刘亚南,彭久瑶,曾鹏,等.公园夏季降温服务供给的城乡差异:基于热舒适和地表温度的双重视角[J].华中农业大学学报,2026,45(1):13-23.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.002

公园夏季降温服务供给的城乡差异:基于热舒适和地表温度的双重视角

刘亚南[1],彭久瑶[1],曾鹏[1],薛维[2,3],赖小红[1],刘垚燚[4]

1.重庆交通大学建筑与城市规划学院,重庆 400074;2.江汉大学数字建造与爆破工程学院/精细爆破全国重点实验室,武汉 430056;3.东南大学建筑学院,南京 210096;4.南京林业大学风景园林学院,南京 210037

摘要 为弥补现有研究多依赖地表温度(land surface temperature,LST)而忽视环境热舒适的不足,从热舒适视角系统评估城市公园的热环境缓解效能,以上海市为例,引入改进温湿指数(modified temperature - humidity index,MTHI)表征热舒适度,融合公园矢量与手机信令数据,从热舒适视角评估公园的降温能力,并对比分析基于MTHI与LST的公园降温效应及其城乡差异。结果显示:公园降温范围由核心城区向远郊递增,但MTHI评估的效应整体低于LST;公园面积、植被及水体覆盖度均与降温强度呈正相关,而植被覆盖与LST降温距离呈正相关,与MTHI降温距离呈负相关;核心城区因人口密集,其等效降温服务人口远超郊区,但MTHI测算的服务人口较LST低54.5%,说明传统仅依赖LST的评估方法可能显著高估公园效应。结果表明,应引入热舒适指标以综合评估公园降温效应,并采取差异化策略:在高密度城区增加小型公园供给,在郊区优化公园设计,从而精准提升人居环境的热舒适度。

关键词 公园降温效应;热岛效应;热舒适度;地表温度;改进温湿指数;极端高温;城乡差异

中图分类号: TU986 **文献标志码:** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0013-11

近年来,全球气候变暖导致极端高温事件愈发频繁。世界气象组织确认2024年为有记录以来最热的一年,全球平均气温较工业化前上升约1.55 ℃,首次突破《巴黎协定》中1.5 ℃控制目标(https://public.wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level.)。在我国,高温形势同样严峻。《中国气候变化蓝皮书(2025)》指出,我国是全球气候变化的敏感区和显著影响区,北京、上海、重庆等超大城市的极端天气发生频率和增暖速率均高于全球平均水平,给公众健康与社会经济带来严峻挑战[1]。同时,联合国预测到2050年近七成人口将居住在城市,超大城市居民的热暴露风险及城乡健康差异将进一步扩大[2]。在此背景下,公园作为城市中重要的近自然空间,被普遍视为缓解热岛效应和改善微气候的关键手段[3]。

现有研究多通过缓冲区分析地表温度(land surface temperature,LST)变化量化公园热缓解效应,并构建降温范围、效率和强度等指标体系探讨公园形态与景观要素对降温效应的影响[4-5]。然而尽管技术路径较为成熟,却往往忽视与居民实际体感密切相关的环境热舒适维度。环境温度下降并不必然提升热舒适度,LST仅反映地表热能状态,难以体现温湿耦合效应[6]。例如,在湿热环境中,即便LST偏低,仍可能感到闷热;而在通风良好条件下,即便LST偏高,也可能获得更好的热舒适体验。改进温湿指数(modified temperature-humidity index,MTHI)整合温度与水汽条件,可更真实地刻画热舒适度,已在多个城市研究中得到应用[7-8]。基于此,本研究引入MTHI从环境热舒适视角评估公园的降温效应。

同时,公园降温效应研究正从供给侧测度逐步转向需求侧的公平性分析[9]。传统研究普遍依赖人口普查或全球人口格网产品(如WorldPop)表征服务需求,但此类数据仅反映静态居住人口,难以呈现城

收稿日期:2025-09-07
基金项目:国家自然科学基金青年项目(52208095);重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K202400706)
刘亚南,E-mail:lyn3620@cqjtu.edu.cn
通信作者:曾鹏,E-mail:p.zeng@cqjtu.edu.cn

市人群的动态活动空间，因而不足以反映高温暴露情境下的真实降温需求[10-15]。这可能导致公园降温服务覆盖与实际人口活动错配，从而影响评估的准确性。相比之下，手机信令数据具有高时空分辨率，可刻画区域人口的实时活动特征，从根本上提升降温受益评估精度[13-14,16]。本研究以上海市为例，结合MTHI、LST与手机信令数据，从环境热舒适和温度双重视角系统比较不同城乡梯度下公园的降温效应及其服务人口差异，旨在揭示上海市公园在提升夏季热舒适和促进服务公平方面的作用与不足，为优化绿色空间布局、精准提升城市高温韧性提供实证依据与政策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

上海位于长江三角洲前沿，属亚热带季风气候，四季分明，夏季高温高湿，湿热环境显著增加居民健康风险，尤其在夜间[17]。作为全球人口密度最高的超大城市之一，上海市高强度建筑与大面积硬质下垫面加剧了城市热岛效应[18]。为应对高温与热岛效应，上海市《城市总体规划(2017—2035)》强调完善公园绿地体系和公共活动空间网络，并提出提升人均公园绿地面积与服务可达性目标[19-20]。2011—2021年间，上海市公园绿地面积由16 446 hm^2增至21 981 hm^2，人均公园绿地面积约13 m^2(https://tjj.sh.gov.cn/zrdl/20180819/0014-216816.html)。然而，公园降温服务的空间可获取性和受益公平性仍存在显著差异，尤其在不同城乡梯度之间，单纯供给增加难以保证均衡受益。基于此，研究区域(图1)按上海环线划分为核心城区(内环以内，69个公园)、中心城区(内环-外环，152个公园)、近郊(外环-郊环，154个公园)及远郊(郊环以外，109个公园)。本研究拟分析公园降温效应及其服务人口数在不同城乡梯度的差异。

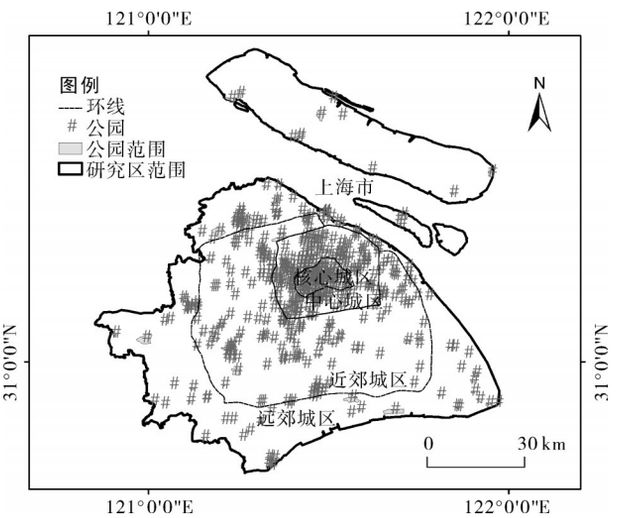


图1 研究区域

Fig.1 Study area

1.2 数据来源及预处理

1)LST和MTHI的空间特征对比。基于2022年8月14日的Landsat 8遥感影像(来源于地理空间数据云，https://www.gscloud.cn/)，反演获取地表温度(LST，公式中表示为t_{LD})及归一化差异水汽指数(normalized difference moisture index，NDMI，公式中表示为I_{NDM})，并据此计算改进温湿指数(MTHI，公式中表示为I_{MTH})。随后，利用ArcGIS展示LST与MTHI的空间分布及其差异，并进一步分析城乡之间的对比特征。

2)公园降温效应量化。依据上海市园林绿化和市容管理局(https://lhsr.sh.gov.cn/)提供的公园名录，在百度地图(https://map.baidu.com/)上确定各公园的矢量边界。基于LST和MTHI分别计算公园的降温效应，分析指标包括降温强度、降温范围和降温距离，并结合环线划分的城乡圈层，比较LST与MTHI的降温表现及其城乡差异。

3)公园降温覆盖人口的空间评估。利用中国联通(http://www.chinaunicom.com/)提供的2022年8月9—15日逐小时手机信令人口数据(空间分辨率200 m，共7×24份)，在ArcGIS 10.2中构建200 m×200 m网格，统计上海市171 751个网格的平均人口数。为提高计算精度，将200 m网格重采样至10 m，并按面积比例调整人口数。最后，结合公园降温效应与人口分布数据，分析不同公园降温指标及其受益人口的空间分布特征。

1.3 地表温度反演

本研究采用Landsat-8于2022年8月14日获取的夏季影像(空间分辨率30 m)，基于辐射传输方程法(RTE)对TIRS波段10进行大气校正后反演地表温度[21]。计算过程如下：

$$t_{LD}=\frac{T_B}{1+\left(\frac{10.9\times T_B}{0.01438}\right)\ln\varepsilon} \tag{1}$$

$$T_B=\frac{1321.08}{\ln\left(\frac{774.89}{L_T}+1\right)}-273.15 \tag{2}$$

$$L_T=\frac{0.0003342\times Q_{cal}+0.1-L_{up}-\tau\times(1-\varepsilon)\times L_{down}}{\tau\times\varepsilon} \tag{3}$$

式(1)～(3)中，t_{LD}为地表温度，T_B为亮度温度；L_T、L_{up}和L_{down}分别为离开地表的辐射率、上涌辐射率和下沉大气辐射率；Q_{cal}为量化校准的像素值，ε和τ分别是地表发射率和大气透射率。

1.4　归一化差异水汽指数计算

归一化差异水汽指数(NDMI，公式中为I_{NDM})通常用于反映区域湿润状态[22]，其计算公式为：

$$I_{NDM}=\frac{R_{NIR}-R_{SWIR}}{R_{NIR}+R_{SWIR}} \tag{4}$$

式(4)中，R_{NIR}与R_{SWIR}分别为近红外与短波红外波段的地表反射率(Landsat-8对应B5/B6)。I_{NDM}取值范围为[－1，1]，值越接近1表示越湿润，越接近－1表示越干燥。

1.5　改进温湿指数计算

本研究采用Feng等[7]提出的基于遥感的改进温湿指数(MTHI，公式中为I_{MTH})计算上海的热舒适性的空间变化。该指数是基于观测温度和湿度的城市热舒适度指数改进而来[7,23]，应用于精细尺度的热舒适计算。I_{MTH}的计算公式如下：

$$I_{MTH}=T_{rs}-0.55\times(1-R_{Hrs})\times(T_{rs}-14.5) \tag{5}$$

式(5)中，T_{rs}和R_{Hrs}分别表示由遥感获取的地表温度与归一化差异水汽指数[23-24]。

1.6　降温效应计算

基于D8算法量化公园降温效应。D8算法是一种单流向水文分析方法，通常用于数字高程模型(digital elevation model，DEM)下的水流方向与汇流计算。在城市热环境中，夜间冷空气和土壤水分沿坡向或汇流线运动形成冷空气通道或高湿区，增强蒸散作用，从而带走热量形成降温区域[25]。因此，可将D8算法用于提取公园降温范围和降温源区，类似于汇水区计算的方法[25-26]。本研究用LST与MTHI代替DEM，在ArcGIS 10.8中实现D8汇水区计算。主要步骤如下：

步骤1，填洼处理。使用“填洼”命令消除局部洼地，确保D8单流向假设下数据连续，避免径流路径断裂。

步骤2，流向与坡度计算。通过“流向”和“坡度”命令，确定每个像元沿8邻域中最陡下坡方向的流向，形成有向栅格网络。

步骤3，汇水区提取。使用“汇水区”命令，根据流向反向追踪生成以公园为汇口的汇水区多边形，视为公园冷源贡献域，即降温范围。

步骤4，降温指标计算。

1)降温强度。用汇水区的边界“按掩膜提取”坡度得到的每个公园降温范围内的坡度，再统计得到每个公园降温范围内的平均降温强度。

2)降温距离。将公园边界和汇水区边界提取为闭合线，利用“近邻分析”计算公园边界到汇水区边界的最短距离，并统计平均和最大降温距离。

3)降温服务人口。先用汇水区的边界“按掩膜提取”人口数据，再统计得到每个公园降温范围内的总人口数量。

4)等效降温人口。表征单位降温空间内，降温强度与降温服务人口的综合作用效应，计算公式如下：

$$N_{ECP}=\frac{\Delta X_{park}\times N_{park}}{R_{park}} \tag{6}$$

式(6)中，N_{ECP}即公园的等效降温人口，ΔX_{park}是公园的平均降温强度，R_{park}为公园的降温范围，N_{park}是公园降温服务人口数(位于降温范围内的实际人口)，评价指标$X\in\{t_{LD},I_{MTH}\}$。

1.7　相关性分析

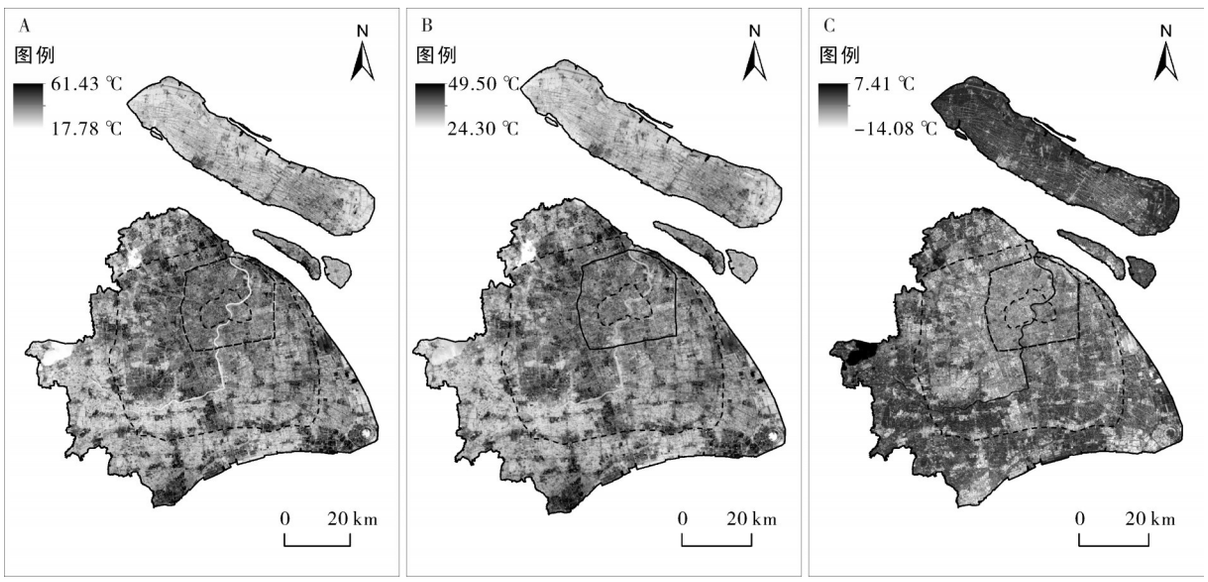
在SPSS Statistics 27中使用皮尔逊相关性分析计算公园降温指标(即降温强度、降温范围、平均降温距离和最大降温距离)与公园的景观形状指数(LSI)、面积和内部土地利用的相关性，检验各降温指标是否与景观形状指数、公园面积和土地利用类型存在显著性关系。

2　结果与分析

2.1　MTHI和LST的空间特征差异

从空间分布来看，上海市的MTHI与LST整体呈现相似的城乡梯度特征(图2)，但MTHI的分布更为均匀。全市平均MTHI为(37.66±1.62)℃，标准差较小，显示出城乡梯度波动较弱。各分区均值排序为：中心城区[(38.25±1.23)℃]＞近郊地区[(38.12±1.48)]℃＞核心城区[(38.08±1.08)℃]＞远郊地区[(37.28±1.66)℃]，其中仅远郊地区低于全市平均水平。相比之下，全市平均LST为(36.51±3.60)℃，空间异质性更明显，各分区均值依次为：中心城区[(38.16±2.66)℃]＞核心城区[(38.14±2.46)℃]＞近郊地区[(37.53±3.32)℃]＞远郊地区[(35.61±3.64)℃]，除远郊外，其余区域均高于全市

平均水平(表1),整体呈现由城市中心向外递减的格局。进一步对比MTHI与LST的差异发现,核心城区和中心城区大部分区域的LST高于MTHI,而近郊与远郊地区则呈相反趋势。全市平均差值为(1.15±2.19) ℃,分区均值依次为:远郊地区[(1.67±2.18) ℃]>近郊地区[(0.58±2.06) ℃]>中心城区[(0.09±1.73) ℃]>核心城区[(−0.06±1.72) ℃]。值得注意的是,核心城区是唯一均值为负值的区域,而远郊地区则是唯一均值高于全市平均水平的区域。



A.地表温度 t_{LD}; B.改进温湿指数 I_{MTH} ;C:$I_{MTH}-t_{LD}$.

图 2 LST与MTHI的空间格局

Fig.2 Spatial patterns of LST and MTHI

表 1 MTHI与LST城乡差异对比

Table 1 Comparison of urban-rural differences in MTHI and LST ℃

指数 Indexes	上海全市 Shanghai	核心城区 Core urban area	中心城区 Central urban area	近郊地区 Suburb urban area	远郊地区 Outer suburb urban area
I_{MTH}	37.66±1.62	38.08±1.08	38.25±1.23	38.12±1.48	37.28±1.66
t_{LD}	36.51±3.60	38.14±2.46	38.16±2.66	37.53±3.32	35.61±3.64
$I_{MTH}-t_{LD}$	1.15±2.19	−0.06±1.72	0.09±1.73	0.58±2.06	1.67±2.18

2.2 基于MTHI和LST的公园降温效应的城乡差异

1)公园降温效应的城乡差异。由图3可见,在降温强度方面,基于MTHI的分析显示,上海市公园的平均降温强度为(0.68±0.20) ℃,各分区均值排序为:核心城区[(0.76±0.22) ℃]>近郊地区[(0.67±0.20) ℃]>中心城区[(0.66±0.17) ℃]≈远郊地区[(0.66±0.20) ℃],分区差异相对较小。相比之下,基于LST的评估结果显示全市公园的平均降温强度为(1.09±0.38) ℃,最大值为7.17 ℃,整体高于MTHI,并呈现更明显的空间异质性。LST下各分区均值排序为:中心城区[(1.11±0.37) ℃]>核心城区[(1.10±0.44) ℃]≈近郊地区[(1.10±0.33) ℃]>远郊地区[(1.06±0.43) ℃]。在降温范围方面,MTHI指标显示,上海市公园的平均降温面积为(28.92±86.43) hm^2,各分区排序为:远郊地区[(59.14±150.09) hm^2]>近郊地区[(30.67±72.47) hm^2]>中心城区[(14.64±35.22) hm^2]>核心城区([8.74±19.10) hm^2]。LST下的平均降温面积为(39.56±91.42) hm^2,分区排序与MTHI一致,但各区数值均明显高于MTHI,尤其是核心城区,差异最为显著。在降温距离方面,基于MTHI的上海市公园平均和最大降温距离的均值分别为(16.88±11.10) m和(65.27±45.17) m,各分区均呈现远郊地区>近郊地区>中心城区>核心城区的趋势,显示出从低城市化区向高城市化区递减的规律。LST下的平均和最大降温距离的均值分别为(55.30±35.40) m和(133.42±68.49) m,平均距离排序为中心城区>核心城区>近郊地区>

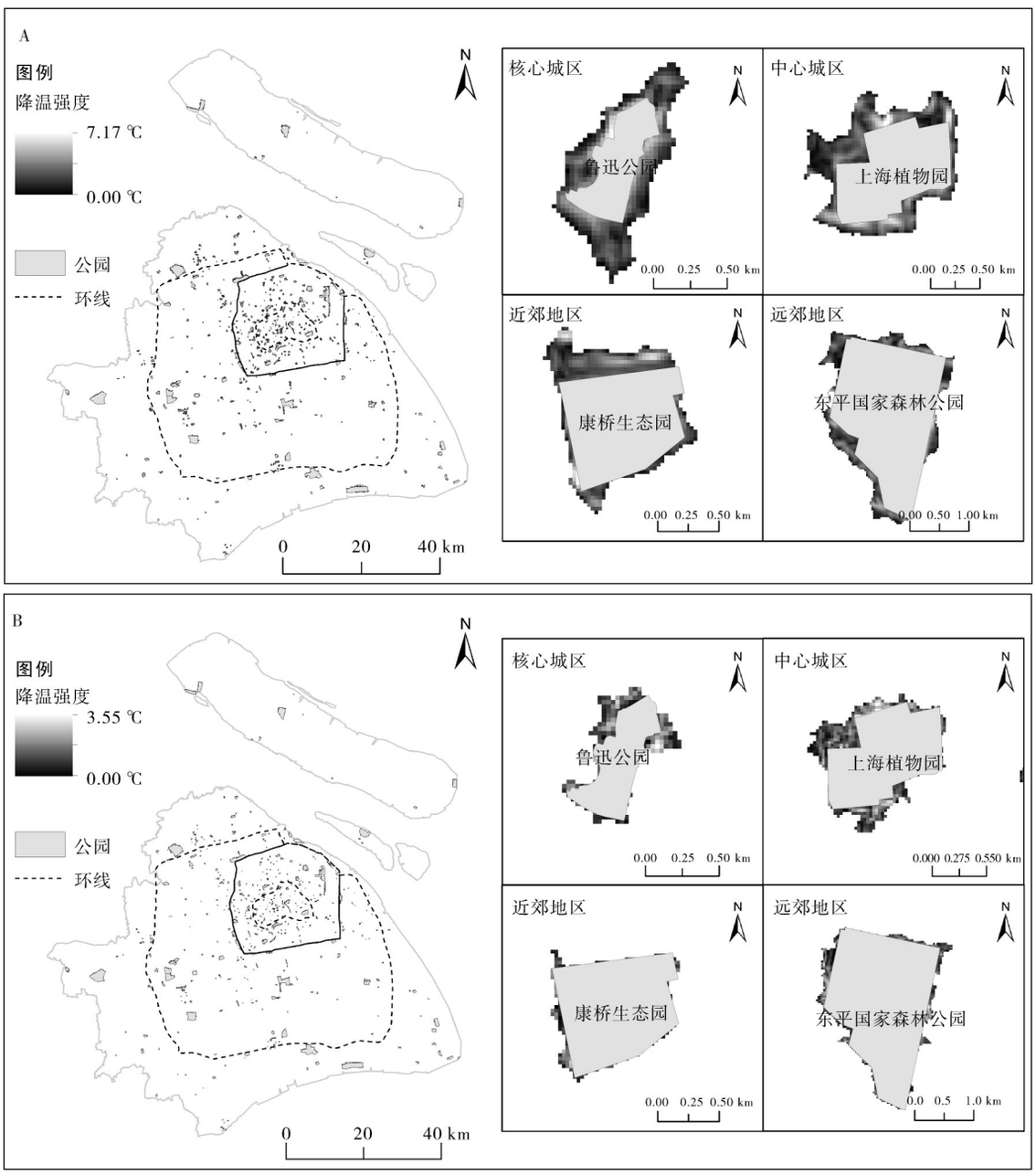


图 3　基于LST（A）与MTHI（B）量化的公园降温效应的空间变化

Fig.3　Spatial variations in park cooling effects quantified using LST（A） and MTHI（B）

远郊地区，最大距离排序为中心城区＞近郊地区＞远郊地区＞核心城区（表2）。总体来看，LST结果整体偏高且空间异质性更大，而MTHI能提供更稳定、规律的城乡梯度特征，更准确反映上海市公园的热舒适效应。

2）公园降温效应与公园面积、景观形状指数和公园土地利用的相关性。表3显示了公园面积、景观形状指数（landscape shape index，LSI）及内部土地利用类型与降温指标之间的皮尔逊相关性。首先，从公园面积来看，基于MTHI的结果显示，公园面积与公园降温强度呈显著低负相关，与公园降温范围呈极显著正相关，并且与公园平均降温距离和最大降温距离均表现出显著正相关。基于LST的结果呈现类似趋势，公园降温强度与公园面积呈显著低负相关，降温范围显著正相关，平均降温距离无显著关系，而最大降温距离呈低至中度显著正相关。总体而言，公园面积与降温范围的相关性最为稳定且最强，表明面积主要影响降温的空间扩展，而对降温强度的影响相对有限。值得注意的是，MTHI下的降温距离指标比LST更为敏感，显示公园面积对热舒适空间延伸的作用更

表2 基于MTHI与LST量化的降温效应指标的城乡差异

Table 2 Urban-rural differences in park cooling effect indicators quantified using MTHI and LST

指数 Indexes	降温效应指标 Cooling effect indicators	上海全市 Shanghai	核心城区 Core urban area	中心城区 Central urban area	近郊地区 Suburb urban area	远郊地区 Outer suburb urban area
MTHI	降温强度/℃ Cooling intensity	0.68±0.20	0.76±0.22	0.66±0.17	0.67±0.20	0.66±0.20
	降温范围/hm^2 Cooling area	28.92±86.43	8.74±19.10	14.64±35.22	30.67±72.47	59.14±150.09
	平均降温距离/m Average cooling distance	16.88±11.10	13.10±7.82	16.21±10.47	16.99±10.33	20.04±13.70
	最大降温距离/m Maximum cooling distance	65.27±45.17	47.22±31.29	60.38±42.30	69.25±48.23	77.88±47.83
LST	降温强度/℃ Cooling intensity	1.09±0.38	1.10±0.44	1.10±0.33	1.11±0.37	1.06±0.43
	降温范围/hm^2 Cooling area	39.56±91.42	19.53±25.17	25.21±43.16	41.70±76.27	69.23±157.14
	平均降温距离/m Average cooling distance	55.30±35.40	55.99±34.28	59.04±35.43	54.52±35.66	50.73±35.58
	最大降温距离/m Maximum cooling distance	133.42±68.49	120.92±61.47	134.55±60.95	134.42±70.59	138.34±78.85

表3 基于MTHI与LST量化的公园降温指标与公园面积、景观形状指数和公园土地利用的皮尔逊相关性

Table 3 Pearson correlation between park cooling indicators quantified by MTHI and LST and park area, landscape shape index and park land use

指数 Indexes	项目 Items		降温强度 Cooling intensity	降温范围 Cooling area	平均降温距离 Average cooling distance	最大降温距离 Maximum cooling distance
MTHI	公园面积 Park area		−0.134**	0.998**	0.299**	0.444**
	景观形状指数 Landscape shape index		0.030	0.058	0.181**	0.235**
	土地利用 Land-use type	林地 Woodland	0.003	−0.110*	−0.120**	−0.132**
		灌木 Shrubland	0.000	0.027	−0.041	−0.026
		草地 Grassland	−0.103*	0.081	0.044	0.099*
		水体 Water body	0.081	0.201**	0.220**	0.267**
		建设用地 Build-up land	0.138**	−0.150**	−0.062	−0.120**
LST	公园面积 Park area		−0.144**	0.989**	0.001	0.356**
	景观形状指数 Landscape shape index		0.040	0.059	−0.123**	0.040
	土地利用 Land-use type	林地 Woodland	0.052	−0.071	0.438**	0.224**
		灌木 Shrubland	−0.018	0.023	−0.072	−0.026
		草地 Grassland	−0.091*	0.066	−0.181**	−0.024
		水体 Water body	0.167**	0.209**	0.047	0.187**
		建设用地 Build-up land	−0.007	−0.178**	−0.346**	−0.346**

注：*和**分别代表在0.05和0.01水平的显著相关性。Note: * and ** indicate statistically significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

明显。其次，基于MTHI的分析显示，平均降温距离和最大降温距离均与LSI呈低显著正相关，而降温强度和降温范围与LSI无显著相关关系。这表明，公园形态复杂度对热舒适的空间延伸具有一定影响，但对降温强度和范围作用有限。相比之下，LST结果显示，除最大降温距离与LSI呈显著低负相关外，其余降温指标均无显著相关关系，进一步说明LSI对热舒适空间扩展的作用更为明显。最后，从公园内部土地利用类型来看，基于MTHI的结果显示，林地覆盖比例与降温范围、平均和最大降温距离呈显著低负相关；草地与降温强度呈显著低负相关；水体与降温范围及距离指标均呈显著正相关；建设用地与降温强度呈低正相关，但与降温范围和最大距离均表现为显著负相关。相比之下，基于LST的结果显示，林地覆盖与平均和最大降温距离呈显著低正相关；草地与降温强度及平均距离呈显著低负相关；水体与降温强度、范围及最大距离均呈显著低正相关；建设用地与降温范围、平均和最大降温距离均呈显著

负相关。总体来看，灌木在2套指标体系下均未显示显著相关性；水体对降温范围和距离呈显著正相关，是提升公园降温效应的关键因素；建设用地则在2套指标体系下均削弱降温效果。

2.3　基于MTHI和LST的公园降温服务人口差异

结合降温指标与手机信令人口数据，评估上海市公园的降温服务人口覆盖情况，以探讨其公平性（表4）。基于MTHI的分析显示，全市公园的平均降温服务人口为（1 601±2 567）人，各城市分区呈现由核心城区向远郊递减的趋势，其中核心城区公园的服务人口最多，而近郊和远郊公园明显较低，中心城区公园降幅最为显著（减少18.82 万人）。从降温服务人口占比来看，基于MTHI的全市公园降温服务人口总占比为2.42%，各区排序为：核心城区（5.31%）＞远郊地区（1.95%）＞近郊地区（1.79%）＞中心城区（1.63%）。中心城区的公园降温服务人口占比为唯一高于全市平均水平的分区，体现出明显的城乡梯度差异。相比之下，基于LST的分析显示，全市公园的平均降温服务人口为（3 519±4 501）人，超出基于MTHI的1倍。各区公园同样呈现由核心城区向远郊递减的趋势，其中核心城区公园服务人口最多（69.26 万人），中心城区公园其次（50.11 万人），而近郊和远郊公园显著减少。基于LST的平均降温服务人口占比为5.32%，核心城区公园最高（11.49%）。总体来看，MTHI相较LST更能真实反映上海市公园在夏季高温下的热暴露服务情况，尤其在核心城区和中心城区的公园服务覆盖上提供了更为保守且可靠的估计，从而有助于科学评估公园降温服务的公平性。

表 4　基于MTHI与LST量化的公园降温服务人口的城乡差异对比

Table 4　Comparison of urban-rural differences in the population benefiting from park cooling services quantified using MTHI and LST

指数 Indexes	项目 Items	上海全市 Shanghai	核心城区 Core urban area	中心城区 Central urban area	近郊地区 Suburb urban area	远郊地区 Outer suburb urban area
MTHI	平均降温服务人口数 Average cooling service population	1 601±2 567	2 727± 2 921	2 105±3 199	1 164±2 044	804±1 336
	降温服务总人口数 Total cooling service population	775 025	319 923	188 190	179 272	87 641
	区域总人口数 Total population	32 040 604	6 028 373	11 513 697	10 000 831	4 498 110
	降温服务人口数占比/% Percentage of population served by cooling	2.42	5.31	1.63	1.79	1.95
LST	平均降温服务人口数 Average cooling service population	3 519±4 501	7 263±5 946	4 557±5 067	2 252±2 929	1 490±1 841
	降温服务总人口数 Total cooling service population	1 702 967	692 614	501 143	346 788	162 422
	区域总人口数 Total population	32 040 604	6 028 373	11 513 697	10 000 831	4 498 110
	降温服务人口数占比/% Percentage of population served by cooling	5.32	11.49	4.35	3.47	3.61

进一步从等效降温人口（N_{ECP}）均值（表5）分析，基于MTHI的结果显示，上海市核心城区公园的N_{ECP}最高，达318.19（℃•人）/hm^2，而远郊公园最低，为39.73（℃•人）/hm^2，呈现出从高城市化区向低城市化区递减的规律。这表明，单位面积降温效能与服务人口的综合效应在核心城区公园最为显著，而远郊公园尽管具备一定的降温潜力，但由于人口分布稀疏，其整体服务效应未能充分发挥。进一步比较N_{ECP}超过与未超过均值的公园属性发现：基于MTHI的结果显示，N_{ECP}超过均值的公园通常面积较小（平均4.76 hm^2）、形状规则（LSI约2.4～2.5），且主要分布于核心城区；而未超过均值的公园多为面积较大（平均32.67 hm^2）、形状复杂，主要集中在近郊和远郊地区。相比之下，基于LST的公园N_{ECP}均值

表5 基于MTHI与LST量化的公园等效降温服务人口均值的城乡差异对比

Table 5 Comparison of urban-rural differences in the average population benefiting from park equivalent cooling services quantified using MTHI and LST

指数 Indexes	项目 Items		上海全市 Shanghai	核心城区 Core urban area	中心城区 Central urban area	近郊地区 Suburb urban area	远郊地区 Outer suburb urban area
	等效降温人口均值/[(℃•人)/ hm^2] Average equivalent cooling population		116.30±125.10	318.19±158.52	139.92±90.36	56.71±44.18	39.73±46.77
MTHI	超过均值 Above the average	LSI	2.45±0.62	2.35±0.55	2.56±0.72	2.32±0.46	2.31±0.34
		面积/hm^2 Area	4.76±6.61	3.70±3.71	4.98±8.53	5.69±11.64	3.99±4.22
	未超过均值 Below the average	LSI	2.39±0.63	2.45±0.60	2.54±0.99	2.36±0.45	2.30±0.36
		面积/hm^2 Area	32.67±93.21	8.91±23.98	14.28±38.36	40.23±83.54	78.89±166.15
	等效降温人口均值/[(℃•人/ hm^2)] Average equivalent cooling population		195.62±204.85	485.23±281.65	248.36±161.39	100.98±77.09	72.45±85.42
LST	超过均值 Above the average	LSI	2.47±0.65	2.35±0.50	2.69±2.69	2.36±0.47	2.29±0.33
		面积/hm^2 Area	5.07±6.94	4.68±4.58	5.40±8.80	6.32±11.45	4.17±43.1
	未超过均值 Below the average	LSI	2.37±0.62	2.45±0.65	2.45±0.93	2.34±0.44	2.31±0.36
		面积/hm^2 Area	34.46±96.16	8.21±24.68	14.01±38.38	40.54±84.52	75.68±163.34

整体偏高:核心城区公园为485.23 (℃•人)/hm^2,远郊公园为72.45 (℃•人)/hm^2,各区同样呈现从高城市化区向低城市化区递减的趋势。公园属性也呈现类似规律:面积较小、形状规则的核心城区公园N_{ECP}较高,而大面积、形状复杂的近郊与远郊公园N_{ECP}较低,但整体数值普遍高于MTHI。这进一步说明传统基于LST的评估可能高估了公园降温服务人口的覆盖效应。总体来看,单位面积小且形状规则的公园在提升热舒适服务人口方面更为高效,而大面积复杂公园虽然具有较大降温潜力,但其服务人口覆盖效果相对有限。

3 讨 论

本研究结合改进温湿指数(MTHI)、地表温度(LST)与手机信令人口数据,系统分析了上海不同城乡梯度下公园的降温效应。结果显示,基于MTHI评估揭示的降温强度、范围与距离均低于LST,空间波动性更小,城乡差异相对减弱。这表明,在上海夏季高温高湿背景下,仅依赖LST可能高估公园的热舒适效应,尤其在核心城区与近郊地区偏差更为突出。相关性分析显示,公园面积与降温范围呈显著正相关,但与降温强度呈低负相关,表明面积主要影响降温的空间扩展而非强度。景观形状指数与降温距离呈显著正相关,其中基于MTHI的结果更为突出,说明优化公园形态有助于提升降温服务覆盖。土地利用方面,水体对降温范围和距离均表现出显著正相关,而建设用地则呈负相关;林地和草地的相关性在不同指标体系下存在差异,MTHI中林地与降温距离呈负相关,而LST中为正相关。总体来看,水体和植被是增强公园降温效应的关键因素,其中水体作用最为显著。人口效应方面,城区公园虽降温范围有限,但因人口密度高,其单位面积等效降温人口效能远超郊区;而郊区公园尽管供给规模大,却服务人口不足,反映出供需错配与服务公平性不足。总体而言,MTHI能更真实地揭示环境热胁迫,而LST仅反映地表温度差异。二者结合可更全面评估公园的降温效应,对热浪背景下的城市热环境评价与公园规划具有重要参考价值。

结合本研究结果,为提升超大城市公园的热环境调节效能与服务公平性,提出以下规划建议。首先,建立科学的评价体系。当前城市热环境研究多依赖单一LST指标体系,易高估公园降温效应。建议政府在监测与评估中引入反映环境热舒适的指标,建立涵盖温度、湿度及人口暴露的多维度评估体系,为科学决策提供更可靠的依据[27-28]。其次,优化公园规划布局,实现差异化与公平性。在高度城市化地区,应优先增加“小而密、形态适度复杂”的社区公园,通过复杂边界提升降温强度,缓解人口密集区的热暴露风险。在低城市化地区,应在保障生态功能的前提下,增强公园与居住区的空间联系,推动降温潜力与人口需求相匹配[29-31]。公园内部规划应优化水体与植被布局:优先强化水体的强降温作用,尤

其在大型郊野公园中，应保护和修复自然水体（如池塘、溪流）；在缺乏自然水体的城市公园，可建设人工水体、喷泉或雾森系统。针对林地在MTHI和LST中的表现差异，设计应避免形成大面积、密闭、通风不良的单一林地，建议采用复层混交林结构，在降温的同时改善局部湿度；严格控制公园内建筑密度和硬质广场面积，减少对降温效应的负面影响[32-34]。最后，应缩小城乡服务差距。针对“郊区供给效能高、城区需求集中”的空间错配，应统筹区域公园规划与公共服务资源配置，建立以需求为导向的公平性评价机制，引导新增与改造项目兼顾生态功能和居民需求，逐步实现热舒适服务的均衡化。综上，政策制定者应从指标选取、公园布局和城乡公平3个维度统筹施策，以提升城市应对极端高温的能力，推动健康、宜居与可持续发展目标的实现[12,35]。

本研究在评估公园降温效应的城乡差异和指标差异方面仍存在若干局限性。首先，本研究在数据获取方面存在一定限制。Landsat 8遥感影像的空间分辨率为30 m，重访周期为16 d，难以全面覆盖夏季高温时段。2022年夏季仅2张符合条件的遥感影像，为匹配获取的2022年8月9—15日的手机信令人口数据，本研究选择了8月14日的数据进行分析。在人口数据处理方面，由于遥感影像未能覆盖所有时段，采用了手机信令数据的1周均值，虽然该数据覆盖了工作日和周末，能在一定程度上反映上海市真实的人口空间分布，但未能充分考虑人口活动的日内波动特征。但是这种数据处理方法已被多项研究证实为可行，如Gao等[4]、He等[5]以及Zheng等[6]均采用了类似的数据获取和处理策略来量化公园降温效应。未来若能获取更高时空分辨率的温度数据（如无人机热红外影像或密集气象站网络）和更精细的人口动态数据，将有助于进一步提高研究的精确度。其次，已有研究[8,12]验证了MTHI与通用热气候指数、生理等效温度等综合性人体热舒适指标具有高度相关性，这说明MTHI能在一定程度上反映人体热舒适的空间差异。但是，MTHI并不能反映人体真实的热感知。未来将开发或引入更贴近人体感受的热舒适模型，结合ENVI-met等微气候模拟软件，在空间上精细化地模拟人体热舒适。

参考文献 References

[1] 中国气象局气候变化中心 . 中国气候变化蓝皮书(2025)[M]. 北京：科学出版社，2025. China Meteorological Administration Center for Climate Change. Blue book on climate change in China (2025)[M]. Beijing: Science Press, 2025(in Chinese).

[2] UN. World population prospects 2024[R]. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2025.

[3] CAI X Y, YANG J, ZHANG Y Q, et al. Cooling island effect in urban parks from the perspective of internal park landscape [J/OL]. Humanities and social sciences communications, 2023, 10: 674[2025-09-07]. https://doi.org/10.3390/rs13163154.

[4] GAO Y, PAN H F, TIAN L. Analysis of the spillover characteristics of cooling effect in an urban park: a case study in Zhengzhou City[J/OL]. Frontiers in earth science, 2023, 11: 1133901 [2025-09-07]. https://doi.org/10.3389/feart.2023.1133901.

[5] HE M T, YANG C B, HE M T, et al. Analyzing cooling island effect of urban parks in Zhengzhou City: a study on spatial maximum and spatial accumulation perspectives[J/OL]. Sustainability, 2024, 16(13): 5421[2025-09-07]. https://doi.org/10.3390/su16135421.

[6] ZHENG X R, ZHANG N, WANG X. Development of a modified thermal humidity index and its application to human thermal comfort of urban vegetation patches[J/OL]. Ecosystem health and sustainability, 2022, 8: 2130095 [2025-09-07]. https://doi.org/10.1080/20964129.2022.2130095.

[7] FENG L, ZHAO M M, ZHOU Y N, et al. The seasonal and annual impacts of landscape patterns on the urban thermal comfort using Landsat[J/OL]. Ecological indicators, 2020, 110: 105798 [2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105798.

[8] FENG R D, WANG F Y, LIU S H, et al. How urban ecological land affects resident heat exposure: evidence from the mega-urban agglomeration in China[J/OL]. Landscape and urban planning, 2023, 231: 104643 [2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104643.

[9] LIANG H L, YAN Q, YAN Y J, et al. Using an improved 3SFCA method to assess inequities associated with multimodal accessibility to green spaces based on mismatches between supply and demand in the metropolitan of Shanghai, China[J/OL]. Sustainable cities and society, 2023, 91: 104456 [2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104456.

[10] DAI D J. Racial/ethnic and socioeconomic disparities in urban green space accessibility: where to intervene? [J]. Landscape and urban planning, 2011, 102(4): 234-244.

[11] WEI B Y, SU G W, LIU F G. Dynamic assessment of spatiotemporal population distribution based on mobile phone data: a case study in Xining City, China[J]. International journal of disaster risk science, 2023, 14(4): 649-665.

[12] ZENG P, SHI D C, LIU Y Y, et al. Parks may not be effective enough to improve the thermal environment in Shanghai (China) as our modified H3SFCA method suggests[J/OL]. Building and environment, 2024, 253: 111291 [2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111291.

[13] ZHAI Y J, WU H B, FAN H C, et al. Using mobile signaling data to exam urban park service radius in Shanghai: methods

and limitations [J]. Computers, environment and urban systems, 2018, 71: 27-40.

[14] CHUKWU M, HUANG X, WANG S Q, et al. Urban park accessibility assessment using human mobility data: a systematic review[J]. Annals of GIS, 2024, 30(2): 181-198.

[15] SHI Y, YANG J Y, SHEN P Y, et al. Revealing the correlation between population density and the spatial distribution of urban public service facilities with mobile phone data[J/OL]. ISPRS international journal of GEO-information, 2020, 9(1): 38[2025-09-07]. https://doi.org/10.3390/ijgi9010038.

[16] XIAO Y, WANG D, FANG J. Exploring the disparities in park access through mobile phone data: evidence from Shanghai, China [J]. Landscape and urban planning, 2019, 181: 80-91.

[17] LIANG C, YUAN J C, TANG X, et al. The influence of humid heat on morbidity of megacity Shanghai in China[J/OL]. Environment international, 2024, 183: 108424 [2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108424.

[18] SHI X, SUN M, LUO X C. Comparative analysis of near-surface and surface urban heat islands in the Yangtze River Delta region [J/OL]. Frontiers in environmental science, 2024, 12: 1387672 [2025-09-07]. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1387672.

[19] 上海市规划和国土资源管理局. 上海市城市总体规划(2017—2035)[M]. 上海: 上海市人民政府, 2018. Shanghai municipal planning and land resources administrati[M]. Shanghai Municipal Urban Master Plan (2017—2035). Shanghai: Shanghai Municipal Peopl's Government(in Chinese).

[20] BEN S L, ZHU H, LU J J, et al. Valuing the accessibility of green spaces in the housing market: a spatial hedonic analysis in Shanghai, China[J/OL]. Land, 2023, 12(9): 1660[2025-09-07]. https://doi.org/10.3390/land12091660.

[21] SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. Remote sensing of environment, 2004, 90(4): 434-440.

[22] WILSON E H, SADER S A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery[J]. Remote sensing of environment, 2002, 80(3): 385-396.

[23] XU H Q, HU X J, GUAN H D, et al. Development of a fine-scale discomfort index map and its application in measuring living environments using remotely-sensed thermal infrared imagery[J]. Energy and buildings, 2017, 150: 598-607.

[24] BENALI A, CARVALHO A C, NUNES J P, et al. Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data[J]. Remote sensing of environment, 2012, 124: 108-121.

[25] LIN W Q, YU T, CHANG X Q, et al. Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: method and test[J]. Landscape and urban planning, 2015, 134: 66-75.

[26] JIANG L, LIU S, LIU C, et al. How do urban spatial patterns influence the river cooling effect? A case study of the Huangpu Riverfront in Shanghai, China [J/OL]. Sustainable cities and society, 2021, 69: 102835[2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102835.

[27] ZHANG H N, ZHANG J, FEDIUK R, et al. Multiscale assessment of thermal comfort, exposure, inequality, and heat risk in Zhengzhou[J/OL]. Scientific reports, 2025, 15: 15588[2025-09-07]. https://doi.org/10.1038/s41598-025-00032-3.

[28] CHEN M, JIA W X, YAN L, et al. Quantification and mapping cooling effect and its accessibility of urban parks in an extreme heat event in a megacity[J/OL]. Journal of cleaner production, 2022, 334: 130252 [2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130252.

[29] GAO Z, ZAITCHIK B F, HOU Y, et al. Toward park design optimization to mitigate the urban heat island: assessment of the cooling effect in five U.S. cities[J/OL]. Sustainable cities and society, 2022, 81: 103870[2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103870.

[30] 韩贵锋, 蔡智. 山地城市公园形态对其降温效应的影响[J]. 西部人居环境学刊, 2016, 31(6): 61-68. HAN G F, CAI Z. Impact of mountain urban park form on cooling effect[J]. Journal of human settlements in West China, 2016, 31(6): 61-68 (in Chinese with English abstract).

[31] WOLCH J R, BYRNE J, NEWELL J P. Urban green space, public health, and environmental justice: the challenge of making cities 'just green enough' [J]. Landscape and urban planning, 2014, 125: 234-244.

[32] 赵选. 西安城市热环境效应及绿地缓解作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. ZHAO X. Thermal environment effect and mitigation effect of green space in Xi'an City[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021 (in Chinese with English abstract).

[33] 苏王新, 常青, 刘筱, 等. 城市蓝绿基础设施降温效应研究综述[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2902-2917. SU W X, CHANG Q, LIU X, et al. Cooling effect of urban green and blue infrastructure: a systematic review of empirical evidence [J]. Acta ecologica sinica, 2021, 41(7): 2902-2917 (in Chinese with English abstract).

[34] ZHOU S Q, YU Z W, MA W Y, et al. Vertical canopy structure dominates cooling and thermal comfort of urban pocket parks during hot summer days[J/OL]. Landscape and urban planning, 2025, 254: 105242 [2025-09-07]. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105242.

[35] RIGOLON A. Parks and young people: an environmental justice study of park proximity, acreage, and quality in Denver, Colorado[J]. Landscape and urban planning, 2017, 165: 73-83.

Urban-rural disparities in summer cooling services in parks based on a dual perspective of thermal comfort and land surface temperature

LIU Ya′nan[1], PENG Jiuyao[1], ZENG Peng[1], XUE Wei[2,3], LAI Xiaohong[1], LIU Yaoyi[4]

1.*School of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*;
2.*School of Digital Construction and Blasting Engineering/State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China*;
3.*School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China*;
4.*College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China*

Abstract　Shanghai was used to systematically evaluate the cooling effectiveness of urban parks from the perspective of thermal comfort to address the limitation of existing studies that rely heavily on the land surface temperature (LST) and neglect the thermal comfort in environment. The modified temperature-humidity index (MTHI) was introduced to characterize the thermal comfort. The vector data of parks were integrated with mobile signaling data to evaluate the cooling capacity in parks from the perspective of thermal comfort. The cooling benefits of parks and urban-rural disparities based on MTHI and LST were compared. The results showed that the cooling range of parks increased from the core urban area to the outskirts, but the benefits evaluated with MTHI was overall lower than those with LST. The size of park, vegetation coverage, and water-body proportion was positively correlated with the intensity of cooling. The vegetation coverage was positively correlated with LST-based cooling distance, but negatively correlated with MTHI-based cooling distance. The equivalent cooling service for population in the core urban area far exceeded that in the suburbs due to its high density of population. However, the served population estimated with MTHI was 54.5% lower than that with LST, indicating that traditional LST-based evaluation may significantly over-estimate the benefits of parks. It is indicated that the thermal-comfort indexes should be introduced to comprehensively evaluate the cooling benefits of parks and adopt differentiated strategies including increasing the supply of small parks in high-density urban areas and optimizing the design of parks in suburban areas to accurately improve the thermal comfort of the living environment.

Keywords　cooling effect in parks; heat island effect; thermal comfort; land surface temperature (LST); modified temperature-humidity index (MTHI); extreme high temperature; urban-rural disparities

(责任编辑:张志钰)