doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.04.06
引用格式: 周毅,丁明涛,黄涛,等.芦山县滑坡灾害影响因素的空间分异性[J].中国地质调查,2022,9(4): 45-55.(Zhou Y,Ding M T,Huang T,et al. Spatial heterogeneity of influencing factors of landslide disasters in Lushan County[J]. Geological Survey of China,2022,9(4): 45-55.)

芦山县滑坡灾害影响因素的空间分异性

周 毅, 丁明涛, 黄 涛, 何雨峰
(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 近年来受多次地震影响,芦山县的地质环境和生态结构较为脆弱,滑坡灾害高发,制约了县内基础建设和经济发展,威胁着人民生命财产安全,研究静态地质环境下芦山县滑坡影响因素的空间分异性,可为区内国土空间规划提供基础资料,为滑坡灾害预测与防治提供数据支持。本文使用信息量模型和地理探测器分析了高程、坡度等12个影响因素与滑坡发育的关系,总结了滑坡发育规律,分析了影响因素的空间分异特征,并使用GIS加权叠加生成了滑坡易发性评价图。研究结果表明: ①滑坡主要集中于高程较低([571,1 300) m)、距道路距离较近([0,300) m)、距水系距离较近([0,300) m)、地形起伏度较小([0,30) m)、坡度较缓([0°,30°))、距断层距离较近([0,600) m)的地区,岩土类型以粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥岩等软弱沉积岩和砂卵砾石土层的第四系堆积物为主,土地利用类型以建设用地、农业用地等为主; ②滑坡发育主要受高程、距道路距离、工程地质岩组等因素控制,此外土地利用类型、距水系距离、地形起伏度、坡度、距断层距离等因素也有较高的贡献率; ③两种不同影响因素对滑坡发育的作用较单一因素而言均呈现双因子或非线性增强,以高程和距道路距离与其他因素的交互作用最为强烈; ④滑坡高易发区和极高易发区主要分布于东南部中低山峡谷区、丘陵区以及河流沟谷地貌。

关键词: 滑坡; 影响因素; 空间分异性; 地理探测器
中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2022)04-0045-11

0 引言

芦山县作为“5·12”汶川地震和“4·20”芦山地震的重灾区,发生了大量的滑坡等地质灾害,破坏了原有生态地质环境。由于受多次地震影响,生态地质环境恢复缓慢,地质环境脆弱,加之近年来极端气象灾害频发和城镇化速率加快,芦山县内滑坡灾害多发,严重制约着县内基础建设和经济发展,威胁着人民生命财产安全。滑坡灾害由众多影响因素共同作用所致,研究芦山县滑坡灾害发育规律并分析影响因素的空间分异性,可指导区内国土空间规划,改善生态地质环境,为滑坡灾害的监测预警、预测防治、险情评价提供理论基础,推动区内滑坡灾害的防灾减灾与预测防治工作的开展。

前人已对滑坡影响因素开展过深入研究,通过滑坡空间分布规律使用知识驱动的定性分析(经验模型)[1-2]和定量分析(数理统计模型、机器学习、深度学习)[3-8]方法,分析了滑坡空间分布规律以及影响因素对滑坡发育的空间分异特征。Zou等[3]基于GIS空间分析统计了鲁甸地震同震滑坡的控制因素,分析了滑坡发生与控制因素的相关性; Hu等[4]使用分形模型分析了全国范围内地质灾害的空间分布特征,并分析了地质灾害与海拔、坡度等5种诱发因素的空间关系; 许冲等[9]使用确定性系数评价了汶川地震滑坡影响因素的敏感性,根据确定性系数值评价了有利于地震滑坡发育的子区间; 王新胜等[10]使用神经网络模型分析了

收稿日期: 2022-04-19; **修订日期:** 2022-07-18。
基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“强震区泥石流形成演进机制与动态监测预警研究(编号: U21A2032)”、国家自然科学基金面上项目“面向灾害保险的岷江上游聚落风险模式化认知与应急响应(编号: 41871174)”和国家重点研发计划川藏专项“川藏铁路沿线高势能泥石流形成-演进过程及链生效应(编号: 2021YFB2301404)”联合资助。
第一作者简介: 周毅(1998—),男,硕士研究生,主要从事地质灾害风险控制与工程减灾研究工作。Email: sysz2936384@163.com。
通信作者简介: 丁明涛(1981—),男,教授,主要从事地质灾害风险控制与聚落减灾研究工作。Email: mingtaoding@163.com。

重庆市滑坡灾害发育的驱动因子,并定量计算了各影响因素的贡献权重,得出研究区内滑坡的主控因子为人口密度、降雨和地貌类型;杨忠平等[11]对三峡库区开展了堆积层滑坡在影响因子作用下的变形破坏特征和分布规律分析,解明了堆积层滑坡在关键影响因子作用下的分布规律和变形破坏特征;唐尧等[12]使用高分遥感技术对攀西米易地区开展了地质灾害调查,分析了隐患点分布规律并总结了区域地质灾害成灾规律;董毅兵等[13]对甘肃省会宁县开展了地质灾害易发性评价,基于层次分析法建立 14 种影响因子的评价模型,并总结了区域地质灾害成灾规律。

前人研究多集中于滑坡发育与影响因素子区间的关系或影响因素贡献率,本文选择地理探测器和信息量模型,针对滑坡与影响因素子区间的空间分布关系、影响因素贡献率、影响因素交互作用和滑坡易发性评价,综合分析滑坡发育规律和影响因素的空间分异性,为区内国土空间规划和滑坡灾害的风险管控奠定基础。本文选择芦山县作为研究区,以滑坡灾害为研究对象,使用信息量模型和地理探测器探究滑坡灾害的发育规律与主控因素,分析影响因素的空间分异性。基于信息量模型和地理探测器分析滑坡的空间分布规律、影响因素对滑坡发育的贡献率以及影响因素的交互作用,使用 GIS 核密度统计和加权叠加生成核密度统计图及易发性评价图,综合评价分析滑坡灾害发育规律和影响因素的空间分异性,研究对县内防灾减灾与空间规划有重大意义。

1 研究区概况及滑坡影响因素

1.1 研究区概况

芦山县位于四川省中部,四川盆地西部边缘,地形地貌变化复杂,地形切割严重。区内地形整体由北向南海拔逐渐降低,海拔高差较大,海拔最低 571 m,最高 5 358 m。北部和西部为高山峡谷区,中部和东南部为中低山山地、丘陵和河谷地貌,山地地貌和沟谷较为发育。区内水系丰富,水文地质作用强烈,大小河流共计 556 条,隶属于岷江水系。区内滑坡灾害极为发育,本文收集了近 5 a 内共 413 处典型滑坡灾害点,主要发育于研究区中部和东南部中低山地貌、河谷区和丘陵区(图 1)。研究区内的滑坡灾害发育区也是县内人民的生产生活聚集区,对人民生命财产安全构成严重威胁。

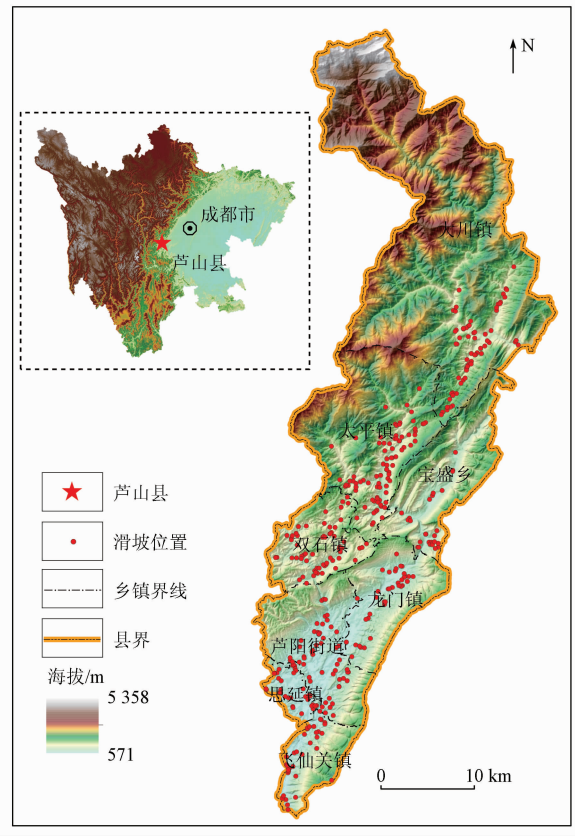

图 1 芦山县区域位置及灾害分布

Fig. 1 Regional location and disaster distribution of Lushan County

1.2 滑坡影响因素

本文基于数据收集和文献阅读,从地形地貌、地质构造、人类活动等方面共选择了 12 个滑坡影响因素(图 2),选取原则为相对静态地质环境下滑坡的影响因素,未考虑极端气象灾害和地震因素对滑坡灾害形成演化的动态过程。主要评价在相对静态的地质环境下,滑坡灾害发育规律和影响因素的空间分异性。静态地质环境下的影响因素分析结果可作为研究区内国土空间规划的基础数据,在综合考虑地震等突发灾害或降雨等气象灾害因素的情况下,可作为研究区内突发外因诱导下的滑坡地质灾害风险管控及防治规划的理论基础。

使用 GIS 的统计分析功能对所选的 12 个影响因素进行分类和离散化:①研究区内高程变化显著,从北部高山区向南部丘陵区逐渐变化,高程除反映地形上的变化外,在一定程度上也体现了人类工程活动的强度,本文将高程(571 ~ 5 358 m)划分

为 8 个区间;②坡度表示斜坡地表单元的陡峭程度,研究区内坡度变化较大(0° ~ 72°),以 10°为区间将坡度等距离划分为 7 个区间;③不同坡向的斜坡岩土体受日照、降水等风化营力作用的程度不同,地表植被覆盖率也有差异;④地形起伏度表示地表某一范围内高程最大值和最小值的差值,指示地形的起伏程度,本文将地形起伏度按 10 m 为间隔等距离划分为 7 个区间;⑤曲率反映了地表形态的变化,本文使用曲率工具提取了研究区的平面曲率和剖面曲率,并采用自然断点法划分为 6 个等级;⑥断层对滑坡发育的影响体现在断层活动对周围岩土体结构的破坏上,距道路距离表示道路修建对边坡岩土体原有地质结构的破坏,水系与滑坡发育的关系在于河流的侵蚀冲刷作用对堤岸岩土体的扰动破坏,本文根据滑坡的空间分布,将距断层距离划分为 11 个区间,将距道路距离、距水系距

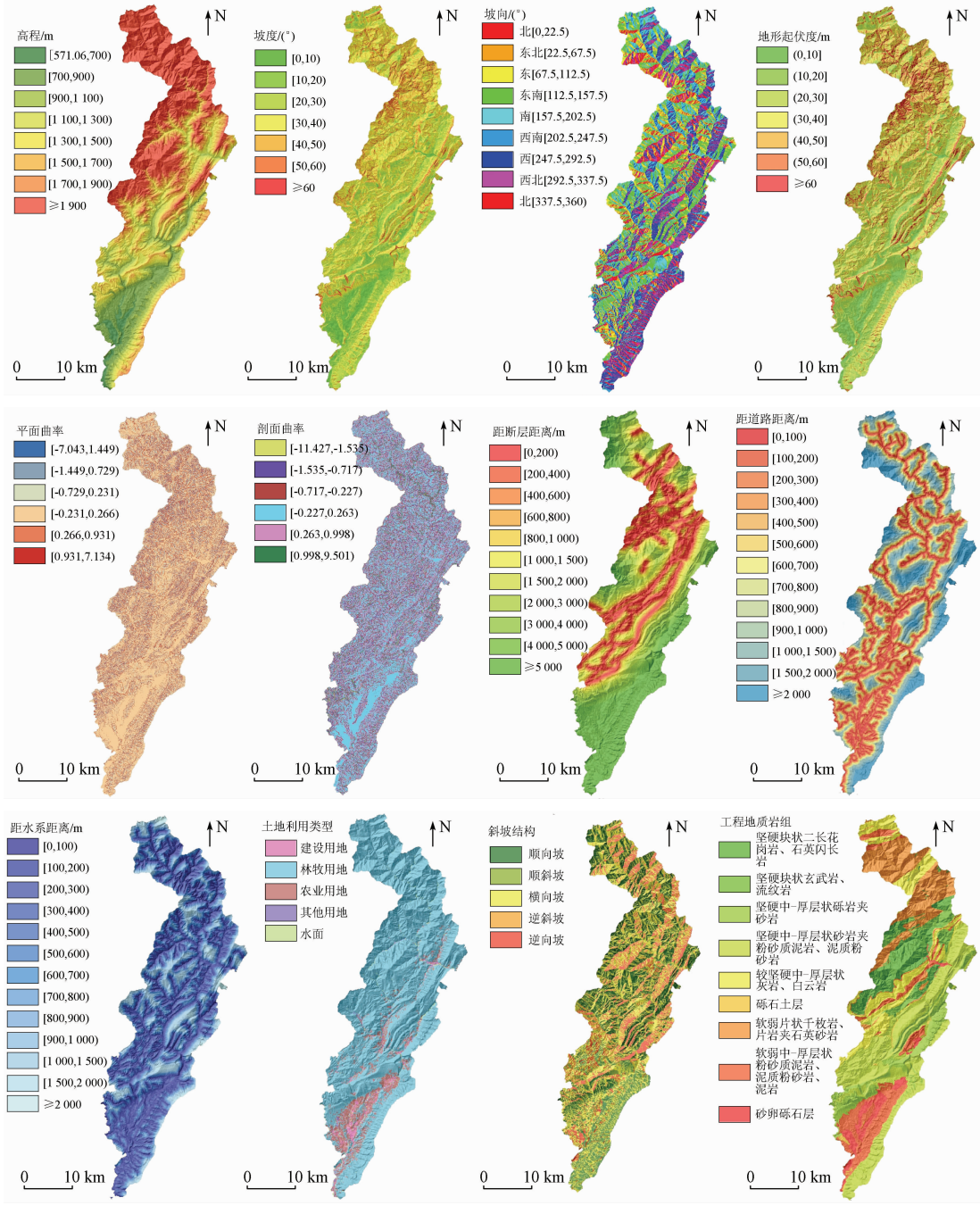

图 2　滑坡影响因素

Fig. 2　Influencing factors of landslides

离划分为 13 个区间；⑦不同的土地利用类型表示区域内人类活动的强弱和植被覆盖率的大小，根据各地块的土地用途划分为建设用地、林牧用地、农业用地、其他用地及水面；⑧斜坡结构表示岩土体岩层倾向与斜坡坡向的夹角关系，根据夹角的大小划分为 5 种斜坡类型；⑨工程地质岩组决定了斜坡的物质组成和工程岩土性质，岩组的岩性、力学性质、水理性质、岩体结构构造直接影响斜坡的变形破坏强度和应力分布，本文将研究区划分为 9 种岩组类型。

2 研究方法

2.1 信息量模型

信息量模型是一种基于计算滑坡影响因素与历史灾害点之间数值关系的定量模型，计算得出的信息量值体现了某种影响因素子区间对于滑坡是否发生的贡献度。信息量模型的计算公式为

$$I_{A_j-B} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \quad (j = 1,2,3,4.....n)。 \quad (1)$$

式中：I_{A_j-B}表示在滑坡影响因素 A 的子区间 j 中滑坡灾害 B 对应的信息量值；N_j表示在滑坡影响因素 A 的子区间 j 中滑坡灾害 B 的分布的数量；N 表示滑坡灾害 B 的总数量；S_j表示滑坡影响因素 A 的子区间 j 对应的面积，km^2；S 表示研究区的总面积，km^2。

当 $I_{A_j-B}>0$ 时，表示滑坡影响因素 A 的子区间 j 与滑坡灾害发育呈正相关性，滑坡灾害发生的可能性较大，即此状态有利于地质灾害的发生；当 $I_{A_j-B}<0$ 时，表示滑坡影响因素 A 的子区间 j 与滑坡灾害发育呈负相关性，不利于滑坡灾害的发生；当 $I_{A_j-B}=0$ 时，表示滑坡影响因素 A 的子区间 j 对于滑坡灾害的发生不提供任何信息。

2.2 地理探测器

地理探测器是基于空间分层异质性原理探测研究对象于空间上的差异性表现，并分析其驱动因素的统计学方法[14]。滑坡灾害作为多种因素综合作用的产物，如果某个滑坡影响因素对滑坡发育有重要的作用，那么滑坡灾害和影响因素的空间分布应该有相似性。为探究影响因素对滑坡灾害发育的贡献率、影响因素子区间滑坡发生率的变化以及两种因素共同作用时较单一因素对滑坡发育的影响，本文选择了地理探测器的因子探测模块、风险探测模块和交互作用探测模块。

(1)因子探测。探测自变量(滑坡影响因素)对因变量(滑坡灾害发育)的解释力，即滑坡影响因素对滑坡灾害发育作用和影响的程度，以 q 值量化滑坡与影响因素之间的关系，表示影响因素对滑坡灾害发育有 $100\times q\%$ 的贡献率，公式为

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

式中：q 表示影响因素对滑坡灾害发育的贡献率，%；N 与 σ^2 表示样本量和方差；N_h与 σ_h^2 表示 h 层的样本量和方差。

(2)风险探测。计算因变量在影响因素子区间的均值，表示滑坡灾害在子区间的发生率。

(3)交互作用探测。评估两种不同的影响因素交互作用时对滑坡灾害发育的影响，判断依据如表 1 所示。

表 1 影响因素交互作用判断依据

Tab. 1 Interaction judgment basis of influencing factors

判断依据	交互作用
$q(X_1\cap X_2)<\min[q(X_1),q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1),q(X_2)]<q(X_1\cap X_2)<\max[q(X_1),q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1\cap X_2)>\max[q(X_1),q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1\cap X_2)=q(X_1)+q(X_2)$	独立
$q(X_1\cap X_2)>q(X_1)+q(X_2)$	非线性增强

注：X_1、X_2表示不同影响因素。

3 影响因素空间分异性

3.1 滑坡空间分布规律

基于 ArcGIS 对 12 种影响因素分级，统计子区间的滑坡点分布规律，利用信息量模型和地理探测器风险探测模块分别计算子区间的信息量值和滑坡发生率，可视化结果见图 3。滑坡灾害发育的成因复杂，在影响因素内部表现出较为明显的空间分异性。

研究区内滑坡主要发育于高程较低([571,1 300) m)、坡度较缓([0°,30°))、地形起伏度较低([0,30) m)、地表弯曲程度较小(平面曲率第四区间,剖面曲率第四、第五区间)和东南、西南、西、西北坡向的区域;在距断层距离因素中,滑坡主要发育于[0,600) m 区间内;在距道路距离因素中,滑坡主要发育于[0 ~ 300) m 区间内;在距水系距离因素中,滑坡主要发育于[0 ~ 300) m 区间内;在

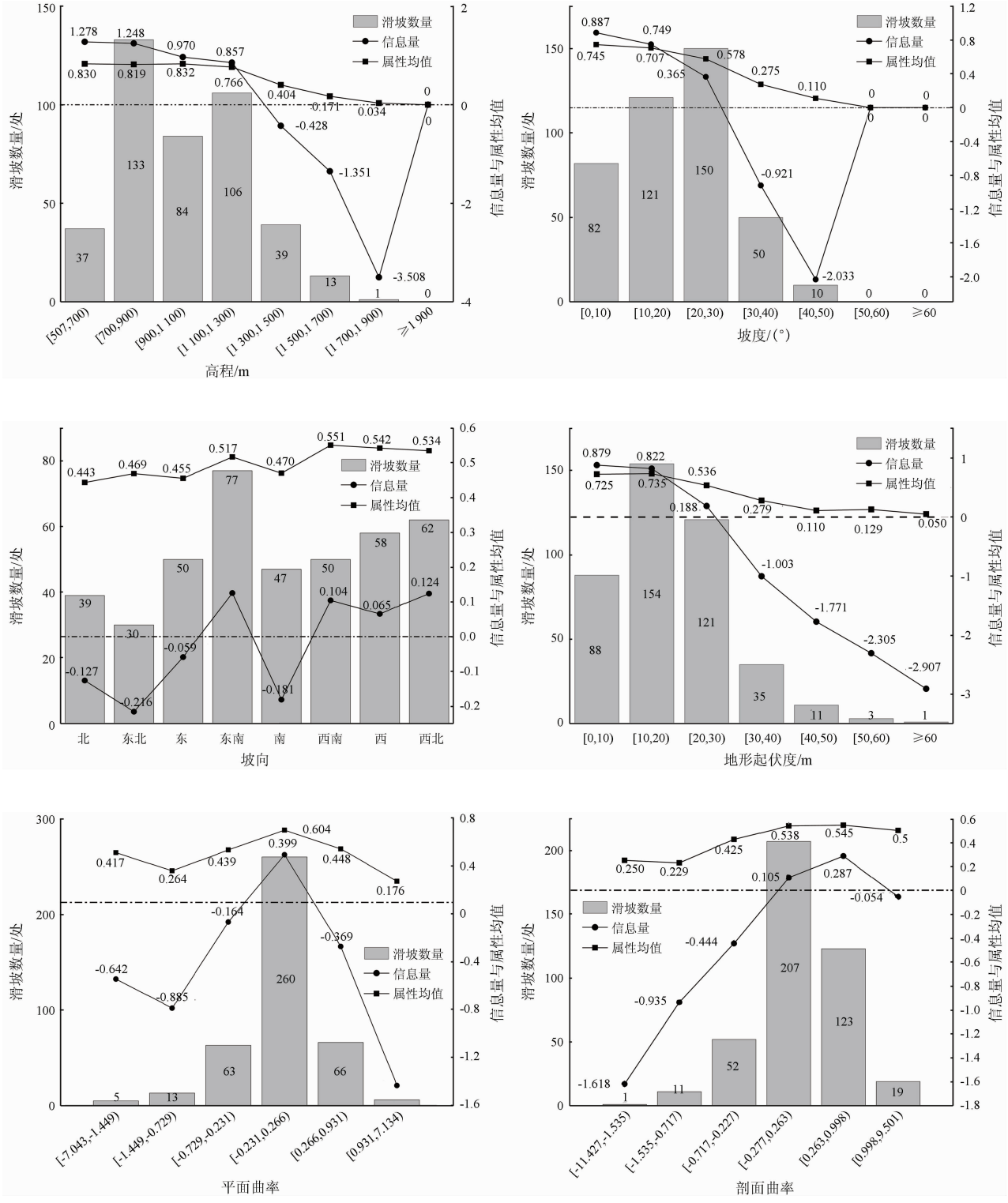

图 3 – 1　研究区滑坡空间分布规律统计

Fig. 3 – 1　Statistics on the spatial distribution of landslides in the study area

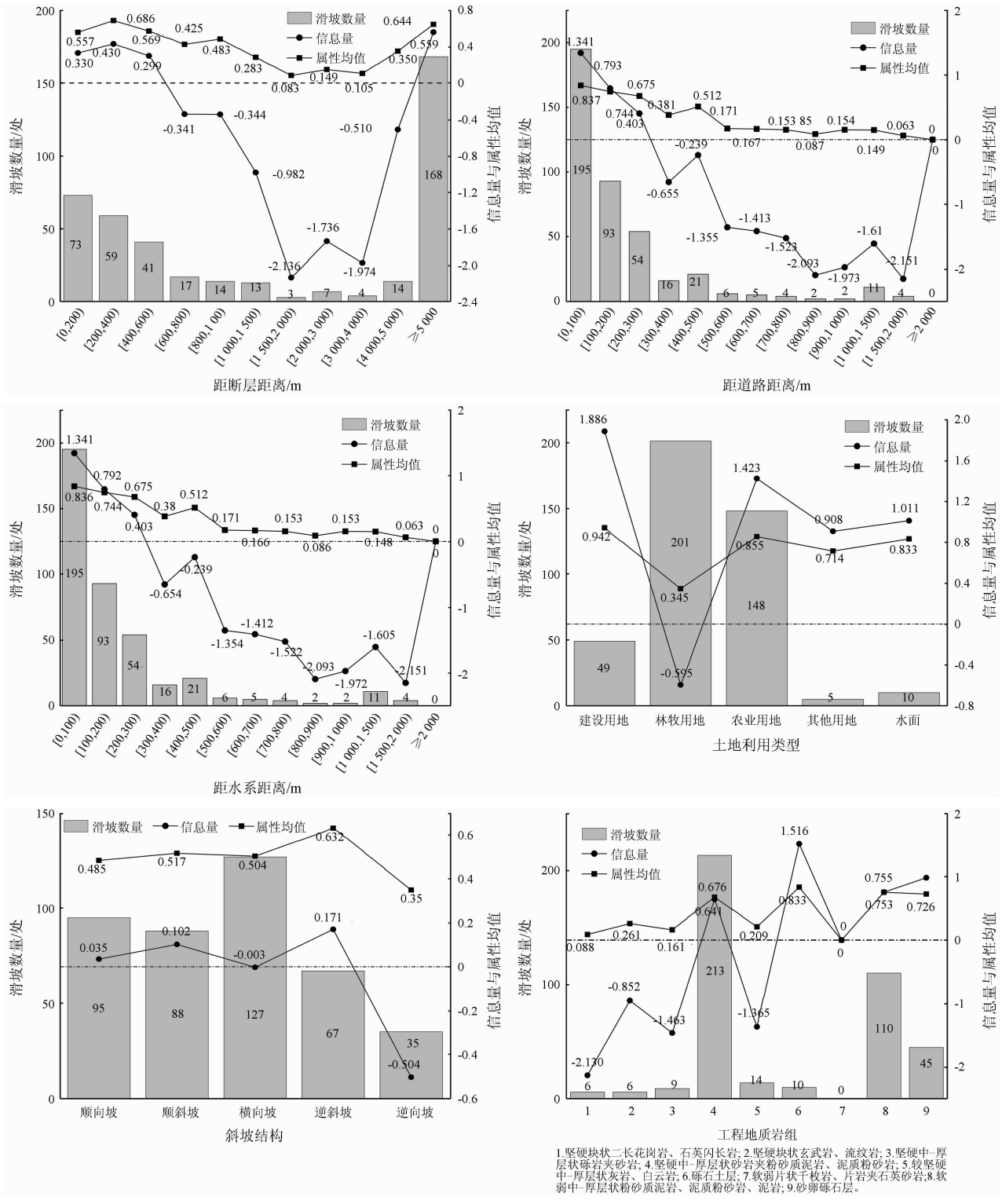

图 3 – 2　研究区滑坡空间分布规律统计

Fig. 3 – 2　Statistics on the spatial distribution of landslides in the study area

土地利用类型因素中,滑坡主要发育于建设用地和农业用地; 在工程地质岩组因素中,滑坡主要发育于泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、砂岩夹粉砂质泥岩为主的软弱沉积岩(岩组 4 与岩组 8)以及以砾石土层、砂卵砾石层为主的第四系堆积物中(岩组 6 与岩组 9); 在斜坡结构因素中,滑坡主要发育于顺向坡、顺斜坡和逆斜坡中,这些区域信息量值均大于 0,滑坡发生率较高,有利于滑坡的发生。

滑坡分布规律在连续性影响因素中呈现不同的变化趋势。在高程、坡度、地形起伏度因素中,滑坡主要分布于高程较低、坡度较缓、地形起伏小的区域,且滑坡数量、信息量值、滑坡发生率随高程、坡度、地形起伏度增加,总体呈减小趋势; 在平面曲率和剖面曲率因素中,滑坡数量、信息量值、滑坡发生率呈近似正态分布,峰值位于曲率绝对值接近于 0 的位置,随曲率绝对值增大而减小; 在距断层距离、距道路距离、距水系距离因素中,滑坡主要分布于距离断层、道路、水系较近区域,随着距离的增加滑坡数量、信息量值、滑坡发生率减小,距断层距离大于 5 000 m 的区间内,滑坡数量和滑坡发生率极高,此区间是数据与数理统计模型定量评价的异常值,与断层作用无关,不参与断层作用力的讨论。

3.2　贡献率分析

基于地理探测器因子探测模块分析影响因素与滑坡发育的关系,q 值表示影响因素对滑坡发育的贡献率,p 值表示影响因素与滑坡发育的显著性,以 5% 为置信区间(表 2)。

表 2　因子探测结果

Tab. 2　Factor detection results

序号	影响因素	贡献率/%	显著性
X1	高程	45.25	0
X2	距道路距离	40.69	0
X3	工程地质岩组	32.86	0
X4	土地利用类型	23.05	0
X5	距水系距离	22.91	0
X6	地形起伏度	21.71	0
X7	坡度	20.44	0
X8	距断层距离	14.72	0
X9	平面曲率	5.82	0
X10	剖面曲率	2.65	0
X11	斜坡结构	2.03	0.003
X12	坡向	0.72	0.656

因子探测结果表明,高程、距道路距离、工程地质岩组、土地利用类型、距水系距离、地形起伏度、坡度、距断层距离、平面曲率、剖面曲率、斜坡结构的 p 值均小于 0.05,呈高显著性,表示影响因素与滑坡发育具有统计学意义; 坡向因素的 p 值远大于 0.05,不具有统计学意义。在分析的 12 个影响因素中,高程、距道路距离、工程地质岩组的贡献率均大于 30%,对滑坡发育的解释力最强; 坡度、土地利用类型、距水系距离、地形起伏度、距断层距离的贡献率均大于 15%,对滑坡发育具有较强的解释力; 平面曲率、剖面曲率、斜坡结构、坡向的贡献率均小于 10%,对滑坡发育的解释力较弱。

3.3　交互作用分析

通过交互探测模块计算两种不同影响因素共同作用对滑坡发育的贡献率,并与单一因素的贡献率对比,分析两种影响因素的交互作用(表 3),交互作用探测结果中斜对角线数据表示单因子贡献率,下三角矩阵表示影响因素交互作用贡献率,上三角矩阵表示交互作用结果。滑坡灾害的发育是在多因素共同作用下的非线性动力学过程,交互作用分析表明研究区内两两因素交互作用对滑坡发育均呈双因子增强或非线性增强作用,表明两种因素共同作用时对滑坡的发育具有增强作用,其中以高程与距断层距离、距道路距离、距水系距离、工程地质岩组,距道路距离与坡度、地形起伏度、距断层距离、距水系距离、工程地质岩组交互作用的贡献率均大于 50%,表明在研究区内的滑坡发育中,高程和距道路距离因素起到了非常重要的作用。

表 3　交互作用探测结果

Tab. 3　Interaction detection results

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
X1	0.453	N	N	N	N	N	N	Y	N	Y	Y	Y
X2	0.658	0.407	N	N	N	N	N	Y	N	Y	Y	Y
X3	0.551	0.625	0.329	N	N	N	N	N	N	Y	N	Y
X4	0.499	0.489	0.421	0.231	N	N	N	N	N	N	Y	Y
X5	0.536	0.516	0.472	0.360	0.229	N	N	Y	Y	Y	Y	Y
X6	0.494	0.526	0.414	0.338	0.388	0.217	N	N	N	Y	Y	Y
X7	0.491	0.513	0.403	0.334	0.374	0.239	0.204	N	N	Y	Y	Y
X8	0.625	0.556	0.471	0.334	0.391	0.345	0.332	0.147	Y	Y	Y	Y
X9	0.475	0.466	0.362	0.257	0.302	0.258	0.252	0.226	0.058	Y	Y	Y
X10	0.486	0.452	0.371	0.245	0.273	0.248	0.235	0.205	0.103	0.027	Y	Y
X11	0.482	0.459	0.350	0.256	0.285	0.250	0.234	0.208	0.095	0.065	0.020	Y
X12	0.499	0.488	0.382	0.252	0.307	0.256	0.244	0.219	0.089	0.080	0.104	0.007

注: N. 双因子增强; Y. 非线性增强。

3.4 易发性评价

基于研究区所提取的静态地质环境滑坡发育影响因素，使用 ArcGIS 对影响因素贡献率和分级子区间信息量值加权叠加，预测研究区内滑坡的易发性。筛除贡献率较低的 X9 ~ X12 这 4 种影响因素，使用 X1 ~ X8 生成研究区滑坡易发性评价图，采用自然断点法将滑坡易发性划分为低易发区、中易发区、高易发区、极高易发区 4 个易发分区(图 4)，使用核密度统计对研究区内滑坡灾害点进行密度统计(图 5)，分析研究区内滑坡灾害点的空间聚集性。

研究区内极高易发区面积约 193 km^2，高易发区面积约 314 km^2，中易发区面积约 457 km^2，低易发区面积约 217 km^2，分区面积占比分别为 16%、26%、39% 和 19%。极高和高易发区主要沿山谷和河流走势线分布，集中于峡谷和河流沟谷地貌，而中低易发区主要分布于较高海拔山区。易发分区的分布特征表明海拔较低、受人类活动影响较大、河流动力较强的地区极易发生滑坡，与滑坡影响因素的空间分异特征高度一致(图 5)。核密度统计图中核密度高值区与易发性评价图中的极高易发区和高易发区分布基本相同，主要分布于南部丘陵区和中低山峡谷区，表示研究区内滑坡灾害点和易发分区于空间上有较高的聚集性和差异性。

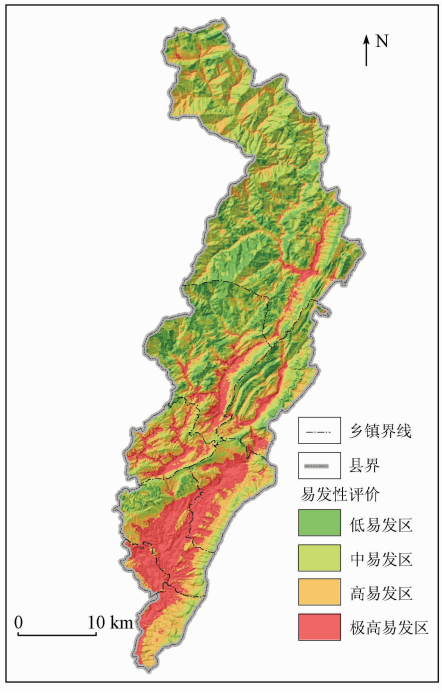

图 4 研究区滑坡易发性评价

Fig. 4 Landslide susceptibility evaluation of the study area

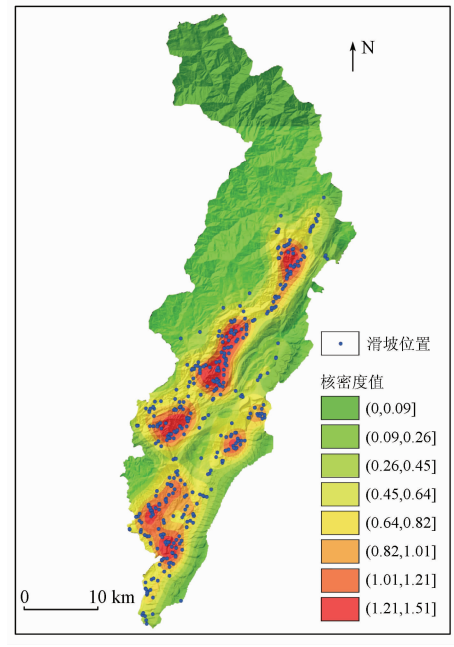

图 5 研究区核密度统计

Fig. 5 Kernel density statistics of the study area

使用 ROC 曲线检验模型准确性(图 6)，模型 AUC 值为 0.910，表明选择的模型具有较高的精度。

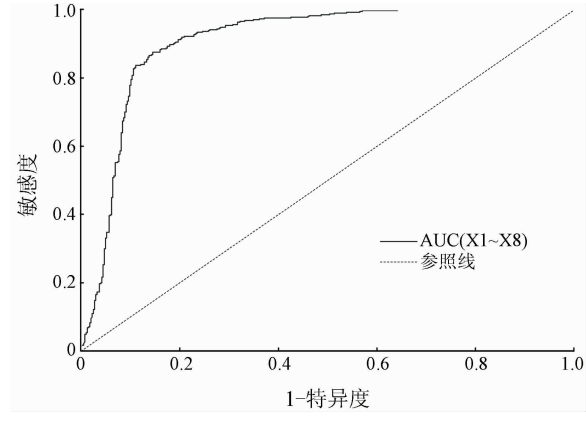

图 6 易发性评价图 ROC 曲线

Fig. 6 ROC curve of susceptibility evaluation chart

基于滑坡的空间分布规律、影响因素贡献率与交互作用以及滑坡易发性评价结果，除斜坡岩土体的工程地质岩组性质和水文地质条件决定了滑坡发育的原始地质条件和水文地质作用，人类工程活动也对滑坡发育有较大的影响。研究区滑坡发育主要受高程、距道路距离、工程地质岩组因素控制，此外与土地利用类型、距水系距离、地形起伏度、坡度、距断层距离因素也有较高相关性。工程地质岩组决定了岩土体的物质组成，研究区内滑坡主要发育于粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥岩等软弱沉积岩以及砂卵砾石土层的第四系堆积物。距断层、道

路及水系的距离与滑坡发育具有明显的空间衰变关系,随距离的增加,断层作用力、人类工程影响、水系侵蚀作用力逐渐减小。高程、坡度、地形起伏度与滑坡发育关系呈现靠近小值的偏峰分布,曲率与滑坡发育关系呈近似正态分布,表明滑坡主要发生于地形变化较小、地貌较为平缓的人类高聚集区,地形地貌因素对于斜坡岩土体的力学性质、聚汇水性、边坡应力分布等有重要影响,而高程、坡度、地形起伏度的偏峰分布和曲率的正态分布对于人类活动影响滑坡发育有明显的指向意义。滑坡高发于建设用地和农业用地,表明人类活动导致的岩土体失稳和植被破坏造成了滑坡灾害的发生。滑坡的极高易发区和高易发区主要集中于中低山峡谷和丘陵地貌,并沿山谷和河流走势线分布,此区域人类活动较为频繁,道路修建较多;中易发区和低易发区主要分布于海拔较高的山区,此区域人类活动较少。影响因素的空间分异规律和易发分区的分布特征表明研究区内人类工程活动对滑坡发育影响较大,合理开展工程活动并降低人为因素对自然环境的影响将极大地减少滑坡灾害的发生。

4　结论

本文基于地理探测器和信息量模型分析了芦山县滑坡的空间分布规律、影响因素贡献率以及影响因素交互作用,使用 GIS 加权叠加生成了滑坡易发性评价图,总结了芦山县滑坡发育规律和影响因素的空间分异性,分析了静态地质环境下的滑坡易发性,得到以下结论:

(1)区内滑坡主要集中于高程较低([571,1300) m)、距道路距离较近([0,300) m)、距水系距离较近([0,300) m)、地形起伏度较小([0,30) m)、坡度较缓([0°,30°))、距断层距离较近([0,600) m)的地区。岩土类型以粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥岩等软弱沉积岩和砂卵砾石土层的第四系堆积物为主,土地利用类型以建设用地、农业用地等为主。

(2)滑坡发育主要受高程、距道路距离及工程地质岩组因素控制,此外与土地利用类型、距水系距离、地形起伏度、坡度、距断层距离因素也有较高相关性,平面曲率、剖面曲率、斜坡结构、坡向因素贡献率极低。

(3)两种不同影响因素对滑坡发育的作用较单一因素而言均呈现双因子或非线性增强,以高程和距道路距离因素与其他因素的交互作用最为强烈。

(4)研究区内极高易发区面积约 193 km^2,高易发区面积约 314 km^2,中易发区面积约 457 km^2,低易发区面积约 217 km^2,分区面积占比分别为 16%、26%、39% 和 19%,高易发区和极高易发区主要分布于东南部中低山峡谷区、丘陵区和河流沟谷地貌。

参考文献(References):

[1] Das S,Sarkar S,Kanungo D P. GIS - based landslide susceptibility zonation mapping using the analytic hierarchy process (AHP) method in parts of Kalimpong Region of Darjeeling Himalaya[J]. Environ Monitor Assessm,2022,194(3):234.

[2] Liang S Z X,Chen D,Li D H,et al. Spatial and temporal distribution of geologic hazards in Shaanxi Province[J]. Remote Sens,2021,13(21):4259.

[3] Zou Y,Qi S W,Guo S F,et al. Factors controlling the spatial distribution of coseismic landslides triggered by the MW 6.1 Ludian earthquake in China[J]. Eng Geol,2022,296:106477.

[4] Hu Q,Zhou Y,Wang S X,et al. Fractal - based spatial distribution analysis of geological hazards and measurement of spatial association with hazard - related predisposing factors[C]//International Archives of the Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences,Volume XLII - 3/W10,2020 International Conference on Geomatics in the Big Data Era. Guilin:IPRS,2020:125 - 131.

[5] Nath R R,Pareek N,Lal Sharma M. Implications and inclusion of size - dependent scenario earthquakes on landslide hazard zonation:A case study of the Indian Himalayas[J]. CATENA,2022,212:106027.

[6] Rabby Y W,Li Y K,Abedin J,et al. Impact of land use/land cover change on landslide susceptibility in rangamati municipality of rangamati district,Bangladesh[J]. ISPRS Int J Geo - Inform,2022,11(2):89.

[7] Xiao T,Yu L B,Tian W M,et al. Reducing local correlations among causal factor classifications as a strategy to improve landslide susceptibility mapping[J]. Front Earth Sci,2021,9:781674.

[8] Li J Y,Wang W D,Li Y G,et al. Spatiotemporal landslide susceptibility mapping incorporating the effects of heavy rainfall:A case study of the heavy rainfall in August 2021 in Kitakyushu,Fukuoka,Japan[J]. Water,2021,13(22):3312.

[9] 许冲,戴福初,姚鑫,等. 基于 GIS 的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2972 - 2981.
Xu C,Dai F C,Yao X,et al. GIS based certainty factor analysis of landslide triggering factors in Wenchuan earthquake[J]. Chin J Rock Mech Eng,2010,29(S1):2972 - 2981.

[10] 王新胜,滕德贵,谢伟,等. 山地城市滑坡灾害空间分布特征及影响因素分析[J]. 重庆大学学报,2020,43(8):87 - 96.

Wang X S, Teng D G, Xie W, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of landslide disasters in mountain cities[J]. J Chongqing Univ, 2020, 43(8): 87 – 96.

[11] 杨忠平, 李绪勇, 赵茜, 等. 关键影响因子作用下三峡库区堆积层滑坡分布规律及变形破坏响应特征[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 617 – 627.
Yang Z P, Li X Y, Zhao Q, et al. Key influencing factors based distribution regularity and deformation and failure response of colluvial land – slides in Three Gorges Reservoir area[J]. J Eng Geol, 2021, 29(3): 617 – 627.

[12] 唐尧, 马松, 王立娟, 等. 高分辨率遥感技术在地质灾害调查与成灾规律分析中的应用——以攀西米易地区为例[J]. 中国地质调查, 2022, 9(3): 96 – 103.
Tang Y, Ma S, Wang L J, et al. Application of high resolution remote sensing technology in geological disaster investigation and disaster law analysis: A case study of Panxi Miyi area[J]. Geol Survey China, 2022, 9(3): 96 – 103.

[13] 董毅兵, 郁文, 张仲福. 基于 GIS 的地质灾害易发性分区评价——以甘肃省会宁县为例[J]. 中国地质调查, 2020, 7(3): 89 – 95.
Dong Y B, Yu W, Zhang Z F. Susceptibility zoning of geological disasters based on GIS: A case of Huining area in Gansu Province[J]. Geol Survey China, 2020, 7(3): 89 – 95.

[14] 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 J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geogr Sin, 2017, 72(1): 116 – 134.

[15] 裴向军, 黄润秋. "4 · 20"芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 257 – 263.
Pei X J, Huang R Q. Analysis of characteristics of geological hazards by "4 · 20" Lushan earthquake in Sichuan, China[J]. J Chengdu Univ Technol: Sci Technol Ed, 2013, 40(3): 257 – 263.

[16] 许冲, 肖建章. 2013 年芦山地震滑坡空间分布分析——以太平镇东北方向的一个典型矩形区为例[J]. 地震地质, 2013, 35(2): 436 – 451.
Xu C, Xiao J Z. Spatial analysis of landslides triggered by the 2013 MS7.0 Lushan earthquake: A case study of a typical rectangle area in the northeast of Taiping town[J]. Earthq Geol, 2013, 35(2): 436 – 451.

[17] 丁明涛, 庙成. 基于 GIS 的芦山地震灾区滑坡灾害风险评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 81 – 90.
Ding M T, Miao C. GIS – based risk assessment of landslide hazards in Lushan earthquake – stricken areas[J]. J Nat Dis, 2014, 23(4): 81 – 90.

[18] 胡凯衡, 丁明涛. 滑坡泥石流风险评估框架体系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 26 – 30.
Hu K H, Ding M T. Discussion on framework of landslide and debris – flow risk assessments[J]. Chin J Geol Hazard Control, 2013, 24(2): 26 – 30.

[19] 王骏, 丁明涛, 庙成, 等. 基于 GIS 和 AHP 的芦山地震灾区泥石流危险性评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1580 – 1587.
Wang J, Ding M T, Miao C, et al. Hazard assessment of debris flow based on GIS and AHP in Lushan earthquake disaster area[J]. Resour Environ Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1580 – 1587.

[20] 黄涛, 丁明涛, 蒋林宏, 等. 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[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2019, 44(9): 45 – 51.
Huang T, Ding M T, Jiang L H, et al. Relative importance analysis of debris flow influence factors based on geographical detectors: A case study in the upper reaches of Min River[J]. J Southwest China Normal Univ: Nat Sci Ed, 2019, 44(9): 45 – 51.

[21] 兰剑, 陈晓利. 2008 年 MS8.0 汶川地震诱发滑坡灾害在映秀地区的演化特征[J]. 地震地质, 2020, 42(1): 125 – 146.
Lan J, Chen X L. Evolution characteristics of landslides triggered by 2008 MS8.0 Wenchuan earthquake in Yingxiu area[J]. Earthq Geol, 2020, 42(1): 125 – 146.

[22] Pardeshi S D, Autade S E, Pardeshi S S. Landslide hazard assessment: Recent trends and techniques[J]. SpringerPlus, 2013, 2(1): 523.

[23] Psomiadis E, Papazachariou A, Soulis K X, et al. Landslide mapping and susceptibility assessment using geospatial analysis and earth observation data[J]. Land, 2020, 9(5): 133.

[24] He Q, Wang M, Liu K. Rapidly assessing earthquake – induced landslide susceptibility on a global scale using random forest[J]. Geomorphology, 2021, 391: 107889.

[25] Williams F, McColl S, Fuller I, et al. Intersection of fluvial incision and weak geologic structures cause divergence from a universal threshold slope model of landslide occurrence[J]. Geomorphology, 2021, 389: 107795.

[26] He Q F, Shahabi H, Shirzadi A, et al. Landslide spatial modelling using novel bivariate statistical based Na? ve Bayes, RBF Classifier, and RBF Network machine learning algorithms[J]. Sci Total Environ, 2019, 663: 1 – 15.

[27] Bordoni M, Galanti Y, Bartelletti C, et al. The influence of the inventory on the determination of the rainfall – induced shallow landslides susceptibility using generalized additive models[J]. CATENA, 2020, 193: 104630.

[28] Zhu A X, Miao Y M, Wang R X, et al. A comparative study of an expert knowledge – based model and two data – driven models for landslide susceptibility mapping[J]. CATENA, 2018, 166: 317 – 327.

[29] Schlögel R, Marchesini I, Alvioli M, et al. Optimizing landslide susceptibility zonation: Effects of DEM spatial resolution and slope unit delineation on logistic regression models[J]. Geomorphology, 2018, 301: 10 – 20.

[30] Nguyen B Q V, Lee S R, Kim Y T. Spatial probability assessment of landslide considering increases in pore – water pressure during rainfall and earthquakes: Case studies at Atsuma and Mt. Umyeon[J]. CATENA, 2019, 187: 104317.

[31] Panchal S, Shrivastava At K. Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India[J]. Ain Shams Eng J, 2022, 13(3): 101626.

[32] Chahal P, Rana N, Ray P K C, et al. Identification of landslide – prone zones in the geomorphically and climatically sensitive Mandakini valley, (central Himalaya), for disaster governance u-

sing the Weights of Evidence method[J]. Geomorphology,2017,284:41 - 52.

[33] Yi Y N, Zhang Z J, Zhang W C, et al. Landslide susceptibility mapping using multiscale sampling strategy and convolutional neural network: A case study in Jiuzhaigou region[J]. CATENA, 2020,195:104851.

Spatial heterogeneity of influencing factors of landslide disasters in Lushan County

ZHOU Yi , DING Mingtao , HUANG Tao, HE Yufeng

(*School of Earth Science and Environmental Engineering*, *Southwest Jiaotong University*, *Sichuan Chengdu* 611756, *China*)

Abstract: The geological environment and ecological structure are relatively fragile in Lushan County due to the frequent earthquakes in recent years. The high - frequency landslide disasters restrict the infrastructure construction, economic development, and threaten the safety of people's lives and properties. The analysis of spatial heterogeneity of influencing factors of landslide disasters in Lushan County under static geological environment can provide basic data for land and space planning in the region and data support for landslide disasters prediction and prevention. The relationship between landslide development and 12 influencing factors, such as elevation and slope, were analyzed by information model and geographic detector, and the law of landslide development were summarized. Besides, the spatial heterogeneity characteristics of influencing factors were also studied, and a landslide - prone Sexual Evaluation Chart was generated using GIS weighted superposition. The results show that ① Landslides are mainly concentrated in areas with low elevations ([571,1 300) m), close to the road ([0,300) m) and water system ([0,300) m), small topographic relief ([0,30) m), gentle slope ([0°,30°)) and close to fault ([0,600) m). The landslides occurred in sedimentary rocks of silty mudstone, argillaceous siltstone, mudstone and Quaternary sedimentary, and lands for construction and agriculture. ② Landslide development is mainly controlled by factors such as elevation, distance from road and engineering geological rock group. And the land use type, distance from water system, terrain relief, slope, and distance from fault also have high contribution rates to the landslide. ③ The effects of two different influencing factors on landslide development show two - factors or nonlinear character compared with a single factor. The interaction between the distance from the road, elevation and other factors is the strongest. ④ The landslide - prone areas and extremely high landslide - prone areas are mainly distributed in the middle and low mountain canyons, hilly areas and river valley landforms in the southeastern areas.

Keywords: landslide; influencing factors; spatial differentiation; geographic detector

(责任编辑: 魏昊明)