引文格式：汤顺洪,陈丽佳. 利用信息量法评价岩溶地面塌陷危险性[J]. 地理空间信息, 2025, 23(11): 74-77. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.11.015

利用信息量法评价岩溶地面塌陷危险性

汤顺洪[1]，陈丽佳[2*]
（1. 广东省工程勘察院，广东 广州 510080；2. 广东地下管网工程勘测公司，广东 广州 510080）

摘　要：以粤东山区梅州市石灰岩矿山分布区域为研究对象，采用信息量法和GIS技术对矿山岩溶地面塌陷灾害进行危险性评价。选取岩性、地下水动力条件、地壳稳定性、第四系厚度、地下活动强度（与矿井距离）等指标构建岩溶地面塌陷危险性评价体系，并结合GIS技术进行空间数据采集、管理和分析，将梅州市岩溶地面塌陷风险划分为不稳定、较稳定和稳定3个等级，其中稳定区域的分布范围最广，主要位于基岩裸露的低山与丘陵地带。研究成果可为城市地质安全评估与预测以及灾害防治策略的制定提供理论支撑。

关键词：信息量法；岩溶；地面塌陷；危险性；防治
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）11-0074-04

Risk Assessment of Karst Ground Collapse Based on Information Quantity Method

TANG Shunhong[1], CHEN Lijia[2]
(1. Guangdong Engineering Investigation Institute, Guangzhou 510080, China;
2. Guangdong Underground Pipeline Network Engineering Survey Company, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Taking the distribution of limestone mines in Meizhou, a mountainous area in eastern Guangdong Province as the research objects, we used information quantity method and GIS technology to assess the risk of Karst ground collapse disasters. We selected the lithology, groundwater dynamic, crustal stability, Quaternary thickness, and underground activity intensity (distance to mine shaft) to construct risk assessment system for Karst ground collapse, and used GIS technology to conduct spatial data collection, management, and analysis. Consequently, we classified the Karst ground collapse risk in Meizhou into unstable, relatively stable, and stable three levels. The stable zones, which cover the widest distribution, are primarily located in low hills and hilly regions with exposed bedrock. The research findings provide theoretical support for urban geological safety assessment and prediction, as well as the formulation of disaster prevention strategies.

Key words: information quantity method, Karst, ground collapse, risk, prevention and cure

近年来广东山区岩溶地面塌陷灾害频发[1-3]，具有分布范围较广、危害程度高、危险性大的特点。岩溶地面塌陷不仅会破坏矿区及其周边道路和土地，还会导致建（构）筑物形成裂缝甚至倒塌，严重威胁人身和财产安全[4-6]。目前通常采用地下水最优开采和工程治理措施治理喀斯特地表坍塌。部分学者[7-8]对喀斯特地表坍塌问题进行了调研，而操作方便、计算结果易于理解的信息量法仍被广泛应用于岩溶地面塌陷危险性评价中[9]。粤东山区的梅州市富含矿产资源，石灰岩的广泛分布，导致该地区矿山岩溶地面塌陷灾害频繁发生。因此，本文以梅州市石灰岩矿山分布区为研究对象，运用信息量法[10-11]综合评估该区域矿山岩溶地面塌陷灾害的风险程度。为深入评估岩溶地区地面塌陷的潜在风险，本文采用岩石性、地下水动力条件、地壳稳定性、第四系厚度以及地下活动强度（与矿井距离）等指标构建了一套综合危险性评价模型；通过融合GIS技术采集、整理与分析空间数据，进而对梅州市岩溶地面塌陷灾害进行风险级别划分。研究成果可为城市地质灾害危险评估、预测与防治提供理论支持。

1　研究区概况

1.1　地理位置与地质背景

本文聚焦于梅州市境内石灰岩矿藏的分布带，行政辖区涵盖梅县、梅江区、蕉岭县、平远县、兴宁市和五华县；具备便捷的交通网络，包括梅河、梅龙、

第一作者简介：汤顺洪（1972—），本科，高级工程师，主要从事工程测量和变形测量（地铁监测、基坑监测与地质灾害监测）工作，E-mail：281314970@qq.com。
通信作者：陈丽佳（1984—），硕士研究生，高级工程师，注册测绘师，主要从事测绘地理信息应用和管理工作，E-mail：147147215@qq.com。

梅揭等高速公路，国道G205与G206贯穿其中，广梅汕铁路可为该地区提供铁路运输服务，南部三角镇建设有梅县机场。梅州市属亚热带季风气候，日照与降水资源充沛，降雨主要集中于4—9月，年均降雨量为1 400~1 800 mm；6—9月该地区常受台风侵袭，导致暴雨频发。研究区水网密集，河川与峡谷星罗棋布，大多位于韩江中游上游；主要水道为梅江，流量丰沛。梅州市地形总体呈现北部高耸南部低平的格局，以韩江和东江上游区域的山地与丘陵为主轴，台地、阶地和盆地依次分布。

研究区地层构成相对完备，其空间分布显著受地质构造影响与制约。自前泥盆纪地层至第四纪地层广泛分布，其中在侏罗纪地层中分布范围最广。新生代第四纪地层主要集中于梅江及其支流的两岸地区。研究区主体架构由显著的北北东至东西方向的构造带以及北西方向的断层带构成。区内广泛出露基岩裂隙水和松散岩类孔隙水；此外，在各岩溶盆地与河谷区域，碳酸盐岩裂隙溶洞水呈现出分散性分布特征。在隐匿的喀斯特地貌区域内，松散岩石层下伏的孔隙水导致不同区段的含水层含水量差异明显，大部分区域均展现出优良或较优越的含水状况。在岩土工程领域，根据岩石的物理性质与形成过程，可分为质地坚硬的侵入岩与火山岩，半坚硬特性的碳酸岩、碎屑岩以及经历变质作用的岩石。此外，还包括结构较软的红层以及位于山间与山前区域的松散冲积和洪积层，这些构成了工程地质的分区特征。

1.2　岩溶地面塌陷概况

自20世纪80年代以来，梅州市区内记录的岩溶型地面塌陷已逾200起，主要集中于梅县区、蕉岭县、平远县、兴宁市、五华县及梅江区等地，已成为引发地表构筑物损毁和倒塌的关键因素，对居民的生命财产安全构成了重大威胁。梅州喀斯特地貌区地表坍塌现象具有隐蔽性、不可预见性、周期性、集中连发性等特点，在特定地理位置，塌陷现象可能屡次出现，且岩溶地面塌陷灾害常在同一地区的某一时段集中形成灾害群。

2　研究方法

2.1　岩溶地面塌陷危险评估体系

岩溶地面塌陷危险评估体系主要包括确定危险性评价指标和风险度。影响岩溶地面塌陷地质灾害的因素很多且相互联系。根据研究区历史岩溶地面塌陷的位置、范围、密度、强度、地质条件、水文条件等情况，经综合分析，本文选取岩性、地下水动力条件、地壳稳定性、第四系厚度、地下活动强度（与矿井距离）5个指标对岩溶地面塌陷地质灾害进行危险性评估[6]。危险性评估变量见表1。

表1　地面塌陷地质灾害危险性评估变量表

指标	状态	变量	指标	状态	变量
岩性	灰岩	X_1	第四系厚度/m	3~10	X_8
	砂岩、变质岩	X_2		10~25	X_9
	花岗岩	X_3		基岩裸露	X_{10}
地下水动力条件	覆盖岩溶水	X_4	地下活动强度（与矿井距离）/m	100~300	X_{11}
	基岩裂隙水	X_5		300~500	X_{12}
地壳稳定性	稳定或较稳定	X_6		>500	X_{13}
	不稳定	X_7			

2.2　信息量法[12]

设置岩溶地面塌陷发生为 H，影响岩溶地面塌陷地质灾害发生的因素为 X_i，则各因素对地质灾害发生提供的信息量为：

$$I(X_i,H)=\ln\frac{P(X_i,H)}{P(X_i)} \tag{1}$$

式中，$P(X_i,H)$ 为塌陷发生时出现 X_i 的概率。

对单元内各影响指标的信息量进行求和，确定评价单元内的总信息量值[11]：

$$I_i=\sum_{i=1}^{P}\lg\frac{N_i/N}{S_i/S} \tag{2}$$

式中，P 为作用于某一单元的因素总数；N 为参评因子数；I_i 值越大，说明该单元内发生塌陷的概率越大[13]。

2.3　GIS技术

本文采用ArcGIS构建地理信息数据库和属性信息数据库[14]。在危险性评估框架内，通过细致审视评价指标，精确界定所必需的数据范畴及其相应的来源渠道[15]。收集相关的图件和文字资料，将数据整理后输入属性数据库[16]。对清晰度低、内容繁杂的图像进行清绘；对有破损的图像进行修补[17]。为消除原始图像的扫描变形，先通过图像处理软件进行初步处理，再导入MapGIS中进行校准，最后转换成ArcGIS文件。对图像进行矢量化检查修改并建立拓扑关系。充分利用GIS的空间分析功能，完成危险性评价。

3　岩溶地面塌陷危险性评价

3.1　因子图层的栅格化和重采样

该研究区的关键栅格数据包括但不限于：溶洞地面塌陷点的空间分布图、地层的岩性分布图、居民居住点的空间位置图以及测定断层与河流之间距离的地图等[18]。在执行栅格化操作时，必须确定栅格单元的尺寸。本文中栅格单元尺寸通过GIS在岩溶地面塌陷

评估中应用的经典经验公式确定，即

$$G_s = 7.49 + 0.000\,6S - 2.0 \times 10^{-9} + 2.9 \times 10^{-15} \quad (3)$$

式中，G_s 为适宜格网大小；S 为原始等高线地图比例尺的分母。

在评估实际绘图成效的基础上，本文采用边长130 m的正方形网格系统，50 m分辨率DEM数据，对源于DEM的断层映射、矿井位置图以及岩性分布图进行重采样处理。

3.2 栅格化因子图层的重分类

根据实际情况分析，某种因素对岩溶地面塌陷的影响在一个数量范围内是稳定的[19]，因此为准确把握岩溶地面塌陷分布与影响因子之间的关系，需对数据进行重分类。数据重分类遵循类内差异尽可能小、类间差异尽可能大的原则[20]。本文首先将各栅格因子图层按相邻类别间较小的间隔进行预分类；再将预分类的因子图层与岩溶地面塌陷点栅格图层进行叠加，统计岩溶地面塌陷在各因子图层的分布情况；最后根据分布情况进行重分类，得到较客观合理的分类结果。利用ArcGIS的Spatial Analyst模块创建岩溶地面塌陷与各因子类别的统计图。岩性、断层因子重分类结果见图1、2。

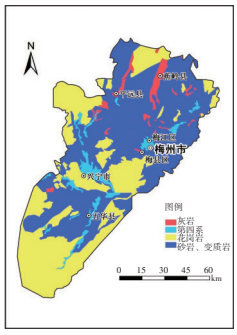


图1 岩性分区图

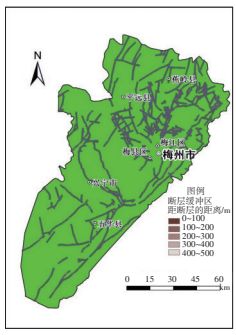


图2 距断层距离分级图

3.3 各因子图层类别信息量计算

通过ArcGIS空间数据库功能，对多个影响因子图层进行叠加，并与岩溶地面塌陷的分布图层相结合。各属性表显示了不同类别的像素数量以及这些像素在各影响因子图层分类中的分布情况。结合研究区岩溶地面塌陷的总像素数量，计算得到各影响因子对岩溶地面塌陷事件发生所贡献的信息量，结果见表2、3。

3.4 各因子图层按信息量重分类

通过GIS的空间叠加分析，对各因素层级进行信息价值的重新归类，以确保各网格层级VALUE指标与重新归类的信息量级相匹配。在此过程中，本文采用自然断裂点分类法生成各因素的信息量图（图3）。

表2 岩性信息量计算结果

OID	VALUE	COUNT	塌陷点密度	塌陷点密度比	信息量值
0	1	211	0.047 393	10.266 983	3.359 940
1	2	277	0.044 400	3.128 279	1.645 369
2	3	2 466	0.008 110	0.175 696	−2.508 846
3	4	3 545	0.003 949	0.855 534	−0.225 104

表3 断层信息量计算结果

OID	VALUE	COUNT	塌陷点密度	塌陷点密度比	信息量值
5	600	5 355	0.003 361	0.728 179	−0.457 634
2	300	228	0.004 386	0.950 146	−0.073 779
1	200	223	0.004 484	0.971 450	−0.041 788
0	100	210	0.009 524	2.063 175	1.044 866
3	400	251	0.011 952	2.589 243	1.372 553
4	500	232	0.021 552	4.668 822	2.223 059

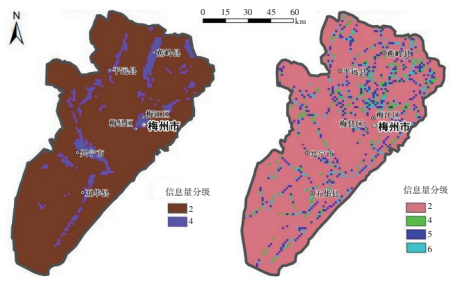


图3 岩性和断层信息量分布图

3.5 各信息量图层叠加分析与重分类

通过栅格计算器执行加法运算，综合各信息量图层数据，进而确定每个评价单元的信息量总和。据此，绘制岩溶地面塌陷的风险评分图（图4），其中信息量总和较高的区域，表明各相关因素相互作用对于岩溶地面塌陷发生的正向影响较大，相应地，该区域发生塌陷的可能性亦随之增加。通过精确评估，本文确定了针对危险性评分图层的最优划分标准，将其划分为0~7分、7~10分、10~21分3个区间。基于此，对岩溶地区地表塌陷风险评分图进行重新划分，将其细化为稳定地带、相对稳定地带和不稳定地带3个等级，进而构建一套岩溶地表塌陷灾害风险等级划分图[21]。经过深度整合，将岩溶地面塌陷检测数据与岩溶地面塌陷灾害风险等级分布图进行叠加（图5），结果表明处于高度和极高度风险等级的岩溶地面塌陷点位占比达80%，表明灾害风险分级的精确度较高。

岩溶地面塌陷灾害风险等级分布图呈现的特征为：①梅州地区易于发生岩溶地面塌陷的岩性为石炭系壶天群组、二叠系栖霞组灰岩以及灰岩分布区周围砂岩夹灰岩区，零星分布于研究区内，面积占比为5.23%；②覆盖性岩溶水分布区易发生岩溶地面塌陷，面积占比为5.12%；③第四系厚度为3~10 m，即第四系厚度小于10 m极易发生岩溶地面塌陷，面积占比

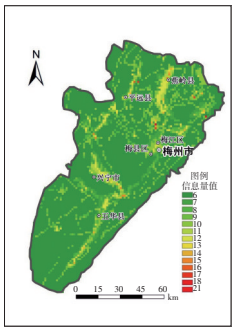


图4　岩溶地面塌陷危险性得分图

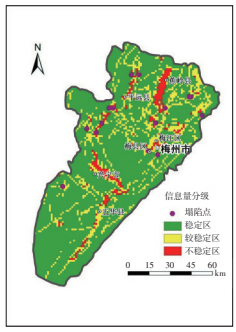


图5　岩溶地面塌陷危险性验证图

为3.51%；④距断层距离小于150 m，面积占比为3.63%；⑤距矿井距离小于500 m，面积占比为0.86%，岩溶地面塌陷沿矿井周边分布；⑥地壳稳定性的信息量较小，影响较小；⑦易发区面积虽然较小，但危险性等级较高，较高、极高危险性等级区域的面积占比分别为19.13%和5.10%，说明梅州市有将近25%的地区为岩溶地面塌陷发育较不稳定—不稳定区域，应当加强防范措施。

4　结　论

本文深入探讨了梅州地区矿山岩溶地面塌陷的历史演变、生成环境、发展规模以及其造成的损害，并构建了成因模型。利用GIS技术和信息量分析方法对矿山岩溶地面塌陷灾害进行了风险评估。研究结果揭示了岩溶地面塌陷地质灾害的风险评估指标，通过剖析控制喀斯特地貌表面塌陷的关键因素，完成了灾害危险性的区域划分，为该区域的地表塌陷预测与治理提供了坚实的理论支撑。

1）地表塌陷的产生依赖于3个核心要素，即喀斯特地貌的发育程度、地下水的流动、覆盖层性质及其沉积厚度。

2）研究区喀斯特地貌地表塌陷的空间分布特征为：地表塌陷点的空间分布与第四纪地层的岩性及其厚度存在显著相关性；塌陷事件频繁出现在河流、湖泊等低地以及紧邻水体的区域，塌陷现象主要集中于石灰岩矿区周边的矿井附近；塌陷活动往往在水位波动显著的季节以及地下水降落漏斗影响范围内发生。

3）该区域地表沉陷的成因机制除潜在的侵蚀效应外，还涵盖超负荷作用、承载压力作用和渗透压强影响等多种因素。

4）依据风险区域的划分成果，地表沉陷的风险性（即可塌陷性）被细分为3个级别。稳定性范畴可被细分为稳定区、较稳定区和不稳定区3个等级。

参考文献

[1] 邓志德,邱锦安,刘燕辉,等. 基于InSAR技术的岩溶塌陷区地表形变监测应用研究[J]. 资源信息与工程,2024,39(1):34-40

[2] 李明,周振钊,吴丽霞. 清城区岩溶地面塌陷发育现状及形成机理研究[J]. 地下水,2022,44(6):170-173

[3] 许世龙,何宏伟,卢艺开,等. 广东某凹陷式开采的矿山诱发地面塌陷研究[J]. 世界有色金属,2022(15):37-39

[4] 黄文龙. 岩溶地面塌陷区地下水监测方法探究:以广东肇庆地区某自然村为例[J]. 地下水,2021,43(1):47-48

[5] 赵鹏,李小罗,钟兆泓. 广东凡口铅锌矿地面塌陷成因及分布规律[J]. 现代矿业,2017,33(7):300-304

[6] 刘江龙. 广州市地面塌陷成灾机制与危险性评价[D]. 广州:广州大学,2006

[7] 李建朋,聂庆科,刘泉声,等. 基于权重反分析的岩溶地面塌陷危险性评价方法研究[J]. 岩土力学,2018,39(4):1 395-1 400

[8] 罗卫民. 黔中地区岩溶塌陷形成机理及危险性评价研究:以清镇市站街镇为例[D]. 贵阳:贵州大学,2021

[9] 李军,杨毅,李扬清,等. 基于信息量模型的册亨县滑坡易发性评价[J]. 中国资源综合利用,2024,42(6):85-89

[10] 李龙海,谢鹏,何列松,等. 面向非关系型数据库的时空数据信息量平衡索引方法[J]. 测绘科学,2022,47(4):160-168

[11] 吴勇庆. 基于加权信息量方法的汕头市地质灾害易发性评价[J]. 地下水,2022,44(6):165-169

[12] 史峻丞. 基于GIS的阳春市地质灾害风险评价[D]. 南昌:东华理工大学,2023

[13] 杜培军,郭达志,方涛,等. GIS在开采沉陷领域应用及与专业模型的结合[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2003,28(4):463-467

[14] 马天华,廖禄云,陈国辉,等. 基于三维倾斜摄影及GIS技术的华蓥山康养城地质环境危险性评价[J]. 四川地质学报,2022,42(4):695-700

[15] 刘江龙,刘文剑,吴湘滨,等. 基于GIS广州市主城区地面塌陷危险性评价[J]. 工程地质学报,2007,15(5):630-634

[16] 光磊. 基于GIS的武隆县滑坡地质灾害危险性评价研究[D]. 重庆:西南师范大学,2005

[17] 雷征,王睿,梁春丽. 广西北部湾经济区乡村性评价与时空分异研究[J]. 地理空间信息,2024,22(7):12-17

[18] 张红,李玥,邓雯,等. 利用网络游记分析成都市旅游景区空间结构[J]. 地理空间信息,2024,22(7):31-35

[19] 江光光. 利用多源数据识别宁乡产业园区空间范围[J]. 地理空间信息,2024,22(7):93-96

[20] 王劲骥. 珠三角北部地区岩溶地面塌陷危险性评价[J]. 地球,2013(4):52

[21] 马海会. 临沂市区岩溶地面塌陷成因机理与防治对策研究[D]. 山东青岛:山东科技大学,2010