

多级洪涝灾害中上海市通勤时空结构韧性测度与优化研究*

Resilience of Shanghai's Urban Spatiotemporal Structure under Varying Flood Scenarios

沈尧 徐子寒 冯韵洁 SHEN Yao, XU Zihan, FENG Yunjie

摘要 城市空间与功能高度耦合形成复杂的时空城市系统。时空城市系统不仅承载并适应各类城市挑战,也是面向城市韧性提升的规划干预对象。理解真实城市系统的韧性演化机制及其复杂的社会经济效应,是韧性城市建设与规划的基础。融合手机信令、道路路网、房价等多源数据,构建城市通勤时空结构模拟框架,并测度其在不同等级洪涝情境下的动态韧性特征及空间、社会分异规律。通过识别韧性瓶颈,提出相应的规划干预策略,并将方法应用于上海市,揭示不同地区的韧性差异与多种韧性组合模式。结果表明,城市通勤时空结构韧性呈现出多维复杂性,社会经济条件下的韧性空间分异高于性别等因素,并表现出基于风险分布的不均衡社会排斥效应。此外,通勤效率瓶颈的修复存在显著的时效性和空间分异,并可实现较精准的定位。研究结果验证了本方法的有效性,揭示了上海市通勤时空结构韧性的洪涝灾害响应机制,并为韧性优化与精细化规划提供了参考。

Abstract Urban space and function are highly coupled, forming a complex spatiotemporal system that not only accommodates and responds to various urban challenges but also serves as a critical target for enhancing urban resilience and informing planning interventions. Understanding the resilience dynamics of real-world urban systems and their intricate socio-economic effects is fundamental to the development of resilient cities. This study integrates multi-source data, including mobile signalling, road networks, and housing prices, to construct a simulation framework for urban commuting spatiotemporal structures. It further assesses their dynamic resilience characteristics and spatial-social disparities under varying levels of flood scenarios. By identifying resilience bottlenecks, the study proposes targeted planning interventions and applies the framework to Shanghai to unveil regional resilience variations and diverse resilience typologies. The findings indicate that the resilience of urban commuting spatiotemporal structures exhibits multidimensional complexity, with disparities among social strata exceeding those related to gender and manifesting as uneven socio-spatial exclusion effects driven by risk distribution. Moreover, the mitigation of commuting efficiency bottlenecks demonstrates significant temporal sensitivity and spatial heterogeneity, enabling precise intervention targeting. The results validate the effectiveness of the proposed approach, elucidate the flood response mechanisms of Shanghai's commuting spatiotemporal resilience, and offer insights for resilience optimisation and refined urban planning.

关键词 韧性城市;时空大数据;洪涝灾害;复杂网络;社会公平;时空模拟

Key words urban resilience; spatiotemporal big data; flood disasters; complex networks; social equity; spatiotemporal simulation

文章编号 1673-8985 (2025) 02-0040-11 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20250206

作者简介

沈尧

同济大学建筑与城市规划学院

同济大学中英联合城市科学实验室

副教授,博士生导师,eshenyao@tongji.edu.cn

徐子寒

同济大学建筑与城市规划学院 硕士研究生

冯韵洁

同济大学建筑与城市规划学院 硕士研究生

0 引言

城市是一个高度复杂的时空巨系统,在不同的时间与空间尺度上展现出多样的投影与表达形式,这不仅影响人们对城市的认知,也决定了城市规划的方法与路径^[1]。城市系统的时空演化受制于空间与功能要素的复杂耦合关系,这一特征构成了城市真实性的重要维

度^[2-5]。近年来,城市系统的快速时空变化已成为规划领域关注的核心议题^[6]。随着传感器技术、移动互联网及物联网的快速发展,大量高频时空大数据不断涌现,使我们不仅能够观测个体的时空行为,更能精细刻画群体行为所塑造的城市时空结构^[7-9]。只有深入解析城市时空结构的形成机制,才能有效提升其社

*基金项目:国家自然科学基金面上项目“高频城市的网络韧性提升:精细化测度、关键要素识别与自适应优化研究”(编号52278074);上海市青年科技启明星人才计划项目“时空智能支持下的城市韧性精准评估、关键要素识别及自适应系统优化研究”(编号22QB1404800);中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号22120240370)资助。

会经济绩效,并进一步支撑高质量城市发展的规划目标^[10]。

近年来,气候变化、极端降雨与公共卫生事件等共性挑战持续考验着城市系统抵御内外部冲击的韧性能力^[11-13]。我国已将韧性城市建设纳入国家城市发展战略,其中,极端降雨导致的洪涝灾害正成为城市治理的重要挑战,并在过去几年对国内多个城市造成重大损失。一方面,洪涝灾害带来的直接经济损失不容忽视;另一方面,其级联效应可能导致更深远的间接影响^[14-15]。尽管“规划先行”仍被视为提升城市韧性的关键策略,但在如何实施精准、高效的规划响应方面,学界和实践界尚未形成共识^[16-17]。针对洪涝灾害影响的精准刻画及其时空特征分析,是提升规划响应效能与韧性优化精准性的核心难题^[18-20]。

在韧性城市研究中,复杂网络方法因其在建模、机制解析及规划响应方面的独特优势,正日益受到关注^[21-24]。首先,城市系统的多模态、异构性要求精确的建模方法,以充分表征其内部结构和动力学机制。复杂网络作为研究复杂系统的重要工具,可有效将城市系统抽象为可计算与分析的对象,为韧性城市研究提供坚实的建模基础^[25]。其次,城市在遭受扰动后,往往呈现复杂的级联效应,导致间接影响远超直接损失^[26]。现有研究表明,复杂网络可通过动力学传播机制准确模拟级联效应,并借助计算实验揭示城市系统的复杂响应机理^[27-28]。此外,韧性城市的规划响应需要精准的空间落位,以确保干预措施的针对性和高效性。城市规划仍然依赖于空间要素的统筹与调控,而复杂网络方法能够在矢量建模的基础上,定义空间交互关系,从而满足规划对空间精确性的需求^[29]。

与此同时,城市韧性的社会分异问题亦是韧性城市建设的核心议题^[30]。不同社会群体的活动空间存在差异,这种分异直接影响韧性规划的公平性与可持续性^[31-34]。若弱势群体所处的居住、工作及生活环境在灾害冲击下持续恶化,不仅会加剧社会不平等,也会显著增加城市维护与恢复的长期成本^[35-36]。因此,精准

识别特定扰动条件下的关键受影响群体,并制定针对性规划响应策略,有助于提升韧性城市建设的社会效益^[37-39]。

据此,本文提出一种基于多源数据进行城市时空结构韧性测度和优化的方法框架,并在上海进行实证。通过融合手机信令、空间网络数据、房价数据等,模拟不同社会群体的通勤行为,并总结时空结构特征,结合街道网络上多级洪涝灾害过程模拟结果,测度城市通勤时空结构的韧性及其社会分异结果,识别影响韧性结果的关键路径,提出空间响应方案并进行绩效评价。

1 研究方法:多级洪涝灾害下城市通勤时空结构韧性测度与优化

为实现多级洪涝灾害下城市通勤时空结构韧性测度与优化,本文提出一个“灾害扰动模拟—时空结构建模—网络韧性测度—韧性瓶颈优化”的4步研究框架(见图1),主要包含:基于道路网络的多级洪涝模拟、基于道路网络的通勤时空结构模拟、城市通勤时空网络结构韧性测度及其社会分异,和城市通勤时空结构瓶颈识别与优化;以实现基于多

场景对城市动态时空系统韧性机理的理解,并以空间为抓手,依托关键瓶颈进行韧性绩效优化。

(1) 基于道路网络的多级洪涝模拟

本研究引入多级降雨引起的洪涝灾害场景,考虑不同重现期(10年、20年、50年、100年、500年)降雨等级下作用于道路网络的洪涝灾害。通过降雨量估计、地表径流量估计、求解淹没深度,确定对道路网络的影响范围。

首先根据地方标准计算暴雨强度。如上海,根据上海市质监局发布的上海市《暴雨强度公式与设计雨型标准》(DB31/T 1043-2017),公式为:

$$q = \frac{1600(1 + 0.846 \lg P)}{(t + 7.0)^{0.656}} \times \frac{60}{167} \quad (1)$$

式中: q 为设计降雨强度,单位为mm/h(毫米每小时); P 为设计重现期,单位为a(年); t 为降雨历时,单位为min(分)。本研究设定降雨历时为60 min。

本文采用SCS-CN方法估计地表径流,综合考虑了降雨量、土壤类型、土地覆盖和前期湿度等条件^[40]。其主要公式为:

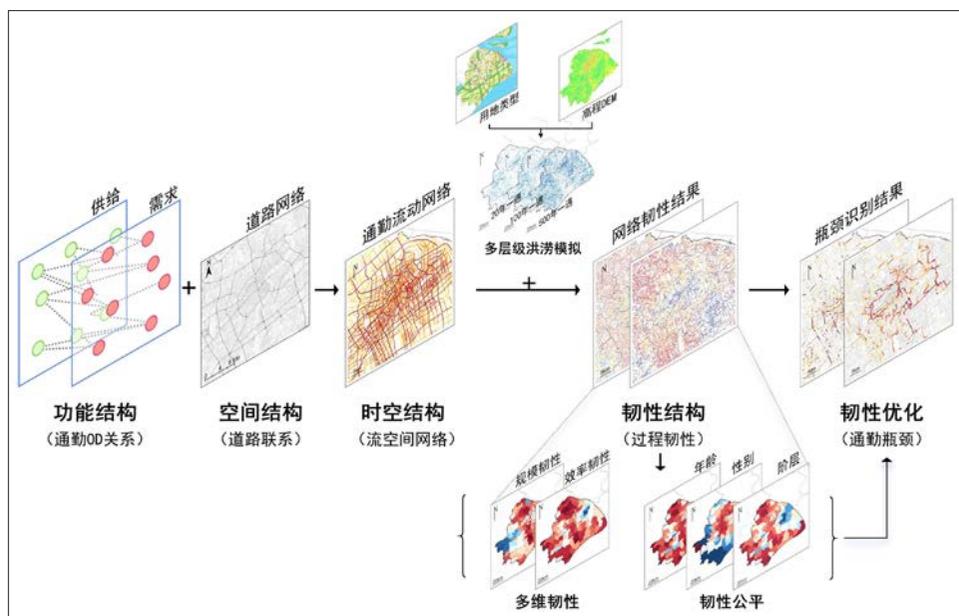


图1 研究路径
Fig.1 Research framework

资料来源:笔者自绘。

$$Q = \frac{(q - I_a)^2}{q + S - I_a} - W \quad (2)$$

式中:Q为净雨量(即径流量),单位为mm/h;q为降雨强度;S为饱和储水量,由CN(Curve Number)值确定; I_a 为降雨实际情况的修正比例系数;W为排水体积,根据积水面积和排水速度计算所得。

最后使用等体积法来分配径流体积,根据地势差别进行体积分配,直到分配结束,并根据得到的淹没范围映射入街道网络,得到街道网络的分级淹没区估计。等体积法具有简明性和计算成本较低的优势。由于本文主要聚焦于洪涝受灾导致的通勤结构风险,重点在于韧性特征和风险间的关联而非灾害本身,因此,在缺失复杂水文建模本地数据的限制下,使用本方法对城市暴雨内涝快速估计仍具有一定合理性^[41]。但同时需指出,该方法无法动态模拟径流汇流路径和降雨滞后过程等,因此不适用于考虑时间维度的汇流模拟;且在降雨历时期间所估计淹没范围更集中于低地势地区,这可能导致对部分较高地势地区淹没程度的低估^[42]。

(2) 基于道路网络的城市通勤时空结构模拟

城市通勤时空结构是城市人口分布与就业布局的联系(O-D联系),表示为具备时空权重的道路网络(O-D流量矩阵)。本研究考虑以城市通勤联系表征的日常城市通勤的时空结构作为受灾体,结合最短路径选择与流量惩罚的通勤流模拟方法来模拟城市通勤时空结构的重塑过程,同时表征受到扰动而依赖网络结构发生的级联效应以及通勤行为自适应和恢复效应。

本研究采用增量交通分配算法(Incremental Traffic Assignment, ITA)进行流量分配。作为对最短路径算法的优化,ITA算法基于居民个体追求出行效用最大化的行为假设(即选择通行时间或成本最低的路径),并考虑了流量累积带来的拥堵效应。其通过迭代化进行交通分配,将O-D流量矩阵划分为多个部分,并依次逐步分配到网络中。每次分配

后,根据当前网络中的流量状况对网络边权进行动态调整,以反映道路拥堵对通行成本的影响。相比于单纯的最短路径算法,ITA能够更真实地模拟交通流量的时空分布以及拥堵效应对路径选择的影响^[43]。本文使用的路阻系统估计公式^[44]如下:

$$t_a = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{V_a}{C_a} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

式中: t_a 为路段a的当前通行时间; t_0 为自由流通行时间; V_a 为路段流量; C_a 为路段容量; α 和 β 为经验参数,本研究中分别取0.15和4.00。

(3) 城市通勤时空网络结构韧性测度及其社会分异

本研究测度了城市通勤供需网络韧性主要包含规模和效率维度,在复杂网络分析中(不考虑供需分布)一般对应最大连通子图规模与网络效率指标。本研究使用可通勤人口比例作为规模韧性指标,表示当前网络中尚能建立起居住地和和工作地联系的人口规模,并按未发生风险扰动场景时的常态人口规模进行归一化处理。本研究区分直接损失与间接损失,前者指的是由于洪涝直接影响而失效的存量损失,而后者指的是时空行为模拟后发现的由于流量结构重构而导致的损失。二者均计算为无法通勤人口规模与常态人口规模的比例。使用通勤延误时长指标表示扰动发生过程中的因选择替代路径而导致通勤时间增加发生的通勤延误,由扰动下通勤时长和常态通勤时间的差值表示。使用较低通勤延误人群的比例进行韧性计算,比例按当前尚能通勤的人口规模进行归一化处理。

城市通勤时空网络结构因人而异,可能导致韧性风险暴露度的显著差异,需要在规划过程中妥善考虑。笔者考虑3种社会分异,即性别、年龄与房价的空间分异,根据其所涉及子时空网络进行测度,并进一步比较差异以反映分异程度。

(4) 城市通勤时空结构瓶颈识别与优化

通过识别规模和效率两类瓶颈,以识别对于两类韧性保持具备区别意义的关键空间

路径,以提升相关规划的精细化程度。两类瓶颈的识别选择首先依托网络流量模拟结果。具体而言,在流量分配过程中,将通勤O-D所经历每一路径记录该对O-D流量,并最终累计反映该路径所承担的全部流量规模。

对于规模瓶颈,本研究在淹没的道路空间中选择高流量、高选择性、高唯一性的道路,主要由其承载的日常流量规模所反映。这些瓶颈的存在与否会显著影响规模韧性结果。对于效率瓶颈,本研究首先关注承担较高流量导致拥堵效应加重、效率降低的道路。这一效应的突变程度由前文公式(3)中 $\frac{V_a}{C_a}$ 的变化来反映,且同时需考虑到流量增加是否超过了道路本身承载力。因此,本文选择扰动后 $\frac{V_a}{C_a}$ 大于1,且扰动前后 $\frac{V_a}{C_a}$ 变化大于0的道路作为效率瓶颈。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域:上海市域(未含崇明岛等)

选取上海市域地区作为后续实证开展的研究区域。具体而言,该范围为上海市域行政区划中排除崇明区后的剩余陆地部分,涵盖全市除崇明区外的其他15个行政区共196个街道单元,总面积约为5 883 km²(见图2)。由于地理限制,崇明岛与主城区联系较弱,可能会造成基于网络分析的结果偏误,故排除。

2.2 研究数据

(1) 手机信令数据

采用中国联通智慧足迹平台提供的手机信令数据,通过城市通信基站捕获用户移动设备信号,获取高分辨率人口时空动态信息。数据选取2021年10月研究范围早高峰通勤时段并标准化处理,以构建通勤标准日,并与250 m×250 m网格进行空间匹配。手机信令数据还补充有关通勤者的年龄、性别、通勤距离、时长等特征信息,其中年龄与性别属性数据被用作韧性社会分异的基础,距离和时长则可用于时空路径模拟的有效性验证。

(2) DEM高程数据

该数据来自开放地形平台(<https://open.topography.org/>)提供的分辨率为30 m哥白

尼全球数字高程模型 (Copernicus Global Digital Elevation Model), 用于构建洪涝扰动场景。

(3) 路网数据

道路网络数据来源于OpenStreetMap开源平台, 并经过筛选和校准处理。具体处理包括对核心等级道路的提取, 剔除零星分布或呈破碎状的用地内部道路 (如居住区内部道路)。提取的道路中心线数据用于表征城市空间网络的基本结构。此外, 由于网络计算中采用时间作为权重, 本研究对道路的自由流速度进行了校准。校准过程基于高德地图API爬取的夜间24:00低流量时段的实时交通态势数据, 按道路类型分类后取平均值, 作为不同等级道路的自由流速度。

(4) 房价数据

二手房价格数据采集于2019年, 来源于链家、安居客等多个二手房线上交易平台。在排除重复房源后, 最终获取约5万条二手房交易数据, 涵盖上海陆域范围内的核心建成区。结合二手房价格数据, 研究使用K-Means算法对通勤用户的起讫点房价水平进行初步划分,

其结果在一定程度上反映了居民用户的社会经济地位。例如, 同时居住与工作在高房价地区的居民群体通常意味着更高的收入水平。诚然, 单纯通过房价来衡量空间分异具有一定局限性, 但此方法依旧能够提供一项相对可行且易于获取的社会分异指标, 用于对年龄和性别这类常规人口变量之外的重要补充。

3 实证结果

3.1 多级降雨洪涝模拟

图3展示了不同重现期降雨情景下的道路淹没分布特征。在低重现期降雨下, 浦东、青浦圩区及苏州河沿岸等地呈现多点小规模聚集特征。随着重现期提升至100年一遇及以上, 淹没区呈现显著的空间连续性特征, 多处沿河道路发展为连续淹没走廊, 青浦、松江、金山和浦东新区的低洼区域淹没程度明显加深, 形成大范围的连片淹没区。此外, 强降雨情景下, 洪涝淹没重心向城市两侧低地势郊区转移。这可能源于等体积法忽略了降雨汇集期间在较高地势的积水滞留, 导致增量降雨直接汇入低地势区域。

3.2 上海日常通勤时空结构及其社会分异

(1) 日常工作通勤时空结构

图4记录了上海日常通勤的OD时空结构, 以人次与距离分别描述。从主要流量聚集区域和起讫点的分布看, 通勤群体集中在上海外环线附近, 特别是在嘉定、闵行和浦东等地区, 表现出明显的就业中心高流量聚集性。而在郊区如松江产业基地、奉贤以及金山与浦东交界的产业区, 也存在一定流量聚集现象。通勤流动主要集中在城市中心区的外围, 而内部通勤流动相对较少。

筛选汽车出行的通勤样本后, 计算其平均通勤距离约为8 km, 与现有文献及相关报告结果基本一致^[45-47], 表明该数据具备一定的可信度。按照通勤O-D连线距离 (3 km以下、3—10 km、10 km以上) 进行划分, 发现中心区的整体流量较小, 但O-D流动网络却非常密集, 3 km以下的通勤流动几乎全部集中在主城区范围。相比之下, 3—10 km的通勤流动覆盖范围较广, 而10 km以上的通勤流动虽然覆盖了整个城市, 但流动频率较低, 分布较为稀疏。这三类通勤距离的流量分别占总流

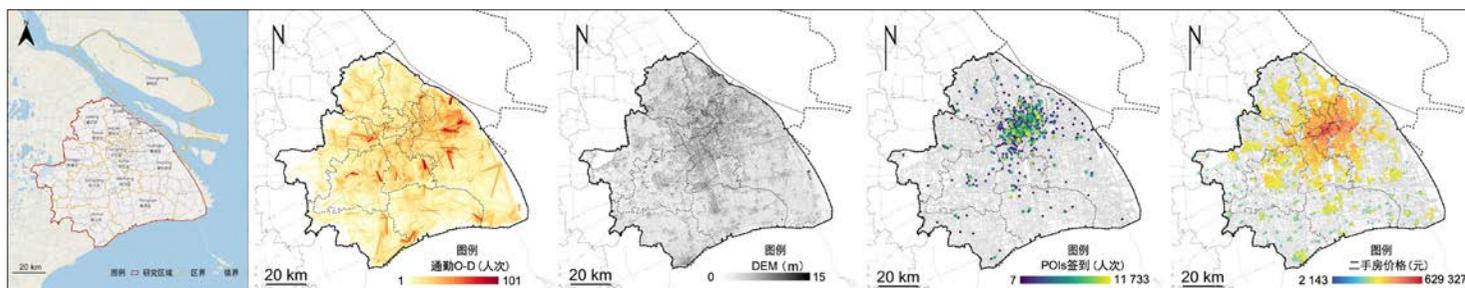


图2 研究地区及数据
Fig.2 Study area and data

资料来源: 笔者自绘, 底图审图号: 沪S[2024]069号。

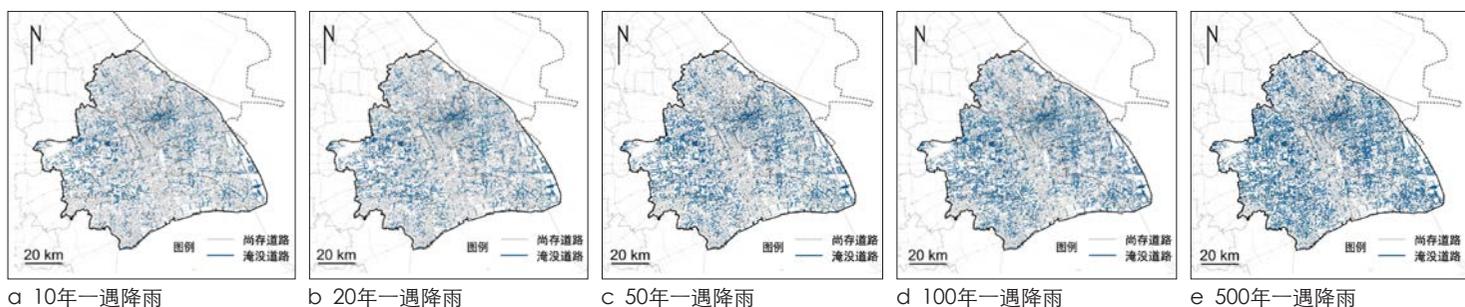


图3 上海市分级降雨洪涝淹没累及道路场景图示
Fig.3 Simulated road inundation under hierarchical rainfall flooding scenarios in Shanghai

资料来源: 笔者自绘。

注释: ① 根据2021年中国主要城市通勤监测报告数据, 上海市单程平均通勤距离约9.8 km。

量的25.1%、52.2%和22.7%，3—10 km是最主要的通勤距离。

在常态场景下，汽车出行群体的平均通勤时间约为21 min。约50%的人口通勤时间不超过20 min，这部分群体可能属于前文中的中短距离出行群体，主要集中在城市核心建成区，包括市中心和郊区的主要就业中心。

(2) 日常工作日通勤时空结构的社会分异

图5按照通勤群体的性别、年龄和房价地区进行分组可视化，可看出不同群体的空间模式存在显著差异。年龄组和性别组主要是流动强度差异，空间差异较小；而不同房价地区的群体则展现出突出的空间差异。青年和男性群体的总体流动强度和人口规模普遍高于中年和女性群体，尤其在松江、嘉定、奉贤和金山等地。不同房价地区的群体呈现圈层分异特征，从而形成空间上的分割。低房价地区群体主要分布在外环线以外的郊区，具有较为密集的郊区通勤联系，少部分流动跨越中心区，中房价地区群体则相对集中在外环线附近的区域，而高房价地区群体的流动规模较小，收缩于黄浦、徐汇及浦东陆家嘴等市中心地区。

3.3 多级洪涝风险下上海通勤时空结构韧性及其社会分异

(1) 洪涝风险下通勤时空结构的规模韧性

图6展示了在不同洪涝分级场景下的城市通勤时空结构的整体规模韧性表现。左图所示的是关于通勤供给（就业）与需求（人口）损失，右图表示的是通勤联系的损失。供给与

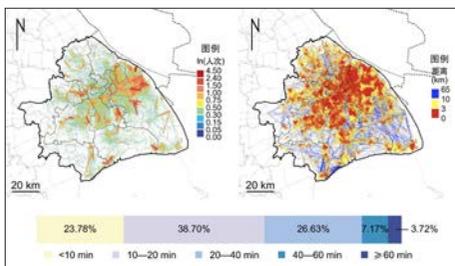


图4 日常情境下工作日通勤时空分布与通勤时间
Fig.4 Spatiotemporal patterns and duration of weekday commuting under routine scenarios

资料来源：笔者自绘。

需求损失比例的变化趋势与洪涝淹没道路比例基本一致，但通勤供给的损失略高于需求损失。这说明通勤供给和需求分布相对均质化，但供给侧分布相较之下更加集中。通勤供需规模损失存在2.00%—10.00%的间接损失（全部损失与直接损失之差），表明洪涝暴露风险即直接损失无法完全捕捉通勤结构变化。这意味着在洪涝除了对通勤职住地直接淹没，还导致额外2.00%以上的人口无法通勤。这一比例在5个洪涝场景下分别为2.02%、2.48%、5.18%、5.75%和9.48%。

图7显示，中心城区由于就业高度集中，供给侧的直接损失更为突出，而郊区的需求侧损失及间接损失更大，如松江佘山镇、青浦赵巷镇等在通勤需求侧的损失更为明显，而间接损失层面如青浦朱家角镇、浦东书院镇等地区

的损失水平相对较高。此外，青浦金泽镇和浦东书院镇等地区在直接损失上并不突出，但它们在洪涝灾害下易形成“通勤孤岛”，缺乏有效的交通替代方案，因此间接损失较为严重。这表明，洪涝灾害不仅影响直接通勤路径，还会通过连锁效应进一步加剧外部区域的通勤损失，尤其是在通勤高度依赖跨区域流动的城市格局下，这种影响尤为显著。

(2) 洪涝风险下通勤时空结构的规模韧性的社会分异

随着洪涝重现期的增加，青年群体的通勤直接损失比中年群体更为显著，尤其是在100年和500年重现期的洪涝场景下，青年群体的损失中值比中年群体高出3%。但二者的间接损失幅度几乎一致。性别组与年龄差异相反，男女群体差异在间接损失方面更大，而在

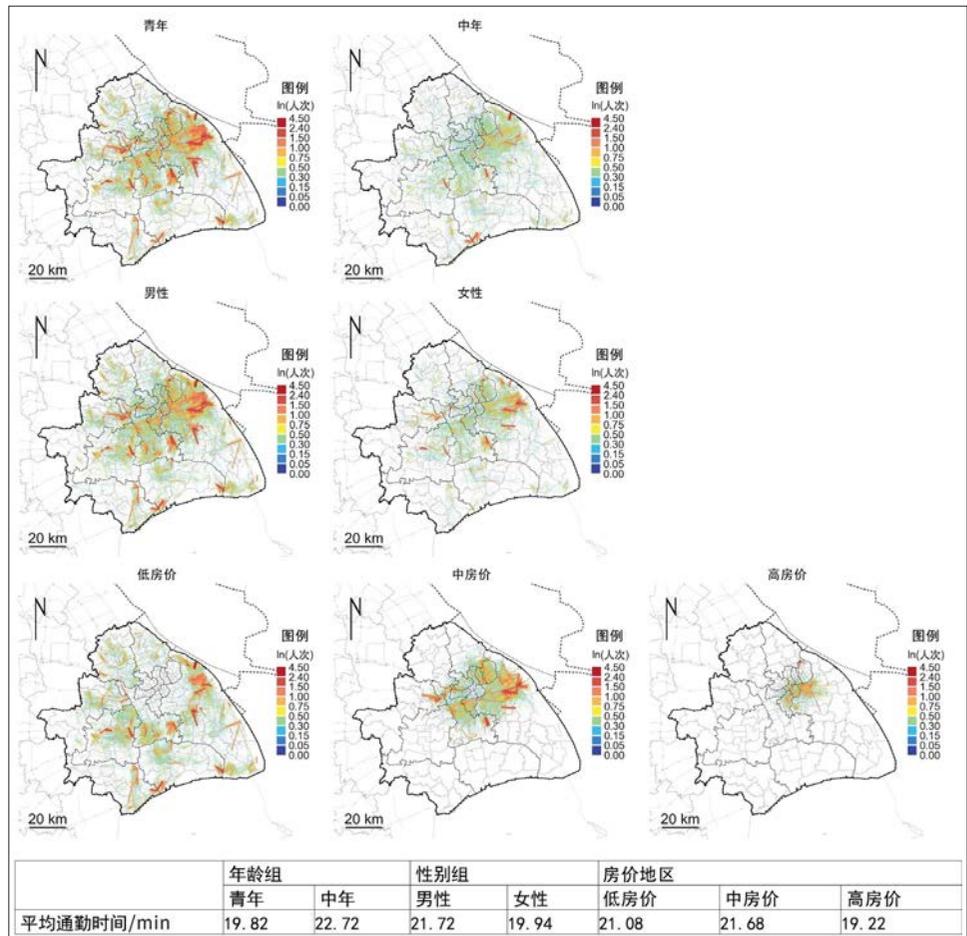


图5 常态情景不同群体的通勤流分布
Fig.5 Commuting flow distribution of different groups under routine conditions

资料来源：笔者自绘。

直接损失方面则较小(见图8)。

低强度洪涝下,直接损失与空间位置相关,高房价地区群体集中于主要淹没地区的市中心,损失比例远远高于另外两者。随着洪涝强度的增加,低房价地区群体的损失比例才开始持续上升。而间接损失方面则不同,低房价地区群体在每一洪涝场景下均表现出最

高损失。该类人群的通勤流动主要集中在城市外围地区,而非流向市中心。因此这可能由于城市郊区路网分布相对稀疏,依靠较少的交通干道与彼此相互联系。这使得这些地区缺乏足够的替代路径选择,导致在洪涝灾害中面临更大的出行困境。这表明洪涝灾害直接影响了高房价地区,并导致了外围低房价地区间的联系分割。

而重度延误比例基本维持在18%—22%。

此外,洪涝下部分群体产生通勤“负延误”现象(延误时间小于0 min)。这表明灾害可能会形成比正常情况通勤时间更短的情况,也就是“灾害受益者”。此现象源于流量竞争效应的衰减,即部分通勤者因竞争减少反而提升了通行效率。这一现象在既往研究中鲜被提及,主要由于多聚焦于通勤距离维度或忽略拥堵动态模拟,致使灾害场景下的通勤成本计算未能捕捉这一情况。

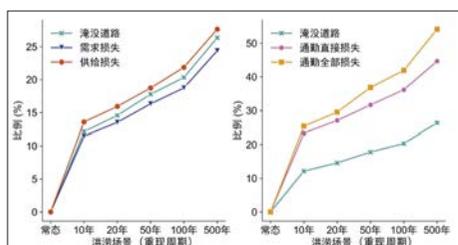


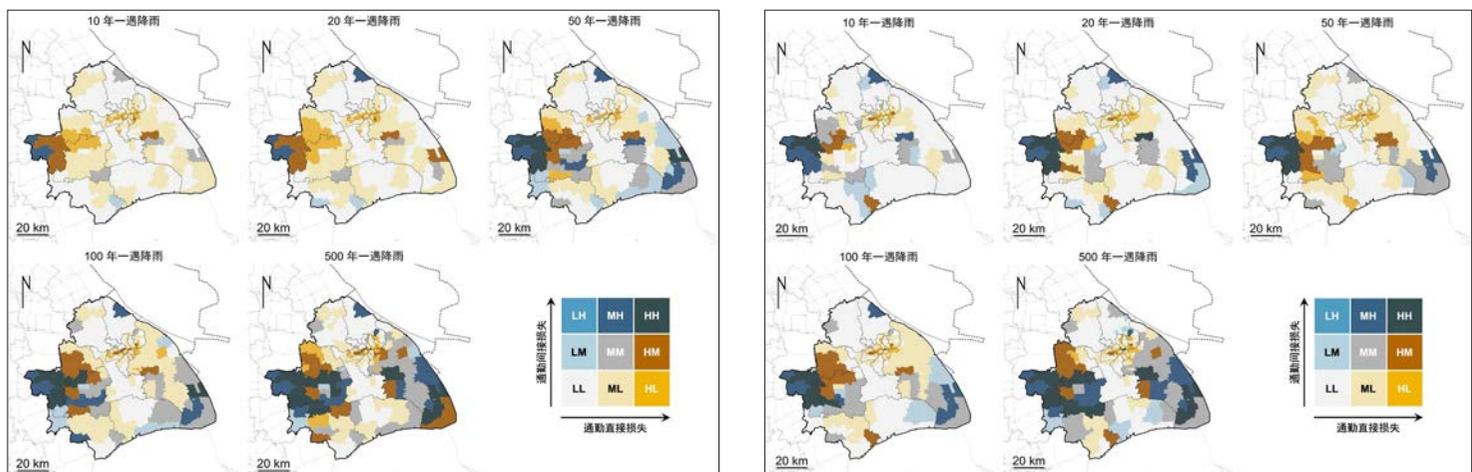
图6 洪涝场景下的通勤供需损失
Fig.6 Assessment of commuting supply-demand losses under flood conditions

资料来源:笔者自绘。

(3) 洪涝风险下通勤时空结构的效率韧性

本研究将延误超过20 min的情况视为重度延误,在20 min以内的为轻度延误。在洪涝发生后的上海,轻度延误占据了大多数,但即便是最低洪涝强度下,也有15%以上的人口发生了重度延误(见图9)。随着洪涝强度增加,轻度延误的比例与无法通勤的比例此消彼长,

在群体差异维度,中年和男性群体的常态通勤时长较青年和女性群体平均多出约4 min(10%—20%)。然而,通勤延误结果表明洪涝灾害缩小了这一差异,所有群体都表现出几乎一致的延误程度。尤其是对年龄组而言,组间差异明显缩小。这表明由洪涝带来的通勤



a 通勤供给损失分布

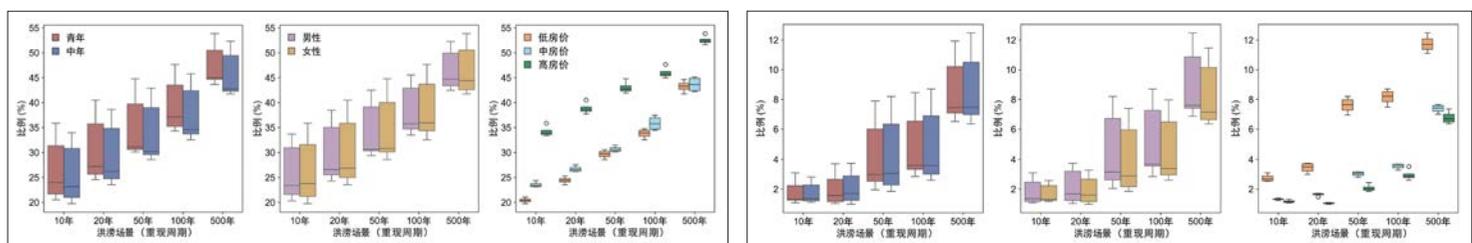
b 通勤需求损失分布

注:L、M和H表示按分位数划分的低、中和高损失程度,首字母表示直接损失,末字母表示间接损失,如LH表示低直接损失高间接损失。

图7 通勤供给和需求损失分布

Fig.7 Distribution of commuting supply and demand losses

资料来源:笔者自绘。



a 通勤直接损失

b 通勤间接损失

图8 不同群体通勤直接和间接损失

Fig.8 Direct and indirect commuting losses across different groups

资料来源:笔者自绘。

绕行延误是普遍且几乎无差别的。相比之下，不同房价地区群体之间的延误差异更为显著。3类群体常态下的平均通勤时长差距不超过3 min。而随着洪涝灾害的发生及其逐步加剧，这一差异被放大，并表现出与常态不同的顺序关系。洪涝初期，低房价地区群体反而成为通勤延误最短的群体，而中房价地区群体的通勤

时长变为最长。这一特征一直持续到50年洪涝场景下。3类群体的延误差异呈现出先变大后减小的趋势。值得注意的是，结合通勤间接损失的分析结果来看，尽管低房价地区群体的损失最为严重，其通勤延误却是最小的；而中高房价地区群体在损失最小的情况下，却面临相当严重的延误。

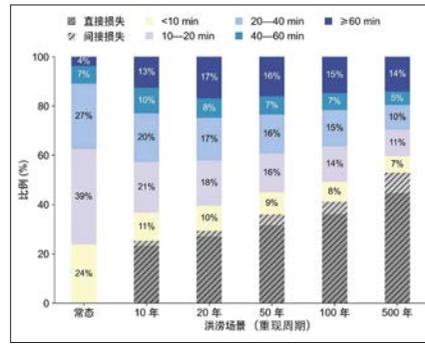
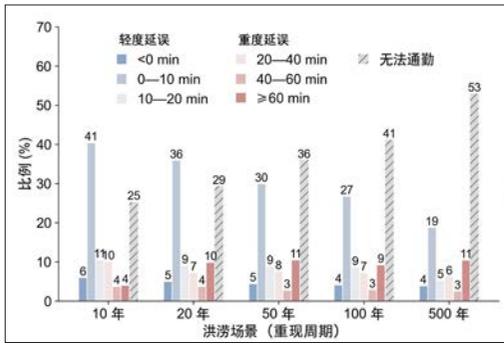
在10年重现期的降雨洪涝下，不同地区的通勤延误差异显著（见图10）。轻度延误主要分布在洪涝灾害区之外，呈现南北放射状扇形结构；而20 min以上的重度延误则集中于浦东、松江和市中心外围。此外，负延误现象基本出现在西侧，如青浦金泽镇等。

在500年重现期的降雨洪涝下，通勤延误格局进一步演变。首先，浦东地区供需（居住地与就业地）错位更加明显。其次，轻度延误空间模式与10年一遇情景相似，但松江、青浦地区的轻度延误比例却进一步上升，负延误范围也更为广泛。最后，重度延误蔓延至中心城区，静安和普陀等区均表现出极高的延误比例。此外，浦东地区重度延误现象极为广泛，从陆家嘴向东侧呈放射状扩展。

总体来看，不同洪涝重现期下通勤延误的分布模式发生了明显变化。灾害初期，网络破坏较轻，通勤出行可在较大范围内保持连通。而在极端情景下，能维持联系的节点显著变少，网络支持范围也明显缩小。因此，尽管浦东部分街道如陆家嘴等具有优越的交通区位，高延误情况依然突出。

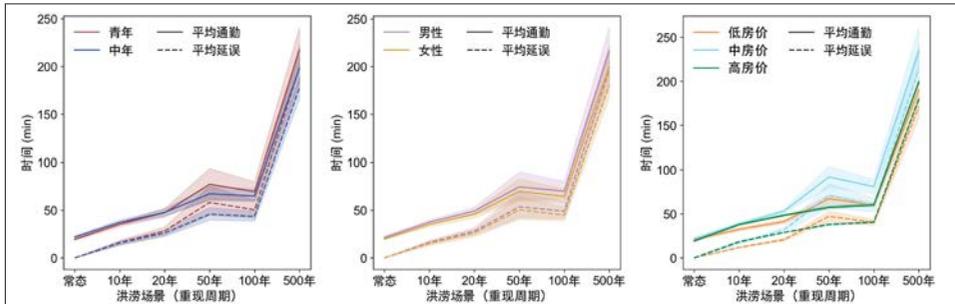
(4) 洪涝风险下通勤时空结构效率韧性的社会分异

图11表明低房价地区在城市外围郊区地带延误最轻。中房价地区在城市中部西南侧闲



a 各级洪涝不同延误区间的人群比例

b 各级洪涝不同通勤区间的人群比例

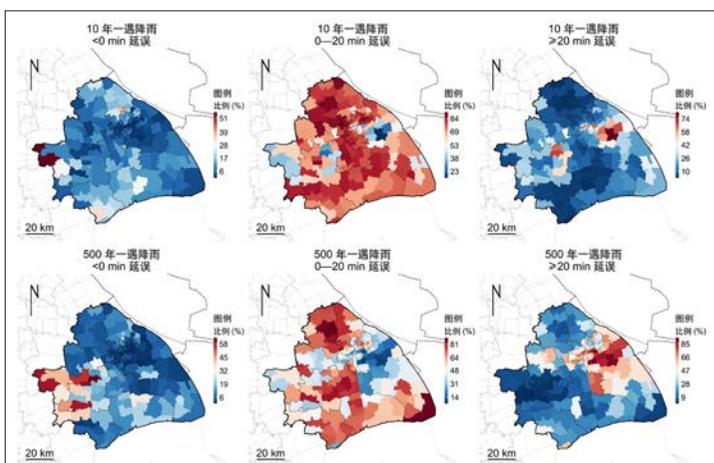


c 洪涝场景下各群体的通勤时长和延误时间

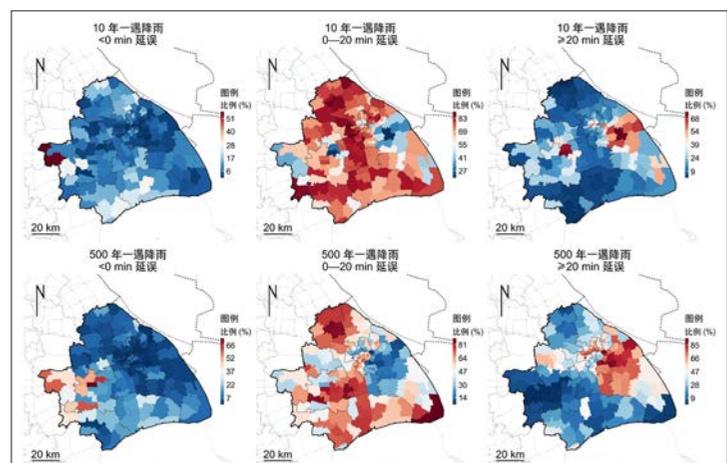
图9 洪涝场景下各群体的通勤时长和延误时间

Fig.9 Commuting duration and delay time across groups under flood scenarios

资料来源:笔者自绘。



a 10年一遇和500年一遇降雨洪涝场景下通勤供给延误分布



b 10年一遇和500年一遇降雨洪涝场景下通勤需求延误分布

图10 10年一遇和500年一遇降雨洪涝场景下通勤供给和需求延误分布

Fig.10 Distribution of commuting supply and demand delays under 10-year and 500-year flood scenarios

资料来源:笔者自绘。

行、松江区延误最轻,而在城市边缘地区延误十分明显。高房价地区群体的延误主要分布在嘉定、宝山和浦东沿海地区。但同样可以看到,中高房价地区在中心城区也具有较高比例的重度延误。需求方面的变化在于高房价地区,其高延误地区从北侧和东侧扩展到整个城市郊区,但空间模式仍然相对一致。

房价地区差异源于空间分布不同,表现出局部地区职住平衡的优势。当群体通勤流动集中在自身所在的城市地区时,延误程度普遍较低。例如,低房价地区群体主要活动在城市外围地区,那么流入(或流出)城市中心的长距离跨区通勤行为则势必受洪涝影响较大。高房价地区群体也是如此。但对中房价地区群

体而言,他们位于中间区位,不论是城市郊区还是市中心都属于跨区出行,这两个地区的通勤延误都较为明显。

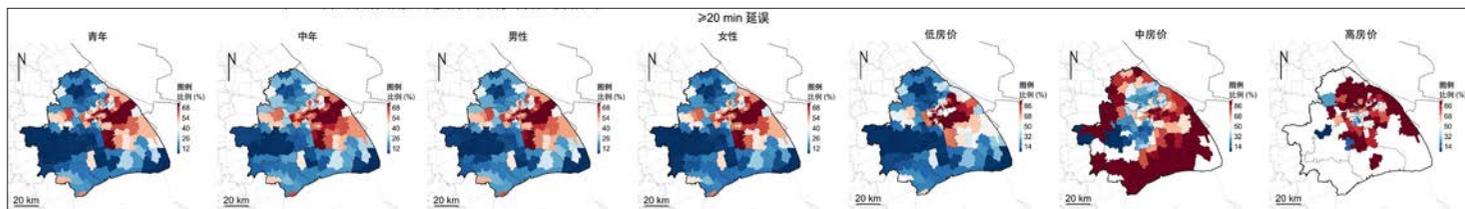
(5) 洪涝风险下通勤时空结构效率与规模韧性比较

效率韧性与规模韧性在空间分布上高度一致,但浦东地区的效率韧性水平明显较低。通勤流入与流出效率韧性的对比显示,郊区在通勤需求侧的韧性普遍低于供给侧,而中心城区则相反,供给侧韧性低于需求侧。浦东在需求侧展现出更广泛的低韧性区域。

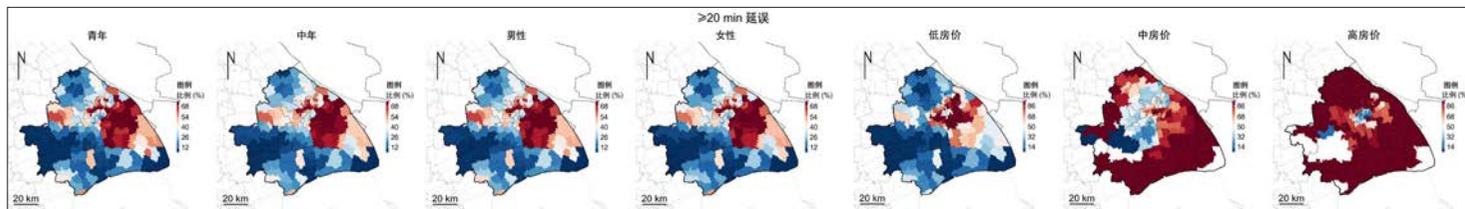
整体来看,通勤供需双方仍呈现出沿纵向廊道分布的特征。然而,相较于规模韧性,高效率韧性区域分布更为分散,甚至覆盖了洪涝

严重的青浦区。这表明,尽管青浦遭受严重通勤损失,但因维持通勤联系的个体数量有限,流量竞争压力相对较小,进而产生“负延误”现象,反而形成较高的效率韧性。

年龄和性别组的韧性水平差异总体较小,而不同房价地区表现出显著的不平等性,表明通勤韧性水平与社会人口属性和常态通勤行为的关联较小。常态通勤数据显示,青年、中年与低房价地区群体拥有最大的通勤流量规模;中年、男性与中房价地区群体的通勤时间最长。但在韧性表现中,青年、男性及高房价地区群体却呈现出最低的规模与效率韧性。总体上,年龄与性别组间的韧性差异通常低于5%,而各房价地区间差异往往超过10% (见表1)。



a 500年一遇降雨洪涝场景下通勤供给侧多群体延误分布

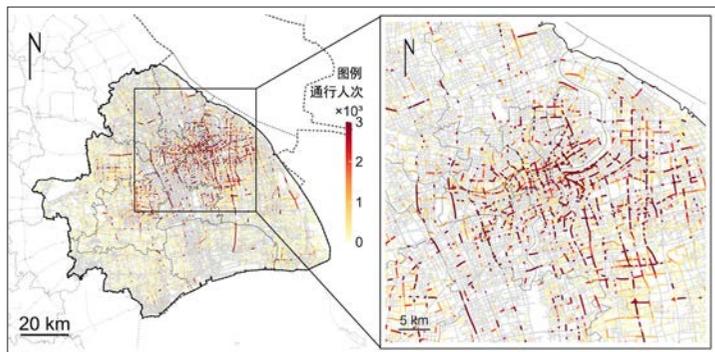


b 500年一遇降雨洪涝场景下通勤需求侧多群体延误分布

图11 500年一遇降雨洪涝场景下通勤供给和需求重度延误分布

Fig.11 Distribution of severe commuting supply (a) and demand (b) delays under the 500-year flood scenario

资料来源:笔者自绘。

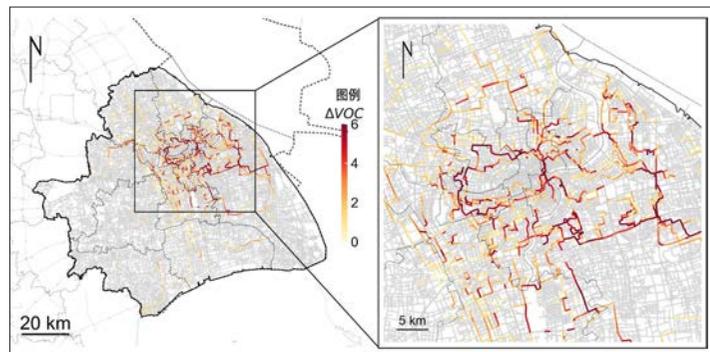


a 通勤规模瓶颈分布

注: ΔVOC 为洪涝场景与常态时刻的 $\frac{V_a}{C_a}$ 之差,即 $\frac{V-V_a}{C_a}$,为无量纲指标。

图12 通勤规模与效率瓶颈分布

Fig.12 Distribution of commuting scale and efficiency bottlenecks



b 通勤效率瓶颈分布

资料来源:笔者自绘。

3.4 通勤流量瓶颈识别与优化

图12展示了500年一遇洪涝场景下规模瓶颈的通勤流量情况。其中的高流量道路代表被较多的供需流量经过,需要进一步保护和修复,也是通勤供需规模瓶颈的典型。此类瓶颈并未表现出明显的道路等级结构。从流量集中度来看,高流量道路主要分布于上海市中心,尤以浦东黄浦江沿岸的浦东大道、世纪大道及南部的锦绣路为代表;黄浦、虹口、静安等中心城区内部道路亦承载显著通勤压力。而效率瓶颈在空间上更具连续性和方向性:浦西自虹口南侧经黄浦、静安、长宁一路向西,最终形成普陀与虹口之间的局部环状高值区。类似的环路结构在浦东外环高速及其衔接浦西的区域亦有分布,进一步佐证了洪涝灾害对道路流量格局的重组与突出瓶颈的重构。

从两类瓶颈的流量来源看,男性和女性群体在瓶颈道路上的流量比例与其整体通勤规模比例较为一致。而青年群体则相对于规模比例表现出更低的依赖特征。同时,房价地区间表现出中房价地区占据最高的依赖比例。这一结果显示:一方面,青年群体虽然拥有更大的流动规模,却并不在瓶颈路段展现出相同的比例优势;另一方面,低房价地区人群整体流动规模最大,但瓶颈中主要依赖的群体却是中房价地区群体(见表2)。

规模瓶颈修复中,随着修复数量的增加,规模损失显著降低。在修复数量达到1 000条时,通勤规模损失从53%降低至46%。然而修复表现出一定的阶段性,前400条修复效果更显著,之后则基本呈线性变化。在效率瓶颈修复中,效率恢复程度有限,前150条恢复提升较快,随后放缓。然而,即便对前500条路径进行扩容,其通勤效率恢复最大程度也仅为0.38%。这表明,通过道路扩容来提升效率的策略存在明显的局限性。其原因在于扩容虽然可以暂时提高通行效率,但并未改变居民在通勤行为中的选择机制。部分关键路径虽因扩容提升了通行能力,却也因此吸引了更多的流量,导致流量与容量的相对比例未必

表1 通勤规模与效率韧性群体差异

Tab.1 Group differences in commuting scale and efficiency resilience

类型	年龄组		性别组		房价地区		
	青年	中年	男性	女性	低房价	中房价	高房价
通勤规模韧性	3.341	3.384	3.356	3.368	3.377	3.449	2.967
通勤效率韧性	2.662	2.727	2.686	2.694	2.875	2.660	2.067

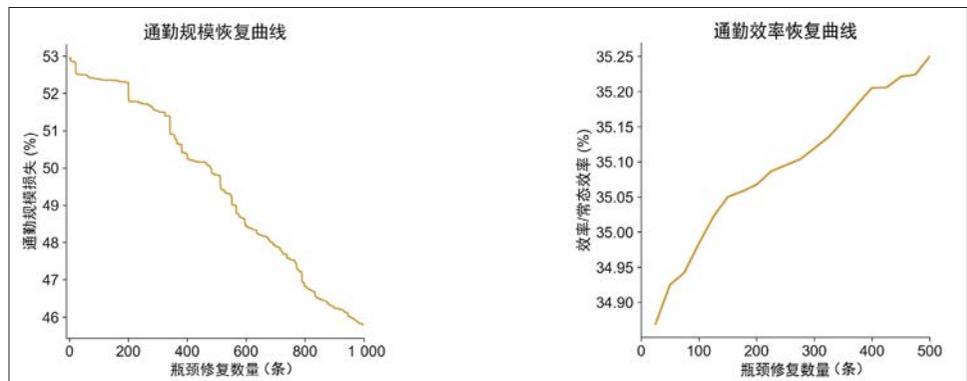
资料来源:笔者自制。

表2 通勤规模与效率瓶颈的群体依赖比例

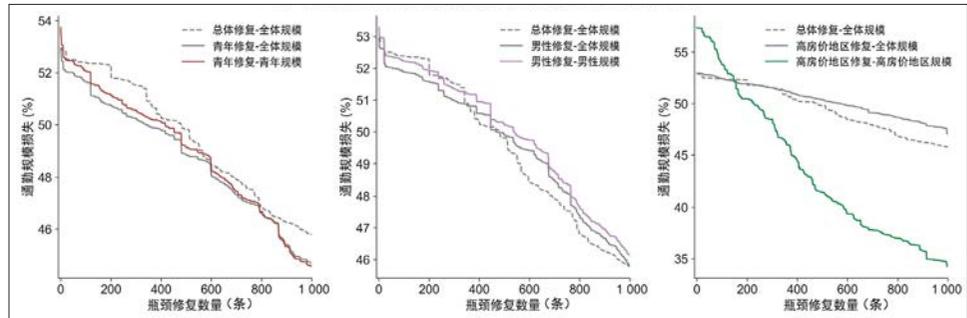
Tab.2 Proportion of group dependence on commuting scale and efficiency bottlenecks

类型	年龄组		性别组		房价地区		
	青年/%	中年/%	男性/%	女性/%	低房价/%	中房价/%	高房价/%
规模瓶颈群体依赖	51.10	48.90	66.26	33.73	27.07	52.82	20.11
效率瓶颈群体依赖	51.04	48.96	66.36	33.64	28.65	53.12	18.23
群体总规模占比	55.55	44.45	65.60	34.40	47.56	41.10	11.33

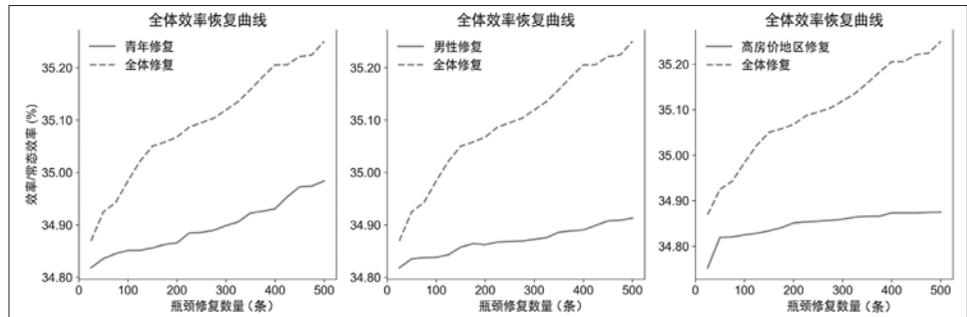
资料来源:笔者自制。



a 总体规模和效率瓶颈修复数量的绩效评估



b 对不同群体进行规模瓶颈修复数量的绩效评估



c 对不同群体进行效率瓶颈修复数量的绩效评估

图13 规模瓶颈和效率瓶颈修复数量的绩效评估

Fig.13 Performance evaluation of bottleneck restoration in scale and efficiency

资料来源:笔者自绘。

显著降低。

此外,在针对各类低韧性群体修复场景中,仅在对青年群体进行规模修复时具有更高的规模总体恢复程度,而在其他群体修复场景中对规模和效率的改善均未体现出明显的改善优势。这表明,对更高依赖比例的特定群体的瓶颈修复不一定带来对全部群体更好的韧性改善(见图13)。

4 结论与讨论

本文构建了多级洪涝灾害下上海市通勤时空结构的韧性测度框架,并通过融合多源数据,系统分析了不同社会群体在洪涝灾害中的通勤韧性特征及其空间分异规律。研究结果表明,城市通勤时空结构的韧性呈现出显著的多维复杂性,不同区域、不同社会群体在灾害冲击下表现出差异化的适应能力。其中,房价地区间的韧性差异显著高于性别和年龄因素,高房价地区群体即便具有优越的居住与就业区位,但未必获得更强的通勤适应能力,而低房价地区群体则受到更小的通勤延误与社会排斥效应的影响。

此外,研究发现,通勤效率瓶颈的修复存在显著的时效性与空间分异,部分关键道路的淹没会引发级联效应,导致整个通勤网络的连通性大幅降低。优化通勤韧性需重点关注高流量、高选择性及高唯一性的瓶颈道路,以精准干预提升网络连通性,并降低通勤延误成本。本研究的韧性优化方案通过识别并干预关键通勤路径,验证了基于复杂网络方法的规划响应策略的有效性,为城市在极端天气条件下制定精准、动态的交通规划提供了理论支撑。

本研究不仅深化了对城市通勤韧性演化机理的理解,也为韧性城市建设提供了精细化的空间优化策略。然而,研究仍存在一定局限性,例如未充分考虑个体通勤行为的长周期适应性调整,以及住房—就业联动优化对韧性提升的潜在影响。未来研究可进一步引入个体行为模型,在具备对个体社会经济信息描述更充分的数据支持下结合长期政策模拟,以提升规划干预的可操作性与可持续性。■

参考文献 References

- [1] BATTY M. The new science of cities[M]. Cambridge: MIT Press, 2013.
- [2] 龙瀛,张宇,崔承印. 利用公交刷卡数据分析北京职住关系和通勤出行[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1339-1352.
LONG Ying, ZHANG Yu, CUI Chengyin. Identifying commuting pattern of Beijing using bus smart card data[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(10): 1339-1352.
- [3] 柴彦威,张雪,孙道胜. 基于时空行为的城市生活圈规划研究——以北京市为例[J]. 城市规划学刊, 2015(3): 61-69.
CHAI Yanwei, ZHANG Xue, SUN Daosheng. A study on life circle planning based on space time behavioural analysis: a case study of Beijing[J]. Urban Planning Forum, 2015(3): 61-69.
- [4] KULP S A, STRAUSS B H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding[J]. Nature Communications, 2019, 10: 4844.
- [5] 甄峰,李哲睿,谢智敏. 基于人口流动的城市内部空间结构特征及其影响因素分析——以南京市为例[J]. 地理研究, 2022, 41(6): 1525-1539.
ZHEN Feng, LI Zherui, XIE Zhimin. Analysis of urban internal spatial structure characteristics and its influencing factors based on population flow: a case study of Nanjing[J]. Geographical Research, 2022, 41(6): 1525-1539.
- [6] 沈尧. 协频城市: 时空数据增强设计中的频度协同[J]. 上海城市规划, 2022(3): 8-13.
SHEN Yao. Synergised city: frequency synergy in spatiotemporal data-augmented-design[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2022(3): 8-13.
- [7] BASSOLAS A, BARBOSA-FILHO H, DICKINSON B, et al. Hierarchical organization of urban mobility and its connection with city livability[J]. Nature Communications 2019, 10: 4817.
- [8] MA Z, ZHU D. Collective flow-evolutionary patterns reveal the mesoscopic structure between snapshots of spatial network[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2024, 39(1): 86-117.
- [9] SHEN Y, KARIMI K. Urban function connectivity: characterisation of functional urban streets with social media check-in data[J]. Cities, 2016, 55: 9-21.
- [10] 吴志强,郑迪,邓弘. 大都市战略空间制胜要素的迭代[J]. 城市规划学刊, 2020(5): 9-17.
WU Zhiqiang, ZHENG Di, DENG Hong. Iteration of winning elements in the metropolitan strategic space[J]. Urban Planning Forum, 2020(5): 9-17.
- [11] CHEN Z, GONG Z, YANG S, et al. Impact of extreme weather events on urban human flow: a perspective from location-based service data[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2020, 83: 101520.
- [12] COLEMAN N, LIU C, ZHAO Y, et al. Lifestyle pattern analysis unveils recovery trajectories of communities impacted by disasters[J]. Humanities and Social Sciences Communications, 2023, 10: 803.
- [13] 赵瑞东,方创琳,刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731.
ZHAO Ruidong, FANG Chuanglin, LIU Haimeng. Progress and prospect of urban resilience research[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [14] DING R, UJANG N, HAMID H B, et al. Detecting the urban traffic network structure dynamics through the growth and analysis of multi-layer networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 503: 800-817.
- [15] SERRE D, HEINZLEF C. Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 30: 235-243.
- [16] 仇保兴. 基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J]. 城市发展研究, 2018, 25(10): 1-3.
QIU Baoxing. Methods and principles of designing resilient city based on complex adaptive system theory[J]. Urban Development Studies, 2018, 25(10): 1-3.
- [17] 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.
YAN Wentao, REN Jie, ZHANG Shangwu, et al. Resilient urban planning in Shanghai: key issues, general framework, and planning strategies[J]. Urban Planning Forum, 2022(3): 19-28.
- [18] ALESSANDRETTI L, OROZCO L G N, SABERI M, et al. Multimodal urban mobility and multilayer transport networks[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2023, 50(8): 2038-2070.
- [19] IG K, KA S, Y M, et al. When floods hit the road: resilience to flood-related traffic disruption in the San Francisco Bay Area and beyond[J]. Science Advances, 2020, 6(32): eaba2423.
- [20] RAJPUT A A, NAYAK S, DONG S, et al. Anatomy of perturbed traffic networks during urban flooding[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 97: 104693.
- [21] BOEING G, HA J. Resilient by design: simulating street network disruptions across every urban area in the world[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2024, 182: 104016.
- [22] PORTA S, CRUCITTI P, LATORA V. The network analysis of urban streets: a dual approach[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applica-

- tions, 2006, 369(2): 853-866.
- [23] RUS K, KILAR V, KOREN D. Resilience assessment of complex urban systems to natural disasters: a new literature review[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 31: 311-330.
- [24] 沈尧,徐怡怡,刘乐峰. 网络渗流视角下的城市肌理识别与测度研究[J]. *城市规划学刊*, 2021(5): 40-48.
SHEN Yao, XU Yiyi, LIU Lefeng. Urban texture analysis from the perspective of network percolation[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(5): 40-48.
- [25] BATTY M. Cities as complex systems: scaling, interaction, networks, dynamics and urban morphologies[M]//MEYERS R. *Encyclopedia of complexity and systems science*. New York: Springer, 2009.
- [26] ALLCOTT H, DIAMOND R, DUBÉ J P, et al. Food deserts and the causes of nutritional inequality[J]. *Quarterly Journal of Economics*, 2019, 134(4): 1793-1844.
- [27] PARR J. Metropolitan area definition: a reevaluation of concept and statistical practice[J]. *Journal of Marketing Research*, 1970, 7(3): 406.
- [28] LIU R-R, EISENBERG D A, SEAGER T P, et al. The "weak" interdependence of infrastructure systems produces mixed percolation transitions in multilayer networks[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 2111.
- [29] 沈尧,卓健,吴志强. 精准城市设计面向社会效应精准提升的城市形态[J]. *时代建筑*, 2021(1): 26-33.
SHEN Yao, ZHUO Jian, WU Zhiqiang. Precise urban design toward socially sustainable urban form[J]. *Time + Architecture*, 2021(1): 26-33.
- [30] 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.
- [31] HUNG H-C, YANG C-Y, CHIEN C-Y, et al. Building resilience: mainstreaming community participation into integrated assessment of resilience to climatic hazards in metropolitan land use management[J]. *Land Use Policy*, 2016, 50: 48-58.
- [32] KWAN M-P. The limits of the neighborhood effect: contextual uncertainties in geographic, environmental health, and social science research[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2018, 108(6): 1482-1490.
- [33] 王德,钟炜菁,谢栋灿,等. 手机信令数据在城市建成环境评价中的应用——以上海市宝山区为例[J]. *城市规划学刊*, 2015(5): 82-90.
WANG De, ZHONG Weijing, XIE Dongcan, et al. The application of cell phone signaling data in the assessment of urban built environment: a case study of Baoshan District in Shanghai[J]. *Urban Planning Forum*, 2015(5): 82-90.
- [34] 申悦,柴彦威. 基于日常活动空间的社会空间分异研究进展[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(6): 853-862.
SHEN Yue, CHAI Yanwei. Progress of research on sociospatial differentiation based on daily activity space of urban residents[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(6): 853-862.
- [35] HE R, ZHANG L, TIONG R L K. Responding of metro stations to upcoming floods: to close or to protect?[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2025, 256: 110683.
- [36] 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.
- [37] LEI D, CHENG L, WANG P, et al. Identifying service bottlenecks in public bikesharing flow networks[J]. *Journal of Transport Geography*, 2024, 116: 103830.
- [38] FAN C, WU F, MOSTAFAVI A. Discovering the influence of facility distribution on lifestyle patterns in urban populations[J]. *Developments in the Built Environment*, 2024, 17: 100348.
- [39] ROY K C, CEBRIAN M, HASAN S. Quantifying human mobility resilience to extreme events using geo-located social media data[J]. *EPJ Data Science*, 2019, 8: 18.
- [40] MISHRA S K, SINGH V P. *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*[M]. Dordrecht: Springer, 2003.
- [41] DU S, WANG C, SHEN J, et al. Mapping the capacity of concave green land in mitigating urban pluvial floods and its beneficiaries[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 44: 774-782.
- [42] 黄清雨,董军刚,李梦雅,等. 暴雨内涝危险性情景模拟方法研究——以上海中心城区为例[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(4): 506-513.
HUANG Qingyu, DONG Jungang, LI Mengya, et al. Research on the scenario simulation method of rainstorm waterlogging hazard: a case study in the central urban area of Shanghai[J]. *Journal of Geoinformation Science*, 2016, 18(4): 506-513.
- [43] WANG P, HUNTER T, BAYEN A M, et al. Understanding road usage patterns in urban areas[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 1001.
- [44] United States Bureau of Public Roads. *Traffic assignment manual for application with a large, high speed computer*[M]. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, Office of Planning, Urban Planning Division: For sale by the Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, 1964.
- [45] 丁亮,钮心毅,施澄. 多中心空间结构的通勤效率——上海和杭州的实证研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(9): 1578-1586.
DING Liang, NIU Xinyi, SHI Cheng. The commuting efficiency of polycentric spatial structure: an empirical study of Shanghai and Hangzhou[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(9): 1578-1586.
- [46] 谢栋灿,王德,钟炜菁,等. 上海市建成环境的评价与分析——基于手机信令数据的探索[J]. *城市规划*, 2018, 42(10): 97-108.
XIE Dongcan, WANG De, ZHONG Weijing, et al. Assessment and analysis on built environment of Shanghai: an exploration based on mobile phone signaling data[J]. *City Planning Review*, 2018, 42(10): 97-108.
- [47] 岳丽莹,朱宇,李开明. 双视角、双维度下超大城市的通勤效率——以上海市为例[J]. *地理研究*, 2024, 43(2): 429-445.
YUE Liying, ZHU Yu, LI Kaiming. Commuting efficiency in dual dimensions of education and travel mode in Shanghai from the perspectives of average distance and spatial organization[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(2): 429-445.