

暴雨内涝情景下城市消防服务可达性的精细化评估

李睿^{1,2,3}, 王军^{1,2,3}, 李梦雅^{1,2,3*}

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241; 2. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241;
3. 华东师范大学上海城市公共安全研究中心, 上海 200241)

摘要:为了揭示城市暴雨内涝灾害对应急响应服务功能的影响, 论文基于高精度城市洪涝模型(FloodMap)和增强型两步移动搜寻法(E2SFCA), 对暴雨内涝灾害影响下上海市中心城区消防服务可达性进行精细化评估。研究结果表明: ①百年一遇暴雨内涝情景下, 内涝最严重时积水深度超过50 cm的淹没范围整体呈现“西高东低”分布态势, 淹没总面积约1.5 km², 可导致471条路段(约占路网全长5.11%)通行受阻。②上海市中心城区消防服务可达性的空间差异比较显著, 大体呈现出由黄浦江两岸向西北和东南方向递减态势, 但在一天中的不同时段, 可达性空间格局变化并不明显。③与正常天气条件相比, 暴雨内涝情景下不可达单元(250 m×250 m)数量显著增多, 夜间低峰、早高峰、白天平峰和晚高峰时段分别增加36.32%、35.89%、39.07%和32.01%; 从暴雨内涝的过程(全程120 min)上看, 在雨峰后半段((30, 45] min)不可达单元数量最多, 消防服务可达性的空间差异程度最大。④消防服务可达性表现出一定程度的空间集聚特征, 其中高值集聚区(“高一高”型)主要位于黄浦江两岸以及浦西边缘地区, 低值集聚区(“低—低”型)主要位于西北和西南区域, 这2类集聚区呈“团块状”分布, 而“高一低”型和“低—高”型集聚均不显著。⑤研究区内消防服务可达性与需求的空间失配现象(“低需求—高可达”或“高需求—低可达”)较为明显, 而暴雨内涝会加剧空间失配问题。研究结果可为提升城市洪涝灾害管理与应急响应服务的精细化水平提供科学依据。

关键词:消防服务; 可达性; E2SFCA; 暴雨内涝; 上海

在全球气候变化和快速城市化影响下, 城市地区面临的暴雨内涝灾害风险日益增高^[1-2]。极端暴雨内涝不仅会造成严重的人员伤亡和直接经济损失, 还可能导致城市交通以及其他服务功能受到严重影响。近年来, 中国北京、上海、深圳、广州等特大城市无一能幸免于暴雨内涝灾害的侵袭。例如, 2016年武汉“7·6”暴雨、2018年北京“7·16”极端暴雨、2020年广州“5·22”特大暴雨引发的内涝均导致

市区多条道路因严重积水而中断^[3-5]。交通中断不仅会扰乱城市居民的正常出行, 更重要的是导致与交通相关的一系列城市服务效率降低, 甚至彻底瘫痪。例如, 2017年9月美国“厄玛”飓风带来的洪水导致佛罗里达州大范围救援服务中断, 当地一个养老院8人丧生^[6]; 2019年8月台风“利奇马”带来的极端降水导致浙江省部分地区大面积断电, 区域交通中断, 46人因灾死亡, 直接经济损失242.6亿元^[7]。

收稿日期: 2021-02-25; 修订日期: 2021-05-17。

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(18ZDA105); 国家自然科学基金项目(41971199, 42001182); 中国博士后科学基金项目(2019M661424)。[Foundation: Major Program of National Social Science Foundation of China, No. 18ZDA105; National Natural Science Foundation of China, No. 41971199 and 42001182; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2019M661424.]

第一作者简介: 李睿(1998—), 女, 山西阳泉人, 硕士生, 主要研究方向为灾害风险评估与风险管理。

E-mail: lirui0229@163.com

***通信作者简介:** 李梦雅(1991—), 女, 湖北荆州人, 博士后, 主要研究方向为城市灾害风险与公共安全管理。

E-mail: myli@geo.ecnu.edu.cn

引用格式: 李睿, 王军, 李梦雅. 暴雨内涝情景下城市消防服务可达性的精细化评估[J]. 地理科学进展, 2022, 41(1): 143-156. [Li Rui, Wang Jun, Li Mengya. Fine-resolution evaluation of urban fire service accessibility under the impact of a 100-year pluvial flood. Progress in Geography, 2022, 41(1): 143-156.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.01.013

因此,在洪涝灾害风险日益加剧的背景下,如何提升城市应急救援能力,最大限度地减少人员伤亡和财产损失,保障城市安全,已经成为国际社会高度关注和亟待解决的热点问题之一。

应急救援可达性是衡量其服务水平的重要指标^[8]。尽管地理、交通和城市规划等领域对可达性概念的界定有所区别^[9-13],但其本质都在于刻画居民在地理空间中获取服务的有效机会和难易程度。基于这一涵义,学者们不断探索和优化空间可达性的评估模型,目前较常采用的可达性测度方法为重力模型法和两步移动搜寻法(2SFCA)^[14]。其中,2SFCA较为全面地考虑了供给规模、需求规模和供需距离对可达性的影响,计算结果更为准确和直观^[15],自Luo等^[16]首次提出该方法后,即在医疗、教育、交通、绿地等公共服务设施可达性研究中得到深入研究与广泛应用。例如,Williams等^[17]基于2SFCA对公立中学可达性进行评估,发现可达性与种族差异、社会经济水平、语言文化等因素显著相关;Hu等^[18]基于2SFCA对急救医疗服务可达性进行评估,研究表明道路拥挤程度会对急救医疗服务可达性产生负面影响;赵东霞等^[19]基于2SFCA对养老服务设施的空间可达性进行评估,结果表明不同社区养老服务设施的可达性存在显著的空间差异。随后,在2SFCA的基础上,又发展出了增强型两步移动搜寻法(E2SFCA)等众多扩展形式^[20-22],在解决公共服务供需矛盾、辅助政府决策中发挥了重要作用。

作为针对突发紧急事件(通常危及生命)采取的响应措施,应急服务通常要求将响应时间(专业施救人员接到出警指令后行车到现场)控制在5~15 min以内。鉴于其对时间高度敏感,在城市应急服务可达性研究中需高度重视调度过程受到干扰情况下响应时间的不确定性。暴雨内涝灾害中,严重的道路积水可直接导致救援车辆无法通行,或加剧交通拥堵,使得响应时间大大延长。此外,城市人群的日常活动使得一天之中的交通状态呈现明显变化。暴雨内涝发生在不同时段,对可达性造成的影响也有所不同。然而,目前基于洪涝灾害场景开展的应急服务可达性研究还比较缺乏,对灾害影响下应急响应时间的不确定性认识不足。尽管近年来已有研究开始关注洪涝灾害对医疗(120)、公安(110)等应急响应服务可达性的影响^[23-24],但大多是基于GIS网络分析中的“服务域”或“最近设施点”

等工具直接绘制服务范围,忽略了可达性中的供需关系,也未能考虑交通成本在精细时空尺度上的变化情况,研究方法还有较大提升空间。

本文基于高精度城市洪涝模型和增强型两步移动搜寻法,聚焦典型城市实证区(上海市外环线以内中心城区),对暴雨内涝灾害影响下城市消防服务(119)可达性进行精细化评估。在方法上,分别采用脆弱性POI(point of interest)和高德地图实时路况表征需求规模和交通成本,并将动态的暴雨内涝过程划分为多个阶段,基于每个阶段的淹没范围和积水深度信息对道路通行状态进行更新,从而在精细时空尺度上度量百年一遇暴雨内涝情景下城市消防服务可达性。研究结果可为提升城市消防服务与洪涝灾害精细化管理水平提供科学依据。

1 研究区域、方法与数据

1.1 研究区概况

上海位于国家“一带一路”倡议和“长江经济带”发展战略的交汇点上,是中国的经济、金融、贸易和交通中心,引领长三角城市群参与全球竞争合作。然而,上海每年都会不同程度地遭受洪水、强降雨等灾害侵袭,汛期“风、暴、潮、洪”等致灾因子“多碰头”现象时有发生,城市洪涝灾害风险防控依然面临严峻挑战^[25]。

本文以上海市中心城区(外环线以内)为研究区,该区总面积约667 km²,是上海城镇体系的核心,长期承载着高强度人类活动。在快速城镇化过程中,中心城区河道萎缩、地面沉降问题十分严重,地表透水和储水能力大大降低。该区域地势低平,部分地表高程甚至低于多年平均高潮位。区域内排涝系统整体设计标准偏低,排水能力非常有限。因此,该区域已成为典型的暴雨内涝灾害高风险区。

在《上海市机构改革方案》指导下,上海于2018年正式组建应急管理局,统筹建设和管理火灾扑救、抗洪抢险、地震和地质灾害救援、生产安全事故救援等应急救援力量。实践经验表明^[26-27],消防服务是暴雨内涝灾害中需求较高的一种救援类型,也是本文重点关注的城市应急响应部门。依据上海市消防局2019年的最新统计信息,研究区现阶段共有53个消防中队、大队或支队,其中37个位于浦西地区、16个位于浦东地区,且内环、中环、外环分别

有21、17、15个消防站点(浦东支队战勤保障大队和保税区中队在空间位置上重叠),基本覆盖中心城区(图1a)。此外,本文采用的需求单元是250 m×250 m规则网格,以网格的几何中心作为代表计算每个需求点与消防站之间的时间(距离)成本,研究区内总共有3744个网格。

1.2 数据来源及处理

本文所使用的数据主要包括研究区地形数据、POI数据、实时路况数据以及道路网络数据。其中地形数据由上海测绘研究院提供,数据源是基于高精度航拍影像通过立体像对方式生成的数字表面模型(DSM),原始分辨率为0.5 m。为兼顾模型运算效率和模拟精度,通过重采样将分辨率降低至5 m,约为单车道宽度,可以保证暴雨内涝模拟结果展现道路网络中的积水状态。

POI数据从高德开放平台“搜索POI”应用程序接口(API)爬取得到。根据POI的类型可以大致判断出该位置上的人群、地物或活动特征,进而度量

其脆弱性水平以及对消防救援服务的需求规模。本文重点关注4类脆弱性POI:事故高发类、人群脆弱类、人流密集类和历史文物类(表1)。其中,事故高发类主要包括加油站、加气站、工业园区等易燃易爆场所,火灾事故隐患较高,造成的人员伤亡和事故影响也极为恶劣,对消防服务有较高需求。人群脆弱类主要包括养老院、幼儿园、学校、医院等场所,聚集了大量弱势人群,在灾害发生时自我保护和逃生能力较差,容易遭受伤害,对消防服务也有较高需求。人流密集类主要包括商业中心、热门景点等场所,虽然不是脆弱人群聚集地,但由于人流量大,在安全事故中也极易造成“群死群伤”的重大悲剧。历史文物类涉及图书馆、博物馆等场所,存放着大量珍贵的历史文物与文献资料,具有极高的文化价值。因此,以上4类场所都应是消防部门重点关注和保护的对象。本文综合考虑每类场所发生安全事故的概率及其后果的严重程度,将事故高发类、人群脆弱类、人流密集类、历史文物类的消防

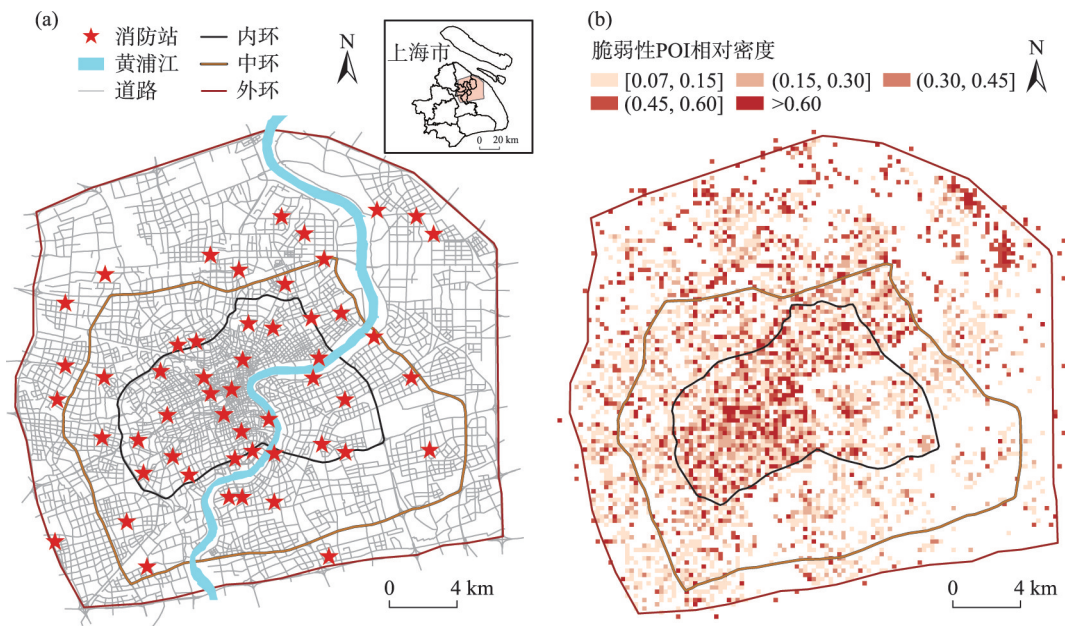


图1 研究区消防站及脆弱性POI空间分布
Fig.1 Spatial distribution of fire stations and vulnerable POIs in the study area

表1 脆弱性POI类型及权重

Tab.1 Types of vulnerable POIs and weights for calculating service demand

POI类型	数量/个	所占比例/%	权重
事故高发类(加油站、加气站、工业园区、物流仓储等)	812	11.40	4
人群脆弱类(学校、养老院、社会福利院、医院等)	4545	63.82	3
人流密集类(商业中心、交通枢纽、热门景点等)	938	13.17	2
历史文物类(博物馆、档案馆、历史遗迹、图书馆等)	827	11.61	1

需求等级分别设置为4、3、2、1(4表示最高,1表示最低)。对收集到的7122条POI数据进行分类后,统计每个需求网格内每类POI的数量并进行极差标准化处理,再以需求等级为权重进行加权求和,得到每个需求网格的需求规模(图1b)。

实时路况数据通过调用高德开放平台“交通态势”API爬取,数据格式为shapefile。采集了2020年5月18—22日共计5 d,每天9:00、14:00、18:00和2:00的实时路况,包括道路名称、拥堵状态、方向、车行角度(判断道路正反向使用)和速度(数值型)等信息。据统计,在早高峰(9:00)、白天平峰(14:00)、晚高峰(18:00)和夜间低峰(2:00)4个时段,研究区路网平均速度分别为27.78、30.74、26.14和31.40 km/h。本文所使用的道路网络数据由华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室提供,包含道路名称、类型(高架/高速路、主干道、次干道、支路)、长度、标准限速、单双行、转向限制等基本信息。研究区共计有9209个路段(两个路口之间),其中能匹配到高德实时路况的路段有5095个(匹配路段总长度占整个路网的60%~65%),剩余路段(大部分为支路)的速度基于标准限速进行适当折减,以体现实时交通和暴雨天气对消防车行驶速度的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 城市暴雨内涝模拟

首先,对百年一遇暴雨情景进行设定:采用上海市暴雨强度公式和芝加哥雨型计算生成降雨量和降雨时间序列。然后,采用基于栅格的高精度水文—水动力数值模型(FloodMap-HydroInundation2D)进行地表内涝过程模拟。该模型在二维水动力模型(FloodMap)的基础上耦合了城市水文过程(蒸发、下渗和排水等)模块,其中,下渗量通过Green-Ampt方程计算,蒸发量基于经验公式估算(约3 mm/d),排水量基于雨水管网的设计排水能力计算(将36 mm/h线性分解到每个时间步长上)。水动力模拟基于圣维南方程描述浅水波非恒定流,采用与LISFLOOD-FP相似的模型结构,简化的动量方程为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{gh\partial(h+z)}{\partial x} + \frac{gn^2q^2}{hr^{4/3}} = 0 \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度, r 为水力半径, z 为栅格底部高程, h 为水深, n 为曼宁系数(取0.06)。对式(1)从时间上进行离散可得:

$$\frac{q_{t+\Delta t} - q_t}{\Delta t} + \frac{gh_t\partial(h+z)}{\partial x} + \frac{gn^2q_t^2}{h_t^{7/3}} = 0 \quad (2)$$

式中: q_t 为 t 时的流量, $q_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ (下一时间步长)时的流量,推导可得:

$$q_{t+\Delta t} = \frac{q_t - gh_t\Delta t[\partial(h+z)/\partial x]}{1 + gh_t\Delta t n^2 q_t / h_t^{10/3}} \quad (3)$$

基于2011年8月12日对上海中心城区造成显著影响的一场暴雨内涝事件对模型参数进行验证和率定^[28]。模拟的水平空间分辨率为5 m,模拟时长为4 h(其中降雨发生在第一个小时内),以使内涝过程达到稳定状态。本文仅基于前2 h的模拟结果进行分析和讨论。

1.3.2 消防服务可达性评估

消防救援服务的可达性不仅受交通阻抗影响,还与需求单元的需求规模紧密相关。供给点周边的需求量越高,供给点越繁忙,则服务的“可获得性”可能较差,进而导致可达性较低。两步移动搜寻法(2SFCA)基于机会累计思想,在一定的搜索半径内计算供需比,考虑了居民对有限资源的竞争,即可达性的“可接近性”维度。但这一方法假设搜索区内所有居民获取服务的机会是均等的,与现实情况有一定差距。在2SFCA的基础上,E2SFCA在搜索半径内按时间(距离)设置权重,时间(距离)越短,对资源的竞争优势越大,体现了“可获得性”维度。本文采用E2SFCA计算消防救援服务可达性,步骤为:

首先,计算每个消防站的供需比。假设响应时间阈值为10 min,以消防站 j 为中心,搜索消防车在10 min内能够到达的 n 个需求单元,以此作为消防站 j 的服务范围。每个需求单元 i 的竞争优势由其到消防站的时间成本(基于实际路网计算)决定,可得消防站 j 的供需比 R_j 为:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{i=1}^n D_i f_{t(ij)}} \quad (4)$$

式中: S_j 表示消防站 j 的供给规模,由于缺乏相关数据,本文假定各个消防站的供给规模相同,统一取单位1; D_i 表示需求单元 i 的需求规模,已由POI数据估算得到; $t(ij)$ 表示从消防站 j 到需求单元 i 的响应时间; $f_{t(ij)}$ 为时间权重,基于高斯函数 $e^{-t(ij)^2/\gamma}$ 计算得到。假定响应时间达到阈值(10 min)时,阻抗最大,竞争优势接近于0,基于此可求出参数 γ 的值^[29]。

然后,计算每个需求单元的可达性。以需求单元*i*为中心,搜索其在响应时间 $t(ij)$ 内可到达的消防站点,并根据时间权重 $f_{t(ij)}$ 对消防站的供需比 R_j 进行加权求和,得到每个需求单元*i*的可达性:

$$A_i = \sum_{j=1}^m R_j f_{t(ij)} \quad (5)$$

交通成本基于GIS网络分析计算,需对路段通行状态和速度进行设置。一般来讲,普通机动车排气管距离地面高度约25~35 cm,当水深超过30 cm时,将有可能淹没排气管,导致车辆抛锚或出现其他故障。考虑到消防车作为承担城市应急救援任务的特种车辆,涉水能力较强,因此本文假设积水深度超过50 cm的路段消防车无法通行。对于能匹配到实时路况数据的路段,其通行速度等于当前时刻的实时速度 S_0 。对于不能匹配到实时路况数据的路段,其通行速度等于道路标准限速 S_1 。此外,考虑到暴雨内涝会对行车条件产生一定影响(如视线不佳、路面湿滑等),进一步对上述设定的通行速度进行适当折减。最终消防车的通行速度 S_r 采取的计算方案为:

$$S_r = A \cdot B_i \cdot S_i \quad (6)$$

式中: A 和 B_i 为速度调整参数, $S_r=S_0$ 或 S_1 。当 $S_i < 50$ km/h时,取 $A=1.25$;当 $S_i \geq 50$ km/h时,取 $A=1$ 。这是由于考虑到消防车作为执行救援任务的车辆,在确保安全的前提下可以不严格遵守交通规则(如红绿灯、靠右行驶等),假设在路上车辆较多或存在一定的拥堵情况时,其车速会略高于路段平均速度。此外, B_i 表示暴雨对车速的影响。在2 h的暴雨内涝过程中,降雨开始和尾声阶段((0, 15] min和(45, 60] min)取 $B_i = 0.7$;雨峰时段((15, 45] min)取 $B_i = 0.5$;雨停之后((60, 120] min)取 $B_i = 0.9$ 。

1.3.3 可达性空间差异分析

空间差异分析是描述一个区域内公共服务水平及公平性的重要手段,常见的刻画空间差异的指标有方差、标准差和变异系数等。本文采用需求加权的标准差公式计算可达性的空间差异水平。公式如下:

$$\hat{A} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (A_i - \bar{A})^2 D_i / \sum_{i=1}^m D_i} \quad (7)$$

式中: \hat{A} 为标准差, A_i 为需求单元*i*的可达性, D_i 为需求单元*i*的需求规模; \bar{A} 为所有需求单元的加权平均可达性,根据2SFCA方法的重要性质^[30], $\bar{A} = S_r / D_i$,其中, S_r 和 D_i 分别是总供给量和总需求

量; m 为需求单元的数量。与可达性的评估结果对应,在一天中不同时段和暴雨内涝不同阶段分别计算 \hat{A} 值,以表征消防救援服务可达性在不同情景下的空间差异程度。

2 结果与分析

2.1 暴雨内涝模拟结果

百年一遇暴雨内涝模拟结果如图2所示。由于在5 m水平空间分辨率下展布整个研究区的积水分布不利于辨识出水深超过50 cm的淹没区,故统计了250 m×250 m格网单元内积水深度超过50 cm的淹没面积,图2a为内涝最严重时段的统计结果。总体来看,积水深度超过50 cm的淹没范围呈现微弱的“西高东低”分布态势,淹没总面积可达1.5 km²。其中,淹没面积在0~100 m²的格网单元连片分布,数量最多(约占48.90%),淹没面积在100~300 m²的格网单元呈团块状分布(约占37.58%),而淹没面积在300 m²以上的格网单元主要沿河流、道路等呈条带状分布(约占13.52%)。可见,由于研究区地势低平,内涝分布并无明显空间差异,不会出现大片的严重积水区域。暴雨径流的汇流过程主要受微地表形态影响,道路(除高架、高速路外)一般是城市地表中的典型低洼处,路面低于两侧路肩约20~30 cm,极易成为内涝发生地^[31]。

为了更加精准地描述道路网络中积水分布的动态变化及其对路网通行状态的影响,本文以15 min为间隔输出模拟结果,将动态的暴雨内涝过程划分为8个阶段。图2c中 $T_1 \sim T_8$ 为各阶段淹没状态的局部放大显示。可以看出:①在百年一遇暴雨情景下,上海中心城区大部分道路都会出现10~20 cm深度积水;20~30 cm积水分布范围虽不够连续,但与道路形态仍十分接近;30~50 cm及超过50 cm积水分布较为分散,通常只出现在路段的某一部分,并且仅在低洼地区出现整条路段被淹情况。②降雨开始阶段(T_1 : (0, 15] min)没有出现内涝,雨峰前后($T_2 \sim T_3$: (15, 45] min)内涝逐渐形成并加强,到雨停之时(T_4 : (45, 60] min)达到最严重内涝状态;雨停之后($T_5 \sim T_8$: (60, 120] min)积水逐渐消退,但速度较慢,(75, 105] min内涝程度差异不大,直到120 min积水范围和深度才明显缩小。

图2b为依据每一阶段内道路网络的最大淹没深度信息辨识的通行受阻路段。除(0, 15] min(没有

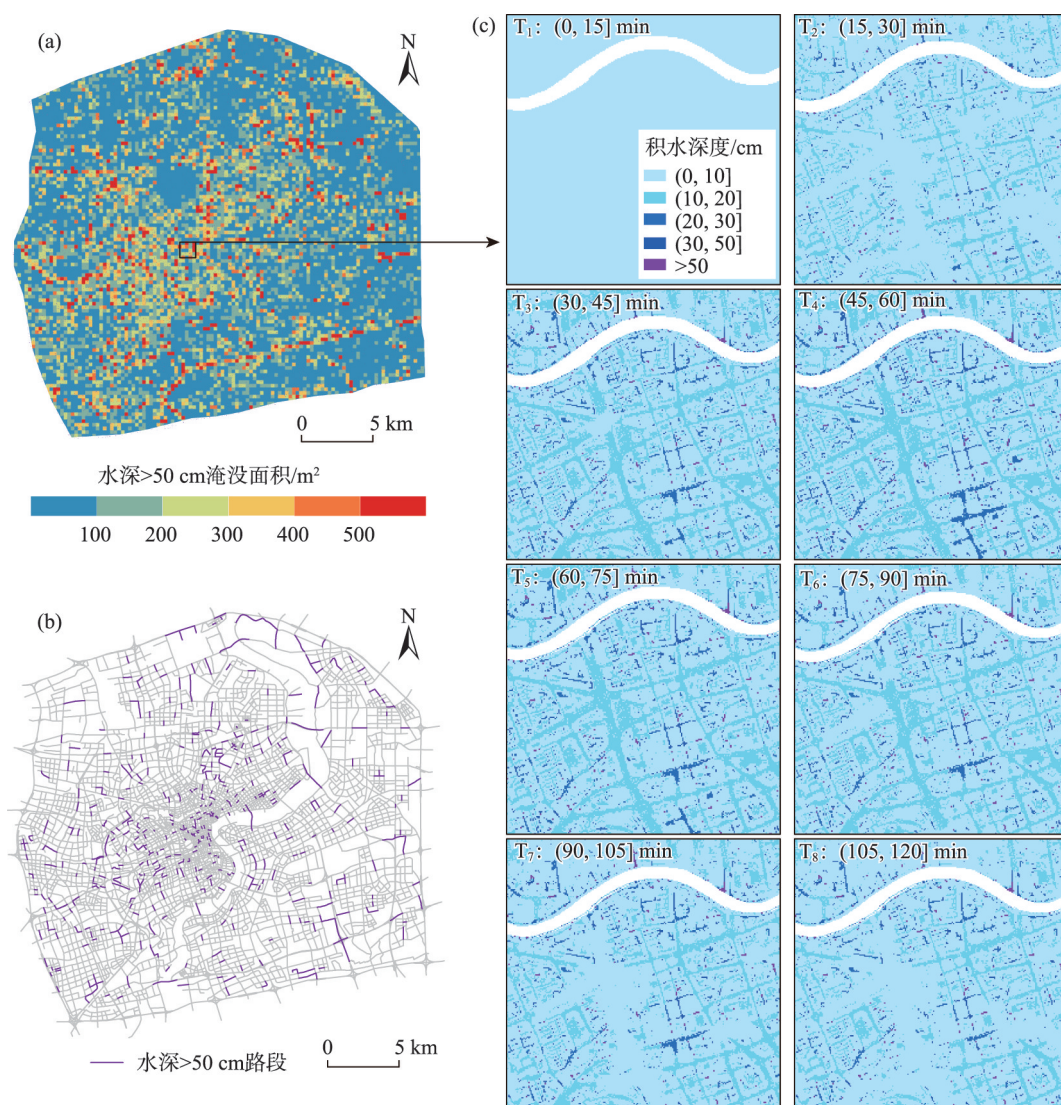


图2 暴雨内涝积水深度超过 50 cm 淹没范围及路段

Fig.2 Pluvial flood extent and roads with inundation depth over 50 cm

内涝)外,依次统计其他7个阶段水深超过50 cm的路段分别有82、367、471、449、418、395和378条,累计长度分别为35.34、165.24、206.46、195.91、182.92、172.40、166.26 km。总体来讲,百年一遇暴雨内涝情景下上海市中心城区淹没深度超过50 cm的路段占全路网的0.89%~5.11%,并且在降雨尾声阶段(T₄: (45, 60] min)内涝状态最为严重。

2.2 消防服务可达性时空变化特征分析

2.2.1 时空分布特征

分别对正常天气条件(n)和百年一遇暴雨内涝情景下(p)下研究区消防救援服务可达性进行评估,结果如图3所示。可以发现:

(1) 在正常情景下,上海市中心城区消防救援服务可达性大体呈现出由黄浦江两岸向西北和东

南方向递减态势,空间差异较为显著。在一天中的不同时段,可达性空间格局变化并不明显,整体上呈现以各个消防站为中心向四周递减的趋势,但受站点周边交通状况及需求分布的综合影响,递减速度有所不同。夜间低峰和白天平峰时段不可达单元相对较少,分别为413个(11.03%)和407个(10.87%),主要分布在研究区边缘,由于距离消防站较远,消防车难以在响应时间内到达。早高峰和晚高峰时段不可达单元相对较多,分别为535个(14.29%)和556个(14.85%)。由于早、晚高峰期间,城市人群流动量较大,尤其是“潮汐式”通勤出行导致道路网络中车辆数量激增,拥堵加剧,通行速度降低,导致消防车能在规定响应时间内到达的范围缩小,更多的需求单元变得不可达。总体来看,一

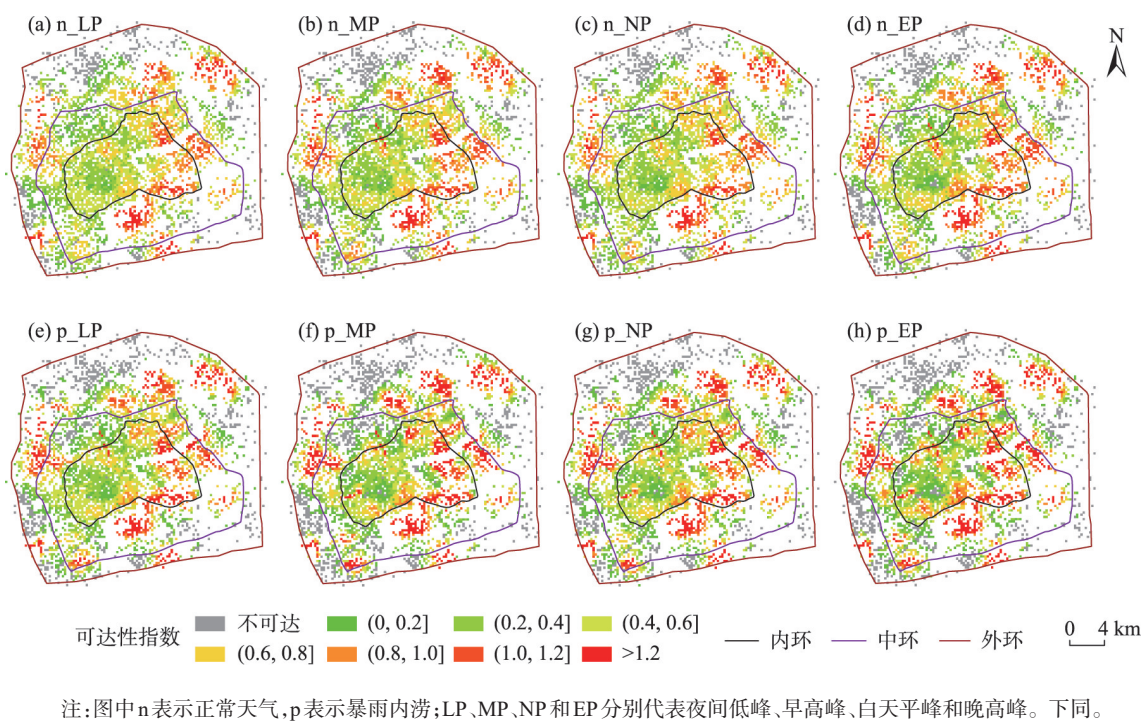


图3 正常天气和暴雨内涝情景下消防服务可达性空间分布对比

Fig.3 Comparison of fire service accessibility under normal and pluvial flood scenarios

天中不同时段消防服务可达性指数分布特征相似,中可达(0.4, 0.8]单元最多(32.53%~39.72%),低可达(0, 0.4]单元次之(30.32%~32.32%),高可达(>0.8)单元较少(16.93%~21.79%),不可达单元最少(11.03%~14.85%)。

(2) 如图4所示,百年一遇暴雨内涝情景下,中可达单元的范围明显缩小,其他3类可达水平的区域均有所扩张,且扩张幅度为:不可达区域>高可达区域>低可达区域。与正常天气相比,暴雨内涝情景下夜间低峰、早高峰、白天平峰和晚高峰时段

中可达单元分别减少22.46%、24.62%、23.90%和27.75%,不可达单元分别增加36.32%、35.89%、39.07%和32.01%,高可达单元分别增加19.24%、11.26%、20.42%、10.66%,低可达单元分别增加5.12%、4.49%、4.92%和6.33%。不可达、高可达单元的变化幅度更大,主要原因在于洪涝影响下消防服务“可接近性”变差,服务范围进一步缩小,从而使得分布在消防站点附近的需求单元可达性明显升高。

(3) 选择可达性差异最大的2个时段,即夜间低

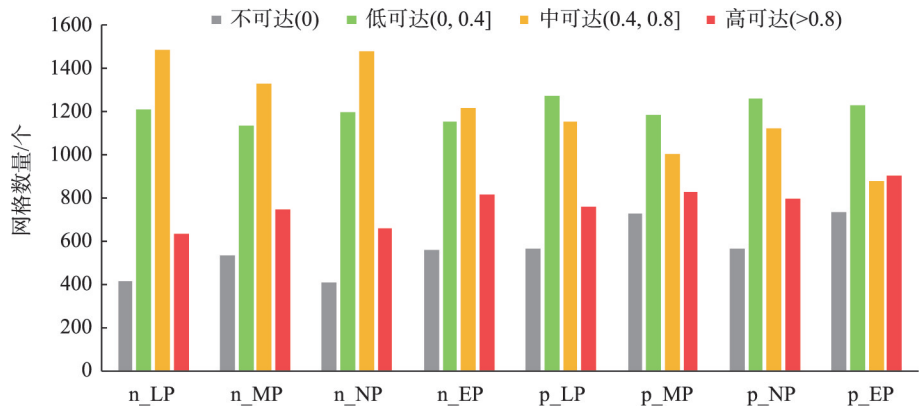


图4 不同时段消防服务可达性网格数量

Fig.4 The number of grids with different accessibility of fire service at different time periods

峰(LP)和晚高峰(EP),分别对其在暴雨内涝过程中8个阶段的可达性进行评估,结果如图5和图6。从暴雨内涝过程(全程120 min)看,在雨峰后半段(T_3 : (30, 45] min)不可达、高可达单元数量最多,而低可达、中可达单元数量最少。与正常情景相比,低峰时段在 T_3 阶段的不可达、高可达单元占比分别增加

221.07%和33.28%,而低可达、中可达单元占比分别减少38.10%和44.59%。晚高峰时段在 T_3 阶段的不可达、高可达单元占比分别增加230.40%和17.16%,而低可达、中可达单元占比分别减少63.00%和56.98%。从空间上看,不可达单元连片分布,高可达单元主要沿黄浦江两岸呈簇状分布,中、

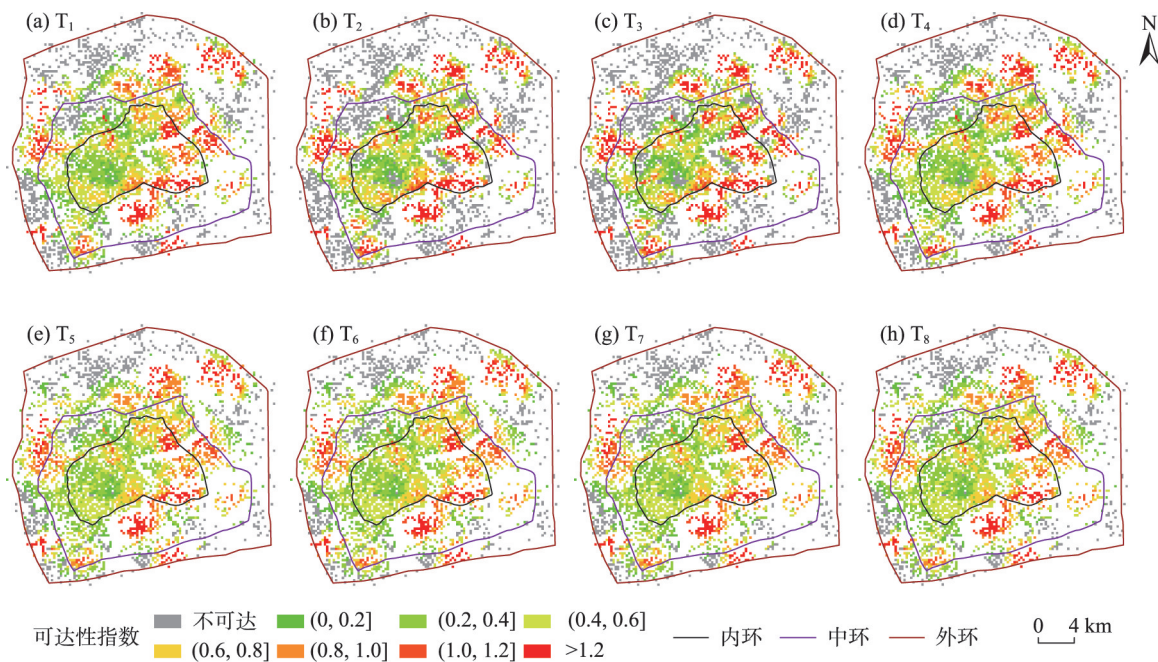


图5 百年一遇暴雨内涝情景下夜间低峰时段消防服务可达性空间分布

Fig.5 Fire service accessibility during the night hours under the 100-year pluvial flood scenario

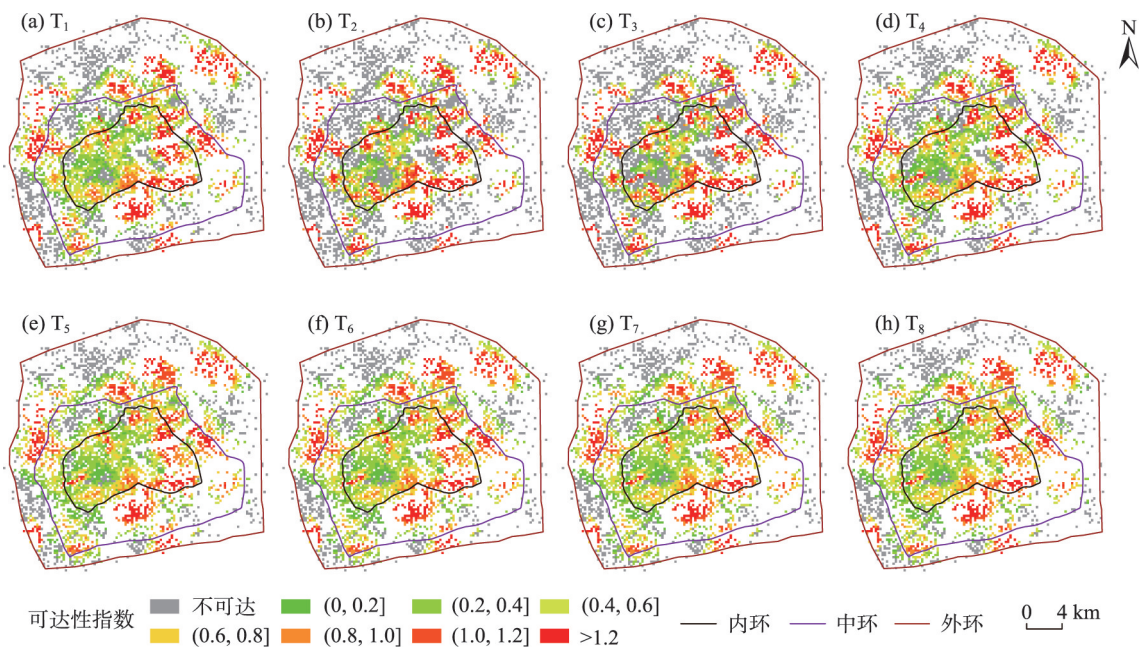


图6 百年一遇暴雨内涝情景下晚高峰时段消防服务可达性空间分布

Fig.6 Fire service accessibility during the evening peak hours under the 100-year pluvial flood scenario

低可达单元则呈零星分布。

2.2.2 空间差异特征

各情景下消防救援服务可达性的平均值、中位数和标准差计算结果如表2所示。可以发现:在一天中的不同时段,当交通状态发生改变时,消防救援可达性的空间差异水平也会有所变化,差异水平总体呈现“晚高峰>早高峰>白天平峰>夜间低峰”的规律。在T₂~T₄降雨阶段,可达性的平均值与标准差的时间变化规律一致,而中位数的时间变化规律则正好相反,为“晚高峰<早高峰<白天平峰<夜间低峰”。尽管晚高峰时段可达性的平均值最高,但并不代表其可达性最佳,因为这一时段可达性的中位数最低而标准差最大,说明其空间差异显著,高值少,低值多,且高、低值差距很大。

从暴雨内涝的不同阶段来看,晚高峰在8个阶段的空间差异都是最大的,从T₁~T₈依次比夜间低峰时段的标准差高出15.37%、17.72%、21.12%、18.79%、13.96%、14.02%、13.83%、13.78%。其中,雨峰后半段(T₃:(30, 45] min)的空间差异达到最大,此时标准差(0.7248)和平均值(0.5289)均为全程最高,而中位数为全程最低(0.1282)。在T₃阶段,由于道路积水已非常严重,367个路段禁行导致共计165.24 km的道路通行受阻。T₃虽然不是内涝状态最严重的阶段,但因其处于雨峰期间,高强度暴雨对通行速度的影响也十分严重(折减系数*B*₁为0.5)。这些不利因素共同导致消防救援服务的可达范围大幅缩小,不可达单元数量激增。在兼顾“可

获得性”和“可接近性”的评估体系下,不可达单元增多,意味着参与竞争服务资源的单元减少,一个消防站的全部或大部分资源则可能被分配到少数可达单元上,进而导致这些单元的可达性急剧增大。简言之,严重的暴雨内涝将导致消防服务可达性的“高低极化”现象,不可达(低值)单元数量增多,而高可达(高值)单元的可达性指数反而大幅增长。

2.3 消防服务可达性空间集聚特征

采用局部莫兰指数(Local Moran's *I*)进一步探讨暴雨内涝过程对可达性空间集聚特征的影响。如图7所示,n_LP/n_EP、T₃_LP/T₃_EP和p_LP/p_EP分别表示正常天气情景、雨峰后半段(T₃:(30, 45] min)及暴雨内涝全过程的空间集聚结果。正常天气条件下,可达性高值聚集区(“高一高”型)主要位于黄浦江两岸以及研究区的西部边缘地区,低值聚集区(“低—低”型)主要位于研究区西北和西南区域,这2类聚集区均呈“团块状”分布,而其他2类(“高一低”型和“低—高”型)集聚特征都不显著。值得注意的是,在内环以内的西南区域也出现了典型的低值聚集区。这一区域位于静安区、黄浦区和徐汇区的交界处,分布着许多重要的商业中心、学校和医院,人流量大,经济活动频繁,而周边消防站分布稀疏,因而形成了低值聚集区域,是消防部门增设站点需要重点考虑的区域。

百年一遇暴雨内涝情景下,全程平均可达性高、低值聚集区的分布情况与正常天气高度相似,集聚特征显著的区域略微减少。但仅从T₃阶段来

表2 15 min尺度上消防救援可达性水平变化
Tab.2 Temporal variation of fire service accessibility at 15-min scale

指标	不同情景	时段/min								全程平均
		(0, 15]	(15, 30]	(30, 45]	(45, 60]	(60, 75]	(75, 90]	(90, 105]	(105, 120]	
平均值	夜间低峰	0.4946	0.5092	0.4999	0.4939	0.4937	0.4932	0.4934	0.5100	0.4985
	早高峰	0.5038	0.5194	0.5252	0.5133	0.5017	0.5015	0.5002	0.5009	0.5083
	白天平峰	0.5007	0.5151	0.5182	0.5093	0.5015	0.5015	0.5007	0.5012	0.5060
	晚高峰	0.5102	0.5241	0.5289	0.5186	0.5072	0.5071	0.5056	0.5060	0.5135
中位数	夜间低峰	0.4131	0.3356	0.4011	0.4371	0.4375	0.4378	0.4381	0.3243	0.4080
	早高峰	0.3937	0.2608	0.2146	0.3783	0.4281	0.4278	0.4300	0.4298	0.4133
	白天平峰	0.4242	0.3187	0.2986	0.4087	0.4488	0.4481	0.4512	0.4517	0.3837
	晚高峰	0.3819	0.1970	0.1282	0.3505	0.4270	0.4263	0.4290	0.4290	0.3702
标准差	夜间低峰	0.4476	0.5886	0.5984	0.4688	0.3762	0.3759	0.3737	0.3738	0.4319
	早高峰	0.4923	0.6640	0.7076	0.5302	0.4187	0.4183	0.4157	0.4153	0.4832
	白天平峰	0.4362	0.6011	0.6230	0.4700	0.3725	0.3721	0.3698	0.3700	0.4291
	晚高峰	0.5164	0.6929	0.7248	0.5569	0.4287	0.4286	0.4254	0.4253	0.4998

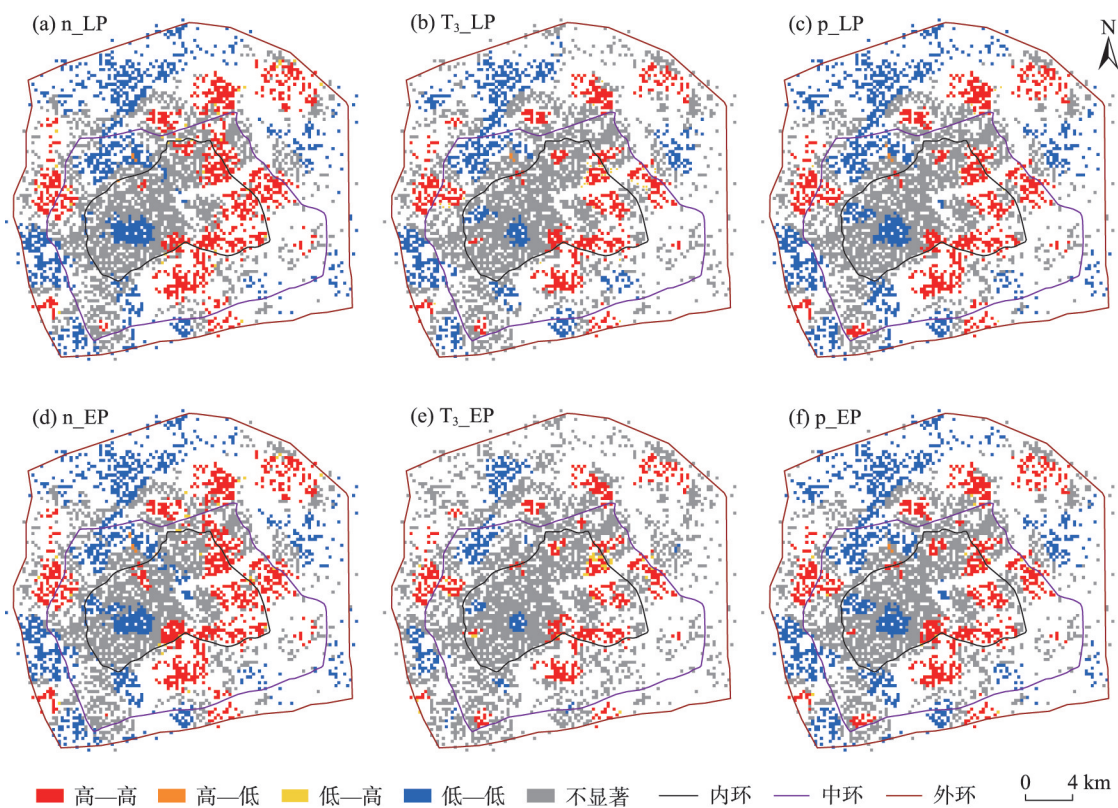


图7 不同交通时段消防服务可达性时空集聚特征

Fig.7 Spatiotemporal aggregation characteristics of fire service at different time periods

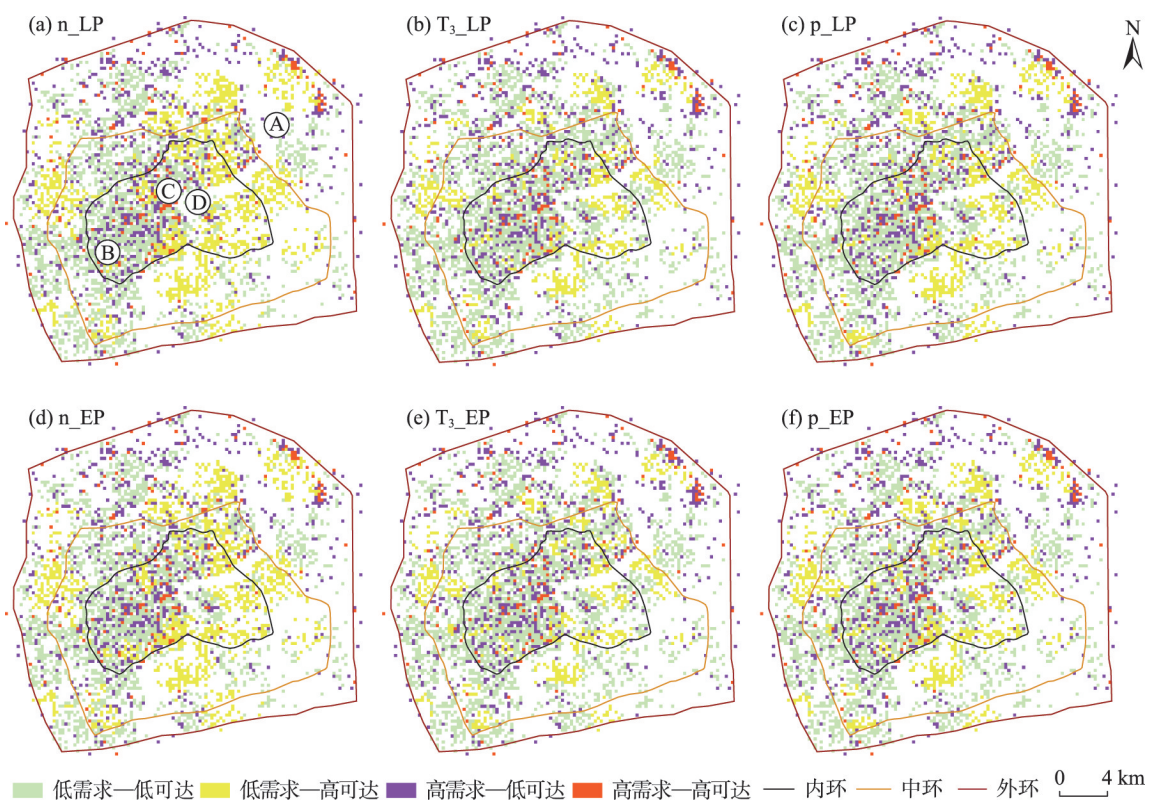


图8 不同交通时段消防服务可达性供需关系变化

Fig.8 Spatiotemporal variation between fire service accessibility demand and supply at different time periods

看,高、低值聚集区的缩小幅度十分明显,集聚特征不显著的区域范围超过60%,说明在暴雨内涝的影响下,消防可达性会呈现一种更加随机的空间分布,这给消防服务的优化工作增添了难度。此外,在一天中的不同时段,消防服务可达性表现出相似的空间集聚特征。晚高峰时段由于道路拥挤程度高,对消防救援过程的干扰更大,其可达性的空间集聚性略低于夜间低峰期。

2.4 消防服务供需关系变化

基于可达性和需求规模数据,采用K-means算法对需求单元进行聚类,探讨暴雨内涝对消防救援服务供需关系的影响。同样地,选取 n_LP 、 T_3_LP 、 p_LP 和 n_EP 、 T_3_EP 、 p_EP 这6个情景进行对比分析。K-means算法是典型的非层次聚类算法,采用距离作为相似性评价指标,在最小化误差函数的基础上将数据划分为预定的 k 个类簇^[32],一般可通过计算轮廓系数(Silhouette Coefficient)确定 k 的取值。本文综合考虑数据自身特点和轮廓系数,最终确定 k 的取值为4,将需求单元分为“低需求—低可达”“低需求—高可达”“高需求—低可达”“高需求—高可达”4种类型。每类需求单元在不同情景下的空间分布如图8所示。由图8可知,正常天气条件下,“低需求—低可达”单元在浦西地区呈连片分布,中间夹杂着呈簇状分布的“低需求—高可达”单元和离散分布的“高需求—低可达”单元。在浦东地区,“低需求—低可达”和“低需求—高可达”单元均呈簇状分布,且后者主要分布于黄浦江沿岸。“高需求—低可达”单元更为零散,主要位于外高桥地区。

与正常天气条件相比,暴雨内涝情景下低峰和晚高峰时段2类“高可达”区域(“低需求—高可达”型和“高需求—高可达”型)单元数量分别减少26.86%和25.12%,而2类“低可达”区域(“低需求—低可达”型和“高需求—低可达”型)单元数量分别增加13.72%和12.71%。特别是在 T_3 阶段,夜间低峰和晚高峰时段的“高需求—低可达”单元较正常情景分别增加6.23%和7.06%。“高需求—低可达”单元产生的原因是多方面的。例如,在图8a中,A~D都是典型的消防服务高需求点,其中A内分布有港鑫仓库等事故高发类场所,但由于濒临黄浦江且地势低洼,暴雨内涝导致附近大部分道路积水深度超过50 cm,通行受阻严重,因而可达性较低。B内分布有汇家幼儿园、上海市胸科医院等人群脆弱类场所,C内分布有七浦兰城商厦等人流密集类场

所,由于B、C周边也分布着大量人群脆弱类或人流密集类场所,对消防服务的竞争较为激烈,加上地处内环以内地区,交通拥堵问题也比较严重,而暴雨内涝使得道路连通性变得更差,这些原因共同导致其消防服务可达性较低。D内分布有上海城市历史发展陈列馆等历史文物类场所,但由于其距离消防站较远(距离最近的铜山中队约3.3 km、消防车需要约11 min才能到达),因而难以在规定的响应时间内获得消防服务。

总的来说,即使在正常天气条件下,研究区内消防服务的空间失配现象也比较明显,“低需求—高可达”单元和“高需求—低可达”单元的数量较多(48.13%~48.26%)。其中,“高需求—低可达”单元是更需要被特殊关注的对象。在暴雨内涝情景下,“低需求—高可达”单元减少,但“高需求—低可达”单元数量增多,加剧了消防服务空间失配问题的严重性。因此,消防部门今后还需加强资源优化配置方面的工作。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于高精度城市暴雨内涝模拟和增强型两步移动搜寻法,综合考虑需求规模和交通成本的动态变化,在精细时空尺度上分别对正常天气条件和百年一遇暴雨内涝情景下消防服务可达性进行评估。主要发现如下:

(1) 百年一遇暴雨内涝情景下,上海市中心城区内涝最严重时积水深度超过50 cm的淹没范围整体呈现“西高东低”分布态势,淹没总面积约1.5 km²;积水深度超过50 cm的路段占全路网的0.89%~5.11%,降雨尾声阶段(T_4 :(45, 60] min)内涝状态最为严重,但可达性受损最严重的是在雨峰后半段(T_3 :(30, 45] min)。

(2) 消防服务可达性的空间差异比较显著,大体呈现出由黄浦江两岸向西北和东南方向递减态势。但在一天中的不同时段,可达性空间格局变化并不明显。与正常天气条件相比,暴雨内涝情景下中可达单元减少,不可达单元增多(夜间低峰、早高峰、白天平峰和晚高峰时段分别增加36.32%、35.89%、39.07%和32.01%)。

(3) 消防服务可达性表现出一定的空间集聚特征,其中高值聚集区(“高一高”型)主要位于黄浦江

两岸以及研究区的西部边缘地区,低值聚集区(“低—低”型)主要位于研究区西北和西南区域,这2类聚集区均呈“团块状”分布,其他2类聚集区(“高一低”型和“低—高”型)集聚均不显著。

(4) 在正常天气条件下,研究区内消防服务的空间失配现象也比较明显,“低需求—高可达”单元和“高需求—低可达”单元的数量较多。暴雨内涝情景导致“低需求—高可达”单元减少,但“高需求—低可达”单元数量增多,加剧了消防服务的空间失配问题的严重性。

3.2 讨论

随着城市地区暴雨内涝灾害风险日益增高,开展基于灾害场景的城市应急响应能力研究具有重要意义。本文旨在通过精细时空尺度下暴雨内涝对城市消防服务可达性的影响分析,为城市尺度的消防服务与洪涝灾害精细化管理提供参考案例。鉴于洪涝灾害对城市消防服务可达性的显著影响,应急管理部门可考虑如下预防和应对策略:① 极端暴雨预警发布后,在消防服务需求较高、可达性却较低的失配区域设置临时急救站,提前派遣消防车和专业施救人员到达现场,以免事故突发时不能及时赶到开展援救工作;② 提高暴雨内涝实时预报精度(更新频率 ≤ 15 min),在此基础上优化消防车导航系统,能精准捕获实时交通状态和积水分布信息,避免误入拥堵严重或积水过深的路段从而导致救援延误;③ 进一步提高消防车涉水性能,或配合其他交通工具(气垫船、直升机、水陆两栖车等)同步使用,确保路网关键节点发生严重积水后仍能执行紧急救援任务;④ 进一步优化消防救援系统的资源配置,包括增设新的消防站点并合理分配供给规模,逐步解决空间失配问题。

本文可在以下2个方面进行完善与拓展:一是加强可达性影响因素定量研究,在供需规模和交通成本时空差异基础上,考虑更加全面的自然和人文因素,对其影响大小和时/空间异质性进行分析;二是极端暴雨内涝情景下应急救援车辆速度的率定,本文采用统一的折减系数体现降雨过程和其他车辆避让行为对消防车行驶速度的影响,还需基于更具代表性的雨天交通态势数据和消防车出勤数据对折减系数进行优化。

参考文献(References)

[1] IPCC. Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability [M]. Cambridge, USA: Cambridge University

Press, 2014.

- [2] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估 [J]. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562. [Yin Zhan'e, Xu Shiyuan, Yin Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 553-562.]
- [3] 陈昆仑, 许红梅, 李志刚, 等. 快速城市化下的武汉城市暴雨渍水空间特征及发生机制 [J]. 经济地理, 2020, 40(5): 129-135, 219. [Chen Kunlun, Xu Hongmei, Li Zhigang, et al. The spatial characteristics and formation mechanism of urban rainstorm waterlogging under the influence of human activities in Wuhan. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 129-135, 219.]
- [4] 易嘉伟, 王楠, 千家乐, 等. 基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应 [J]. 地理学报, 2020, 75(3): 497-508. [Yi Jiawei, Wang Nan, Qian Jiale, et al. Spatio-temporal responses of urban road traffic and human activities in an extreme rainfall event using big data. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 497-508.]
- [5] 李威, 艾婉秀, 曾红玲, 等. 2020年汛期我国主要天气气候特征及成因分析 [J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(1): 1-5, 63. [Li Wei, Ai Wanxiu, Zeng Hongling, et al. Major weather and climate characteristics of China during flood season in 2020. *China Flood & Drought Management*, 2021, 31(1): 1-5, 63.]
- [6] 殷杰, 许世远, 经雅梦, 等. 基于洪涝情景模拟的城市公共服务灾害应急响应空间可达性评价: 以医疗急救为例 [J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1737-1747. [Yin Jie, Xu Shiyuan, Jing Yameng, et al. Evaluating the impact of fluvial flooding on emergency responses accessibility for a mega-city's public services: A case study of emergency medical service. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1737-1747.]
- [7] 项素清, 周梅, 徐亚钦, 等. “利奇马”台风的特点及极端强降水的成因分析 [J]. 海洋预报, 2020, 37(5): 76-85. [Xiang Suqing, Zhou mei, Xu Yaqin, et al. The Characteristics of typhoon "Lekima" and the cause of extreme rainfall. *Marine Forecasts*, 2020, 37(5): 76-85.]
- [8] 宋正娜, 陈雯, 张桂香, 等. 公共服务设施空间可达性及其度量方法 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(10): 1217-1224. [Song Zhengna, Chen Wen, Zhang Guixiang, et al. Spatial accessibility to public service facilities and its measurement approaches. *Progress in Geography*, 2010, 29(10): 1217-1224.]
- [9] Hansen W G. How accessibility shapes land use [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1959, 25(2): 73-76.

- [10] Geurs K T, van Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions [J]. *Journal of Transport Geography*, 2004, 12(2): 127-140.
- [11] Kwan M-P. Beyond space (as we knew it): Toward temporally integrated geographies of segregation, health, and accessibility [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2013, 103(5): 1078-1086.
- [12] 陈洁, 陆锋, 翟瀚, 等. 面向活动地点推荐的个人时空可达性方法 [J]. *地理学报*, 2015, 70(6): 931-940. [Chen Jie, Lu Feng, Zhai Han, et al. Making place recommendations: An individual accessibility measure to urban opportunities in space and time. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(6): 931-940.]
- [13] 付晓, 李梦瑶, 陆欣, 等. 考虑行程时间不确定性的服务设施时空可达性度量 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(2): 86-93. [Fu Xiao, Li Mengyao, Lu Xin, et al. Measurement of space-time accessibility to service facilities considering travel time uncertainty. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(2): 86-93.]
- [14] 申悦, 李亮. 医疗资源可达性与居民就医行为研究进展 [J]. *科技导报*, 2020, 38(7): 85-92. [Shen Yue, Li Liang. Progress of research on medical resource accessibility and residents' health seeking behavior. *Science & Technology Review*, 2020, 38(7): 85-92.]
- [15] 陶卓霖, 程杨. 两步移动搜寻法及其扩展形式研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(5): 589-599. [Tao Zhuolin, Cheng Yang. Research progress of the two-step floating catchment area method and extensions. *Progress in Geography*, 2016, 35(5): 589-599.]
- [16] Luo W, Wang F H. Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: Synthesis and a case study in the Chicago region [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2003, 30(6): 865-884.
- [17] Williams S, Wang F H. Disparities in accessibility of public high schools, in metropolitan Baton Rouge, Louisiana 1990-2010 [J]. *Urban Geography*, 2014, 35(7): 1066-1083.
- [18] Hu W Y, Tan J K, Li M Y, et al. Impact of traffic on the spatiotemporal variations of spatial accessibility of emergency medical services in inner-city Shanghai [J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2020, 47(5): 841-854.
- [19] 赵东霞, 韩增林, 王利, 等. 基于两步移动搜寻法的城市居家养老服务设施可达性研究: 以大连市沙河口区低龄老年人为例 [J]. *地域研究与开发*, 2014, 33(6): 27-32. [Zhao Dongxia, Han Zenglin, Wang Li, et al. Accessibility research about urban in-home service facilities for the elderly based on two-step mobile research: Taking low-aging elder people in Shahekou district of Dalian as an example. *Areal Research and Development*, 2014, 33(6): 27-32.]
- [20] Luo W, Qi Y. An enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians [J]. *Health & Place*, 2009, 15(4): 1100-1107.
- [21] Wang F H. Measurement, optimization, and impact of health care accessibility: A methodological review [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2012, 102(5): 1104-1112.
- [22] Kc K, Corcoran J, Chhetri P. Measuring the spatial accessibility to fire stations using enhanced floating catchment method [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2020, 69: 100673. doi: 10.1016/j.seps.2018.11.010.
- [23] Li M Y, Kwan M-P, Yin J, et al. The potential effect of a 100-year pluvial flood event on metro accessibility and ridership: A case study of central Shanghai, China [J]. *Applied Geography*, 2018, 100: 21-29.
- [24] 经雅梦, 殷杰, 叶明武, 等. 河流洪涝对城市公共安全应急响应能力的影响研究: 以上海市外环以内中心城区为例 [J]. *地理科学*, 2018, 38(11): 1924-1932. [Jing Yamei, Yin Jie, Ye Mingwu, et al. Evaluating the impact of fluvial flooding on urban emergency response accessibility: A case study in the city center of Shanghai, China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(11): 1924-1932.]
- [25] 陈振楼, 王军, 刘敏, 等. 上海市主要自然灾害特点与应对策略 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2008(5): 116-125. [Chen Zhenlou, Wang Jun, Liu Min, et al. Characteristics of main natural disasters and coping strategies in Shanghai. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2008(5): 116-125.]
- [26] 刘强, 郭其云, 蒋慧灵. 我国公共危机应急救援力量体系建设 [J]. *消防科学与技术*, 2013, 32(1): 74-77. [Liu Qiang, Guo Qiyun, Jiang Huiling. Establishment of Chinese emergency rescue force in public crisis. *Fire Science and Technology*, 2013, 32(1): 74-77.]
- [27] 暴风雨中的奔波: 全国消防救援队伍抢险救援掠影 [J]. *中国消防*, 2020(6): 42-45. [Running in the storm: Glimpse of the national fire and rescue team. *China Fire*, 2020(6): 42-45.]
- [28] Yin J, Yu D P, Wilby R. Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding: A case study of downtown Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 744-753.
- [29] Kwan M-P. Space-time and integral measures of individu-

- al accessibility: A comparative analysis using a point-based framework [J]. *Geographical Analysis*, 1998, 30 (3): 191-216.
- [30] Wang F H, Tang Q. Planning toward equal accessibility to services: A quadratic programming approach [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2013, 40 (2): 195-212.
- [31] 殷杰. 基于高精度地形表面模型的城市雨洪情景模拟与应急响应能力评价 [J]. *地理研究*, 2017, 36(6): 1138-1146. [Yin Jie. Urban pluvial flood scenario modeling and emergency response assessment using high resolution Lidar- DSM. *Geographical Research*, 2017, 36(6): 1138-1146.]
- [32] 杨俊闯, 赵超. *K-means* 聚类算法研究综述 [J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(23): 7-14, 63. [Yang Junchuang, Zhao Chao. Survey on *K-means* clustering algorithm. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(23): 7-14, 63.]

Fine-resolution evaluation of urban fire service accessibility under the impact of a 100-year pluvial flood

LI Rui^{1,2,3}, WANG Jun^{1,2,3}, LI Mengya^{1,2,3*}

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. Research Center for Urban Public Security, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Taking the central urban area of Shanghai Municipality as the study area and using the enhanced two-step floating catchment area method (E2SFCA), this study evaluated the accessibility of urban fire service (UFS) under the impact of a 100-year pluvial flood, which can cause extensive road closures. A high-resolution hydrodynamic model (FloodMap- HydroInundation2D) was used to produce flood scenarios at very fine spatiotemporal scales. The results show that: 1) Under the flood scenario, the most serious flood extent (water depth > 50 cm) totals about 1.5 km² and may cause 471 road closures (accounting for 5.11% of the entire road length). Flooding on the west side of the Huangpu River is slightly more severe than the east. 2) The spatial distributions of UFS accessibility are not the same at different time periods of the day, but they show a very similar pattern that the accessibility decreases from both sides of the Huangpu River to the northwest and the southeast peripheral areas. 3) Compared with normal weather situation, the number of inaccessible spatial units (250 m × 250 m) at the night, morning peak, nonpeak daytime, and evening peak hours increases by 36.32%, 35.89%, 39.07% and 32.01% respectively under the flooding scenario. During the entire process of the pluvial flood event (120 min), both the maximum number of inaccessible units and the most significant spatial variance emerge at the second phase of the rain peak (30–45 min). 4) Urban fire service accessibility displays significant spatial agglomeration characteristics under both the normal and the flooding scenarios. The High-High clusters are mainly located along the two sides of the Huangpu River and the western peripheral areas, while the Low-Low clusters are primarily distributed in the northwest and southwest. Neither the High-Low clusters nor the Low-High clusters are significant. 5) The spatial mismatch of UFS demand and accessibility (low demand-high accessibility or high demand-low accessibility) is evident even under the normal weather situation, and can be further aggravated if a 100-year pluvial flood occurs. These results can provide a scientific support for improving the smart management of pluvial flood disaster and emergency response service in urban areas.

Keywords: urban fire service; accessibility; E2SFCA; pluvial flood; Shanghai