

DOI: 10.20103/j.stxb.202411152798

左晔, 张春娜, 林子斌, 毛旭锋, 刘淑慧, 刘志锋. 西宁市行道树夏季正午遮荫效果多尺度评估. 生态学报, 2025, 45(10): 4728-4742.

Zuo Y, Zhang C N, Lin Z B, Mao X F, Liu S H, Liu Z F. A Multi-scale evaluation study on the shading effects of street trees at noon in summer in Xining City. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4728-4742.

## 西宁市行道树夏季正午遮荫效果多尺度评估

左晔<sup>1,3</sup>, 张春娜<sup>1,3</sup>, 林子斌<sup>1,3</sup>, 毛旭锋<sup>1,3</sup>, 刘淑慧<sup>4</sup>, 刘志锋<sup>2,3,\*</sup>

1 青海师范大学青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008

2 北京师范大学地理科学学部自然资源学院土地资源与区域发展研究中心, 地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室, 北京 100875

3 青海师范大学地理科学学院, 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008

4 青海省国土空间规划研究院, 西宁 810008

**摘要:** 西宁市作为青藏高原最大的城市, 面临着强烈紫外线辐射的影响。评估其行道树的遮荫效果对于完善行道树空间布局 and 降低紫外线辐射对行人的危害具有重要意义。结合无人机遥感和实地测量, 定量评估了西宁市 7 条主路、21 条支路和 47 个样方的人行道上行道树夏季正午的遮荫效果, 并选取了 11 种典型行道树, 分析了不同树种及结构特征对遮荫效果的影响。结果表明: (1) 西宁市行道树遮荫率较低。全市遮荫率均值为 36%, 所有城区行道树遮荫率均值均不超过 50%, 城北区遮荫率均值最低, 仅为 29%; 93% 的道路遮荫率低于 50%, 湟中路遮荫率最低, 仅为 21%。(2) 不同树种的遮荫效果差异明显。青甘杨 (*Populus przewalskii*)、垂枝榆 (*Ulmus pumila cv. Tenue*)、新疆杨 (*Populus alba var. pyramidalis*)、大叶榉树 (*Zelkova schneideriana*) 和美国红栎 (*Fraxinus pennsylvanica*) 具有较好的遮荫效果, 三角枫 (*Acer buergerianum*) 的遮荫效果最差。(3) 缺少行道树是遮荫率低的主要原因, 全市行道树的种植率均值仅为 48%。因此, 在西宁市的城市更新过程中, 需在湟中路等遮荫率极低的路段通过种植青甘杨等遮荫效果较好的树种提升遮荫率。

**关键词:** 高原城市; 行道树; 遮荫效果; 紫外线屏蔽率

## A Multi-scale evaluation study on the shading effects of street trees at noon in summer in Xining City

ZUO Ye<sup>1,3</sup>, ZHANG Chunna<sup>1,3</sup>, LIN Zibin<sup>1,3</sup>, MAO Xufeng<sup>1,3</sup>, LIU Shuhui<sup>4</sup>, LIU Zhifeng<sup>2,3,\*</sup>

1 Key Laboratory of Surface Processes and Ecological Conservation of Qinghai-Tibet Plateau (Ministry of Education); Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes in Qinghai Province, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

2 Center for Land Resources and Regional Development, School of Natural Resources; State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Hazards Risk Governance, Faculty of Geographical Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University; Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining 810008, China

4 Qinghai Provincial Institute of Land and Spatial Planning, Xining 810008, China

**Abstract:** As the largest city on the Qinghai-Tibet Plateau, Xining faces significant environmental challenges due to intense ultraviolet (UV) radiation. Prolonged exposure to high UV levels poses health risks to pedestrians and negatively impacts overall urban livability. Assessing the shading efficiency of street trees is essential for optimizing their spatial distribution and mitigating UV exposure risks. This study integrates drone-based remote sensing and field measurements to quantitatively assess the midday summer shading effects of street trees. The study area covers 7 main roads, 21 branch roads, and 47 sample quadrats in Xining. Additionally, eleven typical street tree species were selected to analyze the influence of tree

**基金项目:** 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0405); 青海省面上 (2023-ZJ-929M)

**收稿日期:** 2024-11-15; **采用日期:** 2025-03-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zhifeng.Liu@bnu.edu.cn

species and structural characteristics on shading performance. The results revealed several key findings: (1) The overall shading rate of street trees in Xining is relatively low, with a citywide average of only 36%. No district achieved an average shading rate exceeding 50%, with Chengbei District exhibiting the lowest rate at 29%. Furthermore, 93% of roads had shading rates below 50%, with Huangzhong Road presenting the lowest value at just 21%. These findings highlight the urgent need to improve street tree coverage to enhance pedestrian comfort and UV protection. (2) Significant differences in shading performance were observed among tree species. *Populus przewalskii*, *Ulmus pumila* cv. *Tenuis*, *Populus alba* var. *pyramidalis*, *Zelkova schneideriana*, *Fraxinus pennsylvanica* exhibited superior shading capabilities, making them ideal candidates for increasing urban canopy cover. In contrast, *Acer buergerianum* demonstrated the poorest shading performance, indicating its limited effectiveness in mitigating UV radiation. These results underscore the importance of selecting tree species with high shading efficiency for urban greening projects. (3) Insufficient planting density of street trees was identified as major factor contributing to the low shading rate. The average planting rate across Xining was found to be only 48%, highlighting a substantial gap in the optimal tree coverage required for effective shading. In areas like Huangzhong Road, where shading rates are critically low, the lack of adequate tree cover exacerbates pedestrian exposure to UV radiation. Given these findings, urban renewal initiatives in Xining should prioritize increasing the planting density of high-shading tree species such as *Populus przewalskii* Maxim and other effective species in critical low-coverage areas. Implementing strategic tree-planting programs along major roads and pedestrian pathways will significantly enhance shading effectiveness, thereby improving urban thermal comfort and public health. Future studies should also explore the impact of tree age, canopy structure, and seasonal variations on shading performance to further refine urban greening strategies in Xining and other high-altitude cities facing similar environmental challenges.

**Key Words:** city on the plateau; street trees; shading effect; ultraviolet shielding rate

西宁市作为青藏高原人口规模最大的城市<sup>[1]</sup>,推动该区域的经济发展和改善民生方面发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。在西部大开发和“一带一路”倡议的推动下,西宁市自 2000 年以来经历了快速的经济社会发展过程<sup>[3]</sup>,城镇常住人口从 112 万人增加到 2023 年的 200 万人,建成区面积从 54km<sup>2</sup>增加到 108km<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。西宁市的快速发展为提升居民福祉提供了重大机遇,但也面临着巨大挑战。在当地特殊地理位置和环境条件影响下,当地居民长期受到强烈紫外线辐射的威胁<sup>[5]</sup>。强烈的紫外线辐射会对皮肤和眼睛造成严重损害<sup>[6]</sup>,导致皮肤癌和白内障等疾病<sup>[7-8]</sup>。因此,在西宁市的发展过程中,需要重点关注紫外线辐射危害的防范。

行道树作为城市绿化基础设施的重要组成部分<sup>[9-11]</sup>,在遮荫和屏蔽紫外线方面发挥着重要的作用<sup>[12-13]</sup>,可以提升行人出行的舒适度并减少健康风险<sup>[14-15]</sup>。但已有研究表明,受自然条件和城市规划等因素的影响,不同城市间以及同一城市内不同区域的行道树遮荫率存在巨大差异<sup>[16-18]</sup>。而且,不同树种的遮荫效果也不尽相同<sup>[19-21]</sup>。对于地处青藏高原、具有独特自然条件和人文背景的西宁市,行道树遮荫程度如何?有何空间分布特征?不同树种的遮荫效果有何差异?准确回答以上问题对于在城市扩张与更新过程中有针对性地提升行道树遮荫率和降低紫外线辐射具有重要意义。

目前,已有研究者对西宁市行道树进行了初步的调查与分析<sup>[22]</sup>。比如,王可等<sup>[23]</sup>分析了西宁市行道树植被群落结构分布及其差异,发现该地区行道树以杨树、柳树以及针叶树为主,树木种类较少,不足南方地区树种的 1/2。耿生莲等<sup>[24]</sup>则分析了西宁市道路绿化的不同情景和类型,评估了主要绿化树种的生长状况,并对行道树的树高、冠幅及疏密度等关键生长指标进行了测量。宋彬等<sup>[25]</sup>进一步研究了西宁市常见的 22 种树木,重点分析了他们的叶片结构及生态适应性。上述研究为深入分析西宁市行道树遮荫效果奠定了重要基础,但还缺乏西宁市行道树遮荫效果空间异质性的多尺度评估研究。

本研究选取西宁市市辖区作为研究区,通过无人机遥感技术量化行道树遮荫率,并结合实地调查评估单株树木遮荫效果,旨在定量评估西宁市不同区域、街道和样方行道树的遮荫率及其空间异质性,以及主要行道

树种的遮荫效果及其与树木形态指标的关系。研究结果可以为进一步提升西宁市行道树遮荫率提供科学依据。

### 1 研究区概况

西宁市位于青藏高原东北部,属高原寒温带半干旱气候,有海拔高、气压低、日照时间长、太阳辐射强等特点<sup>[26]</sup>。全年日照时数平均为 2587.6h,夏季日照时数变化趋势最大,为 16.1h/10m<sup>2</sup><sup>[27]</sup>;年太阳辐射量 5668MJ/m<sup>2</sup>左右<sup>[28]</sup>,辐射强度在 15—30W/m<sup>2</sup><sup>[29]</sup>;平均气温 5.5℃,最高气温 34.6℃,最低气温零下 18.9℃;年平均降水量 500mm 左右,降水的季节和年度分配不均<sup>[30]</sup>。

本研究以西宁市城西区、城东区、城巾区和城北区为研究区,选取人流密集的 7 条主干道路以及每条主干路旁的 3 条支路为道路样地,并且在 4 个区从中心到外围沿城郊梯度选择 47 个研究样方(图 1)。主干道路样地包括城西区的五四大街、海晏路、昆仑大道,位于城东区的八一路,位于城巾区的七一路,位于城北区的宁张路。根据无人机获取的影像范围,每个样方的大小约为 500m×800m。在上述道路和样方中,选取了最为常见的 11 种行道树进行遮荫效果研究。

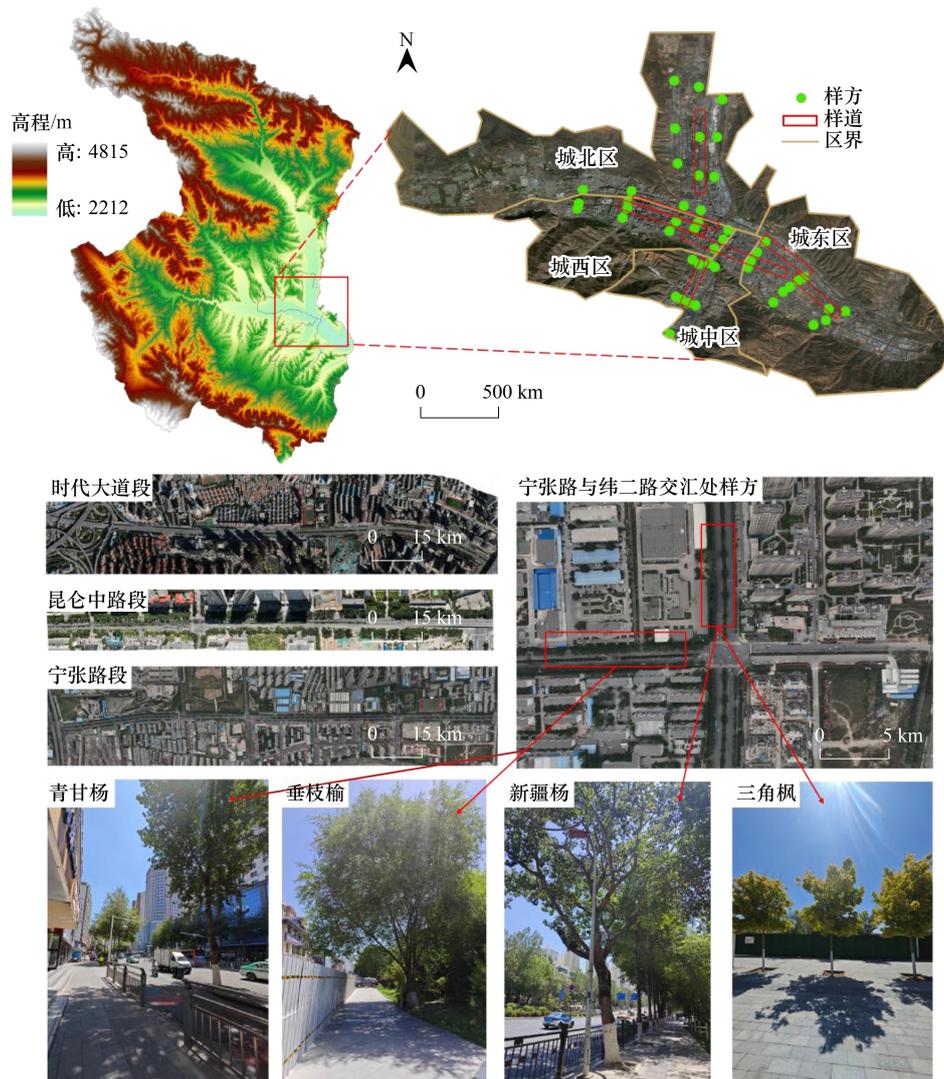


图 1 研究区范围以及样道和样方  
Fig.1 Study area and sample roads and plots

## 2 数据来源和研究方法

### 2.1 数据来源

本研究采用的数据来源于无人机遥感影像和实地观测数据。数据采集数据时间为 2023 年 7 月 15 日至 2024 年 8 月 15 日,选择晴朗或少云的天气,采集时间段为 11:00 至 15:00,以最大限度减少天气因素对实验结果的影响。

首先,使用配备高精度定位模块和高清摄像头的无人机(型号:DJI Mavic 3 Pro)对采样街道和样方进行拍摄,为计算遮荫率计算提供基础数据(图 2)。在保持光源稳定且无风的情况下,设置固定的飞行高度、航线、航向和重叠率,连续拍摄图像并实时记录数据采集时间和位置信息。

其次,选择 11 种当地常见的行道树进行观测,分别为青甘杨、新疆杨、美国红栎、大叶榉树、裂叶榆、垂枝榆、旱柳、垂柳、龙爪魁、三角枫和雪松。针对每种树木,在采样的街道和样方中随机选择 5 株,共计 55 株进行测量。测量内容包括树高、胸径、枝下高和冠幅以及环境因子(光照强度、紫外线强和空气温度)(图 2)。树高使用激光测距仪测量,胸径在离地面 1.5m 处用树径尺测量,枝下高和冠幅则利用米尺分别测量(枝下高是地面到树冠第一个活枝的高度,冠幅为东西、南北方向测量值)。光照强度通过照度计(TES Electrical)测量,紫外线强度使用紫外辐照计(型号:UV340B)测定。空气温度则通过手持式温度计记录。每次测量持续 3min,测量 3 组数据并取平均值,以减少误差。所有测量均在行道树树荫下进行(统一放置在被测树木的北侧),仪器高度保持在离地面 1.5m 处。同时,设置阳光下环境为对照组,在每株树木树荫外 2m 处选择未被树冠层和建筑物遮挡处设置对照点进行测量(图 2)。

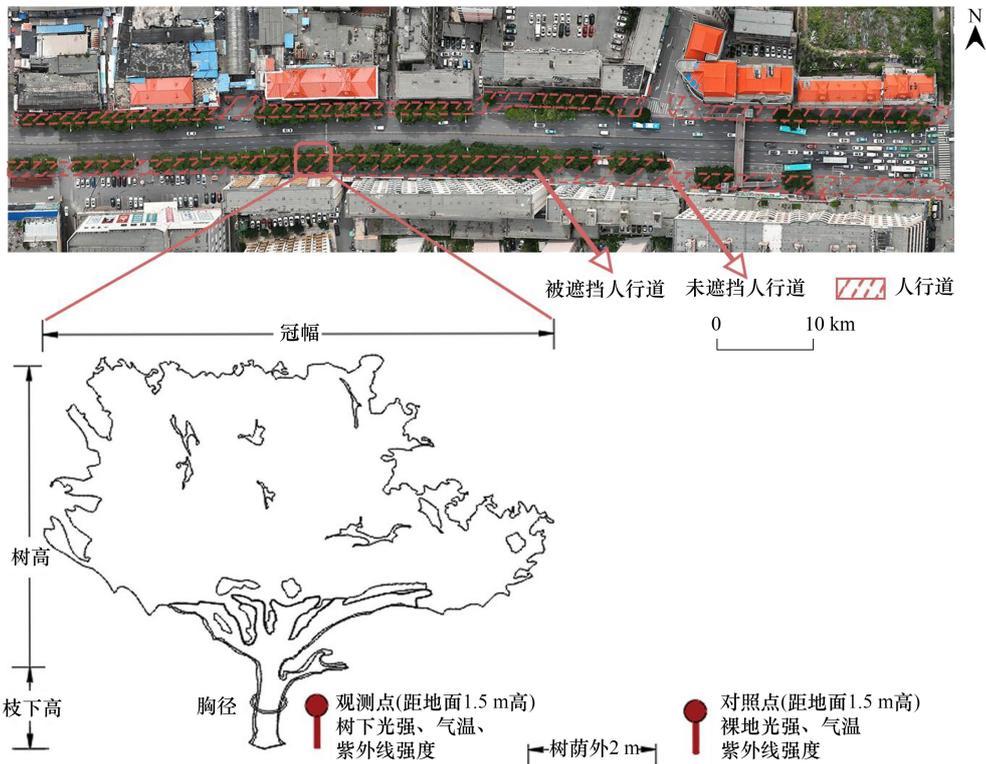


图 2 无人机遥感影像图以及行道树观测示意图

Fig.2 Unmanned aerial vehicle remote sensing imagery and schematic diagram of street tree observation

### 2.2 研究方法

首先,预处理无人机采集的影像数据,并对影像中的行道树、人行道进行分类,以计算人行道的遮荫率。

数据预处理包括剔除异常和重复图像,完成图像校正与拼接,获得完整的街道和样方影像。使用 Ecognition 软件对处理后的影像进行分类,利用面向对象的分类方法对树冠、道路和建筑物进行识别。分类结果经目视校正后,提取出行道树和人行道信息。分类完成后,随机选择 12 个样方进行实地考察,并结合目视判读对结果进行精度评价。最终,分类的总体精度为 97.12%, Kappa 系数为 0.86, 用户精度为 94.70%, 生产者精度为 91.40%。计算遮荫率的指标包括整条主路的平均遮荫率(即人行道被行道树冠遮挡的比例,见图 2)、分段遮荫率、支路平均遮荫率、各样方遮荫率。遮荫率计算公式如下:

$$SR = \left( \frac{PA - USA}{PA} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $SR$  为遮荫率,  $PA$  为人行道面积,  $USA$  为未被行道树遮挡的人行道面积。

其次,整理并归类不同树种的遮荫指标数据,包括遮光率、紫外线屏蔽率、遮荫面积、降温率。由于试验在正午进行,太阳高度角的影响较小,因此视为垂直投影,遮荫面积统一按冠幅的正投影面积计算<sup>[31]</sup>。遮光率(Light Blockage Rate,  $LBR$ )、紫外线屏蔽率(Ultraviolet Shielding Rate,  $USR$ )、遮荫面积(Shade Area,  $SA$ )、降温率(Cooling Rate,  $CR$ )计算公式如下:

$$LBR = \left( \frac{I - I_s}{I} \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$USR = \left( \frac{UVB - UVB_s}{UVB} \right) \times 100\% \quad (3)$$

$$SA = \pi \left( \frac{W_N + W_E}{4} \right)^2 \times 100\% \quad (4)$$

$$CR = \left( \frac{T - T_s}{T} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $I$  为全光下的照度,  $I_s$  为树荫中心的照度;  $UVB$  为全光下的紫外线强度,  $UVB_s$  为树荫中心的紫外线强度;  $W_N$  和  $W_E$  分别为南北和东西方向的冠幅;  $T$  为全光下的温度,  $T_s$  为树荫中心的温度。

最后,利用一元线性回归分析和多元线性回归分析,量化行道树的树高、胸径、枝下高、冠幅等基础指标参数和遮光率、紫外线屏蔽率、遮荫面积、降温率等遮荫功能指标之间的关系。利用散点图对上述分析结果进行可视化,直观展示行道树的树体结构特征与遮荫功能之间的复杂关系,并筛选出在遮荫功能方面表现较好的树种。

### 3 结果

#### 3.1 城区尺度的行道树遮荫率

西宁市行道树遮荫率总体较低,且城区间行道树的遮荫率存在明显差异。全市 47 个样方的遮荫率均值为 36.00%, 各城区的遮荫率均值介于 29.14%—46.40% 之间(图 3)。城东区的遮荫率最高,达到 46.40%; 城中区、城西区、城北区和城北区的遮荫率较低,分别为 36.75%、31.64% 和 29.14%。样方间遮荫率差异更为明显,遮荫率最高可达 80% 以上,最低不足 10%, 79% 的样方遮荫率低于 50%。空间分布呈现明显的中心集聚效应,即城市中心区域遮荫率较高,从中心到外围,遮荫率逐渐降低(图 4)。

在城北区,宁张路以西,遮荫率平均超过 40%, 而宁张路以东至北川河区域,遮荫率则低于 10%。该区

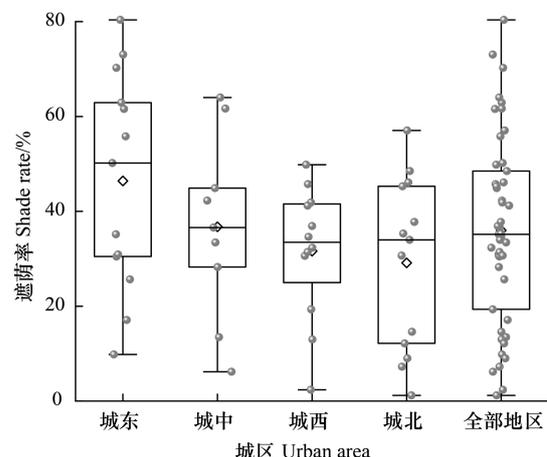


图 3 城区及各区域遮荫率

Fig.3 Urban and regional shading rate

灰色圆点代表样方,白色菱形代表每个城区平均遮荫率

域遮荫率的极值差异尤为突出,最高点(57.04%)与最低点(1.19%)之间的差异达到 67.88 倍(图 4)。在城西区,沿五四大街从中心广场至海湖新区,遮荫率呈现梯度递减趋势。最高遮荫率(49.82%)是最低遮荫率(2.38%)的 20.93 倍(图 4)。在城中区,时代大道以东至南川河的遮荫率显著高于西部。该区域遮荫率极值差异较大,最高点(64.00%)是最低点(6.18%)的 10.36 倍(图 4)。在城东区,昆仑中路以东、八一路以西的区域,围绕王府井生活广场为中心,遮荫率呈现递减趋势。该区域遮荫率的最高点(80.37%)是最低点(9.83%)的 8.18 倍(图 4)。

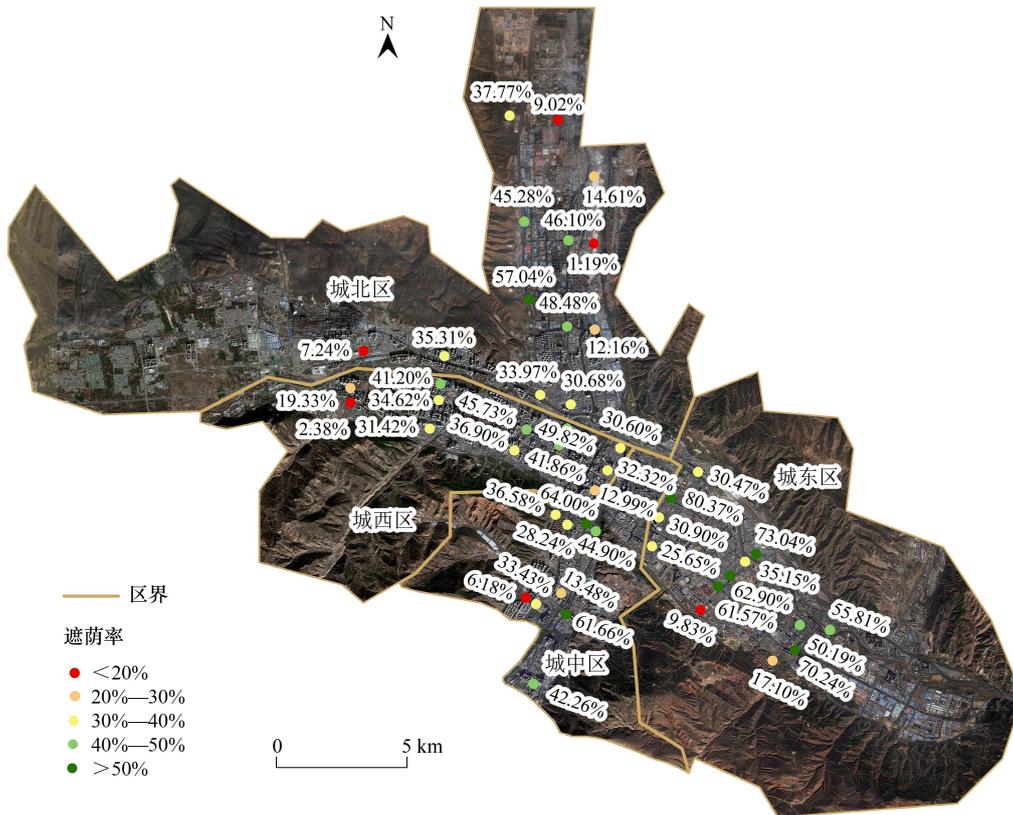


图 4 各样方遮荫率

Fig.4 Shading rate of sample plots

### 3.2 街道尺度的行道树遮荫率

28 条道路的遮荫率在 20.52%—55.88% 之间,均值为 38.17%,其中 92.90% 的道路遮荫率低于 50% (图 5)。7 条主路平均遮荫率介于 32.59%—48.29% 之间,各主路分段遮荫率在 19.42%—55.06% 之间(图 6)。其中,五四大街平均遮荫率最高,为 48.29%;昆仑大道和海晏路平均遮荫率较高,分别为 44.59%、40.62%;时代大道、宁张路和八一路遮荫率较低,分别为 37.75%、35.33% 和 33.90%;七一路平均遮荫率最低,仅为 32.59%。五四大街平均遮荫率是七一路的 1.48 倍(图 6)。主路各分段遮荫率的差异性较为明显。例如,时代大道的郁金香大街—无名路为 48.40%,而砖厂路—福禄巷仅为 19.40%,两者差距达 29%。此外,昆仑大道、五四大街、七一路分段遮荫率差异较大,分别为 24.19%、16.13%、13.34%;而海晏路、八一路分段遮荫率差异较小,分别为 10.77%、6.58%;宁张路的分段差异最小,小乔大街段与天津路—纬二路段的遮荫率仅差 0.50%(图 6)。

21 条支路的遮荫率分布较为分散,其中乐都路、海山路的遮荫率超过 50%;新宁路、冷湖路、景程路、纬二路、德令哈路、金汇路、花园北街、五一路的遮荫率介于 40%—50%;海湖路、通海路、知行路、文成路、福禄巷、刘家沟路、建国大街的遮荫率介于 30%—40%;桃李路、文博路、郁金香大街、湟中路的遮荫率最低,仅为

20%—30%。其中,乐都路的遮荫率(55.88%)是湟中路的(20.52%)2.72 倍(图 6)。

主路与支路的遮荫率也存在明显差异。宁张路、七一路、八一路主路遮荫率低于支路遮荫率,而五四大街、昆仑大道、海晏路、时代大道主路遮荫率高于支路遮荫率。五四大街的主路遮荫率与支路遮荫率差距最大,为 10.87%;七一路、海晏路、八一路、昆仑大道、宁张路的主路遮荫率与支路遮荫率差距相对较小,分别为 8.65%、8.55%、4.87%、4.39%、4.09%;时代大道主路与支路遮荫率遮荫差距最小,仅为 1.64%(图 6)。

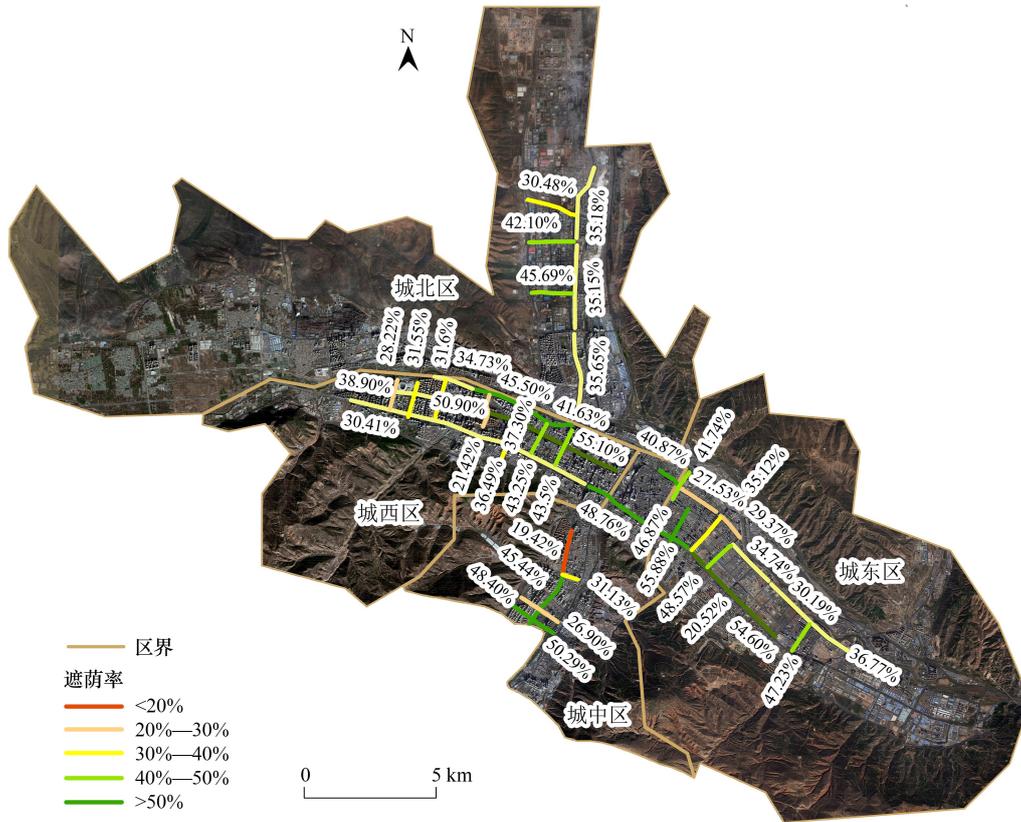


图 5 各样道遮荫率  
Fig.5 Shading rate of sample roads

### 3.3 不同树种的遮荫、紫外线屏蔽效果

青甘杨、垂枝榆、新疆杨、大叶榉树和美国红栎遮荫效果较好,三角枫的遮荫效果最差(图 7)。具体而言,青甘杨、大叶榉树的遮光率大于 60%;美国红栎、垂枝榆、裂叶榆、新疆杨、雪松、旱柳、垂柳、龙爪魁、三角枫的遮光率处于 40%—60%之间。其中,青甘杨的遮光率(61.46%)比三角枫的遮光率(41.16%)高 1.49 倍(图 7)。在紫外线屏蔽方面,垂枝榆、美国红栎、青甘杨、大叶榉树、新疆杨、裂叶榆、垂柳的紫外线屏蔽率均超过 80%,龙爪魁、雪松、旱柳、三角枫的紫外线屏蔽率处于 60%—70%之间。其中,垂枝榆的紫外线屏蔽率(88.53%)比三角枫(63.22%)高 1.40 倍(图 7)。遮荫面积分析显示,新疆杨、垂柳、旱柳、垂枝榆、青甘杨的遮荫面积超过 40%;裂叶榆、美国红栎、龙爪魁、大叶榉树的遮荫面积处于 20%—40%之间;雪松、三角枫遮荫面积低于 20%。其中,新疆杨的遮荫面积(54.51m<sup>2</sup>)远高于三角枫(10.28m<sup>2</sup>),相差 5.30 倍(图 7)。在降温效果方面,垂枝榆、青甘杨、大叶榉树、美国红栎、龙爪魁、新疆杨的降温率均超过 10%;旱柳、垂柳、裂叶榆、三角枫、雪松的降温率处于 5%—10%之间。垂枝榆的降温率(12.79%)明显高于雪松(6.66%),相差 1.92 倍(图 7)。

树体结构特征与遮荫面积和紫外线屏蔽率的相关性尤为显著,而与降温率和遮光率的相关性则相对较弱(表 1)。具体而言,遮荫面积( $Y_3$ )的多元回归模型解释度( $R^2$ )达到了 0.98( $P<0.01$ ),冠幅( $X_4$ )对遮荫面积的解释度最高,为 0.98( $P<0.01$ );树高( $X_1$ )对遮荫面积呈正向影响, $R^2$  为 0.22( $P<0.05$ )(表 1)。紫外线屏蔽

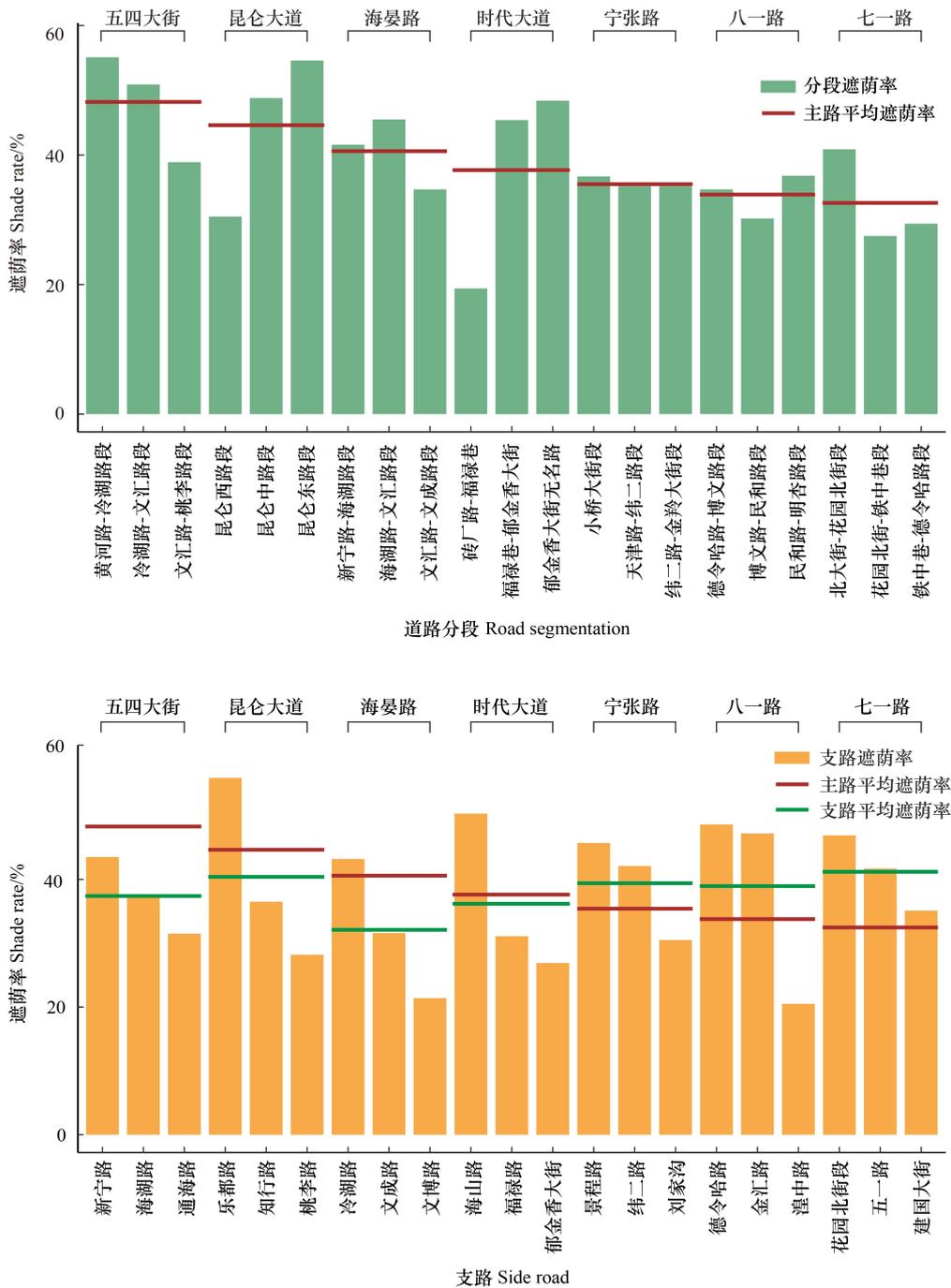


图 6 主路与分段遮荫率以及支路遮荫率

Fig.6 Shading rate of the main roads and their segments, as well as the branch roads

率( $Y_2$ )的多元回归模型解释度为 0.65( $P<0.01$ ),冠幅( $X_4$ )、树高( $X_1$ )和枝下高( $X_2$ )均对紫外线屏蔽率均有显著正向影响, $R^2$ 分别为 0.44( $P<0.01$ )、0.43( $P<0.01$ )和 0.36( $P<0.01$ )(表 1)。遮光率( $Y_1$ )的多元回归模型解释度为 0.36( $P<0.01$ ),显示树体结构特征与遮光率之间存在中等程度的相关性。在此模型中,树高( $X_1$ )、冠幅( $X_4$ )和枝下高( $X_2$ )与遮光率呈显著正相关, $R^2$ 分别为 0.22( $P<0.05$ )、0.19( $P<0.05$ )和 0.16( $P<0.05$ )(表 1)。降温率( $Y_4$ )的多元回归模型解释度为 0.25( $P<0.01$ ),表明树体结构特征与降温率之间存在较低程度的关联。在该模型中,枝下高( $X_2$ )、冠幅( $X_4$ )和树高( $X_1$ )对降温率均有正向影响, $R^2$ 分别为 0.21( $P<$

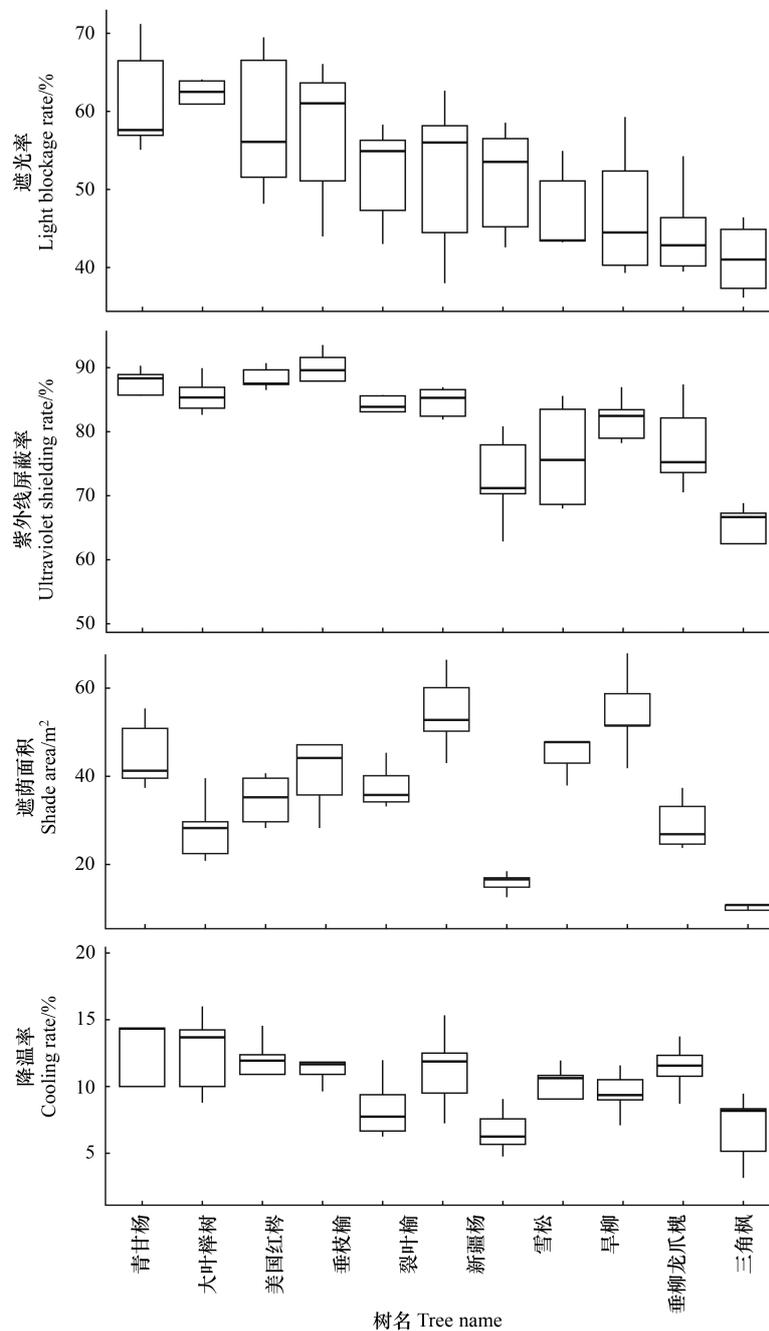


图7 不同树种的遮光率、紫外线屏蔽率、遮荫面积、降温率

Fig.7 The light blocking rate, ultraviolet shielding rate, shading area, and cooling rate of different tree species

图中红色标注文字为平均值

0.01)、0.17( $P < 0.05$ )和0.10( $P < 0.01$ )(表1)。

通过散点图可视化分析表明,青甘杨、垂枝榆、新疆杨、大叶榉树和美国红栎遮荫效果较好(图8)。例如:新疆杨、垂柳、旱柳、青甘杨、垂枝榆树种的树冠较大,遮荫面积也相应较大;新疆杨、青甘杨、垂枝榆、美国红栎的树木高大且胸径较粗,遮荫面积也较大(图8)。新疆杨、青甘杨、垂枝榆、大叶榉树的树木高大,树冠和枝下高度较大,且紫外线屏蔽率较高(图8)。青甘杨、垂枝榆的树木较高、树冠和枝下高度较大,且遮光率较高(图8)。青甘杨、垂枝榆、新疆杨具有较大的冠幅和枝下高度,且降温率较高(图8)。

表 1 树体结构特征与遮荫效果的回归方程

Table 1 The regression equation of tree structure indicators and shading effects

遮荫功能指标 Shade function index	回归方程 Regression equation	$R^2$	显著性 Significance
遮光率( $Y_1$ ) Light blockage rate	$Y_1 = 39.33 + 0.98X_1$	0.22	*
	$Y_1 = 39.71 + 1.57X_2$	0.16	*
	$Y_1 = 49.30 + 0.03X_3$	0.01	
	$Y_1 = 39.03 + 0.82X_4$	0.19	*
	$Y_1 = 34.83 + 0.71X_1 + 0.21X_2 - 0.14X_3 + 1.07X_4$	0.36	**
紫外线屏蔽率( $Y_2$ ) Ultraviolet shielding rate	$Y_2 = 63.90 + 1.30X_1$	0.43	*
	$Y_2 = 62.98 + 6.63X_2$	0.36	*
	$Y_2 = 74.69 + 0.06X_3$	0.06	
	$Y_2 = 56.32 + 1.18X_4$	0.44	*
	$Y_2 = 55.43 + 0.66X_1 + 1.33X_2 - 0.14X_3 + 1.36X_4$	0.65	**
遮荫面积( $Y_3$ ) Shade area	$Y_3 = 1.11 + 2.72X_1$	0.59	*
	$Y_3 = 3.70 + 2.11X_2$	0.38	*
	$Y_3 = 0.32 + 0.34X_3$	0.62	*
	$Y_3 = -29.18 + 3.16X_4$	0.98	**
	$Y_3 = -28.91 - 0.13X_1 - 0.35X_2 + 0.32X_3 + 3.10X_4$	0.98	**
降温率( $Y_4$ ) Cooling rate	$Y_4 = 6.84 + 2.87X_1$	0.10	*
	$Y_4 = 4.54 + 2.13X_2$	0.21	*
	$Y_4 = 7.91 + 0.02X_3$	0.05	
	$Y_4 = -3.91 + 0.31X_4$	0.17	*
	$Y_4 = 2.70 - 0.12X_1 + 1.63X_2 - 0.01X_3 + 0.30X_4$	0.25	**

\*  $P \leq 0.01$  水平上极显著差异; \*  $P \leq 0.05$  水平上显著差异;  $X_1$ : 树高 Tree height;  $X_2$ : 枝下高 Height to crown base;  $X_3$ : 胸径 Diameter at breast height;  $X_4$ : 冠幅 Crown width

## 4 讨论

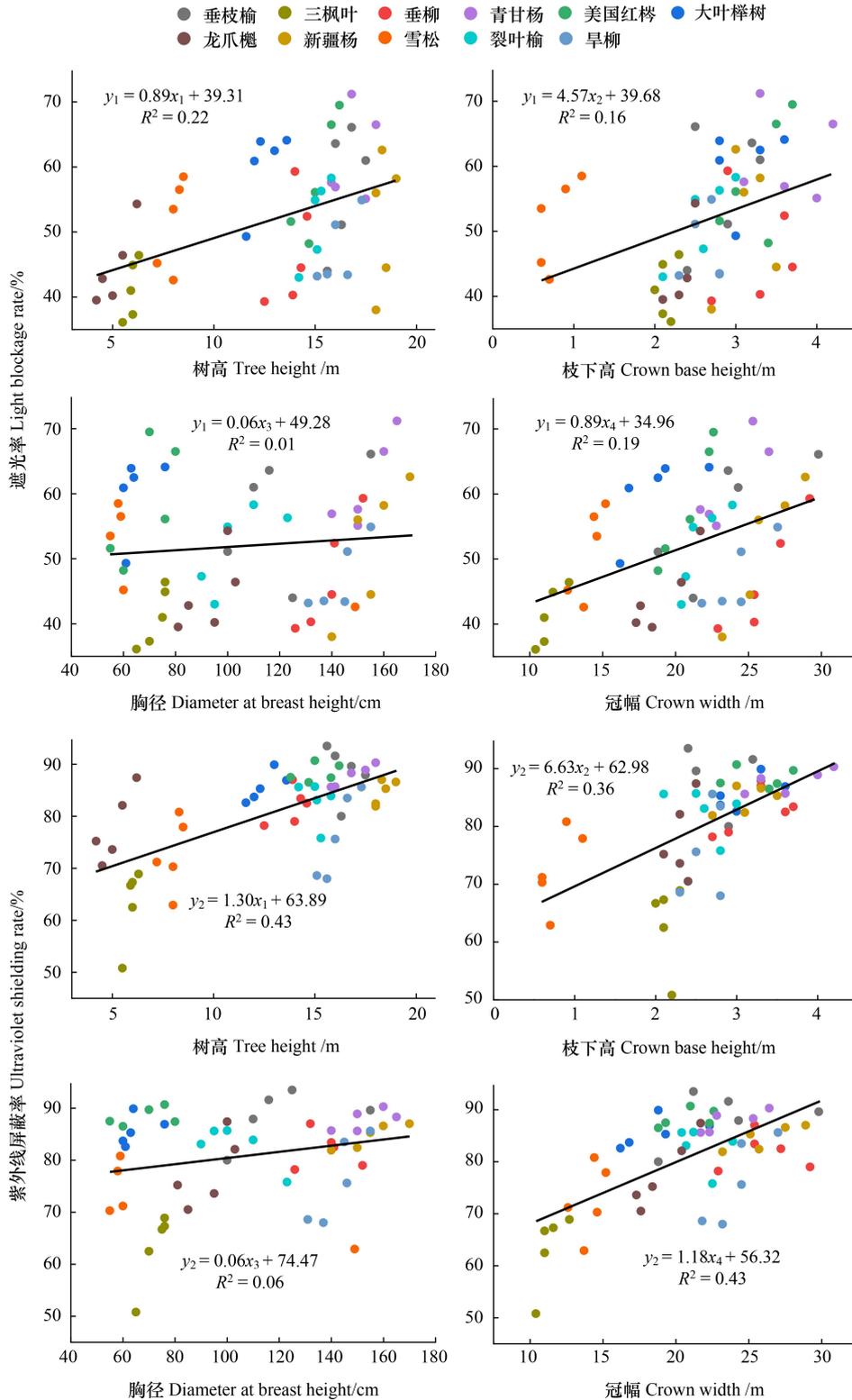
### 4.1 西宁市行道树遮荫率低的主要原因与优化策略

与国内外城市相比,西宁市的行道树遮荫率明显偏低。已有研究表明,西班牙巴塞罗那市、荷兰乌特勒支市和以色列特拉维夫市的遮荫率分别为 65.00%<sup>[32]</sup>、54.00%<sup>[33]</sup>和 44.10%<sup>[34]</sup>;我国柳州市、哈尔滨市的遮荫率分别为 64.70%<sup>[35]</sup>和 56.30%<sup>[36]</sup>,均高于西宁市遮荫率的平均水平(36.00%)(图 9)。

行道树遮荫率受行道树种植率以及行道树遮荫效果两方面的影响<sup>[37-38]</sup>。其中,行道树种植率是指人行道上种植行道树的路段占比<sup>[39]</sup>;行道树遮荫效果则主要是指已栽种行道树的路段遮荫面积占该路段总面积的比例<sup>[40]</sup>。我们发现,西宁市人行道遮荫率低的主要原因是行道树种植率低。全市人行道上行道树的种植率平均值为 47.72%(图 10)。在遮荫率最低的城北区,行道树的种植率平均值仅为 32.60%(图 10)。行道树种植率不足 50%的道路占 66.67%(图 11)。例如,刘家沟路、纬二路、小乔大街段和纬二路—金陵大街段行道树种植率分别为 44.78%、31.47%、30.10%和 27.47%(图 11)。此外,在部分地区还面临着行道树遮荫效果较差的问题。例如城东区的七一路和八一路部分路段的行道树种植率虽超过全市平均值(47.72%),但遮荫率却仅为全市平均遮荫率的 50%(图 11)。

在西宁市发展过程中,需要因地制宜、多措并举以提升行道树遮荫率。《西宁市国土空间规划(2021—2035)》要求通过改善道路两侧的景观、完善城市绿道建设以提升绿道品质,提高其功能复合度和游赏价值<sup>[41]</sup>。在受强烈紫外线辐射影响的西宁市,提升人行道遮荫率是提高其功能性和休憩价值的基本前提<sup>[42-43]</sup>。为此,首先需要大规模提升行道树的种植率<sup>[44]</sup>。根据现有行道树的遮荫效果估算,将所有样方的行道树种植率提升 10%,即可将遮荫率的平均水平提升 11%。当行道树种植率平均值增至 74.39%时,遮荫率

平均水平约为 60%，西宁市可以达到国内外城市中较高遮荫率水平。其次，在提升行道树种植率的过程中，需要选择遮荫效果较好的树种。例如，新疆杨的单株遮荫面积平均值是三角枫的 5.30 倍，平均每个样方仅需种植 25 棵新疆杨即可将遮荫率提升至 60%，但需要种植 131 棵三角枫才能达到相同的遮荫率。此外，在城市更新过程中，可以将三角枫等遮荫效果较差的树种替换为新疆杨等遮荫效果较好的树种以进一步提升人行道遮荫率。



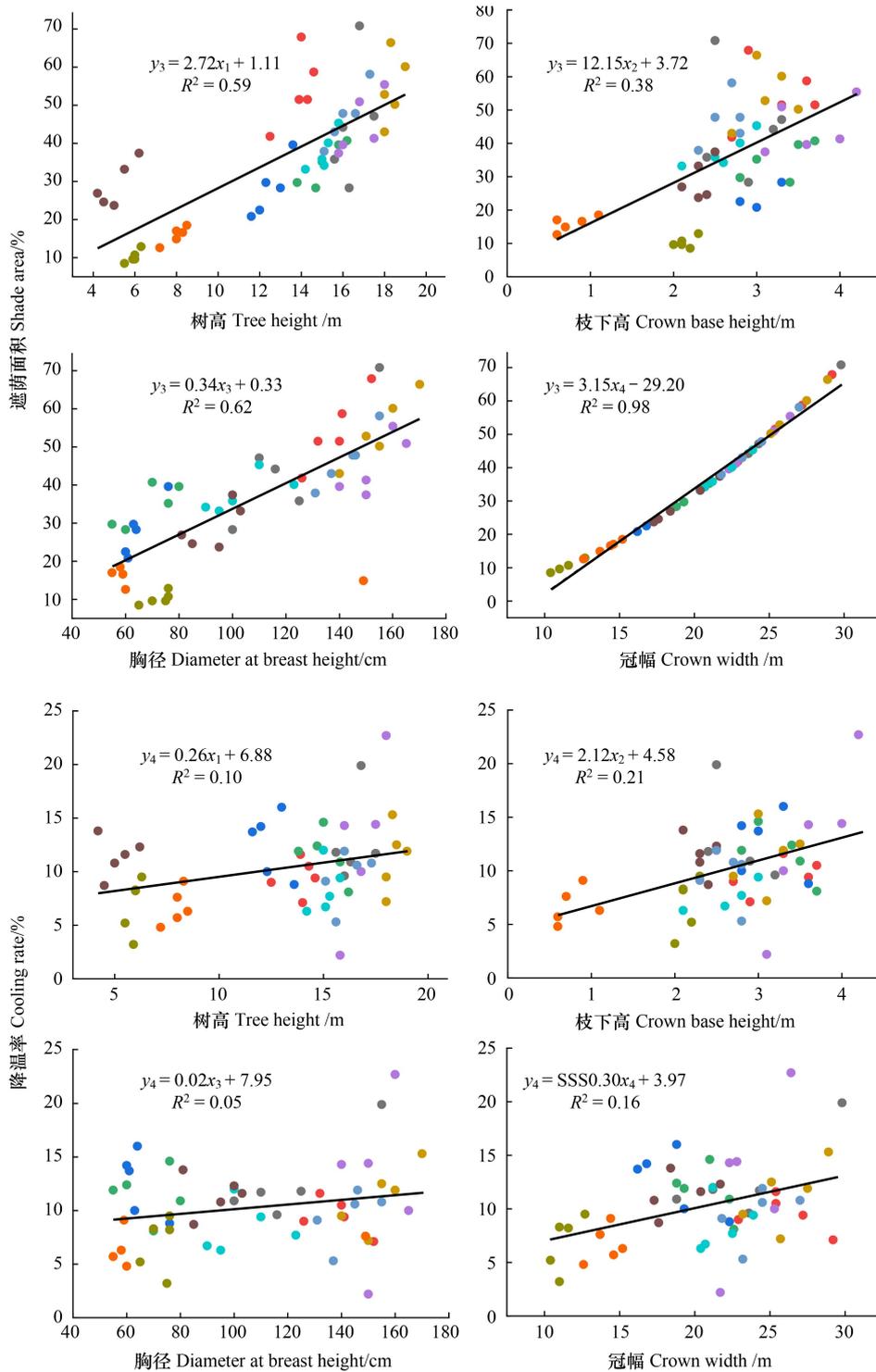


图 8 树木结构指标与遮荫效果的关系

Fig.8 Relationships between tree structure indicators and shading effects

### 4.2 不足和展望

本文主要依靠无人机遥感数据量化行道树的遮荫率,无人机遥感在空间分辨率上具有优势,但尚未能够覆盖西宁市的全部区域。未来研究可通过结合更大范围的高分辨率遥感数据和人本尺度的街景数据,全面量化西宁市全域的行道树的遮荫效果。此外,本研究在正午开展调查,未考虑不同时段、季节以及天气条件对遮

荫效果的影响。未来研究可结合三维建模,通过不同时间段的遥感调查,分析不同时段、季节以及天气变化对遮荫效果的动态影响<sup>[45-46]</sup>。基于本研究的成果,进一步拓展青藏高原其他城市行道树遮荫效果的研究,将有助于深化对高原城市绿化生态效益的认识,并为该区域城市绿化提供理论支持和实践指导。

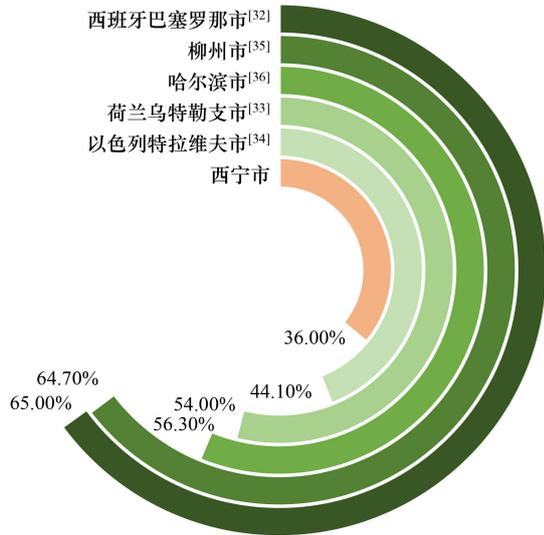


图9 不同城市行道树遮荫率

Fig.9 Shading rates of street trees in different cities

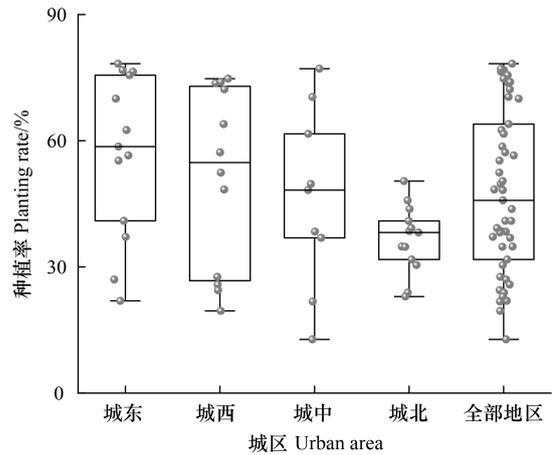


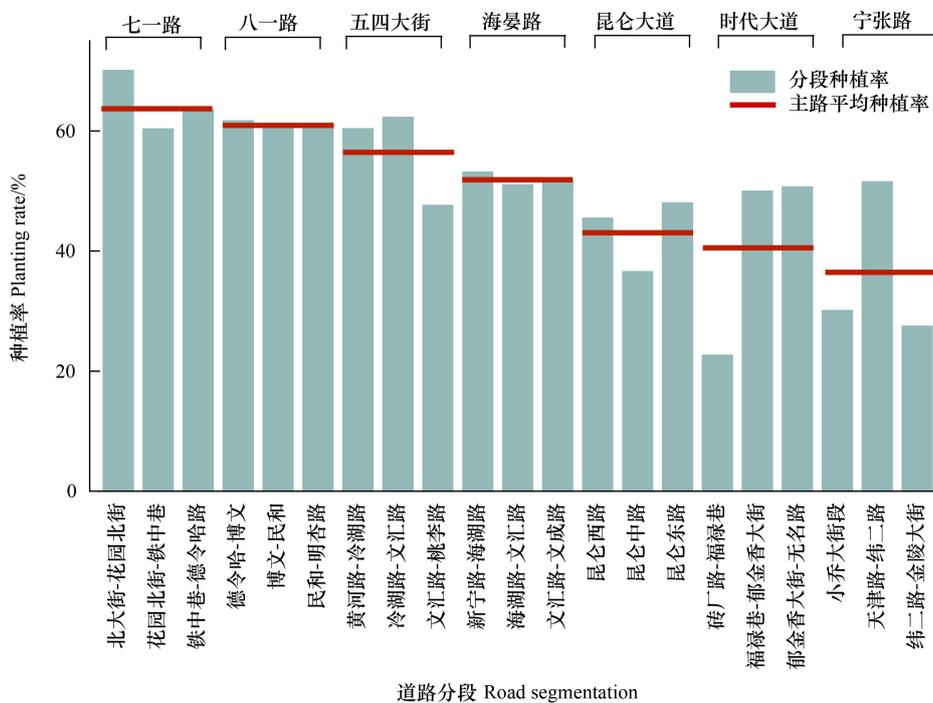
图10 西宁市各城区种植率

Fig.10 Planting rate of different districts in the Xining city

灰色圆点代表样方,白色菱形代表每个城区平均遮荫率

### 5 结论

本研究结合无人机遥感与实地调查,定量评估了西宁市行道树遮荫效果的空间异质性及不同树种遮荫效果差异,探究了西宁市行道树遮荫率的主要影响因素和提升途径。研究表明,西宁市行道树的遮荫率偏低,平均值为 36.00%,遮荫率存在明显的空间差异,城北区的遮荫率明显低于其他城区,仅为 29.14%;92.90%



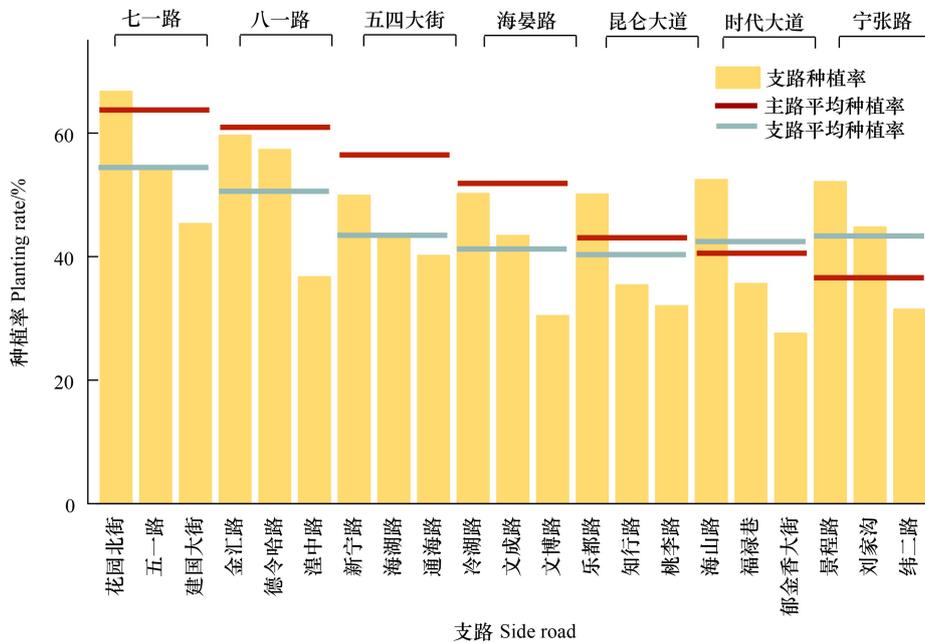


图 11 主路与分段行道树种植率以及支路种植率

Fig.11 Planting rate of street tree in the main roads and their segments, as well as the branch roads

的道路遮荫率低于 50%。11 种行道树遮荫效果差异较大,其中青甘杨、垂枝榆、新疆杨、大叶榉树和美国红栎遮荫效果较好,三角枫的遮荫效果最差。西宁市行道树遮荫率明显低于国内外城市的平均水平,该市行道树种植率低是导致遮荫率不足的主要原因,未来需要在湟中路等种植率较低的街道栽种新疆杨等遮荫效果较好的树种提升行道树遮荫率。本研究为改善西宁市行道树遮荫率和降低紫外线对当地居民的威胁提供了科学依据。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 青海省第七次全国人口普查公报 [ 1 ] ( 第二号 ). [ 2024-10-10 ]. [http://tjj.qinghai.gov.cn/tjData/surveyBulletin/202107/t20210701\\_73826.html](http://tjj.qinghai.gov.cn/tjData/surveyBulletin/202107/t20210701_73826.html).
- [ 2 ] 刘振, 刘盛和, 戚伟, 金浩然. 青藏高原流动人口居留意愿及影响因素. 地理学报, 2021, 76(9): 2142-2156.
- [ 3 ] 田明, 田一聪, 曾丹. 青藏高原县域城镇化多维协调时空演变及其机制. 地理学报, 2024, 79(8): 1940-1960.
- [ 4 ] 统计年鉴\_西宁市统计局. [ 2025-02-08 ]. <https://tjj.xining.gov.cn/zwgk/fdzdgnr/tjxx/gnj/index.html>.
- [ 5 ] 林峰, 信忠保, 彭钟彝. 青藏高原人居环境: 评估指标、评估框架及其时空变化. 生态学报, 2024, 44(20): 9011-9028.
- [ 6 ] Ebi K L, Capon A, Berry P, Broderick C de Dear R, Havenith G, Honda Y, Kovats R S, Ma W, Malik A, Morris N B, Nybo L, Seneviratne S I, Vanos J, Jay O. Hot weather and heat extremes: health risks. The Lancet, 2021, 398(10301): 698-708.
- [ 7 ] Li X, Yoshimura Y, Tu W, Ratti, C. A pedestrian level strategy to minimize outdoor sunlight exposure in hot summer. arXiv preprint arXiv:1910.04312.2019.
- [ 8 ] Zölch T, Rahman M A, Pfeleiderer E, Pauleit, S. Designing public squares with green infrastructure to optimize human thermal comfort. Building and environment, 2019, 149: 640-654.
- [ 9 ] Ettinger A K, Bratman G N, Carey M, Hebert R, Hill O, Kett H, Levin P, Murphy-Williams M, Wyse L. Street trees provide an opportunity to mitigate urban heat and reduce risk of high heat exposure. Scientific Reports, 2024, 14(1): 3266.
- [ 10 ] Richards D R, Edwards P J. Quantifying street tree regulating ecosystem services using Google Street View. Ecological indicators, 2017, 77: 31-40.
- [ 11 ] 梁陈涛, 杨艳波, 田盼立, 肖路, 王慧梅, 王文杰. 基于街景测量的南昌市行道树结构特征与健康状况研究. 生态学报, 2022, 42(2): 549-560.
- [ 12 ] Downs N J, Amar A, Dearnaley J, Butler H, Dekeyser S, Igoe D, Parisi A V, Raj N, Deo R, Turner J. The mitigating effect of street trees, urban flora, and the suburban environment on seasonal peak UV indices: A case study from Brisbane, Australia. Photochemistry and Photobiology, 2025, 101(1): 251-266.
- [ 13 ] Li Q, Li Q, Lu X, Liu Y. Numerical simulation of the effect of street trees on outdoor mean radiant temperature through decomposing pedestrian experienced thermal radiation: A case study in Guangzhou, China. Urban Forestry & Urban Greening, 2024, 91: 128189

- [14] Lachapelle J A, Scott Krayenhoff E, Middel A, Coseo P, Warland J. Maximizing the pedestrian radiative cooling benefit per street tree. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 230: 104608.
- [15] Zhang J, Gou Z. Tree crowns and their associated summertime microclimatic adjustment and thermal comfort improvement in urban parks in a subtropical city of China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 59: 126912.
- [16] Teshnehdel S, Akbari H, Di Giuseppe E, Brown R D. Effect of tree cover and tree species on microclimate and pedestrian comfort in a residential district in Iran. *Building and Environment*, 2020, 178: 106899.
- [17] Li X, Ratti C. Mapping the spatial distribution of shade provision of street trees in Boston using Google Street View panoramas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 31: 109-119.
- [18] Tamaskani Esehankalateh A, Ngarambe J, Yun G Y. Influence of tree canopy coverage and leaf area density on urban heat island mitigation. *Sustainability*, 2021, 13(13) 7496
- [19] Liu H, Lim J Y, Wint Hnin Thet B, Lai P Y, Koh W S. Evaluating the impact of tree morphologies and planting densities on outdoor thermal comfort in tropical residential precincts in Singapore. *Building and Environment*, 2022, 221: 109268.
- [20] Sabrin S, Karimi M, Nazari R, Pratt, J., & Bryk, J. Effects of different urban-vegetation morphology on the canopy-level thermal comfort and the cooling benefits of shade trees: Case-study in Philadelphia. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 66102684.
- [21] Morakinyo T E, Lau K KL, Ren C, Ng, E. Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. *Building and Environment*, 2018, 137: 157-170
- [22] Song M, Zhou C, Ouyang H. Distributions of dominant tree species on the Tibetan Plateau under current and future climate scenarios. *Mountain Research and Development*. 2004, 24(2): 166-173
- [23] 王可, 肖路, 田盼立, 张喜亭, 王洪元, 王文杰. 中国 35 个城市行道树种组成特征研究. *植物研究*, 2020, 40(4): 568-574.
- [24] 耿生莲, 王志涛. 西宁市道路绿地及乔木树种的降噪效应. *西北林学院学报*, 2013, 28(6): 182-187.
- [25] 宋彬, 张义, 王得祥, 刘红茹, 徐勇. 西宁市 22 种城市森林植物叶片解剖结构的抗旱性分析. *西北林学院学报*, 2015, 30(5): 68-74.
- [26] Liu J, Liu J, Linderholm H W, Chen D, Yu Q, Wu D, Haginoya S. Observation and calculation of the solar radiation on the Tibetan Plateau. *Energy Conversion and Management*, 2012, 57: 23-32.
- [27] 李宝华, 达海钰, 周丹, 雷春苗, 马守存, 郑玲. 基于 GIS 的西宁地区 1970—2019 年日照时空变化规律. *青海环境*, 2022, 32(1): 21-25.
- [28] 张少婷, 肖国杰, 范广洲, 李谢辉, 刘琰琰. 青海省日照时数的时空变化特征分析. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(1): 121-126.
- [29] 余志康, 孙根年, 冯庆, 罗正文. 青藏高原旅游气候舒适性与气候风险的时空动态分析. *资源科学*, 2014, 36(11): 2327-2336.
- [30] 马红璐, 祁栋林, 赵彤, 曹晓云, 赵全宇, 张睿. 西宁市夏季居民区空气负离子浓度变化特征及其影响因子分析. *干旱区地理*, 2024, 47(8): 1358-1366.
- [31] 唐丽清, 邱尔发, 韩玉丽, 王荣芬. 不同径级国槐行道树重金属富集效能比较. *生态学报*, 2015, 35(16): 5353-5363.
- [32] Segura R, Krayenhoff E S, Martilli A, Badia A, Estruch C, Ventura S, Villalba G. How do street trees affect urban temperatures and radiation exchange? Observations and numerical evaluation in a highly compact city. *Urban Climate*, 2022, 46: 101288.
- [33] Klemm W, Heusinkveld B G, Lenzholzer S, Van Hove B. Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 201, 138: 87-98.
- [34] Aleksandrowicz O, Zur S, Lebendiger Y, Lerman Y. Shade maps for prioritizing municipal microclimatic action in hot climates: Learning from Tel Aviv-Yafo. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 53: 101931.
- [35] 黄婷, 李钊, 陈建全, 罗银花, 罗应华. 柳州市行道树资源调查与结构特征分析. *广西植物*, 2018, 38(3): 370-380.
- [36] Li G, He N, Zhan C. Evaluation of tree shade effectiveness and its renewal strategy in typical historic districts: A case study in Harbin, China. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2022, 49(3): 898-914.
- [37] Qin Z, Li Z, Cheng F, Chen J, Liang B. Influence of canopy structural characteristics on cooling and humidifying effects of *Populus tomentosa* community on calm sunny summer days. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 127: 75-82.
- [38] Sanusi R, Johnstone D, May P, Livesley S J. Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 157: 502-511.
- [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*, 2019, 116(15): 7575-7580.
- [40] Ren Z, Zhao H, Fu Y, Xiao L, Dong Y. Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: a case study in Changchun city, China. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(3): 911-922.
- [41] 青海省国土空间规划(2021—2035年)-政务公开-青海省人民政府网. [2025-02-06]. <http://www.qinghai.gov.cn/zwgk/system/2024/05/27/030045305.shtml>.
- [42] Langenheim N, White M, Tapper N, Livesley S J, Ramirez-Lovering D. Right tree, right place, right time: A visual-functional design approach to select and place trees for optimal shade benefit to commuting pedestrians. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 52: 101816.
- [43] Zhang Y, Chen L, Sun C, Fu Y, Xie Y. An investigation of the influence of the morphological indexes of trees on the outdoor microclimate at high altitude in summer. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1098966.
- [44] Guo W, Cheng B, Wang C, Tang X. Tree planting indices and their effects on summer park thermal environment: A case study of a subtropical satellite city, China. *Indoor and Built Environment*, 2022, 31(1): 109-120.
- [45] Li G, Ren Z, Zhan C. Sky View Factor-based correlation of landscape morphology and the thermal environment of street canyons: A case study of Harbin, China. *Building and Environment*, 2020, 169: 106587.
- [46] Aminipouri M, Knudby A J, Krayenhoff E S, Zickfeld K, Middel A. Modelling the impact of increased street tree cover on mean radiant temperature across Vancouver's local climate zones. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 39: 9-17.