

DOI: 10.20103/j.stxb.202407171677

李思恒, 余兆武. 全球城市树木降温效率阈值效应和气候响应. 生态学报, 2025, 45(4): 1878-1889.

Li S H, Yu Z W. Threshold effects and climate responses of cooling efficiency of urban trees. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1878-1889.

全球城市树木降温效率阈值效应和气候响应

李思恒, 余兆武*

复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200438

摘要: 城市树木对缓解城市热岛效应具有重要作用, 但是单位树木覆盖率 (Fraction tree cover, FTC) 增加对地表温度的减弱程度, 即降温效率 (Cooling Efficiency, CE) 对树木覆盖率的响应特征尚不清楚。此外, 气温 (Air temperature, AT)、土壤湿度 (Soil moisture, SM) 和饱和水汽压差 (Vapor pressure deficit, VPD) 的相互作用阻碍对其如何影响 CE 的理解。选取全球 229 座城市, 构建 2100 m×2100 m 单元格, 利用分段回归确定不同气候带 CE 随 FTC 变化的拐点 (阈值效应), 结合偏最小二乘路径分析探究上述气象变量对 CE 的直接和间接影响。结果表明: (1) 在干旱带白天和半干旱带夜间, CE 随 FTC 的增加不存在显著拐点, 在半干旱带白天和干旱带夜间, FTC 阈值为 19%, 半湿润带昼夜 FTC 阈值分别为 45% 和 30%, 湿润带为 55% 和 23%。(2) AT 和 SM 普遍促进 CE, VPD 在白天直接抑制 CE, 夜间则促进 CE。在 (半) 干旱带, AT 和 SM 主要通过控制 VPD 间接影响 CE, 而在 (半) 湿润带, AT 和 SM 主要直接影响 CE。(3) 在半干旱带, 白天 AT 和 VPD 在 FTC 阈值前后对 CE 的影响方向相反, 主导因素由 AT 变成 VPD; 夜间湿润带 AT 对 CE 的路径系数在 FTC 阈值处由负转正, 其余气候带的主导因素保持不变。本研究得到的 FTC 阈值能指导不同气候带城市绿化规划, 通过分析气候条件在 FTC 阈值前后对 CE 的差异性影响, 为构建气候韧性城市提供依据。

关键词: 城市树木; 降温效率; 阈值效应; 分段回归; 路径分析

Threshold effects and climate responses of cooling efficiency of urban trees

LI Siheng, YU Zhaowu*

Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China

Abstract: Urban trees play a crucial role in mitigating the urban heat island (UHI) effects. However, the cooling efficiency (CE), defined as the reduction in land surface temperature (LST) per unit increase in fraction tree cover (FTC), and its response to changes in FTC remain poorly understood across climate zones, presenting challenges for optimizing urban tree planting strategies to maximize cooling benefits. Additionally, the interactions among key meteorological factors, such as air temperature (AT), soil moisture (SM) and vapor pressure deficit (VPD), complicate a comprehensive understanding of how these factors influence CE. In this study, we analyzed CE of 229 cities across the globe by 2100 m×2100 m grid cells. Using piecewise regression, we determined the FTC threshold values associated with CE variations across different climate zones. We further applied Partial Least Squares Path Modeling (PLS-PM) to explore the direct and indirect effects of these meteorological variables on CE. The results indicate that: (1) In arid zones during the day and semi-arid zones at night, no significant FTC threshold is observed as FTC increases. However, in semi-arid zones during the day and arid zones at night, the FTC threshold is 19%. In sub-humid zones, the FTC thresholds are 45% during the day and 30% at night, while in humid zones, the thresholds are 55% during the day and 23% at night. These thresholds underscore the importance of considering local climatic conditions when planning urban tree coverage to achieve optimal cooling benefits. (2) AT and SM

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42171093); 上海市自然科学基金面上项目 (21ZR1408500); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (42201200)

收稿日期: 2024-07-17; **网络出版日期:** 2024-11-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowu_yu@fudan.edu.cn

generally enhance *CE*, while *VPD* directly suppresses *CE* during the day but promotes it at night. In (semi-) arid zones, *AT* and *SM* primarily influence *CE* indirectly by controlling *VPD*, whereas in (semi-) humid zones, *AT* and *SM* have a direct impact on *CE*. (3) In semi-arid regions, the direct effect direction of *AT* and *VPD* on daytime *CE* reverse around the *FTC* threshold, with the dominant factor shifting from *AT* to *VPD*. At night in humid regions, the influence of *AT* on *CE* transitions from negative to positive around the *FTC* threshold, while in other climate zones, the dominant factors remain consistent across the threshold. The *FTC* thresholds identified in this study can guide urban greening planning in different climate zones. By revealing the different impacts of meteorological variables on *CE* before and after these thresholds, our results provide crucial insights for urban planners aiming to enhance cooling benefits in cities, informing the development of climate-resilient urban environments.

Key Words: urban tree; cooling efficiency; threshold effect; piecewise regression; path modeling

城市化使不透水结构增加,破坏城市能量平衡,进而引发热岛效应,对城市居民健康造成危害^[1-2]。城市树木通过遮荫、蒸腾、固碳、湍流等过程直接或间接影响城市热环境,因此植树造林被视为基于自然的缓解城市热岛效应方案^[3-4]。量化和评估城市树木降温效应已成为城市规划师关注的问题和城市生态学的研究热点。为此,一系列参数相继被提出,如降温范围^[5]、降温强度^[6]、降温梯度^[7]、效率阈值^[8]和降温效率^[9]等。其中降温效率(Cooling efficiency, *CE*)是指每单位树木覆盖率(Fraction tree cover, *FTC*)增加所引起的地表温度(Land surface temperature, *LST*)下降值。由于树木覆盖率在城市规划中容易调控,通过研究 *CE* 与 *FTC* 的关系,城市规划师能更高效地配置绿地资源以实现更大的降温效益。回顾现有研究,*CE* 与 *FTC* 多呈现非线性关系^[10]。例如,王佳发现,在半干旱带的北京,当 *FTC* 小于 20% 时,*CE* 随着 *FTC* 的增加迅速减少,之后 *CE* 缓慢增加;而位于湿润带的深圳,当 *FTC* 超过 77%,*CE* 才迅速增加,在此之前 *CE* 并无明显增长^[11]。程雪雁的研究表明,较湿润的德班、内罗毕在极端高温期间的 *FTC* 阈值为 80%,且 *CE* 在阈值后增加 10 个单位,而干旱的开普敦、卡诺 *FTC* 阈值为 40%,阈值后 *CE* 增加幅度为 6 个单位^[12]。这些结果说明局地环境的变化对 *CE* 的影响可能存在气候带差异。但上述研究仅限于部分城市,结论的普适性需要选择更多城市样本进行验证。

CE 主要受气候条件影响^[13-15]。气温(Air temperature, *AT*)和土壤湿度(Soil moisture, *SM*)决定树木的生长状况,它们直接影响树冠高度、密度和幅度,这些特征与遮荫效果和地表粗糙度密切相关,从而对地表能量平衡和局部气候产生影响^[16]。同时,树木为应对饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, *VPD*)的变化会主动调节气孔导度,进而影响蒸腾速率^[17]。蒸散量是大气水分的重要来源,受土壤湿度控制,而气温和空气水分含量会引起 *VPD* 的波动。目前,*CE* 与气候条件关系的研究结论并不一致。例如,Yang 发现,随着气温的升高,白天 *CE* 逐步增长,并且其增长的速度随着气温的升高加快,而 *CE* 会随着 *VPD* 的升高而显著增加^[13]。Zhao 则指出,生长在高 *VPD* 区域的树木会遭受水分胁迫,当缺乏灌溉时,树木关闭气孔并限制蒸腾以保持水分^[14]。上述研究主要使用的是传统统计分析方法如偏相关分析、最小二乘回归和广义加性等,但这些方法仅检验了气象变量和 *CE* 之间的直接关系,忽略了气象变量之间的相互作用,这限制了对气候条件影响 *CE* 的深入理解^[18]。偏最小二乘路径模型(Partial Least Squares Path Modeling, *PLS-PM*)能够弥补这一不足^[19],有助于厘清气象变量之间的相互作用对 *CE* 的影响。

本研究以 *CE* 为对象,利用分段回归和 *PLS-PM* 模型等,回答以下问题:(1)不同气候带昼夜 *CE* 随 *FTC* 的增加如何变化,若出现拐点,拐点所对应的 *FTC* 值在不同气候带是否存在差异?(2)气温、土壤湿度和饱和水汽压差在不同气候带的 *FTC* 阈值前后对 *CE* 的直接和间接影响是否存在差异?本研究旨在确定不同气候带最佳 *FTC* 范围和揭示气候条件对 *CE* 的影响机制,为城市树木规划和管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究采用干旱指数(Aridity Index, AI)将全球划分为四种气候带:干旱带($AI < 0.2$)、半干旱带($0.2 \leq AI < 0.5$)、半湿润带($0.5 \leq AI < 0.65$)和湿润带($AI \geq 0.65$)^[20]。干旱指数被定义为年均降水量与年均参考蒸散量的比值,能够反映降水量相对于大气水分需求的差值。由于干旱指数能够更直接地反映降水与蒸散的动态关系,相比之下,柯本气候分类法虽然在全球气候带划分中应用广泛,但主要基于温度和降水量的长期平均值,无法充分反映水分需求与供给之间的动态平衡^[21],因此本研究以干旱指数作为气候带的划分依据。本研究使用干旱指数产品的时间范围为 1970—2000 年,空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。结合全球城市边界数据集^[10],筛选出 517 个 2018 年主城区不透水面积大于 200 km^2 的城市。结合人口数量、经济发展水平和遥感影像质量,最终保留了 229 座城市(图 1),其中有 27 个属于干旱带、61 个属于半干旱带、25 个属于半湿润带和 116 个属于湿润带。本研究突破了将城市视为点的传统视角,将每个城市的建成区划分为 $2100 \text{ m} \times 2100 \text{ m}$ 的网格单元,将其定义为城市单元进行研究。

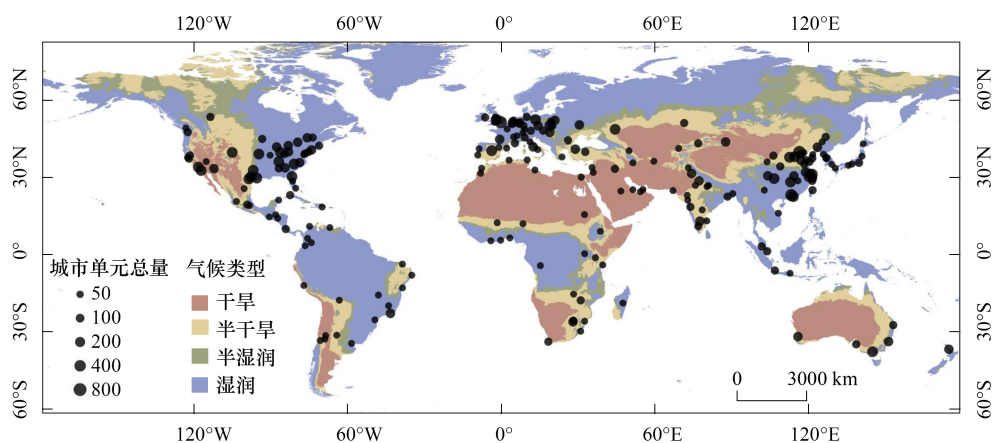


图 1 研究城市地理位置和气候带分布

Fig.1 Locations of cities and climate zones distribution

1.2 数据来源

1.2.1 地表温度数据

本研究选用的是美国国家航空航天局生态系统星载实验热辐射计(Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station, ECOSTRESS)提供的 Land Surface Temperature and Emissivity Daily L2 产品。ECOSTRESS 可以在不固定时间连续收集 53.6°N — 53.6°S 之间的地表信息,重返周期为 3—5 d,分辨率为 $70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ ^[23]。由于昼夜能量过程差异,LST 变化呈现出不对称的日变化规律^[24],并有研究表明树冠可以在夜间储存热量并防止地表热量损失^[25–26]。了解树木所引起地表温度变化的昼夜模式对于准确评估其降温能力具有重要意义。因此,本研究选用的是 2020—2022 年夏季(北半球 6—8 月、南半球 12—2 月)上午 10:00 至下午 2:00 和晚上 8:00 至 12:00 的影像,排除 LST 误差大于 2K 的像元,且使用对应的 ECOSTRESS Cloud Mask Daily L2 产品去云处理。

1.2.2 地表覆盖数据

ESA WorldCover 10m V200 是欧空局基于哨兵一号、哨兵二号数据制作的 2021 年 10 m 分辨率的全球土地覆盖数据,包括 11 种类型,其中树木像元指的是植被最低高度为 5 m 且覆盖率大于 10% 的地理区域。为匹配 LST 影像,本研究沿着 LST 像元构建 $70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ 单元格以计算单元格内树木像元占比,即树木覆盖率。此外,本研究还直接计算了城市单元内的水体覆盖率用于后续检查,水体像元是一年内超过 9 个月被水面覆盖

的地理区域。

1.2.3 气象数据

气象数据选用的是欧洲中期天气预报中心(ECWMF)提供的第五代逐小时再分析产品,分辨率为 0.1° (约等于11132 m)。本研究选择的是2 m 高度气温和露点温度、0—7 cm 的土壤湿度,数据获取时间与卫星过境时间相匹配。饱和和水汽压差的计算式为:

$$VPD = e_s - e_a = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3}\right) - 0.611 \exp\left(\frac{17.27 \times T_d}{T_d + 237.3}\right) \quad (1)$$

式中, e_s 代表该气温下饱和水汽压, e_a 代表实际水汽压, T_a 代表气温, T_d 代表露点温度。

1.3 研究方法

1.3.1 城市树木降温效率计算

本研究首先选取四个具有不同柯本气候型的发达城市,设置不同尺度(1050 m×1050 m, 2100 m×2100 m, 3150 m×3150 m)的网格对CE进行敏感性分析。结果发现所有城市2100 m与3150 m的单元格的CE值均大于1050 m单元格,而前两者的CE差异较小且未通过显著性检验(图2)。最后本研究确定单元格大小为2100 m×2100 m,并将单元格定义为城市单元,并要求每个城市单元的LST和FTC像元数均大于300。考虑到高程对地表温度和水体对邻近树木降温效应的影响,依照以往研究的经验删除高程标准差大于100^[27]和水体覆盖率超过0.1%^[28]的单元格。之后将城市单元内的散点按FTC从小到大排序,将FTC相同的像元分成一组,然后取该组的LST中位数,以FTC为自变量,LST中位数为因变量,进行最小二乘拟合,其斜率的相反数就是CE,确保拟合结果的 R^2 大于0.1且 P 值小于0.05。

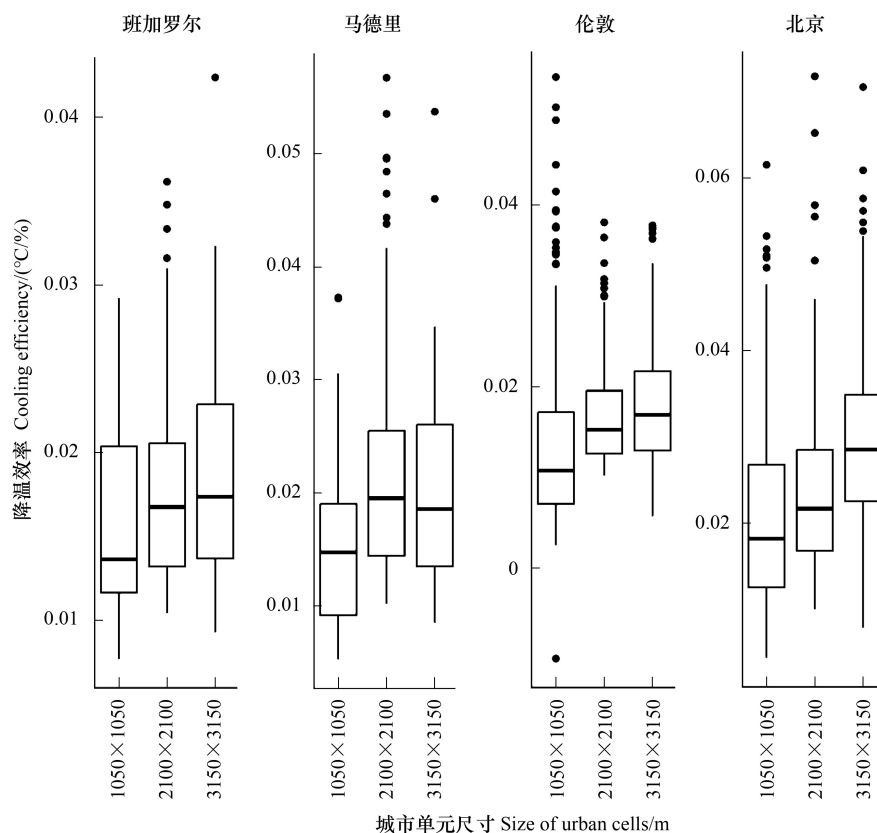


图2 城市单元尺寸的敏感性分析

Fig.2 Sensitivity test of size of urban grid cells

1.3.2 分段回归

本研究利用分段回归探讨树木覆盖率和降温效率的定量关系。分段回归是一种灵活的分析方法,它通过将数据划分为多个线性段来模拟变量之间的非线性关系,因此特别适用于那些难以用传统数学公式直接进行拟合的复杂数据模式^[29]。公式如下:

$$y_i = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i & x_i \leq \alpha \\ \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2(x_i - \alpha) + e_i & x_i > \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中, y_i 是第 i 个观测值, x_i 是第 i 个观测值所对应的自变量, α 是断点(或者阈值), e_i 是误差项。为更清晰地展现 CE 随 FTC 增长的变化特征,将全球不同气候带的样本等频分箱为 50 个数据点。首先通过戴维斯检验(Davies test)对断点是否存在进行判断^[30],如果存在断点则可进一步通过基于 python 的 pwlf 2.2.1 包进行拟合并寻找断点位置。

1.3.3 偏最小二乘路径模型

偏最小二乘路径模型是一种用于分析多个自变量和因变量之间复杂关系的统计方法,是标准化多元线性回归分析的衍生。该模型本质上是由自变量之间的双向相关关系和自变量对因变量的单向因果关系构成的网络^[31]。该模型适用于样本量小、数据偏态分布或不满足正态分布假设的情况^[32]。首先构建标准化多元线性回归方程:

$$Y = \beta_1^* x_1 + \beta_2^* x_2 + \cdots + \beta_m^* x_m + \varepsilon = \beta^{*T} x + \varepsilon \quad (3)$$

式中, $x = (x_1, x_2, \cdots, x_m)^T$, $\beta = (\beta_1^*, \beta_2^*, \cdots, \beta_m^*)^T$ 。 ε 为回归残差与 X 无关且服从 $N(0, \sigma^2)$ 。然后对多元线性回归方程进行假设检验,得到显著性结果后进行路径分析,确定自变量对因变量的作用方式及影响大小。最后,对因变量与自变量之间的总相关系数进行分解,直接影响强度由两变量之间的路径系数表示,间接影响强度则由两变量路径上所有路径系数的乘积表示。本研究基于 python 中的 plspm 库,选取气温、土壤湿度和饱和水汽压差三个典型气象变量,探讨气象变量在 FTC 阈值前后对 CE 的差异性影响。

2 结果与分析

2.1 降温效率对树木覆盖率变化的响应特征

图 3 揭示了不同气候带 CE 对 FTC 变化的响应差异。在干旱带, CE 在 FTC 小于 30% 的区间内存在较大波动,当 FTC 约为 38% 时, CE 达到峰值后开始下降,但由于 FTC 超过 30% 的样本量较少,结果相对不稳健,未通过戴维斯检验($P=0.33$),不存在显著的拐点。在半干旱带, CE 首先随 FTC 的增加而减小,当 FTC 超过 19% 之后, CE 增大,但增长速度慢于下降速度,这可能跟该气候带复杂的能量过程有关(见 3.1)。在半湿润和湿润带, CE 分别在 FTC 约为 45% 和 55% 处达到峰值,随后下降,半湿润带 CE 下降速度比拐点前 CE 的增长速度慢,而湿润带则较快。

夜间拟合的 R^2 比白天低,说明夜间树木覆盖率对树木降温效率的解释力有限,这可能是因为夜间地表温度受更多复杂因素的影响。半干旱带结果未通过戴维斯检验,而在干旱和半湿润地区, CE 分别在 FTC 约为 19% 和 30% 处达到峰值,随后下降,且 CE 下降速度相比于拐点前 CE 的增长速度慢。在湿润条件下, CE 在 FTC 超过 23% 之后增长速度放缓。

2.2 气象变量对降温效率的路径分析结果

图 4 展示了 AT 和 SM 对 CE 的直接影响和通过 VPD 对 CE 间接影响以及上述效应的气候带差异。从总体来看,白天 AT 对 CE 具有直接的促进作用,尤其是在(半)湿润地区更为显著。 SM 对 CE 的直接影响程度相对较小,这可能与 SM 相对稳定有关。白天 VPD 对 CE 起到直接的抑制作用,且在(半)干旱条件下,其影响程度相对于 AT 和 SM 更大。在(半)干旱条件下,随着湿度的增加, AT 对 SM 的抑制作用加强,而在(半)湿润带, AT 对 SM 有微弱的积极影响, AT 虽然能加速蒸散作用,但降水量也随之增加并补充进土壤。 AT 既能直接提高饱和水汽压,又能通过促进蒸散作用提高实际水汽压,缩小与饱和水汽压的差距,因此 AT 对 VPD 的影响

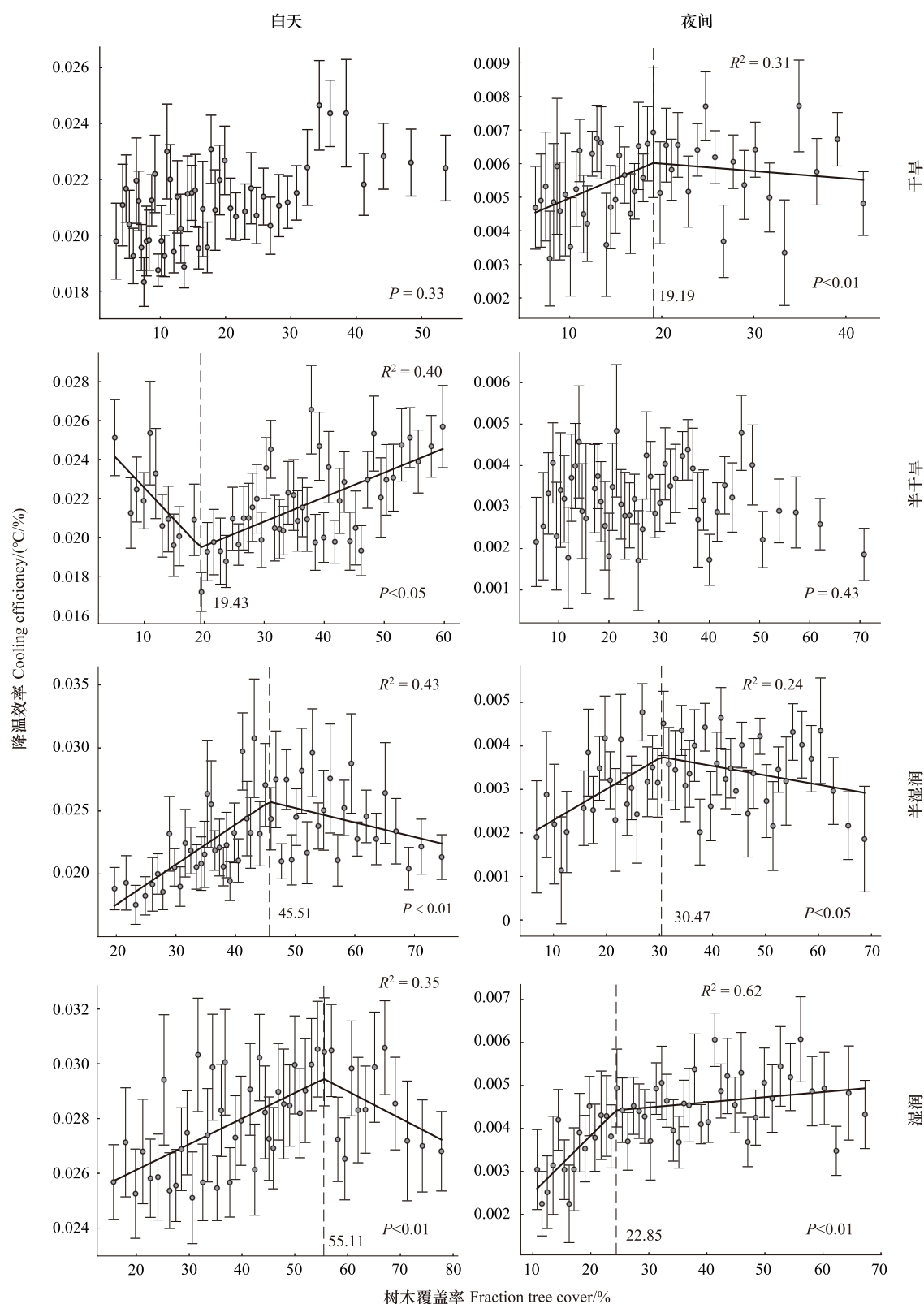


图3 降温效率对树木覆盖率变化的响应

Fig.3 Response of CE to FTC

若 P 值小于 0.05, 表示通过戴维斯检验, 即可拒绝没有断点的原假设 CE : 降温效率 Cooling efficiency; FTC : 单位树木覆盖率 Fraction tree cover

需要综合这两个过程。从总体来看,AT 对 VPD 呈现显著的正效应,但在更湿润的条件下,AT 对 VPD 的促进作用减弱。SM 对 VPD 呈现负效应,在(半)湿润条件下更显著。AT 和 SM 对 VPD 的绝对影响程度差距随湿度的增加而缩小。

夜间与白天情况类似,只是部分气候带的气象变量对 CE 的影响方向和程度有变化。AT 对 CE 的直接促进减弱,甚至在湿润带呈现微弱的抑制效应。除湿润带外,SM 对 CE 的直接影响方向与白天相反,而 VPD 对 CE 的直接促进作用在湿润带最显著。(半)干旱带 AT 对 SM 的抑制作用相较于白天减弱,而 SM 对 VPD 的抑制作用增强。(半)湿润带 AT 对 SM 的促进作用增强,而湿度增加不会导致 AT 和 SM 对 CE 的影响程度发生显著变化。

2.3 气象变量对 FTC 阈值前后对 CE 的影响差异

2.3.1 气象变量在 FTC 阈值前后对 CE 的直接影响差异

在半干旱带,AT 和 VPD 在 FTC 阈值前后对白天 CE 的直接影响方向发生改变,湿润带的夜间 AT 在 FTC 阈值前先大幅抑制 CE,在阈值后促进 CE(表 1)。SM 在 FTC 阈值前后对昼夜 CE 的影响方向不变,白天 SM 在 FTC 阈值前对 CE 的影响程度更强,而夜间 SM 对 CE 的影响程度在 FTC 阈值前后并未有显著变化。半干旱带白天 CE 在 FTC 阈值前的主导因素为 AT,阈值后转变成 VPD,湿润带白天 CE 在 FTC 阈值前的主导因素为 SM,后转变成 AT,夜间各气候带主导因素在 FTC 阈值前后不变。

表 1 气象变量在 FTC 阈值前后对 CE 的直接路径系数

Table 1 Comparison of direct path coefficient of climate variables on CE before and after FTC threshold

时段 Period	气候带 Climate zone	AT		SM		VPD	
		阈值前	阈值后	阈值前	阈值后	阈值前	阈值后
白天 Daytime	半干旱	-0.33 *	0.22 ***	-0.19 *	-0.06 ***	0.19 *	-0.34 ***
	半湿润	0.45 ***	0.44 ***	0.20 ***	0.17 ***	-0.39 ***	-0.40 ***
	湿润	0.22 ***	0.33 ***	0.24 ***	0.12 ***	-0.15 ***	-0.23 ***
夜间 Nighttime	干旱	0.26 *	0.23 *	-0.12 *	-0.12 *	0.26 *	0.22 *
	半湿润	0.13 **	0.18 ***	-0.05 *	-0.06 *	0.12 ***	0.15 ***
	湿润	-0.19 ***	0.05 *	0.24 ***	0.27 ***	0.45 ***	0.31 ***

AT: 两米高度气温; SM: 土壤湿度; VPD: 饱和水汽压差; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

2.3.2 气象变量在 FTC 阈值前后对 CE 的间接影响差异

本研究将 AT 和 SM 通过 VPD 影响 CE 的间接路径系数与 AT 和 SM 对 CE 的直接路径系数的比值定义为效应比值,若该比值为正,表示两条路径方向一致,间接路径将增强直接路径,体现为协同效应,反之则抵消,体现为拮抗效应。当效应比值的绝对值超过 100%,说明间接影响起主导作用。

白天 AT 间接路径的效应比值均为负(图 5)。随着湿度增加,拮抗效应减弱,但在(半)干旱带效应比值的绝对值均超过 100%,说明在(半)干旱带 AT 主要通过控制 VPD 影响 CE。其中 AT 的拮抗效应在 FTC 阈值后较阈值前更强,而在(半)湿润带阈值前后并无显著差异。这可能是因为 FTC 增加后整体蒸腾作用增强,VPD 对蒸腾作用的影响更显著,但在(半)湿润带树木蒸腾能大幅增加空气湿度,进而减少 VPD 对蒸腾的抑制。除半干旱带外,SM 间接路径的比值均为正值,其中半湿润带的值最高,说明 SM 能够极大抑制 VPD 对 CE 的负面影响。湿润带的协同效应不如半湿润带是因为 VPD 水平较低,而干旱带协同效应最弱则是因为较低的 SM 水平。半干旱带在 FTC 阈值前 SM 体现为协同效应,在阈值后则表现为拮抗效应,即在阈值后 VPD 促进 CE,这说明在 FTC 较高的半干旱带,这些树木长期处于高 VPD 环境,对水分胁迫的抵抗力和耐受力较高,适当地增加 VPD 有利于蒸腾降温。SM 在(半)湿润带 FTC 阈值后的协同效应略微增强,这得益于土壤提供足够的水分以支持较高的蒸腾水平抑制 VPD。

夜间除湿润带外,AT 间接路径均体现为协同效应,特别是在(半)干旱带,AT 的间接影响接近甚至超过直接影响。湿润带在 FTC 阈值前 AT 体现为拮抗效应,在阈值后则体现为协同效应。这是因为 AT 在 FTC 阈值

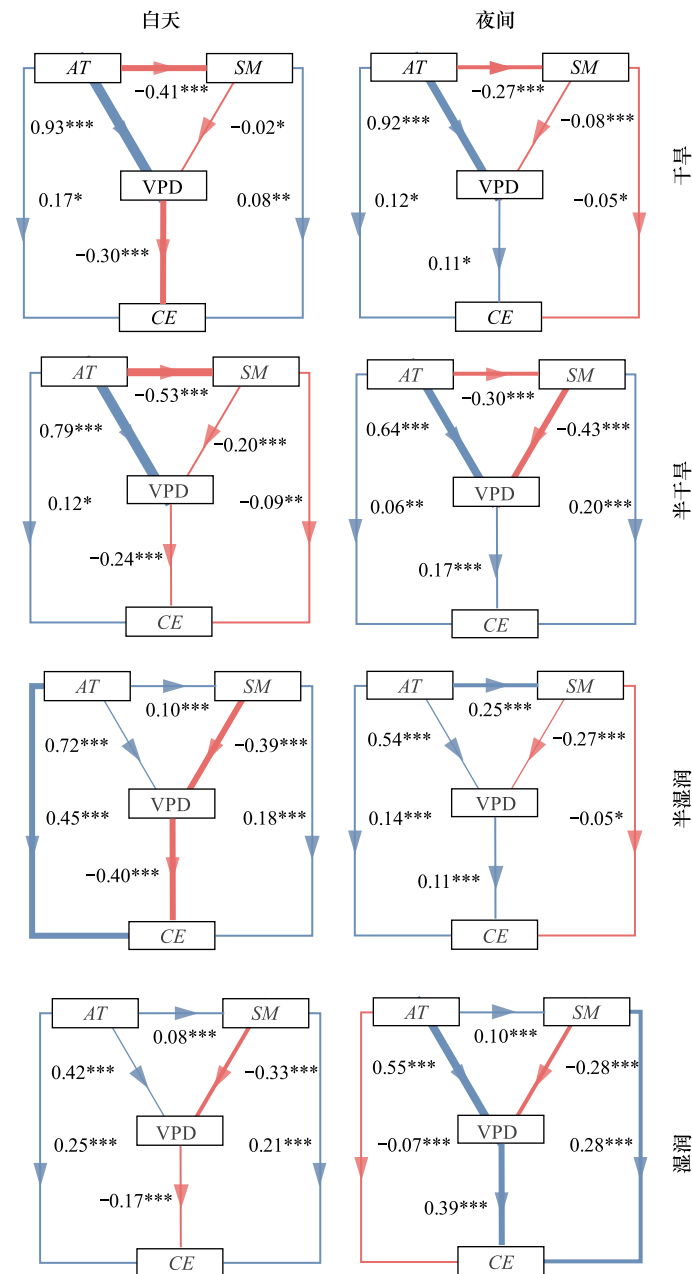


图4 气象变量对CE的直接和间接影响

Fig.4 The direct and indirect effects of climate variables on CE

AT: 2m 高度气温; SM: 土壤湿度; VPD: 饱和水汽压差; CE: 城市树木降温效率; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

前对CE的直接影响为负效应,阈值后为正效应,但无论阈值前后,间接影响均为正且强度相差不大。SM也呈现相似的格局,在半干旱和湿润带SM对CE体现为拮抗效应,干旱带SM在FTC阈值前呈现极强的协同效应,而在半湿润带,SM在FTC阈值后表现成较强的协同效应。

3 讨论

3.1 不同气候带下CE对FTC响应特征差异的解释

除半干旱带外,其余气候带的昼夜CE起初随FTC的增加而增加,这是因为在低FTC区域气温较高且湿度较低,有利于树木蒸腾作用^[33],且树木提供的相对遮荫更多^[34],导致CE增加。然而,随着局地FTC的增

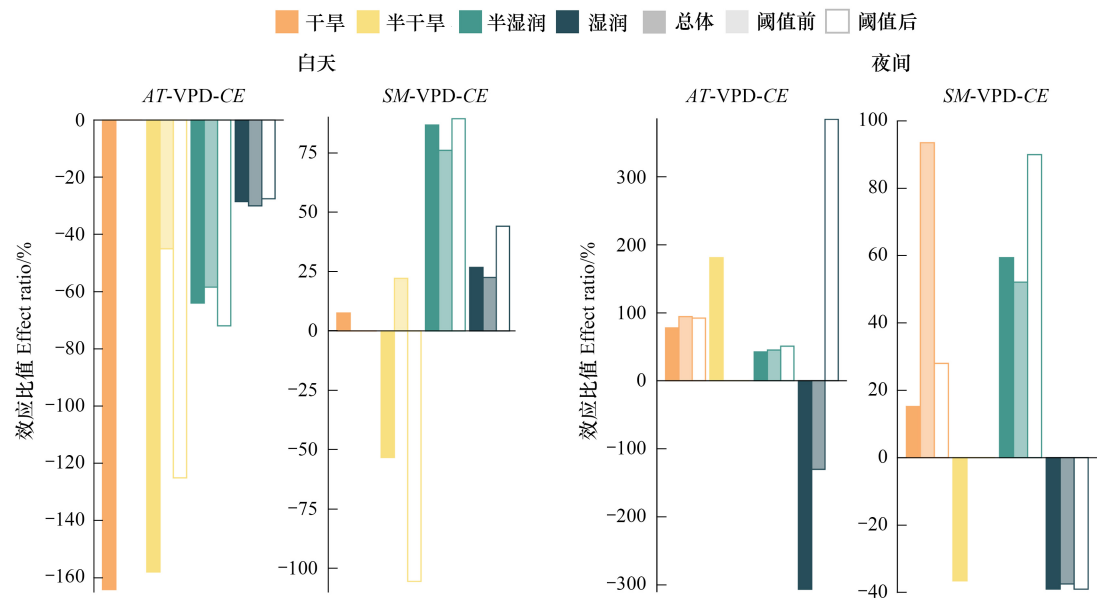


图 5 FTC 阈值前后气象变量对 *CE* 的直接和间接影响对比

Fig.5 Comparison of direct and indirect effects of climate variables on *CE* before and after FTC threshold

加,气温降低,湿度提高,将抑制树木的蒸腾作用^[35]。同时树冠重叠,叶面积指数不会显著增加,遮荫作用也不会显著增强(图 6)。此外,FTC 的增加会显著提高地表粗糙度,降低风速,使对流边界层由受迫对流转化为自然对流,导致边界层传质阻力增大^[36],蒸腾速率减小,从而使 *CE* 下降。而在半干旱带,随着 FTC 的增加,叶面积指数增长缓慢,反照率却显著降低,地表接收到更多的太阳短波辐射。但 FTC 低于 20%时,潜热通量无明显增加,无法抵消快速增长的短波辐射所累积的热量,因此 *CE* 随 FTC 增加而下降。此外,(半)干旱带风

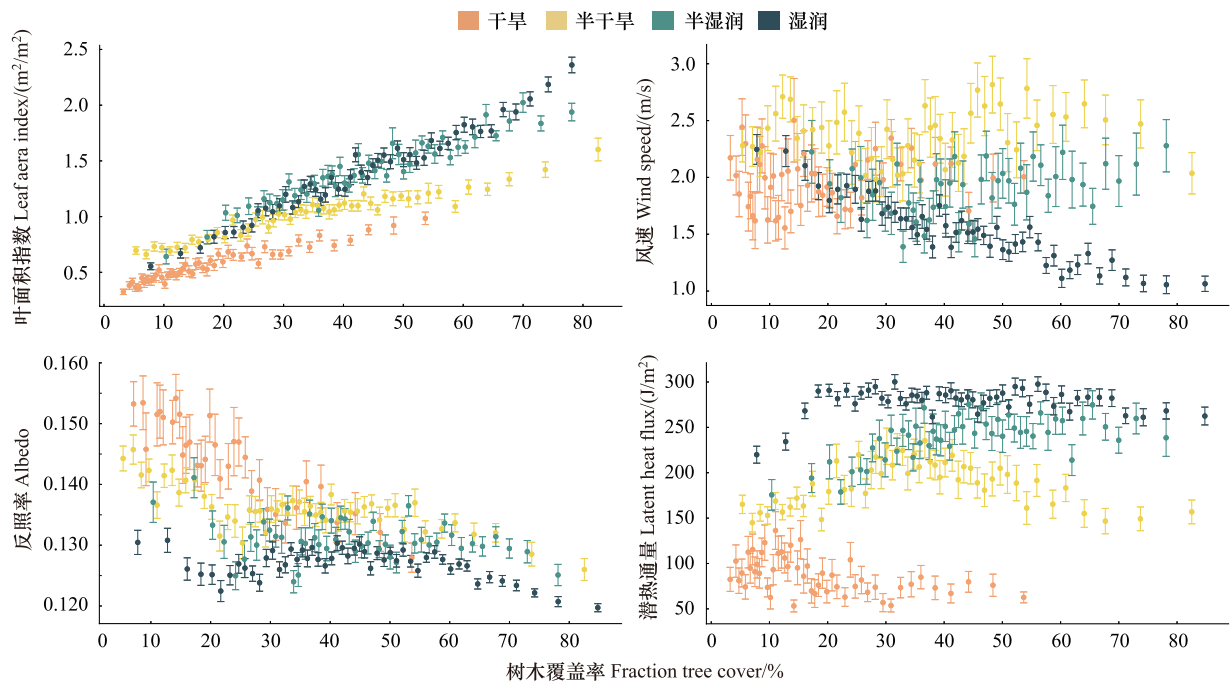


图 6 白天不同气候带部分变量随 FTC 增加的变化趋势

Fig.6 The trend of some variables with the increase of FTC across climate zones during the daytime

速随着 FTC 增加而增加,这可能是因为 FTC 增加显著提高了林地与裸地的 LST 差异,导致局地热力环流的形成^[37]。植被覆盖和植被密度增大也增加了热量和水汽传输的粗糙度,使得空气动力学阻抗减小,提高空气混合效率,更有利于蒸腾作用^[38]。综上,在半干旱带白天 CE 随 FTC 增加呈现 V 型变化趋势。

3.2 不同气候带下气候条件对 CE 的影响差异解释

热量和水分条件共同决定 CE,但二者的影响并非线性,在不同的气候条件下主导因素也有所不同^[39]。在(半)干旱带,AT 主要通过控制 VPD 来影响 CE,而在(半)湿润带,AT 和 SM 则直接影响 CE。这说明,在干旱条件下,VPD 对蒸腾作用的控制更为关键,而在湿润条件下,气温可能通过影响树木生长进而影响 CE。

在(半)湿润带,SM 的协同效应减弱,可能是因为植被蒸腾潜力达到饱和^[40]。在(半)干旱区域,植被蒸腾和土壤蒸散受到可利用水量的限制,即使增加少量降水量,也能显著提升地表蒸散量。然而,由于区域湿度的增加,植被和土壤蒸散受到可利用水量的限制减少,使得增加降水量并不能大幅改变地表蒸散量。特别是在降水量已经很高的湿润带,植被和土壤有充分的水分可利用,此时地表蒸散发量主要受到太阳辐射和植被本身蒸散潜力的限制,地表温度不再随土壤湿度的变化而显著改变。

3.3 不足与展望

第一,本研究没有区分普通夏日和极端高温,连续极端高温会对树木生长造成不可逆的影响^[41—42]。在全球变暖的背景下,未来可进一步研究极端高温事件下 CE 对 FTC 的响应特征是否会发生变化,也可在不同排放情境下对 CE 的变化趋势进行预测。第二,本研究仅讨论了部分气象变量对 CE 直接和间接影响,未来可进一步拓展到其他类型变量例如城市建筑特征(不透水面占比,建筑高度和城市峡谷高宽比等),这些变量在之前的研究中已被证实通过影响树木所在的微气候环境进而影响树木降温效应^[43—44]。第三,本研究属于宏观尺度研究,无法考虑树种类型,且出于城市景观的考虑,当地会种植非本地物种,这将影响结果的普适性^[45],未来可进行城市微观尺度的相关研究。

4 结论

本研究通过对城市树木降温效率 CE 的阈值效应及气候条件在阈值前后对 CE 的差异性影响进行分析得到以下结论:(1)在干旱带白天和半干旱带夜间,CE 随 FTC 的增加不存在显著拐点,在半干旱带白天和干旱带夜间,FTC 阈值为 19%,半湿润带昼夜 FTC 阈值分别为 45%和 30%,湿润带为 55%和 23%。(2)白天 AT 和 SM 主要促进 CE,VPD 抑制 CE,在半干旱带较显著,而在夜间由于夜间树木生理活动减弱,气象变量对 CE 的影响程度减弱,但 VPD 阈值提升,VPD 促进 CE。在(半)干旱带,AT 和 SM 主要通过控制 VPD 间接影响 CE,而在(半)湿润带,AT 和 SM 则主要直接影响 CE。(3)在半干旱带 AT 和 VPD 对白天 CE 的直接影响方向在 FTC 阈值前后发生变化,夜间湿润带 AT 对 CE 的影响在 FTC 阈值前后出现反转,而半湿润带气象变量在 FTC 阈值前后对昼夜 CE 的直接影响差异最小。为最大化发挥城市树木降温效应,干旱带的城市应将 FTC 控制在 20%,并通过滴灌等方式缓解 VPD 的负面影响,也可探索浅色立面等非生物方式降温,而湿润带的城市可将 FTC 控制在 30%—50%,并注意树木对夜间地表降温的负面影响。

参考文献(References):

- [1] Wu W B, Yu Z W, Ma J, Zhao B. Quantifying the influence of 2D and 3D urban morphology on the thermal environment across climatic zones. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 226: 104499.
- [2] Yu Z W, Yang G Y, Lin T, Zhao B, Xu Y Y, Yao X H, Ma W Y, Vejre H, Jiang B. Exposure ecology drives a unified understanding of the nexus of (urban) natural ecosystem, ecological exposure, and health. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024, 10: 165.
- [3] Schwaab J, Meier R, Mussetti G, Seneviratne S, Bürgi C, Davin E L. The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6763.
- [4] 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.

- [5] Feyisa G L, Dons K, Meilby H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: an example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 87-95.
- [6] 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.
- [7] Du H Y, Cai W B, Xu Y Q, Wang Z B, Wang Y Y, Cai Y L. Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing Data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 24-31.
- [8] Yu Z W, Yang G Y, Zuo S D, Jørgensen G, Koga M, Vejre H. Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: a threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 49: 126630.
- [9] Zhou W Q, Wang J, Cadenasso M L. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: a comparative study. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195: 1-12.
- [10] Zhan W F, Wang C L, Wang S S, Li L, Ji Y Y, Du H L, Huang F, Jiang S D, Liu Z H, Fu H Y. Fraction-dependent variations in cooling efficiency of urban trees across global cities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 216: 229-239.
- [11] Wang J, Zhou W Q, Jiao M. Location matters: planting urban trees in the right places improves cooling. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2022, 20(3): 147-151.
- [12] Cheng X Y, Liu Y X, Dong J Q, Corcoran J, Peng J. Opposite climate impacts on urban green spaces' cooling efficiency around their coverage change thresholds in major African cities. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 88: 104254.
- [13] Yang Q Q, Huang X, Tong X H, Xiao C J, Yang J, Liu Y, Cao Y X. Global assessment of urban trees' cooling efficiency based on satellite observations. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(3): 034029.
- [14] Zhao J C, Zhao X, Wu D H, Meili N, Fatichi S. Satellite-based evidence highlights a considerable increase of urban tree cooling benefits from 2000 to 2015. *Global Change Biology*, 2023, 29(11): 3085-3097.
- [15] Yu Z W, Chen T T, Yang G Y, Sun R H, Xie W, Vejre H. Quantifying seasonal and diurnal contributions of urban landscapes to heat energy dynamics. *Applied Energy*, 2020, 264: 114724.
- [16] Bai X Y, Yu Z W, Wang B Y, Zhang Y T, Zhou S Q, Sha X H, Li S H, Yao X H, Geng X L. Quantifying threshold and scale response of urban air and surface temperature to surrounding landscapes under extreme heat. *Building and Environment*, 2024, 247: 111029.
- [17] Yu Z W, Chen J Q, Chen J K, Zhan W F, Wang C H, Ma W J, Yao X H, Zhou S Q, Zhu K, Sun R H. Enhanced observations from an optimized soil-canopy-photosynthesis and energy flux model revealed evapotranspiration-shading cooling dynamics of urban vegetation during extreme heat. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 305: 114098.
- [18] Cheng X Y, Peng J, Dong J Q, Liu Y X, Wang Y L. Non-linear effects of meteorological variables on cooling efficiency of African urban trees. *Environment International*, 2022, 169: 107489.
- [19] Zhang H, Han J J, Zhou R, Zhao A L, Zhao X, Kang M Y. Quantifying the relationship between land parcel design attributes and intra-urban surface heat island effect via the estimated sensible heat flux. *Urban Climate*, 2022, 4141: 101030.
- [20] Zomer R J, Xu J C, Trabucco A. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 409.
- [21] Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, Vergopolan N, Berg A, Wood E F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 2018, 5: 180214.
- [22] Li X C, Gong P, Zhou Y Y, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Xiao Y X, Xu Bin, Yang J. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094044.
- [23] Hulley G C, Götsche F M, Rivera G, Hook S J, Freepartner R J, Martin M A. Validation and quality assessment of the ECOSTRESS level-2 land surface temperature and emissivity product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5000523.
- [24] Liu Z H, Zhan W F, Lai J M, Bechtel B, Lee X H, Hong F L, Li L, Huang F, Li J F. Taxonomy of seasonal and diurnal clear-sky climatology of surface urban heat island dynamics across global cities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 187: 14-33.
- [25] 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.
- [26] Wujeska-Klaue A, Pfautsch S. The best urban trees for daytime cooling leave nights slightly warmer. *Forests*, 2020, 11(9): 945.
- [27] Zhao L, Lee X H, Smith R B, Oleson K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511(7508): 216-219.
- [28] Peng J, Liu Q Y, Xu Z H, Lyu D N, Du Y Y, Qiao R L, Wu J S. How to effectively mitigate urban heat island effect? A perspective of waterbody patch size threshold. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 202: 103873.
- [29] Toms J D, Lesperance M L. Piecewise regression: a tool for identifying ecological thresholds. *Ecology*, 2003, 84(8): 2034-2041.
- [30] Muggeo V M R. Regression models with breakpoints/changepoints estimation. 2017.

- [31] Michel T, Vinzi V E, Chatelin Y M, Carlo L. PLS path modeling. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2005, 48(1): 159-205.
- [32] Zhong Z Q, He B, Wang Y P, Chen H W, Chen D L, Fu Y H, Chen Y N, Guo L L, Deng Y, Huang L, Yuan W P, Hao X M, Tang R, Liu H M, Sun L Y, Xie X M, Zhang Y F. Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity. *Science Advances*, 2023, 9(32): eadf3166.
- [33] Li W F, Cao Q W, Lang K, Wu J S. Linking potential heat source and sink to urban heat island: heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 457-465.
- [34] Jiao M, Zhou W Q, Zheng Z, Yan J L, Wang J. Optimizing the shade potential of trees by accounting for landscape context. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 70: 102905.
- [35] Jiao M, Zhou W Q, Zheng Z, Wang J, Qian Y G. Patch size of trees affects its cooling effectiveness: a perspective from shading and transpiration processes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 293-299.
- [36] Rahman M A, Moser A, Rötzer T, Pauleit S. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Building and Environment*, 2017, 114: 118-128.
- [37] Kim D, Oren R, Oishi A C, Hsieh C I, Phillips N, Novick K A, Stoy P C. Sensitivity of stand transpiration to wind velocity in a mixed broadleaved deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 187: 62-71.
- [38] 张杰, 张强, 黄建平. 空气动力学阻抗算法在半干旱区的应用比较和遥感反演. *高原气象*, 2010, 29(3): 662-670.
- [39] Ziter C D, Pedersen E J, Kucharik C J, Turner M G. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(15): 7575-7580.
- [40] Manoli G, Fatichi S, Schlöpfer 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(7772): 55-60.
- [41] Wang C H, Wang Z H, Wang C Y, Myint S W. Environmental cooling provided by urban trees under extreme heat and cold waves in U.S. cities. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 227: 28-43.
- [42] 李晓萌, 孙永华, 孟丹, 余洁, 李小娟. 近 10 年北京极端高温天气条件下的地表温度变化及其对城市化的响应. *生态学报*, 2013, 33(20): 6694-6703.
- [43] Meili N, Manoli G, Burlando P, Carmeliet J, Chow W T L, Coutts A M, Roth M, Velasco E, Vivoni E R, Fatichi S. Tree effects on urban microclimate: diurnal, seasonal, and climatic temperature differences explained by separating radiation, evapotranspiration, and roughness effects. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 58: 126970.
- [44] Paschalis A, Chakraborty T, Fatichi S, Meili N, Manoli G. Urban forests as main regulator of the evaporative cooling effect in cities. *AGU Advances*, 2021, 2(2): e2020AV000303.
- [45] Rahman M A, Stratopoulos L M F, Moser-Reischl A, Zölch T, Häberle K H, Rötzer T, Pretzsch H, Pauleit S. Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis. *Building and Environment*, 2020, 170: 106606.