

黄健,贺子城,黄祥,等.基于地貌特征的滑坡堰塞坝形成敏感性研究[J].地质科技通报,2021,40(5):253-262.
Huang Jian, He Zicheng, Huang Xiang, et al. Formation sensitivity of landslide dam based on geomorphic characteristics[J].
Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(5): 253-262.

基于地貌特征的滑坡堰塞坝形成敏感性研究

黄 健, 贺子城, 黄 祥, 王 豪

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

摘 要: 滑坡堰塞坝是由斜坡失稳堵塞河道而形成的天然坝体,且易溃坝诱发洪水,对沿岸群众生命财产构成巨大的威胁。为提升主动减灾防灾能力,急需构建了一种快速预测与判断滑坡堵江成坝能力的方法。通过文献资料查阅,结合遥感技术,提取了70处典型滑坡的地貌特征参数,其中50处为堵江成坝滑坡。运用K-S检验和M-W U检验方法分析了滑坡地貌特征因子的敏感性,利用Boruta算法确定了因子重要度,筛选了滑坡体积、面积、高差、长度及河宽共5个地貌特征参数。基于此,利用Bayes判别法与逻辑回归方法,分别建立了滑坡堰塞坝形成的预测模型,准确率超过90%。选取高重要度且差异显著的因子,利用比值法建立了滑坡堵江成坝阈值判据,实现了滑坡堰塞坝形成的快速判定。统计不同诱因下滑坡地貌特征,对比 $V-W_r$ 经验公式,确定了滑坡堰塞坝形成与诱因间的关系,为进一步构建不同诱因下滑坡堰塞坝形成预测模型提供了技术支撑。

关键词: 滑坡堰塞坝;地貌特征;Bayes判别法;逻辑回归;阈值方程

中图分类号: P642.22 **文章编号:** 1000-7849(2021)05-0253-10 **收稿日期:** 2020-12-04

doi: 10.19509/j.cnki.dzkg.2021.0040

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Formation sensitivity of landslide dam based on geomorphic characteristics

Huang Jian, He Zicheng, Huang Xiang, Wang Hao

(The State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Landslide dams formed by unstable slope usually blocks the river, and later fail to trigger huge floods threatening the downstream residents' lives and properties. In order to improve the ability of active disaster reduction and prevention, it is urgent to construct a method to quickly predict and judge the ability of landslide to build dams. This paper firstly extracts the geomorphic characteristic parameters of 70 typical landslides based on literature reading and remote sensing, including 50 damming landslides. The five parameters (landslide volume, area, relief, length and river width) are determined by K-S test and M-W U test, and the Boruta algorithm is used to determine the factor importance. Then, the Bayes discriminance method and logistic regression method are used to build a prediction model of the landslide dam, in which the accuracy exceeds 90%. The threshold equation combined with H and L/W_r is determined by using factors with high importance and significant differences and the ratio method in order to carry out a rapid judgment of landslide dams formation. The statistic analysis of the landslide geomorphic characteristics of different triggering factors and the prediction result of $V-W_r$ empirical formula determine the relationship between landslide dams formation and triggering factors, providing technical support for the further con-

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目(41521002)

作者简介: 黄 健(1984—),男,副教授,主要从事地质灾害预测预报方面的研究工作。E-mail: hjian.2010@qq.com

通信作者: 贺子城(1997—),男,现正攻读地质工程专业硕士学位,主要从事地质灾害风险评价方面的研究工作。E-mail: hezicheng00@163.com

struction of prediction models for the formation of landslide dams with different inducements.

Key words: landslide dam; geomorphic characteristic; Bayes discriminant method; logistic regression; threshold equation

全世界 84% 的滑坡堰塞坝都是由降雨和地震造成的^[1]。滑坡堰塞坝高度可从几米到几百米,堰塞湖体积从几十万立方米至上百亿立方米,淹没上游区域。一旦溃坝,易形成洪水灾害,造成下游人员伤亡与财产损失。如 2008 年汶川地震诱发唐家山滑坡堰塞坝蓄水达 $2.425 \times 10^8 \text{ m}^3$,水位高 740 m,对下游构成了巨大威胁。2018 年西藏白格村金沙江右岸发生的特大型滑坡一堵江事件,使金沙江断流两日。可见,随着全球气候变化和强震频发,高海拔、高烈度地区易发生大型、特大型滑坡,潜在堵江风险巨大,亟需开展滑坡堰塞坝形成、堵江、溃坝等方面的深入研究。

国内外学者已对滑坡堰塞坝形成条件、稳定性及灾害链风险评价方面进行了大量的研究。如柴贺军等^[2]结合野外调查和文献查阅,提出滑坡堵江主要取决于地形条件和河床条件,且多为中、大型滑坡;Xu 等^[3]利用光学遥感影像解译汶川地震诱发的 256 个滑坡堰塞坝,对典型的 32 座天然堆石坝进行了危险性评价。另外,Fan 等^[4]利用遥感解译建立了汶川地震区滑坡堰塞坝数据库,并进行了滑坡堰塞坝空间分布特征及滑坡一堰塞湖一溃坝洪水的灾害链研究。对于滑坡堰塞坝的形成判据方面,樊晓一等^[5]认为滑坡堵江的根本原因在于滑坡与河流的空间区域小于滑坡运动距离,即受控于地形特征,通过研究未受河流地形显著阻止的滑坡水平运动距离与体积、垂直运动距离的关系可以判别滑坡堵江事件;Fan 等^[6]基于汶川地震下的滑坡堰塞坝数据库进行了同震滑坡堰塞坝形成经验预测,提出了反体积模型与体积一河宽经验公式共同决定的体积阈值;Chen 等^[7]通过统计台湾地震和台风形成的滑坡堰塞坝地貌特征参数,建立了滑坡堰塞坝预测模型。可见,滑坡堰塞坝的形成主要受控于滑坡地貌特征参数,数据易于获取,适用于建立快速判定的预测模型,且目前构建的判据条件尚未考虑滑坡诱发因素,针对不同诱因下滑坡是否具有相同的堵江成坝能力尚不清楚。

鉴于此,笔者通过文献查阅,收集历史上已发生的堵江成坝和未堵江成坝滑坡数据,利用遥感与 GIS 技术提取滑坡地貌特征参数,建立滑坡地貌特征参数数据库;利用非参数检验(K-S 检验,M-W U 检验)与 Boruta 算法,确定滑坡堰塞坝形成的关键地貌特征因子;采用 Bayes 判别法与 Logistic 回归模型,构建滑坡堰塞坝的形成预测模型与阈值判据;

基于此,进一步讨论不同诱因(台风、降雨及地震)下的滑坡堰塞坝地貌特征分布是否具有 consistency,堵江成坝能力是否存在差异,为开展不同诱因下滑坡堵江成坝能力预测研究提供支撑。

1 研究方法

本次主要从地貌特征上开展滑坡堰塞坝的形成敏感性研究。根据文献总结和分析,确定影响滑坡堵江成坝的主要地貌特征参数包括:滑坡面积、体积、高差、长度、高差与长度比值、坡度、宽度、河道宽度等^[3-5]。采用统计与数理方法,确定主控特征参数,建立基于地貌因子的滑坡堰塞坝预测模型,获取滑坡堵江成坝判据阈值。在此基础上,进一步讨论不同诱因形成的滑坡堵江成坝能力。

1.1 非参数检验与 Boruta 算法

非参数检验是一种常用的通过样本对总体进行推断的统计分析方法。该方法可在总体方差未知或知之甚少的前提下,利用样本数据对总体分布形态进行评估。本次研究主要运用 K-S 检验和 M-W U 检验。

K-S 检验是将样本数据的经验分布和特点与理论分布相比较,若两者之间的差距较小,则可推断出样本取值于特定的分布。M-W U 检验主要用于检验两组独立样本是否来自两组不同的样本,可比较两组样本之间的差异性。

Boruta 算法是一种寻找全部相关变量的特征选择方法^[8],通过将原特征矩阵随机排列构建阴影矩阵,同时将两者进行拼接构成新特征矩阵,运用随机森林分类器进行训练,并以阴影矩阵的最大 Z 分数作为判断原特征是否重要的阈值,不断迭代的过程中可从原特征矩阵中筛选出与因变量真正相关的特征集合,本次研究以袋外误差作为特征重要性进行输出,并计算 Z 分数。

1.2 分类方法

分类方法是一种常用的数据挖掘方法,依据样本数据的特征构建相应的分类函数或模型,目的是把未分类的样本映射到已确定的类别中,本次研究选用 Bayes 判别法和 Logistic 回归进行基于地貌特征的滑坡堰塞坝形成分类研究。

Bayes 判别法是通过将多维数据投影到某特定方向上,投影原则是不同类别的样本之间尽可能地分离,再运用贝叶斯判别函数将其分类^[7]。

Logistic 回归主要用于处理因变量为分类变量的回归问题,常采用 Sigmoid 函数解决二分类问题。

1.3 Bootstrap 方法

Bootstrap 方法又称自助法,是一种重采样的模型检验方法。通过对样本集进行多次等概率随机重采样,构建一个抽样分布,且认为其是最接近客观事实的样本^[9]。根据不同抽样方法的原理与数据特点,本次研究选取 Pairs Bootstrap,即对原样本集直接进行等概率(有放回)的随机抽样。利用多次随机抽样构建样本集,可有效减弱原样本数据波动的影响,也可对总体分布特征进行推断,使其更接近真实值。

2 数据提取与因子确定

2.1 数据来源

通过遥感手段可快速获取滑坡的基本地貌参数,基于此,选取滑坡堰塞坝形成相关的地貌因子包括滑坡形态因子和河流因子,共 8 个(图 1)。样本数据主要通过遥感解译方法和参考已发表的文献[3,5,7,10-24]及调查报告进行补充完善与验证(表 1,2)。DEM 数据采用 ALOS 卫星数据,分辨率 12.5 m。针对部分缺失的滑坡体积数据,采用 Larsen 等^[25]通过拟合全球 4 000 多处滑坡数据获得的最佳 V-A 关系公式,并结合已有滑坡资料验证了该公式的有效性。

$$V=0.146A^{1.332} \tag{1}$$

式中:V 为滑坡体积;A 为滑坡面积。

2.2 滑坡地貌因子相关性分析

本次研究总共收集了 50 个堵江成坝滑坡(表 2)和 20 个未堵江成坝滑坡,共计 70 个样本,具体滑坡名称和地理坐标可见来源文献[3,5,7,10-24]。其中滑坡堰塞坝样本的各地貌因子统计分布结果如

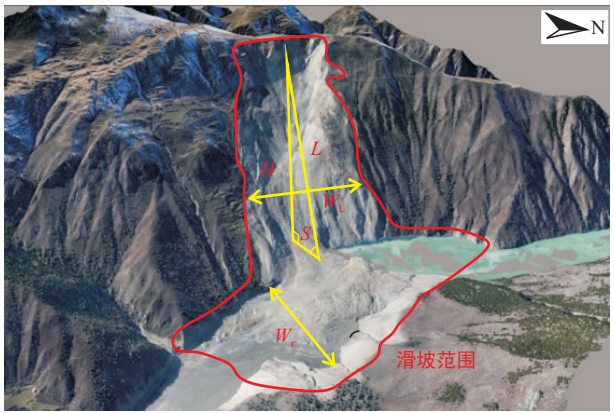


图 1 地貌特征参数示意图(以白格滑坡为例,具体含义见表 1)

Fig. 1 Schematic diagram of geomorphic characteristics

图 2 所示,可见大部分样本均分布在相近的范围内,差异性不大,且分布形态具有一定的相似性。

表 1 地貌特征参数的确定及量值提取方法^[3,5,7,10-24]

Table 1 Determination of the geomorphologic characteristic parameters and extraction method for the quantitative value

地貌特征	定义	提取方法
滑坡面积 A/m^2	滑坡形成(破坏)和堆积的平面面积	结合文献资料和 Google Earth 的历史影像信息解译
滑坡体积 $V/10^4\text{m}^3$	估算发生滑坡的体积	滑坡范围,计算面积;同时可借助经验公式计算体积
滑坡高差 H/m	滑坡高程的变化量(滑坡后缘与前缘的高程差)	结合文献资料并利用 Google Earth 历史影像信息与标尺工具提取滑坡高差、长度、宽度和河宽
滑坡长度 L/m	滑坡纵向长度	
滑坡宽度 W_L/m	滑坡最大的横向宽度	
河宽 W_r/m	河道的宽度	
滑坡坡度 $S/(\text{^\circ})$	滑坡体表面与水平方向的夹角,取其平均值为滑坡坡度	利用 GIS 中 3D 分析工具与 DEM 计算坡度、坡向
H/L 比值	H 和 L 的比值	根据滑坡高差与长度值,计算 H/L

关于滑坡地貌特征参数与滑坡堰塞坝形成的关系简述如下:

(1)滑坡面积、体积、长度、宽度表征了滑坡规模。较大规模的滑坡形成滑坡堰塞坝的可能性更大,为其形成提供了物质方面的条件。

(2)滑坡高差、坡度代表着滑坡势能。滑坡高差和坡度越大,水平运动距离越远,阻断河流的可能性也就越大,为滑坡堰塞坝的形成提供了能量方面的条件。

(3) H/L 为滑坡总斜率,反映滑坡的基本形态特征,在一定程度上可体现滑坡在运动过程中的受阻情况。

(4)河宽可表示河流的规模。河流的宽度越小,更容易被小型滑坡和滑坡堰塞坝阻挡。

2.3 预测因子的确定

2.3.1 地貌特征参数检验

通过 K-S 检验计算可得 A 、 V 、 H 、 L 、 S 、 W_L 、 W_r 的显著性水平小于 0.05,为非正态分布; H/L 显著性水平大于 0.05,即显著地来自正态分布总体。对于呈正态分布的因子可采用单因素方差分析,而对于非正态分布的因子则应采用 M-W U 检验进行分析。为了保证整体的一致性,综合考虑之下各因子均采用 M-W U 检验。

根据 M-W U 检验理论,将滑坡样本分为两组,

表 2 堵江成坝滑坡的地貌特征参数^[2,4,6,10-24]

Table 2 Geomorphic characteristics parameters of damming landslide

编号	诱因	A/m ²	V/10 ⁴ m ³	H/m	L/m	H/L	S/(°)	W _L /m	W _r /m	资料来源
1	台风	55 667	31	119	373	0.319	22.5	311	273	
2	台风	34 954	16	102	287	0.355	24.0	116	33	
3	台风	61 590	35	263	574	0.458	29.8	349	92	
4	台风	149 377	114	346	608	0.569	41.8	518	24	
5	台风	38 910	19	117	307	0.381	29.7	228	47	
6	台风	83 997	53	294	1 046	0.281	15.7	144	145	
7	台风	324 744	320	429	1523	0.282	27.3	450	173	
8	台风	25 192	11	106	352	0.301	2.5	105	184	
9	台风	329 953	327	597	807	0.740	32.2	556	69	
10	台风	366 400	376	500	919	0.544	24.6	810	188	
11	台风	2 487 075	4 824	621	1 990	0.312	24.7	2 782	16	
12	台风	6 109	2	36	116	0.310	4.5	109	20	
13	台风	61 870	35	53	193	0.275	1.7	438	102	
14	台风	204 452	173	318	1 428	0.223	26.4	322	16	Chen 等 ^[7]
15	台风	41 3071	441	331	917	0.361	24.7	1 290	265	
16	台风	8 576	3	60	97	0.619	12.3	131	24	
17	台风	87 926	56	289	308	0.938	33.4	280	26	
18	台风	47 884	25	140	678	0.206	15.1	88	28	
19	台风	58 936	33	161	539	0.299	30.4	137	26	
20	地震	26 267	11	197	270	0.730	17.4	165	46	
21	降雨	76 233	46	261	419	0.623	28.6	290	5	
22	台风	20 603	8	193	379	0.509	26.5	267	52	
23	台风	92 679	60	181	451	0.401	32.1	400	16	
24	地震	6 045 884	15 749	822	2 046	0.402	24.9	1 663	194	
25	地震	1 982 762	3 567	505	1 212	0.417	21.9	1 268	38	
26	降雨	165 621	131	406	937	0.433	27.5	205	179	
27	降雨	61 081	35	121	398	0.304	27.7	113	17	
28	降雨	277 593	260	155	350	0.443	36.0	120	55	樊晓一等 ^[10]
29	地震	1 490 909	2 440	835	1 200	0.696	27	130	611.8	胡卸文等 ^[11]
30	地震	3 730 000	115 900	1 567	3 400	0.461	29	1 500	170	许强等 ^[3]
31	降雨	520 000	1 542	300	1 205	0.249	25	445	65	樊晓一等 ^[5]
32	降雨	1 954 688	3 500	850	1 413	0.602	57.5	560	112	许强等 ^[12]
33	地震	255 770	350	250	472	0.530	36	308	160	
34	地震	182 000	468	562	880	0.639	48	400	172	
35	降雨	1 400 000	9 500	1 000	1 500	0.667	60	1 150	200	樊晓一等 ^[5]
36	降雨	251 880	424	430	770	0.558	65	432	150	
37	降雨	1 075 000	2 500	190	725	0.262	15	1 300	90	乔建平 ^[13]
38	地震	1 504 264	2 110	552	1317	0.419	35	980	156	龙维 ^[14]
39	降雨	540 000	540	325	1 350	0.241	21	550	65	简文星 ^[15]
40	降雨	10 440	18	108	280	0.386	30	100	10	樊晓一等 ^[16]
41	地震	1 650 000	15 000	238	800	0.298	22	800	436	
42	地震	91 185	12	280	450	0.622	43	87	130	柴贺军 ^[17]
43	地震	1 400 387	10 250	1 395	2136	0.653	65	986	330	
44	地震	192 367	300	430	1 000	0.430	45	120	83	裴向军 ^[18]
45	地震	313 917	4 000	509	1 034	0.492	22.5	404	135	杨琴 ^[19]
46	地震	750 000	60 000	640	1 300	0.492	35	320	90	王家柱 ^[20]
47	降雨	10 725 806	30 000	3 330	8 000	0.416	30	912	327	吕杰堂 ^[21]
48	降雨	3 100 000	5 040	400	1 000	0.400	25	900	180	周洪福 ^[22]
49	地震	500 000	2 000	440	950	0.463	37.5	900	95	陈丹 ^[23]
50	地震	360 000	2 800	650	750	0.867	60	500	220	柴贺军 ^[24]

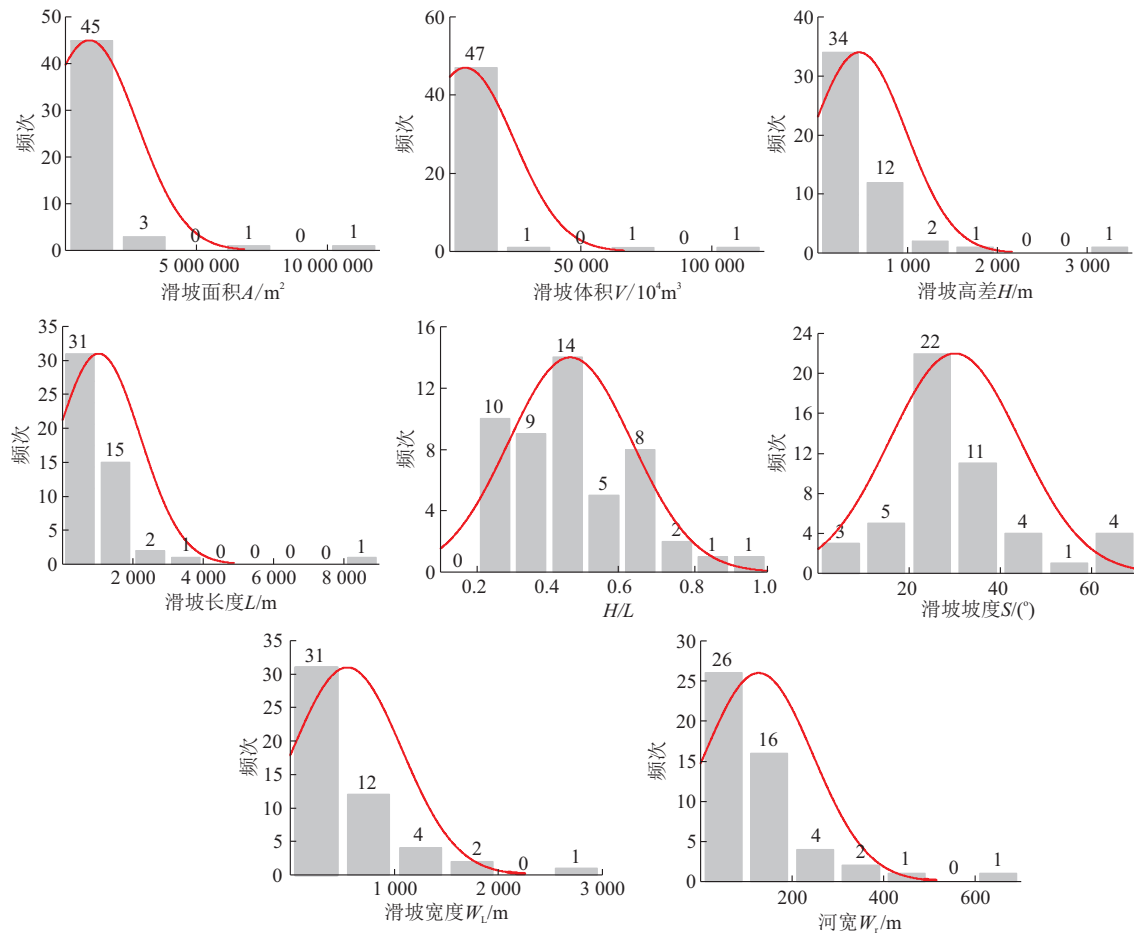


图2 堵江成坝滑坡地貌特征参数统计分布图

Fig. 2 Statistical distribution diagram of geomorphic characteristics parameters in damming landslides

一组为堵江成坝滑坡,标记为“1”;另一组为非堵江成坝滑坡,标记为“0”。计算结果为 A 、 V 、 H 、 L 、 W_L 、 W_r 的显著水平分别为 0.002, 0.009, 0.0, 0.006, 0.001, 均小于 0.05, 具有显著的差异性, 其余因子则无明显差异性。上述结论进一步证明了本次研究所收集的同组滑坡统计样本之间存在一定的相似性, 具备统计分析的共性基础。

由此可知, 滑坡堰塞坝的形成受上述 6 个滑坡地貌特征参数影响显著, 且主要受控于滑坡的规模、势能、河流规模 3 个因素, 体现为滑坡运动距离、滑坡与河流规模的相对大小, 是控制滑坡是否堵江成坝的关键条件。

2.3.2 基于 Boruta 算法确定重要程度

利用 Anaconda3 软件中 BorutaPy 包对初步选取的 8 个地貌特征因子作重要程度排序, 提取迭代过程中基于随机森林分类器所得的重要程度 (Z 分数)。

由图 3 可知, A 、 V 、 H 、 L 、 H/L 、 S 、 W_r 的 Z 分数均大于 $Z_{\max}$, 并被标记为重要; W_L 则处于 $Z_{\max}$ 与 $Z_{\min}$ 之间, 被标记为不重要。其中 H 、 L 、 W_r 的

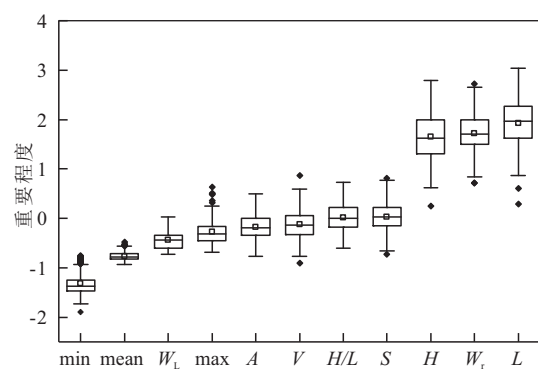


图3 地貌特征因子重要程度排序

Fig. 3 Order of importance degree of geomorphic characteristics

Z 分数显著高于 $Z_{\max}$ 与其余地貌特征参数的重要程度, 表现出较高的重要性, 而其余被标记为重要的地貌特征参数均处于同一水平。 H 、 L 在一定程度上可分别表示滑坡的势能、规模, 且 W_r 为河宽, 这与上述分析结果具有一致性, 进一步确定了更为重要的主控因子。

综上所述,M-W U 检验可判断出在堵江成坝与未堵江成坝滑坡中表现显著差异的因子,Boruta 算法可筛选出与因变量真正相关的地貌特征因子。结合两种方法的结果,考虑最大程度满足各地貌特征因子的敏感性要求,选取 A 、 V 、 H 、 L 、 W_r 5 个参数作为构建滑坡堵江成坝预测模型的地貌因子。

3 滑坡堰塞坝形成敏感性研究

3.1 基于 Bayes 的预测模型构建

将堵江成坝滑坡计为“1”,未堵江成坝滑坡计为“0”。采取随机取样的方法从所收集的样本库中选取 70% 的样本作为训练集,建立预测模型。余下 30% 的样本作为验证集,用于检验模型的预测效果。

表 3 Bayes 线性判别系数

Table 3 Bayes linear discriminace coefficient

因子	M1		M2		M3	
	0	1	0	1	0	1
滑坡面积 A	-4.632×10^{-7}	-1.338×10^{-6}	-4.606×10^{-7}	-8.381×10^{-7}	-4.259×10^{-7}	-1.154×10^{-6}
滑坡体积 V	-2.773×10^{-5}	0.000	-6.514×10^{-6}	-1.092×10^{-5}	5.399×10^{-7}	-9.188×10^{-6}
滑坡高差 H	-0.002	0.004	-0.002	0.001	-0.003	0.001
滑坡长度 L	0.002	0.005	0.001	0.002	0.002	0.002
河宽 W_r	0.008	2.901×10^{-5}	0.010	0.002	0.008	0.001
常量	-2.784	-2.741	-2.527	-1.507	-2.672	-1.601

$$Y_0 = -4.632 \times 10^{-7}A - 2.773 \times 10^{-5}V - 0.002H + 0.002L + 0.008W_r - 2.784 \quad (2)$$

$$Y_1 = -1.338 \times 10^{-6}A + 0.000V + 0.004H + 0.005L + 2.901 \times 10^{-5}W_r - 2.741 \quad (3)$$

$$Y = Y_1 - Y_0 = -8.748 \times 10^{-7}A + 2.773 \times 10^{-5}V + 0.006H + 0.003L - 7.97099 \times 10^{-3}W_r + 0.043 \quad (4)$$

表 4 各模型分析结果对比

Table 4 Comparison of analysis results of each model

模型	精确度/%	准确率/%	漏报率/%	误报率/%
M1	93.9	90.0	8.0	6.1
M2	82.1	80.0	8.0	17.9
M3	80.4	77.1	10.0	19.6

3.2 基于 Logistic 回归的预测模型构建

将滑坡样本分为两组,一组为堵江成坝滑坡,计为“1”;另一组为未堵江成坝滑坡,计为“0”。运用 Logistic 模型得回归方程式(5), R^2 为 0.793,表明拟合效果处于可接受范围,该回归方程可行。

$$Y = 0.006V + 0.008H + 0.007L - 0.015W_r - 0.217 \quad (5)$$

为避免偶然性事件,共随机进行了 3 次,分别构建了 3 个判别模型(M1、M2、M3)。

判别模型中各因子的判别系数如表 3 所示,在此基础上利用精确度、准确率、漏报率、误报率 4 个指标定量评价模型的效果,以确定最优模型。

各模型判别分析的结果如表 4 所示,其中 M1 模型的精确度与准确率最高(93.9%、90.0%),漏报率与误报率最低(8.0%、6.1%);M2 模型中误报率最低(8.0%);M3 模型精确度和准确率最低(80.4%、77.1%),漏报率和误报率最高(10.0%、19.6%)。精确度与准确率最高且漏报率与误报率最低的模型效果最好,应为最优模型,即 M1 模型为最优模型。所得的判别方程为公式(2)~(4),当 $Y > 0$ 时,滑坡堰塞坝形成的概率最大。

采用 Logistic 回归分析方法所得模型的准确率为:未堵江成坝滑坡 85.0%,堵江成坝滑坡 96.0%,总准确率为 92.9%(表 5)。

表 5 Logistic 回归分析分类

Table 5 Classification of logistic regression analysis

实测	预测		准确率/%
	0	1	
0	17	3	85.0
1	2	48	96.0
总准确率/%			92.9

基于 Logistic 回归模型,采用条件参数估计似然比检验法进行向前逐步回归(公式(6)),以确保最终用于模型构建的因子均具有显著影响。相比于上一模型,该模型可最大程度地解释因变量的变化,各因子之间不存在多重共线性^[26-28]。

$$Y = 0.016H - 0.011W_r - 0.053 \quad (6)$$

模型准确率为:未堵江成坝滑坡 85.0%,堵江成坝滑坡 92.0%,总准确率为 90.0%(表 6), R^2 为 0.728。上述两个模型各有优劣,通过比较准确率的大小,确定最优模型为公式(5)。

3.3 滑坡堰塞坝形成的阈值判据

基于主控因子与理论分析,通过运用合理的分类模型可建立滑坡堰塞坝形成的阈值方程,应用于堵江成坝滑坡的快速判定。根据前述的预测模型构建结果,可知 Logistic 模型优于 Bayes 判别法,更适合用于阈值方程的建立。

表 6 Logistic 回归分析分类

Table 6 Classification of logistic regression analysis

实测	预测		准确率/%
	0	1	
0	17	3	85.0
1	4	46	92.0
总准确率/%			90.0

参考前述因子分析的结果,本次研究提出一种较为简单的阈值判据,采用重要程度较高且表现出明显差异性的因子(H 、 L 、 W_r),结合比值法^[7] (L/W_r) 建立滑坡堰塞坝阈值判别方程,可有效减弱可用数据中特定数值的限制,提高所得阈值线的准确性。

图 4 显示滑坡长度在一定程度上可表示滑坡规模的大小,且滑坡纵向长度越大于河宽,堵江成坝的可能性越大;滑坡高差则代表滑坡势能的大小。因此,当 H 与 L/W_r 均越大,即滑坡运动足够远的距离且规模远大于河流时,堵江成坝的可能性越大,反之则堵江成坝的可能性越小。

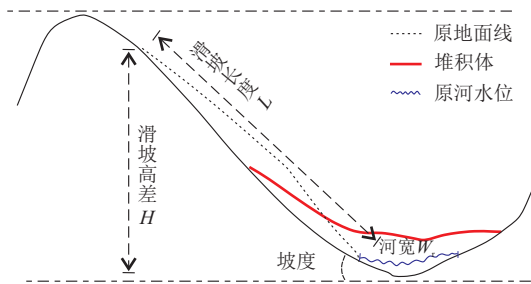


图 4 滑坡高差 H 与(滑坡长度/河宽) L/W_r 的关系

Fig. 4 Relation between H and L/W_r

为了避免小样本的影响,利用 Bootstrap 方法进行 50 次随机抽样构建了 50 个 Logistic 模型,以平均值作为分界线的最终参数(公式(7))。为了保证可靠性,以最外侧的 Logistic 模型作为上下区间线,上区间线(公式(8))以上的滑坡为堵江成坝滑坡,下区间线(公式(9))以下的滑坡为未堵江成坝滑坡,而上下区间线内的滑坡则需要进一步的理论计算或数值模拟来判断其是否堵江成坝(图 5)。

为了验证该阈值方程的实际应用性,分别选取典型的堵江成坝滑坡与未堵江成坝滑坡进行验证(表 7)。通过将参数值代入上述阈值方程,可知验

证效果良好(图 5)。

$$\ln(H) = -3.212\ln(L/W_r) + 7.091 \quad (7)$$

$$\ln(H) = -8.525\ln(L/W_r) + 15.601 \quad (8)$$

$$\ln(H) = -2.478\ln(L/W_r) + 5.866 \quad (9)$$

表 7 滑坡地貌特征参数^[29-30]

Table 7 Geomorphic characteristics parameters of landslide

滑坡	类别	H/m	$\ln H$	L/m	W_r/m	$\ln(L/W_r)$
平溪村	1	144	4.970	414	36	2.442
二蛮山	0	610	6.413	1 000	1 542	-0.433

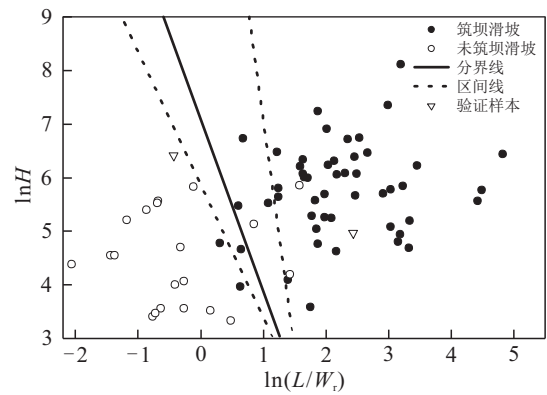


图 5 滑坡高差 H 与(滑坡长度/河宽) L/W_r 的统计分析

Fig. 5 Statistical analysis of H and L/W_r

4 滑坡堰塞坝形成的诱因

本次研究收集的滑坡堰塞坝案例主要受台风、降雨和地震 3 类外因条件诱发形成。基于堵江成坝滑坡样本(50 处),统计不同诱因下堵江成坝滑坡地貌特征参数的分布情况,进一步利用地貌特征参数之间的相关性与经验公式来探讨不同诱因下滑坡的堵江成坝能力。

4.1 不同诱发因素的滑坡堰塞坝差异性分析

图 6 表明在降雨、地震及台风诱发形成的滑坡堰塞坝中,体积、河宽分布特征表现为地震最大,降雨次之,台风最小,其余的地貌特征均表现为地震与降雨相差不大,且均大于台风(均值分析);体积、高差、 H/L 、坡度、河宽表现为地震>降雨>台风,面积、长度、宽度表现为地震=降雨>台风(中位线分析)。根据 25%~75% 范围显示,相比于台风和降雨,地震诱发的滑坡堰塞坝中长度、河宽的离散程度相对较小,其余的地貌特征则无明显的差异。可见,地震与降雨在分布上具有一定的相似性,诱发的滑坡堰塞坝多为大型滑坡,而台风诱发的滑坡堰塞坝多为中、小型滑坡,存在一定的差异性。分析原因主要为:地震释放巨大能量,破坏斜坡稳定状态,影响范围较大,易于诱发大型滑坡;而相比于地震,台风则依靠其带来的强降雨与强风,产生的影响有限。

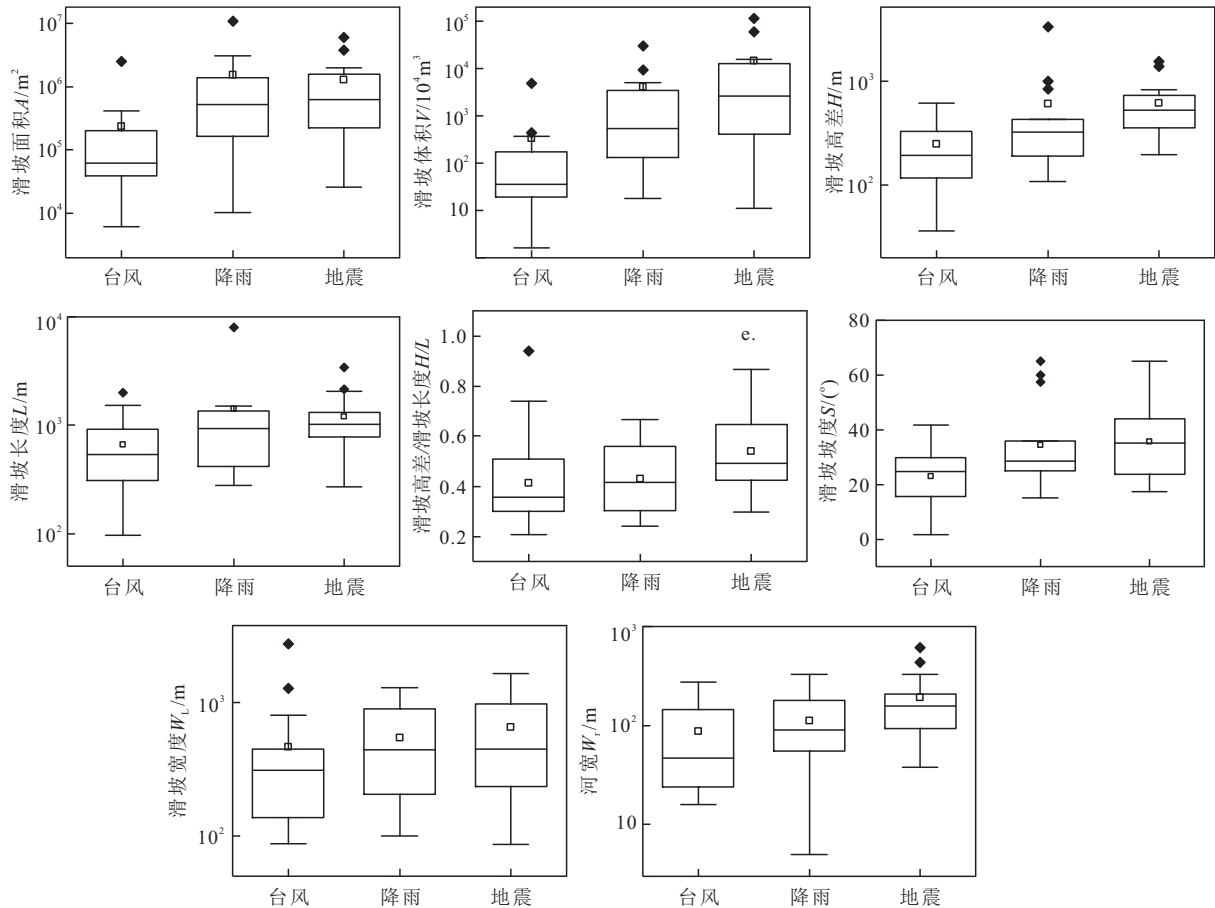


图 6 不同诱因下的滑坡地貌特征参数统计分析

Fig. 6 Statistics analysis of geomorphic characteristics under different incentives

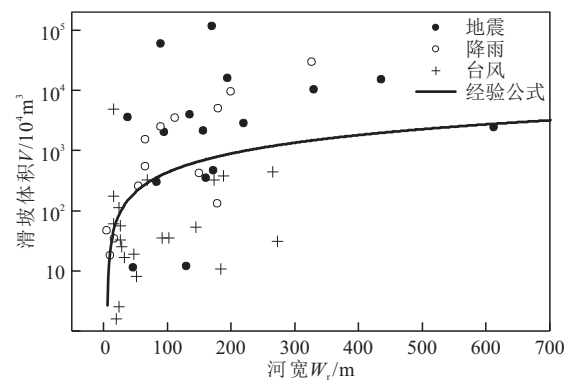
综上所述,不同诱因形成的滑坡堰塞坝在滑坡规模、势能的分布上具有一定差异性,而河宽则无明显差异。

4.2 不同诱因形成滑坡的堵江成坝能力分析

通过前述分析可知,地震诱发滑坡堰塞坝的地貌特征参数分布特征与台风具有显著的区别。根据堵江成坝滑坡样本集,通过比较不同诱因下堵江成坝滑坡的 $V-W_r$ 分布情况,并结合合同震级下堵江成坝滑坡体积—河宽经验公式^[6](公式(10)),分析不同诱因下滑坡堵江成坝能力。

$$V = 45\,747W_r - 247\,897 \quad (10)$$

图 7 表明利用经验公式(10)可在一定程度上较好地判别出地震、降雨诱发的滑坡是否堵江成坝,但明显不适用于台风,与统计分析结果较符合。当河宽处于 0~200 m 范围内时,相比于台风,地震与降雨诱发的滑坡需要更大的体积才能堵江成坝,造成这种现象可能的原因有:①地震滑坡与非地震滑坡的地形阻止系数(指地形的综合阻止系数,详细内容可参考樊晓一等^[10])均随滑坡规模的增大而变小,同时地震滑坡明显大于同规模等级的非地震滑坡^[29];②对于中、小型滑坡,台风带来的强降雨可有

图 7 滑坡体积 V 与河宽 W_r 的关系Fig. 7 Relation between V and W_r

效地软化滑带,降低抗剪强度,促使滑坡整体滑动,同时强力的台风在一定程度上使其动能增大,滑动更远的距离。

通过上述特征统计与定性分析可知,不同诱因触发的滑坡堵江成坝能力不同,因此应结合触发机制,以构建精细化的预测模型或判据,进而实现滑坡堵江成坝能力的综合评估。在判断中、小型滑坡是否堵江成坝时,应首要考虑台风工况,其次为地震工

况;在判断大型滑坡是否堵江成坝时,应首要考虑地震工况,其次为降雨工况。

5 结 论

通过文献查阅与遥感解译,对形成滑坡堰塞坝的地貌特征进行了敏感性研究,建立了滑坡堰塞坝预测模型和阈值方程,并讨论了不同诱因下堵江成坝滑坡的地貌特征分布情况及其堵江成坝能力的差异。主要得出以下结论:

(1)提取堵江成坝滑坡和非堵江成坝滑坡的地貌特征参数,利用 K-S 检验、M-W U 检验、Boruta 算法确定滑坡堰塞坝形成的预测因子,包括滑坡体积(V)、面积(A)、高差(H)、长度(L)及河宽(W_r)共 5 个因子。

(2)利用 Bayes 判别与 Logistic 回归方法,分别建立了滑坡堰塞坝形成的预测模型。检验得准确率超过 90%,表明所建模型能够满足预测精度要求。通过 H 与 L/W_r 的相关性分析,确定了滑坡堰塞坝形成阈值判别方程,验证效果良好。

(3)对不同诱因形成的滑坡堰塞坝的统计分析表明,滑坡堰塞坝的形成具有显著的地貌特征差异,河宽无明显差异。地震与降雨在分布上具有一定的相似性,诱发的滑坡堰塞坝多为大型滑坡,而台风诱发的滑坡堰塞坝多为中、小型滑坡。

(4)根据 $V-W_r$ 的分布情况与经验公式分析,对滑坡堰塞坝的形成应结合滑坡触发机制进行综合评估。当滑坡规模较小时,台风为最危险工况,反之,地震为最危险工况。限于样本数量的局限,笔者下一步将在完善样本数据库基础上,进一步分析不同诱因下滑坡堵江成坝能力,改进本次研究已建立的预测模型及阈值判据。

参考文献:

- [1] Schuster R L, Costa J E. Perspective on landslide dams[C]//A-nnon. Landslide Dams: Processes, risk, and mitigation. [S. l.]: [s. n.], 1986: 1-20.
- [2] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 滑坡堵江的基本条件[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(1): 41-46.
Chai H J, Liu H C, Zhang Z Y. The main conditions of landslide dam[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(1): 41-46 (in Chinese with English abstract).
- [3] Xu Q, Fan X M, Huang R Q, et al. Landslide dams triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, southwest China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68: 373-386.
- [4] Fan X M, van Westen C J, Xu Q, et al. Analysis of landslide dams induced by the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 57: 25-37.
- [5] 樊晓一, 黄润秋, 乔建平, 等. 未受河流阻止的滑坡水平运动距离与滑坡堵江判别[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 128-133.
Fan X Y, Huang R Q, Qiao J P. Horizontal movement distances of no-blocking landslide and blocking river assessment [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 128-133 (in Chinese with English abstract).
- [6] Fan X M, Rossiter D G, van Westen C J, et al. Empirical prediction of Coseismic landslide dam formation[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39: 1913-1926.
- [7] Chen C Y, Chang J M. Landslide dam formation susceptibility analysis based on geomorphic features[J]. Landslide, 2016, 13: 1019-1033.
- [8] Kursa M B, Rudnicki W R. Feature selection with the Boruta Package[J]. Journal of Statistical Software, 2010, 36(11): 1-13.
- [9] Li D, Tang X, Phoon K. Bootstrap method for characterizing the effect of uncertainty in shear strength parameters on slope reliability[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 140: 99-106.
- [10] 樊晓一. 地震与非地震诱发滑坡的运动特征对比研究[J]. 岩土力学, 2010, 11(2): 32-37.
Fan X Y. Comparative study on movement behaviors of seismic and non-seismic induced landslides[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 11(2): 32-37 (in Chinese with English abstract).
- [11] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 182-189.
Hu X W, Huang R Q, Shi Y B et al. Analysis on blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 182-189 (in Chinese with English abstract).
- [12] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551.
Xu Q, Zheng G, Li W L, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018 [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534-1551 (in Chinese with English abstract).
- [13] 乔建平, 吴彩燕, 李秀珍, 等. 四川省宣汉县天台乡特大型滑坡分析[J]. 山地学报, 2005, 23(4): 458-461.
Qiao J P, Wu C Y, Li X Z, et al. Analysis on super large-scale landslide in Tiantai, Xuanhan, Sichuan [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(4): 458-461 (in Chinese with English abstract).
- [14] 龙维. 金沙江上游特大型古滑坡成因及稳定性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Long W. Study on causation and stability of Temi large-scale ancient landslide in the upper Jinsha River [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015 (in Chinese with English abstract).
- [15] 简文星, 殷坤龙, 闫天俊, 等. 重庆万州区民国场滑坡基本特征及形成机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 20-23.
Jian W X, Yin K L, Yan T J, et al. Characteristics and formation mechanism of Minguochang landslide in Wanzhou District, Chongqing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard

- and Control, 2005, 16(4): 20-23 (in Chinese with English abstract).
- [16] 樊晓一, 王成华, 乔建平. 两龙滑坡特征及转化泥石流机制分析[J]. 水土保持研究, 2015, 12(6): 156-158.
Fan X Y, Wang C H, Qiao J P. Feature of lianglong landslide and the mechanism analysis of landslide-induced debris flow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 12(6): 156-158 (in Chinese with English abstract).
- [17] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 一九三三年叠溪地震滑坡堵江事件及其环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(1): 7-17.
Chai H J, Liu H C, Zhang Z Y. Landslide dams induced by diexi earthquake in 1933 and its environmental effect[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1995, 6(1): 7-17 (in Chinese with English abstract).
- [18] 裴向军, 郝宣峰, 张军新, 等. 老鹰岩滑坡成因机制与运动特征研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(4): 28-32.
Pei X J, Hao Y F, Zhang J X, et al. Movement characteristics and mechanism of Laoyingyan landslide triggered by Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(4): 28-32 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杨琴, 范宣梅, 许强, 等. 北川唐家湾滑坡变形历史与形成机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 136-141.
Yang Q, Fan X M, Xu Q, et al. A study of the deformation history and mechanism of the Tangjiawan landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 136-141 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王家柱, 任光明, 葛华. 金沙江上游某特大型滑坡发育特征及堵江机制[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 46-57.
Wang J Z, Ren G M, Ge H. Development characteristics and river-blocking mechanism of a Mega-landslide in the upper reach of Jinsha River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 46-57 (in Chinese with English abstract).
- [21] 吕杰堂, 王治华, 周成虎. 西藏易贡大滑坡成因探讨[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(1): 107-110.
Lü J T, Wang Z H, Zhou C H. Discussion on the occurrence of Yigong landslide in Tibet[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(1): 107-110 (in Chinese with English abstract).
- [22] 周洪福, 韦玉婷, 聂德新. 黄河上游戈龙布滑坡高速下滑成因机制及堵江分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 483-488.
Zhou H F, Wei Y T, Nie D X. Formation mechanism of high-speed Gelongbu landslide and associated blockage of upper reach of Yellow River[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 483-488 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈丹. 茂县苦瓜子滑坡成因机制与古地震效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
Chen D. The research of Maoxian Kudiguazi landslide's formation mechanism and seismic effect[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [24] 柴贺军, 刘汉超. 岷江上游多级多期崩塌堵江事件初步研究[J]. 山地学报, 2002, 20(5): 616-620.
Chai H J, Liu H C. Study on landslide damming of river in upper of Minjiang River[J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(5): 616-620 (in Chinese with English abstract).
- [25] Larsen L J, Montgomery D R, Korup O. Landslide erosion controlled by hillslope material[J]. Nature Geoscience, 2010, 3: 247-251.
- [26] 胡涛, 樊鑫, 王硕, 等. 基于逻辑回归模型和3S技术的思南县滑坡易发性评价[J]. 地质科技通报, 2020, 39(2): 113-121.
Hu T, Fan X, Wang S, et al. Landslide susceptibility evaluation of Sinan County using logistics regression model and 3S technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 113-121 (in Chinese with English abstract).
- [27] 郑迎凯, 陈建国, 王成彬, 等. 确定性系数与随机森林模型在云南芒市滑坡易发性评价中的应用[J]. 地质科技通报, 2020, 39(6): 131-144.
Zheng Y K, Chen J G, Wang C B, et al. Application of certainty factor and random forests model in landslide susceptibility evaluation in Mangshi City, Yunnan Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(6): 131-144 (in Chinese with English abstract).
- [28] 连志鹏, 徐勇, 付圣, 等. 采用多模型融合方法评价滑坡灾害易发性: 以湖北省五峰县为例[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 178-186.
Lian Z P, Xu Y, Fu S, et al. Landslide susceptibility assessment based on multi-model fusion method: A case study in Wufeng County, Hubei Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 178-186 (in Chinese with English abstract).
- [29] 袁进科, 黄润秋, 裴向军, 等. 汶川地震触发平溪村滑坡特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 110-114.
Yuan J K, Huang R Q, Pei X J, et al. Characteristics and cause analysis of the Pingxi landslide triggered by Wenchuan Earthquake[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 110-114 (in Chinese with English abstract).
- [30] 顾成壮, 胡卸文, 方力, 等. 四川汉源二蛮山高速滑坡—碎屑流基本特征及地质演化[J]. 山地学报, 2014, 32(5): 568-578.
Gu C Z, Hu X W, Fang L, et al. Basic characteristics and evolution history of Ermanshan high-speed slide-debris flow in Hanyuan, Sichuan[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 32(5): 568-578 (in Chinese with English abstract).