

超大城市高温热浪脆弱性评价及应对策略 ——以上海市为例

Vulnerability Assessment and Response Strategies for High-Temperature Waves in Megacities: A Case Study of Shanghai

陈星 姜紫莹 方澜 CHEN Xing, JIANG Ziyong, FANG Lan

摘要 近年来全球气候变化给城市带来巨大挑战,高温热浪灾害研究逐渐受到学者们的关注。基于多源数据进行高温热浪脆弱性评估,对城市缓解与适应高温热浪危机,构建健康、宜居、可持续的城市具有重要意义。以上海市为例,构建超大城市高温热浪脆弱性评价体系,根据暴露度、敏感性、适应能力等进行研究。结果显示,高脆弱性区域主要集中于中心城,并且由内向外脆弱性相对减弱,中郊与远郊^①有零星散布的脆弱性较高的区域,反映了高温热浪在空间上具有广泛影响。运用K-均值聚类将市域空间分为6类高温特征空间,并提出引导方向。最后结合国际城市应对高温热浪的措施,从总体行动、分区分管、专项策略等方面提出应对措施。

Abstract In recent years, global climate change has brought enormous challenges to cities, and research on heatwave disasters has attracted increasing attention from scholars. Based on multi-source data, conducting vulnerability assessments of high-temperature heat waves is of great significance for cities to alleviate and adapt to the crisis of high-temperature heat waves, and to build healthy, livable, and sustainable cities. This article takes Shanghai as an example to construct a vulnerability assessment system for high-temperature heat waves in megacities, and conducts research based on the exposure level, sensitivity, and adaptability of disaster-causing factors. The results show that high vulnerability areas are mainly concentrated in the central city, with the degree of vulnerability relatively decreasing from the inner to outer regions. There are scattered areas with higher vulnerability in the middle and far suburbs, reflecting the widespread spatial impact of high-temperature heat waves. This paper uses K-means clustering to divide the urban space into six categories of high-temperature feature spaces, and proposes guiding directions. In addition, in combination with the measures taken by international cities to cope with heatwaves, response measures are proposed from the aspects of overall action, zoning control, and special strategies.

关键词 高温热浪;超大城市;脆弱性评价;应对策略

Key words heatwaves; megacities; vulnerability assessment; response strategies

文章编号 1673-8985 (2025) 06-0124-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20250616

作者简介

陈星

上海市城市规划设计研究院

高级工程师,硕士

姜紫莹

上海市城市规划设计研究院

工程师,硕士

方澜 (通信作者)

上海市城市规划设计研究院

发展研究中心主任

高级工程师,硕士, 13215948@qq.com

0 引言

全球气候变化对城市的正常运行和居民生活具有重要影响,近年来高温热浪灾害给人类带来巨大风险。世界气象组织注重气候风险的实时监测和应对,2023年3月联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《气候变化2023》(AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023)提出,全球气温已上升1.1℃,导致前所未有的气候系统变化。全球平均气温每上升0.5℃,极端高温、强降雨和区域干旱

就会愈加频发、程度更加严重。高温环境对人体健康具有显著影响,它可能引起体温调节失衡,进而影响个体生理健康和环境适应能力^[1]。2023年11月,经济学人智库首次发布《韧性城市指数:城市风险、响应与恢复的全球基准》,采用通用热气候指数(UTCI)^②衡量热应力,提出伦敦、巴黎等城市数值较低,气候舒适度较高;纽约、东京、新加坡、香港、上海等高密度城市数值较高,高温酷热风险较高。高温热浪对我国也有较大影响,夏季长江中下游地区城

注释: ① 本文将上海的郊区分为近郊、中郊、远郊,近郊指外环外离市中心20 km以内的区域,中郊为离市中心20—40 km的区域,远郊为离市中心40 km以上的区域。

② 通用热气候指数(UTCI)预测是研究气候舒适度的模型,其值越高表示热应激越严重,越低表示热舒适程度越高,一般认为-10到30之间是人体可以接受的舒适范围。

市均面临着持续的高温天气。《中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告》显示,近60年来,中国极端天气气候事件经历了显著变化,具体表现为高温天气和暴雨天气的天数有所增加,而极端低温事件的频率则显著减少。未来极端高温天气的发生频率将会有所提升,应对高温带来的风险刻不容缓。因此,针对超大城市的空间特征,结合多源数据,制定高温脆弱性评价体系,形成“识别—分析—策略”的体系,对于城市高温分区管控、城市可持续发展具有重要意义。

国外学者从20世纪80年代开始关注高温热浪问题,主要涉及城市环境、居民健康、规划管理、设施建设、预测与评估等方面。城市环境方面注重高温气候对城市整体空间环境、生态环境、动物活动、植物生长等产生的影响^[2]。居民健康方面关注生理和心理健康,包括高温引起的中暑、皮肤病等,以及对老人、儿童、孕妇等人群带来的焦虑、抑郁等影响。如Alexander Liss等^[3]研究旨在探讨美国本土地区热浪与老年人因中暑而住院之间的关联。规划管理方面关注通过合理的空间布局和资源配臵减少高温带来的风险,涉及城市空间形态、绿地空间建设、城市水环境等。预测与评估方面关注通过气候模型,结合气候灾害因子、城市建成环境、人群特征等研究高温热浪的分类和风险分布等。如使用人工智能模糊逻辑对热浪危害进行分类和风险评估^[4]。

国内学者对高温的研究可以追溯到20世纪末,起步相对较晚,较多关注高温特征^[5]、时空变化特征^[6]、健康风险^[7]、应对策略^[8]等方面。近年来学者们开始重视高温风险评估与适应性设计方面的内容,如冷红等^[9]构建科学量化气候风险的评估框架和体系,并分析比较现有定量研究方法。杨林川等^[10]基于脆弱性与适应性理论,定量评价街道尺度的高温热浪脆弱性,分析高温热浪脆弱性的空间分异特征。郑颖生等^[11]以局地气候分区数据集为信息基础,量化高温风险的危险性、暴露度和脆弱性,并在城市尺度与局地尺度探讨高温问题的应对策略。但是总体上看,高温热浪脆弱性研究宏

观上多集中于国家或区域层面,在城市层面一般以街道镇为主,较小尺度的研究相对不足。超大城市空间气候灾害影响因素尤其复杂,数据获取难度较大,研究内容较少。

因此,本文重点关注超大城市的空间特征,构建了高温热浪脆弱性评价体系,以上海为例,结合遥感数据、第七次全国人口普查(以下简称“七普”)数据、第四次全国经济普查(以下简称“四经普”)数据等多源数据,以500 m×500 m单元进行高温热浪脆弱性的定量评估。本文综合考虑暴露度、敏感性和适应能力3方面评价指标,深入探讨超大城市在高温热浪影响下的脆弱性空间分布特征,并提出针对性的气候适应策略,以增强城市应对高温热浪的能力。

1 城市高温热浪脆弱性评估体系

1.1 指标选取的理论基础

城市高温脆弱性评估需要从敏感性、适应性等方面切入,反映城市自然环境、经济设施环境和建成环境等方面对高温热浪的适应性与应对能力。超大城市应对高温热浪的应对能力对整体城市建设和市民生活质量具有重要作用^[12]。科学合理的城市规划对于提高城市应对气候灾害风险的管理能力和适应气候变化的能力至关重要^[13]。

超大城市的脆弱性研究反映了城市在应对风险、扰动或压力时的系统受灾状态和损坏程度^[14],涉及生态环境脆弱性、城市设施脆弱性、受灾人群脆弱性等方面。高温脆弱性不仅关注

自然环境、社会环境等对整体城市空间的影响,而且更加关注城市社会、生态系统的自愈能力。超大城市高温热浪的脆弱性研究有助于识别和缓解高温热浪风险,为城市规划和管理提供依据,提升城市应对气候变化挑战的韧性。

1.2 指标选取和算法

本文借鉴2007年IPCC第四次评估报告中对脆弱性研究的框架,结合《适应气候变化——脆弱性、影响和风险评估指南》和高温热浪研究相关学者的研究成果,构建了包括暴露度、敏感性和适应能力3方面的高温脆弱性评价框架(见表1)。指标选取方面,综合高温脆弱性评估、高温风险评估相关文献涉及的暴露度、敏感性、适应能力等方面的指标建立指标库(见表2)。充分考虑数据的可获得性和代表性进行典型指标筛选,结合超大城市空间要素、空间资源等特征增加“建筑密度”“容积率”等与城市空间密切相关的指标,形成超大城市高温脆弱性评价指标体系(见表3)。

(1) 暴露度:指的是与高温热浪具有直接联系的重要环境因素。超大城市中城市气温是影响城市产生高温热浪灾害影响的最直接因素,气温与地表温度之间具有较为密切的联系,反映了城市热环境的特征。城市植被覆盖对气温灾害具有显著的缓解作用。因此选取高温热浪日间地表温度作为正相关指标,而归一化植被指数(NDVI)作为负相关指标。

(2) 敏感性:指的是城市空间中人群、建筑等在高温中容易增加风险的敏感情况。城市

表1 高温热浪评估的主要变量及含义对比研究

主要变量	关键组成	相关含义	来源
脆弱性	暴露、灵敏度、适应能力	脆弱性是一个系统所暴露的气候变化和变化的特征、幅度、速率、敏感性及适应能力的函数	2007年的IPCCAR4、脆弱性原始资料
风险	危害、暴露、脆弱性	风险来自脆弱性、暴露和危害的相互作用,风险一词主要指气候变化影响的风险;脆弱性包括对伤害的敏感性或易感性以及缺乏应对和适应能力	2014年的IPCC AR5
热风险	热暴露、热敏感、热适应	热暴露与客观环境的高温强度和持续时间直接相关;热敏感从人自身的生理状态和活动模式角度出发;热适应反映自然环境和设施功能等对气候的综合适应能力	参考文献[15]2905
脆弱性	高温暴露/暴露度、敏感性、适应能力	高温暴露指外部环境因素,如气候和环境要素;敏感性指受高温暴露而容易增加健康风险的人口特征;适应能力指能够减轻高温暴露影响的便利设施和人群应对高温的能力	参考文献[10]40, [16]39, [17]69

资料来源:笔者根据《适应气候变化——脆弱性、影响和风险评估指南》(ISO 14091:2021)及相关文献整理。

表2 城市高温热浪评估相关指标库

Tab.2 Collection of relevant indicators for urban heat wave assessment

关键要素	指标库
暴露度	高温热浪日间地表温度、归一化植被指数(NDVI)、人口密度、热感知情绪强度、高温日数、高温热浪总天数、日最高气温、热指数等
敏感性	常住老年人口比例、老年人口密度、0—14岁人口、地下通廊面积比例、常住女性人口比例、热敏感群体日常出行强度、中青年群体日常通勤强度、居民体力活动强度、建筑从业人员比例等
适应能力	二手住房价格、纳凉设施点数量、医疗设施点数量、社区服务中心10 min步行可达范围比例、单位面积房租水平、地铁站点10 min步行可达范围比例、用地多样性、每万人病床数、人均绿植面积、单位面积房租水平、公园绿地10 min步行可达范围比例等

资料来源:笔者根据参考文献[10]40、[15]2905、[16]39、[17]69、[18-19]整理。

表3 超大城市高温热浪脆弱性评估体系

Tab.3 Vulnerability assessment system for high-temperature heat waves in megacities

目标层	准则层	指标层	编号	指标层与准则层的关系	因子权重	数据来源	
城市高温热浪脆弱性	暴露度	高温热浪日间地表温度	N1	正相关	0.67	2022年遥感影像进行地表温度反演	
		归一化植被指数(NDVI)	N2	负相关	0.33	2022年遥感影像数据分析获取	
	城市环境敏感性	建筑密度	N3	正相关	0.25	2023年地形建筑物数据	
		容积率	N4	正相关	0.25	2023年地形建筑物数据	
	敏感性	承灾体敏感性	5岁以下人口密度	N5	正相关	0.07	七普数据
			5岁以下人口比例	N6	正相关	0.06	
			65岁及以上人口密度	N7	正相关	0.07	
			65岁及以上人口比例	N8	正相关	0.06	
			建筑从业人员密度	N9	正相关	0.06	四经普数据
			高中及以下学历人口密度	N10	正相关	0.04	七普数据
			高中及以下学历人口比例	N11	正相关	0.04	
			月收入4 000元以下人口数量	N12	正相关	0.06	2023年百度人口数据
			低消费人口数量	N13	正相关	0.04	
			二手住房价格	N14	正相关	0.17	
	适应能力		公园绿地面积	N15	正相关	0.33	2022年第三次全国国土调查现状用地数据
			医疗设施(各级医院、社区卫生服务中心等)覆盖情况	N16	正相关	0.33	2023年规划设施用地
			公园绿地、防护绿地、街头绿地覆盖情况	N17	正相关	0.17	2022年第三次全国国土调查现状用地数据

资料来源:笔者自制。

环境敏感性与城市空间密度具有密切联系,建筑物形态、分布特征对城市空间温度变化、城市气温舒适度具有重要影响。承灾体敏感性与容易受到高温暴露影响而增大风险的人群密切相关。其中,老年人、儿童在应对高温热浪方面身体条件相对较差,容易产生中暑、呼吸道疾病等;建筑从业人员、低收入人群等集聚的企业,在空间上降温设施配置压力较大,高温暴露的敏感性也会有所增加。

(3) 适应能力:指的是减轻高温暴露影响或为人群提供服务的设施或空间,涉及住房、公园绿地、医疗设施等。二手房价在一定程度上能反映不同收入人群在住房方面的适应

能力。公园绿地的面积和覆盖情况也能反映城市中应对高温时场所的配备情况。医疗设施主要是满足因高温等因素就医的人群的医疗预防、医疗救治和健康帮助等需求的设施。

2 研究范围、数据来源及分析方法

2.1 研究范围

上海市位于中国东部,地处长江入海口,是亚热带季风性气候,以四季分明、阳光充足、降水丰富为特征。截至2022年,全市年平均气温17.7℃,极端最高气温为40.9℃(中心城区)。我国气象局在高温热浪方面的标准显示,当单日最高气温达到或超过35℃时,该日被定义为高

温天气;若高温天气持续3 d及以上,则被视作高温热浪。上海平均日最高气温 ≥ 35 ℃的高温日数有50 d。近年来,上海的高温热浪时间增多,39℃以上高温日偏多。近150年来,上海平均气温增温速率为0.18℃/10年。本文以上海全市为研究对象,以500 m \times 500 m网格为统计单元进行研究,在空间上实现了量化,有利于不同地区数据的对比研究。

2.2 数据来源及处理情况

(1) 卫星遥感数据及产品。本文依托地理空间数据云平台提供的遥感影像,采用地表温度反演技术提取地表温度,遥感影像数据来源于2022年8月7日landsat 8-9 OLI/TIRS C2L2数据(见图1);采用2022年影像数据进行计算,可得到上海市的NDVI数据(见图2)。

(2) 建筑量数据。计算建筑密度和容积率时采用2023年地形建筑物数据,通过建筑层数、建筑基地面积等数据将其落到500 m \times 500 m网格中。

(3) 各类人口数据。5岁以下人口、65岁及以上人口、高中及以下学历人口等数据来自七普数据,数据统计单元为居委,根据比例、密度等进行转换落到500 m \times 500 m网格。建筑从业人员来自四经普数据,通过点位统计落到网格。月收入4 000元以下人口和低消费人口数据来自百度人口数据,通过点位统计落到网格。

(4) 住房和设施数据。本文选用的二手住房数据来源于2022年5月的网络二手房小区数据。医疗设施数据(各级医院、社区卫生服务中心等)来自规划系统的数据。计算三级医院1 000 m半径覆盖、一二级医院500 m半径覆盖、其他医院300 m半径覆盖等情况并将结果汇总至500 m \times 500 m网格。

(5) 公园绿地数据。采用2022年12月第三次全国国土调查现状用地数据中的公园绿地数据进行处理。公园绿地覆盖情况分析采用公园绿地500 m缓冲、防护绿地和街头绿地300 m缓冲进行叠加处理,并将结果汇总至500 m \times 500 m网格。

2.3 数据处理方法

根据极值量化的方法进行数据无量纲化,将各类指标数据进行简化,处理至0—1范围内。根据两两比较的方式确定暴露度、敏感性、适应能力的权重。相关计算公式如下:

$$\text{暴露度} = N1 \times 0.67 + 0.33 \times (1 - N2) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{敏感性} = & N3 \times 0.25 + N4 \times 0.25 + N5 \times 0.07 + \\ & N6 \times 0.06 + N7 \times 0.07 + N8 \times 0.06 + N9 \times 0.06 + \\ & N10 \times 0.04 + N11 \times 0.04 + N12 \times 0.06 + N13 \times 0.04 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{适应能力} = & N14 \times 0.17 + N15 \times 0.33 + N16 \\ & \times 0.33 + N17 \times 0.17 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{高温脆弱性} = \text{暴露度} \times \text{敏感性} \times (1 - \text{适应能力}) \quad (4)$$

3 上海市高温热浪脆弱性评价结果分析

3.1 暴露度

暴露度通过高温热浪日间地表温度和NDVI综合判读。整体上看,暴露度分值高的区域呈多中心分散化分布,中心城及近郊区的西部区域分值高于东部(见图3)。中心城和新城分值较高,主要是建筑相对密集,热浪的反射、吸收需要有较长的时间。邻近浦东机场、虹桥机场等区域的分值较高,这与该地区植被覆盖率较低有一定关系。崇明区、浦东新区南部、青浦区西部的分值较低,主要因为植被覆盖率较高,可以在一定程度上减少热辐射。从街道镇上看,暴露度分值较高的区域主要分布在松江区的中山街道、岳阳街道等,嘉定区的嘉定镇、马陆镇、安亭镇等,青浦区的香花桥街道、盈浦街道等,金山区的石化街道、山阳街道等。

3.2 敏感性

3.2.1 城市环境敏感性

城市环境敏感性通过与城市建成环境息息相关的指数来衡量。从城市环境敏感性评价结果(见图4)可知,中心城内环内由于建筑

密度高、容积率较高,分值远高于近远郊。高值的街道集中于中心城内环内,主要位于黄浦区、静安区南部、长宁区东部、普陀区东南部、杨浦区南部等。较高值的区域主要位于嘉定新城、松江新城、青浦新城、金山、惠南、川沙等地区;中值的区域分布于近郊地区及新城外围地区;低值和较低值的区域主要位于远郊的集建区外区域,这些区域建筑密度较低。从街道镇上看,中心城市环境敏感性分值高的区域主

要分布在黄浦区的打浦桥街道、老西门街道、淮海中路街道等,静安区的曹家渡街道、江宁路街道等,长宁区的华阳路街道、天山路街道等,普陀区的曹杨新村街道、甘泉路街道等,虹口区的曲阳路街道、嘉兴路街道等,杨浦区的控江路街道、江浦路街道等。

3.2.2 承灾体敏感性

承灾体敏感性高低主要从相关人群的角度识别高温热浪影响的敏感性。从承灾体敏感

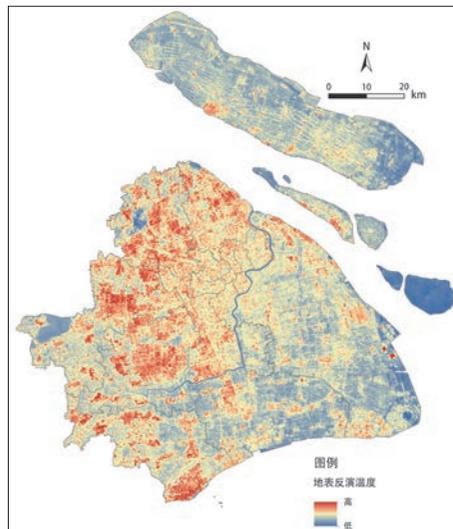


图1 地表温度反演数据
Fig.1 Surface temperature inversion data

资料来源:笔者自绘。

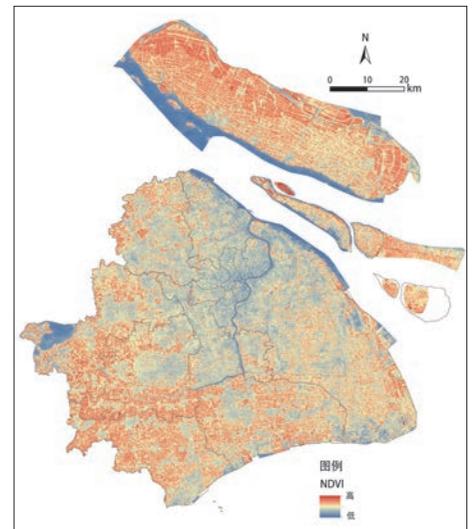


图2 归一化植被覆盖指数(NDVI)数据
Fig.2 Normalized Vegetation Cover Index (NDVI) data

资料来源:笔者自绘。

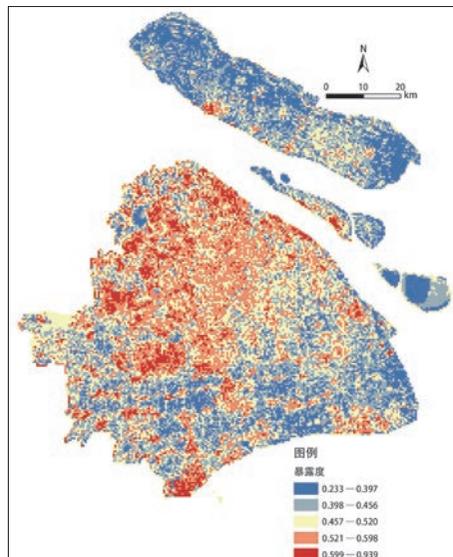


图3 暴露度空间分布图
Fig.3 Spatial distribution map of exposure level

资料来源:笔者自绘。

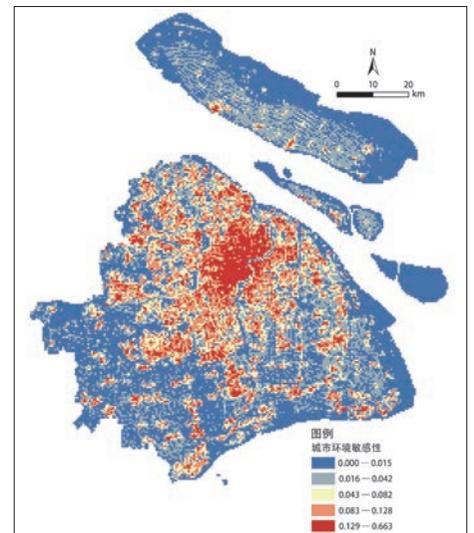


图4 城市环境敏感性空间分布图
Fig.4 Spatial distribution map of urban environmental sensitivity

资料来源:笔者自绘。

性评价结果(见图5)可知,中心城数值普遍较高,主要由于中心城常住人口老人和儿童密度相对较高;沿着中心城向外显示出若干放射状的集聚区域,主要是受到轨道交通线路等因素影响。此外,崇明区、青浦区、金山区、奉贤区等郊区的数值也较高。从街道镇上看,中心城承灾体敏感性分值较高的区域主要分布在黄浦区的老西门街道、半淞园路街道等,徐汇区的枫林路街道、斜土路街道等,普陀区的曹杨新村街道、长寿路街道等,虹口区的曲阳路街道、江湾镇街道等,杨浦区的殷行街道、控江路街道、延吉新村街道等,静安区的彭浦新村街道、共和新村街道等。

3.2.3 敏感性综合分析

综合城市环境敏感性和承灾体敏感性的结果,可以得到高温敏感性的综合分析结果(见图6)。中心城数值普遍较高,主要由于中心城建筑密度、容积率都相对较高,老人和儿童等人群的密度也较高。松江新城、嘉定新城、金山区等区域的分值也相对较高。

3.3 适应能力

适应能力反映了城市环境、城市设施等方面应对高温热浪气候的适应能力。从高温热浪适应能力结果(见图7)中可知,适应能力分

值呈现明显的中心—外围梯度变化特征,即从城市中心向外围逐渐降低。其中,高适应能力的区域主要分布在中心城、近郊与中郊地区和新城地区,尤其是黄浦区、徐汇区北部、静安区南部。中心城的高适应性是与完备的医疗设施、更丰富的资源配置等具有密切联系,近郊与中郊的适应性主要受公园绿地、二手住房价格等影响。在中心城范围,适应能力分值较高的区域主要分布在黄浦区的淮海中路街道、瑞金二路街道、南京东路街道等,徐汇区的湖南路街道、天平路街道等,静安区的南京西路街道、石门二路街道等,长宁区的江苏路街道、华阳路街道等。

3.4 脆弱性

脆弱性反映了城市空间在应对高温热浪灾害的脆弱程度。整体上看,高脆弱性区域主要集中于中心城,并且由内向外,脆弱性相对减弱(见图8)。嘉定新城、松江新城、青浦新城、奉贤新城等人口密集区域的脆弱性也相对较高。中郊与远郊有零星散布的脆弱性较高的区域,反映了高温热浪在空间影响上具有广泛性。低脆弱性的区域主要分布于城市边缘地区,这些地区植被覆盖率较高、人口密度较低、城市开发强度较低。高温热浪脆弱性指数在空间上受到较多因素影响,在制定适应和缓解高

温热浪风险的时候,需要关注不同区域各类影响因素,形成差异性的应对策略。

在中心城范围,浦西地区整体脆弱性高于浦东地区,其中脆弱性较高的区域主要位于黄浦区的老西门街道、半淞园路街道等,杨浦区的控江路街道、殷行街道等,虹口区的曲阳路街道、欧阳路街道等,静安区的彭浦新村街道、临汾路街道、曹家渡街道等,普陀区的曹杨新村街道、甘泉路街道等,徐汇区的斜土路街道、枫林路街道等,长宁区的天山路街道、北新泾街道,浦东新区的周家渡街道、上钢新村街道等(见图9)。

3.5 空间聚类

为了进一步研究不同空间高温热浪脆弱性评估维度的特征,运用K-均值聚类方法,根据暴露度、城市环境敏感性、承灾体敏感性、适应能力、脆弱性5个方面的分值将其分为6类聚类空间(见图10)。从结果可知(见表4):聚类一为“高致灾性,高敏感,高适应”,主要位于内环内,城市建设密度较高,各类敏感人群较为集聚,高温热浪应对设施也较为完善;聚类二为“中致灾性,中敏感,高适应”,主要位于内外环间,人口和建筑密度较高,但高温敏感性和适应能力较高;聚类三为“中致灾性,低敏感,

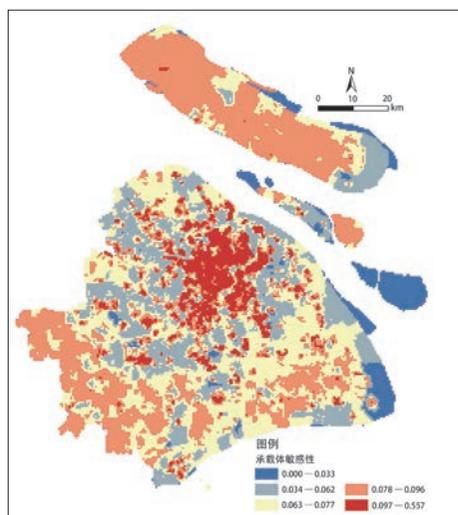


图5 承灾体敏感性空间分布图
Fig.5 Spatial distribution map of sensitivity by disaster affected population

资料来源:笔者自绘。

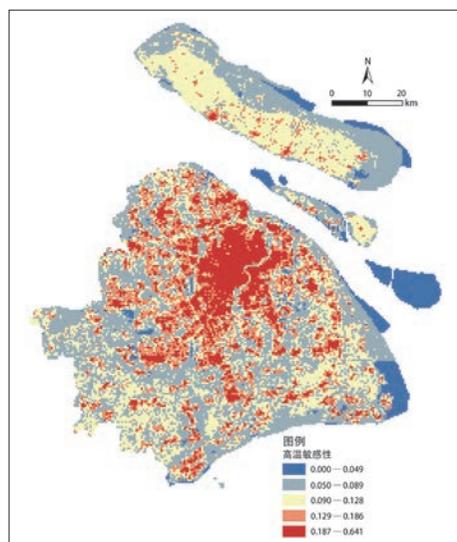


图6 敏感性空间分布图
Fig.6 Sensitivity spatial distribution map of sensitivity

资料来源:笔者自绘。

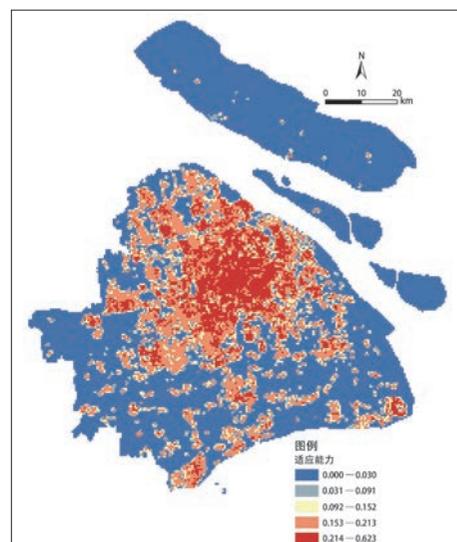


图7 适应能力空间分布图
Fig.7 Spatial distribution map of adaptability

资料来源:笔者自绘。

中适应”，主要位于近郊区和外围开发区，地表温度相对较高，但是人口和建筑密度相对较低，适应能力相对较好；聚类四为“高致灾性，中敏感，中适应”，主要位于新城和重要镇区，地表温度相对较高，城市建设较为集中，整体脆弱性属于中等水平；聚类五为“中致灾性，低敏感，低适应”，位于中郊与远郊，地表温度相对较高，人口和建筑密度较低，高温脆弱性水平较低；聚类六为“低致灾性，中敏感，低适应”，主要位于远郊，植被覆盖相对较高，村庄地区老年人口比例略高，整体脆弱性水平较低。

4 应对城市高温热浪脆弱性的策略

4.1 总体行动：构建宏观系统战略，提升空间响应能力

4.1.1 城市发展战略和气候行动

城市应提出应对气候变化的整体发展

战略，制定和实施气候适应计划，包括热浪应对策略。定期评估和更新气候行动计划，以适应气候变化的新趋势。例如，2013年纽约发布《一个更强大、更具韧性的纽约》，以风险评估及脆弱性评价为核心，制定完备的气候适应规划策略体系。2022年巴黎发布的《巴黎大区气候变化适应规划》提出了13个杠杆和61项具体行动，重点突出对弱势群体保护、生态系统保护和经济可持续发展等方面。英国在《2022年热浪：英国对高温风险的应对和未来准备》中针对高温解决方案提出了4类措施（见表5）。

4.1.2 城市热预警响应体系

城市需要建立高温预警体系，完善极端高温事件的快速响应机制。这一体系不仅包括气象风险预警，还有健康风险预警，特别是要关注高风险重点人群的健康状况。高温预警采

取“事前预警、事后防治”的精细化管理模式，强化风险分级分类管控。不同群体对高温天气的适应能力具有较大差异，相关规划制定时需要考虑公共资源的分配和规划合理性。

4.1.3 城市通风廊道规划

城市通风廊道能有效缓解城市热岛效应。例如，日本东京都政府在城市热环境研究的基础上，优化规划方案，构建了三级通风廊道体系。香港特别行政区将气候分析纳入规划标准，通过空间管控引导空气流通，制定了都市气候分析图和都市气候规划建议图。

4.2 分区分管：聚焦空间特征与需求，实行差异化管控

建立全域高温风险管理平台，监测不同类型高温空间的热环境变化，制定分级响应机制。本文针对识别出的6类空间实行差异化管控策略。

一是内环内区域，建筑与人口高度密集，敏感人群集中，尽管高温应对设施较为完善，但需进一步提升设施匹配度和人居环境质量。要重点关注脆弱敏感人群，增强高温适应设施的人群匹配度。此外，通过立体绿化和高反射率铺装降低热岛效应，优化城市风环境。

二是内外环间区域，人口密度较高，适应

表4 高温脆弱性评价各维度K-均值聚类结果

Tab.4 K-means clustering results of high-temperature vulnerability assessment

评价维度	聚类一	聚类二	聚类三	聚类四	聚类五	聚类六
暴露度	0.547(高)	0.523(中)	0.497(中)	0.600(高)	0.507(中)	0.400(低)
城市环境敏感性	0.373(高)	0.208(中)	0.076(低)	0.170(中)	0.037(低)	0.016(低)
承载体敏感性	0.216(高)	0.144(高)	0.070(低)	0.074(中)	0.070(低)	0.074(中)
适应能力	0.253(高)	0.243(高)	0.175(中)	0.158(中)	0.012(低)	0.005(低)
高温脆弱性	0.033(高)	0.012(中)	0.002(低)	0.007(中)	0.001(低)	0.001(低)

资料来源：笔者自制。

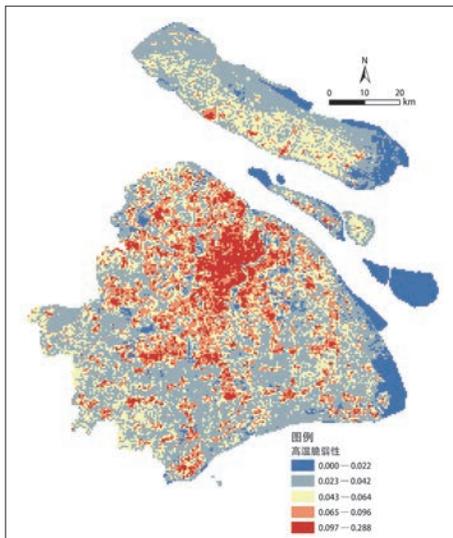


图8 市域脆弱性空间分布图
Fig.8 Spatial distribution map of urban vulnerability
资料来源：笔者自绘。

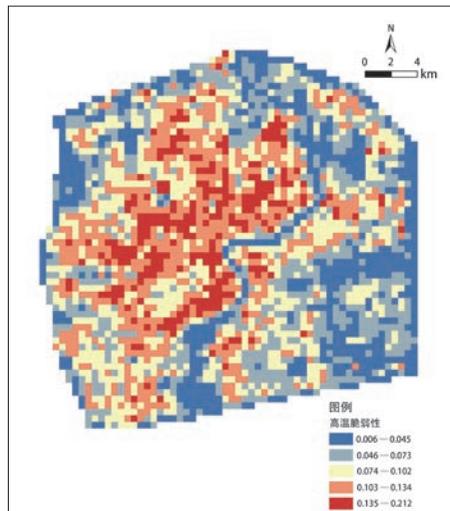


图9 中心城脆弱性空间分布图
Fig.9 Spatial distribution map of vulnerability in the central city
资料来源：笔者自绘。

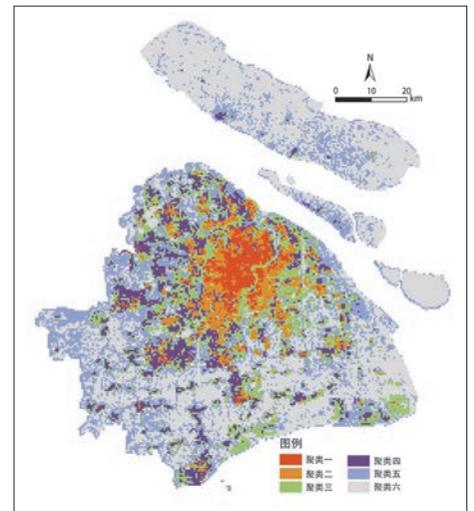


图10 高温脆弱性评价各维度K-均值聚类情况
Fig.10 K-means clustering of various dimensions in high-temperature vulnerability evaluation
资料来源：笔者自绘。

能力较强,但仍需优化热环境以减少高温暴露风险。应优先建设带状公园和社区级绿地,增加绿色生态空间。推动建筑适应高温改造,针对既有建筑实施外立面隔热改造。

三是近郊和外围开发区,工业及新兴城区占比较大,需重点控制热排放并优化微气候。通过建筑降温设计减少热排放,可利用闲置地块建设水景观,低成本调节局部气候。此外,可在公共空间增设遮阳设施,降低户外活

动区域的热暴露风险。

四是新城与重要镇区,城市建设集中,地表温度较高,需加强绿地建设。在新城核心区布局口袋公园,采用“乔木+灌木+草地”复合植被结构提升遮荫效率。加强敏感性较高人群的设施配套,如针对高频户外人群设置降温驿站。

五是中郊与远郊地区,人口稀疏,高温缓解设施不足,但生态基底较好,可强化自然降

温与普惠性设施覆盖。通过生态修复扩大林地、湿地面积,构建降温廊道。可结合乡村建设增加亲水步道和遮荫休憩点,提升高温适应韧性。

六是远郊村庄,植被覆盖良好,但老年人口比例较高,设施配套不足,需重点关注关键人群的降温需求,完善高温适应性设施。在建筑层面,推广被动降温技术,减少室内热积聚。可结合村庄现有水系建设亲水步道,增强自然通风,增加降温设施。

表5 英国在应对高温方面的相关政策

Tab.5 Related policies of the UK in response to high temperatures

类型	具体措施
基于自然的措施	将基于自然的解决方案纳入主流,如增加城市绿地与植被;新建公园、行道树和城市森林;在建筑中增设绿化空间;增加城市蓝色基础设施(如水体);加强城市绿地的保护、灌溉和维护;完善蓝色空间系统;建设公共交通绿色廊道
准备与应对	推行有针对性的实施行为改变倡导计划;制定组织机构的热浪应对方案;开展有针对性的公共宣传活动;进行高温脆弱性评估;规划疏散流程与避难场所准入机制;提升居民居家降温能力;完善预警系统并推动早期行动;发布热防护指南;加强社会支持网络
资产管理	更换为LED照明系统;采用被动式建筑降温和热敏建筑设计;推动主动制冷技术应用,并关注长期影响与低收入群体的可负担性;在建筑规范中将热风险纳入考量;推进建筑改造;建立资产脆弱性评估体系
城市服务	在公共场所设置物理遮阳设施;铺设凉爽的人行道和街道界面;设立室内外凉爽空间;开展热易损性评估;安装兼具遮阳与发电功能的太阳能板;为关键基础设施配备冷却系统;建设耐热基础设施

资料来源:《2022年热浪:英国对高温风险的应对和未来准备》(The 2022 Heatwaves: England's Response and Future Preparedness for Heat Risk)。

表6 城市高温缓解设施及可实施性

Tab.6 Urban high temperature mitigation facilities and feasibility

方向	措施	相关空间	可实施性
绿化	完善城市绿化策略	城市空间	中
	根据气候与环境植树	街道、公园等	高
	优化停车场、建筑周边绿化	停车场、社区等	高
	增加垂直绿化、屋顶绿化	公园、社区等	高
基础设施	应用建筑反射材料、白色屋面、高反照率涂料	社区、商业区、工业区等	中
	维护结构保温性能、增加热惰性材料	社区、商业区等	中
	使用高性能窗、遮阳构件	社区、公共空间等	高
	建设高反照率路面	道路等	中
	通风良好的城市形态	城市空间	中
	在城市上风建设公园	公园等	中
	建设避暑中心	公共空间等	高
	完善水利设施、设备	绿地空间等	高
雨水管理	地面采用渗透性表面	城市空间	中
	增加雨水花园	公园等	中
	利用池塘	公园、郊野等	高
	完善排水与渗蓄设施	街道、公园等	高
减少人为热	完善储水路面结构	道路空间等	中
	使用冷光灯	社区、商业区等	高
	提升办公设备能效	商业区、工业区等	中
	提升家用电器能效	社区等	中
	减少市中心车流	街道空间等	中
	增加城市通风	城市空间	中
	加强地热能利用	城市空间	高
	使用太阳能空调	社区、商业区、工业区等	高
完善冷辐射系统	商业区、工业区等	中	

资料来源:笔者根据参考文献[20]修改。

4.3 专项策略:聚焦降温、人群服务,提升城市高温韧性

4.3.1 强化绿地空间与冷岛规划

城市绿化是降低地表温度的有效手段,应加强自然生境保护,提高自然生态系统健康活力,建设蓝绿交织、灰绿相融、连续完整的城市生态基础设施体系。在社区层面,可以通过改造提升绿地面积,增强绿地的开放性和空间利用率。此外,还应加强城市高温缓解设施建设(见表6),增强城市高温应对能力。巴黎在2018年发行的《巴黎气候行动规划》中提出确定及建立城市冷岛^③及路线,为市民提供夏天避暑的空间。

4.3.2 加强特殊人群的精准服务

针对老年人、儿童等高温热浪下的脆弱人群,提供特别的关注和保护措施,如设置纳凉中心、提供避暑指导等。提升高温预报预警的精细化水平,及时向居民发布高温预警信息。如巴黎在《将健康纳入城市规划文件》中提出保护生物多样性和绿色空间,采取控温行动,保护或创造绿色和蓝色空间有助于改善地区居民的生活环境。

4.3.3 提升设施韧性服务水平

强化城市关键基础设施在极端条件下的快速恢复力和关键部位的综合防护力,确保城市在面对灾害挑战时能够迅速响应和有效恢复。社区应建立与完善高温行动框架,包括监测和预警系统、预防和准备、缓解和适应策略等。此外还需不断优化社区环境空间,如增加树木和绿地、设计场地遮阳、应用反射涂

注释: ③“冷岛”即相较于周边环境温度偏低的区域,且白天和夜间都对公众开放。

层、设计喷淋等。如波士顿在高温韧性方面侧重高温热浪缓解和凉爽社区建设,并提出了多样化的策略。

5 结语

近年来,气候变化导致极端高温事件的频率和强度不断增加,对城市空间、居民生活质量、可持续发展等带来严峻挑战。开展高温热浪脆弱性评估有助于制定有效的高温气候适应性措施,缓解城市的热风险,具有重要的现实意义。

本文在构建高温热浪脆弱性评估模型时,充分考虑了超大城市的物理空间环境、社会发展情况、经济运行情况等,综合选取17类指标,评估了上海市高温热浪脆弱性的空间分布特征。研究结果显示,高温热浪的脆弱性呈现出明显的空间分异,其中高脆弱性区域主要集中在中心城。随着从市中心向外扩展,脆弱性逐渐降低。此外,嘉定新城、松江新城、青浦新城、奉贤新城等人口密集的新兴城区也表现出较高的脆弱性。在中郊与远郊地区,虽然高温热浪的影响相对分散,但仍存在一些脆弱性较高的零星区域,这表明高温热浪对城市的影响具有普遍性。本文综合考虑了城市空间特征,并借鉴了国际城市的成功经验,从总体行动、分区管控、专项策略等方面提出了一系列应对措施,以增强城市对高温热浪的适应性和韧性。

(感谢上海市城市规划设计研究院钱昊工程师等在数据获取、论文撰写方面的帮助。)

参考文献 References

[1] WEI D, YANG L, BAO Z, et al. Variations in outdoor thermal comfort in an urban park in the hot-summer and cold-winter region of China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103535.

[2] HARMAY N S M, CHOI M. Effects of heat waves on urban warming across different urban morphologies and climate zones[J]. *Building and Environment*, 2022, 209: 108677.

[3] LISS A, NAUMOVA E N. Heatwaves and hospitalizations due to hyperthermia in defined climate regions in the conterminous USA[J]. *Environmental*

Monitoring and Assessment, 2019, 191(s2): 394.

[4] KERAMITSOGLOU I, KIRANOUDIS C T, MAIHEU B, et al. Heat wave hazard classification and risk assessment using artificial intelligence fuzzy logic[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185: 8239-8258.

[5] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 等. 中国城市高温特征及社会脆弱性评价[J]. *地理研究*, 2020 (7): 1534-1547.

HUANG Xiaojun, WANG Bo, LIU Mengmeng, et al. Characteristics of urban extreme heat and assessment of social vulnerability in China[J]. *Geographical Research*, 2020(7): 1534-1547.

[6] 江斯达, 占文凤, 杨俊, 等. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展[J]. *地理学报*, 2020 (9): 1860-1878.

JIANG Sida, ZHAN Wenfeng, YANG Jun, et al. Urban heat island studies based on local climate zones: a systematic overview[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020(9): 1860-1878.

[7] 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价——研究进展与框架[J]. *地理科学进展*, 2015, 34 (2): 165-174.

XIE Pan, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Health related urban heat wave vulnerability assessment: research progress and framework[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 165-174.

[8] 何宝杰, 尹名强. 应对城市高温的国际总体行动、策略与指南[J]. *国际城市规划*, 2024, 39 (3): 98-108.

HE Baojie, YIN Mingqiang. Global actions, strategies and guidelines for beating urban heat[J]. *Urban Planning International*, 2024, 39(3): 98-108.

[9] 冷红, 李泓锐, 袁青. 气候变化背景下空间健康风险的评估方法及韧性规划应对[J]. *上海城市规划*, 2022 (6): 16-23.

LENG Hong, LI Hongrui, YUAN Qing. Assessment methods and resilience planning response for spatial health risks in the context of climate change[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2022(6): 16-23.

[10] 杨林川, 杨皓森, 范强雪, 等. 大城市高温热浪脆弱性评价及规划应对研究——以成都市为例[J]. *规划师*, 2023, 39 (2): 38-45.

YANG Linchuan, YANG Haosen, FAN Qiangxue, et al. Vulnerability assessment and planning response to high-temperature wave in large cities: the case of Chengdu[J]. *Planners*, 2023, 39(2): 38-45.

[11] 郑颖生, 王墨, 李建军, 等. 城市高温风险评估与气候适应性规划策略——以亚热带高密度城市深圳为例[J]. *规划师*, 2021, 37 (14): 13-19.

ZHENG Yingsheng, WANG Mo, LI Jianjun, et al. Risk assessment of high temperature and adaptive planning strategies: Shenzhen example[J]. *Planners*, 2021, 37(14): 13-19.

[12] 石晓冬, 黄晓春, 高雅, 等. 超大城市气候适应性规划技术体系及应用——以北京为例[J]. *城市学报*, 2023 (5): 105-113.

SHI Xiaodong, HUANG Xiaochun, GAO Ya, et al. Technical system and application of climate adaptation planning for megacities: taking Beijing as an example[J]. *Journal of Urban Sciences*, 2023(5): 105-113.

[13] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change[M]. New York: Cambridge University Press, 2012.

[14] 黄晓军, 祁明月, 赵凯旭, 等. 高温影响下西安市人口脆弱性评估及其空间分异[J]. *地理研究*, 2021 (6): 1684-1700.

HUANG Xiaojun, QI Mingyue, ZHAO Kaixu, et al. Assessment of population vulnerability to heat stress and spatial differentiation in Xi'an[J]. *Geographical Research*, 2021(6): 1684-1700.

[15] 张蔚, 甄峰, 陈文婷, 等. “活动—环境”交互视角下南京城市街道空间热风险评估研究[J]. *地理研究*, 2024, 43 (11): 2902-2919.

ZHANG Wei, ZHEN Feng, CHEN Wenting, et al. Study on the assessment of heat risks in Nanjing's urban street spaces: an "activity-environment" interaction perspective[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(11): 2902-2919.

[16] 陈恺, 唐燕. 城市高温热浪脆弱性空间识别与规划策略应对——以北京中心城区为例[J]. *城市规划*, 2019, 43 (12): 37-44.

CHEN Kai, TANG Yan. Identification of urban areas vulnerable to heat waves and coping strategies: a case study of Beijing central city[J]. *Planning Studies*, 2019, 43(12): 37-44.

[17] 顾玮琦, 傅红. 城市人居环境脆弱性评估及空间分布特征——以成都市主城区为例[J]. *西部人居环境学刊*, 2023, 38 (6): 67-74.

GU Weiqi, FU Hong. Heat vulnerability assessment and spatial distribution characteristics of urban population in Chengdu[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2023, 38(6): 67-74.

[18] 金星星, 祁新华, 陆玉麒, 等. 福建省高温热浪风险评估与空间分异研究[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20 (12): 1820-1829.

JIN Xingxing, QI Xinhua, LU Yuqi, et al. Evaluation and spatial differentiation of heat waves risk of Fujian Province[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(12): 1820-1829.

[19] 王丹舟, 张强, 朱秀迪, 等. 基于多源数据的上海市高温热浪风险评估[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 57 (5): 613-623.

WANG Danzhou, ZHANG Qiang, ZHU Xiudi, et al. Multisource data evaluation of heat risk in Shanghai[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(5): 613-623.

[20] GIGUÈRE M. Literature review of urban heat island mitigation strategies[M]. Québec: Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique Québec, 2009.