网络出版时间:2025-11-26 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.05.009

赤霉素和褪黑素对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗生长及生理特性的影响

唐红,薛娜娜,陶宣霖,王润龙,刘佳苗
(甘肃农业大学 林学院,甘肃 兰州 730070)

[摘 要] 【目的】探究赤霉素(gibberellin,GA)和褪黑素(melatonin,MT)对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗生长及生理特性的影响,筛选出能有效增强紫斑牡丹耐盐碱性的外源物质及其最适质量浓度,为合理利用植物激素改善紫斑牡丹耐盐碱性提供理论依据。【方法】以3年生紫斑牡丹'玉壶冰心'实生苗为材料,采用盆栽试验,共设10个处理,分别为:CK. 蒸馏水空白对照;S. 盐碱胁迫处理(50~150 mmol/L NaCl-$NaHCO_3$,其中n(NaCl)∶n($NaHCO_3$)=1∶1);SG_1. 盐碱胁迫+50 mg/L GA;SG_2. 盐碱胁迫+100 mg/L GA;SG_3. 盐碱胁迫+150 mg/L GA;SG_4. 盐碱胁迫+200 mg/L GA;SM_1. 盐碱胁迫+50 μmol/L MT;SM_2. 盐碱胁迫+100 μmol/L MT;SM_3. 盐碱胁迫+200 μmol/L MT;SM_4. 盐碱胁迫+400 μmol/L MT,测定不同处理紫斑牡丹幼苗生长指标、叶绿素含量、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,在此基础上对不同处理紫斑牡丹耐盐碱性进行了综合评价。【结果】与CK相比,盐碱胁迫处理紫斑牡丹幼苗叶片萎蔫发黄,生长明显被抑制;而喷施不同浓度GA和MT可缓解盐碱胁迫处理幼苗叶片枯萎黄化症状,显著改善幼苗株高、叶长、叶宽、根冠比,提高叶片相对含水量,增强叶绿素和可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸含量以及SOD、POD和CAT活性,减少膜脂过氧化产物MDA的积累。综合评价结果显示,不同处理紫斑牡丹'玉壶冰心'幼苗耐盐性的总得分排名依次为SM_3>SG_2>SG_3>SM_2>SM_4>SG_4>SG_1>SM_1>S。【结论】适宜浓度的GA和MT能增强盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗抗氧化和渗透调节能力,缓解盐碱胁迫对幼苗的伤害,提高幼苗耐盐碱能力,其中以100 mg/L GA和200 μmol/L MT处理效果较佳。

[关键词] 紫斑牡丹;盐碱胁迫;赤霉素;褪黑素;生长与生理特性
[中图分类号] S685.11;Q945.78 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)05-0091-10

Effects of gibberellin and melatonin on growth and physiological characteristics of *Paeonia rockii* seedlings under saline-alkali stress

TANG Hong, XUE Nana, TAO Xuanlin, WANG Runlong, LIU Jiamiao
(*College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: 【Objective】 The study aims to explore the effects of gibberellin (GA) and melatonin (MT) on the growth and physiological characteristics of *Paeonia rockii* seedlings under saline-alkali stress, and identify the exogenous substances that can effectively enhance the saline-alkali tolerance of *P. rockii* and their optimal mass concentrations, thereby providing a theoretical foundation for enhancing the saline-alkali tolerance of *P. rockii* via rational phytohormone application. 【Method】 Using 3-year-old seedlings of *P. rockii* 'Yuhubingxin' as materials, a pot experiment was conducted under 10 treatments: CK. Distilled water blank control; S. Saline-alkali stress treatment (50 − 150 mmol/L NaCl-$NaHCO_3$, n(NaCl)∶n($NaHCO_3$)=1∶1); SG_1. Saline-alkali

[收稿日期] 2025-03-25 [修回日期] 2025-06-03
[基金项目] 甘肃省牡丹工程研究中心项目(XZ20181120);甘肃省科技支撑计划项目(1604NKCA053)
[作者简介] 唐红(1969−),女,山东阳谷人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事园林植物遗传育种研究。E-mail:tangh@gsau.edu.cn

stress+50 mg/L GA;SG_2. Saline-alkali stress+100 mg/L GA;SG_3. Saline-alkali stress+150 mg/L GA;SG_4. Saline-alkali stress+200 mg/L GA;SM_1. Saline-alkali stress+50 μmol/L MT;SM_2. Saline-alkali stress+100 μmol/L MT;SM_3. Saline-alkali stress+200 μmol/L MT;SM_4. Saline-alkali stress+400 μmol/L MT. Growth indicators, chlorophyll content, antioxidant enzyme activities, and osmolyte contents of *P. rockii* seedlings under different treatments were measured. Based on these indices, a comprehensive evaluation of the salt-alkali tolerance of *P. rockii* under different treatments was conducted.【Result】Compared with CK, *P. rockii* seedlings under saline-alkali stress showed leaf wilting and yellowing, with significantly inhibited growth. Foliar application of different concentrations of GA and MT alleviated leaf wilting and yellowing symptoms, significantly improved seedling plant height, leaf length, leaf width, root-shoot ratio, and increased leaf relative water content. Treated seedlings exhibited elevated contents of chlorophyll, soluble protein, soluble sugar, proline, and activities of SOD, POD and CAT, and reduced accumulation of membrane lipid peroxidation product MDA. Comprehensive evaluation ranked salt tolerance for *P. rockii* seedlings under different treatments as SM_3>SG_2>SG_3>SM_2>SM_4>SG_4>SG_1>SM_1>S.【Conclusion】Appropriate concentrations of GA and MT can enhance the antioxidant and osmotic adjustment capabilities of *P. rockii* seedlings under saline-alkali stress, alleviate the damage to seedlings caused by saline-alkali stress, and improve the salt-alkali tolerance of seedlings. Treatment with 100 mg/L GA and 200 μmol/L MT demonstrate superior efficacy.

Key words: *Paeonia rockii*; saline-alkali stress; gibberellin; melatonin; growth and physiological characteristics

土壤盐碱化通常指土壤中存在高浓度的可溶性盐,其会干扰植物水分吸收和离子平衡,对植物造成渗透胁迫,从而影响植物光合和呼吸作用[1-2]。此外,盐碱土壤的高pH值也会影响植物对养分的吸收,抑制植物生长,引起叶片黄化和早衰,严重影响农林业生产和生态环境[3]。由于全球气候变暖和不合理灌溉施肥等原因,中国土壤盐碱化程度不断加剧,土壤盐渍化问题日益突出,盐碱地治理及植物耐盐碱性研究逐渐成为中国生态环境治理的研究热点[4]。

赤霉素(GA)和褪黑素(MT)是重要的植物生长调节剂,在植物生长发育进程及应对非生物胁迫方面发挥着重要的调控作用,如提高植物对盐碱胁迫的耐受能力、缓解盐害症状等[5-6]。紫斑牡丹(*Paeonia rockii*)属芍药科芍药属落叶灌木,其品种繁多,是常见的园林观赏花木,在城市园林绿化、荒山造林绿化等领域具有广泛的应用潜力[7]。当前有关紫斑牡丹的研究主要聚焦于栽培技术优化、杂交育种以及药用和油用价值的挖掘开发等领域,关于其耐盐性及外源物质GA和MT调控耐盐性方面鲜有报道。鉴于此,本研究以3年生盆栽紫斑牡丹'玉壶冰心'实生苗为材料,分析叶面喷施GA和MT对混合盐碱处理幼苗生长、叶绿素含量、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的影响,筛选可有效增强紫斑牡丹耐盐性的外源物质及最适浓度,为合理利用植物激素改善紫斑牡丹耐盐性及治理开发盐碱地提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取甘肃省兰州市榆中县官滩沟牡丹培育基地生长状况良好、长势一致的紫斑牡丹'玉壶冰心'3年生实生苗为试验材料,将其移植至直径18 cm、高20 cm的塑料花盆中,每盆1株,每盆基质1.2 kg,盆下有托盘,栽培基质为泥炭土和珍珠岩,按照体积比为3∶1混合而成,并放置于甘肃农业大学苗圃温室内养护备用。

1.2 试验方法

2024年6月4日进行盆栽试验,共设10个处理,分别为:(1)CK. 蒸馏水空白对照;(2)S. 盐碱胁迫处理;(3)SG_1. 盐碱胁迫+50 mg/L GA;(4)SG_2. 盐碱胁迫+100 mg/L GA;(5)SG_3. 盐碱胁迫+150 mg/L GA;(6)SG_4. 盐碱胁迫+200 mg/L GA;(7)SM_1. 盐碱胁迫+50 μmol/L MT;(8)SM_2. 盐碱胁迫+100 μmol/L MT;(9)SM_3. 盐碱胁迫+200 μmol/L MT;(10)SM_4. 盐碱胁迫+400 μmol/L MT。每处理3次重复。选用NaCl-$NaHCO_3$(n(NaCl)∶n($NaHCO_3$)=1∶1)溶液进行盐碱胁迫处理,具体方法为:先将紫斑牡丹幼苗依次用50,100,150 mmol/L NaCl-$NaHCO_3$处理,每盆浇灌200 mL,每2 d浇灌1

次，当NaCl-$NaHCO_3$浓度达到150 mmol/L时继续胁迫5 d。胁迫完成后，幼苗叶面喷施设定浓度GA和MT溶液，首次喷施完毕后，每隔2 d喷施1次，以叶面湿润无液滴垂落为准，共计喷施5次，以首次喷施激素开始计时，处理15 d后取不同处理‘玉壶冰心’幼苗中部功能叶片，各处理均采集5枚叶片，并重复3次，去除叶脉后置于－80 ℃超低温冰箱保存，用于各项生理指标测定。

1.3　测定指标及方法

1.3.1　生长指标　在试验处理前和处理后，用精度为0.1 mm的直尺测量试验苗株高（基部至茎尖），游标卡尺测定已标记试验苗中上部成熟小叶的叶长及叶宽，以处理前后测量值的差值作为株高、叶长、叶宽的相对生长量。试验结束后，将幼苗地上部和根系分开，置于烘箱105 ℃杀青10 min，80 ℃烘干至质量恒定，冷却后称其干质量，并计算根冠比（根系干质量/地上部干质量，R/S）。测定各指标时均设3次重复。

1.3.2　生理指标　叶片相对含水量（RWC）采用烘干称重法测定；叶绿素a、b和总含量采用丙酮提取法测定；可溶性糖（SS）含量采用蒽酮比色法测定；可溶性蛋白（SP）含量采用考马斯亮蓝法测定；丙二醛（MDA）含量采用硫代巴比妥酸法测定；脯氨酸（Pro）含量采用酸性茚三酮法测定；超氧化物歧化酶（SOD）活性采用氮蓝四唑光化还原法测定；过氧化物酶（POD）活性采用愈创木酚法测定，过氧化氢酶（CAT）活性采用紫外吸收法测定[8-9]。各指标测定均重复3次。

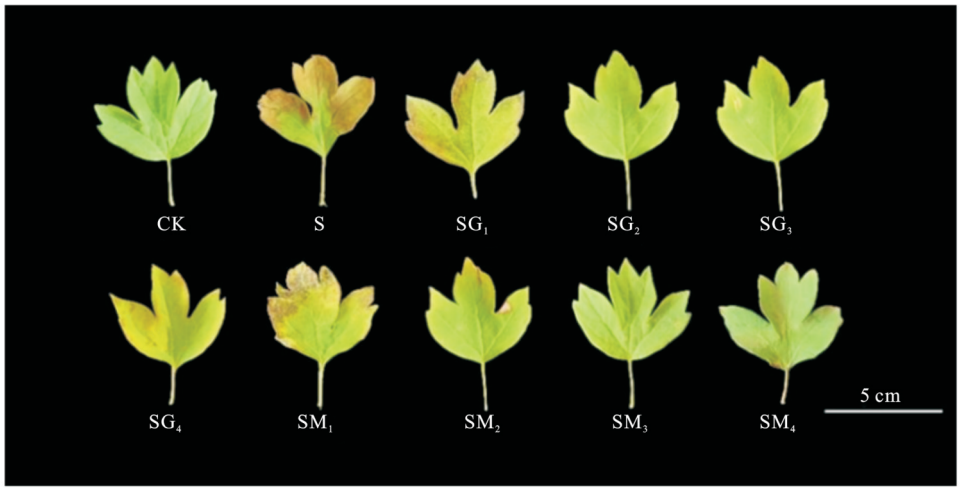
1.4　数据处理

采用Microsoft Excel和Origin 2021进行数据整理和做图，用SPSS 27.0进行单因素方差分析、相关性分析及主成分分析。

2　结果与分析

2.1　赤霉素和褪黑素对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗生长的影响

在盐碱胁迫（S）下，紫斑牡丹‘玉壶冰心’幼苗叶片萎蔫发黄；之后在不同浓度GA和MT处理后幼苗叶片萎蔫状态均得到不同程度缓解，且缓解效果因激素浓度不同而异。其中SM_3处理幼苗叶片萎蔫状态缓解效果最显著，幼苗叶片明显复绿；其次是SG_2和SG_3处理，幼苗枯萎黄化也有效缓解，生长良好；其余处理幼苗叶片萎蔫有所缓解但仍明显发黄，均与S处理差异不明显（图1）。



图示叶片为二回复叶的顶生小叶。CK为空白对照；S表示盐碱胁迫处理；SG_1、SG_2、SG_3、SG_4分别表示盐碱胁迫后叶面喷施50，100，150，200 mg/L GA处理；SM_1、SM_2、SM_3、SM_4分别表示盐碱胁迫后叶面喷施50，100，200，400 μmol/L MT处理。下同。

The illustration shows the terminal leaflet of a bipinnate compound leaf. CK is the blank control; S indicates salt-alkali stress; SG_1, SG_2, SG_3, and SG_4, respectively, represent the foliar spray of 50, 100, 150, and 200 mg/L GA after saline-alkali stress; SM_1, SM_2, SM_3, and SM_4, respectively, represent the foliar spray of 50, 100, 200, and 400 μmol/L MT after saline-alkali stress. The same below.

图1　赤霉素和褪黑素对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗叶片表型的影响

Fig. 1　Effects of gibberellin and melatonin on leaf phenotype of *P. rockii* seedlings under salt-alkali stress

表1显示，在盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗生长受到显著抑制，幼苗株高、叶长、叶宽相对生长量分别比CK显著降低55.64%，34.38%，41.67%（$P<0.05$），根冠比较CK显著增加3.03%。与S处理相比，叶面喷施GA和MT后，紫斑牡丹幼苗各形态指标大多有不同程度增加，并随GA和MT浓度的升高呈先升后降趋势。其中，幼苗株高、叶宽相对生长量在SG_2处理下增幅较大，与S处理相比分别显

著增加了105.33%,57.14%($P<0.05$),但仍显著低于CK;幼苗叶长相对生长量在SG_2和SM_3处理下增幅较大,较S处理均显著增加了33.33%,但仍显著低于CK;根冠比在SG_2处理下最高,分别比CK和S显著增加了12.12%和8.82%。说明喷施外源GA和MT能在一定程度上缓解盐碱胁迫对幼苗生长的抑制作用,其中SG_2处理总体效果最佳,其次为SM_3处理。

表1 赤霉素和褪黑素对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗生长的影响

Table 1 Effects of gibberellin and melatonin on growth of *P. rockii* seedlings under saline-alkali stress

处理 Treatment	株高相对生长量/cm Relative plant height growth	叶长相对生长量/cm Relative leaf length growth	叶宽相对生长量/cm Relative leaf width growth	根冠比 Root-shoot ratio
CK	3.81±0.11 a	0.32±0.01 a	0.24±0.02 a	1.32±0.03 c
S	1.69±0.01 f	0.21±0.02 d	0.14±0.01 e	1.36±0.02 b
SG_1	2.41±0.19 d	0.24±0.01 cd	0.17±0.01 cd	1.39±0.01 b
SG_2	3.47±0.02 b	0.28±0.01 b	0.22±0.01 b	1.48±0.03 a
SG_3	3.29±0.06 b	0.24±0.01 cd	0.16±0.01 d	1.46±0.03 a
SG_4	2.83±0.04 c	0.21±0.01 d	0.14±0.01 e	1.37±0.07 b
SM_1	2.16±0.02 e	0.22±0.01 d	0.14±0.00 e	1.36±0.02 b
SM_2	2.85±0.30 c	0.25±0.02 c	0.17±0.01 d	1.38±0.03 b
SM_3	3.43±0.06 b	0.28±0.02 b	0.20±0.01 c	1.45±0.08 ab
SM_4	2.62±0.28 cd	0.21±0.02 d	0.19±0.01 c	1.40±0.15 b

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 赤霉素和褪黑素对盐碱胁迫下紫斑牡丹叶片相对含水量和叶绿素含量的影响

由表2可知,紫斑牡丹'玉壶冰心'幼苗叶片相对含水量和叶绿素含量在盐碱胁迫(S)下均比CK显著下降($P<0.05$),相对含水量和叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量降幅分别为21.78%,38.10%,50.79%,43.26%。与S相比,4种浓度GA和MT处理下,紫斑牡丹幼苗相对含水量和叶绿素含量均有所升高,且存在明显的浓度效应,即随着激素浓度的升高呈先升后降趋势,均在SG_2和SM_3处理下增幅较大,处理效果最显著,SG_2和SM_3处理相对含水量和叶绿素含量与CK相近,差异均不显著($P>0.05$)。幼苗叶片相对含水量、叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量在SG_2处理下分别较S处理显著增加20.05%,49.28%,72.33%,57.35%,在SM_3处理下分别较S处理显著增加20.50%,51.63%,75.78%,55.81%($P<0.05$)。这表明盐碱胁迫会降低紫斑牡丹幼苗叶片细胞的保水能力,并抑制其光合作用;叶面喷施适宜浓度的GA和MT溶液能够有效缓盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗叶片失水及光合色素分解,确保水分运输、光合作用的正常进行。

表2 GA和MT对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗叶片相对含水量和叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of GA and MT on relative water content (RWC) and chlorophyll content in leaves of *P. rockii* seedlings under saline-alkali stress

处理 Treatment	相对含水量/% Relative water content	叶绿素a含量/(mg·g^{-1}) Chlorophyll a content	叶绿素b含量/(mg·g^{-1}) Chlorophyll b content	叶绿素总含量/(mg·g^{-1}) Total chlorophyll content
CK	87.01±2.07 a	4.60±0.22 a	2.96±0.22 a	7.58±0.26 a
S	69.13±1.62 d	2.85±0.11 d	1.46±0.09 d	4.30±0.10 d
SG_1	74.58±1.77 c	3.47±0.04 c	1.73±0.05 c	5.21±0.04 c
SG_2	83.00±1.28 ab	4.26±0.22 ab	2.51±0.03 ab	6.77±0.21 ab
SG_3	80.02±2.47 b	4.11±0.05 b	1.95±0.05 bc	6.06±0.17 b
SG_4	78.41±1.59 b	3.93±0.02 bc	1.75±0.03 c	5.73±0.06 bc
SM_1	73.77±0.67 c	3.64±0.05 c	1.68±0.06 c	5.31±0.15 c
SM_2	79.90±0.89 b	4.09±0.04 b	2.15±0.08 b	6.24±0.08 b
SM_3	83.30±3.90 ab	4.33±0.12 ab	2.56±0.11 ab	6.89±0.15 ab
SM_4	77.76±0.44 b	4.10±0.06 b	2.14±0.03 b	6.25±0.07 b

2.3 赤霉素和褪黑素对盐碱胁迫下紫斑牡丹渗透调节物质和MDA含量的影响

表3显示,各处理紫斑牡丹'玉壶冰心'幼苗叶片中SP、SS、Pro和MDA含量均较CK显著增加。其中,幼苗叶片SP含量在盐碱胁迫(S)下比CK显著增加了48.13%,在GA和MT处理后均显著高于

CK和S处理，并随着激素浓度增加呈先增后降的趋势，SM_3处理最高，SG_3处理次之，两者分别较S处理显著增加84.29%和62.47%（$P<0.05$）。叶片SS含量在S处理下较CK显著增加了45.11%，在叶面喷施GA和MT后进一步上升，且除SG_4、SM_1、SM_4处理外增幅均达到显著水平，并以SG_2、SG_3、SM_3处理较高，分别比S处理显著增加了26.27%，22.26%，16.65%。叶片Pro含量在S处理下比CK显著增加138.23%（$P<0.05$），在各浓度GA和MT处理下又均比S处理显著提高，并在SM_2处理时最高，较S处理显著提高169.54%。同时，紫斑牡丹叶片中MDA含量在S处理下比CK显著增加了111.39%；在4种浓度的GA和MT处理后，叶片中的MDA含量均较S处理显著下降，并以SG_3和SM_3处理降幅较大，分别较S处理显著降低38.14%和39.88%，但仍显著高于CK（$P<0.05$）。以上结果说明盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗细胞受损严重，叶面喷施适宜浓度GA和MT可显著降低盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗叶片中的MDA含量，促进SP、SS和Pro含量累积，有效减轻膜脂质的过氧化程度，从而增强其耐盐碱性。

表3　GA和MT对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗叶片SP、SS、Pro和MDA含量的影响

Table 3　Effects of GA and MT on the contents of SP, SS, Pro, and MDA in leaves of *P. rockii* seedlings under saline-alkali stress

处理 Treatment	SP含量/(mg·g^{-1}) SP content	SS含量/(mg·g^{-1}) SS content	Pro含量/(μg·g^{-1}) Pro content	MDA含量/(mmol·g^{-1}) MDA content
CK	3.76±0.16 e	95.26±2.01 d	435.97±16.31 g	9.78±0.13 g
S	5.56±0.21 d	138.24±1.56 c	1 038.61±71.09 f	20.68±0.08 a
SG_1	6.88±0.16 c	156.89±1.44 b	1 405.84±58.80 de	18.31±0.13 b
SG_2	7.19±0.31 c	174.55±5.08 a	2 027.31±81.54 c	14.11±0.32 e
SG_3	9.03±0.28 b	169.00±0.92 ab	1 471.75±48.93 de	12.80±0.47 f
SG_4	6.74±0.38 c	143.06±1.21 c	1 349.34±58.80 e	15.29±0.23 d
SM_1	7.37±0.11 c	148.87±0.41 bc	1 904.90±86.31 c	17.00±0.55 c
SM_2	8.30±0.28 bc	152.79±5.60 b	2 799.44±28.25 a	14.73±0.08 de
SM_3	10.25±0.16 a	161.26±3.39 b	2 319.21±101.85 b	12.43±0.24 f
SM_4	6.64±0.96 c	146.57±1.92 bc	1 697.74±56.50 d	15.51±0.43 d

2.4　赤霉素和褪黑素对盐碱胁迫下紫斑牡丹抗氧化酶活性的影响

由表4可知，紫斑牡丹‘玉壶冰心’幼苗叶片中抗氧化酶SOD、POD、CAT活性在各处理下均较CK显著提高，其中在盐碱胁迫（S）下分别比CK显著增加了38.62%，181.31%，114.34%（$P<0.05$）；在4种浓度GA和MT处理后，SOD、POD和CAT活性均不同程度高于S处理，且随着激素浓度的增加呈先增后减趋势，但增幅大多达显著水平。紫斑牡丹叶片SOD、POD活性在SG_2和SM_3处理下增长幅度较大，SOD活性分别较S处理显著增加21.60%，18.53%，POD活性分别较S处理显著增加了92.61%，79.31%（$P<0.05$），但SOD活性在各浓度GA和MT处理间大多无显著差异，说明适宜浓度GA和MT处理对幼苗叶片POD活性的促进作用更显著。叶片CAT活性在SM_3处理时最高，SG_3处理次之，二者差异显著且分别较S处理显著增加77.99%和63.94%（$P<0.05$）。可见，紫斑牡丹幼苗受到盐碱胁迫后激发了自身的氧化应激保护机制，能通过增强抗氧化酶活性来缓解氧化损伤；适宜浓度的GA和MT处理有助于提高幼苗在盐碱胁迫下的抗氧化酶活性，有效增强植株抗氧化能力。

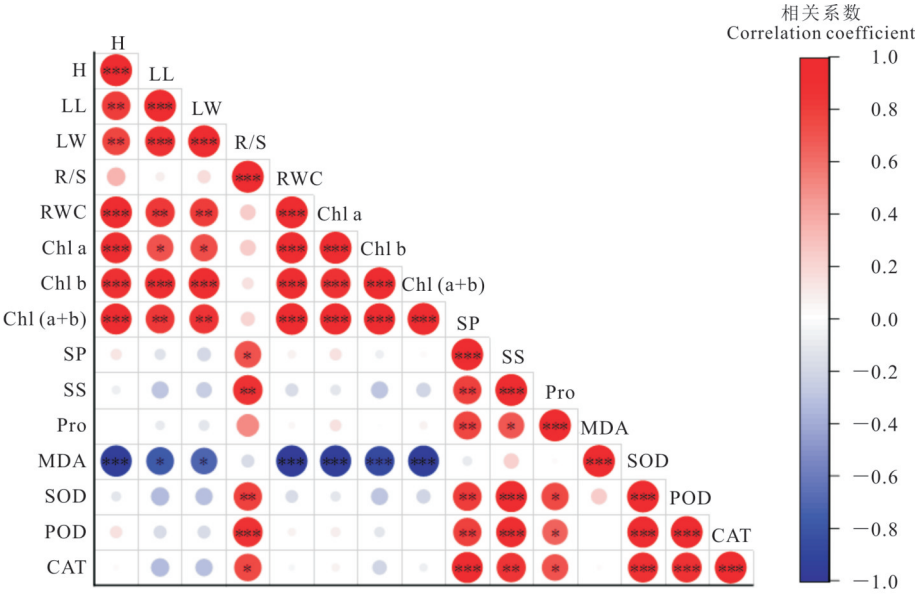
表4　GA和MT对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗叶片SOD、POD、CAT活性的影响

Table 4　Effects of GA and MT on the activities of SOD, POD, CAT in leaves of *P. rockii* seedling under saline-alkali stress　　U/g

处理 Treatment	SOD活性 SOD activity	POD活性 POD activity	CAT活性 CAT activity	处理 Treatment	SOD活性 SOD activity	POD活性 POD activity	CAT活性 CAT activity
CK	63.06±0.33 d	31.17±1.04 f	94.40±0.54 f	SG_4	96.73±0.64 b	141.00±3.97 b	283.82±0.83 c
S	87.40±0.45 c	87.67±3.51 e	202.31±2.49 e	SM_1	93.38±1.50 bc	100.33±6.79 d	254.44±9.23 cd
SG_1	96.23±1.08 b	109.67±3.75 cd	242.26±3.20 d	SM_2	97.23±1.01 b	118.50±3.04 c	275.37±1.61 c
SG_2	106.26±0.54 a	168.83±4.04 a	268.69±1.77 c	SM_3	103.56±1.19 ab	157.17±2.84 ab	362.10±13.63 a
SG_3	98.08±0.81 b	144.50±1.73 b	331.67±3.71 b	SM_4	91.81±0.93 bc	102.50±3.50 d	275.00±14.07 c

2.5 赤霉素和褪黑素处理紫斑牡丹耐盐碱性的综合评价

2.5.1 相关性分析 赤霉素和褪黑素及盐碱胁迫处理紫斑牡丹幼苗各项指标的相关性分析结果见图2。



H、LL、LW分别表示株高、叶长、叶宽相对生长量;R/S表示根冠比;RWC表示相对含水量;Chl a、Chl b、Chl (a+b)分别表示叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量;SP、SS、Pro分别表示可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸;MDA表示丙二醛;SOD、POD、CAT分别表示超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶。下同。*、**和***分别表示在$P<0.05$、$P<0.01$和$P<0.001$水平显著相关。红色表示正相关,颜色越深相关性越强。

H, LL, and LW represent the relative growth of plant height, leaf length and leaf width; R/S represents root-shoot ratio; RWC represents relative water content; Chl a, Chl b, and Chl (a+b) represent chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll; SP, SS, and Pro, represent soluble protein, soluble sugar, and proline; MDA represents malondialdehyde; SOD, POD, and CAT represent superoxide dismutase, peroxidase, and catalase, respectively. *, ** and ***indicate significant correlation at $P<0.05$, $P<0.01$ and $P<0.001$ levels, respectively. Red indicates positive correlation; darker shades represent stronger correlations. The same below.

图2 赤霉素和褪黑素及盐碱胁迫处理紫斑牡丹幼苗各项指标相关性分析热图

Fig. 2 Correlation heatmap of various indexes in *P. rockii* seedlings treated with gibberellin, melatonin and saline-alkali stress

图2表明,植株株高相对生长量(H)与叶长相对生长量(LL)、叶宽相对生长量(LW)呈极显著正相关($P<0.01$);根冠比(R/S)与可溶性糖(SS)和SOD、POD呈极显著正相关($P<0.01$),与可溶性蛋白(SP)和CAT呈显著正相关($P<0.05$);叶片相对含水量(RWC)与叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)、叶绿素总含量[Chl(a+b)]呈极显著正相关($P<0.001$);SP与SS、脯氨酸(Pro)呈显极显著正相关($P<0.01$);MDA与H、RWC、Chl a、Chl b、Chl (a+b)呈极显著负相关($P<0.001$),与LL、LW呈显著负相关($P<0.05$);SOD与POD、CAT呈极显著正相关($P<0.01$)。说明外源激素GA和MT能诱导抗性酶活性与渗透调节物质含量增加,帮助植物抵抗盐碱胁迫。

2.5.2 主成分分析 不同处理紫斑牡丹'玉壶冰心'各指标经主成分分析后,结果(图3)显示主要分离出2个主成分,其中第一主成分(PC1)方差贡献率为49.42%,第二主成分(PC2)方差贡献率为38.92%,累计方差贡献率达88.34%,表明前2个主成分可表征不同处理'玉壶冰心'幼苗的生长态势。此外,CK和S、SM_3和S、SG_2和S在PC1和PC2中差异明显,说明适宜水平GA和MT处理对盐碱胁迫'玉壶冰心'紫斑牡丹幼苗具有明显影响。

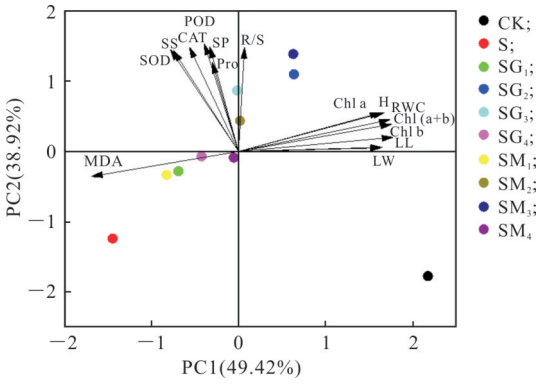


图3 赤霉素和褪黑素及盐碱胁迫处理紫斑牡丹幼苗各指标间的主成分分析

Fig. 3 PCA of indicators in *P. rockii* seedlings treated with gibberellin, melatonin and saline-alkali stress

由表5可得，PC1中，H、LL、LW、RWC、Chl a、Chl b、Chl（a+b）、MDA等8项指标的贡献较大；PC2中，R/S，SP、SS、Pro以及SOD、POD、CAT活性等7项指标的贡献较大。

表5　赤霉素和褪黑素及盐碱胁迫处理紫斑牡丹幼苗各指标主成分的载荷矩阵及方差贡献率

Table 5　PCA Loading matrix and variance contribution rates for various indexes in *P. rockii* seedlings treated with gibberellin，melatonin and saline-alkali stress

指标 Index	主成分1 PC1	主成分2 PC2	权重 Weight	指标 Index	主成分1 PC1	主成分2 PC2	权重 Weight
H	0.966	0.114	0.071	SS	−0.193	0.940	0.072
LL	0.885	−0.186	0.070	Pro	0.023	0.789	0.051
LW	0.876	−0.169	0.069	MDA	0.949	−0.005	0.063
R/S	0.241	0.869	0.071	SOD	−0.209	0.957	0.074
RWC	0.988	0.045	0.068	POD	0.008	0.952	0.060
Chl a	0.947	0.113	0.070	CAT	−0.088	0.947	0.065
Chl b	0.971	−0.110	0.071	特征值 Eigenvalue	7.41	5.84	
Chl（a+b）	0.989	0.004	0.066	方差贡献率/% Variance contribution rate	49.42	38.92	
SP	0.033	0.918	0.060	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution rate	49.92	88.34	

2.5.3　综合评价　将每个主成分得分与相应方差贡献率相乘相加计算得到总得分，依据总得分对不同处理进行排序，结果见表6。

表6　赤霉素和褪黑素及盐碱胁迫处理紫斑牡丹耐盐碱性的综合评价

Table 6　Comprehensive evaluation of salt-alkali stress tolerance in *P. rockii* seedlings treated with gibberellin，melatonin and saline-alkali stress

处理 Treatment	主成分1得分 Score of PC1	主成分2得分 Score of PC2	总得分 Total score	排序 Ranking	处理 Treatment	主成分1得分 Score of PC1	主成分2得分 Score of PC2	总得分 Total score	排序 Ranking
S	0.024	0.166	0.088	9	SM_1	0.149	0.248	0.193	8
SG_1	0.181	0.260	0.217	7	SM_2	0.299	0.320	0.308	4
SG_2	0.423	0.394	0.410	2	SM_3	0.425	0.417	0.422	1
SG_3	0.313	0.363	0.335	3	SM_4	0.270	0.261	0.266	5
SG_4	0.212	0.263	0.235	6					

由表6可得，不同处理紫斑牡丹‘玉壶冰心’幼苗耐盐性的总得分排序依次为：SM_3>SG_2>SG_3>SM_2>SM_4>SG_4>SG_1>SM_1>S，可知SM_3（200 μmol/L MT）处理缓解盐碱胁迫的效果最佳，其次是SG_2（100 mg/L GA）处理。

3　讨　论

盐碱胁迫是植物经常应对的重要非生物胁迫因子之一，植物激素GA和MT能有效促进植物生长发育，减轻逆境胁迫（如盐碱胁迫、干旱胁迫、高温胁迫等）对植物造成的氧化损伤。本研究结果表明，盐碱胁迫会显著阻碍紫斑牡丹植株生长，导致叶片枯萎黄化，而适宜浓度GA和MT处理能有效改善盐碱胁迫植株叶片表征，增加幼苗株高、叶长宽和根冠比等形态指标。前人研究结果发现，外源GA和MT处理能够显著促进盐碱胁迫下白三叶（*Trifolium repens*）幼苗生长[5]，外源GA也可以有效增加盐胁迫下黄芪（*Astragalus membranaceus*）幼苗根冠比[10]，这与本研究结果一致。本试验进一步发现，GA对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗生长形态的促进作用强于MT，其中100 mg/L GA处理的改善效果最为显著。这可能因为GA能够刺激细胞伸长，提高细胞壁的延展性，从而使茎、叶、根系伸长来促进植株生长[11]。

植物生长发育过程中，叶片对逆境胁迫有着高度敏感性[12]。有研究表明，盐碱胁迫会减缓植物水分的运输和细胞膨压，使叶片出现萎蔫现象[13]。翟婕陶等[14]关于盐碱胁迫下苹果（*Malus pumila*）幼苗生理特性的研究发现，施加适宜浓度的GA可以有效提高叶片相对含水量（RWC），缓解叶片萎蔫；偶春等[15]研究发现，外源MT能显著改善盐碱胁迫下香椿（*Toona sinensis*）幼苗生长状况，提升叶片RWC。本研究也发现，紫斑牡丹幼苗RWC在盐碱胁迫下显著降低，经不同浓度外源激素GA和MT处理后，叶片RWC的降低趋势均有不同程度的缓解，这与前人的研究结果一致；此外，紫斑牡丹幼苗

RWC随激素浓度增加呈先升后降趋势,其中200 μmol/L MT处理效果最佳,其次为100 mg/L GA。说明适宜浓度的GA和MT处理均能有效缓解植物水分散失,保护细胞膜结构与功能的完整性,增强叶片保水能力,且适宜浓度的MT对RWC的维持效果优于GA。

光合色素是植物进行光合作用的最基础物质,其中叶绿素不仅是参与光合作用的关键物质,也是反映植物抗逆能力的重要指标[16]。植物叶绿素合成是一系列酶催化反应的结果,在盐碱胁迫环境下植物叶片叶绿素合成受阻、光合作用减弱[17]。本研究中,紫斑牡丹幼苗叶片叶绿素含量在盐胁迫下显著降低,说明盐碱胁迫会加剧光合色素分解,对幼苗光合作用产生显著的抑制作用;而在外源激素GA和MT处理下,叶片叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量均有所提高,整体随激素浓度升高呈先升后降趋势,分别在100 mg/L GA和200 μmol/L MT处理后效果较佳。说明适宜浓度GA和MT能够有效缓解盐碱胁迫下紫斑牡丹叶绿素的降解,清除植物在盐碱胁迫下产生的过多自由基,保护叶绿素分子的结构完整性。研究发现,外源MT可以有效增加盐胁迫下紫花苜蓿(*Medicago sativa*)叶片叶绿素含量[18];外源GA可以有效抑制盐碱胁迫下草莓(*Fragaria* × *ananassa*)叶片中叶绿素的降解,增强叶片光合色素累积[19],这与本研究结果相似。

SS、SP、Pro是植物体内的重要渗透调节物质,在抵制活性氧(ROS)对细胞损伤中具有积极作用[20]。Pro有极强的亲水性,可维持细胞膨压;SS可调节细胞渗透压,降低细胞水势;而SP可通过水合作用提高细胞保水力,三者协同保护膜系统的正常功能,提高植物抗逆境能力[21]。本试验结果表明,盐碱胁迫下紫斑牡丹'玉壶冰心'叶片中的Pro、SP、SS含量相较于CK显著增加,这与范海霞等[22]关于金盏菊(*Calendula officinalis*)的相关研究结果类似,说明植物在盐碱胁迫下会启动自我保护与调节机制,通过促进SS、SP、Pro合成来增强自身抗氧化能力。在不同浓度外源激素GA和MT处理后,紫斑牡丹叶片渗透调节物质含量持续增加,SS、Pro含量在200 μmol/L MT处理时最高,SP含量在100 mg/L GA处理时最高,并与盐碱胁迫(S)处理相比差异显著。这与前人在紫花苜蓿与中的研究结果[23]类似。说明适宜浓度GA和MT可通过提高植物叶片内的SP、SS、Pro含量来维持细胞水势,缓解盐碱胁迫对细胞膜透性的破坏,以此来维持细胞的正常生理功能。

MDA是膜脂过氧化的主要产物,能够直接反映植物细胞的受损程度,植物在盐碱环境下产生氧化应激反应,积累大量ROS,导致细胞膜脂过氧化,植物生长发育受阻[24]。本试验中,紫斑牡丹'玉壶冰心'幼苗生长状况与MDA含量呈极显著负相关,盐碱胁迫下叶片MDA含量增加,细胞膜受损;在4种浓度外源激素GA和MT处理下,叶片MDA含量较盐碱处理均有不同程度下降,其中150 mg/L GA和200 μmol/L MT处理时MDA含量较低,缓解效果最佳,而在50 mg/L GA和400 μmol/L MT处理时效果不明显。这与前人关于外源MT处理对盐碱胁迫下葡萄(*Vitis vinifera*)幼苗的相关研究结果[25]一致。说明适宜浓度GA和MT处理可缓解盐碱胁迫导致的自由基过量积累对细胞的损伤,防止紫斑牡丹质膜受损,且150 mg/L GA和200 μmol/L MT处理的效果较佳,既能有效发挥激素预期功能,也可避免激素浓度过高对植物造成伤害,类似的研究也已证实外源激素的增强效果随着植物物种和品种不同而存在剂量关系[26]。

植物受到盐碱胁迫时会产生大量活性氧,SOD、POD及CAT是植物清除ROS的主要抗氧化酶,3种酶相互协调保护植株对抗逆境伤害[27]。本试验结果表明,盐碱胁迫下,紫斑牡丹叶片中SOD、POD、CAT 3种抗氧化酶活性显著增加;经不同水平GA和MT处理后幼苗叶片中抗氧化酶活性大多显著提高,且随激素浓度升高整体呈先升后降趋势,并以100 mg/L GA和200 μmol/L MT处理幼苗叶片的SOD、POD活性较强,150 mg/L GA和200 μmol/L MT处理CAT活性较强。这与前人研究结果相似,如苏文欣等[28]研究发现,50 mg/L GA和100 μmol/L MT处理可以显著提高盐胁迫下紫苏(*Perilla frutescens*)的抗氧化酶活性;李嘉文等[29]发现,50 μmol/L MT处理可以缓解盐碱胁迫对燕麦(*Avena sativa*)幼苗生长的抑制作用,显著提高POD、SOD活性。说明适宜浓度GA和MT能有效增强植物的抗氧化能力,缓解盐碱对幼苗的胁迫伤害,且不同植物对GA和MT敏感度存在差异,提高植物抗氧化酶活性所需的GA和MT浓度各异[30]。

4 结 论

盐碱胁迫下紫斑牡丹'玉壶冰心'幼苗生长受

到明显抑制，叶片枯萎黄化；而叶面喷施不同水平GA和MT均能不同程度缓解盐碱胁迫的伤害，且缓解效果因激素浓度而异，其中200 μmol/L MT和100 mg/L GA处理可有效缓解盐碱胁迫对紫斑牡丹‘玉壶冰心’株高、叶长、叶宽、根冠比、叶片相对含水量的抑制作用，增强叶绿素的合成和SP、SS、Pro等渗透调节物质的累积以及POD、SOD、CAT等抗氧化酶的活性，减少膜脂过氧化产物MDA的过度积累，从而减轻植物盐害症状。不同处理紫斑牡丹‘玉壶冰心’幼苗耐盐碱性综合得分依次为SM_3＞SG_2＞SG_3＞SM_2＞SM_4＞SG_4＞SG_1＞SM_1＞S，即以SM_3（200 μmol/L MT）处理缓解效果最佳，其次为SG_2（100 mg/L GA）处理。

[参考文献]

[1] 朱紫檀，洪晓松，张晓宁，等. 盐地碱蓬耐盐碱响应机制研究进展[J]. 现代农业科技，2024(6)：94-97.
ZHU Z T，HONG X S，ZHANG X N，et al. Research progress on saline-alkali tolerance response mechanism of *Suaeda salsa* [J]. Modern Agricultural Science and Technology，2024(6)：94-97.

[2] ZHANG M J，LIU Y，LIU Y L，et al. Rotation of *Triticale* and sweet sorghum improves saline-alkali soil and increases productivity in a saline soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，2023，54(7)：910-925.

[3] CHEN Z，WANG Q Z. Graphene ameliorates saline-alkaline stress-induced damage and improves growth and tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry，2021，163：128-138.

[4] 贾文飞，魏晓琼，聂小兰，等. 盐碱胁迫对越橘生理特性及叶片解剖结构的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2022，50(05)：115-126.
JIA W F，WEI X Q，NIE X L，et al. Effects of saline-alkali stress on physiological characteristics and leaf anatomical structure of blueberry[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2022，50(05)：115-126.

[5] 陈红，许凌欣，王梦琦，等. 外源赤霉素和褪黑素对三种胁迫下白三叶种子萌发、幼苗生长及生理的影响[J]. 草地学报，2024，32(3)：781-792.
CHEN H，XU L X，WANG M Q，et al. Effects of exogenous gibberellin and melatonin on seed germination，seedling growth and physiology of *Trifolium repens* under three stresses[J]. Acta Agrestia Sinica，2024，32(3)：781-792.

[6] 李红叶，翟秀珍，张少聪，等. 外源褪黑素对干旱胁迫小麦发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2021，49(06)：75-84.
LI H Y，ZHAI X Z，ZHANG S C，et al. Effects of exogenous melatonin on germination and physiological characteristics of *Triticum aestivum* seedlings under drought stress[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2021，49(06)：75-84.

[7] 张瑞，唐红，何丽霞. 同株紫斑牡丹中单瓣与重瓣花芽分化及内源激素含量比较[J]. 西北植物学报，2022，42(7)：1152-1160.
ZHANG R，TANG H，HE L X. Comparison of flower bud differentiation and endogenous hormone contents between single and double petals of *Paeonia rockii* from same plant[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2022，42(7)：1152-1160.

[8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社，2000：134-170.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing：Higher Education Press，2000：134-170.

[9] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京：高等教育出版社，2006：208-228.
GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing：Higher Education Press，2006：208-228.

[10] 王楠，高静，黄文静，等. 赤霉素浸种时长和施用浓度对重度干旱和盐胁迫下黄芪幼苗发育的影响[J]. 生态学杂志，2019，38(9)：2693-2701.
WANG N，GAO J，HUANG W J，et al. The effects of concentration and duration of seed soaking by GA_3 on the development of *Astragalus membranaceus* seedlings under severe drought and salt stresses[J]. Chinese Journal of Ecology，2019，38(9)：2693-2701.

[11] MUHAMMAD A S R，MUHAMMAD F S，MUHAMMAD Y A，et al. Glycinebetaine applied under drought improved the physiological efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant[J]. Soil & Environment，2012，31(1)：67-71.

[12] 向警，黄倩，鞠春燕，等. 外源褪黑素对盐胁迫下水稻种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 植物生理学报，2021，57(2)：393-401.
XIANG J，HUANG Q，JU C Y，et al. Effect of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth of rice under salt stress[J]. Plant Physiology Journal，2021，57(2)：393-401.

[13] 田小霞，毛培春，郑明利，等. 脱落酸对NaCl胁迫下马蔺幼苗生长、叶片气孔特征和光合性能的影响[J]. 西北植物学报，2025，45(1)：45-53.
TIAN X X，MAO P C，ZHENG M L，et al. Effects of ABA on growth，leaf stomatal characteristics，and photosynthesis of *Iris lactea* seedlings under NaCl stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2025，45(1)：45-53.

[14] 翟婕陶，杨建华，绵旭林，等. 外源赤霉素对盐碱胁迫下苹果砧木M26幼苗生理特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报，2025，60(1)：167-180.
ZHAI J T，YANG J H，XIAN X L，et al. Effect of exogenous gibberellin on physiological characteristics of apple rootstock M26 seedlings under salt-alkali stress[J]. Journal of Gansu Agricultural University，2025，60(1)：167-180.

[15] 偶春，张敏，姚侠妹，等. 褪黑素对盐胁迫下香椿幼苗生长及离子吸收和光合作用的影响[J]. 西北植物学报，2019，39(12)：2226-2234.

OU C, ZHANG M, YAO X M, et al. Effect of melatonin on growth, ion absorption and photosynthesis of *Toona sinensis* seedlings under salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(12): 2226-2234.

[16] 夏静,南丽丽,陈洁,等. 低磷胁迫对不同根型苜蓿光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 169-176.
XIA J, NAN L L, CHEN J, et al. Effects of low phosphorus stress on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of alfalfa with different root types[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 169-176.

[17] 刘建新,刘瑞瑞,刘秀丽,等. 硫化氢对盐碱胁迫下裸燕麦光合生理的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(07): 45-55.
LIU J X, LIU R R, LIU X L, et al. Effects of hydrogen sulfide on photosynthetic physiology of *Avena nuda* under saline-alkali stress [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(07): 45-55.

[18] 蔡文祺,李淑霞,王晓彤,等. 外源褪黑素与乙烯交互对盐胁迫下紫花苜蓿幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(1): 80-93.
CAI W Q, LI S X, WANG X T, et al. Effects of interaction between exogenous melatonin and ethylene on the growth and physiological characteristics of *Medicago sativa* seedlings under salt stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1): 80-93.

[19] 马媛媛,李刚,何旺,等. 外源褪黑素对NaCl胁迫下草莓幼苗生理特性的缓解效应[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(10): 2486-2495.
MA Y Y, LI G, HE W, et al. Alleviating effect of exogenous melatonin on strawberry seedling under NaCl stress[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(10): 2486-2495.

[20] MA Y Y, ZHANG Y L, LU J, et al. Roles of plant soluble sugars and their responses to plant cold stress[J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(10): 2004-2010.

[21] 刘佳苗,唐红,朱佳辰,等. 3种生长调节剂对紫斑牡丹开花及枝条生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(12): 1837-1847.
LIU J M, TANG H, ZHU J C, et al. Effects of three kinds of growth regulators on flowering and branch physiological characteristics of *Paeonia rockii*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(12): 1837-1847.

[22] 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.
FAN H X, ZHAO S, LI J, et al. Effects of exogenous melatonin on the growth, photosynthesis and physiological characteristics of *Calendula officinalis* seedlings under salt stress[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(5): 1326-1334.

[23] 崔雪雯. 紫花苜蓿的耐盐性鉴定及褪黑素对盐胁迫的缓解效应[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
CUI X W. Salt tolerance identification of alfalfa and mitigation effect of melatonin on salt stress[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.

[24] 马媛媛,王智,曹金萍,等. 2,4-表油菜素内酯对盐碱胁迫下芸豆幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(8): 1181-1189.
MA Y Y, WANG Z, CAO J P, et al. Effects of 2,4-epibrassinolide on the growth and physiological characteristics of *Phaseolus vulgaris* seedlings under saline and alkaline stresses [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(8): 1181-1189.

[25] 卞凤娥,肖秋红,郝桂梅,等. 根施褪黑素对NaCl胁迫下葡萄内源褪黑素及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 952-963.
BIAN F E, XIAO Q H, HAO G M, et al. Effect of root-applied melatonin on endogenous melatonin and chlorophyll fluorescence characteristics in grapevine under NaCl stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(5): 952-963.

[26] JIANG D, LU B, LIU L T, et al. Exogenous melatonin improves the salt tolerance of cotton by removing active oxygen and protecting photosynthetic organs[J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 331.

[27] 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.
LIU D S, YAO L, XU W R, et al. Research progress of melatonin in plant stress resistance[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(1): 111-126.

[28] 苏文欣,许凌欣,姜宛彤,等. 不同外源物质对盐碱胁迫下紫苏种子萌发、幼苗生长及生理的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(9): 2415-2422.
SU W X, XU L X, JIANG W T, et al. Effects of different exogenous substances on seed germination and seedling growth and physiology of *Perilla frutescens* under saline-alkali stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(9): 2415-2422.

[29] 李嘉文,麻冬梅,苏立娜,等. 外源褪黑素对盐胁迫下燕麦幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(2): 396-403.
LI J W, MA D M, SU L N, et al. Effects of exogenous melatonin on oat seedling growth and antioxidant system under salt stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 396-403.

[30] 郭郁频,任永霞,刘贵河,等. 外源钙和赤霉素对干旱胁迫下苜蓿幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(7): 89-96.
GUO Y P, REN Y X, LIU G H, et al. Effects of calcium($CaCl_2$), GA_3 and complex liquid on the physiological characteristics of alfalfa seedlings under drought stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(7): 89-96.

(责任编辑:李小平)