

亚热带城市乡土树种小叶榕的蒸腾、 降温及其减碳效益研究

丁俊杰 秦龙君 谭圣林 于小惠 邹振东 邱国玉 鄢春华[†]

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; [†]通信作者, E-mail: yanch@pku.edu.cn

摘要 基于蒸腾扩散系数, 对几种亚热带城市典型植物的蒸腾降温潜力进行评估, 并对小叶榕进行持续观测, 定量地研究其蒸腾降温特征和节能减碳效益, 得到如下结论。1) 在研究区域内的几种典型植被中, 小叶榕作为乡土树种, 在相同的环境条件下表现出最强的蒸腾降温潜力。2) 单株小叶榕的日均蒸腾水量为 32.48 kg, 总体上呈现夏秋高、春冬低的特点; 同时, 小叶榕能有效地缓解热岛效应, 尤其是在热岛效应严重的夏季夜间, 其蒸腾降温作用使得观测区域 86% 的时间为无热岛状态。3) 单株小叶榕每年通过蒸腾降温作用间接减少的二氧化碳排放量达到 1442.10 kg。

关键词 三温模型; 小叶榕; 植被蒸腾; 降温作用; 减碳效益

Study on Characteristics of Transpiration, Cooling Effect and Carbon-Reduction Effect of *Ficus concinna*, a Native Tree Species in Subtropical Cities

DING Junjie, QIN Longjun, TAN Shenglin, YU Xiaohui, ZOU Zhendong, QIU Guoyu, YAN Chunhua[†]

School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

[†] Corresponding author, E-mail: yanch@pku.edu.cn

Abstract Based on the transpiration transfer coefficient (h_{at}), the cooling potential of several typical subtropical urban vegetations was evaluated. A *Ficus concinna* was continuously observed to quantitatively study its characteristics of transpiration, cooling effect and carbon-reduction effect. The results showed that 1) among several typical vegetations in the study area, *Ficus concinna*, as a native tree species, showed the strongest cooling potential in the same environment. 2) The average daily transpiration volume of *Ficus concinna* was 32.48 kg per tree, which was generally high in summer and autumn and low in spring and winter. At the same time, *Ficus concinna* could effectively alleviate the heat island effect, especially at night in summer when the heat island effect was severe, its cooling effect made the observation area no heat island state for 86% of the time. 3) The annual carbon emission reduction from the cooling effect of individual *Ficus concinna* reached 1442.1 kg.

Key words three-temperature model; *Ficus concinna*; vegetation transpiration; cooling effect; carbon-reduction effect

近年来, 随着城市的快速发展和碳排放的急剧增加, 城市热岛效应愈发严重, 不仅影响城市居民的身心健康, 还影响社会和谐和可持续发展^[1-2], 因此, 缓解城市热岛效应已经成为亟待解决的问题。目前, 缓解热岛效应的主要方式有降低人为热源排放、增加城市绿地面积、采用新型建筑材料以及优

化城市布局等^[3]。其中, 植被能够遮蔽一定的长短期辐射^[4], 通过蒸腾作用以潜热的形式消耗大量辐射^[5], 在增加湿度的同时减少显热, 从而使地表和空气降温, 成为缓解热岛效应的重要手段^[6-7]。

目前关于植被蒸腾降温效应的研究, 大多集中在从群落角度探究植被降温效果与植被盖度等结构

或形态参数的关系^[8-14], 对不同类型植被蒸腾降温效果的定量评估较为缺乏。由于针对城市高异质性下垫面^[15-16]进行研究, 目前的植被蒸腾观测方法存在一定的局限性, 限制了对降温效果的准确定量评估。在现有的蒸散发计算方法中, 三温模型^[17]以地表能量平衡方程为基础, 通过引入参考植被的概念(干燥、无蒸腾的植被), 简化了蒸散发的计算过程, 适用于高异质性下垫面的蒸散发观测^[18-20]。其子模型的蒸腾扩散系数已应用于评估植被的健康状况^[21]。并且, 由于仅需测量 3 个温度, 观测简单, 所以该模型在评估城市植被蒸腾降温效果方面具有较大的潜力。

本研究通过采集亚热带城市典型植被的热红外图像, 结合同步观测的气象数据和植物蒸腾数据, 利用蒸腾扩散系数, 评估不同植物的降温潜力。在此基础上, 利用树干液流法和植物生理观测, 探究降温潜力最大的亚热带城市乡土树种小叶榕的蒸腾特征、降温效果及其节能减碳效益。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

深圳市地处广东省东南沿海, 属亚热带海洋性气候, 受南亚热带季风影响, 雨热同期, 夏长冬短, 四季温和, 雨量充沛, 辐射丰富。多年平均气温为 22.3°C, 最冷月(1 月)平均气温为 14.9°C, 最热月(7 月)平均气温为 28.6°C。多年平均降水量为 1924.7 mm, 年平均降水日数为 146 天, 其中 5—9 月降水较多, 10—4 月降水较少。多年平均日照时数为 2060 小时, 年太阳辐射量为 5225 MJ/m²。

观测样地位于深圳大学城北京大学深圳研究生院校园内, 该观测区域植被覆盖率约为 60%, 包含多种典型的亚热带城市植物, 包括小叶榕(*Ficus concinna*)、黄金间碧竹(*Bambusa vulgaris* f. *Vittata*)、南洋楹(*Albizia falcataria* (Linn.) Fosberg)、小叶榄仁(*Terminalia mantaly*)、苦楝(*Melia azedarach* Linn.)、桃花心木(*Swietenia mahagoni* (Linn.) Jacq)、白兰(*Michelia alba* DC.)和金叶女贞(*Ligustrum × vicaryi* Rehder)等, 为研究相同条件下不同植物的蒸腾降温潜力提供了条件。

小叶榕属桑科榕属常绿乔木, 喜暖热多雨气候, 在我国亚热带区域(尤其是广东)分布范围广泛。作为深圳的乡土树种, 其生存能力极强, 生长快, 寿命长, 易于移栽, 是优良的植树造林绿化树种, 是

深圳市居住区、公园、医院等各类城市区域最常见的绿化树种之一。

1.2 观测方法

1.2.1 树干液流法

本研究使用树干液流法观测小叶榕的长期蒸腾特征。在选定的小叶榕胸高处安装一套两针的 SF-G 传感器探针(Ecomatic Ltd, 德国), 即在树干的胸高处(1.3 m 高)钻取两个间隔 10 cm, 皮下深 2 cm, 直径为 2 mm 的小洞, 后将直径约为 2 mm 的铝管插入洞中, 再将上下探针涂上具有良好导热性能的硅润滑油, 分别轻轻插入铝管中。在树干外部用防辐射罩包裹防护。利用 CR1000 数据采集器(Campbell Scientific, 美国)自动记录上下两个探针间的温差数据, 每分钟采集 1 次数据, 并存储每 10 分钟的平均值。

1.2.2 热红外遥感拍摄

采用蒸散发扩散系数来评估不同植物的蒸腾降温潜力, 该方法需要通过热红外成像技术获取植物的表面温度。使用 IR Flexcam Ti55 Thermal Imager 红外热像仪(Fluke Corp, 美国), 分别对观测样地内典型植物进行拍摄, 包括黄金间碧竹、小叶榄仁、桃花心木、苦楝、金叶女贞、白兰、南洋楹和小叶榕。分别于 2014 年 7 月 15 日、8 月 15 日、8 月 16 日和 10 月 13 日共 4 个晴朗少云的日期, 每天从 8:00 至 17:00, 每小时对上述对象各拍摄一次。拍摄时, 观测人员站在植物旁建筑物楼顶, 尽量以垂直向下的角度进行拍摄, 每个对象每次拍摄 3 张平行图像。Ti55 型红外热像仪的观测波段为 8~14 μm, 观测精度为 ±1°C, 灵敏度为 0.05°C, 图像分辨率为 320×240。

1.2.3 生理生态观测

为了研究小叶榕的夜间蒸腾降温潜力, 于 2016 年 6 月 24 日 20:00 至次日凌晨 5:00 采集小叶榕的热红外图像, 并同步采用 Li-6400XT 便携式光合作用测量系统(LI-COR, 美国), 在自然条件下对夜间叶面的蒸腾速率进行活体测定, 夜间每小时测定 1 次, 每次随机选取健康、成熟、干净的 3 枚叶片进行测定。该仪器基于参考气体与叶室气体的 H₂O 浓度差、气体流速和叶面积等参数计算蒸腾速率, 并直接输出结果。

1.2.4 气象观测

本研究通过在观测样地架设气象观测系统来获取气象数据。观测的气象数据包括太阳总辐射、光

表 1 气象观测系统传感器信息
Table 1 Information of sensors of meteorological observation system

观测要素	仪器型号	安装高度/m	测量精度
相对湿度和气温	225-050YA, NOVALYNX, 美国	2.0, 1.5	± 3%, ± 0.6°C
太阳总辐射	PYP-PA, APOGEE, 美国	2	10~40 μV·W ⁻¹ ·m ²
光合有效辐射	QSOA-S, APOGEE, 美国	2	<3%
净辐射	240-100, NOVALYNX, 美国	2	<4%

合有效辐射、净辐射、气温和相对湿度, 传感器具体信息如表 1 所示。利用 CR1000 数据采集器记录各个传感器数据, 每分钟采集 1 次数据, 并存储每 10 分钟的平均值。同时, 将深圳大学城内一片天然混杂林(秋枫(*Bischofia javanica*)、相思(*Acacia confuse*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、合欢(*Albizia julibrissin*)和垂叶榕(*Ficus benhamina*)作为参考绿地, 记录其气温数据。

1.3 数据处理方法

1.3.1 树干液流法

树干液流系统直接观测得到上下两个探针之间的温度差。根据 Granier^[22]提出的液流密度经验公式, 可求得液流密度($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$):

$$F_d = 119 \times [(\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T]^{1.231}, \quad (1)$$

其中, ΔT_{\max} 为昼夜最大温差, ΔT 为瞬时温差, F_d 为瞬时液流密度。

本研究暂不考虑液流密度的径向差异, 用单个部位测得的液流密度代表整个边材厚度上的液流密度值, 因此整树瞬时蒸腾速率 T_r (g/s) 可通过以下公式计算:

$$T_r = F_d \times A_s, \quad (2)$$

其中, A_s 为边材面积, 本研究中小叶榕的边材面积约为 0.048 m^2 。

1.3.2 蒸腾扩散系数

影响植被蒸腾作用的因素可分为外因和内因。外因主要是水分和能量供应, 同时风速和水汽压差等也有影响。内因主要由植被的生理构造及其活动特征决定。邱国玉等^[23-24]提出用植被蒸腾扩散系数评价植被的蒸腾能力, 该系数的计算公式如下:

$$h_{at} = \frac{T_c - T_a}{T_{cp} - T_a}, \quad (3)$$

其中, h_{at} 为植被蒸腾扩散系数, T_c 为植被表面温度

(°C), T_a 为气温(°C), T_{cp} 为参考表面温度(°C)。气温通过气象观测系统直接获取, 植被表面温度取红外热像仪所测温度的平均值, 参考温度为叶片不发生蒸腾时的表面温度。

从理论上讲, T_a 为一定值时, 受净辐射影响, $T_c > T_a$ 。当植被受到非常大的水分亏缺或环境胁迫, 叶片不发生蒸腾时, T_a 达到最大值 T_{cp} , 此时 h_{at} 取得最大值 1。随着植被受到的水分亏缺或环境胁迫不断降低, 叶片蒸腾速率不断增大, T_c 不断降低, h_{at} 值也不断减小。当植被供水充足、没有环境胁迫, 蒸腾速率达到潜在蒸腾速率时, T_c 达到最小值, h_{at} 也取得最小值, 此时蒸腾速率主要取决于太阳辐射和水汽压梯度等气象条件。因此, 在其他条件相同时, h_{at} 越小, 植被的蒸腾作用越明显, 降温潜力也越大。

1.3.3 城市热岛强度

本研究将深圳大学城内一片天然混杂林作为参考绿地, 并以该区域的气温为背景值计算热岛强度。根据 Oke 等^[25]提出的计算方法, 城市热岛强度(UHII)为观测区域与参考绿地的温度差:

$$\text{UHII} = T_{ob} - T_{ref}, \quad (4)$$

其中, T_{ob} 为小叶榕观测区域的温度(°C), T_{ref} 为参考绿地的温度(°C)。

本研究根据城市热岛强度的大小, 将其分为无($\leq 0.5^\circ\text{C}$)、弱($0.5^\circ\text{C} \sim 1.5^\circ\text{C}$)、中等($1.5^\circ\text{C} \sim 2.5^\circ\text{C}$)、强($2.5^\circ\text{C} \sim 3.5^\circ\text{C}$)和极强($> 3.5^\circ\text{C}$)5 个等级。

2 结果与讨论

2.1 不同植被类型的蒸腾降温潜力比较

选择 2014 年 8 月 15 日的日间热红外遥感观测数据, 计算观测样地内植物的蒸腾扩散系数(h_{at}), 结果如图 1 所示。由于研究区域 2014 年 8 月 13 日至 14 日上午有一场降雨, 可认为 8 月 15 日研究区域植被的水分条件较为充足。同时, 该日天气晴朗,

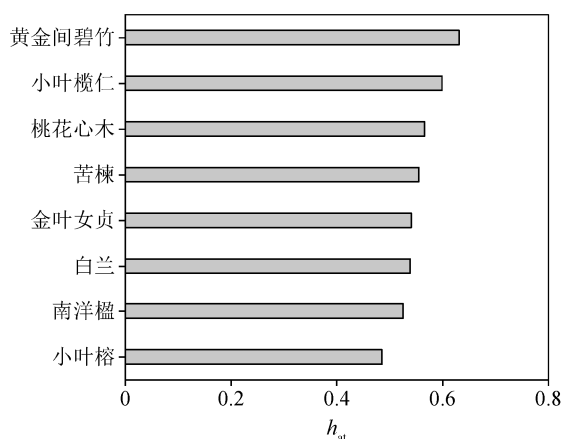


图 1 典型城市植物的 h_{at}
Fig. 1 h_{at} of typical urban vegetation

阳光强烈,且观测植被均处于相似的环境条件下,故可认为这些植被的辐射、气温和相对湿度等环境条件较为一致。因此,影响 h_{at} 的主要因素是各种植被的生理构造与活动特性。

2014 年 8 月 15 日的数据显示,典型植被的 h_{at} 从小到大排序为小叶榕(0.4853)<南洋楹(0.5252)<白兰(0.5386)<金叶女贞(0.5406)<苦楝(0.5547)<桃花心木(0.5657)<小叶榄仁(0.5989)<黄金间碧竹(0.6310)。因此,小叶榕蒸腾降温潜力最大,其次为南洋楹、白兰、金叶女贞、苦楝和桃花心木,小叶榄仁和黄金间碧竹的蒸腾降温潜力相对较小。由此可见,小叶榕作为亚热带城市常见的乡土树种,不仅生长快,寿命长,经济美观,绿化效果好,还具有相对较强的蒸腾降温潜力。

2.2 城市单株小叶榕的蒸腾特征

本文通过树干液流法,对研究区域内一棵小叶榕的蒸腾进行长期观测,该小叶榕的日蒸腾量变化情况如图 2 所示。观测期内,小叶榕的日蒸腾量为 1.23~66.65 kg。最大日蒸腾量为 66.65 kg,出现在 2015 年 8 月 25 日。该日平均太阳总辐射为 415.69 W/m^2 ,平均光合有效辐射为 1036.00 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$,平均饱和水汽压差为 2.07 kPa,无降雨,水热条件较好,利于植被蒸腾。最小日蒸腾量为 1.23 kg,出现在 2015 年 4 月 11 日。该日为暴雨天,日降雨量为 25.10 mm,日均太阳总辐射为 50.78 W/m^2 ,日均光合有效辐射 150.14 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$,日均饱和水汽压差为 0.29 kPa,植被蒸腾的驱动力较小。2014 年 8 月 1 日—2015 年 7 月 31 日的一年间,小叶榕年蒸腾总用水量达到 11854.30 kg,日均蒸腾水量为 32.48 kg。

从图 3 看出,小叶榕月蒸腾量在 1—9 月逐渐增大,10—12 月逐渐减小。观测期内,2015 年 8 月的蒸腾量最大,为 1613.52 kg;2014 年 12 月的蒸腾量最小,仅为 615.58 kg。总体而言,小叶榕的蒸腾量明显呈现干湿两季差异性特征,深圳雨季降水充沛,辐射强度大,小叶榕的蒸腾量相对较大,而旱季降水较少,辐射相对较弱,小叶榕的蒸腾量也相对较小。

城市乔木的蒸腾速率与气候环境、乔木种类和大小等因素密切相关。据 Pataki 等^[26]的研究,在洛杉矶植物园的 5 种不同乔木中,榕树日均蒸腾量相对较高,且同样明显高于本研究中小叶榕同期的日

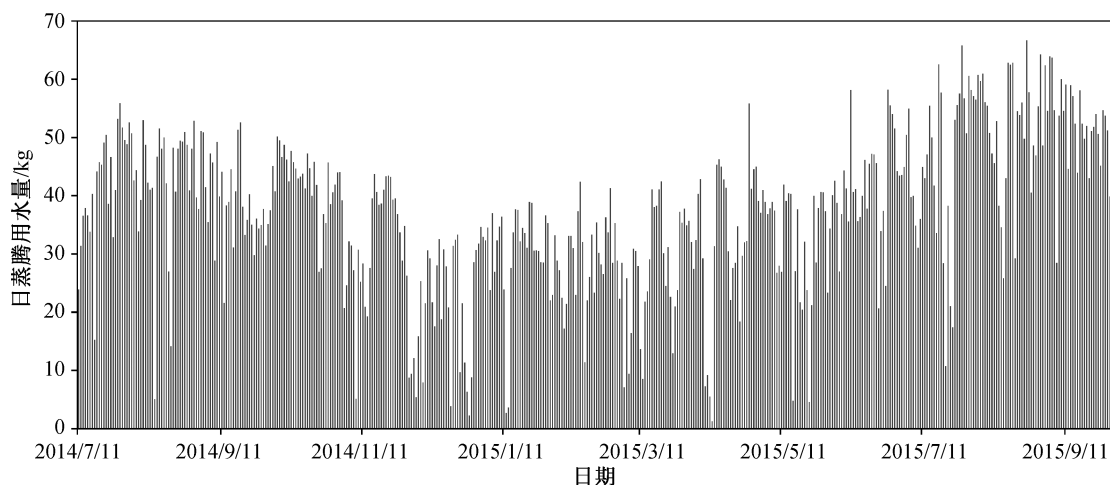


图 2 基于树干液流法的小叶榕日蒸腾用水量变化(2014 年 7 月 11 日—2015 年 9 月 30 日)
Fig. 2 Daily water use of *Ficus concinna* from sap flow (from July 11, 2014 to Sept. 30, 2015)

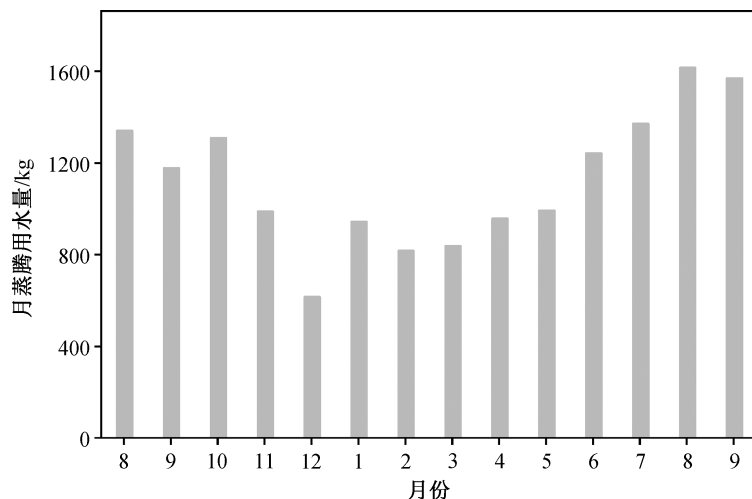


图3 基于树干液流法的小叶榕月蒸腾用水量变化
Fig. 3 Monthly water use of *Ficus concinna* from sap flow

均蒸腾量, 达到 89.90 kg。这可能是由于洛杉矶夏季辐射同样充足, 虽然降水较少, 但研究期间保证了充分的灌溉, 因此土壤水分较为充分, 在更加干燥的环境中, 相对较大的饱和水汽压差促进了榕树的蒸腾。在相似气候条件下的日本三好市, 榉树 (*Zelkova serrata*) 的日蒸腾量明显低于本研究的小叶榕, 反映出乔木种类和大小对蒸腾的影响^[27]。

2.3 城市单株小叶榕的夜间蒸腾降温效果

进一步分析小叶榕 2016 年 6 月 24 日的夜间蒸腾降温潜力(图 4), 可知小叶榕的植被蒸腾扩散系数 h_{at} 在 0:00 前快速增加, 从 20:00 的 0.71 增至 0:00 的 0.85, 后半夜则维持在 0.87~0.90, 说明小叶榕在夜间仍然发生蒸腾作用, 且在 0:00 前仍存在一定的降温潜力, 但其降温潜力随着夜间蒸腾的衰减不断降低。这与 Li-6400XT 观测到的叶片蒸腾速率

变化规律是一致的, 20:00 叶片蒸腾速率为 0.36 $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 在夜间也呈现不断减小的趋势, 在凌晨 2:00 时接近零。

小叶榕夜间蒸腾降温效果的衰减过程亦反映在夜间小叶榕叶片表面温度和气温的差值变化上。从图 5 可以看出, 小叶榕叶片表面与周围空气之间的温差为 1.2°C~2.8°C, 且 0:00 前二者温差较大, 维持在 1.3°C 以上, 进一步说明小叶榕在 0:00 前降温效果更好, 之后逐渐减弱。

不同季节小叶榕观测区的热岛效应强度如图 6 所示。结果表明, 自夜间至日出阶段, 小叶榕观测区有 14% 为弱热岛, 且仅出现在秋季; 白天无热岛, 并且部分时段出现超低温现象(观测区气温低于参考绿地), 说明观测区夜间的热岛强度比白天强。就不同季节来看, 秋季, 观测区夜间的热岛强度最

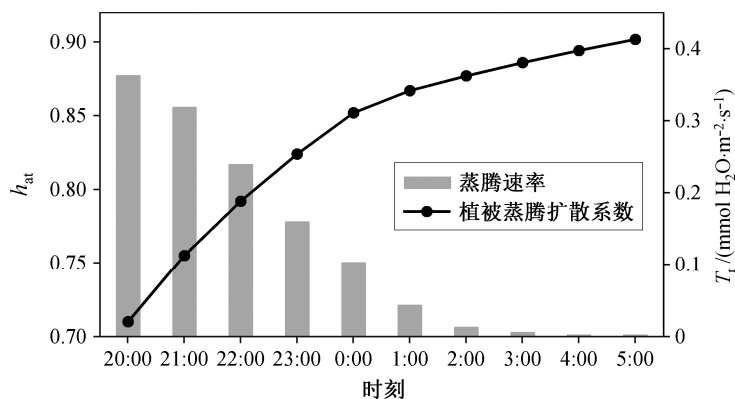


图4 采用 Li-6400XT 观测得到的小叶榕夜间蒸腾速率 T_t 和基于三温模型的植被蒸腾扩散系数 h_{at}
Fig. 4 Variations of leaf transpiration rates from Li-6400XT and h_{at} of *Ficus concinna* from 3T Model

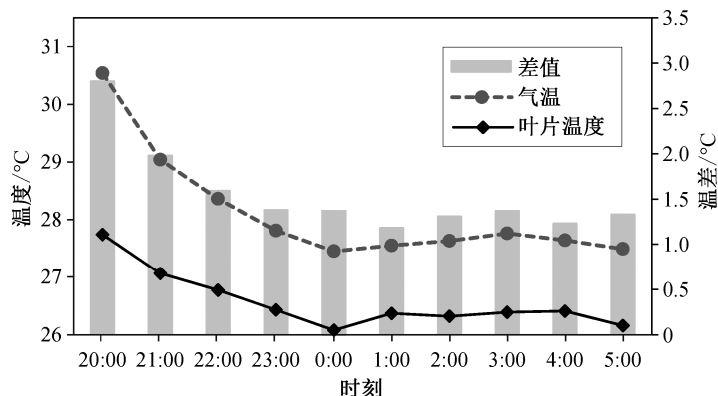


图 5 夜间小叶榕叶片表面温度与气温变化情况

Fig. 5 Variations of leaf surface temperature, air temperature and their differences of *Ficus concinna* at night

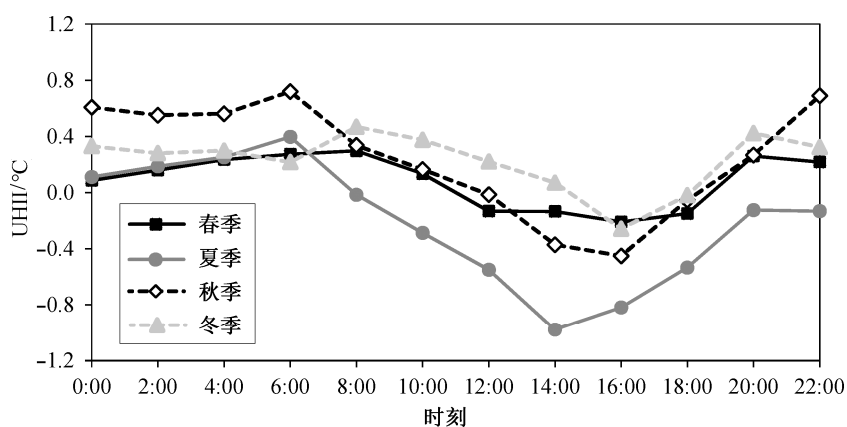


图 6 不同季节小叶榕观测区热岛强度变化

Fig. 6 UHII at the observation area in different seasons

高,最高值达到 0.7°C;夏季,小叶榕观测区的热岛强度最低,夜间 22:00 前,观测区的气温低于参考绿地。夏季是一年中最为炎热的季节,而小叶榕观测区在夏季夜间的热岛强度却是四季中最弱的,说明小叶榕的夜间蒸腾有显著且实时的降温作用。朱春阳等^[28]的研究结果也表明,绿地的降温功能在不同的时间效果不同,一般在气温较高时段发挥得最为显著。

对比同时段城区(硬化路面和建筑物)的热岛强度^[29]可以发现,夜间城区几乎全部为中等强度热岛,热岛强度年均值为 1.8°C;白天城区全部为弱热岛,热岛强度年均值为 1.2°C。由此可见,小叶榕蒸腾可以有效地缓解热岛问题,尤其在夜间,86%为无热岛,而硬化路面和建筑物区却常年处于中等强度的热岛效应中。

本文研究结果与下述研究一致。苏泳娴等^[30]发现,在夜间,城市绿地的降温效果与植被覆盖率有

比白天更显著的相关性。郭秋萍^[29]采用运动样带观测深圳大学城的热岛效应,发现城市夜间的热岛强度与绿地率有很强的负相关关系,绿地率每增加 10%,夜间热岛强度就会减弱 0.5°C。由此可见,城市绿地不仅能在白天发挥蒸腾降温效果,在夜间也有明显的降温效果,夜间蒸腾对缓解城市热岛效应有非常重要的作用。

2.4 单株小叶榕蒸腾降温的减碳效益评估

城市植被(尤其乔木)是城市中重要的碳汇,而小叶榕作为最为常见的亚热带城市的乡土树种,由于其本身较为美观、种植成本低、易于生长和寿命长的特点,不仅绿化效果好,还有重要的固碳作用。同时,植被蒸腾吸热可以间接地减少空调制冷用电,进而可以减少生产电能消耗的化石燃料,从而减少碳排放。

研究期间,小叶榕的年蒸腾总量为 11854.30 kg,蒸腾吸热量为 2.89×10^4 MJ, 平均每天吸热 79.18 MJ,

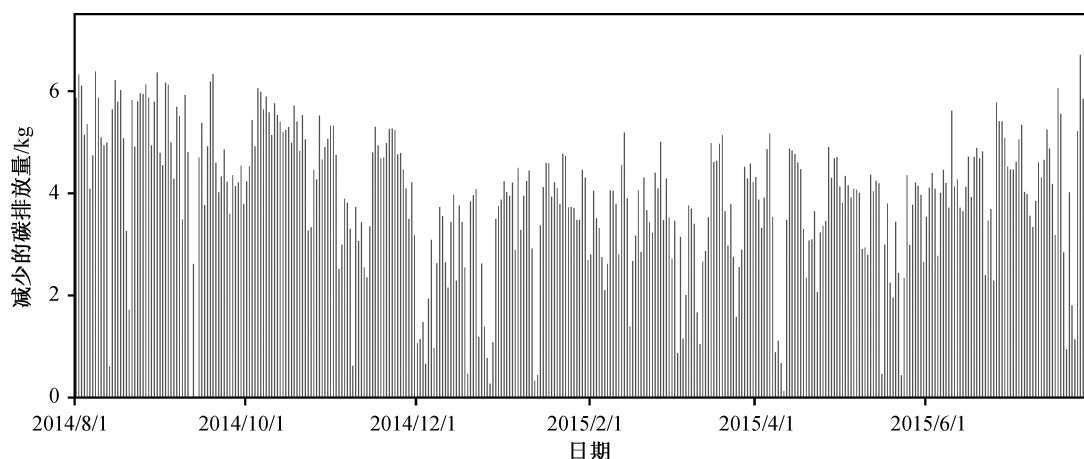


图7 小叶榕蒸腾降温减少的碳排放量(2014年8月1日—2015年7月31日)

Fig. 7 CO₂ emission reduction from the transpiration of *Ficus concinna* (from Oct. 1, 2014 to July 31, 2015)

取空调的能效比为3.5,则小叶榕每年节约的电能可达到 2.29×10^3 kWh, 平均每天节约6.27 kWh。我国发电厂每生产1 kWh电能会排放约627 g CO₂^[31], 则小叶榕一年间的蒸腾降温作用相当于减少1442.1 kg碳排放量。小叶榕每日的碳排放减少量如图7所示,可以看出,小叶榕单日蒸腾降温作用减少的碳排放量在0.12~6.71 kg之间, 平均每天减少3.95 kg。不同季节,小叶榕蒸腾降温的节能减排效果明显不同,夏秋季高,冬春季低,夏季(4.62 kg/d)>秋季(4.51 kg/d)>春季(3.38 kg/d)>冬季(3.22 kg/d)。

同时,有研究表明,城市树木蒸腾降温间接减少的温室气体排放量,远高于树木光合作用所吸收的温室气体量(5~10倍)^[32]。因此,作为重要的城市绿化植物,小叶榕能有效地减少碳排放,吸收温室气体,并发挥重要的固碳作用,具有十分重要的生态价值。

3 结论

1) 蒸腾扩散系数 h_{at} 可用于评估不同植被的蒸腾降温潜力。评估结果表明,观测样地内几种典型植物的蒸腾降温潜力从大到小排序为小叶榕>南洋楹>白兰>金叶女贞>苦楝>桃花心木>小叶榄仁>黄金间碧竹。

2) 观测期内小叶榕的日蒸腾用水量位于1.23~66.65 kg之间,总体上呈现夏秋高、春冬低的特点。2014年8月1日—2015年7月31日的一年间,小叶榕年蒸腾用水量为11854.30 kg,日均蒸腾用水量为32.48 kg。

3) 小叶榕在夜间仍然存在蒸腾作用,且在0:00

前有一定的降温潜力。夏季夜间,小叶榕的蒸腾降温作用能够使得观测区域86%的时间为无热岛状态,具有极大的降温潜力。

4) 根据估算,小叶榕蒸腾降温所减少的碳排放量在0.12~6.71 kg/d之间,总体呈现为:夏季(4.62 kg/d)>秋季(4.51 kg/d)>春季(3.38 kg/d)>冬季(3.22 kg/d);小叶榕全年通过蒸腾降温间接减少的碳排放量为1442.10 kg。

研究结果表明,小叶榕作为亚热带城市的乡土树种,不仅易栽培,生长快,寿命长,经济美观,绿化效果好,还具有很强的蒸腾降温潜力,能够有效地缓解热岛效应,减少碳排放,也是城市重要的碳汇,是优良的城市绿化植被。

致谢 研究工作得到王振华工程师、博士后王蓓、博士生秦龙君以及 Shinichi Takeuchi 先生等在仪器安装维护与数据分析等方面的协助,对此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Thompson R, Hornigold R, Page L, et al. Associations between high ambient temperatures and heat waves with mental health outcomes: a systematic review. *Public Health*, 2018, 161: 171–191
- [2] Vicedo-Cabrera A M, Scovronick N, Sera F, et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature Climate Change*, 2021, 11(6): 492–500
- [3] Rizwan A M, Dennis L Y C, Chunho L I U. A review on the generation, determination and mitigation of

- Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(1): 120–128
- [4] Berry R, Livesley S J, Aye L. Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature. *Building and Environment*, 2013, 69: 91–100
- [5] Morakinyo T E, Balogun A A, Adegun O B. Comparing the effect of trees on thermal conditions of two typical urban buildings. *Urban Climate*, 2013, 3: 76–93
- [6] Manoli G, Fatichi S, Schlöpfer M, et al. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 2019, 573: 55–60
- [7] Winbourne J B, Jones T S, Garvey S M, et al. Tree transpiration and urban temperatures: current understanding, implications, and future research directions. *BioScience*, 2020, 70(7): 576–588
- [8] Paschalis A, Chakraborty T C, Fatichi S, et al. Urban forests as main regulator of the evaporative cooling effect in cities. *AGU Advances*, 2021, 2(2): e2020AV000303
- [9] Jaganmohan M, Knapp S, Buchmann C M, et al. The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 134–145
- [10] Kong F, Yan W, Zheng G, et al. 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] Hayat M, Xiang J, Yan C, et al. Environmental control on transpiration and its cooling effect of *Ficus concinna* in a subtropical city Shenzhen, southern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 312: 108715
- [12] Ren Z, He X, Zheng H, et al. Estimation of the relationship between urban park characteristics and park cool island intensity by remote sensing data and field measurement. *Forests*, 2013, 4(4): 868–886
- [13] Yang C, He X, Wang R, et al. The effect of urban green spaces on the urban thermal environment and its seasonal variations. *Forests*, 2017, 8(5): 153
- [14] Li X, Zhou W. Optimizing urban greenspace spatial pattern to mitigate urban heat island effects: extending understanding from local to the city scale. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 41: 255–263
- [15] Grimmond C S B, Oke T R. Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2002, 41(7): 792–810
- [16] Xu W, Wooster M J, Grimmond C S B. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: a demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature–emissivity separation approach. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3493–3510
- [17] Qiu G Y. A new method for estimation of evapotranspiration [D]. Tottori: Tottori University, 1996
- [18] Qiu G Y, Sase S, Shi P, et al. Theoretical analysis and experimental verification of a remotely measurable plant transpiration transfer coefficient. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2003, 37(3): 141–149
- [19] Qiu G Y, Zhao M. Remotely monitoring evaporation rate and soil water status using thermal imaging and “three-temperatures model (3T Model)” under field-scale conditions. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, 12(3): 716–723
- [20] Qiu G Y, Yu X, Wen H, et al. An advanced approach for measuring the transpiration rate of individual urban trees by the 3D three-temperature model and thermal infrared remote sensing. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 125034
- [21] Yuan W, Yu Y, Yue Y, et al. Use of infrared thermal imaging to diagnose health of *Ammopiptanthus mongolicus* in northwestern China. *Journal of forestry research*, 2015, 26(3): 605–612
- [22] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309–320
- [23] 邱国玉, 吴晓, 王帅, 等. 三温模型——基于表面温度测算蒸散和评价环境质量的方法Ⅳ. 植被蒸腾扩散系数. *植物生态学报*, 2006, 30(5): 852–860
- [24] Qiu G Y, Shi P J, Wang L M. Theoretical analysis of a remotely measurable soil evaporation transfer coefficient. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101: 390–398
- [25] Oke T R, East C. The urban boundary layer in Montreal. *Boundary-Layer Meteorology*, 1971, 1(4): 411–437
- [26] Pataki D E, McCarthy H R, Litvak E, et al. Transpiration of urban forests in the Los Angeles

- metropolitan area. *Ecological Applications*, 2011, 21(3): 661–677
- [27] Asawa T, Kiyono T, Hoyano A. Continuous measurement of whole-tree water balance for studying urban tree transpiration. *Hydrological Processes*, 2017, 31(17): 3056–3068
- [28] 朱春阳, 李树华, 纪鹏, 等. 城市带状绿地宽度与温湿效益的关系. *生态学报*, 2011, 31(2): 383–394
- [29] 郭秋萍. 城市绿地对城市热环境和舒适度影响的实验研究[D]. 深圳: 北京大学, 2015
- [30] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 等. 广州市城区公园对周边环境的降温效应. *生态学报*, 2010, 30(18): 4905–4918
- [31] Zhang B, Gao J, Yang Y. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: a case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 2014, 76: 37–43
- [32] 孙艳秋, 王秋莹, 王震. 浅析森林对大气污染的净化功能. *林业科技情报*, 2010, 42(3): 15

* * * * *

勘误声明

《北京大学学报(自然科学版)》2022年第58卷第2期已发表论文《游客呼吸与九寨沟钙华景观退化的相关性探究》的作者和单位有误。经全体作者确认,做如下变更。

1) 将唐亚、乔雪和杜杰移出作者名单,作者更正为“邱国玉 向皎 鄢春华 秦龙君 毛鹏 熊博文 李瑞利 沈小雪 石聪 蒋先逞豪 陈挚 石喆 黄樱 丁俊杰”。

2) 删除四川大学建筑与环境学院环境系、九寨沟世界遗产管理局两个单位,仅保留北京大学深圳研究生院环境与能源学院。

特此声明,并诚挚地向读者致歉。

通信作者 邱国玉

2022年4月18日