# 城市公园常见蔷薇科乔木冠层特征对林下降温效应差异及影响机制*

陈昕瑶[1] 张 兴[1] 高 飞[1,2]

1 苏州科技大学建筑与城市规划学院 江苏苏州 215011

2 黑龙江省科学院自然与生态研究所 哈尔滨 150040

**摘要**：【目的】探究城市公园植物配置的科学种植高度、种植间距等冠层特征及其对林下降温效应的影响，为后续科学优化种植方案提供数据支撑。【方法】以苏州市城市公园常见蔷薇科乔木为研究对象，采取抽样调查法，使用植物冠层分析仪、测高仪、激光测距仪，基于冠层热扩散理论，分析其冠层结构和冠层效益等特征对林下降温的差异，探讨其影响机制及林下降温的冠层特征指标最优值。【结果】冠层结构指标中与降温效应相关性高低的排序为太阳散射辐射通过率（DHI）>胸径（DBH）>树高（TH）>树冠厚度（CTH）>冠幅（CW）>叶面积指数（LAI），且当 TH 为 6.8 m、CW 为 3.3 m、CTH 为 2.2 m、DBH 为 0.27 m、LAI 为 4、DHI 为 12 时，降温效应最优；冠层效益指标中与降温效应相关性高低的排序为热垂直扩散结构指标（SIV）>综合热扩散结构指标（CSI）>热水平扩散结构指标（SIH）>潜热扩散结构指标（SIL），且冠层效益指标对总降温效应的贡献大于冠层结构指标。【结论】城市公园中蔷薇科乔木对林下降温效应存在差异性，其最优降温效应通过冠层结构参数与冠层效益参数的协同调控实现，并且主要依赖植物增强潜热调控热量的生理机制。

**关键词**：降温效应；冠层特征；林下降温；热环境

DOI：10.12169/zgcsly.2024.12.16.0004

## Differences in Understorey Cooling Effect of Canopy Characteristics of Common Rosaceae Trees in Urban Parks and Its Impact Mechanism

Chen Xinyao[1] Zhang Xing[1] Gao Fei[1,2]

(1. School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 2. Institute of Nature and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China)

**Abstract**: 【Objective】 The study is to explore the canopy characteristics of plant configuration in urban parks, such as scientific planting height and planting spacing, and their influences on understorey cooling effect., which would provide data support to the follow-up planting plan optimization. 【Method】 This paper takes the common Rosaceae trees in Suzhou's urban parks as the research object. By employing a sampling survey approach, the investigation utilizes a plant canopy analyzer, altimeter, and laser rangefinder to analyze the different influences that their canopy structure, canopy efficiency and other characteristics have on understorey cooling, discuss the influence mechanism and explore the optimal value

收稿日期：2024-12-16

*基金项目："十四五"江苏省重点学科建设项目（082240006/002/002）；江苏省研究生工作站；宿迁交通科研基金（2022Y11）；国家自然科学基金青年基金（52008280）；国家自然科学基金青年基金（52308029）；黑龙江省科学院双提雁阵项目（STYZ2022ZR01）；黑龙江省博士后资助（LBH-Z23263）

第一作者：陈昕瑶（1999-），女，硕士生，研究方向为地域生态环境与景观规划。E-mail：1037014036@qq.com

通信作者：张兴（1968-），男，博士，教授，研究方向为地域生态环境与景观规划。E-mail：1006598747@qq.com

of canopy characteristic indexes for understorey cooling. 【Result】 The correlation of canopy structure indexes with the cooling effect is ordered as diffuse horizontal irradiance (DHI) >diameter at breast height (DBH) >tree height (TH) >canopy thickness (CTH) >canopy width (CW) >leaf area index (LAI); and the cooling effect is optimal when TH is at 6.8 m, CW at 3.3 m, CTH at 2.2 m, DBH at 0.27 m, LAI at 4, and DHI at 12. The correlation of the canopy efficiency index to the cooling effect is ranked as SIV > CSI > SIH > SIL, and the canopy efficiency index has the larger contribution to the total cooling effect than the canopy structure index. 【Conclusion】 In urban parks, the understorey cooling effect of Rosaceae trees is differentiated, and the optimal cooling effect is realized through the synergistic regulation of canopy structure parameters and canopy efficiency parameters. The physiological mechanism of enhancing latent heat with plants is mainly relied on to regulate the amount of heat.

**Keywords**: cooling effect; canopy characteristics; understorey cooling; thermal environment

全球气候变暖与城市化背景下，城市热岛效应所面临的城市问题愈发严峻。城市公园在缓解城市热岛效应方面具有重要地位[1-3]，如何在有限的空间内充分发挥植物的降温效应是植物配置中的重要研究问题。因此，越来越多的学者开始研究植物与林下温度之间的影响机制。乔木作为城市公园植物配置的主要类型，可通过冠层增加潜热与降低显热对林下环境产生降温效应[4]。乔木冠层是影响林下温度的重要因子，影响冠层内部光辐射的吸收、透射[5]，冠层特征不同导致降温的调节效果不同[6]。

现有对林下降温效应的研究多关注不同的绿地尺度、植物群落种类、植物群落结构等[7-10]，模糊了植物科属带来的影响，较少关注同一科属乔木植物对林下的降温效应。同时，近年来地域性乡土树种的应用越来越受到重视[11]，蔷薇科乔木属于苏州地域性植物资源，在苏州城市公园的植物配置中兼顾了生态效益与美学效益，是营造植物景观的首选和常见的品种，且多以群植、片植的方式种植，常以乔草群落的种植模式出现，其林下降温效应较为显著[12]，也便于开展相关研究，但以往对蔷薇科乔木冠层特征与林下降温方面的研究较少。

目前冠层对林下降温效应影响的研究多以叶片性状为对象[13]，少以冠层结构特征，即冠层密度[14]、水平冠层结构[15]与垂直冠层结构[16]为研究对象。有学者指出冠层调节热量的能力也会影响林下温度[17]。同时，针对冠层对林下降温效应的影响研究中少有考虑冠层热量调节能力（冠层热量调节能力的研究方法主要为热脉冲[18]与热扩散[19]等热技术手段）。在此基础上，本研究基于热扩散理论，以苏州城市公园中的蔷薇科乔木为研究对象，研究相同尺度和群落结构中的冠层结构与冠层效益等冠层特征对林下降温效应的影响，采用地面调查结合图像综合测量，分析辐射差、温度差等多种数据，综合分析冠层特征对林下降温效应的影响，分析冠层效益的调节热量能力及其对林下降温效应的影响，为后续科学优化种植方案提供数据支撑。

## 1 研究区概况

江苏省苏州市（119°55′—121°20′E，30°47′—32°02′N）位于长三角中部，属亚热带季风海洋性气候。2024年，苏州全年平均温度较往年有所提高，共出现48个高温日，持续性高温集中于7月初至9月中旬，城市热岛效应较为严重。研究蔷薇科乔木的冠层特征对林下降温的差异及影响机制，对有效缓解高温环境，创造生态宜居城市有重要意义。本研究在正式试验之前对苏州城区范围内具有代表性的55个综合性城市公园开展了预调查，并结合各公园的规模大小、地理分布区域、植物群落分布、树种组成结构以及蔷薇科乔木的种类丰富程度，最终选定桐泾公园进行研究。桐泾公园占地约20 $hm^2$，是苏州市中心城区最大的市级公园之一，其内部植物群落分布均匀、树种组成结构完善、蔷薇科乔木种类丰富，且植物维护定时、设备设施完善，空间使用率高，有利于本研究的开展。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

通过对苏州城区内有代表性的城市公园内部

蔷薇科乔木的应用调查（表 1），从植物学外观属性的角度将调研所获得的蔷薇科树种进行分类：依据树高将其分为上层乔木、中层乔木、下层乔木，依据冠幅形态将其分为冠幅高且水平密度较高的开阔型、冠幅较低且水平密度较高的紧凑型与冠幅较高且水平密度较低的通透型，依据叶片密度将其分为高叶面积指数（LAI）、中 LAI 与低 LAI 型（表 2）。最终选出种植使用频次较高且常以群植、列植方式种植，林下降温效应较为明显的紫叶李（*Prunus cerasifera*）、枇杷（*Eriobotrya japonica*）、桃（*Prunus persica*）、石楠（*Photinia serratifolia*）、垂丝海棠（*Malus halliana*）、樱花（*Cerasus yedoensis*））、杜梨（*Pyrus betulifolia*）、苹果（*Malus pumila*）8 种蔷薇科树种种植样方进行研究。

**表 1　苏州城市公园中蔷薇科乔木的种类**

| 公园名称 | 应用较多的蔷薇科乔木植物 |
|---|---|
| 苏州公园 | 紫叶李、垂丝海棠、石楠、樱花、枇杷、西府海棠（*Malus* × *micromalus*）、苹果、桃、梅（*Armeniaca mume*） |
| 桂花公园 | 紫叶李、垂丝海棠、石楠、樱花、枇杷、海棠 |
| 桐泾公园 | 紫叶李、垂丝海棠、石楠、樱花、枇杷、苹果、桃、杜梨、西府海棠、杏（*Prunus armeniaca*） |
| 运河公园 | 紫叶李、垂丝海棠、樱花、枇杷、桃、西府海棠 |
| 广济公园 | 紫叶李、垂丝海棠、石楠、樱花、枇杷 |
| 三香公园 | 紫叶李、石楠、樱花、木瓜（*Pseudocydonia sinensis*）、杜梨、苹果 |
| 中央公园 | 紫叶李、垂丝海棠、石楠、樱花、枇杷、梅 |
| 何山公园 | 紫叶李、石楠、杜梨、梅 |
| 新区公园 | 紫叶李、石楠、梅、枇杷、杜梨 |
| 花卉植物园 | 紫叶李、垂丝海棠、石楠、樱花、苹果 |
| 白塘植物园 | 紫叶李、垂丝海棠、石楠、樱花、西府海棠、杜梨 |

**表 2　蔷薇科乔木植物分类**

| 乔木层次多样化 | 冠层形态多样化 | 冠层密度多样化 |
|---|---|---|
| 上层乔木：枇杷、紫叶李 | 开阔型：枇杷、苹果、西府海棠、梅 | 高 LAI：苹果、紫叶李、木瓜 |
| 中层乔木：樱花、石楠、苹果、西府海棠、杏 | 紧凑型：紫叶李、石楠 | 中 LAI：枇杷、杜梨、石楠、西府海棠、梅、杏 |
| 下层乔木：垂丝海棠、桃、杜梨、梅、木瓜 | 通透型：垂丝海棠、樱花、苹果、杏、木瓜 | 低 LAI：垂丝海棠、樱花、桃、苹果 |

结合蔷薇科乔木种类的丰富程度和完整性考虑，确定桐泾公园内盲人植物园区为样方选区，本文采取随机结合典型抽样原则，沿盲人植物园内唯一人行干道随机选取环境相似的 8 组 8 m×8 m乔草样方，对样方开展植物调查，记录其蔷薇科乔木的种类，并在公园入口处无遮挡草地设置对照点（图 1），8 组样方内树种均为单一蔷薇科乔木（表 3）。样方内微气候条件基本稳定，与道路及水体距离相近，保证环境因子基本一致。

选取实测冠层叶温度与林下大气温度的温度差来研究植物冠层的降温效应。由于夏季观测林下降温效应最为显著，所以在夏季使用气象站观测仪器（型号：NH193 mini 超声波 5 要素传感器；生产厂家：慧能科技）选取 3 日（2023 年 9 月 17—19 日 8：30—16：00）没有降雨、天气晴朗且风速小于 1 m·s$^{-1}$的微风或无风天气进行林下大气温度实测。在试验开始前，对气象站仪器

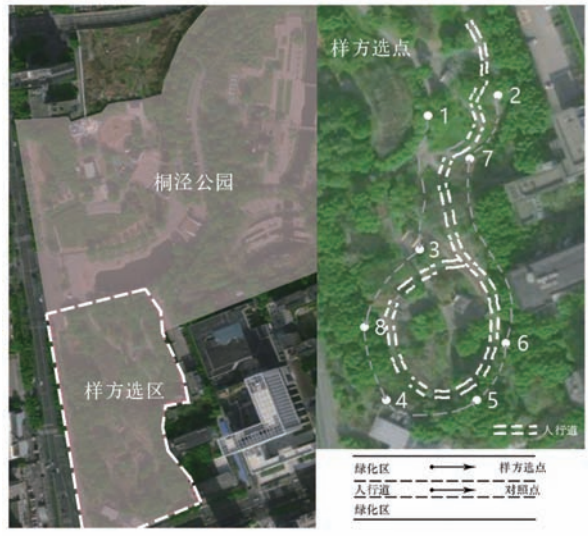



**图 1　桐泾公园样方选点示意图**

进行时间和读数校准，读数 3 次取平均值，保留一位小数。试验过程中，在样方对角线上的四等分点进行观测，观测点呈九点分布，离地面

表 3 桐泾公园观测样方构成

| 编号 | 群落结构 | 乔木种类 | 树高(TH)/m | 冠幅(CW)/m | 树冠厚度(CTH)/m | DBH/m | LAI | 太阳散射辐射通过率(DHI)/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 乔草 | 紫叶李 | 7.5 | 6.1 | 3.3 | 0.19 | 4.9 | 0.09 |
| 2 | 乔草 | 枇杷 | 7.1 | 6.0 | 2.9 | 0.12 | 3.2 | 0.05 |
| 3 | 乔草 | 桃 | 5.3 | 6.9 | 1.3 | 0.16 | 2.6 | 0.07 |
| 4 | 乔草 | 石楠 | 6.6 | 5.8 | 2.2 | 0.28 | 2.9 | 0.05 |
| 5 | 乔草 | 垂丝海棠 | 4.1 | 5.2 | 1.2 | 0.12 | 2.5 | 0.11 |
| 6 | 乔草 | 樱花 | 5.5 | 5.4 | 1.7 | 0.21 | 2.4 | 0.05 |
| 7 | 乔草 | 杜梨 | 4.0 | 3.8 | 1.4 | 0.14 | 3 | 0.05 |
| 8 | 乔草 | 苹果 | 4.9 | 4.9 | 0.7 | 0.13 | 5.8 | 0.07 |
| 对照组 | 草 | – | – | – | – | – | – | – |

1.5 m，以最大限度减少外部因素对测量结果的影响。使用高精度热成像仪（Fortric348c，生产厂家：热像科技）每隔 1.5 h 测量 1 次冠层叶温度，测量时将仪器保持在固定距离且无太阳直射处进行测量，并同时测量样方内林下大气温度。

冠层特征包括冠层结构指标和冠层效益指标两种。冠层结构指标包括 LAI（单位土地面积上植物叶片总面积与土地面积的比值）、平均叶倾角（MTA，指叶片方向与地面水平方向的夹角）、CTH（从树冠顶部到最低点的垂直距离或深度）、DHI（太阳辐射下穿透冠层到达地面的比例）、TH、CW。本研究使用植物冠层分析仪（TOP-1300，生产厂家：托普云农）测量，并采用底视法定量分析不同乔木的冠层结构特征 LAI、MTA、DHI。同时，使用测高仪（CGQ-1 型，生产厂家：哈尔滨光学仪器厂）测量 TH、CTH，使用激光测距仪（测距范围 0~100 m）测乔木冠层水平方向最宽 CW。冠层效益指标包括热垂直扩散结构指标（SIV）、热水平扩散结构指标（SIH）、潜热扩散结构指标（SIL）、综合热扩散结构指标（CSI）（表 4）。

### 2.2 数据处理与分析

#### 2.2.1 结构数据处理

基于冠层热扩散理论，选取与林下降温效应相关性较高的 LAI、MTA、CTH、枝下高（UBH）、冠高比（RCT）5 项指标来计算冠层效益指标[17]（表 4）。

表 4 冠层效益指标及计算公式

| 指标 | 计算公式 |
|---|---|
| SIV（树冠整体增加潜热降低显热的能力） | MTA/（CTH×LAI） |
| SIH（树冠水平方向增加潜热的能力） | UBH/RCT |
| SIL（树冠垂直方向增加潜热的能力） | LAI×CTH |
| CSI（综合 5 项指标树冠对热量的影响能力） | （MTA×UBH）/（CTH×RCT×LAI） |

#### 2.2.2 温度数据处理与分析

对所有样方（包括对照点）的林下温度与冠层叶表面温度变化值进行平行比较，采用 SPSS12.0 软件对林下温度数据进行相关性分析。然后通过二次曲线拟合分析，探求冠层特征对林下降温效应的影响，分析其对林下降温的差异性，并得出林下降温的冠层指标最优值。

#### 2.2.3 冠层温度处理与获取

使用 Analyzir 软件分析和处理热红外图像，获得植物冠层最高叶表面温度以及平均叶表面温度，设置固定的辐射率、反射温度、大气温度、相对湿度以及热像仪和被观察物体之间的距离等参数（裸露地面、草地和林冠层的已知比辐射率分别为 0.92、0.95 和 0.97）。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同植物林下降温结果存在差异性

由图 2 可知，不同植物群落降温率在 4.67%~10.86%，平均降温率 8.34%，其中石楠降温效应最高，为 10.86%；垂丝海棠降温效应最低，为 4.67%。8 个植物群落的排序为石楠>枇杷>樱花>杜梨>紫叶李>桃>苹果>垂丝海棠。对 8 组样方植物在各时间段内的降温效应进行排序发现，各样方在不同时间段内的降温效应变化趋势基本一致，

在 8：30—13：00 均呈现降温效应逐渐增强的趋势。紫叶李、杜梨、垂丝海棠在 13：00—14：30 呈现出最强的降温效应；其余植物在 14：30—16：00呈现出最强的降温效应。

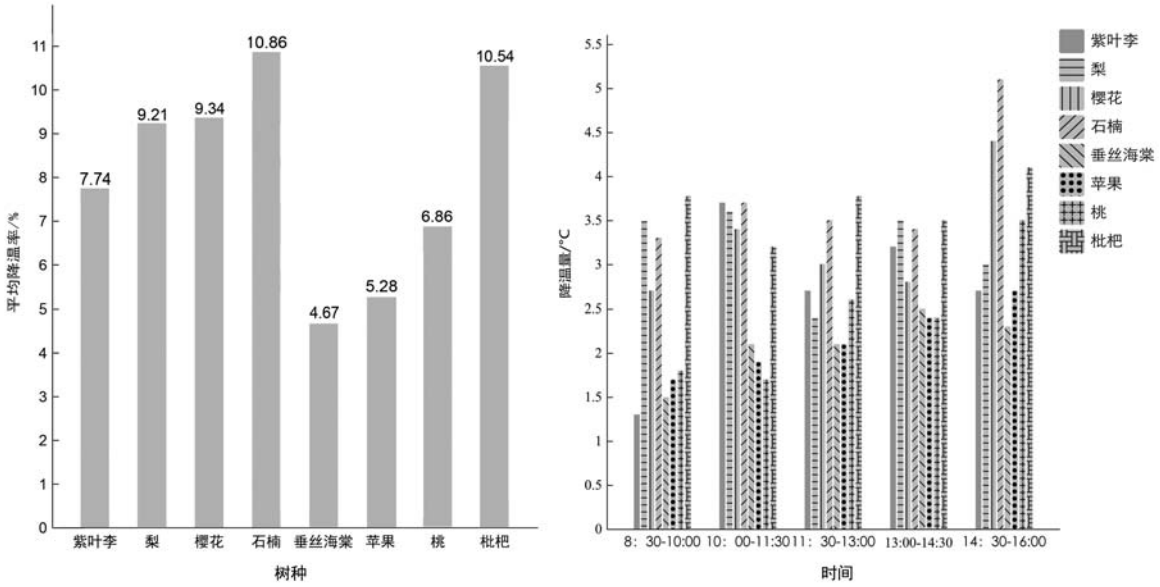



图 2　样方内植物群落的降温效应

### 3.2　冠层特征对林下降温效应存在显著影响

#### 3.2.1　冠层结构指标对林下降温效应的影响具有差异性

由表 5 可知，降温效应与 TH、CTH、DBH 呈正相关，与 CW、LAI、DHI 呈负相关。

表 5　冠层结构指标和冠层降温效应的相关性分析

| 项目 | TH | CTH | DBH | CW | LAI | DHI |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 降温效应 | 0.263 | 0.382* | 0.394* | −0.028 | −0.259 | −0.586* |

注：* 表示 $P<0.05$。

分别对 6 个指标进行二次曲线拟合（图 3）发现，不同的冠层结构指标对降温效应均存在差异且变化趋势显著。随着 TH 与 DHI 的增大，降温效应出现先递减后递增的趋势：在 TH 为 6.8 m，DHI 为 12 时降温效应最强，推测原因是当 TH 越大时，树木可以提供更多的阴影和蒸腾面积，从而改善降温效应；但当 TH 达到 6.8 m 时，冠层过于密闭，阳光无法穿透，则降温效应会随之降低。随着 CTH 与 LAI 的增大，降温效应出现先递增后递减的趋势：CTH 为 2.2 m 时降温效应最强，推测原因可能是 CTH 增大时，降温效应先增强，在达到临界值 2.2 m 以上时，因冠层过于厚重，则空气对流减弱，导致降温效应降低；LAI 为 4 时降温效应最强，随着 LAI 的增大，降温效应不断变强，在 LAI 达到 4 以上时，过于密集的冠层阻碍空气流通，导致局部热量积累，反而抑制了散热故降温效应变弱。随着 CW 的增大，降温效应也不断变弱，并在 CW 达到 2.5 m 以上时趋于平缓，推测原因是过大的 CW 会增加树冠密度，降低林下的通风性，减少蒸腾与地表散热效应。随着 DBH 的变大，降温效应先趋于平缓再增强，推测原因是胸径的增大通常意味着树木生长状况较好，故而具有较好的降温能力，降温效应也更强。综上，当 TH 为 6.8 m、CW 为 3.3 m、CTH 为 2.2 m、DBH 为 0.27 m、LAI 为 4，DHI 为 12 时，降温效应达到最优。

#### 3.2.2　冠层效益指标对林下降温效应的影响具有差异性

冠层效益指标能够全面反映冠层对热量的调控能力、定量评估冠层的潜热调节功能。分析结果（表 6）表明，冠层效益指标对林下降温效应的影响存在差异性，与 SIV、SIH、CSI 呈负相关。

表 6　冠层效益指标和冠层降温效应的相关性分析

| 项目 | SIV | SIH | SIL | CSI |
|---|---|---|---|---|
| 降温效应 | −0.424** | −0.310 | 0.140 | −0.351* |

注：* 表示 $P<0.05$；** 表示 $P<0.01$。

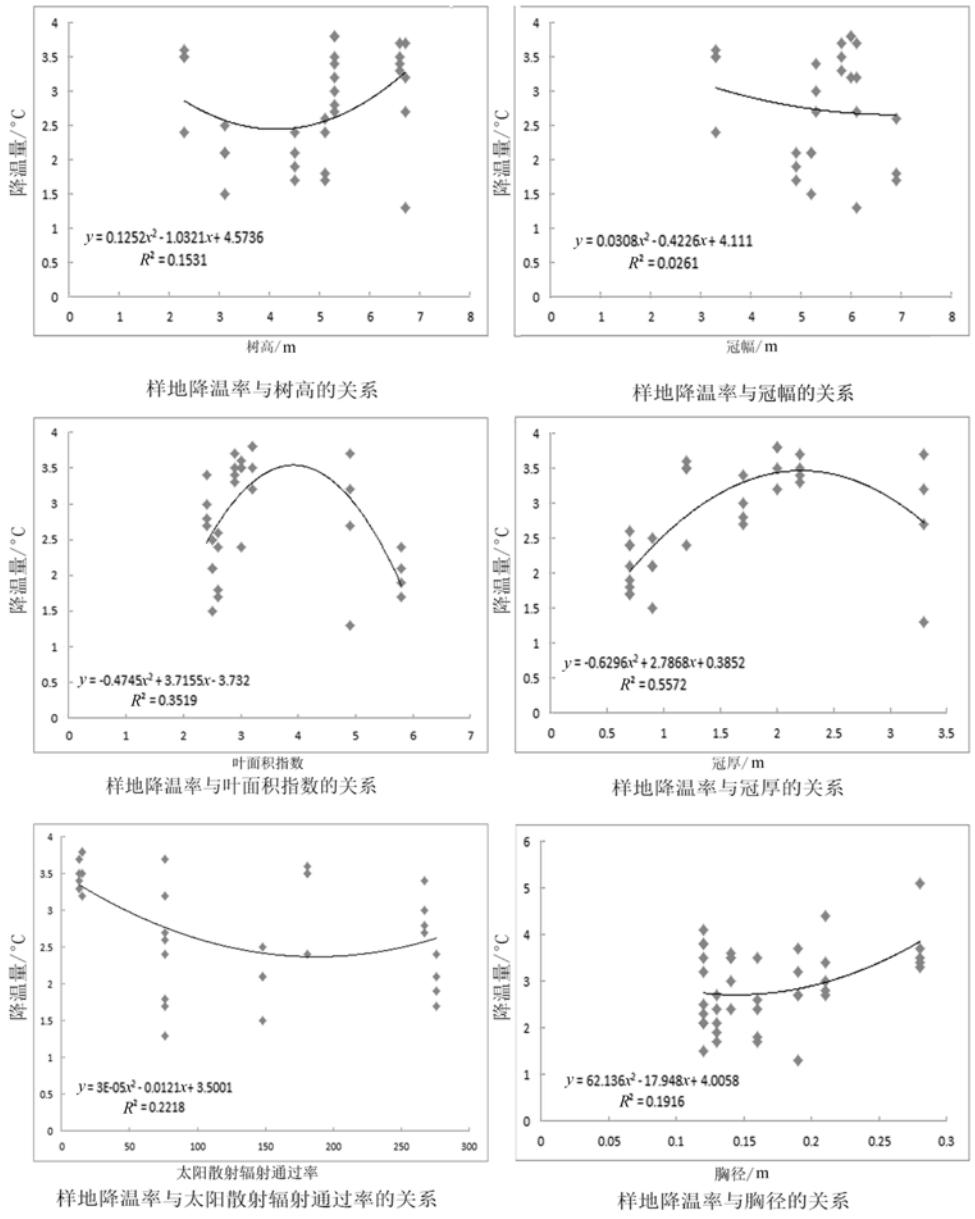



**图 3 观测样方降温效应与冠层结构指标的关系**

分别对 4 个指标进行二次曲线拟合（图 4）发现，不同冠层效益指标对降温效应均存在差异且变化趋势显著。SIV 与 SIH 与降温效应呈负线性关系。随着 SIV 的增大，降温效应呈不断变弱的趋势，究其原因是 SIV 受 MTA 影响，MTA 越小则 SIV 越小，较低的 MTA 可以阻断显热，故 SIV 值偏小时降温效应较强；而 SIH 受 RCT 与 UBH 影响，低 RCT 有利于通风透光，UBH 影响林下风环境，适当通风有利于增加潜热，SIH 越大时其林下垂直空间越大，则冠层水平方向潜热能力越强，对垂直方向的林下降温效应越弱，故 SIH 值偏小时降温效应较强。SIL 受 LAI 与 CTH 影响，当 SIL 增大时，冠层体积增大间隙率缩小，降温效应先递增后递减。CSI 受五项指标综合的影响，CSI 越小则冠层降低显热、增加潜热的能力越强，降温效应越强。综上，当 SIV 为 1.8、SIH 为 2、SIL 为 9.6、CSI 为 6 时，降温效应达到最优。

### 3.2.3 冠层特征对林下降温效应的贡献率

对冠层特征不同指标 Pearson 与线性回归分析（表 7）可知，冠层效益指标对冠层整体降温效应贡献率（$R^2$）达到 69%，相较于冠层结构指标对整体降温效应贡献率（47%）提高了 22%。

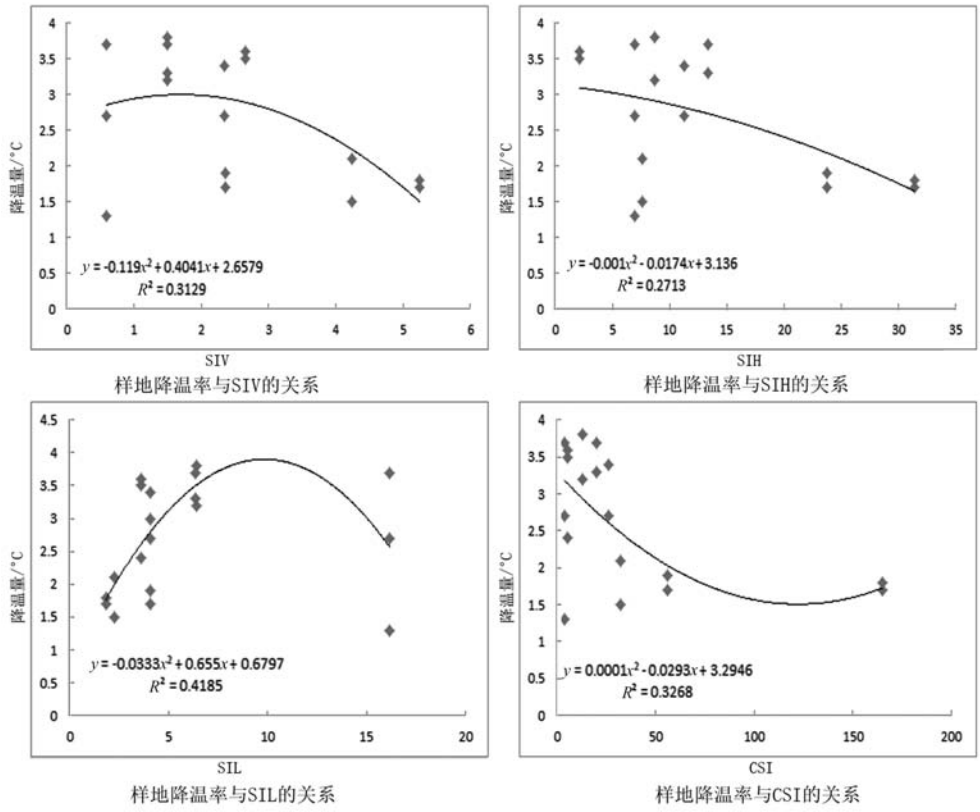



**图 4　地观测样方降温效应与冠层效益指标的关系**

**表 7　不同指标的 Pearson 与线性回归分析**

| 冠层指标 | Pearson 相关线性回归 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 相关系数 | *R* | 德宾沃森 | $R^2$ |
| 冠层结构指标 | 0. 39 | <0. 05 | 1. 4 | 0. 47 |
| 冠层效益指标 | −0. 42 | <0. 01 | 1. 3 | 0. 69 |

注：冠层结构指标包含 TH、CTH、DBH、CW、LAI、DHI；冠层效益指标包含 SIV、SIH、SIL、CSI。

## 4　讨论

### 4. 1　蔷薇科乔木降温效应最强时间段

植物全天内大气温度最高的时间段为13：30—15：00，本研究中大部分植物在13：00—14：30时降温效应最强，与大气温度变化趋势相吻合，与前人研究结果一致[7]。少部分植物如紫叶李与石楠在 15：00—16：00 时降温效应最强，这可能与绿化植被降温效应有一定的阈值相关[20]。

### 4. 2　蔷薇科乔木冠层特征与降温效应的关系

研究中，垂丝海棠、桃等的降温效应弱于与其结构指标相似的樱花、枇杷等，推测是因为其 LAI 较低，较高的 LAI 既可以阻隔太阳辐射又利于冠层热量调节。

研究表明，LAI 与林下降温效应的相关性并不显著，这与前人研究相符[21]。推测原因是较高的 LAI 可以提供较大的遮荫能力，但对林下温度的调节效果可能不如 CTH 等指标显著，且还会受到气候等多方外界因素的干扰。此外，LAI 对太阳辐射的遮挡作用受限，尤其是在太阳高度较高的正午时刻，LAI 对林下辐射的影响较小，推测这也可能是 LAI 在全天段时间内与林下降温效应显示不显著的原因。也有部分学者认为，植物群落的降温效应与 LAI 呈正相关，即有随 LAI 的减小而降低的趋势[22]，推测是以往研究对象尺度的差异对 LAI 最佳降温阈值区间也产生了影响。研究发现，LAI 与降温并非单纯的正线性关系，这与前人研究结果一致[8]。当 LAI 过高时，植物之间可能会发生水分竞争[23]，这种竞争会直接影响植物的降温效应，这就佐证了本文 LAI 与降温效应并非单纯线性关系的研究结论。

TH 与 CW 两个指标与林下降温效应呈不显著相关，这与前人的结论相符[24]，推测是两者影响树冠在垂直与水平方向的分布易受到太阳高度角的限制，而林下降温效应则更多依赖于 CTH 与冠

层覆盖密度[24]。

除上述指标外，CTH 与 DHI 等对林下环境降温效应的调节效应最为显著，表明具有复杂内部结构的乔木冠层能够更有效地阻挡和吸收太阳辐射热量，从而显著改善林下的温度环境。此外，高覆盖度的冠层通过增大叶面积和冠层阴影面积，可以提升区域的热量调节，进一步加强降温效应[13]。

冠层效益指标中 SIV 受 MTA、CTH 与 LAI 影响可有效增加潜热降低显热，与林下降温效应的相关性最显著。前人研究中，部分发现 SIH 对林下降温效应相关性最为显著[17]，推测是因为不同研究区域的植物种类不同，影响潜热的大小也有所差异，外界因素如地理位置等也有一定的影响。CSI 可以表现冠层对热量的整体调控，对林下降温效应的影响也呈显著，这与前人的研究一致[17]。此外，SIH 与 SIL 与林下降温效应呈不显著相关，推测是因为林下降温效果受冠层整体的增加潜热降低显热能力，呈现单一水平方向潜热能力的 SIH 与呈现单一垂直方向潜热能力的 SIL 在树冠密度或是树冠高度较高的情况下，对林下降温的调节效果都会受到一定的影响。

研究发现冠层效益指标对林下降温的贡献率（$R^2$）可以达到 69%，相较于冠层结构指标对整体降温效应（$R^2$）提高了 22%，推测增加潜热是被测蔷薇科乔木调节林下温度的主要手段。

根据彭曼公式量化气象要素与能量交换的关系，影响冠层热量调节主要有气候因素、植被指数、地理位置和和冠层结构，说明城市公园林下温度的调节是各个指标共同作用的结果。研究中冠层效益指标对林下总降温效应的贡献率最高达到 69%，但仍有超过 30%的林下温度环境变化是由其他因子引起的，说明影响林下温度环境的原因是多样化的，这也验证了前人的研究[25]。一部分学者的研究中降低显热是乔木对林下环境的温度调节的主要方式[26]，推测可能是因为被测树种树高等结构指标的不同引起的贡献效果不一致。受限于观测仪器、试验人员、天气等因素，本研究在样方数量、植物的密度、观测的同步性、采样的季节方面仍然存在一定的不足，例如在研究各样方调查冠层特征时，虽已尽量避开建筑与水域带来的干扰，但仍难以排除周围道路以及人流等的影响。所以，后续研究还需增加更多数据加以验证。

## 5 结论

1）城市公园中蔷薇科乔木对林下降温效应存在差异性，其降温效应大小依次为石楠>枇杷>杜梨>樱花>紫叶李>桃>苹果>垂丝海棠。

2）城市公园中蔷薇科乔木对林下最优降温效应通过冠层结构参数与冠层效益参数的协同调控实现。冠层结构指标中林下降温效应与 CTH 及 DBH 呈显著正相关，与 DHI 则呈显著负相关；冠层效益指标中降温效应与 SIV 呈极显著负相关，与 CSI 呈显著负相关。冠层结构指标 TH 为 7 m、CW 为 3.3 m、CTH 为 2.2 m、DBH 为 0.27 m、LAI 为 4.1、DHI 为 10 时，降温效应达到最优；冠层效益指标 SIV 为 1.8、SIH 为 2、SIL 为 9.6、CSI 为 6 时，降温效应达到最优。

3）被测蔷薇科乔木主要通过增加潜热的方式完成对林下环境的温度调节。

**参考文献**

[1]乔孟托,张龙,宋钰红.城市公园冷岛效应研究进展综述[J].低温建筑技术,2024,46(5):50-54.

[2]杨宣,宫聪.城市公园降温效应的影响因素研究进展[J].中国城市林业,2024,22(6):28-34.

[3]谭兴,廖建军,王志远,等.住区不同绿化组合比率的绿地热环境模拟[J].中国城市林业,2022,20(4):37-42.

[4]陶薪宇,范舒欣,董丽.北京公园绿地植物群落表面温度及温湿效应的空间变化[J].福建农林大学学报(自然科学版),2024,53(3):377-384.

[5]张佳华,姚凤梅.影响植被内部辐射状况的冠层结构特征研究[J].气象科学,2000,20(1):15-22.

[6]温志宏,黄敏仁.美洲黑杨冠层光截获特性的遗传学研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),1992,16(3):11-17.

[7]秦仲,李湛东,成仿云,等.夏季栾树群落冠层结构对其环境温湿度的调节作用[J].应用生态学报,2015,26(6):1634-1640.

[8]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(2):10-16.

[9]周寅桥,邵明,李雄.基于 Landsat-8 遥感影像的扬州市城市公园夏季温湿效应[J].中国城市林业,2023,21(5):114-123.

[10]樊柏青,刘东云,李丹宁,等.北京市六环内区域城市绿地对地表温度降温效益的差异性[J].中国城市林业,2022,20

(4):43-50.
[11]郑钧文,宋霄雪,甘玉佳,等.蔷薇科植物的红外光谱分类研究[J].激光与光电子学进展,2024,61(9):504-512.
[12]王跃武,李云峰,陈慧霞.蔷薇科树种在城市园林绿化中的应用[J].现代农村科技,2015(7):51.
[13]王小玲.上海城市森林冠层结构与叶功能性状对夏季林下微环境降温效应的影响[D].上海:华东师范大学,2023.
[14]张凯旋.上海环城林带群落生态学与生态效益及景观美学评价研究[D].上海:华东师范大学,2010.
[15]ZHOU S Q,YU Z W,MA W Y,et al.Vertical canopy structure dominates cooling and thermal comfort of urban pocket parksduring hot summer days[J].Landscape and Urban Planning,2025,254:105242.
[16]唐泽,任志彬,郑海峰,等.城市森林群落结构特征的降温效应[J].应用生态学报,2017,28(9):2823-2830.
[17]刘海轩,吴鞠,许丽娟,等.与林内小气候舒适度相关的城市森林冠层结构指数选择[J].林业科学,2020,56(2):32-39.
[18]BOSCH D D,MARSHALL L K,TESKEY R.Forest transpiration from sap flux density measurements in a Southeastern Coastal Plain riparian buffer system[J].Agricultural and Forest Meteorology,2014,187:72-82.
[19]GRANIER A.A new method of sap flow measurement in tree stems[J].Annals of Forest Science,1985,42(2):193-200.
[20]邓永成,李娜,梁玉婷.夏季不同冠层结构绿带对城市街道降温增湿效应研究[J].绿色科技,2020,22(19):33-36.
[21]RAHMAN M A,ARNDT S,BRAVO F,et al.More than a canopy cover metric:influence of canopy quality,water-use strategies and site climate on urban forest cooling potential[J].Landscape and Urban Planning,2024,248:105089.
[22]陈娟,史红文,廖建雄,等.武汉市春季 49 种园林植物的光合和蒸腾特性研究[J].河南大学学报(自然科学版),2013,43(1):62-68.
[23]ZWEIFEL R,ZIMMERMANN L,ZEUGIN F,et al.Intra-annual radial growth and waterrelations of trees:implications towards a growth mechanism[J].Journal of Experimental Botany,2006,57(6):1445-1459.
[24]WANG X L,RAHMAN M A,MOKROŠ M,et al.The influence of vertical canopy structure on the cooling and humidifying urban microclimate during hot summer days[J].Landscape and Urban Planning,2023,238:104841.
[25]CHEN X,ZHAO P,HU Y T,et al.Canopy transpiration and its cooling effect of three urban tree species in a subtropical city-Guangzhou,China[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,43:126368.
[26]王晓娟,孔繁花,尹海伟,等.高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征[J].生态学报,2018,38(12):4234-4244.

(上接第 27 页)

[19]LI J,WANG Y F,NI Z B,et al.An integrated strategy to improve the microclimate regulation of green-blue-grey infrastructures in specific urban forms[J].Journal of Cleaner Production,2020,271:122555.
[20]孙晓丹,李海梅,刘霞,等.不同绿地结构消减大气颗粒物的能力[J].环境化学,2017,36(2):289-295.
[21]汪结明,王良桂,朱柯铖杰,等.不同园林绿地类型内空气 $PM_{2.5}$ 浓度的动态变化及其滞尘效应分析[J].环境工程,2016,34(7):120-124.
[22]康新礼,张文豪,刘原萍,等.基于随机森林的京津冀地区 $PM_{2.5}$ 遥感反演及变化分析[J].遥感技术与应用,2022,37(2):424-435.
[23]黄伟伟,杨勇,陈丰农.杭州校园中不同植被对 $PM_{2.5}$ 的吸附能力[J].环境科学研究,2018,31(7):1233-1240.
[24]赵松婷,李新宇,李延明,等.公园绿地及周边环境 $PM_{2.5}$ 浓度特征及影响因素[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(2):187-192.
[25]陈晓杰,张金亭,张长城,等.基于泰森多边形的南京市 $PM_{2.5}$ 时空特征及其与土地利用的相关性研究[J].水土保持通报,2018,38(1):293-298.
[26]LI C Y,HUANG Y L,GUO H H,et al.The concentrations and removal effects of $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ on a wetland in Beijing[J].Sustainability,2019,11(5):1312.
[27]余娟,高占冬,王德远,等.天缘洞空气负离子时空分布特征及影响因素分析[J].环境化学,2021,40(4):1078-1087.
[28]陈雷,孙冰,谭广文,等.广州城市绿地植物群落空气负离子特征研究[J].西北林学院学报,2015,30(1):227-232.
[29]王薇,余庄,冀凤全.基于空气负离子浓度的城市环境空气清洁度评价[J].生态环境学报,2013,22(2):298-303.
[30]KOLARZ P,FILIPOVIC D.Measurements and correlations between several atmospheric parameters[J].Facta Universitatis-Series:Physics,Chemistry and Technology,2008,6(1):99-104.
[31]潘剑彬,李佳妮,李树华,等.城市绿地植物群落与空气负离子空间分异特征相关关系研究:以北京奥林匹克森林公园为例[J].中国园林,2022,38(6):57-62.
[32]李冠衡,熊健,徐梦林,等.北京公园绿地边缘植物景观降噪能力与视觉效果的综合研究[J].北京林业大学学报,2017,39(3):93-104.
[33]KOPROWSKA K,EDYTA Ł,KRONENBERG J,et al.Subjective perception of noise exposure in relation to urban green space availability[J].Urban Forestry & Urban Greening,2018,31:93-102.