



四川省雅江县上游河段滑坡灾害危险性评价

胡 鹏¹, 杨东强¹, 王荐霖²

1. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610061;

2. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052

摘 要: 雅江县位于四川省西部雅砻江中游河段, 以中山—高山峡谷地貌为主, 地质灾害频发。为保障人民生命财产安全, 基于逻辑回归与确定性系数叠加分析, 进行雅江县上游河段滑坡灾害危险性评价。结果表明: 1) 雅江县上游河段滑坡极易发生在海拔 2 500~3 000 m、拔河高度 600~900 m、坡度 30~45°、距离河流水系 0~200 m 范围较硬岩夹较软岩类地带; 2) 雅江县上游河段高危险区、极高危险区面积占总面积的 46.75%, 发生滑坡占滑坡总数的 65.91%, 说明该区域内滑坡分布密集, 危害程度相对较高, 与野外实际调查结果相符; 3) 雅江县上游河段呷拉镇一带多属极高危险区、高危险区, 瓦多乡一带多属中等危险区, 木绒乡、普巴绒乡一带多属低危险区、极低危险区; 4) 通过查验点及 ROC 曲线对评价结果验证, 该评价结果有较高的准确性, 能够作为研究区防灾减灾与河谷开发利用的合理方案依据。

关键词: 滑坡灾害; 逻辑回归法; 确定性系数法; 危险性评价; 雅砻江; 四川省

RISK ASSESSMENT OF LANDSLIDE DISASTERS IN THE UPPER REACHES OF YAJIANG COUNTY, SICHUAN PROVINCE

HU Peng¹, YANG Dong-qiang¹, WANG Jian-lin²

1. Nuclear Industry Southwest Geotechnical Investigation and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610061, China;

2. China Southwest Geotechnical Investigation and Design institute Co., Ltd., Chengdu 610052, China

Abstract: Yajiang County, located in the middle reaches of Yalong River in western Sichuan Province, is dominated by the landform of middle mountain-alpine valley, with frequent geological disasters. The risk assessment of landslide disasters in the upper reaches of Yajiang County is carried out on the basis of overlay analysis of logistic regression (LR) and certainty factor (CF) to ensure people's life and property security. The results show that the landslides are prone to occur in the hard rock interbedded with soft rock zone, with an altitude of 2 500~3 000 m, relative height above river of 600~900 m, gradient of 30~45° and distance of 0~200 m from river system. The high and very high risk areas in the upper reaches of Yajiang County account for 46.75% of the total area, and 65.91% of the total landslide occurrences, indicating the dense distribution of landslides and high damage degree, which is consistent with the field survey results. The Xiala Town mostly belongs to very high and high risk area, Waduo Township mostly medium risk area, and Murong Township and Pubarong Township mostly low and very low risk area. The assessment results have high accuracy through verification of inspection points and ROC curve, and thus can serve as a reasonable plan basis for disaster prevention and mitigation, river development and utilization in the study area.

Key words: landslide disaster; logistic regression (LR); certainty factor (CF); risk assessment; Yalong River; Sichuan Province

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-16. 编辑: 张哲.

基金项目: 四川省甘孜州国土资源局项目“甘孜州雅江县地质灾害隐患排查”(5113262017000036).

作者简介: 胡鹏(1981—), 男, 高级工程师, 从事勘查技术与工程工作, 通信地址 四川省成都市锦江区二环路东四段 298 号, E-mail/26894021@qq.com

0 引言

中国西南地区地势具有西高东低的特点,特别是在一级地貌与二级地貌过渡地带,山高坡陡,滑坡灾害是其最常见、最严重的地灾类型^[1-2]。尤其是2020年8月以来,四川省各地区连续性的强降雨使得滑坡灾害频发。因此,为了预测和防治滑坡灾害带来的损失,必须要弄清其诱发因素及成因类型,对该区域滑坡的诱发机率进行系统的分析,优先治理滑坡灾害发生机率大、造成损失严重的地区,才能更有效地减轻、避免各类地质灾害带来生命财产损失^[3]。

本研究通过对雅江县上游两岸滑坡灾害分布发育特征的调查,对研究区内滑坡的各个要素及分布规律进行分析统计,提取有关因素,进而建立评价体系,预测评价区内滑坡发生的危险性,并划分危险等级,以期对雅江县流域内滑坡灾害的预警和防治提供依据,为当地的生产活动以及经济发展提供支持。

1 研究区概况

研究区位于四川省甘孜藏族自治州雅江县上游雅砻江流域,整体最大高差约2 500 m。研究区处于西南地区构造活动极为频繁的区域,区域构造属鲜水河断裂带与理塘断裂带之间^[4]。两条断裂在第四纪以来活动频繁,加上印支期和喜马拉雅期以来造山运动产生的强烈的河流下切,形成了以中高山为主、呈典型的“V”型深切峡谷的地貌特征。区内灾害隐患点较多,通过野外实地调查共获得滑坡数据114个(图1、2)。

2 滑坡灾害危险性评价

2.1 评价方法与原理

目前,区域滑坡危险性评价的方式有很多。相比于其他评价方式,逻辑回归法有着可解决指标间的相互依赖问题、模型清晰、概率值得推敲等优点;而确定性系数法则可依托于野外实际情况,人为地对逻辑回归得出的结论进行修正^[5-6]。故本文选用逻辑回归法与确定性系数法叠加分析,评价研究区滑坡灾害危险性特征。先在研究区内以一定的间距生成3 000个样本点,并随机选取调查滑坡中的100个,共3 100个样本数据作为危险性评价的原始数据;选取研究区内平均分布的14个滑坡数据作为评价成果的验证数据,用以验证评价结果的精确性。主要思路如图3所示。

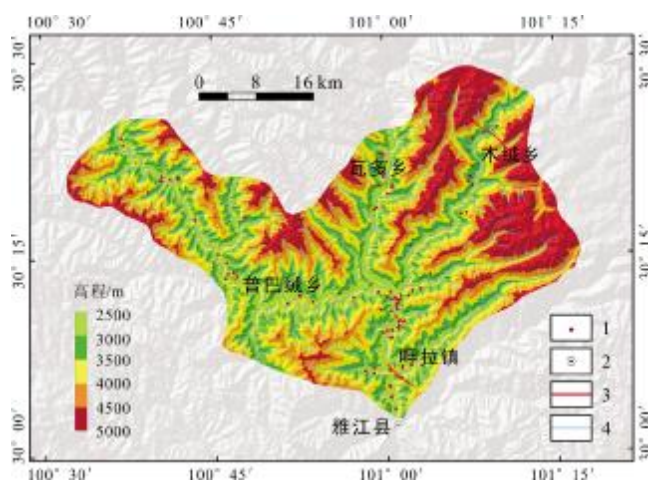


图1 研究区滑坡灾害点分布图

Fig. 1 Distribution map of landslide disaster points in the study area

1—滑坡灾害点(landslide disaster point); 2—主要乡镇(main rural town); 3—断裂带(fault zone); 4—水系(river)

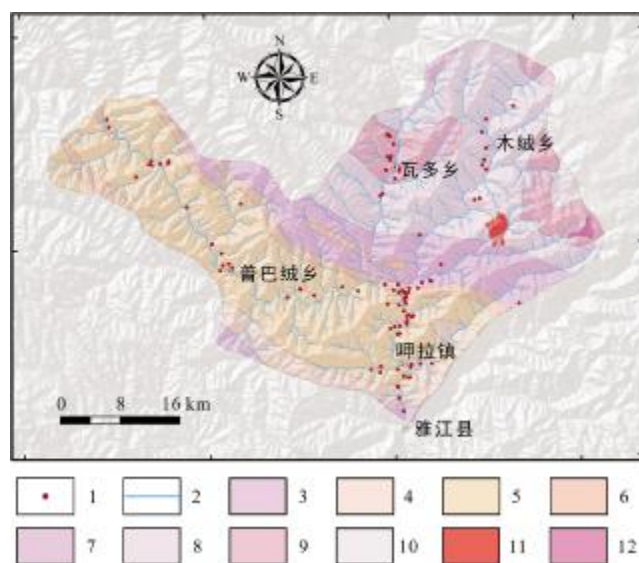


图2 研究区地层岩性图

Fig. 2 Stratigraphy of the study area

1—滑坡灾害点(landslide disaster point); 2—水系(river); 3—三叠系上统雅江组上段(upper mem. of Yajiang fm., Upper Triassic); 4—三叠系上统两河口组下段(lower mem. of Lianghekou fm., Upper Triassic); 5—两河口组中段(middle mem. of Lianghekou fm.); 6—两河口组上段(upper mem. of Lianghekou fm.); 7—三叠系上统瓦多组下段(lower mem. of Waduo fm., Upper Triassic); 8—瓦多组中段(middle mem. of Waduo fm.); 9—瓦多组上段(upper mem. of Waduo fm.); 10—三叠系中统侏倭组(Middle Triassic Zhuwu fm.); 11—印支期闪长岩(Indosinian diorite); 12—印支期二云母二长花岗岩(Indosinian two-mica monzogranite)

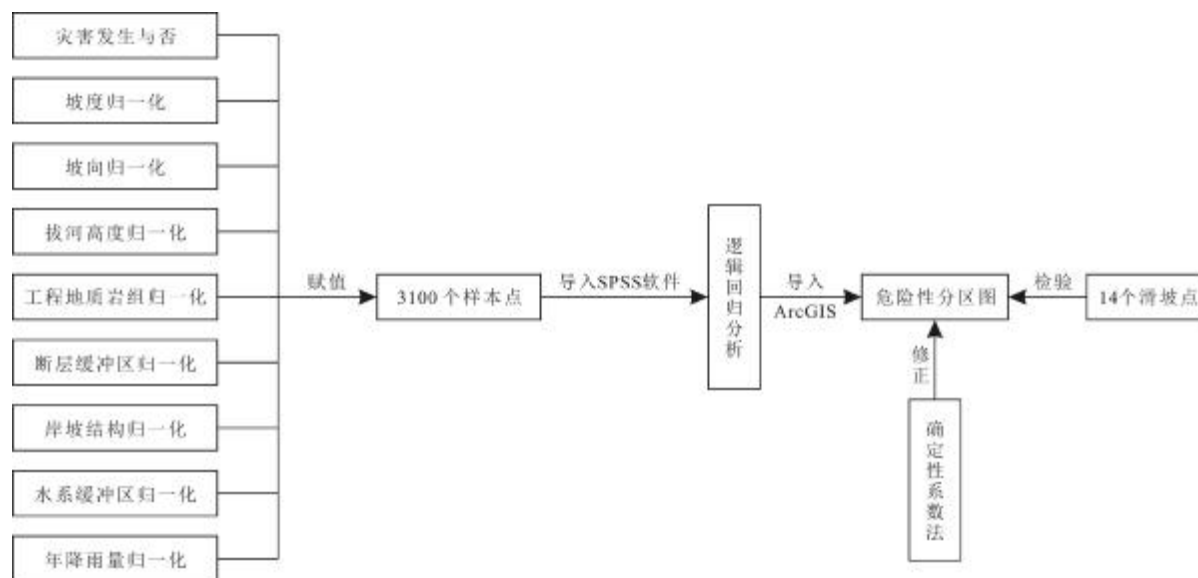


图3 滑坡灾害危险性评价思路流程图

Fig. 3 Risk assessment flowchart of landslide disaster

逻辑回归模型的表达式为^[7-9]:

$$P(y_i=1|x_i)=\frac{1}{1+e^{-\varepsilon_i}} \quad (1)$$

式中, x_i 为关于 P_i 的自变量, ε_i 为系数.

事件发生的条件概率 P_i 为:

$$P_i=\frac{1}{1+e^{-(\alpha+\beta)}}=\frac{e^{\alpha+\beta}}{1+e^{\alpha+\beta}} \quad (2)$$

则事件不发生的概率为:

$$1-P_i=1-\frac{e^{\alpha+\beta}}{1+e^{\alpha+\beta}}=\frac{1}{1+e^{\alpha+\beta}} \quad (3)$$

从而:

$$\text{Logit } P=\ln[P/(1-P)]=\alpha_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_nx_n \quad (4)$$

$$P=\frac{e^{\alpha_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_nx_n}}{1+e^{\alpha_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_nx_n}} \quad (5)$$

式中, α_0 为常数项; $\beta_1\cdots\beta_n$ 为各个评价指标的逻辑回归系数.

确定性系数模型的表达式为^[10-13]:

$$CF=\begin{cases} \frac{PP_a-PP_s}{PP_a(1-PP_s)}, & PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a-PP_s}{PP_s(1-PP_a)}, & PP_a < PP_s \end{cases} \quad (6)$$

式中, PP_a 为滑坡数目与评价指标面积的比值; PP_s 为滑坡总面积与研究区面积的比值.

单个评价因子的确定性权计算公式为:

$$P_i=W_{ci} \times CF_{ij} \quad (7)$$

式中, W_{ci} 为评价因子 C_i 的权重; CF_{ij} 为评价因子 X_i 第 j 个分类的确定性系数.

综合确定性权的计算公式为:

$$LSP=\sum_{i=1}^n W_{ci} \times CF_{ij} \quad (8)$$

式中, LSP 为评价指标的确定性权.

2.2 评价指标体系

依据控制研究区滑坡发育特征的工程环境条件, 可将影响滑坡危险性评价的因素分为 7 个内在指标及 1 个外在指标(图 4).

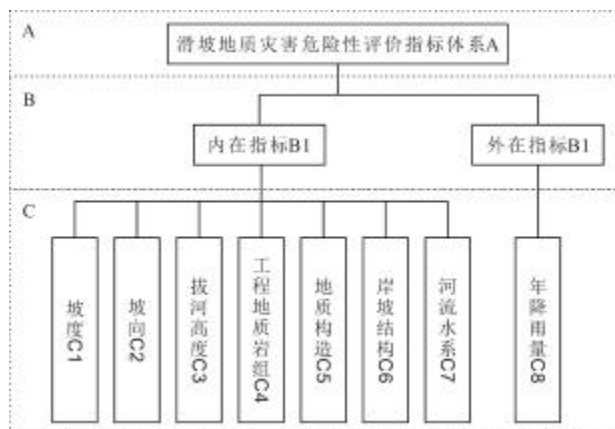


图4 滑坡灾害危险性评价指标体系

Fig. 4 Risk assessment index system of landslide disaster

2.3 滑坡灾害分布特征

2.3.1 坡度

坡度主要影响地面的起伏程度, 直接决定斜坡体临空面的发育情况及应力分布特征。通过分析研究区滑坡与地形坡度关系不难看出, 坡度为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 区间滑坡数量最多, 为 54 个, 占滑坡总数的 47.37% (图 5a、6a); 此坡度区间灾害点密度也最大, 为 7.06 个/100 km²。滑坡的诱发是一个循序渐进的过程, 斜坡覆盖层的天然休止角通常为 35° 左右^[14]。当地形坡度过小时, 无法诱发滑坡; 当地形坡度堆积到天然休止角 ($30^{\circ}\sim 45^{\circ}$) 时, 滑坡极易发生了, 而过大的地形坡度造成的地质灾害则以崩塌为主。只有当地形坡度在一个合适的区间内时, 才容易诱发滑坡。

2.3.2 坡向

斜坡坡向对于斜坡稳定性的影响主要取决于太阳辐射对斜坡树木发育、土体冻融、土壤湿度等要素的影响, 进而间接影响滑坡的发生^[15-17]。研究区朝向北侧斜坡土体水分不易蒸发, 土壤湿度大于南坡, 土体的冻胀情况亦强于南坡, 从而使得北坡土体裂隙数量多于南坡, 故发生滑坡的数量较多 (21 个, 占滑坡总和 18.42%), 灾害点密度较大, 为 9.49 个/100 km², (图 5b、图 7)。

2.3.3 拔河高度

斜坡的拔河高度反映了河流对河谷底部的切割程度, 反映了斜坡临空面的发育情况及坡体的应力分布特征^[18]。当拔河高度过低时, 临空高度不足, 但其受到人类工程活动的影响较大; 当拔河高度过高时, 人类工程活动较少, 坡顶地形坡度较大, 崩塌为主要的地质灾害方式。研究区拔河高度 600~900 m 范围的滑坡数目最多, 为 36 个, 占总和的 36.98%; 拔河高度 300~600 m 范围灾害点密度最大, 为 8.07 个/100 km², 占总和 30.70% (图 5c)。滑坡的数量与拔河高度呈现近似正态分布的关系 (图 6b)。

2.3.4 工程地质岩组

依据研究区地层岩性、岩体结构面发育情况、岩体风化情况、岩体强度的不同, 可将区内地层分为较软岩类、较软岩夹较硬岩类、较硬岩夹较软岩类、较硬岩类 4 类。通过图 5d 可知, 研究区滑坡主要分布于软硬互层岩类的边坡中。当斜坡岩层性质一致时, 岩层的内摩擦角、内聚力与斜坡稳定性系数呈近似线性关系; 而

斜坡岩层性质不一致时, 这种线性关系便发生改变, 雨水极易沿岩体结构面入渗坡体, 软岩受雨水软化后便会形成软弱带, 斜坡极易沿着这层软弱带产生滑动。当软岩厚度较小时, 岩层内聚力及内摩擦角的细微变化都会对斜坡稳定系数产生较大影响。因而, 较硬岩夹较软岩地区相对于其他区域更容易引发滑坡^[19] (图 6c)。研究区较硬岩夹较软岩类地区滑坡个数 72 个, 占滑坡总和的 63.16%, 灾害点密度为 0.10 个/100 km²。

2.3.5 断裂带

研究区范围内断裂带数量虽较少, 但通过查阅区域地质资料可知, 距雅江县城下游约 10 km 处, 断裂带较发育, 受区域断裂影响较大。研究区断裂带附近滑坡分布相对密集 (图 5e), 滑坡与断裂带距离在 1000~2000 m 范围灾害点密度最大, 为 18.09 个/100 km²。

2.3.6 岸坡结构

虽然研究区岸坡结构以横向坡、斜向坡为主, 其中斜向坡分布滑坡数目最多, 但顺向坡结构松散, 抗风化能力低, 受扰动后极易引发滑坡, 灾害点密度最大, 为 9.48 个/100 km², 占滑坡总和的 22.81% (图 5f、6d)。

2.3.7 河流水系

研究区属深切峡谷地貌, 河流的侧蚀作用及下蚀作用不断冲刷岸坡, 致使岸坡岩体软化, 临空面发育, 斜坡稳定性降低, 容易造成新滑坡的发生及老滑坡的复活。研究区内滑坡沿雅鲁江干流、支流两岸呈明显的沿河流线性分布特征, 其中距河流水系 0~200 m 范围滑坡数目最多, 为 35 个, 占 35.07%; 距河流水系 200~400 m 范围灾害点密度最大, 为 10.04 个/100 km², 占滑坡总和的 29.82% (图 5g、6e)。

2.3.8 降雨

雨水入渗, 增大了坡体的下滑力, 同时研究区地层以较硬岩夹较软岩类为主, 所夹较软岩极易受到雨水的侵蚀, 导致承载能力降低, 形成滑动面。研究区年平均降雨量主要为 780 mm (图 5h), 该范围内滑坡的数目最多, 为 90 个, 占滑坡总和的 78.95%, 灾害点密度最大, 为 8.47 个/100 km² (图 6f)。

2.4 滑坡灾害结构组成特征

经野外实地调查, 研究区滑坡可分为土质滑坡及岩质滑坡两大类。

2.4.1 土质滑坡

这类滑坡多发生于沿道路两侧及已有滑坡前缘产

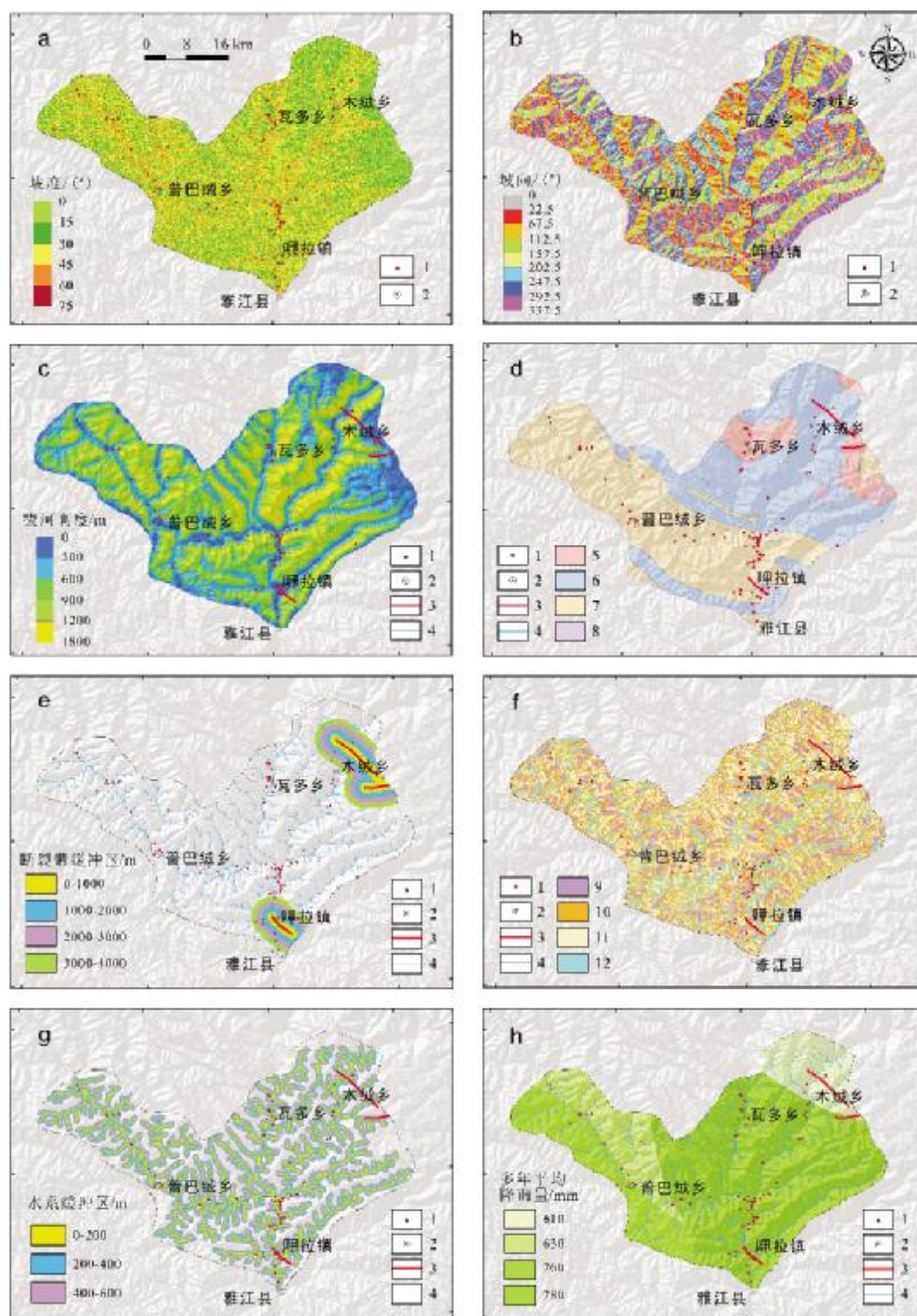


图5 研究区滑坡危险性评价图

Fig. 5 Risk assessment maps of landslide disaster in the study area

a—滑坡灾害沿坡度分布(landslide disaster distributed by slope gradient); b—滑坡灾害沿坡向分布(landslide disaster distributed by slope aspect); c—滑坡灾害沿海拔河高度分布(landslide disaster distributed by relative height above river); d—滑坡灾害沿工程地质岩组分布(landslide disaster distributed by engineering geological rock type); e—滑坡灾害沿断裂带分布(landslide disaster distributed by fault zone); f—滑坡灾害沿岸坡结构分布(landslide disaster distributed by bank slope structure); g—滑坡灾害沿水系分布(landslide disaster distributed by river system); h—滑坡灾害沿降雨量分布(landslide disaster distributed by rainfall); 1—滑坡灾害点(landslide disaster point); 2—主要乡镇(main rural town); 3—断裂带(fault zone); 4—水系(river); 5—较软岩类(soft rock); 6—较软岩类夹较硬岩类(soft rock with hard rock); 7—较硬岩夹较软岩类(hard rock with soft rock); 8—坚硬岩类(hard rock); 9—顺向坡(dip slope); 10—斜向坡(diagonal slope); 11—横向坡(transverse slope); 12—逆向坡(reverse slope)

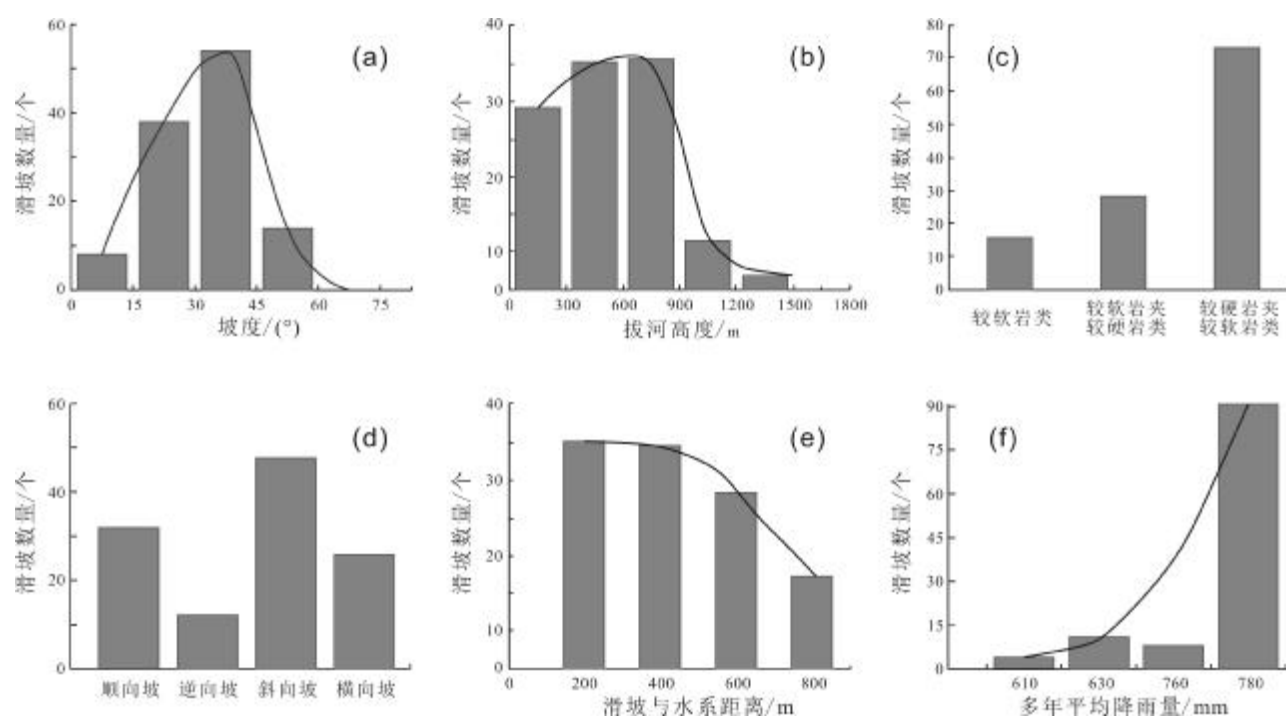


图 6 评价指标与滑坡数量关系

Fig. 6 Relationship between evaluation indexes and amount of landslide

a—滑坡数量与坡度图(landslide number vs. slope gradient); b—滑坡数量与拔河高度图(landslide number vs. relative height above river); c—滑坡数量与工程地质岩组图(landslide number vs. engineering geological rock type); d—滑坡数量与岸坡结构图(landslide number vs. bank slope structure); e—滑坡数量与水系距离图(landslide number vs. distance among river system); f—滑坡数量与多年平均降雨量图(landslide number vs. multiyear average precipitation)

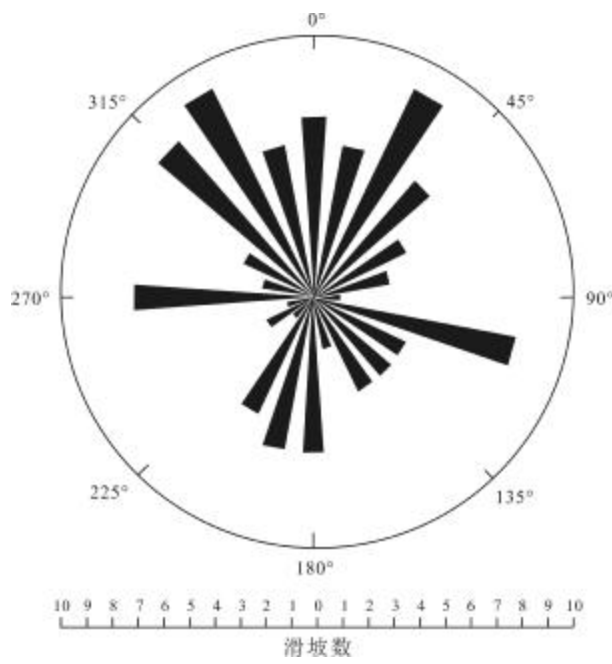


图 7 滑坡数量与坡向关系图

Fig. 7 The diagram of landslide numbers by slope aspects

生的二次滑动,滑坡规模通常相对较小,滑源区高程较低,受人类活动的影响较大,危害形式以堵塞道路为主. 滑坡堆积体主要为残坡积、滑坡堆积块碎石土,碎石粒径通常在 3~5 cm.

2.4.2 岩质滑坡

这类滑坡是研究区滑坡的主要类型,滑坡的稳定性受“锁固段”控制,滑坡形态以长条形、箕形为主,规模通常较大,危害也较大. 依据滑坡堆积体组成结构特征,可将其分成完全解体滑坡和不完全解体滑坡两类.

完全解体滑坡多发生在拔河高度较高地带,滑坡滑动区域长度通常较长,整体落差较大. 滑体处在滑源区时有着较大的势能,当“锁固段”破裂滑动产生时,这些势能全部转化为动能并顺着结构面释放,使滑体在滑动时完全解体,呈高速流动状态. 堆积体形态为块石堆积,滑坡形态呈长条形、扇形(图 8).

不完全解体滑坡堆积体形态多为箕形,滑体主要沿岩体结构面以整体下挫的形式或沿基覆界线产生滑

动, 后缘可见圈椅状地形、双沟同源等滑坡的典型特征. 这类滑坡堆积体前缘多有“假基岩”出露, 表面往往有一定厚度的覆盖层, 由残坡积、崩坡积和滑坡堆积组成(图 9).

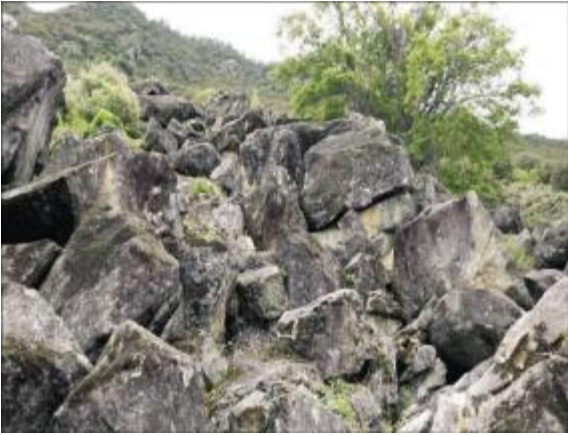


图 8 完全解体滑坡堆积体形态特征
Fig. 8 Morphological characteristics of completely disintegrated landslide



图 9 不完全解体滑坡堆积体形态特征
Fig. 9 Morphological characteristics of incompletely disintegrated landslide

2.5 危险性评价结果

通过 2.3 节的分析可知, 滑坡的诱发是由多个因素引起的, 且每个因素之间都有着内在的联系. 逻辑回归分析的核心在于通过对比各个因素之间的内在联系从而得出回归系数, 可使评价结果的准确性得到保障. 其具体公式如下^[20-21]:

$$R_{ij} = \frac{S_{ij}^z}{S_{ij}}$$

(9)

表 1 评价指标归一化值计算表

Table 1 Calculation results for normalized value of evaluation indexes

评价指标	指标分级	滑坡面积/km ²	评价指标面积/km ²	R _{ij}	X _{ij}
坡度/(°)	0~15	6.13	194.12	0.032	0.199
	15~30	21.87	597.43	0.037	0.231
	30~45	37.54	765.32	0.049	0.309
	45~60	8.36	201.96	0.041	0.261
	60~75	0.00	5.03	0.000	0.000
坡向	北(0~22.5°, 337.5~360°)	11.16	200.18	0.056	0.162
	北东(22.5~67.5°)	6.01	194.32	0.031	0.090
	东(67.5~112.5°)	3.77	213.46	0.018	0.051
	南东(112.5~157.5°)	5.03	247.63	0.020	0.059
	南(157.5~202.5°)	11.93	218.62	0.055	0.159
	南西(202.5~247.5°)	9.34	211.34	0.044	0.128
	西(247.5~292.5°)	16.05	210.55	0.076	0.221
拔河高度/m	北西(292.5~337.5°)	11.95	267.76	0.045	0.130
	0~300	26.50	249.31	0.106	0.325
	300~600	19.26	433.68	0.044	0.136
	600~900	23.52	452.01	0.052	0.159
	900~1200	63.98	531.78	0.120	0.368
工程地质岩组	1200~1800	0.37	97.08	0.004	0.012
	较软岩类	3.96	190.03	0.021	0.188
	较软岩夹较硬岩类	16.71	774.37	0.022	0.195
	较硬岩夹较软岩类	53.23	778.79	0.068	0.617
断裂带距离/m	坚硬岩类	0.00	20.67	0.000	0.000
	0~1000	2.02	45.34	0.045	0.199
	1000~2000	4.20	49.76	0.084	0.377
	2000~3000	0.48	53.30	0.009	0.040
	3000~4000	2.60	58.52	0.044	0.198
岸坡结构	>4000	64.60	1556.94	0.041	0.185
	顺向坡	24.85	292.31	0.085	0.483
	斜向坡	27.67	618.31	0.045	0.254
	横向坡	16.55	579.12	0.029	0.162
河流水系/m	逆向坡	4.83	274.12	0.018	0.100
	0~200	48.14	382.31	0.126	0.630
	200~400	16.54	338.62	0.049	0.245
	400~600	6.27	298.31	0.021	0.105
年平均降雨量/mm	>600	2.95	744.62	0.004	0.020
	610	0.16	192.92	0.001	0.008
	630	7.25	230.95	0.031	0.303
	760	3.35	277.58	0.012	0.116
	780	63.14	1062.23	0.059	0.573

$$X_{ij} = \frac{R_{ij}}{\sum_{j=1}^m R_{ij}} \tag{10}$$

式中, R_{ij} 为滑坡灾害面积 S_{ij}^* 与其对应的评价指标面积 S_{ij} 的比值; X_{ij} 为评价指标的归一化值; ij 为第 i 个评价指标的第 j 个子集; m 为子集个数;

依据公式(9)(10)可求得研究区各个评价指标分级的归一化值 (表 1). 如表 1 中坡度 0~15°范围内滑坡面积与坡度为 0~15°区域面积的比值即为 R_{ij} , R_{ij} 与研究区面积的比值即为 X_{ij} .

随后将各评价指标的归一化值 X_{ij} 赋值在 3 100个

样本点上, 再将其导入 SPSS 软件计算各个评价指标的回归系数. 回归系数值越大, 说明其对滑坡诱发的影响程度越高. 计算结果见表 2.

依据公式(6)(7)计算各个评价指标分级的确定性系数权值(表 3).

将所得回归系数(表 2)与各评价指标分级的确定性系数权值(表 3)分别代入 ArcGIS 软件中, 加权求和分别得出研究区滑坡发生的概率 P_1 、 P_2 , 随后将 P_1 与 P_2 相叠加, 进而得到研究区滑坡灾害危险性成果图(图 10).

表 2 回归系数计算结果

Table 2 Calculation results of regression coefficient

坡度	坡向	拔河高度	工程地质岩组	断裂带	岸坡结构	河流水系	降雨	常数
1.809	1.116	2.015	2.684	6.884	2.663	2.362	3.047	-5.894

表 3 各个评价指标的确定性系数权值

Table 3 Certainty factor weights of evaluation indexes

评价指标	指标分级	CF	W_{ci}	P_i	确定性权排名	评价指标	指标分级	CF	W_{ci}	P_i	确定性权排名
坡度/ (°)	0~15	0.4375	0.0833	0.0365	25	工程地质岩组	较软岩类	0.4010	0.2003	0.0803	9
	15~30	0.5382	0.0833	0.0449	16		较软岩夹较硬岩类	0.0760	0.2003	0.0152	31
	30~45	0.6887	0.0833	0.0574	13		较硬岩夹较软岩类	0.8994	0.2003	0.1802	1
	45~60	0.8172	0.0833	0.0681	12		坚硬岩类	-1.0000	0.2003	-0.2003	39
	60~75	-1.0000	0.0833	-0.0833	35	断层缓冲区/m	0~1000	-0.5737	0.1789	-0.1027	38
坡向	北(0~22.5°, 337.5~360°)	0.7444	0.0587	0.0437	18		1000~2000	0.2003	0.1789	0.0358	26
	北东(22.5~67.5°)	0.7049	0.0587	0.0414	19		2000~3000	-0.4910	0.1789	-0.0879	36
	东(67.5~112.5°)	0.5461	0.0587	0.0320	28		3000~4000	0.0000	0.1789	0.0000	33
	南东(112.5~157.5°)	0.4995	0.0587	0.0293	29		>4000	0.7917	0.1789	0.1417	2
	南(157.5~202.5°)	0.6712	0.0587	0.0394	21	岸坡结构	顺向坡	0.7500	0.1308	0.0981	6
	南西(202.5~247.5°)	0.1570	0.0587	0.0092	32		逆向坡	0.3087	0.1308	0.0404	20
	西(247.5~292.5°)	0.5818	0.0587	0.0341	27		横向坡	0.7672	0.1308	0.1003	5
	北西(292.5~337.5°)	0.7451	0.0587	0.0437	17		斜向坡	0.5812	0.1308	0.0760	10
拔河高度/ m	0~300	0.9428	0.1308	0.1233	3	水系缓冲区/m	0~200	0.7617	0.0506	0.0385	23
	300~600	0.4299	0.1308	0.0562	14		200~400	0.7781	0.0506	0.0394	22
	600~900	0.5382	0.1308	0.0704	11		400~600	0.7552	0.0506	0.0382	24
	900~1200	0.7387	0.1308	0.0966	7		>600	-0.0988	0.0506	-0.0050	34
	1200~1800	0.8861	0.1308	0.1159	4	年平均降雨量/ mm	610	-0.8083	0.1111	-0.0898	37
							630	0.4946	0.1111	0.0550	15
							760	0.2362	0.1111	0.0262	30
							780	0.8525	0.1111	0.0947	8

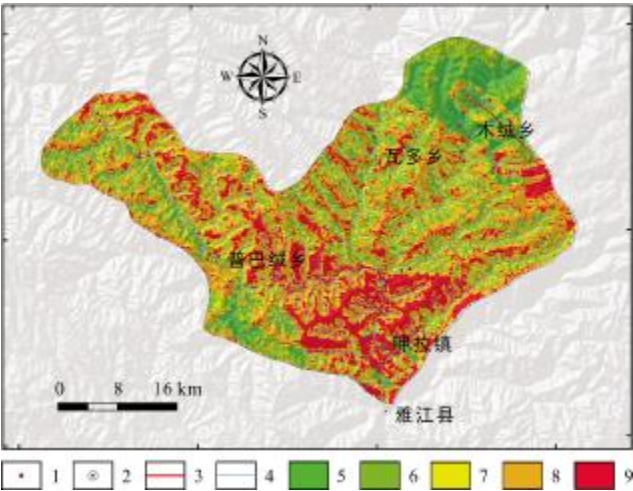


图 10 滑坡灾害危险性成果图

Fig. 10 Risk zoning map of landslide disaster in the study area
1—滑坡灾害点 (landslide disaster point); 2—主要乡镇 (main rural town); 3—断裂带 (fault); 4—水系 (river); 5—极低危险区 (very low risk); 6—低危险区 (low risk); 7—中等危险区 (medium risk); 8—高危险区 (high risk); 9—极高危险区 (very high risk)

3 评价结果验证与分析

为了确保评价结果的准确性，利用以下两种方法对其进行检验。

1) 查验点验证

研究区共调查滑坡灾害 114 个，随机选取其中的 100 个滑坡点进行评价分析，剩余 14 个点作为查验点，用以验证成果的精确性。14 个查验点在危险性分区图中的分布如表 4 所示。

表 4 查验点分布统计表

Table 4 Risk zoning and number of landslide disaster inspection points	
危险性等级	滑坡数量/个
极低危险区	0
低危险区	0
中等危险区	4
高危险区	6
极高危险区	4

2) ROC 曲线验证

本研究选用 ROC 检验曲线用以验证评价结果的精确性。ROC 曲线下面积越大，表明评价结果的准确

程度越高。ROC 曲线下面积为 85.48% (图 11)，评价结果精确性较高。

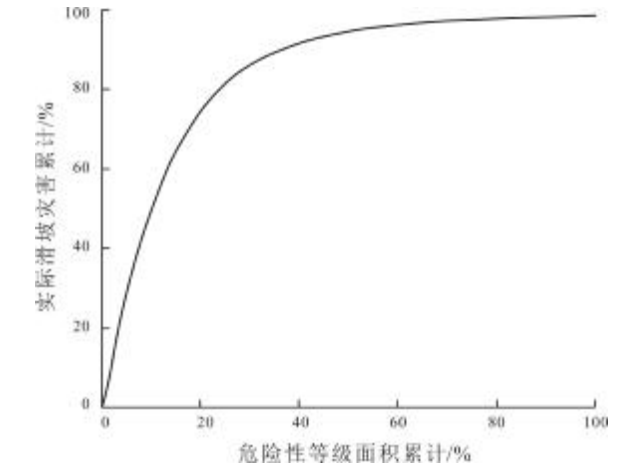


图 11 ROC 检验曲线

Fig. 11 ROC test curve of risk zoning

评价结果表明：研究区高危险区、极高危险区主要位于呷拉镇一带山脊的两侧，分布滑坡 74 个，占总数的 65.91%，灾害点密度为 8.00 个/100 km²。该区域范围内年平均降雨量为 780 mm，地层以较硬岩夹较软岩为主，岸坡结构多为顺向坡，且分布有一条断裂带，皆为易引发滑坡的致灾因素。评价结果 (表 5) 与实际野外调查结果相符。

表 5 滑坡灾害危险性评价结果统计表

Table 5 Risk evaluation results of landslide disaster				
危险性分区	面积/km ²	滑坡面积/km ²	滑坡面密度/%	占滑坡总数比例/%
极高危险区	303.64	23.59	7.77	27.19
高危险区	520.94	30.49	5.85	37.72
中等危险区	361.33	14.06	3.89	20.18
低危险区	376.58	5.82	1.55	13.16
极低危险区	201.34	0.24	0.12	1.75

4 结论

依据雅江县上游河段滑坡的野外调查结果，结合 DEM 高程数据，分析研究区内滑坡灾害的发育分布特点，并基于逻辑回归与确定性系数的叠加分析，对研究区滑坡危险性进行分区评价，取得如下成果。

1) 雅江县上游河段滑坡主要分布在海拔 2 500~

3 000 m、拔河高度 600~900 m、坡度 30~45°、距离河流水系 0~200 m 范围内较硬岩夹较软岩类地带。

2)雅江县上游河段滑坡以岩质滑坡为主,岩质滑坡又可进而分为完全解体滑坡和不完全解体滑坡两类。完全解体滑坡多发生在拔河高度相对较高、岩体结构破碎地段,滑体多以碎屑流的方式滑动,滑坡形态多呈长条形,堆积体为块石堆积;不完全解体滑坡形态多呈箕形,滑体沿岩体结构面整体下挫或沿基覆界线产生滑动。

3)雅江县上游河段高危险区、极高危险区面积占总面积的 46.75%,该区内滑坡数目为滑坡总和的 65.91%。说明该区域内滑坡分布相对聚集,危害程度较高,与实际野外调查结果相符。

4)雅江县上游河段极高危险区、高危险区主要位于呷拉镇一带山脊的两侧;中等危险区主要位于呷拉镇、瓦多乡斜坡的中部,普巴绒乡上游河段;低危险区、极低危险区主要位于普巴绒乡、瓦多乡坡脚河流的两岸,木绒乡上游河段。

5)经查验点及 ROC 曲线验证,危险性评价成果有较高的精确度(85.48%),能够作为研究区防灾减灾工作及河谷两岸开发利用的合理方案依据。

参考文献(References):

- [1]黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th Century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454.
- [2]许强, 黄润秋, 向喜琼. 地质灾害发生时间和空间的预测预报[J]. 山地学报, 2000, 18(S1): 112-117.
Xu Q, Huang R Q, Xiang X Q. Time and spacial predicting of geological hazards occurrence[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(S1): 112-117.
- [3]王荐霖. 岷江上游汶川-松潘河段大型滑坡发育特征及危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
Wang J L. Research on development characteristics and hazard assessment of large-scale landslide in Minjiang River from Wenchuan to Songpan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [4]倪化勇, 王德伟, 陈绪钰, 等. 四川雅江县城地质灾害发育特征与稳定性评价[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 474-480.
Ni H Y, Wang D W, Chen X Y, et al. Formation characteristics and stability assessment of geological hazards in Yajiang City, Sichuan Province[J]. Geoscience, 2015, 29(2): 474-480.
- [5]毛硕. 基于 GIS 的薛城地区滑坡地质灾害危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
Mao S. Hazard assessment of landslide geological disaster in Xuecheng area based on GIS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [6]许冲. 汶川地震滑坡分布规律与危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 432.
Xu C. Distribution law and risk assessment for Wenchuan earthquake-triggered landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 432.
- [7]邢秋菊, 赵纯勇, 高克昌, 等. 基于 GIS 的滑坡危险性逻辑回归评价研究[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 49-51.
Xing Q J, Zhao C Y, Gao K C, et al. Logical regression analysis on the hazard of landslide based on GIS [J]. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(3): 49-51.
- [8]李翔. 以绥德县为例基于 ArcGIS 及逻辑回归法的地质灾害危险性评价[D]. 西安: 长安大学, 2015.
Li X. Evaluation of geological hazard zonation based on ArcGIS and logistic regression[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [9]王鹏. 基于逻辑回归与 GIS 的青海省尖扎县区域滑坡危险性评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
Wang P. Regional slide hazard assessment based on logistic analysis and GIS in Jianzha County, Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [10]侯兴利, 陈建勋, 张恋. 基于 ArcGIS 的滑坡空间分布的变维分形研究——以江西省宁都县为例[J]. 地质与资源, 2019, 29(3): 293-297.
Hou X L, Chen J X, Zhang L. Fractal dimension study on the spatial distribution of landslides based on ArcGIS: A case study of Ningdu County, Jiangxi Province[J]. Geology and Resources, 2019, 29(3): 293-297.
- [11]赵力行, 范文, 柴小庆, 等. 秦巴山区地质灾害发育规律研究——以镇巴县幅为例[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 187-195.
Zhao L X, Fan W, Chai X Q, et al. Study on the development regularity of geohazards in Qinling-Daba mountains: A case study of Zhenba County, Shaanxi Province[J]. Geology and Resources, 2020, 29(2): 187-195.
- [12]光磊. 基于 GIS 的信息量法在滑坡危险性评价中的应用[J]. 地质与资源, 2005, 14(3): 231-233.
Guang L. Application of the GIS-based information acquisition analysis in assessment of landslide hazards[J]. Geology and Resources, 2005, 14(3): 231-233.
- [13]王国卫, 李明波, 蒋明光, 等. 基于加权信息量模型的湖南省麻阳县地质灾害危险性评价与区划[J]. 地质与资源, 2020, 29(3): 266-272.
Wang G W, Li M B, Jiang M G, et al. Risk assessment and zoning of the geological hazards in Mayang County of Hunan Province based

- on weighted information model[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(3): 266–272.
- [14] Zhao B, Wang Y S, Su L J, et al. Directional seismic response to the complex topography: A case study of 2013 Lushan Ms 7.0 earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(9): 2049–2067.
- [15] 杨栓成, 王运生. 基于 GIS 的涪江上游南坝-水晶流域滑坡危险性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(6): 15–22.
- Yang S C, Wang Y S. GIS-based landslide risk assessment along the Nanba-Shuijing reaches in the Fujiang River[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(6): 15–22.
- [16] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495–5504.
- Li H X, Liu G H, Fu B J. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the three-river headwaters region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5495–5504.
- [17] 薛强, 张茂省, 高波. 斜坡单元支持下基于土体含水率的陕西省清涧县城区黄土滑坡危险性评价[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1904–1914.
- Xue Q, Zhang M S, Gao B. Hazard assessment of loess landslide based on soil moisture content and supported by slope unit in Qingjian City, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1904–1914.
- [18] 杜军, 杨青华, 严嘉, 等. 基于 GIS 与信息量模型的汶川次生地质灾害危险性评价[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, 35(2): 324–330.
- Du J, Yang Q H, Yan J, et al. Hazard evaluation of secondary geological disaster based on GIS and information value method [J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(2): 324–330.
- [19] 夏开宗, 陈从新, 鲁祖德, 等. 软硬岩互层边坡稳定性的敏感性因素分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2013, 37(4): 729–732, 736.
- Xia K Z, Chen C X, Lu Z D, et al. Analysis of sensitivity factors to stability of inter-beddings of soft and hard rock slope[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2013, 37(4): 729–732, 736.
- [20] 杜晓晨. 基于 ArcGIS 和 SPSS 的德昌县滑坡危险性评价研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- Du X C. Hazard assessment of landslide in Dechang based on ArcGIS and SPSS [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [21] 韩蓓. 基于 GIS 的岷江上游汶川-叠溪河段滑坡灾害危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- Han B. Landslide geological disaster hazard assessment in Minjiang River from Wenchuan to Diexi based on GIS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.

(上接第 739 页/Continued from Page 739)

- [29] 刘娜, 余晔, 马学谦. 西宁市大气污染来源和输送季节特征[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1268–1279.
- Liu N, Yu Y, Ma X Q. Seasonal characteristics of air pollutant sources and transport pathways in Xining City [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1268–1279.
- [30] Hu W Y, Wang H F, Dong L R, et al. Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 650–661.
- [31] Huang S S, Tu J, Liu H Y, et al. Multivariate analysis of traceelement concentrations in atmospheric deposition in the Yangtze River Delta, East China[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(36): 5781–5790.
- [32] 严晓瑜, 缙晓辉, 武万里, 等. 银川地区大气颗粒物输送路径及潜在源区分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 1727–1738.
- Yan X Y, Gou X H, Wu W L, et al. Analysis of atmospheric particulate transport path and potential source area in Yinchuan[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5): 1727–1738.
- [33] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥. 长春市城区重金属大气干湿沉降特征[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(1): 28–34.
- Yang Z P, Lu W X, Long Y Q. Atmospheric dry and wet deposition of heavy metals in Changchun City, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(1): 28–34.