

北京地区 5 种栎类植物光合特性及其生态服务能力研究

王月容 王茜 胡雪凡 舒健骅 李祖政 梁芳 金莹杉*

(北京市园林绿化科学研究院, 北京 100102)

摘要: 探究不同栎类植物光合特性及其生态服务能力, 对栎类植物栽培管理与碳计量评估具有重要意义。本研究以北京地区的槲树 *Quercus dentata* Thunb.、栓皮栎 *Quercus variabilis* Blume、麻栎 *Quercus acutissima* Carruth.、蒙古栎 *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb. 和槲栎 *Quercus aliena* Blume 等 5 种主要栎类植物为研究对象, 利用 LI-6400XT 便携式光合仪测定其光合特性指标的日变化特征, 结合绿量计算模型和固碳释氧量、蒸腾吸热评估模型估算不同种栎类植物及栎林的生态服务能力。结果表明: 1) 5 种栎类植物净光合速率和蒸腾速率日变化均呈明显的双峰曲线变化趋势。2) 净光合速率日变化范围为 $1.05\sim 12.20\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 蒸腾速率日变化范围为 $0.48\sim 5.46\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 两者日均速率由大到小排序均为: 槲树、栓皮栎、蒙古栎、麻栎、槲栎。3) 按单株胸径 20 cm 同规格绿量计算, 日固碳量和日释氧量由大到小排序均为: 蒙古栎、栓皮栎、槲树、麻栎、槲栎。在降温增湿生态服务能力方面, 日释水量由大到小排序为: 槲树、栓皮栎、蒙古栎、麻栎、槲栎; 日吸收热量由大到小排序为: 蒙古栎、槲树、栓皮栎、麻栎、槲栎。4) 按当前北京地区 5 种主要栎类林总面积 12.27 万 hm^2 计算, 其生态服务能力总量为: 年均固碳量 355 万 t、年均释氧量 258 万 t、年均释水量 65.4 亿 t、年均吸收热量 $1.756\times 10^{16}\ \text{kJ}$ 。本研究为北京地区栎类植物造林绿化树种的选择和应用提供科学依据。

关键词: 栎类植物; 光合速率; 蒸腾速率; 生态服务能力

中图分类号: S792.18

文献标识码: A

文章编号: 2097-5279(2026)02-0083-08

DOI: 10.27035/j.cnki.issn2097-5279.20260210

Photosynthetic characteristics and ecological service capacity of five *Quercus* species in Beijing region

Wang Yuerong Wang Qian Hu Xuefan Shu Jianhua Li Zuzheng Liang Fang Jin Yingshan*

(Beijing Institute of Landscape Architecture, Beijing 100102, China)

Abstract: The investigation of photosynthetic traits and ecological service capabilities of *Quercus* species is crucial for their cultivation management and carbon sequestration assessment. In this study, five major *Quercus* plants in Beijing, including *Quercus dentata* Thunb., *Quercus variabilis* Blume, *Quercus acutissima* Carruth., *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb. and *Quercus aliena* Blume were investigated. The diurnal variation of photosynthetic characteristics was measured using LI-6400XT portable photosynthmeter, and the ecological benefits of different *Quercus* pecies were estimated by combining their green quantity calculation model, carbon fixation, oxygen release and transpiration evaluation model. Our results showed that: 1) The diurnal variation of net photosynthetic rate and transpiration rate of the five *Quercus* species exhibited a a distinct bimodal curve pattern, characterized by peaks and troughs. 2) The daily variation range of net photosynthetic rate was $1.05\sim 12.20\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and the daily variation range of transpiration rate was $0.48\sim 5.46\ \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. The average daily rates of both were as follows: *Q. dentata*, *Q. variabilis*, *Q. mongolica*, *Q. acutissima*, *Q. aliena*. 3) According to the green mass of an individual plant with a diameter of 20 cm, the daily carbon sequestration and oxygen release were as follows: *Q. mongolica*, *Q. variabilis*, *Q. dentata*, *Q. acutissima*, *Q. aliena*. Regarding cooling and humidification benefits, the daily water release was ranked as follows: *Q. dentata*, *Q. variabilis*,

收稿日期: 2025-08-04; 修回日期: 2025-08-28。

基金项目: 绿化植物育种北京市重点实验室重点研发项目(YZZD202407, YKYZD202607); 青年预探索项目(YKYQN202502); 北京市财政项目(11000025T000003340135)。

* 通信作者: 金莹杉(E-mail: j_ysh@163.com), 正高级工程师。

引文格式: 王月容, 王茜, 胡雪凡, 等. 2026. 北京地区 5 种栎类植物光合特性及其生态服务能力研究[J]. 树木医学, 3(2): 83-90.

Wang Y R, Wang Q, Hu X F, et al. 2026. Photosynthetic characteristics and ecological service capacity of five *Quercus* species in Beijing region[J]. Tree Health, 3(2): 83-90.

Q. mongolica, *Q. acutissima*, *Q. aliena*. The order of daily heat absorption is: *Q. mongolica*, *Q. dentata*, *Q. variabilis*, *Q. acutissima*, *Q. aliena*. 4) Based on the current total area of 122 700 m² of the five major *Quercus* forest types in the Beijing region, the total ecological service capacity was estimated. The annual carbon sequestration amounts were 3.55 million tons, with annual oxygen release of 2.58 million tons. Annual water transpiration reaches 6.54 billion tons, while annual heat absorption totaled 1.756×10^{16} kJ. These findings provide a scientific basis for the selection and application of *Quercus* species in afforestation and greening initiatives in the Beijing region.

Keywords: *Quercus* species; photosynthetic rate; transpiration rate; ecological service capacity

栎树是壳斗科 Fagaceae 栎属 *Quercus* L. 树种的统称, 亦称为柞树和橡树。栎属是壳斗科中数量最多、分布范围最大的属, 全球范围内共有 600 余种(兰士波, 2018; 官秀玲和胡艳波, 2019; 黄建华等, 2022)。作为温带与亚热带地区阔叶林中最常见的树种, 栎树有其独特且影响深远的生态作用。目前, 我国共有栎属及其变种 60 余种, 其中落叶栎占比最大。许多栎类植物是我国多个地区森林的关键建群种, 其中包含落叶栎, 如栓皮栎 *Quercus variabilis* Blume、麻栎 *Quercus acutissima* Carruth.、蒙古栎 *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.、槲栎 *Quercus aliena* Blume 和槲树 *Quercus dentata* Thunb. 等(施翔等, 2021; 王谦等, 2019)。

栎树历史悠久, 不仅是重要的木本能源、粮食作物、工业原料和木质用材, 更在环境治理与生态修复中占据关键地位, 同时兼具较高的景观价值与社会服务价值(Nechita et al., 2017; Gerasimenko et al., 2022)。众多专家学者对栎类植物进行了深入研究, 在抗逆生理(张星, 2022)、地理分布(付佼, 2021)、生物培育以及其他综合性价值计算方面取得了重要进展(黄利斌等, 2014; 高文强等, 2016; 王奇, 2023; 孙彰镁等, 2024); 也有学者对栎类的生态服务能力进行了初步研究, 包括碳汇、生物多样性、光合特性等(张冬阳, 2018; 任云卯等, 2023; 蔡林豆等, 2025; 王音等, 2024); 还有学者动态评估了中国栎林在“十五”期间的生态服务功能, 结果显示年均总价值达到 1.397 1 万亿元(郭浩等, 2010)。然而, 目前仍缺乏对不同栎类植物光合特性及其相关生态服务功能(如固碳释氧、降温增湿)的系统性比较研究。

栎树是北京地区的第一大类树种, 栎林面积为 12.27 万 hm²(Hu et al., 2025), 占全市乔木林面积的 19.74%。在对北京地区 5 种栎类植物种群进行典型分布抽样调查的基础上, 本研究选取北京市园林绿化科学研究院东北侧栎林地内, 树龄 20 年(2004 年种植), 具有代表性的槲树、栓皮栎、麻栎、蒙古栎、槲栎作为试验材料。在相同环境条件下测定不同栎类植物的光合指标, 结合绿量模型计算与评估, 确定 5 种栎类植物的生态服务能力, 筛选出高固碳栎类树种,

旨在为北京地区森林经营中的树种选择、栽培管理、经营技术调控及碳计量评估等提供基础数据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北京的地理坐标为 39°26′~41°03′ N, 115°25′~117°30′ E, 总面积 16 410 km²。其中, 山地面积 10 200 km²、平原面积 6 200 km²。北京地处华北平原北部, 地势西北高耸, 东南低缓, 属暖温带半湿润大陆性季风气候, 四季分明、春秋短促、冬夏较长。年平均气温 10~12 °C, 多年平均降水量为 406.3~700.0 mm, 年均降水量为 626.3 mm(截至 2023 年底)。降水集中在 5—8 月, 夏季降水量约占全年降水量的 80%, 7 月和 8 月常有暴雨。在暖温带大陆性季风气候控制下, 该地区发育并形成了地带性植被——暖温带落叶阔叶林, 其中典型落叶阔叶林的主要树种包括栓皮栎、麻栎、蒙古栎、槲栎和槲树等。

1.2 试验材料

在前期对北京市西山林场(栓皮栎、槲树)、密云白龙潭林场(麻栎)、京西林场(蒙古栎)、上方山森林公园(槲栎)等地 5 种栎林进行抽样调查的基础上, 根据平均树高与胸径等规格特征(表 1), 于 2023 年 6 月在北京市园林绿化科学研究院东北侧栎林地内选择 20 年树龄的槲树、栓皮栎、麻栎、蒙古栎和槲栎等 5 种栎类植物作为试验材料, 试验材料均无人为干扰, 生长良好、大小基本一致、无病虫害且无特殊管理养护。

1.3 试验方法

1.3.1 光合特性参数测定

本实验使用 LI-6400XT 便携式光合测定仪(美国), 对 5 种栎类植物的净光合速率(net Photosynthetic Rate, Pn)、蒸腾速率(transpiration rate, Tr)、叶片气孔导度(stomatal conductance, Gs)和胞间 CO₂ 浓度(inter-cellular CO₂ concentration, Ci)等 4 种光合指标参数进行了测定。每种植物选取 2 株代表林地树高、胸径等平均规格参数的标准木, 每株选取 3 片生长良好、

表1 北京地区5种栎类植物实验材料规格参数特征

Tab. 1 Experimental material specification parameters of 5 kinds of *Quercus* species in Beijing

树种 Tree species	平均 树高/m Average tree height	平均 胸径/cm Average chest diameter	平均冠幅/m×m Average crown width		平均枝下 高/m Average height under the branches	平均叶片 长度/cm Average blade length	平均叶片 宽度/cm Average blade width	平均叶片 厚度/mm Average blade thickness	平均叶 面积/cm ² Average leaf area
			东西 East-west direction	南北 North-south direction					
槲树 <i>Q. dentata</i>	9.83±2.37	11.17±2.57	4.31±0.17	3.86±0.57	2.38±0.50	17.07±2.93	8.53±2.16	1.07±0.04	136.63±31.25
栓皮栎 <i>Q. variabilis</i>	11.13±1.52	11.70±4.25	5.23±0.58	4.51±0.45	2.18±0.38	16.97±1.86	5.40±0.17	0.83±0.12	58.83±5.49
麻栎 <i>Q. acutissima</i>	12.00±0.42	11.75±0.35	3.78±0.01	5.58±0.51	2.11±0.31	15.85±1.63	5.40±0.42	0.83±0.04	84.69±14.30
蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	13.07±1.12	15.97±1.78	5.23±1.22	6.15±0.60	2.01±0.57	16.93±1.31	7.30±1.22	0.86±0.07	116.70±8.57
槲栎 <i>Q. aliena</i>	14.43±2.48	17.60±5.93	4.26±1.38	4.43±0.89	2.26±1.25	16.45±3.32	9.87±1.00	0.95±0.11	149.51±11.88

注: 表中数值为“平均值±标准差”。

Notes: Data in the table are presented as “mean value±standard deviation”.

无病虫害的新叶, 每个叶片测定3次, 取平均值。

2023年6月, 于晴朗、无风的天气, 自然光照条件下, 在室外进行活体测定, 具体日期分别是6月21日、6月23日、6月30日。测定时间为8:00—18:00, 每隔2h测定一次。

1.3.2 环境因子测定

使用手持式气象站 Kestrel-5500 袖珍式气象测量仪、LI-6400XT 便携式光合仪及 ST-85 型照度计同步测定各项关键生态因子。在实验当天, 同时记录林外和林内各个时间段的大气温度、空气湿度、风速、光合有效辐射、大气 CO₂ 浓度和光照强度等环境因子。

1.3.3 单叶面积测定

2023年8月底, 正值5种栎类树种枝叶茂盛, 且冠层与生物量已基本趋于稳定的时期, 选取长势较好的成年植株进行调查取样。每树种选3~5株, 分别从树冠上、中、下3层剪取20~25片健康无破损、大小均一的成熟叶片, 装入保鲜袋并立即送往实验室, 采用 LI-3000C 型便携式叶面积仪进行单叶面积测定, 游标卡尺测定其叶片厚度等形态特征。

1.3.4 单株绿量(总叶面积)测定

2023年9—10月, 在前期对5种栎类植物规格特征值调查基础上, 采用常规的人工1/4树冠标准枝全叶取样推算全株法, 选取试验地片林中长势较好的成年植株(结合西山国家森林公园、世纪立成苗圃、黄垆苗圃、大东流苗圃大样本植物材料选取), 每种树取15~20株标准木的叶片, 利用单株叶面积总和与胸径指标建立单株叶面积一元回归方程, 结合陈自新等(1998)建立的北京园林植物绿量回归模型估算绿量(总叶面积)修正(表2)。

表2 5种栎类植物单株叶面积一元回归方程

Tab. 2 Regression equation of leaf area per individual plant of five *Quercus* species

树种 Tree species	一元回归方程 Univariate regression equation
槲树 <i>Q. dentata</i>	$S=8.164W-42.83$ $R=0.718$
栓皮栎 <i>Q. variabilis</i>	$S=10.180W-47.35$ $R=0.628$
麻栎 <i>Q. acutissima</i>	$S=11.670W-50.10$ $R=0.671$
蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	$S=10.550W-10.75$ $R=0.764$
槲栎 <i>Q. aliena</i>	$S=7.620W+42.34$ $R=0.507$

注: S 为叶面积(m²), W 为胸径(cm), R 为回归系数。

Notes: S indicates leaf area(m²), W indicates chest diameter(cm), R indicates regression coefficient.

1.3.5 生态服务能力计算方法

以下计算公式参考薛海丽等(2018)的方法。固碳释氧生态服务能力计算公式如下:

$$P = \text{日平均净光合速率} \times \text{光合时间} \times 3600 \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$W(\text{CO}_2) = P \times 44 \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$W(\text{O}_2) = P \times 32 \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: P 为日同化总量(mm²·m⁻²·d⁻¹), $W(\text{CO}_2)$ 为单位面积叶片日固定CO₂的质量(g·m⁻²·d⁻¹), 44为CO₂的摩尔质量, $W(\text{O}_2)$ 为单位面积叶片日释放O₂的质量(g·m⁻²·d⁻¹), 32为O₂的摩尔质量, 10⁻³为由μmol换算为mmol与mol的单位。

降温增湿生态服务能力计算公式如下:

$$E = \text{日平均蒸腾速率} \times \text{光合时间} \times 3600 \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$W(\text{H}_2\text{O}) = E \times 18 \quad (5)$$

$$Q = W(\text{H}_2\text{O}) \times 4.18 \times L \quad (6)$$

$$L = 597 - 0.57 \times T \quad (7)$$

式中: E 为日蒸腾量(mol·m⁻²·d⁻¹), $W(\text{H}_2\text{O})$ 为单位面积叶片日释放水的质量(g·m⁻²·d⁻¹), 18为H₂O的摩尔

质量, Q 为单位叶面积日吸收的热量 ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), L 为蒸发潜热 ($\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}$), T 为叶面温度, $1\text{ J}=4.18\text{ cal}$ 。597 是在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近水的汽化潜热近值; 0.57 是经验系数, 表示汽化潜能随温度升高而线性递减的速率。

1.4 数据处理

使用 SPSS、EXCEL 软件整理 LI-6400XT 系统测定的光合数据, 运用 Python3.3.3 进行相关性分析并制图, 使用 R 语言 agricolae 包进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 光合生理特性分析

2.1.1 净光合速率日变化特征

5 种栎类树种的净光合速率日变化均呈双峰曲线。峰值均出现在 10: 00 和 16: 00 左右。净光合速率在 8: 00—10: 00 增加, 10: 00 后达到光饱和状态后开始下降, 14: 00 左右出现谷值, 14: 00—16: 00 出现第二个峰值, 16: 00—18: 00 为下降趋势。净光合速率为 $1.05\sim12.20\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 最高与最低峰值分别为栓皮栎与槲栎(图 1)。不同种栎类植物, 日平均净光合速率也有明显差异(图 2), 5 种栎类植物日平均净

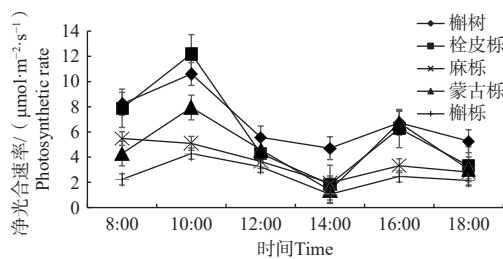


图 1 5 种栎类植物净光合速率日变化
Fig. 1 Diurnal changes of net photosynthetic rate of five *Quercus* species

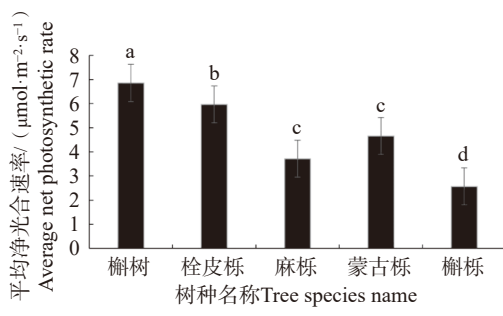


图 2 5 种栎类植物日平均净光合速率
Fig. 2 Average daily net photosynthetic rate of five *Quercus* species

注: 不同小写字母表明平均净光合速率在不同树种间存在显著差异 ($P<0.05$)。

Notes: Different lowercase letters indicate that the average net photosynthetic rate is significantly different among different tree species ($P<0.05$).

光合速率由大到小依次为: 槲树 $6.85\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 栓皮栎 $5.96\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 蒙古栎 $4.66\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 麻栎 $3.71\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 槲栎 $2.57\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.1.2 蒸腾速率日变化特征

蒸腾速率指植物在一定时间内单位叶面积蒸腾的水量, 5 种栎类植物的蒸腾速率日变化均呈现双峰曲线。第 1 个峰值大多出现在 10: 00, 第 2 个峰值出现在 14: 00 或 16: 00 左右; 蒸腾速率日变化范围 $0.48\sim5.46\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 槲树、栓皮栎、麻栎、蒙古栎和槲栎的峰值分别为 5.32 、 4.83 、 2.94 、 3.84 和 $1.95\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 16: 00 出现二次高峰是因为下午温度下降到适宜范围, 气孔再次开放(图 3)。在相同时间段, 不同栎类植物的平均蒸腾速率不同(图 4), 由大到小依次为: 槲树 $3.92\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 栓皮栎 $2.77\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 蒙古栎 $2.23\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 麻栎 $1.75\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 槲栎 $0.92\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

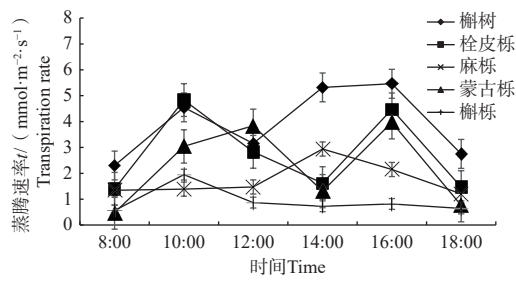


图 3 5 种栎类植物林木蒸腾速率日变化
Fig. 3 Diurnal change of tree transpiration rate of five *Quercus* species

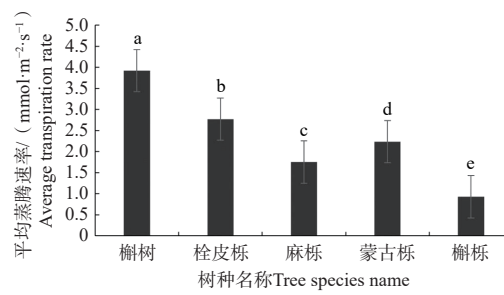


图 4 5 种栎类植物日平均蒸腾速率特征
Fig. 4 Characteristics of average daily transpiration rate of five *Quercus* species

注: 不同小写字母表明平均蒸腾速率在不同树种间存在显著差异 ($P<0.05$)。

Notes: Different lowercase letters indicate that the average transpiration rate is significantly different among different tree species ($P<0.05$).

2.1.3 光合特性指标与环境因子相关性分析

净光合速率与温度呈负相关, 相关系数为 -0.51 ; 与湿度呈正相关, 相关系数为 0.58 ; 与 CO_2 浓度呈正相关, 相关系数为 0.50 ; 与光照强度呈负相关, 相关系数为 -0.33 。但相关性均不显著(图 5)。

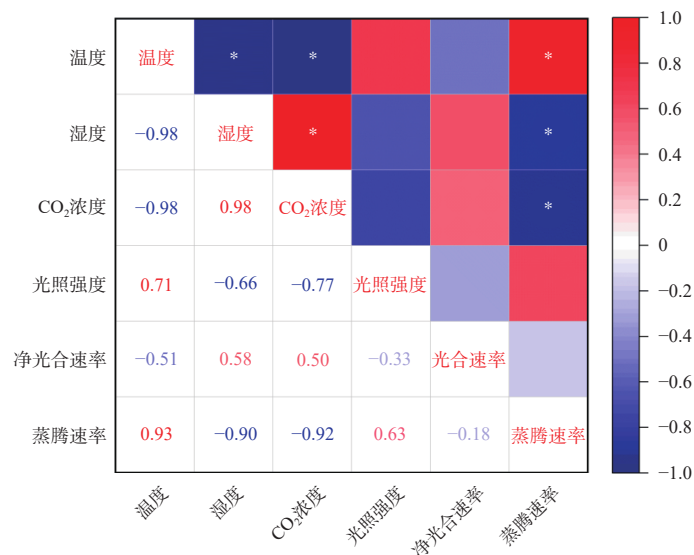


图5 光合特性指标与环境因子相关性图

Fig. 5 Correlation between photosynthetic characteristics and environmental factors

注：*表明光合特性指标与环境因子存在显著差异($P < 0.05$)。

Notes: * indicate significant differences between photosynthetic characteristics and environmental factors ($P < 0.05$).

蒸腾速率与温度显著呈正相关, 相关系数为 0.93; 与湿度呈显著负相关, 相关系数为-0.90; 与二氧化碳浓度呈显著负相关, 相关系数为-0.92; 与光照强度呈正相关, 相关系数为 0.63; 与净光合速率呈负相关, 相关系数为-0.18。

2.2 生态服务能力分析

2.2.1 单株固碳释氧生态服务能力

5种栎类植物的固碳释氧生态服务能力如表3所示。5种相同规格的树种, 其单株、单位时间、单位面积内的固碳释氧量均不相同。其中, 槲树在单位时间、单位面积内的固碳与释氧量最高, 分别

为 13.02, 9.47 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 其次是栓皮栎, 分别为 11.34, 8.25 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 麻栎与蒙古栎居中; 槲栎最低, 分别为 5.01, 3.65 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。结合同规格的单株绿量评估其单株的固碳与释氧量, 日固碳量由大到小依次为蒙古栎, 栓皮栎, 槲树, 麻栎, 槲栎; 日释氧量依次为蒙古栎, 栓皮栎, 槲树, 麻栎, 槲栎。整体看, 单位时间、单位面积内, 槲树的固碳与释氧量显著高于其他树种; 而在单株水平, 蒙古栎、栓皮栎和槲树的日固碳与释氧量显著高于麻栎和槲栎。总体看, 净光合速率高、绿量大的树种固碳释氧的生态服务能力较好。

表3 5种栎类植物绿量与固碳释氧量

Tab. 3 Green content, carbon fixation and oxygen release of five quercus species

树种 Trees pecies	日平均净光合 速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Average daily photosynthetic rate	日同化量/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) Daily assimilation volum	单位面积日固定 CO ₂ 的质量 W(CO ₂)/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) Daily fixed CO ₂ mass per unit area	单位面积日 固定O ₂ 的质量 W(O ₂)/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) Daily fixed O ₂ mass per unit area	胸径规格/cm Diameter at breast height specifications	单株绿量/ m^2 Vegetation quantity	单株日固定 CO ₂ 的质量 W(CO ₂)/ ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$) The mass of CO ₂ fixed	单株日释放O ₂ 的质量W(O ₂)/ ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$) The mass of O ₂ released
槲树 <i>Q. dentata</i>	6.85 a	295.99 a	13.02 a	9.47 a	20	120.46 d	1 568.79 b	1 140.94 b
栓皮栎 <i>Q. variabilis</i>	5.97 b	257.69 b	11.34 b	8.25 b	20	156.28 c	1 771.89 ab	1 288.65 ab
麻栎 <i>Q. acutissima</i>	3.37 c	145.41 d	6.40 d	4.65 d	20	183.30 b	1 172.77 c	852.92 c
蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	4.66 c	201.31 c	8.86 c	6.44 c	20	200.25 a	1 773.76 a	1 290.01 a
槲栎 <i>Q. aliena</i>	2.64 d	113.96 e	5.01 e	3.65 e	20	194.73 a	976.45 d	710.15 d

注：同列数据后标相同字母表示该指标在不同树种间差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母表示该指标在不同树种间差异显著 ($P < 0.05$)。

Notes: The same letter in the same column of data indicates that there is no significant difference in this index among different tree species ($P > 0.05$), while different letters indicates a significant difference in this index among different tree species ($P < 0.05$).

2.2.2 单株降温增湿生态服务能力

5 种栎类植物单位时间内单位叶面积日蒸腾量存在显著差异(表 4)。其中: 槲树的日蒸腾量最高, 达到 169.42 mol·m⁻²·d⁻¹; 而槲栎的日蒸腾量最低, 仅为 40.10 mol·m⁻²·d⁻¹。以胸径 20 cm 的单一植株为标准计算绿量, 槲树的单株日释水量最高, 槲栎最低, 分别是 367.33、140.57 kg·株⁻¹·d⁻¹。单株日释水量由大到小依次为: 槲树, 栓皮栎, 蒙古栎, 麻栎, 槲栎。蒙

古栎单株日吸热量最高, 槲栎最低, 分别为 923.84、340.41 M·kJ, 由大到小依次为: 蒙古栎, 槲树, 栓皮栎, 麻栎, 槲栎。总体来看, 单位时间单位面积内蒸腾量与释水量由大到小依次为: 槲树, 栓皮栎, 蒙古栎, 麻栎, 槲栎。在单株水平上, 蒙古栎的绿量显著高于其他树种, 而槲树的日释水量显著高于其他树种。结果表明, 影响栎类植物降温增湿能力的主要影响因素是日蒸腾量及绿量。

表 4 5 种栎类植物绿量与降温增湿量

Tab. 4 Green mass and cooling and humidification capacities of five *Quercus* species in Beijing

树种 Tree species	日平均蒸腾速率/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹) Average daily transpiration rate	日蒸腾量/ (mol·m ⁻² ·d ⁻¹) Daily transpiration	单位面积日 释水的质量 W(H ₂ O)/(kg·m ⁻² ·d ⁻¹) The mass of water released per unit area per day	单位叶面积日 吸收热量 Q/(kJ·m ⁻² ·d ⁻¹) Heat absorption per unit leaf area per day	各树种胸径 规格/cm Diameter at breast height specification	单株绿量/m ² Vegetation quantity	单株日 释水量/kg Daily water release	单株日吸收 热量/(M·kJ) Daily heat absorption
槲树 <i>Q. dentata</i>	3.92 a	169.42 a	3.05 a	7.38 a	20	120.46 e	367.33 a	889.53 b
栓皮栎 <i>Q. variabilis</i>	2.77 b	119.66 b	2.15 b	5.22 b	20	156.28 d	336.61 b	815.13 c
麻栎 <i>Q. acutissima</i>	1.75 d	75.60 d	1.36 d	3.30 d	20	183.30 c	249.43 d	604.03 d
蒙古栎 <i>Q. mongolica</i>	2.45 c	105.84 c	1.91 c	4.61 c	20	200.25 a	293.68 c	923.84 a
槲栎 <i>Q. aliena</i>	0.93 e	40.10 e	0.72 e	1.75 e	20	194.73 b	140.57 e	340.41 e

注: 表中M代表10³。同列数据后标相同字母表示该指标在不同树种间差异不显著($P>0.05$), 不同字母表示该指标在不同树种间差异显著($P<0.05$)。

Notes: In the table, M represents 10³. The same letter in the same column of data indicates that there is no significant difference in this index among different tree species($P>0.05$), while different letters indicates a significant difference in this index among different tree species($P<0.05$).

2.2.3 北京市 5 种栎林年生态服务能力总量

根据对 5 种栎类林进行的典型抽样实地调查统计, 5 种栎类林的平均密度为 1 072 株·hm⁻²。按一年 180 d 的生长期计算其光合作用的生态服务能力, 表 5 结果显示, 年均固碳量为 288.92 t·hm⁻², 年均释氧量为 210.12 t·hm⁻², 年均释水量为 53 314.09 t·hm⁻², 年均

吸收热量为 143 131.51×10⁶·kJ·hm⁻²。基于当前北京地区主要栎类林总面积 12.27 万 hm² 核算其生态服务能力总量: 年均固碳量为 355 万 t、年均释氧量为 258 万 t、年均释水量为 65.4 亿 t、年均吸收热量为 1.756×10¹⁶ kJ, 这些数据表明, 北京地区栎类林的生态服务能力较强。

表 5 北京地区 5 种主要栎类林生态服务能力总量

Tab. 5 The total ecological service capacity of the five *Quercus* forests in the Beijing area

栎林 <i>Quercus</i> Forests	密度/ (株数·hm ⁻²) Density	北京栎类林 总面积/(万 hm ²) The total area of <i>Quercus</i> forests in Beijing	年均固碳量/(t·hm ⁻²) Annual carbon sequestration capacity	年均释氧量/ (t·hm ⁻²) Annual oxygen release	年均释水量/ (t·hm ⁻²) Annual water release	年均吸收热量/ (10 ⁶ ·kJ·hm ⁻²) Annual heat absorption
槲树林	1 068	12.27	301.58	219.33	70 615.52	171 003.25
栓皮栎林	748		238.57	173.50	45 321.17	109 749.10
麻栎林	537		113.36	82.44	24 109.90	58 385.54
蒙古栎林	1 832		584.92	425.39	96 843.92	304 645.48
槲栎林	1 173		206.17	149.94	29 679.95	71 874.17
平均	1 072		288.92	210.12	53 314.09	143 131.51
年总计	/		355 万 t	258 万 t	65.4 亿 t	175.6×10 ¹⁶ kJ

注: 栎类林是落叶阔叶林, 一年按约 180 d 的生长期计算光合作用。

Notes: *Quercus* forests are of the deciduous broad-leaved forest type. Photosynthesis is calculated based on a growth period(approximately 180 days) in a year.

3 讨论

光合作用是树木重要的生理过程,其强弱除了与树木自身的遗传基因有关,还受到周边环境的影响。一般情况下,光合作用与树木的生长环境有着极为密切的关系,其强弱直接反映了树木适应环境能力的高低。因此,在林业引种驯化过程中,光合作用的强弱常被用作评判树种优良与否的重要指标。树木对周边生长环境的适应情况可以通过生理反应和生态反应的综合表现来评估(蒋龙, 2018; 孙彰镁等, 2024)。

3.1 环境因子对光合特性变化的影响

在夏季,5种栎类植物净光合速率和蒸腾速率的日变化均呈明显的双峰曲线,这与一天中的环境因子有关。10:00以后由于温度过高、光照强度过于强烈,净光合速率达到饱和状态甚至呈现下降趋势,也称为植物光合的“午休”现象。此时,蒸腾速率也最大或不再随时间而增加,气孔关闭;14:00—16:00,随着温度与光照强度小幅度的下降,又出现二次增加现象;16:00以后光照强度与温度呈直线下降,净光合速率和蒸腾速率不再继续增加,这与前人的研究结论基本相似(蒋龙, 2018; 吴一晗等, 2022; 赵佳宝, 2024)。同时温度达到35℃时,栎类植物的Pn、Gs、Ci值均显著降低,表明气孔是抑制其光合作用的主要因素。因此,影响光合作用的主要环境因素是温度和光照强度,其次是CO₂浓度。

不同环境因子会直接影响植物的光合作用。此外,不同树种对环境因子的敏感性也存在差异。如蒋龙(2018)在研究南方几种栎类的光合特性日变化中发现,3种栎类的净光合速率日变化近似于单峰型曲线,其中叶面温度、相对湿度、CO₂浓度和光合有效辐射等环境因素对3种栎类的水分利用效率和净光合速率的影响显著。一般情况下,植物在夏季和秋季光合作用较强,夏季光合速率最高,在春季和冬季植物光合作用相对较弱,冬季光合速率最低(孙彰镁等, 2024)。

3.2 生态服务能力的影响因素

植物生态功能的发挥以单株植物为基础,而绿量对单株尺度的生态调节功能具有决定性影响。因此,在植物选择与种植过程中,只有通过科学有效的方法评估植物的固碳释氧与降温增湿能力,才能选择更好的树种,营造生态服务能力高的城市森林。本研究中,槲树、栓皮栎、麻栎、蒙古栎、槲栎5种栎类植物的单株绿量分别为120.46、156.28、183.30、200.25、

194.73 m²,结合绿量与生态服务能力综合分析,蒙古栎与栓皮栎在单株固碳释氧、降温增湿等方面表现最优,槲树与麻栎次之。

在北京地区,蒙古栎的生态位比其余4种栎类植物更宽,在平原、浅山区及海拔800 m的中山地形条件下都能良好生长,未来可广泛用于多立地条件下的造林绿化。此外,仅从景观效果看,槲树也是优良选择,其叶片硕大、形态优美,且秋季叶色艳丽,观赏价值较高。

4 结论

在北京地区,槲树、栓皮栎、麻栎、蒙古栎、槲栎等5种主要栎类植物的光合速率和蒸腾速率的日变化均呈明显的双峰曲线变化趋势,温度和光照强度是影响这些栎类植物光合速率和蒸腾速率的主要因素。北京地区5种栎类生态服务能力较强,年均固碳量为355万t、年均释氧量为258万t、年均释水量为65.4亿t、年均吸收热量为175.6×10¹⁶ kJ。绿量、光合速率和蒸腾速率共同影响其生态服务能力。在北京地区栎类植物造林和经营过程中,首选栓皮栎和蒙古栎,其次是槲树;若仅考虑景观需求,槲树则为最佳选择。

参 考 文 献

- 蔡林豆,刘勇,张瑞瑶,等. 2025. 北京西山栓皮栎人工林径向生长对干旱事件的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 45(1): 130–139.
- Cai L D, Liu Y, Zhang R Y, et al. 2025. Response of radial growth of the Chinese cork oak plantation forest to drought events in Xishan mountain, Beijing[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 45(1): 130–139. (in Chinese)
- 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等. 1998. 北京城市园林绿化生态效益的研究(2)[J]. 中国园林, 14(2): 51–54.
- Chen Z X, Su X H, Liu S Z, et al. 1998. Study on ecological benefits of urban landscaping in Beijing (2)[J]. Chinese Landscape Architecture, 14(2): 51–54. (in Chinese)
- 付佼,马涛,徐晓婷. 2021. 栎属物种多样性格局及其影响因子分析[J]. 现代园艺, 44(24): 176–178.
- Fu J, Ma T, Xu X T. 2021. Analysis of species diversity pattern and its influencing factors of *Quercus*[J]. Contemporary Horticulture, 44(24): 176–178. (in Chinese)
- 高文强,王小菲,江泽平,等. 2016. 气候变化下栓皮栎潜在地理分布格局及其主导气候因子[J]. 生态学报, 36(14): 4475–4484.
- Gao W Q, Wang X F, Jiang Z P, et al. 2016. Impact of climate change on the potential geographical distribution pattern and dominant climatic factors of *Quercus variabilis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(14): 4475–4484. (in Chinese)
- 官秀玲,胡艳波. 2019. 我国栎类经营及其发展方向研究[J]. 西部林业科学, 48(2): 146–150, 158.

- Guan X L, Hu Y B. 2019. Research on oak forest management orientation of China[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 48(2): 146–150, 158. (in Chinese)
- 郭浩, 汪玉如, 王兵. 2010. 中国栎林生态服务功能评估[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 49(3): 79–85.
- Guo H, Wang Y R, Wang B. 2010. The oakery forest ecosystem services evaluation in China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 49(3): 79–85. (in Chinese)
- 黄建华, 唐佳成, 李国雷, 等. 2022. “十四五”北京将累计推广栎类为主的乡土植物 1000 万株(穴)以上 100 万株栎苗扎根北京[J]. *绿化与生活* (12): 4–8.
- Huang J H, Tang J C, Li G L, *et al.* 2022. During the "14th Five-Year Plan" period, Beijing will cumulatively promote over 10 million native plants (holes) of *Quercus* and more than 100, 000 *Quercus* seedlings to take root in Beijing [J]. *Greening and Life*, (12): 4–8. (in Chinese)
- 黄利斌, 窦全琴, 汤瑾, 等. 2014. 栎树的生物学特性与栽培研究综述[J]. *江苏林业科技*, 41(6): 43–50, 54.
- Huang L B, Dou Q Q, Tang J, *et al.* 2014. Review on the biological characteristics and cultivation of oak trees[J]. *Jiangsu Forestry Science and Technology*, 41(6): 43–50, 54. (in Chinese)
- 蒋龙. 2018. 几种栎类的光合特性日变化比较[J]. *农村科学实验* (14): 66–69.
- Jiang L. 2018. Comparison of Diurnal variations of photosynthetic characteristics of several oak species [J]. *Rural Science Experiment*, (14): 66–69. (in Chinese)
- 兰士波. 2018. 中国北方落叶栎类研究进展及前景[J]. *中国林副特产* (4): 71–76.
- Lan S B. 2018. Present research progress and prospect on deciduous oak of northern China[J]. *Forest By-Product and Speciality in China*, (4): 71–76. (in Chinese)
- 任云卯, 温志勇, 王敏男, 等. 2023. 北京市森林碳汇能力评价[J]. *北京林业大学学报*, 45(12): 108–119.
- Ren Y M, Wen Z Y, Wang M N, *et al.* 2023. Evaluation of forest carbon sequestration capacity in Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 45(12): 108–119. (in Chinese)
- 施翔, 王树凤, 陈益泰, 等. 2021. 不同栓皮栎家系对重金属的耐性和富集特性[J]. *林业科学研究*, 34(1): 121–127.
- Shi X, Wang S F, Chen Y T, *et al.* 2021. Tolerance and enrichment characteristics of different families of *Quercus variabilis* to heavy metal[J]. *Forest Research*, 34(1): 121–127. (in Chinese)
- 孙彰镁, 汤松波, 王淑, 等. 2024. 3 种落叶栎植物功能性状在喀斯特和非喀斯特生境的异同[J]. *生态学报*, 44(24): 11317–11330.
- Sun Z M, Tang S B, Wang S, *et al.* 2024. Comparison of plant functional traits of three deciduous *Quercus* species growing at karst and non-karst habitats[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 44(24): 11317–11330. (in Chinese)
- 王奇, 孙婧依, 刘建锋, 等. 2023. 暖温带北缘 3 种栎树径向生长对气候要素的响应差异及预测[J]. *林业科学研究*, 36(3): 62–70.
- Wang Q, Sun J Y, Liu J F, *et al.* 2023. Differences in the response of radial growth of three *Quercus* species to climatic elements at the northern edge of the warm temperate zone and prediction[J]. *Forest Research*, 36(3): 62–70. (in Chinese)
- 王谦, 陈冷澍, 赵薇, 等. 2019. 干旱条件下栓皮栎叶片光系统活性受损的温度指标[J]. *中国农业气象*, 40(5): 308–316.
- Wang Q, Chen L S, Zhao W, *et al.* 2019. Temperature index of *Quercus variabilis* leaf PSII activity damage under high temperature combined with drought[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 40(5): 308–316. (in Chinese)
- 王音, 同小娟, 张劲松, 等. 2024. 干旱对栓皮栎人工林碳水通量及其耦合的影响[J]. *植物生态学报*, 48(9): 1157–1171.
- Wang Y, Tong X J, Zhang J S, *et al.* 2024. Impact of drought on carbon and water fluxes and their coupling in a *Quercus variabilis* plantation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 48(9): 1157–1171. (in Chinese)
- 吴一哈, 薛旭鹏, 尤海舟, 等. 2022. 栓皮栎幼苗对不同光照强度的响应[J]. *天津农业科学*, 28(10): 1–5, 34.
- Wu Y H, Xue X P, You H Z, *et al.* 2022. Responses of *Quercus variabilis* seedlings to different light intensities[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 28(10): 1–5, 34. (in Chinese)
- 薛海丽, 唐海萍, 李延明, 等. 2018. 北京常见绿化植物生态调节服务研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 54(4): 517–524.
- Xue H L, Tang H P, Li Y M, *et al.* 2018. Regulation service of main greening tree species in Beijing[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 54(4): 517–524. (in Chinese)
- 张冬阳. 2018. 基于树盘图像数字化北京松山主要树种碳汇能力研究[D]. 北京: 北京林业大学.
- Zhang D Y. 2018. Research on carbon sequestration of different tree species based on digital tree-tray images in Songshan area in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University. (in Chinese)
- 张星, 王苗苗, 李国雷, 等. 2022. 栓皮栎和锐齿槲栎幼苗光合特性对高温胁迫的响应[J]. *北京林业大学学报*, 44(7): 25–35.
- Zhang X, Wang M M, Li G L, *et al.* 2022. Photosynthetic response of *Quercus variabilis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* seedlings to high temperature stress[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 44(7): 25–35. (in Chinese)
- 赵佳宝. 2024. 不同环境条件下栓皮栎幼苗的生理生态响应研究[D]. 郑州: 河南农业大学.
- Zhao J B. 2024. Research on the physiological and ecological responses of *Quercus variabilis* seedlings under different environmental conditions [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University. (in Chinese)
- Hu X F, Duan G S, Jin Y S, *et al.* 2025. Study on the natural regeneration characteristics and influencing factors of typical *Quercus* forests in northern China[J]. *Forests*, 16(2): 250.
- Nechita C, Popa I, Eggertsson Ó. 2017. Climate response of oak (*Quercus* spp.), an evidence of a bioclimatic boundary induced by the Carpathians[J]. *Science of the Total Environment*, 599–600: 1598–1607.
- Gerasimenko V V, Markova G A, Chekurov I V, *et al.* 2022. On the state of the pedunculate oak plants (*Quercus robur* L.) of the Orenburg climatype[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1010(1): 012124.