

基于动态轨迹数据的城市滨水空间雨洪韧性评价方法研究*——以深圳市盐田区为例

Flood Resilience Evaluation Method for Urban Waterfront Spaces Based on Dynamic Trajectory Data: A Case Study of Yantian District, Shenzhen

陈心妍 翟国方 邹滢 宁世强 CHEN Xinyan, ZHAI Guofang, ZOU Ying, NING Shiqiang

摘要 雨洪韧性评估需要综合考量社会经济、人口暴露、建成环境等多维因素。传统人口暴露评估主要依赖静态人口数据,但这类数据难以反映实际人口活动特征,易导致评估偏差。为提升滨水空间雨洪扰动适应能力,研究提出一种结合运动轨迹数据的滨水空间建成环境雨洪韧性评价方法。以深圳市盐田区为例,采用熵权—TOPSIS法,综合考虑雨洪吸收、适应、恢复能力(如绿地率、路网密度等)和人口暴露性特征(静态人口密度与动态运动轨迹密度),构建雨洪韧性评价体系,并对比分析静态—动态综合评估与单一静态评估的结果。研究发现:(1) 动态轨迹数据的引入显著提高了韧性评估的准确性;(2) 单一静态评估方法会系统性高估区域韧性水平。研究成果为城市雨洪韧性评估提供了新的数据视角和方法框架,特别强调了动态人口活动特征在提升评估精度中的关键作用。

Abstract Urban flood resilience assessment requires the integration of multidimensional factors, including socioeconomic conditions, population exposure, and built environment characteristics. Traditional population exposure assessments primarily rely on static population data, which often fail to capture real-time human activity patterns, leading to evaluation biases. To enhance the adaptive capacity of waterfront spaces to flood disturbances, this study proposes a novel flood resilience assessment method for built environments that incorporates movement trajectory data. Taking Yantian District, Shenzhen, as a case study, we employ the entropy-weighted TOPSIS method to construct a comprehensive evaluation framework, considering flood absorption, adaptation, and recovery capacities (e.g., green space ratio, road network density) as well as population exposure features (static population density and dynamic movement trajectory density). A comparative analysis is conducted between static-dynamic integrated assessments and static-only assessments. The findings reveal that: (1) the incorporation of dynamic trajectory data significantly improves the accuracy of resilience assessments; and (2) static-only assessment methods tend to systematically overestimate regional resilience levels. This research provides a new data perspective and methodological framework for urban flood resilience assessment, particularly highlighting the critical role of dynamic human activity characteristics in enhancing evaluation precision.

关键词 韧性评价;雨洪韧性;滨水空间;建成环境;运动轨迹数据

Key words resilience evaluation; rainstorm resilience; waterfront space; built environment; movement trajectory data

文章编号 1673-8985 (2026) 01-0135-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20260118

作者简介

陈心妍

南京大学建筑与城市规划学院
硕士研究生

翟国方 (通信作者)

南京大学建筑与城市规划学院
教授,博士生导师
guofang_zhai@nju.edu.cn

邹滢

南京大学建筑与城市规划学院
硕士研究生

宁世强

西安科技大学安全科学与工程学院
博士研究生

0 引言

在全球气候变化加剧的背景下,极端天气事件频发^[1],导致城市面临的雨洪灾害风险日益增加,严重影响居民的日常生活。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在《气候变化2022:影响、适应和脆弱性》报告中强

*基金项目:国家重点研发计划“城镇可持续发展关键技术与装备”重点专项“城市系统韧性功能提升关键技术研究与应用”(编号2023YFC3805204)资助。

调^[2],在自然灾害无法避免的情况下,适应气候变化是降低其风险的关键策略。作为城市与水体之间的过渡区域,滨水空间不仅具有重要的生态功能、文化景观和经济价值,还在城市防灾减灾中扮演着关键角色^[3]。因此,提升城市及其滨水区应对雨洪扰动的能力,已成为适应气候变化和减少灾害损失的关键。“韧性”(resilience)已成为近年来建成环境研究的重要主题^{[4], [5]^[2]}。霍林(Holling)^[6]首次提出韧性这一概念,并将其解释为系统在受到外部干扰后依然能够保持其功能运作的的能力。雨洪韧性是将韧性理论应用于应对城市雨洪灾害的具体体现,即城市在遭遇雨洪冲击时,所具备的抗压、吸收、适应和快速恢复能力^[7]。雨洪韧性评估是提升建成环境质量和优化城市建设的重要手段。借助评估,城市可以更精准地识别雨洪灾害对各区域的影响,进而优化空间规划并强化基础设施的建设,提高城市在极端天气下的应对能力和恢复速度^[8-11],为未来城市规划提供重要的科学依据和决策支持。

雨洪韧性作为一个多维度的综合性概念,涵盖了人类活动与环境领域的交互作用^[12]。建成环境质量与雨洪韧性存在显著关联,其规划设计水平直接影响区域应对雨洪灾害的适应效能与恢复效率^[13-16]。灾害情境下的人口暴露特征也是影响城市韧性的关键因素,即空间中人口越密集,越容易受到灾害影响^[19]。因此,雨洪韧性评估通常采用多维度框架,同时考量社会经济、人口暴露及建成环境等要素。Robert等^[20]通过灾难数据,采用多标准决策分析(MCDA)方法,将人口特征、环境和基础设施等因素整合到一个统一框架中,评估快速城市化地区的洪水脆弱性和韧性;Wei等^[21]提出了一个基于基础设施、环境、人口和制度等子要素的精细化城市韧性指数,关注人均城市道路面积、排水密度、用地性质、人口结构等指标;Dincer等^[22]从物理空间、环境与气候、人口特征3个方面构建了城市韧性指数得分,包括绿地率、建筑密度、温度、人口密度、人口结构等指标;陈碧琳等^{[23]^[80]}从景观生态空间、街道网络、街区和建筑等维度,对滨海空间的

雨洪韧性进行了综合评价。

现有研究在表征韧性人口暴露维度时,主要采用静态人口密度和人口结构等指标^[24]。然而,这些基于户籍登记等传统手段获取的数据难以反映空间实际活动人口特征,可能导致韧性评估结果与实际情况存在偏差。近年来,部分学者开始尝试利用运动轨迹数据来表征空间使用特征。例如,祝朝阳等^[25]基于健身软件的运动轨迹数据,通过计算运动轨迹密度识别高人气区域的空间特征,为街道空间规划提供决策依据;Ge等^[26]则利用南京市GPS步行轨迹数据,分析了不同性别行人的热暴露差异。然而目前尚未有研究将运动轨迹密度指标纳入滨水空间建成环境雨洪韧性评估体系。将运动轨迹密度作为人口暴露维度的表征指标,能够更准确地反映城市实际运行状态,有助于提升雨洪韧性评估的精确度,进而优化灾害应对与恢复策略,最终增强城市整体的灾害适应能力。

本文旨在提出一种新的雨洪韧性评价方法,以深圳市盐田区为例,结合空间物理环境因素,构建一个基于动态轨迹数据的建成环境雨洪韧性评价体系。该体系从雨洪吸收能力、应对能力、恢复能力和暴露性4个维度展开,并采用熵权-TOPSIS法对各项指标进行综合分析。本文期望填补现有研究的空白,提升评价模型的准确性与科学性,从而为城市滨水空间的雨洪灾害应对提供理论依据与实践指导。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

盐田区(N-22.35°, E-114.18°)位于深圳市东部,距离市中心约12 km,西界罗湖区,东邻大鹏新区,北接龙岗区与坪山区,南界香港新界。研究区范围包括盐田区海滨栈道至小梅沙海滨栈道,总面积约为50 km²(见图1)。盐田区属于亚热带海洋性气候,常受台风、风暴潮和暴雨的影响,导致频繁发生雨涝灾害。近年来,极端天气事件呈现增多趋势。2022年,盐田区年均降水量为2 504.9 mm。2023年9月8日,盐田区发生了超历史记录的特大暴雨,盐田区正坑站记录最大3 h滑动雨量为246.8 mm,

造成沙头角、海山街道等地严重内涝,交通中断,部分居民区积水严重,影响居民的日常生活与出行。

1.2 数据及预处理

国内外学者普遍采用指标体系方法将灾害风险纳入韧性评估框架,以系统分析特定灾害风险的韧性特征。本文借鉴Dong等^[27]提出的风险-韧性耦合机制评价框架,从雨洪吸收能力、适应能力、恢复能力和暴露性4个维度,构建盐田区滨水空间雨洪韧性评价指标体系。其中,雨洪吸收、适应及恢复能力主要为建成环境的关键要素^{[5]^[21], [23]^[84]}。暴露性通过静态人口暴露和动态人口暴露两个层面进行表征:静态人口暴露采用居住人口密度指标衡量,而动态人口暴露则通过反映人群行为特征的运动轨迹密度指标来评估(见表1)。

1.2.1 雨洪吸收能力指标

雨洪吸收能力指区域在遭遇雨洪灾害时,能够防止系统状态发生不利变化的能力^{[28], [29]^[60]}。在这一过程中,绿化植被作为透水区域发挥着至关重要的作用。绿地率越高,地块在雨洪灾害情境下形成的调蓄水体越多,从而增强其吸收地表径流的能力^[30-31]。此外,雨洪灾害发生时,城市中的大型公共绿地能够与周边淹没区域相互作用,起到缓解作用^{[23]^[81]}。因此,本文选取绿地率和蓝绿空间平均淹没比率作为表征雨洪吸收能力的指标(见图2)。

1.2.2 雨洪适应能力指标

雨洪适应能力是指地区通过有效的基础



图1 研究范围

Fig.1 Scope of the research

资料来源:笔者自绘,底图审图号:GS(2025)1508号。

表1 指标体系与数据来源

Tab.1 Indicator system and data sources

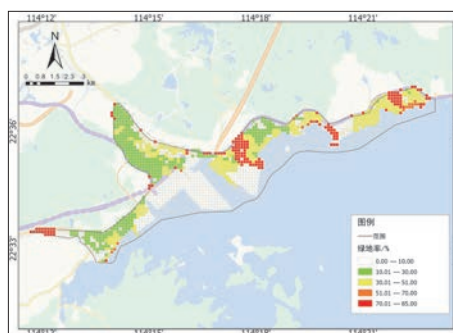
| 一级指标 | 二级指标 | 计算方法与说明 | 数据来源 |
|------|----------------------------|-----------------------------------|--|
| 吸收能力 | 绿地率/% | 绿化用地面积/用地面积 | 中国多时期土地利用遥感监测数据集 (https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54) |
| | 蓝绿空间平均淹没比率/% | 被淹没蓝绿空间面积/总蓝绿空间面积 | 中国多时期土地利用遥感监测数据集 (https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54) 全球数字地表模型数据 (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm) 国家海洋科学数据中心 (http://mds.nmdis.org.cn/) |
| 适应能力 | 路网密度/(m/m ²) | 总街道长度/用地面积 | 深圳市盐田区矢量路网数据(http://guangdong.tianditu.gov.cn/) 全球数字地表模型数据 (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm) 国家海洋科学数据中心 (http://mds.nmdis.org.cn/) |
| | 灾中街道步行可达性 | 去除淹没路径后的街道网络步行可达性 | 深圳市盐田区矢量路网数据(http://guangdong.tianditu.gov.cn/) |
| 恢复能力 | 混合用地地块比例/% | POI数总和/用地面积 | 高德地图API (https://lbs.amap.com) |
| | 聚集度指数 | 相同类型的相似邻接数量除以该类型最大程度上丛生为一个斑块时的最大值 | 中国多时期土地利用遥感监测数据集 (https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=54) |
| 暴露性 | 运动轨迹密度/(m/m ²) | 轨迹长度/用地面积 | 运动轨迹密度python爬虫数据(https://www.2bulu.com) |
| | 人口密度/(人口/m ²) | 人口总数/用地面积 | WorldPop数据集(https://www.worldpop.org/) |

资料来源:笔者自制。

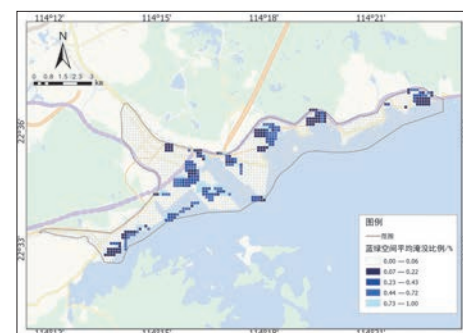
设施和应急措施来应对并适应雨洪灾害,从而减少其对社会和环境的干扰与影响^{[29]61}。灾害发生时,地区需要迅速组织人员、物资和信息的调配,以减轻灾害带来的不利影响^[32]。良好的街道网络可以提高物资流动水平,承载密集而紧凑的调配活动,从而增强城市应对雨洪灾害的适应能力^[33-34]。例如,在洪水侵扰后,路网密度高、通行能力强的地区可以更迅速地展开救援工作,并有效转移受灾人群^[35]。因此,本文选取路网密度和灾中街道步行可达性作为衡量适应能力的指标(见图3)。

1.2.3 雨洪恢复能力指标

雨洪恢复能力是指地区在经历雨洪灾害后,从失衡状态重新恢复至平衡状态的能力^[36]。用地和建筑模块等子系统构成了社会经济活动的物质基础^{[23]84}。提升用地功能多样性能够显著提高社会活动水平,进而增强区域应对雨洪灾害的恢复能力。其次,具备良好完整性和连通性的景观格局在受到扰动后,展现出较强的韧性,恢复到扰动前状态所需的时间相对较短^[37]。现有研究通常采用聚集度指数(CONTAG)来衡量景观格局的完整性^[38]。聚集度越高,越能有效降低雨洪灾害对当地水文环境的负面影响。因此,本文选取混合用地地块比例和聚集度指数作为衡量恢复能力的指标(见图4)。



a 绿地率空间分布

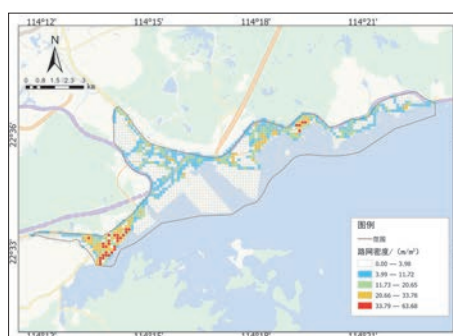


b 蓝绿空间平均淹没比率空间分布

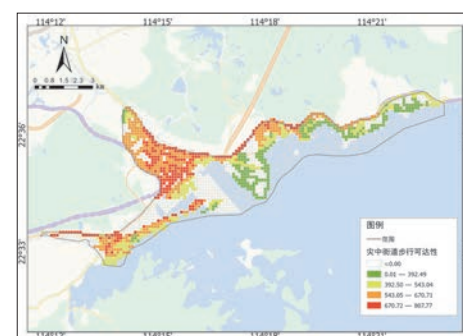
图2 雨洪吸收能力各指标空间分布图

Fig.2 Spatial distribution maps of various indicators for rainwater and flood absorption capacity

资料来源:笔者自绘。



a 路网密度空间分布



b 灾中街道步行可达性空间分布

图3 雨洪适应能力各指标空间分布图

Fig.3 Spatial distribution maps of various indicators for rainwater and flood adaptation capacity

资料来源:笔者自绘。

1.2.4 暴露性指标

暴露性是指灾害中人员、环境及资产的潜在受影响程度^{[12]10},本文重点探讨人口暴露特征。人口暴露量对人群疏散的速度与效率

产生重要影响,这直接关系到城市在灾难发生后的适应能力和恢复能力^[39]。基于ArcGIS平台构建150 m网格体系,采用人口密度指标量化静态暴露(常住人口/网格面积)。为克

服静态数据的局限性,创新性引入运动轨迹密度指标,通过Python开发的定向爬虫程序从两步路户外助手平台获取2023年研究区内运动轨迹数据(样本量503条)。虽然日均采集量有限,但考虑到:(1)数据覆盖早雨季完整周期;(2)聚焦具有空间代表性的滨水活动热点;(3)经K-S检验满足分析要求($D=0.08$, $p=0.12 > \alpha=0.05$),该样本能有效表征区域人群活动模式^[40-42]。采用与静态分析相同的空间网格体系,计算轨迹长度与面积的标准化比值(见图5)。

2 研究方法

逼近理想解排序法(TOPSIS)是一种多准则决策技术,其核心原理是通过计算最优解与理想解之间的最短距离,以及最劣解与理想解之间的最长距离来确定排序^[43]。熵权-TOPSIS法将准则权重的确定与理想解的计

算相结合,通过综合考虑距离和权重,为多准则决策问题提供了一种系统化的解决方案。两者的结合能够显著降低主观偏差对结果的影响^[44]。

2.1 熵权法

熵权法基于信息熵的概念,将评价指标的有序程度量化为熵值,从而反映指标数据的分布规律和差异性^[45]。本文利用各项指标对应的样本数据计算熵权(见表2)。蓝绿空间的平均淹没比率、运动轨迹密度和路网密度的熵权较为突出,位居前列;其次是人口密度、绿地率、灾中街道步行可达性和混合用地地块比例,而聚集度指数的熵权最小。

2.2 逼近理想解排序法

本文采用TOPSIS方法评估建成环境的雨洪韧性水平。根据原始指标数据矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$,

利用TOPSIS评估建成环境雨洪韧性的步骤如下。

原始指标数据矩阵标准化处理,具体计算公式如下:

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: b_{ij} 表示标准化处理后的数据。

对标准化指标值进行加权处理,得到加权标准化矩阵 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$,加权的计算公式如下:

$$y_{ij} = \omega_j b_{ij} \quad (2)$$

式中: y_{ij} 表示加权后的数据值; ω_j 表示第j项指标的权重。

确定正、负理想解 Y^+ 和 Y^- ,其计算分别如式(3)和(4)所示:

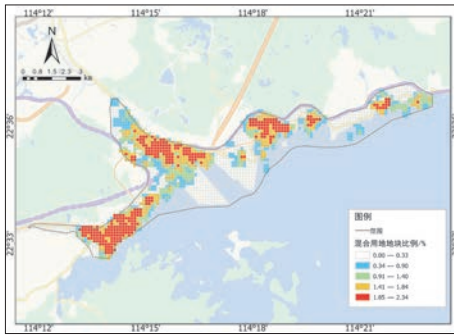
$$Y^+ = [(\max_i y_{ij} | j \in Q_+), (\min_i y_{ij} | j \in Q_-)] \quad (3)$$

$$Y^- = [(\min_i y_{ij} | j \in Q_+), (\max_i y_{ij} | j \in Q_-)] \quad (4)$$

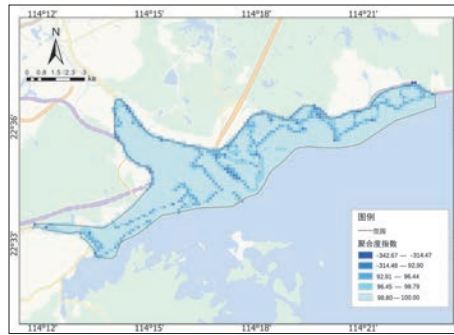
式中: Q_+ 、 Q_- 分别代表正向指标集合与负向指标集合; $\max_i y_{ij}$ 、 $\min_i y_{ij}$ 分别代表i个理想解中第j项指标的最大值与最小值。

计算评估对象与正、负理想解的几何距离 d_j^+ 和 d_j^- ,处理过程如式(5)和(6)所示:

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{ij} - y_j^+)^2} \quad (5)$$



a 混合用地地块比例空间分布



b 聚合度指数空间分布

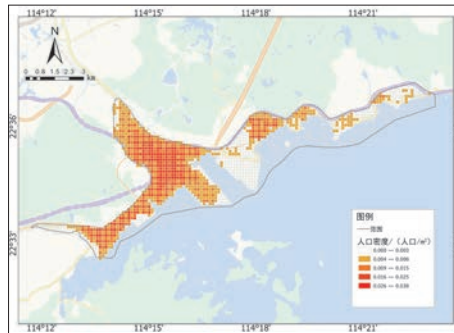
图4 雨洪恢复能力各指标空间分布图

Fig.4 Spatial distribution maps of various indicators for rainwater and flood recovery capacity

资料来源:笔者自绘。



a 运动轨迹密度空间分布



b 人口密度空间分布

图5 暴露性各指标空间分布图

Fig.5 Spatial distribution map of exposure indicators

资料来源:笔者自绘。

表2 指标权重分配结果

Tab.2 Result of index weight allocation

| 一级指标 | 二级指标 | 熵权法权重 |
|--------|------------|-------|
| 雨洪吸收能力 | 绿地率 | 0.117 |
| | 蓝绿空间平均淹没比率 | 0.199 |
| 雨洪适应能力 | 路网密度 | 0.151 |
| | 灾中街道步行可达性 | 0.108 |
| 雨洪恢复能力 | 混合用地地块比例 | 0.107 |
| | 聚集度指数 | 0.001 |
| 暴露性 | 运动轨迹密度 | 0.187 |
| | 人口密度 | 0.131 |

资料来源:笔者自制。

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{ij} - y_j^-)^2} \quad (6)$$

式中: d_j^+ , d_j^- 分别表示第 j 项指标的正理想解和负理想解。

计算评估对象与理想解的贴合度, 具体计算公式如下:

$$c_j^+ = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-} \quad (7)$$

贴合度 c_j^+ 越大, 表示越接近正理想解; 反之, 越接近负理想解。

建成环境的雨洪韧性评估结果可以通过贴合度来量化, 其取值范围为0到1。当贴合度 c_j^+ 趋近于1时, 表明韧性水平越高; 反之, 当贴合度 c_j^+ 趋近于0时, 表明韧性水平越低。

3 研究结果

3.1 雨洪吸收能力空间分布

结合绿地率和蓝绿空间平均淹没比率, 通过归一化处理以及栅格计算器叠加各项指标的权重, 采用自然断点法重分类将雨洪吸收能力划分为5个等级 (见图6)。研究区包括4.14%的高吸收区、14.99%的较高吸收区、20.23%的中吸收区、18.65%的较低吸收区和41.98%的低吸收区。

高吸收区和较高吸收区主要分布在研究区的最东侧、大梅沙西侧的非城市建成区、小

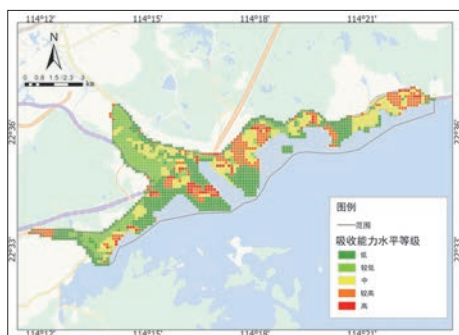


图6 滨水空间建成环境雨洪吸收能力空间分布图
Fig.6 Spatial distribution map of rainwater and flood absorption capacity in the built environment of waterfront spaces

资料来源: 笔者自绘。

梅沙东侧的海滨地带和葵涌街道的中部。高值区域集中在盐田港区和城市大型绿地 (如海山广场和海心公园), 表明城市公园作为重要的开放空间, 能够有效承接日常灾害中的蓄水调控功能。低吸收区和较低吸收区占据了大部分面积, 这些区域的共同特点是城市聚集区, 绿地率较低, 且这些区域的绿地在调节水位方面的功能较弱。

3.2 雨洪适应能力空间分布

结合路网密度和灾中街道步行可达性, 采用自然断点法重分类将雨洪适应能力划分为5个等级 (见图7)。研究区包括4.47%的高应对区、16.52%的较高应对区、20.28%的中应对区、15.59%的较低应对区和43.13%的低应对区。

高适应区和较高适应区主要分布在盐田街道和沙头角街道, 其中高适应区集中在西侧的海山路一带, 较高适应区在盐田街道和大梅沙区域的占比更大。这可能是由于该地区融合了商业、办公、学校和住宅等多种功能, 且该区域的路网密度较高, 非滨海路段的路网较为完整, 能够在500 m半径内迅速找到避难场所进行紧急避险。较低适应区和低适应区主要分布在研究区内的海岸线和港区, 主要原因是这些区域的可达性较差。

3.3 雨洪恢复能力空间分布

结合混合用地地块比例和聚集度指数,

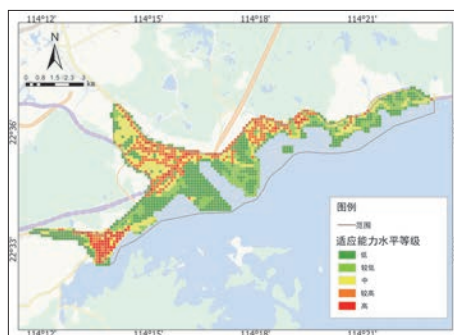


图7 滨水空间建成环境雨洪适应能力空间分布图
Fig.7 Spatial distribution map of rainwater and flood adaptation capacity in the built environment of waterfront spaces

资料来源: 笔者自绘。

采用自然断点法重分类将雨洪恢复能力划分为5个等级 (见图8)。研究区包括19.08%的高恢复区、13.03%的较高恢复区、11.34%的中恢复区、10.85%的较低恢复区和45.69%的低恢复区。

高恢复、较高恢复、中恢复和较低恢复区的面积占比相差较小, 其中高恢复区占比较高, 主要分布在海山路、明珠大道和大梅沙海滨公园附近, 这与这些地区较高的混合用地地块比例密切相关。地区设施类型的丰富性与雨洪灾害恢复能力之间存在正相关关系, 设施越丰富, 恢复能力越强。

3.4 暴露性空间分布

结合人口密度和运动轨迹密度, 采用自然断点法重分类将暴露性划分为5个等级 (见图9)。研究区包括17.92%的高暴露区、17.97%的较高暴露区、17.97%的中暴露区、17.82%的较低暴露区和28.29%的低暴露区。

高暴露区和较高暴露区主要分布于盐田区海滨公园段、大小梅沙段及御景佳园周边区域。这些区域普遍具备优质的景观环境、完善的路网系统和丰富的休闲设施, 其较高的运动轨迹密度反映出强烈的户外活动特征, 增加了人群在雨洪灾害中的暴露风险。与传统静态人口密度评估相比, 结合人口密度和运动轨迹密度计算的暴露性考虑了暴露于室外环境下的动态人口, 如大梅沙和小梅沙海滨公园, 这些区域虽具有优越的景观资源和运动设施, 吸引

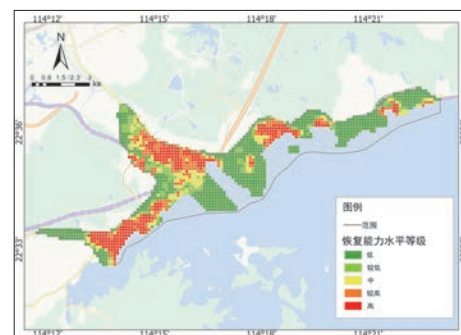


图8 滨水空间建成环境雨洪恢复能力空间分布图
Fig.8 Spatial distribution map of rainwater and flood recovery capacity in the built environment of waterfront spaces

资料来源: 笔者自绘。

大量非本地居民前来活动,但其常住人口密度相对较低。若仅基于静态人口数据进行评估,将严重低估这些区域的真实暴露水平。

3.5 建成空间环境雨洪韧性水平综合评价

通过为各个指标赋予综合权重并进行TOPSIS分析,得出建成空间环境雨洪韧性水平综合评价结果(见图10)。从韧性等级分布来看,较低韧性区占比最高(37.02%),其次为低韧性区(35.18%),而中韧性区(24.04%)、较高韧性区(3.64%)和高韧性区(0.13%)占比较小。空间格局上表现为显著的西北—东南梯度差异:西北部韧性水平最高,中部次之,东南部最低。其中西北部海山街道(海山路、盐田中央公园及海滨栈道延伸区)和盐田街道海翠路以北区域的较高韧性水平区比例较高。这些区域路网密度较高,灾中街道步行可达性优良,并且融合了商业、办公、学校和住宅等多种功能。

通过对比分析静态—动态人口暴露与单一静态人口暴露的建成空间环境雨洪韧性水平综合评价结果,研究发现,仅考虑静态人口暴露时,雨洪韧性水平较高。具体而言,低韧性区的占比为32.34%,较低韧性区为30.93%,中韧性区为30.68%,较高韧性区占比为5.10%,高韧性区占比为0.94%。研究区的北部和西部地区整体雨洪韧性水平较高(见图11)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文考虑了建成环境特征与居民活动的综合影响,从雨洪灾害的吸收能力、适应能力、恢复能力和暴露性4个方面进行分析。采用熵权—TOPSIS方法构建了滨水空间建成环境雨洪韧性评估模型,并对比分析静态—动态人口暴露和仅考虑静态人口暴露的评估结果。

基于深圳市海绵城市建设专项规划提供的易涝点空间数据(见图12),本文采用空间叠加统计法对雨洪韧性评估结果进行验证,以每个易涝点为中心,建立500 m的缓冲区。计算各韧性等级区域覆盖的易涝点数量及比

例(见表3)。结果显示,低和较低韧性区覆盖了51%易涝点,验证了该评估方法的可行性和有效性。进一步对比静态与静态—动态人口暴露建成环境雨洪韧性评价结果的差异显示:静态评价方法下中等韧性区覆盖了51.7%的易涝点,而静态—动态评价方法使较低韧性区的易涝点覆盖率从28.8%显著提升至46.1%。卡方检验结果表明两种方法在韧性等级分布上存在显著差异($\chi^2=22.68$, $df=4$, $p<0.001$),

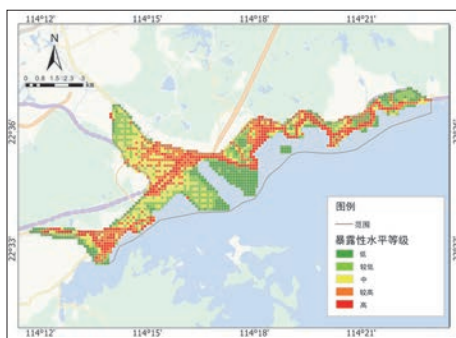


图9 滨水空间建成环境暴露性空间分布图
Fig.9 Distribution map of exposure space in the built environment of waterfront spaces

资料来源:笔者自绘。

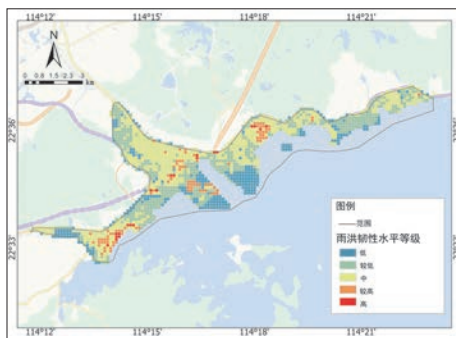


图11 静态人口暴露建成空间环境雨洪韧性综合评价结果
Fig.11 Comprehensive evaluation results of static population exposure to the rainwater and flood resilience in the built environment of waterfront spaces

资料来源:笔者自绘。

证实了引入动态人口暴露数据的评价结果更符合实际易涝风险分布特征。因此,本文方法能够更准确地反映建成环境雨洪韧性的真实水平。

其次,在评估指标权重时,与其他指标相比,聚集度指数的熵权较低,这可能是因为在研究区域内的数据分布较为均匀,景观格局相对一致,尤其是在城市建成区,聚集度指数的变化较小。因此,该指标在反映雨洪韧

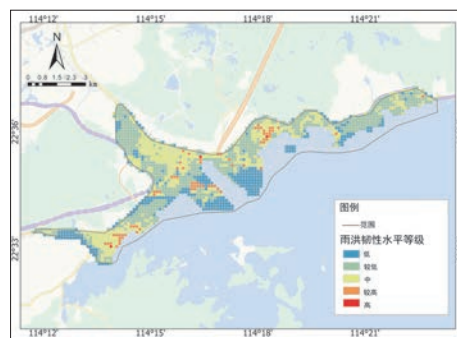


图10 建成空间环境雨洪韧性综合评价结果
Fig.10 Comprehensive evaluation results of rainwater and flood resilience in the built environment of waterfront spaces

资料来源:笔者自绘。

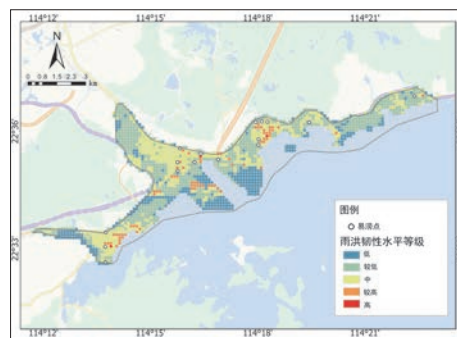


图12 建成空间环境雨洪韧性综合评价等级验证
Fig.12 Verification of comprehensive evaluation levels for rainwater and flood resilience in the built environment of waterfront spaces

资料来源:笔者自绘。

表3 静态与静态—动态人口暴露下各韧性等级覆盖的易涝点数量对比

Tab.3 Comparison of the number of waterlogging-prone points covered by each resilience level under static and static-dynamic population exposure

| 韧性等级 | 静态人口暴露覆盖易涝点数量/个 | 占比/% | 静态—动态人口暴露覆盖易涝点数量/个 | 占比/% |
|------|-----------------|------|--------------------|------|
| 低 | 19 | 4.2 | 22 | 4.9 |
| 较低 | 130 | 28.8 | 208 | 46.1 |
| 中 | 233 | 51.7 | 185 | 41.0 |
| 较高 | 58 | 12.9 | 33 | 7.3 |
| 高 | 11 | 2.4 | 3 | 0.7 |

资料来源:笔者自制。

性差异方面的作用较弱,导致其权重较低。此外,聚集度指数可能与其他指标(如路网密度、混合用地地块比例等)的相关性较小,所以在研究模型中,聚集度指数的权重可能被有意或无意地降低。综上所述,聚集度指数权重较低的原因可能与其数据分布、研究区域特征、指标相关性、数据处理方式、研究重点等因素有关。未来研究可以进一步优化指标选择和数据采集方法,以提高聚集度指数在雨洪韧性评估中的重要性。

当前的评估模型虽然已经将运动轨迹密度作为动态人口暴露性特征纳入考量,但行为活动的多样性和复杂性远不止于此。未来研究可进一步细化活动的分类,例如区分日常通勤、休闲运动、紧急疏散等不同类型的活动模式。活动特征的空间分布和时间变化也是未来研究需要关注的重点。当前模型主要基于运动轨迹数据,未能充分反映体力活动在时间上的动态变化。例如,居民的活动模式在一天中的不同时段、一周中的不同时期和一年中的不同季节都可能存在显著差异。未来研究可以引入时间序列和时空数据分析方法,捕捉活动的动态变化规律,从而更全面地评估滨水空间的雨洪韧性。

4.2 结论

本文以深圳市盐田区为例,基于运动轨迹密度、绿地率、路网密度、可达性等数据,对滨水空间建成环境的雨洪韧性水平进行了综合评价。得出以下主要结论:

(1) 基于动态人口暴露特征,本文提出一种新的建成环境雨洪韧性评价方法。通过与现状易涝点的对比分析,发现结合动态人口暴露性的雨洪韧性评价结果更符合实际情况。

(2) 深圳市盐田区滨水空间建成环境的雨洪韧性水平呈现出显著的空间分异特征,其中西北部地区韧性最高,中部地区次之,东南部地区韧性较低。仅考虑静态人口暴露的韧性评价结果整体高于静态—动态人口暴露的评价结果。

(3) 动态人口暴露性特征是影响城市雨洪

韧性的重要因素之一。然而,本文仅考虑了动态人口暴露性特征的一个方面,可能存在一定的局限性。未来研究需要通过更多样化的数据和指标,细化动态人口暴露的分类与分析。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023: 121-196.
- [3] 邹锦. 城市滨水空间的韧性机理及其设计响应[J]. 上海城市规划, 2023 (1): 40-46.
- [4] ZOU Jin. Resilience mechanism and design response of urban waterfront[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2023(1): 40-46.
- [5] LIU L, YIN J, WANG J, et al. Urban flood resilience evaluation in China: a systematic review of frameworks, methods, and limitations[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2024, 16(1): 2445631.
- [6] RIBEIRO P J G, PENNA JARDIM GONÇALVES L A. Urban resilience: a conceptual framework[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 50: 101625.
- [7] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [8] 翟国方. 气候变化背景下规划视角的城市雨洪灾害韧性应对: 关键概念、基本思路和通用框架[J]. 城市规划学刊, 2024 (1): 29-37.
- [9] ZHAI Guofang. Resilient response to urban rain-storm and flood disasters from a planning perspective under the background of climate change: key concepts, basic ideas and general framework[J]. Urban Planning Forum, 2024(1): 29-37.
- [10] MOGHADAS M, ASADZADEH A, VAFIDIS A, et al. A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 35: 101069.
- [11] MURDOCK H, DE BRUIJN K, GERSONIUS B. Assessment of critical infrastructure resilience to flooding using a response curve approach[J]. Sustainability, 2018, 10: 3470.
- [12] BARREIRO J, FERREIRA F, BRITO R, et al.

- Development of resilience framework and respective tool for urban stormwater services[J]. Sustainability, 2024, 16: 1316.
- [11] OLADOKUN V O, PROVERBS D G, LAMOND J. Measuring flood resilience: a fuzzy logic approach[J]. International Journal of Building Pathology and Adaptation, 2017, 35(5): 470-487.
- [12] ANELLI D, TAJANI F, RANIERI R. Urban resilience against natural disasters: mapping the risk with an innovative indicators-based assessment approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 371: 133496.
- [13] 李超骖,朱鹏辉,李可欣,等. 城市形态与气候韧性的关联性实证研究——以澳门的雨洪事件为例[J]. 国际城市规划, 2023, 38 (4): 48-57.
- [14] LI Chaosu, ZHU Penghui, LI Kexin, et al. Empirical correlations between urban form and climate resilience: a study of flooding events in Macau[J]. Urban Planning International, 2023, 38(4): 48-57.
- [14] 张开冉,殷苏平,蒋明君. 城市轨道交通网络韧性优化研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25 (2): 527-535.
- [15] ZHANG Kairan, YIN Suping, JIANG Mingjun. Research on optimizing the resilience of urban rail transit networks[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(2): 527-535.
- [15] KARAMOUZ M, TAHERI M, KHALILI P, et al. Building infrastructure resilience in coastal flood risk management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2019, 145(4): 04019004.
- [16] 宁世强,高郭平,李晓艳,等. 基于3D-3MIEIC模型的社区灾害韧性评价研究[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42 (6): 1264-1271.
- [17] NING Shiqiang, GAO Guoping, LI Xiaoyan, et al. Research on disaster resilience of community based on 3D-3MIEIC model[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(6): 1264-1271.
- [17] 陈奇放,翟国方,施益军. 韧性城市视角下海平面上升对沿海城市的影响及对策研究——以厦门市为例[J]. 现代城市研究, 2020 (2): 106-116.
- [18] CHEN Qifang, ZHAI Guofang, SHI Yijun. The impacts of sea level rise on coastal cities and measures from the perspective of resilience city: a case study of Xiamen[J]. Modern Urban Research, 2020(2): 106-116.
- [18] LIU C, SUSILO Y O, KARLSTRÖM A. Examining the impact of weather variability on non-commuters' daily activity-travel patterns in different regions of Sweden[J]. Journal of Transport Geography, 2014, 39: 36-48.
- [19] ZHOU M, HE Q, GU Y, et al. Urban flood resilience assessment of prefecture-level cities in Yangtze River Delta[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2025, 14: 108.
- [20] KOSOVA R, HAJRULLA S, XHAFAJ E, et al.

- Urban flood resilience: a multi-criteria evaluation using AHP and TOPSIS[J]. *Jurnal Ilmiah Ilmu Terapan Universitas Jambi*, 2024, 8: 812-825.
- [21] WEI Y, KIDOKORO T, SETA F, et al. Spatial-temporal assessment of urban resilience to disasters: a case study in Chengdu, China[J]. *Land*, 2024, 13: 506.
- [22] DINCER S, ERCOSKUN Ö. Urban resilience index study on Ankara metropolitan area[J]. *Iconarp International Journal of Architecture and Planning*, 2024, 12(2): 504-532.
- [23] 陈碧琳, 李颖龙. 洪涝韧性导向下高密度沿海城市适应性转型规划评估——以深圳红树湾片区为例[J]. *城市规划学刊*, 2023 (4): 77-86.
CHEN Bilin, LI Yinglong. Evaluation of adaptive transformation planning of high-density coastal cities guided by flood resilience: taking Shenzhen Mangrove Bay area as an example[J]. *Urban Planning Forum*, 2023(4): 77-86.
- [24] 张钰佳, 翟国方, 何仲禹. 行为暴露视角下高温健康风险评估——以南京市为例[J]. *灾害学*, 2025, 40 (1): 53-60.
ZHANG Yujia, ZHAI Guofang, HE Zhongyu. Heat health risk assessment from the perspective of behavioural exposure: a case study of Nanjing City[J]. *Journal of Catastrophology*, 2025, 40(1): 53-60.
- [25] 祝朝阳, 郑善文, 甄冉, 等. 基于运动轨迹数据的健康街道环境优化研究——以北京核心区为例[J]. *规划师*, 2023, 39 (7): 72-79.
ZHU Zhaoyang, ZHENG Shanwen, ZHEN Ran, et al. Research on optimizing healthy street environments based on movement trajectory data: a case study of Beijing's core area[J]. *Planners*, 2023, 39(7): 72-79.
- [26] GE Y, HU Y, HE Z, et al. Exploring pedestrian thermal risk exposure and its determinants among various types of walking trips: a gendered examination from a GPS-based study in Nanjing[J]. *Travel Behaviour and Society*, 2024, 37: 100841.
- [27] DONG W, ZHOU Y, GUO D, et al. Evaluation of urban infrastructure resilience based on risk-resilience coupling: a case study of Zhengzhou City[J]. *Land*, 2025, 14: 530.
- [28] QIAO H, PEI J. Urban stormwater resilience assessment method based on cloud model and TOPSIS[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 19: 38.
- [29] 彭翀, 郭祖源, 彭仲仁. 国外社区韧性的理论与实践进展[J]. *国际城市规划*, 2017, 32 (4): 60-66.
PENG Chong, GUO Zuyuan, PENG Zhongren. Progress in theory and practice of community resilience abroad[J]. *Urban Planning International*, 2017, 32(4): 60-66.
- [30] MENS M J P, KLIJN F, DE BRUIJN K M, et al. The meaning of system robustness for flood risk management[J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(8): 1121-1131.
- [31] 郭佳, 翟国方, 葛懿夫. 乡村人居环境综合韧性指数构建及实证研究——以江苏省为例[J]. *上海城市规划*, 2023 (2): 15-22.
GUO Jia, ZHAI Guofang, GE Yifu. Construction and empirical study of comprehensive resilience index of rural human settlements: a case study of Jiangsu Province[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2023(2): 15-22.
- [32] KOOHSARI M J, OKA K, NAKAYA T, et al. Urban form metrics for promoting walking: street layouts and destinations[J]. *Journal of Urban Health*, 2023, 100(5): 1024-1031.
- [33] BHAVATHRATHAN B K, PATIL G R. Capacity uncertainty on urban road networks: a critical state and its applicability in resilience quantification[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, 54: 108-118.
- [34] ZHANG Y, AYYUB B M, SAADAT Y, et al. A double-weighted vulnerability assessment model for metro rail transit networks and its application in Shanghai metro[J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2020, 29: 100358.
- [35] LIU X, YANG S, YE T, et al. A new approach to estimating flood-affected populations by combining mobility patterns with multi-source data: a case study of Wuhan, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 55: 102106.
- [36] 宋钦滢, 张博寡, 马东辉, 等. 社区雨洪韧性量化评估方法研究综述[J]. *灾害学*, 2024, 39 (2): 212-219.
SONG Qinying, ZHANG Boqian, MA Donghui, et al. Review on quantitative assessment methods of community rain-flood resilience[J]. *Journal of Catastrophology*, 2024, 39(2): 212-219.
- [37] 卢刚, 王琳. 基于景观格局优化的水生态韧性提升——以山东省林家村镇为例[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21 (35): 15194-15202.
LU Gang, WANG Lin. Enhancement of water ecological resilience based on landscape pattern optimization: a case study of Linjiacun Town, Shandong Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(35): 15194-15202.
- [38] 李春霖, 汤萃文, 卢国春, 等. 2002—2020年甘肃民勤连古城自然保护区土地利用及景观格局时空变化特征[J]. *生态科学*, 2024, 43 (5): 31-42.
LI Chunlin, TANG Cuiwen, LU Guochun, et al. Spatiotemporal variation characteristics of land use and landscape pattern in Minqin Liangucheng Nature Reserve, Gansu Province from 2002 to 2020[J]. *Ecological Science*, 2024, 43(5): 31-42.
- [39] 车乐, 李媛钰, 赵渺希, 等. 水生态系统韧性视角下热带雨林地区的蓝绿空间评价——以五指山市南圣河为例[J]. *热带地理*, 2024, 44 (4): 709-723.
CHE Le, LI Yuanyu, ZHAO Miaoxi, et al. Evaluation of blue-green space in tropical rainforest areas from the perspective of water ecosystem resilience: taking the Nansheng River in Wuzhishan City as an example[J]. *Tropical Geography*, 2024, 44(4): 709-723.
- [40] KOOHSARI M J, YASUNAGA A, VEITCH J, et al. The density paradox: density, walking, and psychological stress in overcrowded public spaces[J]. *Cities & Health*, 2024 (in press).
- [41] WANG F, ZHAO M X, MENG Q L. Analysis of the vitality measurement and correlation factors of urban waterfront space[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 612(1): 012013.
- [42] LIU K, SIU K W M, GONG X Y, et al. Where do networks really work? The effects of the Shenzhen greenway network on supporting physical activities[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 152: 49-58.
- [43] 张溟彬, 白永强. 博弈论-TOPSIS法在城市洪涝韧性评估中的应用[J]. *安全*, 2024, 45 (10): 66-73.
ZHANG Haobin, BAI Yongqiang. Application of game theory-TOPSIS method in urban flood resilience assessment[J]. *Safety*, 2024, 45(10): 66-73.
- [44] 吴秀梅, 施展, 袁翔, 等. 基于熵权-改进TOPSIS法的高速公路桥梁工程安全韧性评价方法[J]. *交通信息与安全*, 2024, 42 (3): 139-147.
WU Xiumei, SHI Zhan, YUAN Xiang, et al. Evaluation method of safety resilience of expressway bridge engineering based on entropy weight-improved TOPSIS method[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2024, 42(3): 139-147.
- [45] 陈丽慧, 陈洁, 高郭平. 滨海城市洪涝风险评估——以上海临港新城为例[J]. *长江科学院院报*, 2025, 42 (8): 84-93.
CHEN Lihui, CHEN Jie, GAO Guoping. Flood risk assessment of coastal cities: a case study of Shanghai Lin'gang New City[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025, 42(8): 84-93.