

DOI: 10.20103/j.stxb.202207212091

文慧, 彭立华, 殷实, 冯宁叶, 凌子尧. 城市绿地热效应全年变化特征及其与背景气象因子的关系. 生态学报, 2023, 43(19): 8193-8205.

Wen H, Peng L H, Yin S, Feng N Y, Ling Z Y. Annual temporal pattern and underlying meteorological factors of the thermal effects of urban green spaces. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 8193-8205.

城市绿地热效应全年变化特征及其与背景气象因子的关系

文 慧¹, 彭立华^{2,*}, 殷 实², 冯宁叶², 凌子尧²

1 南京工业大学测绘科学与技术学院, 南京 211816

2 南京工业大学建筑学院绿色建筑与生态城市实验室, 南京 211816

摘要:城市绿地能够调节热气候,是城市实现高质量可持续发展的重要空间载体。以往研究着重探讨城市绿地夏季降温效应的空间特征,较少分析绿地热效应的全年变化规律与潜在影响因子。在南京城区选择 7 个代表性城市公园,采用热气候定点观测方法获取公园大气温度全年观测数据,并与城市中心区参照点进行对比,分析公园热效应的全年动态变化规律及背景气象因子的影响。研究发现,由于植被覆盖率、冠层郁闭度及海拔不同,不同公园热效应的季节、昼夜规律存在显著差异,主要表现为 3 种形式:全年降温型,全年昼升夜降型,以及夏季全天降温、春秋冬季昼升夜降型。与城市中心区相比,公园夏季最高可降低气温 7.7℃,冬季最高可增温 3℃。大气温度、相对湿度、风速与太阳辐射 4 个背景气象因子能解释 23.5%—77.4% 的公园热效应变异。夏冬两季日间热效应主要受太阳辐射和气温的影响,夜间热效应主要受风速影响:太阳辐射每升高 100W/m²,夏季日间降温强度减少 0.3℃,冬季日间增温强度增加 0.2—0.5℃;气温每升高 1℃,夏季日间降温强度提高 0.1—0.14℃,冬季日间增温强度提高 0.05—0.08℃;风速每增加 1m/s,夏季夜间降温强度减少 0.05—0.78℃,冬季夜间降温强度减少 0.4—1.1℃。研究结果有助于深入认识城市绿地热效应的复杂形成机制,并为夏热冬冷地区城市自然空间保护与气候适应性设计提供科学参考。

关键词:全球变暖;城市绿地;冷岛效应;气候适应性

Annual temporal pattern and underlying meteorological factors of the thermal effects of urban green spaces

WEN Hui¹, PENG Lihua^{2,*}, YIN Shi², FENG Ningye², LING Ziyao²

1 School of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

2 Laboratory of Green Building and Eco-city, School of Architecture, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

Abstract: Urban green spaces (UGSs) can help cities achieve high-quality and sustainable development by regulating local climate through the thermal effects. A large number of studies have investigated the spatial pattern of the summer cooling effects of UGSs, while few studies explored the temporal pattern and underlying factors of UGS thermal effects on an annual basis. This study selected seven representative urban parks in Nanjing City to investigate their yearlong thermal-effect dynamics and underlying meteorological factors. Air temperature sensors were mounted on pole-like structures at around 2.5m above the ground at both the center and boundary of the parks. To assess the thermal effects, fixed measurements were also taken at two urban reference sites in the central business district that has a compact high-rise morphology. The results indicated significant differences in the seasonal and daily dynamics of thermal effects between the seven parks due to their differences in vegetation coverage, canopy closure and altitude. Three temporal patterns of thermal effects were discovered,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41871189)

收稿日期:2022-07-21; **网络出版日期:**2023-05-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: plhblue@njtech.edu.cn

including cooling throughout the year, daytime warming and nighttime cooling, and daylong cooling in summer and daytime warming nighttime cooling in other seasons. Compared with the urban center, the park could lower the air temperature by up to 7.7°C in summer and increase the temperature by 3°C in winter. However, the impacts of urban parks on urban climate were not always beneficial, since they can display a warming effect in summer daytime and a cooling effect in winter nighttime. The four background meteorological factors, including air temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation, could explain 23.5%—77.4% of the variations in the thermal effects. Air temperature and solar radiation were the primary factors for daytime thermal effect, while wind speed mainly affected the nighttime thermal effect. For every 100W/m² increase in solar radiation, the summer daytime cooling effect could decrease by 0.3°C, and the winter daytime warming effect could increase by 0.2—0.5°C. For every 1°C increase in air temperature, the summer daytime cooling effect could increase by 0.1—0.14°C, and the winter daytime warming effect could increase by 0.05—0.08°C. For every 1m/s increase in wind speed, the summer nighttime cooling effect could reduce by 0.05—0.78°C, and the winter nighttime cooling effect could decrease by 0.4—1.1°C. The above results revealed the complex formation mechanism of the thermal effects of urban green spaces, and might provide scientific references for natural conservation and climate adaptative design of urban parks in hot summer and cold winter areas.

Key Words: global warming; urban green space; cold-island effect; climate adaptability

城市热气候与大气质量、建筑能耗、人居舒适度、乃至整个城市生态系统的健康与安全密切相关^[1-3]。改善热气候对城市实现高质量可持续发展具有重要意义。城市绿地因具有重要的热气候调节服务功能(即热效应)而受到广泛关注。以往有关城市绿地热效应的研究主要集中在3个方面:(1)基于遥感影像反演方法,分析绿地斑块表面温度或地表降温强度与斑块面积、形状等景观格局因子之间的定量关系^[4-7];(2)采用热气候观测方法,研究城市绿地降温(多指气温)效应以及植物配置、生物量、冠层结构等植被特征参数对降温强度的影响^[8-11];(3)借助小气候模型,模拟分析城市微尺度空间内部植被的降温效应、冷空气扩散距离及其与植被特征及周边建筑环境之间的关系^[12-16]。

上述研究对揭示城市绿地热效应的强度、空间特征及影响因子具有重要意义,可从改善热气候角度指导城市绿地空间规划设计。然而,当前研究着重探讨城市绿地在典型夏季晴朗天气下的降温效应,较少关注热效应的长期时间分异特征与潜在影响因子。主要原因在于,全球气候变化带来的高温热浪频发以及城市化导致的热岛效应是当前城市热气候面临的最突出问题^[17-19],因而夏季降温成为改善城市热环境的首要目标;此外,由于遥感影像只能提供有限时间截面的地温数据,热气候观测往往费时费力,小气候模型受到计算机性能限制更适合开展短时模拟,针对城市绿地热效应的长时间序列研究具有较大的技术难度。

从地表热平衡过程分析,城市绿地可同时表现为降温 and 增温两种热效应:降温源于植被的遮阴和蒸散作用^[20],增温源于植物冠层对地面长波辐射散热的阻挡作用^[21]。这些热过程与辐射、温湿度、风速等背景气象因子密切相关;太阳辐射提供了蒸发蒸腾所需的能量,且与植被冠层的遮阴能力直接相关^[22];背景大气温度决定了绿地和参照点的大气温度、地表温度与长波辐射过程,直接影响两者之间的差异^[23];相对湿度表征空气中的水分饱和程度,反映地面与大气之间的水汽压梯度,是影响蒸发蒸腾速率的关键因子^[24];风是驱动水汽运动与平流热交换的主要力量,不仅影响植被土壤中水分的蒸发蒸腾速率,还决定冷空气从绿地往外传输的路径与距离^[25-27]。背景气象因子的季节与昼夜差异导致植被遮阴与蒸散作用的动态变化,加之植被覆盖率与冠层结构本身也存在季节性演变,两种因素结合势必引起绿地热效应的时间分异。同时,背景气象条件的季节与昼夜差异使得城市对绿地的热效应需求也不仅仅局限于降温。对寒冷或夏热冬冷地区而言,冬季低温时段的增温效应可对建筑能耗与居民热舒适度产生同样重要的积极作用^[28]。探索城市绿地热效应的全年变化特征及其与气象因子的关系有助于更全面地了解绿地的气候调节服务功能、更深入地剖析热效应的形成机制、并为不同气候变化情景下的绿地热效应预测提供线索。

已有研究表明,城市绿地降温效应主要发生在夏季,而在冬季或干旱时期会出现微弱的增温效应^[25]。在中国香港地区的实测研究显示,城市绿地降温效应存在显著的季节与昼夜差异:夏季强于冬季,日间强于夜间^[29];太阳辐射与气温是影响热效应的关键因子,其中,太阳辐射能解释 24.7%的热效应差异,背景气温升高 1℃,绿地降温强度增加 0.05℃^[30]。一项关于南京紫金山森林公园热效应的研究表明,公园降温效应夜间高于白天,晴天高于阴天和雨天,太阳辐射和相对湿度与降温强度的相关性最大^[31]。上述研究揭示了背景气象条件对城市绿地热效应的潜在影响,但涉及的绿地类型较为单一。具有不同植被特征(覆盖率、冠层结构、叶面积指数等)城市绿地的热效应对背景气象条件的响应是否存在明显差异?这个问题尚没有得到深入探讨。

本研究在南京城市内部选择 7 个具有不同植被特征的代表性城市公园绿地,采用热气候定点观测的方法,通过设置高密度观测网络获取长时间序列(一年)的大气温度数据,分析与比较不同公园绿地的全年热效应特征及昼夜季节规律,深入探析背景气象因子对公园热效应的影响。研究结果有助于全面了解夏热冬冷地区城市绿地热效应特征及形成机制,为基于气候适应性的城市自然空间保护与公园绿地设计提供科学依据。

1 研究方法数据来源

1.1 研究区概况

南京市位于长江下游中部地区(31°14′—32°37′N,118°22′—119°14′E),属北亚热带季风性气候,四季分明,冬夏长、春秋短,多年观测数据记录的南京夏季最高气温约为 43℃、冬季最低气温为-14℃,夏热冬冷的气候特征使得夏季降温、冬季增温成为增强城市气候适应性的双重目标。截止 2020 年,南京市建成区面积 868km²,常住人口 932 万人,城镇化率为 86.8%^[32],城市用地持续扩张与较高的城市化水平导致南京市热岛范围和强度不断增加^[33]。近年实测研究发现,南京市夏季夜间平均热岛强度为 3.1℃,位于城市中心区的高密度建筑区热岛强度达 5.2℃^[34]。

南京城市的诞生及发展是依据“三条山脉、两条河流和三个湖泊”的地理格局构思和规划的^[35-36]。其中,三条山脉指北脉幕府山至狮子山山脉,中间紫金山延伸向西经北极阁抵达长江边,以及南部牛首山祖堂山脉络;两条河流指秦淮河和金川河;三个湖泊指玄武湖、莫愁湖和燕雀湖。明朝之后的规划都是在城墙内,民国时期逐渐突破城墙向外发展建设^[35],2008 年以后,城市主要向南和东北方向扩张,原本位于东郊的紫金山逐渐被建成区包围^[36],同时,河西地区城市用地扩展迅速。南京“山水城林”交织、景观资源丰富,其中,城市园林绿地总面积为 935km²,绿地覆盖率 44.7%,森林覆盖率 25.8%。城市绿地主体为紫金山、幕府山、雨花台三大风景林地,以及各种大小公园 165 个,人均公园绿地面积 16m²^[32]。

本研究综合考虑位置、面积、地形条件、地表覆盖特征等要素,在南京主城区选择 7 个代表性城市公园开展热效应观测研究(表 1)。其中,紫金山森林公园位于主城区东部,面积 3008hm²,是主城区最大的绿地斑块。公园内部地形起伏明显,最高处头陀岭海拔约为 448m,植被覆盖率达 95%,拥有种子植物 1138 种。幕府山地处南京市北部,位于长江之滨,面积 751hm²,沿江岸线长达 6km。公园内部植被资源丰富,最高处海拔为 204m。雨花台公园位于城区南部,面积 146hm²,以自然山林为依托,内部植物种类丰富,古树名木较多,但因兼具红色教育功能,园区内部同时包含较大面积的纪念馆、广场等硬质地表。古林公园位于城区内西北方向,面积约 27hm²,自然环境条件优越。玄武湖公园位于紫金山西侧,是市区内最大的滨水公园,总面积 135hm²,71%的面积为水域。河西中央公园和绿博园伴随城市往西扩展建造而成。其中,河西中央公园被高层建筑包围,内部植被资源一般,不透水地面覆盖率较高,占公园面积的 44%。绿博园是南京河西滨江风光带示范段,为长江沿岸最大的城市公园,面积 201hm²,公园内分布着 600 多种植物,物种多样性较高。

1.2 实验设计

在每个公园的中心和边界区设置若干大气温湿度记录仪(Onset HOB0 MX2301)开展为期一年的热气候定点观测。温湿度记录仪外部安装防太阳辐射罩,并用不锈钢扎带固定在路灯杆、监控杆或树干离地面约 2.5m 处以避免人为干扰和破坏。为分析公园的热效应,在中心城区新街口设置 2 个热气候参照点,1 个位于

植被覆盖丰富的林荫道上,另 1 个位于无植被的裸露商业街上。温湿度记录仪每隔 1h 记录一次数据,并定期通过蓝牙连接下载到手机上。为研究背景气象条件对公园热效应的影响,在南京城东一商业建筑楼顶设置自动气象站获取背景气象数据,并收集南京基准气象站提供的大气温湿度,风速,辐射等背景气象数据。图 1 显示了 7 个城市公园及其内部观测点以及气象站的位置信息。

表 1 七个公园位置及内部地表覆盖情况

Table 1 Location and internal land cover features of the seven urban parks

公园名称 Park name	城区方位 Urban direction	面积/hm ² Area	植被覆盖率/% Vegetation coverage	不透水覆盖率/% Impervious coverage	水体覆盖率/% Water coverage
绿博园 Greenery theme park	西部	190.4	65.5	26.7	7.8
玄武湖 Xuanwu lake	中间	513.7	19.3	9.8	71.0
幕府山 Mufu mountain	北边	751.3	92.7	6.8	0.5
古林公园 Gulin park	西北	26.9	90.8	8.4	0.8
河西中央公园 Hexi central park	西南	11.7	50.6	44.1	5.3
雨花台风景区 Yuhuatai scenic spot	南部	146.1	86.5	12.6	1.2
紫金山森林公园 Purple forest park	东部	3008.8	95.4	2.3	2.3

为定量了解每个公园植被的生物量与冠层遮蔽特征,采用 Hemiview 冠层分析系统(英国 Delta-T 公司制造)分别拍摄测点夏冬两个季节的鱼眼照片,并使用 Hemisfer 软件计算测点叶面积指数(Leaf area index, LAI)和天空视域因子(Sky view factor, SVF);采用 GPS 定位系统测量每个测点的海拔。表 2 为每个测点的基本特征信息。

表 2 七个公园与中心城区监测点基本信息

Table 2 Basic information of seven parks and central urban monitoring sites

公园名称 Park name	基本信息 Basic information		公园名称 Park name	基本信息 Basic information	
	夏季 Summer	冬季 Winter		夏季 Summer	冬季 Winter
古林 Gulin park	海拔: 31m	海拔: 31m	雨花台 Yuhuatai scenic spot	海拔: 27m	海拔: 27m
	SVF: 0.09	SVF: 0.45		SVF: 0.18	SVF: 0.65
	LAI: 2.12	LAI: 0.68		LAI: 1.73	LAI: 0.30
河西中央 Hexi central park	海拔: 8m	海拔: 8m	幕府山 Mufu mountain	海拔: 126m	海拔: 126m
	SVF: 0.43	SVF: 0.52		SVF: 0.18	SVF: 0.75
	LAI: 0.61	LAI: 0.54		LAI: 1.64	LAI: 0.27
绿博园 Greenery theme park	海拔: 12m	海拔: 12m	紫金山 Purple forest park	海拔: 328m	海拔: 328m
	SVF: 0.16	SVF: 0.34		SVF: 0.05	SVF: 0.63
	LAI: 1.91	LAI: 1.15		LAI: 3.05	LAI: 0.52
玄武湖 Xuanwu lake	海拔: 11m	海拔: 11m	城区中心区参照点 Central urban monitoring sites	海拔: 56m	海拔: 56m
	SVF: 0.40	SVF: 0.84		SVF: 0.03	SVF: 0.35
	LAI: 0.89	LAI: 0.07		LAI: 2.82	LAI: 0.26

SVF:天空视域因子 Sky view factor;LAI:叶面积指数 Leaf area index

1.3 数据分析

热气候定点观测实验从 2020 年 7 月持续至今,本研究使用 2020 年 9 月 1 日至 2021 年 8 月 31 日的整年数据对公园绿地的热效应特征进行分析。首先,计算公园中心点与对照点的全年逐小时温度差值,并绘制热力图,分析公园热效应的全年整体动态变化规律;第二,选择夏冬两季昼(10:00—14:00)夜(18:00—22:00)两个典型时段,详细解析每个公园的热效应特征;第三,采用多元线性回归法分析太阳辐射、大气温度、相对湿度及风速在夏冬两季昼夜两个时段对城市公园热效应的影响与相对贡献。针对每个公园建立 4 个多元回归模型(夏季日间、夏季夜间、冬季日间、冬季夜间),因变量为每日昼或夜时段的公园热效应平均值,自变量为

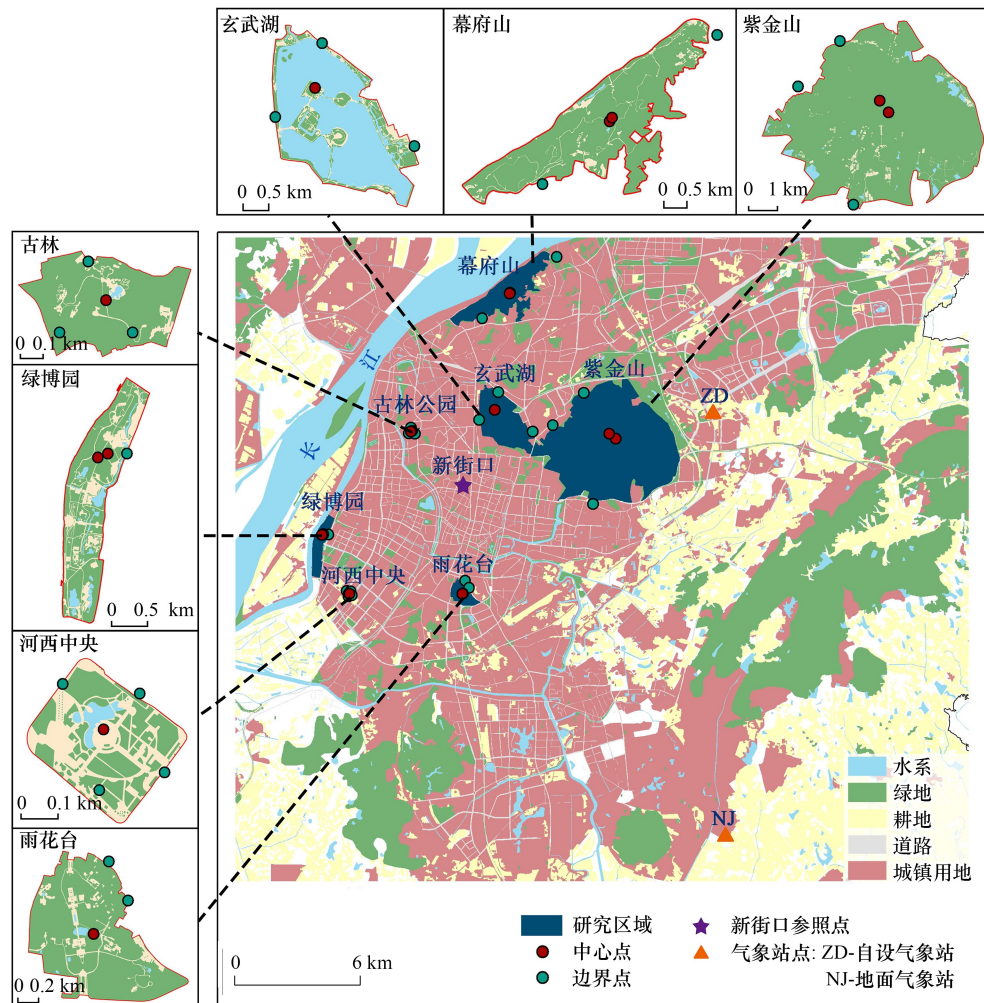


图 1 七个城市公园大气温湿度测点分布

Fig.1 Locations of the 7 urban parks, monitoring points and the Nanjing standard weather station

每个背景气象因子的当日平均值,每个模型共包含约 90 个样本数据,即夏季或冬季的天数。其中,公园热效应的计算公式如下:

$$\Delta T = T_i - T_j$$

式中, ΔT (温度差)表示城市绿地热效应, T_i 为绿地内部监测点某时刻的大气温度, T_j 指该时刻城市中心区两个对照点大气温度的平均值。 ΔT 为负值表示绿地有降温效应,为正值表示增温效应。为分析热效应的季节变化规律,定义春季的起止时间为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12—次年 2 月。

2 结果分析

2.1 全年热效应总体特征

图 2 为 7 个城市公园中心点与中心城区参照点之间的全年逐时温差图。七个公园绿地全年热效应的时间变化规律可大致分为三种类型:(1)全年以降温效应为主导,包括紫金山和幕府山两个森林公园;(2)夏季全天降温,春秋冬季日间升温夜间降温型(昼升夜降),包括古林公园、雨花台和绿博园三个公园;(3)全年昼升夜降型,包括河西中央公园和玄武湖两个公园。以下对三种类型的具体特征与形成原因做进一步分析。

紫金山和幕府山公园全年以降温为主导,两个公园均具有面积大、森林覆盖率高、植物冠层郁闭度大等特征,因此遮阴与蒸散作用强,加之中心点海拔高,使得降温效应明显且持续时间长,几乎覆盖全年各时段。与

新街口参照点相比,紫金山和幕府山公园中心点全年最高降温时段为夏季日间,降温强度最大值分别为 7.7℃ 和 6.4℃;最低降温时段为冬季日间,降温强度最大值分别为 3.8℃ 和 3.1℃。

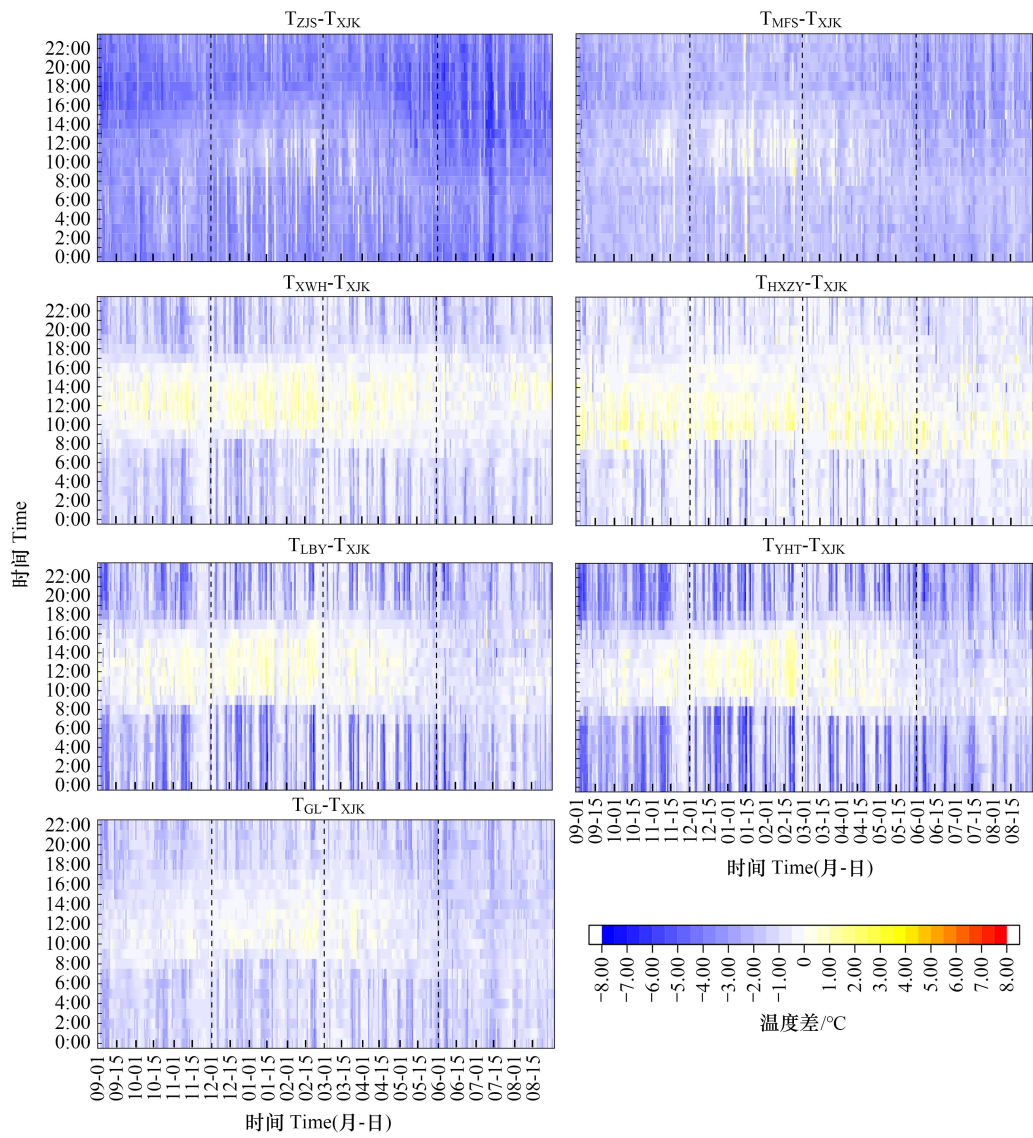


图 2 七个公园中心点与中心城区参照点全年逐时温差图

Fig.2 Hourly ΔT between the seven parks and the urban reference sites throughout the year

ZJS:紫金山森林公园 Purple forest park;MFS:幕府山 Mufu mountain;XWH:玄武湖 Xuanwu lake;HXZY:河西中央公园 Hexi central park;LBY:绿博园 Greenery theme park;YHT:雨花台 Yuhuatai scenic spot;GL:古林公园 Gulin park;XJK:城区中心区参照点 central urban monitoring sites; T代表的是公园中心点与中心城区参照点的逐时大气温度

古林、雨花台和绿博园三个公园依托自然或半自然植被建设而成,面积比紫金山和幕府山小,但同样具备较高的植被多样性和冠层郁闭度,因此在夏季最热时段,降温效应能持续全天,最高降温强度依次为 4.1℃、6.5℃ 和 6.3℃,一般发生在夜间 20:00 之后。夜间中心城区高层高密度建筑阻碍近地面长波散热,使得街谷内部热量集聚、温度升高,热岛效应最明显,因此相应的公园冷岛效应在此时段最强,且夜间降温效应在春、秋、冬三个季节同样显著。但春秋冬三季 3 个公园白天均存在增温时段,主要发生在日间 9:00—12:00 内,以冬季最为显著,最高增温强度依次为 1.2℃、3.0℃ 和 2.4℃。冬季公园 LAI 与夏季相比依次减少了 1.44、1.43 和 0.76,SVF 依次增大了 0.36、0.47 和 0.18,使得太阳辐射能直接到达公园地面,起到升温作用。

玄武湖和河西中央公园属于全年昼升夜降型。两个公园位于城市中心区,植被覆盖率低,其中玄武湖

71%为湖面,河西中央公园 44%的面积为硬质铺装,监测点所在位置空间开阔,SVF 较大。日间,由于遮阴作用比新街口高层高密度建筑区小,因此公园内部气温高于对照点,全年最高增温强度分别为 2.2℃ 和 3.1℃,且增温效应没有明显的季节差异;夜间,由于空间开阔,公园长波辐射散热作用比城区街谷明显,因此表现为降温效应,最高降温强度依次为 4.8℃ 和 4.4℃。

2.2 夏冬两季热效应强度

结合南京地区夏热冬冷的气候特点及 2.1 部分展示的昼夜规律,分别计算 7 个公园中心点和边界点夏冬两季昼(10:00—14:00)夜(18:00—22:00)时段与参照点之间的平均温度差,并进行对比(图 3—4)。

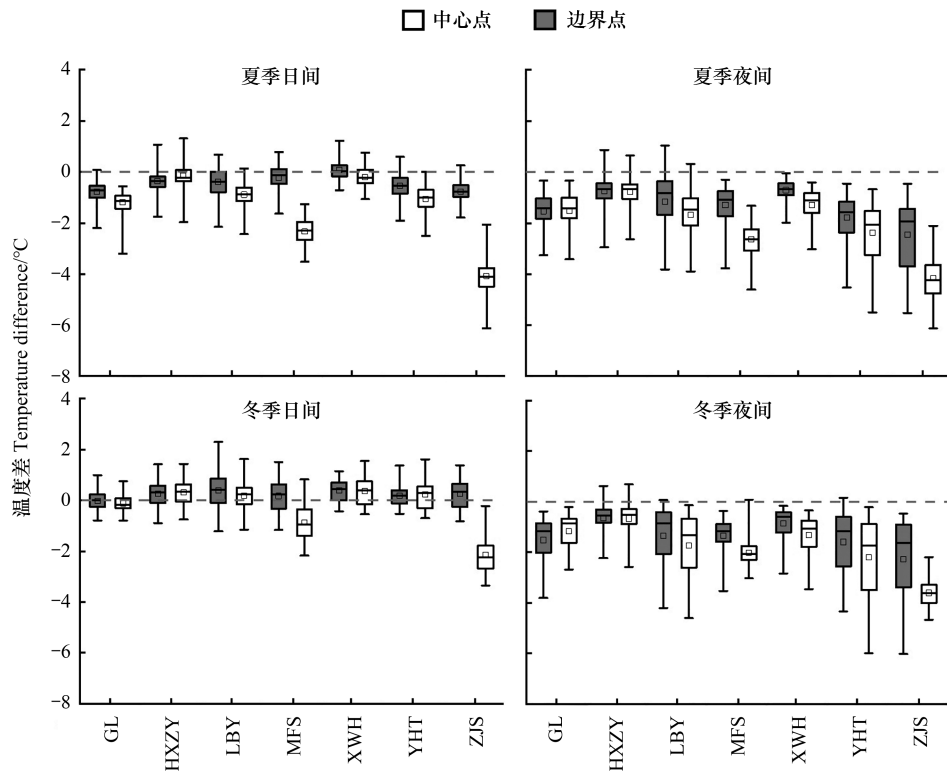


图 3 夏冬两季昼夜时段城市公园监测点与中心城区对照点的平均温度差箱线图

Fig.3 Box plots of the daytime and nighttime average ΔT (compared with the reference sites) of the central and boundary monitoring points in the seven urban parks in summer and winter

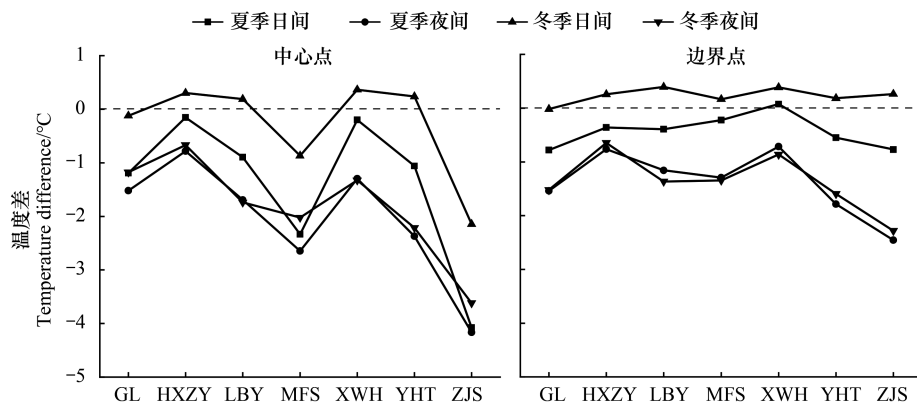


图 4 夏冬两季日间和夜间七个公园中心点和边界点与中心城区对照点的平均温差折线图

Fig.4 The daytime and nighttime average ΔT (compared with the reference sites) of the central and boundary points in the seven urban parks in summer and winter

夏季日间,公园中心点和边界点均以降温效应为主导。古林、绿博园、幕府山、雨花台、紫金山 5 个公园中心点 100%时段表现为降温效应;另外两个公园(河西中央与玄武湖公园)中心点约 75%的时段为降温效应。紫金山平均降温强度最高,为 4.1℃,其次为幕府山,平均降温强度 2.3℃,最低为玄武湖与河西中央公园,平均降温强度分别为 0.2℃和 0.16℃。

公园边界点夏季日间仍以降温效应为主,但与中心点相比降温强度有所减弱。7 个公园 50%以上时段表现为降温效应,平均降温强度在 0.07—0.8℃之内,比中心点平均降温强度弱 0.5—3.3℃。河西中央公园边界点降温强度强于中心点 0.2℃。但是,除古林公园全时段为降温效应外,其余 6 公园有 12%—50%时段表现为增温效应。边界点位于公园与高密度建成区交界处,冷热两种空气在此交互抗衡,热环境形成机制复杂,此处以降温效应为主导说明公园对其热环境起决定作用,也揭示了公园冷岛效应往外围建筑区外溢的可能性。

夏季夜间,公园热效应仍以降温为主,但与日间相比,降温时段更长、降温强度更大。除河西中央与绿博园有少量时段呈现升温效应外,其余公园中心点和边界点的所有时段均表现为降温效应。紫金山和幕府山的平均降温强度仍然位列第一和第二,分别为 4.2℃和 2.7℃,比日间分别增加 0.1℃和 0.3℃;河西中央与玄武湖公园降温时段占比分别增加到 96%和 100%,前者平均降温强度最低,为 0.8℃,但比日间增加 0.6℃。古林和河西公园中心点和边界点的平均温差相当,其它公园中心点降温强度仍然高于边界点。

冬季日间,公园的升温效应表现最为明显。除紫金山和幕府山中心点外,其余公园中心和边界点均以升温效应为主,升温时段占比 30%—70%,平均升温强度在 0.2—0.4℃之间,且边界点和中心点之间的区别并不明显。紫金山和幕府山中心点由于海拔和植被遮阴的影响,仍然以降温效应为主导,降温强度分别为 2.1℃和 0.9℃。

冬季夜间与夏季夜间相似,公园主要表现为降温效应,且降温强度与夏季夜间相当。这主要是因为中心城区街谷效应及人为热排放双重作用,使得夜间降温冷却速率放缓,导致与公园之间较大的温度差。最高降温强度仍然在紫金山,为 3.6℃,其次为雨花台,为 2.2℃。公园绿地通过植被遮阴和蒸腾达到降温增湿的作用,因此对不同公园绿地的温湿度监测,有助于我们了解降温效应的形成机制。

2.3 背景气象因子对热效应的影响

以太阳辐射、大气温度、相对湿度和风速为背景气象因子,基于夏冬两个季节昼夜时段的样本数据,采用进入法进行多元回归分析,探究气象条件对每个公园热效应的影响和贡献率。以 P 值的大小来判断模型整体拟合情况,决定系数(R^2)判断公园热效应的总变异中可由背景气象因子解释部分所占的比例,标准化系数(Beta)代表各气象因子对公园热效应的相对贡献(表 3—表 6)。

七个公园中,除河西中央和雨花台公园外,其余 5 个公园的 4 个模型均具有显著性($P < 0.05$), R^2 在 0.235—0.774 之间,说明城市公园的热环境效应受背景气象条件影响显著。总体来说,冬季的显著性模型多于夏季,说明公园冬季热效应受背景气象因子的影响较大。夏季模型中,夜间模型的决定系数普遍高于日间;而冬季日间的决定系数普遍高于夜间。两个季节日间热效应主要受气温和太阳辐射的影响,夜间热效应主要受风速的影响,但热效应与气象因子之间的正负相关性在季节、昼夜之间存在反向性。

夏季日间,古林、绿博园、玄武湖、幕府山、紫金山 5 个公园的多元回归模型具有显著性, R^2 在 0.218 到 0.574 之间。古林公园模型拟合程度最高,4 个气象因子能解释 57.4%的热效应差异;河西中央和雨花台公园模型不具显著性,说明两个公园热效应可能受背景气象条件之外的其它因素影响较大。太阳辐射的 Beta 系数最高,对热效应的影响最显著。太阳辐射每增加 $100\text{W}/\text{m}^2$,降温强度减低 0.3℃,这种负相关关系可能跟城市中心区较高的 LAI 和较低的 SVF 对白天太阳辐射的高遮挡作用有关。气温与温度差呈显著负相关,气温越高,植被发挥的遮阴、蒸散作用越大,因而降温强度越大,气温每升高 1℃,降温强度增加 0.1—0.14℃。相对湿度与温度差呈显著正相关,相对湿度越高,降温强度越小,一方面由于相对湿度与大气温度之间存在负相关关系,此外,空气中湿度增加会抑制植物蒸发蒸腾过程,使得植被吸收的能量不能有效转化为潜热。与其它因子相比,风速进入模型最少,仅一个,说明风速对夏季日间公园热效应的作用有限。

表 3 背景气象因子对夏季日间公园热效应影响的多元回归分析结果

Table 3 The multivariable linear regression analysis of the summer daytime thermal effects of the seven urban parks														
公园 Parks	决定系数 R^2	显著性 P	风速 Wind speed/(m/s)			大气温度 Temperature/℃			相对湿度 Relative humidity/%			太阳辐射 Solar radiation/(W/m ²)		
			Co	Beta	t	P	Co	Beta	t	P	Co	Beta	t	P
GL	0.574	<0.01	-0.001	-0.001	-0.010	0.992	-0.099	-0.546	-4.783	<0.01	0.031	0.770	4.231	<0.01
HXZY	0.208	0.059	-0.156	-0.321	-2.163	0.037	0.030	0.179	1.150	0.257	0.002	0.050	0.203	0.841
LBY	0.218	0.048	0.023	0.044	0.300	0.766	-0.021	-0.119	-0.771	0.446	0.027	0.700	2.840	<0.01
XWH	0.553	<0.01	-0.144	-0.369	-3.309	<0.01	-0.035	-0.266	-2.273	0.029	0.022	0.727	3.902	<0.01
MFS	0.429	<0.01	-0.038	-0.067	-0.532	0.598	-0.120	-0.620	-4.692	<0.01	0.010	0.234	1.111	0.273
YHT	0.084	0.491	-0.006	-0.011	-0.066	0.948	-0.002	-0.009	-0.051	0.959	0.020	0.473	1.771	0.084
ZJS	0.466	<0.01	-0.074	-0.102	-0.834	0.409	-0.141	-0.569	-4.453	<0.01	0.024	0.443	2.176	0.036

Co:非标准化回归系数 Unstandardized regression coefficient; Beta:标准化回归系数 Standardized regression coefficient; t:独立样本 t 检验 Independent-Sample t test; P:显著性水平 Significance level

表 4 背景气象因子对夏季夜间公园热效应影响的多元回归分析结果

Table 4 The multivariable linear regression analysis of the summer nighttime thermal effects of the seven urban parks														
公园 Parks	决定系数 R^2	显著性 P	风速 Wind speed/(m/s)			大气温度 Temperature /℃			相对湿度 Relative humidity/%			太阳辐射 Solar radiation/(W/m ²)		
			Co	Beta	t	P	Co	Beta	t	P	Co	Beta	t	P
GL	0.406	<0.01	0.486	0.486	3.694	<0.01	-0.023	-0.068	-0.505	0.616	0.012	0.201	0.959	0.344
HXZY	0.083	0.498	0.167	0.217	1.329	0.192	0.004	0.015	0.088	0.930	0.011	0.238	0.914	0.367
LBY	0.525	<0.01	0.738	0.558	4.742	<0.01	-0.064	-0.140	-1.160	0.253	0.031	0.404	2.158	0.037
XWH	0.296	<0.01	0.368	0.437	3.052	<0.01	-0.034	-0.119	-0.810	0.423	0.007	0.145	0.638	0.527
MFS	0.393	<0.01	0.309	0.385	2.892	<0.01	-0.099	-0.358	-2.628	0.012	0.003	0.068	0.322	0.749
YHT	0.659	<0.01	0.778	0.550	5.510	<0.01	-0.063	-0.130	-1.277	0.209	0.036	0.443	2.796	<0.01
ZJS	0.566	<0.01	0.049	0.046	0.410	<0.01	-0.076	-0.211	-1.830	0.075	0.040	0.663	3.706	<0.01

表 5 背景气象因子对冬季日间公园热效应影响的多元回归分析结果

公园 Parks	决定系数 R^2	显著性 P	Table 5 The multivariable linear regression analysis of the winter daytime thermal effects of the seven urban parks						太阳辐射 Solar radiation/(W/m ²)					
			风速 Wind speed/(m/s)			大气温度 Temperature /℃			相对湿度 Relative humidity/%			Beta		
			Co	Beta	t	P	Co	Beta	t	P	Co	Beta	t	P
GL	0.467	<0.01	0.021	0.055	0.523	0.604	0.009	0.147	1.238	0.222	0.003	0.130	0.872	0.387
HXZY	0.398	<0.01	-0.003	-0.006	-0.057	0.954	-0.001	-0.019	-0.153	0.879	-0.006	-0.214	-1.348	0.184
LBY	0.542	<0.01	0.035	0.064	0.651	0.518	-0.021	-0.240	-2.181	0.034	-0.003	-0.085	-0.616	0.541
XWH	0.774	<0.01	0.035	0.062	0.902	0.371	-0.007	-0.082	-1.057	0.296	0.002	0.075	0.770	0.445
MFS	0.628	<0.01	-0.027	-0.033	-0.373	0.710	0.049	0.37	3.731	<0.01	-0.006	-0.132	-1.058	0.295
YHT	0.727	<0.01	0.017	0.026	0.342	0.734	0.016	0.154	1.818	0.075	-0.012	-0.339	-3.168	<0.01
ZJS	0.662	<0.01	-0.185	-0.204	-2.429	0.019	0.082	0.568	6.016	<0.01	-0.004	-0.090	-0.759	0.451

表 6 背景气象因子对冬季夜间公园热效应影响的多元回归分析结果

公园 Parks	决定系数 R^2	显著性 P	Table 6 The multivariable linear regression analysis of the winter nighttime thermal effects of the seven urban parks						太阳辐射 Solar radiation/(W/m ²)					
			风速 Wind speed/(m/s)			大气温度 Temperature/℃			相对湿度 Relative humidity/%			Beta		
			Co	Beta	t	P	Co	Beta	t	P	Co	Beta	t	P
GL	0.317	<0.01	0.370	0.531	4.124	<0.01	-0.012	-0.100	-0.720	0.475	-0.001	-0.031	-0.195	0.846
HXZY	0.491	<0.01	0.491	0.609	5.473	<0.01	0.015	0.104	0.865	0.391	-0.014	-0.284	-2.053	0.045
LBY	0.504	<0.01	0.927	0.682	6.213	<0.01	-0.021	-0.086	-0.723	0.473	-0.006	-0.070	-0.514	0.609
XWH	0.365	<0.01	0.521	0.565	4.550	<0.01	0.005	0.030	0.220	0.827	-0.010	-0.163	-1.057	0.296
MFS	0.218	0.015	-0.179	-0.303	-2.201	0.032	0.050	0.473	3.171	<0.01	-0.007	-0.190	-1.107	0.274
YHT	0.554	<0.01	1.114	0.667	6.413	<0.01	0.003	0.008	0.075	0.940	-0.005	-0.051	-0.394	0.695
ZJS	0.235	0.010	-0.124	-0.188	-1.380	0.174	0.066	0.564	3.816	<0.01	-0.007	-0.167	-0.983	0.330

夏季夜间,除河西中央公园外,其余公园模型均具有显著性, R^2 在 0.296 到 0.659 之间。雨花台公园的模型拟合程度最高,气象因子能解释 65.9%的热效应差异。风速进入的模型最多(5 个)且 Beta 系数最大,风速与温度差呈显著正相关,风速每增加 1m/s,降温强度减低 0.05—0.78℃,较高的风速加速了公园与周边的热量交换,使得植被蒸散作用产生的凉爽空气不能有效集聚。气温进入的模型最少,仅 1 个,说明温度对夜间公园冷岛效应的作用较小。相对湿度与温度差的关系与日间相同,湿度越高,降温强度越小。太阳辐射对 7 个公园的夏季夜间热效应均无显著影响。

冬季日间,七个公园的回归模型均具有显著性, R^2 在 0.398 到 0.774 之间。玄武湖公园的模型拟合最好,气象因子能解释 77.4%的热效应差异。太阳辐射进入的模型最多(7 个)且 Beta 系数最大,说明太阳辐射对公园冬季日间的热效应起到关键作用,太阳辐射每增加 100W/m²,增温强度提高 0.2—0.5℃。冬季公园植被凋落,LAI 减少,SVF 增大,进入地面的辐射热量增多,因而增温效应明显。气温进入了 3 个模型,但与夏季日间不同,气温与温度差呈正相关,气温每升高 1℃,公园的升温作用增强 0.05—0.08℃。相对湿度和风速进入模型最少,表明这两个因子对冬季日间公园热效应的作用较小。

冬季夜间,七个公园的回归模型均具有显著性,决定系数在 0.218 到 0.554 之间。雨花台公园的夜间模型拟合最好,气象因子能解释 55.4%的热效应。与夏季夜间相同,风速进入的模型最多,除紫金山和幕府山外,其余公园温度差与风速均有显著正相关关系,风速每增加 1m/s,降温强度减低 0.4—1.1℃。紫金山和幕府山地形、植被条件复杂,其内部风环境受局地微气候、山体影响较大,而分析采用的区域风环境数据可能不能代表两个公园中心点的风速条件。太阳辐射与温度差呈显著负相关,太阳辐射越大,公园降温强度越大,可能因为,冬季植被的 LAI 减小,使得公园夜间长波散热比中心城区街谷快。大气温度仅进入了幕府山和紫金山公园这两个模型,且气温与降温强度呈负相关,这是因为两个森林公园的高郁闭度比起中心城区街谷更有利于抑制冬季夜间散热,促进保温。

3 讨论

3.1 城市绿地热效应的全年变化特征

城市公园绿地热效应存在明显的季节、昼夜变化规律,且这个规律在不同类型公园间存在差异。数据显示,公园绿地热效应的时间规律大致分为全年降温,全年昼升夜降,以及夏季全天降温、其余季节昼升夜降三种类型。公园之间植被覆盖率、冠层郁闭度及海拔的不同是造成时间规律差异的主要原因。七个公园在夏季夜间均呈现显著的降温效应,其中紫金山和幕府山两个森林公园的夜间平均降温强度最高,为 4.2℃ 和 2.7℃,且降温效应能延伸至公园边界处。根据 Yang 等人的实测研究结果,南京夏季城市热岛效应一般发生在日落至次日早上 8:00 左右^[37],此时段与本研究发现的公园降温时段正好吻合,表明公园绿地可有效缓解夏季城市热岛,特别是森林公园的作用最为关键,应当重点保护,防止城市开发对自然植被造成破坏。五个公园由于冬季 LAI 大幅下降提高了太阳辐射透过率,因此白天呈现增温效应,最高增温强度达 3.1℃,这对城市热气候改善同样具有重要意义;可抵消冷空气的负面影响、提升公园使用者的热舒适度,并减少周边地区建筑制热能耗。综上,为增强夏季降温效应与冬季增温效应,城市公园绿地的植物选择应同时考虑夏季遮阴和冬季纳阳的双向需求,以此提高绿地的综合气候服务调节功能。

然而,研究揭示的玄武湖与河西中央公园夏季日间的升温效应以及七个公园冬季夜间的降温效应对夏热冬冷地区热气候改善不利。城市公园的夏季增温效应在以往文献中也有报导,如 Chang 等对台北市 61 个公园的研究发现,约有 20%的公园在夏季日间的气温高于周边建筑区,特别是硬质铺装面积占比大于 50%且树木稀少的公园大多会呈现增温效应^[25]。冬季夜间的降温效应与以往研究存在不一致性^[29],这可能是由参照点的选取方式不一致引起的。由于绿地热效应由绿地内部测点和参照点的温度差值表征,因此参照点的空间特征与热气候状况对热效应计算结果有直接影响。大部分研究选择绿地外部一定范围的建筑区为参照点,以确保两者拥有相似的背景气象条件,但参照点气温本身可能受绿地的影响,从而使热效应计算出现偏差;也有

研究直接选择标准地面气象站为参照点,但气象站一般位于城市边缘区,并不能完全代表城市内部热气候状况。本研究选择建筑最为密集的中心商业区作为参照点,可保证对每个公园热效应计算基于同一基准,但由于街谷的蓄热作用以及人为热影响,参照点冬季夜间的热岛效应明显,因此计算得到绿地在此时段的降温效应尤为显著。未来研究可综合选择位置与城市形态各异的参照点,使热效应评价结果更加客观。

3.2 城市绿地热效应与背景气象因子之间的关系

大气温度、相对湿度、风速与太阳辐射 4 个背景气象因子能解释 23.5%—77.4% 的公园热效应变异,但是,气象因子对热效应的贡献率及影响方向(正负相关性)在公园之间、以及季节与昼夜间存在差异:与自然植被覆盖度高的城市森林相比,较为开敞且功能多样的人工公园热效应受背景气象因子的影响较小;夏冬两季日间热效应主要受气温和太阳辐射的影响,夜间热效应主要受风速影响;夏季,大气温度越高,公园降温效应越明显,而冬季,大气温度越高,增温效应越显著;此外,冬季太阳辐射对热效应的影响在昼夜间存在反向性,较强的太阳辐射能够提高公园日间增温效应,但同时也增强了夜间降温效应。以往研究发现,城市绿地夏季降温幅度随空气温度的升高而增大,随相对湿度、风速的增大而减弱^[26,38]。本研究对每个公园夏冬两季昼夜两个时段的热效应进行多元回归分析,进一步揭示了气象因子对热效应影响的复杂规律与内在机制。此外,研究建立了各个气象因子与热效应之间的定量关系,如,气温每升高 1℃,城市绿地的夏季降温强度增加 0.1—0.14℃,冬季增温强度增加 0.05—0.08℃,研究结论可为其它气候区或不同气候变化背景下的绿地热效应预测提供参考。

4 结论

大部分城市绿地热效应研究主要关注夏季绿地降温效应的空间特征与空间因子,本研究以南京市 7 个具有不同植被覆盖率与冠层特征的城市公园绿地为研究对象,基于长时间序列观测数据,分析公园绿地热效应的全年动态变化特征,探讨背景气象因子对热效应的影响。研究发现,对夏热冬冷地区而言,城市绿地热效应同时存在有利与不利影响;有利影响表现为夏季夜间的降温效应与冬季日间的增温效应,不利影响表现为夏季日间的增温效应与冬季夜间的降温效应。为提高城市绿地的综合热气候调节服务功能,一方面应重点保护植被覆盖率高、物种多样性丰富且冠层结构复杂的自然森林,以最大程度增强夏季降温效应、缓解城市热岛;在新建公园的设计上宜选择落叶乔木,夏季枝繁叶茂可遮阴降温,冬季枝叶凋敝可提高太阳辐射透过率从而实现增温。此外,本研究重点探究了背景气象因子对绿地热效应的影响与作用机制,通过多元回归分析建立两者之间的定量关系,可为绿地热效应评估与预测提供线索。

参考文献(References):

- [1] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, TARVER Jr Gregory, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. 生态学报, 2005, 25(8): 2055-2060.
- [2] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 栗娟. 城市热岛效应研究进展. 生态环境, 2005, 14(4): 574-579.
- [3] 金虹, 王博. 城市微气候及热舒适性评价研究综述. 建筑科学, 2017, 33(8): 1-8.
- [4] Cao X, Onishi A, Chen J, Imura H. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. Landscape and Urban Planning, 2010, 96(4): 224-231.
- [5] 冯晓刚, 石辉. 基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究. 生态学报, 2012, 32(23): 7355-7363.
- [6] 冯悦怡, 胡潭高, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响. 生态学报, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [7] Kong F H, Yin H W, James P, Hutyra L R, He H S. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of Eastern China. Landscape and Urban Planning, 2014, 128: 35-47.
- [8] Potchter O, Goldman D, Kadish D, Iluz D. The oasis effect in an extremely hot and arid climate: the case of southern Israel. Journal of Arid Environments, 2008, 72(9): 1721-1733.
- [9] 高吉喜, 宋婷, 张彪, 韩永伟, 高馨婷, 冯朝阳. 北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响. 资源科学, 2016, 38(6): 1028-1038.
- [10] Kong F H, Yan W J, Zheng G, Yin H W, Cavan G, Zhan W F, Zhang N, Cheng L. Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using

- terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 217: 22-34.
- [11] Amani-Beni M, Zhang B, Xie G D, Xu J. Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: a case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 32: 1-6.
- [12] Yu C, Hien W N. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 2006, 38(2): 105-120.
- [13] Morakinyo T E, Lam Y F. Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment*, 2016, 103: 262-275.
- [14] Morakinyo T E, Kong L, Lau K K L, Yuan C, Ng E. A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment*, 2017, 115: 1-17.
- [15] 姜之点, 彭立华, 杨小山, 姚灵烨, 朱春磊. 街区尺度屋顶绿化热效应及其与城市形态结构之间的关系. *生态学报*, 2018, 38(19): 7120-7134.
- [16] Peng L L H, Jiang Z D, Yang X S, He Y F, Xu T J, Chen S S. Cooling effects of block-scale facade greening and their relationship with urban form. *Building and Environment*, 2020, 169: 106552.
- [17] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展. *地球科学进展*, 2007, 22(10): 1066-1075.
- [18] 叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 郑有飞, 吴荣军. 1961—2010 年我国夏季高温热浪的时空变化特征. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 15-20.
- [19] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change widespread, rapid, and intensifying. (2021-08-09) [2022-06-28]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_en.pdf.
- [20] Bowler D E, Buyung-Ali L, Knight T M, Pullin A S. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(3): 147-155.
- [21] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 徐海龙, 李俊生, 蒲英霞. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征. *生态学报*, 2018, 38(12): 4234-4244.
- [22] Tan P Y, Wong N H, Tan C L, Jusuf S K, Chang M F, Chiam Z Q. A method to partition the relative effects of evaporative cooling and shading on air temperature within vegetation canopy. *Journal of Urban Ecology*, 2018, 4(1): 1-11.
- [23] Wang W, Wang H, Xiao L, He X, Zhou W, Wang Q, Wei C. Microclimate regulating functions of urban forests in Changchun City (north-east China) and their associations with different factors. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 2018, 11(1): 140-147.
- [24] Peng L L H, Yang X S, He Y F, Hu Z Y, Xu T J, Jiang Z D, Yao L Y. Thermal and energy performance of two distinct green roofs: temporal pattern and underlying factors in a subtropical climate. *Energy and Buildings*, 2019, 185: 247-258.
- [25] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 386-395.
- [26] Oliveira S, Andrade H, Vaz T. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: a case study in Lisbon. *Building and Environment*, 2011, 46(11): 2186-2194.
- [27] 刘凤凤, 闫伟姣, 孔繁花, 尹海伟, 班玉龙, 徐文彬. 基于气温实地调查的城市绿地降温效应研究现状与未来展望. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1387-1396.
- [28] Yang X S, Peng L L H, Jiang Z D, Chen Y, Yao L Y, He Y F, Xu T J. Impact of urban heat island on energy demand in buildings: local climate zones in Nanjing. *Applied Energy*, 2020, 260: 114279.
- [29] Fung C K W, Jim C Y. Microclimatic resilience of subtropical woodlands and urban-forest benefits. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 42: 100-112.
- [30] Cheung P K, Fung C K W, Jim C Y. Seasonal and meteorological effects on the cooling magnitude of trees in subtropical climate. *Building and Environment*, 2020, 177: 106911.
- [31] Yin S, Peng L L H, Feng N Y, Wen H, Ling Z Y, Yang X S, Dong L N. Spatial-temporal pattern in the cooling effect of a large urban forest and the factors driving it. *Building and Environment*, 2022, 209: 108676.
- [32] 南京市统计局. 2021 年南京统计年鉴. http://tjj.nanjing.gov.cn/material/njnj_2021/.
- [33] 李艳霞. 基于卫星遥感数据的南京市城市下垫面和热岛效应历史变迁与关联性研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [34] 杨小山, 姚灵烨, 金涛, 姜之点, 彭立华, 叶燕华. 南京夏季城市局地气温时空变化特征. *土木与环境工程学报: 中英文*, 2019, 41(1): 160-167, 174.
- [35] 姚亦锋. 南京历史地理与古都景观规划研究. *中国名城*, 2018(8): 46-52.
- [36] 高晓明, 王宇, 赵虎. 南京城市形态演化的历史时空成因研究. *规划师*, 2016, 32(6): 137-141.
- [37] Yang X S, Yao L Y, Jin T, Peng L L H, Jiang Z D, Hu Z Y, Ye Y H. Assessing the thermal behavior of different local climate zones in the Nanjing metropolis, China. *Building and Environment*, 2018, 137: 171-184.
- [38] 闫伟姣, 孔繁花, 尹海伟, 孙常峰, 许峰, 李文超, 张啸天. 紫金山森林公园降温效应影响因素. *生态学报*, 2014, 34(12): 3169-3178.