

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.03

地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用 ——以西藏江达县为例

支泽民¹, 陈琼^{1,2}, 张强^{3,4}, 周强^{1,2}, 刘峰贵^{1,2}, 赵富昌¹, 陈永萍¹

(1. 青海师范大学地理科学学院, 青海西宁 810008; 2. 高原科学与可持续发展研究院, 青海西宁 810008; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:高山峡谷区是滑坡灾害频发地区,随着气候变化和人类活动加剧,滑坡呈多发、频发态势。本文选择坐落于横断山高山峡谷区的西藏江达县作为研究区,利用野外调查获取的 85 个滑坡数据,选取坡度、河流密度、地貌类型、降水量、距断层距离、道路密度、地震动峰值加速度、岩性等 8 个稳定性影响因素,运用地理探测器对滑坡稳定性的影响因素进行了探测。结果表明:(1)按滑坡体体积划分等级,江达县滑坡主要以中、小型滑坡为主;按其稳定性划分,50% 以上的滑坡处于稳定状态;按危险等级划分,以Ⅲ级、Ⅳ级为主;江达县滑坡主要沿河流与道路分布,全县地面调查发现 85 处滑坡全部分布于河流附近,其中 71.76% 的滑坡分布于道路两侧。(2)江达县滑坡稳定性的主要影响因子为地貌类型、河流密度、道路密度和距断层距离,其贡献率分别为 0.501, 0.477, 0.465, 0.332;当影响因子两两相互作用时,因子解释力总是大于单个因子对滑坡稳定性的解释力,即当两种影响因子相互作用时,对于滑坡的失稳具有促进作用。

关键词:滑坡稳定性;地理探测器;高山峡谷区;影响因素

中图分类号: P642 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2021)02-0019-08

Application of geographic detector in identifying influencing factors of landslide stability: A case study of the Jianga County, Tibet

ZHI Zemin¹, CHEN Qiong^{1,2}, ZHANG Qiang^{3,4}, ZHOU Qiang^{1,2},
LIU Fenggui^{1,2}, ZHAO Fuchang¹, CHEN Yongping¹

(1. College of Geography, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China; 2. High Level Forum of Plateau Science and Sustainability, Xining, Qinghai 810008, China; 3. State Key Laboratory of Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The high mountain and gorge area is a typically area, where geological disasters happen frequently. Especially landslide is one of the most serious geological disasters. Recently relative researches on geological disasters showed that landslides had an increasing trends due to the impacts of both climate change and human activities. In this study, Jianga County in Tibet Autonomous region was selected as our study area, which located in the high mountain and gorge area of the Hengduan Mountain Region. In addition, using the landslide data for 85 sites based on field survey, choosing Slope, River density, Geomorphic type, Precipitation, the distance from the fault, Road density, the ground motion peak acceleration and Lithology as 8 influencing factors on landslide, and then employing the Geodetector model to analyze the impact of various

收稿日期: 2020-06-15; 修订日期: 2020-12-17

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0906); 国家重点研发计划(2019YFA0606902)

第一作者: 支泽民(1994-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事土地利用与灾害风险研究。E-mail: zhizemin@126.com

通讯作者: 陈琼(1975-), 女, 浙江诸暨人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地科学研究。E-mail: qhchenqiong@163.com

variables on landslide stability. The results showed that 1) according to the volume of landslide, medium and small landslides are main types in Jiangda County; According to its stability, more than 50% of the landslide is in a stable state; according to the danger level, they are mainly divided into III, IV. In space, it is mainly along rivers and roads in Jiangda County, which caused by the limitations of the field survey besides physical factors. Because all 85 landslide survey sites located near rivers, and more than 71% sites are distributed on both sides of the road. 2) The geomorphic type, River density, Road density and the distance from the fault are major factors to affect the stability of the landslide in Jiangda County, its contribution rate are 0.501, 0.477, 0.465 and 0.332, respectively. When the influence factors interact in pairs, the explanatory power of factors is always greater than that of a single factor to the stability of landslides. In other words, when the two influencing factors interact, they always promote the instability of landslides.

Keywords: landslide stability; geographic detector; alpine canyon; influence factors

0 引言

滑坡是青藏高原东缘数量最多、分布最广、危害性最大的一种地质灾害类型。是山体斜坡的土体或岩体, 在外界因素的影响和重力作用下, 发生的非线性动力学过程, 受时空变化内外因素综合作用的结果^[1]。青藏高原东缘 117 个县(区、市) 共有 10 560 处滑坡, 其中巨型滑坡 183 处, 大型滑坡 1 133 处, 中型滑坡 2 870 处, 小型滑坡 6 374 处, 具有显著的沿活动断裂带、河流和道路密集分布的特征^[2]。目前, 我国关于滑坡的研究主要集中在滑坡形成的影响因素分析^[3-6]、滑坡危险度的评价与区划^[7-9]、滑坡防治工程措施研究^[10-12]、滑坡的稳定性评价^[13-15]等方面。

青藏高原横断山区是我国高山峡谷密布地区, 由于地形条件特殊, 滑坡灾害受气候变化和人类活动双重因素的影响, 呈现多发、频发态势。因此, 关注和研究该地区滑坡, 对于本地区人居环境安全具有重要的现实意义。本文通过地理探测器作为主要分析工具, 以西藏江达县滑坡灾害为对象, 定量探测高山峡谷地区滑坡灾害稳定性的影响因素, 揭示造成滑坡体失稳的主要贡献因子, 为高山峡谷地区开展滑坡危险度的评价、滑坡防治工程建设提供科学的依据。

1 研究区概况

青藏高原横断山区是我国高山、极高山最为集中的区域, 河流深切, 峡谷陡峻, 是滑坡等地质灾害的多发频发区。江达县位于横断山区东北部, 面积 13 164.09 km²。该地区地质环境复杂, 地质构造活跃, 挤压活动强烈, 形成众多平行山脉纵向排列, 为南北向水系发育奠定了基础。其中, 金沙江、通天河在其东部边界长期强烈侵蚀下切, 形成纵向深切峡谷, 境内还有藏曲、热曲、卓克曲、绒曲、多曲等 77 条面积 50 km² 以上的河流, 强烈的

下切侵蚀, 也形成大量深切峡谷。因此, 复杂的地质和地表过程, 使该地区形成极端复杂的高山峡谷区。区域最高海拔 5 297 m, 最低海拔 2 822 m, 相对高差达到 2 475 m, 平均海拔约 3 600 m, 地势由西北向东南倾斜。该区域干湿季分明, 年降水量约为 550 mm, 降水集中在夏季, 由此夏季成为滑坡灾害的高发期。近些年来, 由于该地区社会经济的发展, 人类活动不断增加, 导致滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害频发(图 1)。

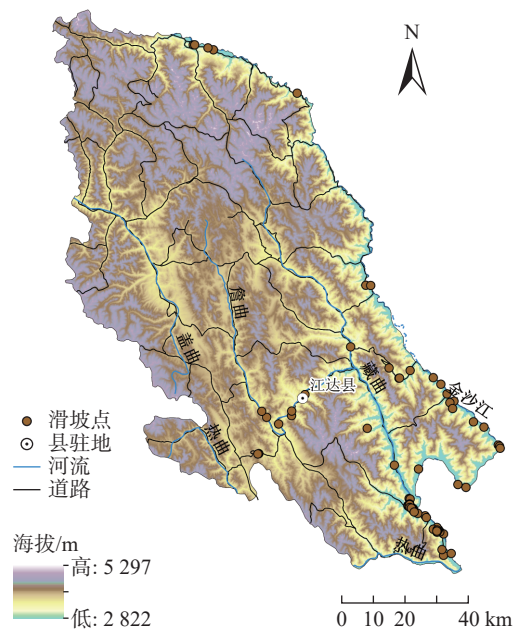


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of study area

2018 年 10 月, 西藏自治区与四川省交界处的西藏江达县波罗乡白格村发生山体滑坡, 即著名的“白格滑坡”。滑坡造成金沙江干流河道堵塞, 形成巨大的堰塞湖, 威胁到上下游数个村庄 5 万余人的生命财产安全。江达县波罗乡热多村乡政府对面发生波罗寺滑坡, 该滑坡为大型滑坡, 主要受降雨影响, 主要威胁乡政府及附

近村民、房屋等,威胁群众 300 余人;江达县县政府斜对面山体滑坡,发生于江达镇将达村,该滑坡规模为中型滑坡,主要由人类工程活动引起,威胁附近 30 余户 400 余人生命财产安全以及 317 国道部分路段。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

实地调查数据:滑坡数据来自第二次青藏科考对该地区的实地调查。

基础数据:分辨率为 30 m 的 DEM 数据、分辨率为 1 km 的地貌数据、分辨率为 1 km 的 2015 年降水数据(来自中国科学院数据共享网 <http://www.resdc.cn/>);河流数据、道路数据、县级行政区划数据(来自国家基础信息数据库 <http://www.ngcc.cn/ngcc/html/1/>);地震动峰值加速度、1:1 800 000 青藏高原及邻区地质构造图(昌都部分为 1:500 000)、地层岩性数据(来自地质空间数据云 <http://geocloud.cgs.gov.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 地理探测器

地理探测器是假设研究区分为若干子区域,如果子区域的方差之和小于区域总方差,则存在空间分异性;如果两变量的空间分布趋于一致,则二者存在统计关联性^[16]。同时,根据地理学第一定律,地理事物或属性在空间分布上互为相关,存在集聚、随机或者规则分布的科学定律^[17]进行地理探测。

(1)分异与因子探测:探测因变量 Y 的空间分异性,以及探测某自变量因子 X 多大程度上解释了 Y 的空间分异。用 q 值度量,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中: q ——各影响因素对滑坡稳定性的解释力;

N 、 σ^2 ——分别为样本量和方差;

N_h 、 σ_h^2 —— $h(h=1, 2, \dots, L)$ 层样本量和方差。其取值范围为 $[0, 1]$,数值越大表明影响因素对滑坡稳定性的解释力越强,数值为 0 说明影响因素与滑坡稳定性完全无关,数值为 1 说明影响因素可以完全解释滑坡稳定性的分布差异。

(2)交互作用探测:用来识别不同影响因素相互作用的结果,即评估影响因素 1 与影响因素 2 共同作用时对于因变量的解释力是否会增强或者减弱,或这些因素对于因变量 Y 的影响是独立的^[16]。 $q(X1 \cap X2) < \text{Min}$

$[q(X1), q(X2)]$ 表明两因素交互后,线性减弱; $\text{Min}(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \text{Max}(q(X1), q(X2))$ 表明两因素交互后,单因素非线性减弱; $q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$ 表明两因素交互后,双因子增强; $q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$ 表明两因素呈相互独立; $q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$ 表明两因素交互后,非线性增强。

(3)生态探测:用于比较两因子 $X1$ 和 $X2$ 对属性 Y 的空间分布的影响是否有显著的差异^[17],主要探测不同因素解释力的相对重要性差异,通过 F 检验度量:

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2} - 1)SSW_{X1}}{N_{X2}(N_{X1} - 1)SSW_{X2}} \quad (2)$$

式中: N_{X1} 、 N_{X2} ——分别表示两个因子 $X1$ 和 $X2$ 的样本量;
 SSW_{X1} 和 SSW_{X2} ——分别表示由 $X1$ 和 $X2$ 形成的分层的层内方差之和。

其中零假设 $H_0: SSW_{X1} = SSW_{X2}$ 。如果在 α 的显著性水平上拒绝 H_0 ,这表明两因子 $X1$ 和 $X2$ 对属性 Y 的空间分布的影响存在着显著的差异。

2.2.2 稳定性影响因子选取

(1)滑坡稳定性影响因子:滑坡稳定性是指自然地理、地质构造和地层岩性等背景条件下滑坡的稳定程度,表征地理地质环境基本属性对滑坡稳定性的控制作用。因此,本文在众多的滑坡稳定性影响因素中,结合高山峡谷地区的地理地质特征,以实地调查的滑坡稳定性作为因变量(Y),选取了坡度^[18]($X1$)、距断层距离($X2$)、地层岩性($X3$)、河流密度^[19]($X4$)、地貌类型($X5$)、道路密度($X6$)、降水量($X7$)、地震动峰值加速度($X8$)等 8 个因素作为滑坡稳定性影响因子。

(2)最优离散分类^[20]:将坡度($X1$)、距断层距离($X2$)、河流密度($X4$)、地貌类型($X5$)、道路密度($X6$)、降水量($X7$) 6 个影响因子分别在 ArcGIS 中利用自然断点法进行重分类,一般将其分类数限定为 5 ~ 10 类,然后依次将其带入地理探测器模型中,求得该分类数影响因子的最大 q 值,则该分类数即为该影响因子的最优离散分类(图 2)。

得出(图 3):坡度最优离散分类为 10;距断层距离最优离散分类为 9;河流密度最优离散分类为 10;道路密度最优离散分类为 10;降水最优离散分类为 10;地貌类型数据为离散型变量,对其不进行分类;地震动峰值速度值分为 4 类(数据限制),地层岩性数据根据岩性硬度进行划分,分别分为极硬岩、次硬岩、次软岩、极软岩 4 类^[21],其对滑坡稳定性贡献值分别赋值为 4、3、2、1(表 1)。

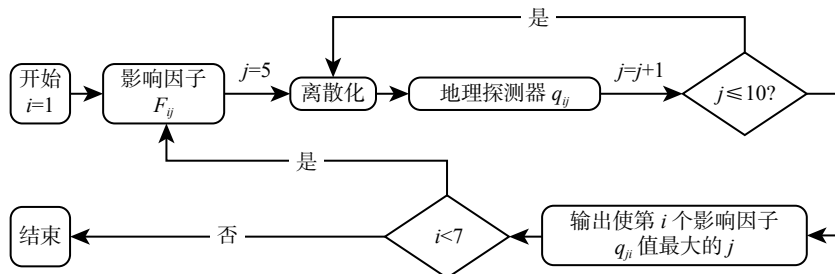


图 2 最优离散分类流程图

Fig. 2 Flowchart of optimal discrete classification

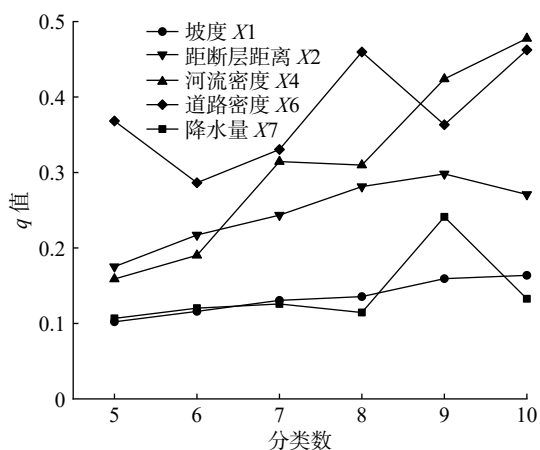


图 3 影响因子最优离散分类

Fig. 3 Optimal discrete classification of each factor

表 1 地层岩性硬度划分表

Table 1 Stratum lithology hardness division table

类别	代表岩石	稳定性赋值
极硬岩	花岗岩、二长花岗岩、闪长岩、辉长岩、石英闪长岩、玄武玢岩、硅质岩、超镁铁质岩类	4
次硬岩	碳酸盐岩、碎屑岩、大理岩、白云岩、石灰岩、中酸性基性火山岩、赤铁矿、夹灰岩、地层并层等	3
次软岩	千枚岩、板岩、灰岩、石膏等	2
极软岩	页岩、黏土岩、泥岩、砂岩、砾岩及各种土体等	1

3 结果分析

3.1 滑坡分类及分布

(1) 分类: 根据实地调查显示, 江达县共发现滑坡 85 处, 按照滑坡体体积^[4]、稳定性、险情等分别划分相应的等级。根据滑坡体体积将江达县滑坡划分为特大型、大型、中型和小型 4 个等级(表 2)。中小型滑坡共有 71 处, 占江达县滑坡比例的 83.53%; 大型滑坡 11 处, 占 12.94%; 特大型滑坡 3 处, 占 3.53%, 其中包括 2018 年滑坡体积为 $3\ 500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的金沙江特大“白格滑坡”。

表 2 按滑坡体体积划分的滑坡等级

Table 2 Landslide grade divided by volume

规模	标准/(10^4 m^3)	数量/个	占比/%
小型	$V < 10$	45	52.94
中型	$10 \leq V < 100$	26	30.59
大型	$100 \leq V < 1\ 000$	11	12.94
特大型	$1\ 000 \leq V$	3	3.53
总计		85	100.00

根据滑坡稳定性将江达县滑坡划分为稳定、较稳定、稳定性较差、不稳定和易发 5 个等级(表 3)。不稳定滑坡数量最多, 达到 33 处, 占江达县滑坡总数的 38.82%; 较稳定滑坡数量共有 29 处, 占滑坡总数的 34.12%; 易发滑坡体 5 处, 占比 5.88%。总体来看, 稳定、较稳定滑坡占比达到江达县滑坡总数的 50.59%, 不稳定、易发滑坡体占比达到 44.70%, 一半以上的滑坡处于稳定状态。

表 3 按稳定性划分的滑坡等级

Table 3 Landslide grade divided by stability

稳定性评价	数量/个	占比/%
稳定	14	16.47
较稳定	29	34.12
稳定性较差	4	4.71
不稳定	33	38.82
易发	5	5.88
总计	85	100.00

根据《国家突发地质灾害应急预案》中对地质灾害危险等级的划分标准, 对江达县滑坡危险等级进行划分, 依次可划分为 I 级、II 级、III 级、IV 级 4 个危险级别。特大型地质灾害险情(I 级)指受灾害威胁需搬迁转移人数在 1 000 人以上或潜在可能造成的经济损失 1 亿元以上的地质灾害险情; 大型地质灾害险情(II 级)指受灾害威胁需搬迁转移人数在 500 人以上、1 000 人以下, 或潜在经济损失 5 000 万元以上、1 亿元以下的地质灾害险情; 中型地质灾害险情(III 级)主要指受灾害

威胁,需搬迁转移人数在100人以上、500人以下,或潜在经济损失500万元以上、5000万元以下的地质灾害险情;小型地质灾害险情(Ⅳ级)指受灾害威胁,需搬迁转移人数在100人以下,或潜在经济损失500万元以下的地质灾害险情。江达县地质灾害险情等级主要以Ⅲ级、Ⅳ级为主,占比达97.65%(表4)。

表4 按危险性划分的滑坡等级
Table 4 Landslide grade divided by danger

险情等级	数量/个	占比/%
I级	0	0.00
II级	2	2.35
III级	17	20.00
IV级	66	77.65
总计	85	100.00

(2)分布:从空间上来讲,江达县有78处滑坡分布在其中部、南部地区,占滑坡总数的91.76%;同时,滑坡主要沿高山峡谷中的河流与道路分布,全县85处滑坡

全部分布于河流附近,其中,61处滑坡分布于道路两侧,占其滑坡总数的71.76%(图1)^[22-24]。

3.2 滑坡稳定性的地理探测

(1)因子探测结果:因子探测主要用于探测单个影响因子对滑坡稳定性的贡献率或者因子解释力。 q 值越大,表明其对滑坡稳定性的贡献率越高,因子解释力越强。根据2.2.1和2.2.2,将因变量与自变量代入地理探测器,计算得出:因子解释力 q 值大小分别为地貌类型($q=0.501$)>河流密度($q=0.477$)>道路密度($q=0.465$)>距断层距离($q=0.332$)>坡度($q=0.168$)>地震动峰值加速度($q=0.129$)>降水量($q=0.122$)>岩性($q=0.101$)。地貌类型对滑坡稳定性的贡献最大,达到0.501;河流密度与道路密度贡献率分别达到0.477、0.465,距断层距离贡献率为0.332,说明其对滑坡稳定性的解释力很强;其他因子的贡献率较小,解释力不强。因此,地貌类型、河流密度、道路密度以及距断层距离是影响滑坡稳定性的主要影响因子(表5)。

表5 因子探测结果

Table 5 Factor detection results

	坡度 X1	距断层距离 X2	岩性 X3	河流密度 X4	地貌类型 X5	道路密度 X6	降水量 X7	地震动峰值加速度 X8
q 值	0.168	0.332	0.101	0.477	0.501	0.465	0.122	0.129

(2)交互作用探测结果:交互作用探测主要用于探测当两种影响因子两两相互作用时,其对滑坡稳定性的解释力相对于其中一个影响因子来说,其解释力是增强还是减弱。根据2.2.2交互作用探测,将8个自变量两两交互进行分析,结果显示,相较于单因子对滑坡稳定性的解释力,双因子交互作用时的解释力明显较高,各因子对滑坡稳定性的综合作用力值高于任意因子单独作用的强度,因此,各因子对滑坡稳定性的影响力是交互增强的。交互作用结果主要分为双因子增强(N)与非线性增强(Y)两类。当道路密度与降水量、道路密度与坡度、坡度与河流密度、坡度与降水量、坡度与地貌类型、坡度与距断层距离、降水量与地貌类型、岩性与坡度等因子在两两相互作用时,对于滑坡稳定性的分异具有非线性增强的作用,且当地貌类型与距断层距离共同作用时,其贡献率最大为0.930,其次,河流密度与地貌类型相互作用时,贡献率居于第二,达到0.830;当道路密度与河流密度、道路密度与地貌类型、道路密度与距断层距离、河流密度与降水量、河流密度与地貌类型、河流密度与距断层距离、降水量与距断层距离等因子两两相互作用时,对于滑坡稳定性分异均具有双因子增强的作用(表6)。

(3)生态探测结果:生态探测着重比较不同影响因子对滑坡灾害稳定性分异是否具有显著性差异。在显著性检验0.05置信水平下,道路密度与坡度以及降水量对于滑坡稳定性的分异具有显著性的差异;坡度与河流密度、地貌类型和地震动峰值加速度对于滑坡稳定性的分异具有显著性的差异;河流密度与降水量、地震动峰值加速度对于滑坡稳定性的分异具有显著性的差异;降水量与地貌类型对于滑坡稳定性的分异具有显著性的差异;地貌类型与距断层的距离、地震动峰值加速度以及坡度、距断层距离对于滑坡稳定性的分异具有显著性的差异;岩性与道路密度、河流密度、地貌类型以及距断层距离对于滑坡稳定性的分异具有显著性差异(表7)^[25-26]。

4 结论

(1)按滑坡体体积划分等级,江达县滑坡主要以中、小型滑坡为主,占到滑坡总数的83.53%,大型、特大型滑坡占16.47%;按其稳定性划分,稳定、较稳定滑坡占比超50%,不稳定、易发滑坡体占比达44.70%,一半以上滑坡处于稳定状态;按危险等级划分,主要以Ⅲ级、Ⅳ级为主,占比97.65%。同时发现,江达县滑坡

表 6 交互作用探测结果
Table 6 Interaction detection results

交互因素	交互值	交互值比较	交互结果
坡度∩断层距离	0.728	$>q(\text{坡度})+q(\text{断层距离})$	非线性增强
坡度∩岩性	0.418	$>q(\text{坡度}), q(\text{岩性})$	非线性增强
坡度∩河流密度	0.677	$>q(\text{坡度})+q(\text{河流密度})$	非线性增强
坡度∩地貌	0.827	$>q(\text{坡度}), q(\text{地貌})$	非线性增强
坡度∩道路密度	0.748	$>q(\text{坡度}), q(\text{道路密度})$	非线性增强
坡度∩降水量	0.424	$>q(\text{坡度})+q(\text{降水量})$	非线性增强
坡度∩地震动峰值加速度	0.404	$>q(\text{坡度})+q(\text{地震动峰值加速度})$	非线性增强
断层距离∩岩性	0.433	$>q(\text{断层距离})+q(\text{岩性})$	非线性增强
断层距离∩河流密度	0.739	$>\text{Max}(q(\text{断层距离}), q(\text{河流密度}))$	双因子增强
断层距离∩地貌	0.938	$>q(\text{断层距离}), q(\text{地貌})$	非线性增强
断层距离∩道路密度	0.783	$>\text{Max}(q(\text{断层距离}), q(\text{道路密度}))$	双因子增强
断层距离∩降水量	0.413	$>\text{Max}(q(\text{断层距离}), q(\text{降水量}))$	双因子增强
断层距离∩地震动峰值加速度	0.445	$>\text{Max}(q(\text{断层距离}), q(\text{地震动峰值加速度}))$	双因子增强
岩性∩河流密度	0.557	$>q(\text{岩性})+q(\text{河流密度})$	非线性增强
岩性∩地貌	0.781	$>q(\text{岩性})+q(\text{地貌})$	非线性增强
岩性∩道路密度	0.547	$>\text{Max}(q(\text{岩性}), q(\text{道路密度}))$	双因子增强
岩性∩降水量	0.221	$>\text{Max}(q(\text{岩性}), q(\text{降水量}))$	双因子增强
岩性∩地震动峰值加速度	0.339	$>q(\text{岩性})+q(\text{地震动峰值加速度})$	非线性增强
河流密度∩地貌	0.831	$>\text{Max}(q(\text{河流密度}), q(\text{地貌}))$	双因子增强
河流密度∩道路密度	0.700	$>\text{Max}(q(\text{河流密度}), q(\text{道路密度}))$	双因子增强
河流密度∩降水量	0.540	$>\text{Max}(q(\text{河流密度}), q(\text{降水量}))$	双因子增强
河流密度∩地震动峰值加速度	0.559	$>q(\text{河流密度})+q(\text{地震动峰值加速度})$	非线性增强
地貌∩道路密度	0.815	$>\text{Max}(q(\text{地貌}), q(\text{道路密度}))$	双因子增强
地貌∩降水量	0.735	$>q(\text{地貌})+q(\text{降水量})$	非线性增强
地貌∩地震动峰值加速度	0.544	$>\text{Max}(q(\text{地貌}), q(\text{地震动峰值加速度}))$	双因子增强
道路密度∩降水量	0.617	$>q(\text{道路密度})+q(\text{降水量})$	非线性增强
道路密度∩地震动峰值加速度	0.521	$>\text{Max}(q(\text{道路密度}), q(\text{地震动峰值加速度}))$	双因子增强
降水量∩地震动峰值加速度	0.267	$>\text{Max}(q(\text{降水量}), q(\text{地震动峰值加速度}))$	双因子增强

表 7 生态探测结果
Table 7 Ecological detection results

	坡度X1	断层距离X2	岩性X3	河流密度X4	地貌X5	道路密度X6	降水量X7	地震动峰值加速度X8
坡度								
断层距离	N							
岩性	N	Y						
河流密度	Y	N	Y					
地貌	Y	N	Y	N				
道路密度	Y	N	Y	N	N			
降水量	N	Y	N	Y	Y	Y		
地震动峰值加速度	N	N	N	Y	Y	Y	N	

的分布主要沿河流与道路分布,全县 85 处滑坡全部分布于河流附近,其中 61 处滑坡分布于道路两侧,占比达 71.76%。

(2)江达县滑坡稳定性的主要影响因子为地貌类型、河流密度、道路密度和断层距离,其贡献率分别为 0.501, 0.477, 0.465, 0.332, 因此,可以看出地貌类型与

断层距离是造成高山峡谷地区滑坡失稳的先决条件,河流的冲刷侵蚀以及基础道路的修建(人类活动)是造成滑坡失稳的诱发条件;探测发现,影响滑坡稳定性因子在两两相互作用时,其解释力总是大于单个因子的解释力,对于滑坡的稳定性分异具有非线性增强与双因子增强的作用,也就是说,当两种影响因子相互作用时,对

于滑坡的失稳总是具有增强的作用。

(3)通过利用地理探测器对滑坡稳定性影响因子的探测发现,其结果较为符合科学依据与事实。因此,地理探测器这一模型对于滑坡稳定性影响因子探测具有一定的实用性。

参考文献 (References) :

- [1] 陈冠,孟兴民,郭鹏,等.白龙江流域基于GIS与信息量模型的滑坡危险性等级区划[J].兰州大学学报(自然科学版),2011,47(6):1-6. [CHEN Guan, MENG Xingmin, GUO Peng, et al. Landslide susceptibility mapping based on GIS and information value model in Bailong river basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, 47(6): 1-6. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张永双,郭长宝,杨志华,等.青藏高原东缘地形急变带滑坡灾害特征与危险性研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2018. [ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, YANG Zhihua, et al. Study on the characteristics and risks of landslide disasters in the sudden Change Zone of the Eastern Tibetan Plateau[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.(in Chinese)]
- [3] 柳丙善,李世海,赵卿.清江隔河岩水库茅坪滑坡的主要影响因素分析[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(2):36-43. [LIU Bingshan, LI Shihai, ZHAO Qin. Research on the main factors causing Maoping Landslide based upon the insitu investigation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 36-43. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈剑,李晓,杨志法.三峡库区滑坡的时空分布特征与成因探讨[J].工程地质学报,2005,13(3):305-309. [CHEN Jian, LI Xiao, YANG Zhifa. On the distribution and mechanism of landslides in the Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(3): 305-309. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 尹小涛,王水林.基于可靠度理论的滑坡稳定性及其影响因素分析[J].岩土力学,2008,29(6):1551-1556. [YIN Xiaotao, WANG Shuilin. Stability and its influential factors analysis of landslides based on reliability theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1551-1556. (in Chinese with English abstract)]
- [6] TURKAN B A, ERGIN G. Landslide-Triggering Factors in Korucak Subbasin, North Anatolian, Turkey [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2015, 15: 566-572.
- [7] 杨华阳,许向宁,杨鸿发.基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):20-29. [YANG Huayang, XU Xiangning, YANG Hongfa. The Jiuzhaigou co-seismic landslide hazard assessment based on weight of evidence method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 20-29. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张向营,张春山,孟华君,等.基于Random Forest和AHP的贵德县北部山区滑坡危险性评价[J].水文地质工程地质,2018,45(4):142-149. [ZHANG Xiangying, ZHANG Chunshan, MENG Huajun, et al. Landslide hazard evaluation in the northern mountainous area of Guide County based on Random Forest and AHP [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 142-149. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨可明,郭海会,钱小丽,等.结合信息熵改进的证据权法与滑坡危险性区划[J].地理与地理信息科学,2013,29(3):104-108. [YANG Keming, GUO Haihui, QIAN Xiaoli, et al. Improving weights of evidence method based on entropy and zoning the landslide hazard [J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(3): 104-108. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张倬元.滑坡防治工程的现状与发展展望[J].地质灾害与环境,2000,11(2):89-97. [ZHANG Zhouyuan. The present status, technical advance and development trends of landslide remedial measures [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(2): 89-97. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王恭先.滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3818-3827. [WANG Gongxian. Key technique in landslide control and its handling measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3818-3827. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 罗丽娟,赵法锁.滑坡防治工程措施研究现状与应用综述[J].自然灾害学报,2009,18(4):158-164. [LUO Lijuan, ZHAO Fasuo. Status of research and application of engineering measures for preventing and controlling landslide [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(4): 158-164. (in Chinese with English abstract)]
- [13] NIE Z B, ZHANG Z H, ZHENG H, et al. Stability analysis of landslides using BEM and variational inequality based contact model [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 1-7.
- [14] 闫玉平,肖世国.考虑滑带强度参数分区取值的堆积层滑坡稳定性分析方法[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(2):44-49. [YAN Yuping, XIAO Shiguo. Stability analysis method for bedrock-talus landslides considering strength parameter partition of slip shear band [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 44-49. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘磊,徐勇,李远耀,等.湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价[J].水文地质工程地质,2019,46(2):21-

28. [LIU Lei, XU Yong, LI Yuanyao, et al. A study of deformation mechanism and stability evaluation of the Chenxiyu landslide in western Hunan [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 21 - 28. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望 [J] . *地理学报*, 2017, 72(1): 116 - 134. [WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J] . *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116 - 134. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李涛,廖和平,褚远恒,等.重庆市农地非农化空间非均衡及形成机理 [J] . *自然资源学报*, 2016, 31(11): 1844 - 1857. [LI Tao, LIAO Heping, CHU Yuanheng, et al. Spatial disequilibrium and its formation mechanism of farmland conversion in Chongqing [J] . *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(11): 1844 - 1857. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 闫举生,谭建民.基于不同因子分级法的滑坡易发性评价:以湖北远安县为例 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 52 - 60. [YAN Jusheng, TAN Jianmin. Landslide susceptibility assessment based on different factor classification methods—A case study in Yuan'an County of Hubei Province [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 52 - 60. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张铎,吴中海,李家存,等.滇西北永胜-宾川地区滑坡发育的影响因子分析及其动力成因与意义探讨 [J] . *自然灾害学报*, 2016, 25(1): 176 - 190. [ZHANG Duo, WU Zhonghai, LI Jiacun, et al. Analysis of the influential factor of landslide in Yongsheng-Binchuan region of northwest Yunnan and the exploration of its dynamic cause and significance [J] . *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(1): 176 - 190. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 谢帅,刘士彬,段建波,等.OSDS注册用户空间分布特征及影响因素分析 [J] . *地球信息科学学报*, 2016, 18(10): 1332 - 1340. [XIE Shuai, LIU Shibin, DUAN Jianbo, et al. Spatial distribution characteristics of OSDS registered users and its influencing factors [J] . *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(10): 1332 - 1340. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 田丰,张军,冉有华,等.甘肃陇南市泥石流灾害危险性及其影响因子评价 [J] . *灾害学*, 2017, 32(3): 197 - 203. [TIAN Feng, ZHANG Jun, RAN Youhua, et al. Assessment of debris flow disaster hazard and influence factors in Longnan district [J] . *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(3): 197 - 203. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 方然可,刘艳辉,苏永超,等.基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型 [J] . *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 181 - 187. [FANG Ranke, LIU Yanhui, SU Yongchao, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 181 - 187. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 郭伟,王晨辉,李鹏,等.基于LoRa的地质灾害分布式实时监测系统设计 [J] . *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 107 - 113. [GUO Wei, WANG Chenhui, LI Peng, et al. Design of the distributed real-time monitoring system for geological hazards based on LoRa [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 107 - 113. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张茂省.发挥新型举国体制优势提高地质灾害防治能力 [J] . *西北地质*, 2019, 52(2): I - II. [ZHANG Maosheng. Maximising the advantages of the new national system for improving the ability to prevent and mitigate geological disasters [J] . *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): I - II. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张茂省,薛强,贾俊,等.山区城镇地质灾害调查与风险评估方法及实践 [J] . *西北地质*, 2019, 52(2): 125 - 135. [ZHANG Maosheng, XUE Qiang, JIA Jun, et al. Methods and practices for the investigation and risk assessment of geo-hazards in mountainous towns [J] . *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 125 - 135. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李滨,张青,王文沛,等.金沙江乌东德水电站坝区高陡边坡地质灾害监测预警研究 [J] . *地质力学学报*, 2020, 26(4): 556 - 564. [LI Bin, ZHANG Qing, WANG Wenpei, et al. Geohazard monitoring and risk management of high-steep slope in the Wudongde dam area [J] . *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 556 - 564. (in Chinese with English abstract)]