R_{1\text{临}}$ 为触发泥石流的1 h临界雨量(mm); $R_{24}$ 为24 h降雨量(mm); $R_{24\text{临}}$ 为触发泥石流的24h临界降雨量(mm); $M_i$ 为流域内形成泥石流的物质条件; $T_i$ 为流域内形成泥石流的地形条件函数; $n$ 为泥石流危险性级别数, $n=4$ ,即极高、高、中、低危险区。式(2)为沟床启动型泥石流预测概念模型,其中 $P$ 为预警值; $C_r$ 为判据临界值; $R$ 为降水因子; $T$ 为地形条件; $G$ 为地质条件。

根据上述关系分别用一个综合因子代表形成泥石流的地形、地质和降雨等三大条件,再分析它们之间的关系,分别构建10 min、1 h沟床起动类降雨型泥石流潜在危险性预测预报模型。图2为根据研究区实际泥石流孕灾地质情况及灾害发育特征建立的该区降雨型泥石流潜在危险度预测预报概念模型流程图。

#### 3.2 数据来源

本文开展泥石流潜在危险性预报的数据源主

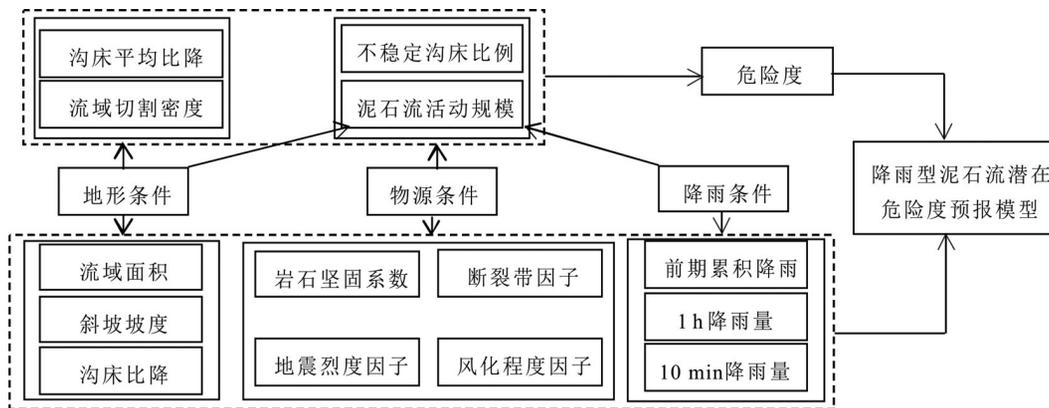


图2 降雨型泥石流潜在危险性预测预报流程示意图  
Fig.2 The flow chart of potential hazard prediction for rainfall-type debris flow

表1 数据类型及数据来源  
Table 1 Sources and types of data

基础数据	数据来源与制作	数据格式
DEM	地理空间数据,用于提取泥石流流域面积、山坡坡度、主沟长度、流域相对高程、流域支沟发育等	国家地理信息中心:25m×25m 栅格数据
地质数据	地层岩性分区、断裂(甘肃省地质环境监测院)及地震分布(国家地震科学数据共享中心网站)	1:100 000 区域地质图,矢量数据
遥感数据	用于泥石流物源、基本特征等解译	2015年5月至2016年5月获取的Pléiades 四波段捆绑数据(分辨率全色0.5 m+多光谱2 m),栅格数据
泥石流灾害统计	根据《陇南白龙江流域地质灾害调查成果报告》《陇南市地质灾害防治规划(2011—2020年)》、遥感影像解译	矢量数据
降雨资料	兰州中心气象台,陇南市地质灾害专业监测网络	点云(矢量)数据

要包括:(1)30条典型泥石流灾害点的基础数据主要来自2016—2018年“陇南白龙江流域地质灾害调查”数据库,如松散固体物质总量及不稳定沟床比例;(2)研究区1:50000DEM数据和Pléiades卫星遥感数据,其中DEM数据用于提取泥石流流域面积、山坡坡度、沟床平均比降、流域切割密度等信息,而Pléiades遥感影像经正射矫正、多光谱自动配准、影像融合、波段组合及图像增强,生成解译基础数据,在地学理论的指导下,通过人机交互解译,提取泥石流物源信息及其他基本特征数据;(3)1:100000构造地质图结合灾害点数据库,用于提取地层岩性、断裂及地震等信息;(4)降雨数据来源于2008—2016年63处陇南地质灾害监测预警系统气象站数据库;(5)通过整理野外勘查资料和查阅工程地质手册,获取研究区各种岩土类别物理力学参数及物理化学特征。本文所需的主要数据类型及数据源汇总见表1。

## 4 泥石流危险度评价

### 4.1 泥石流危险度评价因子确定

泥石流危险度是指在人类及所在环境中的一切事物遭受泥石流损害的可能性大小。通常为时间尺度的函数,理论上用泥石流规模-频率曲线的定积分来表达。而实际中泥石流规模和频率难以直接确定,且泥石流通常是多次重复发生、具有时空演变性等特征。因此,评价泥石流的潜在危险程度,定量给出其危险度预测值就显得非常重要,对于泥石流预警预报和减轻泥石流可能造成的生命财产损失具有重要的意义。

以白龙江流域泥石流形成条件为指导,根据前人研究成果结合白龙江流域泥石流发育分布情况(王高峰等,2019),选取泥石流活动规模、沟床平均比降、流域切割密度及不稳定沟床比例等4个因子作为研究区泥石流危险度评价指标。上述选取的泥石流危险度因子物理意义明确,因子关系清晰且相关性小,同时根据野外调查结合遥感技术能快速准确地获取这些因子数据,也可为新时期地质灾害快速调查识别提供参考。

(1)泥石流活动规模( $m, 10^4 m^3$ )。泥石流活动规模是泥石流沟严重程度的综合指标之一,其冲出松散固体物质方量越大,遭到泥石流损害的可能性就越大,往往泥石流的淤积破坏能力通过泥石流的活动规模来体现,属主要危险因子。充足的水源条件是泥石流发生的必备条件,雨量的大小对泥石流的运动特征和堆积特征都具有影响。而降雨频率与降雨量相一致,不同降雨程度其泥石流规模差异悬殊,传统的不同频率降雨情景下泥石流规模是采用雨洪法或形态调查法由泥石流流量和持续时间计算得到。白龙江流域受强烈新构造运动和频繁地震活动的影响,导致参与泥石流活动的松散固体物质大幅度增加,泥石流爆发规模也随之增强。同时由于流域内有天然堰塞体或拦挡坝的存在,可能产生链式溃决,增大泥石流容重和流量。如三眼峪泥石流沟谷内存在天然堰塞体严重堵塞沟道,致使同样降雨条件下泥石流规模增加了1.6倍,其“8.7”泥石流爆发规模是采用雨洪法计算结果的3倍。上述问题的存在需新方法、新模型来计算白龙江流域未来不同降雨频率下泥石流规模。

有关泥石流规模的计算通常有两种方法,一是考虑一次泥石流活动历时与其流量建立的理论表达式,二是通过历史发生的泥石流数据得出一次泥石流规模与某一因素或某几个因素的经验关系。对比国内研究成果发现,泥石流活动规模与流域面积、流域内松散固体物质总量有密切的联系,另外泥石流一次最大冲出量也与某一设计暴雨频率有关(王高峰等,2020)。因此,本文通过收集白龙江流域24条泥石流沟事件及降雨资料分析(袁远荣等,1982),依据有关泥石流规模的第二种计算思路,采用Matlab软件回归分析方法构建了泥石流活动规模预测模型:

$$m=0.0182 \times p \times (A_b W)^{0.5903} \quad (3)$$

式中,泥石流活动规模预测模型的复相关系数 $R^2=0.9167$ ,其中 $m$ 为泥石流在降雨频率为 $i$ 年爆发规模( $10^4 \text{ m}^3$ ); $W$ 为泥石流流域内松散固体物质总量( $10^4 \text{ m}^3$ ); $A_b$ 为未来泥石流灾害爆发区面积( $\text{km}^2$ ); $p$ 为降雨系数即 $(i/10)$ 无量纲, $i$ 为不同规模泥石流的降雨频率(年)。

修正后的泥石流活动规模预测模型对小流域单沟泥石流有广泛的应用前景。主要是因为,第一,模型充分体现了泥石流爆发的三大条件,既考虑了泥石流爆发时的流域特性,也增加了降雨频率这一诱发因子,使预测模型更符合泥石流爆发时的真实情况,同时能体现出泥石流活动规模和降雨频率为泥石流危险性评价的关键因子这一综合要素;第二,结合研究区已发生沟床启动型泥石流事件运动时的冲淤特征、物源补给过程及降雨汇集条件,利用模型对其进行验证,结果表明本模型具有较高的预测精度(王高峰等,2020)。此外,模型主要优点是输入参数易获取,能快速准确完成白龙江流域泥石流活动规模预测。结果不仅充分揭示了不同降雨条件下物源动储量,也体现了泥石流爆发的动态性,突出了物源条件和降雨条件在形成泥石流的重要性,更有利于进行泥石流动态危险度评价及防灾避险。

(2)沟床平均比降( $j, \%$ )。主沟道纵比降是影响沟谷水动力条件的重要参数之一,是泥石流获得动能维持运动的基本条件,为次要因子。沟床纵比降越大,降水汇集越快,动能迅速增加,沟道侵蚀和携带泥沙能力越强,泥石流在短时间内形成且危害

性越强。白龙江流域山高坡陡、沟谷纵比降通常较大,其泥石流爆发具有速度快、冲刷能力强、冲击力大的特点。沟床纵坡的大小可以表征泥石流的能量及活动强弱,据《泥石流沟严重程度(易发程度)数量化表》沟床纵坡大于213‰时,泥石流沟严重易发。调查发现白龙江流域泥石流沟床纵坡主要集中在200‰~500‰,占总数的63%。而小于50‰一般认为是非泥石流的清水溪沟,比降大于700‰时,陡峻的沟道很难保留固体松散物质,难以形成泥石流。而实际计算中,沟床平均比降是主沟长度和流域相对高差的函数,故本文将主沟长度和流域相对高差归并为沟床平均纵比降因子。其值是根据研究区1:1万或1:5万DEM数据结合ArcGIS分析功能,采用分区段原则计算得出。

(3)流域切割密度( $s_c, \text{km}/\text{km}^2$ )。能综合反映泥石流流域内地质地理环境要素,是水流汇集能力的表现。流域切割密度越大,该流域支沟越发育,土壤侵蚀越严重,参与泥石流活动的岩土体受降雨侵蚀和风化侵蚀能力越强,在降水的触发下,一旦发生泥石流,各支沟泥石流向主沟汇集,随着固体和液体径流增大,泥石流潜在规模和破坏力就越大。本文以各泥石流流域单元发育主支沟的总长度与泥石流沟面积的比值来表征流域切割密度这一次要因子。

(4)不稳定沟床比例( $s_u, \%$ )。即泥沙沿程补给段长度比,指沿泥石流沟谷段松散物质积累的区间累计长度占主沟道长度的百分比,为次要因子。作为泥石流启动条件之一,是判定泥石流灾害发生程度的一个重要指标,能综合描述松散固体物质补给的范围和可能补给量,从而影响泥石流规模。其值越大,表明流域内松散固体物质补给的条件越好,对泥石流危险性评价有较大影响。

#### 4.2 泥石流危险度表达式及评价结果

因此,本文采用适合研究区经改进的单沟泥石流潜在危险度评价方法,以泥石流活动规模为主要因子,以沟床平均比降、流域切割密度及不稳定沟床比例为次要因子等综合作为泥石流危险度评价指标。根据白龙江流域潜在泥石流形成的主要因子和各次要因子对泥石流危险程度贡献大小,结合以往研究成果,从对泥石流危险程度贡献最小的次要因子开始,给定其起始权数1为基本单位,依次呈

表2 改进后单沟泥石流危险度评价因子的权重系数及转换函数

Table 2 Weight coefficient and conversion function of risk assessment factor for single gully debris flow after improvement

转换赋值	权重数	权重系数	转换函数	
$M$	6	0.5	$M = 0$	$m \leq 1$
			$M = \log m/2$	$1 < m \leq 100$
			$M = 1$	$m > 100$
$J$	3	0.25	$J = 0$	$j \leq 50$ 或 $j > 700$
			$J = j/200$	$50 < j \leq 200$
			$J = 1$	$200 < j \leq 700$
$S_6$	2	0.17	$S_6 = 0.05s_6$	$0 < s_6 \leq 20$
			$S_6 = 1$	$s_6 > 20$
$S_9$	1	0.08	$S_9 = s_9/60$	$0 \leq s_9 \leq 60$
			$S_9 = 1$	$s_9 > 60$

等差形式向贡献大的方向递增,主要因子以最大次要因子权数为基准,以2为公比,呈等比级数递增。从而得到各个危险因子的权重分别为:0.5、0.25、0.17、0.08(刘希林,2010),见表2。然后对研究区30条泥石流沟考虑工程情景在不同降雨频率下泥石流危险度进行评价,改进后的泥石流危险度( $H$ )公式为:

$$H=0.5M+0.25J+0.17S_6+0.08S_9 \quad (4)$$

式中, $M$ 为泥石流规模转换值,其值取泥石流活动规模 $m$ 与沟谷工程治理后拦沙量之差的转换值; $J$ 为泥石流沟床平均比降 $j$ 的转换值; $S_6$ 为泥石流流域切割密度 $s_6$ 的转化值; $S_9$ 泥石流不稳定沟床比例 $s_9$ 的转化值。其转化函数赋值见表2。

据调查,白龙江中游50 a一遇1 h最大降雨量为41~49 mm,而三眼峪泥石流事件1 h降雨强度达到77.3 mm,相当于100 a一遇降雨频率,因此综合考虑极端降雨条件,1 h最大降雨量对应100 a一遇泥石流爆发频率。而10 min最大降雨量在16~30 mm范围内,与20~50 a一遇泥石流爆发频率一致。因本文预建立10 min和1 h泥石流潜在危险性预报模型,故主要考虑降雨频率为30 a一遇和100 a一遇条件下泥石流潜在危险度,计算结果见表3。

以往成果认为危险度等级与危险度的关系为:极低危险(0~0.2);低度危险(0.2~0.4);中度危险(0.4~0.6);高度危险(0.6~0.8);极高危险(0.8~1.0)(刘希林,2010)。为与概念预测模型等级一致,本文危险度分级采用4级划分法,将极低危险和低度

危险归并为低度危险(0~0.4),其余危险度等级范围值不变。根据表3危险度计算结果,典型沟谷中,100 a一遇降雨频率泥石流潜在危险度极高的沟谷有7条,危险度高的沟谷有13条,其余10条沟谷为危险度中等及以下;30 a一遇降雨频率泥石流潜在危险度高的沟谷有4条,其余26条沟谷为危险度中等及以下。这基本符合白龙江流域工程治理情景下降雨型泥石流的特点,也较准确地反映泥石流危险度随规模的不同而变化。

## 5 降雨型泥石流危险性预报

### 5.1 泥石流形成的地形条件分析

地形因素是泥石流形成的决定性条件,其中与泥石流形成有关的地形条件主要有形成区面积、形状系数及沟床纵比降等(余斌等,2015)。然而泥石流流域内固体松散物质总量不仅是泥石流活动规模的主要因子之一,也是泥石流形成的主要物源条件。据调查分析,影响固体松散物质诱发沟谷泥石流形成的关键地形因子主要有流域面积、沟床纵比降及流域斜坡坡度等(表4),有关沟床纵比降前节已作论述,此处不再赘。

(1)流域面积 $A$ 。泥石流流域面积与泥石流活动规模和流域内固体松散物质总量有关,流域面积较大的沟谷可能会形成较大的山洪流量,更会产生较多固体物质参与泥石流活动,导致泥石流活动规模增大。因此,可选取除堆积区以外的泥石流流域面积作为一个地形因素。

(2)斜坡坡度 $S_0$ 。研究认为大多数重力型滑坡发生在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 的斜坡坡度下(余斌等,2016)。而研究区滑坡的坡度主要集中在 $[25^\circ, 45^\circ]$ 区间,滑坡面积为 $121.68 \text{ km}^2$ ,占滑坡面积的54.3%;坡度从 $15^\circ \sim 40^\circ$ 的滑坡面积最大,滑坡面积为 $162.81 \text{ km}^2$ ,占滑坡面积的72.6%;且在 $[10^\circ, 35^\circ]$ 区间的滑坡相对面密度较大。研究区坡度范围 $[0^\circ, 77^\circ]$ ,将小于 $55^\circ$ 坡度范围按5度间隔分为多个范围,其余为一个等级,共12个坡度等级范围。通过ArcGIS空间分析工具从DEM中提取的各坡度范围栅格数据,采用确定性系数模型分别研究这些坡度范围内固体松散物质对泥石流爆发的敏感性。结果表明, $10^\circ \sim 40^\circ$ 范围的斜坡坡度 $C_r$ 值均为正值,代表滑坡变形失稳的确定性高,表明在该坡度环境内易于发生滑坡灾害,

表3 研究区30条泥石流沟不同降雨频率下泥石流规模及综合危险度

Table 3 Scale of debris flow and comprehensive risk under different rainfall frequency of 30 debris flow gullies in the study area

沟名	流域面积/km <sup>2</sup>	$W/10^4\text{m}^3$	100am/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	30am/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	工程治理拦 砂量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	$j/\%$	$S_0/(\text{km}/\text{km}^2)$	$S_0/\%$	100aH	100a危险度	30aH	30a危险度
咀子沟	2.16	308.33	8.45	2.53	1.30	366.27	7.19	78.38	0.607	高度危险	0.416	中度危险
泥湾沟	11.53	4549.11	111.21	29.46	24.31	208.22	4.42	90.86	0.855	极度危险	0.548	中度危险
圆盘沟	0.65	137.33	2.58	0.77	0.00	484.36	7.07	29.27	0.452	中度危险	0.350	低度危险
老庄沟	5.42	957.19	28.38	8.51	23.07	245.74	2.41	16.55	0.474	中度危险	0.293	低度危险
贾家沟	8.32	1387.82	45.51	13.65	29.17	140.81	0.62	14.41	0.504	中度危险	0.201	低度危险
龙床沟	32.62	3524.23	176.73	53.02	170.64	131.61	0.38	8.23	0.375	低度危险	0.179	低度危险
燕儿沟	4.23	664.61	19.77	5.93	0.61	304.60	18.19	95.25	0.805	极度危险	0.666	高度危险
甘家沟	43.64	14734.09	354.24	145.88	142.46	82.74	13.84	72.44	0.802	极度危险	0.436	中度危险
佛堂沟	45.08	6521.06	84.89	25.47	38.25	93.41	1.15	11.69	0.560	中度危险	0.143	低度危险
山牛沟	4.32	181.49	9.30	2.79	0.95	370.25	4.61	80.86	0.602	高度危险	0.438	中度危险
椒园沟	3.09	159.07	7.06	2.12	0.31	503.45	8.83	82.26	0.614	高度危险	0.471	中度危险
透防沟	53.85	4552.55	276.35	82.90	51.61	121.79	9.70	60.89	0.816	极度危险	0.690	高度危险
沟门前沟	10.63	699.43	35.10	10.53	28.72	264.62	2.07	32.01	0.513	中度危险	0.312	低度危险
小河口沟	36.77	2651.50	160.35	48.11	51.32	166.17	2.62	55.68	0.807	极度危险	0.406	中度危险
王沟	3.92	320.45	12.29	3.69	2.15	351.65	4.05	92.92	0.619	高度危险	0.414	中度危险
何家沟	3.02	484.85	13.45	4.04	2.26	492.67	2.94	83.70	0.620	高度危险	0.420	中度危险
南山沟	8.56	792.10	33.24	9.97	2.93	269.30	3.45	66.87	0.732	高度危险	0.574	中度危险
青草坪沟	1.42	218.01	5.37	1.61	0.91	380.56	11.37	80.61	0.590	中度危险	0.428	中度危险
东江水沟	7.19	1094.98	36.30	10.89	2.87	187.09	9.12	76.86	0.774	高度危险	0.619	高度危险
两水泉沟	4.21	440.25	15.46	4.64	6.94	269.71	4.30	78.30	0.602	高度危险	0.369	低度危险
段河坝沟	2.77	584.84	14.28	4.28	10.43	338.26	3.75	65.70	0.511	中度危险	0.365	低度危险
清水沟	2.13	647.08	12.98	3.89	1.06	376.06	12.90	38.04	0.679	高度危险	0.524	中度危险
渭子沟	35.97	563.21	18.69	5.61	13.68	140.57	0.36	6.60	0.363	低度危险	0.188	低度危险
徐家沟	4.46	202.74	10.12	3.04	1.89	467.55	13.25	54.01	0.664	高度危险	0.450	中度危险
杜家沟	4.28	788.28	22.02	6.60	1.50	321.29	17.54	58.45	0.805	极度危险	0.654	高度危险
火烧沟	2.49	468.35	11.76	2.61	1.69	400.18	4.95	68.20	0.625	高度危险	0.375	低度危险
庙上沟	1.59	367.68	7.82	0.93	0.85	487.94	6.97	65.59	0.602	高度危险	0.391	低度危险
小溪沟	1.08	534.08	7.76	1.05	0.63	492.86	7.55	80.29	0.610	高度危险	0.396	低度危险
石门沟	47.04	1967.20	71.98	44.09	41.54	97.06	0.66	11.07	0.513	中度危险	0.244	低度危险
汉林沟	34.01	3132.61	168.97	50.69	52.46	150.53	3.87	69.41	0.804	极度危险	0.304	低度危险

对泥石流的发生最为敏感,其中固体松散物质发育面积占整个研究区面积的80%。故本文选取每条沟谷内10°~40°斜坡坡度范围的面积与各自泥石流流域面积 $A$ 的比值 $S_0$ 作为另一个地形条件因子。

根据所选30条典型泥石流沟发生泥石流可能性大小,按面积分为 $\leq 5\text{ km}^2$ 、 $5\sim 20\text{ km}^2$ 、 $> 20\text{ km}^2$ 三类进行地形条件分析。从图3a~c对比分析流域面积 $A$ 越大,斜坡坡度面积比 $S_0$ 越大,爆发泥石流的可能性就越大。当同等条件下,随着泥石流流域面积 $A$ 的增大, $T_G$ 是趋于降低的,说明流域面积的越大,越不利于泥石流的形成。因此,由图3获得研究区

概念地形因子关系式:

$$T_G = S_0 F^{0.2} \quad (5)$$

式中, $T_G$ 为概念地形因子; $S_0$ 为10°~40°坡度范围占比(小数表示); $F$ 为流域面积 $A(\text{km}^2)$ 与单位面积 $A_0(A_0=1\text{ km}^2)$ 的比值,与 $S_0$ 统一量纲,即 $F=A/A_0$ 。

依据图4a~c进一步分析概念地形因子 $T_G$ 与沟床纵比降 $J$ 的关系式可得,概念地形因子 $T_G$ 随沟床纵比降 $J$ 具有明显的幂函数规律。

$$T = T_G J^{0.3} = S_0 F^{0.2} J^{0.3} \quad (6)$$

式中, $T$ 为综合地形因子; $J$ 为沟床纵比降(小数表示)。

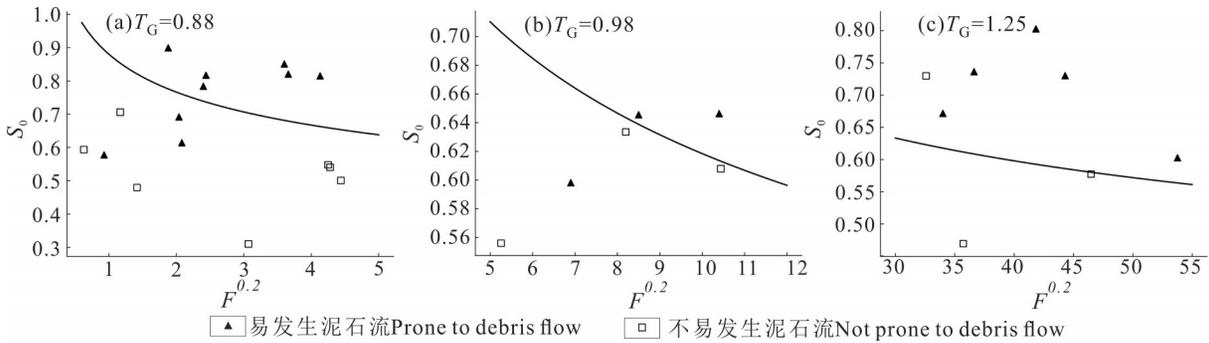


图3 斜坡坡度与流域面积的关系(a、b、c分别为流域面积≤5 km<sup>2</sup>、5~20 km<sup>2</sup>、>20 km<sup>2</sup>的分析结果)

Fig. 3 The relationship between slope and watershed area(a,b,c represent analysis results of watershed area ≤5 km<sup>2</sup>、5–20 km<sup>2</sup>、>20 km<sup>2</sup> respectively)

图4获得  $T$  能够较准确地反映泥石流沟谷的地形条件,也可量化表达地形条件因子,其在泥石流发生过程中地形条件贡献率大小为  $S_0 > T > F$ 。同时不同面积范围内大多数泥石流易发程度随  $T$  值的增大而增强,故曲线  $T$  的分界值也可作为判别泥石流易发程度的概念阈值。另一方面,泥石流发生的综合地形因子临界值随流域面积的不同而变化,主要是因为不同流域面积接受的降雨量多少是有差异的。

### 5.2 泥石流形成的地质条件分析

泥石流形成的物源条件与地质条件密切相关,是地质条件的外在体现,可以认为地质条件是泥石流发生的主控作用因素(王伟等,2012),地质条件主要反映地质构造、地层岩性等对泥石流潜在危险性的影响大小。以往研究成果表明(Yu et al., 2013),可通过对流域岩石坚固系数、构造、地震烈度以及风化进行修正,获取定量描述泥石流形成的地质条件,最终归并为一个无量纲的综合地质因子(式7)(表4),可达到快速计算的目的。

$$G = F_0 C_1 C_2 C_3 C_4 \quad (7)$$

式中: $G$ 为综合地质因子; $F_0$ 为泥石流流域岩石平均坚固系数; $C_i$ ( $i=1、2、3、4$ )分别为断层(断裂带)、地震烈度及物理风化和化学风化修正因子。

通常认为地层岩性与断裂构造是影响泥石流流域内滑坡孕育的两个重要基础地质因子。据研究白龙江流域滑坡主要沿断裂带成群成带分布,在沿区域性活动断裂一般发育大型或巨型滑坡,据统计70.6%的滑坡分布在距断裂2.5 km范围内,在距离断层小于5.0 km范围分布有90%以上的大型滑

坡(孟兴民等,2013;杨为民等,2014)。而在地层岩性软弱区或软硬相间岩层区内滑坡成片发育,据调查研究区内共有612处滑坡发育于软弱岩层区,180处滑坡发育于软硬相间岩层区,占滑坡总数的84.3%。故选取岩石坚固程度与构造活动作为泥石流形成的基础地质条件。

地震能造成大量坡体失稳和岩体破坏,为泥石流灾害提供了丰富的物源,随着时间的推移,松散固体物质逐渐固结、运移到冲积扇或下游沟道,泥石流的危险性也随之降低(王高峰等,2019)。研究区高山地带寒暑交替明显,河谷地带相对气候温和,区域年降雨量和年平均温度差异性较大,岩石干湿循环效应明显,导致物理风化影响强烈,是形成泥石流物源的关键因素。而化学风化越严重,岩石坚固程度越低,越有利于泥石流孕育,研究区大部分区域为碳酸盐岩建造区,当化学风化越强烈,越不利于降水的汇流,不利于泥石流的形成(余斌等,2013)。

### 5.3 泥石流触发降雨条件分析

国内对泥石流临界雨量确定是根据当地爆发泥石流事件临界降雨范围,结合泥石流形成的地形地质情况,流域松散物质规模、分布特征及颗粒成分来厘定临界降雨阈值。结果认为前期连续性降雨与泥石流发生有密切关系,特别是与1 h雨强具有很好的相关性,但沟床起动力型泥石流与10 min降水强度相关性更密切(朱平一等,2000;张楠等,2018)。根据历史统计、观察分析发现,10 min和1 h等短历时强降雨往往是诱发白龙江流域绝大多数泥石流灾害发生与否的主要原因。强降雨激发泥

表4 典型泥石流沟泥石流危险性预报综合因子参数统计

Table 4 Statistical table of comprehensive factors for debris flow risk prediction of typical debris flow gullies

沟名	$F$	$S_0$	$T$	$F_0$	$G$	$I_{10}/\text{mm}$	$I/\text{mm}$	$C_v$	$R_{10}$	$R$
咀子沟	1.88	0.90	0.78	6.24	5.85	15.53	32.20	0.43	0.88	2.27
泥湾沟	10.40	0.65	0.64	5.67	5.17	9.84	31.70	0.46	0.73	2.41
圆盘沟	0.63	0.59	0.44	7.92	7.66	15.53	32.20	0.43	0.88	2.27
老庄沟	5.26	0.56	0.51	7.91	7.66	15.53	32.20	0.43	0.88	2.27
贾家沟	8.20	0.63	0.61	6.47	6.01	12.25	25.40	0.43	0.76	1.86
龙床沟	32.59	0.73	0.80	6.60	5.66	12.83	26.60	0.43	0.65	1.60
燕儿沟	3.60	0.85	0.74	5.54	4.95	18.04	37.40	0.42	1.15	2.95
甘家沟	41.84	0.80	0.81	6.33	5.43	18.04	37.40	0.42	0.94	2.41
佛堂沟	44.30	0.73	0.77	7.13	6.11	11.96	24.80	0.42	0.68	1.66
山牛沟	4.28	0.54	0.54	7.18	7.01	25.04	51.90	0.47	1.21	2.74
椒园沟	3.07	0.31	0.32	7.58	7.68	25.04	51.90	0.44	1.29	2.92
透防沟	53.76	0.60	0.71	6.86	6.74	25.04	51.90	0.47	1.21	2.74
沟门前沟	10.44	0.61	0.65	8.63	8.75	13.07	27.10	0.41	0.91	2.25
小河口沟	36.63	0.74	0.88	7.88	7.50	25.04	51.90	0.47	1.17	2.64
王沟	3.66	0.82	0.79	6.48	5.97	15.68	23.60	0.40	1.07	2.06
何家沟	2.44	0.82	0.82	5.92	5.46	15.68	23.60	0.40	1.07	2.06
南山沟	8.50	0.65	0.67	7.12	6.61	21.42	44.40	0.43	0.95	2.54
青草坪沟	1.17	0.71	0.57	5.92	5.46	15.68	23.60	0.40	1.07	2.06
东江水沟	6.90	0.60	0.54	5.92	5.29	16.31	25.40	0.40	1.22	2.31
两水泉沟	4.13	0.81	0.73	7.12	6.61	21.42	44.40	0.43	0.95	2.54
段河坝沟	2.40	0.78	0.69	6.82	5.66	14.76	30.60	0.43	0.87	2.05
清水沟	2.08	0.61	0.53	5.16	4.61	16.31	25.40	0.40	0.94	1.78
渭子沟	35.73	0.47	0.59	7.17	7.27	17.90	27.30	0.43	0.88	1.68
徐家沟	4.44	0.50	0.54	7.54	7.00	13.22	40.30	0.40	0.80	2.58
杜家沟	4.25	0.55	0.52	7.02	6.52	23.45	48.60	0.43	1.29	3.11
火烧沟	2.04	0.69	0.63	7.43	6.90	9.84	31.70	0.46	0.73	2.41
庙上沟	1.42	0.48	0.42	6.97	6.74	9.84	31.70	0.46	0.73	2.41
小溪沟	0.93	0.58	0.47	6.17	5.55	9.84	31.70	0.46	0.73	2.41
石门沟	46.48	0.58	0.66	6.90	6.21	14.57	22.40	0.46	0.98	1.78
汉林沟	34.00	0.67	0.77	4.36	3.62	9.12	36.60	0.40	0.64	2.18

石流起动是通过减小土体内聚力和增加水的作用力实现的,必须在一定的雨强激发条件下才能启动发生,而前期累积降雨对沟道坡面产汇流的形成和重力侵蚀型物源的启动都至关重要。白龙江流域受局地地形和过渡季风的综合影响,气候垂向上随海拔变化差异悬殊,在时空分布上降水分布不均匀且小气候现象明显,尤其是近10年间极端降雨量变化很大,需对每年的具体实测数据进行分析。

为研究泥石流危险性降雨阈值,选取白龙江中游两水镇至外纳乡段63处陇南地质灾害监测预警系统气象站的标准10 min、1 h、24 h等降雨量数据,时间段为2008—2016年。为反映地形条件对降雨

的影响,提取8年来不同时段多年平均最大雨量作为量值,需要在ArcGIS空间分析平台下对多年平均最大降雨量采用Spline插值法,构建研究区不同时段暴雨等值和10 min降水变差系数空间分布。结果表明,白龙江流域受汶川地震、漳县岷县地震两次强震影响,诱发泥石流的10 min和1 h降雨量比震前略有下降。在研究区影响泥石流危险程度的10min降雨量为9.12~25.04 mm,高阈值区主要集中在白龙江左岸汉林乡—龙凤乡段,雨量在16.2~25.04 mm,8年间共发生泥石流灾害事件3例;1 h降雨量为22.4~51.9 mm,而高阈值区主要集中在白龙江右岸两水镇—东江水镇段,雨量在38.7~51.9

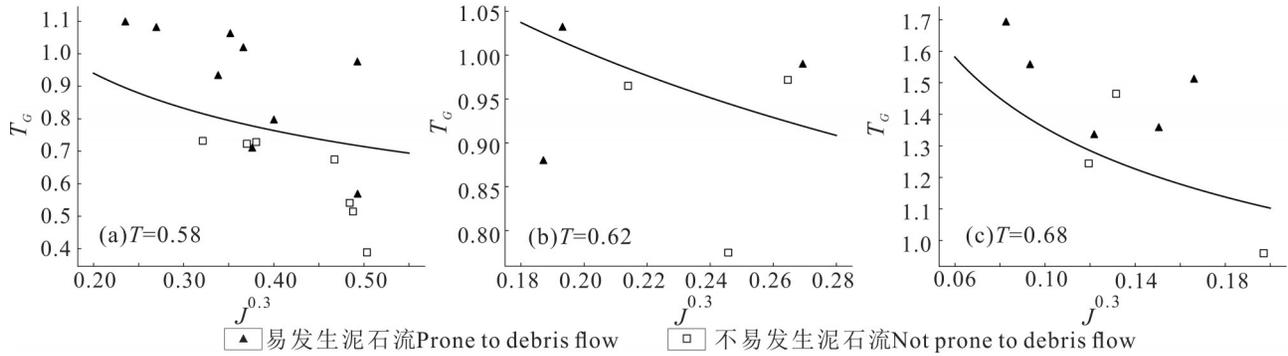


图4 概念地形因子与沟床纵比降的关系(a、b、c分别为流域面积≤5 km<sup>2</sup>、5~20 km<sup>2</sup>、>20 km<sup>2</sup>的分析结果)  
 Fig.4 The relation between the concept topography factor and longitudinal ratio of trench bed(a,b,c represent analysis results of watershed area ≤5 km<sup>2</sup>, 5~20 km<sup>2</sup>, >20 km<sup>2</sup>, respectively)

mm, 8年间共发生泥石流灾害事件12例。对比也可以发现,各年度暴雨次数变化趋势与泥石流发生频率呈正相关性,当泥石流危险程度空间分布与不同时段降雨量的相关性并不完全对应,主要是因为泥石流危险程度大小还受地形地质条件的影响。

根据研究区降水的不均匀性及差异性特征,本文选用前期降雨量、10 min或1 h降雨量和年平均降雨量等组成的降水因子作为诱发泥石流危险程度大小的降雨因素。据中国台湾地区 and 贵州省对降雨综合值的研究成果(余斌等,2014),在白龙江流域对于10 min泥石流危险程度降雨预报模型,系数K为8,而1 h泥石流危险程度降雨预报模型,系数K取值12.5,其降水因子公式为:

$$R_{10}=(B+8I_{10})/(R_0C_r) \quad (8)$$

$$R=(B+12.5I)/(R_0C_r) \quad (9)$$

式中:R<sub>10</sub>、R为降水因子;B为泥石流形成24 h前期累积降雨量;I<sub>10</sub>为泥石流触发10 min降雨量;I为泥石流触发1 h降雨量;R<sub>0</sub>为研究区年平均降雨量;C<sub>r</sub>为研究区10 min降水变差系数(表4)。

#### 5.4 降雨型泥石流危险性预报模型

在概念模型的基础上,白龙江流域潜在泥石流1 h和10 min危险性预报模型由归并综合地形地质因子和降水因子组成,表达式如下:

$$P_{1h}=RT^{0.2}G^{-0.5} \geq C_r \quad (10)$$

$$P_{10min}=RT^{0.25}G^{-0.45} \geq C_r \quad (11)$$

式中,P<sub>1h</sub>为1 h泥石流危险性预警值;P<sub>10min</sub>为10 min泥石流危险性预警值;C<sub>r</sub>为临界判据值。

从公式(10)得到研究区30条典型泥石流沟的1h潜在泥石流危险性的判断模式(图5a),其临界值

C<sub>r</sub>有3个:C<sub>r1</sub>=0.655、C<sub>r2</sub>=0.798、C<sub>r3</sub>=1.005,对应的3条临界曲线,将泥石流的危险程度划分为4个区域。当P<sub>1h</sub><0.655时,泥石流危险度较低,吻合率为100%;0.655≤P<sub>1h</sub><0.798;泥石流危险度中等,吻合率为77.8%;0.798≤P<sub>1h</sub><1.005,泥石流危险度高,吻合率为91.7%;P<sub>1h</sub>≥1.005,泥石流危险度极高,吻合率为87.5%。

从公式(11)得到研究区10 min潜在泥石流危险性的判断模式(图5b),考虑工程治理情景30 a一遇降雨频率下30条泥石流沟活动规模预测值为[0, 31.3]万方,危险度值在0.143~0.69范围内,据调查发现白龙江流域在30 a一遇降雨条件下其危险度均小于极高危险度的最低值。故其临界值C<sub>r</sub>有2个:C<sub>r1</sub>=0.353、C<sub>r2</sub>=0.462,对应的2条临界曲线,将泥石流的危险程度划分为3个区域。当P<sub>10min</sub><0.353时,泥石流危险度较低,吻合率为84.6%;0.353≤P<sub>10min</sub><0.462;泥石流危险度中等,吻合率为75.0%;P<sub>10min</sub>≥0.462,泥石流危险度高,吻合率为80%。

## 6 模型验证分析

在白龙江流域泥石流大多属于降雨型泥石流,有详细的泥石流爆发事件记录以及降雨过程观测,特别是10 min降雨量观测数据较少。本文将筛选1 h或10 min降雨资料较为详实的泥石流事件进行实例验证分析。通过分析各泥石流事件形成的地形地质条件及触发泥石流降雨条件,将各参数代入构建的10 min和1 h降雨型泥石流潜在危险性预报模型,根据不同泥石流危险级别临界判据值,确定不同降雨频率下泥石流危险等级,利用改进后的泥石

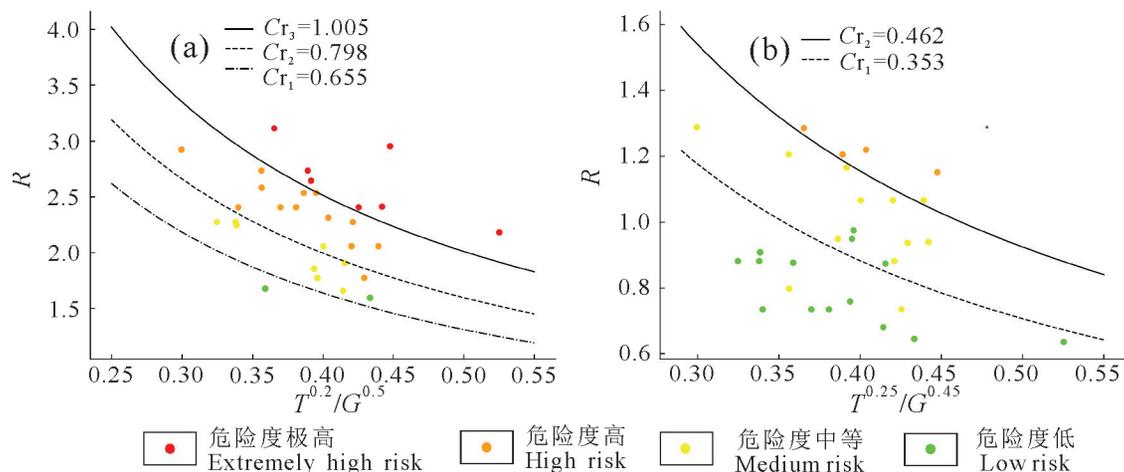


图5 降雨型泥石流潜在危险度预报模型临界曲线(a、b分别为1h、10min预报模型临界曲线)

Fig.5 The critical curve of risk prediction model of rainfall-type potential debris flow(a, b represent 1 h and 10 min critical curve of risk prediction model, respectively)

流危险度公式,以计算得出各个泥石流事件危险度值为依据,来判别模型的准确程度。

### 6.1 三眼峪和罗家峪泥石流

三眼峪和罗家峪泥石流沟位于甘肃省舟曲县,白龙江左岸。流域面积分别为 $24.1\text{ km}^2$ 、 $16.6\text{ km}^2$ ,沟床纵比降分别为 $241\text{‰}$ 、 $239\text{‰}$ ,综合地形因子 $T$ 分别为 $0.474$ 、 $0.348$ 。该区主要出露的岩体工程地质类型为中等岩溶化层状半坚硬灰岩岩组和中一薄层较软千枚岩、炭质板岩岩组,受坪定—化马活动断裂带影响形成“入”字型断裂群,综合地质因子 $G$ 为 $8.418$ ,其中 $F_0=9.11$ 、 $C_1=0.93$ 、 $C_2=0.9$ 、 $C_3=0.96$ 、 $C_4=1.15$ 。流域多年平均降雨量 $435.8\text{ mm}$ ,2010年8.7特大山洪泥石流灾害触发 $1\text{ h}$ 降雨量为 $77.3\text{ mm}$ ,相当于 $100\text{ a}$ 一遇降雨, $10\text{ min}$ 降水变差系数 $C_v=0.54$ 。根据 $1\text{ h}$ 潜在泥石流危险性预测模型得出三眼峪和罗家峪泥石流预警值分别为 $1.342$ 、 $1.261$ ,远大于 $C_3=1.005$ ,据研究“8.7”三眼峪和罗家峪爆发规模分别为 $152\times 10^4\text{ m}^3$ 、 $68\times 10^4\text{ m}^3$ (余斌等,2010),泥石流危险度均为极高危险(表5)。

### 6.2 化马沟泥石流

化马沟位于宕昌县化马乡,属白龙江岷江支流左岸,流域面积为 $20.42\text{ km}^2$ ,沟床纵比降为 $288.9\text{‰}$ ,综合地形因子 $T$ 为 $0.641$ 。主要出露的地层岩性主要有灰岩、炭质板岩和千枚岩,受断裂影响强烈,综合地质因子 $G$ 为 $6.728$ ,其中 $F_0=7.858$ 、 $C_1=0.93$ 、 $C_2=0.9$ 、 $C_3=0.93$ 、 $C_4=1.1$ 。该区多年平均降雨量

$592.7\text{ mm}$ ,1976年7月25日宕昌化马乡一带爆发大型黏性泥石流,触发泥石流 $24\text{ h}$ 累积降雨量 $330\text{ mm}$ ,最大小时降雨量 $47.1\text{ mm}$ , $10\text{ min}$ 降水变差系数 $C_v=0.52$ 。 $1\text{ h}$ 潜在泥石流危险性预警值为 $1.051$ ,属极高度危险区范围,据资料分析“7.25”化马沟泥石流爆发规模为 $77.1\times 10^4\text{ m}^3$ (袁远荣等,1982),泥石流危险度预测值为 $0.804$ ,为极高危险(表5)。

### 6.3 柳湾沟泥石流

该沟位于白龙江左岸,流域面积为 $2.63\text{ km}^2$ ,沟床纵比降为 $438.3\text{‰}$ ,综合地形因子 $T$ 为 $0.704$ 。地层岩性以志留系炭质板岩和千枚岩为主,综合地质因子 $G$ 为 $5.64$ 。流域所在区域多年平均降雨量 $592.7\text{ mm}$ ,1963年8月29日触发柳湾沟泥石流 $24\text{ h}$ 累积降雨量 $31.8\text{ mm}$ ,最大小时降雨量 $10.8\text{ mm}$ ,最大 $10\text{ min}$ 降雨量 $7.7\text{ mm}$ , $10\text{ min}$ 降水变差系数 $C_v=0.45$ 。据资料分析本次触发泥石流降雨强度为 $25\text{ a}$ 一遇,泥石流冲出固体物质约 $1.98\times 10^4\text{ m}^3$ (袁远荣等,1982),泥石流危险度预测值为 $0.389$ ,属低危险。根据 $10\text{ min}$ 潜在泥石流危险性预测模型得出预警值为 $0.147$ ,位于低危险区范围内,远小于 $C_{11}=0.353$ (表5)。

### 6.4 马家沟泥石流

马家沟位于武都区安化镇北部,属北浴河右岸一级支沟,流域面积为 $11.18\text{ km}^2$ ,沟床纵比降为 $208\text{‰}$ ,综合地形因子 $T$ 为 $0.809$ 。出露地层主要为中厚层块状灰岩夹板岩、千枚岩,综合地质因子 $G$

表5 模型实例验证结果统计

Table 5 Statistical table of validation results of model examples

模型	沟名	$T$	$G$	$T^{0.2}/G^{0.5}$	$R$	预警值 $P$	$m$ 预测值/ $10^4\text{m}^3$	实际 $m$ 值/ $10^4\text{m}^3$	$H$ 预测值	准确程度
$P_{1h}$ 预警 结果	三眼峪	0.474	8.418	0.297	4.520	1.342	166.22	152.00	0.831	准确
	罗家峪	0.348	8.418	0.279	4.520	1.261	72.72	68.00	0.800	准确
	化马沟	0.641	6.728	0.353	2.980	1.051	88.17	77.10	0.804	准确
$P_{10min}$ 预警 结果	柳湾沟	0.704	5.640	0.393	0.350	0.147	2.64	1.98	0.389	准确
	马家沟	0.809	7.992	0.339	1.050	0.356	9.37	15.30	0.607	基本准确
	马槽沟	0.995	4.717	0.460	1.200	0.552	11.79	10.40	0.614	准确

为7.992。区域多年平均降雨量612.4 mm,2017年8月7日触发泥石流24 h累积降雨量71.2 mm,最大小时降雨量34.5 mm,最大10 min降雨量23.2 mm,10 min降水变差系数 $C_v=0.41$ 。10 min潜在泥石流危险性预警值为0.356,位于中等度危险区范围内,根据实地调查马家沟“8.7”泥石流冲出规模为 $15.03 \times 10^4 \text{m}^3$ ,危险度预测值为0.607,属高度危险,基本接近于中等危险度区间最高阈值。主要是因为本次实测最大泥石流流量为 $173.17 \text{m}^3/\text{s}$ ,相当于50 a一遇降雨重现期,泥石流爆发规模比30 a一遇泥石流规模增大了37.7%,故10 min泥石流危险性预警值偏小(表5)。

### 6.5 马槽沟泥石流

马槽沟位于武都区马街镇,属北浴河左岸支沟,流域面积为 $13.94 \text{km}^2$ ,沟床纵比降为334.4‰,综合地形因子 $T$ 为0.995。受断裂影响,流域泥石流松散固体物质极为发育,单位面积物源量达 $81.9 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}^2$ , $G$ 为4.717。区域多年平均降雨量495mm,1986年8月6日24 h累积降雨量65.1 mm,最大小时降雨量31 mm,最大10 min降雨量23 mm,10 min降水变差系数 $C_v=0.42$ 。据研究触发泥石流降雨强度为30 a重现期,泥石流冲出固体物质约 $10.4 \times 10^4 \text{m}^3$ (蔡祥兴等,1989),危险度预测值为0.614,属高度危险。根据10 min潜在泥石流危险性预测模型得出预警值为0.552,位于高危险区范围内(表5)。

## 7 结 论

(1)通过研究白龙江流域部分泥石流事件活动规模和相应降雨频率数据资料,得到基于泥石流灾害爆发区面积、流域内松散固体物质总量及诱发泥石流的降雨条件等3个因子的不同降雨频率下泥石流活动规模定量表达式。

(2)提出以不同降雨频率下对应的泥石流活动规模代替刘希林单沟泥石流危险度计算模型中的规模和频率因子作为主要因子,将主沟长度和流域相对高差归并为沟床平均比降作为次要因子之一的单沟泥石流危险度评价方法。根据修正后的单沟泥石流危险度公式推算了30条典型泥石流沟分别在100 a、30 a一遇降雨频率的泥石流危险度,结果基本符合白龙江流域工程治理情景下降雨型泥石流的特点,也较准确地反映泥石流危险度随规模的不同而变化。

(3)泥石流危险性预报模型是以泥石流孕灾条件和沟床起动机理为基础的预报模型,所选样本数据的泥石流面积范围 $0.63 \sim 53.76 \text{km}^2$ ,沟床比降范围为82.7‰~503.5‰,均为降雨型沟床起动类泥石流。因这类泥石流在白龙江流域广泛发育,公式(10)和公式(11)预测精度较高,特别是针对极端降雨情况下 $P_{1h}$ 更准确,在中国陇南山区或同类地区的泥石流危险性预报中有一定的应用范围。

(4)本文提出的泥石流危险度预报模型为中小尺度的县市级或小区域预报模型。如通过无人机航测等技术获取“精细化”大比例尺泥石流沟谷信息,结合云数据人工智能处理的“精准化”降雨观测数据,可将本文提出的预警预报模型拓展到乡镇级或某一小流域,以提高泥石流防灾减灾预警精度,更有效发挥预报的时效性优势。由于选取的验证样本数量有限,研究结果对时变性较强的局地小气候区泥石流事件的适用性还有待进一步的研究。

## References

- Bai Liping, Sun Jiali, Nan Yun. 2008. Analysis of the critical rainfall thresholds for mudflow in Beijing, China[J]. Geological Bulletin of China, 27(5):674-680(in Chinese with English abstract).
- Cai Xiangxing, Li Honglian, Cui Bintian. 1989. Exploring and

- discussing of the debris flow control engineering in Macao gully[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 9(6): 50–59(in Chinese with English abstract).
- Ding Guiling, Wang Yihong, Mao Jian, Yao Kang, Liu Huanhuan.2017. A study of the rainfall threshold of debris flow forewarning in Beijing based on susceptibility analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 44(3): 136–142 (in Chinese with English abstract).
- Gao Bo, Zhang Maosheng, Zhang Chenghang, Yu Guoqiang.2016. Rainfall threshold for debris flow in Sanyanyu valley, Zhouqu, China[J]. Journal of Catastrophology, 31(1): 25–28(in Chinese with English abstract).
- Guo Fuyun, Song Xiaoling, Xie Yu, Meng Xingmin.2015. A discussion the geological hazards meteorological warning system in Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Contral, 26(1): 127–133(in Chinese with English abstract).
- He Chaoyang, Xu Qiang, Ju Nengpan, Huang Jian, Xiao Yang.2018. Real-time early warning technology of debris flow based on automatic identification of rainfall process[J]. Journal of Engineering Geology, 26(3): 703–710(in Chinese with English abstract).
- Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Science and Traffic Science Institute of Gansu Province. 1982. China Bebris Flow in Gansu Province [M]. Beijing: China Communications Press, 156–181(in Chinese).
- Li Shuzhen, Dai Shuang, Wang Huawei, Zhang Xiang.2015. Fault features and their implication on distribution and formation of landslides in Bailongjiang Region[J]. Journal of Lanzhou University, 51 (2): 145–152(in Chinese with English abstract).
- Liu Xilin. 2010. Quantitative assessment on site-specific debris flow hazard and application[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 30(3): 241–245(in Chinese with English abstract).
- Luo Hongdong, Li Ruidong, Zhang Bo, Cao Bo.2019. An early warning model system for predicting meteorological risk associated with geological disasters in the Longnan area, Gansu Province based on the information value method[J]. Earth Science Frontiers, 26(1): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Meng Xingmin, Chen Guan, Guo Peng, Xiong Muqi, Janusz Wasowki. 2013. Research of landslides and debris flow in Bailong river basin: Progress and prospect[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 33(4): 1–15(in Chinese with English abstract).
- Qu Yongping, Tang Chuan.2014. Preliminary study of prediction model for early warning of debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 22(1): 1–7(in Chinese with English abstract).
- Shang Hui, Wang Mingxuan, Luo Donghai, Feng Jiao, Wang Aijun. 2019. Single gully debris flow hazard assessment based on function assignment model and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Contral, 30(1): 61–69(in Chinese with English abstract).
- Tan Binyan. 1990. The study of prediction for debris flow caused by rainstorm [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 4(4): 14–20 (in Chinese with English abstract).
- Wang Gaofeng, Deng Bing, Mao Jiarui, Tian Yuntao, Ye Zhennan, Guo Ning, Gao Youlong. 2020. Prediction model of activity of rainfall-type debris flow in Bailongjiang River Basin [J]. Science Technology and Engineering, 51(5): 12–20(in Chinese with English abstract).
- Wang Gaofeng, Ye Zhennan, Li Gang, Tian Yuntao, Deng Bing, Guo Ning, Chen Zongliang. 2019. Geological hazard risk assessment of Zhouqu county in Bailong river basin[J]. Journal of Catastrophology, 34(3): 128–133(in Chinese with English abstract).
- Wang Gaofeng, Yang Qiang, Tian Yuntao, Ye Zhennan, Chen Zongliang, Gao Youlong, Guo Ning, Deng Bing. 2019. Establishment of assessment model for debris flow susceptibility: A case study from Shimen township to Yangtang river in the Bailong River Basin[J]. Arid Zone Research, 36(3): 761–770(in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Li Tianhong, Ni Jinren. 2012. Rapid assessment of debris flow gully hazards based on environmental factor codes[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 20(5): 874–885(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiwen, Zhang Tiejun, Feng Jun, Wang Suichan, Liu Zhiguo.2004. Study of the geological calamity meteorological grade prediction in Gansu Province[J]. Arid Meteorology, 22(1): 8–12(in Chinese with English abstract).
- Wang Yiming, Yin Kunlong.2018. A study of the typhoon-triggered debris flow hazard degree of a single gully[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 37(3): 124–130(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhihua, Guo Zhaocheng, Du Mingliang, Cheng Zunlan.2011. Model study of monitoring and early warning of rainstorm induced landslide and debris flow based on digital landslide technology[J]. Earth Science Frontiers, 18(5): 303–309(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhihua, Guo Zhaocheng, Du Mingliang, Cheng Zunlan.2012. Model study of predicting rainstorm induced landslide and debris flow at Niujian gully, the focal area of 2008–05–12 Earthquake[J]. Earth Science Frontiers, 19(1): 228–238(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhilu, Zhang Yan, Sun Chang. 2005. Study on geology disaster weather forecast and forewarning technique in Longnan area[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 16 (1): 105–110(in Chinese with English abstract).
- Wei Yongming, Xie Youyu. 1997. Study on prediction models of precipitation-typed debris flow[J]. Journal of Natural Disasters, 6 (4): 48–54(in Chinese with English abstract).
- Wen Mingsheng, Liu Chuanzheng, Liu Yanhui, Fang Zhiwei.2019.

- Regional warning of geological hazards in high seismic intensity area of Wenchuan earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Contral, 30(1): 10–19(in Chinese with English abstract).
- Xie Yongping, Zhang Xueyan, Li Yuan, Cao Hongyang. 2016. Forming conditions and quantitative assessment on Yan'er gully debrisflow hazard in Longnan of Gansu[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Contral, 27(4): 50–55(in Chinese with English abstract).
- Xu Jiwei, Yu Guoqiang, Zhang Maosheng, Cong Kai. 2017. Critical rainfall thresholds for debris flow in Zhouqu, China[J]. Mountain Research, 35(1): 39–47(in Chinese with English abstract).
- Yang Weimin, Huang Xiao, Zhang Chunshan, Si Haibao. 2014. Deformation behavior of landslides and their foemation mechanism along Pingding–Huama active fault in Bailongjiang River Region[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 44(2): 574–583.
- Yang Xiaofeng, Zhu Jun, Cao Yungang, Gong Jing, Cao Zhenyu, Yin Lingzhi. 2017. Risk assessment of Qipangou debris flow based on determining weight method and effectiveness anlysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 28(1): 22–29 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yan, Zhang Xujiao, Ye Peisheng, Hu Yue, Wu Zhonghai. 2012. Fuzzy comprehensive evaluation for risk assessment of the Malanghe debris flow gully in Baoshan area, Western Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 31(2/3): 351–355(in Chinese with English abstract).
- Yu B, Li L, Wu Y F. 2013. A formation model for debris flows in the Chenyulan river watershed, Taiwan[J]. Natural Hazards, 68(2): 745–762.
- Yu Bin, Chu Shengming, Zhu Yuan, Xie Hong. 2013. Impacts of weathering on formation of gullied debris flow[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 33(6): 51–56(in Chinese with English abstract).
- Yu Bin, Wang Tao, Zhu Yuan. 2016. Research on the topographical and rainfall factors of debris flows caused by shallow landslides[J]. Advances in Water Science, 27(4): 542–550(in Chinese with English abstract).
- Yu Bin, Yang Yonghong, Su Yongchao, Huang Wenjie, Wang Gaofeng. 2010. Research on the gisant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7, 2010[J]. Journal of Engineering Geology, 18(4): 437–444(in Chinese with English abstract).
- Yu Bin, Zhu Yuan, Wang Tao, Chen Yuanjing, Zhu Yunbo. 2014. Prediction model for occurrence of debris flows in channels with runoff initiation mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 22(3): 450–455(in Chinese with English abstract).
- Yu Bin, Zhu Yuan, Wang Tao, Zhu Yunbo. 2015. Research on the 10–minute rainfall perdition model for debris flows[J]. Advances in Water Science, 26(3): 347–355(in Chinese with English abstract).
- Zhang Nan, Fang Zhiwei, Han Xiao, Chen Chunli, Qi Xiaobo. 2018. The study on temporal and spatial distribution law and cause of debris flow disaster in China in recent years[J]. Earth Science Frontiers, 25(2): 299–308(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Yao Xin, Guo Changbao, Li Lingjing, Yang Zhihua, Du Guoliang. 2016. Regional warning of debris flow hazards after Wenchuan earthquake in Longmenshan region[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 51(5): 1014–1023(in Chinese with English abstract).
- Zhu Pingyi, Cheng Zhunlan, Wang Yangchun. 2000. Research of rainfall–debris flow and environment in upper reaches of Yangzi river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 14(5): 35–62(in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 白利平, 孙佳丽, 南赞. 2008. 北京地区泥石流灾害临界雨量阈值分析[J]. 地质通报, 27(5): 674–680.
- 蔡祥兴, 李鸿璘, 崔炳田. 1989. 马槽沟泥石流防治工程初探[J]. 水土保持通报, 9(6): 50–59.
- 丁桂伶, 王翊虹, 冒建, 姚康, 刘欢欢. 2017. 北京市泥石流易发区降雨预警阈值研究[J]. 水文地质工程地质, 44(3): 136–142.
- 高波, 张茂省, 张成航, 于国强. 2016. 甘肃舟曲三眼峪泥石流降雨临界阈值[J]. 灾害学, 31(1): 25–28.
- 郭富赞, 宋晓玲, 谢煜, 孟兴民. 2015. 甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 26(1): 127–133.
- 何朝阳, 许强, 巨能攀, 黄健, 肖洋. 2018. 基于降雨过程自动识别的泥石流实时预警技术[J]. 工程地质学报, 26(3): 703–710.
- 李淑贞, 戴霜, 王华伟, 张翔. 2015. 白龙江地区断裂构造与滑坡分布及发生关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 51(2): 145–152.
- 刘希林. 2010. 沟谷泥石流危险度计算公式的由来及其应用实例[J]. 防灾减灾工程学报, 30(3): 241–245.
- 罗鸿东, 李瑞冬, 张勃, 曹博. 2019. 基于信息量法的地质灾害气象风险预警模型: 以甘肃省陇南地区为例[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 26(1): 1–10.
- 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 熊木齐, Janusz Wasowski. 2013. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 33(4): 1–15.
- 屈永平, 唐川. 2014. 暴雨型泥石流预警模型初步研究[J]. 工程地质学报, 22(1): 1–7.
- 尚慧, 王明轩, 罗东海, 冯皎, 王爱军. 2019. 基于函数赋值模型与模糊综合评判法单沟泥石流危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 30(1): 61–69.
- 谭炳炎. 1990. 暴雨泥石流预报的研究[J]. 水土保持学报, 4(4): 14–20.
- 王高峰, 杨强, 田运涛, 叶振南, 陈宗良, 高幼龙, 郭宁, 邓兵. 2019. 泥石流易发性评价模型的构建——以白龙江流域石门乡羊汤河段为例[J]. 干旱区研究, 36(3): 761–770.
- 王高峰, 邓兵, 毛佳睿, 田运涛, 叶振南, 郭宁, 高幼龙. 2020. 白龙江流域降雨型泥石流活动规模预测模型[J]. 科学技术与工程, 51

- (5):12-20.
- 王高峰,叶振南,李刚,田运涛,邓兵,郭宁,陈宗良. 2019. 白龙江流域舟曲县城区地质灾害危险性评价[J]. 灾害学, 34(3): 128-133.
- 王伟,李天宏,倪晋仁. 2012. 基于环境要素编码的泥石流沟道危险度快速识别[J]. 应用基础与工程科学学报, 20(5): 874-885.
- 王锡稳,张铁军,冯军,王遂缠,刘治国. 2004. 甘肃地质灾害气象等级预报研究[J]. 干旱研究, 22(1): 8-12.
- 王一鸣,殷坤龙. 2018. 台风暴雨型泥石流单沟危险度研究[J]. 水文地质工程地质, 37(3): 124-130.
- 王志禄,张燕,孙畅. 2005. 陇南地质灾害气象预报及预警技术研究[J]. 地质灾害与环境, 16(1): 105-110.
- 王治华,郭兆成,杜明亮,程尊兰. 2011. 基于数字滑坡技术的暴雨滑坡、泥石流预警、监测模型研究[J]. 地学前缘, 18(5): 303-309.
- 王治华,郭兆成,杜明亮,程尊兰. 2012. 5.12震源区牛眠沟暴雨滑坡泥石流预测模型[J]. 地学前缘, 19(1): 228-238.
- 魏永明,谢又矛. 1997. 降雨型泥石流(水石流)预报模型研究[J]. 自然灾害学报, 6(4): 48-54.
- 温铭生,刘传正,刘艳辉,方志伟. 2019. 汶川地震高烈度区崩滑流灾害区域预警[J]. 中国地质灾害与防治学报, 30(1):10-19.
- 解咏平,张雪燕,李源,曹洪洋. 2016. 甘肃陇南燕儿沟泥石流条件及其危险度评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 27(4): 50-55.
- 徐继维,于国强,张茂省,丛凯. 2017. 舟曲地区泥石流降雨临界阈值[J]. 山地学报, 35(1): 39-47.
- 杨艳,张绪教,叶培盛,胡悦,吴中海. 2012. 基于模糊数学法评价滇西保山地区麻榔河泥石流沟的危险性[J]. 地质通报, 31(2/3): 351-355.
- 杨为民,黄晓,张春山,司海宝. 2014. 白龙江流域坪定-化马断裂带滑坡特征及其形成演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(2): 574-583.
- 杨小凤,朱军,曹云刚,龚竞,曹振宇,尹灵芝. 2017. 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, 28(1): 22-29.
- 余斌,杨永红,苏永超,黄文杰,王高峰. 2010. 甘肃省舟曲8.7特点泥石流调查研究[J]. 工程地质学报, 18(4):437-444.
- 余斌,褚胜名,朱渊,谢洪. 2013. 风化作用对沟谷型泥石流发育环境的影响研究[J]. 水土保持通报, 33(6): 51-56.
- 余斌,王涛,朱渊,等. 2016. 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, 27(4):542-550.
- 余斌,朱渊,王涛,陈源井,朱云波. 2014. 沟床启动型泥石流预报研究[J]. 工程地质学报, 22(3):450-455.
- 余斌,朱渊,王涛,朱云波. 2015. 沟床启动型泥石流的10min降雨预报研究[J]. 水科学进展, 26(3):347-355.
- 张楠,方志伟,韩笑,陈春利,祁小博. 2018. 近年来我国泥石流灾害时空分布规律及成因分析[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学), 25(2):299-308.
- 张永双,姚鑫,郭长宝,李凌婧,杨志华,杜国梁. 2016. 龙门山地区震后泥石流灾害区域预警研究[J]. 西南交通大学学报, 51(5):1014-1023.
- 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 1982. 甘肃泥石流[M]. 北京:人民交通出版, 156-181.
- 朱平一,程尊兰,汪阳春. 2000. 长江上游暴雨泥石流与环境研究[J]. 水土保持学报, 14(5):35-62.