

基于贡献率模型的崩塌易发性评价

——以广州市白云区为例

邓日朗¹, 陈凌伟², 蔡俊坚¹, 詹华炜¹, 郑先昌¹

(1.广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510000; 2.广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060)

摘要: [目的] 根据地质灾害野外普查空间数据库, 分析花岗岩风化残积土发育地区崩塌形成机理和破坏模式, 探究不同环境孕灾因子对崩塌发育的贡献率, 评估崩塌灾害空间易发性与分布规律, 为中国东南沿海地质灾害多发区的灾害防治工作提供科学支持。[方法] 在分析广州市白云区花岗岩风化残积土崩塌发育特征的基础上, 选取高程、坡度、坡向、地形起伏度、距地表水体距离、降雨量、地层岩性、土地利用类型共8个与崩塌灾害发育密切关联的致灾因子构建崩塌灾害易发性评价指标体系, 叠加研究区内404个历史崩塌数据, 依据贡献率模型计算统计各指标因子崩塌灾害敏感性和空间分布特征。采用各二级指标因子贡献率的修正样本差确定因子权重。[结果] ①研究区内坡度、高程和地形起伏度对崩塌易发性贡献程度较高, 坡向、地层岩性、降雨量在崩塌灾害易发性评价中贡献程度较低。②极高易发区主要集中在丘陵西麓, 崩塌易发性由山地线范围外层边缘向中心逐级降低。③崩塌极高易发区和高易发区崩塌比率占总崩塌比率超过85%, 模型易发性评价成功率和预测率分别达到91.3%和92.6%。[结论] 斜坡地形地貌因子对崩塌发育影响较显著, 基于贡献率的崩塌灾害易发性评价模型能够客观量化指标因子权重, 模型预测评价结果精度较高, 易发性区划符合实际崩塌发育空间分布特征。

关键词: 崩塌; 花岗岩残积土; 易发性评价; 指标因子; 贡献率; GIS

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0218-09

中图分类号: P642.22

文献参数: 邓日朗, 陈凌伟, 蔡俊坚, 等. 基于贡献率模型的崩塌易发性评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 218-226. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.028; Deng Rilang, Chen Lingwei, Cai Junjian, et al. Evaluation of collapse susceptibility based on a contribution rate model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 218-226.

Evaluation of Collapse Susceptibility Based on a Contribution Rate Model

—A Case Study at Baiyun District, Guangzhou City

Deng Rilang¹, Chen Lingwei², Cai Junjian¹, Zhang Huawei¹, Zheng Xianchang¹

(1. College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510000, China;

2. Guangzhou Urban Planning Survey and Design Institute, Guangzhou, Guangdong 510060, China)

Abstract: [Objective] The spatial database of geological disaster field survey was conducted to analyze the formation mechanism and failure mode of collapse in the area where granite weathered residual soil was developed, to explore the contribution rate of different environmental disaster factors to collapse development, and to evaluate the spatial susceptibility and distribution law of collapse disaster. [Methods] Based on the analysis of the development characteristics of granite weathered residual soil collapse at Baiyun District, Guangzhou City, eight disaster-causing factors closely related to the development of collapse disaster (including elevation, slope, slope direction, topographic relief, distance to stream, rainfall, stratum lithology, and land use) were selected to construct the evaluation index system of collapse disaster susceptibility, and 404 historical collapses in the study area were superimposed. Using the contribution rate model, the collapse disaster sensitivity and spatial distribution characteristics of each index factor were calculated and counted. The modified

收稿日期: 2021-01-09

修回日期: 2022-03-11

资助项目: 广东省清远市财政项目“清远市清城区多要素城市地质调查”(441802-202001-405001-0001); 广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金项目(2020B121202019); 广州市城市规划勘测设计研究院科技基金项目(RDI2210204140; RDI2210204146)

第一作者: 邓日朗(1997—), 男(汉族), 广东省佛山市人, 硕士研究生, 研究方向为滑坡灾害风险评价。Email: 2112016100@e.gzhu.edu.cn.

通讯作者: 郑先昌(1969—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、城市地质的教学和研究。Email: zhengxianchang@gzhu.edu.cn.

sample difference of the factor contribution rate of each secondary index was used to determine the factor weight. [Results] ① The contributions of slope, elevation, and topographic relief to collapse susceptibility in the study area were relatively high, while slope direction, stratum lithology and rainfall had low contributions to the assessments of collapse susceptibility. ② The extremely high-prone areas were mainly concentrated in the western foothills, and the collapse susceptibility decreased gradually from the outer edge of the mountain ground line to the center. ③ The collapse rates of the extremely high and high prone areas accounted for more than 85% of the total collapse rate. The model susceptibility evaluation success rate and prediction rate reached 91.3% and 92.6% respectively. [Conclusion] Topography and geomorphic factors of slope had significant impacts on collapse development. The collapse disaster susceptibility evaluation model based on contribution rate could objectively quantify the index factor weight, and the prediction results of the model had high accuracy. The susceptibility zoning conformed to the actual spatial distribution characteristics of collapse development.

Keywords: collapse; granite residual soil; susceptibility evaluation; index factor; contribution rate; GIS

中国是滑坡、崩塌、泥石流灾害最为严重的国家之一,根据自然资源部 2015 年度中国地质环境公报所发布的数据,滑坡、崩塌、泥石流 3 种灾害的数量占中国 6 大主要地质灾害总数高达 85.7%^[1]。广东省地质灾害多发生在汛期,占全年地质灾害总数的 70%,粤西、粤东和粤北低山丘陵地区崩滑流灾害较为多发,是中国东南沿海地质灾害的多发区^[2]。

目前,基于遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)的 3S 技术是地质灾害易发性和危险性综合评价与区划的研究热点,专家打分法模型、层次分析法模型、多因素回归分析模型、灰色关联分析模型、信息量模型等评价方法在地质灾害易发性和危险性评价研究中得到广泛的应用^[3-7]。基于滑坡与环境因子非线性映射的数据驱动方法也成为滑坡易发性预测研究的热点。郭子正等^[8]利用粒子群法优化的 BP 神经网络模型与证据权模型计算滑坡易发性指数,综合模型的预测精度优于两种模型单独评价的精度。Pradhan 等^[9]将决策树、支持向量机和模糊神经网络 3 种模型在滑坡易发性区划中进行对比。Raghuvanshi^[10]研究人工神经网络的径向基函数和感知器神经网络在滑坡灾害分区中的应用。国内外学者通过改进现有评价理论或引入新的评价手段,将不同评价模型的评价效果和预测精度进行对比。贡献率法作为分析多因素作用大小程度的方法,广泛用于各类致灾因子对滑坡、崩塌、泥石流的贡献程度分析以及敏感性评价,因子的敏感性直接反映为评价过程的权重大小^[11-12]。任凯珍等^[13]采用主成分分析法对崩塌灾害承灾因子敏感性进行排序。林金煌等^[14]采用 SPCA 法和 Moran's *I* 指数分析城市群的地质灾害敏感性等级。崔玉龙等^[15]采用贡献率法定量统计不同影响因子对滑坡的危险度。贡献率权重法也被利用于研究不同斜坡坡向对滑坡发育的贡献程度,

得到斜坡坡向与滑坡发育的定量相关关系^[16-17]。武鑫等^[18]采用贡献率法、突变理论和模糊数学相结合的方法进行滑坡稳定性判别。陈顺满等^[19]引入贡献率法考虑地下采场中矿柱宽高比和矿柱载荷与承受荷载之比对矿柱稳定性影响贡献以及权重。单博等^[20]利用最小熵分析原理分析各因子对泥石流系统贡献率及权重,根据置信度识别准则确定泥石流沟敏感度水平。易靖松等^[21]基于数量化理论 II 对基岩顺层滑坡样本进行学习,并得到各影响因子贡献率和易发性评价系数。综上所述,目前滑坡崩塌易发性评价研究主要侧重评价因子的选取分级和指标因子权重的量化两方面,前者反映了滑坡崩塌发育的内在规律,是构建评价体系的重要环节,后者为避免评价主观性的缺陷,利用数据驱动的评价方法正被广泛地研究。

目前,权重的确定方式主要有层次分析法、客观赋权法、主成分分析法和信息熵等,但这些方法各存在主观因素影响大、依赖指标体系选取和对异常数据敏感等不足^[19]。本文重点关注花岗岩风化残积土地区多因子共同影响对崩塌空间分布规律的量化分析,提出基于二级指标因子贡献率修正样本差的权重计算模型并进行区域易发性评价。

为此,本研究在地质灾害野外调查的基础上,建立区域崩塌灾害空间数据库,以广州市白云区为例,首先,结合研究区内崩塌的发育特征和影响因素共确定 8 个一级指标因子;然后,从 404 个历史崩塌点随机选取 90%用于模型构建,余下 10%用于模型检验,通过计算各崩塌点在相应指标因子中的频率因子、体积因子和贡献率,分析花岗岩风化残积土土质崩塌的影响因素和空间分布规律;接着,在计算贡献率的基础上,本文提出利用各二级指标因子贡献率与均值的偏离程度确定相应一级指标因子的敏感性,从而得到各因子的量化权重;最后,基于 GIS 平台叠加得到崩

塌易发性区划结果,利用成功率曲线和预测率曲线定量分析验证崩塌易发性区划图的预测精度。

1 研究区概况

白云区位于广州市北部,为广州市管辖的完整县域单元,坐标范围为东经 $113^{\circ}08'36''$ — $113^{\circ}34'52''$,北纬 $23^{\circ}07'03''$ — $23^{\circ}25'53''$,面积约 795.79 km^2 ,地势北部和东北部高,西部和南部低。研究区内山脉均属于广东最高峰九连山向南延伸的支脉,多受北东—南西走向山脉控制,区内主要山峰有:帽峰山,海拔 534.9 m ,为该区最高峰;白云山,海拔 382 m ;杨大岭,海拔 349 m 。

1.1 基础地质概况

研究区内地貌类型大致以北北东走向的广从断裂和东西走向的瘦狗岭断裂带为界,广从断裂带以东,瘦狗岭断裂带以北主要是低山丘陵区域,中有山间冲积平原点缀。广从断裂带以西主要为流溪河冲积平原和珠江三角洲平原。岩石是地貌发育的物质基础,研究区内主要为大面积花岗岩和变质岩分布,花岗岩在风化作用下形成风化残积土或全风化层,由花岗岩组成的地貌风化壳厚度大,一般可达 20 m 以上,最大厚度超过 80 m ^[22]。花岗岩残积土风化程度自上而下逐渐增强,上部以细粒土为主,下部以砂土为主。崩塌体物质主要为花岗岩风化残积土,石英粒含量较多,主要为砂质黏性土,结构疏松,在湿热的气候条件下化学风化强烈,侵蚀、剥蚀作用加速地貌发育,水土流失严重。其次,花岗岩节理较发育,球状风化显著,研究区内常见有孤石出露地貌。

1.2 气象与水文

研究区地处低纬,面向海洋,属亚热带季风海洋性气候,夏长冬短,雨量充沛,近 30 a 年平均气温 23.0°C ,年平均降雨量 1772.1 mm 。春季和初夏北方冷气流在高空减弱,热带海洋暖湿气流在低空和地面向北延伸,冷暖气流在南岭大陆形成准静止锋,导致广东全省春季“梅雨”和初夏暴雨的明显降水过程,5,6,8 和 9 月分别为两个降水高峰期,且一般前峰大于后峰。研究区内常年于 3 月下旬入汛,3—10 月为汛期,汛期期间降雨量占全年降雨量约 86% 。夏秋季节,来自西北太平洋和南海的热带风暴也会带来显著的降雨。研究区内崩塌滑坡灾害集中发生在雨季。秋季,随着西风带的发展地面冷高压逐渐加强,副热带高压控制广东省高空,两个高压叠加形成全省大陆晴朗干燥的天气,10—11 月降水量明显减少。冬末春初干燥少雨,其中 12 月是全年降水量最少的月份。研究区内河流属珠江水系,由于地势影

响,河流多从东北流向西南,主要河流有珠江、流溪河以及白坭河。

1.3 崩塌形成机理

研究区地质灾害类型以崩塌灾害为主,占各类地质灾害点总数的 80% 以上,滑坡和泥石流灾害相对较少,崩塌点主要聚集分布在东南部九连山支脉低山丘陵区域。崩塌主要受研究区内充沛的降雨和强烈的人为工程干扰所支配,崩塌多发生于经人为削坡导致一面临空的斜坡坡顶和坡面部位,以及道路开挖在一侧形成的高陡边坡,同样也多发于坡度大于 30° 的陡倾斜地形自然边坡。削坡坡度陡峭,一般在 60° — 90° ,多近乎直立状,削坡坡高一般在 $3\sim 8 \text{ m}$ 。部分边坡坡顶和坡底均无排水沟,地表水排泄不畅,坡面植被稀少,受雨水冲刷侵蚀作用明显,为降雨入渗和土体软化创造了条件。

经坡脚削坡建房修路或大面积开挖取土后,造成斜坡表层松弛,每年汛期持续降雨的触发作用使坡度较陡峭的斜坡较大概率引起崩塌灾害,一般潜在崩塌点均与承灾体距离接近,是预防人员伤亡的重点区域。

人工削坡形成的临空面在缺乏坡面防护和良好排水条件的情况下,遇持续的降雨作用时,降雨将沿松散土体的裂隙或孔隙入渗到坡体中,坡体含水率升高,自重加大,坡体下滑力增大,坡体中孔隙水压力增加,从而使有效应力降低,滑带摩阻力减小;降雨入渗到风化残积土坡体内部时,将使土颗粒间的斥力超过吸力,花岗岩风化残积土遇水发生碎裂崩解,崩解速度往往较快,且由于黏粒含量较少,当降雨强度超过土体入渗能力时产生坡面径流,雨水冲刷将带走土体中的黏粒,导致土体黏聚力降低甚至丧失,土体强度大大降低,易形成滑塌面;由于原生裂隙和干湿循环等各种风化营力的作用,坡面和坡顶裂隙比较发育,坡体在降雨作用下沿着孔隙、裂隙方向崩解,对坡体产生静水压力,增大下滑力。研究区内主要为微型土质崩塌,长度和高度各数米至十余米,厚度数米,但数量较多,分布较广泛。

1.4 崩塌致灾模式

根据研究区地质灾害调查成果和边坡破坏的起始运动形式,将研究区内崩塌破坏模式归纳为两类,分别是倾倒式崩塌和滑移式崩塌。如图 1 所示,倾倒式崩塌主要发育于经切坡后角度近于垂直,且缺少坡面支挡的土质边坡。经削坡后坡面植被稀少,汇水面积较大,冲刷较严重,坡顶裂缝发育。受降雨长期影响,裂缝数量和张开程度逐渐发展,此时边坡处于冲刷和变形开裂阶段,呈现渐变式破坏特征。当降雨强

度增大时,边坡后缘裂缝被雨水充填,在自重、静水压力和动水压力的作用下,坡体上部张拉应力集中区范围达到一定程度,边坡将向临空方向发生倾倒式失稳破坏,崩塌破坏过程呈现突发性。



图1 倾倒式崩塌

如图2所示,滑移式崩塌主要发育于坡度大于 60° 的土质边坡,坡面植被较少,汇水面积大,雨水冲刷严重。在降雨入渗的作用下,结构面土体发生软化,抗剪强度降低,而坡体由于土体含水率增加导致自重增加,沿坡体内部结构面剪应力增大,当剪应力大于结构面抗剪强度时,边坡将发生滑移式失稳破坏。风化残积土坡体内滑动面受控于坡形、应力状态和遇水后土体强度降低,少数由不利结构面组合所控制。



图2 滑移式崩塌

2 研究方法 with 数据来源

2.1 易发性评价模型

贡献率模型一般根据各类影响因子区域内历史灾害点的数量、面积或体积^[12],选取若干特征计算其算术平均值作为影响因子孕灾综合贡献程度。研究区内崩塌地质灾害风险主要由灾害活动规模(强度)

和活动频次(概率)决定,因此研究区内评价崩塌易发性综合考虑两方面,一是研究区内崩塌灾害出现的频率,二是研究区内崩塌土体的体积,分别记为频率因子 f_{ij} 和体积因子 v_{ij} 。针对研究区内各崩塌点所在位置,分别统计每个二级指标因子区域范围内的崩塌次数与所有崩塌点总数的比值和崩塌体积之和与所有崩塌点体积总和的比值即为频率因子 f_{ij} 和体积因子 v_{ij} 。贡献率主要由频率因子和体积因子所综合决定,以此来衡量各一级指标因子中二级指标因子对崩塌发育所起影响作用大小,其计算公式^[23]为:

$$w_{ij} = f(f_{ij}, v_{ij}) \quad (1)$$

式中: f_{ij}, v_{ij} 分别为第*i*个一级指标因子中第*j*个二级指标因子的频率因子和体积因子; w_{ij} 为在第*i*个一级指标因子中第*j*个二级指标因子的贡献率。

贡献率计算要考虑各二级指标因子相应的区域面积,在所占比例越小的范围内崩塌发生的频率和体积越大,则该影响因子越符合潜在崩塌灾害的触发条件,具体计算方法为:

$$w'_{ij} = \frac{(f_{ij} + v_{ij})}{2} \cdot \frac{c_{ij}}{\sum c_{ij}} \quad (2)$$

式中: c_{ij} 为第*i*个一级指标因子中第*j*个二级指标因子对应的区域面积; w'_{ij} 为第*i*个一级指标因子中第*j*个二级指标因子归一化前的贡献率。

对各二级指标因子贡献率进行归一化处理:

$$w_{ij} = \frac{w'_{ij}}{\sum w'_{ij}} \quad (3)$$

本文在贡献率参数计算的基础上提出一种量化影响因子权重的方法,采用二级指标因子贡献率的修正样本差来描述数据的分散程度,即通过计算各二级指标因子贡献率方差值来表示一级指标因子对崩塌灾害的敏感性。敏感性系数能客观定量地反映出各评价因子间以及因子内对地质灾害的权重大小^[12],如果敏感性系数较小,则说明该一级指标因子对崩塌灾害的敏感性较低,反之则说明敏感性高。与直接通过计算贡献率加权平均值^[12]作为影响因子敏感性系数或权重相比,该方法基于各二级指标因子贡献率与均值的偏离程度,描述了一级指标因子之间由于二级指标因子分布差异在总离散中所占的重要性大小,能够有效区分多种影响因子中的主控因素。该方法不依赖于指标分级体系划分,为量化影响因子权重提供新途径。由于各二级指标因子分级数量不相同,通过乘以 a/b 来考虑二级指标因子由于人为分级数量各异而导致方差值的差别,敏感性系数 S_i 计算公式为:

$$S_i = \frac{a}{b} \times \frac{1}{n-1} \sum (\omega_{ij} - \overline{\omega_{ij}})^2 \quad (4)$$

式中: a 为所有一级指标因子中相应的二级指标因子分级数量的最大值; b 为一级因子 i 所对应的二级指标因子分级数量; $\overline{\omega_{ij}}$ 为一级指标因子 i 所对应所有二级指标因子 j 的贡献率均值。

该模型首先在计算敏感性系数的基础上确定各一级指标因子的权重, 然后与归一化后的各二级指标因子的贡献率对应相乘得到各二级指标因子的量化权重, 基于 GIS 的图层赋值与空间叠加功能即可得到研究区崩塌易发性评价结果。计算公式为:

$$P_i = \frac{S_i}{\sum S_i} \quad (5)$$

$$P_{ij} = P_i \omega_{ij} \quad (6)$$

式中: P_i 为一级指标因子 i 所对应的权重值; P_{ij} 为一级指标因子 i 所对应的二级指标因子 j 的权重值。

为检验模型预测结果准确性, 本文将 404 个历史崩塌数据随机划分为两部分: 90% 的历史崩塌数据用于构建贡献率模型, 余下 10% 的历史崩塌数据用于模型测试。

2.2 评价指标体系划分

滑坡崩塌是一个复杂的非线性系统, 它为相互作用的若干因素的复合体, 各种因素相互作用以及影响构成了一个完整的灾害系统^[23]。经前文分析崩塌灾害的形成机理, 将崩塌灾害形成和变化因素分为斜坡内部条件和外界诱发作用两个方面, 前者对土质崩塌的形成起控制性作用, 主要包括地形地貌、地层岩性、水文地质等方面, 后者对崩塌的发生起触发作用, 主要从人类工程活动和气象两方面加以分析。根据前文所述研究区内崩塌发育特征, 按照一定的主次顺序原则, 结合相关文献研究^[13-17], 采用穷举一剔除法构建区内土质崩塌灾害易发性评价指标体系, 从斜坡内部条件和外界诱发作用两方面出发, 选取高程、坡度、坡向、地形起伏度、距地表水体距离、降雨量、地层岩性、土地利用类型共 8 个一级指标因子构建易发性评价体系。

2.3 数据来源

本文用于研究区崩塌地质灾害易发性评价的基础数据如封 3 附图 3 所示, 包括: ① DEM 数据。数字高程数据来源于地理空间数据云, 空间分辨率为 30 m, 用于提取高程、坡度、坡向等信息; ② 1:100 万地质图。该数据来源于全国地质资料馆, 用于提取研究区内地层岩性; ③ 历史降雨数据。数据包含研究区内 33 个气象站点 2019—2020 年逐日降水量, 来源于广州市政府数据统一开放平台; ④ 土地利用类型信息。该数据是 Esri 公司基于 10 m 分辨率的哨

兵影像数据使用深度学习模型绘制而成, 数据总体精度为 85%; ⑤ 崩塌点野外调查资料。该数据包括研究区内崩塌点坐标、崩塌土方体积等信息, 共计 404 处。

3 结果与分析

3.3 因子分级统计和贡献率分析

3.3.1 崩塌与地形地貌的关系

(1) 高程。崩塌灾害多发生于研究区东部低山丘陵地区, 不同高程的斜坡坡形具有差异。另一方面, 研究区内人口密度较高的区域主要分布在西部冲积平原和九连山余脉西麓, 因此在一定高程范围内自然斜坡受人为干扰的程度较大, 造成崩塌频繁发生, 而高程较高的区域人类工程活动较少。因此高程图层中综合反映了崩塌地质灾害相关分布共性特征。将 DEM 重分类生成 6 个高程区间(见封 3 附图 3a), 高程范围为 50—100 m 的频次因子和体积因子均最大, 是崩塌最为敏感的区域, 其次是 100—150 m, 随着高程增加, 崩塌发生频次和体积递减。另外, 余脉山麓高程多在 0—50 m 区间内, 该区域崩塌频次因子和体积因子较高, 但由于相应区域分布面积较大, 因此综合贡献率较小。

(2) 坡度。斜坡变形崩塌取决于坡体的应力分布和土体强度特征, 而应力分布与坡形、坡高和坡度相关。随着坡度增大, 坡脚附近最大主应力显著增大, 最小主应力显著减小, 坡面和坡顶的张拉应力区范围越大, 当剪应力超过滑面抗剪强度时, 将发生滑坡崩塌灾害。因此, 坡度越陡, 水平应力越大, 斜坡越容易产生变形和破坏。将坡度重分类为 6 个区间, 统计结果如图 4 所示, 坡度区间 $5^\circ \sim 20^\circ$ 发生崩塌的频数最高, 而坡度区间 $40^\circ \sim 50^\circ$ 的贡献率最大, 坡度大于 30° 的斜坡分布面积较小, 综合贡献率总体随坡度增加而增大, 说明削坡坡度增加对崩塌发生较为敏感(见封 3 附图 3b)。

(3) 坡向。不同坡向接受的太阳辐射量和降水强度不同, 进而将影响局部小气候和蒸发量差异, 具体体现在斜坡土壤温湿度、植被分布、土壤侵蚀强度等方面随坡向不同而产生差异, 从而对坡体浅层土体孔隙水压力分布规律和土体物理力学性质造成一定影响。已有相关研究表明南坡和阳坡侵蚀作用较强, 分布崩岗较多^[24]。为分析崩塌与坡向的关系, 将坡向重分类为 8 个区间(图 5), 坡向为南的频次因子、体积因子及贡献率均为最大, 是崩塌发育最敏感的方位, 其次是坡向为西的斜坡区域。总体来看, 南坡崩塌的发育程度高于北坡(见封 3 附图 3c)。

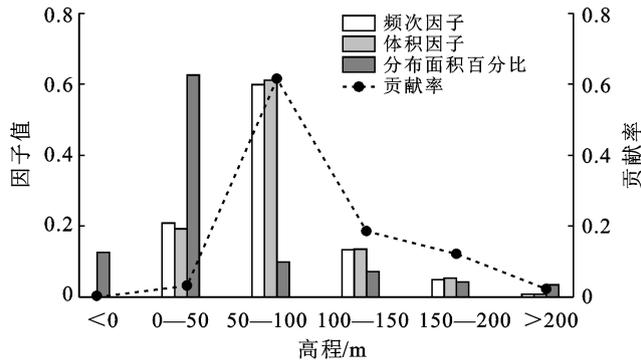


图 3 研究区高程分级统计

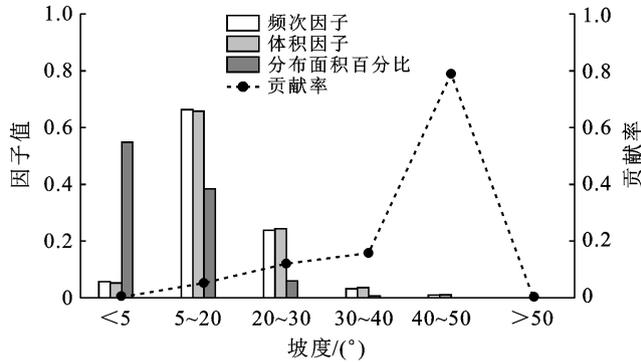


图 4 研究区坡度分级统计

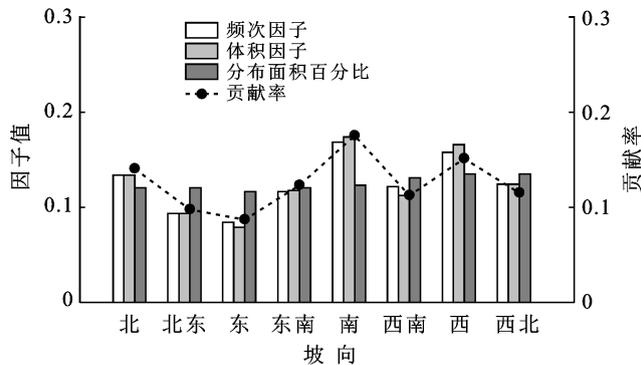


图 5 研究区坡向分级统计

(4) 地形起伏度。地形高差越大越有利于地质灾害的发育,地形起伏度能够描述一定区域范围内地形特征,反映特定区域内相对地势差,是划分地貌类型的基本指标。地形起伏度通过计算 DEM 图层邻域范围内像元最大值与最小值之差生成。地形起伏度随邻域范围增大而增大,最终趋于稳定,在考虑崩塌点灾害规模和影响范围的基础上,邻域范围的选取需要反映崩塌发育与地形起伏度的关系。结合研究区崩塌实际规模,计算邻域取 4×4 范围矩形像元,邻域范围约 360 m²。将栅格计算结果重分类为 4 个区间,将崩塌点与地形起伏度图层叠加统计后结果如图 6 所示,地形起伏度在区间 0—15 m 范围内的分布面积最大,而崩塌发生频次最小,崩塌主要分布在地形

起伏度 15—45 m 区间范围内,贡献率随地形起伏度增加而上升(见封 3 附图 4a)。

3.3.2 崩塌与水文类因子

(1) 距地表水体距离。斜坡的稳定性与斜坡中地下水的类型及其动态变化有着非常密切的关系,斜坡中地下水动力场的变化是一个非稳定流过程,地表水体的存在及水位涨落将使水土作用环境和条件发生变化。地表水体对岸坡坡脚或下部长期的软化、掏蚀作用,容易使上部土体失去支撑从而产生局部坍塌。

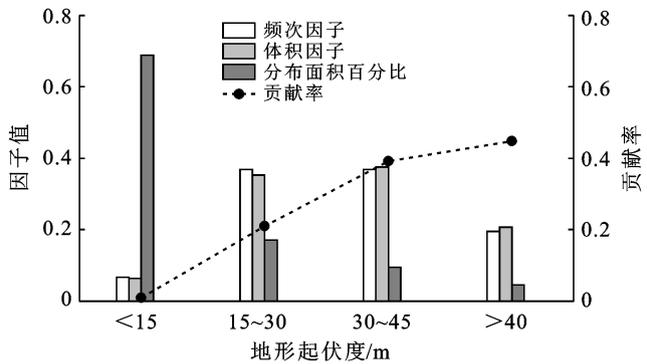


图 6 研究区地形起伏度分级统计图

地表水的组成包含河流、溪流、水库和湖泊等陆地表面上的水体,为分析崩塌与地表水的关系,对地表水建立两种尺度的缓冲区,将 4 级支流及以上级别河流分别以缓冲 0—20 m 和 20—50 m 作为一级和二级缓冲区,将四级支流以下级别河流和封闭水域分别缓冲 0—10 m 和 10—30 m 作为一级和二级缓冲区。见图 7,在用于模型构建的 364 个崩塌隐患点中,分别有 33 个和 17 个崩塌点位于一级缓冲区和二级缓冲区范围内,说明崩塌灾害与地表水具有影响相关关系,且距离地表水较近的区域崩塌发生的概率较大。在地表水对崩塌发生贡献率值计算中,一级缓冲区的贡献率比二级缓冲区的贡献率大(见封 3 附图 4b)。

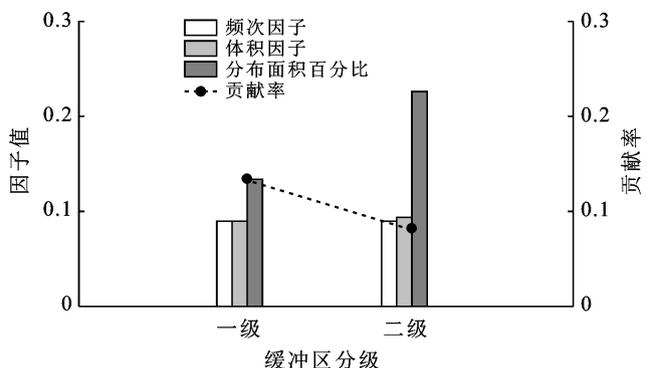


图 7 研究区距地表水体距离分级统计

(2) 降雨量。降雨在非饱和残积土边坡中的入渗将改变孔隙水压力、含水率的分布和土体力学性质;边坡蓄满产流和超渗产流均会在坡面形成径流,对坡面进行冲刷、侵蚀,改变坡体原有形态结构,因此降雨诱发崩塌是一个动态过程。区域性斜坡失稳阈值与降雨总量、降雨强度和降雨历时有关。统计区内 33 个气象站的年降雨量,采用克里金法将点插值为表面栅格。如图 8 所示,1 820 mm 年降雨量是滑坡灾害最为敏感的区域,其次为 1 795 和 1 845 mm 年降雨量区域。由于崩塌的发生是地层岩性、坡形等内在因素和降雨、地震、人类活动等外在因素共同长期作用的结果,因此并非年降雨量大的区域对降雨型崩塌的贡献程度最高(见封 3 附图 4c)。

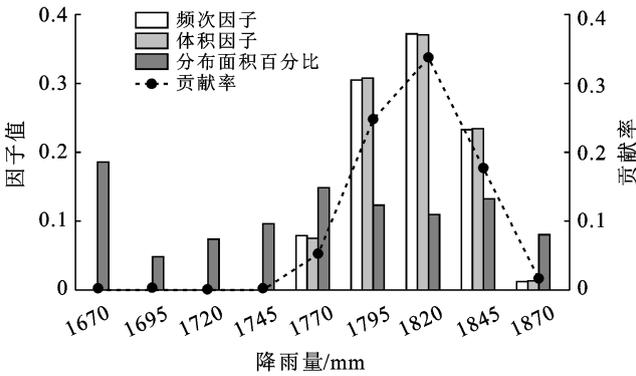


图 8 研究区降雨量分级统计

3.3.3 崩塌与地层岩性的关系 地层岩性是形成崩塌滑坡的物质基础,不同岩性中崩塌发育程度不同,是斜坡孕灾体重要的内在因素。研究区一带花岗岩风化壳深厚,崩塌主要发生在全、强风化层内,滑动面多在同种类均质体结构坡体土层中,滑动面受控于坡形和降雨入渗后风化层强度的降低,剪出口受削坡基面和侵蚀基面控制。研究区大面积分布花岗岩侵入,局部为变质岩,共出露 12 套地层。如图 9 所示,志留纪二长花岗岩(S_{3yg})地层分布面积较广,崩塌发生频次和面积最大,贡献率最高,崩塌地质灾害极为发育。晚侏罗世二长花岗岩(J_{3yg}^1)和第三系宝月组(E_{2by})地层分布面积和崩塌发生频次次之。早白垩世花岗岩(K_{1yg}^1)、石炭系测水组(C_{1c})、元古界云开岩群(P_{1y})、分布面积较小,崩塌地质灾害发育程度较低。石炭系石碇子组(C_{1s})、壶天组(C_{2y})、二叠系栖霞组(P_{2q})、白垩系大塍山组(K_{2dl})、三叠系大冶组(T_{1d})、小坪组(T_{3x})基本不发育。由统计结果发现各个地层岩性区域内贡献率差异较大,说明崩塌与地层岩性的关系较为密切(见封 3 附图 5a)。

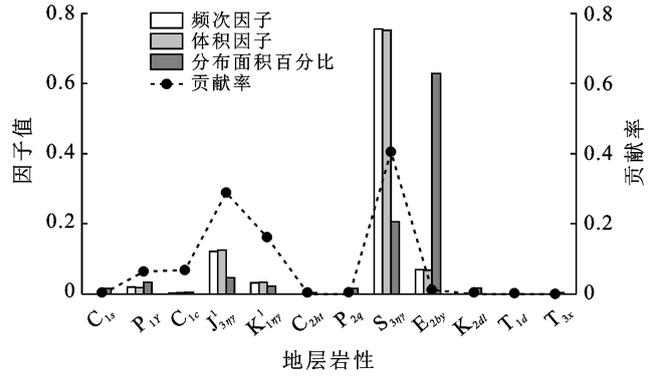


图 9 研究区地层岩性分级统计

3.3.4 崩塌与土地利用类型的关系 研究区内村民削坡建房和城市化改造工程进行了数量较多的切坡、开挖工程,土地利用类型能反映研究区内自然环境的分布特征和人类活动干扰的区域痕迹,人类工程活动较弱,人口密度较小,地质灾害发育程度较弱。人类工程活动干扰对斜坡的稳定性造成影响,植被覆盖类型对斜坡的水文地质效应和力学效应会同时产生有利和不利的作用。土地利用数据将土地覆盖类型综合为 8 个类别,分别为树木、农作物、灌木、裸地、建筑区域、草地、水域、水淹植被。崩塌与土地覆盖类型图层叠加统计后的结果如图 10 所示。树木覆盖区域的贡献率最大,其次是草地覆盖区域。崩塌发生在树木覆盖区域的频次最高,落入建筑区域的崩塌点频次次之。造成建筑区域频次因子较高的原因在于崩塌点定位误差和土地覆盖数据精度偏差,造成崩塌点可能落入附近的承载体范围内(见封 3 附图 5b)。

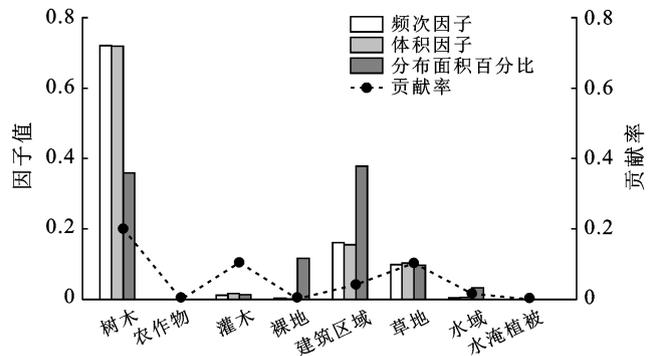


图 10 研究区土地利用类型分级统计

3.4 叠加分析

在计算各二级指标因子贡献率的基础上,利用公式(4)计算各一级指标因子敏感性系数,从而利用公式(5)–(6)计算各一级和二级指标因子权重(表 1),坡度、高程和地形起伏度对崩塌灾害发生敏感性较高,一级指标因子权重较大,说明地形地貌是诱发崩

塌灾害的控制性因素。坡向、地层岩性、降雨量在崩塌灾害易发性评价中敏感性较低。

表 1 研究区敏感性系数与权重计算结果

影响因子	敏感性系数	一级指标因子权重
高程	0.112 0	0.206 0
坡度	0.144 6	0.265 9
坡向	0.001 1	0.002 0
地形起伏度	0.105 0	0.193 1
距地表水体距离	0.094 9	0.174 5
降雨量	0.032 2	0.059 2
地层岩性	0.018 3	0.033 7
土地利用类型	0.035 7	0.065 6

根据所构建的贡献率模型,利用 ArcGIS 加权总和工具将所有赋权值后的栅格图层进行叠加运算,叠加值结果范围为 0.031 1~0.527 9,其中值越大说明崩塌易发性程度越高。为与不同模型的孕灾程度和评价精度结果形成对比^[7-8],采用自然间断点分级法^[21]将叠加值重分类为 5 个等级,分别为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区和极低易发区 5 个崩塌易发区,相应叠加值范围为 0.280 5~0.527 9, 0.212 4~0.280 5, 0.150 1~0.212 4, 0.099 5~0.150 1, 0.031 1~0.099 5,研究区崩塌灾害易发性评价结果如封 3 附图 6 所示。研究区内崩塌极高易发区和高易发区主要集中在研究区东部和南部低山丘陵区,其中低山丘陵与冲积平原过渡相接的山麓带分布极高易发区较为集中,崩塌易发性由山地线范围外层边缘向中心逐级降低。评价结果符合研究区内斜坡坡脚和丘陵西麓由于大量的人类工程活动集中引起崩塌灾害的发生规律。

3.5 精度评价

将用于模型构建的 364 个崩塌点与崩塌易发性

分级区划结果进行空间链接,分析崩塌与易发性区划分级面积的空间关系。统计结果详见表 2,有占崩塌总数 79.7%和 5.1%的历史崩塌分别发生在占研究区总面积 18.0%的极高、高易发区和占研究区总面积 71.4%的低、极低易发区内。崩塌比率为崩塌密度与分级面积比例的比值,崩塌比率值随易发性升高不断增大,因此,易发性划分结果是比较可靠的。

表 2 研究区各等级崩塌分布统计结果

易发性等级	分级面积比例	崩塌密度/%	崩塌比率
极低易发区	0.49	0.86	0.02
低易发区	0.23	4.23	0.18
中易发区	0.11	15.23	1.46
高易发区	0.10	23.54	2.22
极高易发区	0.07	56.14	7.57

为了评价本文模型对于崩塌地质灾害的预测能力,成功率和预测率被广泛应用于滑坡灾害易发性评价精度检验,本文采用 ROC 曲线对模型进行精度验证^[5,7-10]。将所有栅格根据叠加值的大小等间距地划分成 100 个区间,从叠加值最大区间开始,逐个统计每个区间内的崩塌累计发生频率,绘制崩塌频率随栅格累计频率变化的曲线即为 ROC 曲线。为了表达模型评价效果,通常用 ROC 曲线下面积 AUC 作为定量衡量模型预测准确程度的指标,AUC 值介于 0~1 范围,AUC 值越接近 1,说明模型预测效果越准确^[25]。本文模型成功率和预测率曲线如图 11 所示,检验结果显示模型成功率和预测率曲线的 AUC 值分别为 0.913 和 0.926,均大于 0.75。检验结果表明模型运用在区域崩塌灾害易发性预测中效果较好,且能够结合评价指标体系和崩塌灾害发育特征定量计算指标因子权重,模型在实际应用中具有实践意义。

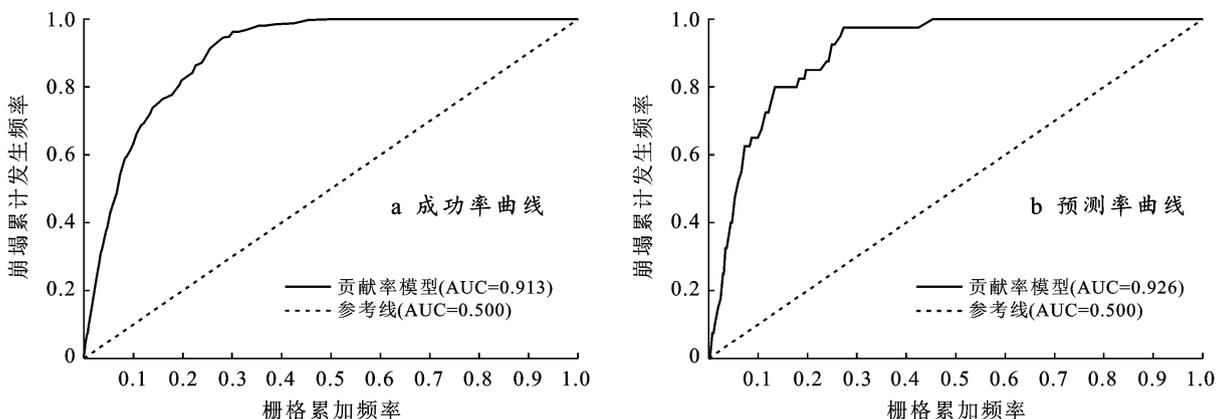


图 11 研究区模型计算崩塌易发性成功率和预测率曲线

4 结论

(1) 以广州市白云区作为研究对象,分析和总结研究区内风化残积土崩塌形成机理与破坏模式,分别从斜坡内部条件和外界诱发作用两方面选取高程等 8 个因子作为崩塌易发性评价指标体系。依据考虑频率因子和体积因子的各二级指标因子综合贡献率分布差异性,定量分析崩塌灾害的空间分布特征。

(2) 利用贡献率模型计算各二级指标因子权重,结果表明地形地貌中的坡度、高程和地形起伏度对崩塌发育影响较大,符合崩塌实际分布规律。模型通过计算二级指标因子的修正样本差衡量崩塌灾害的敏感性,从而确定崩塌与各二级指标因子的权重关系,该方法避免了权重量化计算的主观性,合理地考虑崩塌与各单因子的关系。

(3) 根据贡献率和敏感性系数计算结果确定各二级指标因子权重,基于 GIS 的空间叠加方法进行研究区崩塌易发性评价,崩塌比率随易发性等级增大而明显增大,极高易发区和较高易发区崩塌比率占总崩塌比率超过 85%,且模型成功率和预测率的 AUC 值分别达到 91.3%和 92.6%,评价模型能客观准确地揭示崩塌空间分布统计规律。

[参 考 文 献]

- [1] 朱耀琪.中国地质灾害与防治[M].北京:地质出版社,2017:71-72.
- [2] 国土资源部地质环境司,国土资源部宣传教育中心.中国地质灾害与防治[M].北京:地质出版社,2003:184-185.
- [3] 李萍,叶辉,谈树成.基于层次分析法的永德县地质灾害易发性评价[J].水土保持研究,2021,28(05):394-399,406.
- [4] Sreedevi N, Karthikeyan J. Landslide hazard zonation mapping using power method based AHP for Saklespur, India [J]. Indian Journal of Ecology, 2021,48(1):23-29.
- [5] 许嘉慧,张虹,文海家,等.基于逻辑回归的巫山县滑坡易发性区划研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2021,38(02):48-56.
- [6] 钱立辉,臧淑英.基于格网 GIS 与灰色关联模型的崩滑流灾害孕灾环境研究[J].地理信息世界,2020,27(6):64-68,74.
- [7] 张俊,殷坤龙,王佳佳,等.三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):284-296.
- [8] 郭子正,殷坤龙,付圣,等.基于 GIS 与 WOE-BP 模型的滑坡易发性评价[J].地球科学,2019,44(12):4299-4312.
- [9] Pradhan B. A comparative study on the predictive ability

of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS [J]. Computers & Geosciences, 2013,51:350-365.

- [10] Raghuvanshi T K, Negassa L, Kala P M. GIS based grid overlay method versus modeling approach: A comparative study for landslide hazard zonation (LHZ) in Meta Robi District of West Showa Zone in Ethiopia [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2015,18(2):235-250.
- [11] 李刚,赵新生,封丽华,等.基于模糊评价法优选泥石流防治方案:以青河县泥石流为例[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):18-23.
- [12] 吴森,李虎杰,陈国辉,等.基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):26-31.
- [13] 任凯珍,于森,王晟宇,等.北京地区崩塌灾害成灾因子敏感性分析[J].人民长江,2017,48(7):60-64.
- [14] 林金煌,张岸,邓超,等.闽三角城市群地质灾害敏感性评价[J].地球信息科学学报,2018,20(09):1286-1297.
- [15] 崔玉龙,魏进兵,邓建辉,等.利用贡献率分析法研究河道型水库两岸滑坡发育规律[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(3):50-56.
- [16] 吴彩燕,乔建平.三峡库区云阳一巫山段坡向因素对滑坡发育的贡献率研究[J].四川大学学报(工程科学版),2005,37(4):25-29.
- [17] 金刚,王运生,刘江伟,等.白龙江流域斜坡坡向滑坡贡献率研究[J].西北师范大学学报(自然科学版),2019,55(5):100-105.
- [18] 武鑫,赵浩然,郑秀清,等.基于改进突变理论的滑坡稳定性分级判别[J].自然灾害学报,2019,28(4):122-130.
- [19] 陈顺满,吴爱祥,王黎明.基于贡献率和未确知测度理论的矿柱稳定性预测[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(5):697-703.
- [20] 单博,陈剑平,王清.基于最小熵理论和未确知测度理论的泥石流敏感性分析[J].岩土力学,2014,35(5):1445-1454.
- [21] 易靖松,张勇,程英建,等.大巴山区顺层岩质滑坡发育影响因素的贡献率及易发性评价[J].水土保持通报,2019,39(4):275-280.
- [22] 刘金山,任凯.广州市地质遗迹研究[M].北京:地质出版社,2008:103-104.
- [23] 曹洪洋,袁颖,贾磊.区域降雨型滑坡灾害预警预报[M].北京:地质出版社,2017:8-10.
- [24] 温美丽,陈瑜,何小武,等.基于 GIS 的崩岗分布及坡向选择性验证[J].中国水土保持科学,2018,16(03):1-7.
- [25] 张纪恺,凌斯祥,李晓宁,等.九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(08):1595-1610.