

# 外源褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐幼苗 生理特性的缓解效应\*

刘贝宁<sup>1</sup>, 陈发兴<sup>2\*\*</sup>

(1. 福建农林大学 戴尔豪西大学联合学院(国际学院), 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 园艺学院, 福建 福州 350002)

**[摘要]** 为探讨褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐生理机制的影响, 以念珠刺桐幼苗为材料, 进行盐胁迫(100 mmol/L NaCl)下叶片喷施外源褪黑素(0, 50, 100, 150, 200  $\mu\text{mol/L}$ )处理, 研究外源褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐生长、光合效率及抗氧化作用的影响. 结果表明, 盐胁迫会显著抑制念珠刺桐的生长, 降低渗透调节和抗氧化能力, 以及光合作用. 而在盐胁迫下通过叶片喷施 100  $\mu\text{mol/L}$  褪黑素能够显著促进植株生长, 提高可溶性糖和可溶性蛋白含量, 减少电解质外渗, 降低丙二醛含量, 促进叶片中 SOD、POD、CAT 和 APX 活性的提高; 提高叶绿素和类胡萝卜素含量, 促进光合效率的提高; 但高浓度(150, 200  $\mu\text{mol/L}$ )外源褪黑素反而会产生一定程度的氧化胁迫和渗透胁迫. 因此, 100  $\mu\text{mol/L}$  外源褪黑素处理能较好地缓解盐胁迫下念珠刺桐的渗透胁迫、氧化胁迫和光合效能, 有利于促进念珠刺桐生长.

**[关键词]** 盐胁迫; 念珠刺桐; 抗氧化系统; 生理特性; 褪黑素

**[中图分类号]** S687 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5639(2024)03-0099-09

**DOI:** 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2024.03.014

土壤盐碱化是一个世界性资源和生态问题, 全球各种盐碱土壤面积占农业用地的 20%<sup>[1]</sup>. 中国是世界第三大盐碱地所在国, 有 9 900 万  $\text{hm}^2$  盐碱土地; 福建省海岸线绵延曲折, 拥有滨海盐渍旱地 5 240  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>. 福建滨海地区由于地理位置和地质基础的特殊性, 土壤含盐量存在高度异质性和明显的季节变化, 园林绿化植物生长受到严重影响<sup>[3]</sup>. 土壤盐渍化对植物的生长发育起到不利影响<sup>[4]</sup>, 其中渗透压的改变会引起植物体内离子平衡变化, 导致植物产生亚细胞水平的氧化胁迫, 造成植物盐胁迫的危害<sup>[5]</sup>. 因此, 开展植物对滨海盐渍化土壤的适应性及其开发利用, 有利于丰富滨海植物生物多样性.

念珠刺桐(*Erythrina tholloniana*)为豆科刺桐属落叶乔木, 原产于印度至大洋洲海岸林中, 我国主要分布于福建、广东、海南、台湾等低纬度临海地区. 念珠刺桐树身高大挺拔, 枝叶茂盛; 花形奇特, 花瓣次第开放. 其常被种植于近海岸旁, 成为滨海地区特色景观植物; 也适合用作公园绿地及风景区美化<sup>[6]</sup>. 念珠刺桐已成为福建滨海地区广泛种植的园林绿化树种, 开展盐胁迫下生理特性研究, 对于拓展滨海地区园林景观营造和生态环境建设具有重要意义.

褪黑素作为生长调节剂和抗氧化剂在调节植物响应环境胁迫中起着重要作用, 它通过直接清除活性氧, 提高抗氧化酶活性、光合效率和代谢物含量, 以及与其他植物激素相互作用, 从而提高植物的胁迫耐受性<sup>[7,8]</sup>. 已有研究表明, 盐胁迫下褪黑素可以调节植物的抗氧化系统, 保持离子稳态, 调控光合作用, 调节植物的抗氧化系统. 目前, 关于褪黑素缓解植物盐胁迫的应用集中在金盏菊<sup>[9]</sup>、萱草<sup>[10]</sup>、紫花苜蓿<sup>[11]</sup>、月季<sup>[12]</sup>等植物, 而褪黑素对念珠刺桐盐胁迫的相关研究尚未见报道, 本研究中以念珠刺桐为试验材料, 通过喷施外源褪黑素, 分析褪黑素对盐胁迫下植株生长、光合特性、抗氧化作用的影响, 揭示褪黑素缓解念珠刺桐盐胁迫的生理响应机制, 为滨海地区园林植物开发利用提供理论参考.

\* [收稿日期] 2024-05-07

[作者简介] 刘贝宁, 女, 福建泉州人, 福建农林大学在读本科生, 研究方向为园林植物.

\*\* [通信作者] 陈发兴, 男, 福建农林大学教授, 博士, 研究方向为园艺植物, E-mail: fxchen@fafu.edu.cn.

[基金项目] 福建省科技计划项目(2022N5016).

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

念珠刺桐 (*Erythrina tholloniana*) 种子由中国科学院西双版纳热带植物园提供, 在圆形塑料花盆中 (直径 13 cm、高度 14 cm) 装入高温灭菌的细沙 600 g, 念珠刺桐种子先用 0.5%  $\text{KMnO}_4$  溶液浸种消毒 20 min, 无菌水清洗冲洗 3~4 次, 然后播种于花盆中, 每盆播种 3 粒种子, 待出苗后每 5 d 每盆浇灌 Hoagland 营养液 100 mL, 以保证幼苗正常生长。

### 1.2 试验设计

待念珠刺桐幼苗生长至 90 d 时, 选择长势基本一致、健康的念珠刺桐植株, 每盆保留 2 株, 通过浇灌含 100 mmol/L NaCl 的 Hoagland 营养液进行盐胁迫处理, 以仅浇灌 (不含 NaCl) Hoagland 营养液为对照 (CK); 3 d 后对盐胁迫处理的植株进行叶面喷施褪黑素处理, 共设置 5 个处理浓度 (0, 50, 100, 150, 200  $\mu\text{mol/L}$ ), 分别记为 N、NT1、NT2、NT3、NT4, 每个处理 5 株, 重复 3 次, 随机区组排列。褪黑素溶液每次喷施于 19:00 进行, CK 和 N 处理喷施等量去离子水, 每隔 5 d 喷施 1 次, 连续喷施 4 次, 喷施量以叶面湿露不滴水为准。分别在处理第 7, 14, 21 d 取样检测生理指标, 第 21 d 同步进行生物量测定。

### 1.3 测定方法

生长指标测定。幼苗冲洗干净后, 用直尺测量幼苗地上部分茎基部到生长点的距离记为株高。将地上部和地下部分开, 分别称鲜质量, 置于烘箱中 105  $^{\circ}\text{C}$  杀青 10 min 后, 置于 80  $^{\circ}\text{C}$  烘至恒质量, 使用分析天平称其干质量。

生理指标测定。超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性测定均采用酶联免疫法, 测定步骤与所需试剂均来自试剂盒 (购自上海臻科生物科技有限公司); 丙二醛 (MDA) 采用气相色谱法测定<sup>[12]</sup>, 相对电导率 (REC) 采用电导率仪测定 (上海康仪仪器有限公司, DDS-320); 叶绿素和类胡萝卜素采用紫外-可见光谱法测定<sup>[13]</sup>, 可溶性糖 (SS) 采用蒽酮比色法测定<sup>[14]</sup>, 可溶性蛋白 (SP) 采用考马斯亮蓝 G-250 比色法<sup>[14]</sup>。

光合指标测定。在天气晴朗的上午 09:00—11:00 利用 CI-340 手持式光合测定系统 (美国 CID 公司) 测定胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、净光合速率 ( $P_n$ ) 等光合气体交换参数<sup>[15]</sup>。选取枝条顶芽往下第 2~3 个复叶的功能叶片进行测定; 环境条件控制为: 温度  $25 \pm 2$   $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{CO}_2$  浓度 28.62  $\mu\text{mol/L}$ , 光合有效辐射 (PAR) 1 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

### 1.4 数据处理

试验数据和图表利用 Excel 2019 软件进行处理, 显著性分析利用 SPSS 19.0 软件单因素 ANOVA 检验。试验数据均为 3 次重复, 统计结果用平均值和标准误差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐幼苗生长的影响

念珠刺桐在盐胁迫下株高和生物量均显著下降。由表 1 可知, 盐胁迫下念珠刺桐幼苗株高比 CK 处理下降 26.02%, 地上部和地下部的鲜质量分别下降 37.75% 和 49.15%。褪黑素处理能够缓解盐胁迫对念珠刺桐生长的抑制作用, 随着褪黑素浓度增加, 株高和生物量均呈现先升高后降低的变化; 其中 NT2 处理的株高和生物量均达到峰值, 其中株高、地上部鲜质量、地下部鲜质量分别比 N 处理增加 28.10%、50.60% 和 68.06%, 且与其他盐胁迫处理存在显著性差异。可见, 褪黑素缓解念珠刺桐盐胁迫具有浓度效应。

表 1 盐胁迫下褪黑素对念珠刺桐幼苗生长指标的影响

处理	株高/cm	鲜质量/g		干质量/g	
		地上部	地下部	地上部	地下部
CK	20.83 ± 1.61 <sup>a</sup>	29.46 ± 1.53 <sup>a</sup>	14.10 ± 0.32 <sup>a</sup>	5.63 ± 0.18 <sup>a</sup>	1.63 ± 0.15 <sup>a</sup>
N	15.41 ± 3.56 <sup>c</sup>	18.34 ± 1.13 <sup>c</sup>	7.17 ± 0.49 <sup>d</sup>	3.34 ± 0.32 <sup>d</sup>	0.79 ± 0.22 <sup>d</sup>
NT1	17.16 ± 1.45 <sup>d</sup>	20.11 ± 0.62 <sup>d</sup>	8.26 ± 0.51 <sup>c</sup>	3.71 ± 0.26 <sup>c</sup>	0.92 ± 0.11 <sup>c</sup>
NT2	19.74 ± 0.93 <sup>b</sup>	27.62 ± 1.94 <sup>b</sup>	12.05 ± 0.19 <sup>b</sup>	5.02 ± 0.11 <sup>b</sup>	1.31 ± 0.15 <sup>b</sup>

续表 1

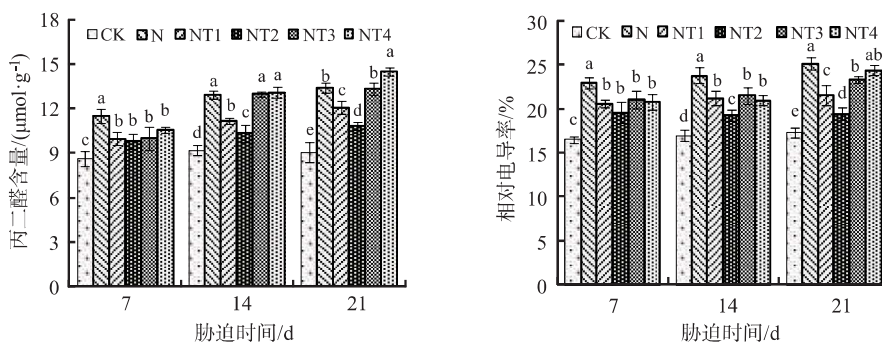
处理	株高/cm	鲜质量/g		干质量/g	
		地上部	地下部	地上部	地下部
NT3	18.26 ± 1.05 <sup>c</sup>	22.86 ± 1.31 <sup>c</sup>	9.18 ± 1.62 <sup>c</sup>	4.13 ± 0.16 <sup>c</sup>	1.14 ± 0.12 <sup>c</sup>
NT4	18.15 ± 2.39 <sup>c</sup>	21.77 ± 0.89 <sup>c</sup>	8.76 ± 0.15 <sup>c</sup>	3.97 ± 0.23 <sup>c</sup>	1.02 ± 0.13 <sup>c</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下表同.

## 2.2 褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐相对电导率和丙二醛含量的影响

丙二醛 (MDA) 是脂质过氧化反应的产物之一, 能反映植物膜脂过氧化的程度. 由图 1 (a) 可知, 所有处理的 MDA 含量均随着胁迫时间的增加而出现上升的变化. 盐胁迫下念珠刺桐的 MDA 含量均比 CK 处理显著上升, N 处理在胁迫 7, 14, 21 d 的 MDA 含量分别比 CK 处理增加 33.29%、40.79% 和 47.46%. 褪黑素处理后, 念珠刺桐的 MDA 含量随着浓度增加呈现出先下降后上升; 胁迫 7 d 时褪黑素处理的 MDA 含量显著低于 N 处理, 但处理间差异不显著; 胁迫 14 d NT2 处理的 MDA 含量比 N 处理降低 20.14%, NT3 和 NT4 的 MDA 含量显著增加, 且与 N 处理差异不显著; 胁迫 21 d NT2 处理的 MDA 含量显著低于其他褪黑素处理, NT3 处理与 N 处理差异不显著, NT4 处理显著高于 N 处理.

细胞内电解质的渗漏程度决定于细胞质膜透性. 由图 1 (b) 可知, 盐胁迫下念珠刺桐相对电导率 (REC) 显著上升, 且随着胁迫时间的增加, REC 呈现逐渐增加; 其中, 盐胁迫 21 d 后 N 处理的 REC 比 CK 处理升高 45.70%. 褪黑素对盐胁迫下 REC 具有缓解作用, 胁迫 7 d 的 REC 均比 N 处理显著下降, 但处理间差异不显著. 胁迫 14 d NT2 处理的 REC 出现下降, 比 N 处理降低 19.14%, 且与其他处理存在显著差异. 胁迫 21 d 时, REC 随着褪黑素浓度增加表现为先下降后上升, 其中 NT2 处理的 REC 出现最低值, 比 N 处理降低 22.84%, 褪黑素处理间存在显著差异.



(a) 丙二醛含量的变化

(b) 相对电导率的变化

注: 相同胁迫时间条件下, 不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同.

图 1 盐胁迫下外源褪黑素对念珠刺桐 REC 和 MDA 含量的影响

## 2.3 褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐抗氧化酶活性的影响

抗氧化酶活性是反映植物抗氧化能力的重要指标. 由图 2 (a) 可知, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性随着胁迫时间的增加而逐渐下降. N 处理降低念珠刺桐 SOD 活性, 且随着胁迫时间的增加 SOD 活性逐渐下降; 胁迫 7, 14, 21 d 的 SOD 活性分别比 CK 处理下降 39.92%、49.79% 和 58.04%. 盐胁迫下褪黑素能够提高 SOD 活性, 表现为随着褪黑素浓度增加而先上升后下降的变化, 其中 NT2 处理的 SOD 活性高于其他处理, 胁迫 7, 14, 21 d 时 SOD 活性分别比 N 处理增加 57.19%、68.38% 和 74.19%. NT3 和 NT4 处理在胁迫 14 d 前差异不显著, 胁迫 21 d 时 NT4 处理 SOD 活性低于 NT3 处理.

由图 2 (b) 可知, 念珠刺桐过氧化物酶 (POD) 活性均随着胁迫时间的增加而逐渐下降. N 处理显著降低念珠刺桐 POD 活性, 胁迫 7, 14, 21 d 的 POD 活性分别比 CK 处理下降 37.10%、53.54% 和 69.45%. 盐胁迫下外源褪黑素显著提高念珠刺桐 POD 活性, 且随着褪黑素浓度增加呈现先上升后下降的变化; 其中 NT2 处理的 POD 活性高于其他处理, 胁迫 7, 14, 21 d 时的 POD 活性分别比 N 处理增加 55.30%、54.20% 和 83.23%. 胁迫 7 d 时 NT2 处理的 POD 活性与 CK 处理差异不显著; NT3 和 NT4 处理

随着胁迫时间增加而逐渐下降,胁迫14 d时 NT4 显著低于 NT3 处理,胁迫21 d时二者间差异不显著.因此,褪黑素能够提高盐胁迫下念珠刺桐的 POD 活性.

由图2(c)可知,过氧化氢酶(CAT)活性也呈现出随着胁迫时间的增加而逐渐下降的变化.盐胁迫同样降低念珠刺桐CAT活性,胁迫7,14,21 d的CAT活性分别比CK处理下降38.41%、42.84%和61.58%,与CK处理差异显著.盐胁迫下外源褪黑素提高念珠刺桐CAT活性,随着褪黑素浓度增加呈现先上升后下降的变化;其中NT2处理的CAT活性高于其他处理,胁迫7,14,21 d时的CAT活性分别比N处理增加50.35%、47.64%和66.13%.胁迫7 d时NT2和NT3处理的CAT活性显著高于N处理,而NT1和NT4与N处理差异不显著;胁迫14 d时NT1、NT2和NT3处理均显著高于NT4处理,三者间差异不显著;胁迫21 d时NT2的CAT活性与CK处理不存在显著差异,NT3和NT4处理均高于NT1处理,且存在显著差异.因此,褪黑素能够减缓盐胁迫对CAT活性的影响.

由图2(d)可知,抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性也呈现出随着胁迫时间的增加而逐渐下降的情况.盐胁迫处理下念珠刺桐APX活性下降,胁迫7,14,21 d时N处理的APX活性分别比CK处理下降32.72%、47.54%和65.54%,与CK处理差异显著.喷施外源褪黑素提高盐胁迫下念珠刺桐APX活性,随着褪黑素浓度增加呈现先上升后下降的变化;其中NT2处理的APX活性高于其他处理,胁迫7,14,21 d时的APX活性分别比N处理提高44.20%、51.78%和78.80%.胁迫7 d时NT2、NT3和NT4处理的APX活性均显著高于NT1处理,与CK处理差异不显著;胁迫14 d时NT3和NT4处理的APX活性显著下降,NT3与NT1处理显著高于NT4处理,二者间差异不显著;胁迫21 d时NT1、NT3和NT4三者间差异不显著.因此,褪黑素能够提高盐胁迫下APX活性.

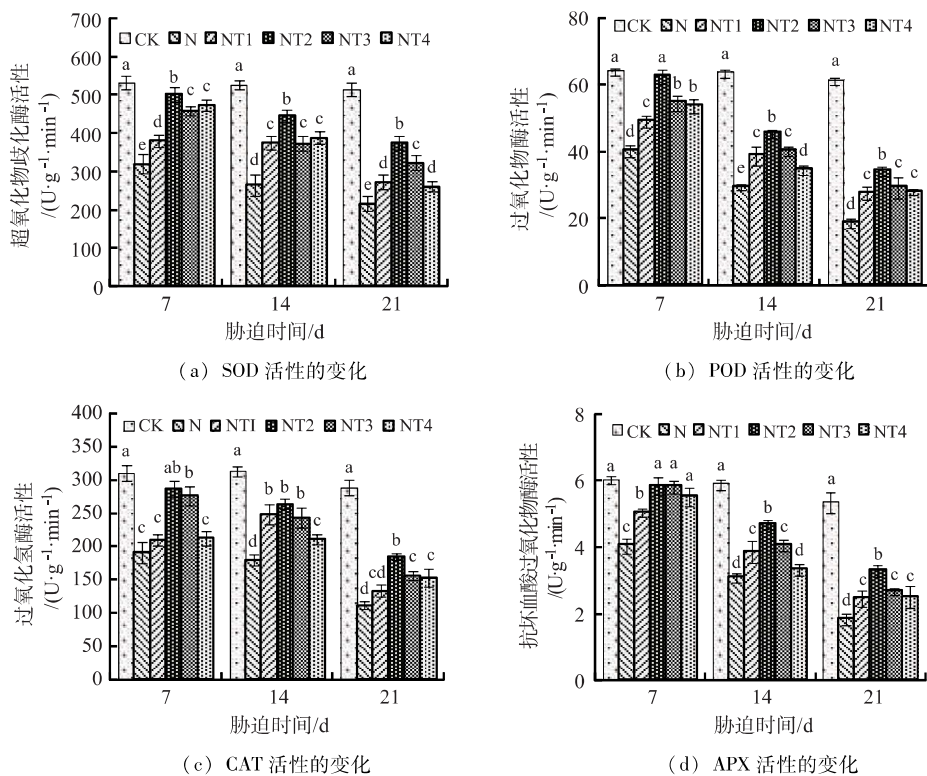


图2 盐胁迫下外源褪黑素对念珠刺桐 SOD、POD、CAT 和 APX 活性的影响

#### 2.4 褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

可溶性糖(SS)含量随着胁迫时间的增加而逐渐下降(图3(a)).盐胁迫处理下念珠刺桐的SS含量出现显著下降,胁迫7,14,21 d时N处理的SS含量分别比CK处理下降24.14%、37.22%和49.25%,且与CK处理存在显著差异.盐胁迫下喷施褪黑素提高念珠刺桐SS含量,随着褪黑素浓度增加SS含量呈现先上升后下降;其中,NT2处理的SS含量均达到最大值,胁迫7,14,21 d时的SS含量分别比N处理提高

20.49%、54.24%和88.93%。胁迫7 d时 NT2、NT3 和 NT4 处理的 SS 含量均显著高于 NT1 处理, 而 NT1 与 N 处理间差异不显著; 胁迫14 d时 NT2 处理的 SS 含量与 CK 处理差异不显著, 而 NT1 处理显著高于 N 处理; 胁迫21 d时 NT2 处理的 SS 含量与 CK 处理差异不显著, 其他处理的 SS 含量为 NT3 > NT4 > NT1, 且处理间存在显著差异。由此可见, 盐胁迫会减低可溶性糖含量, 而褪黑素能够提高盐胁迫下念珠刺桐可溶性糖含量。

由图3(b)可知, 念珠刺桐的可溶性蛋白(SP)含量随着胁迫时间的增加而逐渐下降。盐胁迫处理下念珠刺桐的 SP 含量出现下降, 胁迫7, 14, 21 d时 N 处理的 SP 含量分别比 CK 处理下降18.18%、24.84%和33.78%, 与 CK 处理存在显著差异。盐胁迫下 SP 含量随着褪黑素浓度的增加呈现先上升后下降的变化; 其中 NT2 处理的 SP 含量均高于其他处理, 胁迫7, 14, 21 d NT2 的 SP 含量分别比 N 处理提高20.74%、33.04%和48.98%。褪黑素对盐胁迫的缓解跟胁迫时间有关系, 胁迫7 d时 NT2、NT3 和 NT4 处理的 SP 含量均高于 NT1 处理, 且与 NT1 处理存在显著差异; 胁迫14 d和21 d时, NT2 和 NT3 处理的 SS 含量均降低, 但与 CK 处理不存在显著差异, NT1 与 NT4 处理的 SP 含量均高于 N 处理, 且存在显著差异。说明盐胁迫下褪黑素能够较好地提高可溶性蛋白含量。

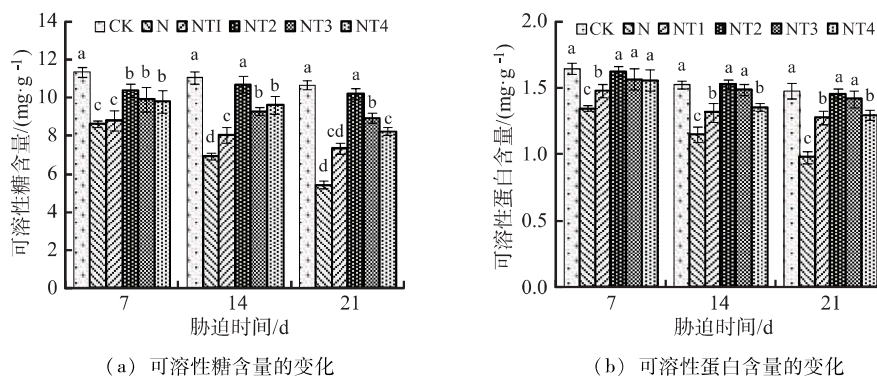


图3 盐胁迫下外源褪黑素对念珠刺桐可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

## 2.5 褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

光合色素是植物进行光合作用的关键物质, 对植物生长和发育具有重要作用。由图4可知, N 处理下念珠刺桐的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量与 CK 处理相比均出现显著下降, 且随着胁迫时间的增加, 其含量降为最低值; 胁迫21 d时叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量分别比 CK 处理下降52.34%、46.36%、50.26%和51.93%。而喷施褪黑素可提高盐胁迫下叶绿素和类胡萝卜素含量, 与 N 处理差异显著; 盐胁迫7 d时, NT2、NT3 和 NT4 处理的叶绿素和类胡萝卜素含量均显著高于 NT1 处理, 但与 CK 处理间差异不显著, 且 NT2、NT3 和 NT4 处理间差异不显著。胁迫14 d时, 随着褪黑素浓度增加念珠刺桐的叶绿素和类胡萝卜素含量呈现出先上升后下降的变化, 其中 NT2 处理的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均达到最大值, 分别比 N 处理提高53.58%、40.31%、48.68%和50.90%。胁迫21 d时, 叶绿素和类胡萝卜素含量继续下降, 褪黑素处理的叶绿素 a 和总叶绿素含量均低于 CK 处理, 且存在显著差异, 其中以 NT2 处理含量为最高; 而叶绿素 b 和类胡萝卜素含量则以 NT2 和 NT3 处理为较高, 且与 CK 处理不存在显著差异。说明盐胁迫下 100  $\mu\text{mol/L}$  褪黑素能够较好减少叶绿素和类胡萝卜素的分解, 有利于光合色素的生成。

## 2.6 褪黑素对盐胁迫下念珠刺桐光合作用参数的影响

净光合作用速率反映植物在光合作用过程中净合成有机物的速度。由图5(a)可知, 盐胁迫降低念珠刺桐的净光合速率 (Pn), 且随着时间增加而加剧。N 处理的净光合速率均显著低于 CK 处理, 胁迫7, 14, 21 d时的净光合速率分别比 CK 处理下降22.05%、29.84%和38.39%。而喷施褪黑素可缓解盐胁迫下念珠刺桐的净光合速率的降低。随着褪黑素浓度增加, 净光合速率呈现先上升后下降的变化; 其中, NT2 处理较好地提高了盐胁迫下净光合速率。胁迫7 d时, 褪黑素处理的净光合速率与 CK 处理差异不显著, 处理间也不存在显著差异; 胁迫21 d时, NT2 处理的净光合速率显著高于其他褪黑素处理, 但显著低于 CK 处理。说明盐胁迫下 100  $\mu\text{mol/L}$  褪黑素更有利于提高念珠刺桐净光合速率。

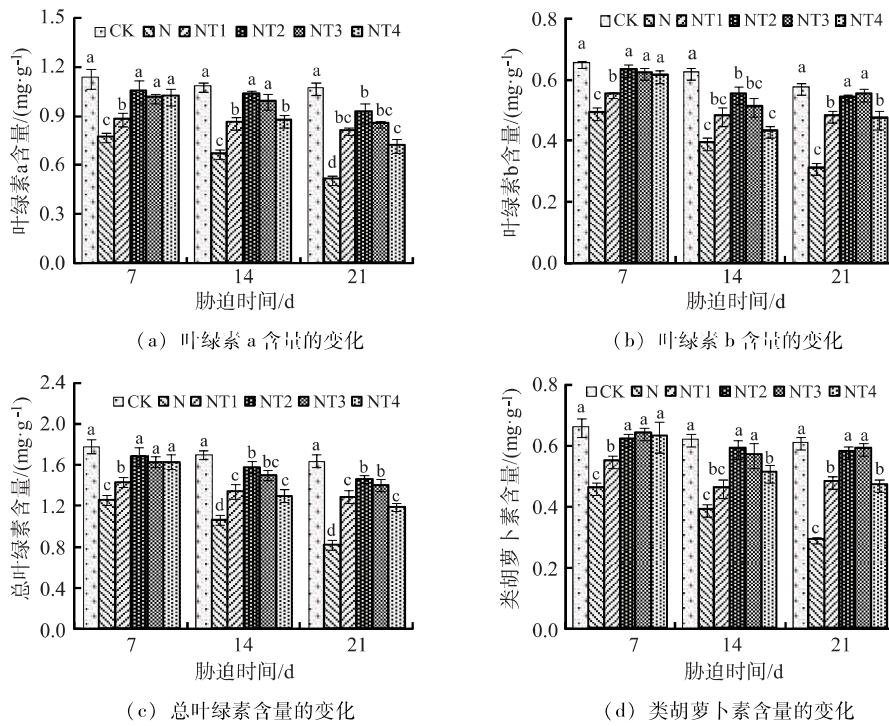
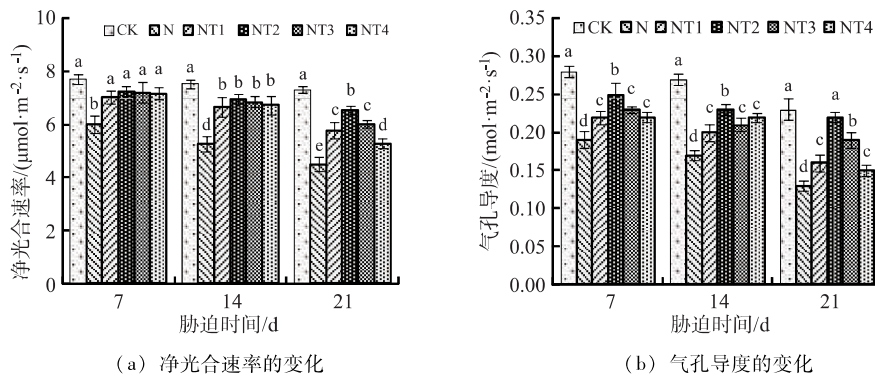


图 4 盐胁迫下外源褪黑素对念珠刺桐光合色素含量的影响

气孔导度 ( $G_s$ ) 是衡量植物气孔张开程度, 反映气体通过气孔的难易程度. 由图 5 (b) 可知, 盐胁迫下念珠刺桐的气孔导度明显下降, 且随着胁迫时间增加而显著下降. 胁迫 21d 时, N 处理的  $G_s$  比 CK 处理降低了 43.48%. 而喷施褪黑素可显著提高盐胁迫下念珠刺桐的  $G_s$ . 随着褪黑素浓度增加,  $G_s$  呈现先上升后下降的变化, 但随着胁迫时间的增加而逐渐下降. 其中, NT2 处理的  $G_s$  均达到最大值, 且与 NT1、NT3 和 NT4 处理间存在显著差异. 胁迫 21 d 时, NT2 处理的  $G_s$  与 CK 处理差异不显著.

蒸腾速率 ( $T_r$ ) 直接反映植物的水分利用能力, 也可反映气孔的开放程度. 由图 5 (c) 可知, 盐胁迫下念珠刺桐的  $T_r$  变化与气孔导度的变化基本一致. 在盐胁迫下, 褪黑素可显著提高念珠刺桐的  $T_r$ , 且随着褪黑素浓度增加呈现先上升后下降的变化, 并随着胁迫时间的增加而逐渐下降. 胁迫 21 d 时, N 处理的  $T_r$  比 CK 处理降低 46.56%, NT2 处理的  $T_r$  比 N 处理提高 63.80%.

胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 是  $CO_2$  同化速率与气孔导度的比值. 由图 5 (d) 可知, 盐胁迫会显著降低念珠刺桐的  $C_i$ , 且随着胁迫时间增加而降低. 胁迫 21 d 时, N 处理的  $C_i$  比 CK 处理下降 42.72%. 盐胁迫下褪黑素可提高念珠刺桐的  $C_i$ , 随着褪黑素浓度增加呈现先上升后下降的变化, 且随着胁迫时间的增加而逐渐下降; 其中 NT2 处理的  $C_i$  均为最高值. 胁迫 7 d 时, NT2、NT3 和 NT4 处理  $C_i$  均显著高于 NT1 处理, 三者间差异不显著; 胁迫 14 d 时, NT2 和 NT3 处理的  $C_i$  均显著高于 NT1 和 NT4 处理; 胁迫 21 d 时, NT2 处理的  $C_i$  显著高于其他处理, NT1 和 NT3 处理显著低于 NT4 处理, 而 NT4 处理与 N 处理差异不显著.



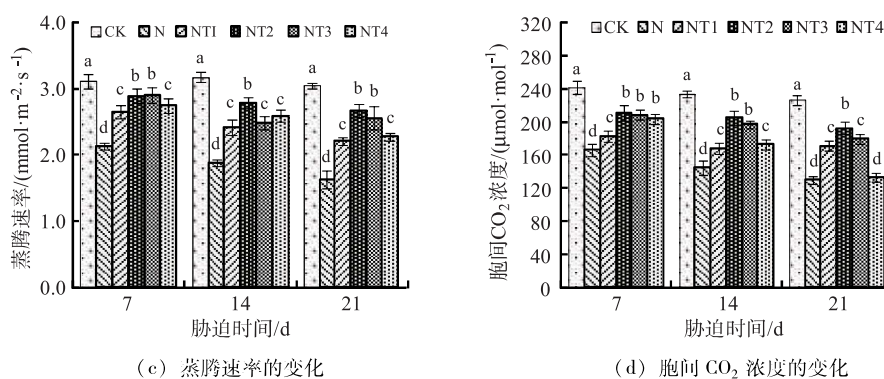


图5 盐胁迫下外源褪黑素对念珠刺桐光合作用参数的影响

### 3 讨论

逆境条件下植物通过氧化代谢途径产生活性氧 (ROS) 积累, 发生膜脂过氧化作用, 生成过量的丙二醛物质, 破坏细胞生物膜结构, 影响植物正常新陈代谢<sup>[16]</sup>. 抗氧化酶通过清除体内过量的活性氧物质, 维持植物体正常代谢, 在缓解植物逆境胁迫方面起到重要作用. 植物抗氧化酶 SOD、POD、CAT 和 APX 通过酶促反应, 可以清除细胞内 ROS, 减少 ROS 的积累, 降低脂质过氧化作用<sup>[17,18]</sup>. 张楠等<sup>[19]</sup>研究表明, 耐盐型花生品种具有较强的抗氧化酶活性和清除体内过量活性氧积累能力. 已有研究发现, 褪黑素可以增强鼠尾草<sup>[20]</sup>、银杏<sup>[21]</sup>等抗氧化酶的活性, 从而缓解盐胁迫伤害. 本研究中, 盐胁迫下念珠刺桐喷施外源褪黑素后, 抗氧化酶活性得到显著提高, 膜脂过氧化作用减弱, 维持盐胁迫下细胞膜结构的稳定性. 说明外源褪黑素通过激活抗氧化酶系统, 提高抗氧化酶活性, 增强细胞的 ROS 清除能力, 降低 ROS 对细胞质膜的损伤, 从而提高植物对盐胁迫的耐受能力.

植物细胞膜对细胞正常代谢起到调控作用. 逆境胁迫下过量 ROS 的累积, 引发膜脂过氧化作用, 促进 MDA 生成, 引起蛋白质和核酸等交联聚合, 损伤细胞膜结构, 导致电解质外渗, 提高相对电导率. 本试验表明, 盐胁迫会显著提高念珠刺桐的 MDA 含量和 REC, 喷施褪黑素后 MDA 含量和 REC 则显著降低. 这与平欧杂种榛<sup>[22]</sup>、金盏菊<sup>[9]</sup>的研究结果一致. 说明褪黑素参与活性氧的清除, 防止膜脂过氧化发生, 维持植物细胞膜结构的稳定, 保护植物细胞膜功能, 缓解盐胁迫对细胞膜的损伤, 有利于植物正常生长发育.

逆境条件下植物通过累积渗透调节物质, 增加细胞液浓度, 降低细胞内渗透势, 维持细胞膨压, 防止体内水分的流失<sup>[23]</sup>. 同时, 逆境下植物通过生成可溶性糖和可溶性蛋白等渗透调节物质, 提高细胞含水量, 减轻胁迫对细胞的伤害<sup>[24]</sup>. 本研究表明, 盐胁迫显著降低念珠刺桐可溶性糖和可溶性蛋白含量, 这与盐胁迫下提高菊芋<sup>[25]</sup>、木麻黄<sup>[26]</sup>等植物中渗透调节物质含量的结果不同. 喷施外源褪黑素后, 念珠刺桐的可溶性糖和可溶性蛋白含量显著上升; 这与张琦等<sup>[27]</sup>的研究结果相同. 说明外源褪黑素有利于促进渗透调节物质的生成, 提高盐胁迫下渗透调节物质含量, 进而缓解盐胁迫对植物的毒害.

叶绿素和类胡萝卜素是植物进行光合作用的主要色素, 决定着植物的光合性能. 盐胁迫对植物叶绿素生物合成途径起到抑制作用, 降低叶绿素生成, 加快叶绿素降解, 导致叶绿素含量和光反应系统活性下降<sup>[28-30]</sup>. 本研究表明, 盐胁迫显著降低念珠刺桐叶绿素和类胡萝卜素含量, 而外源褪黑素处理后, 叶绿素和类胡萝卜素含量则显著提高. 这可能是褪黑素促进叶绿体的抗坏血酸-谷胱甘肽循环效率的增强, 有利于活性氧清除速率的提高, 进而缓解盐胁迫对植物叶绿体的损伤. 这与在紫花苜蓿上施用褪黑素研究结果一致<sup>[31,32]</sup>.

光合作用是决定植物生存和生产力的关键生物过程, 盐胁迫通过气孔限制和非气孔限制降低植物叶片光合速率, 气孔限制对光合效率的影响大于非气孔限制<sup>[33,34]</sup>. 已有研究表明, 褪黑素可以缓解胁迫对植物光合作用影响<sup>[35,36]</sup>. 在本研究中, 盐胁迫引起念珠刺桐 Pn、Gs、Tr、Ci 下降, 这可能是由于盐胁迫引起念珠刺桐出现生理干旱而导致气孔关闭, 使 Ci 出现降低, 而 Gs 和 Ci 都下降表明盐胁迫下气孔限制是念珠刺桐叶片 Pn 降低的主要原因. 喷施褪黑素后 Pn 显著增加, Tr、Gs 和 Ci 也随之增加, 这可能是由于褪黑素减轻盐胁迫下念珠刺桐 PSII 的损伤过程, 有利于维持较高 PSII 活性. 由此可见, 褪黑素能够调

节盐胁迫下念珠刺桐叶片的光合功能,增强念珠刺桐的耐盐性.其机理主要是通过克服气孔限制和维持较高的光能利用效率,从而减轻盐胁迫对念珠刺桐叶片光合作用的影响.

#### 4 结论

综上所述,盐胁迫对念珠刺桐造成生理干旱,细胞膜系统损伤,抗氧化酶活性降低,光合作用能力下降等伤害.外源褪黑素可增加念珠刺桐的渗透调节物质含量,维持植物体内渗透平衡;提高SOD、POD、CAT和APX活性,增强念珠刺桐的抗氧化能力;降低MDA积累,维持细胞膜结构的功能,缓解盐胁迫对念珠刺桐的伤害.同时,褪黑素可以缓解盐胁迫对叶绿体的损伤,提高叶绿素含量和光能利用效率,促进盐胁迫下念珠刺桐的生长.研究表明,100 mmol/L NaCl胁迫下添加100  $\mu$ mol/L褪黑素对缓解念珠刺桐盐胁迫危害的作用效果最佳.本研究为褪黑素提高念珠刺桐耐盐性的生理机制提供理论依据.

#### [参考文献]

- [1] 朱建峰,崔振荣,吴春红,等.我国盐碱地绿化研究进展与展望[J].世界林业研究,2018,31(4):70-75.
- [2] 吴明辉.厦门市马銮湾新城滨海盐碱地园林苗木栽植及养护管理技术[J].南方农业,2023,17(19):93-96.
- [3] 卞阿娜,王文卿,陈琼.福建滨海地区耐盐园林植物选择与配置构想[J].南方农业学报,2013,44(7):1154-1159.
- [4] 丁燕,范紫云,周欢,等.盐胁迫对菠萝蜜幼苗生长及生理特性的影响[J].东南园艺,2021,9(5):31-40.
- [5] KANG S M, SHAFFIQUE S, INJAMUM-UL-HOQUE M, et al. Foliar treatment with melatonin modulates photosynthetic and antioxidant responses in *Silybum marianum* L. under salt stress [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 325: 112664.
- [6] 陈清海.基质、插穗与生根剂对刺桐属植物扦插成活率的影响[J].东南园艺,2023,11(3):201-204.
- [7] 刘德帅,姚磊,徐伟荣,等.褪黑素参与植物抗逆功能研究进展[J].植物学报,2022,57(1):111-126.
- [8] 左佳琦,谢佳恒,薛宇轩,等.褪黑素对缓解植物逆境胁迫作用的研究进展[J].基因组学与应用生物学,2014,33(3):709-715.
- [9] 范海霞,赵飒,李静,等.外源褪黑素对盐胁迫下金盏菊幼苗生长、光合及生理特性的影响[J].热带作物学报,2021,42(5):1326-1334.
- [10] 吴华鑫.外源褪黑素对盐胁迫下‘金娃娃’萱草的缓解效应[D].哈尔滨:东北农业大学硕士学位论文,2022.
- [11] 谭英,尹豪.盐胁迫下根施AMF和褪黑素对紫花苜蓿生长、光合特征以及抗氧化系统的影响[J].草业学报,2024,33(6):64-75.
- [12] 刘政,胡孙田,沈晓飞,等.外源褪黑素处理对月季幼苗盐胁迫的缓解效应[J].浙江农林大学学报,2020,37(5):957-962.
- [13] 刘家尧,刘新.植物生理学实验教程[M].北京:高等教育出版社,2010:13-15.
- [14] 张志良,瞿伟菁,李小方.植物生理学实验指导[M].4版.北京:高等教育出版社,2009:103-104.
- [15] 李佳赢,侯立伟,鲁绍伟,等.水分条件变化对典型园林灌木叶片水势及光合特征的影响[J].东北林业大学学报,2024,52(1):30-37.
- [16] 刘聪,董腊媛,林建中,等.逆境胁迫下植物体内活性氧代谢及调控机理研究进展[J].生命科学研究,2019,23(3):253-258.
- [17] KANWAL R, MAQSOOD M F, SHAHBAZ M, et al. Exogenous ascorbic acid as a potent regulator of antioxidants, osmo-protectants, and lipid peroxidation in pea under salt stress [J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 247.
- [18] AZIZI S, SEYED HAJIZADEH H, AGHAEE A, et al. In vitro assessment of physiological traits and ROS detoxification pathways involved in tolerance of *Damask rose* genotypes under salt stress [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 17795.
- [19] 张楠,张鹤,白百一,等.不同耐受型花生品种对盐胁迫的生理响应及其产量差异[J].沈阳农业大学学报,2024,55(2):129-137.
- [20] SHEIKHALIPOUR M, KULAK M, MOHAMMADI S A, et al. Foliar application of either melatonin or sodium nitroprusside regulates the antioxidant status, and the morpho-physiological attributes and essential oil production in sage (*Salvia officinalis* L.) under salinity stress [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 323: 112526.
- [21] 周丹,李海燕,王秀军,等.外源褪黑素对盐胁迫下银杏幼苗渗透调节和抗氧化能力的影响[J].应用生态学报,2024,35(2):431-438.



- [22] 罗达, 宋锋惠, 卢明艳, 等. 盐胁迫对平欧杂种榛根系生理生化特性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52 (4): 29-33.
- [23] 郭仰东, 张磊, 李双桃, 等. 蔬菜作物应答非生物逆境胁迫的分子生物学研究进展 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (6): 1167-1181.
- [24] 王倩. 逆境胁迫下短葶山麦冬生理生化响应与园林应用的研究 [D]. 福州: 福建农林大学硕士学位论文, 2012.
- [25] 马凯, 饶良懿. 盐胁迫下菊芋生长和生理指标对生物炭的响应 [J]. 草业科学, 2023, 40 (11): 2879-2888.
- [26] 李冠军, 陈珑, 余雯静, 等. 固体培养内生真菌对土壤盐胁迫下木麻黄幼苗渗透调节和抗氧化系统的影响 [J]. 植物生态学报, 2023, 47 (6): 804-821.
- [27] 张琦, 张文静, 袁宪凯, 等. 褪黑素对盐胁迫下普通菜豆芽期核酸修复的调控机制 [J]. 植物学报, 2023, 58 (1): 108-121.
- [28] 姬新颖, 唐佳莉, 李敖, 等. 盐胁迫下不同基因型核桃实生幼苗生长及生理响应 [J]. 林业科学, 2024, 60 (2): 65-77.
- [29] MOHAMMADI H, ABDOLLAHI-BASTAM S, AGHAEI A, et al. Foliar-applied silicate potassium modulates growth, phytochemical, and physiological traits in *Cichorium intybus* L. under salinity stress [J]. BMC Plant Biology, 2024, 24 (1): 288.
- [30] AL-MAQTARY E, AL-MADHAGI I, AL-MUREISH K. Salicylic acid alleviates the adverse of salinity stress in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) [J]. Asian Journal of Biology, 2024, 20 (4): 30-58.
- [31] 苏立娜, 麻冬梅, 李嘉文, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下两种紫花苜蓿生理及光合特性的影响 [J]. 草地学报, 2023, 31 (3): 726-732.
- [32] 赵丽娟, 麻冬梅, 王文静, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿幼苗抗氧化能力以及光合作用效率的影响 [J]. 西北植物学报, 2021, 41 (8): 1355-1363.
- [33] KUMARA K, AMPITIYAWATTAA D, PADMAPERUMA A, et al. Alleviation of salt-induced adverse effects on gas exchange, photosynthetic pigments content and chloroplast ultrastructure in *Gerbera jamesonii* L. by exogenous salicylic acid application [J]. Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry, 2021, 7 (2): 1-13.
- [34] DA SILVA VIANA J, DE SOUSA LOPES L, DE CARVALHO H H, et al. Differential modulation of metabolites induced by salt stress in rice plants [J]. South African Journal of Botany, 2023, 162: 245-258.
- [35] 洪震, 洪琮浩, 徐艳, 等. 外施褪黑素对干旱胁迫的长序榆光合与碳氮磷积累及其化学计量比的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2022, 50 (9): 29-34.
- [36] 苏兰茜, 白亭玉, 鱼欢, 等. 盐胁迫对 2 种菠萝蜜属植物幼苗生长及光合荧光特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (12): 2140-2150.

### Alleviating Effect of Exogenous Melatonin on *Erythrina tholloniana* Seedlings under Salt Stress

LIU Beining<sup>1</sup>, CHEN Faxing<sup>2</sup>

(1. FAFU-Dal Joint College (International College), Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian, China 350002;

2. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian, China 350002)

**Abstract:** To explore the effect of exogenous melatonin on the physiological mechanism of *Erythrina tholloniana* seedlings under salt stress. Using *Erythrina tholloniana* seedlings as materials, exogenous melatonin (0, 50, 100, 150, 200  $\mu\text{mol/L}$ ) was sprayed on the leaves under salt stress (100 mmol/L NaCl) to study the effects of exogenous melatonin on the growth, photosynthetic efficiency, and antioxidant activity of *Erythrina tholloniana* seedlings under salt stress. The results showed that salt stress significantly inhibited the growth of *Erythrina* seedlings, reduced osmotic regulation, antioxidant capacity, and photosynthetic efficiency. Under salt stress, spraying 100  $\mu\text{mol/L}$  melatonin on leaves can significantly promote plant growth, increase the content of soluble sugar and protein, reduce electrolyte leakage rate, decrease malondialdehyde content, and promote the increase of activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) and catalase (CAT) and ascorbic acid peroxidase (APX) in leaves; increasing the content of chlorophyll and carotenoids can promote the improvement of photosynthetic efficiency. However, high concentrations of exogenous melatonin (150, 200  $\mu\text{mol/L}$ ) actually lead to a certain degree of oxidative and osmotic stress. Therefore, 100  $\mu\text{mol/L}$  exogenous melatonin can effectively alleviate the osmotic stress, oxidative stress, and photosynthetic efficiency of *Erythrina tholloniana* seedlings under salt stress, which is beneficial for promoting the growth of *Erythrina tholloniana* seedlings.

**Key words:** salt stress; *Erythrina tholloniana*; antioxidant system; physiological characteristics; melatonin

(责任编辑: 陈伟超)