

基于 GIS 的华宁县滑坡灾害影响因子分析及 易发性评价

吴常润, 赵冬梅, 刘澄静, 角媛梅, 冯志娟, 刘敬

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

摘 要:为了明晰区域滑坡灾害影响因子及其易发性,为滑坡地质灾害的防治提供借鉴。以云南省华宁县为研究对象,利用 GIS 空间分析技术,对华宁县滑坡空间分布及诱发因子进行了分析研究,依据区域地质灾害详细调查资料,建立 GIS 灾害数据库的同时选取海拔、坡度、坡向、距水系、道路、断层距离、岩性 7 个诱发因子,利用统计指数对滑坡在每个因子各类别中的占比进行了权重分析,最终确定滑坡灾害易发性分区并阐述其空间分布特征。结果表明:(1)在滑坡灾害分布特征上,具有空间集中分布特征,灾害点密度以中部地区最大,受灾影响人数最大的主要分布在海拔较低的宁州街道和通红甸乡。(2)从诱发因子上看,滑坡灾害大多分布在海拔 1 600~2 300 m(占 76.06%),坡度 10°~30°(占 71.83%),坡向为 E,NE,NW,N 等方向上(占 71.82%),距离河流、断层和道路越近,发生滑坡的可能性越大。(3)在滑坡灾害易发性上,高易发区主要分布在宁州街道、青龙镇、华溪镇;中易发区主要分布在青龙镇东北部、宁州街道西南部、通红甸彝族苗族乡中部和盘溪东部;低易发区主要分布在通红甸彝族苗族乡、盘溪镇。华宁县滑坡灾害呈现出东少西多,南少北多的特征,未来华宁县应重点关注中部和西部区域的滑坡灾害预防。

关键词:滑坡; 易发性分区; 诱发因子分析; 华宁县; GIS

中图分类号:P642.22; X43

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0212-07

GIS-Based Analysis on Impact Factors and Susceptibility Evaluation of Landslide Hazard in Huaning County

WU Changrun, ZHAO Dongmei, LIU Chengjing, JIAO Yuanmei, FENG Zhijuan, LIU Jing

(School of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: The aim of this study is to analyze the impact factors and susceptibility of regional landslide hazards, provide the reference for the prevention and control of landslide hazards. Taking Huaning County of Yunnan Province as the research object, we used a spatial analysis technology of geographic information system (GIS) to analyze and study the spatial distribution and inducing factors of landslides. According to the detailed investigation data of geological hazards, the GIS disaster database was established, and seven inducing factors, such as elevation, slope, slope direction, distance from water system, road, fault and lithology, were selected at the same time. The statistical index was used to analyze the proportion of landslides in each category of each factor, and the landslide susceptibility zone and elaborates its spatial distribution characteristics were finally determined. The results show that: (1) in terms of the distribution characteristics of landslide hazards, in space, the landslide hazards have the centralized distribution characteristics, the density of disaster points is the largest in the central region, and the largest number of people affected by landslide hazards mainly distribute in Ningzhou streets and Tonghongdian Township at lower altitudes; (2) from the point of view of inducing factors, most of the landslide disasters are located at the elevations of 1 600~2 300 m (accounting for 76.06%), slope of 10°~30° (accounting for 71.83%), slope direction of east, north-east, northwest, north (accounting for 71.82%); the closer to rivers faults and roads is, the greater the

收稿日期:2019-01-16

修回日期:2019-02-25

资助项目:国家自然科学基金(41761115,41271203)

第一作者:吴常润(1994—),女,云南昭通人,硕士研究生,研究方向为区域分析与土地规划。E-mail:3255006965@qq.com

通信作者:角媛梅(1972—),女,云南曲靖人,博士,教授,主要从事景观生态研究。E-mail:ymjiao@sina.com

possibility of landslide occurrence is; (3) for the susceptibility of landslide disasters, the high susceptibility areas mainly distribute in Ningzhou Street, Qinglong Town and Huaxi Town; the middle susceptibility areas mainly distribute in the northeast of Qinglong Town, the southwest of Ningzhou Street, the central part of Tonghongdian Yi Miao Township and the eastern part of Panxi; the low susceptibility areas mainly distribute in Tonghongdian Yi Miao Township and Panxi Town. The results indicate that the landslide disasters are characterized as fewer occurrences in the east, more occurrences in the west, fewer occurrences in the South and more occurrences in the north. In the future, prevention of landslide disasters should be focused on the central and western regions of Huaning County.

Keywords: landslide; susceptibility zone; inducing factor analysis; Huaning County; GIS

全球范围内凡是有人类居住和工程活动的山岭地区,几乎都有滑坡灾害发生,滑坡已成为各灾种中频度最高、损失最大的地质灾害类型,中国尤其云南省是一个滑坡灾害极为频繁的地区^[1]。因此,近年来对滑坡灾害的研究越来越受重视。目前我国滑坡灾害研究主要集中在滑坡易发性评价^[2-6]、风险性评价^[7-9]、敏感性分析^[10]、滑坡灾害预测^[11]、影响因子研究^[13-15]等方面,并已获得丰硕成果。如在易发性评价方面,杨根云^[3]、史展^[9]、王志旺^[11]等从不同的模型出发开展滑坡易发风险评价研究和危险性评价以及进行滑坡空间预测评价。在风险评价方面,许英杰^[7]在危险性评价和易损性评价基础之上展开区域滑坡地质灾害风险性评价。在影响因子研究方面,一些学者从影响因子出发研究滑坡与其影响因子的关系及其分布特征。其中,黄发明等^[5]从高程、坡度、剖面曲率、平面曲率、地形起伏度、地层岩性、地质构造、距离河流的距离和归一化植被指数等因子出发开展对影响滑坡发育的环境因子的研究。兰恒星等^[13]利用滑坡确定性系数的方法对研究区进行分析后,从岩性、结构、坡度、高程、断裂等因子出发开展对滑坡因子敏感性分析。王德耀等^[15]从新构造运动与地形地貌、地层岩性、水文、人类活动等因子出发开展对崩塌、滑坡的成因分析。同时,随着地理信息科学的不断成熟和完善,地理信息技术(GIS)被广泛应用于滑坡灾害的危险性区划及计算机制图,特别是基于 GIS 技术的影响因子和滑坡易发性评价逐渐成为滑坡研究领域的热点^[4,16-17]。例如,王亚强^[18]、王萌^[19]等在 GIS 支持下,建立各影响因子图层的空间数据库,对各因子进行分级赋值,然后进行因子叠加分析,完成区划制图及区划研究。整体上可知,GIS 技术是目前开展滑坡等灾害研究有力的工具。但在目前的滑坡研究中,不同学者在考虑因子上各不相同。在因子组合方面,本文加入了坡向和距道路距离,经过实地考察发现这两个因子对研究区来说非常重要。同时,从多重因子出发,考虑到在滑坡灾害研究上基于 GIS 技术分析滑坡灾

害影响因子和滑坡灾害的易发性研究已经比较成熟,所以将多重因子叠加与 GIS 结合展开对华宁县滑坡灾害影响因子分析和易发性评价研究。

华宁县作为全国开放型生态农业示范县和生态文明建设示范县,是云南省最大的柑橘生产基地,自改革开放以来县域经济取得了巨大的发展。但由于全县地处滇中高原湖盆区,地质活动频繁,地质灾害广布,加之城市化进程加快,经济建设和社会发展所引发的各种地质灾害问题开始日益增多,其中滑坡灾害所占比例最大,带来的影响最为广泛。在 2017 年华宁县滑坡灾害统计数据中,受滑坡灾害威胁人数达 16 570 人,对当地人民的生命财产造成了很大影响,这极大地制约了全县经济社会的可持续发展。为切实保护全县生态环境,避免和减轻滑坡灾害给当地人民的生命和财产安全造成损失,促进县域经济与社会全面协调可持续发展,本文利用 GIS 空间分析技术,对华宁县滑坡空间分布及诱发因子进行分析研究,依据区域地质灾害详细调查资料,建立 GIS 灾害数据库的同时选取海拔、坡度、坡向、距水系距离、距道路距离、距断层距离、岩性 7 个诱发因子,利用统计指数对滑坡在每个因子的各类别中的占比进行权重分析,最终确定滑坡灾害易发性分区并阐述其空间分布特征,以期为华宁县的防灾减灾提供借鉴,有效降低滑坡地质灾害造成的人员伤亡和财产损失,并为区域滑坡灾害防治与管理提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

华宁县位于云南省中部偏东南,滇中高原湖盆区南缘,抚仙湖东岸,南盘江西滨。行政区划上属于玉溪市所辖,地理坐标范围是 $23^{\circ}59' - 24^{\circ}34' \text{N}$, $102^{\circ}49' - 103^{\circ}09' \text{E}$,总面积为 $1\,313 \text{ km}^2$ (图 1)。受多次地质构造运动和断块抬升的影响,境内南北向断层和东西向褶皱纵横相切,全境地势呈现出西北高东南低的特点,地形东西狭,南北长,呈南北展布的“两脊两槽”特殊地形,高

山、盆地、河谷相间。研究区海拔 1 019~2 656 m,坡度分布范围较大,在 0°~70°左右;河网密度较大,境内有青龙河流域、龙洞河、曲江和南盘江 4 个流域,在整体上这 4 个流域皆属珠江流域西河水系的范畴;气候属中亚热带半湿润高原季风气候,季节变化小,干湿季节分明,年平均气温 17.7℃,降水量比较充沛,约 600~1 100 mm,年平均降水量为 886.4 mm,气候较湿润,水量充足;区内岩石组成复杂,共划分出碎屑岩、碳酸盐岩、变质岩、岩浆岩、松散土类 5 类岩石。此外研究区由于山多坝少,斜坡陡峭,可耕种土地少,环境容量有限,虽然森林覆盖率较高,但分布不均,在人类活动较多的地区,人口多而耕地少,毁林开荒严重,导致水土流失,引起滑坡、泥石流等灾害频发。

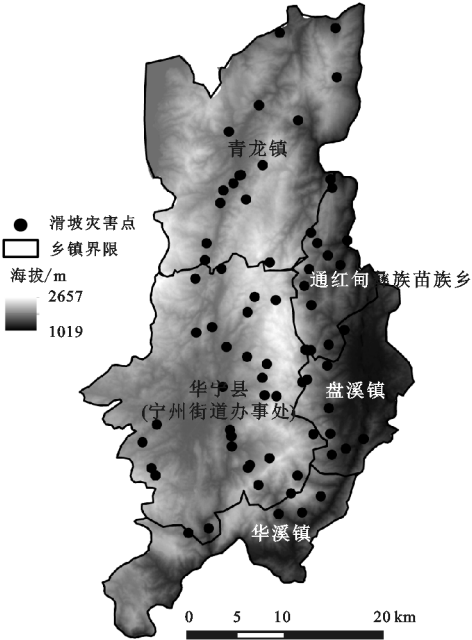


图 1 华宁县的位置与滑坡灾害空间分布

1.2 数据来源与方法

在数据来源上,灾害点数据来源于实地考察和云南省玉溪市华宁县防震减灾局,通过 GPS 工具精确定位各滑坡点的经纬度、海拔高度,将数据库导入 ArcGIS 10.2 软件内完成滑坡空间制图。研究区地形数据来源于地理空间数据云的数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM),分辨率为 30 m×30 m。

在研究方法上,利用软件制图、文献和已有数据等进行综合分析和判断,制图采用 ArcGIS 软件。选取地形、地质、道路距离等 7 个因子叠加滑坡灾害点制图,其中从 DEM 数据中提取了 3 个地形因子,分别为坡度、坡向和水系,其中距水系距离先后利用水文分析模块及欧式距离进行处理得到;地层岩性和断层因子则由云南省华宁县地质局提供的 1:5 万地质灾害

详细调查区域工程地质条件图数字化得出,并通过欧氏距离从中提取断层距离;道路数据由云南省华宁县防震减灾局提供,而后在 GIS 软件平台进行配准栅格化而成,并通过欧氏距离从中提取道路距离。所有栅格图层统一到 WGS_1984_UTM_Zone_48N 坐标,并对各个因子进行重分类,利用统计指数对滑坡在每个因子的各类别中的占比进行权重分析,完成易发性区划。同时在数据分析方面,还借助 DIVA-GIS 软件。

2 结果与分析

2.1 滑坡灾害的分布特征

2.1.1 滑坡灾害点空间分布的总体特征 地质环境不同的区域,滑坡的产生和分布都有较大差异。华宁县的滑坡灾害分布特点受区域地理、地质环境条件的影响,在各区域都有分布,具有明显的地域特点。县内主要地质灾害以滑坡灾害为主,占滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降、不稳定斜坡 5 种类型灾点总数的 80%。研究区所辖 5 个乡镇均有滑坡地质灾害分布,全县滑坡地质灾害点分布平均密度 0.054/100 km²(表 1)。整体上滑坡灾害规模总体以小型为主,在 2017 年华宁县滑坡地质灾害统计中(表 1),共 71 处滑坡灾害点,其中特大型规模滑坡 3 处,大型规模滑坡有 3 处,中型规模 27 处,小型 38 处。

表 1 华宁县 2017 年各乡镇严重滑坡灾害

乡镇	滑坡灾害/ 处	威胁人数/ 人	面积/ km ²	面密度 (个/100 km ²)
华溪镇	5	698	151	0.03
盘溪镇	13	1684	197.5	0.06
通红甸乡	11	1535	114	0.09
青龙镇	16	2574	432	0.04
宁州镇	26	10079	418.5	0.06
总计	71	16570	1313	0.28

注:数据来源于云南省玉溪市华宁县防震减灾局。

2.1.2 滑坡灾害点密度分布特征 从滑坡灾害点的密度来看,滑坡灾害点密度能够反映出不同区域灾害点分布的疏密情况,从而反映滑坡点集中分布区域以及比较区域之间的差异。整体上高密度区主要集中在华宁县的磨豆山和登楼山地区。在乡镇分布上,各乡镇滑坡灾害点密度见表 1,其中宁州街道滑坡点数量最多,但灾害点密度不是最高,以通红甸乡灾害点密度最大,除了与其自然地理环境有关,还与其面积小有关(表 1)。从图 2 可以看出,研究区中部滑坡灾害点密度最大,尤其以青龙镇南部、宁州街道、通红甸西部、盘溪西部、华溪东北部等区域最明显。

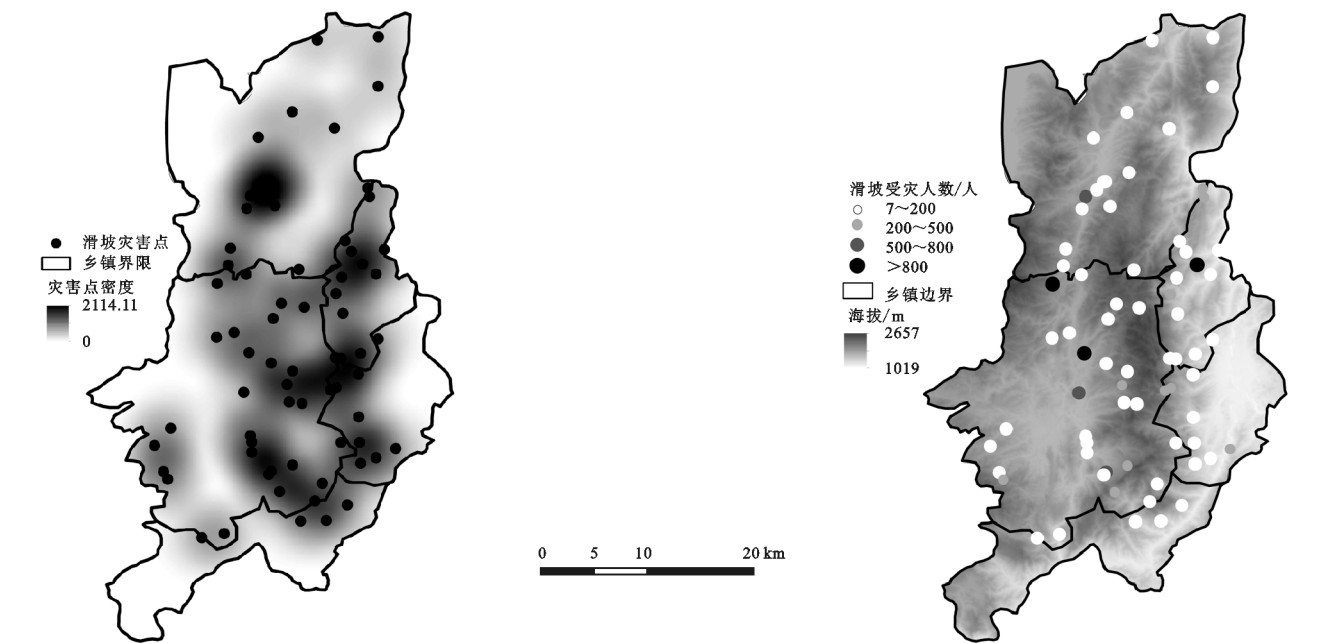


图 2 华宁县滑坡灾害密度分布和受灾人数分布

2.1.3 滑坡受灾人数分布特征 在滑坡受灾人数分布上,受灾人数多少能反映滑坡灾害的影响程度。从滑坡受灾人数的空间分布来看(表 1、图 2),受灾影响人数最大的主要分布在海拔较低的宁州街道和通红甸乡,说明两个乡镇人口密集,受滑坡灾害影响较明显。其中宁州街道作为华宁县的中心,经济发达,交通设施便利,人口较其他乡镇多,在同等条件下滑坡灾害影响大;通红甸乡以少数民族为主,海拔较低、水系发达,旅游业较发达,居住人口多,受滑坡灾害点影响人数较多。整体上看,滑坡受灾人数较大区域主要集中在人口密集区,在人口稀少地区,滑坡影响人数随之降低。

整体来看,华宁县滑坡地质灾害在空间分布特征上,主要集中于中部高海拔地区,中部较东部发育。青龙镇、宁州街道等地,由于地质环境条件复杂,属滑坡灾害发生频率较高区域,灾害点主要分布于海拔较高的山区或盆地边缘。盘溪、通红甸等地,由于坡度较缓,森林植被覆盖较好,水土流失量较少,滑坡地质灾害较青龙镇、宁州街道较少。在滑坡灾害点密度分布上,研究区中部滑坡灾害点密度最大,尤其以青龙镇南部、宁州街道、通红甸西部、盘溪西部、华溪东北部等区域最明显。从滑坡受灾人数来看,受灾影响人数最大的主要分布在海拔较低的宁州街道和通红甸乡。

2.2 滑坡灾害分布的影响因子

滑坡灾害的发育与发生受多种因素的影响和制约。华宁县滑坡灾害分布的影响因素包括地形地貌、水文、人类工程活动、地层岩性、地质构造 5 个方面。地形地貌包括海拔、坡度、坡向等方面,滑坡灾害在不同的海拔高度、坡度、坡向有不同的发育强度。人类工程活动主要指基础设施的建设,区内的基础设施建

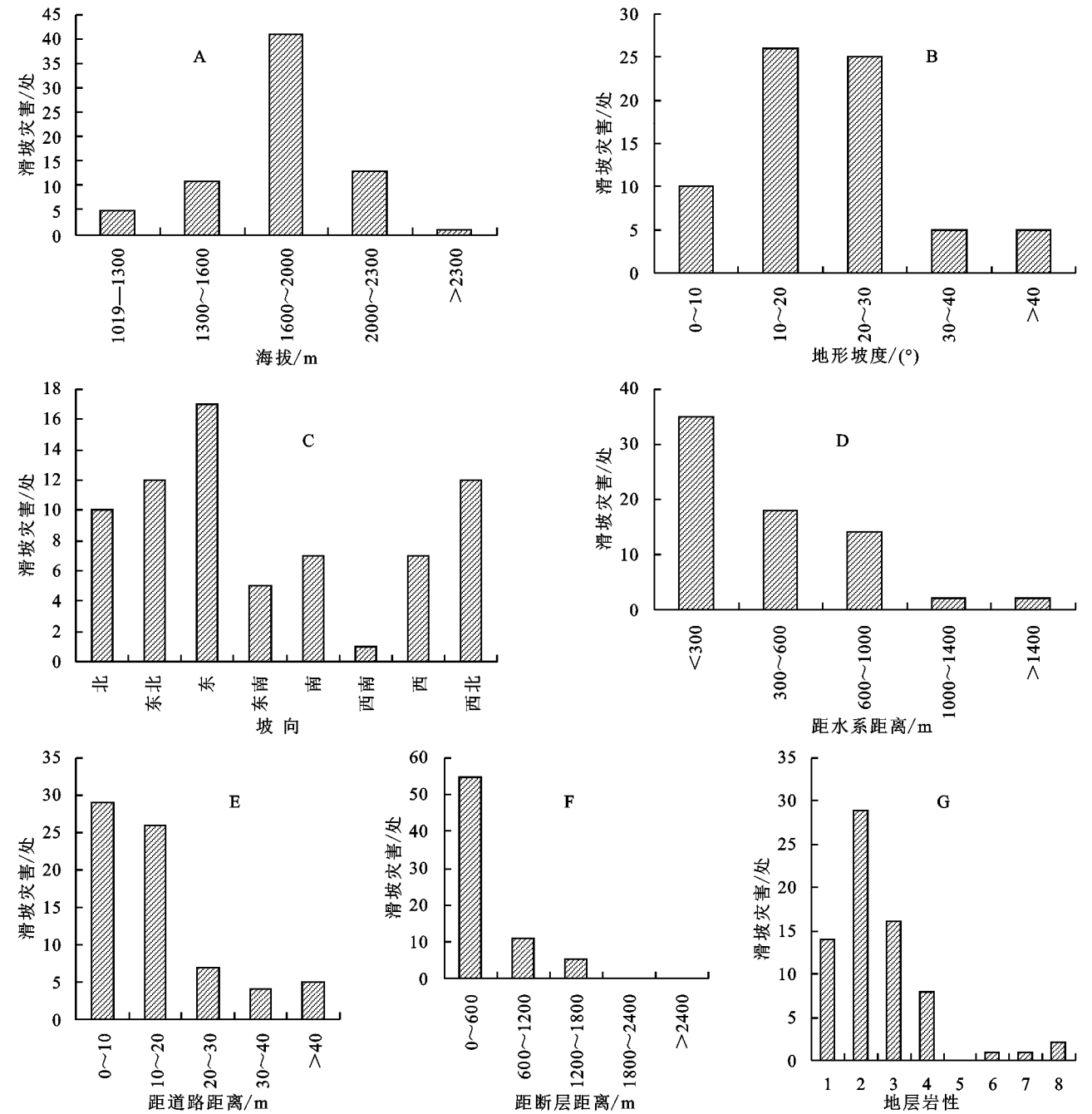
设主要为公路建设和水利设施建设,距道路和水系远近也影响着滑坡的发生。地质环境不同的区域,滑坡的产生和分布都有较大差异,华宁县的滑坡灾害及分布特点受区域地理、地质环境条件的影响,在各区域都有分布,具有明显的地域特点。

2.2.1 海拔 海拔高度与植被类型、岩土体的含水率、人类工程活动以及降雨都具有一定的相关性,从而对滑坡灾害的分布产生影响^[8]。研究区滑坡在不同的海拔高度分布数量有很大差异,表现出一定海拔高度的集中性。结合研究区实地调查和参考相关文献的基础上^[8-10],本文将华宁县内海拔在 ArcGIS 软件中划分 5 个等级进行评价,分别为 1 019~1 300 m, 1 300~1 600 m, 1 600~2 000 m, 2 000~2 300 m 及 >2 300 m,并统计分析华宁县滑坡灾害在各等级的分布情况(附图 1A)。统计结果表明,滑坡灾害大多分布在 1 600~2 300 m 海拔区间内,其中 57.75%分布在 1 600~2 000 m 海拔区间内(图 3A)。滑坡分布最密集的海拔范围为华宁地区人类活动最频繁与地形坡度较陡的范围。海拔高程小于 1 600 m 的地区,由于地形起伏较小,不容易形成滑坡;海拔高程大于 2 300 m 的地区由于人类活动少且植被覆盖率大,滑坡数量也较少。

2.2.2 坡度和坡向 滑坡灾害点分布与坡度关系密切,坡度是影响滑坡稳定性的重要因素。已有研究表明,自然条件下滑坡所处坡体坡度越大,临空面的黏性力越小,斜坡受重力影响越大,滑坡发生可能性越大^[10,14,21]。然而如图 3B 所示,研究区的滑坡数量并没有随坡度变大而增多,而是集中在 10°~30°范围内,这说明区内有许多滑坡集中发育在较缓坡度区。

本文利用华宁县 DEM 数据,生成坡度分布图,分别统计各等级坡度内滑坡点数量,依据史展等^[9]提出的按贡献率分级将研究区内坡度分为 5 个级别,分别为 0°~10°,10°~20°,20°~30°,30°~40°, >40°,同时叠加滑坡灾害点,得到研究区滑坡灾害点坡度空间分布

图(附图 1B),统计结果表明,研究区滑坡的易发坡度区域为 10°~30°范围内,有 36.62%的滑坡分范围内布在 10°~20°,35.21%分布在 20°~30°的滑坡范围内(图 3B)。这说明了滑坡灾害多发生在 10°~30°,在这个范围内,坡度越大,滑坡稳定性越差。



注:1 为坚硬灰岩、白云岩岩组;2 为较坚硬灰岩、白云岩夹泥灰岩、砂岩、泥岩岩组;3 为松散土类岩组;4 为较坚硬喷出玄武岩岩组;5 为较坚硬含砂砾岩、泥岩夹砾岩岩组;6 为较软弱砂页岩互层岩组;7 为较坚硬砂、板岩夹灰岩、白云岩岩组;8 为极软黏土岩、砂岩岩组。

图 3 滑坡灾害点和影响因子相关性统计

滑坡发育与多种因素相关,斜坡的坡向也是一个不可忽视的条件。将滑坡分布位置的坡向分为 8 个方向,利用 GIS 软件将研究区坡向与滑坡灾害点叠加,得到在不同坡向滑坡灾害分布情况,图 3C 是研究区滑坡坡向分级和与滑坡分布的关系图。可以看

出大多数滑坡发生在面向 E,NE,NW,N 等方向上,滑坡数分别占 23.94%,16.9%,16.9%,14.08%(附图 1C、图 3C),其中以东向相关性最高。说明在这 4 个方向上滑坡发生的可能性大。

2.2.3 距水系和道路的距离 滑坡灾害的发育和发

生与河流的特征有密切关系,河流通过其流水活动影响和改变地理环境^[23]。在距离河流不同的区域受其影响不同,河流的流量、流速、水位等水情要素等对滑坡的产生有一定的影响。华宁县流域为珠江水系,南盘江流域,境内有南盘江、海口河、华溪河、青龙河、龙洞河5条主要河流,区内地表水系发育,受河流侵蚀的作用,斜坡多处于极限平衡状态,在外力的作用下,易失稳形成滑坡。空间临近效应表明,距离越近对滑坡影响程度越大,根据ArcGIS软件中的直方图通过自然间断点分级法进行分类,将滑坡灾害点距离河流的距离在ArcGIS软件中划分5个等级进行评价,分别为<300 m,300~600 m,600~1 000 m,1 000~1 400 m及>1 400 m,并统计分析华宁县滑坡灾害在各等级的分布情况(附图1D)。统计结果表明,滑坡灾害大多分布在小于300 m区间内,49.3%的滑坡分布在此范围内,距离河流越近,发生滑坡的可能性越大(图3D)。

与道路距离的远近也影响着滑坡的发生,将滑坡灾害点距离道路的距离在ArcGIS软件中划分5个等级进行评价,分别为<10 m,10~20 m,20~30 m,30~40 m及>40 m,并统计分析华宁县滑坡灾害在各等级的分布情况(图3E)。统计结果表明,滑坡灾害大多分布在<20 m区间内,77.47%的滑坡分布在此范围内,距离道路越近,发生滑坡的可能性越大。

2.2.4 距断层距离 在分析滑坡灾害分布特征时,断层距离是重要的影响因素。根据相关研究资料,滑坡灾害的发育和发生与断层距离关系密切,距断层越近,地震滑坡就越多^[8]。华宁县经历了多次构造变动,县域内构造体系复杂,主要断层如小坝断层、白玉冲断层、永和村—何家沟断层、河边断层等断层附近滑坡灾害分布有27处之多,在支断层上滑坡分布数量较少(附图1F)。已有研究表明^[21-23]地质灾害多发于断裂构造较密集部位附近,具有沿构造线方向密集展布的特点,距离主断层越近,滑坡灾害越多,而支断层附近由于破碎度较低,因而分布的滑坡灾害较少。因此,采用距断层距离这个因子来分析滑坡易发性本身已经体现了断层性质的影响,所以没有进行主断层和支断层的分类。利用研究区断层分布图与灾害点进行空间分析,将灾害点至最近断层带的距离按照600 m等间距进行划分,在GIS软件中依据自然间断点分级法将研究区滑坡灾害点距断层距离划分为5个等级进行评价,分别为0~600 m,600~200 m,1 200~1 800 m,1 800~2 400 m及>2 400 m,分析不同距离内滑坡灾害的分布。统计结果表明,随着与断层距离的减少,滑坡的数量越多,77.46%

的滑坡发育在距断裂破裂带0~600 m的范围内(附图1F,图3F)。

2.2.5 地层岩性 滑坡变形失稳与地层岩性关系密切,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的发育程度,与岩土体的类型密切相关。岩土体的物理和水理性质主要是由岩土类型决定的。根据研究区内的岩相、岩体结构、强度和岩性等要素的有机组合,共划分出碎屑岩、碳酸盐岩、变质岩、岩浆岩、松散土类5类岩石,划分为8个岩组(附图1G),通过GIS软件叠加滑坡灾害点,并计算在不同岩性下滑坡灾害点的数量,统计结果表明,滑坡灾害主要集中分布于松散土类和较坚硬灰岩、白云岩夹泥灰岩、砂岩、泥岩岩组(图3G),63.39%的滑坡发生在这两个岩组之内。其中,22.54%的滑坡灾害点分布在松散土类岩组,松散土类岩性疏松,岩性相对软弱,岩体较破碎,易风化,具有软硬相间特征,浸水后岩体强度显著降低,在强降雨及不利地质条件下容易产生滑坡等地质灾害,主要分布于青龙镇、宁州街道、通红甸乡。40.85%的滑坡灾害点分布在碳酸岩中的较坚硬灰岩、白云岩夹泥灰岩、砂岩、泥岩,该岩类由于节理裂隙较发育,岩体较坚硬,力学性质较好,当受到较强烈的风化作用时,层间夹杂的泥岩、泥灰岩岩体易破碎,易引起滑坡崩塌等地质灾害,主要分布于青龙镇、宁州街道、通红甸乡。

2.3 滑坡灾害易发性分区和制图

滑坡灾害的易发程度受控于地理、地质、水文、人类活动等多种要素,这些要素可以称之为滑坡灾害影响因子。要对滑坡灾害易发性进行评价,就要分别对滑坡灾害的影响因子分别进行评价。本次详细调查收集到的华宁县滑坡灾害影响因子共有7个(附图1),把每一个影响因子都进行分类,统计滑坡灾害在每一类中的分布情况,就可以初步认识这一影响因子中对滑坡灾害的相对贡献率大小。7个因子的贡献率相互叠加,即完成了华宁县滑坡灾害易发性分区。

基于上述分析,我们可以在GIS平台上,对控制滑坡灾害的7个因子对滑坡灾害发育的贡献进行叠加分析,叠加产生华宁县的滑坡灾害易发程度的空间分布(图4)。根据地区特点,考虑成果的可用性和复杂性,把华宁县滑坡灾害易发程度划分为高、中、低3个等级(图4)。高易发区主要分布在研究区中部地区,在5个乡镇均有高易发区的分布,其中主要分布在海拔较高的中部和西部山区,在行政区划上主要集中在青龙镇、宁州街道、华溪镇。中易发区主要分布在研究区东北和西南区域,以及东部部分区域。中易

发区在行政区划上主要集中在青龙镇东北部、宁州街道西南部、通红甸彝族苗族乡中部和盘溪东部分布最为集中。低易发区主要分布在研究区东部和西南部分地区。低易发区行政区划上主要集中在通红甸彝族苗族乡、盘溪镇分布最为集中。

结合灾害点密度角度来看,灾害点密度大的地区,发生滑坡灾害的风险也越大。整体上,华宁县滑坡灾害呈现出东少西多,南少北多的特征。宁州街道中部地区本来应属于中低易发区,但由于岩性的影响,在易发性分区图上表现为高易发区,这说明在影响因子组合上还需要进行改进。未来华宁县应重点关注中部和西部区域的滑坡灾害预防。

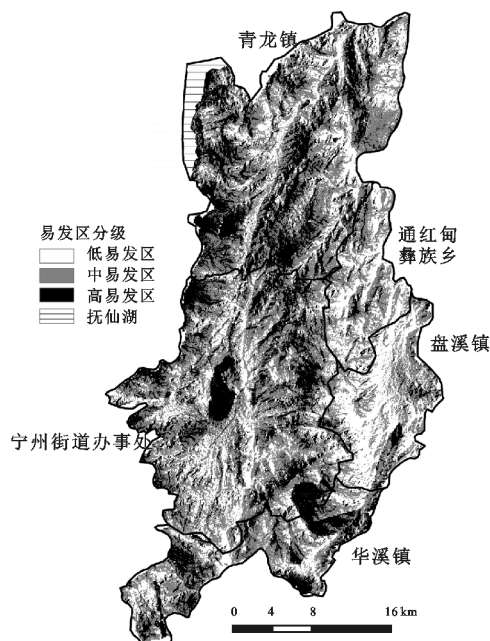


图 4 滑坡灾害易发性分区

3 结论

(1) 华宁县地质环境复杂,地质灾害类型多样,以山区突发性的滑坡为主,灾害等级以小型为主。从滑坡灾害点空间分布来看,具有空间集中分布特征,集中分布于中部高海拔地区;从滑坡灾害点密度分布来看,中部地区滑坡灾害点密度最大,其次是东部和北部地区。从滑坡受灾人数来看,受灾影响人数最大的主要分布在海拔较低的宁州街道和通红甸乡,其次是青龙镇、通红甸西部、盘溪西部、华溪东北部、宁州街道。

(2) 滑坡灾害影响因子统计结果表明,滑坡灾害大多分布在 1 600~2 300 m 海拔区间内,其中有 57.75% 分布在 1 600~2 000 m 海拔区间内;研究区滑坡的易发坡度区域为 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内,有 36.62% 的滑坡分布在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 范围内,35.21% 的滑坡分布在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内;大多数滑坡发生在 E、NE、NW 和 N 等方向上,滑坡数分别占 23.94%,16.9%,16.9%,14.08%;滑坡灾害大多分布在

距离河流 300 m 区间内,49.3% 的滑坡分布在此范围内,距离河流越近,发生滑坡的可能性越大;滑坡灾害大多分布在距离道路 20 m 区间内,77.47% 的滑坡分布在此范围内,距离道路越近,发生滑坡的可能性越大;滑坡灾害主要集中分布于松散土类和较坚硬灰岩、白云岩夹泥灰岩、砂岩、泥岩岩组;随着与断层距离的减少,滑坡的数量越多,77.46% 的滑坡发育在距断裂破裂带 0~600 m 的范围内。

(3) 在滑坡灾害易发性上,主要分为 3 个等级:高易发区、中易发区、低易发区。滑坡灾害高易发区主要分布在宁州街道、青龙镇、华溪镇;中易发区主要分布在青龙镇东北部、宁州街道西南部、通红甸彝族苗族乡中部和盘溪东部;低易发区主要分布在通红甸彝族苗族乡、盘溪镇。

参考文献:

- [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.
- [2] 邱海军.区域滑坡崩塌地质灾害特征分析及其易发性和危险性评价研究[D].西安:西北大学,2012.
- [3] 杨根云,周伟,方教勇.基于信息量模型和数据标准化的滑坡易发性评价[J].地球信息科学学报,2018,20(5):674-683.
- [4] 郭子正,殷坤龙,黄发明,等.基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,2019,38(2):287-300.
- [5] 黄发明,殷坤龙,蒋水华,等.基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):156-167.
- [6] 吴姿姿.云南省滑坡、泥石流的孕育因素及易发性研究[D].北京:中国地质大学,2015.
- [7] 许英杰.四川冕宁县滑坡地质灾害发育特征及风险性评价研究[D].成都:成都理工大学,2017.
- [8] 孙艳萍,张苏平,陈文凯,等.汶川地震滑坡危险性评价:以武都区 and 文县为例[J].地震工程学报,2018,40(5):1084-1091.
- [9] 史展,陶和平,刘斌涛,等.GIS 支持下川滇黔接壤区滑坡危险性评价[J].水土保持通报,2012,32(3):262-266,301.
- [10] 倪树斌,马超,杨海龙,等.北京山区崩塌、滑坡、泥石流灾害空间分布及其敏感性分析[J].北京林业大学学报,2018,40(6):81-91.
- [11] 王志旺,李端有,王湘桂.区域滑坡空间预测方法研究综述[J].长江科学院院报,2012,29(5):78-85,94.
- [12] 李滨,吴树仁,石菊松.渭北黄土塬区滑坡发育特征及分布规律研究[J].水土保持研究,2011,18(5):212-216.
- [13] 兰恒星,伍法权,周成虎,等.基于 GIS 的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(10):1500-1506.

全格局优化构建[J].生态学杂志,2016,35(3):791-799.

[10] 吴莉,侯西勇,邸向红.山东省沿海区域景观生态风险评价[J].生态学杂志,2014,33(1):214-220.

[11] 王涛,张超,于晓童,等.洱海流域土地利用变化及其对景观生态风险的影响[J].生态学杂志,2017,36(7):2003-2009.

[12] 闻国静,刘云根,王妍,等.普者黑湖流域景观格局及生态风险时空演变[J].浙江农林大学学报,2017,34(6):1095-1103.

[13] 位宏,徐丽萍,李晓蕾,等.博斯腾湖流域景观生态风险评价与时空变化[J].环境科学与技术,2018,41(S1):345-351.

[14] 任金铜,莫世江,陈群利,等.贵州夹岩水利枢纽区域景观生态风险评价研究[J].环境科学与技术,2018,41(4):182-189.

[15] 任金铜,杨可明,陈群利,等.贵州草海湿地区域土地利用景观生态安全评价[J].环境科学与技术,2018,41(5):158-165.

[16] 王娟,崔保山,刘杰,等.云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J].环境科学学报,2008,28(2):269-277.

[17] 郭建国.景观生态学:概念与理论[J].生态学杂志,2000,19(1):42-52.

[18] 张月,张飞,王娟,等.基于 LUCC 的艾比湖区域生态风险评价及预测研究[J].中国环境科学,2016,36(11):3465-3474.

[19] 巩杰,谢余初,赵彩霞,等.甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J].中国环境科学,2014,34(8):2153-2160.

[20] 孙广友,田卫,贾志国,等.松原灌区建设对查干湖生态风险分析及对策[J].湖泊科学,2014,26(1):66-73.

[21] 郭玉静,郑毅,王妍,等.滇西北高原湖泊剑湖演变过程及其生态环境效应分析[J].环境工程,2017,35(4):45-50,105.

(上接第 204 页)

[21] 任正超,朱华忠,柳小妮.年际尺度上土地覆盖类型时空分异及其对气候和地形的响应[J].农业工程学报,2012,28(15):205-214.

[22] 任正超,朱华忠,史华,等.中国潜在自然植被 NPP 时空分布格局变化及其对气候和地形的响应[J].草地学报,2017,25(3):474-485.

[23] 李登科,王钊.基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J].生态环境学报,2018,27(3):397-405.

[24] 邓舒雨,董向忠,马明哲,等.基于森林碳库动态评估神农架国家级自然保护区的保护成效[J].生物多样性,2018,26(1):27-35.

[25] 崔林丽,史军,肖风劲.气候要素及 El Niño/La Niña 事件对中国陆地 NPP 变化的影响[J].地理学报,2018,73(1):54-66.

(上接第 218 页)

[14] 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.

[15] 王德耀,杜忠潮,张满社.陕西省泾阳南塬崩塌、滑坡地质灾害及成因分析[J].水土保持通报,2004,24(4):34-37.

[16] 戴福初,李军.地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J].地质科技情报,2000,19(1):91-96.

[17] 胡最,汤国安,闫国年.GIS 作为新一代地理学语言的特征[J].地理学报,2012,67(7):867-877.

[18] 王亚强,王兰民,张小曳.GIS 支持下的黄土高原地震滑坡区划研究[J].地理科学,2004,24(2):170-176.

[19] 王萌,乔建平.基于 GIS 的沐川县滑坡危险度区划[J].自然灾害学报,2009,18(1):174-179.

[20] 白世彪,闫国年,盛业华,等.基于 GIS 的长江三峡库区滑坡影响因子分析[J].山地学报,2005,23(1):63-70.

[21] 黄润秋,李为乐.汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J].工程地质学报,2009,17(1):19-28.

[22] 王帅,王深法,俞建强.构造活动与地质灾害的相关性:浙西南山地滑坡、崩塌、泥石流的分布规律[J].山地学报,2002,20(1):47-52.

[23] 曾琳洁,张涛,冯文凯.河南南召县地质灾害形成条件与分布规律[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):82-89.