

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.009

开放科学(资源服务)标识码 OSID:



强震区沟谷型泥石流峰值流量预测研究及应用

张亮亮^a, 徐林荣^{a,b}, 李永威^a, 苏娜^a, 晏子旋^a, 丁奎^a

(中南大学 a. 土木工程学院; b. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 长沙 410075)

摘要: 强震区次生泥石流灾害演化规律与发展趋势受地震“后效应”影响显著, 与震前相比, 其峰值流量增长数倍, 泥石流规模增大显著, 对震区沟谷型泥石流针对性防治设计提出新挑战。基于四川汶川强震区泥石流案例, 采用因子回归分析方法研究流域特征参数与峰值流量的内在关系, 建立泥石流峰值流量多元预测模型。结果表明: 预测模型解决了原始变量共线性导致的信息叠加问题, 模型拟合优度 $R^2 = 0.94$, 预测精度显著提升; 采用预测模型对研究区 32 条泥石流沟的峰值流量阈值进行预测, 得出强震区泥流动力特性分布规律与泥石流规模演化特征, 在此基础上定义了震区“特大型高位远程型泥石流”的特征参数。

关键词: 强震区; 泥石流; 峰值流量; 因子回归分析; 预测

中图分类号: P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)02-0081-08

Prediction of the gully debris flow peak discharge prediction in strong earthquake area

ZHANG Liangliang^a, XU Linrong^{a,b}, LI Yongwei^a, SU Na^a, YAN Zixuan^a,
DING Kui^a

(a. School of Civil Engineering; b. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South University, Changsha 410075, P. R. China)

Abstract: The evolution pattern and development trend of secondary debris flow in the strong earthquake area were significantly affected by the “post-effect” of the earthquake. The peak discharge had increased several times compared with that before earthquake, and the scale of the debris flow had increased obviously. According to the norms, the new challenge to the targeted design of prevention and control of the gully debris flow in seismic area is being put forward. Therefore, based on the case of debris flow in Wenchuan earthquake, the factorial regression analysis was used to investigate the intrinsic relationship between the basic characteristic parameters and the peak discharge in this paper, and a multivariate prediction model was established. The problem of information superposition caused by the collinearity of the original variables was solved, with

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(2018YFC1505403, 2017YFB1201204, 42172322)

作者简介: 张亮亮(1996-), 男, 主要从事泥石流灾害、路基病害研究, E-mail: 194812263@csu.edu.cn。

徐林荣(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: lrxu@csu.edu.cn。

Received: 2021-11-18

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 2018YFC1505403, 2017YFB1201204, 42172322)

Author brief: ZHANG Liangliang (1996-), main research interests: debris flow disaster, roadbed disease, E-mail: 194812263@csu.edu.cn.

XU Linrong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lrxu@csu.edu.cn.

goodness of fitting $R^2 = 0.94$, and the prediction accuracy was improved significantly; at last, the proposed model was used to predict the peak discharge thresholds of 32 debris flows in the study area, and the distribution law of dynamic characteristics and the scale evolution characteristics of debris flow were analyzed in strong earthquake area. Based on results above, the characteristic parameters of “super-large-scale high-level long-distance debris flow” was defined.

Keywords: strong earthquake area; debris flow; peak discharge; factorial and regression analysis; prediction

强震引发的直接地质灾害和次生灾害的数量及规模远超震前水平,且持续时间可达数年甚至百年^[1-2]。同震地表破裂后形成的大量松散崩塌体、滑坡体直接对沟道内的物源进行补给^[3-4],导致震后次生泥石流灾害进入活跃期^[5]。据四川省国土资源厅调查,汶川地震后,5 a内(2008—2012年)共暴发2 333处次生泥石流,约为震前水平(2003—2007年,共758处)的3倍^[6],频发的泥石流灾害严重影响了地震灾区人民的生命和财产安全,制约了地震灾区的重建工作,如汶川县2013年“7.10”及2019年“8.20”泥石流。

强震对次生泥石流的显著“后效应”引起了学者们的普遍关注,针对日本关东地震(1923, Ms 7.9)和台湾集集地震(1999, Ms 7.6)都开展了较为系统的长期研究。震后经过40 a时间,日本关东地震地质灾害恢复到震前水平^[7],在震后10 a,台湾集集地震地质灾害恢复到震前水平^[8],黄润秋^[9]预测了受2008年地震影响,汶川县地质灾害将维持20~25 a,并以4~5 a为周期震荡式衰减。汶川地震10多年来,大量学者对地震灾区地质灾害的演化规律和发展趋势进行跟踪和预测,主要以定性分析为主,如野外地质调查、物源识别、地质建模、危险性评价等^[10]。受地震影响中国西南山区,震后泥石流呈现高频性、大规模和群发性的特征^[11],与普通山地泥石流存在显著差异。强震区泥石流沟道内存在大量的堰塞体,溃决后泥石流峰值流量会急剧增大^[12]。崔鹏等^[13]认为,汶川震后泥石流流量会普遍增大为震前的50%~100%;唐川等^[14]通过对8.14红椿沟泥石流调查发现,堰塞体溃决后峰值流量是溃决前水平的数倍。泥石流峰值流量主要与泥石流流域面积、沟道坡度、产流系数等因素相关,峰值流量计算方法有瞬时单位线方法、等流时线方法及直接积分法等。Gregoretti等^[15]通过对泥石流流域特征的分析,建立了获取峰值流量的半经验与经验公式,但在不同地质地貌环境的适用性有待探讨。Sinarta等^[16]根据山体地形构造与降雨水平对NHSU流量计算过程线进行修正,优化了设计峰值流量计算公式。然而,经验公式均需依靠流域

雨量、雨强的监测数据^[17],但偏远山区降雨监测受到复杂、高海拔地形的阻碍,局限性大^[18],且难以对复杂环境下泥石流暴发规模进行预测。由于震区泥石流形成机制和过程的复杂性,峰值流量的准确计算和预测仍面临挑战,但峰值流量对于防治或减轻泥石流危险性至关重要^[19]。

目前,常规的泥石流类型划分方法仅考虑了泥石流本身的流域特征参数,如流域面积、纵坡降、最大高差等,如“狭陡型泥石流”^[20]、“宽缓”与“窄陡”型泥石流^[21]、“急陡沟道泥石流”^[22],无法宏观体现泥石流的动力特点。泥石流的动力参数是震区泥石流防治的关键^[23],也是减灾防灾及沟谷地貌演化的重要理论之一^[24],如泥石流峰值流量、一次性冲出量等。根据《泥石流灾害防治工程勘察规范》(T/CAGHP 006—2018)^[25]规定,泥石流峰值流量是泥石流规模分级的重要指标,其中,峰值流量超过200 m³/s时,定义为特大型泥石流。野外调查发现,依据该划分标准对震区泥石流进行划分,大多数泥石流为特大型,对泥石流针对性防治工作不具备指导意义。为适应震区泥石流防灾减灾工程需要,需对泥石流类型进行精确划分。笔者利用因子回归分析方法,研究强震区泥石流流域特征参数与峰值流量的内在关系,建立强震区泥石流沟道峰值流量阈值预测模型,为峰值流量作为泥石流类型划分指标提供理论依据,并据此定义一组划分震区泥石流类型的特征参数。

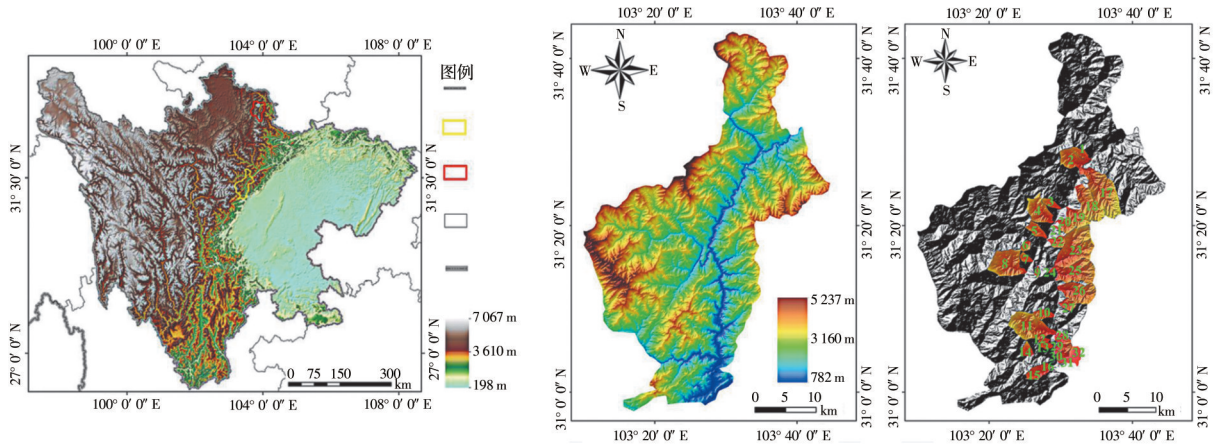
1 研究区概况

研究区地处四川省阿坝藏族羌族自治州境内的汶川(E103°30', N31°20')强震区,位于四川盆地西北缘向青藏高原的过渡带。属于温带季风气候,年平均气温13℃左右,年平均降雨量500 mm以上,大部分区域海拔2 000 m以上,垂直分带明显。

研究区地质构造复杂,褶皱断层发育,新构造运动剧烈,山地切割密度大,碳酸岩分布广泛,地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流)频发。由于5.12汶川地震

(Ms 8.0)为泥石流提供了大量的松散物源,研究区泥石流规模、暴发频次、群发性等特征与常规山地泥石流存在显著差异,需对现有规范中流量计算方法进行修正,并针对泥石流的活动特点、演化趋势及防

治中存在的问题,提出加强灾害分析、风险管理、预报预警等针对性的防灾减灾措施^[13]。选取的 32 条泥石流沟分布在汶川县岷江及都汶公路两侧,研究区地形地貌特征及泥石流沟分布情况如图 1 所示。



注:泥石流沟名称:1.羊岭沟;2.新桥沟;3.苏村沟;4.锄头沟;5.华溪沟;6.石村沟;7.红水沟;8.龙潭沟;9.毛洲沟;10.南磨子沟;11.小沟;12.关山沟;13.小磨子沟;14.蟹子沟;15.牛圈沟;16.张家坪沟;17.七盘沟;18.板桥沟;19.南板桥沟;20.安家沟;21.瓦窑沟;22.磨子沟;23.桃关沟;24.福堂沟;25.佛堂坝沟;26.罗圈湾沟;27.银杏坪沟;28.清水沟;29.芳子沟;30.烧房沟;31.红椿沟;32.大干沟。

图 1 研究区地形地貌及泥石流沟的分布

Fig. 1 Topography and position of debris flow gully in study area

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

强震区泥石流沟基础数据来源见表 1。

2.2 研究方法

基于 R 型主因子分析(PFA)^[27]与多元回归分析方法对泥石流特征参数进行研究。首先,通过因子分析解决原始数据之间共线性问题,进而对原始流域特征参数变量进行提取,确定公共因子(综合因子),以此达到降低自变量维度、简化回归模型的目的。根据因子分析中各指标方差贡献度确定各综合因子的权重,结合各指标变量回归模型建立目标值权重预测矩阵,对强震区沟谷型泥石流峰值流量阈值进行预测,从而为震区泥石流类型划分增加动力参数提供依据,研究方法技术路线见图 2。

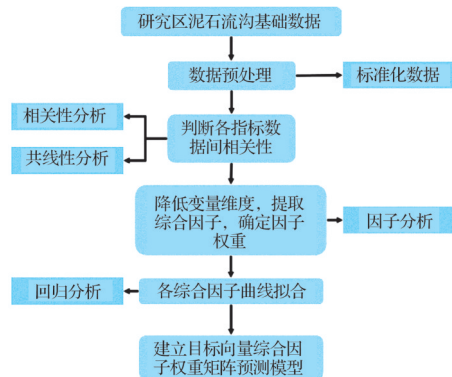


图 2 研究方法技术路线图

Fig. 2 Flow chart of research methodology

3 数据运算与分析

通过对四川汶川强震区 32 条泥石流沟基础数据的获取与整理^[14,24,26],随机选择 20 条泥石流沟,分

表 1 数据来源及类型

Table 1 Source and type of data

基础数据	数据来源与制作	数据格式
DEM	地理空间数据库云网站(www.gscloud.cn)	30 m × 30 m 栅格数据
地形数据	DEM提取、无人机遥感影像解译	矢量
泥石流特征参数	现场调查、历史调查报告查阅、文献调查 ^[14,26] 、泥石流灾害防治工程勘察规范(T/CAGHP 006—2018) ^[25]	数据

注:选取的泥石流沟峰值流量为历史周期内暴发的多次泥石流峰值流量最大值。

析 7 类流域特征参数:流域面积、沟道长度、最大高差、沟道平均纵坡降、横坡坡度、流域切割密度、流域形态发育系数与泥石流流动力特征参数峰值流量之间的关系,如图 3 所示,随机选取的 20 条沟在图 6 预测模型误差分析中标出。

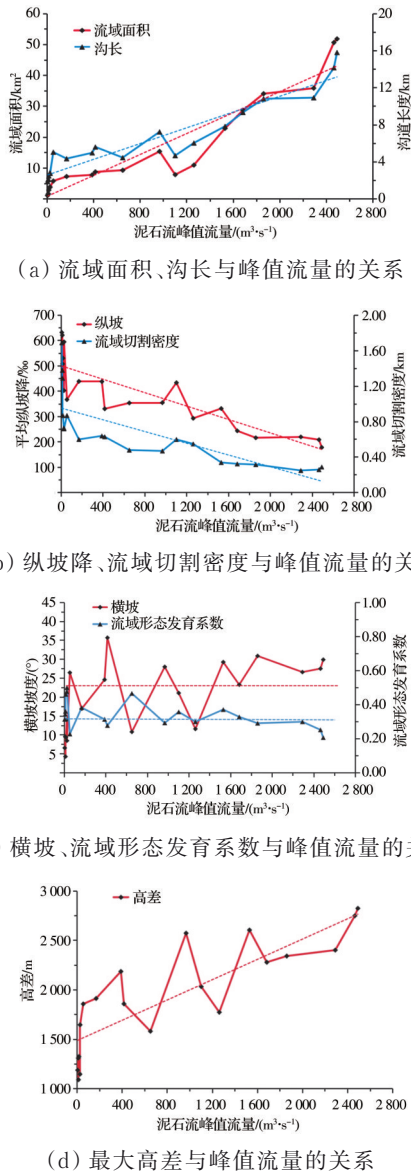


图 3 泥石流峰值流量与各指标关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between peak discharge and indexes of debris flow

由图 3 可知,用于划分泥石流类型的各指标与泥石流峰值流量均无明显线性相关关系。由图 3 (a)、(d)可知,随着泥石流沟峰值流量的增加,泥石流沟流域面积、沟道长度、最大高差均有增加趋势;由图 3(b)可知,随着泥石流峰值流量的增加,泥石流沟的平均纵坡降与流域切割密度均有下降趋势;由图 3(c)可知,泥石流沟横坡坡度、流域形态发育

系数随峰值流量增加无明显增减趋势,但强震区泥石流沟横坡坡度多数大于 20°,形态发育系数多数位于 0.25~0.5 区间,可判断四川强震区泥石流多数为沟谷型泥石流,且流域形态多数为桦叶形。

3.1 归一化数据

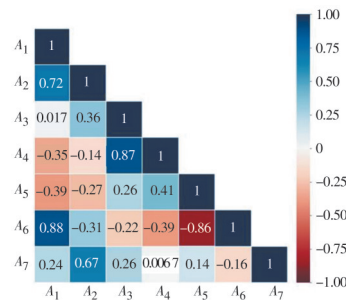
由于研究区泥石流沟的各指标因子量纲不同,为保证进行因子分析与回归分析时结果的精度,需进行原始数据归一化,计算公式为

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为原始变量矩阵值; $x_{j\max}$ 为原始变量矩阵第 j 列最大值; $x_{j\min}$ 为原始变量矩阵第 j 列最小值; X_{ij} 为归一化数据。

3.2 因子分析

3.2.1 相关性分析 在双侧检验的条件下,各泥石流特征参数相关性如图 4 所示,其中,流域面积、沟道长度、形态发育系数之间正相关较强,流域切割密度与流形态发育系数之间负相关性较强。直接运用相关性较强的自变量进行多元回归时会出现共线性问题。因此,需要对个特征参数进行共线性诊断,如表 2 所示。



注:数据相关性系数采用pearson线性相关分析,显著性水平 0.01; A_1 为流域面积; A_2 为沟道长度; A_3 为最大高差; A_4 为平均纵坡降; A_5 为流域切割密度; A_6 为形态发育系数; A_7 为横坡坡度。

图 4 基础数据相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of basic data

表 2 共线性诊断

模型	Sig.	TOL	VIF
流域面积	0.01	0.06	15.63
沟道长度	0.01	0.03	31.25
最大高差	0.00	0.45	2.24
平均纵坡降	0.01	0.39	2.58
流域切割密度	0.36	0.21	4.72
形态发育系数	0.24	0.46	2.16
横坡坡度	0.01	0.52	1.94

3.2.2 共线性诊断 由表 2 可知,在统计显著性 $\text{Sig.} < 0.01$ 下,存在泥石流特征参数流域面积、沟道

长度容差 $TOL < 0.1$, $VIF > 10$,即在建立多元回归分析模型时,会存在泥石流特征参数之间信息重叠问题,无法保证模型精度,需要进行因子分析,确定综合因子,进而进行单因素分析。

3.2.3 主因子分析 在标准化处理原始变量矩阵后,进行KMO与Bartlett球体检验,得到KMO检验统计量为 $0.697 > 0.50$,显著性 $Sig.=0 < 0.01$,因此,可对标准化相关系数矩阵进行因子分析,如表3所示。

表 3 总方差解释

Table 3 Explanation of total variance

主因子	特征根	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	2.11	29.46	29.46
2	1.85	25.84	55.30
3	1.39	19.41	74.71
4	1.15	16.06	90.77
5	0.49	6.84	97.61
6	0.12	1.68	99.29
7	0.05	0.71	100.00

为保证原始数据提供足够的解释信息,需保证累计方差贡献度大于80%,由于分析泥石流沟道基础地形特征参数与动力学参数之间的关系,需尽可能多地保留原始信息,因此,提取5个主因子,剔除2个主因子,累计方差贡献率为 $97.61\% > 80\%$,可以达到因子提取的要求。由公式计算后提取的综合因子的权重矩阵见式(2)。

$$w = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4 \quad w_5] = (0.302, 0.265, 0.198, 0.165, 0.07) \quad (2)$$

初始因子荷载矩阵表示综合因子对原始变量的信息提取程度,绝对值越大,表示综合因子对原始变量的解释程度越高。通过表4可判断综合因子

依次对流域面积、平均纵坡降、流域切割密度、沟道长度、最大高差解释效果最好,为充分表现原始数据之间的内在关系,将提取的综合因子权重值分别赋予原始变量,进行后续计算。

表 4 初始因子荷载矩阵

Table 4 Initial factor load matrix

变量	1	2	3	4	5
流域面积	1.179	0.608	-0.398	0.234	-0.616
沟道长度	0.718	0.261	-0.105	1.851	-0.252
最大高差	-0.196	0.190	0.122	-0.014	1.908
平均纵坡降	0.320	1.133	-0.354	0.437	0.822
流域切割密度	0.515	0.895	-1.196	0.380	-0.721
形态发育系数	0.494	0.224	0.102	0.610	-0.409
横坡坡度	0.060	0.489	-0.349	-0.276	-0.988

3.3 回归分析

通过对原始数据的共线性诊断发现,如果直接对原始数据进行多元线性回归分析,不同组原始数据之间会出现信息叠加,影响回归模型精度。因此,使用单一变量回归分析,通过对因子分析中提取的综合因子非线性回归分析,比较 Fourier、Gaussian、Polynomial、Logistic 4种函数拟合效果,最终确定使用 Polynomial 多项式函数对原始变量的回归分析结果最好,回归模型如表5所示。

通过各单一变量拟合曲线计算结果构建峰值流量参数矩阵,分别反映不同变量对峰值流量的影响,矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{15} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{p1} & y_{p2} & \cdots & y_{p5} \end{bmatrix} \quad (3)$$

表 5 回归分析结果

Table 5 Results of regression analysis

自变量	峰值流量拟合曲线	拟合优度 R^2
流域面积	$y_1 = 0.4853x_1^3 - 1.554x_1^2 + 2.121x_1 - 0.0497$	$R^2 = 0.90$
平均纵坡降	$y_2 = -0.8035x_2^3 + 2.64x_2^2 - 2.903x_2 + 1.066$	$R^2 = 0.84$
流域切割密度	$y_3 = -3.102x_3^3 + 6.695x_3^2 - 4.562x_3 + 0.9668$	$R^2 = 0.89$
沟道长度	$y_4 = -1.913x_4^3 + 2.255x_4^2 + 0.6658x_4 - 0.0201$	$R^2 = 0.90$
最大高差	$y_5 = -0.3297x_5^3 + 1.253x_5^2 + 0.0316x_5$	$R^2 = 0.74$

根据峰值流量的物理意义,需保证矩阵中各因子均大于0。

3.4 主因子回归预测模型的建立

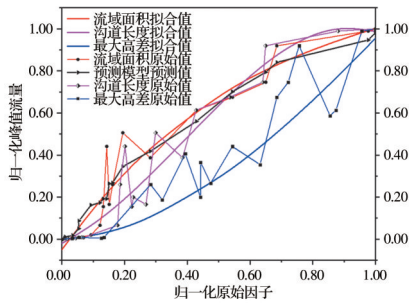
结合因子分析获取的综合因子的权重值与回归分析确定的流量矩阵,建立峰值流量权重矩阵预测模型,如式(4)所示。

$$Q_w = Qw^L \quad (4)$$

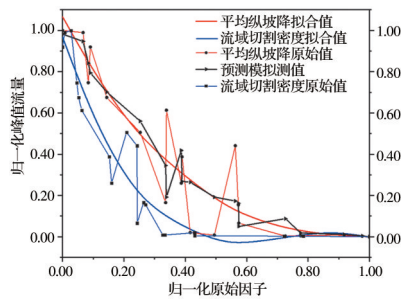
式中: Q_w 为预测模型求得的泥石流峰值流量阈值; w 为因子分析法求得的原始变量综合因子权重矩阵,如式(2)所示; Q 为回归模型求得的峰值流量矩阵,如式(3)所示。

以研究区 20 条泥石流沟各特征参数为原始变

量,分别采用回归分析模型与预测模型对泥石流沟峰值流量进行预测,通过分析发现,预测模型能更好地反映强震区泥石流沟地形地貌参数与动力特征参数峰值流量之间的关系,如图 5 所示。



(a) 归一化预测值与原始因子正相关



(b) 归一化预测值与原始因子负相关

图 5 预测值与原始值对比关系图

Fig. 5 Relationship between the predicted and original values

由图 5 可知,处于(0,0.3)区间内时,预测模型增长趋势与下降趋势明显,处于(0.7,1.0)区间内时,增长趋势与下降趋势放缓,预测模型可兼顾 5 种单一因素对目标变量的影响,且对目标变量峰值流量的拟合优度 $R^2 = 0.94$,大于各单一变量拟合优度最大值 $R^2 = 0.90$,同时,利用多变量解释目标变量,预测精度更高。由图 6 可知,预测模型的预测值相对误差在 10% 范围内,精度远高于最优曲线拟合结果,通过计算发现,预测模型的平均相对误差为 7.85%,回归模型的平均相对误差分别为 16.84%、20.59%、30.88%、26.79%、20.11%,相对回归模型,预测模型精度分别提高 8.99%、12.74%、23.03%、18.94%、12.26%。

4 研究区泥石流峰值流量预测及应用

4.1 预测模型的可靠性分析

通过对利用预测模型获取的剩余 12 条泥石流峰值流量阈值与其原始值的对比发现,预测值与原始值的最大相对误差为 10.6%,平均相对误差为

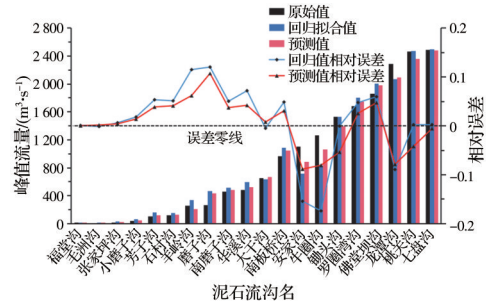


图 6 预测模型误差分析

Fig. 6 Error analysis of prediction model

3.5%,进一步说明了预测模型的可靠性与准确性,如图 7 所示。最后,通过因子回归预测模型对汶川强震区 32 条泥石流沟进行泥石流峰值流量阈值预测,绘制研究区峰值流量阈值区划图,对震区泥石流针对性防治提供建议,预测结果如图 8 所示。

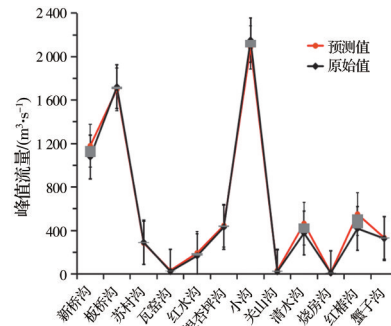


图 7 模型可靠性分析

Fig. 7 Model reliability analysis

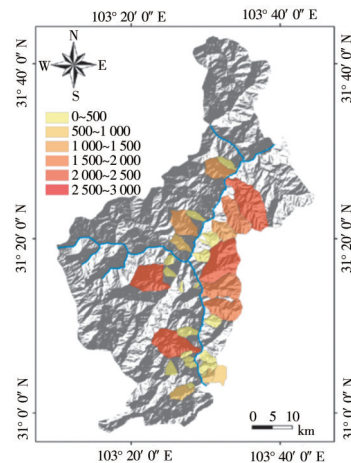


图 8 研究区泥石流峰值流量预测

Fig. 8 Predicted peak discharge of debris flow in study area

4.2 震区泥石流类型划分

根据《泥石流灾害防治工程勘察规范》(T/CAGHP 006—2018)^[25]规定,泥石流峰值流量超过

200 m³/s时定义为特大型泥石流,但强震区泥石流峰值流量普遍大于此界限(研究区超过70%属于特大型泥石流),因此,需重新定义强震区特大型泥石流峰值流量特征,以满足强震区防灾减灾工程需要。现通过泥石流峰值流量预测模型对四川汶川强震区32条泥石流沟进行预测,发现共有14条泥石流沟峰值流量>500 m³/s,约占统计泥石流沟数量的43.75%。其中,流域面积大于8 km²、沟道长度大于5.0 km、最大高差大于1 500 m、泥石流沟平均纵坡降小于350‰、流域切割密度小于0.65/km的泥石流数量分别占特大型泥石流数量的86.96%、78.26%、81.54%、95.65%、91.30%,将各泥石流参数值带入预测模型预测得到的峰值流量为538.90 m³/s,与定义特大型泥石流峰值流量偏差仅为7.78%,进一步说明了预测模型的精确性。因此,根据强震区泥石流特征,将峰值流量>500 m³/s、流域面积>8 km²、沟道长度>5.0 km、最大高差>1 500 m、泥石流沟平均纵坡降<350‰、流域切割密度小<0.65/km的沟道型泥石流定义为“震区特大型高位远程型泥石流”。

5 结论

通过对四川汶川强震区数条泥石流沟研究分析,得到的主要结论如下:

1)利用DEM影像(30 m×30 m)、卫星遥感影像解译获取研究区的地形地貌参数,通过对研究区泥石流特征参数分析发现,震区泥石流沟道两侧横坡坡度多数大于20°,呈明显沟道形式,为沟谷型泥石流;泥石流流域形态发育系数多位于0.25~0.5区间,流域形状近似呈桦叶型。

2)通过因子回归预测模型构建泥石流动力特征与地形地貌特征的内在联系,预测模型拟合优度 $R^2=0.94$,平均相对误差仅为3.5%,表明该模型预测强震区泥石流峰值流量的可靠性及实用价值,为震区泥石流针对性防治工作提供理论基础。

3)为提升强震区泥石流防治工程作用效果,需要对现有规范中震区泥石流规模等级划分条件加以修正。依据强震区泥石流沟道特征,定义一种震区特殊性泥石流——震区特大型高位远程型泥石流,其峰值流量大于500 m³/s,流域面积大于8 km²,沟道长度大于5.0 km,最大高差大于1 500 m,泥石流沟平均纵坡降小于350‰,流域切割密度小于0.65/km。

参考文献

[1] WEI X L, CHEN N S, CHENG Q G, et al. Long-term activity of earthquake-induced landslides: A case study

from Qionghai Lake Basin, Southwest of China [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 607-624.

- [2] HUANG R Q, LI W L. Post-earthquake landsliding and long-term impacts in the Wenchuan earthquake area, China [J]. Engineering Geology, 2014, 182: 111-120.
- [3] 周荣军, 黄润秋, 雷建成, 等. 四川汶川8.0级地震地表破裂与震害特点[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2173-2183.
ZHOU R J, HUANG R Q, LEI J C, et al. Surface rupture and hazard characteristics of Wenchuan earthquake with magnitude 8.0 in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2173-2183. (in Chinese)
- [4] 蒋志林, 朱静, 常鸣, 等. 汶川地震区红椿沟泥石流形成物源量动态演化特征[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 81-88.
JIANG Z L, ZHU J, CHANG M, et al. Dynamic evolution characteristics of Hongchun gully source area of debris flow in Wenchuan earthquake region [J]. Mountain Research, 2014, 32(1): 81-88. (in Chinese)
- [5] 崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊, 2008, 23(4): 317-323.
CUI P, WEI F Q, CHEN X Q, et al. Geo-hazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2008, 23(4): 317-323. (in Chinese)
- [6] 黄勋. 强震区大型泥石流动力特性与风险量化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
HUANG X. Dynamic characteristics and quantitative risk assessment of catastrophic debris flows in Wenchuan earthquake-stricken area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] NAKAMURA H, TSUCHIYA S, INOUE K, et al. Sabo against earthquakes [M]. Tokyo: Kokon Shoin, 2000.
- [8] CHEN H, HAWKINS A B. Relationship between earthquake disturbance, tropical rainstorms and debris movement: An overview from Taiwan [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(2): 161-186.
- [9] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 145-151.
HUANG R Q. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 145-151. (in Chinese)
- [10] 张友谊, 叶小兵, 顾成壮. 强震区震后泥石流物源启动机制研究现状[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 144-149.
ZHANG Y Y, YE X B, GU C Z. Research status of initiation mechanism of debris flow provenance after earthquake in meizoseismal area [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 144-149. (in Chinese)
- [11] 黄勋, 唐川, 乐茂华, 等. 汶川震区银厂沟区域8·18暴雨泥石流灾害成灾机理与特征[J]. 工程地质学报,

- 2013, 21(5): 761-769.
- HUANG X, TANG C, LE M H, et al. Mechanism and characteristics on debris flow hazards in Yinchanggou area triggered by rainstorm on August 18, 2012 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(5): 761-769. (in Chinese)
- [12] HUNGR O, MORGAN G C, KELLERHALS R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(4): 663-677.
- [13] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(5): 10-19.
- CUI P, ZHUANG J Q, CHEN X C, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(5): 10-19. (in Chinese)
- [14] 唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J]. *地球科学*, 2011, 36(1): 172-180.
- TANG C, LI W L, DING J, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, epicenter of Wenchuan earthquake [J]. *Earth Science*, 2011, 36(1): 172-180. (in Chinese)
- [15] GREGORETTI C, DEGETTO M, BERNARD M, et al. The debris flow occurred at Ru Secco Creek, Venetian Dolomites, on 4 August 2015: Analysis of the phenomenon, its characteristics and reproduction by models [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2018, 6: 80.
- [16] SINARTA I N, WAHYUNI P I, ARYASTANA P. Analysis of discharge and area of the debris flow based on geological structural and rainfall levels in the slopes of Mount Abang, Kintamani [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1098(2): 022064.
- [17] CUI P, GUO X J, YAN Y, et al. Real-time observation of an active debris flow watershed in the Wenchuan Earthquake area [J]. *Geomorphology*, 2018, 321: 153-166.
- [18] ZENG Q, CHEN H, XU C Y, et al. Feasibility and uncertainty of using conceptual rainfall-runoff models in design flood estimation [J]. *Hydrology Research*, 2016, 47(4): 701-717.
- [19] GUO X J, CUI P, CHEN X C, et al. Estimation of discharges of water flows and debris floods in a small watershed [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46(3): 642-658.
- [20] 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)
- [21] 韩玫. 汶川震区“宽缓”与“窄陡”沟道型泥石流致灾机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- HAN M. Hazard mechanism research of wide-gentle and narrow-steep channels debris flow in Wenchuan earthquake region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [22] 李卓儒, 周文倩, 贾梦瑶. 急陡沟道泥石流动力学特征模拟研究[J]. *甘肃水利水电技术*, 2018, 54(9): 4-8, 12.
- LI Z R, ZHOU W Q, JIA M Y. Simulation study on dynamic characteristics of debris flow in steep trenches [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2018, 54(9): 4-8, 12. (in Chinese)
- [23] 屈永平. 强震区急陡沟道泥石流动力特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- QU Y P. The research on dynamic characteristics of urgent steep-channel debris flows in meizoseismal area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [24] 王勇智. 固液两相泥石流运动计算力学[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- WANG Y Z. Solid-liquid of two-phase debris flow movement of computational mechanics [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [25] 泥石流灾害防治工程勘察规范: T/CAGHP 006—2018 [S]. 北京: 中国地质灾害防治工程行业协会, 2018.
- Debris flow hazard prevention engineering survey specification: T/CAGHP 006—2018 [S]. Beijing: China Geological Hazard Prevention Engineering Industry Association, 2018.
- [26] 王高峰, 田运涛, 高幼龙, 等. 非匀质泥石流运动特征与峰值流量关系研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1028-1038.
- WANG G F, TIAN Y T, GAO Y L, et al. Relationship between movement characteristics of nonhomogeneous debris flow and peak flow [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1028-1038. (in Chinese)
- [27] 张文彤, 钟云飞. IBM SPSS 数据分析与挖掘实战案例精粹[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- ZHANG W T, ZHONG Y F. IBM SPSS data analysis and mining [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)

(编辑 胡玲)