

基于居民出行特征扰动的城市住区雨洪韧性评估及其规划启示*

——以深圳市为例

Assessment of Pluvial Flood Resilience in Urban Residential Areas Based on Travel Disruption Characteristics and Planning Implications: A Case Study of Shenzhen

成昱霖 甘欣悦 杨晓春 郭仁忠

CHENG Yulin, GAN Xinyue, YANG Xiaochun, GUO Renzhong

关键词 住区雨洪韧性; 手机信令数据; 出行扰动; 空间分异; 评估框架

Keywords: neighborhood pluvial flood resilience; mobile phone signaling data; travel disruption; spatial differentiation; assessment framework

提 要 住区是解析城市安全韧性及其空间分异格局的基本单元。既有研究多依赖静态数据进行宏观尺度评估, 难以精细刻画城市韧性的动态演变。以灾害期间居民的移动时空动态特征作为表征韧性水平的核心指标, 构建数据驱动的住区尺度雨洪韧性评估框架。基于手机信令数据对深圳市“9·7”极端暴雨事件降雨集中的1087个住区的实证分析表明: 商品房住区的韧性水平显著高于城中村, 且不同年代住区在灾中和灾后的韧性呈现显著异质性; 关联分析证实道路内涝是引发居民出行扰动的重要驱动因素, 验证了本框架识别住区韧性空间分异的有效性; 基于人口结构的检验揭示手机信令数据运用于微观尺度韧性评估可能存在低估老龄化住区真实风险的内在偏差。本评估框架可为城市动态灾害监测预警、更新体检及可持续规划提供量化分析支撑。

Abstract: Residential neighborhoods are fundamental units for analyzing urban resilience and spatial differentiation. Existing studies predominantly rely on static datasets for macro-scale assessments, failing to capture the dynamic evolution of resilience processes. This study adopts spatiotemporal mobility patterns of residents during hazard events as a core indicator to construct a data-driven framework for assessing neighborhood-scale pluvial flood resilience. Using mobile phone signaling data, we empirically analyze 1,087 neighborhoods in Shenzhen affected by the "9·7 extreme rainstorm." The Results indicate that commodity housing neighborhoods exhibit significantly higher resilience than urban villages, with notable heterogeneity across different development periods during both disaster and recovery phases. Correlation analysis confirms road inundation as a key driver of travel disruptions, validating the effectiveness of the framework in identifying spatial variations in resilience. Furthermore, demographic validation reveals potential biases in mobile phone data, which is likely to underestimate disaster risks in aging neighborhoods at the micro scale. This framework provides quantitative support for dynamic disaster monitoring, urban regeneration diagnostics, and sustainable planning.

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202602015
文章编号 1000-3363(2026)02-0113-08

作者简介

成昱霖, 深圳大学建筑与城市规划学院硕士研究生, chengyulin0829@163.com
甘欣悦, 深圳大学建筑与城市规划学院副教授
杨晓春, 深圳大学建筑与城市规划学院, 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室、粤港澳智慧城市联合实验室教授, 通信作者, yangxc@szu.edu.cn
郭仁忠, 中国工程院院士, 深圳大学建筑与城市规划学院、亚热带建筑与城市科学全国重点实验室、粤港澳智慧城市联合实验室教授

* 中国工程院战略研究与咨询项目课题二“安全韧性城市规划与设计”(项目编号: 2022-JB-02); 深圳市基础研究专项(自然科学基金)“海平面上升对深圳滨海建成环境影响及韧性提升模拟”(项目编号: JCYJ20250604182433045); 深圳大学2035追求卓越研究计划“区域网络协同时代绿色城市规划设计理论研究”(项目编号: 2022B005); 国家自然科学基金青年科学基金项目(C类)“居住-活动关联视角下超大城市‘城中村生活圈’特征识别、机制与规划响应——以深圳为例”(项目编号: 52508072)

在全球气候极端化现象加剧背景下，城市气候韧性成为国际学界和治理实践的核心议题。作为城市治理的基本单元，住区既是居民日常生活的空间载体，又是灾害应急管理的前沿阵地。伦敦、纽约等国际都市均已将提升住区对自然灾害的抵御能力纳入重要的气候适应战略^[1]。然而，我国超、特大城市近年来极端暴雨事件频发，气候系统常因“列车效应”维持活跃残留环流，导致间歇性降雨持续引发次生影响^[2]，严重制约居民生产生活等城市功能的正常运转，并延缓灾后恢复进程。

现有研究多依赖静态指标评估城市宏观韧性，难以在住区尺度动态识别灾害全周期的韧性差异。本研究创新性地引入居民出行时空扰动特征，构建数据驱动的城市住区雨洪韧性评估框架，并用于分析深圳市2023年“9·7”极端暴雨事件。研究精准识别不同住区韧性的时空异质性，通过实际内涝数据验证模型的效度，同时亦揭示大数据应用在微观尺度韧性评估中的潜在偏差。该评估方法旨在为精细化的灾害应急响应、住区更新体检及气候适应性规划提供科学支撑。

1 城市雨洪韧性评估方法综述

城市韧性研究经历了从脆弱性到韧性的范式转型^[3]。既有研究^[4-6]多承袭综合指标体系的传统脆弱性框架，聚焦灾前固有属性评估，但受限于数据可获取性，且指标选取及权重赋值难以避免主观偏差。随着Cutter等^[7-9]先后开发的社会脆弱性评价指数和社区韧性基线指标，研究重点由静态转向系统的动态响应，大量学者开始利用多源时空数据捕捉城市韧性的过程特征。

城市雨洪韧性是指城市系统面对暴雨洪涝灾害冲击时，抵抗、吸收、适应和恢复的综合能力^[10-11]。与普遍的韧性一致，其核心内涵通常包括三个方面：有效降低灾时性能下降程度、快速从扰动中恢复以及实现较高水平的恢复^[12-15]；其研究的空间尺度涵盖个体（或建筑）、社区、城市乃至区域层面^[16-18]。然而，无论是基于模拟软件的情景分析法^[19]、基于社会网络分析的系统动力学方法^[20]，

还是基于大数据的实证分析^[21-24]，韧性曲线^[25]都是被广泛应用的韧性量化评估理论工具。

基于韧性曲线的研究框架通过刻画系统性能在灾害前后的时间序列轨迹，主要提取关键特征点包括冲击点、恢复点和平息点，进而量化总扰动面积、峰值损失率、恢复速率及曲线形态等指标^[26-29]，实现系统韧性水平的映射。作为韧性研究的核心范式，被广泛用于刻画交通网络、排水供电、医疗设施、经济产出等城市关键功能的动态响应^[30]。

大数据为城市人群时空行为研究提供了高精度数据支撑，并广泛应用于灾害事件的行为建模。既有研究依托韧性曲线框架，利用社交媒体、GPS轨迹、手机信令等出行大数据，或以“日”为时间单位，聚焦灾害的长期宏观扰动，识别出双峰恢复模式^[22]，或以小时为单位，捕捉极端暴雨的短期冲击，发现系统恢复可能晚于事件结束^[23]，以及移动网络流量的滞后恢复效应^[24]，因而揭示了极端天气事件引发的出行扰动特征，但对气候灾害多阶段影响机制的响应仍显不足。既有研究多将灾中冲击与灾后扰动统合计算，未能有效区分二者的驱动机制与累积效应，由此模糊了对灾害动态过程的机理认知。

综上，住区尺度的动态韧性评估仍缺乏适配方法。现有研究鲜有有效手段来量化暴雨灾害对不同阶段住区居民出行行为的影响^[31]。为此，本研究以小时为单位，构建灾害前后短周期^[32]住区居民出行波动曲线，并以积水清退时间进行划分，将传统抵抗—恢复阶段作为灾中阶段以量化直接冲击，同时新增滞后扰动阶段作为灾后阶段以量化次生影响。契合极端暴雨的多阶段气候特征，可实现不同类型城市住区韧性的动态评估，推动基于精细化诊断的应急治理与规划启示转化^[33]。

2 实证研究区域与研究方法

2.1 研究区域、数据来源及处理

据深圳市气象台报告，2023年9月7日17时至8日6时，深圳遭遇超历史记录的特大暴雨，且强对流系统呈现明显的“列车效应”，使得灾后恢复过程仍有

间歇性降水。本研究选取降雨较为集中的罗湖区全区、福田区的园岭、华强北、南园街道以及龙岗区的布吉街道等共14个街道作为研究区域（图1）。

以百度地图的住区AOI数据为基础，结合OpenStreetMap（OSM）的2018年深圳市建筑矢量数据、安居客网站的商品房坐标点，综合判定和筛选出研究区域内共1087个住区单元（含103个城中村和984个商品房住区）[图1(b)]；居民出行特征分析基于中国联通智慧足迹（DAAS）平台的手机信令数据，共提取研究区域内暴雨发生前后（2023年9月2日至9月24日）约100万人次匿名设备的移动轨迹。

此外，深圳市水务局、应急管理局发布的2023年“9·7”暴雨期间发生显著积水的内涝道路信息，以及2020年深圳市第七次全国人口普查的街道级人口结构数据将用于评估方法可靠性验证。

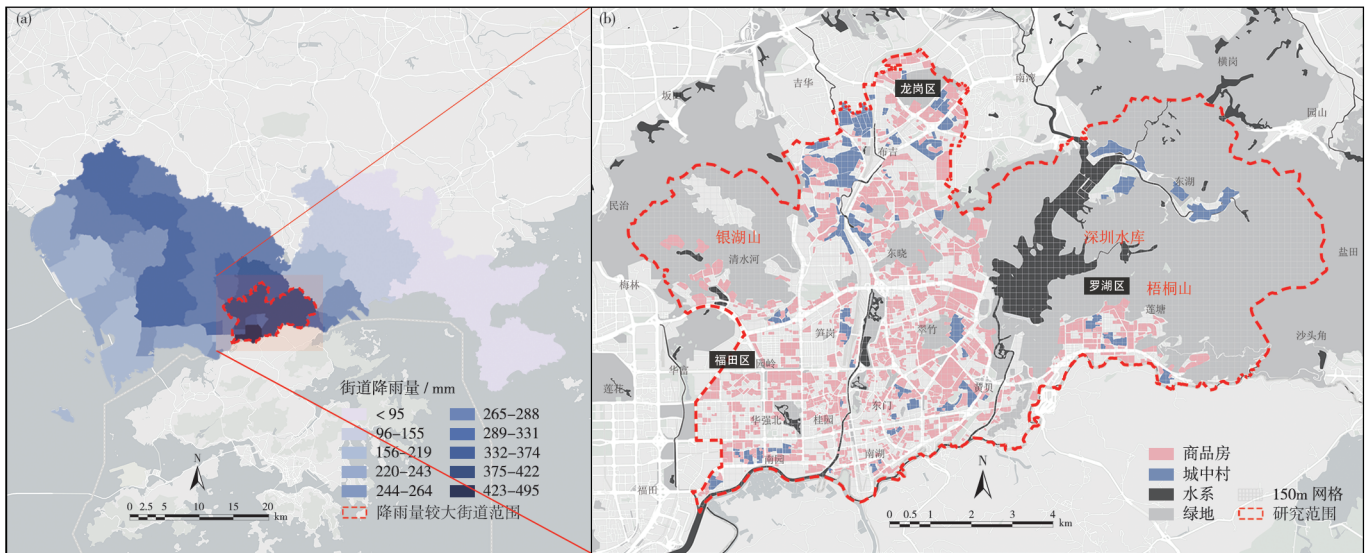
2.2 研究方法

本研究通过计算居民出行数据灾时相较于非灾时的变化情况，量化住区受极端暴雨的影响程度及其恢复能力，以表征其雨洪韧性水平，进而结合内涝数据及其步行可达范围、住区外部道路连通性、街道人口结构进行多维度验证。整个评估过程包含3个关键步骤（图2）。

2.2.1 出行数据库构建

本研究在DAAS平台中通过结构化查询语言（structured query language, SQL）采集匿名化的时空信息记录，确保数据合法使用并严格保护用户隐私。向DAAS平台导入研究范围内的住区边界数据，通过SQL统计各住区居民每小时的出行总量，构建覆盖灾害前后的住区出行数据库。

研究选取2023年9月6日至9月15日连续10天的住区出行量变化作为出行波动曲线数据基础，覆盖暴雨期间及其后1周工作日，以捕捉灾后持续的出行趋势。以避开特殊节假日的晴天为目标，选取灾害预警前1天9月5日与灾害平息后1周9月18日至22日每小时出行量的平均值，作为非灾时工作日出行基线，选取9月2日与23日、9月3日与24日计算非灾时周六、周日出行基线，以此构建各住区工作日、周末3组每小时的出



(a) 深圳“9·7”极端暴雨24h降雨量空间分布示意图

(b) 研究范围内住区空间单元分布图

图1 研究区域
Fig.1 Study Area

行基线。采用滑动平均生成波动曲线揭示居民出行水平，窗口值设为7h，兼顾平滑噪声与保留受灾趋势。初步分析显示，超过50%的住区出行扰动呈现“灾中冲击+滞后扰动”的分阶段特征。

2.2.2 住区雨洪韧性评估与分级

沿用韧性曲线的核心逻辑——测量系统在连续时间段内应对灾害事件的表现——分析住区居民出行水平（y轴）在灾害前后每小时（x轴）的变化，以暴雨对居民出行行为扰动程度反向表征住区雨洪韧性。该方法结合“9·7”暴雨的气候特征进行了适应性优化。

(1) 引入“滞后扰动阶段”以捕捉暴雨灾害对居民出行的次生影响

由于暴雨对居民出行的影响往往呈现多阶段特征——初始的直接降雨冲击，以及后续间歇降雨的滞后影响，居民出行可能在暴雨结束后数日受持续扰动。因此，与以往韧性研究多聚焦单次冲击不同，本研究将滞后扰动阶段作为灾后阶段纳入韧性评估指标计算，从而更全面刻画住区韧性水平在暴雨及其次生灾害下的分阶段异质性。

(2) 引入非灾时出行波动范围确定灾情特征点

居民每日出行情况存在一定变化幅度，因此冲击点和平息点并非零点，而是与非灾时波动范围的交点。本研究将

第*t*小时的出行量差值定义为 ΔS_t ，依据该差值序列计算标准差 σ ，指标算法见表1。

(3) 构建强化时间持续累积影响的住区人均出行扰动强度以表征韧性水平

根据扰动强度和持续时间的差异，将扰动类型分为两类：短期高强度型和长期中强度型。持续时间越长，涉及的出行活动类型越多，累积效应加剧资源消耗和社会经济损失，对住区造成的总体影响往往也越大。因此本研究对扰动强度*A*进行时间加权，该复合指标可突出整个灾害周期对居民出行扰动的累积代价^[35]，同时将加权强度归一化为“人均出行扰动强度”，以便住区横向对比，指标算法见表1。与传统指标相比，该指

标对小尺度空间单元韧性差异的敏感性更高。

根据深圳市气象局总结^①，将48h作为灾中阶段与灾后阶段的分界线。灾中扰动为灾中阶段所有出行扰动的总和，灾后同理；若扰动跨越48h分界线，则根据其在分界线前面积大小进行归类。最后采用K-means聚类方法分别对灾中和灾后韧性进行分级，引入肘部法则(Elbow Method)与轮廓系数确定最优聚类数*k*。

2.2.3 评估方法验证

为验证评估方法在实际场景中的适用性与可靠性，本研究进一步引入多维度外部变量对评估结果进行实证检验。

(1) 内涝道路邻近性与住区外部道

表1 指标算法

Tab.1 Indicator Algorithm

指标	公式	含义
非灾时波动范围	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta S_i - \overline{\Delta S})^2}$	$\overline{\Delta S}$ 为24h内出行差值的均值, $N=24$ h, 时间序列为 <i>t</i> =1到24h。本研究以 σ 作为非灾时波动的参考基准, 将做对比的两组正常出行日之间出行量差值的标准差作为非灾时波动范围
人均出行扰动强度	$V_i = \frac{A_i T_i}{N_i} = \frac{\int_{t_0}^{t_2} [Q_{\max} - Q(t) - \sigma] dt \cdot (t_2 - t_0)}{N_i}$	V_i 表示第 <i>i</i> 个住区初次波动的人均出行扰动强度, N_i 表示该住区的总人口数; A_i 为初次扰动强度, 反映出行下降的累积效应; T_i 为扰动持续时间, 即从冲击点至平息点之间的时长, 如 $t_0 < T \leq t_2$ (图2); Q_{\max} 为出行基线, $Q(t)$ 为实际居民出行水平

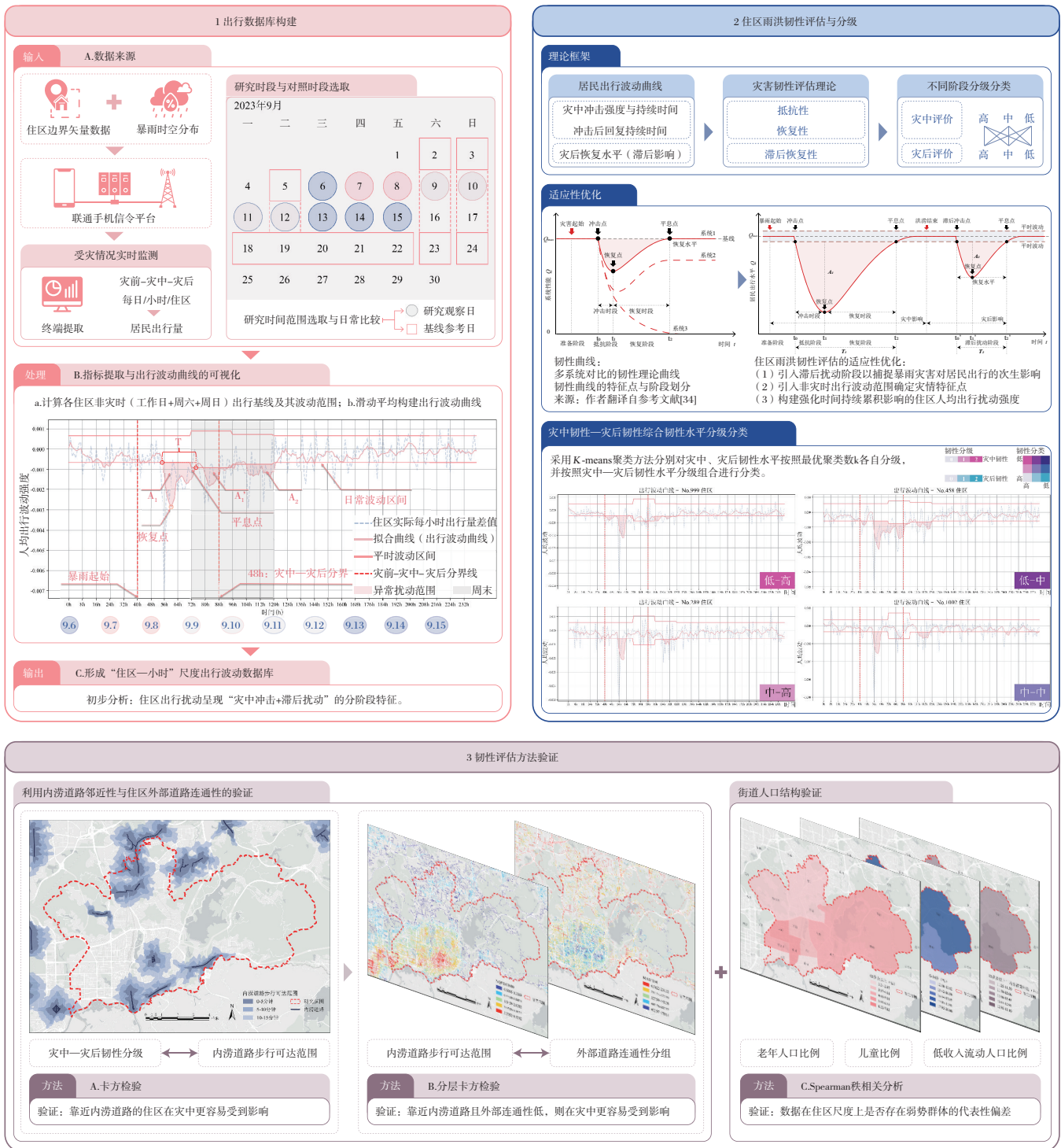


图2 研究方法
Fig.2 Research methods

路连通性分析

居民出行往往因途经道路内涝阻断而被迫取消出行，邻近内涝道路且出行道路可选择性（可操作化为外部道路连通性）较低的住区，在暴雨内涝扰动下

预计将承受更大的功能损失和出行受限风险。为验证这一假设，按照大于15 min、10—15 min、5—10 min以及小于5 min构建住区与内涝道路的步行可达分层缓冲计量值以表征邻近性，采用卡方检

验统计韧性等级与内涝道路邻近性的显著性。在此基础上，基于空间句法，从介数中心性（体现道路网络结构重要性）和角平均深度（体现路径组织效率）综合刻画住区外部道路连通性。将住区划

分为低连通性组和高连通性组，进行韧性等级与内涝道路邻近性的分层卡方检验，从而分析住区的内涝道路邻近性与外部道路连通性的交互作用，考察居民出行路径多样性和可达性是否在其中发挥调节或中介作用。

值得说明的是，研究未将住区高程纳入主要验证变量。尽管高程是内涝分布的传统物理因素，但其与积水深度及出行受限之间的关系受排水系统、管网容量、微地形、土壤渗透性、人员应急安排等因素共同影响，并非简单的线性关系，并且住区高程主要反映自身被内涝淹没的风险，而在解释居民出行受洪涝影响时并非直接解释因子。

(2) 街道人口结构验证

为检验手机信令数据在住区尺度上是否存在老年人、儿童及部分低收入流动人口等弱势群体的代表性偏差，并探讨本研究的社会解释力，引入深圳市第七次全国人口普查街道级人口结构数据，包括65岁及以上老年人口比例、0—14岁儿童比例、15岁及以上人口平均受教育年限，采用Spearman秩相关分析，检验街道平均韧性与人口结构的关联强度与显著性。

3 研究结果

3.1 灾中、灾后住区韧性水平

灾中、灾后人均出行扰动强度聚类结果显示，误差平方和曲线均在 $k=3$ 处

呈现肘部拐点，且轮廓系数也处于较高水平，因此将灾中、灾后韧性水平各自分为三级，并将各水平住区分别标记为0、1、2以代表高、中、低韧性，按照灾中一灾后分级组合进行分类。

韧性分级地图(图3)表明，低韧性住区呈现连片分布特征：灾中低韧性住区主要集中于罗湖区莲塘街道，以及东门、黄贝和南湖街道的交界区域，这些地区地势相对较低，排水系统可能无法承受短时强降雨，导致内涝严重并直接影响居民出行；灾后新出现的低韧性住区主要集中于罗湖区桂园街道及福田区南园街道，这些地区靠近商业密集区，可能受限于交通拥堵、社会经济活动密集等因素，暴雨过后对居民出行的扰动将持续较长时间；灾中和灾后均呈现低韧性的住区则集中于龙岗区布吉街道，该片区内老旧小区和城中村分布较多，基础设施老化、排水系统不完善，极易发生内涝，加剧灾中灾后居民出行的持续扰动。此外，罗湖区笋岗、清水河街道等区域亦呈现小范围连片分布，少部分住区则以孤立形式出现，反映了街道基础设施建设水平、治理效率及地形高程差异对韧性分布的潜在影响。

区域间横向比较进一步显示，研究范围内的低韧性住区主要集中于罗湖区和龙岗区，而经济条件较优的福田区的低韧性住区显著较少。这一结果反映了城市空间形态、建成环境基础设施及经济资源配置对住区抗灾能力的深层影响。

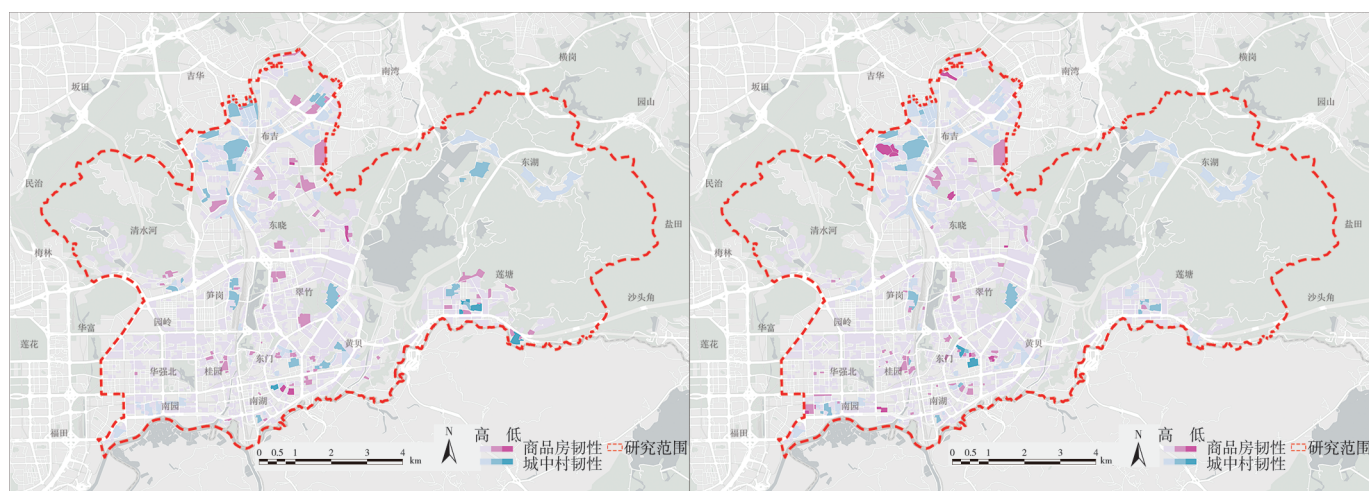
特别地，商品房与城中村的韧性对比分析表明，低韧性住区主要为城中村，部分城中村韧性明显低于其邻近的商品房住区，体现出部分城中村建成环境基础设施的严重不足，凸显其在相同地理区位下的韧性劣势。

3.2 不同住区类型在灾中、灾后的韧性水平差异

基于韧性评估结果，本研究生成箱线图与散点分布图分析不同类型住区在灾中与灾后阶段的韧性变化，揭示不同类型住区的韧性特征(图4)。

城中村整体表现出较低的灾中与灾后韧性，箱线图显示其灾中扰动上须显著延长，部分极高扰动样本拉高了分布范围[图4(a)]，这可能归因于基础设施不足与社会资源短缺，放大灾害冲击的影响。灾后扰动虽然下降但仍较高，接近商品房的灾中扰动，反映了城中村在恢复阶段的滞后影响更多。相比之下，商品房住区的灾中扰动中位数较低，但散点图显示部分样本仍呈现较低韧性；灾后扰动显著下降，可能得益于较完善的基础设施与充足的社会资源支持，恢复效率更高。

分年代箱线图[图4(b)]表明：2000年前与2000—2010年商品房的整体韧性相似，但散点图揭示2000年前样本的低韧性住区较多，可能因基础设施老化易损与社会资源支持不足；且2000—2010年商品房的灾后恢复更快，受益于规划

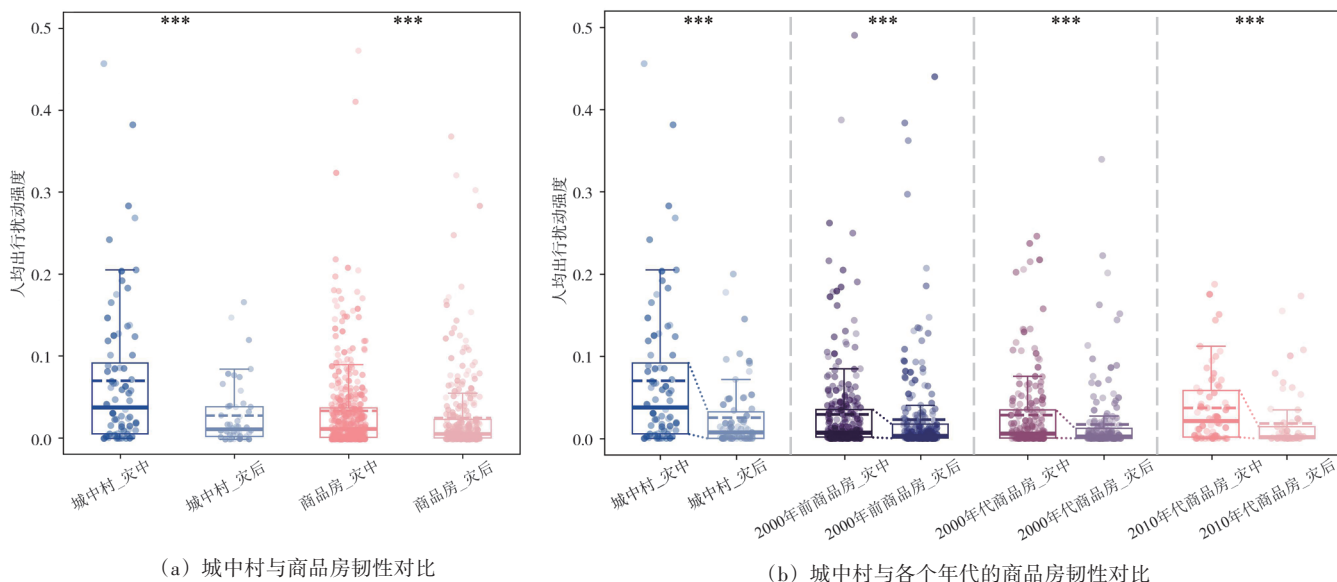


(a) 灾中住区韧性地图

(b) 灾后住区韧性地图

图3 住区韧性地图

Fig.3 Maps of residential neighborhood resilience



(a) 城中村与商品房韧性对比

(b) 城中村与各个年代的商品房韧性对比

图4 住区韧性箱线图与散点分布

Fig.4 Boxplot and scatter distribution of resilience levels for residential areas

标准提升和逐步改善的建成环境；2010年后商品房在灾中显示出最高的出行扰动中位值，表现出较大的箱体高度(IQR)，但低韧性住区散点最少，呈现出较强的两极分化特征，灾后恢复最快，与更优越的基础设施和资源配置相符。尽管传统假设认为住区建设年代、质量与韧性呈正相关，但本研究发现灾中韧性差异提示不同类型住区在暴雨冲击下的抵抗力及人群响应机制存在非线性异质性。

综上，住区韧性评估需超越单一建成环境指标，综合考虑灾中抵抗力与灾后恢复力的动态变化。城中村的低韧性突显了社会经济属性与应急资源分配的重要性，而商品房跨年代的差异揭示了基础设施演进的影响。

3.3 住区韧性评估结果验证

卡方检验结果(图5)显示：灾中韧性与内涝道路步行距离存在显著关联($\chi^2=14.5216, P=0.0243<0.05$)，表明距离内涝道路越近的住区，在灾中出现低韧性的概率显著更高；灾后韧性与内涝道路步行距离的关联不显著($\chi^2=12.0748, P=0.0603>0.05$)，仅呈现边缘趋势，说明灾后韧性受内涝道路直接邻近性的影响较弱。该结果支持本研究方法的有效性，即灾中韧性受道路内涝的直接影响，而灾后韧性则受其他因素影响。

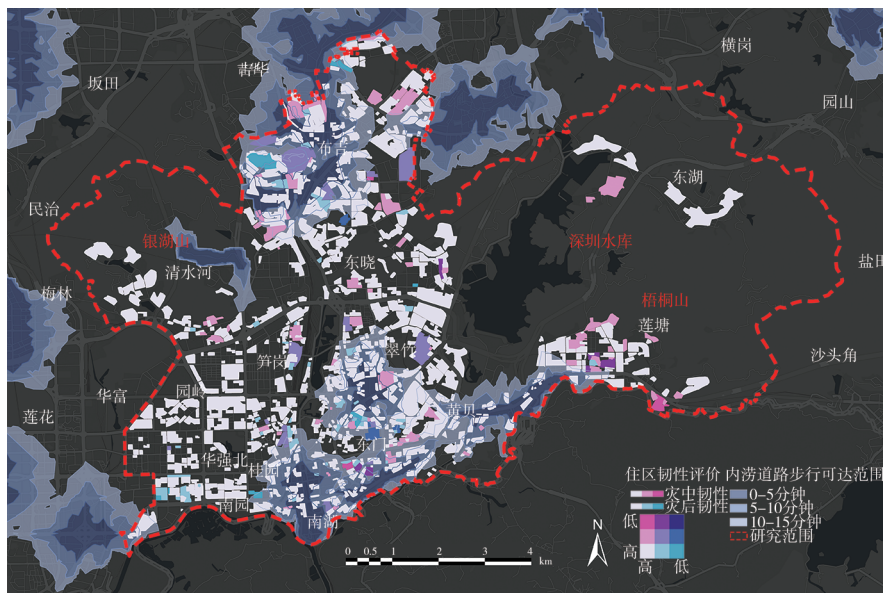


图5 利用内涝道路分层缓冲区的验证

Fig.5 Validation of the layered buffer zone approach on waterlogged roads

分层卡方检验按住区外部连通性中位数分为低连通性组和高连通性组，结果显示：灾中韧性在低连通性组与内涝道路步行距离存在显著关联($\chi^2=15.8262, P=0.01472<0.05$)，而在高连通性组，该关联不显著($\chi^2=9.0223, P=0.1723>0.05$)，说明在外部连通性高的小区，内涝的影响被削弱；灾后韧性无论在低连通性组($\chi^2=10.8070, P=0.0945>0.05$)还是高连通性组($\chi^2=7.3557, P=$

$0.2892>0.05$)，都与内涝道路步行距离关联不显著。这揭示了小区外部道路连通性是内涝道路影响灾中韧性的重要调节因素。连通性低的小区在灾中更容易因附近道路内涝而出现显著出行受限，相比之下，高连通性小区可通过多路径排水或绕行缓解影响。上述结果共同表明本研究方法能有效捕捉内涝道路对周边住区灾中韧性的分异影响。

街道平均韧性指标(基于人均出行

扰动强度大于0的住区计算的均值，反映街道整体扰动水平）与人口结构变量的 Spearman 秩相关分析结果（表2）显示：灾中阶段的扰动强度指标与老年比例、儿童比例和教育年限的相关性均较弱且不显著；灾后阶段的扰动强度与老年人比例和受教育年限呈现显著负相关，与儿童比例呈微弱负相关，说明出行扰动在灾中阶段对人口结构偏差的敏感性较低，扰动主要受突发物理阻断驱动，弱势群体出行隐形的影响尚未显著放大；灾后阶段相关性显著增强，说明方法对灾后阶段的恢复滞后过程呈现较强的社会经济敏感性，能够部分捕捉人口结构对滞后扰动的分异效应。例如，教育水平越高即代表低收入人口越少的街道，其灾后韧性越高。然而，老年人比例的显著负相关说明手机信令数据在住区尺度上存在一定代表性偏差——由于老年人样本覆盖率低，计算时部分住区（园岭、翠竹等街道）的出行减少对全样本的扰动贡献微弱，从而产生了老年人越多，其计算出的“韧性越高”的统计假象。这意味着单纯依赖手机信令数据可能低估弱势人群的真实受灾风险。未来研究还需融合社区级人口普查或抽样问卷数据进一步校正，以实现更具包容性的韧性评估。

4 讨论与结论

4.1 主要结论与实践价值

本研究构建了基于暴雨灾害对居民出行时空扰动的住区雨洪韧性评估框架，并对深圳“9·7”极端暴雨事件进行实证检验。通过解析百万级匿名设备的信令数据，构建灾害前后的出行波动曲线，量化了住区在灾中、灾后不同阶段的韧性水平，并生成住区韧性地图，研究方法效度经由实际内涝道路数据和人口结构进行验证。结果显示：商品房住区相对于城中村表现出更高的韧性，且不同建成年代的商品房住区的韧性水平亦呈现显著异质性；基于内涝道路的关联分析证实，道路内涝是引发灾害期间居民出行扰动的重要驱动因素，验证了本框架识别住区韧性空间分异的有效性；同时基于街道级人口结构的检验揭示手机信令数据运用于微观尺度韧性评估可能

存在低估老龄化住区真实风险的内在偏差。

现有灾害韧性评估多聚焦于宏观层面的静态评估，本研究实现了在住区尺度上的精细化研判，凸显了基于居民出行特征的动态、连续时序分析优势。相较于基于韧性曲线、利用大数据的既有研究，本研究对住区雨洪韧性评估的适应性优化为理解城市雨洪韧性的时空异质性、进而为灾害应急治理提供了更具洞察力的视角。与依赖高程的情境模拟分析不同：一方面，本研究不仅验证了灾中韧性与内涝道路邻近性的显著相关性，而且发现低韧性住区并不局限于内涝道路的一定范围内（图5）；另一方面，低高程住区虽传统上被视为高风险区，但本研究发现与现实中居民出行受扰动的实际状况并不完全吻合，如部分山体周边地势较高的住区因道路选择性有限而呈现低韧性。基于流动性的动态评估能够更综合地捕捉传统评估所忽略的更为复杂的影响。

此外，本研究回应了城市韧性研究中的社会公平议题。现有研究^[15]指出，社会经济状况较差的住区往往韧性低。本研究通过不同建成年代、不同性质住区之间的韧性对比，进一步验证了社会经济因素与韧性的关联，反映了在灾害抵抗和恢复过程中，基础设施不足和资源分配不均导致的住区韧性差异的现实问题。同时，研究生成了住区层面的韧性地图，对城市微观尺度的韧性水平进行了更为精细的刻画。

4.2 将韧性评估纳入城市住区尺度体检的建议

根据《国土空间规划城市体检评估规程》等政策文件，城市体检已成为推动城市高质量发展、补齐人居环境短板的重要制度工具，韧性是现有城市体检

评估的一个重要维度。针对当前住区尺度上的精细化动态韧性评估系统性方法欠缺的现状，本研究提出一套手机信令数据驱动的住区雨洪韧性体检评估流程，可尝试在体检评估中推广应用。

在城市更新与住区灾害应急管理方面，通过数据采集、基准构建、灾情阶段划分、扰动量化、外部验证等步骤，将诊断结果反馈至城市体检信息平台，进一步通过城市体检平台嵌入城市更新规划编制流程中，例如低韧性住区可接入城市更新项目库，匹配渐进式微更新、蓝绿基础设施补短板、社区应急联动机制建设等措施，形成“体检评估—诊断识别—分优先级、有针对性地整改—动态监测”的闭环治理路径，支持数据驱动的常态化动态监测预警和可持续规划决策。

4.3 研究局限与未来展望

居民出行量下降并非单一地反映住区系统功能受损，本研究的出行扰动强度指标未能区分刚性出行受阻与弹性出行主动规避的差异，可能导致高治理能力住区的韧性被低估。未来研究可开发多源数据融合平台，整合POI、土地利用、卫星遥感、手机信令和社交媒体等数据，结合LSTM时间序列预测或图神经网络对出行轨迹进行聚类，实现刚性与弹性波动的分离量化，为韧性治理提供更具针对性的决策依据。

本研究的核心指标 V_1 在揭示住区受暴雨扰动的累积承受能力方面具有价值，但单一指标难以在急性风险与长期累积损失之间取得平衡。未来可构建复合指标，纳入峰值丧失率，捕捉灾害最大破坏强度与急性风险；结合恢复斜率、基于曲线形态的聚类分析，提升评估精准性的同时，辨析出不同住区在急性风险抵抗与长期恢复能力上的差异化机制。

表2 不同阶段街道平均韧性与人口结构变量的相关性分析

Tab.2 Correlation analysis between average street-level resilience and demographic structure variables across different stages

人口结构	灾中人均出行扰动强度	灾后人均出行扰动强度
65岁及以上老年人口比例	-0.152	-0.53*
0—14岁儿童比例	-0.007	-0.38
15岁及以上人口平均受教育年限	-0.099	-0.582*

注：* 表示在0.05级别（双尾）相关性显著

注释

① 大部分积水点在48 h内完成清退,应急响应强度显著下降;供水、供电、通信等关键基础设施在72 h内全面恢复正常。来源:深圳市气象局(台)《闻风而动力搏风雨筑牢城市防灾减灾第一道防线——深圳市气象局迎战台风“苏拉”及“9·7”极端特大暴雨侧记》。

参考文献

[1] 陈轶,陈睿山,葛怡.我国城市社区洪涝灾害社会脆弱性与韧性的研究及思考[J].城市建筑,2018(35):32-34.

[2] 陈训来,徐婷,王蕊,等.珠江三角洲“9·7”极端暴雨精细观测特征及成因[J].应用气象学报,2024,35(1):1-16.

[3] 魏宗财,林宇栋,文晓岚,等.国内外极端气候下城市韧性研究进展:概念框架、测度和优化策略[J].规划师,2025,41(7):10-17.

[4] CUTTER S L, FINCH C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(7): 2301-2306.

[5] BALICA S F, WRIGHT N G, VAN DER MEULEN F. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts[J]. Natural Hazards, 2012, 64: 73-105.

[6] 张晓瑞,张琳雅,方创琳.概念、框架和测度:城市脆弱性研究脉络评述及其拓展[J].地理与地理信息科学,2015,31(4):94-99.

[7] CUTTER S L, BORUFF B J, SHIRLEY W L. Social vulnerability to environmental hazards[J]. Social Science Quarterly, 2003, 84(2): 242-261.

[8] CUTTER S L, BURTON C G, EMRICH C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2010, 7(1): 51.

[9] CUTTER S L, ASH K D, EMRICH C T. The geographies of community disaster resilience[J]. Global Environmental Change, 2014, 29: 65-77.

[10] TIMMERMAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of model's possible climatic applications [R]. Toronto: Institute for Environmental

Studies, University of Toronto, 1981.

[11] 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.

[12] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.

[13] ADGER W N. Social and ecological resilience: are they related? [J]. Progress in Human Geography, 2000, 24(3): 347-364.

[14] FOLKE C, CARPENTER S, WALKER B, et al. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35(1): 557-581.

[15] SHARIFI A, YAMAGATA Y. Urban resilience assessment: multiple dimensions, criteria, and indicators[M]//YAMAGATA Y, SHARIFI A. Urban resilience: a transformative approach. Cham: Springer, 2016.

[16] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49.

[17] SPAANS M, WATERHOUT B. Building up resilience in cities worldwide - Rotterdam as participant in the 100 Resilient Cities Programme[J]. Cities, 2017, 61: 109-116.

[18] 郭仁忠,杨晓春,洪武扬,等.安全韧性城市规划与设计的基本逻辑与架构[J].中国工程科学,2025,27(4):28-42.

[19] 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.

[20] LIU C, XU F, GAO C, et al. Deep learning resilience inference for complex networked systems[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 9203.

[21] 范雅婷,李超凡,涂伟,等.社交媒体数据支持的城市承灾体脆弱性评估:以深圳极端天气为例[J].城市规划,2024,48(08):101-113.

[22] HSU C W, MOSTAFAVI A. Dissecting resilience curve archetypes and properties in human systems facing weather hazards [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 11897.

[23] ZHANG F, LI Z, LI N, et al. Assessment of urban human mobility perturbation under extreme weather events: a case study in Nanjing, China[J]. Sustainable Cities and

Society, 2019, 50: 101671.

[24] TANG J, ZHAO P, GONG Z, et al. Resilience patterns of human mobility in response to extreme urban floods[J]. National Science Review, 2023, 10(8): nwad097.

[25] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.

[26] HONG B, BONCZAK B J, GUPTA A, et al. Measuring inequality in community resilience to natural disasters using large-scale mobility data[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1870.

[27] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems [J]. Structural Safety, 2012, 36: 23-31.

[28] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 174-180.

[29] QIAN J, DU Y, LIANG F, et al. Measuring community resilience inequality to inland flooding using location aware big data [J]. Cities, 2024, 149: 104915.

[30] 颜文涛,任婕,张尚武,等.上海韧性城市规划:关键议题、总体框架和规划策略[J].城市规划学刊,2022(3):19-28.

[31] 杨俊宴,曹俊.动·静·显·隐:大数据在城市设计中的四种应用模式[J].城市规划学刊,2017(4):39-46.

[32] 彭翀,左沛文,李月雯,等.城市空间多风险耦合及规划的韧性应对[J].城市规划学刊,2024(5):88-97.

[33] 潘海嘯,戴慎志,赵燕菁,等.“应对气候变化的城市韧性与空间规划”学术笔谈[J].城市规划学刊,2021(5):1-10.

[34] NAN C, SANSAVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35-53.

[35] POULIN C, KANE M B. Infrastructure resilience curves: performance measures and summary metrics[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 216: 107926.