

DOI: 10.20103/j.stxb.202403130517

王世豪, 孙朝阳, 黄麟, 徐新良, 师华定, 韩冬锐, 谷庆宝, 刘寒冰. 城市绿地景观结构对夏季城市热环境的影响. 生态学报, 2024, 44(24): 11163-11176.

Wang S H, Sun C Y, Huang L, Xu X L, Shi H D, Han D R, Gu Q B, Liu H B. Impacts of urban green spaces structure on summer urban thermal environment. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11163-11176.

城市绿地景观结构对夏季城市热环境的影响

王世豪^{1,2}, 孙朝阳^{3,*}, 黄麟⁴, 徐新良⁵, 师华定², 韩冬锐⁶, 谷庆宝¹, 刘寒冰²

1 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012

3 国家气候中心, 北京 100081

4 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

5 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

6 山东省农业科学院, 农业信息与经济研究所, 济南 250010

摘要: 城市热环境问题降低了居民的生活质量, 城市绿地能够有效改善城市热环境问题。然而在精细尺度下, 不同景观结构绿地的降温能力及昼夜差异仍有待深入研究。基于土地利用、植被覆盖、地面高程、人为热排放和气象数据等, 利用 UrbClim 模型模拟了夏季高温日北京城区高分辨率逐小时气温, 解析了精细尺度下城市绿地的景观结构特征, 揭示了不同结构绿地昼夜降温效果的差异规律。结果显示: 北京城区内部的城市热岛由一个主热岛和分散在周围的多个小热岛组成, 北部气温较高、东南部气温较低, 白天的最高气温范围是 30.7—34.2°C, 夜间最低气温范围是 26.0—31.7°C。绿地景观结构显著影响气温的空间格局和波动变化, 高覆盖绿地夜间降温效果减弱, 并能减小每日的气温波动程度, 尤其是当绿地超过 80% 时效果最显著。面状、聚集斑块绿地气温稳定性要强于线状、零散斑块绿地。植被类型对昼夜气温调节作用不同, 白天乔木灌木降温效果比草地更显著, 而夜间乔木保温作用明显。此外, 在一天最热的时刻, 绿地百分比高、斑块为面状且聚集、植被类型为乔木的绿地在白天的降温效果最佳, 而在夜间最冷的时刻, 这种绿地减缓了白天热量的消散, 保温效果显著。研究可为相关部门开展城市规划工作和城市热环境改善等方面的决策和管理提供科学依据。

关键词: 城市绿地; 景观结构; 城市热环境; 气候模拟

Impacts of urban green spaces structure on summer urban thermal environment

WANG Shihao^{1,2}, SUN Chaoyang^{3,*}, HUANG Lin⁴, XU Xinliang⁵, SHI Huading², HAN Dongrui⁶, GU Qingbao¹, LIU Hanbing²

1 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China

3 National Climate Center, Beijing 100081, China

4 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

5 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

6 Institute of Agricultural Information and Economics, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250010, China

Abstract: Urban heat environment issue has reduced the quality of life for residents, and urban green spaces can effectively

基金项目: 国家自然科学基金项目(42377464); 中国博士后科学基金第 74 批面上资助(2023M743339)

收稿日期: 2024-03-13; **网络出版日期:** 2024-09-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunchaoy@cma.cn

improve the urban heat environment. However, at a fine scale, the cooling capacity of green spaces with different structures and the diurnal variation still require in-depth study. This paper, based on land use, vegetation cover, ground elevation, anthropogenic heat emission, and meteorological data, utilizes the UrbClim model to simulate high-resolution hourly temperatures in Beijing's urban area during summer high-temperature days. It analyzes the structural characteristics of urban green spaces at a fine scale and reveals the diurnal cooling effect differences among green spaces with various structures. The results indicate that the Urban Heat Island (UHI) within Beijing's urban area consists of a primary heat island and several smaller heat islands scattered around it. The northern part experiences higher temperatures, while the southeastern part is cooler, with the highest daytime temperatures ranging from 30.7 °C to 34.2 °C and the lowest nighttime temperatures ranging from 26.0 °C to 31.7 °C. The structure of green spaces significantly influences the spatial pattern and fluctuation of air temperatures. Green spaces with high coverage exhibit a diminished cooling effect at night and can reduce the extent of daily temperature fluctuations, particularly when the greenery exceeds 80%, where the effect is most pronounced. The temperature stability of patchy and aggregated green spaces is stronger than that of linear and scattered green spaces. Vegetation types have different regulatory effects on diurnal temperatures; during the day, trees and shrubs have more significant cooling effect than grasslands, while at night, the warming effect of trees is more pronounced. Furthermore, at the hottest time of the day, green spaces with a high percentage of area, patchy and aggregated shape, and tree vegetation type have the best cooling effect, while at the coldest time of the night, these green spaces slow down the dissipation of heat accumulated during the day and have the most significant warming effect. The paper provides a scientific basis for relevant departments to carry out urban planning work and improve urban heat environments for decision-making and management.

Key Words: urban greenspaces; landscape structure; urban thermal environment; climate simulation

城市热环境是由气温、湿度、风速等组成的物理环境条件,直接影响城市居民的工作效率、身体健康和热舒适度。近年来,随着城镇化水平不断提高,自然生态景观不断被人工景观所取代,下垫面格局改变,影响地表的热辐射和热存储,引起热传递变化,人为热排放加剧和能源消耗,加剧了城市热岛(Urban heat island, UHI)效应^[1-2],引发诸多城市热环境问题^[3-4],增加了城市环境污染^[5-7],降低了城市热舒适度和居民生活质量^[1],夏季高温热浪事件增加了发病率和死亡率,威胁人类健康^[8-12]。因此,深入开展城市热环境研究对于缓解 UHI 效应、创造良好的热舒适性、提高居民生活质量具有重要意义。

当前,城市热环境研究主要聚焦于 UHI 强度及动态变化^[13-17]、驱动因素^[18]、情景预测^[10]、人类健康响应和适应等^[19-20],研究尺度包括宏观(例如城市,10—100 km)、中观(例如城区,1—10 km)和微观尺度(例如街区,<1 km)等。城市建成区内部是居民的主要聚集区,微气候因素直接影响居民的人体舒适度和健康。气候背景、土地利用、社会经济因素以及城市形态都会直接或间接影响城市热环境^[21-25],微尺度热环境主要受街道布局、建筑高度密度、城市绿地等因素的影响,其中城市绿地能够通过植物光合、吸收、隔离阻挡、蒸腾、蒸散等作用降温增湿,缓解 UHI 效应^[26-28]。近年来,城市绿地对微尺度热环境的影响日益受到关注,绿地降温效果受景观类型、面积、几何形态、垂直结构、植被冠层覆盖率、树种丰富度及多样性、与建筑物配置模式的影响^[29-38]。已有研究表明,形状规则的绿地具有更高的降温潜力^[39],不同群落结构的绿地(乔、灌、草)降温增湿效果具有显著差异^[40]。绿地景观结构包括组分和配置,前者侧重分析植被覆盖度^[41-43]、植被指数^[44-45]与热环境的关系,后者侧重景观类型时空组合效应^[46-47],分析景观格局指数与热环境的关系^[48],或利用热力景观方法定量分析城市热环境空间格局^[49],相关研究已在北京^[3,50]、厦门^[51]、西安^[52-53]、乌鲁木齐^[54]、沈阳^[55]等城市开展。此外,城市热环境在许多城市表现出显著的昼夜、季节和年际变化^[7,13,23,56-59],城市绿地的昼夜气温调节能力存在差异,已有研究大多基于遥感影像提取的地表温度信息或气象观测数据分析绿地在单一时刻或地点的降温效应^[57,60-62],受限于数据的时间和空间分辨率,当前对于精细尺度下绿地降温能力的昼夜差异仍有待深入研究^[63]。为了最大程度发挥绿地降温潜力,需要在精细尺度深入探讨城市微气候的内在不均

匀性^[64]和不同绿地景观结构对城市热环境的影响及昼夜差异^[33]。

城市热环境研究常用的数据获取方法包括地面观测、遥感监测和数值模拟等^[65]。地面观测虽然能反映城市热环境在连续时间上的变化,但受站点数量的限制,空间上不能全面地反映热环境状况^[47],难以识别影响因素的空间变化^[66]。航天遥感监测尺度大、覆盖范围广,能获得空间上连续的地表温度信息,但难以同时满足精细的时空分辨率^[56];而航空遥感数据虽然空间分辨率高,但大面积监测成本较高^[58]。数值模拟常用基于热力学和动力学理论的边界层数值模型,或在中尺度大气模式中引入城市地表能量平衡来模拟城市气候特征,可以获取连续时间内的热环境状况^[65],了解 UHI 形成的物理过程^[67]。然而,要评估城市内部热环境,需要更高的空间分辨率,常用的气候模式例如 MM5^[68]、WRF 模式^[69]、边界层数值模式^[70]等,时空分辨率较粗,模拟精度在 km 级别,无法精细刻画城市内部特征,难以应用于城市内部结构及热环境的精细研究^[71]。而且,中尺度模式与城市模型的耦合计算过程复杂,中尺度模式在时间步长上的稳定性限制会极大地降低其运行速度,长时间模式积分需要海量计算资源,使得其难以胜任城市气候模拟^[72-73]。UrbClim 模型是一个由地表参数方案耦合三维大气边界层模块组成的城市边界层气候模型,以天气尺度的气象场为约束条件,在模型中实现对天气强迫的考虑^[72]。该模型的地表参数方案是基于 De Ridder 和 Schayes^[74]提出的土壤-植被-大气传输方案,考虑了反照率、比辐射率、空气动力学、热粗糙度长度以及人为热排放等城市地表特性,模拟时能充分考虑土壤、植被和大气之间的水热通量交换,实现局域尺度的气温、湿度等的精细化模拟。该模型可对城市区域进行空间分辨率高达 100 m 的气温模拟,已应用于欧洲 100 多个城市,通过与实际观测数据和其它模式结果的对比验证,在城市热环境研究和评估中具有很好效果^[72-76]。

综上所述,城市绿地能显著影响微尺度热环境,然而已有研究的尺度往往难以同时满足精细的时间、空间分辨率,且对不同结构绿地的昼夜降温效应理解也不够深入。因此,为了探究精细尺度下绿地景观结构对城市微尺度热环境的影响及昼夜变化,本文以北京城区为研究区,以局地气候分区(Local Climate Zones, LCZ)分类的土地利用数据、植被覆盖数据、地面高程数据、人为热排放数据以及气象数据作为输入数据,驱动 UrbClim 城市气候模型,模拟了夏季 7 月份空间分辨率为 100 m 的 2 m 高度逐小时气温,分析了气温网格内绿地的组分、构型配置和乔灌木类型,解析了不同景观结构绿地的气温调节能力,并探究了城市绿地夏季降温效果的昼夜变化。本研究对于城市空间格局的优化和城市热环境改善具有重要的科学意义,可为城市空间规划提供可靠的定量依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

北京是我国的首都,是全国政治、文化中心,建成区面积为 1469 km²,常住人口城市化率为 87.8%,人口从 2010 年的 1961.9 万人增长至 2023 年的 2185.8 万人,增长了 11.4%。近年来随着北京人口激增和城市面积扩张,下垫面性质发生剧烈变化,人为热排放增多, UHI 效应加剧,空气质量下降^[77],城市雾霾污染又加剧了夜间的 UHI^[5],北京的城市热环境问题愈发严重。北京高温区向南北扩展,热岛足迹和热岛容量不断增长^[78],东城、西城、海淀为热岛中心,石景山、丰台是局地升温的显著区域^[79],东南部 UHI 异速增长,西部缓慢增长。因此本文选择北京作为夏季热环境问题的典型城市(图 1),以东经 116.34°、北纬 39.96°为中心点,向外扩 15 km 形成 30 km×30 km 的区域作为研究区。

1.2 数据来源

本文所用到的数据包括遥感影像数据、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据、数字高程模型(DEM)数据、人为热通量(Anthropogenic Heat Flux, AHF)数据、气象数据和城市绿地数据。

遥感影像数据:使用 Landsat-8 OLI/TIRS 数据(2022 年 7 月 24 日,条带号 123,行编号 032),来源于美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)数据网站(<https://earthexplorer.usgs.gov>)。基于 LCZ 下垫面分类方案^[80],根据研究区实际情况对 LCZ 类型进行适当的合并调整,使用 Google Earth 软件绘制训练样

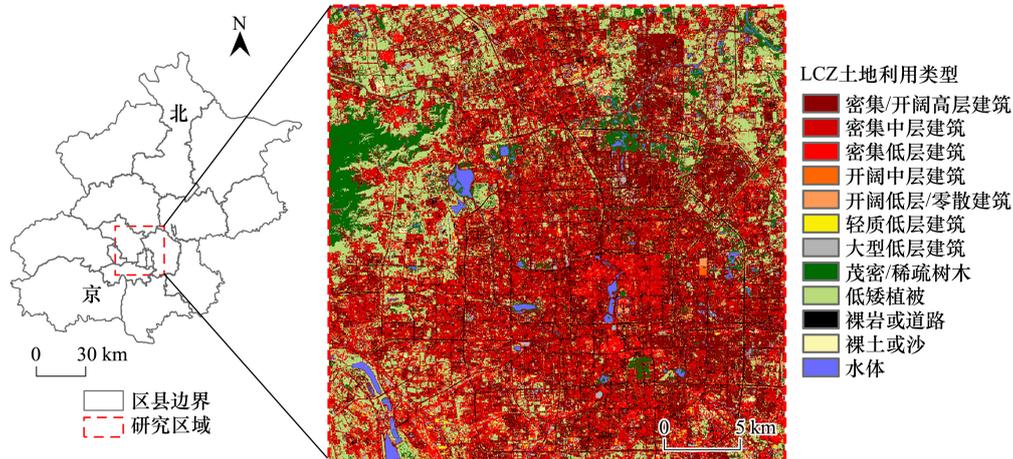


图1 研究区空间分布图,模拟区域的位置及 LCZ 土地利用类型

Fig.1 The study area; location and LCZ types of the simulation area

LCZ:局地气候分区 Local climate zones

区,采用随机森林方法对遥感影像进行分类。经过准确性验证和不断调整,得到模型输入所需的 LCZ 土地利用数据^[81-83](图 1)。

NDVI 数据:使用 250 m 分辨率的 MODIS NDVI 数据,来源于美国国家航空航天局(NASA)数据网站(<https://www.earthdata.nasa.gov>),用于模型的植被覆盖输入。

DEM 数据:使用 30 m 分辨率的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据,来源于 USGS 数据网站,用于模型的地面高程输入。

AHF 数据:使用 5 km 分辨率的全球 AHF 数据,来源于美国能源信息署(Energy Information Administration,EIA)网站(<https://www.eia.gov>),用于模型的人为热排放输入。

气象数据:使用分辨率为 0.75°(70—80 km)的全球大气再分析资料 ERA-Interim 数据,来源于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)网站(<https://www.ecmwf.int>),用于模型的气象输入。

站点气温观测数据:收集了研究区内 15 个气象站点 2022 年 7 月份共 31 天的逐小时气温观测数据,来源于中国气象局国家气候中心,用于模型模拟结果的验证。

城市绿地数据:使用分辨率为 1 m 的 SinoLC-1 全国土地利用数据^[84],来源于 Zenodo 平台(<https://zenodo.org/records/7709035>),该数据基于深度学习方法和开放数据生成,空间分辨率高,景观细节精细。提取土地利用类型中的乔木、灌木、草地 3 类,用于城市绿地景观结构的分析。

1.3 研究方法

1.3.1 UrbClim 模型模拟

利用 UrbClim 城市气候模型对北京城区 7 月份高分辨率逐小时气温进行模拟。模型输入数据包括地面数据(包括 LCZ 土地利用、NDVI、DEM 和 AHF 数据)和气象数据。地面参数主要取决于 LCZ 数据,而 DEM、NDVI、AHF 数据起到辅助作用,所有地面数据输入模型时会统一插值到 100 m 分辨率。大气驱动场提供天气尺度的约束条件,模型模拟时根据地面参数来计算 100 m 格点上的气温。经过设置模型网格、投影转换、数据插值、格式转换等数据预处理操作后,运行 UrbClim 模式。模型输出数据为 7 月份北京城区内部 2 m 高度的气温栅格数据,空间分辨率为 100 m,时间分辨率为逐小时(连续 31 d),用于城市热环境特征分析。利用站点气温观测数据(共 15 个站点,每个站点连续 31 d 逐小时数据)对模型模拟结果进行精度验证(图 2),结果显示模拟气温趋势与实测数据基本一致,精度满足本文实验要求。

1.3.2 绿地景观结构参数计算

基于气温模拟数据 100 m 网格单元位置,对提取的城市绿地栅格数据进行重采样,得到 5 m 分辨率的绿地数据(图 3),使每个 100 m 格网内刚好覆盖 20 行×20 列 5 m 大小的绿地格网,便于分析气温与绿地景观结构的关系。

本文从组分、构型配置和植被类型 3 个方面来开展城市绿地景观结构的解析。其中城市绿地的组分特征以每个 100 m 网格内绿地百分比表征:

$$PG = \frac{G}{A} \times 100\%$$

式中,PG 为城市绿地百分比,G 为网格单元内城市绿地面积,A 为网格单元面积。

在百分比相同的情况下,绿地空间结构和布局特征对于降温效应同样重要^[85]。关于城市绿地的空间配置特征,已有研究大多以绿地斑块的景观格局指数来表征,虽然能大致体现出斑块的复杂和破碎程度,但是无法具体直观地表现斑块的形态和布局。因此本文利用

OpenCV(<https://opencv.org>)对 100 m 网格内绿地斑块边界矩形的几何特征进行识别,参考已有的城市绿地布局形式(点、条带、混合等)^[86],根据绿地斑块的数量和形状的不同,将绿地斑块的形态布局类型分为线(A)、面(B)、面-面(C)、线-面(D)、线-线(E)和混合型(F)6类(图 3)。斑块边界矩形长宽比大于 2 为 A,反之则为 B。A 和 B 在网格中只有一个斑块,C、D、E 为两个斑块组合,F 为两个以上斑块组合。

乔木、灌木和草地在生长形态以及对微气候的影响方面存在显著差异。乔木高大且树冠茂盛,能有效遮挡阳光、减少地表辐射热量;灌木低矮但枝叶丰茂,一定程度上也能遮荫和降温;草地矮小但地表覆盖分布广泛,蒸散作用明显,能有效降低周围环境的温度。因此,本文分析乔木、灌木和草地 3 种不同类型绿地的降温效果,揭示不同类型植被在降温效应上的贡献和差异^[39-40,62,87]。

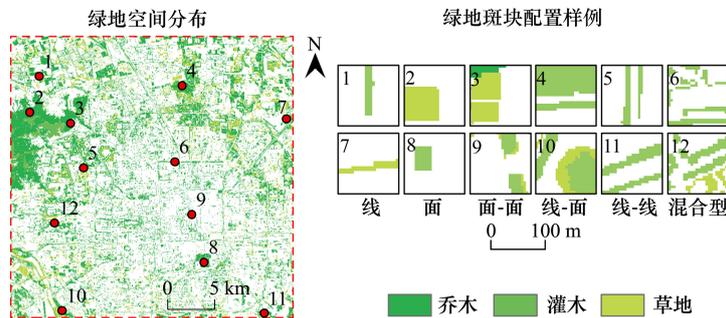


图 3 绿地空间分布及斑块配置样例

Fig.3 Distribution of the green spaces and examples of patches

1.3.3 空间统计分析

基于模拟得到的逐小时气温和城市绿地景观结构参数,以 100 m 气温网格为基本单元,采用空间统计分析的方法,分析不同面积百分比、不同空间配置以及不同高度种类绿地的气温调节效果,气温变化指标包括气温与整个研究区气温均值的差 ΔT 、气温日较差(Diurnal Temperature Range, DTR)、逐小时气温标准差

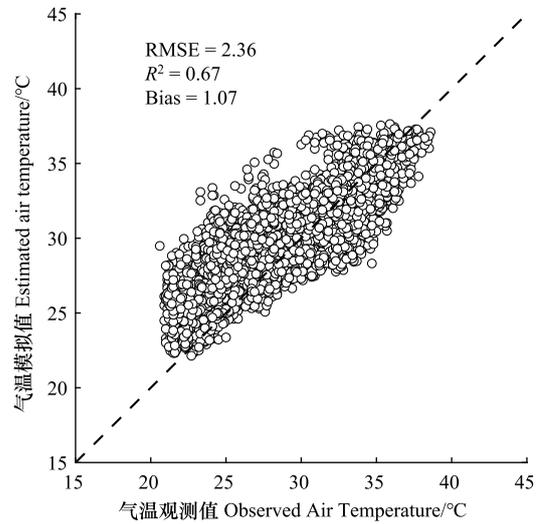


图 2 模型模拟结果与站点观测值的散点图

Fig.2 Scatter plot of model simulation results and site observation values

RMSE:均方根误差 Root mean square error; Bias:偏差

(Standard Deviation, SD)以及变异系数(Coefficient of Variation, CV)。利用 ArcGIS 10.2、SPSS 22 以及 Origin 2018 软件进行空间统计、数据分析以及统计图绘制。

2 结果与分析

2.1 热环境特征

北京城区内部的 UHI 由一个主热岛和分散在周围的多个小热岛组成, UHI 斑块的空间分布紧凑, 碎片化程度较低, 边界比较规则(图 4)。研究区夏季高温地区主要分布在北部, 而东南部气温较低。白天的最高气温范围是 30.7—34.2℃, 局部温差达到了 3.5℃, 一些城市绿地公园的气温较低, 形成城市内部的冷岛。夜间最低气温范围是 26.0—31.7℃, 局部温差达到了 5.7℃。

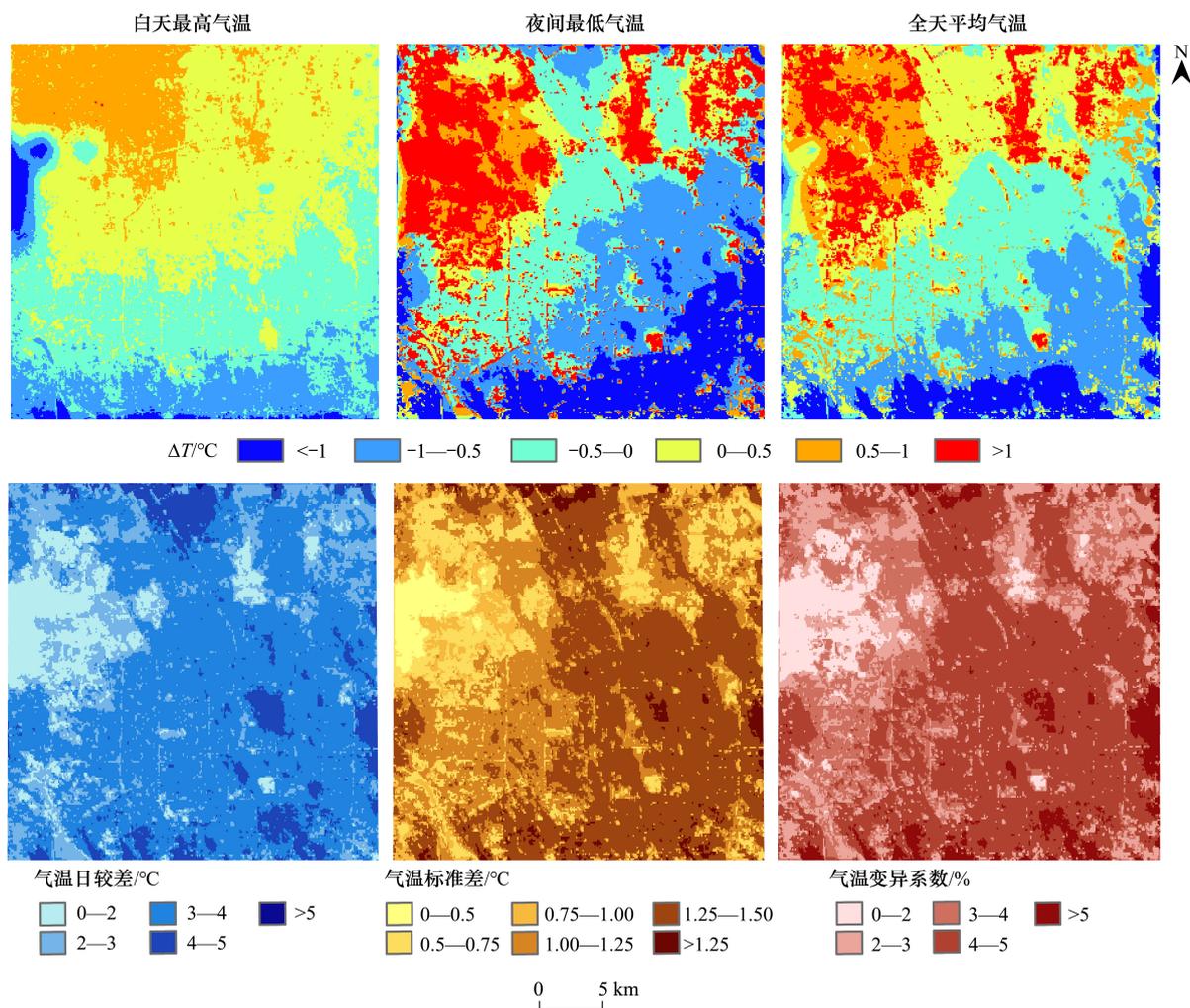


图 4 研究区气温模拟结果空间分布

Fig.4 Distribution of temperature simulation results in the study area

ΔT : 气温与整个研究区气温均值的差

研究区 DTR 的平均值约为 3.2℃, 局部地区 DTR 最高可达 5.5℃, 最低为 1.0℃。气温 SD 范围是 0.35—1.87℃, 气温 CV 范围是 1.1%—6.4%, 研究区西北部 DTR、SD 和 CV 较小, 反映了该地区气温波动较小, 相反东部、中部的值明显高于周边, 表明气温变化幅度较大。

白天和夜间热环境的空间分布存在较大差异(图 5)。研究区平均气温最高的 12 个小时是 3:00—15:00 (UTC), 9:00 平均气温最高, 达到了 31.7℃(图 6), 因此本文将白天高温时段设定为 3:00—15:00, 夜间低温

时段设定为 15:00—3:00。白天(3:00—15:00)气温范围为 27.5—32.9℃,平均气温 31.0℃,SD 为 0.6℃。夜间(15:00—3:00)气温平均值和 SD 分别为 29.0℃和 0.4℃。在气温值较高的地区,夜间的 ΔT 比白天高。

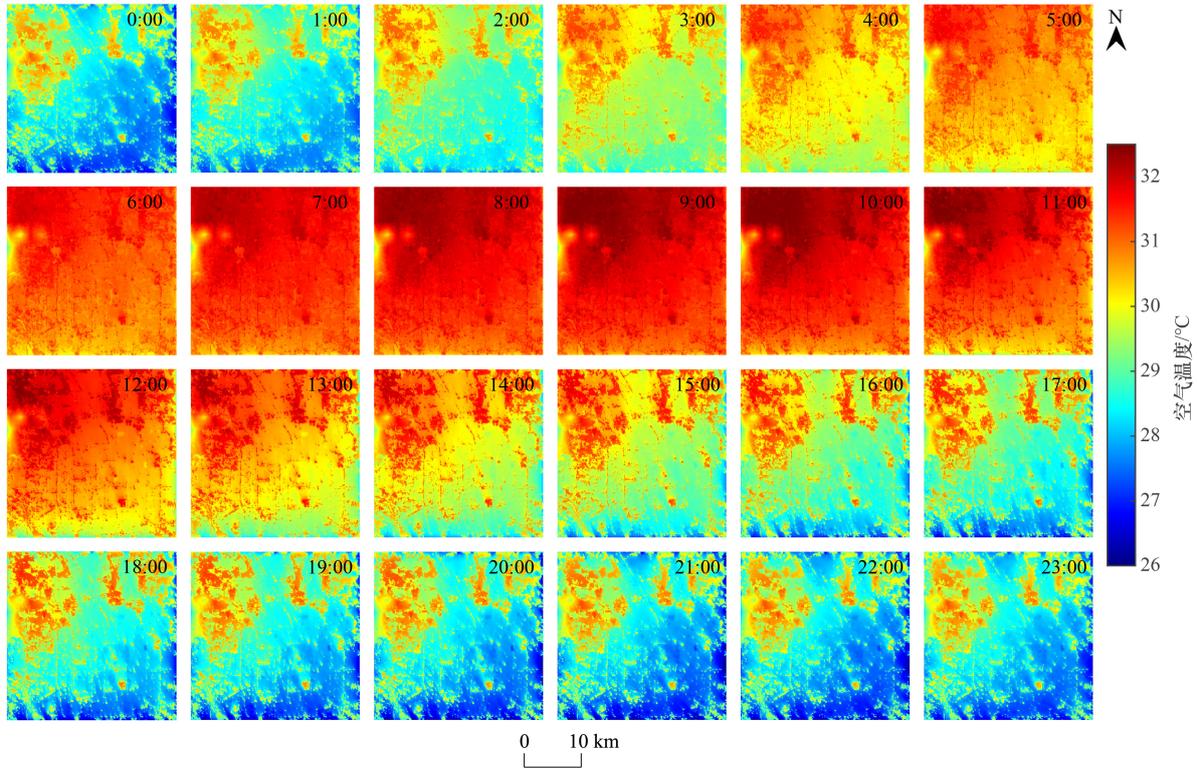


图 5 研究区 2 m 高度逐小时(UTC)平均气温空间分布

Fig.5 Distribution of hourly (UTC) average temperature at 2 meters height in the study area

2.2 绿地气温调节

2.2.1 日尺度降温效果

绿地百分比与夏季城市热环境显著相关,且对城市昼夜气温调节能力影响差异较大(表 1、图 7)。夜间随着绿地百分比的增加,降温效果显著减缓。当绿地百分比低于 60%时,绿地每增加 20%,气温比周边高 0.2℃;而当绿地高于 60%时,每增加 20%,气温比周边高 0.5℃ ($R^2 = 0.2, P < 0.01$)。相比于夜间,绿地对白天热环境分布的影响略有减弱。此外,随着绿地百分比增加,气温 DTR、SD 以及 CV 显著下降,即绿地能显著减小每日的气温波动程度,尤其是当绿地百分比超过 80%时,气温 DTR、SD 和 CV 大幅下降,气温变化幅度能得到有效控制,防止昼夜过热或过冷。

当绿地百分比相近时,空间配置(形状特征和空间组合)也是影响城市热环境的重要因素(图 8)。研究区绿地的主要配置类型是 B 类(面),网格比例约占 40%。白天高温时段,配置类型为 C 类(面-面)的绿地降温效果较好,而 A 类(线)绿地降温效果较差;夜间低温时

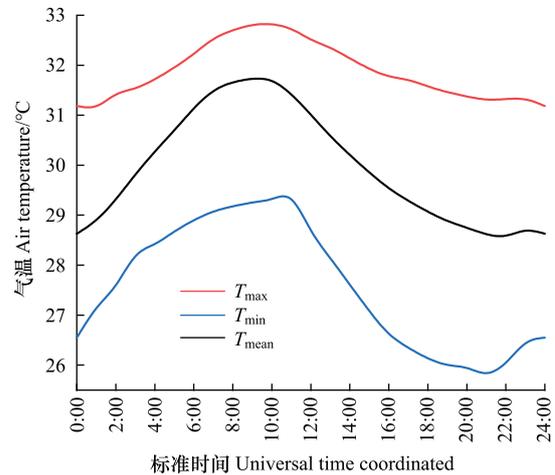


图 6 研究区 2 m 高度逐小时(UTC)气温变化

Fig.6 Hourly(UTC) temperature variation at 2 meters height in the study area

T_{max} :研究区最高气温; T_{min} :研究区最低气温; T_{mean} :研究区平均气温

段,配置类型为 C 类(面-面)和 F 类(混合)的绿地降温效果明显,B 类(面)和 D 类(线-面)绿地降温效果相对较弱。从绿地空间配置对气温波动的影响来看(表 1),各类型绿地的气温波动从低到高依次是 B 类(面)、C 类(面-面)、D 类(线-面)、F 类(混合)、E 类(线-线)和 A 类(线),其中 B 类、C 类绿地的气温波动指标明显低于 A 类和 E 类,表明面状绿地的气温稳定性要高于线状绿地;而 C 类绿地气温波动略高于 B 类,表明单一斑块的面状绿地气温稳定性要高于零散斑块绿地。因此,城市绿地的空间配置能够在一定程度上影响昼夜气温及其稳定性。

表 1 不同结构绿地的气温调节特征统计

Table 1 Statistical analysis of temperature regulation characteristics in different types of green spaces

绿地景观结构 Landscape structure of green spaces	白天最高气温 空间差异变化 Differences in daytime maximum temperatures/°C	夜间最低气温 空间差异变化 Differences in nighttime minimum temperatures/°C	日平均气温 空间差异变化 Differences in average daily temperatures/°C	日较差 Diurnal temperature range/°C	标准差 Standard deviation/°C	变异系数 Coefficient of variation/%	
组分	0—20%	-0.04	-0.34	-0.20	3.45	1.21	4.08
Composition	20%—40%	-0.01	-0.22	-0.12	3.36	1.18	3.96
	40%—60%	0.06	0.06	0.07	3.18	1.11	3.70
	60%—80%	0.11	0.49	0.32	2.89	1.00	3.33
	80%—100%	0.00	1.27	0.66	2.20	0.75	2.46
	空间配置	线	-0.01	-0.27	-0.15	3.41	1.20
Configuration	面	0.00	0.38	0.20	2.90	1.01	3.36
	面-面	0.02	0.05	0.04	3.18	1.11	3.72
	线-面	0.02	-0.01	0.01	3.22	1.12	3.77
	线-线	-0.01	-0.24	-0.13	3.40	1.19	4.01
	混合型	0.00	-0.14	-0.07	3.32	1.16	3.90
植被类型	乔木	0.04	1.13	0.61	2.32	0.79	2.61
	灌木	-0.06	-0.09	-0.09	3.24	1.14	3.82
	草地	0.10	0.39	0.26	2.98	1.04	3.45

植被类型对昼夜气温的调节作用也存在明显差异(表 1)。在白天高温时段,乔木、灌木树冠密集,在白天由于遮荫和蒸腾作用,降温效果比草地更为显著。而在夜间低温时段,乔木将热量保存在树冠下,不利于白天热量的消散,降温效果明显减弱。从植被类型对气温波动的影响来看,乔木周边的气温稳定性明显高于灌木和草地。

2.2.2 小时尺度气温调节

随着研究区总体气温的升高,不同结构的绿地对气温的调节能力也发生显著变化。图 9 显示了不同结构绿地的气温调节能力与研究区平均气温的关系,斜率越小,表明该结构类型的绿地在极端高温下的降温效果越好。随着总体气温升高,绿地百分比越高,降温效果越好,尤其是当平均气温高于 32°C 时,增加绿地面积对白天高温的降温效果最明显。在白天最热的时刻(平均气温超过 36°C),高绿地率(>80%)网格气温比低绿地率(<20%)网格低约 2°C。因此在极端高温的情况下,增加城市绿地面积能更大程度地发挥绿地的降温效应。相对于绿地百分比,绿地空间配置对白天高温影响较小,配置类型 B(面)比其他配置类型的绿地高温平均下降 1°C。此外,在白天极端高温下,乔木对城市热环境的降温效果好于灌木和草地(图 9)。

从不同绿地要素在逐小时气温调节效果来看(图 10),气温调节能力受绿地面积比例影响较大。在白天高温时段的升温阶段(3:00—9:00),绿地百分比越高, ΔT 下降幅度越大,绿地的降温效果越强烈。绿地百分比为 80%—100%的网格对应的 ΔT 平均下降 0.6°C,百分比为 60%—80%的网格 ΔT 下降 0.1°C,而绿地百分比低的区域,绿地降温效果较弱,百分比为 0%—20%的网格 ΔT 上升 0.1°C。在夜间低温时段的降温阶段

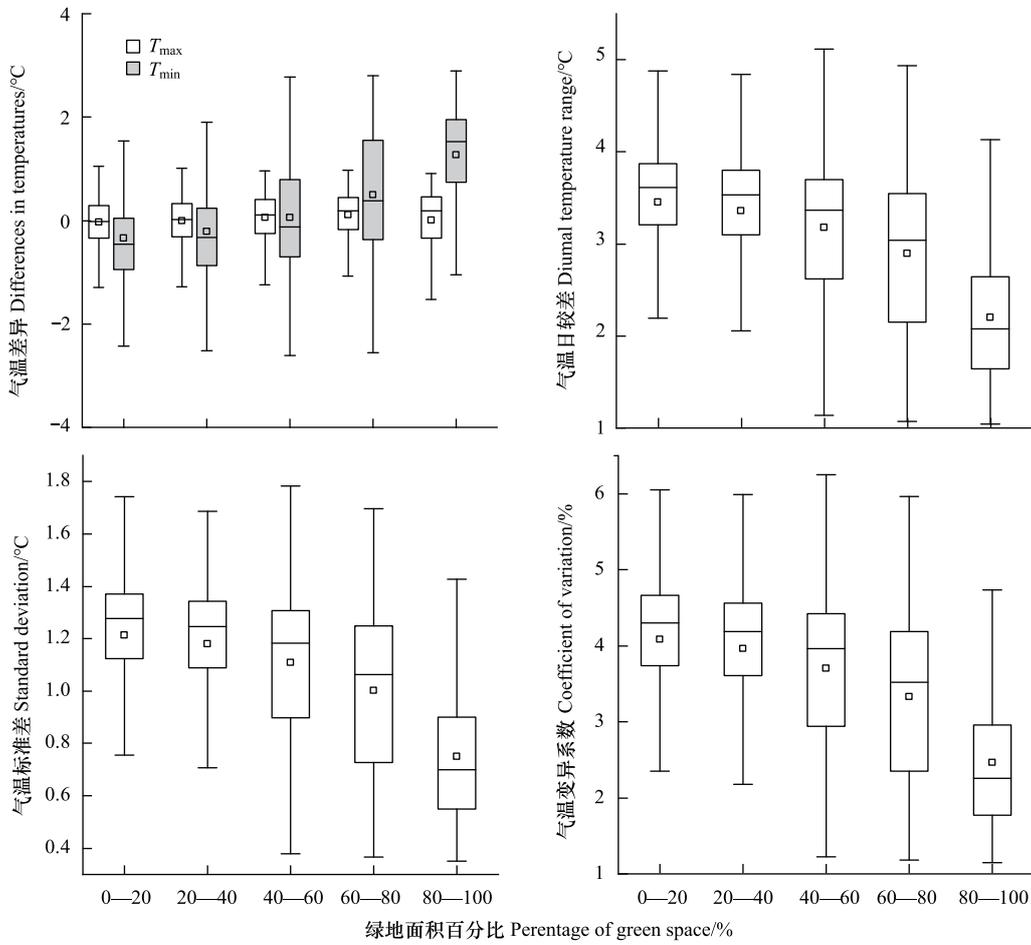


图 7 绿地比例和气温变化之间的关系

Fig.7 Relationship between green spaces proportion and changes in temperature

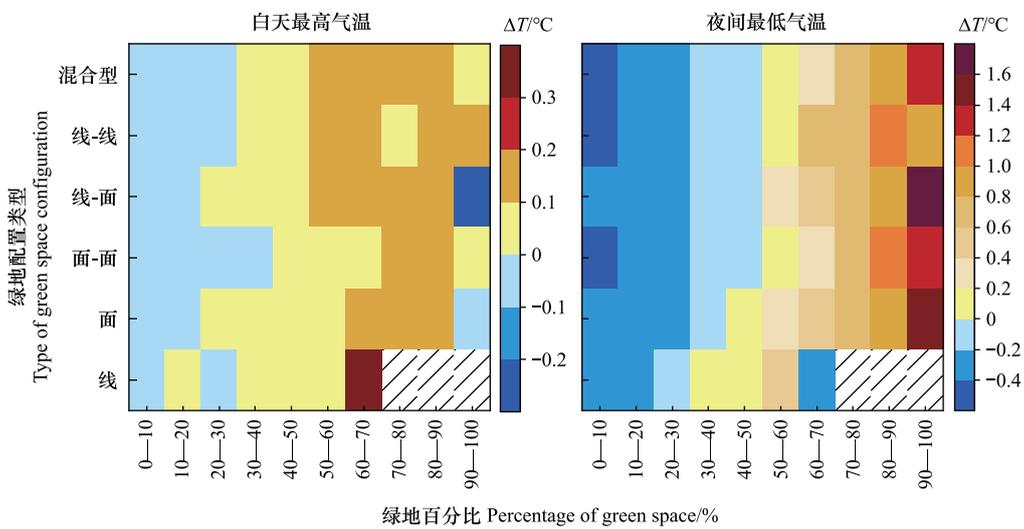


图 8 绿地配置类型对昼夜气温的调节能力

Fig.8 The temperature regulation capacity of different green spaces configurations during day and night

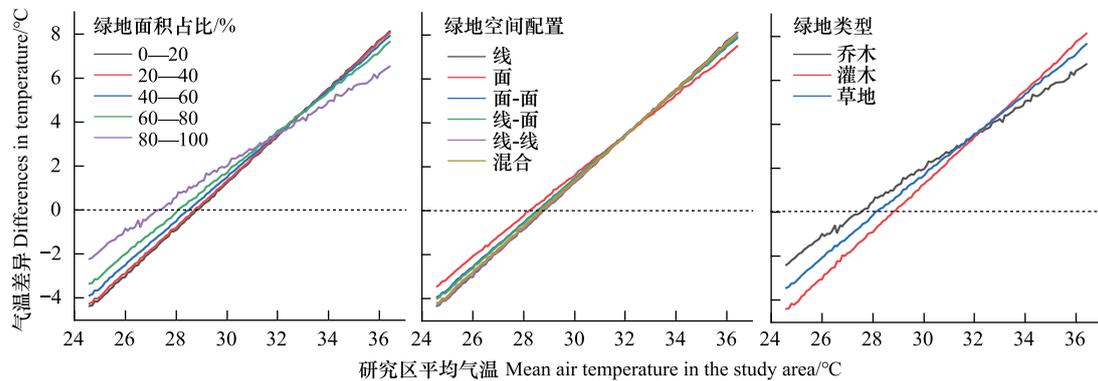


图9 不同气温环境下绿地面积、配置和植被类型的热调节能力

Fig.9 Thermal regulation capacity of green spaces with different area proportion, configuration, and vegetation types under different temperature conditions

(15:00—21:00), 则呈现出与白天升温阶段相反的结果, 绿地百分比为 80%—100% 的网格对应的夜间 ΔT 比周边地区高 0.4°C, 而占比 60%—80% 的网格夜间 ΔT 比周边高 0.1°C, 占比为 0%—20% 的网格夜间 ΔT 比周边低 0.1°C。在最冷的时刻(21:00), 随着绿地百分比增加, 气温最高上升 1.5°C。相似的结果还体现在绿地空间配置和绿地类型上。面状绿地对白天升温的减缓效果较好, 聚集的绿地斑块缓解高温的效果要好于分散斑块, 线状绿地的热缓解能力较弱。乔木的白天高温热缓解效果较好, 其次是草地和灌木。乔木、灌木和草地 ΔT 昼夜最大差异分别为 1.0°C、0.2°C 和 0.3°C。绿地在白天升温时段和夜间降温时段的气温调节能力呈现近乎相反的结果。总体来看, 在白天最热的时刻, 绿地百分比高、斑块为面状且聚集, 以及植被类型为乔木的绿地对城市热环境的降温效果较好, 而在夜间最冷的时刻, 该结构绿地能起到良好的保温效果。

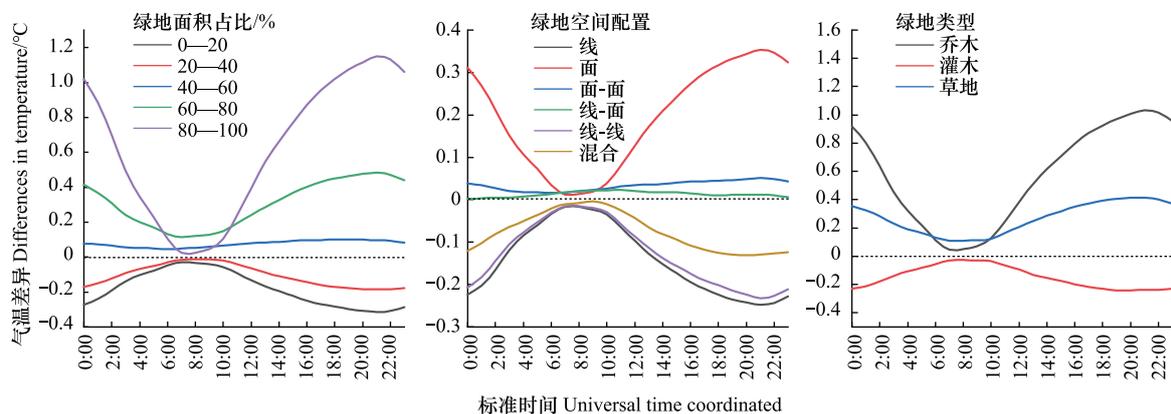
图10 不同结构的绿地逐小时 ΔT 变化

Fig.10 Hourly variation of ΔT in different configurations of green spaces

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文深入探讨了城市绿地景观结构与夏季昼夜气温之间的关系, 结果表明不同绿地景观结构对夏季高温的降温效果存在显著差异。绿地空间布局和形状特征是影响降温效果的重要因素, 此外绿地属性特征以及绿地与周边环境进行能量交换的特征也不容忽视。在选择和规划绿地时, 需要考虑其遮荫和蒸腾作用以达到更好的降温效果^[27]。关于绿地空间配置, 已有研究表明, 面积大、斑块聚集连续的绿地能产生更强的冷岛效

应^[39,43],增加斑块边缘可能会改善绿地与周边区域之间的能量流动和交换,并为周边区域提供更多遮荫,从而导致气温下降^[22]。在日尺度上,绿地在白天的降温效果最佳^[56],且受绿地垂直结构影响较大^[11,31],在季节尺度上,绿地在温暖季节的降温潜力要显著高于凉爽季节,尤其是在夏季达到峰值^[2,33]。本文结果显示绿地白天降温效果明显而夜间降温效果大幅减缓,与已有植被缓解 UHI 效应的研究相一致^[88],原因可能是城市街区过密的树木降低了风速,空气不流通导致夜间建筑释放热量无法有效逸散^[89]。而在香港的研究显示,城市绿地降温效应昼夜差异显著,且日间强于夜间^[90],日间热效应主要受气温和太阳辐射的影响^[91],而夜间热效应主要受风速影响^[92],这些都与本文研究结果一致。

随着城市快速发展和 UHI 的加剧,城市居民热舒适度下降。热舒适度不仅与地表温度有关,还与气温、平均辐射温度、空气湿度和风速有关,进一步理解热环境舒适度、提出缓解策略对目前城市热环境研究至关重要^[93]。城市规划部门应综合考虑人口动态和气候多变性^[94],在规划绿地时考虑绿地类型、形状特征和空间布局,合理规划布局蓝绿空间^[6],优化绿地配置,改变城市空气动力学特性,增强蒸散作用,促进空气和热量的垂直输送,从而有效地缓解夏季 UHI 效应^[19,27,95-97]。乔木树冠是调节城市微气候、改善热舒适度有效策略,能够拦截 70%—90% 的太阳辐射,并通过减少短波和长波辐射来冷却城市地表;通过蒸散作用,利用太阳能将液态水转化为水汽,用潜热取代显热,增加周围环境湿度,降低空气温度,显著提高热舒适度。此外,增加地表反照率也能有效减缓 UHI 效应^[94]。适当设置通风廊道,通过增加空气流动提高潜热输送而降低空气温度,水体通过吸收太阳短波辐射及向大气中输送潜热的方式降低周围气温,提高热舒适程度。因此,在城市规划过程中,通过合理规划绿地和水体面积、形状、分布,有效提升热舒适程度^[98]。此外,本文结果显示乔木、灌木等在白天和夜间的降温效果具有显著差异,城市规划管理部门可以根据城市特点和需求,选择合适的植被类型进行绿化,例如在夏季炎热、阳光强烈的地区,可优先考虑种植乔木以发挥降温效应等。合理配置乔灌木,可以发挥不同植物类型的优势,最大程度提高城市绿地的降温效应,改善城市微气候。

本文存在几个方面的不确定性:(1)本文根据研究区实际情况对 LCZ 分类体系进行主观的合并调整,可能会造成气温模拟结果的偏差。此外,先前验证工作表明,UrbClim 模型与再分析数据结合模拟的气温结果存在轻微的变暖偏差^[75]。(2)绿地的气温调节能力也可能受到其他因素的影响,例如水体面积和形状是调节城市热环境的重要因素^[95],建筑高度、街道宽度和方向能够影响风速和风向,从而影响冷湿空气在绿地的流动,未来工作需要进一步研究蓝色、灰色空间对城市绿地降温效果的影响。(3)空调、汽车等人为热排放也是影响城市夏季热环境的重要因素,需要更精细分辨率的 AHF 数据开展进一步的研究。

3.2 结论

利用 UrbClim 模型模拟了夏季高温日北京城区 100 m 网格尺度、2 m 高度的逐小时气温,解析了网格单元内城市绿地的结构特征,揭示了不同结构绿地降温效果的差异规律。结果显示:北京城区内部的 UHI 由一个主热岛和分散在周围的多个小热岛组成,北部气温较高、东南部气温较低,白天的最高气温范围是 30.7—34.2℃,夜间最低气温范围是 26.0—31.7℃。绿地景观结构显著影响气温的空间格局和波动变化,高覆盖绿地夜间降温效果减弱,并能减小每日的气温波动程度,尤其是当绿地超过 80% 时效果最显著。面状、聚集斑块绿地气温稳定性要强于线状、零散斑块绿地。植被类型对昼夜气温调节作用不同,白天乔木灌木降温效果比草地更显著,而夜间乔木保温作用明显。此外,在一天最热的时刻,绿地百分比高、斑块为面状且聚集、植被类型为乔木的绿地在白天的降温效果较好,而在夜间最冷的时刻,这种绿地减缓了白天热量的消散,保温效果显著。本研究基于精细尺度(100 m、逐小时)的气温模拟数据和高分辨率(5 m)绿地数据,提出了科学合理的绿地景观结构分析方案,揭示了绿地景观结构对城市内部热环境的影响,有助于加深对城市绿地与缓解 UHI 之间关系的理解,可为相关部门开展城市规划工作和缓解夏季城市高温提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Kim S W, Brown R D. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: a systematic literature review. *The Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146389.

- [2] Wang X J, Dallimer M, Scott C E, Shi W T, Gao J X. Tree species richness and diversity predicts the magnitude of urban heat island mitigation effects of greenspaces. *The Science of the Total Environment*, 2021, 770: 145211.
- [3] 孟丹, 李小娟, 宫辉力, 赵文吉. 北京地区热力景观格局及典型城市景观的热环境效应. *生态学报*, 2010, 30(13): 3491-3500.
- [4] 庞新坤, 孙然好. 城市公园景观秋冬季动态热效应. *生态学报*, 2015, 35(12): 4196-4202.
- [5] Cao C, Lee X H, Liu S D, Schultz N, Xiao W, Zhang M, Zhao L. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution. *Nature Communications*, 2016, 7: 12509.
- [6] Venter Z S, Krog N H, Barton D N. Linking green infrastructure to urban heat and human health risk mitigation in Oslo, Norway. *The Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136193.
- [7] Chang Y, Xiao J F, Li X X, Froking S, Zhou D C, Schneider A, Weng Q H, Yu P, Wang X F, Li X, Liu S G, Wu Y P. Exploring diurnal cycles of surface urban heat island intensity in Boston with land surface temperature data derived from GOES-R geostationary satellites. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 144224.
- [8] Christidis N, Jones G S, Stott P A. Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change*, 2015, 5(1): 46-50.
- [9] Ortiz L, González J E, Horton R, Lin W Y, Wu W, Ramamurthy P, Arend M, Bornstein R. High - resolution projections of extreme heat in New York City. *International Journal Of Climatology*, 2019, 39(12): 4721-4735.
- [10] Wang Z H, Upreti R. A scenario analysis of thermal environmental changes induced by urban growth in Colorado River Basin, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 181: 125-138.
- [11] Morakinyo T E, Ouyang W L, Lau K K L, Ren C, Ng E. Right tree, right place (urban canyon): tree species selection approach for optimum urban heat mitigation-development and evaluation. *The Science of the Total Environment*, 2020, 719: 137461.
- [12] 何宝杰. 澳大利亚城市高温缓解技术与策略体系. *国际城市规划*, 2023, 38(6): 193-199.
- [13] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 504-513.
- [14] Quan J L, Chen Y H, Zhan W F, Wang J F, Voogt J, Wang M J. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 33-46.
- [15] Zhao L, Lee X H, Smith R B, Oleson K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511: 216-219.
- [16] Meng Q Y, Zhang L L, Sun Z H, Meng F, Wang L, Sun Y X. Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: a 12-year case study in Beijing, China. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 826-837.
- [17] Firozjaei M K, Weng Q H, Zhao C H, Kiavarz M, Lu L L, Alavipanah S K. Surface anthropogenic heat islands in six megacities: an assessment based on a triple-source surface energy balance model. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 242: 111751.
- [18] Peng J, Jia J L, Liu Y X, Li H L, Wu J S. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 255-267.
- [19] Gunawardena K R, Wells M J, Kershaw T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *The Science of the Total Environment*, 2017, 584/585: 1040-1055.
- [20] 尹名强, 胡纹, 何宝杰. 美国高温适应规划探索及凤凰城实践的探究与启示. *西部人居环境学刊*, 2023, 38(6): 1-8.
- [21] Tian L X, Yang J, Jin C. Dynamic changes in land cover and its effect on urban heat islands. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 17: 2386-2395.
- [22] Zhou W Q, Huang G L, Cadenasso M. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102: 54-63.
- [23] Peng S S, Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Otle C, Bréon F M, Nan H J, Zhou L M, Myneni R B. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 696-703.
- [24] Du S H, Xiong Z Q, Wang Y C, Guo L. Quantifying the multilevel effects of landscape composition and configuration on land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 84-92.
- [25] He T, Wang N, Chen J Y, Wu F, Xu X L, Liu L, Han D R, Sun Z Y, Lu Y S, Hao Y, Qiao Z. Direct and indirect impacts of land use/cover change on urban heat environment: a 15-year panel data study across 365 Chinese cities during summer daytime and nighttime. *Landscape Ecology*, 2024, 39(3): 67.
- [26] Peng J, Hu Y X, Dong J Q, Liu Q Y, Liu Y X. Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: a radius approach. *The Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136792.
- [27] Wong N H, Tan C L, Kolokotsa D D, Takebayashi H. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2: 166-181.
- [28] Liu H, Huang B Z, Cheng X, Yin M Q, Shang C, Luo Y, He B J. Sensing-based park cooling performance observation and assessment: a review. *Building and Environment*, 2023, 245: 110915.
- [29] Li X X, Li W W, Middel A, Harlan S L, Brazel A, Turner II B L. Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: combined effects of land composition and configuration and cadastral-demographic-economic factors. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 233-243.
- [30] Peng J, Xie P, Liu Y X, Ma J. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing Of Environment*, 2016, 173: 145-155.

- [31] Chen J K, Zhan W F, Jin S G, Han W Q, Du P J, Xia J S, Lai J M, Li J F, Liu Z H, Li L, Huang F, Ding H Y. Separate and combined impacts of building and tree on urban thermal environment from two- and three-dimensional perspectives. *Building and Environment*, 2021, 194: 107650.
- [32] Peng J, Ma J, Liu Q Y, Liu Y X, Hu Y N, Li Y R, Yue Y M. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China; an urban-rural contrast perspective. *The Science of the Total Environment*, 2018, 635: 487-497.
- [33] Grilo F, Pinho P, Aleixo C, Catita C, Silva P, Lopes N, Freitas C, Santos-Reis M, McPhearson T, Branquinho C. Using green to cool the grey: modelling the cooling effect of green spaces with a high spatial resolution. *The Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138182.
- [34] Shen H F, Huang L W, Zhang L P, Wu P H, Zeng C. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: a 26-year case study of the city of Wuhan in China. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 172: 109-125.
- [35] Petri A C, Wilson B, Koeser A. Planning the urban forest: adding microclimate simulation to the planner's toolkit. *Land Use Policy*, 2019, 88: 104117.
- [36] Yu K, Chen Y H, Liang L, Gong A D, Li J. Quantitative analysis of the interannual variation in the seasonal water cooling island (WCI) effect for urban areas. *The Science of the Total Environment*, 2020, 727: 138750.
- [37] Fan H Y, Yu Z W, Yang G Y, Liu T Y, Liu T Y, Hung C H, Vejre H. How to cool hot-humid (Asian) cities with urban trees? An optimal landscape size perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 338-348.
- [38] Han D R, An H M, Cai H Y, Wang F, Xu X L, Qiao Z, Jia K, Sun Z Y, An Y. How do 2D/3D urban landscapes impact diurnal land surface temperature: insights from block scale and machine learning algorithms. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104933.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型. *生态学报*, 2017, 37(23): 7769-7780.
- [42] Li J X, Song C H, Cao L, Zhu F G, Meng X L, Wu J G. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3249-3263.
- [43] Li Y Y, Zhang H, Kainz W. Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing Shanghai metropolis, China: using time-series of Landsat TM/ETM+ data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 19: 127-138.
- [44] Guo G H, Wu Z F, Xiao R, Chen Y B, Liu X N, Zhang X S. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 135: 1-10.
- [45] Zhou W Q, Qian Y G, Li X M, Li W F, Han L J. Relationships between land cover and the surface urban heat island: seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures. *Landscape Ecology*, 2014, 29(1): 153-167.
- [46] 乐柯君, 方陆明, 何小兵, 郑辛煜. 森林城市景观格局与热环境的关系——以龙泉市为例. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3066-3074.
- [47] 王海涛. 基于大数据的景观格局时空演变及其环境效应研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [48] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2077-2086.
- [49] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 何春阳. 上海城市热环境的空间格局分析. *地理科学*, 2002, 22(3): 317-323.
- [50] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 绿地格局对城市地表热环境的调节功能. *生态学报*, 2013, 33(8): 2372-2380.
- [51] 黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 邱全毅. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例. *生态学报*, 2012, 32(2): 622-631.
- [52] 王耀斌, 赵永华, 韩磊, 奥勇, 蔡健. 西安市景观格局与城市热岛效应的耦合关系. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2621-2628.
- [53] 杨丽萍, 王乐, 孙晓辉, 刘晶. 基于遥感的西安市热力景观格局演变. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 250-255, 264.
- [54] 马勇刚, 塔西甫拉提·特依拜, 黄粤, 杨金龙. 城市景观格局变化对城市热岛效应的影响——以乌鲁木齐市为例. *干旱区研究*, 2006, 23(1): 172-176.
- [55] Zhang R, Yang J, Ma X Y, Xiao X M, Xia J H. Optimal allocation of local climate zones based on heat vulnerability perspective. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99(1): 104981.
- [56] Huang F, Zhan W F, Wang Z H, Voogt J, Hu L Q, Quan J L, Liu C, Zhang N, Lai J M. Satellite identification of atmospheric-surface-subsurface urban heat islands under clear sky. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 250: 112039.
- [57] 林冰钰, 杨心怡, 张颖诗, 吴铃铃, 王瑜, 郭冠华. 广州市核心区城市绿地降温效应研究. *生态科学*, 2021, 40(2): 26-34.
- [58] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展. *生态学报*, 2018, 38(3): 1134-1147.
- [59] 张伟伟, 贾若愚, 田明, 徐新良, 刘佳雯, 韩冬锐, 贺瞳, 孙宗耀, 从辉, 乔治. 利用 ECOSTRESS 探究 LCZ 类间和类内城市热环境日动态变化. *地球信息科学学报*, 2024, 26(3): 679-692.
- [60] 魏琳沅, 孙然好. 城市绿地和建筑格局影响热环境的模拟研究. *生态学报*, 2021, 41(11): 4300-4309.
- [61] 肖逸, 戴斯竹, 赵兵. 小尺度公园对于城市热岛效应的缓解作用——基于南京市中心城区社区公园的实证研究. *景观设计学*, 2020, 8(3): 26-43.
- [62] 谢紫霞, 张彪, 余欣璐, 郝亮. 上海城市绿地夏季降温效应及其影响因素. *生态学报*, 2020, 40(19): 6749-6760.
- [63] Lai J M, Zhan W F, Voogt J, Quan J L, Huang F, Zhou J, Bechtel B, Hu L Q, Wang K C, Cao C, Lee X H. Meteorological controls on daily variations of nighttime surface urban heat islands. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112198.
- [64] Quaranta E, Dorati C, Pistocchi A. Water, energy and climate benefits of urban greening throughout Europe under different climatic scenarios.

- Scientific Reports, 2021, 11: 12163.
- [65] 刘莹. 苏州下垫面格局改变对热环境的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [66] Yang J C, Bou-Zeid E. Designing sensor networks to resolve spatio-temporal urban temperature variations: fixed, mobile or hybrid? *Environmental Research Letters*, 2019, 14(7): 074022.
- [67] 宫阿都, 徐捷, 赵静, 李京. 城市热岛研究方法概述. *自然灾害学报*, 2008, 17(6): 96-99.
- [68] 江学顶, 夏北成. 珠江三角洲城市群热环境空间格局动态. *生态学报*, 2007, 27(4): 1461-1470.
- [69] 杨浩, 王子羿, 王婧, 孟娜. 京津冀城市群土地利用变化对热环境的影响研究. *自然资源学报*, 2018, 33(11): 1912-1925.
- [70] 陈燕, 蒋维楣, 吴润, 顾骏强, 徐集云. 利用区域边界层模式对杭州市热岛的模拟研究. *高原气象*, 2004, 23(4): 519-528.
- [71] Verdonck M L, Demuzere M, Hooyberghs H, Priem F, Van Coillie F. Heat risk assessment for the Brussels capital region under different urban planning and greenhouse gas emission scenarios. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109210.
- [72] De Ridder K, Lauwaet D, Maiheu B. UrbClim-A fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate*, 2015, 12: 21-48.
- [73] Lauwaet D, De Ridder K, Saeed S, Brisson E, Chatterjee F, van Lipzig N P M, Maiheu B, Hooyberghs H. Assessing the current and future urban heat island of Brussels. *Urban Climate*, 2016, 15: 1-15.
- [74] De Ridder K, Schayes G. The IAGL land surface model. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(2): 167-182.
- [75] García-Díez M, Lauwaet D, Hooyberghs H, Ballester J, De Ridder K, Rodó X. Advantages of using a fast urban boundary layer model as compared to a full mesoscale model to simulate the urban heat island of Barcelona. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(12): 4439-4450.
- [76] Kourtidis K, Georgoulis A K, Rapsomanikis S, Amiridis V, Keramitsoglou I, Hooyberghs H, Maiheu B, Melas D. A study of the hourly variability of the urban heat island effect in the Greater Athens Area during summer. *The Science of the Total Environment*, 2015, 517: 162-177.
- [77] Chen L, Zhang M G, Zhu J, Wang Y W, Skorokhod A. Modeling impacts of urbanization and urban heat island mitigation on boundary layer meteorology and air quality in Beijing under different weather conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(8): 4323-4344.
- [78] 乔治, 黄宁钰, 徐新良, 孙宗耀, 吴晨, 杨俊. 2003—2017年北京市地表热景观时空分异特征及演变规律. *地理学报*, 2019, 74(3): 475-489.
- [79] 张光智, 徐祥德, 王继志, 杨元琴. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及其演变. *应用气象学报*, 2002, 13(S1): 43-50.
- [80] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [81] 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.
- [82] 林中立, 徐涵秋. 基于LCZ的城市热岛强度研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(5): 713-722.
- [83] 穆清晨. 北京土地利用精细分类方法及对城市气象模拟的改进[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [84] Li Z H, He W, Cheng M F, Hu J X, Yang G Y, Zhang H Y. SinoLC-1: the first 1 m resolution national-scale land-cover map of China created with a deep learning framework and open-access data. *Earth System Science Data*, 2023, 15(11): 4749-4780.
- [85] 刘艳红, 郭晋平, 魏清顺. 基于CFD的城市绿地空间格局热环境效应分析. *生态学报*, 2012, 32(6): 1951-1959.
- [86] 同济大学, 李铮生. 城市园林绿地规划与设计(第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [87] 张昌顺, 谢高地, 鲁春霞, 刘春兰, 李娜, 王硕, 孙艳芝. 北京城市绿地对热岛效应的缓解作用. *资源科学*, 2015, 37(6): 1156-1165.
- [88] 胡凤宁, 周亮. 城市绿色基础设施降温作用及其影响因素研究进展. *生态学报*, 2023, 43(11): 4445-4460.
- [89] Huang L M, Li J L, Zhao D H, Zhu J Y. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 7-17.
- [90] Fung C K W, Jim C Y. Microclimatic resilience of subtropical woodlands and urban-forest benefits. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 42: 100-112.
- [91] 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.
- [92] 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.
- [93] Rahman M A, Hartmann C, Moser-Reischl A, von Strachwitz M F, Paeth H, Pretzsch H, Pauleit S, Rötzer T. Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 287: 107947.
- [94] Manoli G, Faticchi S, Schläpfer M, Yu K L, Crowther T W, Meili N K, Burlando P, Katul G G, Bou-Zeid E. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 2019, 573: 55-60.
- [95] Ampatzidis P, Kershaw T. A review of the impact of blue space on the urban microclimate. *The Science of the Total Environment*, 2020, 730: 139068.
- [96] Yao R, Huang X, Gong W, Xia X G. Greening in rural areas increases the surface urban heat island intensity. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(4): 2204-2212.
- [97] Yao R, Wang L C, Huang X, Liu Y T, Niu Z G, Wang S Q, Wang L Z. Long-term trends of surface and canopy layer urban heat island intensity in 272 cities in the mainland of China. *The Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145607.
- [98] 吴志丰, 陈利顶. 热舒适度评价与城市热环境研究: 现状、特点与展望. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1364-1371.