

DOI:10.12171/j.1000-1522.20230028

绒毛白蜡对城市夜间光照的光合响应及其 生理生化适应性特征

吉子彧 刘艳红 秦倩倩

(北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室, 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083)

摘要:【目的】探讨园林绿化植物在不同强度城市夜间光照的响应特征, 可以评估其对城市环境中光污染的耐受性和适应能力。研究旨在揭示绒毛白蜡对不同强度城市夜间光照的光合响应和生理生化适应性特征, 进而为城市园林绿化树种选择及科学调控路灯开放时长等管理工作提供科学依据, 促进城市生态环境的可持续发展。【方法】以北京市行道树常用树种绒毛白蜡为试验材料, 通过野外实地监测和实验室分析, 研究其叶片光合参数、光合色素含量和抗逆生理生化指标在城市夜间不同光照强度梯度下的变化和适应特征。【结果】(1)绒毛白蜡叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率可积极响应城市夜间光照, 与夜间光照强度成正相关。(2)随着夜间光照强度增加, 叶绿素总量显著升高, 叶绿素 a/b 显著下降。(3)随着城市夜间光照强度增加, 绒毛白蜡叶片的可溶性糖含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化酶活性均升高, 一定程度上缓解了城市夜间光照对叶片造成的胁迫。【结论】绒毛白蜡可以通过调整超氧化物歧化酶活性、过氧化酶活性、可溶性糖含量来积极的响应夜间光照, 保证光合作用正常进行。绒毛白蜡表现出适应和响应夜间光照的特性, 可作为城市道路绿化树种。

关键词: 绒毛白蜡; 城市夜间光照; 光合节律; 光合参数; 抗逆

中图分类号: S792.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)02-0058-08

引文格式: 吉子彧, 刘艳红, 秦倩倩. 绒毛白蜡对城市夜间光照的光合响应及其生理生化适应性特征 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(2): 58-65. Ji Ziyu, Liu Yanhong, Qin Qianqian. Photosynthetic response and physiological and biochemical adaptability characteristics of *Fraxinus velutinus* to urban nighttime lighting [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(2): 58-65.

Photosynthetic response and physiological and biochemical adaptability characteristics of *Fraxinus velutinus* to urban nighttime lighting

Ji Ziyu Liu Yanhong Qin Qianqian

(Beijing Key Laboratory of Forest Resources and Ecosystem Processes, School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Exploring the response characteristics of landscape plants to different intensities of urban nighttime lighting can assess their tolerance and adaptability to light pollution in urban environments. The study aimed to reveal the photosynthetic response and physiological and biochemical adaptability of *Fraxinus velutinoides* to different intensities of urban nighttime lighting. This will provide a scientific basis for the selection of urban landscape tree species and scientific regulation of streetlight duration, and promote the sustainable development of urban ecological environments. [Method] Using the commonly used tree species *F. velutina* as the experimental material for roadside trees in Beijing, the changes and adaptation characteristics of leaf photosynthetic parameters, photosynthetic pigment content, and stress resistance

收稿日期: 2023-02-07 修回日期: 2023-04-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504004)。

第一作者: 吉子彧。主要研究方向: 恢复生态学。Email: 18813073277@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生态与自然保护学院。

责任作者: 刘艳红, 博士, 教授。主要研究方向: 恢复生态学。Email: liuyh@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

physiological and biochemical indicators under different lighting intensity gradients at night in the city were studied through field monitoring and laboratory analysis. [Result] (1) The net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of *F. velutina* leaves can actively respond to urban nighttime lighting and are positively correlated with nighttime lighting intensity. (2) With the increase of nighttime lighting intensity, the total amount of chlorophyll significantly increased, while chlorophyll a/b significantly decreased. (3) With the increase of nighttime lighting intensity in urban areas, the soluble sugar content, superoxide dismutase activity, and peroxidase activity of *F. velutina* leaves all increased, which to some extent alleviated the stress caused by urban nighttime lighting on leaves. [Conclusion] *F. velutina* can actively respond to nighttime lighting by adjusting the activity of superoxide dismutase, peroxidase, and soluble sugar content, ensuring normal photosynthesis. *F. velutina* exhibits adaptability and response to nighttime lighting, and can be used as a tree species for urban road greening.

Key words: *Fraxinus velutinus*; urban nighttime lighting; photosynthetic rhythm; photosynthetic parameters; stress resistance

在城市生态系统中, 园林绿化植物在净化空气, 美化人居环境, 维持城市生态环境平衡等方面均发挥着不可或缺的作用^[1]。随着城市化进程的不断加快, 全球范围内夜间人工光源急剧增加, 使地球表面的夜间光环境发生了显著的变化^[2]。目前全球陆地表面受到夜间人工光源影响的面积占比达到近 18.7%, 并且这一比例以每年大约 6% 的速度持续增加^[3-4]。据国际能源机构统计, 夜间人工光源中的路灯数量在全世界范围内的分布已经超过了 1 亿盏^[5]。夜间光照扰乱了正常有序的动植物生物节律, 使植物有效光照时间增加, 影响了植物生长速率和城市生态系统平衡^[6]。

光照是植物生长和发育的重要影响因素之一, 不同强度的光照会影响植物生理特性, 可从直接和间接两方面发挥作用^[7]。一方面, 光照可直接影响植物形态的建成, 如促进黄化苗转绿、叶芽分化, 改变开花时间等^[8]。另一方面, 过强或过弱的光照都会对植物产生胁迫。当光照过强时, 植物吸收的光能超出其需求, 会导致光合速率降低, 进而影响植物合成生长所需的物质和能量, 出现光抑制现象。为了减轻光对叶绿素和光合功能的破坏, 植物会调节光保护机制。而在光照不足的情况下, 植物会通过增加叶绿素含量、提高光合酶活性等措施来增强光合作用, 以增加对有限光能的利用率^[9]。在夏季中午, 光照强度过高, 太阳光直射植物叶片, 叶片被迫降低光合效率, 启动保护机制, 进行各种生理生化反应来减轻光抑制导致的损伤^[10]。外在表现为叶子变焉, 而在体内植物为了保护光合组织, 其保护酶含量和光饱和点会有一定程度的上升^[11]。前期研究^[12-14]提出以不同光照下叶绿素含量及其比值来评价光抑制的程度: 在强光条件下, 叶绿素含量逐渐增加, 光能的吸收和利用能力增强, 以保证正常的光合作用效率;

而在弱光条件下, 叶绿素含量降低, 以减少能源的浪费。叶绿素在不同光照强度下的含量变化是植物为了适应不同光照环境变化而采取的一种调节策略。

在植物的正常生长状态下, 植物体内 O_2^- 和 H_2O_2 一直处于动态变化中, 但可保持相对平衡状态。而当光照过强, 过多吸收光能的同时, 会产生过多的活性氧自由基, 引发膜系统氧化损伤。在这种情况下, 作为生物体内重要的抗氧化酶, 超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和过氧化物酶 (peroxidase, POD) 会被激活, 可将细胞内过剩的超氧自由基和活性氧除去, 进而保护植物细胞^[15]。丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 是膜脂过氧化作用的产物, 其含量的高低可以反映膜所受到的损伤程度, 从而评判植物在逆境环境下受到胁迫的程度^[16]。可溶性糖是一种由光合代谢产生的渗透调节物质, 反映了植物的合成和代谢分解能力, 可通过监测植物叶片可溶性糖含量反映植物叶片的水分状况^[17], 进而评价植物受到胁迫的程度。陈良华等^[18]研究 3 种园林植物对夜间光照的响应与适应特征发现, 夜间光照条件下, 凤仙花 (*Impatiens balsamina*) SOD 和 POD 活性显著上升, MDA 没有显著变化, 有效限制了过量的活性氧对叶片的伤害。

绒毛白蜡 (*Fraxinus velutina*) 为木犀科白蜡属落叶乔木, 现广泛分布于华北、内蒙古南部、辽宁南部以及长江下游等地, 作为一种重要的园林绿化植物和行道树常用树种, 绒毛白蜡在减少空气污染, 防止水土流失, 维护地力保持和水源涵养等方面具有极高的生态价值^[19]。目前, 在园林植物光合节律对光照的响应方面, 多数学者侧重的是自然光和人工补光的研究^[11-13], 但关于植物对路灯产生的低强度夜间光照的适应性特征的研究较为缺乏。因此, 本研究以不同强度城市夜间光照对园林植物光合节律及

抗逆生理特性产生影响为前提假设,以绒毛白蜡为研究对象,拟通过野外实地监测和室内实验,探究不同城市夜间光照强度梯度下绒毛白蜡的光合指标和抗逆生理生化指标的变化规律,旨在揭示绒毛白蜡对城市夜间光照的光合响应和生理生化适应性特征,为城市园林绿化树种选择及科学调控路灯开放时长等管理工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

以北京市海淀区林大北路(东西朝向)、静淑苑路(南北朝向)(39°54'22"N, 116°23'28"E)为采样地点,选择行道树绒毛白蜡作为试验材料。北京市道路路灯夏季开放时间为 19:00 至次日早上 06:00。2022 年 7—9 月,每月挑选至少 15 d 晴天,分别对林大北路、静淑苑路的绒毛白蜡进行监测,由于 2 条路路灯高度不同,所以叶片所受的夜间光照强度也不同,因而设定 2 条路为垂直梯度。每条路根据样本距离路灯不同的水平距离,分别设定为近光(水平距离 (1.8 ± 0.1) m)、远光(水平距离 (3.2 ± 0.1) m)和对照组(水平距离 (5.5 ± 0.1) m)。近光组样本距离路灯较近,叶片受到近光照射;远光组样本距离路灯较远,叶片受到远光照射;对照组样本基本不受灯光照射;此为水平梯度差异。采样地点路灯均为高钠灯,采用照度计(希玛 AS803)测定静淑苑路和林大北路路灯下距地面垂直距离 5 m 处光照强度。采样地点、选取街道、研究植株基本情况如表 1 所示。每个处理选取同一道路上 3 棵长势一致、生长良好、无病虫害的植株,采样时选择同一高度枝条样本中保存较好的叶片进行测量,夜间受光照强度近似的植株作为研究对象,剩余叶片带回实验室进行生理指标测定。

1.2 植物叶片光合参数和光合色素含量的测定

2022 年 7—9 月,每月挑选至少 15 d 晴天,在白天 09:00—11:30 及夜间 20:00—22:30 期间测量植株的蒸腾速率(transpiration rate, T_r)、净光合速率

(net photosynthetic rate, P_n)和气孔导度(stomatal conductance, G_s)。所选叶片为同一部位枝条长势一致生长较好的叶片,选取 5 片叶片,每片叶片测定 4~6 次,最终数据取均值。所用仪器为便携式 Li-6400 光合作用测定仪。

完成叶片测量后,每组叶片选取 2~3 片,使用无水乙醇提取法测量叶片中叶绿素总含量,以及叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值(叶绿素 a/b),每个指标重复测定 3 次,最终数据取均值。

1.3 叶片抗逆生理生化指标的测定

从各样本中选择保存较好的叶片,每组叶片选取 2~3 片,添加液氮研磨至粉末状,用以测定 SOD 活性、MDA 含量、POD 活性以及可溶性糖含量等抗逆生理生化指标的测定。每个指标重复测定 3 次,最终数据取均值。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2013 软件进行统计分析,SPSS 软件进行差异显著性分析,Graphpad 和 Origin 软件进行制图。以独立样本 t 检验比较试验组和对照组的光合指标参数(P_n 、 T_r 、 G_s)及光合色素参数(叶绿素含量、叶绿素 a/b)、抗逆生理生化指标(POD、SOD、MDA、可溶性糖含量)的差异显著性,检验水平为 $P = 0.05$ 。

2 结果与分析

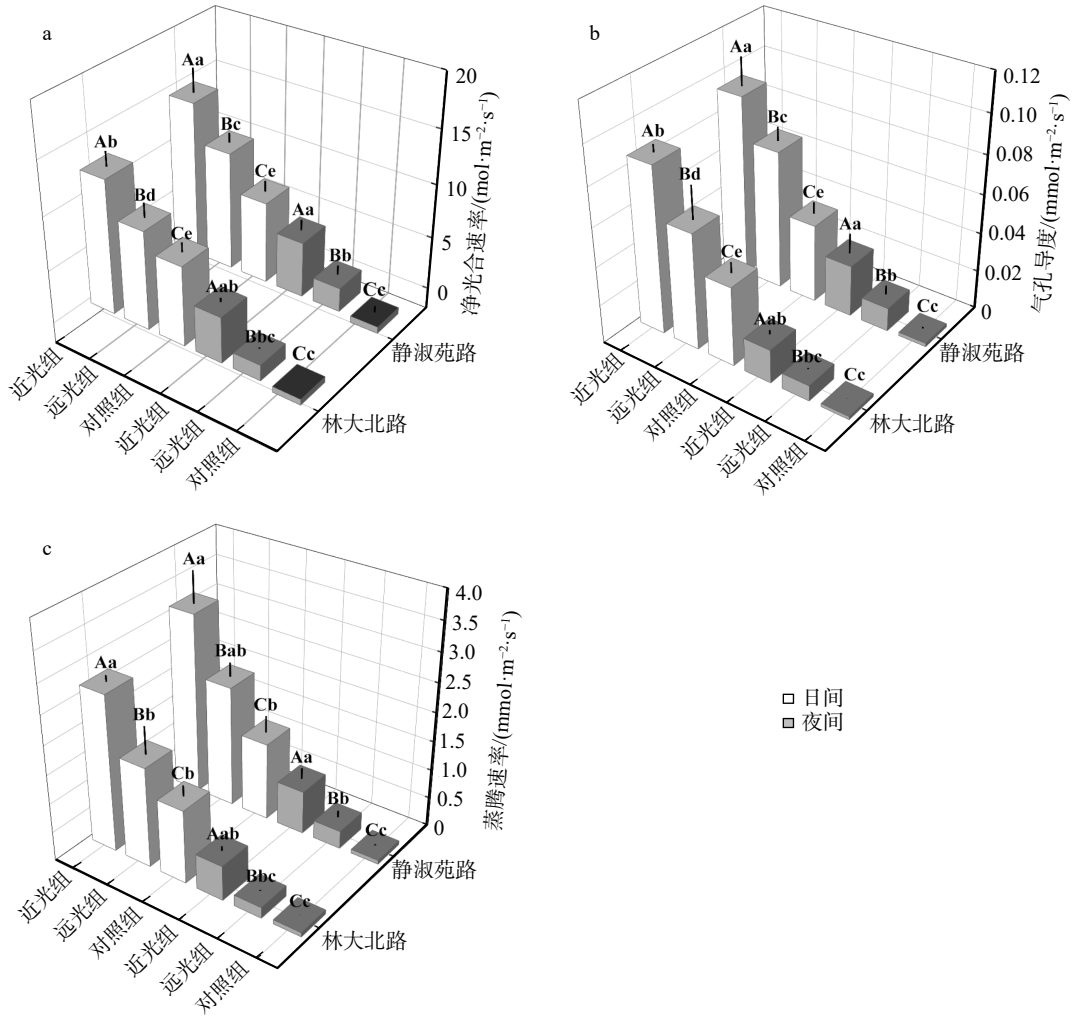
2.1 绒毛白蜡叶片光合指标对不同光照处理组的响应

同一条道路不同强度的夜间光照对绒毛白蜡叶片气孔导度、净光合速率和蒸腾速率 3 个光合指标产生显著影响($P < 0.05$),具体表现为随着夜间光照强度的增强,静淑苑路和林大北路绒毛白蜡的夜间净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均显著升高($P < 0.05$)(图 1)。对照组在夜间基本不受灯光照射,叶片无法进行光合作用,叶片净光合速率为负值。而在同一处理组,不同道路间的叶片夜间气孔导度、净光合速率和蒸腾速率均无显著差异。相较于夜间光照强度较小的远光组和对照组,近光组的绒毛白蜡

表 1 取样街道和树木基本情况

Tab. 1 Sampling streets and basic conditions of trees

街道名称	灯高/m	平均树/m	树间距/m	处理组	距离灯水平距离/m	距地面垂直距离 5 m 光照强度/lx
静淑苑路	10.0	11.8	5.0 ± 0.3	近光组	1.8 ± 0.1	1 080 ± 5
				远光组	3.2 ± 0.1	560 ± 5
				对照组	5.5 ± 0.1	0
林大北路	12.5	11.8	5.0 ± 0.3	近光组	1.8 ± 0.1	770 ± 5
				远光组	3.2 ± 0.1	310 ± 5
				对照组	5.5 ± 0.1	0



不同大写字母代表同一条路上不同处理组间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母代表两条路相同处理组间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同夜间光照条件下绒毛白蜡叶片光合参数变化

Fig. 1 Changes of photosynthetic parameters in leaves of *Fraxinus velutina* under different nighttime lighting conditions

叶片日间的气孔导度、净光合速率和蒸腾速率也最高, 这暗示着夜间光照不仅影响植物夜间的光合生理活动, 可能也对植物日间的光合作用产生影响。

2.2 绒毛白蜡叶片光合色素对不同光照处理组的响应

在水平梯度上, 同一条道路不同强度的夜间光照对绒毛白蜡叶片叶绿素总含量和叶绿素 a/b 产生显著影响($P < 0.05$); 随着光照的增强, 静淑苑路和林大北路绒毛白蜡的叶绿素 a/b 显著下降, 叶绿素总含量显著升高($P < 0.05$)(图 2)。在垂直梯度上, 两条道路夜间所受的光照强度有区别, 静淑苑路和林大北路绒毛白蜡叶片叶绿素 a/b 在对照组和远光组均差异显著($P < 0.05$); 而叶绿素总含量仅在远光组差异显著($P < 0.05$)。

2.3 绒毛白蜡叶片抗逆生理生化指标对不同光照处理组的响应

在水平梯度上, 同一条道路不同强度的夜间光照对绒毛白蜡叶片 POD 活性和 SOD 活性影响显著($P < 0.05$)。随着光照强度的增加, 静淑苑路和林大

北路绒毛白蜡 POD 活性(图 3a)、SOD 活性(图 3b)均显著升高($P < 0.05$), 静淑苑路的可溶性糖含量显著升高($P < 0.05$)(图 3c)。夜间光照强度的变化对绒毛白蜡叶片 MDA 含量影响较小(图 3d)。而在垂直梯度上, 两条道路的夜间光照强度不同, 静淑苑路和林大北路绒毛白蜡叶片 POD 活性、SOD 活性、可溶性糖含量在近光组和远光组均差异显著($P < 0.05$), 两条道路的 MDA 含量无显著差异(图 3)。

3 讨 论

3.1 绒毛白蜡叶片光合指标对不同强度城市夜间光照的响应

本研究中, 近光组和远光组均在较大的夜间光照强度, 夜间净光合速率为正值; 对照组基本无光照, 绒毛白蜡叶片的夜间净光合速率为负值; 城市夜间光照能使绒毛白蜡的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率明显提高。这与紫丁香(*Syringa oblata*)^[20]、二球悬铃木(*Platanus acerifolia*)^[21]、窄叶石楠

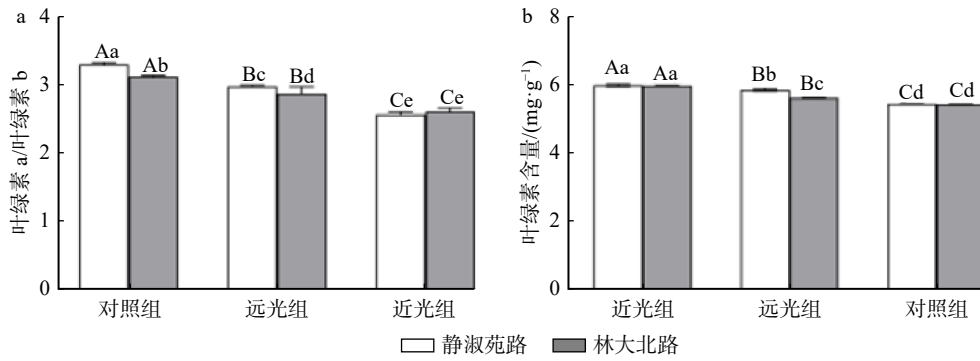


图2 不同夜间光照条件下绒毛白蜡叶片光合色素变化

Fig. 2 Changes of photosynthetic pigment in leaves of *F. velutina* under different nighttime lighting conditions

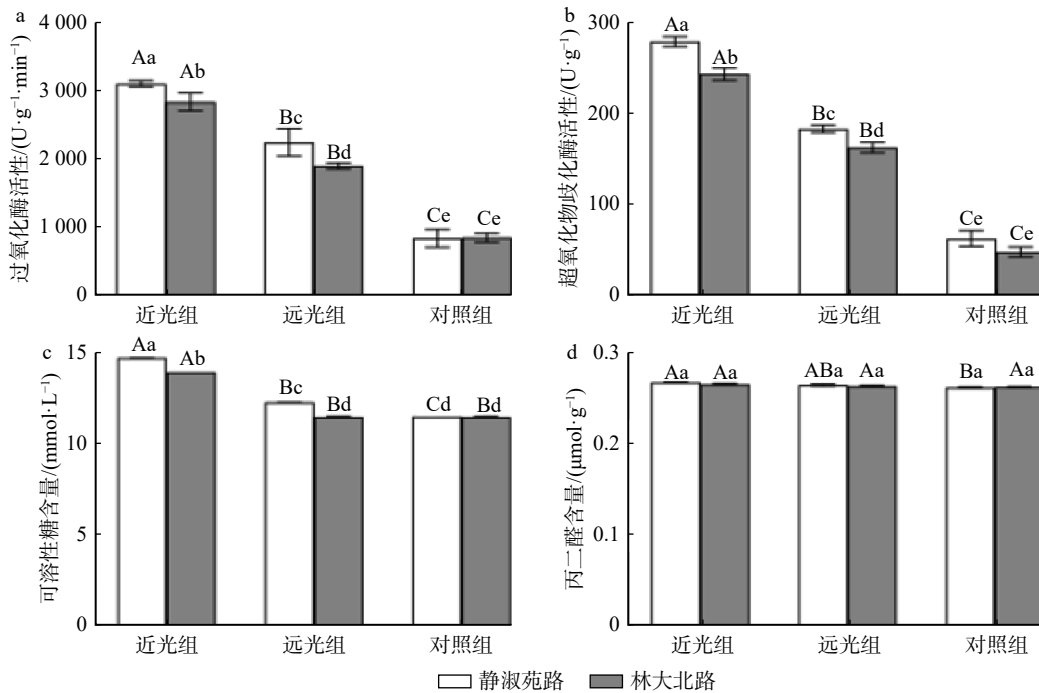


图3 不同夜间光照条件下绒毛白蜡叶片抗逆生理生化指标变化

Fig. 3 Changes in physiological and biochemical indicators of stress resistance of *F. velutina* leaves under different nighttime lighting conditions

(*Photinia stenophylla*)^[22]对夜间光照响应的研究结果相似。植物通过控制气孔迅速开闭响应环境变化,主要原理为:当外界环境因素发生改变时,细胞内环境也发生变化,溶质中的不同离子积累导致渗透压升高,进而从外界环境中吸收水分,细胞膨压增大,外观形状随之改变,从而实现对气孔开闭的控制。城市夜间光照促进了植物气孔张开,叶片气孔限制值减小,气孔导度增加,内部阻力减小,叶片周围CO₂分子更易于进入叶片光合组织,胞间CO₂浓度增加,净光合速率与蒸腾速率也随之提升^[23]。另外,与对照组相比,经过夜间光照后的绒毛白蜡叶片的日间净光合速率、气孔导度、胞间的CO₂浓度升高,原因可能是长期夜间光照使绒毛白蜡叶片的光补偿点降低,气孔运动感知光线的能力增强,进一步推测夜间光照不仅能影响植物夜间的生理活动,也能影响植物白天的光合作用^[24-25]。综上所述,绒毛白蜡

的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率这3个光合指标可积极响应夜间光照,这与许大全等^[26]和周成波等^[27]关于补光对植物光合特性的影响的研究结果一致。

3.2 绒毛白蜡叶片叶绿素对城市夜间光照的响应

叶绿素的含量反映了植物对光照的吸收能力,与植物光合能力的强弱密切相关。本研究发现,相较于白天太阳辐射,城市夜间光照使绒毛白蜡叶绿素总含量增加,叶绿素a/b值下降,这与刘文海等^[28]的研究结果一致。叶绿素总含量的增加可促进植物收集更多光色素蛋白,更高效利用光能,改善植物在弱光环境下的适应度^[29]。叶绿素b对弱光的吸收能力更强,在响应城市夜间光照的过程中,叶绿素b的增量可能会大于叶绿素a,导致叶绿素a/b下降。植物通过不断调整叶绿素a和叶绿素b含量比例,实现二者动态平衡,以响应昼夜之间的强弱光交替,保

证正常生长, 这与张涛等^[30]关于 8 种绿化树种对城市夜间光照的生理适应性的研究结果一致。本研究中, 静淑苑路近光组受到的夜间光照强度比林大北路近光组高, 而叶绿素总量却比林大北路低, 推测过强的夜间光照造成了氧化胁迫, 破坏了叶绿体的 PS II 系统, 使叶片的光合作用反应中心、光合色素和光合膜受到了较大的损害, 影响了光合电子链的传递, 进而抑制了植株正常生长^[31-33]。

3.3 绒毛白蜡叶片抗逆生理生化指标对不同强度城市夜间光照的响应

SOD、POD 可以去除植物细胞内过剩的超氧自由基和活性氧, 进而保护植物细胞, 在植物抵御不利环境胁迫过程中发挥着重要作用, Filippou 等^[34]研究发现, 在干旱和胁迫环境下, 臭椿(*Ailanthus altissima*)可以通过提高 SOD 活性来消除活性氧。在 48.5% 遮光处理下, 蓝羊茅(*Festuca glauca*)和拂子茅(*Calamagrostis emodensis*)的 SOD 和 POD 活性较高^[35]。与全光照相比, 遮光处理下的油用牡丹 SOD 和 POD 活性显著增加, H₂O₂ 含量有所下降。以上研究结果表明, 植物可通过提高 SOD 和 POD 活性来响应环境变化, 这与本研究的结果一致: 随着城市夜间光照强度的增强, 绒毛白蜡的 SOD、POD 活性均增加。另外, 随着夜间光照强度的增强, 绒毛白蜡叶片可溶性糖含量随之增加, 推测其通过调节细胞渗透平衡, 提高抗逆性^[36]。相对于 SOD、POD 活性的增强和可溶性糖含量的升高, 绒毛白蜡叶片中 MDA 含量无显著变化, 推测夜间光照虽然对绒毛白蜡造成了胁迫, 但是植物叶片通过自身的调节作用, 如增加 SOD 活性、POD 活性、多糖含量, 有效限制了过量的活性氧的积累, 保护自身不受损伤。这与张涛等^[30]关于 8 种绿化树种和肖静等^[37]关于番茄(*Solanum lycopersicum*)幼苗响应夜间光照的研究结果一致。

4 结 论

通过野外调查监测和实验室测定, 本文研究了夏秋季绒毛白蜡叶片的光合指标、光合色素与抗逆生理生化指标对不同强度夜间光照的响应, 得到以下结论。

(1) 绒毛白蜡叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率可积极响应城市夜间光照, 与夜间光照强度成正相关。

(2) 随着夜间光照强度增加, 叶绿素总量显著提高, 叶绿素 a/b 显著下降。

(3) 随着城市夜间光照强度增加, 绒毛白蜡叶片的可溶性糖含量、超氧化物歧化酶活性、过氧化酶活

性均升高, 一定程度上缓解了城市夜间光照对叶片造成的胁迫。

综上, 绒毛白蜡可以通过调整超氧化物歧化酶活性、过氧化酶活性、可溶性糖含量来积极的响应夜间光照, 消除夜间光照带来的胁迫作用, 保证光合作用正常进行。绒毛白蜡表现出适应和响应夜间光照的特性, 可作为城市道路绿化树种。研究结果对于揭示城市夜间光照对园林植物的影响规律、以及植物对城市夜间光照的光合响应和生理生化适应性特征具有重要参考价值。未来的研究中可通过扩大研究区域, 细化夜间光照强度梯度, 增加形态学和生理生化指标, 进一步挖掘绒毛白蜡叶片响应不同强度城市夜间光照的具体调控机制。

参 考 文 献

- [1] 张来, 张显强. 城市典型绿化植物释氧与降温的生态效应-贵州安顺城区实例研究 [J]. 基因组学与应用生物学, 2012(31): 78-83.
Zhang L, Zhang X Q. Ecological effects of typical urban greening plants releasing oxygen and cooling temperature: a case study of Anshun City in Guizhou[J]. Genomics and Applied Biology, 2012(31): 78-83.
- [2] Longcore T, Rich C. Ecological light pollution[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2004, 2: 191-198.
- [3] Gaston K J, Visser M E, Franz H. The biological impacts of artificial light at night: the research challenge[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 2015, 370: 133-140.
- [4] Holker F, Wolter C, Perkin E K, et al. Light pollution as a biodiversity threat[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25: 681-682.
- [5] Gaston K J, Gaston S, Bennie J, et al. Benefits and costs of artificial nighttime lighting of the environment[J]. Environmental Reviews, 2014, 23: 14-23.
- [6] Landis T D, Pinto J R, Dumroese R K, et al. Light emitting diodes (LED): applications in forest and native plant nurseries[J]. Forest Nursery Notes, 2013, 33: 5-13.
- [7] Bennie J, Davies T W, Cruse D, et al. Ecological effects of artificial light at night on wild plants[J]. Journal of Ecology, 2016, 104: 611-620.
- [8] 李小婷, 陈斌, 王海军, 等. 城市夜间灯光对香樟生长的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2284-2290.
Li X T, Chen B, Wang H J, et al. Effects of urban nighttime light on the growth of *Cinnamomum camphora*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2284-2290.
- [9] 王博轶, 冯玉龙. 生长环境光强对两种热带雨林树种幼苗光合作用的影响 [J]. 生态学报, 2005, 25(1): 23-30.
Wang B Y, Feng Y L. Effects of growth light intensities on photosynthesis in seedlings of two tropical rain forest species [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 23-30.
- [10] Demming-Adams B, Adams W. Photoprotection and other

- response of plant to high light stress[J]. Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992, 43: 599.
- [11] Boardman N K. Comparative photosynthesis of sun and shade plants [J]. Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1977, 28: 355–377.
- [12] Bertamini M, Muthuchelian K, Nedunchezian N. Photoinhibition of photosynthesis in sun and shade grown leaves of grapevine (*Vitis vinifera* L.) [J]. Photosynthetica, 2004, 42: 7–14.
- [13] Maxwell K, Marrison J L, Leech R M, et al. Chloroplast acclimation in leaves of *Guzmania monostachia* response to high light [J]. Plant Physiology, 1999, 121: 89–95.
- [14] Yang D H, Webster J, Adam Z, et al. Induction of acclimative proteolysis of the light-harvesting chlorophyll a/b protein of photosystem II in response to elevated light intensities [J]. Plant Physiology, 1998, 118: 827–834.
- [15] 周瑞莲, 赵哈林, 程国栋. 高寒山区植物根抗氧化酶系统的季节变化与抗冷冻关系 [J]. 生态学报, 2001, 21(6): 865–870.
- Zhou R L, Zhao H L, Cheng G D. Seasonal changes in enzymatic antioxidant system in roots of alpine perennial forage grasses related to freezing tolerance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6): 865–870.
- [16] 王磊, 隆小华, 孟宪法, 等. 水杨酸对 NaCl 胁迫下菊芋幼苗光合作用及离子吸收的影响 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1901–1907.
- Wang L, Long X H, Meng X F, et al. Effects of salicylic acid on photosynthesis and ion absorption *Helianthus tuberosus* seedlings under NaCl stress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(9): 1901–1907.
- [17] Fan X X, Xu Z G, Liu X Y, et al. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 153(4): 50–55.
- [18] 陈良华, 曹艺, 杨万勤, 等. 三种园林植物对夜间光照的响应与适应特征 [J]. 生态学报, 2017, 37(2): 549–556.
- Chen L H, Cao Y, Yang W Q, et al. Responses and adaptive status of three garden plants exposed to night illumination [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 549–556.
- [19] 燕丽萍, 吴德军, 王因花, 等. 绒毛白蜡耐盐生理与解剖结构研究 [J]. 中国农学通报, 2024, 40(2): 16–24.
- Yan L P, Wu D J, Wang Y H, et al. Salt tolerance physiology and anatomical structure of *Fraxinus velutina* [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(2): 16–24.
- [20] 高明辉, 吴汇元, 周兆平, 等. 夜间照明对紫丁香光合作用的影响 [J]. 吉林林业科技, 2012, 41(5): 7–10, 22.
- Gao M H, Wu H Y, Zhou Z P, et al. Effect of night lighting on the photosynthesis of *Syringa oblata* [J]. Jilin Forestry Science and Technology, 2012, 41(5): 7–10, 22.
- [21] 王旭东, 许晶, 徐慧, 等. 城市道路夜间照明与行道树相互影响探析 [J]. 中国园林, 2019, 35(9): 120–123.
- Wang X D, Xu J, Xu H, et al. Discussion of the interactive influence between the night lighting and road trees on urban roads [J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(9): 120–123.
- [22] 段然, 刘星瀚. 园林植物光合节律对夜间光照响应的研究 [J]. 重庆工商大学学报 (自然科学版), 2021, 38(2): 108–115.
- Duan R, Liu X Y. Response of photosynthetic rhythm of landscape plants to urban nighttime illumination [J]. Journal of Chongqing Technology and Business (Natural Sciences Edition), 2021, 38(2): 108–115.
- [23] 黄莉, 王欣宇, 陈斌. 夜间人工照明对两种常见城市杂草光合特性及生长的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(6): 934–939.
- Huang L, Wang X Y, Chen B. Effects of artificial lighting at night on the photosynthesis and growth of two typical urban weed species [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(6): 934–939.
- [24] Tayloy S H, Franks P J, Hulme S P, et al. Photosynthetic pathway and ecological adaptation explain stomatal trait diversity amongst grasses [J]. New Phytologist, 2012, 193(2): 387–396.
- [25] 温婧雯, 陈昊轩, 滕一平, 等. 太白山栎属树种气孔特征海拔梯度的变化规律 [J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6712–6721.
- Wen J W, Chen H X, Teng Y P, et al. Variation of leaf stomatal traits in *Quercus* species along the altitudinal gradient in Taibai Mountain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6712–6721.
- [26] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响 [J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1217–1234.
- Xu D Q, Gao W, Ruan J. Effects of light quality on plant growth and development [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8): 1217–1234.
- [27] 周成波, 张旭, 刘彬彬, 等. 补充光质对叶用莴苣光合特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2015, 51(12): 2255–2262.
- Zhou C B, Zhang X, Liu B B, et al. The effect of supplementary light quality on physiological characteristics of lettuce [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(12): 2255–2262.
- [28] 刘文海, 高东升, 束怀瑞. 不同光强处理对设施桃树光合及荧光特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2006, 39(10): 2069–2075.
- Liu W H, Gao D S, Shu H R. Effects of different photon flux density on the characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of peach trees in protected culture [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(10): 2069–2075.
- [29] Wang Y, Wei X L. Advance on the effects of different light environments on growth, physiological biochemistry and morphology of plant [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2010, 29: 353–359.
- [30] 张涛, 王瑞敏, 陈燕琼, 等. 8 种绿化树种对城市夜间照明的生理适应性 [J]. 森林与环境学报, 2019, 39(4): 424–430.
- Zhang T, Wang R M, Chen Y Q, et al. Physiological adaptations of eight greening-trees in an urban area under night lighting [J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(4): 424–430.
- [31] 王荷, 张蓓蓓, 张辉, 等. 浅析夜景照明对植物生长的影响 [J]. 农学学报, 2017, 7(5): 33–37.
- Wang H, Zhang B B, Zhang H, et al. Night lighting effects on plant growth [J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(5): 33–37.
- [32] 柴胜丰, 韦霄. 强光胁迫对濒危植物金花茶幼苗生长和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 植物研究, 2012, 32(2): 159–164.

- Chai S F, Wei X. Effect of strong light stress on the growth, biomass and chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of endangered plant *Camellia nitidissima*[J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(2): 159–164.
- [33] 刘成功, 王明援, 刘宁, 等. 不同光照时间对欧美杨幼苗生长和光合特性的影响 [J]. 林业科学, 2018, 54(12): 33–41.
- Liu C G, Wang M Y, Liu N, et al. Effects of different irradiation duration on growth and photosynthetic characteristics of *Populus × euramericana* seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(12): 33–41.
- [34] Filippou P, Bouchagier P, Skotti E, et al. Proline and reactive oxygen /nitrogen species metabolism is involved in the tolerant response of the invasive plant species *Ailanthus altissima* to drought and salinity[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 97: 1–10.
- [35] 张朝铖, 蒋倩, 吴志, 等. 4种观赏草的耐阴特性研究及评价 [J]. 草业学报, 2019, 28(7): 60–72.
- Zhang Z C, Jiang Q, Wu Z, et al. Evaluation of shade tolerance characteristics of four ornamental grasses[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(7): 60–72.
- [36] 徐超华, 李军营, 崔明昆, 等. 延长光照时间对烟草叶片生长发育及光合特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(4): 763–770.
- Xu C H, Li J Y, Cui M K, et al. Effects of supplemental lighting on growth and photosynthesis of tob[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(4): 763–770.
- [37] 马肖静, 刘勇鹏, 黄松, 等. 不同LED光照强度夜间补光对番茄幼苗生长发育的影响 [J]. 植物生理学报, 2022, 58(12): 2411–2420.
- Ma X J, Liu Y P, Huang S, et al. Effects of different LED illumination intensity at night on the growth and development of tomato seedlings[J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(12): 2411–2420.

(责任编辑 赵田芸 吴娟
责任编辑 卢孟柱)