

基于生态服务效能提升的城市竹林微气候效应评测研究 ——以上海三林楔形绿地为例

Evaluation of Urban Bamboo Forest Microclimate Effects Based on Ecosystem Service Enhancement: A Case Study of Sanlin Green Space, Shanghai

徐方斐¹ 丁真慧^{2*} 颜 琦²
XU Fangfei¹ DING Zhenhui^{2*} YAN Qi²

(1.上海市城市建设设计研究总院, 上海 200125; 2.同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092)
(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai, China, 200125; 2. College of
Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092)

文章编号: 1000-0283(2025)08-0131-11
DOI: 10. 12193 /j. laing. 2025. 08. 0131. 015
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-05-16
修回日期: 2025-06-17

摘 要

城市热岛效应与极端高温事件日趋严重, 如何通过生态设计有效改善城市微气候与人体热舒适度, 已成为风景园林学科当前关注的重要议题。竹林作为城市绿地系统的重要组成部分, 具有较强的生态调节潜力, 但其微气候效应及热舒适性改善能力尚未得到系统量化解析。从生态系统服务范畴中的“调节服务”视角切入, 以上海市三林楔形绿地北部片区的城市竹林为研究对象, 基于夏季高温高湿天气下的实地观测数据, 采用湿球黑球温度 (Wet Bulb Globe Temperature, WBGT) 与热指数 (Heat Index, HI) 指标, 综合评估不同竹种, 即毛竹 (*Phyllostachys edulis*)、乌哺鸡竹 (*Phyllostachys vivax*)、刚竹 (*Phyllostachys viridis*)、竹群落与非竹群落、以及不同空间结构 (林内与林缘) 对夏季微气候与热舒适度的调节效应。研究表明, 与非竹群落 (裸地、草地、混交林) 相比, 竹林群落较裸地在中午高温时段显著降低空气温度 (1.5 ~ 3.0℃)、提高相对湿度 (6% ~ 10%), 并显著改善人体热舒适度 (WBGT降低2 ~ 3个单位, HI降低约3 ~ 4个单位)。竹林内部区域微气候调节效应明显优于林缘区域, 进一步验证了林缘效应。此外, 三类竹种中, 刚竹与毛竹表现更佳, 其致密的冠层结构、高叶面积指数 (3.7 ~ 4.1) 和较低的间隙率 ($\leq 22\%$) 显著增强了微气候调节效果 (降低WBGT 2 ~ 3单位、提高湿度6%以上), 而乌哺鸡竹调节能力相对较弱, 与其较低的叶面积指数和冠层透光性有关。为城市造林项目的竹林资源配置优化以及未来城市绿地生态服务高效能优化设计提供了科学依据与实践参考。

关键词

城市热岛效应; 生态服务效能; 微气候调节; 热舒适度; 城市竹林; 气候适应性

Abstract

The escalating severity of the urban heat island (UHI) phenomenon and the occurrence of exceptionally high-temperature events have garnered increasing attention within the discipline of landscape architecture concerning how ecological design can effectively enhance urban microclimates and human thermal comfort. As a significant element of urban green space systems, bamboo forests exhibit considerable ecological regulatory potential; however, their microclimatic impacts and capacity to improve thermal comfort have not yet been comprehensively quantified. From the perspective of regulating services within ecosystem service frameworks, this study focuses on urban bamboo forests located in the northern section of the Sanlin wedge-shaped green space in Shanghai. Based on in situ observations conducted under high-temperature and high-humidity summer conditions, two composite thermal comfort indicators, Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) and Heat Index (HI), were utilized to comprehensively evaluate the microclimate regulation effects of various bamboo species, namely *Phyllostachys edulis*, *Phyllostachys vivax*, and *Phyllostachys viridis*. Additionally, the study compares the differences between bamboo and non-bamboo communities, as well as between interior and edge spatial structures. The findings indicate that, in comparison to non-bamboo communities (including bare land, grassland, and mixed forest), bamboo stands notably decreased air temperature

徐方斐

1985年生/女/浙江杭州人/高级工程师/研究方向为风景园林规划设计研究与实践

丁真慧

1998年生/女/江苏盐城人/在读博士研究生/研究方向为城市绿地系统及其生态服务效能优化

颜 琦

1999年生/男/浙江金华人/在读博士研究生/研究方向为风景园林规划设计及立体园林与数字技术

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 2410364@tongji.edu.cn

基金项目:
上海市住房和城乡建设管理委员会科研开发类项目“三林楔形绿地近自然植物群落营建与碳汇评估应用”(编号: 沪建科2024-002-015)

by 1.5~3.0°C and elevated relative humidity by 6%~10% during periods of midday heat, thereby effectively enhancing thermal comfort (with WBGT decreased by 2~3 units and HI decreased by approximately 3~4 units). Interior bamboo zones exhibited stronger microclimate regulation effects than edge zones, confirming the presence of an edge effect. Among the three bamboo species, *P. viridis* and *P. edulis* demonstrated the best performance. Their dense canopy structure, high Leaf Area Index (LAI: 3.7~4.1), and low gap fraction ($\leq 22\%$) significantly enhanced microclimate regulation (e.g., WBGT reduction by 2~3 units and humidity increase by over 6%). In contrast, *P. vivax* showed weaker regulatory ability, likely due to its lower leaf area index and higher canopy light penetration. This study provides a scientific foundation and practical reference for optimizing bamboo resource allocation in urban afforestation projects and for the high-efficiency design of ecological services in future urban green spaces.

Keywords

urban heat island effect; ecosystem service efficiency; microclimate regulation; thermal comfort; urban bamboo forest; climate adaptability

在全球气候变化加剧的大背景下，城市高温与极端热浪事件频发，已成为制约人居环境安全和城市可持续发展的关键问题之一^[1]。特别是在北亚热带季风气候区，如长三角地区，夏季高温极端天气更趋常态化，显著增加了城市热岛效应的强度和时空范围^[2]。面对高温风险的持续升级^[3]，如何通过景观介入提升城市气候适应性与环境韧性，已成为风景园林学科亟需回应的重要课题。作为绿色基础设施的重要组成部分，城市绿地可以通过植物蒸腾、冠层遮阴和地表辐射调节等生态过程^[4]，影响局地小气候，降低气温、增加湿度，提升人体热舒适性^[5]。Saaroni等^[6]基于多城市实测数据指出，乔木型城市绿地在高温时段可实现1.5°C以上的降温效应；Yan等^[7]则通过FLIR红外热成像研究发现，不同植物配置对地表温度调节差异最大可达5°C，并能够影响公园空间可达性与使用率。

竹林作为城市绿地系统中的特殊植被类型，因其高叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）、快速生物量累积和层状冠层结构，在高温高湿环境背景下展现出良好的蒸腾和遮阴能力，近年来逐渐被纳入气候适应型绿地研究的视野^[8]。在中国南方地区，竹林群落如毛竹（*Phyllostachys edulis*）广泛分布于城市公园、道路绿带和楔形绿地中，在满足景观审美与

文化表达的同时，也承担着重要的生态服务功能^[9]，其中微气候调节作为城市绿地典型的“调节服务”类型，与城市生态韧性和人居环境健康可持续发展密切相关。尽管如此，现有研究多集中于郊野型竹林的碳汇、水文或降温效应，系统探讨其微气候调节的研究仍较缺乏，且未能揭示城市情境下竹林群落的热环境调节能力^[10]。而从植物学结构特征出发，如冠层覆盖率、透光率和天空视域因子等对降温增湿效应的驱动机制，亦未形成统一的评价框架。不同竹种在群落结构、叶面积和冠层分布上差异显著，可能存在热调节效应的空间异质性^[8]，但城市竹林在空间内部（林内）与边界（林缘）的结构变化是否导致热舒适度显著分布差异，目前仍有待进一步实证量化。

与此同时，目前城市热舒适研究仍以温度、湿度等单因子指标为主，缺乏以人体感知为中心的综合评估方法，未能全面反映人体热负荷体验。在热浪频发的极端气候背景下，以湿球黑球温度（Wet Bulb Globe Temperature, WBGT）与热应力指数（Heat Index, HI）为代表的综合热舒适度评价指标因整合了气温与湿度的共同作用，还融入风速、太阳辐射等因素，更适用于复杂城市环境中绿地微气候效应与热舒适度评测，但目前相关方法在竹林生态研究中尚未得到充分使用。

此外，从全球视角来看，当前关于城市竹林微气候效应的研究以中国亚热带地区，尤其是浙江、福建等区域为主，研究多聚焦于竹林的降温增湿效应、碳汇能力及其对城市热环境的调节作用^[11]。相较而言，温带与热带城市的相关研究则较少，在温带如日本名古屋地区，竹林表现出良好的温度调节与蒸腾优势^[12]；而在热带地区，如亚马逊和巴西大西洋林区，竹林则因高蒸腾压力而呈现出与乔木型林地不同的水分调节策略^[13-14]。横向对比显示，不同气候带下竹林蒸腾调节机制存在地域性差异，但冠层结构因子如LAI和林冠闭合度在各气候带中均表现出一致的微气候调节效应^[15]。这一共性规律为探讨竹林生态服务的普适性规律提供了理论基础，也为城市绿地配置策略的气候适应性拓展提供了新思路。

基于上述研究，本文选取上海市中心区域重要生态绿地——三林楔形绿地北部竹林片区为研究对象，聚焦典型夏季高温高湿条件下城市竹林的微气候调节效应。研究通过实地监测与定量分析，重点探讨以下科学问题：（1）城市竹林是否显著改善夏季局地微气候条件；（2）竹种类型与空间位置（林内/林缘）是否存在热舒适度调节效应的显著差异；（3）其调节机制是否与冠层结构因子相关；（4）城市竹林是否具有适应极端高温的

生态服务潜力。为此，本研究选取WBGT与HI综合热舒适度评价指标，结合实测数据与统计建模，评估城市竹林群落的微气候调节效应与适应性机制，旨在为“气候适应型绿地”配置提供理论支撑。

1 研究区概况

选取位于上海市浦东新区的三林楔形绿地作为研究区，其地处城市副中心与近郊过渡带，是《上海市城市总体规划（2017–2035年）》中“三楔九廊”重要生态廊道之一，兼具生态调节与缓冲风廊通道功能。研究区地处 $31^{\circ}11'N$ ， $121^{\circ}32'E$ ，属于北亚热带季风气候区，四季分明，雨热同期。夏季（6–8月）平均气温约为 $27.8^{\circ}C$ ，2023年极端高温日（ $\geq 35^{\circ}C$ ）达47 d，年均相对湿度为76%~85%，具有典型的“高温高湿”特征^[6]。研究区绿地资源密集，空间类型多样，其中北部竹林片区面积约 2.3hm^2 ，主要为自然更新与人工混植的毛竹、刚竹（*Phyllostachys viridis*）、乌哺鸡竹（*Phyllostachys vivax*）、孝顺竹（*Bambusa multiplex*）、金镶玉竹（*Phyllostachys aureosulcata* ‘Spectabilis’）、巴山木竹（*Bashania fargesii*）、淡竹（*Phyllostachys glauca*）、河竹（*Phyllostachys rivalis*）、红竹（*Phyllostachys iridescens*）、水竹（*Phyllostachys heteroclada*）等构成的复合型竹林群落，具备“林内—林缘”空间连续性和“封闭—开敞”过渡特征，是研究城市竹林微气候调节效应的典型样区。

2 研究方法

2.1 实验设计与测点布设

为系统评估城市竹林的微气候调节效应，研究区内共布设9个测点（图1），涵盖了三类竹种（毛竹、刚竹、乌哺鸡竹）、互相对照的两种空间结构（林内、林缘）和三类



图1 测点分布
Fig. 1 Measurement points

非竹对照群落（裸地、草地、混交林），构成 3×3 空间类型组合（表1）。布设方法如下：（1）竹林内部测点（A3、B6、C8），距林缘 $\geq 15\text{m}$ ，冠层封闭度高，代表竹林核心区；（2）林缘测点（A2、B4、C7），临近开放空间或道路边界，冠层稀疏，具有边缘微气候特征；（3）对照测点（A1、B5、C9），分别设置在裸地（硬质铺装）、草地（灌草复层）、混交林（乔草结合）中，模拟常规绿地类型，与竹林群落形成对照组。

尽管场地内种植有约10种亚热带地区常见竹类，但考虑到监测需避免其他环境因素

的干扰，仅选取面积 $\geq 900\text{m}^2$ 的三类竹种作为研究对象，且保证各测点距道路距离超过 15m ， 30m 范围内无水体分布^[8]，且各竹种群落的林分龄级保持相对一致。冠层结构通过植物冠层分析仪采集鱼眼图像，提取LAI与间隙率（Gap Fraction, GF）等指标。各群落密度为 $8\sim 12\text{株}/\text{m}^2$ ，平均高 $8\sim 10\text{m}$ ，冠幅覆盖率为80%以上。

需要补充说明的是，本研究中的竹林为混合龄结构，包含1~5龄竹株，通过地下竹鞭自然更新机制与人工管理共同维持群落稳定^[17]，独立于单株竹龄，结构连续性高，冠

表1 研究区域各测量点位置及特征说明
Tab. 1 Description of the location and characteristics of the measurement points in the study area

测点 编号 Code	位置 Location	植物种类 Plant specie	植被覆盖特征 Vegetation cover characteristic		鱼镜头照片 Fisheye photo
			GF	LAI	
A1	入口绿篱旁	裸地	—	—	—
A2	毛竹林边缘	毛竹	0.1275	4.1186	
A3	毛竹林内	毛竹	0.193	3.2905	
B4	乌哺鸡竹林内	乌哺鸡竹	0.1685	3.5619	
B5	草地	松	0.2221	3.0093	
B6	毛竹林边缘	毛竹	0.1865	3.3589	
C7	刚竹林内	刚竹	0.1913	3.3075	
C8	毛竹林内	毛竹	0.1921	3.2994	
C9	混交林内	混交林 + 地被	0.1812	3.4161	

注：LAI、GF通过植物冠层分析仪拍摄并通过图像建模提取。

层生态功能良好^[18]。此外，本研究以LAI和GF来表征竹林冠层结构，二者已被广泛应用于林分微气候研究，是评估植被对局地气候调控能力的重要参数^[19]。

2.2 微气候数据采集与监测

野外实地数据采集于晴朗微风（风速≤2 m/s）、气象稳定的连续3 d（2024年8月4–6日）进行（表2），覆盖每日8:00–18:00高温时段。本研究所选取的2024年8月4–6日处于上海地区连续高温过程的核心时段，三天日平均最高气温达到38.3℃，接近本地历史高温极值。该监测时段具备典型性与代表性，适宜用于评估竹林群落在“极端热暴露”情境下的最大调节潜能，符合当前气候适应型绿地评估强调“关键气候窗口”（climatic stress window）的国际研究趋势^[6,20]。该采样窗口覆盖日间热负荷峰值，符合目前微气候调研中常用于分析植被降温效应的时间段选择方法^[8]。实验每天从8:00测量至18:00，每2 h记录一组数据，三组仪器在相应时段内对9个测点同步测量，每个测量点稳定10 min，取10 min内的平均值，以确保数据的代表性和稳定性^[21]。

仪器包括三组台湾衡欣黑球温湿度计AZ 87783（准确度±0.6℃，空气相对湿度±5%，分辨率0.1℃，空气相对湿度0.1%），土壤温湿度计，Kestrel NK-5500手持气象站，手持红外测温仪等相关设备。为准确测量到该活动空间人体舒适度指数，AZ87783测量仪器架设高度为1.5 m（模拟人体高度），Kestrel NK-5500手持气象站放置于头部高度上方以避免人体辐射干扰，土壤温湿度计垂直插入地下15 cm，用于评估地表热环境响应。Kestrel NK-5500手持气象站每隔10 s自动记录的包括空气温度（Air Temperature, AT）、湿球温度（Wet Bulb Temperature,

表2 实测日天气信息汇总
Tab. 2 Summary of weather information on the actual test day

日期 Date	全天气温 /℃ Air temperature	日均相对湿度 /% Relative humidity	风向 Wind direction	风力 / 级 Wind power	风速 / (km/h) Wind speed
8月4日	29 ~ 39	60	北风	1 ~ 3	15
8月5日	28 ~ 39	58	北风	1 ~ 3	14
8月6日	28 ~ 37	59	北风	1 ~ 3	16

注：资料来自 <https://www.data.gov/climate>。

WBT)、相对湿度 (Relative Humidity, RH)、风速 (Wind Speed, WS)、热压指数等参数, 结合每测点中心向东南西北4个方向布设4个读数, 采纳森林微气候多点平均法, 提高空间代表性^[22]。最终, 连续3d所得数据以算术平均值进行分析, 以减少短时波动的干扰, 提高结果的稳健性。

2.3 热舒适度指标选取与计算

传统微气候研究多采用单一温度或湿度指标, 但在真实城市环境中, 人体热感知受多重因子共同作用影响。WBGT综合考虑气温、湿度、风速与热辐射, 适用于户外高温高湿情境^[23]; 而HI则更强调空气湿热感受, 反映人体皮肤散热与蒸发效率, 常用于气象级热浪预警。本研究采用WBGT和HI双指标评估热舒适度。两者互补, 前者物理量化更全面, 后者更贴近人体热感, 能综合反映竹林群落的调节效应。

2.3.1 WBGT

依据ISO 7243标准, 采用简化三因子计算式, 见公式(1)

$$T_w = 0.7 \times T_n + 0.2 \times T_g + 0.1 \times T_a \quad (1)$$

式中, T_w 表示湿球黑球温度, 用于评估热辐射、湿度、风速复合作用下人体承受热负荷, 分为5级热应激等级; T_n 为湿球温度, T_g 为黑球温度, T_a 为空气度。

2.3.2 HI

采用美国国家气象局推荐计算公式^[24], 将气温与相对湿度耦合, 反映人体对空气湿热感知程度, 见公式(2)。

$$H = -42.379 + 2.04901523T + 10.14333127R - 0.22475541T \times R - 0.00683783T^2 - 0.05481717R^2 + 0.00122874T^2 \times R + 0.00085282T \times R^2 - 0.00000199T^2 \times R^2 \quad (2)$$

其中, H 表示热指数, 单位为°F (可转换为°C), T 为空气温度 (°F), R 为空气相对湿度 (%)。热指数评价等级分为A级无热感、B级轻度、C级中度、D级严重、E级危险等5类, 适用于高温高湿情境下热舒适评价。

2.4 数据处理与统计分析

2.4.1 单因素方差分析

用于比较不同竹种、空间位置与群落类型在温湿度、WS、WBGT、HI等因子上的显著性差异。采用Tukey事后检验明确差异来源, 显著性水平设定为 $p < 0.05$ 。

2.4.2 皮尔逊相关性分析

探讨微气候因子(AT、RH、WS)与热舒适度指标(WBGT、HI)之间的线性关系, 判断主导因子。

2.4.3 多元线性回归模型

以WBGT、HI为因变量, AT、RH、WS、LAI等为自变量, 建立多元回归方程, 量化各因子对热舒适度的影响贡献, 判断主控变量及其调节机制。为保障数据处理的效率与结果的可重复性, 本研究主要采用Python语言进行数据预处理、统计分析与图表绘制。数据分析环境为Python 3.11, 主要使用pandas进行数据结构化管理, matplotlib与seaborn进行

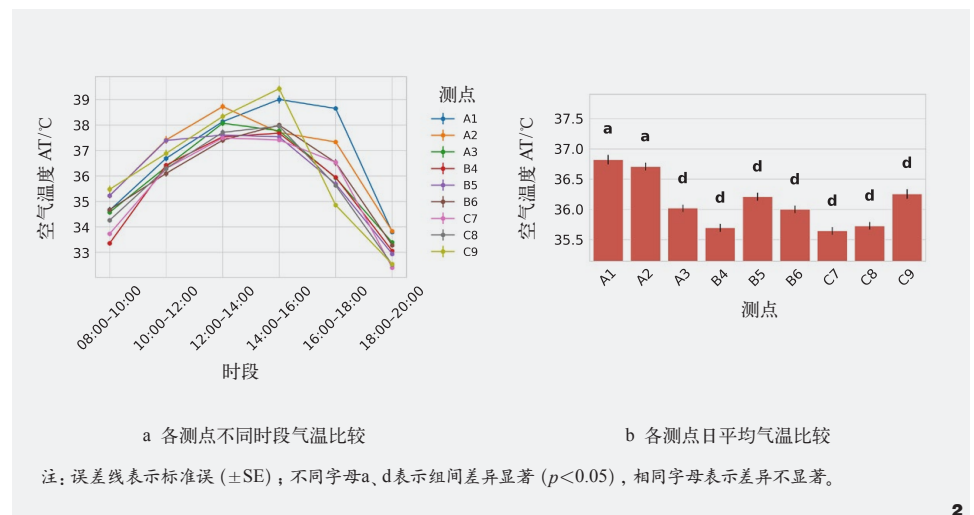


图2 竹林区域各测量点气温日变化比较
Fig. 2 Diurnal changes in AT of the different measurement points

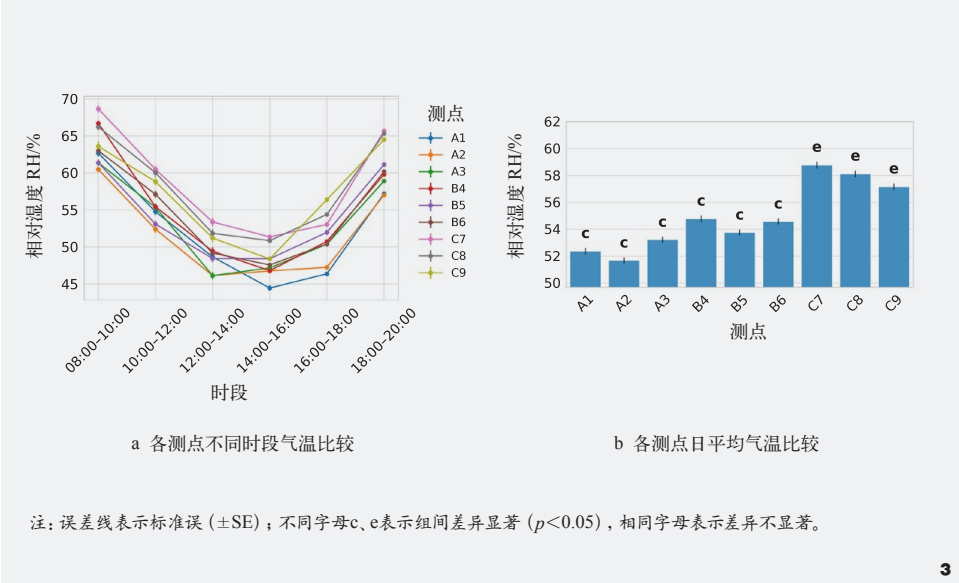


图3 竹林区域各测量点相对湿度日变化
Fig. 3 Diurnal changes in RH of the different measurement points

图形可视化，scipy与statsmodels 模块用于实现单因素方差分析、皮尔逊相关性分析与多元回归建模。所有测点的原始观测数据首先进行标准化清洗，随后提取日均值及高温时段（12:00–14:00）指标进行差异性与机制分析。图表绘制统一标准化，参数设定参考国际气象与人居环境热负荷评价规范^[25]。

3 结果与分析
3.1 城市竹林对微气候因子的调节效应
3.1.1 气温与湿度日变化特征

图2展现了各测点日间温度变化趋势，整体呈现出典型单峰日变化特征，温度峰值集中在12:00–14:00。A1全天气温最高，峰值达44.2℃，全天平均气温为36.8℃，显著高于竹

林样点，显示出其在缺乏植被遮蔽与蒸腾调节下的热积累效应。与之相比，竹林测点B4、C7、C8气温最低，均值在35.6 ~ 35.7℃，显示出其在高温环境下的有效降温能力。毛竹林内部样点A3、B6的气温也维持在36.0℃左右，远低于裸地与林缘，说明竹林群落在整体结构下均可产生良好的降温效果，支持本研究假设“城市竹林可显著改善夏季高温环境”。此外，从图2中看，不同竹种间的气温差异较小，降温效应均较显著。林内样点普遍温度低于林缘样点（表3），如毛竹林A3（36.0℃）显著低于A2（36.7℃），刚竹林C7亦表现出林内的热缓冲优势，支持了“林内—林缘结构差异影响热环境”的研究假设。

如图3所示，RH同样呈现出明显的日变化趋势，各测点RH在日间12:00–14:00达到最低，随后逐渐回升，形成“U”形波动趋势。整体上，竹林样点湿度高于非竹群落（表3），差异显著（ $p < 0.05$ ），其中刚竹林C7的RH均值最高（58.8%），显著高于裸地A1（52.4%）与毛竹林林缘A2（51.7%），属于统计上的e组与c组，反映出竹林冠层结构在减缓空气干燥化方面的生态调节效应。林内区域RH均值普遍高于林缘与开敞空间，毛竹林内B6（RH = 54.6%）与林缘A2（RH = 51.7%）之间差值近3%，乌哺鸡竹B4和混交林C9亦表现出较高湿度值。从湿度的“最低点”（中午）来看，非竹群落RH迅速下降，而竹林群落下降幅度较缓，表明竹林具备更好的“湿度缓冲”能力。这种缓冲能力对于人体热舒适有重要意义，特别是在夏季高温时段，有助于减轻空气干燥造成的热应激反应。综合而言，城市竹林群落特别是结构封闭、蒸腾能力强的刚竹与毛竹林，具备显著的增湿作用，且湿度维持能力在日间表现出明显优势，进一步证实了其在热环境调节方面的协同生态服务功能。

表3 小气候特征的定量分析
Tab. 3 Quantitative analysis of microclimate characteristics

测点 Measurement point	空气温度/℃ Air temperature			相对湿度/% Relative humidity			风速/ (m/s) Wind speed		
	平均值	最大值	变化范围	平均值	最大值	变化范围	平均值	最大值	变化范围
A1	36.8	44.2	12.4	52.4	71.3	37.8	0.7	3.5	3.5
A2	36.7	42.2	9.4	51.7	68.4	32.5	0.5	2.5	2.5
A3	36.0	41.1	8.4	53.2	69.1	31.6	0.2	1.3	1.3
B4	35.7	40.6	9.3	54.8	72.7	35.8	0.1	1.9	1.9
B5	36.2	41.7	9.4	53.8	69.2	29.9	0.3	2.0	2.0
B6	36.0	40.8	8.4	54.6	69.2	29.1	0.2	2.6	2.6
C7	35.6	40.8	9	58.8	75.9	35.7	0.1	1.4	1.4
C8	35.7	40.5	8.6	58.1	74.5	36	0.1	1.4	1.4
C9	36.3	42.5	10.6	57.2	72.9	34.4	0.1	1.4	1.4

注：该温度为裸地最高值，非绿地整体温度。

3.1.2 风速的局部调节作用

根据表3数据显示, 三类竹林群落风速均值在0.2 ~ 0.5 m/s, 显著低于非竹群落(裸地A1为0.7 m/s, 最大达3.5 m/s)。其中B6风速最低, 仅为0.2 m/s, C7与B4风速亦维持在较低水平, 整体风速波动幅度小, 表明林内空间具有较强的“阻风缓流”能力。竹林林内区域风速明显低于林缘与开敞区域(草地、混交林), 显示出竹林冠层在削弱风速扰动方面的生态功能。较高的植株密度与层状结构阻断了对流扰动, 有助于构建低风速、稳定的局地小气候环境, 并间接增强了空气湿度维持与热缓冲效应。

3.2 城市竹林对人体热舒适度的改善表现

3.2.1 热舒适度的日变化规律与空间分布

根据图4和图5, 各测点的WBGT与HI均呈现典型单峰型日变化趋势, 最高值出现在12:00-14:00高温时段, 随后逐步下降, 呈现出与气温高度一致的节律性。从HI空间分布来看, C7和B4表现出最低HI值, 平均仅约46.2℃, 显著低于A1 (47.8℃) 和C9 (48.7℃)。其中C9被归为e组, 热应激等级达“严重”边界, 而C7和B4被归为c组, 为“中度”热应激, 已具备显著缓冲作用。A3、B6、C8亦表现良好, HI控制在46.5 ~ 47.0℃, 热环境改善显著。WBGT方面, 所有竹林样点(A3、B4、B6、C7、C8) 值集中在30.2 ~ 31.3℃, 属于“警戒—谨慎”热应激等级区间, 低于A1 (32.6℃) 与B5 (32.5℃)。ANOVA分析结果显示, 各竹林测点之间虽无显著性差异(同为b组), 但与非竹测点形成明显对比, 显示其在热负荷控制方面具备群落共性优势。空间结构差异方面, 林内测点普遍WBGT与HI低于林缘与开敞区域, 毛竹林内部B6 (WBGT=30.2℃) 与林缘A2 (WBGT=31.7℃) 之间差异达1.5℃。

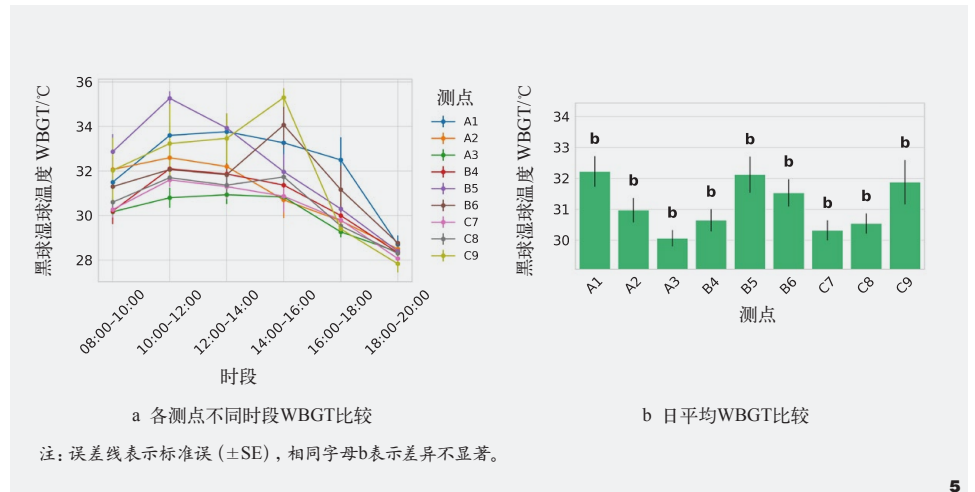
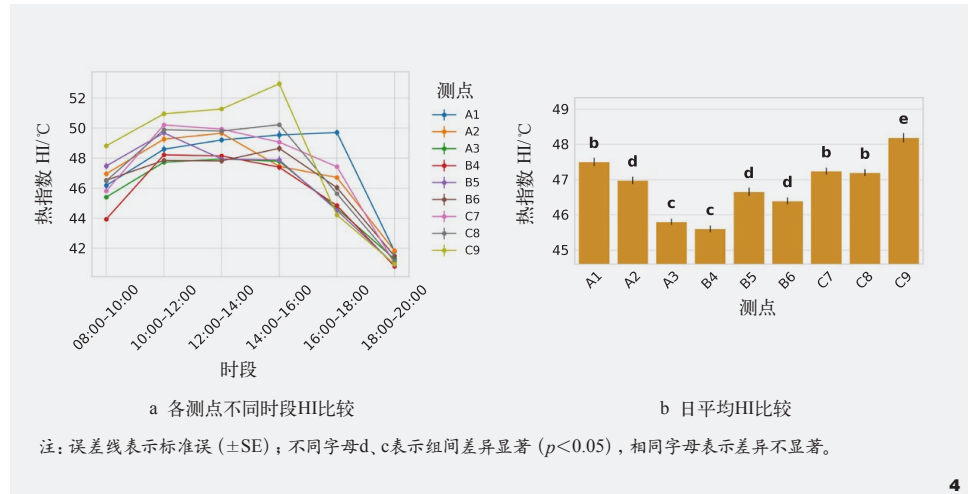


图4 各测点热指数HI日变化特征
Fig. 4 Characteristics of diurnal changes in heat index at each measurement point

图5 各测点黑球湿球温度WBGT日变化特征
Fig. 5 Characteristics of diurnal changes in WBGT at each measurement point

3.2.2 竹林与非竹群落WBGT差异分析

进一步比较竹林群落与非竹绿地的WBGT发现, 不同群落类型间WBGT指数存在明显差异。如图6-a所示, 竹群落的日均WBGT值明显低于非竹绿地(草地、混交林)与其他对照组(裸地), 中位值约为30.8℃, 而非竹绿地(如裸地、绿篱)中位值接近33.2℃, 最大值甚至超过35.5℃, 存在更大热负荷风险。统计结果显示, 竹群落的WBGT波动范围更小, 箱体集中、离群点少, 说明其微气候调节更

加稳定。从图6-b日变化趋势来看, 三类群落在12:00-14:00时段均达到WBGT峰值, 竹群落峰值维持在31.5 ~ 32.0℃, 而非竹群落WBGT可高达34.5 ~ 35.0℃, 舒适等级已进入“谨慎—危险”区间(WBGT ≥ 32℃)。尤其在高温暴露核心时段(10:00-16:00), 竹林群落WBGT始终维持在31℃以下, 明显优于对照样点, 显示其在极端热条件下的显著缓冲作用。此外, 竹林样点日内WBGT上升幅度较平缓, 表现出良好的热环境“缓冲能力”; 而非竹群

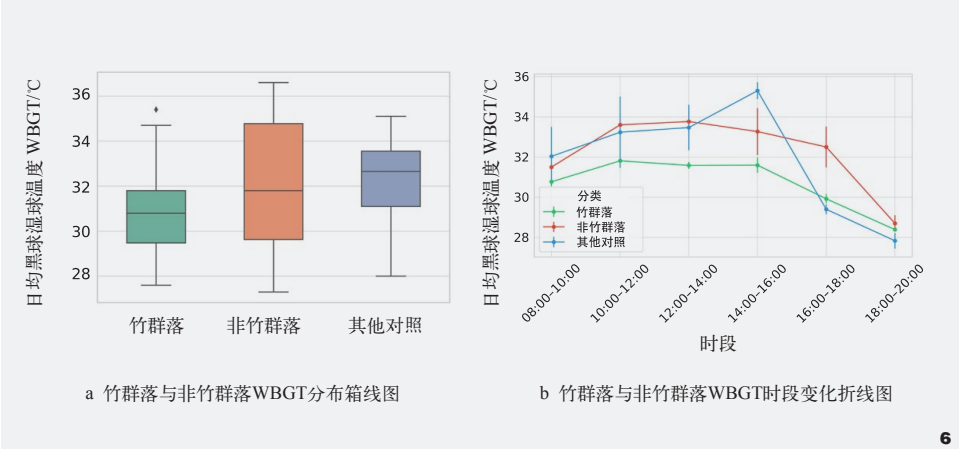


图6 竹群落与非竹群落日均WBGT差异对比图
Fig. 6 Comparison of WBGT index distribution between bamboo forests and non-bamboo communities

落与其他对照WBGT波动剧烈，昼夜落差大，环境热稳定性较差。

3.2.3 不同竹种热舒适度改善能力比较

如图7所示，三类竹种在日均WBGT表现上均显著优于非竹类绿地，且在日间高温时段表现出清晰的类型差异。总体来看，毛竹和刚竹的热舒适度改善能力最强，乌哺鸡竹

次之，明显优于混交林、草地和裸地。在12:00-14:00极端热负荷时段，裸地WBGT峰值超过35.5℃，混交林和草地亦超过34℃，已进入“谨慎—危险区”（WBGT≥32℃）；而毛竹和刚竹控制在31.0℃~31.5℃，乌哺鸡竹略高，为32.0℃左右。三者均显著缓解热负荷风险，特别是毛竹群落在10:00-16:00高温暴露窗口段，整体WBGT曲线最低。

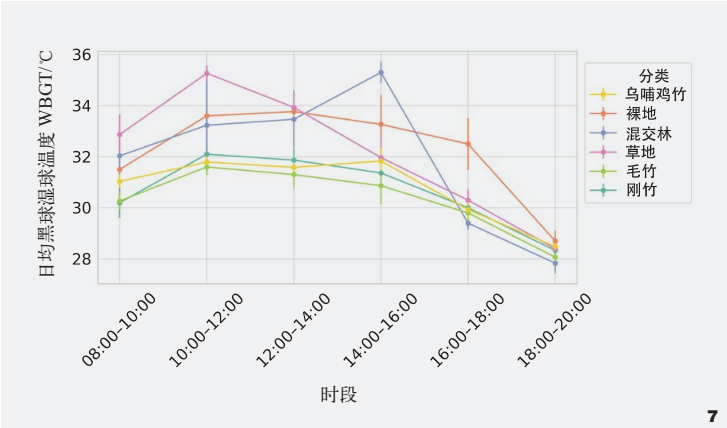


图7 不同群落类型在各时段的 WBGT 日变化曲线图
Fig. 7 Diurnal variation of WBGT across different communities types

图8 微气候因子与热舒适度指标的相关性矩阵图
Fig. 8 Correlation matrix between microclimate factors and thermal comfort indicators

3.3 微气候因子对热舒适度的作用机制分析

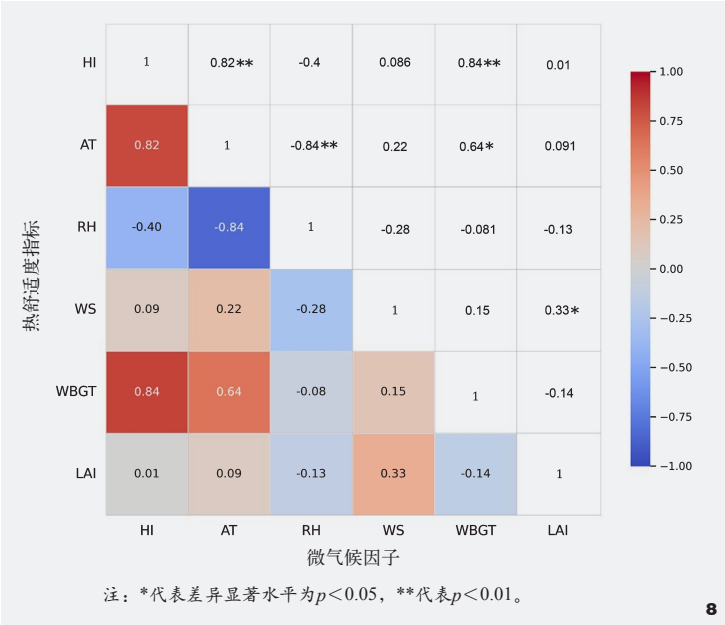
3.3.1 单因素方差分析

为定量评估竹种差异、空间结构与群落类型对微气候及热舒适度指标的影响，采用单因素方差分析对各类样点指标进行显著性检验。结果表明，不同竹种在气温、相对湿度与WBGT三个维度均存在统计显著差异 ($p < 0.05$)，其中毛竹林与乌哺鸡竹林在WBGT上的差异最为显著，Tukey事后检验显示其均值差异达1.4单位。

空间结构上，林内与林缘在气温与HI指标上的差异显著，林缘样点的WBGT平均高出林内约1.2单位。对照绿地中，裸地的热舒适度最差，草地与混交林次之，与林内竹林群落之间的差异亦达到显著水平 ($p < 0.01$)。

3.3.2 皮尔逊相关性分析

微气候因子与热舒适度指标之间的相关性分析结果 (图8) 显示，气温与WBGT、HI均呈高度正相关 ($r = 0.82$ 与 0.85 , $p < 0.01$)，为影响人体热感受的主导因子。相对湿度则



与WBGT和HI呈中度负相关 ($r = -0.68$ 与 -0.65 , $p < 0.01$), 表明湿度的升高可有效缓解热应激负荷。风速与两项热舒适指标的相关性不显著, 进一步印证在竹林较静风环境中, 风速并非调节舒适度的关键因子。

3.3.3 多元线性回归分析

为探讨多因子联合作用下热舒适度变化的主控机制, 构建以WBGT与HI为因变量, AT、RH、WS、LAI为自变量的多元线性回归模型。图9、图10模型回归结果表明: (1) 对于WBGT, AT的标准化回归系数为0.72 ($p < 0.001$), RH为-0.45 ($p < 0.01$), LAI与WS影响不显著; (2) 模型决定系数 $R^2 = 0.695$, 说明模型能解释约69.5%的WBGT变化; (3) 对于HI指标, 回归结构与趋势基本一致, 但 R^2 略低 ($R^2 \approx 0.62$), 反映其对湿度变化更敏感。该结果说明, 在热负荷评估中, 气温依然是最核心的决定因子, 而相对湿度则通过皮肤蒸发潜热调节对热感知有重要缓冲作用, 冠层结构则间接影响热调节路径。

4 结论与讨论

4.1 结论

4.1.1 城市竹林在极端高温条件下具有显著的微气候调节效应

研究结果表明, 城市竹林在夏季极端高温条件下具有显著的微气候调节效应。与非竹群落(裸地、草地和混交林)相比, 竹林群落(竹林)在高温时段(12:00–14:00)表现出明显更佳的热舒适性改善能力。具体表现为: 竹林区域气温较裸地降低 $1.5^\circ\text{C} \sim 3.0^\circ\text{C}$, 相对湿

度提升6%~10%, WBGT与HI指数分别降低2~3个单位与3~4个单位, 整体显著改善人体热舒适度。这与Zhang等^[26]在华南城市公园研究结果一致, 他们发现竹林比乔木型绿地能额外降低约2个WBGT单位, 突显了竹林群落的生态调控优势和在极端高温条件下展现出明显的生态服务潜力, 进一步证实了竹林可作为城市气候适应型绿地的重要组成。竹林群落通过显著缓解局地热环境不适, 表现出良好的气候适应性, 尤其适合于城市热

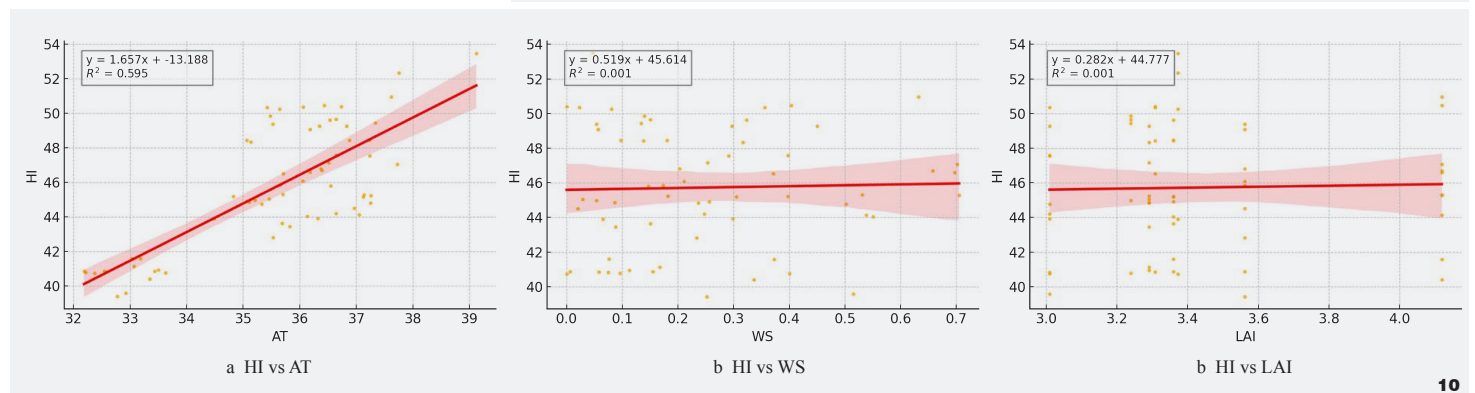
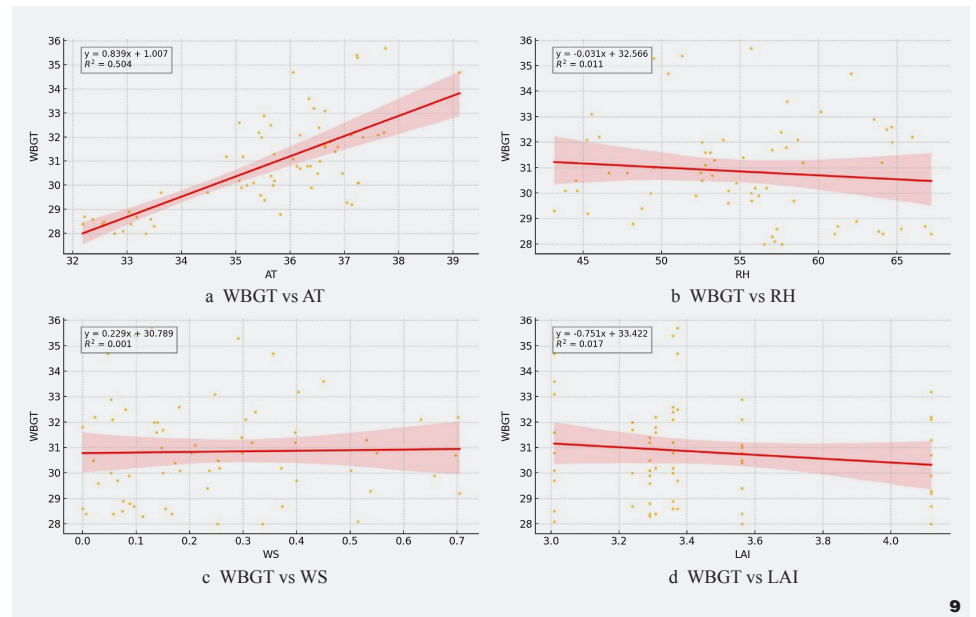


图9 夏季微气候因子与WBGT的回归分析
Fig. 9 WBGT regressions against summer microclimate factors

图10 夏季微气候因子与HI的回归关系分析
Fig. 10 HI regressions against summer microclimate factors

敏感区域布局，能够有效改善夏季城市热环境并提高城市绿地系统的生态韧性和极端气候响应能力。

4.1.2 竹林内部区域在小气候调节中优于边缘区域

研究发现，竹林不同空间结构对微气候的调节表现存在差异，竹林内部区域的小气候调节效果明显优于边缘区域。本研究的量化分析结果显示，林内区域的WBGT指数平均低于林缘区域1.2个单位，证实了竹林微气候调节中的林缘效应，即林内区域的高密度冠层能有效阻挡太阳辐射，降低空气流通速率，进而增强区域微气候的稳定性^[26]。这一空间分异现象也与Ma等^[27]在城市林缘微气候研究中的结论一致，他们指出林缘区域由于辐射和风速扰动较大而表现出更高的热应激水平，进一步强调了冠层结构对竹林微气候调控的重要作用。

4.1.3 不同竹种在调节能力上表现出显著差异

本研究发现，不同竹种的微气候调节能力存在显著差异。其中，毛竹和刚竹群落因其冠层结构致密、高叶面积指数（ $LAI = 3.7 \sim 4.1$ ）和低间隙率（ $\leq 2\%$ ），在降温增湿方面表现突出，尤其毛竹林在极端高温时段可有效降低气温约 3°C ，提高相对湿度 $5\% \sim 7\%$ ，WBGT和HI分别降低 $2 \sim 3$ 个单位和 $3 \sim 4$ 个单位。这与吴仁武等^[28]在亚热带地区研究发现的竹林研究结果相符，他们强调了竹林的高冠层密度和高叶面积指数对微气候调节的积极作用，也与徐欣等^[29]指出的多层植被群落对微气候调节效应的显著性一致。而乌哺鸡竹由于冠层结构较为疏松、叶面积指数较低，其在微气候调节能力和热舒适性改善方面明显弱于毛竹和刚竹。

4.2 研究的局限性与未来展望

本研究也存在一定局限性。一方面，本研究聚焦于夏季极端高温时段，意在评估城市竹林在人体热舒适调节方面的最大生态效能表现，符合当前城市热风险管理中对极端气候适应策略的研究重点。尽管如此，受监测周期限制，研究仅覆盖三天连续高温时段，尚无法反映竹林微气候调节效应在不同季节或复杂气象条件（如阴雨、大风）下的时空稳定性与变异性。未来研究建议扩大监测时长，涵盖不同季节尤其是极端气候条件下的长期观测，以获取更全面的数据集^[30]。另一方面，本研究中竹种覆盖相对有限，未能全面代表亚热带地区所有常用的城市竹林品种。因此，建议后续研究纳入更多竹种，以更精细地分析不同竹种生态功能差异及其调节机制。

此外，尽管本研究已有效应用LAI和GF指标定量评估竹林冠层对微气候的调控作用，但已有研究指出，除上述指标外，冠层厚度、叶面积密度及冠层垂直结构的分布模式同样对微气候具备显著的调控作用，如冠层垂直分布模式能显著影响太阳辐射的截留效率，从而进一步调节林下空间的温湿环境^[31]。考虑到本研究聚焦于不同竹种间的微气候效能差异以及现有测量技术和实验控制要求，优先采用了已被广泛验证且在野外易于操作的指标。然而，未来研究应在此基础上进一步拓展，引入激光雷达或多层次植物结构探测技术，以实现冠层结构参数的全面立体量化，且更加系统地解释冠层结构与微气候效应之间的内在机制，为竹林微气候调节研究与生态规划提供更丰富的理论与实践支撑。

综上所述，未来研究应进一步拓展竹林微气候效应的长期监测，开展跨季节、多年份的系统性观测，以全面掌握竹林生态功能

的时空稳定性。同时需要深入研究竹种生理生态机制，如蒸腾速率、生物量累积机制和叶片结构特征等，明确不同竹种微气候调节的生态生理基础，将有助于指导城市绿地的竹种配置。并建议运用先进的遥感与激光雷达技术，精准量化冠层结构与微气候因子的互动关系，以实现竹林结构优化。此外，结合微气候效应的研究，进一步开展竹林碳汇功能评估，探索其在城市碳中和战略中的潜在贡献，提升竹林生态系统服务的综合效益。同时，应关注竹林布局与居民活动需求之间的相互关系，优化竹林空间布局与管理方案，提升城市绿地的生态服务价值，促进城市生态韧性与宜居环境建设。

注：图1底图源自团队2025年无人机正射影像，经裁剪处理；其余图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[R]. 2021.
- [2] 董建权, 彭建. 绿地空间降温效应综述: 景观调控视角[J]. 生态学报, 2024, 44(04): 1336-1346.
- [3] ALI SAYED IBRAHIM H, SAAD-HUSSEIN A, ISMAIL N M M. Climate Change and Public Health[M]// Climate Changes Impacts on Aquatic Environment. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025: 21-61.
- [4] 张德强, 吕燕. 城市绿地类型与结构对降温效应的影响研究综述[J]. 中国园林, 2021, 37(10): 31-35.
- [5] 范璐璐, 陈其兵, 张帆. 气候舒适视角下竹林小镇景观形态设计——以四川省邛崃市平乐镇区为例[J]. 世界竹藤通讯, 2023, 21(04): 14-19, 33.
- [6] SAARONI H, AMORIM J H, HIEMSTRA J A, et al. Urban Green Infrastructure as a Tool for Urban Heat Mitigation: Survey of Research Methodologies and Findings Across Different Climatic Regions[J]. Urban Climate, 2018, 24: 94-110.
- [7] YAN L, JIA W X, ZHAO S Q. The Cooling Effect of Urban Green Spaces in Metacities: A Case Study of Beijing, China's Capital[J]. Remote Sensing, 2021, 13(22): 4601.

- [8] WU R W, WU N, NAN X G, et al. Effects of the Bamboo Communities on Microclimate and Thermal Comfort in Subtropical Climates[J]. *Forests*, 2023, 14(06): 1231.
- [9] SHAH A M, MA C, LIU G Y, et al. Evaluating Ecosystem Services and Disservices of Bamboo Forest Using the Emergy-based Method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 501: 145092.
- [10] WANG Y, REN Y. Cooling Efficiency of Urban Green Spaces Across Functional Zones: Mitigating Heat Island Effects Through Spatial Configuration[J]. *Sustainability*, 2025, 17(05): 2275.
- [11] LYU B Y, ZENG C C, DENG S Y, et al. Bamboo Forest Therapy Contributes to the Regulation of Psychological Responses[J]. *Journal of Forest Research*, 2019, 24(01): 61-70.
- [12] YONEKURA Y, HAYASHI K, HASEGAWA Y, et al. Biodiversity Assessment of Japanese Urban Forests-Toward A Comprehensive Assessment of Ecosystem Services of Urban Forests in Nagoya, Japan[J]. *Environmental Science*, 2014.
- [13] FADRIQUE B, GANN D, NELSON B W, et al. Bamboo Phenology and Life Cycle Drive Seasonal and Long-term Functioning of Amazonian Bamboo-dominated Forests[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 109(02): 860-876.
- [14] ALTOMARE M, PRADO-JUNIOR J, PEREIRA A L, et al. Interactions of Structural and Functional Characteristics of Trees and Bamboo in an Atlantic Semideciduous Forest in Southeast Brazil[J]. *Folia Geobotanica*, 2022, 57(02): 103-115.
- [15] CECCON E, GÓMEZ RUIZ P A. Bamboos Ecological Functions on Environmental Services and Productive Ecosystems Restoration[J]. *Revista de Biología Tropical*, 2019, 67(04): 679-691.
- [16] 上海市气象局. 上海市气候变化评估报告[R]. 2023.
- [17] LI L W, ZHU H Z, WU T Z, et al. New Landscape-perspective Exploration of Moso Bamboo Forests Under on/off-year Phenomena and Human Activities[J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2023, 6: 1204329.
- [18] XU Z H, ZHANG C F, XIANG S Y, et al. A Hybrid Method of PROSAIL RTM for the Retrieval Canopy LAI and Chlorophyll Content of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) Forests From Sentinel-2 MSI Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 18: 3125-3143.
- [19] 李英男, 张宇涵, 周志成, 等. 城市空间形态对街区热舒适性的影响及优化研究——以韩国京畿道为例[J]. *园林*, 2025, 42(02): 42-51, 61.
- [20] HOEGH-GULDBERG O, JACOB D, BINDI M, et al. Impacts of 1.5 C Global Warming on Natural and Human Systems[C]// *Global Warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report*. IPCC Secretariat, 2018.
- [21] 董芦笛, 樊亚妮, 李冬至, 等. 西安城市街道单拱封闭型林荫空间夏季小气候测试分析[J]. *中国园林*, 2016, 32(01): 10-17.
- [22] SHAIBU V O, UTANG P B. Human Comfort and the Microclimatic Drivers Across Different Land Use Types in Port Harcourt Metropolis, Nigeria[J]. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 2013, 6(06): 737.
- [23] 王一洁, 王璐璐, 丁真慧, 等. 城市滨水绿地空间夏季微气候效应研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(02): 233-241.
- [24] ROMPS D, LU Y-C. The Heat Index as a Measure of Future Heat Stress with Climate Change[J]. *Physiology*, 2023, 38(S1): 5734222.
- [25] ISO 7243:2017. Ergonomics of The Thermal Environment-Assessment of Heat Stress Using the WBGT Index[S]. International Organization for Standardization.
- [26] ZHANG Y, DAI M Q. Analysis of the Cooling and Humidification Effect of Multi-Layered Vegetation Communities in Urban Parks and Its Impact[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(12): 2045.
- [27] MA T T, NAN X G, WU R W, et al. Quantifying the Impact of Canopy Structural Characteristics on Soil Temperature Variations in Different Bamboo Communities[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(03): 445.
- [28] 吴仁武, 晏海, 舒也, 等. 竹类植物夏季微气候特征及其对人体舒适度的影响[J]. *中国园林*, 2019, 35(07): 112-117.
- [29] 徐欣, 张兴, 高飞, 等. 城市公园绿地植被群落郁闭度与三维绿量对夏季降温增湿效应的影响[J]. *中国城市林业*, 2024, 22(02): 10-16.
- [30] WANG W J, ZHANG B, ZHOU W, et al. The Effect of Urbanization Gradients and Forest Types on Microclimatic Regulation by Trees, in Association with Climate, Tree Sizes and Species Compositions in Harbin City, Northeastern China[J]. *Urban Ecosystems*, 2019, 22(02): 367-384.
- [31] CAI Y, LI C, YE L, et al. Effect of the Roadside Tree Canopy Structure and the Surrounding on the Daytime Urban Air Temperature in Summer[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 316: 108850.