

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2019.09.008

基于地理探测器的岷江上游泥石流 影响因子相对重要性分析^①

黄 涛¹, 丁明涛¹, 蒋林宏², 郭浩天²

1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 成都 611756;

2. 四川省冶金地质勘查局六〇四大队, 四川 广元 628017

摘要: 结合 GIS 和 RS 技术, 应用地理探测器方法定量分析岷江上游土壤类型、坡度、年降雨量、植被密度、地层岩性等 9 个影响因子在泥石流活动中的作用及相互作用关系。结果表明: 泥石流具有空间异质性, 对泥石流贡献率大于 10% 的主要影响因子有年降雨量、坡度、距断裂带距离、植被密度和土地利用类型。交互作用探测表明 9 个影响因子间的交互作用主要是非线性增强, 其中年降雨量、距断裂带距离和坡向 3 种影响因子对泥石流的交互作用较强。

关键词: 泥石流; 地理探测器; 影响因子; 交互作用; 岷江上游

中图分类号: P642.33

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)09-0045-07

随着山区城镇经济的快速发展, 人类对山地生态环境的干扰越发频繁且显著, 加上频繁地震(尤其是 2008 年 5 月 12 日汶川 Ms8.0 地震和 2013 年 4 月 20 日芦山 Ms7.0 地震)的影响, 使岷江上游成为典型的生态环境脆弱区和泥石流灾害多发区^[1-2], 居民生命财产和生计资源面临的泥石流灾害威胁越发严重, 如 2010 年 8 月 13 日汶川县红椿沟泥石流造成 17 人死亡^[3]。因此深入研究岷江上游泥石流各影响因子相对重要性和因子交互作用效果显得尤为重要, 一方面可探索泥石流形成的主要原因, 另一方面对灾区防灾减灾措施的制定也有一定的指导意义。

对泥石流影响因子相对重要性的研究, 初期存在资料的难以获取和因子量化困难等原因, 且以半定量的研究方法较多, 而定量的方法偏少, 因此所得结论比较缺乏客观性和准确性^[4-5]。近年来, 朱良峰、丛威青和丁伟翠等^[6-8]用客观赋权法、主观赋权法、支持向量机法、独立信息数据波动赋权法等定量分析方法对泥石流因子相对重要性进行相关研究。但在相对重要性定量分析的研究中, 存在着不少缺陷, 如影响因子筛选不够全面、评估方法不准确等。因此, 对于一个泥石流定量评价模型, 如何更全面地遴选影响因子并体现它们之间的相对重要性, 以及如何体现多因子对研究目标的交互作用是一个难题。地理探测器模型是由王劲峰等^[9]提出的一种新的用来探测空间分异性的统计学方法, 该模型可揭示影响因子间的相互关系, 探测各影响因子对研究目标的相对重要性。廖颖等^[10]基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型能直接体现环境因子对动物生境利用的生态学作用, 具有较好的生态学可解释性; 湛东升等^[11]借地理探测器方法揭示了北京市居民宜居满意度特征与影响机理; 周磊等^[12]采用地理探测器定量分析了 PM_{2.5} 污染风险因子及其影响程度。在各领域的研究中地理探测器都表现出良好的适用性, 无需过多的假设条件与约

① 收稿日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871174); 国家重点研发计划项目(2018YFC1505402); 中央高校基本科研业务费专项项目(2682019CX19)。

作者简介: 黄涛(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害风险评估研究。

通信作者: 丁明涛, 教授, 博士研究生导师。

束,可以避免人为主观性的影响进而客观有效地分析地理事物和其影响因子之间的关系,因此本研究选择泥石流灾害较严重的岷江上游作为研究区域,利用地理探测器模型对泥石流影响因子相对重要性进行定量分析,以此分析确定各影响因子在泥石流活动中的作用及相互作用关系。

1 研究区概况

岷江上游位于北纬 $30^{\circ}45'37''-33^{\circ}69'35''$,东经 $102^{\circ}33'46''-104^{\circ}15'36''$ 之间,研究区主要分布在四川省阿坝藏族羌族自治州的汶川、茂县、理县、黑水、松潘五县^[13-14],流域面积约 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。研究区地貌以高山峡谷为主,地势总体呈西北高、东南低之势,河流下切和侵蚀能力均较强,使河谷下部的地貌动态平衡变得十分脆弱^[15-16]。

区内出露古生代、中生代碎屑岩和碳酸岩,岩性多以砂板岩、片岩、页岩、千枚岩、大理岩等岩类为主,断裂发育,岩体完整性较差。该区气象条件较复杂,处于海陆季风向高原季风转变的过渡地带,干湿季明显,降水多为阵性夜雨,瞬时强度大气候具有水平地带和垂直地带双重特性^[17]。流域内的土地利用主要以林地为主,草地次之,耕地比较少;自然土壤类型主要包括黑毡土、暗棕壤、棕壤、黄毡土等^[16]。流域内植被受气候的影响,垂直分异特征十分显著,从低至高呈现从常绿阔叶林-常绿落叶阔叶混交林-针阔混交林-针叶林-高山疏林灌丛-高山草甸-流石滩的变化趋势。流域内人口主要集中分布在河谷位置^[18]。

总体而言,研究区内泥石流灾害发育较明显,严重威胁着沟谷分散农户和堆积区的城镇及相关基础设施。

2 数据来源与影响因子选取

2.1 数据来源与处理

岷江上游泥石流沟分布数据主要由四川省各州市上报灾害点数据矢量化得到。基于 ArcGIS 10.2 软件,在获取泥石流灾害点分布图的基础上,分析选取泥石流发育较严重的 244 条泥石流沟,并对其进行矢量化,得到岷江上游 244 条泥石流流域分布图(图 1)。从流域来看,岷江上游泥石流沟主要沿着岷江主流、杂谷脑河、黑河干流流域呈条带状分布^[19]。其次就地形而言,泥石流主要集中于纵比降较大的高山峡谷地貌地区。再者,泥石流主要沿深大断裂分布,断裂带附近的泥石流占岷江上游泥石流的 77%^[20]。

在泥石流灾害的影响因子中,坡向、坡度数据利用 ASTER GDEM 数据^[20]提取而出;降雨数据来自于四川省水文水资源局;土壤分布和植被覆盖是来源于郭亚琳的岷江上游地区生境适宜性评价数据集^[21],对其进行数字化处理并归类,得到岷江上游土壤和植被矢量图;土地利用类型对 2013 年 30 m 分辨率 Landsat8 影像^[22]进行遥感解译获得,通过分析历史文献资料整理得出断裂带分布、地层岩性、人类活动高低;最后对部分影响因子进行分级、数值化得到影响因子特征参数。

2.2 泥石流影响因子的选取

本研究在总结前人研究的基础上通过理论分析与实地调查^[23-25],选取对泥石流形成发育影响较大的 9 个影响因子(土壤类型、坡度、年降雨量、植被覆盖、地层岩性、土地利用类型、坡向、距断裂带距离和人类活动)代表研究区泥石流发育的影响因子。

3 研究方法

地理探测器是王劲峰等提出的一种基于空间方差分析理论,进而探测空间分异性以及揭示其背后驱动

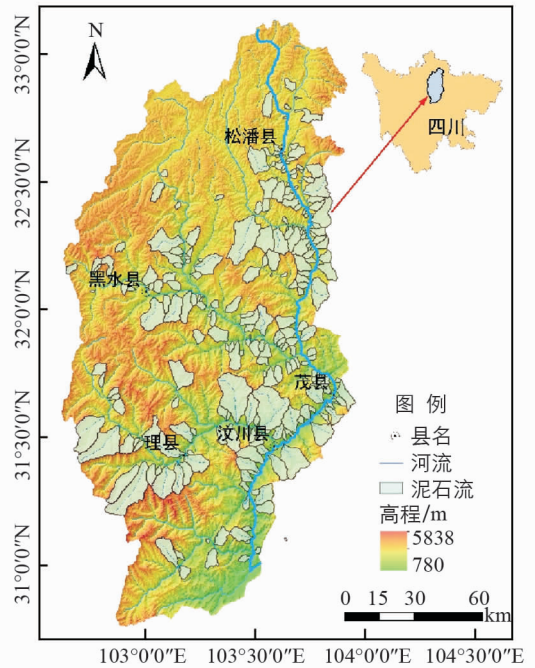


图 1 岷江上游区位及泥石流分布

力的一种模型. 该模型有 4 个模块^[9,26-27], 本研究主要是利用“因子探测器”和“交互作用探测器”对影响岷江上游泥石流的各因子进行定量分析, 得出泥石流的各个影响因子的相对重要性以及各因子之间的交互作用.

1) 贡献率的计算方法

本文利用因子探测器计算各个因子贡献率. 因子探测器是探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异, 用因子的解释力 $P_{D,H}$ 进行判断, $P_{D,H}$ 的值域为 $[0, 1]$, $P_{D,H}$ 的值越大, 表明目标属性 Y 的空间分异性越明显. $P_{D,H}$ 计算公式为:

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2 \quad (1)$$

$$P_{D,H} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

式中: $h = 1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层, 即分类或分区; N_h 和 N 分别为层和全区的单元数; SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差; D 为影响因子; H 为泥石流面积比; $P_{D,H}$ 为 D 对 H 的解释力, 即为各个影响因子的贡献率.

2) 交互作用探测

交互作用探测器是探测风险因子之间是否具有相互作用, 判断依据如表 1 所示.

表 1 地理探测器交互作用判断公式

描 述	交互关系
$P_{D,H}(D1 \cap D2) > \text{Min}(P_{D,H}(D1), P_{D,H}(D2))$	非线性拮抗
$\text{Min}(P_{D,H}(D1), P_{D,H}(D2)) < P_{D,H}(D1 \cap D2) < \text{Max}(P_{D,H}(D1), P_{D,H}(D2))$	单拮抗
$\text{Max}(P_{D,H}(D1), P_{D,H}(D2)) < P_{D,H}(D1 \cap D2) < P_{D,H}(D1) + P_{D,H}(D2)$	双协同
$P_{D,H}(D1 \cap D2) = P_{D,H}(D1) + P_{D,H}(D2)$	相互独立
$P_{D,H}(D1 \cap D2) > P_{D,H}(D1) + P_{D,H}(D2)$	非线性协同

首先, 利用 ArcGIS 10.2 软件, 生成岷江上游 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的 997 个正方形网格图, $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 网格选择依据是小于 244 条泥石流最小流域面积, 然后将网格图与泥石流分布图相叠加, 统计出每个网格泥石流面积, 计算得到每个网格的泥石流面积比. 再分别将其他泥石流影响因子图层与网格图进行叠加, 得到相关数据并导出, 最后利用地理探测器软件进行分析.

4 案例运用

4.1 泥石流影响因子的贡献率

本研究经过分析比较选取了 9 种影响因子, 对泥石流 9 个影响因子进行等级划分, 并绘制各影响因子空间分布图(图 3). 利用因子探测器获得泥石流 9 个影响因子的相对重要性, 即各影响因子对泥石流作为目标属性 Y 的解释力 $P_{D,H}$ 值.

依据分析结果泥石流影响因子相对重要性由大到小排列依次为: 年降雨量(24.9%)、坡度(15.3%)、距断裂带距离(13.7%)、植被密度(12.4%)、土地利用类型(10.6%)、人类活动(7.0%)、坡向(6.7%)、岩性(6.5%)和土壤类型(2.9%).

结果中, 年降雨量、坡度、距断裂带距离 3 个因子对泥石流的贡献率达到了 54%, 表明泥石流的发生主要是受降雨、地形、地质条件因子的影响, 并且在岷江上游降雨因子对研究区泥石流发生影响最大, 其次为坡度.

4.2 泥石流影响因子的交互作用

交互作用探测器用来检验两种影响因子是自身独立起作用还是相互作用, 若为相互作用, 作用是增强还是减弱. 借助交互作用探测器模块获得 9 个影响因子对泥石流的交互作用(表 2). 从表 2 可看出, 研究区泥石流的各影响因子的交互作用基本上是非线性增强的, 其交互作用效果由大到小依次为: 年降雨量/坡向(18.3%)、与断裂带距离/年降雨量(17.1%)、土壤类型/年降雨量(15.2%)、地层岩性/年降雨量(11.3%)、年降雨量/人类活动(10.7%)、年降雨量/土地利用类型(10.3%), 各因子之间的交互作用均在

10%以上,其中年降雨量、坡向、与断裂带距离、土壤类型、的相互作用呈非线性增强作用,使得彼此对泥石流活动的解释力增大,说明在泥石流活动中地形地貌、降雨因子有着非常重要的作用.就某因子与其他8项因子交互的综合作用,年降雨量的交互综合作用最强(1.021),随后依次为距断裂带距离综合(0.795)、坡向综合(0.767)、土壤类型综合(0.654)、坡度综合(0.58)和岩性综合(0.567).

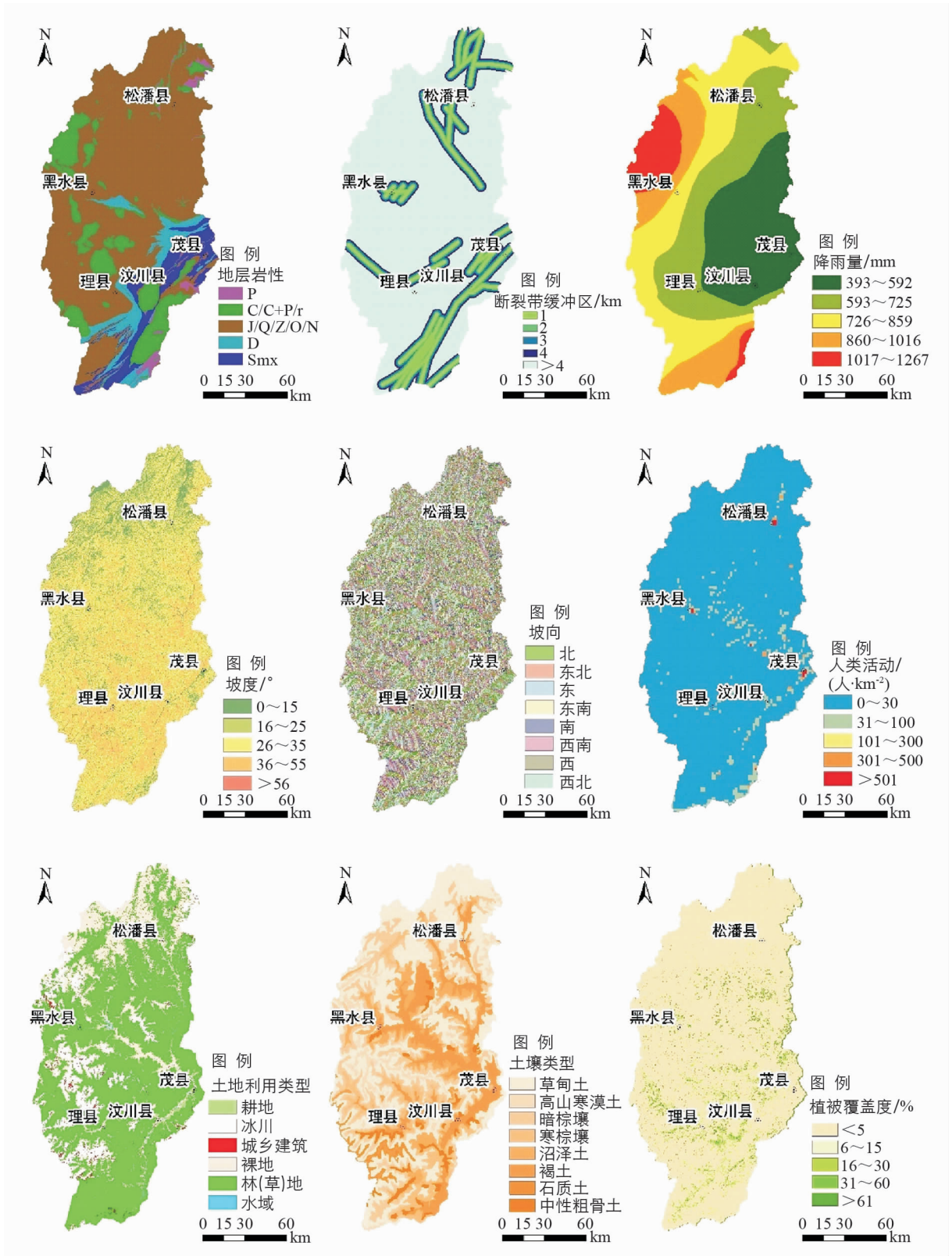


图 3 岷江上游泥石流影响因子空间分布图

表 2 岷江上游泥石流 9 个影响因子的交互作用

驱动因子 $D1/D2$	$C=PD,$ $H(D1 \cap D2)$	$PD,$ $H(D1)$	$PD,$ $H(D2)$	$A=PD, H(D1)+$ $PD, H(D2)$	C 与 A 大小 的比较
土壤类型/岩性	0.071	0.006	0.014	0.021	$C>A$
坡向/植被密度	0.049	0.015	0.028	0.042	$C>A$
土壤类型/土地利用类型	0.043	0.006	0.024	0.030	$C>A$
岩性/土地利用类型	0.054	0.014	0.024	0.038	$C>A$
土壤类型/人类活动	0.039	0.006	0.016	0.022	$C>A$
土地利用类型/坡向	0.060	0.024	0.015	0.038	$C>A$
土壤类型/与断裂带距离	0.124	0.006	0.031	0.037	$C>A$
岩性/年降雨量	0.113	0.014	0.055	0.070	$C>A$
土壤类型/植被密度	0.039	0.006	0.028	0.034	$C>A$
坡向/与断裂带距离	0.125	0.015	0.031	0.046	$C>A$
岩性/坡度	0.062	0.014	0.034	0.049	$C>A$
岩性/人类活动	0.055	0.014	0.016	0.030	$C>A$
土壤类型/年降雨量	0.152	0.006	0.055	0.062	$C>A$
土地利用类型/人类活动	0.047	0.024	0.016	0.039	$C>A$
土壤类型/坡向	0.120	0.006	0.015	0.021	$C>A$
岩性/坡向	0.083	0.014	0.015	0.029	$C>A$
土地利用类型/坡度	0.059	0.024	0.034	0.058	$C>A$
岩性/与断裂带距离	0.085	0.014	0.031	0.045	$C>A$
土壤类型/坡度	0.064	0.006	0.034	0.041	$C>A$
岩性/植被密度	0.044	0.014	0.028	0.042	$C>A$
人类活动/与断裂带距离	0.082	0.016	0.031	0.046	$C>A$
坡向/人类活动	0.062	0.015	0.016	0.031	$C>A$
与断裂带距离/坡度	0.085	0.031	0.034	0.065	$C>A$
坡向/坡度	0.085	0.015	0.034	0.049	$C>A$
土地利用类型/与断裂带距离	0.065	0.024	0.031	0.054	$C>A$
土地利用类型/植被密度	0.052	0.024	0.028	0.051	$C>A$
人类活动/植被密度	0.047	0.016	0.028	0.043	$C>A$
植被密度/年降雨量	0.087	0.028	0.055	0.083	$C>A$
土地利用类型/年降雨量	0.103	0.024	0.055	0.079	$C>A$
坡向/年降雨量	0.183	0.015	0.055	0.070	$C>A$
人类活动/坡度	0.062	0.016	0.034	0.050	$C>A$
人类活动/年降雨量	0.107	0.016	0.055	0.071	$C>A$
坡度/年降雨量	0.106	0.055	0.055	0.111	$C>A$
与断裂带距离/植被密度	0.061	0.031	0.028	0.058	$C>A$
与断裂带距离/年降雨量	0.171	0.031	0.055	0.086	$C>A$
植被密度/坡度	0.064	0.028	0.034	0.062	$C>A$

4.3 危险性评价

利用地理探测器的因子探测得到的 9 个因子在泥石流发生中的贡献率, 即年降雨量(0.249)、坡度(0.153)、距断裂带距离(0.137)、植被密度(0.124)、土地利用类型(0.106)、人类活动(0.070)、坡向(0.067)、岩性(0.065)、土壤类型(0.029), 将所得 9 个因子贡献率作为各个因子的危险性评价权重, 借助 ArcGIS10.2 软件, 采用 GIS 权重叠加法将各个图层进行赋权叠加, 得到基于地理探测器的研究区泥石流危险性评价图(图 4)。

从图 4 可以看出, 岷江上游泥石流高危险区和较高危险区主要分布在沿岷江主流、杂谷脑河、黑河干流的支沟沟道两侧、渔子溪及寿流域, 同时黑水县和松潘县西侧也有较多分布; 中危险区则是分布较广, 以沟道上游分布较多; 泥石流较低和低危险区分布在距河流较远的平缓地区。危险性评价结果与该研究区实际灾害分布情况具有较高的一致性, 表明应用地理探测器探测分析泥石流影响因子相对重要性具有很好的效果。

5 结 论

地理探测器模型是一种基于数据驱动的探测空间分异性模型,可以客观定量分析泥石流各影响因子之间的相对重要性;在选择多种影响因子作为辅助变量时,可以考虑多个影响因子对泥石流的交互作用,使得选择的参数更加准确合理;地理探测器在原理上解决了影响因子“多重共线”问题,如本研究中的土地利用类型与土壤分布,使结果具有更好的解释性。

因子探测器揭示了影响因子对泥石流的解释力 $P_{D, H}$ 的一致性和差异性。泥石流空间数据分析结果表明,岷江上游泥石流具有空间异质性,贡献率在 10% 以上的主要影响因子为年降雨量(24.9%)、坡度(15.3%)、距断裂带距离(13.7%)、植被密度(12.4%)和土地利用类型(10.6%)。交互作用探测证明了泥石流的空间分布是由多种影响因子共同作用的结果,不同因子之间的交互作用强弱不同,差异有统计学意义。结果表明研究区内泥石流各因子之间的交互作用均在 10% 以上,各影响因子之间的交互作用大部分是非线性增强,其中年降雨量、距断裂带距离和坡向 3 种影响因子对泥石流的交互作用较强。

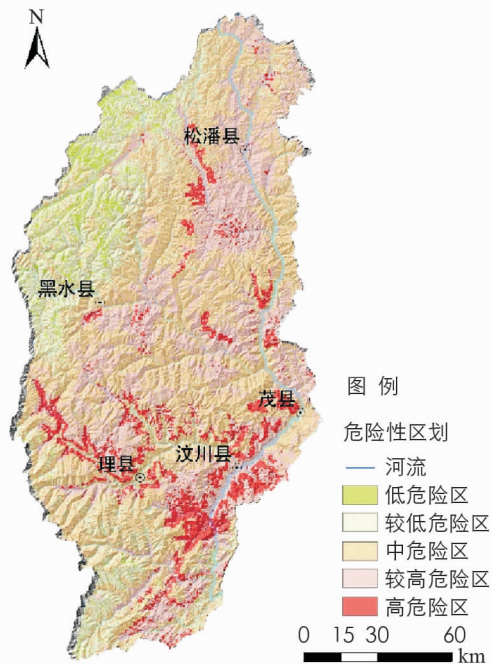


图 4 泥石流危险性评价图

参考文献:

- [1] DING M T, MIAO C. Comparative Analysis of the Distribution Characteristics of Geological Hazards in the Lushan and Wenchuan Earthquake-Prone Areas [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(6): 5359-5371.
- [2] DING M T, HEISER M, HÜBL J, et al. Regional Vulnerability Assessment for Debris Flows in China—A CWS Approach [J]. Landslides, 2016, 13(3): 537-550.
- [3] 周志东, 黄 强, 邓 婷. 四川红椿沟泥石流成因初步分析 [J]. 水利水电技术, 2011, 42(9): 56-57.
- [4] 王霖琳. GIS 支持下的泰山地区泥石流危险性评价研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2004.
- [5] 刘希林, 唐 川, 张松林. 中国山区沟谷泥石流危险度的定量判定法 [J]. 灾害学, 1993, 8(2): 1-7.
- [6] 朱良峰, 吴信才, 殷坤龙, 等. 基于 GIS 的中国滑坡灾害风险分析 [J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 221-224, 230.
- [7] 丛威青, 潘 懋, 李铁锋, 等. 基于 GIS 的滑坡、泥石流灾害危险性区划关键问题研究 [J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 185-190.
- [8] 丁伟翠, 薛星桥, 杨 强, 等. 基于 GIS 的甘肃省灵台县地质灾害易发性区划研究 [J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 32-34, 78.
- [9] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical Detectors-Based Health Risk Assessment and Its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [10] 廖 颖, 王心源, 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证 [J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 767-778.
- [11] 湛东升, 张文忠, 余建辉, 等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 966-975.
- [12] 周 磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 PM_{2.5} 时空分布特征及其污染风险因素 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(4): 483-493.
- [13] 丁明涛, 庙 成, 黄 涛. 岷江上游河谷聚落特征及其演化分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(8): 37-43.

- [14] 丁明涛,周鹏,庙成,等. 基于降雨垂直分异的泥石流监测网传感节点布设研究[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 128-132.
- [15] 包维楷,王春明. 岷江上游山地生态系统的退化机制[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 57-62.
- [16] 丁明涛,王骏,程尊兰,等. 岷江上游土地利用类型对泥石流灾害的敏感性[J]. 山地学报, 2015, 33(5): 587-596.
- [17] 吴勇,苏智先,方精云. 岷江上游干温河谷成因及生态恢复初探[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 276-281.
- [18] 庞金彪. 岷江上游泥石流胁迫下山区建筑物易损性评价[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018: 1-98.
- [19] 冯茵,杨武年,张林,等. 岷江上游地貌侵蚀对泥石流发育的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 16-20, 25.
- [20] 王昕. 岷江上游泥石流活动的分布特征研究[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 2000, 17(4): 51-55, 93.
- [21] 郭亚琳. 岷江上游藏羌聚落生境分异与气候变化的关联机制[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018.
- [22] 中国科学院对地观测与数字地球科学中心. 对地观测数据共享计划[EB/OL]. <http://ids.ceode.ac.cn/>.
- [23] 李炫,杨本勇,范建容,等. 基于流域单元的岷江上游泥石流危险性评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 335-339.
- [24] 林虹宇,丁明涛,余涛,等. 岷江上游典型泥石流活动特征及其易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(4): 6-15.
- [25] 南希,严冬,李爱农,等. 岷江上游流域山地灾害危险性分区[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 113-120.
- [26] WANG J F, HU Y. Environmental Health Risk Detection with Geog-Detector [J]. Environmental Modelling and Software, 2012, 33: 114-115.
- [27] 张茜茜,廖和平,巫芯宇,等. 乡村振兴背景下的“人、地、业”转型空间差异及影响因素分析——以重庆市渝北区为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 1-9.

Relative Importance Analysis of Debris Flow Influence Factors Based on Geographical Detectors: a Case Study in the Upper Reaches of Min River

HUANG Tao¹, DING Ming-tao¹, JIANG Lin-hong², GUO Hao-tian²

1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. 604 Brigade of Sichuan Metallurgical Geological Exploration Bureau, Guangyuan Sichuan 628017, China

Abstract: Combined with GIS and RS technology, the geo-detector method was used to analyze quantitatively the effects and correlations of nine influencing factors such as soil type, slope and annual rainfall, vegetation density and stratum lithology for the debris flow in the upper reaches of Min River. The results show that the debris flow has spatial heterogeneity, and the main influencing factors for the contribution rate of debris flow greater than 10% are annual rainfall, slope, distance from fault zone, vegetation density and land use type. The interaction detection shows that the interaction between the nine influencing factors is mainly nonlinear enhancement, and the interaction effects of annual rainfall, distance from the fault zone and slope direction on the debris flow are stronger.

Key words: debris flow; geo-detector; impact factor; interaction; the upper reaches of Min River