

基于多源遥感数据的澄海区地质灾害风险动态评价

梁德杰, 黄国强*

(广东省地质局汕头地质调查中心, 广东 汕头 515031)

摘要:广东省汕头市澄海区作为广东省重要的沿海区域地质环境复杂, 地质灾害风险评价对区域可持续发展具有重要意义。通过集成 Landsat 8/9 与 Sentinel-1/2 及 SRTM 等多源遥感数据, 结合地质构造与气象水文及历史灾害点数据, 构建包含致灾因子与孕灾环境和承灾体脆弱性的多层级风险评价指标体系。运用主成分分析与独立成分分析相结合的特征融合方法建立多因子耦合的地质灾害风险动态评价模型。采用此方法对广东省汕头市澄海区地质灾害进行风险评价, 结果表明澄海区地质灾害风险呈现显著的空间分异特征, 极高风险区主要分布在北部丘陵的陡坡地带, 占总面积的 8%。动态评价显示 2014-2024 年间澄海区地质灾害风险总体呈上升趋势, 极端降水事件增加导致高风险区范围扩大 15%, 基于风险分区结果需建立分区分管的监测预警体系, 并提出三级防治分区分管策略, 为澄海区地质灾害防治提供科学依据。

关键词:多源遥感数据; 地质灾害; 风险评价; 动态监测; 澄海区

中图分类号: P642. 21

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)11-0093-7

0 引言

地质灾害作为自然灾害的重要组成部分严重威胁人民生命财产安全和社会经济发展, 广东省汕头市澄海区位于广东省东北部韩江三角洲平原, 北部丘陵起伏、南部平原开阔、沿海台地发育。区域内地质构造相对复杂。受亚热带季风气候影响, 多年平均降水量达 1600-2200mm, 且集中降水。加之近年来, 城市化进程加快与人类工程活动频繁, 导致滑坡与崩塌及地面沉降等地质灾害呈多发态势。传统地质灾害风险评价主要依赖野外调查和历史资料分析, 该方法存在时效性差与覆盖范围有限等缺点。遥感技术具有大范围与多时相及多光谱的观测优势, 能够实现地质灾害风险的量化动态监测, 通过整合光学遥感与雷达遥感及数字高程模型等多源数据可以更加准确与及时地识别和评价地质灾害风险, 为区域防灾减灾提供科学依据。

1 研究区概况与数据源

1.1 澄海区地理环境特征

澄海区地形地貌具有明显的分带性特征, 北部为海拔 150-300m 的低山丘陵区, 占总面积的 35%, 坡度多在 15-35° 之间, 主要由花岗岩与砂岩构成; 南部为海拔 5-20m 的冲积平原, 占 45%, 地势平缓开阔, 土壤肥沃深厚; 沿海为海拔 20-80m 的台地, 占 20%, 边缘多发育陡峭的台地崖。区域气候属亚热带海洋性季风气候, 年平均气温 21.5℃, 降水集中在 4-9 月, 年际变化显著。地质构造上位于南澳-汕头断裂带东南侧, 新构造运动活跃, 断裂发育密集, 岩体风化强烈^[1]。土地利用以耕地和建设用地为主, 分别占 38% 和 31%, 林地占 23%, 水域占 8%。近年来, 工程建设活动频繁, 山体开挖与填海造陆等人为活动改变原有地形地貌, 增大了地质灾害发生的不稳定性。

1.2 多源遥感数据获取

遥感数据采用 Landsat 8/9 与 Sentinel-1/2

表 1 澄海区多源遥感数据集参数表

数据类型	数据源	空间分辨率	时间范围	光谱信息	主要用途
遥感影像数据	Landsat 8/9	30m	2014-2024 年	11 个光谱波段	土地利用变化和植被覆盖度动态监测
	Sentinel-1	10m	2014-2024 年	C 波段雷达	地表形变监测, 识别潜在滑坡区域
	Sentinel-2	10-60m	2016-2024 年	13 个光谱波段	地物分类和植被指数计算
地形数据	SRTM DEM	30m	2000 年	数字高程模型	提取坡度、坡向、地形起伏度等因子
辅助数据	土壤普查	乡镇级别	2020 年	12 类土壤属性	土壤类型、质地、厚度分析
	气象观测	30m 插值			
历史数据	地质灾害点	点位数据	2000-2024 年	156 个灾害点	模型训练与验证
处理工具	软件平台	—	—	ENVI5. 6、 ArcGIS10. 8、 PyTorch1. 10. 0	数据预处理与模型构建

及 SRTM 等多源数据,时间跨度涵盖 2014-2024 年。Landsat 8/9 影像空间分辨率 30m,包含 11 个光谱波段,重访周期 16 天,主要用于土地利用变化和植被覆盖度动态监测,Sentinel-1 雷达数据采用 C 波段,重访周期 6 天,空间分辨率 10m,通过干涉测量技术监测地表形变识别潜在滑坡区域。Sentinel-2 光学影像包含 13 个光谱波段,空间分辨率 10-60m,主要使用 10m 分辨率的可见光-近红外波段进行地物分类和植被指数计算。数据预处理采用标准化流程:辐射校正通过 ENVI5.6 实现 DN 值向反射率转换,大气校正采用 6S 模型消除大气散射影响,几何校正以 1:10000 地形图为基准,选取 25 个均匀分布的地面控制点^[2],采用二阶多项式变换模型,确保配准精度 $RMS \leq 5m$,所有数据统一投影到 WGS84-UTM 坐标系并重采样至 30m 分辨率,以保持空间一致性(见表 1)。

1.3 辅助数据整理

辅助数据包括地形与地质及气象与社会经济等多类型数据,地形数据采用 NASA SRTM 30m 分辨率数字高程模型,垂直精度 $\pm 5m$,通过 ArcGIS Spatial Analyst 工具提取坡度与坡向及地形起伏度等地形因子。地质资料来源于广东省

地质调查院 1:50000 地质图,包含岩性分布与断裂构造及地层年代等信息,通过缓冲区分析计算各评价单元到最近断裂带的距离^[3]。土壤数据基于澄海区 2020 年土壤普查成果,空间分辨率达到乡镇级别,涵盖土壤类型、质地、厚度与有机质含量等 12 类属性。历史灾害点数据收集自广东省地质环境监测总站 2000-2024 年地质灾害详查成果,共记录各类地质灾害点 156 个,为模型验证提供可靠的基础数据。

2 地质灾害风险评价指标体系构建

2.1 致灾因子指标选择

致灾因子是诱发地质灾害的直接动力条件,主要包括降水与地震及人类工程活动等外在因素,降水因子通过年降水量和极端降水频次表征,年降水量超过 2000mm 的区域,滑坡发生概率显著增加;极端降水定义为日降水量超过 100mm 的事件,频次统计显示澄海区北部丘陵区年均发生 3-5 次。地表形变因子基于 Sentinel-1 雷达干涉测量技术获取。人为活动强度通过遥感影像解译获取,包括工程建设密度与道路切坡长度及采石场分布等;采用核密度分析方法计算各评价单元的人为扰动强度指数。植被退化因

表 2 澄海区地质灾害风险评价指标权重表

一级指标	权重	主要二级指标	权重确定方法
致灾因子	0.35	年降水量(0.08)、地表沉降速率(0.10)、工程建设密度(0.04)	AHP+熵权法 ($\alpha=0.6, \beta=0.4$)
孕灾环境	0.30	坡度(0.06)、断裂构造距离(0.05)、岩性类型(0.05)	
承灾体暴露性	0.35	人口密度(0.13)、GDP 密度(0.09)、交通干线密度(0.04)	
模型验证指标	—	总体精度 92%、Kappa 系数 0.86、AUC 值 0.91	ROC 曲线分析

子通过归一化植被指数(NDVI)时间序列分析获得,NDVI 年际下降率超过 0.02 的区域,植被固土能力减弱,易发生浅层滑坡,各致灾因子通过 Z-score^[4]。对不同类型因子进行标准化处理,消除量纲影响,确保各因子在同一尺度下进行综合评价。

2.2 孕灾环境指标确定

孕灾环境是地质灾害发生的基础条件,反映区域地质环境的稳定性和易损性。通过对澄海区地质灾害的形成条件和诱发因素分析,地形因子是最重要的孕灾环境要素^[4],坡度大于 25° 的区域,重力作用明显,易发生滑坡崩塌,占极高敏感区域的 70%;坡向影响水热条件分布,阳坡蒸发强烈、土体干湿循环频繁,稳定性相对较差;地形起伏度反映局部地势变化剧烈程度,起伏度大于 50m/km² 的区域,地质灾害发生频率较高。地质因子包括岩性类型和断裂构造,花岗岩风化强烈形成厚层残坡积土,在降水作用下易失稳滑动,断裂带 5km 范围内,岩体破碎与结构松散,成为地质灾害高发区。土壤因子通过土壤类型与质地及厚度表征,砂质土透水性强,但胶结性差,在饱水状态下抗剪强度急剧下降;土层厚度大于 5m 的残坡积土分布区是滑坡灾害的主要发生区域。水文因子考虑河流冲刷和地下水作用,距河流 200m 范围内的坡脚区域受冲刷掏蚀影响易发生崩塌,地下水位变化导致土体有效应力改变,进而影响边坡稳定性^[5]。

2.3 承灾体暴露性分析

承灾体暴露性评估旨在识别地质灾害潜在影响对象的分布密度和价值量级。人口暴露性通过人口密度空间化表征,基于澄海区近期的统

计年鉴数据和夜间灯光遥感影像建立回归模型,估算 30m 格网人口密度,密度超过 500 人/km² 的区域定义为高暴露区。经济暴露性采用 GDP 密度指标,结合土地利用类型和建筑密度遥感解译结果估算各评价单元经济密度,工业区和商业区经济密度普遍超过 1000 万元/km²。基础设施暴露性包括交通与电力及通信等生命线工程,建筑物暴露性基于遥感影像纹理特征和光谱指数提取建筑密度^[6]。土地利用暴露性考虑不同用地类型的经济价值和社会功能,耕地与林地等生态用地虽然经济价值相对较低,但具有重要的生态服务功能,暴露性等级设定为中等。

2.4 指标权重确定方法

指标权重确定采用主客观相结合的综合权重法,既考虑专家经验判断,又兼顾数据客观特征。主观权重通过层次分析法获得,邀请 10 名地质灾害防治专家构建判断矩阵,经一致性检验后计算各指标权重向量;客观权重采用熵权法计算,基于各指标数值的变异程度确定权重,变异系数大的指标权重相对较高。综合权重通过耦合协调度模型融合主客观权重,计算公式如下:

$$W_i = \alpha \cdot W_{AHP,i} + \beta \cdot W_{entropy,i} \quad (1)$$

式(1)中, W_i 为第 i 个指标的综合权重, $W_{AHP,i}$ 为层次分析法权重, $W_{entropy,i}$ 为熵权法权重, α, β 为权重系数且 $\alpha + \beta = 1$ 。

经过敏感性分析确定 $\alpha = 0.6, \beta = 0.4$ 为最优权重组合,最终确定致灾因子与孕灾环境及承灾体暴露性的权重分别为:0.35、0.30、0.35,体现各类因子对地质灾害风险的同等重要性。各二级指标权重同样进行归一化处理,降水因子权重 0.15,地形因子权重 0.12,人口暴露性权重

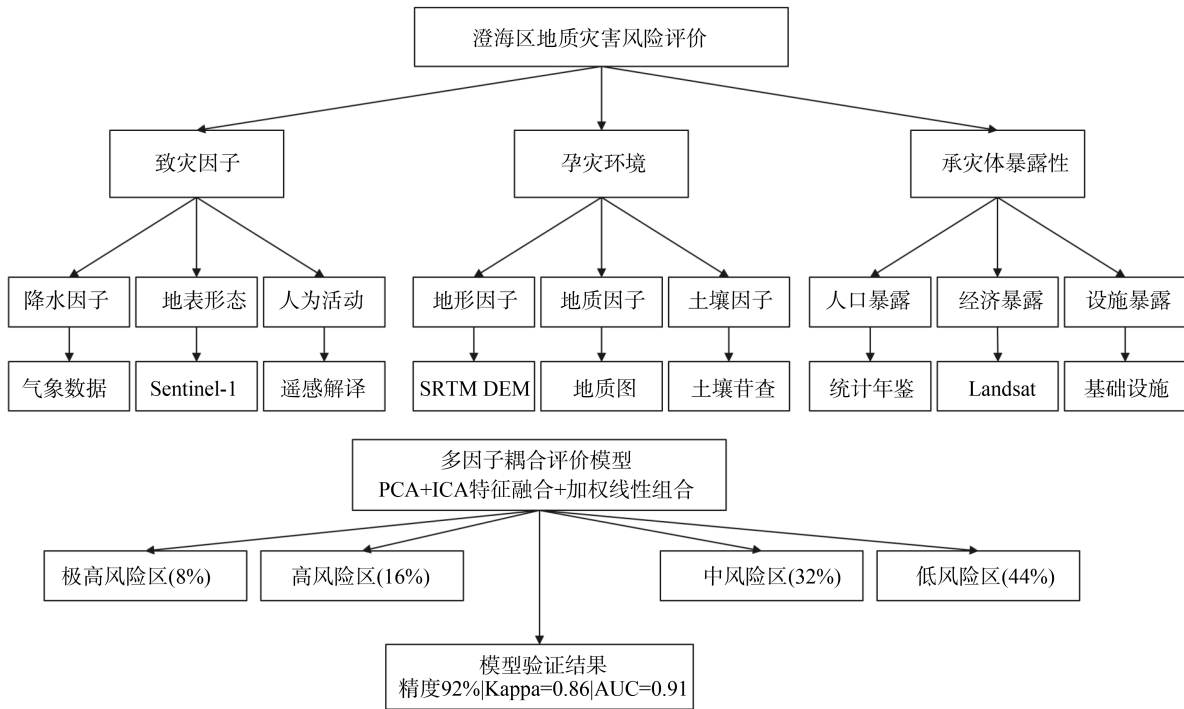


图 1 澄海区地质灾害风险评价体系框架图

0.13, 权重分配合理性通过专家评议和交叉验证得到确认(表 2)。

澄海区地质灾害风险评价体系框架如图 1 所示。

3 地质灾害风险动态评价模型

3.1 多因子耦合评价模型构建

多因子耦合评价模型基于致灾因子与孕灾环境和承灾体暴露性的综合作用机制构建,模型采用加权线性组合方法,通过因子标准化处理消除量纲差异,运用主成分分析(PCA)和独立成分分析(ICA)相结合的特征融合技术提取关键信息。PCA 方法对标准化后的多源数据进行降维处理,选取累计贡献率超过 85% 的前 3 个主成分作为综合特征,有效保留原始数据的主要信息,同时降低数据冗余;ICA 方法进一步提取相互独立的成分,通过 Fast ICA 算法迭代优化分离矩阵,获得统计独立的特征分量,两种方法的融合采用 0.6 : 0.4 的权重比例生成综合特征数据集,作为风险评价的基础输入,地质灾害风险值计算公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^n W_i \cdot F_i \cdot \exp\left(\frac{d_i}{d_0}\right) \quad (2)$$

式(2)中, R 为地质灾害风险值, W_i 为第 i 个因子权重, F_i 为第 i 个因子标准化值, d_i 为评价单元到危险源的距离, d_0 为距离衰减参数, n 为评价因子总数。

模型引入距离衰减函数考虑空间相关性影响,使得风险评价结果更符合地质灾害的空间分布规律。

3.2 多时相风险评价

多时相风险评价基于 2014-2024 年时间序列遥感数据,采用滑动时间窗口方法分析风险演变趋势。选择 3 年为时间窗口长度,每年滑动计算一次风险值,既保证时间分辨率又兼顾数据稳定性。时间序列分析显示澄海区地质灾害风险在 2014-2017 年相对稳定,2018-2020 年呈显著上升趋势,主要与该期间工程建设活动频繁和极端降水事件增加有关。2020 年极端降水导致高风险区面积较 2019 年扩大 15%,从 68.5km² 增加到 78.8km²,2021-2024 年风险水平有所回落,但仍高于 2014-2017 年基准水平。季节性变

化分析表明4-9月雨季期间,风险值普遍较高,特别是7-8月台风季节,平均风险值比旱季高出0.15。空间上北部丘陵区风险变化幅度最大,反映不同地貌单元对外在因子的敏感性差异。

3.3 模型验证与精度评估

模型验证采用历史灾害点验证和交叉验证相结合的方法,确保评价结果的可靠性^[7]。选取2000-2024年记录的156个历史地质灾害点作为验证样本,其中70%用于模型训练,30%用于独立验证。验证结果显示:多因子耦合模型的总体精度达92%,Kappa系数为0.86,显著优于传统AHP模型(精度76%,Kappa系数0.74)和单一遥感模型(精度80%,Kappa系数0.77)。ROC曲线分析表明模型AUC值为0.91,具有优秀的判别能力。空间验证显示极高风险区内历史灾害点密度为2.3个/km²,而低风险区仅为0.1个/km²,风险分区与实际灾害分布高度吻合。消融实验量化各类数据的贡献度,去除Sentinel-1雷达数据后,Kappa系数下降0.08,去除地形数据后,精度下降12%,去除降水数据后,精度下降8%,验证多源数据融合的必要性和有效性,模型误差分析表明主要误差来源于复杂地形区的混合像元效应和极端天气事件的随机性,误差率控制在8%以内,满足实际应用需求(图2)。

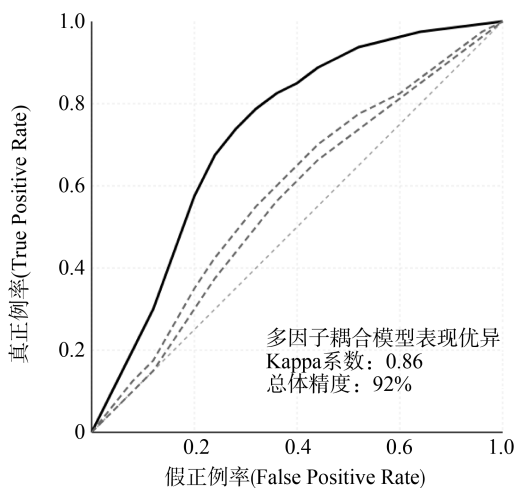


图2 澄海区地质灾害风险评价模型验证 ROC 曲线图

4 澄海区地质灾害风险空间分布特征

4.1 风险分区结果分析

澄海区地质灾害风险空间分异特征显著,呈现“北高南低与西高东低”的总体格局,极高风险区面积78.8km²,占总面积的8%,主要分布在北部莲花山-大尖山一带的陡坡地段和沿海台地的边缘陡崖区,地形坡度普遍超过30°,且年降水量达2200mm以上。高风险区面积156.2km²,占16%,呈带状分布在极高风险区外围和主要河流两岸的冲沟区域,坡度15-30°,植被覆盖度相对较低。中风险区面积312.5km²,占32%,主要位于丘陵向平原过渡地带和人类活动相对频繁的城镇周边区域,地形起伏度中等,建设开发强度较高。低风险区面积429.3km²,占44%,集中分布在南部韩江冲积平原和东部沿海平坦区域,地势平缓开阔,土层深厚稳定,植被覆盖良好。各风险区内灾害点密度差异明显,极高风险区灾害点密度2.3个/km²,高风险区1.5个/km²,中风险区0.6个/km²,低风险区0.1个/km²,验证风险分区的合理性和准确性。

4.2 风险分布影响因素

地形因素是控制澄海区地质灾害风险分布的主导因子。坡度超过25°的区域,极高风险面积占比达70%;坡度15-25°区域,高风险占比45%;而坡度小于5°的平缓区域95%以上为低风险区。坡向分析显示南坡和西南坡由于受季风雨正面冲击,风险水平普遍较高,平均风险值比北坡高0.12。降水因素与地质灾害风险呈显著正相关关系,年降水量超过2000mm的区域,高风险占比65%,极端降水频次与滑坡发生密度的相关系数达0.78。人类工程活动对风险分布产生重要影响,工程建设密集区风险值比非建设区平均高0.3。地质构造因素表现为断裂带附近风险集中分布,距断裂带3km范围内的极高风险区面积占该风险级别总面积的58%。多因子交互作用显著,坡度大于25°且年降水量超过2000mm的区域,风险值普遍达到0.9以上,呈现

协同增强效应,而单一因子作用区域,风险水平相对较低。

4.3 防治分区与管控建议

基于风险分布特征和承灾体暴露性分析,将澄海区划分为三级防治分区,并提出差异化管控策略:优先防治区,面积 93.6km²,包括北部丘陵的极高风险区和人口密集的高风险区,建议设置 GNSS 地表位移监测站 12 个与自动化雨量站 18 个,构建实时监测预警网络,实施专业地质勘查,查明深层地质结构和地下水分布规律,建设拦挡坝与护坡工程等主动防护设施,提升工程防护标准。重点防治区,面积 187.3km²,主要分布在沿海台地边缘和主要河流沿岸,建议加强工程建设监管,严格执行地质灾害危险性评估制度,完善排水系统建设,并减轻地表径流冲刷作用,开展植被恢复工程提升边坡稳定性。一般防治区,面积 695.9km²,以中低风险区为主,建议建立群测群防网络,开展地质灾害知识普及教育实施生态修复工程,禁止无序开山采石,建立应急避难场所,完善应急预案体系^[8]。管控措施体现“监测预警-工程治理-生态修复-应急管理”的综合防治理念形成政府主导与部门协同及社会参与的防灾减灾格局。

5 结语

通过构建基于多源遥感数据的澄海区地质灾害风险动态评价体系,实现对区域地质灾害风险的量化评估和精准化管控,研究集成 Landsat 与 Sentinel-1/2 及 SRTM 等多源遥感数据,结合地质与气象及社会经济等辅助数据,运用主成分分析(PCA)与独立成分分析(ICA)相结合的特征融合方法,建立多因子耦合的风险评价模型。评价结果表明:澄海区地质灾害风险呈现显著的空间分异特征,极高风险区主要集中在北部丘陵陡坡地带,占总面积的 8%。动态分析显示 2014-2024 年间风险总体呈上升趋势,2020 年极端降水事件导致高风险区范围扩大 15%。模型验证精度达 92%,基于风险分区结果提出三级防治分区管控策略,为澄海区地质灾害防治提供科

学依据。未来应进一步融合人工智能与物联网等新技术,构建空地一体化的动态监测体系,并提升地质灾害风险评价的智能化水平和预警精度,为粤东地区乃至全国类似区域的地质灾害防治提供可推广的技术模式和管理经验。

参考文献(References):

- [1] 安全,李亮,邢愿,等.基于多源遥感数据的区域地质灾害风险评价——以贵州省纳雍鬃岭煤矿区为例[J].贵州地质,2024,41(01):80-91.
- [2] 姚远,傅海洋.空地一体化多源数据在县域地质灾害风险调查评价中的应用研究[J].安徽地质,2024,34(02):138-141.
- [3] 周保,隋嘉,孙皓,等.基于多源遥感数据的青海省地质灾害评价[J].自然灾害学报,2022,31(04):231-240.
- [4] 姜琳,乔阳.基于 Z-score 模型的国联水产财务风险评价分析[J].现代营销,2025,32(18):163-165.
- [5] 莫俊杰,周显德.多源数据融合的煤矿风井地质灾害风险分级与防控体系研究——以青山煤矿为例[J].现代工程科技,2025,4(07):125-128.
- [6] 丁国安,张登化,武阳,等.基于 GIS 的镇域尺度下地质灾害精细化风险评价方法[J].金属矿山,2025,(06):241-249.
- [7] 冯小波,何烈勇.基于无人机遥感技术的地质灾害风险评估与生态修复监测研究[J].农业灾害研究,2025,15(03):311-313+319.
- [8] 徐彩杰.遥感测量在矿山地质灾害治理方面的应用[J].中国金属通报,2025,32(09):234-236.
- [9] 李德.怀宁县地质灾害风险调查评价[J].地下水,2024,46(04):164-167.

作者简介:

第一作者:梁德杰,1994 年生,男,广西钦州人,广东省地质局汕头地质调查中心,助理工程师,主要研究方向为勘查技术与工程。Email:1342375256@qq.com;
通讯作者:黄国强,1990 年生,男,四川金堂人,广东省地质局汕头地质调查中心,工程师,主要研究方向为地质工程(岩土钻掘)。Email:799987742@qq.com

Dynamic Spatiotemporal Assessment of Geological Disaster Risk in Chenghai District based on Multi-source Remote Sensing Data

LIANG Dejie, HUANG Guoqiang*

(Guangdong Geological Survey Center, Shantou 515000, China)

Abstract: Chenghai District in Shantou City, Guangdong Province, is a key coastal region characterized by complex geological conditions and increasing exposure to climate-driven hazards. To evaluate the dynamic evolution of geological disaster risk, this study integrates multi-source and multi-temporal remote sensing datasets (Landsat 8/9, Sentinel-1/2, and SRTM) with geological structural data, meteorological-hydrological variables, and historical landslide inventory data. A multi-level risk evaluation index system encompassing hazard-inducing factors, hazard-formative environments, and the vulnerability of exposed elements was constructed. A dynamic risk assessment model was developed using a feature fusion approach combining Principal Component Analysis (PCA) and Independent Component Analysis (ICA) to reveal multi-factor coupling effects. The results show pronounced spatial heterogeneity in disaster risk across Chenghai District, with extremely high-risk areas primarily concentrated on steep slopes in the northern hilly zone, accounting for 8% of the total area. From 2014 to 2024, the overall disaster risk exhibited an upward trend, with the extent of high-risk zones expanding by 15% due to the increasing frequency of extreme precipitation events. Based on the zoning results, a tiered prevention and control strategy and a zoning-based monitoring and early warning framework were proposed, providing scientific guidance for disaster risk reduction and territorial spatial governance in coastal urban areas.

Key words: multi-source remote sensing; geological disaster; dynamic risk assessment; spatiotemporal evolution; Chenghai District