

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.018

引用格式:王辉,孙延亮,李生仪,等.盐碱胁迫对油莎豆种子萌发、幼苗生长和生理特性的影响[J].草地学报,2026,34(7):2540—2552

WANG Hui, SUN Yan-liang, LI Sheng-yi, et al. Effects of Saline-Alkali Stress on Seed Germination, Seedling Growth and Physiological Characteristics of *Cyperus esculentus*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2540—2552

盐碱胁迫对油莎豆种子萌发、幼苗生长和生理特性的影响

王辉¹, 孙延亮¹, 李生仪², 贾舒安³, 杨开鑫¹, 魏孔钦¹, 马春晖¹, 王旭哲^{1*}

(1. 石河子大学动物科技学院, 新疆 石河子 832003; 2. 新疆维吾尔自治区农业农村改革研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 新疆维吾尔自治区动物疫病预防控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:为揭示油莎豆(*Cyperus esculentus*)对盐碱胁迫的适应能力,明确盐碱协同效应,以‘中油莎1号’为试验材料,通过两因素完全随机实验,设置6个盐梯度(0, 100, 150, 200, 250和300 mmol·L⁻¹ Na⁺)和3个碱梯度(pH为7.0, 8.5和10.0)进行盐碱复合胁迫。对不同盐碱胁迫下油莎豆种子萌发、幼苗生长、叶片渗透物质和抗氧化指标进行测定。结果表明,油莎豆种子发芽率、幼苗鲜重和苗长随着盐胁迫的增加均显著下降($P<0.05$),且强碱条件下致死盐阈值(250 mmol·L⁻¹)低于中性及弱碱环境(300 mmol·L⁻¹)。随胁迫加剧,幼苗通过积累脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白进行渗透调节,并提高过氧化物酶与过氧化氢酶活性以缓解损伤。综上所述,油莎豆会通过调节渗透和抗氧化能力适应盐碱胁迫,但在高盐和高碱胁迫时会超过其耐受阈值,导致不可逆损伤。研究结果为油莎豆在新疆盐碱地的推广种植提供科学依据。

关键词:油莎豆;盐碱胁迫;幼苗生长;叶片渗透调节;抗氧化能力

中图分类号:S544.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2540-13

Effects of Saline-Alkali Stress on Seed Germination, Seedling Growth and Physiological Characteristics of *Cyperus esculentus*

WANG Hui¹, SUN Yan-liang¹, LI Sheng-yi², JIA Shu-an³, YANG Kai-xin¹, WEI Kong-qin¹,
MA Chun-hui¹, WANG Xu-zhe^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Agricultural and Rural Reform Research Center, Urumqi, Xinjiang 830000, China; 3. Xinjiang Uygur Autonomous Region Animal Disease Prevention and Control Center, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: To elucidate the adaptive capacity of *Cyperus esculentus* to salt-alkali stress and clarify the synergistic effects of salt and alkali, a two-factor completely randomized design was employed using ‘Zhongyousha 1’ as the test material. Compound salt-alkali stress was imposed using six salt gradients (0, 100, 150, 200, 250, and 300 mmol·L⁻¹ Na⁺) and three alkali gradients (pH 7.0, 8.5, and 10.0). Seed germination, seedling growth, leaf osmolytes, and antioxidant parameters were determined under these conditions. The results showed that germination percentage, fresh weight, and seedling length decreased significantly with increasing salt stress ($P<0.05$). Notably, the lethal salt threshold under strong alkali conditions (250 mmol·L⁻¹) was lower than that in neutral and weak alkali environments (300 mmol·L⁻¹). With intensifying stress, seedlings mitigated damage by accumulating proline, soluble sugars, and soluble proteins for osmotic adjustment, and by

收稿日期:2025-09-03;修回日期:2026-01-25

基金项目:兵团科技计划项目(2024DB023);石河子大学青年拔尖计划项目(BJZK202406);国家自然科学基金项目(32260856);国家牧草产业技术体系(CARS-34)资助

作者简介:王辉(2001-),男,汉族,湖北仙桃人,硕士研究生,主要从事饲草生产与加工研究,E-mail:wh17671003482@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:690953197@qq.com

enhancing peroxidase and catalase activities. In conclusion, *Cyperus esculentus* adapted to salt-alkali stress by regulating osmotic and antioxidant capacities; however, excessive salt and alkali levels exceed its tolerance threshold, causing irreversible damage. These findings provide a scientific basis for promoting the cultivation of *Cyperus esculentus* in saline-alkali lands in Xinjiang.

Key words: *Cyperus esculentus*; Saline-alkali stress; Seedling growth; Leaf osmotic adjustment; Antioxidant capacity

中国盐碱地总面积约 9913 万公顷,约占全国陆地面积的十分之一。其中,新疆地区盐碱化尤为严重,盐碱地面积约 1336 万公顷,占该地区耕地总量的约三分之一^[1-2]。新疆部分地区的盐渍土以苏打-氯化物型为主,主要含有 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 和 NaCl 。高浓度的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 使土壤 pH 值普遍高于 8.5,在碱性较强的区域甚至可达 9.0~10.5^[3-4]。高盐分和高 pH 的土壤环境对多数作物的生长构成严重威胁,而油莎豆(*Cyperus esculentus*)具有较强的环境适应性,兼具抗旱、抗涝、耐贫瘠及耐盐碱等特性,适宜在盐碱化土壤中种植^[5]。该作物分蘖能力较强,地上部分可生长至 1.0~1.5 m,植株无直立茎秆,叶片细长,营养价值较高,粗脂肪、粗蛋白和粗纤维含量分别为 8.9%,9.8% 和 19.3%,是优质的青贮饲料资源^[6]。此外,油莎豆生长周期短、产量高,能在盐碱地等边际土地上实现高效生产,为畜牧业提供可持续的优质饲料来源^[7]。

盐碱土对植物种子萌发与生长的影响主要表现为离子毒害和高 pH 胁迫等^[8]。盐胁迫通常由中性盐(如 NaCl)引起,其主要危害是离子毒害和渗透失衡;而碱胁迫则由碱性盐(如 NaHCO_3 和 Na_2CO_3)导致,除具有盐胁迫效应外,还会引发高 pH 造成的直接损伤,如细胞膜稳定性降低、营养失衡及代谢紊乱^[9-10]。在自然条件下,盐胁迫与碱胁迫常呈协同作用,对植物的萌发和生长产生显著抑制。其中,盐碱胁迫对植物种子萌发及幼苗发育的影响尤为突出,成为近年来研究关注的重点。为适应盐碱环境,植物会

启动一系列分子响应机制,通过调节渗透调节物质和抗氧化酶活性,减轻盐碱胁迫引起的渗透失衡、离子毒害和氧化损伤,从而提升自身的耐盐碱能力^[11]。总体而言,盐碱胁迫不仅影响植物早期生长和生理代谢,也驱动植物形成复杂的耐受与适应机制,这对于探索作物的耐盐碱育种策略具有重要意义。

目前,已有研究主要聚焦于单一盐或碱胁迫对油莎豆生长的影响,而关于盐碱互作对其生长及生理适应机制的研究仍较匮乏,难以满足新疆地区多类型盐碱地油莎豆种植的实际需求。基于此,本研究系统分析了不同盐胁迫和碱胁迫条件下油莎豆种子的萌发特性、幼苗生长指标及生理特征,旨在揭示复合盐碱胁迫对油莎豆早期生长发育的抑制效应及其生理响应机制。研究结果可为油莎豆在新疆盐碱地的推广种植提供科学依据,并为该地区盐碱地资源的高效利用及特色经济作物的可持续发展提供实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试品种为‘中油莎 1 号’,由中国农业科学院油料作物研究所提供。选择颗粒饱满、大小均一、无机械损伤、无发霉及虫眼的种子。经 5% NaClO 溶液消毒 10 min 后,用去离子水冲洗 3 次后风干备用。试验土选取自石河子大学试验地(44°20' N, 88°30' E),试验土壤理化性质见表 1。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

碱解氮 Alkaline nitrogen/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available potassium/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH
153.27	38.3	70.18	25.1	7.48

1.2 试验设计

本试验采用两因素完全随机试验设计,其中 Na^+ 浓度设置 6 个水平:0(S_0), 100(S_1), 150(S_2), 200(S_3), 250(S_4)和 300(S_5) $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$;设置 3 个 pH 水平:7.0(A_0), 8.5(A_1)和 10.0(A_2),共 18 个处理(表 2)。试验利用 NaCl 、 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 按摩尔比

例调整形成不同盐碱梯度以调控 pH;其中 0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na^+ 处理组采用 KOH 调节。

将种子用蒸馏水浸泡 48 h 后,转移至铺有双层纱布的培养皿中,表面覆以脱脂棉。每个处理设置 3 个重复,每个重复含 50 粒种子。培养条件为:光周期 16 h/8 h(昼/夜),光照强度 52 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,温

表 2 各处理盐分组成,摩尔比,Na⁺浓度及 pHTable 2 Salts composition, molar ratio, Na⁺ concentration and pH of solutions for mixed salt-alkali treatment

处理 Treatment	盐分组成和摩尔比 Salt composition and molar ratio			Na ⁺ /(mmol·L ⁻¹)	pH
	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃		
A ₀ S ₀	0	0	0	0	7.02
A ₀ S ₁	1	0	0	100	7.01
A ₀ S ₂	1	0	0	150	7.01
A ₀ S ₃	1	0	0	200	7.01
A ₀ S ₄	1	0	0	250	7.02
A ₀ S ₅	1	0	0	300	7.01
A ₁ S ₀	0	0	0	0	8.50
A ₁ S ₁	69	67	1	100	8.51
A ₁ S ₂	69	67	1	150	8.50
A ₁ S ₃	69	67	1	200	8.52
A ₁ S ₄	69	67	1	250	8.51
A ₁ S ₅	69	67	1	300	8.52
A ₂ S ₀	0	0	0	0	10.03
A ₂ S ₁	4	2	1	100	10.04
A ₂ S ₂	4	2	1	150	10.03
A ₂ S ₃	4	2	1	200	10.04
A ₂ S ₄	4	2	1	250	10.05
A ₂ S ₅	4	2	1	300	10.05

度 35℃,相对湿度 80%^[12]。每天更换新的处理液浸泡纱布,以保持盐度恒定,并定时记录种子发芽数量。发芽试验结束后,将萌发的种子分别移栽至塑料盆(上口直径 20 cm,下口直径 14 cm,高 17 cm)中。按等体积比例混合蛭石与试验土壤,每盆装基质 3 kg,将其置于恒温培养箱中,昼/夜温度为 30℃/25℃,时间为 14 h/10 h,湿度 75%^[13]。每个处理设 10 盆,每盆栽 3 株幼苗。首次浇灌含目标盐浓度的 1/2 Hoagland 营养液 1 L;随后每 3 d 浇灌蒸馏水 500 mL,使基质含水量达饱和状态^[14]。胁迫处理 25 d 后,测定幼苗的相关生理指标。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 种子萌发特性 发芽试验共进行 10 d,从第 2 d 开始每天定时记录每个发芽盒中的发芽种子数(以腋芽突破种皮为发芽标准)。用第 5 d 的发芽种子数计算发芽势(Germination potential, GPO);第 10 d 统计发芽率(Germination percentage, GPE),计算发芽指数(Germination index, GI)和相对盐害率(Related salt damage rate, SDR),公式如下。

$$GPO = (N_5/N) \times 100\%$$

$$GPE = (N_{10}/N) \times 100\%$$

$$GI = \sum(N_i/D_i)$$

$$SDR = (GPE_{ck} - GPE_n)/GPE_n \times 100\%$$

式中, N_5 , N_{10} 和 N_i 分别表示第 5, 10 和 t d 的萌

发种子数, N 表示供试种子总数, D_i 表示萌发天数, GPE_{ck} 表示对照组即 A₀S₀ 处理的发芽率, GPE_n 表示各处理的发芽率。

发芽试验第 10 d, 在每个处理中随机选取五株种苗, 用游标卡尺测定芽长(Bud length, BL)和不定根长(Adventitious roots length, ARL), 计算根芽比(Adventitious roots length/Bud length, R/B), 公式如下:

$$R/B = ARL/BL$$

1.3.2 幼苗生长和生理指标测定 盐碱胁迫 25 d 后, 每个处理随机选取 3 盆, 用直尺测量苗长(Seedling length, SL)和根长(Root length, RL), 用游标卡尺测量茎粗(Stem diameter, SD)。采收幼苗后清洗掉根部泥土, 先称量油莎豆幼苗植株鲜重(Fresh weight, FW), 再置于烘箱 85℃ 烘干至恒重, 称量植株干重(Dry weight, DW)。另随机取 3 盆, 每盆取 2 株生长一致的植株作为生理分析样品。取样时剪取充分展开的功能叶, 称取约 1.0 g 鲜样, 迅速置于液氮中冷冻保存, 后于 -80℃ 冰箱中待测。可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量用蒽酮比色法测定, 可溶性蛋白(Soluble protein, SP)含量用考马斯亮蓝法测定^[15], 过氧化氢酶(Catalase, CAT)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性和脯氨酸(Proline, Pro)含量采用苏州格锐思生物科技有限公司生产的检测试剂盒测定^[16], 丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量采用南京

建成生物工程研究所生产的检测试剂盒测定^[17]。

1.4 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 2020 进行数据整理统计,运用 SPSS27.0 统计软件进行数据的双因素方差分析和 Duncan 多重比较;采用 Origin 2024 软件进行主成分分析和图表的绘制,同时运用皮尔逊(Pearson)相关性分析对油莎豆萌发和生长生理指标进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对油莎豆种子萌发的影响

2.1.1 盐碱胁迫对油莎豆种子发芽势、发芽率、发芽指数和相对盐害率的影响 由表 3 可知,盐和碱胁迫及二者交互对油莎豆种子发芽势、发芽率、发芽指数和相对盐害率均有显著影响($P<0.05$)。在 S_0 , S_1 和 S_2 条件下,发芽势随 pH 值升高呈先升后降的趋势, A_1 处理的发芽势均显著高于 A_0 处理。在 S_0 条件

下, A_2 处理的发芽势高于 A_0 处理;而在 S_1 和 S_2 条件下, A_2 处理显著低于 A_0 处理。在 S_3 和 S_4 条件下,发芽势随 pH 值的上升,呈降低趋势。同一 Na^+ 浓度下,发芽率和发芽指数随 pH 值的上升,呈先升高后降低的趋势,相对盐害率随 pH 值的上升,呈先降低后升高的趋势。同一 pH 值下,发芽势、发芽率和发芽指数随 Na^+ 浓度的上升,呈降低趋势。发芽势在 A_0 , A_1 和 A_2 条件下均在 S_0 处理时最高,在 A_0 条件下到 S_5 降为 0,在 A_1 条件下从 S_4 开始降为 0,在 A_2 条件下从 S_2 开始降为 0。在 A_0 , A_1 和 A_2 条件下,发芽率均在 S_5 时最低,较 S_0 分别降低了 45.20%, 42.22% 和 54.87%。在 A_0 , A_1 和 A_2 条件下,发芽指数均在 S_5 最低,较 S_0 分别降低了 74.07%, 76.93% 和 84.02%。同一 pH 值下,随 Na^+ 浓度的上升,相对盐害率呈升高趋势, A_2S_5 处理的相对盐害率最高,为 49.28%, A_1S_0 的相对盐害率最低,为 -23.25%,在 A_0 , A_1 和 A_2 条件下, S_5 相比于 S_0 相对盐害率分别升高了 45.28%, 51.95% 和 61.74%, A_2 条件下升高最多。

表 3 盐碱胁迫对油莎豆种子发芽势、发芽率、发芽指数和相对盐害率的影响

Table 3 Effects of saline-alkali stress on GPO, GPE, GI and SDR of *Cyperus esculentus* tubers

处理 Treatment	发芽势 Germination potential / %	发芽率 Germination percentage / %	发芽指数 Germination index	相对盐害率 Related salt damage rate / %
A_0S_0	37.33 ± 2.31^{Ac}	48.67 ± 2.31^{Ac}	58.05 ± 3.41^{Ac}	0^{Aa}
A_0S_1	31.33 ± 2.31^{Bb}	48.00 ± 3.46^{Ab}	53.66 ± 3.88^{Ab}	1.45 ± 2.51^{Ba}
A_0S_2	27.33 ± 2.31^{Cb}	44.00 ± 3.46^{Ab}	47.55 ± 4.44^{Bb}	9.68 ± 2.91^{Bb}
A_0S_3	15.33 ± 1.15^{Da}	36.67 ± 3.06^{Bb}	33.05 ± 2.14^{Ca}	24.7 ± 4.18^{Cb}
A_0S_4	5.33 ± 1.15^{Ea}	34.67 ± 1.15^{Bb}	24.25 ± 1.91^{Da}	28.7 ± 3.02^{Db}
A_0S_5	0.00 ± 0.00^{Fa}	26.67 ± 3.06^{Cb}	15.05 ± 1.04^{Eab}	45.28 ± 4.57^{Da}
A_1S_0	58.00 ± 3.46^{Aa}	60.00 ± 4.00^{Aa}	78.11 ± 4.74^{Aa}	-23.25 ± 4.21^{Ac}
A_1S_1	38.67 ± 2.31^{Ba}	54.00 ± 3.46^{Ba}	63.16 ± 3.16^{Ba}	-10.90 ± 1.91^{Bb}
A_1S_2	33.33 ± 3.06^{Ca}	52.67 ± 2.31^{Ba}	55.30 ± 2.56^{Ca}	-8.23 ± 0.40^{Cc}
A_1S_3	15.33 ± 1.15^{Da}	43.33 ± 3.06^{Ca}	36.49 ± 3.54^{Da}	11.01 ± 2.66^{Dc}
A_1S_4	0.00 ± 0.00^{Eb}	40.00 ± 4.00^{Ca}	24.47 ± 1.52^{Ea}	17.91 ± 5.19^{Dc}
A_1S_5	0.00 ± 0.00^{Fa}	34.67 ± 1.15^{Da}	18.02 ± 0.75^{Fa}	28.70 ± 3.02^{Eb}
A_2S_0	44.67 ± 1.15^{Ab}	54.67 ± 1.15^{Ab}	66.60 ± 3.54^{Ab}	-12.46 ± 4.71^{Ab}
A_2S_1	8.67 ± 2.31^{Bc}	47.33 ± 2.31^{Bb}	30.43 ± 1.15^{Bc}	2.67 ± 4.62^{Ba}
A_2S_2	0.00 ± 0.00^{Cc}	38.67 ± 2.31^{Cc}	20.35 ± 1.52^{Cc}	20.58 ± 1.00^{Ca}
A_2S_3	0.00 ± 0.00^{Cb}	32.67 ± 2.31^{Db}	11.86 ± 1.52^{Db}	32.93 ± 1.61^{Da}
A_2S_4	0.00 ± 0.00^{Cb}	28.00 ± 3.46^{Ec}	12.92 ± 1.22^{Db}	42.61 ± 4.52^{Ea}
A_2S_5	0.00 ± 0.00^{Ca}	24.67 ± 1.15^{Eb}	10.64 ± 0.98^{Db}	49.28 ± 2.36^{Fa}
S	**	**	**	**
A	*	**	**	**
A×S	**	*	**	**

注: A 代表碱处理, S 代表盐处理, A×S 代表互作效应; 大写字母表示同一 pH 不同 Na^+ 浓度间在 $P<0.05$ 水平差异显著, 小写字母表示同一 Na^+ 浓度不同 pH 间在 $P<0.05$ 水平差异显著, * 和 ** 分别代表在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著, NS 表示无显著性差异, $P>0.05$, 下同

Note: A represents alkali treatment, S represents salt treatment, and A×S represents interaction effect. The uppercase letter indicates that the difference between different Na^+ concentrations at the same pH is significant at the $P<0.05$ level. The lowercase letter indicates that the difference between different pH at the same Na^+ concentration is significant at the $P<0.05$ level. * and ** represent significant differences at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively, NS indicates no significant difference, $P>0.05$, the same as below

2.1.2 盐碱胁迫对油莎豆种子不定根长、芽长的影响 由表 4 可知,盐和碱胁迫及二者交互对油莎豆种子不定根长、芽长和根芽比均有显著影响($P < 0.05$)。同一 Na^+ 浓度下,随 pH 的上升,根长逐渐降低。在 S_0 和 S_1 条件下,随着 pH 的上升,芽长先升高后降低,而在 S_2, S_3, S_4 和 S_5 条件下,随 pH 的上升,芽长逐渐降低。同一 pH 下,随 Na^+ 浓度的上升,不定

根长和芽长呈现降低的趋势。不定根长在 A_0, A_1 和 A_2 条件下均在 S_0 时最高,在 A_0 条件下在 S_5 降为 1.231 cm,下降了 82.78%,在 A_1 条件下从 S_4 开始降为 0,在 A_2 条件下从 S_2 开始降为 0。芽长在 A_0, A_1 和 A_2 条件下均在 S_5 时最低,相比于 S_0 分别降低了 75.16%, 85.95% 和 88.68%,在 A_3 条件下降低最多。

表 4 盐碱胁迫对油莎豆种子不定根长、芽长的影响

Table 4 Effects of saline-alkali stress on ARL and BL of *Cyperus esculentus* tubers

处理 Treatment	不定根长 Adventitious roots length/cm	芽长 Bud length/cm	根芽比 Adventitious roots length/Bud length
A_0S_0	7.150 ± 0.742^{Aa}	6.614 ± 0.484^{Ab}	1.08 ± 0.05^{Ca}
A_0S_1	6.502 ± 0.538^{Ba}	4.837 ± 0.333^{Ba}	1.34 ± 0.06^{Aa}
A_0S_2	4.211 ± 0.456^{Ca}	4.538 ± 0.386^{Ca}	0.93 ± 0.06^{Da}
A_0S_3	3.357 ± 0.158^{Da}	2.851 ± 0.164^{Da}	1.18 ± 0.01^{Ba}
A_0S_4	1.737 ± 0.059^{Ea}	2.364 ± 0.216^{Ea}	0.74 ± 0.04^{Ea}
A_0S_5	1.231 ± 0.088^{Ea}	1.643 ± 0.069^{Fa}	0.75 ± 0.05^{Ea}
A_1S_0	6.690 ± 0.383^{Aab}	7.262 ± 0.396^{Aa}	0.92 ± 0.02^{Bb}
A_1S_1	5.242 ± 0.590^{Bb}	5.188 ± 0.596^{Ba}	1.01 ± 0.05^{Ab}
A_1S_2	2.604 ± 0.075^{Cb}	3.498 ± 0.166^{Cb}	0.74 ± 0.01^{Cb}
A_1S_3	1.263 ± 0.049^{Db}	2.079 ± 0.165^{Db}	0.61 ± 0.03^{Dc}
A_1S_4	0.815 ± 0.136^{Db}	1.739 ± 0.135^{Db}	0.47 ± 0.05^{Ec}
A_1S_5	0.000 ± 0.000^{Eb}	1.020 ± 0.030^{Eb}	0.00 ± 0.00^{Fb}
A_2S_0	6.228 ± 0.502^{Ab}	5.461 ± 0.331^{Ac}	1.14 ± 0.03^{Ba}
A_2S_1	2.910 ± 0.147^{Bc}	2.250 ± 0.143^{Bb}	1.30 ± 0.04^{Aa}
A_2S_2	1.277 ± 0.065^{Cc}	1.630 ± 0.065^{Cc}	0.78 ± 0.03^{Cb}
A_2S_3	1.047 ± 0.057^{Cb}	1.458 ± 0.084^{Cc}	0.72 ± 0.01^{Db}
A_2S_4	0.000 ± 0.000^{Dc}	1.194 ± 0.062^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Eb}
A_2S_5	0.000 ± 0.000^{Db}	0.618 ± 0.030^{Db}	0.00 ± 0.00^{Eb}
S	**	**	**
A	**	**	*
$A \times S$	**	**	**

2.2 盐碱胁迫对油莎豆幼苗生长的影响

从表 5 中数据可以看出,盐和碱胁迫对油莎豆幼苗的鲜重、干重、苗长、根长以及茎粗产生了显著影响($P < 0.05$),而盐碱交互仅对干重有显著影响($P < 0.05$),此外 S_5 所有处理以及 A_2S_4 处理死亡。同一 Na^+ 浓度下,随 pH 的上升,鲜重、干重、苗长、根长和茎粗均呈先升高后降低的趋势。在 S_1 和 S_4 下, A_1 处理的鲜重显著高于 A_0 处理;在 S_1, S_2, S_3 和 S_4 下, A_1 处理的干重显著高于 A_0 处理,在 S_0 和 S_1 条件下, A_2 处理的干重显著高于 A_0 处理;在 S_3 下, A_2 处理的苗长显著低于 A_0 处理;在 S_3 下, A_1 处理的根长显著高于 A_0 处理,在 S_0 和 S_1 条件下, A_2 处理的根长显著低于 A_0 处理;在 S_1 和 S_4 下, A_1 处理的茎粗显著高于 A_0 处理。同一 pH 下,随 Na^+ 浓度的上升,鲜重、干重、苗长和茎粗逐渐降低,均在 S_0 下最高,

在 S_4 下最低。在 A_0 和 A_1 条件下, S_4 与 S_0 相比鲜重降低了 92.38% 和 80.32%,干重降低了 87.93% 和 64.38%,苗长降低了 83.34% 和 77.79%,茎粗降低了 42.75% 和 42.25%。在 A_0 和 A_1 条件下,随 Na^+ 浓度的上升,根长呈现先升高后降低的趋势,在 S_1 时最高,在 S_4 时最低,下降了 52.03% 和 59.12%。

2.3 盐碱胁迫对油莎豆幼苗叶片生理指标的影响

2.3.1 盐碱胁迫对油莎豆幼苗叶片渗透物质含量的影响 在 S_0, S_1 和 S_2 下,可溶性蛋白含量随 pH 的上升,呈现先降低后升高的趋势,其中 S_0 和 S_1 下, A_1 显著低于 A_0 。在 S_3 下,可溶性蛋白含量随 pH 的上升,呈现逐渐降低的趋势, A_2 显著低于 A_0 ,降低了 7.37%。在 A_0 和 A_1 条件下,可溶性蛋白含量随 Na^+

表 5 盐碱胁迫对油莎豆幼苗生长的影响

Table 5 Effects of saline-alkali stress on the growth of *Cyperus esculentus* seedlings

处理 Treatment	鲜重 Fresh weight/g	干重 Dry weight/g	苗长 Seedling length/cm	根长 Root length/cm	茎粗 Stem diameter/cm
A ₀ S ₀	5.764±0.328 ^{Aa}	0.663±0.036 ^{Ab}	50.13±4.98 ^{Aa}	12.91±1.10 ^{Aa}	3.09±0.19 ^{Aa}
A ₀ S ₁	3.172±0.170 ^{Bb}	0.428±0.023 ^{Bb}	33.24±4.35 ^{Ba}	13.82±1.12 ^{Aa}	2.20±0.15 ^{Bb}
A ₀ S ₂	2.326±0.145 ^{Ca}	0.351±0.022 ^{Cb}	23.28±1.76 ^{Cab}	10.57±1.54 ^{Bab}	2.10±0.42 ^{BCa}
A ₀ S ₃	1.778±0.103 ^{Dab}	0.291±0.017 ^{Cb}	22.58±0.49 ^{Ca}	8.87±0.65 ^{Bb}	1.81±0.08 ^{Ca}
A ₀ S ₄	0.439±0.031 ^{Eb}	0.080±0.006 ^{Db}	8.350±0.32 ^{Da}	6.63±0.49 ^{Ca}	1.77±0.07 ^{Ca}
A ₁ S ₀	6.198±0.728 ^{Aa}	0.688±0.081 ^{Ab}	53.68±1.13 ^{Aa}	13.54±1.96 ^{ABa}	3.29±0.12 ^{Aa}
A ₁ S ₁	3.753±0.294 ^{Ba}	0.537±0.042 ^{Ba}	34.37±3.03 ^{Ba}	14.85±0.88 ^{Aa}	2.67±0.29 ^{Ba}
A ₁ S ₂	2.685±0.137 ^{Ca}	0.451±0.023 ^{Ca}	26.14±1.43 ^{Ca}	12.33±1.59 ^{BCa}	2.26±0.20 ^{Ca}
A ₁ S ₃	1.972±0.115 ^{Da}	0.363±0.022 ^{Da}	24.16±3.01 ^{Ca}	10.93±1.06 ^{Ca}	2.02±0.11 ^{CDa}
A ₁ S ₄	1.220±0.040 ^{Ea}	0.243±0.008 ^{Ea}	11.92±0.51 ^{Da}	6.07±0.39 ^{Da}	1.90±0.14 ^{Db}
A ₂ S ₀	6.086±0.368 ^{Aa}	0.749±0.045 ^{Aa}	53.91±3.25 ^{Aa}	10.72±0.74 ^{Ab}	3.32±0.17 ^{Aa}
A ₂ S ₁	3.237±0.303 ^{Bb}	0.476±0.045 ^{Ba}	32.08±2.53 ^{Ba}	10.52±0.51 ^{Ab}	1.99±0.28 ^{Bb}
A ₂ S ₂	2.252±0.179 ^{Ca}	0.403±0.032 ^{Cab}	19.34±1.69 ^{Cb}	9.72±1.74 ^{Ab}	2.12±0.03 ^{Ba}
A ₂ S ₃	1.373±0.075 ^{Db}	0.278±0.015 ^{Db}	16.76±1.08 ^{Cb}	7.07±0.39 ^{Bb}	1.84±0.16 ^{Ba}
S	**	**	**	**	**
A	**	**	**	**	**
A×S	NS	**	NS	NS	NS

浓度的上升而逐渐升高,在 S₃时达到最大,比 S₀升高了 37.62% 和 50%,在 A₂条件下,可溶性蛋白含量随 Na⁺浓度的上升而呈现先升高后降低的趋势,在 S₂达到最大,比 S₀升高了 24.94%。

在 S₀下,三种 pH 下的可溶性糖含量无显著差异,在 S₁和 S₃下,A₁的可溶性糖含量显著低于 A₀和 A₂($P<0.05$),A₀与 A₂之间差异不显著,在 S₂下,A₀的可溶性糖含量最大,A₂最小。可溶性糖含量在 A₀和 A₂条件下随 Na⁺浓度的上升逐渐升高,在 S₃达到最大,相比于 S₀升高了 70.5% 和 52.84%,在 A₁条件下,随 Na⁺浓度的上升,可溶性糖含量先下降后升高,到 S₃最大,与 S₀相比上升了 43.09%。

同一 Na⁺浓度下,脯氨酸含量随 pH 的上升先升高后降低,其中 S₀,S₂和 S₃下,A₁显著高于 A₀,提高了 26.69%,14.48% 和 16.55%。在同一 pH 下,脯氨酸含量随 Na⁺浓度的上升而逐渐升高。在 A₀,A₁和 A₂条件下,均在 S₃达到最大,相比于 S₀升高了 100.62%,56.24% 和 46.46%。

2.3.2 盐碱胁迫对油莎豆幼苗叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响 S₀和 S₁的 SOD 活性随 pH 的上升而降低,在 A₂时显著低于 A₀,降低了 13.08% 和 18.77%。S₂和 S₃的 SOD 活性在各 pH 条件下无显著差异。在同一 pH 下,SOD 活性随 Na⁺浓度的上升先降低后升高。在 A₀,A₁和 A₂条件下,S₁的 SOD 活性最低,显著低于 S₀,降低了 26.79%,26.81% 和 31.59%,随后逐渐升高。

在 S₀,S₁和 S₂下,随 pH 的上升,CAT 活性逐渐升高,A₁和 A₂均显著高于 A₀,在 A₂时最大,相比于 A₀升高了 18.09%,48.00% 和 36.37%。在 S₃下,随 pH 的上升,CAT 活性呈现先升高后降低的趋势,在 A₁时最大,显著高于 A₀,升高了 29.94%。在 A₀条件下,CAT 活性随 Na⁺浓度的上升,呈现先升高后降低的趋势,在 S₃达到最大,相比于 S₀升高了 19.33%,在 A₁和 A₂条件下,CAT 活性随 Na⁺浓度的上升逐渐升高,在 S₃最大,相比于 S₀升高了 38.48% 和 24.73%。

在 S₀和 S₁下,各 pH 下的叶片 POD 活性差异不显著。在 S₂和 S₃下,A₂的叶片 POD 活性显著低于 A₀,降低了 9.44% 和 21.91%,A₁与 A₀无显著差异。同一 pH 下,油莎豆叶片 POD 活性随着 Na⁺浓度上升,呈现先升高后降低的趋势。在 A₀,A₁和 A₂条件下,POD 活性均在 S₁最大,与 S₀相比升高了 77.51%,80.00% 和 63.80%,随后逐渐降低,S₃的 POD 活性仍显著高于 S₀,相比于 S₀升高了 55.02%,44.65% 和 12.65%。

在同一 Na⁺浓度下,叶片 MDA 含量随 pH 的上升呈现先升高后降低的趋势,均在 A₁达到最大,比 A₀升高了 49.81%,95.18%,8.96% 和 20.45%。在不同 pH 条件下,油莎豆叶片 MDA 含量随 Na⁺浓度的上升呈现先升高后降低的趋势。在 A₀,A₁和 A₂条件下,均在 S₂下 MDA 含量达到最大,比 S₀升高了 154.85%,70.41%,106.67%。

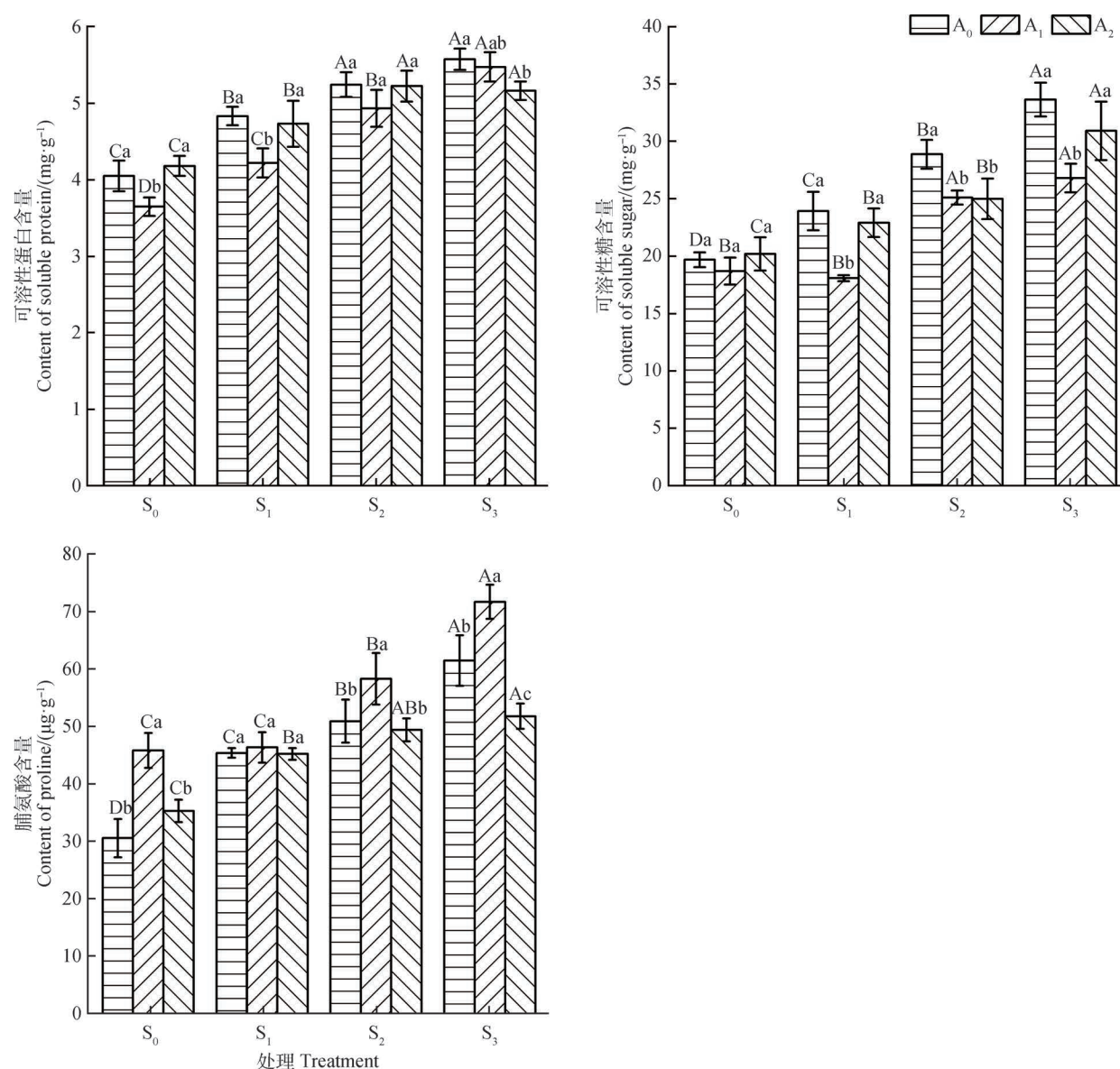


图 1 不同盐碱胁迫对油莎豆叶片渗透物质的影响

Fig. 1 Effects of different saline-alkali stresses on osmotic substances in leaves of *Cyperus esculentus*

注: A 代表碱处理, S 代表盐处理; 大写字母表示同一 pH 不同 Na⁺ 浓度间在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 小写字母表示同一 Na⁺ 浓度不同 pH 间在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 下同

Note: A represents alkali treatment, S represents salt treatment; the uppercase letters indicate that the difference between different Na⁺ concentrations at the same pH is significant at the $P < 0.05$ level. The lowercase letters indicate that the difference between different pH at the same Na⁺ concentration is significant at the $P < 0.05$ level, the same as below

2.4 盐碱胁迫下油莎豆各指标相关性分析和主成分分析

图 3 显示了油莎豆的发芽率、发芽势、发芽指数、芽长、不定根长、苗长、干重和鲜重之间存在显著的正相关性, 而相对盐害率、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量、过氧化氢酶和丙二醛含量与发芽率、发芽势、发芽指数、芽长、不定根长、苗长、根长、干重和鲜重存在显著的负相关性。为了防止各指标代表的盐碱胁迫信息重叠, 影响评价结

果的准确性, 对 19 个指标进行了主成分分析, 形成综合指标后再进行盐碱胁迫评价, 从而保证盐碱胁迫综合评价结果客观准确。如表 6 所示, 19 个指标被转化为三个新的综合指标 C₁, C₂ 和 C₃, 这三个新的综合指标包含了来自上述 19 个指标 88.8% 的信息。第一主成分 (C₁) 的贡献率最高 (66.96%), 主要由发芽势、发芽率、发芽指数、芽长、不定根长、苗长、鲜重、干重及茎粗等生长相关指标构成。相对盐害率、可溶性糖及可溶性蛋白在该主成分中呈负

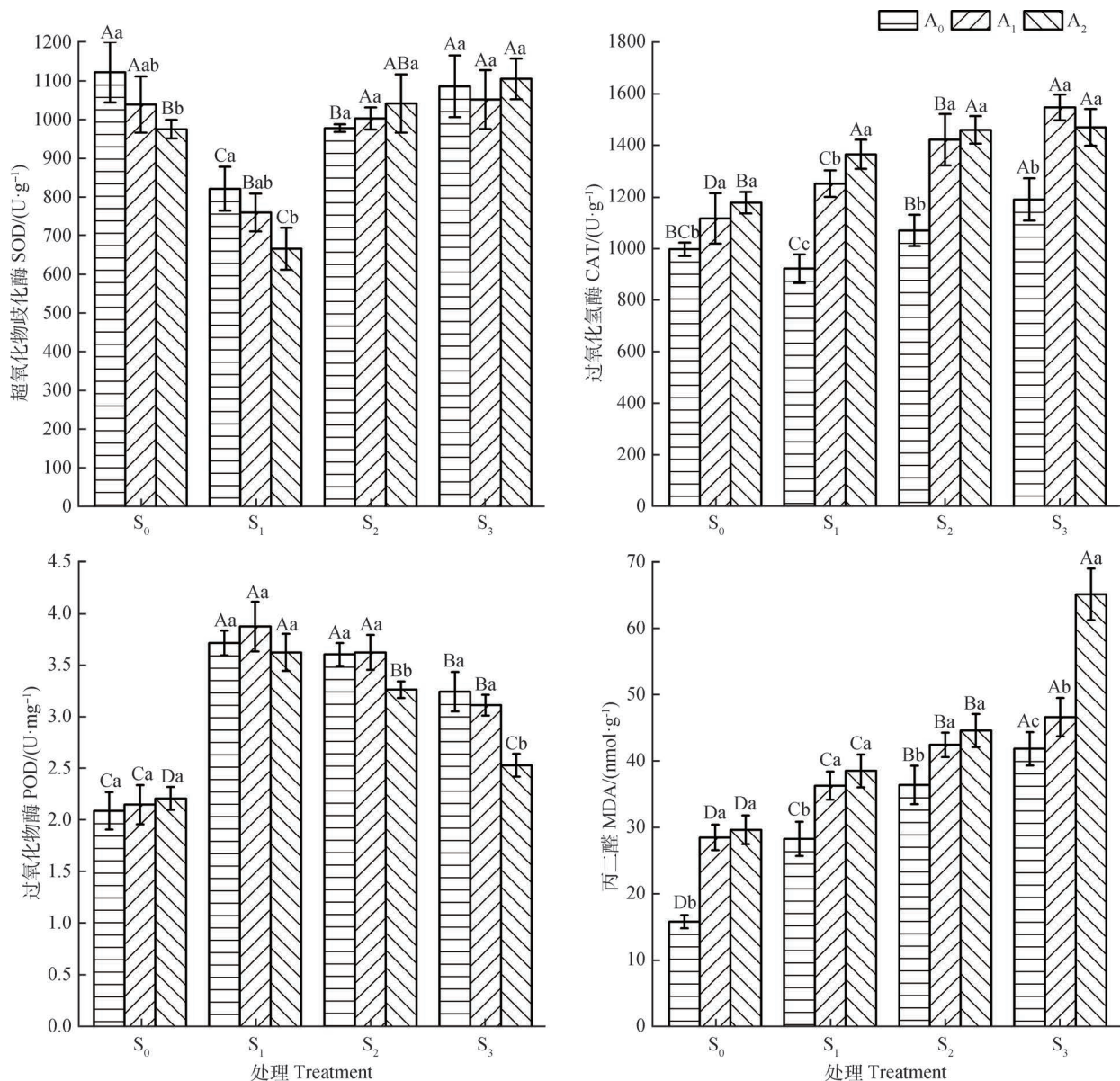


图2 不同盐碱胁迫下对油莎豆叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effects of different saline-alkali stress on antioxidant enzyme activity and MDA content in leaves of *Cyperus esculentus*

载荷,主要反映盐碱胁迫下的生长与发芽综合能力,可视为植物的生长活力主成分。第二主成分(C₂)的贡献率为12.42%,抗氧化酶活性相关指标载荷较高,包括超氧化物歧化酶、可溶性糖和过氧化氢酶活性,而过氧化物酶活性为负载荷。该主成分主要代表植物的抗氧化防御和代谢调节能力,反映油莎豆对盐碱胁迫的抗性系统响应特征。第三主成分(C₃)的贡献率为9.45%,主要与胁迫损伤和代谢平衡有关。丙二醛、过氧化氢酶、脯氨酸等指

标载荷较高,而相对盐害率和根芽比为负载荷。C₃可视为植物的氧化损伤与渗透调节能力的主成分,反映盐碱胁迫下油莎豆的细胞稳定性与损伤恢复水平。表7显示了油莎豆在不同处理下的盐碱胁迫综合评价值。在这12个处理中,A₂S₃的盐碱胁迫综合评价值最低,为-0.866,A₀S₁的盐碱胁迫综合评价值最高,为1.216。一般认为,盐碱胁迫综合评价值越低,表示该处理所受胁迫程度越强。研究结果表明,A₂S₃处理所受胁迫程度最高。

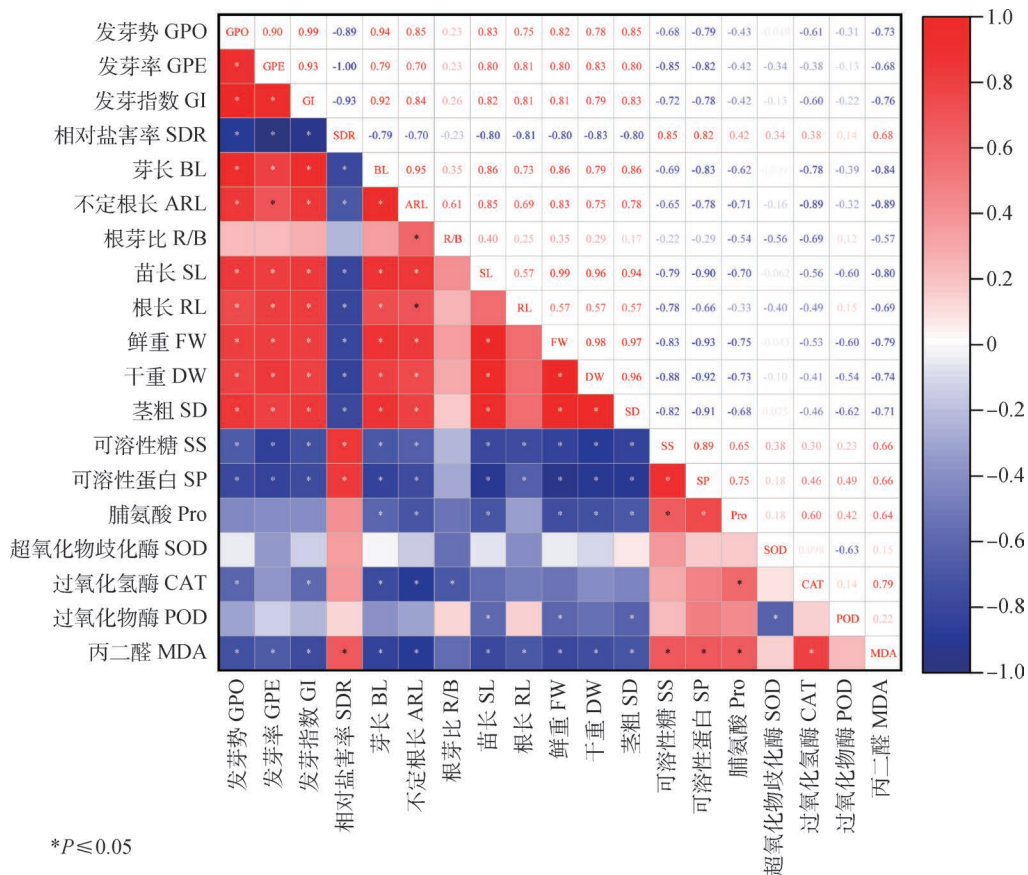


图3 盐碱胁迫下油莎豆各指标相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of each index of *Cyperus esculentus* under saline-alkali stress

注:GPO表示发芽势,GPE表示发芽率,GI表示发芽指数,SDR表示相对盐害率,BL表示芽长,ARL表示不定根长,R/B表示根芽比,SL表示苗长,RL表示根长,FW表示植株鲜重,DW表示植株干重,SD表示茎粗,SS表示可溶性糖,SP表示可溶性蛋白,Pro表示脯氨酸SOD表示超氧化物歧化酶,CAT表示过氧化氢酶,POD表示过氧化物酶,MDA表示丙二醛

Note: GPO represents germination potential, GPE represents germination percentage, GI represents germination index, SDR represents related salt damage rate, BL represents bud length, ARL represents adventitious roots length, R/B represents adventitious roots length/bud length, SL represents seedling length, RL represents root length, FW represents fresh weight, DW represents dry weight, SD represents stem diameter, SS represents soluble sugar, SP represents soluble protein, Pro represents proline, SOD represents superoxide dismutase, CAT represents catalase, POD represents peroxidase, MDA represents malondialdehyde

3 讨论

3.1 盐碱胁迫对油莎豆种子萌发的影响

种子萌发阶段是植物生命周期中对环境胁迫最为敏感的时期,而盐碱胁迫是导致种子萌发受阻和幼苗建成失败的关键限制因素^[18]。大量研究表明,盐碱胁迫会显著降低种子的发芽率、延迟发芽进程、抑制胚根和胚芽的生长,最终影响作物出苗率^[19-21]。本研究发现,随着盐胁迫程度的增加,油莎豆种子萌发受到显著抑制($P < 0.05$),这一趋势与多数植物在盐胁迫下的萌发生态规律一致^[22]。同时,pH变化对发芽表现具有明显影响:弱碱性环境相比中性环境对油莎豆种子萌发具有轻微促进作用,而随着碱度增强,发芽率显著下降($P < 0.05$),呈现出弱碱促进、强碱抑制的效应。这一现象可能源于油莎豆在长期进化

过程中形成的盐碱适应策略,其生理代谢系统对弱碱性环境具有较强的适应能力,如离子调节和渗透平衡能力较高,从而在轻度碱环境中维持较好的萌发性能;而当环境碱度超过适应阈值时,高pH引起的离子毒害与细胞膜损伤则成为限制萌发的主要因素^[23]。值得注意的是,本研究结果显示在无盐条件下,强碱处理对种子萌发有显著促进作用,说明单一碱胁迫在一定范围内可能通过部分破坏种子表面的角质层,增大种皮细胞间隙,从而提高种子与外界之间的水分和气体交换效率,有利于萌发^[24]。然而,当盐与碱同时存在时,强碱的促进效应转变为显著抑制,发芽势、发芽率和发芽指数均显著降低($P < 0.05$)。这表明油莎豆种子在盐碱复合胁迫下表现出明显的盐碱交互作用:无盐时强碱可促进萌发,而在加盐条件下,强碱与盐离子的复合作用增强了胁迫

表 6 各综合指标的因子负荷量及贡献率

Table 6 The factor load and contribution rate of each comprehensive index

指标 Index	C ₁	C ₂	C ₃
发芽势 Germination potential	0.255	0.012	0.122
发芽率 Germination percentage	0.249	−0.100	0.296
发芽指数 Germination index	0.258	−0.047	0.151
相对盐害率 Related salt damage rate	−0.249	0.100	−0.296
芽长 Bud length	0.264	0.031	−0.069
不定根长 Adventitious roots length	0.258	−0.070	−0.238
根芽比 Adventitious roots length / Bud length	0.117	−0.350	−0.479
苗长 Seedling length	0.267	0.130	−0.051
根长 Root length	0.213	−0.269	0.226
鲜重 Fresh weight	0.268	0.151	−0.029
干重 Dry weight	0.261	0.135	0.062
茎粗 Stem diameter	0.260	0.216	0.060
可溶性糖 Soluble sugar	−0.240	0.049	−0.216
可溶性蛋白 Soluble protein	−0.259	−0.085	−0.065
脯氨酸 Proline	−0.199	−0.044	0.331
超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase	−0.052	0.556	−0.086
过氧化氢酶 Catalase	−0.184	0.149	0.451
过氧化物酶 Peroxidase	−0.109	−0.566	0.154
丙二醛 Malondialdehyde	−0.241	0.100	0.199
贡献率 Contribution rate/%	66.96	12.42	9.45
累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	66.96	79.38	88.83

表 7 油莎豆盐碱胁迫程度综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation value of salt stress degree of *Cyperus esculentus*

处理 Treatment	PC1	PC2	PC3	综合评价值 Comprehensive evaluation
A ₀ S ₀	1.223	1.005	−1.211	0.829
A ₀ S ₁	1.543	0.904	0.747	1.216
A ₀ S ₂	1.209	0.878	−0.294	0.891
A ₀ S ₃	0.390	−1.624	−1.017	−0.037
A ₁ S ₀	0.675	−1.275	1.088	0.396
A ₁ S ₁	−0.234	−1.333	−0.196	−0.341
A ₁ S ₂	−0.326	−0.485	−0.544	−0.330
A ₁ S ₃	−0.168	−0.201	1.573	0.011
A ₂ S ₀	−0.942	0.437	0.122	−0.565
A ₂ S ₁	−0.962	−0.068	−1.306	−0.776
A ₂ S ₂	−0.928	0.473	1.414	−0.429
A ₂ S ₃	−1.480	1.290	−0.376	−0.866

注:表中PC₁、PC₂和PC₃分别表示各处理在主成分1、2和3下的得分

Note: In the table, PC₁, PC₂ and PC₃ represent the scores of each treatment under principal component 1, 2 and 3, respectively

胁迫强度,从而抑制种子萌发。总体来看,油莎豆种子对盐碱胁迫的响应并非单一胁迫的简单叠加,而是与盐浓度、碱度及两者的交互效应密切相关。弱碱可作为适度胁迫信号激发萌发潜能,而高盐与强碱复合作用则导致显著的萌发抑制效应,体现油莎豆对复合盐碱胁迫的敏感适应特性。

在种子生长方面,本研究结果揭示了盐碱胁迫对不定根和种芽生长的不同影响。特别值得注意的是,在强碱性环境下不定根生长完全停止所需的盐浓度阈值显著低于弱碱性环境,这表明强碱环境加剧了盐胁迫对根系生长的抑制作用^[25]。同时,弱碱性环境对种芽生长表现出一定的促进作用,但这种促进效应会随着碱性增强而逐渐消失,最终在强

碱性环境中转为抑制作用。这一系列发现说明,油莎豆幼苗的不同器官对盐碱胁迫的敏感性存在明显差异,其中不定根的耐受阈值最低,而种芽在低碱条件下甚至可能受益,但各器官的适应能力均随碱性增强而下降^[26]。本研究结果与王跳霞等^[9]对豆科牧草的研究结果相似,NaCl胁迫主要通过抑制种子吸水速率和胚根伸长阻碍萌发进程,而NaHCO₃胁迫则在初期促进吸胀吸水后,显著抑制胚根发育(降幅达91%),表明,碱胁迫对油莎豆根系生长的抑制作用显著高于对芽生长的影响。

3.2 盐碱胁迫对油莎豆幼苗生长的影响

苗期是植物继萌发后又一敏感阶段,幼苗生存

直接受到盐碱胁迫的威胁,能否成功度过此阶段,决定了植株能否存活并进行后续生长^[27]。大量研究表明,盐碱胁迫通过渗透胁迫、离子毒害及高pH效应,显著抑制植物幼苗的苗长与根长,干扰光合作用与营养吸收,进而降低生物量^[28-31]。其中,盐胁迫以离子失衡与渗透胁迫为主,碱胁迫则在此基础上叠加高pH诱导的细胞膜损伤与离子转运障碍^[32]。本研究结果显示,弱碱性环境对幼苗生长具有促进作用,表现为苗长和根长的显著增加,与于婢等^[33]关于碱性抑制牛至生长的研究结果不一致,这可能得益于油莎豆自身较强的耐盐碱能力,耐盐碱相关基因表达上调从而实现适应性生长^[34]。类似促进作用在拟南芥根系发育中也有报道,其在弱碱性条件下生长素振荡频率提升17.83%,并显著促进侧根密度和主根伸长,该效应主要由ABC转运蛋白介导的生长素运输调控^[35]。而在强碱性环境下,油莎豆幼苗苗长、根长、鲜重和茎粗出现差异性变化,苗长和鲜重在每个盐浓度之间都存在显著差异,这种差异性响应可能源于强碱对分生组织的特异性抑制,碱性环境会阻碍生长素的极性运输,从而抑制细胞分裂,而茎粗和生物量的维持则依赖于光合产物的重新分配^[36]。

本研究结果表明,油莎豆幼苗的存活率受盐浓度和pH的共同影响,表现出明显的阈值效应。在 $300\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Na}^{+}$ 条件下,所有pH处理组均完全死亡,这主要是由于极端盐胁迫导致严重的渗透失衡和 Na^{+} 毒害,使细胞丧失基本生理功能^[37]。值得注意的是,在次高盐浓度($250\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Na}^{+}$)条件下,植株在中性/弱碱环境中仍能存活,但在强碱条件下则死亡,这一差异清晰地表明高pH环境会显著加剧盐胁迫的伤害效应。这种协同作用可能源于强碱性条件促进 Na^{+} 跨膜渗透、破坏离子平衡,同时干扰细胞pH稳态和胁迫响应蛋白功能^[38]。

3.3 盐碱胁迫对油莎豆幼苗生理指标的影响

盐碱胁迫作为一种主要的非生物胁迫因素,通过引发渗透压力、离子毒性及氧化损伤等机制,制约植物的正常生长发育^[8]。在植物抵抗盐碱胁迫的过程中,渗透调节物质通过维持细胞渗透平衡缓解水分胁迫,抗氧化酶则通过协同清除活性氧减轻氧化损伤,二者共同构成植物抵御盐碱胁迫的核心生理机制^[39]。研究表明,在盐碱胁迫下,棉花幼苗会通过积累渗透调节物质来维持细胞渗透平衡,从而缓解胁迫伤害^[40]。本研究表明,随着盐胁迫程度的

增加,油莎豆幼苗叶片中的可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量显著上升,表明油莎豆通过主动积累有机渗透调节物质来维持细胞渗透势,从而抵御渗透胁迫的不利影响。碱性环境显著抑制了油莎豆幼苗可溶性蛋白及可溶性糖的积累,其含量均低于中性环境。此外,脯氨酸的积累模式呈现不同的响应特征,在弱碱性条件下其含量较中性环境显著提高。这种特异性积累可能反映了油莎豆的一种适应性调控机制:一方面,脯氨酸作为兼性pH缓冲物质可缓解碱性胁迫引起的质子失衡;另一方面,其作为活性氧清除剂可减轻高pH诱导的氧化损伤^[41]。这种差异性的渗透调节物质积累模式,特别是脯氨酸在弱碱环境中的特异性积累,可能是油莎豆在轻度碱性条件下维持生长的重要生理基础。

超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶能清除氧自由基,维持细胞氧化还原平衡,降低膜脂过氧化程度,增强植物对盐碱胁迫的耐受性^[42]。本研究发现超氧化物歧化酶活性随盐浓度的上升呈先降低后升高的趋势,在 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Na}^{+}$ 处理下达到最低值。这可能是由于在较低盐浓度下相关耐盐通路尚未被激活,酶活性受到离子抑制,随盐浓度逐渐升高,MKK5等信号通路被触发,SOD基因被激活转录,促进酶蛋白合成,超氧化物歧化酶活性逐渐恢复^[43-44];过氧化物酶和过氧化氢酶活性在盐碱胁迫下均高于对照组,过氧化物酶较过氧化氢酶更加敏感,其在较低盐胁迫下达到较高水平,之后随盐浓度上升呈降低趋势。此外,本研究结果表明超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性具有一定互补效应,这与梁培鑫等^[45]对于油莎豆研究的结果类似,盐胁迫下超氧化物歧化酶与过氧化物酶活性差异变化,可能是植物抗氧化防御的阶段性策略,盐浓度较低时,超氧阴离子暴发导致超氧化物歧化酶被暂时抑制,过氧化物酶代偿性激活以清除积累的过氧化氢;而盐浓度升高时,超氧化物歧化酶通过基因诱导提升酶活性,进而清除超氧阴离子,而过量的过氧化氢导致过氧化物酶蛋白氧化失活^[43-44]。丙二醛含量随盐浓度上升而逐渐升高,在强碱条件下这一趋势更加明显,表明在盐碱互作的环境下油莎豆受到的氧化胁迫更加严重。

4 结论

随着盐浓度的增加,油莎豆种子萌发和幼苗生

长均受到抑制。与中性环境相比,弱碱环境对油莎豆生长有促进作用,但强碱环境则会产生抑制效果。在高盐和高碱的环境下,盐碱胁迫还存在协同抑制作用,导致油莎豆提前死亡。我们还发现油莎豆会通过积累脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白进行渗透调节,同时提升过氧化物酶和过氧化氢酶活性,共同响应盐胁迫。本研究结果可为阐明油莎豆对盐碱胁迫的响应机制提供参考,并为后续探究其在新疆等盐碱地区的种植应用提供理论依据。

参考文献

- [1] TANG L Y, ZHAN L, HAN Y N, et al. Microbial community assembly and functional profiles along the soil-root continuum of salt-tolerant *Suaeda glauca* and *Suaeda salsa* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1301117
- [2] 樊自立, 马英杰, 马映军. 中国西部地区的盐渍土及其改良利用[J]. 干旱区研究, 2001, 18(3): 1-6
FAN Z L, MA Y J, MA Y J. Salinized soils and their improvement and utilization in west China [J]. *Arid Zone Research*, 2001, 18(3): 1-6
- [3] 魏阳, 丁建丽, 王飞, 等. 新疆玛纳斯流域非农业种植地盐碱性空间变异特征[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7655-7666
WEI Y, DING J L, WANG F, et al. Analysis of the spatial variational characteristics of saline-alkaline soil types in non-agriculture land in Manas River Basin, Xinjiang, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7655-7666
- [4] 许晓鸿, 刘肃, 赵英杰, 等. 吉林省西部不同环境因子对苏打盐碱地分布的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 89-95
XU X H, LIU S, ZHAO Y J, et al. Effects of different environmental factors on distribution of soda saline-alkaline land in western Jilin Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(1): 89-95
- [5] CODINA-TORRELLA I, GUAMIS B, TRUJILLO A J. Characterization and comparison of tiger nuts (*Cyperus esculentus* L.) from different geographical origin [J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 65: 406-414
- [6] 阳振乐. 油莎豆的特性及其研究进展[J]. 北方园艺, 2017(17): 192-201
YANG Z L. Characteristics and research progress of *Cyperus esculentus* [J]. *Northern Horticulture*, 2017(17): 192-201
- [7] 孙蕊, 钟鹏, 刘泽东, 等. 油莎豆的利用价值与其产业发展现状[J]. 饲料工业, 2023, 44(21): 19-24
SUN R, ZHONG P, LIU Z D, et al. Utilization value and industrial development status of *Cyperus esculentus* [J]. *Feed Industry*, 2023, 44(21): 19-24
- [8] CHEN W C, CUI P J, SUN H Y, et al. Comparative effects of salt and alkali stresses on organic acid accumulation and ionic balance of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) [J]. *Industrial Crops and Products*, 2009, 30(3): 351-358
- [9] 王跳霞, 张政, 刘美君, 等. 盐碱胁迫对紫花苜蓿种子萌发吸水及萌发特性影响的差异性[J]. 草业科学, 2025, 42(12): 3108-3119
WANG T X, ZHANG Z, LIU M J, et al. Differential effects of saline and alkaline stress on water uptake and germination of alfalfa seeds [J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(12): 3108-3119
- [10] ACOSTA-MOTOS J R, ORTUÑO M F, BERNAL-VICENTE A, et al. Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms [J]. *Agronomy*, 2017, 7(1): 18
- [11] 洪春桃. 大灰藓(*Hypnum plumaeforme*)的耐盐性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015: 46-47
HONG C T. Study on salt tolerance of *Hypnum plumaeforme* [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2015: 46-47
- [12] 李金珠, 张学昆, 徐劲松, 等. H_2O_2 处理修复老化油莎豆的生理机制[J]. 草业科学, 2023, 40(9): 2309-2319
LI J Z, ZHANG X K, XU J S, et al. Physiological mechanism of H_2O_2 treatment to repair aged *Cyperus esculentus* [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(9): 2309-2319
- [13] 唐榕, 郭晨荔, 梁培鑫, 等. 油莎豆幼苗应对盐碱胁迫的光合生理响应机制[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 632-641
TANG R, GUO C L, LIANG P X, et al. Photosynthetic physiological response mechanism of *Cyperus esculentus* L. seedlings under saline alkali stress [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2022, 44(3): 632-641
- [14] 龙威, 王靓, 金羽珉, 等. 苗期油莎豆在盐胁迫下的生理特性及转录组学分析[J]. 河南农业科学, 2025, 54(6): 11-20
LONG W, WANG L, JIN Y K, et al. Physiological characteristics and transcriptomic analysis of *Cyperus esculentus* L. at seedling stage under salt stress [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2025, 54(6): 11-20
- [15] HUANG S J, YANG X X, WANG T, et al. Physiological mechanisms of *Citrus* fruit cracking: study on cell wall components, osmoregulatory substances, and antioxidant enzyme activities [J]. *Plants*, 2024, 13(2): 257
- [16] WANG S, ZHOU H, HE Z B, et al. Effects of drought stress on leaf functional traits and biomass characteristics of *Atriplex canescens* [J]. *Plants*, 2024, 13(14): 2006
- [17] LIANG B B, WAN S G, MA Q L, et al. Transcriptome and physiological analyses of a navel orange mutant with improved drought tolerance and water use efficiency caused by increases of cuticular wax accumulation and ROS scavenging capacity [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(10): 5660
- [18] 贺转转, 邢佳佳, 陈玲, 等. 植物幼苗抗逆机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2013, 29(2): 1-7
HE Z Z, XING J J, CHEN L, et al. Review on progress of stress tolerance mechanisms of plant seedlings [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2013, 29(2): 1-7
- [19] ALSHAHWAN A S, ALYEMENI M N, ALWAHIBI M S, et al. Exploring the influence of saline-alkaline stress on germination and seedling growth traits of *Arta* (*Calligonum comosum* L. Herit) as influenced by saline-alkaline stresses [J]. *Journal of King Saud University - Science*, 2024, 36(10): 103444
- [20] 王宁, 袁美丽. 入侵植物节节麦种子萌发及幼苗生长对盐碱胁迫的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 167-173
WANG N, YUAN M L. Seed germination and seedling growth responses of invasive alien plant *Aegilops tauschii* to saline-alkali stress [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44(5): 167-173
- [21] 赵兰坡, 王宇, 马晶, 等. 吉林省西部苏打盐碱土改良研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(S1): 91-96
ZHAO L P, WANG Y, MA J, et al. Improvement of soda-typed saline-alkaline soil in western Jilin Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(S1): 91-96
- [22] 何建军, 姚立蓉, 汪军成, 等. 干旱和盐胁迫对盐生植物盐生草种子萌发特性的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(11): 129-140
HE J J, YAO L R, WANG J C, et al. Effects of drought and salt

- stress on seed germination characteristics of *Halogeton glomeratus*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(11): 129-140
- [23] 王靛, 龙威, 金羽琨, 等. 碱胁迫下油莎豆幼苗生理代谢和转录组分析[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(12): 1-9
WANG L, LONG W, JIN Y K, et al. Physiological metabolism and transcriptomic analysis of *Cyperus esculentus* L. seedlings under alkali stress[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(12): 1-9
- [24] 张国云, 李艳芳, 呼天明. 氢氧化钠及低温层积处理对嵩草种子萌发的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(12): 104-108
ZHANG G Y, LI Y F, HU T M. Effects of sodium hydroxide and cold stratifying treatments on germination of *Kobresia seeds*[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(12): 104-108
- [25] LI N, LIU H L, SUN J, et al. Transcriptome analysis of two contrasting rice cultivars during alkaline stress[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 9586
- [26] LI Y F, LI Q Y, LIU H S, et al. Ecological stoichiometry-based study of the influence of soil saline-alkali stress on nutrient homeostasis in *L. chinensis*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 165: 243-249
- [27] YOUSEF F, SHAFIQUE F, ALI Q, et al. Effects of salt stress on the growth traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) seedlings[J]. *Biological and Clinical Sciences Research Journal*, 2020(29): 1-5
- [28] 陈雅琦, 苏楷淇, 陈泰祥, 等. 混合盐碱胁迫对醉马草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *草业学报*, 2021, 30(3): 137-157
CHEN Y Q, SU K Q, CHEN T X, et al. Effects of complex saline-alkali stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Achnatherum inebrians*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(3): 137-157
- [29] 冯凯月, 赵鑫焱, 李子妍, 等. 植物响应盐碱胁迫的分子机制研究进展[J]. *生物技术通报*, 2024, 40(10): 122-138
FENG K Y, ZHAO X Y, LI Z Y, et al. Research advances in the molecular mechanisms of plant response to saline-alkali stress[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2024, 40(10): 122-138
- [30] CHEN S, ZHOU Q X, FENG Y W, et al. Responsive mechanism of *Hemerocallis citrina* Baroni to complex saline-alkali stress revealed by photosynthetic characteristics and antioxidant regulation[J]. *Plant Cell Reports*, 2024, 43(7): 176
- [31] SU J, QIU Y H, YANG X S, et al. Dose-effect relationship of water salinity levels on osmotic regulators, nutrient uptake, and growth of transplanting vetiver [*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash][J]. *Plants*, 2021, 10(3): 562
- [32] LIU D, LIU M, LIU X L, et al. Silicon priming created an enhanced tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) seedlings in response to high alkaline stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 716
- [33] 于婵, 张依琳, 李秋莹, 等. 盐碱胁迫对牛至种子萌发和幼苗生理生化特性的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(6): 1882-1892
YU C, ZHANG Y L, LI Q Y, et al. Effects of saline-alkali stresses on seed germination and seedling physiological and biochemical characteristics of *Origanum vulgare*[J]. *Acta Agriculturae Sinica*, 2024, 32(6): 1882-1892
- [34] 魏嘉, 于志晶, 钱雪艳, 等. 野生大豆响应盐碱胁迫转录组分析[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231031.0854.004>, 2023-10-31/2025-04-23
WEI J, YU Z Y, QIAN X Y, et al. Transcriptome analysis of *Glycine soja* response to Na₂CO₃ stress[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231031.0854.004>, 2023-10-31/2025-04-23
- [35] DUAN X L, LUO L, WANG Z, et al. Promotion of root development by slightly alkaline pH involves an auxin mediated adaptation mechanism[J]. *Soil Science and Environment*, 2023, 2(1): 6
- [36] 毛爽, 周万里, 杨帆, 等. 植物根系应答盐碱胁迫机理研究进展[J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(10): 1991-2000
MAO S, ZHOU W L, YANG F, et al. Research progress on mechanism of plant roots response to salt-alkali stress[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(10): 1991-2000
- [37] 许耀照, 曾秀存, 王振朝, 等. NaCl胁迫对冬油菜种子萌发和生理特性的影响[J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(3): 499-508
XU Y Z, ZENG X C, WANG Z C, et al. Effects of NaCl stress on seed germination and physiological characteristics of winter oilseed rape[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(3): 499-508
- [38] 张慧蓉, 张建伟, 张兆沛, 等. 盐碱胁迫对野生地肤种子发芽和幼苗生长的影响[J]. *种子*, 2010, 29(1): 15-19
ZHANG H R, ZHANG J W, ZHANG Z P, et al. Effects of saline-alkali stress on seed germination and seedling growth of wild wacomponents (*Kochia scoparia* (L.) Schrad)[J]. *Seed*, 2010, 29(1): 15-19
- [39] LIU X D, WANG Z S, SHI G Y, et al. Effects of microplastics and salt single or combined stresses on growth and physiological responses of maize seedlings[J]. *Physiologia Plantarum*, 2025, 177(1): e70106
- [40] GUO H J, HUANG Z J, LI M Q, et al. Growth, ionic homeostasis, and physiological responses of cotton under different salt and alkali stresses[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 21844
- [41] 蒋明义, 郭绍川, 张学明. 氧化胁迫下稻苗体内积累的脯氨酸的抗氧化作用[J]. *植物生理学报*, 1997(4): 347-352
JIANG M Y, GUO S C, ZHANG X M. Proline accumulation in rice seedlings exposed to oxidative stress in relation to antioxidant[J]. *Acta Photophysiological Sinica*, 1997(4): 347-352
- [42] CUI Z G, HAO F, DONG X, et al. Integrated physiological, transcriptomic and metabolomic analyses reveal ROS regulatory mechanisms in two *Castor* bean varieties under alkaline stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2025, 220: 109518
- [43] XING Y, CAO Q Q, ZHANG Q, et al. *MKK5* regulates high light-induced gene expression of Cu/Zn superoxide dismutase 1 and 2 in *Arabidopsis*[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2013, 54(7): 1217-1227
- [44] 张敏, 王校常, 严蔚东, 等. 盐胁迫下转Bt基因棉的K⁺、Na⁺转运及SOD活性的变化[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 460-467
ZHANG M, WANG X C, YAN W D, et al. K⁺ and Na⁺ uptake and transport and sod activity in Bt transgenic cotton seedlings under salt stress[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 460-467
- [45] 梁培鑫, 唐榕, 郭睿, 等. 混合盐碱胁迫对油莎豆生长及生理性状的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(10): 185-192
LIANG P X, TANG R, GUO R, et al. Effect of mixed salt-alkaline stress on growth and physiological characteristics in *Cyperus esculentus* L. [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(10): 185-192

(责任编辑 闵芝智)