

DOI: 10.20103/j.stxb.202402180344

沈思栋, 范舒欣, 钱璟, 胡昭岩, 李涵, 赵小玉, 杨一泓, 董丽. 基于叶性状与植株构型性状的园林绿化树种热调节效应研究. 生态学报, 2024, 44 (19): 8675-8687.

Shen S D, Fan S X, Qian J, Hu Z Y, Li H, Zhao X Y, Yang Y H, Dong L. Thermal regulation effect of landscaping tree species based on leaf and architecture traits. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44 (19): 8675-8687.

基于叶性状与植株构型性状的园林绿化树种热调节效应研究

沈思栋¹, 范舒欣¹, 钱璟¹, 胡昭岩², 李涵¹, 赵小玉¹, 杨一泓¹, 董丽^{1,*}

1 北京林业大学园林学院, 城乡生态环境北京实验室, 国家花卉工程技术研究中心, 北京 100083

2 烟台黄渤海新区自然资源和规划局, 烟台 264000

摘要: 旨在探究植物热调节效应与其叶性状、构型性状之间的关联, 以为园林绿地热调节效应提升提供科学植物选择依据。以毛白杨、槐、碧桃等 24 种北京地区常见落叶阔叶树种为研究对象, 测定其叶厚度、比叶重等叶性状与株高、树冠高宽比等植株构型性状, 以及利用 Li-6400XT 便携式光合测定系统以及 Li-250A 光照计测定了植物蒸腾速率、林冠下太阳辐射强度等指标, 在此基础上计算树种蒸腾吸热量、太阳辐射削减率等热调节效应指标, 分析不同树种相关性状与植物热调节效应指标之间的关系。24 种园林绿化树种蒸腾吸热与拦截太阳辐射能力存在显著差异 ($P < 0.05$), 不同生活型热调节效应总体表现出乔木、小乔木优于灌木。其中, 除美国红栎与元宝枫综合热调节能力较强以外, 毛白杨、一球悬铃木在单位土地面积蒸腾吸热量方面表现较优, 银杏、鸡树条在拦截太阳辐射方面表现较优, 紫丁香综合热调节效应最弱。植物叶片蒸腾吸热能力与植物叶片干物质含量、比叶重呈显著正相关 ($P < 0.05$), 且株高、树木高宽比较高的植株其蒸腾吸热能力较强; 叶面积指数、树冠高宽比对植物太阳辐射拦截能力存在显著影响 ($P < 0.05$)。被试树种中美国红栎与元宝枫具有较优的综合热调节效应。叶片干物质含量、比叶重等叶性状以及株高、枝下高、树木高宽比等构型性状是指示或影响绿化树种热调节效应的重要因素。

关键词: 园林绿化树种; 降温增湿; 遮荫; 植物功能性状; 叶性状

Thermal regulation effect of landscaping tree species based on leaf and architecture traits

SHEN Sidong¹, FAN Shuxin¹, QIAN Jing¹, HU Zhaoyan², LI Han¹, ZHAO Xiaoyu¹, YANG Yihong¹, DONG Li^{1,*}

1 College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing 100083, China

2 Yantai Huang-Bohai New Area Natural Resources and Planning Bureau, Yantai 264000, China

Abstract: This study aims to explore the relationship between plant thermal regulation effects and their leaf traits and architecture traits, in order to provide a scientific basis for selecting plants for enhanced thermal regulation effects in urban green spaces. The study focused on 24 common deciduous broad-leaved tree species in Beijing, such as *Populus tomentosa*, *Sophora japonica*, and *Prunus persica* 'Duplex'. It involved measuring leaf traits like leaf thickness and leaf mass per area, as well as architectural traits including plant height and crown height-to-width ratio. Additionally, the Li-6400XT Portable Photosynthesis System and the Li-250A Light Meter were utilized to determine indices such as plant transpiration rate and

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3802602)

收稿日期: 2024-02-18; 网络出版日期: 2024-07-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongli@bjfu.edu.cn

solar radiation intensity beneath the canopy. Based on these measurements, heat regulation indices like heat absorption and solar radiation reduction rate were calculated. The study analyzed the relationship between these indices and the relevant traits of different tree species. Significant differences ($P < 0.05$) were found in the transpiration heat absorption and solar radiation interception capabilities among the 24 greening tree species. Overall, tree and small tree life forms showed better thermal regulation effects than shrubs. In particular, *Fraxinus pennsylvanica* and *Acer truncatum* demonstrated strongly comprehensive thermal regulation capabilities. Besides these two species, *Populus tomentosa* and *Koelreuteria paniculata* excelled in transpiration heat absorption per unit land area, while *Ginkgo biloba* and *Sophora japonica* performed well in intercepting solar radiation. *Syringa oblata* showed weaker comprehensive thermal regulation effects. The leaf transpiration heat absorption ability was significantly positively correlated with leaf dry matter content and leaf mass per area ($P < 0.05$), and plants with greater height and higher tree height-to-width ratio had stronger transpiration heat absorption capacity. Leaf area index and crown height-to-width ratio significantly influenced the plant's ability to intercept solar radiation ($P < 0.05$). *Fraxinus pennsylvanica* and *Acer truncatum* possessed superior thermal regulation effects. Leaf dry matter content, leaf mass per area, and architecture traits such as plant height, under-branch height, and tree height-to-width ratio were important indicators affecting the thermal regulation effects of greening tree species.

Key Words: landscape greening tree species; cooling and humidifying; shading; plant functional traits; leaf traits

随着城市化和工业化进程的加快,大量温室气体排放加剧了气候变化,对全球生态系统造成了深远影响^[1-4]。气候变化导致城市地区极端高温事件的频率、强度和持续时间显著增加,给城市生态环境和居民生活质量带来了严峻挑战^[5-7]。在此背景下,园林植物作为城市绿地热调节服务的主要承担者,其通过拦截太阳辐射、蒸腾作用等方式,实现对环境温度的调节,在缓解城市热岛效应,改善人居环境过程中起到了重要作用^[8-9]。

不同植物发挥的热调节效应不尽相同,为使绿地建设过程中树种选择更具科学性,近些年国内外学者启动了对园林植物热调节效应的量化研究。已有研究发现不同生活型植物在对环境温度调节功能上存在差异,例如乔木通常优于灌木,常绿树优于落叶树^[10-11]。对于不同树种而言,张艳丽^[12]测算了成都地区 8 种常见乔木降温增湿功能,树冠周围的空气温度下降约在 0.1—0.6 °C,其中垂柳、山杜英等植物表现较优;Rahman^[13]在德国的研究表明由于树木对太阳辐射拦截,夏季正午处于欧洲椴(*Tilia cordata*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)树冠下的沥青铺装相对于裸地温度分别可以降低 23 °C 与 12.9 °C。然而,由于不同地区城市气候条件及植物应用种类的差异,同时即便相同植物在不同地区也存在生长发育的差异^[12,14],使得不同学者的研究成果实际上很难成为普适性的应用参考。因此立足城市环境分析不同种类植物热调节功能的差异并解析植物调节城市热环境的机制,为城市绿化树种选择提供更加合理的科学依据,在当下极为迫切。

20 世纪末期,生态学科为了研究植物对环境适应机理提出了植物功能性状这一概念^[15],随着研究不断深入,植物功能性状被认为不仅可以反映植物对环境变化的响应,而且还能影响植物对生态环境的作用^[16]。已有研究初步揭示了植物功能性状对森林、草原等生态系统服务影响的方向和强度^[17-19],城市绿地和植物群落的降温效应也受到平均株高、冠幅和郁闭度等构型性状的显著影响^[20-22]。此外,植物叶片的蒸腾速率也与气孔导度、比叶重等叶性状有着密切关系^[23-24],然而关注不同绿化树种功能性状对其热调节效应的影响的研究则鲜有报道。

立足城市热岛极为严重的北京城区,以该地区最常用的 24 种落叶植物为研究对象,在获取其叶性状和构型性状重要指标的基础上,测定植物、太阳辐射拦截等热调节效应指标,分析植物叶性状、植株构型性状与植物热调节效应的相关性,试图探寻园林绿化树种的功能性状对热调节效应的影响机制,为气候变化背景下城市绿地热调节效应提升的植物选择与利用提供依据。

1 研究方法

1.1 样地概况

研究样地位于北京市海淀区东升八家郊野公园。北京市海淀区处于中纬度地区,介于北纬 39°53'—40°09',东经 116°03'—116°23'之间,属于典型暖温带半湿润大陆性季风气候。夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春秋较短。年平均气温 12.3 ℃,最冷月平均气温 3.7 ℃,最热月平均气温 26.2 ℃。东升八家郊野公园于 2009 年正式建成,总占地面积 81.96 hm²。公园东邻双清路,西邻京新高速,北邻北五环,东南邻双清苑,园区内土壤、水分、温度等环境条件相对一致,植物养护管理水平适中,地势较为平坦,是北京地区典型城市绿地。

1.2 供试树种选择

在对北京市城市绿地实地调研的基础上,依据适生性和代表性原则,选取 24 种常用园林绿化树种作为供试材料,包含乔木 10 种、小乔木 5 种和灌木 9 种(表 1)。在公园内远离水体、建筑且生境相似的区域上,每种植物选取胸径、株高、冠幅等生长指标相似,处于壮龄(乔木、小乔木树龄 15—20a,灌木树龄 5—15a),生长健壮、无病虫害的标准株 5 株。

表 1 供试树种名录

Table 1 List of tested tree species

| 生活型 Life form | 树种 Species | 科名 Family | 属名 Genus |
|------------------------------|--|--------------|-------------|
| 乔木 Arbor | 银杏 <i>Ginkgo biloba</i> | 银杏科 | 银杏属 |
| | 杂交鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i> × <i>tulipifera</i> | 木兰科 | 鹅掌楸属 |
| | 一球悬铃木 <i>Platanus occidentalis</i> | 悬铃木科 | 悬铃木属 |
| | 毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> | 杨柳科 | 杨属 |
| | 绦柳 <i>Salix matsudana</i> 'Pendula' | 杨柳科 | 柳属 |
| | 槐 <i>Sophora japonica</i> | 豆科 | 槐属 |
| | 栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i> | 无患子科 | 栾属 |
| | 元宝槭 <i>Acer truncatum</i> | 无患子科 | 槭属 |
| | 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> | 苦木科 | 臭椿属 |
| | 国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i> | 木樨科 | 栎属 |
| 小乔木 Small arbor | 杏梅 <i>Prunus mume</i> var. <i>bungo</i> | 蔷薇科 | 李属 |
| | 碧桃 <i>Prunus persica</i> 'Duplex' | 蔷薇科 | 李属 |
| | 日本晚樱 <i>Prunus serrulata</i> var. <i>lannesiana</i> | 蔷薇科 | 李属 |
| | 山楂 <i>Crataegus pinnatifida</i> | 蔷薇科 | 山楂属 |
| | 黄栌 <i>Cotinus coggygria</i> var. <i>cinereus</i> | 漆树科 | 黄栌属 |
| 灌木 Shrub | 木槿 <i>Hibiscus syriacus</i> | 锦葵科 | 木槿属 |
| | '绯扇'现代月季 <i>Rosa hybrida</i> 'Hiogi' | 蔷薇科 | 蔷薇属 |
| | 华北珍珠梅 <i>Sorbaria sorbifolia</i> | 蔷薇科 | 珍珠梅属 |
| | 小花溲疏 <i>Deutzia parviflora</i> | 绣球花科 | 溲疏属 |
| | 紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i> | 千屈菜科 | 紫薇属 |
| | 红瑞木 <i>Cornus alba</i> | 山茱萸科 | 山茱萸属 |
| | 紫丁香 <i>Syringa oblata</i> | 木樨科 | 丁香属 |
| | 鸡树条 <i>Viburnum opulus</i> subsp. <i>calvescens</i> | 忍冬科 | 荚蒾属 |
| 金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i> | 忍冬科 | 忍冬属 | |

1.3 叶性状测定

于 2023 年 8 月 15 至 8 月 25 日之间,从标准株的东南西北四个方向,选取树冠中部外层的 16 片完全展开且健康无损的叶片,用于测定叶能性状。使用便携式叶面积扫描仪(FS-leaf-1000)测量植物的叶面积(cm²);使用游标卡尺,避开叶片主脉测量叶厚度(mm);叶片采摘后立即利用 1/10000 天平称量叶鲜重(g),

浸泡 48h 后测定叶饱和鲜重(g),最后 105 ℃烘干 1 h 杀青后,75 ℃烘干至恒重,测定叶干重(g)。

比叶重=(叶干重/叶面积);

叶干物质含量=(叶干重/叶鲜重);

叶片相对含水量=(叶鲜重-叶干重)/(叶饱和鲜重-叶干重)×100%;

1.4 树种构型性状测定

使用胸径尺测量距离地面 1.3 m 处树干胸径(cm),使用卷尺沿东西南北 4 个方向测量后计算冠幅(m),株高和冠高采用树高尺(SRC-1-30)测量(灌木一般基部开始分枝,受到栽培、修剪方式影响较大,不记录其地径);测定树冠最下端活枝至地面的距离为枝下高(m);分别记录树种一级、二级分枝数量。

树木高宽比=株高/冠幅

树冠高宽比=冠高/冠幅

1.5 植物蒸腾吸热能力测算

1.5.1 蒸腾速率测定

于 2023 年 8 月 10 日至 8 月 30 日之间,选择晴朗无云、无风的天气,7:00—17:00 于自然光照下,在每株植物树冠外层选择叶片 3—5 片^[25],使用便携式光合仪(Li-cor6400)每隔 2h 测量 1 次。测量时尽量将叶片铺满叶室,无相互遮盖,待仪器数值稳定后每叶片读取 3 个瞬时蒸腾速率数值。

1.5.2 植物总叶面积与叶面积指数测定

利用标准枝分层法^[26],测算全株叶片总量 p 。则植株总叶面积计算公式为:

$$S_{\text{总}} = p \times LA$$

式中, $S_{\text{总}}$ 为植物总叶面积(cm^2); p 为全株叶片总量(片); LA 是单叶叶面积(cm^2)。

叶面积指数计算公式为:

$$LAI = S_{\text{总}} / (\pi \times (CW/2)^2)$$

式中, LAI 为叶面积指数(m^2/m^2); $S_{\text{总}}$ 为植物总叶面积(m^2); CW 为植株冠幅(m)。

1.5.3 植物蒸腾吸热量计算

单位叶面积日蒸腾总量计算公式为^[12]:

$$E = \sum_{i=1}^j [(e_{i+1} + e_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600 / 1000]$$

式中, E 为该植物在该测定日的蒸腾总量($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$); e_i 为初测点的瞬时蒸腾作用速率($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); e_{i+1} 为下一测点的瞬时蒸腾作用速率($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); t_i 为初测点的瞬时时间(h); t_{i+1} 为下一测点的时间(h); j 为测试次数。3600 指每小时 3600 s;1000 指 1 mol 为 1000 mmol。

单位叶面积蒸腾释水量计算公式为:

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = E \times 18$$

式中, $W_{\text{H}_2\text{O}}$ 为单位叶面积日释水量($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$); E 为该植物在该测定日的蒸腾总量($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

单位叶面积蒸腾吸热量计算公式为:

$$Q = W_{\text{H}_2\text{O}} \times L$$

式中, Q 为单位叶面积蒸腾吸热量($\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$); $W_{\text{H}_2\text{O}}$ 为单位叶面积日释水量($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$); L 为蒸发潜热(J/g),指使 1 g 水汽化所需要吸收的热量,其数值大小与蒸发面温度呈线性负相关,表达式为 $L = 2495.46 - 2.38 \times T$, T 取测定日白天平均温度 31.5 ℃,597 为 0 ℃ 时的蒸发潜热。

单位土地面积蒸腾吸热量计算公式为:

$$Q_{\text{地}} = Q \times LAI$$

式中, $Q_{\text{地}}$ 为单土地面积蒸腾吸热量(J d^{-1}); Q 为单位叶面积蒸腾吸热量($\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$); LAI 为植物叶面积指数(m^2/m^2)

单株植物蒸腾吸热量计算公式为:

$$Q_{\text{株}} = Q \times S_{\text{总}}$$

式中, $Q_{\text{株}}$ 为单株植物蒸腾吸热量 ($\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$); Q 为单位叶面积蒸腾吸热量 ($\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$); $S_{\text{总}}$ 为植物总叶面积 (m^2)

1.6 植物太阳辐射拦截率测算

1.6.1 太阳辐射测定

于 2023 年 6—8 月晴朗、无风/静风、无霾的天气开展实验;于实验日 11:30—12:30 使用光照计 (Li-250A) 测定供试树种冠层内外的太阳辐射强度。于所在供试植物冠层中心位置与冠外 5—10 m 空旷无遮挡处同步测定太阳辐射强度,单株植物重复测定 3—5 次。

1.6.2 太阳辐射拦截率计算

植物太阳辐射拦截率计算公式为^[27]:

$$L = (L_2 - L_1) / L_2 \times 100 \%$$

式中, L 代表遮光率, L_2 为全光照条件下距样株荫影 2 m 外的地面太阳辐射强度 (W/m^2); L_1 为样株荫影中心的太阳辐射强度 (W/m^2)。

1.7 数据分析

采用 Excel 2016、SPSS 22.0 进行数据统计与分析。不同生活型之间的性状指标与热调节效应指标均使用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行差异性检验,使用 Duncan 法对不同生活型功能性状与热调节效应指标进行多重比较。采用 spearman 相关性分析与偏相关分析研究植物叶性状、构型性状与蒸腾吸热量、太阳辐射拦截的关系。

2 结果与分析

2.1 不同树种叶性状与构型性状分析

2.1.1 不同树种叶性状特征分析

北京市 24 园林树种叶性状如表 2 所示,不同生活型树种叶面积表现出显著差异 ($P < 0.05$),叶面积平均值表现出乔木大于小乔木、灌木,乔木叶面积平均值是灌木的 2 倍左右,其中一球悬铃木的单叶面积最大为 156.17 cm^2 ,槐单叶面积最小为 4.98 cm^2 。除叶面积外,不同生活型树种之间叶片厚度、比叶重等其他叶性状并未表现出明显差异 ($P > 0.05$)。其中紫薇叶片厚度最高,为 0.33 mm ,元宝槭最低为 0.11 mm ,平均值为 0.21 mm ;紫薇叶片干物质含量最高为 0.45 g/g ,小花溲疏最低为 0.26 g/g ,平均值为 0.38 g/g ;碧桃的叶片相对含水量最高为 94.83% ,紫薇最低为 74.94% ,平均值为 86.24% ;紫薇的比叶重最高为 0.0126 g/cm^2 ,金银忍冬最低为 0.0046 g/cm^2 ,平均值为 0.0071 g/cm^2 。

2.1.2 不同树种构型性状分析

24 种园林树种的构型性状如表 3 所示,不同生活型植物构型性状差异较大 ($P < 0.05$)。株高、冠幅、冠高等描述植物地上部分体积的构型性状总体呈现出乔木显著高于小乔木与灌木 ($P < 0.05$),其中毛白杨株高最高,达 14.4 m ,一球悬铃木冠幅最大、冠高最高,分别为 9.48 m 与 9.37 m ,而‘绯扇’现代月季株高、冠幅、冠高均最低,分别为 1.02 m 、 0.61 m 、 0.61 m ;叶面积指数、二级分枝数等描述植物枝叶密度的构型性状,乔木平均值显著高于小乔木与灌木 ($P < 0.05$),其中银杏叶面积指数、二级分枝数均最高,分别为 $3.31 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、323 个,紫薇叶面积指数最低为 $0.96 \text{ m}^2/\text{m}^2$,金银忍冬二级分枝数均最低为 5 个;描述植物轮廓形态的树木高宽比则呈现出乔木、灌木显著高于小乔木 ($P < 0.05$),其中毛白杨树树木高宽比最高,为 2.28,月季树冠高宽比最高,为 1.68,黄栌树木高宽比、树冠高宽比最低,分别为 0.62 与 0.48。

表 2 北京市 24 园林树种叶性状
Table 2 Leaf traits of 24 landscape tree species in Beijing

| 生活型 Life form | 树种 Species | 单叶面积 Leaf area/cm ² | 叶片厚度 Leaf thickness/mm | 叶干物质含量 Leaf dry matter content/(g/g) | 叶片相对含水量 Leaf relative water content/% | 比叶重 Leaf mass per area/(g/cm ²) |
|--------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------|---|--|--|
| 乔木 Arbor | 银杏 | 29.46±3.48 | 0.21±0.01 | 0.35±0.02 | 89.03±3.31 | 0.0086±0.0010 |
| | 杂交鹅掌楸 | 132.38±6.24 | 0.18±0.01 | 0.29±0.04 | 92.69±6.35 | 0.0058±0.0004 |
| | 一球悬铃木 | 156.17±5.16 | 0.16±0.01 | 0.39±0.01 | 86.9±1.59 | 0.0054±0.0002 |
| | 毛白杨 | 101.71±9.10 | 0.24±0.02 | 0.42±0.01 | 87.51±0.62 | 0.0108±0.0009 |
| | 绦柳 | 21.31±4.41 | 0.15±0.01 | 0.29±0.01 | 94.51±1.25 | 0.0050±0.0003 |
| | 槐 | 4.98±1.05 | 0.16±0.01 | 0.33±0.01 | 91.28±2.74 | 0.0072±0.0011 |
| | 栾树 | 11.23±3.21 | 0.16±0.01 | 0.44±0.03 | 80.65±5.15 | 0.0068±0.0006 |
| | 元宝槭 | 32.92±5.96 | 0.11±0.01 | 0.41±0.09 | 83.32±6.10 | 0.0049±0.0013 |
| | 臭椿 | 18.28±1.52 | 0.25±0.01 | 0.39±0.01 | 92.34±0.98 | 0.0073±0.0010 |
| | 美国红栎 | 14.94±1.51 | 0.16±0.01 | 0.38±0.03 | 89.97±5.81 | 0.0081±0.0004 |
| | 乔木均值 | 52.38±17.63a | 0.17±0.03a | 0.36±0.05a | 0.89±0.04a | 0.0071±0.0019a |
| 小乔木 Small arbor | 杏梅 | 20.15±1.84 | 0.20±0.02 | 0.41±0.04 | 81.66±5.77 | 0.0081±0.0002 |
| | 碧桃 | 16.50±2.39 | 0.14±0.01 | 0.33±0.03 | 94.83±6.26 | 0.0057±0.0009 |
| | 日本晚樱 | 38.37±2.69 | 0.16±0.01 | 0.41±0.02 | 86.18±2.27 | 0.0073±0.0006 |
| | 山楂 | 38.07±8.73 | 0.18±0.01 | 0.42±0.03 | 82.08±5.08 | 0.0083±0.0012 |
| | 黄庐 | 44.68±4.01 | 0.16±0.02 | 0.40±0.04 | 92.74±3.62 | 0.0060±0.0003 |
| 小乔木均值 | 31.55±5.55ab | 0.14±0.05a | 0.33±0.13a | 0.74±0.32a | 0.0061±0.0021a | |
| 灌木 Shrub | 木槿 | 31.37±3.51 | 0.19±0.01 | 0.32±0.03 | 87.41±2.48 | 0.0061±0.0005 |
| | ‘绯扇’现代月季 | 8.54±2.06 | 0.21±0.03 | 0.40±0.03 | 83.54±6.96 | 0.0088±0.0009 |
| | 华北珍珠梅 | 6.37±0.38 | 0.11±0.02 | 0.38±0.01 | 90.03±3.31 | 0.0056±0.0006 |
| | 小花溲疏 | 29.09±2.86 | 0.20±0.01 | 0.26±0.14 | 86.26±2.78 | 0.0053±0.0008 |
| | 紫薇 | 12.97±3.19 | 0.33±0.04 | 0.45±0.14 | 74.94±10.22 | 0.0126±0.0008 |
| | 红瑞木 | 47.84±3.19 | 0.13±0.01 | 0.36±0.01 | 86.92±5.57 | 0.0055±0.0003 |
| | 紫丁香 | 51.70±5.35 | 0.26±0.03 | 0.35±0.03 | 86.01±4.08 | 0.0096±0.0011 |
| | 鸡树条 | 45.60±5.85 | 0.14±0.01 | 0.38±0.03 | 75.07±7.24 | 0.0055±0.0011 |
| | 金银忍冬 | 20.29±1.41 | 0.13±0.02 | 0.27±0.09 | 87.35±3.57 | 0.0046±0.0018 |
| | 灌木均值 | 26.61±5.78b | 0.17±0.08a | 0.31±0.10a | 0.75±0.20a | 0.0057±0.0025a |

不同字母表示不同生活型间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 不同树种热调节效应分析

2.2.1 不同树种蒸腾吸热能力分析

从图 1 呈现的 24 个树种单位叶面积蒸腾吸热能力看,三类生活型平均单位叶面积蒸腾吸热量差异不显著 ($P > 0.05$),其中乔木毛白杨 ($12283.80 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)、小乔木碧桃 ($10158.97 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 等植物单位叶面积蒸腾吸热量较高;如图 2 所示,三类生活型平均单位土地面积蒸腾吸热量差异显著 ($P < 0.05$),呈现出乔木 > 小乔木 > 灌木的态势,乔木平均单位土地面积蒸腾吸热量分别是小乔木和灌木的 1.25 及 2 倍,乔木中毛白杨 ($35745.86 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)、一球悬铃木 ($27869.44 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 等植物单位土地面积蒸腾吸热量最高(图 2);从平均单株植物蒸腾吸热量来看(图 3),三类生活型差异亦达显著水平 ($P < 0.05$),同样呈现乔木 > 小乔木 > 灌木的态势,其中乔木平均单株植物蒸腾吸热量是小乔木的 3 倍以上,更是灌木的 20 倍以上,乔木中一球悬铃木 ($1977.41 \text{ MJ 株}^{-1} \text{ d}^{-1}$) 和美国红栎 ($1411.08 \text{ MJ 株}^{-1} \text{ d}^{-1}$) 等植物单株植物蒸腾吸热量最高。

2.2.2 不同树种太阳辐射拦截能力分析

24 种树种对太阳辐射拦截率的比较见图 4,其变化范围处于 78.45%—88.31%之间,平均 84.63%。三类生活型之间太阳辐射拦截率差异不显著 ($P > 0.05$),不同乔木树种太阳辐射拦截率在图中排序则较为分散,例

表 3 北京市 24 种园林树种构型性状
Table 3 Architecture traits of 24 landscape tree species in Beijing

| 生活型 Life form | 树种 Tree species | 胸径 Diameter at breast height/cm | 株高 Plant height/m | 冠幅 Canopy/ m | 冠高 Crown height/m | 枝下高 Under branch height/m | 叶面积指数 leaf area index/ (m ² /m ²) | 一级分枝 First-order branching/个 | 二级分枝 Second order branching/个 | 树木高宽比 Height to width ratio of trees | 树冠高宽比 Crown height to width ratio |
|------------------|--------------------|--|-------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| 乔木 | 银杏 | 23.44±3.30 | 7.62±0.42 | 4.92±0.63 | 4.92±0.63 | 2.82±0.08 | 3.31±0.82 | 20±5 | 323±35 | 1.56±0.13 | 0.99±0.17 |
| Arbor | 杂交鹅掌楸 | 25.72±2.40 | 11.10±0.55 | 8.56±0.89 | 8.56±0.89 | 3.90±0.17 | 2.99±0.68 | 17±4 | 266±33 | 1.32±0.18 | 0.85±0.09 |
| | 一球悬铃木 | 30.90±5.55 | 11.20±0.31 | 9.48±0.76 | 9.48±0.76 | 2.20±0.17 | 2.40±0.43 | 2±1 | 43±8 | 1.18±0.08 | 0.94±0.05 |
| | 毛白杨 | 24.78±2.88 | 14.40±0.55 | 6.54±0.77 | 6.54±0.77 | 7.00±0.47 | 2.91±0.75 | 5±1 | 38±12 | 2.28±0.22 | 1.18±0.13 |
| | 绦柳 | 25.28±6.22 | 10.20±0.57 | 8.34±0.85 | 8.34±0.85 | 3.12±0.17 | 1.50±0.30 | 3±1 | 13±6 | 1.24±0.19 | 0.86±0.12 |
| | 槐 | 22.74±2.47 | 10.84±0.48 | 8.82±0.88 | 8.82±0.88 | 2.12±0.43 | 2.32±0.55 | 6±2 | 26±8 | 1.25±0.22 | 1.01±0.14 |
| | 栾树 | 27.24±4.08 | 9.82±0.83 | 8.42±0.66 | 8.42±0.66 | 2.62±0.32 | 2.20±0.39 | 3±1 | 7±1 | 1.17±0.11 | 1.01±0.01 |
| | 元宝槭 | 22.40±2.71 | 7.18±0.30 | 6.00±0.62 | 6.00±0.62 | 1.80±0.10 | 2.74±0.51 | 9±1 | 18±2 | 1.21±0.26 | 0.90±0.12 |
| | 臭椿 | 23.33±1.53 | 8.33±0.58 | 7.60±0.61 | 7.60±0.61 | 1.66±0.23 | 1.87±0.41 | 3±0 | 21±12 | 1.06±0.15 | 0.88±0.10 |
| | 美国红栎 | 26.18±3.29 | 7.40±0.47 | 6.63±0.25 | 6.63±0.25 | 2.05±0.11 | 2.13±0.37 | 8±3 | 59±7 | 1.12±0.10 | 0.81±0.08 |
| | 乔木均值 | 24.88±4.23 | 9.81±2.14a | 7.53±1.38a | 7.02±1.43a | 2.79±1.57a | 2.44±0.52a | 8±6a | 81±108a | 1.34±0.34a | 0.94±0.10a |
| 小乔木 | 杏梅 | 4.20±0.72 | 4.20±0.72 | 4.87±0.57 | 4.87±0.57 | 0.30±0.05 | 1.79±0.55 | 3±0 | 6±0 | 0.84±0.10 | 0.77±0.13 |
| Small arbor | 碧桃 | 2.82±0.63 | 2.82±0.63 | 4.14±0.64 | 4.14±0.64 | 0.89±0.06 | 1.85±0.79 | 2±1 | 6±3 | 0.72±0.14 | 0.65±0.08 |
| | 日本晚樱 | 3.70±0.16 | 3.70±0.16 | 4.20±0.35 | 4.20±0.35 | 0.37±0.03 | 1.98±0.36 | 2±1 | 11±5 | 0.89±0.08 | 0.80±0.11 |
| | 山楂 | 3.20±0.34 | 3.20±0.34 | 3.76±0.38 | 3.76±0.38 | 1.07±0.07 | 1.93±0.42 | 3±2 | 30±12 | 0.86±0.14 | 0.60±0.12 |
| | 黄栌 | 4.50±0.61 | 4.50±0.61 | 7.52±0.67 | 7.52±0.67 | 0.96±0.12 | 1.77±0.49 | 3±2 | 13±7 | 0.62±0.16 | 0.48±0.12 |
| | 小乔木均值 | 3.68±0.56b | 3.68±0.56b | 4.89±1.24b | 3.11±0.72b | 0.72±0.39b | 1.86±0.73b | 3±1b | 13±8b | 0.79±0.09b | 0.66±0.11b |
| 灌木 | 木槿 | 3.10±0.35 | 3.10±0.35 | 1.98±0.49 | 1.98±0.49 | 0.43±0.09 | 1.45±0.49 | 5±1 | 23±3 | 1.68±0.12 | 1.35±0.12 |
| Shrub | ‘绯扇’现代月季 | 1.02±0.37 | 1.02±0.37 | 0.61±0.08 | 0.61±0.08 | 0.00±0.00 | 1.48±0.45 | 3±1 | 8±4 | 1.68±0.24 | 1.68±0.14 |
| | 华北珍珠梅 | 1.48±0.41 | 1.48±0.41 | 1.55±0.7 | 1.55±0.7 | 0.00±0.00 | 1.93±0.36 | 4±1 | 10±3 | 1.01±0.17 | 1.01±0.17 |
| | 小花溲疏 | 2.53±0.26 | 2.53±0.26 | 2.93±0.14 | 2.93±0.14 | 0.00±0.00 | 1.03±0.10 | 10±1 | 45±10 | 0.87±0.10 | 0.87±0.10 |
| | 紫薇 | 2.52±0.42 | 2.52±0.42 | 2.11±0.55 | 2.11±0.55 | 0.82±0.25 | 0.96±0.38 | 4±1 | 11±2 | 1.22±0.11 | 0.81±0.11 |
| | 红瑞木 | 1.46±0.42 | 1.46±0.42 | 2.02±0.48 | 2.02±0.48 | 0.00±0.00 | 2.22±0.24 | 4±1 | 19±1 | 0.72±0.10 | 0.72±0.10 |
| | 紫丁香 | 2.34±0.32 | 2.34±0.32 | 2.20±0.31 | 2.20±0.31 | 0.00±0.00 | 1.27±0.38 | 4±1 | 8±2 | 1.08±0.18 | 1.08±0.16 |
| | 鸡树条 | 2.98±0.31 | 2.98±0.31 | 3.62±1.12 | 3.62±1.12 | 0.00±0.00 | 2.05±0.75 | 4±0 | 13±5 | 0.81±0.10 | 0.81±0.10 |
| | 银忍冬 | 3.83±0.29 | 3.83±0.29 | 3.88±0.89 | 3.66±0.89 | 0.22±0.03 | 1.80±0.79 | 2±1 | 5±1 | 0.99±0.18 | 0.94±0.12 |
| | 灌木均值 | 2.57±1.26b | 2.57±1.26b | 2.57±0.91c | 2.41±1.22b | 0.16±0.26b | 1.58±0.40b | 4±2ab | 16±11b | 1.11±0.33a | 1.01±0.32a |

不同字母表示不同生活型间差异显著 ($P < 0.05$)

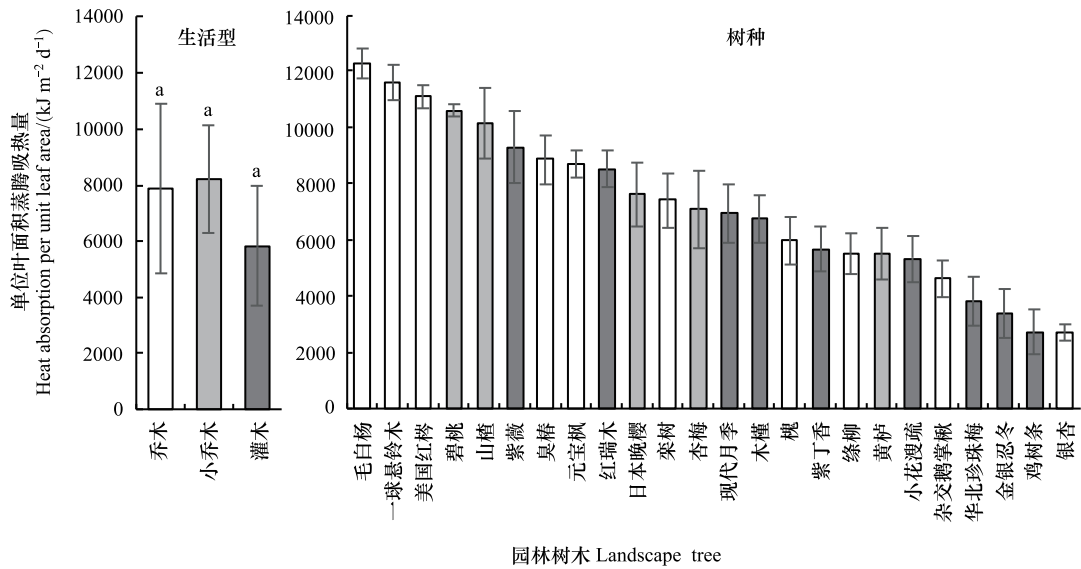


图 1 园林树木单位叶面积蒸腾吸热量

Fig.1 Heat absorption per unit leaf area of landscape tree

不同字母表示不同生活型间差异显著 ($P < 0.05$)

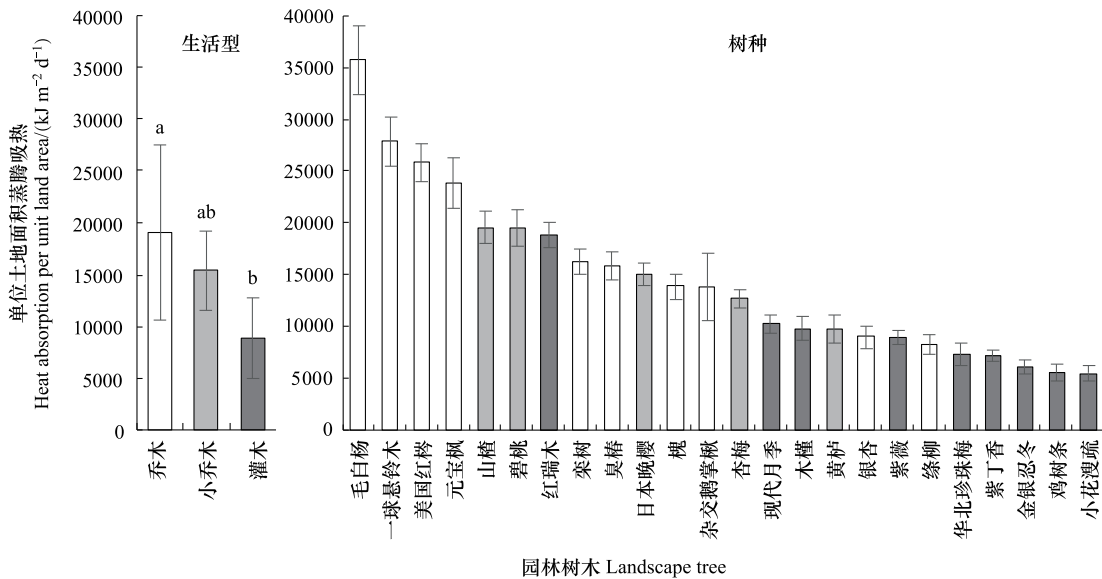


图 2 园林树木单位土地面积蒸腾吸热量

Fig.2 Heat absorption per unit land area of landscape tree

如在所有供试树种中,太阳辐射拦截率最高的两种植物是乔木中的美国红栎(88.31%)和银杏(97.72%),同时最低的两种亦为乔木中的绦柳(79.10%)与臭椿(78.45%)。

2.3 园林树种叶性状和构型性状与植物热调节效应相关性分析

2.3.1 植物叶功能性状与蒸腾吸热功能相关性分析

对 24 种园林树种的叶片性状与单位叶面积蒸腾吸热量进行相关性分析(表 4)的结果表明,单位叶面积蒸腾吸热量与叶片干物质含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与比叶重呈显著正相关($P < 0.05$);单位土地面积日蒸腾吸热量与叶片干物质含量及比叶重呈显著正相关($P < 0.05$)。

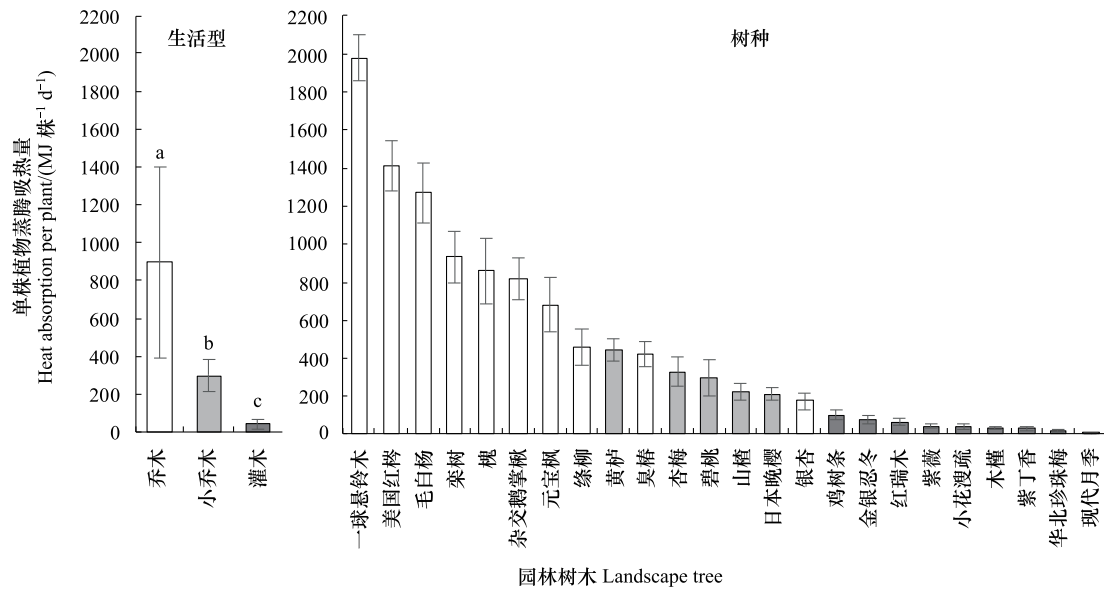


图3 园林树木单株植物蒸腾吸热量

Fig.3 Heat absorption per plant of landscape tree

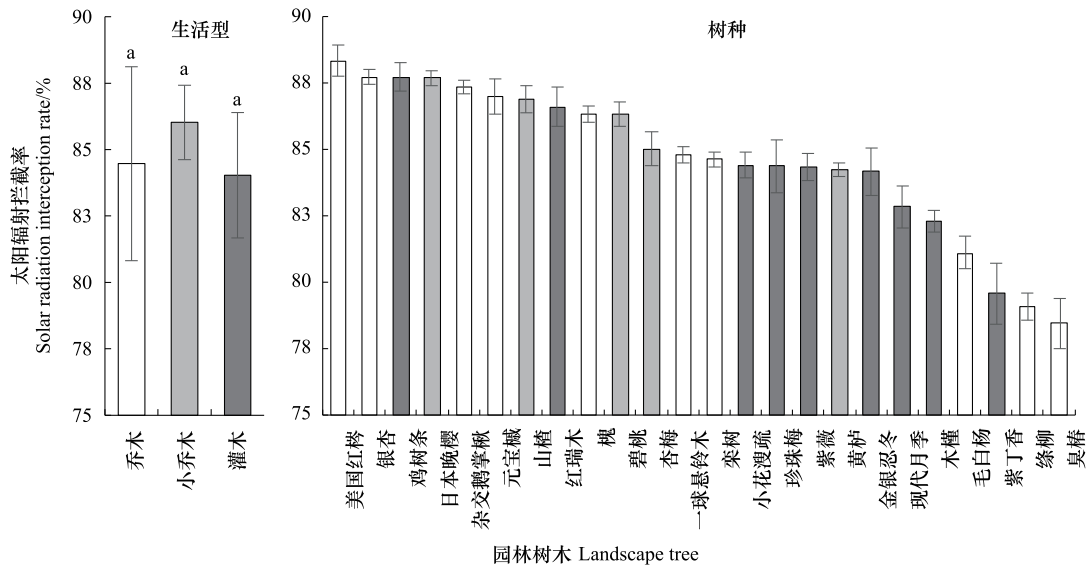


图4 园林树木太阳辐射拦截率

Fig.4 Solar radiation interception rate of landscape tree

不同字母表示不同生活型间差异显著 ($P < 0.05$)

表4 植物叶性状与蒸腾吸热指标相关性分析

Table 4 Correlation analysis between leaf traits and heat absorption index of plants

| | 叶面积 Leaf area | 叶片厚度 Leaf thickness | 叶片干物质含量 Leaf dry matter content | 叶片相对含水量 Leaf relative water content | 比叶重 Leaf mass per area |
|---|------------------|------------------------|------------------------------------|--|---------------------------|
| 单位叶面积蒸腾吸热量 Heat absorption per unit leaf area | 0.043 | 0.094 | 0.551 ** | -0.107 | 0.453 * |
| 单位土地面积蒸腾吸热量 Heat absorption per unit land area | 0.153 | -0.101 | 0.463 * | 0.079 | 0.418 * |

* 表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著

2.3.2 植物构型性状与蒸腾吸热功能相关性分析

对 24 个树种的构型功能性状与单株植物蒸腾吸热量、单位土地面积蒸腾吸热量进行偏相关分析(叶片干物质含量、比叶重作为控制变量)如表 5 所示,单位土地面积蒸腾吸热量与株高、枝下高、树木高宽比、树冠高宽比呈极显著正相关($P<0.01$),与二级分枝数呈显著相关($P<0.05$);单株植物蒸腾吸热量与株高、冠幅、冠高呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 5 植物构型性状与蒸腾吸热指标偏相关分析

Table 5 Correlation analysis between plant architecture traits and transpiration and heat absorption index of plants

| | 胸径 Diameter at breast height | 株高 Plant height | 冠幅 Crown width | 枝下高 Under crown height | 冠高 Crown height | 树木 高宽比 Height to width ratio of trees | 树冠 高宽比 Crown height to width ratio | 一级 分枝数 First-order branching number | 二级 分枝数 Second-order branching number |
|---|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|---|--|---|--|
| 单位土地面积蒸腾吸热量 Heat absorption per unit land area | 0.403 | 0.671 ** | 0.242 | 0.691 ** | 0.512 | 0.820 ** | 0.692 ** | 0.421 | 0.584 * |
| 单株植物蒸腾吸热量 Heat absorption per plant | 0.806 ** | 0.747 ** | 0.818 ** | 0.362 | 0.859 ** | 0.414 | 0.508 | 0.224 | 0.287 |

* 表示在 $P<0.05$ 水平差异显著; ** 表示在 $P<0.01$ 水平差异显著

2.3.3 植物构型性状与太阳辐射拦截功能相关性分析

对 24 种园林树种的太阳辐射削减率与构型性状进行相关性分析(表 6),结果表明,树木对太阳辐射的拦截率与叶面积指数呈极显著正相关($P<0.01$),与树冠高宽比显著负相关($P<0.05$)。虽然太阳辐射拦截率与树木高宽比未表现出显著相关性($P>0.05$),但随着树木高宽比的增加,树冠太阳辐射拦截率也存在一定的下降趋势。

表 6 植物太阳辐射拦截率与构型性状相关性分析

Table 6 Correlation analysis between solar radiation interception rate and architecture traits of plants

| | 叶面积指数 Leaf area index | 一级分枝 First-order branching | 二级分枝 Second-order branching number | 树木高宽比 Height to width ratio of trees | 树冠高宽比 Crown height to width ratio |
|--|--------------------------|----------------------------------|--|--|---|
| 太阳辐射拦截率 Solar radiation interception rate | 0.587 ** | 0.367 | 0.337 | -0.391 | -0.440 * |

* 表示在 $P<0.05$ 水平差异显著; ** 表示在 $P<0.01$ 水平差异显著

3 讨论

3.1 植物热调节效应差异

随着气候变化问题日益严峻以及我国“双碳”目标的逐步推进,评估并提升绿地所发挥的生态系统服务功能,越来越成为我国当下即未来发展中相关学科需重点关注的研究领域。城市绿地植物的热调节效应是衡量城市绿地生态调节服务功能的重要指标^[28]。由于植物自身适应性、生长属性等因素差异,不同植物通过蒸腾作用与拦截太阳辐射发挥的效应不同:首先,植物通过蒸腾作用使水分子发生物态变化,带走自身热量的同时,间接降低了环境的温度。本研究表明了,在夏季北京地区的园林树种的确发挥着重要的蒸腾吸热功能,然而不同树种间也存在较大差异,24 种植物中毛白杨、一球悬铃木、美国红栎等植物在单位土地面积蒸腾吸热量与单株蒸腾吸热量上表现较优,而小花溲疏、紫丁香表现较差。其次,近地面环境中,地面辐射是大气升温的直接热源,空气中水蒸气和二氧化碳吸收地面的长波辐射,从而导致大气升温。相比于硬化地面,地表覆盖的植被能极为有效地降低地面对太阳辐射的吸收,从而减少地面辐射的释放^[29]。研究证实不同树种太阳辐射拦截差异显著,24 种植物中美国红栎、银杏的太阳辐射拦截功能较强,而绦柳、臭椿较弱。植物热调节效应是植物蒸腾吸热功能和太阳辐射拦截功能综合作用的结果,但 24 种供试植物中,仅有少部分植物同时具有

较优的蒸腾吸热能力与太阳辐射拦截能力,如美国红栎、元宝槭,而大部分植物则表现为在蒸腾吸热能力或太阳辐射拦截其中一方面有较好的效应,如毛白杨、一球悬铃木等植物单位土地面积蒸腾吸热量较高,但对太阳辐射拦截效果表现一般;银杏、鸡树条等植物单位土地面积蒸腾吸热量较低,但在拦截太阳辐射方面表现优异。在不能同时兼具两方面优势的情况下,Manickathan 等^[30]研究表明相较于植物蒸腾吸热功能,树木遮荫更能提高人体热舒适度,同样 Shashua-Bar 等^[31]认为树木太阳辐射拦截能力是更为值得考虑的指标。

3.2 植物叶性状与植株构型性状对热调节效应的影响

植物通过功能性状的变化以适应环境,而植物适应环境从而正常生长发育是其发挥最佳生态效应的前提。另一方面,植物功能性状又能够影响生态系统过程进而影响植物生态效应^[32-33]。本研究发现,植物功能性状可通过影响植物水分蒸发以及太阳辐射能量流动进而影响植物所发挥的热调节效应。

叶片是植物蒸腾作用的最重要功能器官,不同树种叶片蒸腾吸热能力与植物叶性状的多个指标均有较强的关联。本研究发现单位叶面积蒸腾吸热量与叶片干物质含量、比叶重呈显著正相关。在李娟霞^[34]对 6 种落叶阔叶植物、马迎宾^[35]对小叶胡杨(*Populus simonii* × *P. euphratica*)的叶性状研究中均发现与本研究类似出现了相似的现象。植物蒸腾作用与光合作用是植物获取无机盐、合成有机物的方式,比叶重、叶片干物质含量等性状体现的是植物在叶片上耗费的资源,植物需要在确保自身的生长生存需求得到满足前提下,补偿其叶片形成所耗费的资源^[36],由此导致了植物单位叶面积蒸腾吸热功能随着比叶重等叶性状的增加而增强。此外,植物单片叶片的蒸腾吸热效应的提升致使植物在单位土地面积上蒸腾吸热量的升高,这也是本研究中发现单位土地面积日蒸腾吸热量与叶片干物质含量、比叶重呈显著正相关的原因。

植物树高、冠幅等构型性状体现着植物对环境水分的适应策略,植物通过降低株高、冠幅,减少叶片数量从而减少水分蒸腾,进而适应较低的土壤水分环境^[37-38],这些性状显然与植物蒸腾吸热能力密切相关。本研究发现,株高、树木高宽比和二级分枝数等指标与植物单位土地面积吸热量之间存在显著正向影响,例如毛白杨这类树形“高瘦”,且具有较多的分枝的植物,能在有限的空间内着生的更多叶片,从而提高植物叶面积指数与单位土地面积蒸腾吸热能。同时,我们研究也发现描述植物地上部分地径的构型性状如胸径、株高、冠幅和冠高等,与单株植物的蒸腾吸热能力显著正相关,这与薛雪^[39]与 Huang^[40]的研究结果相似,其内在机制可能体现在两个方面:首先,胸径、株高、冠幅等生长指标影响了植物总叶面积^[41],进而影响了植株发挥蒸腾吸热功能的强弱;其次,较粗的主干有利于树木水分自下而上运输,从而更有利于植物蒸腾吸热功能的发挥^[42]。

植物构型性状同样体现着植物对光环境的适应策略,植物可通过增加单位空间内的叶片数量、构造宽大的冠型等方式以满足对光照的需求^[43-44],这些性状必然会影响到树木冠下的太阳辐射强度。本研究发现植物对太阳辐射拦截能力与叶面积指数呈显著正相关、与树冠高宽比呈显著负相关,这一结果与吴云霄^[45]、Zhang 等^[46]研究结果相似。植物冠下辐射主要来自两个方面:冠层上方的阳光直射和植物周边的光散射^[47]。其中,冠层上方阳光直射是太阳辐射的主要来源,而高叶面积指数的树种可以通过密集的叶片有效拦截这部分辐射;在散射辐射拦截方面,树木高宽比较低、较为“矮胖”的植物能有效阻挡散射辐射进入林冠下方,发挥较优的太阳辐射拦截功能。然而前文研究结果表明,树木高宽比较低可能也使得单位土地面积蒸腾吸热量较低,同时乔木树种单株蒸腾吸热量较高,但此类树种大多不具备较低树木高宽比,这可能是大多数植物难以兼顾蒸腾吸热功能与太阳辐射拦截功能的原因。

此外,乔木在热调节效应方面主要优势表现在单位土地面积和单株蒸腾吸热量上,这可能是由于其在株高、冠幅、树木高宽比等关键功能性状上显著高于其他生活型树种;在单位叶面积蒸腾吸热量各生活型差异并不显著,在叶干物质含量、比叶重等影响单位叶面积蒸腾吸热量的关键指标上,不同生活型同样差异不显著;在太阳辐射拦截功能上各生活型无显著差异,其原因可能是太阳辐射拦截功能受到叶面积指数与树冠高宽比两个构型性状的共同影响,于乔木而言,其叶面积指数、树冠高宽比较高,对直射光拦截较强,但散射光拦截较弱,而小乔木与灌木则相反。

4 结论

对北京市 24 种园林绿化树种的热调节效应及其叶性状和植株构型性状的研究结果显示:乔木、小乔木综合热调节效应优于灌木,其中美国红栲、元宝槭等植物综合热调节效应较强。叶片干物质含量、比叶重等叶功能性性状与植物叶片蒸腾吸热功能显著正相关;对于树体而言,单位土地面积吸热量、植株蒸腾吸热量和太阳辐射拦截功能受到株高、叶面积指数、树冠高宽比等形态特征的影响更大。因此,在未来进行树种选育和园林绿地建设的树种筛选过程中,建议考虑将植物的干物质含量、比叶重等叶性状和叶面积指数、树冠高宽等形态特征作为重要的筛选指标,以提高城市绿地的热调节服务功能。

参考文献(References):

- [1] 林学椿, 于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. 地球物理学报, 2005, 48(1): 39-45.
- [2] Yang X C, Hou Y L, Chen B D. Observed surface warming induced by urbanization in East China. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116 (D14): D14113.
- [3] 谢启姣, 刘进华, 胡道华. 武汉城市扩张对热场时空演变的影响. 地理研究, 2016, 35(7): 1259-1272.
- [4] Wake B. Reflecting on AR6. *Nature Climate Change*, 2023, 13(9): 890-892.
- [5] Gao Z, Hou Y, Chen W P. Enhanced sensitivity of the urban heat island effect to summer temperatures induced by urban expansion. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(9): 094005.
- [6] Fan S X, Li Y L, Zhang M Y, Li K, Xie Y F, Dong L. Spatial differentiation of neighborhood climates and their response to surrounding land cover composition: a case study in Beijing, China. *The Science of the Total Environment*, 2022, 826: 154001.
- [7] Fischer E M, Sippel S, Knutti R. Increasing probability of record-shattering climate extremes. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 689-695.
- [8] Rötzer T, Rahman M A, Moser-Reischl A, Pauleit S, Pretzsch H. Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *The Science of the Total Environment*, 2019, 676: 651-664.
- [9] 范舒欣, 李坤, 张梦园, 谢雅芬, 董丽. 城市居住区绿地小微尺度下垫面构成对环境微气候的影响——以北京地区为例. 北京林业大学学报, 2021, 43(10): 100-109.
- [10] Peters E B, McFadden J P, Montgomery R A. Biological and environmental controls on tree transpiration in a suburban landscape. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2010, 115(G4): G04006.
- [11] 史红文, 秦泉, 廖建雄, 陈桂桥, 丁昭全. 武汉市 10 种优势园林植物固碳释氧能力研究. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(9): 87-90.
- [12] 张艳丽, 费世民, 李智勇, 孟长来, 徐嘉. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益. 生态学报, 2013, 33(12): 3878-3887.
- [13] 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.
- [14] 殷亦佳, 陈启航, 赵芮, 孙苗, 陈莉祺, 李飞, 于晓南. 北京市常见绿化树种蒸腾特性与温湿效益研究. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 31-36, 76.
- [15] Díaz S, Cabido M, Zak M, Martínez Carretero E, Aranibar J. Plant functional traits, ecosystem structure and land-use history along a climatic gradient in central-western Argentina. *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10(5): 651-660.
- [16] Violle C, Navas M L, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E. Let the concept of trait be functional!. *Oikos*, 2007, 116(5): 882-892.
- [17] Lavorel S. Plant functional effects on ecosystem services. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1): 4-8.
- [18] Hanisch M, Schweiger O, Cord A F, Volk M, Knapp S. Plant functional traits shape multiple ecosystem services, their trade-offs and synergies in grasslands. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(8): 1535-1550.
- [19] 郑华, 潘权, 文志, 杨延征. 植物功能性状与森林生态系统服务的关系研究综述. 生态学报, 2021, 41(20): 7901-7912.
- [20] Zhang Z, Lv Y M, Pan H T. Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(3): 323-329.
- [21] 张波, 王文杰, 何兴元, 周伟, 肖路, 吕海亮, 魏晨辉. 哈尔滨城市森林遮荫和降温增湿效应差异及其影响因素. 生态学杂志, 2017, 36(4): 951-961.
- [22] 李江波, 翟志宏, 李海燕, 邓燕, 陈思豪, 王忆娴, 丁云飞. 广州地区典型绿化乔木降温增湿效应研究. 气候与环境研究, 2024, 29(1): 13-24.
- [23] Grady K C, Laughlin D C, Ferrier S M, Kolb T E, Hart S C, Allan G J, Whitham T G. Conservative leaf economic traits correlate with fast growth

- of genotypes of a foundation riparian species near the thermal maximum extent of its geographic range. *Functional Ecology*, 2013, 27(2): 428-438.
- [24] Blonder B, Salinas N, Patrick Bentley L, Shenkin A, Chambi Porroa P O, Valdez Tejeira Y, Violle C, Fyllas N M, Goldsmith G R, Martin R E, Asner G P, Díaz S, Enquist B J, Malhi Y. Predicting trait-environment relationships for venation networks along an Andes-Amazon elevation gradient. *Ecology*, 2017, 98(5): 1239-1255.
- [25] 郭太君, 林萌, 代新竹, 黄勇. 园林树木增湿降温生态功能评价方法. *生态学报*, 2014, 34(19): 5679-5685.
- [26] 范舒欣, 蔡妤, 董丽. 北京市 8 种常绿阔叶树种滞尘能力. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 408-414.
- [27] 赵晓龙, 李国杰, 高天宇. 哈尔滨典型行道树夏季热舒适效应及形态特征调节机理. *风景园林*, 2016, (12): 74-80.
- [28] Davies H J, Doick K J, Hudson M D, Schreckenberg K. Challenges for tree officers to enhance the provision of regulating ecosystem services from urban forests. *Environmental Research*, 2017, 156: 97-107.
- [29] Zhang Y J, Murray A T, Turner B L II. Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 165: 162-171.
- [30] Manickathan L, Defraeye T, Allegrini J, Derome D, Carmeliet J. Parametric study of the influence of environmental factors and tree properties on the transpirative cooling effect of trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 259-274.
- [31] Shashua-Bar L, Hoffman M E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. *Energy and Buildings*, 2000, 31(3): 221-235.
- [32] de Bello F, Lavorel S, Díaz S, Harrington R, Cornelissen J H C, Bardgett R D, Berg M P, Cipriotti P, Feld C K, Hering D, Martins da Silva P, Potts S G, Sandin L, Sousa J P, Storkey J, Wardle D A, Harrison P A. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(10): 2873-2893.
- [33] Liu C C, Li Y, Yan P, He N P. How to improve the predictions of plant functional traits on ecosystem functioning? *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 622260.
- [34] 李娟霞, 田青. 兰州市 6 种园林植物叶片形态和光合生理特征. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2022, 50(1): 72-80.
- [35] 马迎宾, 黄雅茹, 张景波, 赵英铭, 郝需婷, 张帅. 不同林龄小胡杨叶性状研究. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(6): 89-94.
- [36] Kikuzawa K. A cost-benefit analysis of leaf habit and leaf longevity of trees and their geographical pattern. *The American Naturalist*, 1991, 138(5): 1250-1263.
- [37] 玉米提·哈力克, 柴政, 罗淑政, Bodo Coenradie, Birgit Kleinschmit. 新疆塔里木河下游胡杨树高生长量及其空间分布研究. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(5): 187-191.
- [38] 刘雅楠, 刘洋, 兰再平, 铁牛, 张梦弢, 王成德, 罗奇辉, 张晨. 不同灌溉方式对樟子松生长、光合特性及土壤水分运移的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(4): 135-143.
- [39] 薛雪, 张金池, 孙永涛, 庄家尧, 王鹰翔. 上海常绿树种固碳释氧和降温增湿效益研究. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(3): 81-86.
- [40] Huang J, Kong F H, Yin H W, Middel A, Liu H Q, Zheng X D, Wen Z H, Wang D. Transpirational cooling and physiological responses of trees to heat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108940.
- [41] 申晓瑜. 北京常见园林植物叶面积指数模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [42] Meinzer F C, Bond B J, Warren J M, Woodruff D R. Does water transport scale universally with tree size? *Functional Ecology*, 2005, 19(4): 558-565.
- [43] Givnish T J. Adaptation to Sun and shade: a whole-plant perspective. *Functional Plant Biology*, 1988, 15(2): 63.
- [44] Poorter L, Bongers L, Bongers F. Architecture of 54 moist-forest tree species: traits, trade-offs, and functional groups. *Ecology*, 2006, 87(5): 1289-1301.
- [45] 吴云霄, 雷忻. 树木冠层消光度与三维绿量的关系. *生态科学*, 2016, 35(1): 167-171.
- [46] Zhang J, Gou Z H, Zhang F, Shutter L. A study of tree crown characteristics and their cooling effects in a subtropical city of Australia. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106027.
- [47] 崔启武, 朱劲伟. 林冠的结构和光的分布——光的透射和反射理论. *地理学报*, 1981, 36(2): 196-208.