

李 波,张孝宇,黎飞飞,等. 耐盐碱矮牵牛品种筛选及外源褪黑素对其耐盐碱性的调节作用[J]. 江苏农业科学,2025,53(13):188-196.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.13.024

# 耐盐碱矮牵牛品种筛选及外源褪黑素对其耐盐碱性的调节作用

李 波<sup>1</sup>,张孝宇<sup>1</sup>,黎飞飞<sup>2</sup>,孙 晶<sup>3</sup>

(1. 运城学院生命科学系,山西运城 044000; 2. 山东省农业科学院作物研究所,山东济南 250100;  
3. 运城市科学技术局,山西运城 044000)

**摘要:**为筛选耐盐碱性较强的矮牵牛品种,并探究外源褪黑素对矮牵牛耐盐碱能力的调节作用,以 9 个矮牵牛品种为试验材料并从中筛选出 3 个典型品种,基于盐碱胁迫条件下的种子发芽势、发芽率、发芽指数,以及植株的叶绿素含量、丙二醛(MDA)含量和过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性等指标,综合评价 9 个品种的耐盐碱性,并分析不同浓度褪黑素(40、70、100 μmol/L)浸种处理对矮牵牛盐碱抗性的调节效应。结果表明,9 个供试矮牵牛品种的耐盐碱性由强到弱依次为 YL1 > HS2 > YL2 > HS1 > HC3 > HC2 > HC1 > HS3 > HD。在盐碱胁迫下,40 ~ 100 μmol/L 褪黑素处理提高了矮牵牛种子的发芽能力,增强了植株的叶绿素稳定性,提升了 SOD、POD 活性,并减缓了 MDA 含量的积累;其作用效果与处理浓度呈正相关,当褪黑素浓度为 100 μmol/L 时,种子的发芽势、发芽率、发芽指数达最大值,叶绿素含量最高,SOD、POD 活性最强,而 MDA 积累量最低。综上,100 μmol/L 褪黑素浸种处理,可有效缓解盐碱胁迫对矮牵牛种子萌发和幼苗生长的抑制作用。

**关键词:**矮牵牛;褪黑素;盐碱胁迫;盐碱抗性;综合评价

**中图分类号:**S681.601 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)13-0188-09

据统计,全球约有 7% 的陆地(9 亿多 hm<sup>2</sup>)受到盐碱化的威胁,其中,我国盐碱地总面积已达 1 亿多 hm<sup>2</sup>[1-2]。盐碱化土壤具有明显的高 Na<sup>+</sup> 积累、高 pH 值、钠吸附比和交换性钠比例等特征,同时,盐渍化也会对土壤自身结构及其水力特性造成不

利影响[3-4];盐碱胁迫可通过影响基因表达、mRNA 稳定性及翻译调控,进而改变植物体内的蛋白质丰度,最终破坏细胞内的代谢平衡[5-6],因此,盐碱化土壤不利于植物生长发育,这也成为盐碱地区景观绿化及生态环境治理的一大难题。鉴于此,对耐盐碱园林植物的筛选、鉴定及对园林植物耐盐碱性的研究,具有重要的现实意义和科学价值。

草本植物因其自身较为发达的根系组织及维管束中数量众多的薄壁细胞,可对土壤中的盐碱离子进行富集,从而具有一定的盐碱抗性;此外,草本植物凋落物易被分解,也有益于土壤肥力的提高[7]。已有的研究表明,在盐碱地种植油菜、

收稿日期:2024-08-02

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(编号:2021L478);山西省优秀博士来晋科研专项(编号:QZX-2021007);山西省高等学校科技创新计划创新实验室平台项目(编号:2022P012);运城学院应用研究项目(编号:CY-2021013);运城市基础 Research 计划(编号:YCKJ-2022071);运城学院博士科研启动项目(编号:YQ-2021013)。

作者简介:李 波(1989—),男,甘肃定西人,博士,讲师,主要从事植物逆境生理学等研究工作。E-mail:libo708@126.com.

[28] Lancaster J E, Lister C E, Reay P F, et al. Influence of pigment composition on skin color in a wide range of fruit and vegetables [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122 (4):594-598.

[29] Okazaki K, Kabeya Y, Suzuki K, et al. The PLASTID DIVISION1 and 2 components of the chloroplast division machinery determine the rate of chloroplast division in land plant cell differentiation[J]. *The Plant Cell*, 2009, 21 (6): 1769-1780.

[30] 郭春苗,伍新宇,周晓明,等. 葡萄干饱满度评定指标及影响因素研究[J]. *新疆农业科学*, 2015, 52(6):1033-1039.

[31] 刘峰娟,冯作山,孟 阳,等. 脱水速度对无核白葡萄果皮褐变和细胞超微结构的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(6):220-225.

[32] Kelebek H, Jourdes M, Selli S, et al. Comparative evaluation of the phenolic content and antioxidant capacity of Sun-dried raisins[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(12):2963-2972.

[33] Qin L W, Wang H, Zhang W, et al. Effects of different drying methods on phenolic substances and antioxidant activities of seedless raisins[J]. *LWT*, 2020, 131:109807.

水稻、甜高粱、蓖麻、苜蓿、狗牙根等草本植物,一方面,可明显降低土壤 pH 值和含盐量;另一方面,土壤中的有机质、全磷、全氮、速效钾等养分含量可被大幅提升<sup>[7-8]</sup>。可见,若在盐碱区应用耐盐碱园林草本植物,尤其是园林花卉,不仅能起到景观绿化、美化环境的作用,还具有改良盐碱地的重要价值。

矮牵牛 (*Petunia × hybrida*) 是一种多年生草本花卉,花期较长且花色丰富,具有较高的观赏价值,是绿地景观中常用的园林植物,对干旱和盐渍胁迫表现出较强的耐受性<sup>[9]</sup>。尽管矮牵牛具有耐旱、耐盐碱的形态结构基础,但不同品种间的耐旱性差异较大<sup>[9-11]</sup>,因此推测其耐盐碱性也存在较大差异。然而,目前关于矮牵牛耐盐碱性的研究主要集中于单个品种<sup>[12]</sup>,不同品种(系)间耐盐碱性差异的研究尚不多见。

增强植物耐盐碱性是提升其盐碱环境适应能力的有效途径。除遗传改良外,施用外源物质是一种方便、快速、高效提高植物盐碱胁迫耐受性的手段<sup>[13-15]</sup>。褪黑素(*N*-乙酰-5-甲氧基色胺)作为信号分子和已知的最强效内源性自由基清除剂,在增强植物耐盐碱能力方面发挥着重要作用<sup>[16-22]</sup>。本研究对 9 个不同矮牵牛品种(系)的耐盐碱能力进行综合评价,并分析盐碱胁迫下不同浓度褪黑素浸种对矮牵牛种子萌发及幼苗生长发育的影响,以为矮牵牛在盐碱胁迫环境下的应用及褪黑素的使用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2023 年 7 月至 2024 年 5 月在运城学院智能温室和逸夫实验楼生理生化实验室进行。试验所用矮牵牛材料均为目前园林绿化中常用的品种(系),其种子购于厦门爱垦园艺有限公司,具体品种信息见表 1。

### 1.2 试验方法

1.2.1 耐盐碱品种筛选与鉴定 将挑选出的无破损、饱满且大小均一的矮牵牛种子,用 3% (V/V) NaClO 溶液表面消毒 5 min,随后无菌水冲洗 3~5 次,再用无菌滤纸吸干种子表面水分。

萌发试验 根据预试验和王智威等<sup>[12]</sup>的研究结果,配制由 NaCl 与 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 按等比例(摩尔比)混合而成的 90、110、130 mmol/L 盐碱溶液,模拟不同强度的盐碱胁迫;正常生长条件使用清水(CK)处

表 1 矮牵牛品种信息及编号

编号	品种(系)名	产品批号	花色、花形
HC1	虹彩	93891-1	
HC2	虹彩	96242-1	
HC3	虹彩	17130590	
YL1	雨林	731705	
YL2	雨林	731949	
HS1	海市蜃楼	0050595324	
HS2	海市蜃楼	0050603139	
HS3	海市蜃楼	0050600202	
HD	哈迪	DM032565	

理。采用培养皿滤纸发芽法,将已消毒的不同品种(系)矮牵牛种子均匀摆放在置有双层无菌滤纸的培养皿(直径 9 cm,高 1.5 cm)中,每皿放置 60 粒,加入 5 mL 不同浓度的盐碱溶液,每个处理重复 3 次。采用 25 ℃、8 h 光照/16 h 黑暗条件进行培养,培养期间每天定时称重并补充水分,以维持不同浓度混合盐碱溶液浓度的恒定。种子萌发相关指标的计算公式具体如下<sup>[11]</sup>:

$$\text{发芽势} = N_4/N \times 100\% ;$$

$$\text{发芽率} = N_9/N \times 100\% ;$$

$$\text{发芽指数} = \sum G_t/D_t。$$

式中: $N_4$ 、 $N_9$  分别表示在第 4、9 天时的萌发种子数; $N$  表示供试种子总数(粒); $G_t$  表示  $t$  时间内的萌发种子数(粒); $D_t$  表示发芽时间(d)。

苗期试验 采用盆栽法进行。将已消毒处理的矮牵牛种子在正常条件下催芽处理 5 d 后,选择

发芽一致的种子播种于混合土壤基质(腐殖质:蛭石=1:1)中,在 25 ℃、16 h 光照/8 h 黑暗条件下培养。播种 4 周后进行盐碱胁迫处理,模拟盐碱胁迫的溶液浓度为 150、200、250 mmol/L,正常生长条件使用清水(CK)进行处理,使溶液完全浸透土壤基质,每个处理重复 3 次,每次重复含 55 株幼苗。胁迫 10 d 后取样,测定叶绿素、MDA 含量及 SOD、POD 活性等生理指标。叶绿素含量采用乙醇浸提法测定<sup>[23]</sup>,MDA 含量及 SOD、POD 活性分别参照相应检测试剂盒(BC0020 及 BC0170、BC0090,北京索莱宝科技有限公司)提供的操作说明进行测定。

1.2.2 褪黑素对耐盐碱能力的调节作用 选取 YL1、HS1、HD 3 个矮牵牛品种为试验材料,将消毒处理后的种子分别置于浓度为 40、70、100 μmol/L 褪黑素溶液(分别标记为 M1、M2、M3)中,在 20 ℃、黑暗条件下浸种 24 h,以清水为对照(CK),浸种结束后将种子在遮光处理的超净工作台中风干。浸种后的矮牵牛种子萌发和苗期试验方法同“1.2.1”节,其中将模拟盐碱胁迫处理的溶液浓度分别设定为 110 mmol/L(萌发试验)和 200 mmol/L(苗期试验)。

### 1.3 数据处理与分析

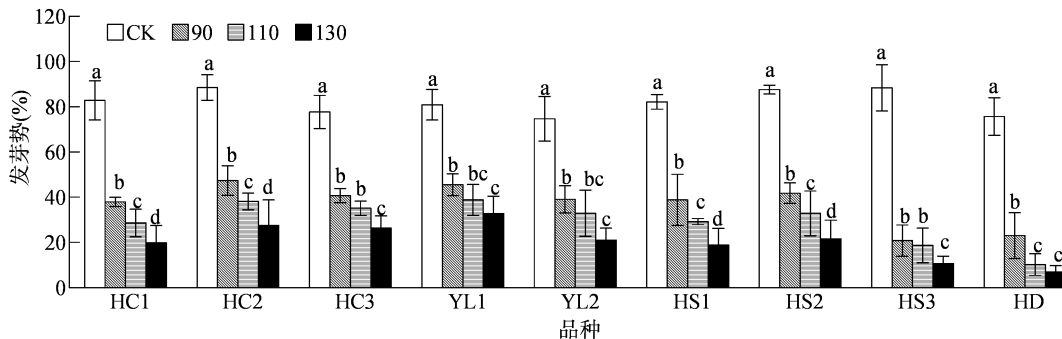
使用 Excel 2021 进行数据整理和图表制作,采用 SPSS 27.0 软件对数据进行差异显著性检验( $\alpha = 0.05$ )和隶属函数值分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同矮牵牛品种的耐盐碱性评价

2.1.1 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛种子萌发的影响 在正常生长条件(CK)下,9 个不同品种矮牵牛种子的发芽力和活力基本一致;而在盐碱胁迫下,种子发芽力和活力均显著降低,种子发芽受到明显抑制,但不同品种的受抑制程度存在差异(图 1 至图 3),说明供试矮牵牛品种的耐盐碱性存在一定的差异。

与正常生长条件(CK)相比,随着盐碱溶液浓度的增大,所有供试矮牵牛品种种子的发芽势均呈下降趋势。其中,在 90 mmol/L 盐碱溶液处理下,HS3、HD 的种子发芽势降幅最明显,分别降低 67.56、52.64 百分点,其他各品种的降幅相对较小,幅度为 35.38 ~ 45.77 百分点。当浓度增至 130 mmol/L 时,HS3、HD 的降幅增大至 77.67、68.72 百分点;而 YL1 的降幅最小,为 48.09 百分点(图 1)。



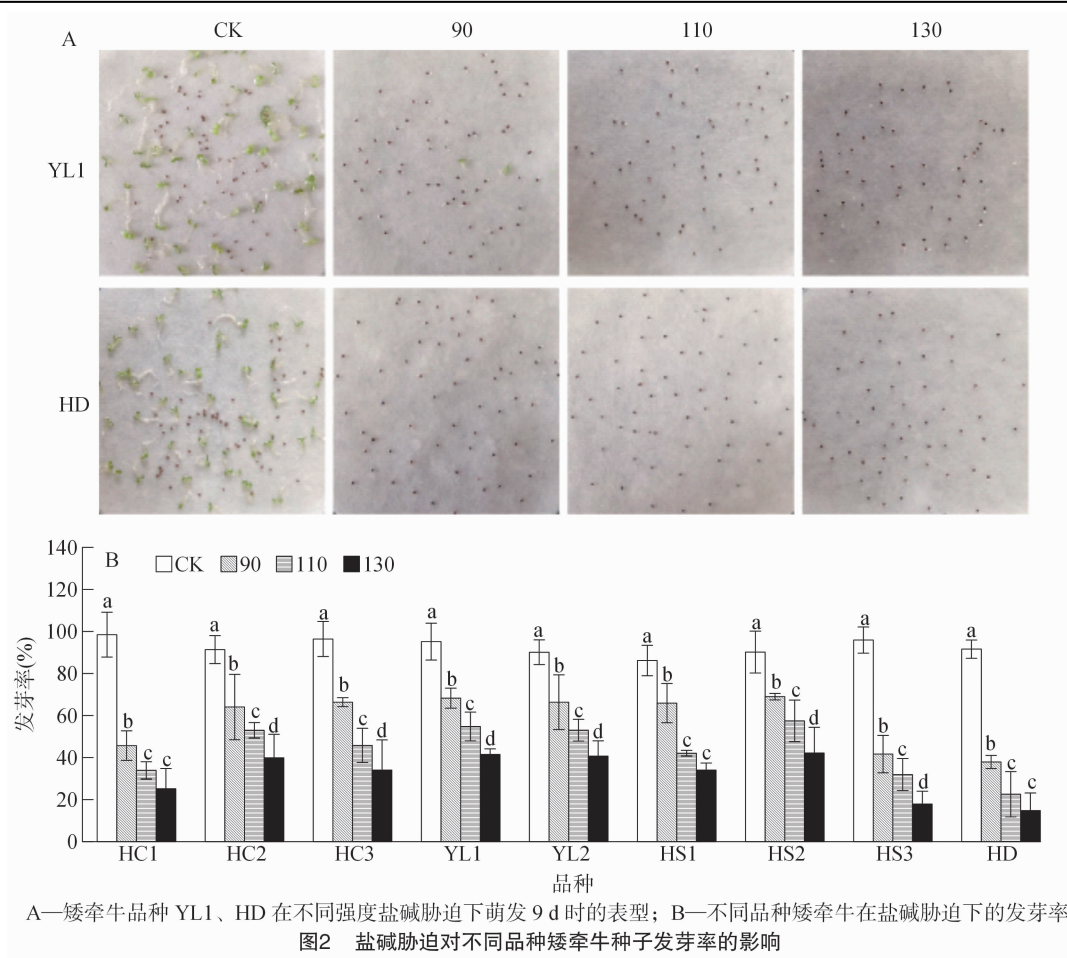
柱上不同小写字母表示不同强度盐碱胁迫间差异显著( $P < 0.05$ )。图 2~图 7 同  
图 1 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛发芽势的影响

盐碱胁迫使矮牵牛种子的发芽率明显降低(图 2)。与正常生长条件(CK)相比,在盐碱溶液浓度为 130 mmol/L 时,HS3、HD 的种子发芽率降幅最为明显,处于相对较低的水平,发芽率仅为 17.89%、14.78%,降幅分别达 77.98、76.78 百分点;HS2 的降幅最小,为 48.02 百分点,对应的发芽率为 42.15%。本研究中,因盐碱溶液浓度相对较高,即使各品种矮牵牛种子在不同浓度盐碱溶液处理下能够保持一定数量的萌发,但其胚芽生长均受到明显的抑制(图 2 - A)。

种子发芽指数是评价种子活力的重要指标之一。由图 3 可知,与正常生长条件(CK)相比,各品

种矮牵牛种子的发芽指数随盐碱溶液浓度的升高呈显著下降趋势,在盐碱溶液浓度为 90 mmol/L 时,各品种降幅为 31.57% ~ 70.66%,HS1 降幅最小,HD 降幅最大;当浓度增大至 130 mmol/L 时,YL1 降幅最小(45.75%),HD 的降幅仍然最大(77.68%)。

2.1.2 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛幼苗生理指标的影响 随着胁迫处理盐碱溶液浓度的升高,各品种矮牵牛植株叶片中的叶绿素含量呈现不同程度的降幅(图 4)。与正常生长条件(CK)相比,在盐碱溶液浓度为 150 mmol/L 时,HC2、HC3、YL1、HS1、HS2 降低不显著,其余各品种均显著降低( $P < 0.05$ );当浓度升高至 250 mmol/L 时,各品种均显著



A—矮牵牛品种 YL1、HD 在不同强度盐碱胁迫下萌发 9 d 时的表型；B—不同品种矮牵牛在盐碱胁迫下的发芽率  
图2 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛种子发芽率的影响

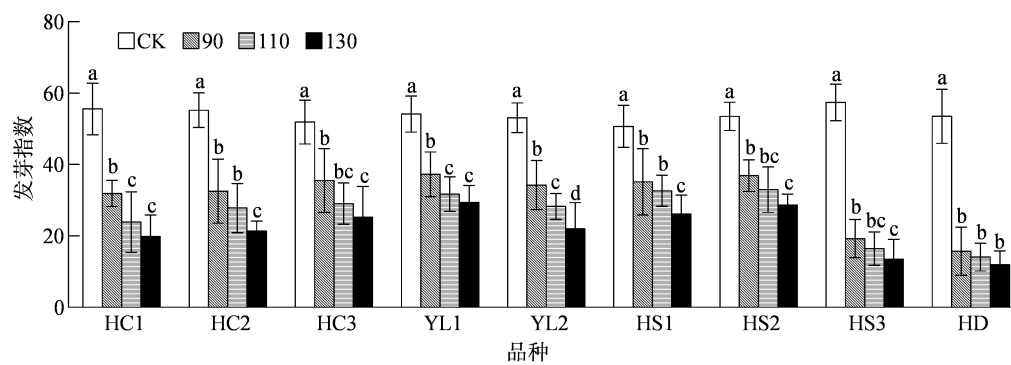


图3 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛发芽指数的影响

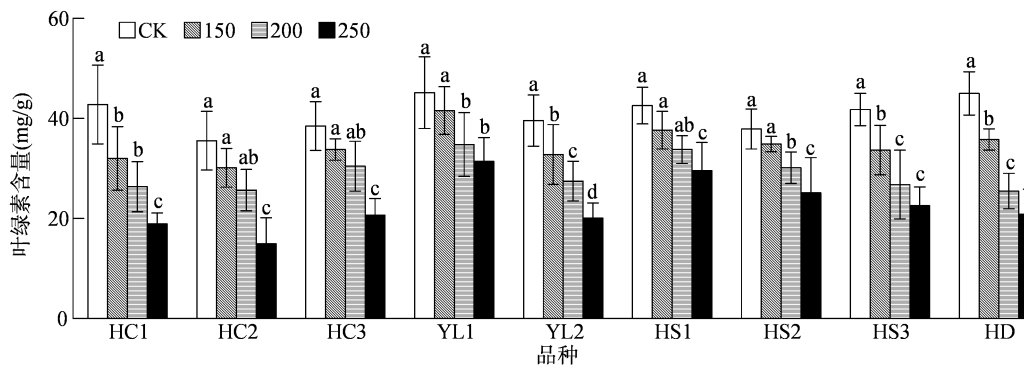


图4 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛叶绿素含量的影响

降低 ( $P < 0.05$ ), 其中, YL1 降幅最小 (30.44%), HC2 降幅最大 (57.85%)。

在盐碱胁迫下, 各品种矮牵牛植株叶片中的 MDA 积累量随处理浓度增大呈上升趋势 (图 5)。与正常生长条件 (CK) 相比, 在浓度为 150 mmol/L 时, YL1、YL2、HS1、HS2 的 MDA 积累量增加不显著, 其余各品种显著增加 ( $P < 0.05$ ); 浓度升高至 250 mmol/L 时, 各品种的 MDA 积累量均显著升高, 其中 YL2 增幅最小, HD 增幅最大, 表明在

250 mmol/L 盐碱溶液处理下 HD 植株的受损程度明显高于其他品种。

随着盐碱胁迫强度增加, 各品种植株的 POD、SOD 活性均呈逐渐增强的趋势, 且与正常生长条件 (CK) 相比差异显著 ( $P < 0.05$ ) (图 6、图 7)。在 250 mmol/L 盐碱溶液处理下, HS2、YL1、YL2 的 POD 活性显著升高, HD 的升幅最小; YL1、HS2 的 SOD 活性也大幅升高, 而 HD、HS3 的增幅表现基本一致, 均较小。

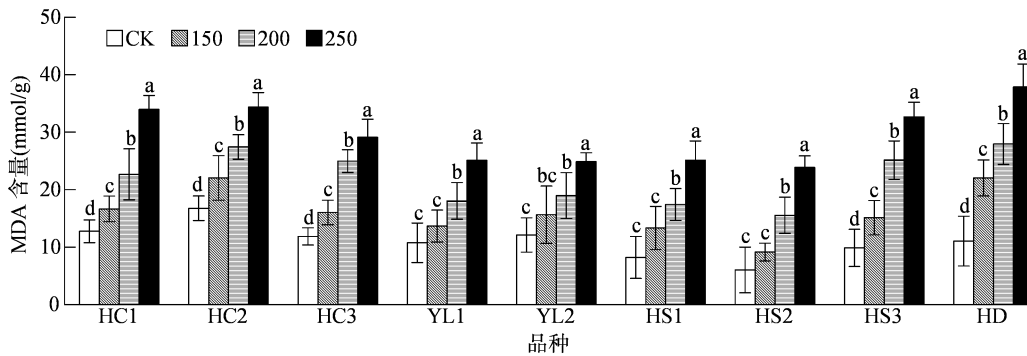


图5 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛丙二醛含量的影响

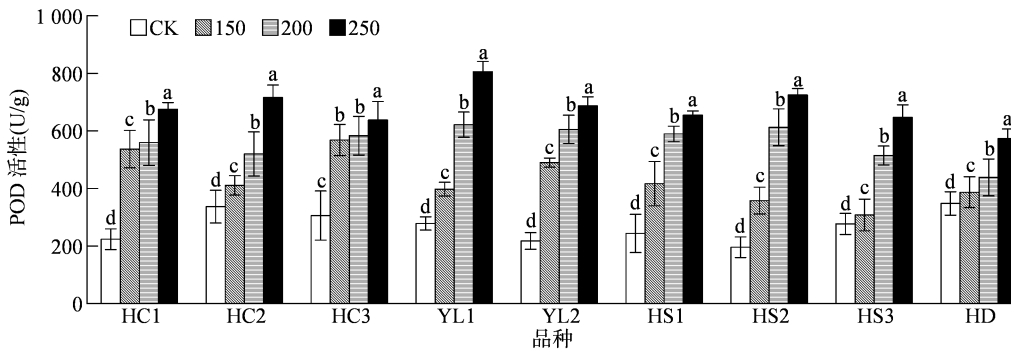


图6 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛过氧化物酶活性的影响

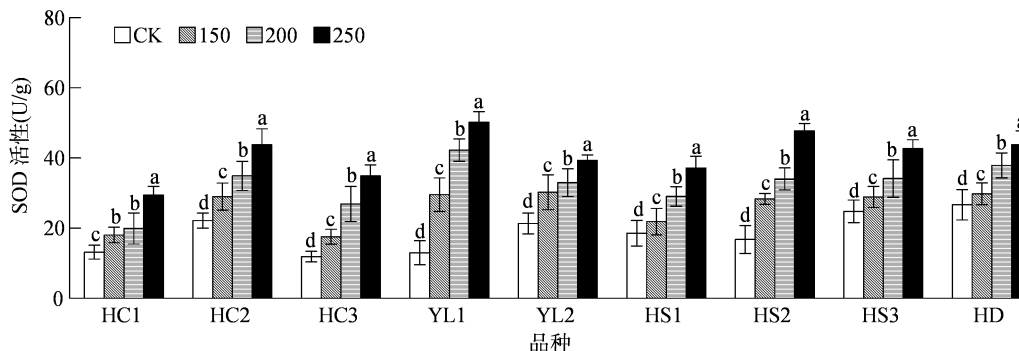


图7 盐碱胁迫对不同品种矮牵牛超氧化物歧化酶活性的影响

2.1.3 不同品种矮牵牛耐盐碱性的综合评价 通过在种子萌发和幼苗生长阶段进行不同程度的盐碱胁迫处理, 以胁迫条件下的指标测定和表型鉴定为依据, 基于隶属函数对供试矮牵牛品种的耐盐碱

性进行评价。结果表明, 9 个品种矮牵牛的盐碱抗性由强到弱依次为 YL1 > HS2 > YL2 > HS1 > HC3 > HC2 > HC1 > HS3 > HD (表 2)。

表 2 矮牵牛各品种的耐盐碱性隶属函数值

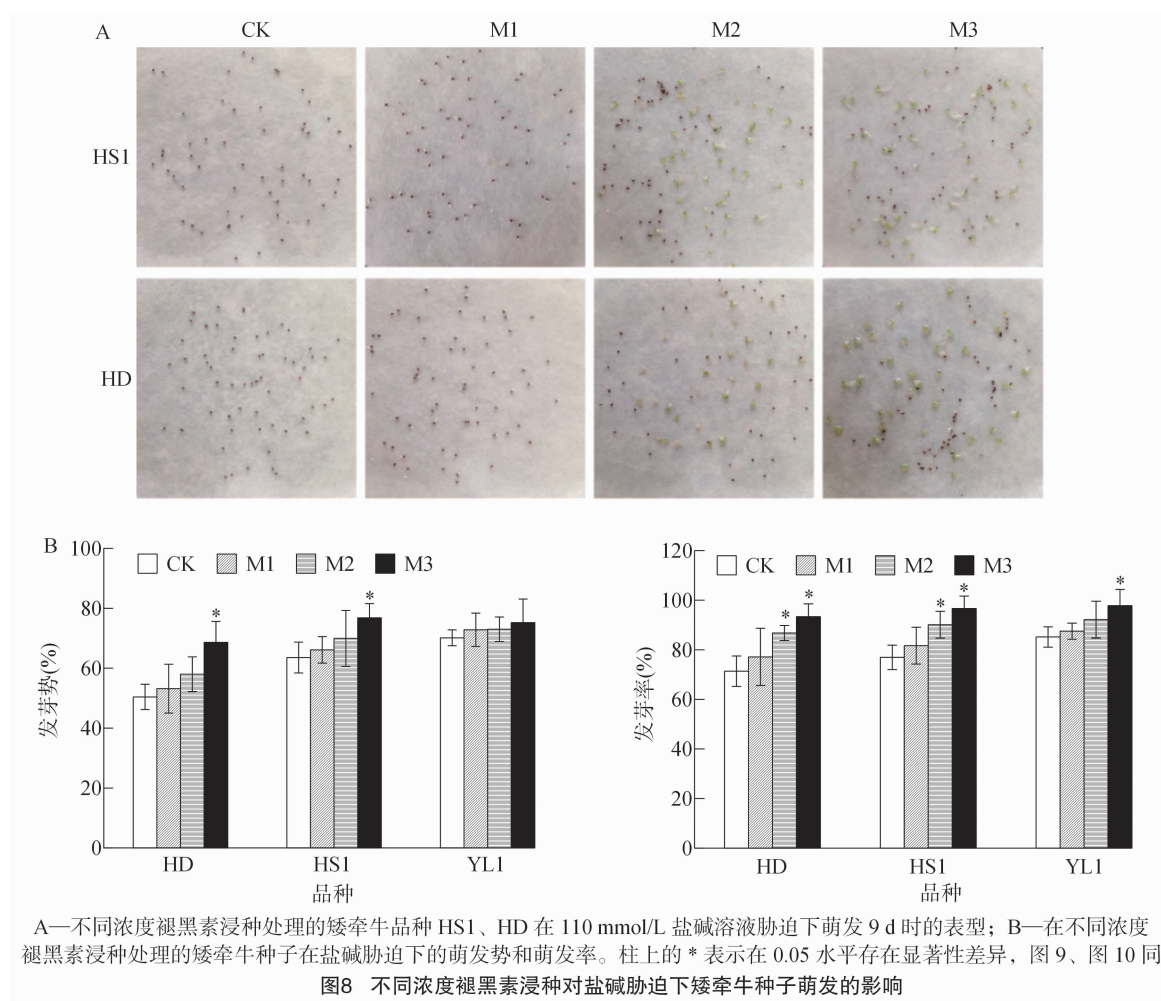
品种编号	隶属函数值							平均值	排序
	发芽率	发芽势	发芽指数	叶绿素含量	超氧化物歧化酶活性	丙二醛含量	过氧化物酶活性		
HC1	0.592	0.576	0.224	0.697	0.514	0.505	0.470	0.511	7
HC2	0.601	0.537	0.494	0.620	0.503	0.519	0.516	0.541	6
HC3	0.643	0.691	0.157	0.685	0.592	0.537	0.556	0.551	5
YL1	0.736	0.754	0.664	0.808	0.611	0.550	0.634	0.679	1
YL2	0.658	0.630	0.513	0.675	0.528	0.526	0.548	0.582	3
HS1	0.618	0.543	0.325	0.786	0.557	0.512	0.632	0.567	4
HS2	0.688	0.728	0.426	0.832	0.609	0.588	0.564	0.633	2
HS3	0.508	0.468	0.429	0.585	0.483	0.442	0.396	0.473	8
HD	0.486	0.424	0.347	0.542	0.455	0.426	0.362	0.434	9

## 2.2 外源褪黑素对矮牵牛耐盐碱性的调节作用

基于对 9 个不同品种(系)矮牵牛耐盐碱能力的综合评价,选择具有强、中、弱抗盐碱能力的 YL1、HS1、HD 3 个品种为研究材料,分析外源褪黑素对矮牵牛耐盐碱能力的调节效应。

### 2.2.1 不同浓度褪黑素对盐碱胁迫下矮牵牛种子

萌发的影响 由图 8 可知,40、70、100  $\mu\text{mol/L}$  褪黑素浸种处理(M1、M2、M3)可不同程度缓解盐碱胁迫对 3 个矮牵牛品种种子萌发的抑制作用,且随着褪黑素浓度的升高调节效应越明显,其中对耐盐碱性较弱的 HS1、HD 的作用效果更为明显。



在盐碱胁迫下,褪黑素浸种处理的矮牵牛种子的发芽势、发芽率均高于 CK,且与褪黑素浓度呈正相关(图 8 - B)。褪黑素浓度为 100  $\mu\text{mol/L}$  时,3 个品种的种子发芽势均达最高值,较 CK 分别提高 18.23、13.29、5.10 百分点,其中 HD、HS1 间差异达显著水平。与 CK 相比,HD 和 HS1 种子发芽率在褪黑素浓度为 70、100  $\mu\text{mol/L}$  时均显著升高 ( $P < 0.05$ ),分别升高 15.40、21.99 百分点和 13.17、19.73 百分点;而 YL1 仅在 100  $\mu\text{mol/L}$  时显著升高 ( $P < 0.05$ ),升高 12.65 百分点。由图 8 - A 可知,褪黑素浸种处理在显著促进盐碱胁迫下矮牵牛种子萌发的同时,也缓解了盐碱胁迫对胚芽生长的抑制作用,且作用效果随褪黑素浓度升高而增强。

由图 9 可知,在盐碱胁迫条件下,褪黑素浸种处理的矮牵牛种子发芽指数随褪黑素浓度升高呈上升趋势。浓度为 70、100  $\mu\text{mol/L}$  时,HD 和 HS1 种子的发芽指数均显著高于 CK,分别升高 15.14%、20.88% 和 14.51%、17.91%;而 YL1 的发芽指数虽有升高,但差异未达到显著水平。

2.2.2 不同浓度褪黑素对盐碱胁迫下矮牵牛幼苗生理指标的影响 在盐碱胁迫下,经褪黑素浸种处理的矮牵牛幼苗叶片中,叶绿素含量和 POD、SOD

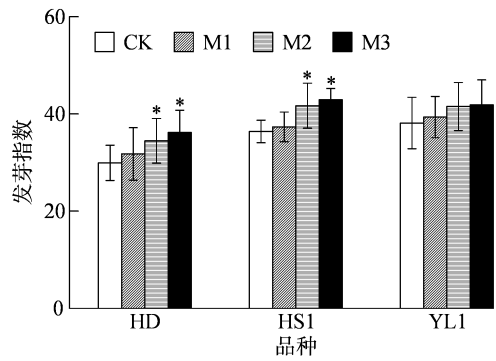


图 9 不同浓度褪黑素浸种对盐碱胁迫下矮牵牛种子发芽指数的影响

活性随褪黑素浓度升高呈上升趋势,而 MDA 含量则呈下降趋势;褪黑素浓度为 100  $\mu\text{mol/L}$  时,前三者均达最大值,MDA 含量达最小值(图 10)。在不同浓度褪黑素浸种处理下,HD 幼苗叶片中的叶绿素含量均显著高于 CK;HS1、YL1 仅在浓度为 70、100  $\mu\text{mol/L}$  时差异显著。与 CK 相比,经 100  $\mu\text{mol/L}$  褪黑素浸种处理的 3 种矮牵牛植株幼苗叶片的 MDA 含量和 SOD、POD 活性差异均达显著水平 ( $P < 0.05$ );而 YL1 在较低褪黑素浓度(40  $\mu\text{mol/L}$ ) 处理时,MDA 含量和 SOD、POD 活性均未达到显著差异(图 10)。

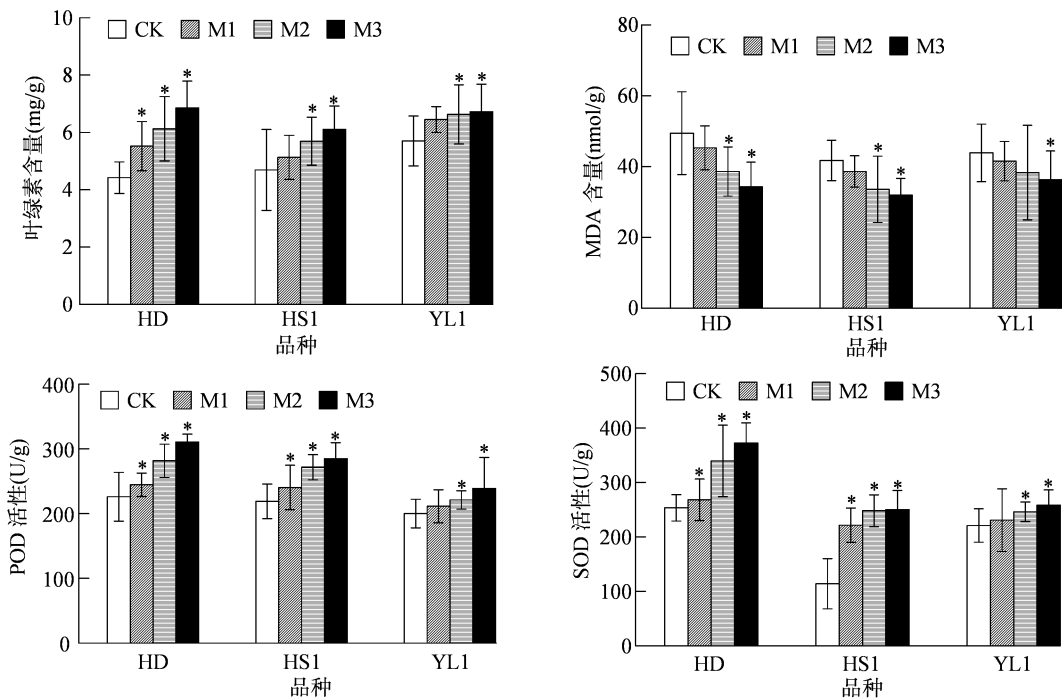


图 10 不同浓度褪黑素浸种对盐碱胁迫下矮牵牛幼苗生理指标的影响

### 3 讨论

盐碱地的化学成分主要包括中性盐与碱性盐。

从对植物的危害程度看,碱性盐大于中性盐;从作用机理看,复合盐碱胁迫较单一成分的中性盐或碱性盐更为复杂<sup>[24-25]</sup>。为最大限度模拟自然生境中

的真实盐碱胁迫,本研究选用植物盐碱胁迫研究中常用的中性盐(NaCl)和碱性盐( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ),将其按等物质量混合后配制成不同浓度的盐碱溶液,用于模拟盐碱胁迫处理。

种子萌发是植物发育的关键阶段,对环境胁迫较为敏感,因此,对于某一植物耐盐碱性的评价往往也可直接通过对其种子萌发期盐碱抗性的分析进行<sup>[24,26-30]</sup>。不同生境下的种子发芽能力反映了植物对环境的适应程度,本研究通过对发芽势、发芽率、发芽指数等指标的统计分析,量化了 9 个不同品种矮牵牛在盐碱胁迫及褪黑素浸种处理下的种子萌发能力。结果表明,盐碱胁迫可不同程度地抑制 9 个品种的种子萌发,表现为发芽势、发芽率、发芽指数降低;且盐碱胁迫强度越大,抑制作用越明显。不同品种对同一强度盐碱胁迫的响应有较大差异;整体而言,盐碱胁迫抗性较强的 YL1、HS2 的抑制程度明显小于抗性较弱的 HD、HS3。进一步研究发现,40、70、100  $\mu\text{mol/L}$  褪黑素浸种处理可不同程度增强盐碱胁迫下矮牵牛种子的发芽能力,促进其种子萌发,这与聂必林等<sup>[31]</sup>、苏文欣等<sup>[13]</sup>、亚梦菲等<sup>[32]</sup>分别以黑果枸杞、紫苏、黑青稞为试验材料的研究结果一致。

盐碱胁迫会导致植物体内  $\text{Na}^+$  等盐离子大量积累,在此基础上引起的离子毒害作用会进一步破坏叶绿体结构,最终降低叶绿素含量<sup>[33]</sup>。本研究中,随盐碱胁迫强度的增加,各品种矮牵牛的叶绿素含量均呈明显下降趋势,但由于盐碱抗性不同,叶绿素含量的降幅呈现出品种差异性,耐盐碱性的品种下降幅度较小。

盐碱胁迫会破坏植物体内活性氧(ROS)产生和清除间的动态平衡,导致 ROS 在细胞内的大量积累,过量的 ROS 会对生物膜、蛋白质、核酸等产生氧化损伤,从而造成细胞功能失调,影响植物的生长发育<sup>[34]</sup>。MDA 作为膜脂氧化的主要产物,在植物体内的变化水平可表征细胞的损伤程度。为主动适应逆境环境,植物在进化过程中形成了 2 套抗氧化系统。其中一类为包含有 SOD、POD 等在内的酶促抗氧化系统,当植物受到盐碱胁迫时,其体内的 SOD、POD 活性增强,加速对 ROS 的清除,进而减轻自身的受损伤程度<sup>[2,34]</sup>。本研究结果表明,随着盐碱胁迫处理浓度升高,9 个品种的 SOD、POD 活性和 MDA 含量均呈上升趋势,但耐盐碱型品种的 SOD、POD 活性的增幅大于盐碱敏感型品种,说明其

具有更强的 ROS 清除能力。另一类为包括褪黑素在内的非酶促抗氧化系统,与植物体内其他已知的抗氧化剂相比,褪黑素具有超强的抗氧化性能,其单个分子可清除多达 10 个左右的 ROS/RNS(活性氮)<sup>[16]</sup>。本研究中在盐碱胁迫下,经 40、70、100  $\mu\text{mol/L}$  褪黑素浸种的矮牵牛幼苗叶片具有更强的 SOD、POD 活性、较低的 MDA 积累量及更高的叶绿素含量,说明褪黑素处理通过清除 ROS 减轻了盐碱胁迫对矮牵牛植株的损伤,这与前人在紫花苜蓿、大豆中的研究结果<sup>[35-37]</sup>一致。

对由多基因和环境因素共同作用的植物抗盐碱性进行评价时,需以多指标综合分析为主。本研究以与种子萌发和苗期植株盐碱胁迫生理响应相关的 7 个指标为依据,对 9 个品种矮牵牛的耐盐碱性进行评价。褪黑素对植物抗盐碱能力的调节作用与其处理浓度密切相关<sup>[13,19,22,31-32,35-37]</sup>。本研究结果表明,褪黑素在 40、70、100  $\mu\text{mol/L}$  时,随着浓度的升高,其对矮牵牛抗盐碱性的调节效应逐渐增强,在 100  $\mu\text{mol/L}$  时的作用效果最为明显,且对盐碱敏感型品种的作用效果明显优于耐盐碱型品种。本研究设置的褪黑素浓度较低,有关高浓度褪黑素对矮牵牛耐盐碱性的调节作用还需进一步验证。

#### 4 结论

9 个矮牵牛品种的耐盐碱性由强到弱依次为 YL1 > HS2 > YL2 > HS1 > HC3 > HC2 > HC1 > HS3 > HD。低浓度(40、70、100  $\mu\text{mol/L}$ )褪黑素浸种对盐碱胁迫条件下矮牵牛种子萌发和苗期生长发育均表现正向调节作用,可作为盐碱生境下用以促进矮牵牛种子萌发和苗期植株生长发育的浸种剂。

#### 参考文献:

- [1] Li J G, Pu L J, Han M F, et al. Soil salinization research in China: advances and prospects[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(5): 943 - 960.
- [2] Fang S M, Hou X, Liang X L. Response mechanisms of plants under saline - alkali stress [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 667458.
- [3] Qadir M, Schubert S. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils[J]. *Land Degradation & Development*, 2002, 13(4): 275 - 294.
- [4] Sumner M E. Gypsum and acid soils the world scene [M]// *Advances in agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 1993: 1 - 32.
- [5] van Zelm E, Zhang Y X, Testerink C. Salt tolerance mechanisms of plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2020, 71: 403 - 433.

- [6] Sharma S S, Dietz K J. The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance[J]. Trends in Plant Science, 2009, 14(1): 43 - 50.
- [7] 王 静, 田永雷, 慕宗杰, 等. 植物改良盐碱地的热点研究及前沿进展: 基于 VOSviewer 的数据可视化分析[J]. 草地学报, 2023, 31(9): 2598 - 2607.
- [8] 邵天韵, 燕 潇, 贾秉志, 等. 种植草本植物狗牙根改良滨海黏性盐碱地的研究[J]. 土壤, 2023, 55(4): 764 - 770.
- [9] 杨晓玲, 郭金耀. 矮牵牛耐盐的形态结构研究[J]. 北方园艺, 2011(15): 113 - 115.
- [10] 关春景, 焦孟月, 张彦妮. 8个矮牵牛品种抗旱性综合评价分析[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 62 - 69, 187.
- [11] 刘冬梅. 不同品种矮牵牛种子萌发期抗旱性鉴定[J]. 种子, 2018, 37(7): 90 - 93.
- [12] 王智威, 苏 冉, 杜文秀, 等. 混合盐碱胁迫对矮牵牛种子萌发的影响[J]. 天津农业科学, 2021, 27(5): 1 - 4.
- [13] 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.
- [14] 张碧茹, 米俊珍, 赵宝平, 等. 外源  $\gamma$ -氨基丁酸缓解燕麦幼苗盐碱胁迫的生理效应[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(2): 222 - 229.
- [15] 张婷婷, 刘宇乐, 陈 红, 等. 不同外源物质对盐、碱及干旱胁迫下草木樨种子萌发、幼苗生长及生理的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(8): 122 - 132.
- [16] Tan D X, Manchester L C, Terron M P, et al. One molecule, many derivatives: a never - ending interaction of melatonin with reactive oxygen and nitrogen species? [J]. Journal of Pineal Research, 2007, 42(1): 28 - 42.
- [17] Zhang Y X, Fan Y P, Rui C, et al. Melatonin improves cotton salt tolerance by regulating ROS scavenging system and  $Ca^{2+}$  signal transduction[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 693690.
- [18] Ali M, Kamran M, Abbasi G H, et al. Melatonin - induced salinity tolerance by ameliorating osmotic and oxidative stress in the seedlings of two tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40(5): 2236 - 2248.
- [19] Cen H F, Wang T T, Liu H Y, et al. Melatonin application improves salt tolerance of alfalfa (*Medicago sativa* L.) by enhancing antioxidant capacity[J]. Plants, 2020, 9(2): 220.
- [20] Liu J, Shabala S, Zhang J, et al. Melatonin improves rice salinity stress tolerance by NADPH oxidase - dependent control of the plasma membrane  $K^+$  transporters and  $K^+$  homeostasis[J]. Plant, Cell & Environment, 2020, 43(11): 2591 - 2605.
- [21] Mohamed I A A, Shalby N, El - Badri A M A, et al. Stomata and xylem vessels traits improved by melatonin application contribute to enhancing salt tolerance and fatty acid composition of *Brassica napus* L. plants[J]. Agronomy, 2020, 10(8): 1186.
- [22] 左月桃, 董 玲, 任晓松, 等. 外源褪黑素对盐碱胁迫下小黑麦种子萌发幼苗生长、抗氧化能力的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(1): 90 - 99.
- [23] 努尔凯麦尔·木拉提, 杨亚杰, 帕尔哈提·阿布都克日木, 等. 小麦叶绿素含量测定方法比较[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(9): 156 - 159.
- [24] 马晓蕾, 胡朋举, 郭 颂, 等. 花生耐盐碱品种的筛选及评价[J]. 华北农学报, 2023, 38(增刊1): 145 - 153.
- [25] 蔺吉祥, 高战武, 王 颖, 等. 盐碱胁迫对紫花苜蓿种子发芽的协同影响[J]. 草地学报, 2014, 22(2): 312 - 318.
- [26] 李 珍, 云 岚, 张玉霞, 等. 10个饲用燕麦品种种子萌发期耐盐碱性的综合评价[J]. 种子, 2019, 38(11): 90 - 95.
- [27] 那桂秋, 寇 贺, 曹敏建. 不同大豆品种种子萌发期耐盐碱性鉴定[J]. 大豆科学, 2009, 28(2): 352 - 356.
- [28] 张玉霞, 崔 禄, 郭 园, 等. 23个紫花苜蓿品种种子萌发期耐盐碱性的综合评价[J]. 种子, 2015, 34(10): 71 - 74.
- [29] 叶协锋, 张晓帆, 郑宪滨, 等. 复合盐碱处理下烤烟品种发芽特性及耐盐性评价[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(3): 37 - 43.
- [30] 曹镇宇, 魏鹏超, 杨忠仁, 等. 复合盐碱胁迫对沙葱种子萌发的影响[J]. 种子, 2024, 43(4): 104 - 110, 116.
- [31] 聂必林, 巫利梅, 如马南木·尼合买提, 等. 外源褪黑素对复合盐碱胁迫下黑果枸杞种子萌发和幼苗生长的缓解效应[J]. 西北植物学报, 2021, 41(10): 1711 - 1724.
- [32] 亚梦菲, 刘人铜, 王建林. 不同复合盐碱胁迫下外源褪黑素浸种对黑青稞种子萌发特性及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(21): 86 - 92.
- [33] 梁培鑫, 唐 榕, 刘建国. 混合盐碱胁迫对油莎豆光合生理及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(12): 195 - 204.
- [34] 李 格, 孟小庆, 蔡 敬, 等. 活性氧在植物非生物胁迫响应中功能的研究进展[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 951 - 959.
- [35] 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.
- [36] 李平平, 张永清, 张 萌, 等. 褪黑素浸种对混合盐碱胁迫下藜麦生长及生理的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 77 - 84.
- [37] 钟行杰, 张明聪, 韩爱平, 等. 外源褪黑素对苏打盐碱胁迫大豆幼苗的缓解效应[J]. 生态学杂志, 2023, 42(12): 2953 - 2960.