

庄朋静, 李娜, 刘乐冕, 等. 植物工厂中银合欢幼苗生长条件的优化 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (2): 183–192.

ZHUANG P J, LI N, LIU L M, et al. Condition Optimization for *Leucaena leucocephala* Seedling Growth in Factory [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (2): 183–192.

植物工厂中银合欢幼苗生长条件的优化

庄朋静^{1,2}, 李娜^{2,3}, 刘乐冕^{1,2,3*}, 郭毅松^{1,2,3}, 陈剑锋^{1,2,3}

(1. 福州大学先进制造学院, 福建 晋江 362200; 2. 福州大学晋江科教园海洋工程研发中心, 福建 晋江 362200; 3. 福州大学生物科学与工程学院, 福建 福州 350108)

摘要:【目的】探明银合欢幼苗在植物工厂中水培的最优生长条件, 为生产优质的银合欢苗奠定基础。【方法】分析不同光照时长 (12、16、20、24 h·d⁻¹)、光照强度 (100、200、300、400 μmol·m⁻²·s⁻¹)、营养液盐度 (7‰、15‰、20‰、25‰)、氮浓度 (7.5、15、30、60 mmol·L⁻¹) 和磷浓度 (0.5、1、2、4 mmol·L⁻¹) 下银合欢幼苗的形态和生理指标, 优化银合欢幼苗的生长条件。【结果】单因素试验结果表明, 随着光照时长、光照强度、氮浓度或磷浓度的增加, 银合欢幼苗的形态指标呈现先增后降的趋势。幼苗定植 35 d 后, 在光照时长 20 h·d⁻¹ 下幼苗鲜重 (5.61±0.11) g·株⁻¹, 比 12、24 h·d⁻¹ 分别增加 60.0% 和 14.6%; 光强 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 下鲜重 (6.55±0.10) g·株⁻¹, 比 100、400 μmol·m⁻²·s⁻¹ 分别增加 21.5% 和 62.1%; 氮浓度 15 mmol·L⁻¹ 下鲜重 (4.32±0.10) g·株⁻¹, 比 7.5、60 mmol·L⁻¹ 分别增加 6.1% 和 108.6%; 磷浓度 1 mmol·L⁻¹ 下鲜重 (5.65±0.21) g·株⁻¹, 比 0.5、4 mmol·L⁻¹ 分别增加 40.9% 和 64.7%。银合欢幼苗的叶绿素含量、叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性也表现出相似的规律。相比之下, 随着营养液盐度的增加, 银合欢幼苗的形态指标、叶绿素含量、叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性均呈现下降趋势。在盐度 7‰ 时鲜重、干重、株高、根长和总叶绿素含量均达到最大值, 分别为 (8.95±0.05) g·株⁻¹、(2.16±0.16) g·株⁻¹、(31.17±1.67) cm、(60.67±0.93) cm、(1.72±0.06) mg·g⁻¹。7‰ 盐度下幼苗的叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性指标也较好。【结论】银合欢幼苗在光照时长 20 h·d⁻¹、光强 200 μmol·m⁻²·s⁻¹、盐度 7‰、氮浓度 15 mmol·L⁻¹、磷浓度 1 mmol·L⁻¹ 的条件下, 其形态指标、叶绿素含量、抗氧化酶活性及叶绿素荧光参数等指标较优, 最适合银合欢幼苗生长。

关键词: 银合欢; 植物工厂; 光照; 盐度; 营养液氮磷

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 02-0183-10

Condition Optimization for *Leucaena leucocephala* Seedling Growth in Factory

ZHUANG Pengjing^{1,2}, LI Na^{2,3}, LIU Lemian^{1,2,3*}, GUO Yisong^{1,2,3}, CHEN Jianfeng^{1,2,3}

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Jinjiang, Fujian 362200, China; 2. Marine Engineering Research and Development Center, Jinjiang Science and Education Park, Fuzhou University, Jinjiang, Fujian 362200, China; 3. College of Biological Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: 【Objective】Optimal conditions for the growth of *Leucaena leucocephala* seedlings in an indoor facility were studied. 【Methods】Selected morphological and physiological indices of *L. leucocephala* seedlings were monitored for the optimization in a chamber under varied light exposures (i.e., 12, 16, 20, and 24 h·d⁻¹) with the intensity of 100, 200, 300, or 400 μmol·m⁻²·s⁻¹ in a nutrient solution of a salinity of 7‰, 15‰, 20‰, or 25‰, a N concentration of 7.5, 15, 30, or 60 mmol·L⁻¹, and a P concentration of 0.5, 1, 2, or 4 mmol·L⁻¹. 【Results】The single factor experiment showed the seedling morphological indices increased at first and then decreased with increasing light exposure, light intensity, N or P concentration. After 35 d of cultivation, the average fresh weight of an individual seedling exposed to 20 h·d⁻¹ of light reached (5.61±0.11) g, which was 60.0% higher than that exposed to 12 h·d⁻¹ or 14.6% higher than that exposed to 24 h·d⁻¹. The intensity of light at 200

收稿日期: 2022-09-19 初稿; 2022-12-13 修改稿

作者简介: 庄朋静 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事生态修复研究 (E-mail: 3128380486@qq.com)

* 通信作者: 刘乐冕 (1984-), 男, 副研究员, 主要从事生物资源与环境工程研究 (E-mail: lmliu@fzu.edu.cn); 陈剑锋 (1968-), 男, 教授, 主要从事生物资源与环境工程研究 (E-mail: jfchen@fzu.edu.cn)

基金项目: 福州大学“旗山学者”奖励支持计划项目 (GXRC-20061); 国家自然科学基金面上项目 (31971469); 晋江市省级海洋产业发展示范县示范项目 (JJHYCYXM-01-004)

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ resulted in a $(6.55\pm0.10)\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ of fresh seedling, which was 21.5% or 62.1% higher than at $100\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ or $400\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively. The nutrient solution containing $15\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{N}$ yielded a fresh seedling weight of $(4.32\pm0.10)\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, which was 6.1% and 108.6% higher than those at 7.5 and $60\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, in concentration. Whereas P at $1\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, the fresh seedling weight was $(5.65\pm0.21)\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, which was 40.9% and 64.7% higher than P at $0.5\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ and $4\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. And the seedlings exhibited similar patterns under those conditions on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, and antioxidant enzyme activities. On the other hand, the seedlings growing under an increasing salinity displayed decreasing trends on the morphological indices, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, and antioxidant enzyme activities. At 7‰ salinity, the greatest fresh seedling weight of $(8.95\pm0.05)\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, dry weight of $(2.16\pm0.16)\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$, plant height of $(31.17\pm1.67)\text{cm}$, root length of $(60.67\pm0.93)\text{cm}$, and total chlorophyll content of $(1.72\pm0.06)\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ were recorded. In contrast, the chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant enzyme activities were improved. 【Conclusion】 Under $20\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ of $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ light exposure, the growth of *L. leucocephala* seedlings in a nutrient solution of 7‰ salinity that contained $15\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{N}$ and $1\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{P}$ rendered the morphological indices, antioxidant enzyme activities, and chlorophyll fluorescence parameters superior to the other tested conditions in a nursery.

Key words: *L. leucocephala*; plant factory; light; salinity; nitrogen and phosphorus

0 引言

【研究意义】银合欢 (*Leucaena leucocephala*) 为含羞草科 (Mimosaceae) 银合欢属 (*Leucaena*) 的多年生木本豆科植物, 银合欢生长速度快, 固氮能力强, 粗蛋白含量高, 耐干旱, 是土地瘠薄地区绿化造林的先锋树种^[1], 具有重要的生态和经济价值。银合欢传统的幼苗培育方式不仅周期长而且还易受天气、自然灾害和播种地段的影响, 成苗率低, 满足不了市场对银合欢幼苗的需求量。植物工厂是一种多层、封闭、可持续并且环保的生产系统, 可通过均匀调控系统内 LED 光源和环境条件使植物的生长不受外部环境的影响, 快速生产大批高质量的植物或植物幼苗^[2]。因此在植物工厂中优化银合欢幼苗的生长条件, 可有效避免恶劣天气、自然灾害、不同地段土壤特性等问题对育苗带来的负面影响, 还能通过调节光、营养液、温湿度等条件, 利用垂直空间种植实现银合欢幼苗的高质、高量的全天候培育。外部的环境因子例如育苗的光照、温度、盐度、湿度、pH 和营养条件都会影响植物的生长^[3-6]。因此, 在植物工厂中优化银合欢幼苗的生长条件是提供优质银合欢标准苗的有力保障。【前人研究进展】陈永快等^[7]研究指出, 适当的光照时长和光照强度有利于提高植物的抗胁迫能力并促进植物的光合作用, 有利于营养物质和干物质的累积。光照时长延长虽然会降低植物暗期的呼吸消耗, 但是不同的植物对光照时间的长短响应结果不一样^[8], 根据植物的品种施加适宜的光照时长才能高效育苗。季延海^[9]研究结果表明在原有营养液配方的基础上加入低浓度的盐有利于芹菜株高和叶片的生长。刘青^[10]研究结果表明, 营养液能促进植物的株高、叶片、

根等的生长, 优化营养液中氮和钾离子的浓度可以提升水芹的产量及品质。乔源^[11]研究结果表明, 高浓度的氮 ($8\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 及适宜的磷浓度能增加芹菜对营养元素的利用率, 提高蛋白质、可溶性糖等品质指标, 磷浓度过高或过低都不利于芹菜的生长, 在适宜的磷浓度 ($0.6\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 下芹菜的产量和可溶性糖含量最高。【本研究切入点】目前, 前人对银合欢的研究大多数集中在银合欢种子的萌发^[12]、固氮特性^[13]及对重金属土壤的修复^[14]等方面, 而关于银合欢幼苗的最适生长环境因子以及在植物工厂中的育苗情况还有待深入探究。【拟解决的关键问题】在植物工厂中用水培的方法通过设置不同的光照及营养液盐度、氮磷等条件培育银合欢幼苗, 分析环境因子对其幼苗形态指标、抗氧化酶活性及光合指标的影响, 得出适合银合欢幼苗的最优培育条件, 为银合欢幼苗快速、优质的生长提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

高速冷冻离心机: 型号 TGL-20bR, 购自上海安亭科学仪器厂; 紫外可见分光光度计: 型号 SP-756P, 购自上海光谱仪器有限公司; 全波长酶标仪: 型号 SP-Max2300A2, 购自上海闪谱生物科技有限公司; 水样荧光仪: 型号 WATER-PAM, 购自德国 WALZ 公司; 液氮罐: 型号 YDS-30-80, 购自查特生物医药成都有限公司。银合欢种子购自江苏春益达园林绿化工程有限公司。植物工厂模组购自福建省中科生物股份有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 种子萌发及幼苗培养 于 25℃ 条件下将浸种 24 h 后的银合欢种子播种在育苗棉上催芽, 待银合

欢幼苗长出 3-5 片真叶时移栽至植物工厂模组上, 观察幼苗的生长情况, 并按时补充水分和营养, 保持培养条件的相对稳定。营养液配方及含量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): NaNO_3 1190; NH_4Cl 53.5; KCl 373; CaCl_2 444; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 493; KH_2PO_4 136; KI 0.83; H_3BO_3 6.2; $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 22.3; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 8.6; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.25; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.025; CoCl_2 0.025; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 13.9; EDTA 钠盐 18.65。其中, 营养液的大量(氮、磷、钾)和中量(钙、镁、硫)元素浓度分别为 15、1、6、4、2、2 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 与改良的霍格兰营养液浓度一致^[15]。

1.2.2 试验梯度设置及样品采收 本研究中的试验均为单因子控制试验。每个试验梯度设 3 个重复, 每个重复 9 株长势相似的植株。光照时长试验设置 4 个梯度, 分别为光照时长: 12、16、20、24 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ 。光照强度试验设置 4 个梯度, 分别为 100、200、300、400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。营养液盐度试验设置 4 个梯度, 分别为 7‰、15‰、20‰、25‰, 用人工海盐调节盐度。营养液总氮浓度试验设置 4 个梯度, 分别为: 7.5、15、30、60 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 以硝酸钠和氯化氨为氮源调节氮浓度, 令硝氮: 氨氮=14:1。营养液总磷浓度试验设置 4 个梯度, 分别为: 0.5、1、2、4 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 以磷酸二氢钾为磷源调节磷浓度, 并通过氯化钾维持原始钾浓度。幼苗定植到植物工厂模组上的第 35 天采收, 测定各项指标。

1.3 植物指标测定方法

1.3.1 植物形态指标测定方法 鲜重: 取新鲜植物, 用蒸馏水冲洗干净, 再用吸水纸吸干水分在精度为千分之一的电子天平上称量。干重: 测完鲜重的植株, 在 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干 30 min 再 75 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重, 用千分之一的电子天平称量。株高和根长: 用精度为 1 mm 的刻度尺直接测量。

1.3.2 叶绿素的测定方法^[16] 称取新鲜叶片 0.2 g, 放入研钵中, 加少量石英砂和碳酸钙粉及 95% 乙醇, 研磨成匀浆, 至组织变白, 静置 3 min, 过滤到 25 mL 棕色容量瓶中, 用乙醇定容至 25 mL, 摇匀。在波长 663 nm 和 646 nm 下测定吸光度。计算公式为: $C_a = 12.21 A_{663} - 2.81 A_{646}$; $C_b = 20.13 A_{646} - 5.03 A_{663}$; $C_T = C_a + C_b$; $A = (V \cdot C_T \cdot N) / W$ 。其中, C_a 和 C_b 分别是叶绿素 a 和 b 含量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); A 为叶绿体色素含量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); C_T 为总叶绿素含量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); A_{663} 和 A_{646} 是叶绿素提取液在 663 nm 和 646 nm 下的吸光度值; V 为提取液体积 (mL); N 为稀释倍数; W 为样品鲜重 (g)。

1.3.3 超氧化物歧化酶 (SOD) 的测定方法^[17] 称取新鲜叶片 0.5 g, 置于研钵中, 磨碎后加 2 mL pH

7.8 的磷酸缓冲溶液。4 $^{\circ}\text{C}$ 下 10000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 上清液为样品提取酶液。暗对照 (空白对照) 管中依次加入磷酸缓冲溶液、甲硫氨酸、氯化硝基四唑蓝、核黄素、酶液 4.1、0.3、0.3、0.3、0 mL, 光对照管依次加入磷酸缓冲溶液、甲硫氨酸、氯化硝基四唑蓝、核黄素、酶液 4.1、0.3、0.3、0.3、0 mL, 样品管依次加入磷酸缓冲溶液、甲硫氨酸、氯化硝基四唑蓝、核黄素、酶液 4.05、0.3、0.3、0.3、0.05 mL; 混匀后, 0-暗对照管置于暗处, 0-光对照管和样品管一起置于 4000 lx 日光灯下反应 20 min。反应结束后, 以 0-暗对照管做空白, 在 560 nm 处测定吸光度值。计算公式为: $\text{SOD 活性} (\text{U} \cdot \text{g}^{-1}) = [(A_{\text{CK}} - A_{\text{E}}) \times V] / (A_{\text{CK}} \times W \times V_t)$ 。其中: A_{CK} 为光对照管的吸光度; A_{E} 为样品管吸光度; V 为样液总体积 (mL); W 为样品鲜重 (g); V_t 为测定时的酶液用量 (mL)。

1.3.4 过氧化物酶 (POD) 的测定方法^[18] 称取新鲜叶片 0.4 g, 加磷酸缓冲液 (pH 7.8) 5 mL, 于研钵中研磨成匀浆, 以 8000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 取上清液 (酶液)。对照管加入反应混合液 [100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲溶液 (pH 6.0) 50 mL, 加入愈创木酚 28 μL , 加热搅拌至愈创木酚溶解, 冷却后加入 30% H_2O_2 19 μL , 混合均匀] 3 mL, 磷酸缓冲液 (pH 7.8) 1 mL, 样品管加入反应混合液 3 mL, 上述酶液 1 mL, 立即开启秒表计时, 于 470 nm 测 OD 值, 每隔 1 分钟记录一次吸光度, 共记录 5 次。计算公式为: $\text{POD 活性} (\text{U} \cdot \text{g}^{-1}) = (\Delta A_{470} \times V_t) / (0.01 \times t \times W \times V_s)$ 。其中, ΔA_{470} 为反应时间内吸光值的变化; W 为样品重量 (g); V_t 为提取酶液总体积 (mL); V_s 为测定时所用酶液体积 (mL); t 为反应时间 (min)。

1.3.5 丙二醛 (MDA) 的测定方法^[19] 取 0.5 g 新鲜叶片, 加入 2 mL 预冷的 0.05 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.8 的磷酸缓冲液, 研磨成匀浆, 转移到 5 mL 离心管, 用缓冲液定容至 5 mL。4500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 上清液即为丙二醛提取液。吸取 2 mL 提取液于试管中, 加入含 0.5% 硫代巴比妥酸的 5% 三氯乙酸溶液 3 mL, 水浴加热 10 min, 迅速冷却。于 4500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min。取上清液于 532、600 nm 波长下, 以蒸馏水为空白测吸光度。计算公式为: 丙二醛含量 ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$) = $[(A_{532} - A_{600}) \times V_1 \times V] / (1.55 \times 10^{-1} \times W \times V_2)$ 。式中: A 为吸光度; V_1 为反应液总量 (mL); V 为提取液总量 (mL); V_2 为测定时所用提取液总量 (mL); W 为植物样品重量 (g); 1.55×10^{-1} 为丙二醛的微摩尔吸光系数。

1.3.6 叶绿素荧光的测定方法 在测定前先将植物暗处理 30 min, 用 WATER-PAM 水样荧光仪测定植

物叶片的叶绿素荧光参数，包括表观光合电子传递速率 ETR ，基于暗适应的叶片光化学效率 F_v/F_m ，光化学淬灭系数 qP 和非光化学淬灭系数 NPQ 。

1.4 数据分析

试验所得数据用 Excel 2010 和 Origin 2018 软件整理，用单因素方差分析方法进行差异显著性检验，用 LSD 法对均值进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 光照时长对银合欢幼苗形态指标、抗氧化酶和叶绿素荧光参数的影响

银合欢幼苗的形态指标在光照时长为 $20\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 时最佳。如表 1 所示，银合欢幼苗鲜重、干重、根长均随光照时长的延长先上升后下降，其中，鲜重和

干重在 $20\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 光照时最大，分别为 $(5.66\pm0.11)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 和 $(1.13\pm0.06)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 。株高随着光照时长的延长逐渐降低；叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量随光照时长的延长先上升后下降，在光照时长为 $20\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 时最高，分别为 (1.04 ± 0.08) 、 (0.26 ± 0.01) 、 $(1.30\pm0.06)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

如表 1 所示，银合欢的 SOD 和 POD 活性随着光照时长的延长逐渐升高，而 MDA 含量先略有下降后快速上升，SOD 和 POD 在光照时长为 $24\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 时达到最大值分别为： (590.16 ± 1.60) 、 $(823.70\pm39.83)\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ ，且 MDA 在光照 $20\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 时最低，为 $(12.44\pm0.93)\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ ；叶绿素荧光参数 ETR 、 F_v/F_m 、 qP 随光照时长的延长先上升后下降，在光照时长 $20\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 下较高， NPQ 在光照时长 $20\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 时较小。

表 1 银合欢在不同光照时长下的表现生长指标和生理指标

Table 1 Growth and physiological indices of *Leucaena leucocephala* under different light duration

参数 Parameters	光照时长 Duration of light/ ($\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$)			
	12	16	20	24
鲜重 Fresh weight/ ($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	$3.54\pm0.22\text{ d}$	$4.14\pm0.06\text{ c}$	$5.66\pm0.11\text{ a}$	$4.94\pm0.13\text{ b}$
干重 Dry weight/ ($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	$0.57\pm0.05\text{ c}$	$0.81\pm0.03\text{ b}$	$1.13\pm0.06\text{ a}$	$0.92\pm0.08\text{ b}$
株高 Shoot height/ ($\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$)	$17.00\pm0.58\text{ a}$	$13.33\pm0.60\text{ b}$	$11.17\pm0.44\text{ c}$	$10.43\pm0.09\text{ c}$
根长 Root length/ ($\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$)	$23.00\pm1.00\text{ c}$	$38.50\pm0.29\text{ a}$	$30.50\pm0.50\text{ b}$	$24.50\pm0.76\text{ c}$
总叶绿素 Total chlorophyll/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	$0.94\pm0.08\text{ b}$	$1.09\pm0.14\text{ ab}$	$1.30\pm0.06\text{ a}$	$1.26\pm0.09\text{ a}$
叶绿素a Chlorophyll a/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	$0.76\pm0.07\text{ b}$	$0.89\pm0.08\text{ ab}$	$1.04\pm0.08\text{ a}$	$1.01\pm0.07\text{ a}$
叶绿素b Chlorophyll b/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	$0.18\pm0.01\text{ a}$	$0.19\pm0.07\text{ a}$	$0.26\pm0.01\text{ a}$	$0.25\pm0.01\text{ a}$
超氧化物歧化酶 SOD/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	$564.7\pm1.6\text{ c}$	$572.9\pm3.5\text{ c}$	$582.7\pm1.4\text{ b}$	$590.2\pm1.6\text{ a}$
过氧化物酶 POD/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	$242.5\pm6.6\text{ c}$	$600.1\pm30.5\text{ b}$	$680.3\pm20.8\text{ b}$	$823.7\pm39.8\text{ a}$
丙二醛 MDA/ ($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	$12.63\pm0.69\text{ b}$	$12.49\pm1.36\text{ b}$	$12.44\pm0.93\text{ b}$	$16.69\pm1.34\text{ a}$
非光化学淬灭系数 NPQ	$0.21\pm0.05\text{ b}$	$0.20\pm0.02\text{ b}$	$0.21\pm0.03\text{ b}$	$0.50\pm0.03\text{ a}$
光化学效率 F_v/F_m	$0.68\pm0.01\text{ c}$	$0.75\pm0.01\text{ a}$	$0.71\pm0.01\text{ b}$	$0.61\pm0.01\text{ d}$
光化学淬灭系数 qP	$0.78\pm0.02\text{ b}$	$0.88\pm0.02\text{ a}$	$0.88\pm0.01\text{ a}$	$0.79\pm0.03\text{ b}$
电子传递速率 ETR	$37.40\pm0.68\text{ ab}$	$41.10\pm0.43\text{ a}$	$39.62\pm1.19\text{ a}$	$33.97\pm2.22\text{ b}$

同行不同小写字母代表不同处理之间显著差异 ($P<0.05$)，下同。

Datas with different lowercase letters on the same row represent significant differences between treatments ($P<0.05$). Same for below.

2.2 光照强度对银合欢幼苗形态指标、抗氧化酶和叶绿素荧光参数的影响

银合欢的形态指标在光照强度为 $200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时最佳。如表 2 所示，银合欢幼苗的鲜重、干重、根长、叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量都随着光照强度的增加先增加后降低，且均在光照强度为 $200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时有最大值，分别为 $(6.55\pm0.10)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $(1.52\pm0.12)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $(36.93\pm1.88)\text{ cm}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $(1.44\pm$

$0.08)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(0.36\pm0.02)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(1.80\pm0.10)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

如表 2 所示，随着光照强度增加，银合欢的 MDA 含量呈先下降后上升的趋势，POD 活性呈上升的趋势，SOD 含量变化不大。银合欢的 ETR 随着光照强度的增加先上升后下降，在光强 200 和 $300\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时较大， NPQ 呈上升趋势， F_v/F_m 和 qP 呈下降趋势。

表 2 银合欢在不同光照强度下的表现生长指标和生理指标

Table 2 Growth and physiological indices of *L. leucocephala* under different light intensities

参数 Parameters	光照强度 Light intensity/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			
	100	200	300	400
鲜重 Fresh weight/ ($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	5.39±0.22 b	6.55±0.10 a	6.41±0.07 a	4.04±0.15 c
干重 Dry weight/ ($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	1.16±0.08 bc	1.52±0.12 a	1.26±0.05 b	0.94±0.04 c
株高 Shoot height/ ($\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$)	14.27±0.14 a	14.07±0.22 a	12.77±0.40 b	12.90±0.47 b
根长 Root length/ ($\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$)	35.33±2.77 a	36.93±1.88 a	34.67±2.09 a	34.17±0.44 a
总叶绿素 Total chlorophyll/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.38±0.08 b	1.80±0.10 a	1.28±0.06 b	1.25±0.05 b
叶绿素a Chlorophyll a/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.12±0.06 b	1.44±0.08 a	1.03±0.03 b	0.97±0.07 b
叶绿素b Chlorophyll b/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.26±0.02 a	0.36±0.02 a	0.25±0.07 a	0.28±0.04 a
超氧化物歧化酶 SOD/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	562.6±6.9 a	559.5±3.1 a	560.4±4.9 a	569.4±2.2 a
过氧化物酶 POD/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	482.6±13.3 c	761.9±25.5 b	815.4±22.6 b	960.7±28.8 a
丙二醛 MDA/ ($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	22.98±0.86 a	21.97±1.26 a	21.69±1.16 a	22.40±1.92 a
非光化学淬灭系数 NPQ	0.34±0.02 c	0.38±0.02 bc	0.42±0.01 ab	0.48±0.01 a
光化学效率 Fv/Fm	0.79±0.01 a	0.75±0.01 b	0.70±0.01 c	0.68±0.01 d
光化学淬灭系数 qP	0.87±0.01 a	0.80±0.01 b	0.79±0.02 b	0.51±0.01 c
电子传递速率 ETR	67.13±3.61 bc	76.51±3.13 ab	84.35±1.73 a	60.46±2.99 c

2.3 盐度对银合欢幼苗形态指标、抗氧化酶和叶绿素荧光参数的影响

如表 3 所示，银合欢的鲜重、干重、株高、根长、叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素都随着盐度的升高而下降，在盐度 7‰ 时最高，其值分别为 (8.95±0.05) g·株⁻¹、(2.16±0.16) g·株⁻¹、(31.17±1.67)

cm、(60.67±0.93) cm、(1.35±0.05) mg·g⁻¹、(0.38±0.01) mg·g⁻¹、(1.72±0.06) mg·g⁻¹。银合欢的形态指标在盐度为 7‰ 时最佳。

如表 3 所示，SOD 活性随着盐度的增加不断下降，POD 活性随着盐度的增加先上升后急速下降至最低值，MDA 含量随着盐度的增加持续上升。

表 3 银合欢在不同盐度下的表现生长指标和生理指标

Table 3 Growth and physiological indices of *L. leucocephala* at different salinities

参数 Parameters	盐度 Salinity/‰			
	7	15	20	25
鲜重 Fresh weight/ ($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	8.95±0.05 a	7.94±0.14 b	4.44±0.38 c	2.33±0.15 d
干重 Dry weight/ ($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	2.16±0.16 a	1.58±0.03 b	0.90±0.02 c	0.32±0.01 d
株高 Shoot height/ ($\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$)	31.17±1.67 a	24.83±0.44 b	19.00±0.50 c	12.17±0.33 d
根长 Root length/ ($\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$)	60.67±0.93 a	47.67±1.36 b	26.40±0.90 c	19.17±1.48 d
总叶绿素 Total chlorophyll/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.72±0.06 a	1.64±0.11 ab	1.44±0.06 b	1.09±0.01 c
叶绿素a Chlorophyll a/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.35±0.05 a	1.29±0.03 a	1.16±0.05 b	0.88±0.01 c
叶绿素b Chlorophyll b/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.38±0.01 a	0.35±0.10 a	0.29±0.01 a	0.21±0.01 a
超氧化物歧化酶 SOD/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	584.3±4.0 a	578.8±9.3 a	576.0±8.7 a	565.1±7.4 a
过氧化物酶 POD/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	476.9±12.0 b	567.1±14.1 a	483.2±7.9 b	469.1±9.4 b
丙二醛 MDA/ ($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	11.51±0.41 b	14.33±1.71 b	19.94±1.48 a	20.49±1.60 a
非光化学淬灭系数 NPQ	0.19±0.04 b	0.27±0.06 b	0.87±0.07 a	1.07±0.14 a
光化学效率 Fv/Fm	0.79±0.01 a	0.77±0.01 a	0.77±0.01 a	0.72±0.01 b
光化学淬灭系数 qP	0.87±0.04 a	0.80±0.01 a	0.80±0.03 a	0.79±0.02 a
电子传递速率 ETR	44.61±2.20 a	41.43±0.16 a	35.47±2.04 b	32.66±2.06 b

表 3 中, 银合欢幼苗的 qP 、 ETR 和 F_v/F_m 随着盐度的增加而降低, 都在 7‰ 盐度时有最大值分别为: 0.87 ± 0.04 、 44.61 ± 2.20 、 0.79 ± 0.01 , 在 25 ‰ 盐度时有最小值分别为: 0.79 ± 0.02 、 32.66 ± 2.06 、 0.72 ± 0.01 , NPQ 随盐度增加而上升。

2.4 营养液中的氮含量对银合欢幼苗形态指标、抗氧化酶和叶绿素荧光参数的影响

银合欢的形态指标和叶绿素含量在氮浓度为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最佳。如表 4 所示, 银合欢的鲜重、干重和株高随着氮浓度的增加先增后减, 在氮浓度为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值, 其值分别为 $(4.32\pm0.10)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $(0.84\pm0.05)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $(21.73\pm0.89)\text{ cm}$; 表 4 中, 银合欢的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的含量都随着氮浓度的增加先上升后下降, 均在

氮浓度 $30\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达最大值, 其次是 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

如表 4 所示, 随着氮浓度的增加 POD 活性先下降后上升, SOD 活性先升高后下降, 在氮浓度为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最高, 为 $(555.02\pm3.77)\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$, MDA 含量先下降后上升, 在氮浓度为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最低, 为 $(13.92\pm1.01)\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。表 4 中, 随着氮浓度的增加银合欢的叶绿素荧光参数 ETR 、 F_v/F_m 和 qP 先上升后下降, 在氮浓度为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值, 分别为 60.67 ± 0.29 、 0.76 ± 0.01 、 0.92 ± 0.01 , NPQ 先下降后上升, 在氮浓度为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达最小值 (0.38 ± 0.02) , 热耗散最少; 在低氮浓度 $7.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和高氮浓度 $60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时值最大, 热耗散最多。

表 4 银合欢在不同氮浓度下的表现生长指标和生理指标

Table 4 Growth and physiological indices of *L. leucocephala* at different nitrogen concentrations

参数 Parameters	氮浓度 Nitrogen concentration/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)			
	7.5	15	30	60
鲜重 Fresh weight/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	$4.07\pm0.08\text{ a}$	$4.32\pm0.10\text{ a}$	$3.38\pm0.13\text{ b}$	$2.07\pm0.13\text{ c}$
干重 Dry weight/($\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	$0.66\pm0.01\text{ b}$	$0.84\pm0.05\text{ a}$	$0.56\pm0.05\text{ b}$	$0.38\pm0.02\text{ c}$
株高 Shoot height/($\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$)	$15.13\pm0.23\text{ b}$	$21.73\pm0.89\text{ a}$	$15.83\pm0.17\text{ b}$	$10.67\pm0.84\text{ c}$
根长 Root length/($\text{cm}\cdot\text{株}^{-1}$)	$27.17\pm1.09\text{ a}$	$27.67\pm0.44\text{ a}$	$27.00\pm4.31\text{ a}$	$24.73\pm0.62\text{ a}$
总叶绿素 Total chlorophyll/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	$1.23\pm0.01\text{ b}$	$1.33\pm0.08\text{ ab}$	$1.46\pm0.03\text{ a}$	$1.28\pm0.03\text{ b}$
叶绿素a Chlorophyll a/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	$0.99\pm0.01\text{ b}$	$1.07\pm0.07\text{ ab}$	$1.17\pm0.02\text{ a}$	$1.04\pm0.03\text{ b}$
叶绿素b Chlorophyll b/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	$0.24\pm0.01\text{ b}$	$0.26\pm0.01\text{ b}$	$0.29\pm0.01\text{ a}$	$0.24\pm0.01\text{ b}$
超氧化物歧化酶 SOD/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	$534.8\pm4.3\text{ a}$	$555.0\pm3.8\text{ a}$	$534.2\pm7.4\text{ a}$	$530.2\pm13.4\text{ a}$
过氧化物酶 POD/($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$)	$529.3\pm4.9\text{ b}$	$487.7\pm12.6\text{ bc}$	$468.9\pm3.9\text{ c}$	$591.2\pm25.8\text{ a}$
丙二醛 MDA/($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	$14.21\pm1.31\text{ a}$	$13.92\pm1.01\text{ a}$	$16.19\pm1.31\text{ a}$	$16.12\pm0.09\text{ a}$
非光化学淬灭系数 NPQ	$0.52\pm0.03\text{ a}$	$0.38\pm0.02\text{ b}$	$0.51\pm0.02\text{ a}$	$0.51\pm0.04\text{ a}$
光化学效率 F_v/F_m	$0.70\pm0.01\text{ b}$	$0.76\pm0.01\text{ a}$	$0.69\pm0.01\text{ b}$	$0.68\pm0.01\text{ c}$
光化学淬灭系数 qP	$0.91\pm0.01\text{ a}$	$0.92\pm0.01\text{ a}$	$0.70\pm0.02\text{ c}$	$0.77\pm0.02\text{ b}$
电子传递速率 ETR	$38.30\pm0.71\text{ c}$	$60.67\pm0.29\text{ a}$	$39.60\pm0.30\text{ c}$	$42.71\pm1.28\text{ b}$

2.5 营养液中的磷元素对银合欢幼苗形态指标、抗氧化酶和叶绿素荧光参数的影响

银合欢的形态指标和叶绿素在磷浓度为 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最佳。如表 5 所示, 随着磷浓度的增加银合欢鲜重、干重、株高、根长、叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素均呈先上升后下降的趋势, 都在磷浓度为 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时取得最大值, 其值分别为 $(5.65\pm0.21)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $(0.98\pm0.05)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$ 、 $(15.63\pm0.58)\text{ cm}$ 、 $(37.57\pm1.10)\text{ cm}$ 、 $(1.44\pm0.05)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $(0.42\pm0.08)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、

$(1.87\pm0.11)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

如表 5 所示, 银合欢的 SOD 和 POD 活性随着磷浓度的增加先上升后下降, 在磷浓度为 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时取得最大值, 其次是磷浓度为 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, MDA 的含量呈上升趋势。表 5 中, 银合欢的叶绿素荧光参数 ETR 和 qP 随着磷浓度的增加先上升后下降, 在磷浓度为 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最大; F_v/F_m 整体呈下降趋势, NPQ 随着磷浓度的增加先下降后上升, 在磷浓度为 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最低。

表 5 银合欢在不同磷浓度下的表现生长指标和生理指标

Table 5 Growth and physiological indices of *L. leucocephala* at different phosphorus concentrations

参数 Parameters	磷浓度 Phosphorus concentration/(mmol·L ⁻¹)			
	0.5	1	2	4
鲜重 Fresh weight/ (g·株 ⁻¹)	4.01±0.24 b	5.65±0.21 a	4.04±0.16 b	3.43±0.22 b
干重 Dry weight/ (g·株 ⁻¹)	0.71±0.05 b	0.98±0.05 a	0.69±0.05 bc	0.54±0.05 c
株高 Shoot height/ (cm·株 ⁻¹)	13.33±0.84 b	15.63±0.58 a	15.27±0.39 ab	11.07±0.58 c
根长 Root length/ (cm·株 ⁻¹)	36.20±0.35 a	37.57±1.10 a	32.50±0.58 b	32.47±1.50 b
总叶绿素 Total chlorophyll/ (mg·g ⁻¹)	1.53±0.07 b	1.87±0.11 a	1.58±0.07 b	1.56±0.05 b
叶绿素a Chlorophyll a/ (mg·g ⁻¹)	1.23±0.05 b	1.44±0.05 a	1.25±0.04 b	1.23±0.04 b
叶绿素b Chlorophyll b/ (mg·g ⁻¹)	0.29±0.04 a	0.42±0.08 a	0.33±0.05 a	0.34±0.01 a
超氧化物歧化酶 SOD/ (U·g ⁻¹)	554.0±8.22 a	571.2±8.80 a	573.8±6.22 a	567.6±6.35 a
过氧化物酶POD/ (U·g ⁻¹)	661.0±6.9 b	807.2±16.5 a	828.2±34.8 a	604.6±12.0 b
丙二醛 MDA/ (nmol·g ⁻¹)	17.96±0.6 a	18.68±0.4 a	18.70±1.6 a	19.17±0.2 a
非光化学淬灭系数 NPQ	0.56±0.05 b	0.38±0.02 c	0.56±0.04 b	1.25±0.08 a
光化学效率 Fv/Fm	0.76±0.01 a	0.77±0.01 a	0.70±0.01 b	0.46±0.01 c
光化学淬灭系数 qP	0.71±0.03 b	0.84±0.01 a	0.62±0.02 c	0.76±0.01 b
电子传递速率 ETR	39.91±2.69 b	54.09±0.60 a	37.11±2.43 b	24.20±0.62 c

3 讨论

银合欢的鲜重、干重和叶绿素含量在光照时长 20 h·d⁻¹ 时最高，说明此时银合欢的有机物积累量最多，植物生长速度最快。有研究指出短光照有利于植物的增高但不利于植株干物质的积累，而长光照有利于干物质的积累但不利于植株伸长^[7]。此外，本研究表明光照 12 h·d⁻¹ 和 24 h·d⁻¹ 均对银合欢叶绿素有一定负面影响，这可能与植物叶绿体光合中心的补光色素蛋白复合体在长光照和短光照胁迫下受到了损伤有关^[20]。银合欢的 SOD、POD 活性随着光照时长的延长逐渐上升，MDA 含量也在光照时长 24 h·d⁻¹ 时达到最大值，说明长时间光照，如光照 24 h·d⁻¹ 下银合欢可能受到一定氧化损伤。相关研究也发现，黄瓜幼苗补光 8 h 分别比补光 0、2、4 h 的 MDA 含量高 22%、19.6%、17%^[21]，这与我们的研究结果一致；本研究中银合欢的 ETR、F_v/F_m 和 qP 均在 20 h·d⁻¹ 光照下有较大值，而此时 NPQ 较小，说明此时银合欢的光合作用能力较强。刘杰等^[20] 研究指出，水培生菜在光照时长为 8、12 和 16 h·d⁻¹ 时，F_v/F_m 先增加后降低，在光照时长为 12 h·d⁻¹ 时取得最大值，说明光照过长或过短都对生菜光合作用产生了胁迫。

与光照时长相似，银合欢鲜重、干重、叶绿素含量均在光强 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ 时有最大值。研究表

明适合的光强可以提高植物细胞内生长素的浓度，使细胞充分扩张、形成了更多的侧根并且使初根伸长，有助于植物生长^[22]。光强过低还会减少植物叶绿素的合成，使叶绿素含量降低，而光强过强则会使植物叶绿体中的基粒数量下降或被破坏^[20]。张悦研究了光强 50-300 μmol·m⁻²·s⁻¹ 下莴苣的生长情况，表明莴苣的最佳生长光强是 200 μmol·m⁻²·s⁻¹，此时莴苣的鲜重及叶绿素含量最高^[23]，这与我们的试验结果一致。

银合欢具有一定的耐盐碱能力，但在本研究中其鲜重、干重、株高、根长及叶绿素含量都随着盐度的升高迅速下降，在低盐度（7‰）时有最高值。高盐度能引起植物组织发生渗透胁迫并对植物产生毒性，并且有毒离子可在植物的根、茎和叶等器官中积累，导致植物的形态发生改变，产量减低^[24]。盐胁迫还会进一步导致叶绿体结构被降解，叶绿素合成前体被破坏，使植物的光合因子含量下降^[25]，生长受到抑制。我们的研究结果与 Bhutta^[26] 的盐度对小麦生产力影响的研究结果一致，盐度胁迫会抑制小麦根的伸长、降低株高和植株重量。Gerami 等^[27] 研究表明甜菊在盐度的胁迫下会导致钠镁离子和钠钾离子的比例缺失和降低，细胞器及叶绿素的超微结构被破坏，进而导致叶绿素含量降低。随着盐度的增加银合欢光合性能不断降低，MDA 含量也不断

增加,说明高盐度使银合欢发生了氧化损伤,并降低了其光合作用活性,这与 Sayyad^[28] 对高粱在不同盐度下的适应性研究结果基本一致。

银合欢的鲜重、干重、株高随着氮浓度的增加,先增后减,在氮浓度为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时有最大值。研究表明适当施加一定浓度的氮,可以提高小麦叶片同化二氧化碳的能力和蛋白质的含量^[29]。适当提高氮浓度也有利于植株生长,例如,较高的氮浓度比低氮浓度更有利于向日葵植株地上部分株高和干物质的增加^[30],中等氮浓度可降低棉花根系中脱落酸和水杨酸的含量,促进棉花主根及侧根的茎围和长度^[31]。银合欢叶绿素含量在氮浓度 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下有较大值,表明氮浓度过高和过低都会抑制银合欢叶绿素合成。研究表明,低氮增加了植物获取光能的能力,但同时会导致植物吸收和传输光能的能力下降,使植物光合作用受到抑制^[32]。此外,氮肥施用量不当不仅影响植物对氮素的吸收还会对其他营养元素吸收造成影响,例如氮素施加过少会导致梨树幼苗叶片变黄,根系变长,硝酸还原酶活性和叶绿素含量下降,氮素施加过多会导致根的生长停滞,硝酸还原酶活性和叶绿素含量下降^[33]。银合欢叶绿素荧光参数均在氮浓度 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时最佳。有研究表明,低氮抑制了木薯植物的羧化生化能力,并且增加了木薯 PS II 的热耗散,降低了电子传递速率和最大光合效率^[34]。油菜在中等和高氮浓度下的电子传递速率 PS II 和 PS I 的活性均高于低氮处理组。前人的研究结果与本研究结果基本一致。

银合欢的鲜重、干重、株高、根长、叶绿素含量均在磷浓度 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时有最大值,表明磷浓度过高或过低都不利于银合欢的生长及叶绿素的合成,这与 Zangani^[35] 的氮磷含量对油菜叶绿素影响的研究结果一致。研究表明过低和过高的磷含量会抑制柑橘植株对氮、铁、钾和锌等其他营养液离子的吸收,导致柑橘营养不良,生长受阻^[36]。Johnson^[37] 研究指出,高磷浓度降低了猪毛菜的高度和干物质含量不利于猪毛菜的生长。银合欢的 *ETR* 和 *qP* 在磷浓度为 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时有最大值, *NPQ* 有最小值,此时 F_v/F_m 也较高。磷含量的多少可以控制 PSII 的光合速率,缺磷状态会降低植物的光合碳循环的速度,叶绿体中的基粒数量下降,并导致植物的净光合速率降低^[38]。有研究指出,萝卜在缺磷的情况下,光合电子传递速率和量子产率都会下降,当磷浓度达到适宜值时光合电子传递速率和量子产率会达到最大值,光合作用增强^[39]。

4 结论

本研究在植物工厂中通过调控银合欢培育的光照条件、营养液盐度和氮磷含量优化银合欢幼苗的生长条件。得出在植物工厂中银合欢幼苗培育的最优光照条件为:光照时长 $20\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 和光照强度 $200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 最优营养液盐度及氮磷条件为:盐度 7‰、氮浓度 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、磷浓度 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此时,银合欢的形态指标(如鲜重、干重等)最佳,叶绿素含量、抗氧化酶活性和光合性能均表现较好。我们的研究为大规模培育银合欢优质苗提供了有益的科学参考。

参考文献:

- [1] 赵英,陈小斌,蒋昌顺.我国银合欢研究进展[J].热带农业科学,2006,26(4):55-58,63.
ZHAO Y, CHEN X B, JIANG C S. Advances on studies of *Leucaena* Benth in China [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2006, 26(4): 55-58,63. (in Chinese)
- [2] GRAAMANS L, BAEZA E, VAN DEN DOBBELSTEEN A, et al. Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency [J]. *Agricultural Systems*, 2018, 160: 31-43.
- [3] 崔羽,严思维,吴建召,等.不同林龄银合欢生长季土壤呼吸影响因素分析[J].武夷学院学报,2018,37(9):31-38.
CUI Y, YAN S W, WU J Z, et al. Analyzing the factors that affect soil respiration during the growing season in *Leucaena leucocephala* (Lam.) de wit [J]. *Journal of Wuyi University*, 2018, 37(9): 31-38. (in Chinese)
- [4] 徐文栋,李春兰.密闭式植物工厂内大黄育苗技术研究[J].南方农机,2022,53(12):25-27,31.
XU W D, LI C L. Study on seedling raising technology of Dahuang in closed plant factory [J]. *South Agricultural Machinery*, 2022, 53(12): 25-27,31. (in Chinese)
- [5] 黄思杰.植物工厂条件下不同基质对番茄产量和品质的影响[D].南京:南京农业大学,2013.
HUANG S J. Effects of different substrates on yield and quality of tomato cultivated in plant factory[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [6] 苗妍秀,曲梅,李伟,等.植物工厂中不同供液方式对辣椒育苗的影响[J].长江蔬菜,2012(6):33-36.
MIAO Y X, QU M, LI W, et al. Effects of different irrigation systems on pepper seedling in plant factory [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2012(6): 33-36. (in Chinese)
- [7] 陈永快,王涛,兰婕,等.植物工厂内LED光调控在作物栽培中的研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(23):40-46.
CHEN Y K, WANG T, LAN J, et al. Research progress of LED light regulation in plant factories in crop cultivation [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(23): 40-46. (in Chinese)
- [8] 刘文科,吴启保,查凌雁.LED连续光照的植物生理作用及植物工厂

- 应用策略[J]. *照明工程学报*, 2020, 31(5): 5–8, 21.
- LIU W K, WU Q B, ZHA L Y. Application strategies and physiological mechanisms of LED continuous light for plant factory with artificial light[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2020, 31(5): 5–8, 21. (in Chinese)
- [9] 季延海. 韭菜营养液栽培的关键技术[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- JI Y H. The key technology of nutrient solutions cultivation of Chinese chives[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [10] 刘青. 营养液配方对盆栽水芹生长和品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- LIU Q. Effect of nutrient solution formula on growth and quality of the potted water dropwort (*Oenanthe javanica* (Roxb) Wall.) [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020. (in Chinese)
- [11] 乔源. 氮磷钾供应对水培芹菜产量、品质及元素利用效率影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- QIAO Y. Effects of NPK on yield, quality and element utilization efficiency of hydroponic celery[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016. (in Chinese)
- [12] 李莉萍, 应东山, 王琴飞, 等. 银合欢种子研究进展[J]. *热带农业科学*, 2014, 34(2): 21–26.
- LI L P, YING D S, WANG Q F, et al. Research progress of *Leucaena* seeds[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2014, 34(2): 21–26. (in Chinese)
- [13] 蔡克强, 黄维南. 银合欢幼苗根瘤固氮特性研究[J]. *植物生理学通讯*, 1986(3): 35–37.
- CAI K Q, HUANG W N. Nitrogen fixation characteristics of nodules of *Acacia* seedlings[J]. *Plant Physiology Communications*, 1986(3): 35–37. (in Chinese)
- [14] 杨韩韩. 矿山废弃地生态修复技术与效应研究——以河南省鲁山县某铁矿区为例[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2012.
- YANG W W. Ecological restoration technology and effect research of abandoned mines ——Take an iron mining area in Lushan County of Henan Province for example[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2012. (in Chinese)
- [15] 过聪, 关伟, 曾祥国, 等. 不同营养液配方对水培白蝴蝶合果芋的影响[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(23): 87–93.
- GUO C, GUAN W, ZENG X G, et al. Influence of different nutrient solution formulations on hydroponic *Syngonium podophyllum* cv. White Butterfly[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(23): 87–93. (in Chinese)
- [16] LU T, YU H J, LI Q, et al. Improving plant growth and alleviating photosynthetic inhibition and oxidative stress from low-light stress with exogenous GR24 in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 490.
- [17] VENISSE J S, PAULIN J P, RISSSET M N. Mechanisms underlying disease and resistance in host plants of fire blight[J]. *Acta Hort*, 2002, 590(72): 467–468.
- [18] LACAN D, BACCOU J C. High levels of antioxidant enzymes correlate with delayed senescence in nonnetted muskmelon fruits[J]. *Planta*, 1998, 204(3): 377–382.
- [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [20] 刘杰, 胡笑涛, 王文娥, 等. 光强和光周期对水培生菜光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(8): 1784–1790.
- LIU J, HU X T, WANG W E, et al. Effects of light intensity and photoperiod on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of hydroponic lettuce[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(8): 1784–1790. (in Chinese)
- [21] 闫晓花, 郁继华. LED补光对温室黄瓜幼苗抗衰老及抗氧化酶系统的影响[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 392–398.
- YAN X H, YU J H. Effects of supplemental LED light on photosynthetic pigment contents and antioxidant enzyme activities of cucumber seedling leaves[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(2): 392–398. (in Chinese)
- [22] HALLIDAY K J, MARTÍNEZ-GARCÍA J F, JOSSE E M. Integration of light and auxin signaling[J]. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2009, 1(6): a001586.
- [23] 张悦. 不同光质、光照强度及光周期对苦苣生长特性及营养品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- ZHANG Y. Effects of different light quality, light intensity and photoperiod on growth characteristics and nutritional quality of chicory[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [24] ALAM M, KHAN M A, IMTIAZ M, et al. Indole-3-Acetic Acid Rescues Plant Growth and Yield of Salinity Stressed Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. *Gesunde Pflanzen*, 2020, 72: 87–95.
- [25] MADANI S M, PIRI S, SEDAGHATHOOR S. The response of three mandarin cultivars grafted on sour orange rootstock to salinity stress[J]. *International Journal of Fruit Science*, 2022, 22(1): 264–274.
- [26] BHUTTA T S, ZAFAR-UL-HYE M, SHAABAN M, et al. Influence of plant growth promoting rhizobacterial inoculation on wheat productivity under soil salinity stress[J]. *Phyton*, 2019, 88(2): 119.
- [27] GERAMI M, MAJIDIAN P, GHORBANPOUR A, et al. *Stevia rebaudiana* Bertoni responses to salt stress and chitosan elicitor[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants: an International Journal of Functional Plant Biology*, 2020, 26(5): 965–974.
- [28] SAYYAD-AMIN P, JAHANSOOZ M R, BORZOU EI A, et al. Changes in photosynthetic pigments and chlorophyll-a fluorescence attributes of sweet-forage and grain sorghum cultivars under salt stress[J]. *Journal of Biological Physics*, 2016, 42(4): 601–620.
- [29] JAYAWARDENA D M, HECKATHORN S A, BOLDT J K. Effects of Elevated Carbon Dioxide and Chronic Warming on Nitrogen (N)-Uptake Rate, -Assimilation, and -Concentration of Wheat[J]. *Plants (Basel)*, 2020, 9(12): 1689.
- [30] CECHIN I, DE FÁTIMA F T. Effect of nitrogen supply on growth and photosynthesis of sunflower plants grown in the greenhouse[J]. *Plant Science*, 2004, 166(5): 1379–1385.

- [31] CHEN J, LIU S D, ZHANG S P, et al. Nitrogen modulates cotton root morphology by affecting abscisic acid (ABA) and salicylic acid (SA) content [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67 (12) : 1722–1738.
- [32] FORNARI E Z, GAVIRAGHI L, BASSO C J, et al. Relationship between photosynthetic pigments and corn production under nitrogen sources [J]. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 2020, 50: 1–9.
- [33] CHEN G, WANG L, FABRICE M R, et al. Physiological and nutritional responses of pear seedlings to nitrate concentrations [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018: 1679.
- [34] CRUZ J L, MOSQUIM P R, PELACANI C R, et al. Photosynthesis impairment in cassava leaves in response to nitrogen deficiency [J]. *Plant and Soil*, 2003, 257 (2) : 417–423.
- [35] ZANGANI E, AFSABI K, SHEKARI F. Nitrogen and Phosphorus Addition to Soil Improves Seed Yield, Foliar Stomatal Conductance, and the Photosynthetic Response of Rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Agriculture*, 2021, 11 (6) : 483.
- [36] TU P F, DENG L S, LI J, et al. Effect of phosphorus on N, P, K, Mg accumulation and plant growth of different citrus rootstocks [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16 (1) : 819–836.
- [37] JOHNSON N C. Responses of *Salsola kali* and *Panicum virgatum* to mycorrhizal fungi, phosphorus and soil organic matter: implications for reclamation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1998, 35: 86–94.
- [38] SOBCZAK A, KOWALCZYK K, GAJC-WOLSKA J, et al. Growth, yield and quality of sweet pepper fruits fertilized with polyphosphates in hydroponic cultivation with LED lighting [J]. *Agronomy*, 2020, 10 (10) : 1560.
- [39] CETNER M D, KALAJI H M, BORUCKI W. Phosphorus deficiency affects the I-step of chlorophyll a fluorescence induction curve of radish [J]. *Photosynthetica*, 2020, 58 (2) : 671–681.

(责任编辑: 林海清)