引文格式：周金,范秋雁,朱真. 广西滑坡灾害的空间分布特征及其影响因子研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(9): 40-43. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.09.010

广西滑坡灾害的空间分布特征及其影响因子研究

周　金[1]，范秋雁[1*]，朱　真[2]
（1. 广西大学 资源环境与材料学院，广西 南宁 530004；2. 广西地质环境监测总站，广西 南宁 530022）

摘　要：基于广西地质灾害信息系统中的历史滑坡灾害点数据，利用空间自相关方法分析了广西滑坡地质灾害的空间分布特征，并运用地理探测器探究了广西滑坡地质灾害空间分布特征及其影响因子的关系。结果表明：①广西滑坡地质灾害集中分布在东部地区，且危险性明显高于西部地区；②降雨对广西滑坡灾害空间分异的解释力最强，高程、地形起伏度、岩性、断裂与人类活动也具有一定的解释力；③各因子之间交互作用对滑坡灾害的空间分异性影响表现为双因子增强与非线性增强，大部分因子之间交互作用的结果为非线性增强，其中岩性与降雨交互作用的解释力最大（q=0.184 0）。研究结果可为广西滑坡地质灾害的防治工作提供参考。

关键词：广西；滑坡灾害；空间自相关；影响因子；地理探测器
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）09-0040-04

Research on the Spatial Distribution Characteristics and Influence Factors of Landslide Disasters in Guangxi

ZHOU Jin[1], FAN Qiuyan[1], ZHU Zhen[2]
(1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Guangxi Geological Environment Monitoring Station, Nanning 530022, China)

Abstract: Based on the historical landslide disaster point data in Guangxi geological disaster information system, we used spatial autocorrelation method to analyze the spatial distribution characteristics of Guangxi landslide geological disasters, and explored the relationship between spatial distribution characteristics and influence factors of landslide geological hazards in Guangxi by means of GeoDetector. The research results show that ①the landslide geological disasters in Guangxi are concentrated in the eastern region, and the risk of landslide geological disasters in the eastern region is obviously higher than that in the western region. ②Rainfall has the closest relation to the spatial specificity of landslide disasters in Guangxi. Elevation, topographic fluctuation, lithology, fracture and human activity factors also have a certain relation. ③The interaction influence between various factors on the spatial specificity of landslide disasters in the study area is manifested by the two-factor enhancement and nonlinear enhancement. Most of the interactions between the factors resulted in a nonlinear enhancement. Among them, the interaction between lithology and rainfall has the greatest influence (q=0.184 0). The research results can provide a reference for the prevention and control of landslide geological disasters in Guangxi.

Key words: Guangxi, landslide disaster, spatial autocorrelation, influence factor, GeoDetector

滑坡是指斜坡上的岩土体受降雨、河流冲刷、人工切坡等因素影响，在重力作用下沿斜坡整体或分散向下滑动的现象。广西是滑坡地质灾害多发省份之一，据不完全统计，1950年以来广西已发生滑坡地质灾害超过4 000起，近年来每年灾害数量仍保持在三位数。滑坡地质灾害已成为制约广西经济发展的主要灾种之一。不少学者针对广西全域或局部地区的滑坡地质灾害开展了大量研究，如吴福[1]等在总结膨胀岩破坏模式、机理与特点的基础上，提出了膨胀岩滑坡地质灾害的具体防治措施；陈立华[2]、许英姿[3]等基于信息量模型对广西花岗岩与碎屑岩地区的滑坡灾害进行了易发性区划，为广西花岗岩与碎屑岩分布区的滑坡地质灾害预警与防治规划提供了技术参考；侯智庭[4]等以栅格为单元基于逻辑回归模型与ArcGIS分析了广西梧州滑坡地质灾害的发生概率并进行了滑坡灾害危险性划分；许英姿[5]、李岳顺[6]、谢敏[7]、杨军[8]、温泳

收稿日期：2022-03-28；修回日期：2022-08-16。
项目来源：广西地质环境图系地质灾害易发分区研究资助项目（BB33900042）。
第一作者简介：周金（1994—），硕士研究生，研究方向为地质灾害防治与岩土，E-mail：2646533349@qq.com。
通信作者：范秋雁（1961—），博士，教授，教授级高级工程师，主要从事岩土工程方向的教学与科研工作，E-mail：qiuyan@gxu.edu.cn。

心[9]等分析界定了广西不同地区滑坡地质灾害的临界雨量，为广西滑坡地质灾害预警预报工作提供了一定的理论依据；范皓然[10]运用统计分析与数值模拟等方法分析了降雨对含泥质夹层碎屑岩滑坡灾害的影响；刘彦花[11]等基于粗糙集与GIS组合的方法对广西梧州的滑坡地质灾害进行了风险评估，为类似地区的滑坡地质灾害风险性评估提供了借鉴；赵轩[12]、杨向敏[13]、朱真[14]等基于不同技术与算法开发的地质灾害监测系统经过验证，对广西地质灾害预警预报具有较好的时效性与准确性。由此可知，目前针对广西滑坡地质灾害的研究大多聚焦于单一因子的影响以及广西全域或局部典型地区的滑坡地质灾害的易发性、风险性评估与区划，对于广西滑坡地质灾害的空间分布格局和影响因子的定量分析较少。因此，本文着眼于广西全域，以广西地质灾害信息系统中的滑坡数据为基础，通过空间自相关方法分析了广西滑坡地质灾害的空间分布特征，再利用地理探测器[15]定量分析了广西滑坡地质灾害与降雨、岩性、人类活动等影响因子的关系，以期为广西的滑坡地质灾害防治工作提供一定的理论依据。

1　研究区概况

广西是我国唯一一个沿海沿边省份，地理位置优越，全区陆地总面积为23.67万km^2，下辖14个地级市；位于我国地势第二阶梯云贵高原东南边缘、两广丘陵西部，地势整体西北高、东南低，山地面积占比达60%以上；地貌总体为山地丘陵盆地，西、北部处于云贵高原边缘，以高山峡谷为主，海拔较高，地形起伏大，东南、南部以丘陵、平原地貌为主，地形坡度较缓，中部地区为盆地地貌，受弧形山脉的分割，形成众多大小相杂的盆地地貌结构；地处华南板块南端，地质构造复杂，受频繁构造运动影响，褶皱、断层较发育，区内地层发育齐全，从元古界到第四系均有分布，以古生界最为发育，泥盆系分布最广；属亚热带季风气候，北回归线贯穿中部，气候温暖、雨水充足，各地年均降水量为723.9～2 983.8 mm，大部分地区年降水量为1 300~2 000 mm。广西降雨时空分布不均，空间上表现为东部多、西部少，丘陵山区多、平原河谷少，夏季迎风坡多、背风坡少；时间上降水主要集中在夏季，占全年降水量的70%以上，雨量大且集中，受降水影响，广西地质灾害多发生于夏季。脆弱的地质生态环境、集中的暴雨和人类工程活动干扰等因素的共同作用导致广西地质灾害频发。广西滑坡地质灾害点分布见图1。

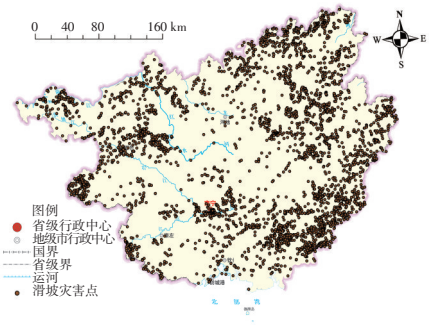


图1　广西滑坡地质灾害点分布图
（审图号：GS(2017)1267）

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

地质灾害的影响因素众多，综合现有数据的可获取性和前人研究成果，本文选取高程、坡度、坡向、地形起伏度、构造断裂、地层岩性、降雨、人类活动作为广西滑坡地质灾害的影响因子开展研究，以分析不同因子对广西滑坡地质灾害的影响。本文采用的广西历史滑坡灾害点数据来源于广西地质灾害信息系统，包含编号、地理位置、经纬度坐标、险情等级等信息；广西DEM数据来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn），分辨率为90 m，通过镶嵌、裁剪等方式获得广西原始高程数据；坡度、坡向和地形起伏度从广西DEM数据中提取；广西多年平均降雨数据、断裂影响分布数据、地层岩性分类数据和人类活动影响因子等资料均来源于广西地质环境监测总站（http://dzhj.dnr.gxzf.gov.cn/）。由于数据来源和空间尺度的不同，本文按照研究区范围对各因子图层进行裁剪，统一投影到CGCS2000坐标系下，并重采样为统一栅格尺度，大小为5 km×5 km。

2.2　研究方法

2.2.1　空间自相关

地质灾害的空间聚集性可在一定程度上反映地质灾害的危险性，即空间上表现为热点聚集的区域地质灾害危险性高，发生地质灾害的可能性大；反之，则地质灾害危险性低，发生地质灾害的可能性小。因此，利用空间自相关分析中优化的热点分析工具可探测广西滑坡地质灾害热点区域与冷点区域，其结果能反映广西滑坡地质灾害的危险程度。优化的热点分析工具可通过输入数据特征中派生的参数来执行热点分析，计算公式为：

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}x_j - \bar{X}\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}}{s\sqrt{\frac{[n\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^{n}\omega_{i,j})^2]}{n-1}}} \quad (1)$$

$$\bar{X}=\frac{\sum_{j=1}^{n}x_j}{n} \tag{2}$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}x_j^2}{n}-\left(\bar{X}\right)^2} \tag{3}$$

式中，x_j 为要素属性值；$\omega_{i,j}$ 为要素 i 与 j 之间的空间权重；n 为要素总数；G_i^* 为统计量，对其进行标准化后 Z 值结果表征广西滑坡地质灾害的危险性。

2.2.2 地理探测器

地理探测器模型是探测事件空间分异性的工具，包括因子探测器、交互探测器、风险探测器和生态探测器4个部分。利用该模型能解决事件空间差异性的影响因子、影响因子对事件空间分异性的解释力大小以及影响因子两两之间交互作用力的解释力等问题。本文主要采用因子探测器与交互探测器来定量分析广西滑坡灾害影响因子的解释力大小和因子之间两两交互作用的解释力。

1）因子探测器用于探测广西滑坡地质灾害事件的空间分异性和某个因子对该事件空间分异性的解释力大小，表达式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}} \tag{4}$$

式中，N_h、N 分别为层 h 下滑坡影响因子总数和研究区样本数；σ_h^2、σ^2 分别为层 h 下滑坡影响因子的方差和全区方差；h 为滑坡影响因子的分层；SSW、SST分别为层内方差之和与全区总方差；q 的值域为[0,1]，值越大表明该因子对广西滑坡地质灾害的解释力越强，反之则解释力越弱，$q=0$ 表明该因子与广西滑坡灾害空间分布无关。

2）交互探测器用于识别不同影响因子之间的相互作用，即评估影响因子两两之间共同作用对广西滑坡灾害空间分异的影响是增强、减弱还是相互独立。两两因子交互作用可分为5种类型（表1）。

表1 交互作用探测

判断依据	交互作用
$\min((X1)、q(X2))>q(X1\cap X2)$	非线性减弱
$\min(q(X1)、q(X2))<q(X1\cap X2)<\max(q(X1)、q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1\cap X2)>\max(q(X1)、q(X2))$	双因子增强
$q(X1\cap X2)=q(X1)+q(X2)$	相互独立
$q(X1\cap X2)>q(X1)+q(X2)$	非线性增强

3 研究结果与分析

3.1 广西滑坡地质灾害的空间分布特征

首先在ArcGIS10.2软件中基于优化的热点分析工具，采用（SNAP_NEARBY_INCIDENTS_TO_CREATE_WEIGHTED_POINTS）聚合方法将邻近滑坡灾害事件点聚合在一起，以创建一个单独的加权点，每个点的权重（Z 值）为该位置聚合事件点的数目；再通过克里金插值法的平滑处理获得整个研究区内任意位置的 Z 值，经归一化处理后得到研究区滑坡地质灾害的危险程度分布（图2），可以看出，Z 值较高区域主要集中在东部地区，玉林、梧州、桂林、南宁等地区属于滑坡地质灾害高易发区；柳州和沿海等地区属于滑坡地质灾害低易发区；部分地级市局部地区也属于滑坡地质灾害高易发区；整体上广西东部地区的滑坡地质灾害危险性明显高于西部地区。

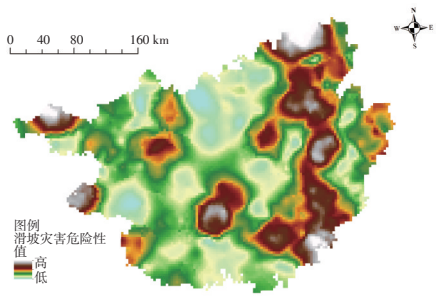


图2 广西滑坡地质灾害危险程度分布图

3.2 广西滑坡地质灾害的影响因子探测

首先在ArcGIS10.2软件的重分类工具中对高程（X_1）、坡度（X_2）、坡向（X_3）、地形起伏度（X_4）、降雨（X_5）、断裂（X_6）、岩性（X_7）、人类活动（X_8）8个因子图层进行分类预处理；再利用创建渔网点工具生成8 949个等间距采样点，通过采样点提取各因子图层栅格单元的数据信息；最后运行地理探测器模型进行定量分析。

3.2.1 单因子影响分析

由地理探测器的因子探测器结果（表2）可知，在0.05显著性水平条件下，高程、地形起伏度、降雨、断裂、岩性、人类活动等因子对广西滑坡地质灾害空间分布有影响，但影响程度具有明显差异。各影响因子对广西滑坡灾害空间分布的解释力排序为：降雨>岩性>高程>人类活动>地形起伏度>断裂。单一因子对广西滑坡地质灾害空间分布差异性的解释力最大为降雨因子（11.74%），最小为断裂因子（0.14%），说明单个因子对广西滑坡灾害空间分布差异性的解释力有限。

表2　因子探测器结果

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
q	0.018 3	0.000 5	0.000 9	0.001 5	0.117 4	0.001 4	0.077 9	0.005 3
P	0	0.421 4	0.335 5	0.0270	0	0.040 1	0	0

3.2.2　双因子交互作用分析

由地理探测器的交互探测器结果（表3）可知，各影响因子之间不是相互独立的，广西滑坡地质灾害的空间差异性是多因子共同作用的结果，因子间交互作用类型包括双因子增强和非线性增强两种，其中高程∩地形起伏度、高程∩降雨、高程∩断裂、高程∩岩性、高程∩人类活动、地形起伏度∩降雨、地形起伏度∩断裂、地形起伏度∩岩性、地形起伏度∩人类活动、降雨∩断裂、降雨∩岩性、降雨∩人类活动、断裂∩岩性、断裂∩人类活动、岩性∩人类活动的交互作用结果表现为非线性增强，降雨∩岩性交互作用结果为双因子增强；从解释力角度来看，高程∩降雨、高程∩岩性、地形起伏度∩降雨、降雨∩断裂、降雨∩岩性、降雨∩人类活动交互作用的解释力均达到10%以上，其中降雨∩岩性交互作用的解释力最大，为18.4%，相较于单一因子的解释力，因子间交互作用对广西滑坡灾害空间分异性的解释力明显提高。

表3　交互探测器结果

	X_1	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
X_1	0.018 3	–	–	–	–	–
X_4	0.024 0	0.001 5	–	–	–	–
X_5	0.167 3	0.126 5	0.117 4	–	–	–
X_6	0.022 0	0.007 2	0.126 0	0.001 4	–	–
X_7	0.104 2	0.087 0	0.184 0*	0.088 2	0.077 9	–
X_8	0.029 3	0.012 6	0.122 7	0.010 2	0.086 6	0.005 3

注：*表示交互作用为双因子增强。

4　结　语

本文采用空间自相关分析与地理探测器分析了广西滑坡灾害的空间分布特征，并对其影响因子进行了定量归因。优化的热点分析表明广西滑坡灾害的空间分布呈现一定的分异格局，高易发区主要集中在东部地区，中部和沿海地区属于低易发区，整体上广西滑坡灾害的危险性程度呈东部高西部低的空间格局。单一因子影响力上，不同因子对广西滑坡灾害空间分异性的解释力差异明显，降雨和岩性的解释力较强，断裂和地形起伏度因子的解释力较弱。因子间存在交互作用，对广西滑坡灾害空间分异性的解释力表现为双因子增强和非线性增强，其中降雨与岩性因子交互作用的解释力最强（18.40%）。

地质灾害的影响因素众多，本文仅从高程、坡度、坡向、地形起伏度、降雨、断裂、岩性、人类活动等8个因子出发探讨广西滑坡灾害空间分异的影响机制，而未研究水系、土壤、土地利用类型等因子对广西滑坡灾害的影响，后续需展开研究；同时，使用地理探测器模型时，针对栅格数据的空间尺度和因子之间的分类预处理还没有明确的划分标准，大多依据经验与前人成果，具有一定的主观性，因此针对数据空间尺度和因子空间分类的划分标准也是今后开展研究的方向之一。

参考文献

[1] 吴福,朱真,徐炳连. 广西膨胀岩滑坡地质灾害特性与整治技术研究[J]. 岩土工程技术,2018,32(1):50-54

[2] 陈立华,叶江,魏传健,等. 基于ArcGIS与信息量法的滑坡易发性评价[J]. 广西大学学报(自然科学版),2016,41(1):141-148

[3] 许英姿,卢玉南,李东阳,等. 基于GIS和信息量模型的广西花岗岩分布区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报,2016,24(4):693-703

[4] 侯智庭,杨盼盼. 梧州市滑坡灾害危险性评价[J]. 钦州学院学报,2016,31(7):71-77

[5] 许英姿,卢玉南,范广,等. 降雨对广西碎屑岩地区地质灾害的影响研究[J]. 工程地质学报,2016,24(2):181-186

[6] 李岳顺. 降雨对广西滑坡地质灾害的影响研究:以梧州地区为例[D]. 南宁:广西大学,2014

[7] 谢敏,陆甲,李艳兰,等. 广西泥石流和滑坡地质灾害临界雨量界定方法[J]. 气象研究与应用,2018,39(1):15-17

[8] 杨军. 广西梧州市万秀区区域降雨型滑坡危险性区划及降雨临界值研究[D]. 桂林:桂林工学院,2007

[9] 温泳心. 广西浦北县滑坡灾害易发性评价及降雨阈值研究[D]. 南宁:广西大学,2020

[10] 范皓然. 降雨对广西含泥质夹层碎屑岩边坡的稳定性影响研究[D]. 南宁:广西大学,2015

[11] 刘彦花,叶国华. 基于粗糙集与GIS的滑坡地质灾害风险评估:以广西梧州为例[J]. 灾害学,2015,30(2):108-114

[12] 赵轩. 滑坡灾害监测预警系统研发[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021

[13] 杨向敏,吴福,陈柏基. 地质灾害预警预报技术创新与应用[J]. 地理空间信息,2021,19(3):112-114

[14] 朱真,江思义,刘小明,等. 基于广播RTK边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统及应用分析[J]. 水文地质工程地质,2021,48(5):176-183

[15] 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