

外源吲哚-3-乙酸对 NaCl 胁迫下甘草幼苗生长调节及总黄酮含量的影响

柳福智, 田雅文

甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070

摘要: 目的 研究外源吲哚-3-乙酸 (indole-3-acetic acid, IAA) 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗生长调节及总黄酮含量的影响。方法 采用丙酮法提取叶片叶绿素含量; 采用超声提取法、紫外分光光度法测定甘草幼苗总黄酮含量; 火焰分光光度计分别测定 Na^+ 和 K^+ 的含量; 氯电极直接电位法测定 Cl^- 的含量; 硫代巴比妥酸法测定丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 的含量; 苯酚法测定可溶性糖的含量; 磺基水杨酸法测定脯氨酸 (proline, Pro) 的含量; 愈创木酚比色法测定过氧化物酶 (peroxidase, POD) 的活性; 氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性; 紫外吸收法测定过氧化氢酶 (catalase, CAT) 的活性; 采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理和分析, 以 SPSS19.0 统计软件对数据进行方差分析。**结果** 施加 10~20 mmol/L 外源 IAA 能显著降低 NaCl 胁迫对甘草幼苗的伤害, 其中外源 IAA 浓度为 15 mmol/L 时效果最佳。NaCl 胁迫条件下, 施加 15 mmol/L 的外源 IAA 时甘草幼苗长势最为健壮, 根长、茎长等生长量增加明显。外源 IAA 浓度为 15 mmol/L 时, 影响渗透调节的 K^+ 及 K^+/Na^+ 浓度增加较显著, Na^+ 、 Cl^- 浓度相较于无 NaCl 胁迫处理时明显降低; 外源 IAA 浓度为 15 mmol/L 时可增加甘草幼苗光合叶绿素含量, 同时降低了甘草幼苗内可溶性糖、Pro 和 MDA 的含量; 外源 IAA 浓度为 15 mmol/L 时可提高甘草幼苗内抗氧化酶 (POD、SOD、CAT) 的活性; 外源 IAA 浓度为 15 mmol/L 时可促进甘草幼苗有效成分总黄酮的积累, 有利于提高甘草幼苗的抗性。**结论** NaCl 胁迫条件下, 施加适宜浓度外源 IAA 可提高甘草幼苗生长量、促进有效成分积累、降低盐害带来的伤害、促进该逆境下甘草幼苗的生长。

关键词: 外源 IAA; NaCl 胁迫; 甘草幼苗; 生长调节; 渗透调节物质

中图分类号: R286.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)24-9135-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.24.023

Effects of exogenous IAA on growth regulation and total flavonoid content of *Glycyrrhiza uralensis* seedlings under salt stress

LIU Fuzhi, TIAN Yawen

College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Objective To study the effects of exogenous indole-3-acetic acid (IAA) on the growth regulation and total flavonoids content of *Glycyrrhiza uralensis* seedlings under NaCl stress. **Methods** Chlorophyll content in leaves was extracted by acetone method; The content of total flavonoids in *Glycyrrhiza uralensis* seedlings was determined by ultrasonic extraction and ultraviolet spectrophotometry. The contents of Na^+ and K^+ were determined by flame spectrophotometer. Determination of Cl^- content by direct potentiometry with chlorine electrode; The content of malondialdehyde (MDA) was determined by thiobarbituric acid method. Determination of soluble sugar content by phenol method; The content of proline (Pro) was determined by sulfosalicylic acid method. The activity of peroxidase (POD) was determined by guaiacol colorimetry. The activity of superoxide dismutase (SOD) was determined by nitroblue tetrazole photochemical reduction method. The activity of catalase (CAT) was measured by ultraviolet absorption method. Microsoft Excel 2019 was used for data processing and analysis, and SPSS19.0 statistical software was used for data analysis of variance. **Results** The experiments showed that the application of 10—20 mmol/L exogenous IAA significantly reduced the damage to licorice seedlings under NaCl stress, with the best effect observed at an exogenous IAA concentration of 15 mmol/L. Under NaCl stress conditions, the application of 15 mmol/L exogenous IAA resulted in the strongest growth of licorice seedlings, with significant increases in root and stem length. When the concentration of exogenous IAA is 15 mmol/L, the concentration of K^+ and K^+/Na^+ that affect osmotic regulation increases significantly. The concentrations of Na^+ and Cl^- were significantly reduced compared to the treatment without NaCl stress; When the concentration of exogenous IAA is 15 mmol/L, it can increase the photosynthetic chlorophyll content of licorice seedlings, while reducing the content of soluble sugars, Pro, and MDA in licorice seedlings; When the concentration of exogenous IAA is 15 mmol/L, it can increase the activity of antioxidant enzymes (peroxidase, superoxide dismutase, catalase) in licorice seedlings; When the concentration of exogenous IAA is 15 mmol/L,

收稿日期: 2025-05-02

基金项目: 药用植物新品种引进筛选与示范推广项目 (00004901)

作者简介: 柳福智 (1976—), 男, 副教授, 主要从事药用植物资源开发与利用等方面的教学和科研工作。E-mail: lfz_1976@126.com

it can promote the accumulation of total flavonoids in licorice seedlings, which is beneficial for improving their resistance. **Conclusion** Under NaCl stress conditions, the application of appropriate concentrations of exogenous IAA can increase the growth of licorice seedlings, promote the accumulation of effective components, reduce the damage caused by salt damage, and promote the growth of licorice seedlings under this stress.

Key words: exogenous IAA; NaCl stress; *Glycyrrhiza uralensis* seedlings; growth regulation; osmotic regulation substances

由于农业实践和气候的变化,土壤盐分已成为限制农作物生产力和质量的重要因素,据统计,世界上盐碱化土地面积约有 $9.54 \times 10^8 \text{ hm}^2$,并以每年 $1.0 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的速度增长^[1]。随着土壤受盐碱胁迫的农业用地范围不断扩大,已成为制约全球粮食安全的主要因素之一。我国盐碱地面积已达到 $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[2]。近年来,土壤盐碱化程度还在不断加重,内陆盆地盐土区占地面积持续增多,使得盐碱地越来越制约农业种植生产^[3]。植物盐害主要表现在离子毒害、渗透胁迫、破坏细胞膜透性等方面^[4],植物在逆境中通过渗透调节、激素代谢及抗氧化酶等途径响应盐胁迫来减轻损伤^[5]。植物在长期的生长发育过程中,通过自身调节来抵御逆境胁迫造成的伤害。

甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. 为豆科多年生草本植物,以其干燥地下根和根茎入药^[6]。其性味甘平,具有补脾益气、清热解毒、祛痰止咳、止痛和调和诸药等功效。甘草多生长在干旱、半干旱的沙土、沙漠边缘和黄土丘陵地带。由于甘草具有较强的抗逆性、耐盐碱、抗旱、抗寒,能在低浓度盐碱地区生长发育,使得其不仅在药用植物资源研究中具有重大作用,而且在植物抗盐碱研究中也发挥着巨大价值^[7]。在甘草抗盐碱胁迫的相关研究中,已经陆续有将其置于较高浓度盐碱胁迫环境下培养,并通过测定相关生理指标来分析生长发育状况的研究见于报道,以此来研究甘草是否适应高浓度盐碱胁迫、是否能适应更苛刻的自然环境。

植物激素是在环境刺激的下发挥重要作用的中间信号物质。吲哚-3-乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)是一种常见的植物内源生长激素,研究认为,其低浓度促进植物生长,高浓度抑制植物生长;在干预植物休眠,促进种子萌发及块茎发芽,调节花芽分化,防止出现落花、落果,在调控植物根系发育网络中也发挥着极为关键的作用^[8]。在逆境条件下,IAA也发挥其独特作用,有研究表明,盐胁迫下蚕豆叶表喷施生长素能有效增强渗透质的积累及抗氧化酶活性^[9]。拟南芥生长素受体基因 *TIR1* 过表达后表现出高耐盐性^[10-11]。上述研究表明,生长素在调控植物对抗盐胁迫的响应机制与响应过程中发挥巨大作用^[12-13]。

外源 IAA 能缓解盐碱胁迫对植物的伤害,但外源 IAA 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗生理生长特性及总黄酮含量累积的影响的研究鲜见报道。本实验通过研究施加不同浓度的外源 IAA 对 200 mmol/L NaCl 胁迫下甘草幼苗期生长的影响,来探索外源 IAA 对甘草幼苗在盐害下的生长量、光合作用、抗氧化酶、渗透调节等生理指标,明晰甘草幼苗在 NaCl 胁迫下,不同浓度的外源 IAA 对其幼苗根系生长及总黄酮含量的影响,探究甘草幼苗抗盐机制,从而进一步明晰甘草生产中的盐害问题,为甘草产业在我国西北盐碱地区的高产优质发展提供相关的理论依据。

1 材料与仪器

1.1 材料

本实验在甘肃农业大学国家级植物生产类实验室进行;供试品甘草种子经甘肃农业大学陈垣教授鉴定为豆科甘草属植物甘草 *G. uralensis* Fisch. 的种子。外源 IAA (LOT: C134161600) 购自北京酷莱博科技有限公司。

1.2 仪器

HPX-1-250 型生化培养箱(上海跃进医疗器械有限公司),11191932 型超声清洗器(宁波新芝生物科技股份有限公司),26-1650-01-1071 型紫外可见分光光度计(北京普析通用有限责任公司),F-100 型火焰光度(上海元析仪器有限公司),PTX-FA220 型电子天平(美国康州 HZ 电子有限公司)。

2 方法

2.1 甘草幼苗培养

挑选表皮完整颗粒饱满均一的甘草种子,用 98% 浓硫酸浸泡 10~30 min,期间不断搅拌使其与浓硫酸充分接触,后用无菌水冲洗被浓硫酸浸泡过的甘草种子 3~5 次,冲净甘草种子表面残存的浓硫酸;再用 75% 乙醇浸泡 1 min,无菌水冲洗 3~5 次,洗净其表面乙醇;用 0.1% 升汞溶液浸泡 5~10 min,进行 2 次消毒,无菌水冲洗 3~5 次;用灭菌滤纸吸干消毒处理的甘草种子表面水分置于超净工作台待用。甘草无菌苗的培养:用灭过菌的镊子将处理好的无菌甘草种子接入锥形瓶中,每瓶接入 5~6 粒无菌甘草种子,每个处理 20 瓶,将接好种的甘草种子培养瓶置于培养架上进行无菌苗培养。培养温度控制在 $(28 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 、光照时间 10~12 h、空气

相对湿度为 50%~70%。3~6 d 长出甘草无菌苗。

2.2 不同外源 IAA 浓度处理

将上述经无菌培养的甘草无菌苗经练苗处理后转入容积为 30 cm×20 cm×8 cm 的塑料花盆，加无菌水至土壤湿润，置于植物组织培养室中，光照 8 h/d、光强 4 000 Lx。(土壤和细砂取自甘肃农业大学百草园，细砂用 9 号筛过筛 3 次并清洗 8~10 次；与土壤分别置于高压蒸汽灭菌锅中灭菌。按砂-土 1:1，每盆装土 2 kg，土壤 pH 为 8.0)。本研究 10、20、30 d 甘草幼苗在盐胁迫下的生长情况。试验设 7 个处理，每个处理进行 3 次重复，每次取 15~20 株甘草幼苗。处理见表 1。

表 1 NaCl 浓度与外源 IAA 浓度处理
Table 1 NaCl concentration and exogenous IAA concentration treatment

编号	处理方法
CK1	空白对照，正常条件下生长
CK2	200 mmol·L ⁻¹ NaCl 溶液 100 mL + 0 mmol·L ⁻¹ IAA
T1	200 mmol·L ⁻¹ NaCl 溶液 100 mL + 5 mmol·L ⁻¹ IAA 溶液 100 mL
T2	200 mmol·L ⁻¹ NaCl 溶液 100 mL + 10 mmol·L ⁻¹ IAA 溶液 100 mL
T3	200 mmol·L ⁻¹ NaCl 溶液 100 mL + 15 mmol·L ⁻¹ IAA 溶液 100 mL
T4	200 mmol·L ⁻¹ NaCl 溶液 100 mL + 20 mmol·L ⁻¹ IAA 溶液 100 mL
T5	200 mmol·L ⁻¹ NaCl 溶液 100 mL + 25 mmol·L ⁻¹ IAA 溶液 100 mL

2.3 甘草幼苗生长及生理指标测定

分别取 7 个处理的甘草幼苗各 15~20 株，测定其 20 d 的幼苗生长量。将甘草幼苗用蒸馏水冲洗净，用无菌滤纸吸干水分，分别称定质量(地上部、全株质量)并测定幼苗长度(根长、茎长)。同时测定甘草幼苗生长 10、20、30 d 时的生理指标。

叶片叶绿素含量采用丙酮法提取^[14]；超声提取法、紫外分光光度法(标准曲线法)测定甘草幼苗总黄酮含量^[15]；火焰分光光度计分别测定 Na⁺和 K⁺的含量^[16]；氯电极直接电位法测定 Cl⁻的含量^[17]；硫代巴比妥酸法测定丙二醛(malondialdehyde, MDA)的含量^[12]；苯酚法测定可溶性糖的含量^[12]；磺基水杨酸法测定脯氨酸(proline, Pro)的含量^[18]；愈创

木酚比色法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)的活性^[14]；氮蓝四唑光化还原法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性^[19]；紫外吸收法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)的活性^[14]。

2.4 数据统计与处理

利用 Microsoft Excel 2019 对试验数据进行分析和处理，采用 SPSS19.0 统计分析软件对试验数据做了方差分析，对测得的甘草幼苗在 10、20、30 d 的生长和生理各指标进行了相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同浓度的外源 IAA 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗生长的影响

如图 1 所示，经过不同浓度梯度外源 IAA 处理后，20 d 的甘草幼苗生长状况存在显著差异。与 CK1 对照相比，200 mmol/L NaCl (CK2) 处理下的甘草幼苗生长最为矮小，随着外源 IAA 浓度增加甘草幼苗高度呈现增加趋势。T3 处理的幼苗植株地上部分与根系部分生长最为健壮，而 T1、T2、T4、T5 处理的幼苗长势较 T3 小。由此可见，在 NaCl 胁迫下施加适宜浓度的外源 IAA 可促进甘草幼苗的生长发育，甘草幼苗根系生长随外源 IAA 浓度梯度增加适当呈现增长趋势。

如表 2 所示，处理 CK1 与 CK2 相比，甘草幼苗的株高与鲜质量差异显著，其根长相差 12%，茎长相差 26%，根系鲜质量相差 28%，全株鲜质量相差 17%。说明甘草幼苗受到 NaCl 胁迫后生长明显受到抑制。经过外源 IAA 处理后植株的根长、茎长、全株鲜质量有明显的先增加后减小的趋势：处理 T1~T5 中甘草的根长在 T3 时增加最显著，较其他 4 个处理分别增加了 11%、6%、10%、19%；处理 T1~T5 中甘草幼苗的茎长呈现先增加后减小的趋势，但在 T3 时增加最显著，T3 处理较 T1、T2、T4、T5 分别增加了 24%、13%、10%、24%；处理 T1~T5 下甘草的全株鲜质量在 T3 时增加最明显，较 T1、T2、T4、T5 分别增加 17%、16%、13%、18%。这说明 15 mmol/L (T3) 的外源 IAA 在缓解 NaCl 胁迫下甘草幼苗生长发育是最为适宜的浓度。



图 1 NaCl 胁迫下不同浓度的外源 IAA 对甘草幼苗生长的影响

Fig. 1 Effects of exogenous IAA under different concentrations of NaCl stress

表 2 NaCl 胁迫下不同浓度外源 IAA 对甘草幼苗生长的影响

Table 2 Effect of different concentrations of exogenous IAA on growth of *G. uralensis* under NaCl stress

处理	根长/cm	茎长/cm	单株鲜质量/(g·株 ⁻¹)	
			根系	全株
CK ₁	9.23 ± 0.26a	7.90 ± 0.22b	0.074 ± 0.005a	0.184 ± 0.013a
CK ₂	8.11 ± 0.14b	5.88 ± 0.14d	0.053 ± 0.002b	0.153 ± 0.043a
T ₁	9.11 ± 0.37ab	6.17 ± 0.26d	0.051 ± 0.003b	0.153 ± 0.004a
T ₂	9.61 ± 0.36ab	7.06 ± 0.12c	0.063 ± 0.006ab	0.171 ± 0.001a
T ₃	10.21 ± 0.15a	8.11 ± 0.12a	0.074 ± 0.003a	0.184 ± 0.003a
T ₄	9.16 ± 0.16bc	7.30 ± 0.28bc	0.064 ± 0.005ab	0.161 ± 0.005a
T ₅	8.27 ± 0.46c	6.18 ± 0.19d	0.048 ± 0.003c	0.150 ± 0.002b

不同小写字母表示各处理间具有显著差异性 ($P < 0.05$), 下图同。

Different letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$), same as below Figs.

3.2 不同浓度的外源 IAA 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗中叶绿素含量的影响

如图 2 所示, 不同浓度的外源 IAA 对 200 mmol/L NaCl 胁迫下甘草幼苗中叶绿素的合成有促进作用, 并明显发现外源 IAA 浓度在 15 mmol/L (T₃) 时甘草幼苗中叶绿素含量增加趋势变高, 相较于 CK₂ 处理增加 39%; 相较于 T₁、T₂ 增加了 33%、21%, 差异显著; 较 T₃ 来说 T₄、T₅ 处理下叶绿素含量增加不明显, 但总体仍呈现升高趋势。由此可知, 伴随外源 IAA 浓度的增加, 甘草幼苗叶绿素含量在不断增加, 但变化逐渐趋于稳定。

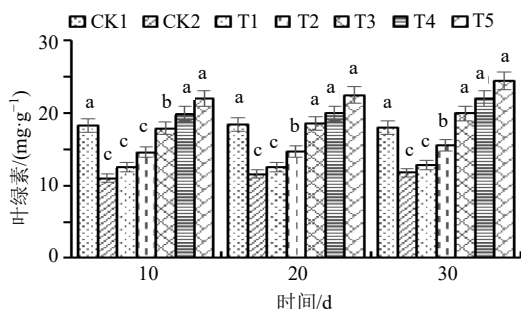


图 2 NaCl 胁迫下不同浓度外源 IAA 对甘草幼苗内叶绿素含量影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of exogenous IAA on chlorophyll content in *G. uralensis* under NaCl stress

3.3 不同浓度的外源 IAA 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗中相关离子含量的影响

如图 3 所示, 在不受 200 mmol/L NaCl 胁迫 (CK₁) 时, 甘草幼苗细胞中保持较高浓度的 K⁺ 和较低浓度的 Na⁺, 在受到 200 mmol/L NaCl (CK₂) 胁迫时离子平衡被破坏。由图 3 所示, 在 CK₁ 处理下, 甘草幼苗中 K⁺/Na⁺ 含量并不高, 但在受到 200

mmol/L NaCl (CK₂) 胁迫后 K⁺/Na⁺ 含量快速下降, 降幅达到 57%。在施加不同浓度外源 IAA 后 K⁺、Na⁺ 及 K⁺/Na⁺ 含量的趋势都发生了变化, 在外源 IAA 浓度为 15 mmol/L (T₃) 时, Na⁺ 浓度相较于 CK₂ 降低了 41%, K⁺、K⁺/Na⁺ 浓度相较于 CK₂ 分别增加 49%、62%, 差异显著。由此可见, 15 mmol/L 外源 IAA 是缓解 200 mmol/L NaCl 胁迫下甘草幼苗内 K⁺、Na⁺ 及 K⁺/Na⁺ 含量的最适浓度。表明施加适宜浓度的外源 IAA 可维持 NaCl 胁迫下甘草幼苗内 K⁺ 和 Na⁺ 相对平衡。

从图 3 可以看出, 在 200 mmol/L NaCl (CK₂) 胁迫下甘草幼苗中 Cl⁻ 含量升到最高状态, 而施加不同浓度外源 IAA 后甘草幼苗中 Cl⁻ 含量明显呈现下降趋势且不断接近 CK₁ (无 200 mmol/L NaCl 胁迫)。尤其 T₃ 最为接近, 只相差 1%, 同时, T₃ 相较于 CK₂ 降低了 34%。由此可知, 15 mmol/L 外源 IAA 是缓解 200 mmol/L NaCl 胁迫下甘草幼苗内 Cl⁻ 含量的最适浓度梯度。由此得出, 施加适宜浓度外源 IAA 可以缓解 NaCl 胁迫下 Cl⁻ 升高带来的离子伤害。即施加外源 IAA 可维持甘草幼苗内相关离子的相对平衡。

3.4 不同浓度的外源 IAA 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗中可溶性糖和脯氨酸含量的影响

如图 4 所示, 在受到 200 mmol/L NaCl (CK₂) 胁迫后甘草幼苗内可溶性糖含量最高, 表明高浓度盐会促进甘草幼苗中可溶性糖的累积, 相较于 CK₁, 增加了 34%。当施加不同浓度外源 IAA 后, 随着其浓度梯度的增加, 可溶性糖含量在逐渐降低。在外源 IAA 浓度为 15 mmol/L (T₃) 时, 甘草幼苗内可溶性糖含量降至 NaCl 胁迫后各处理的最低点, 已经接近于 CK₁, 相较于 CK₁ 增加 4.7%, 相

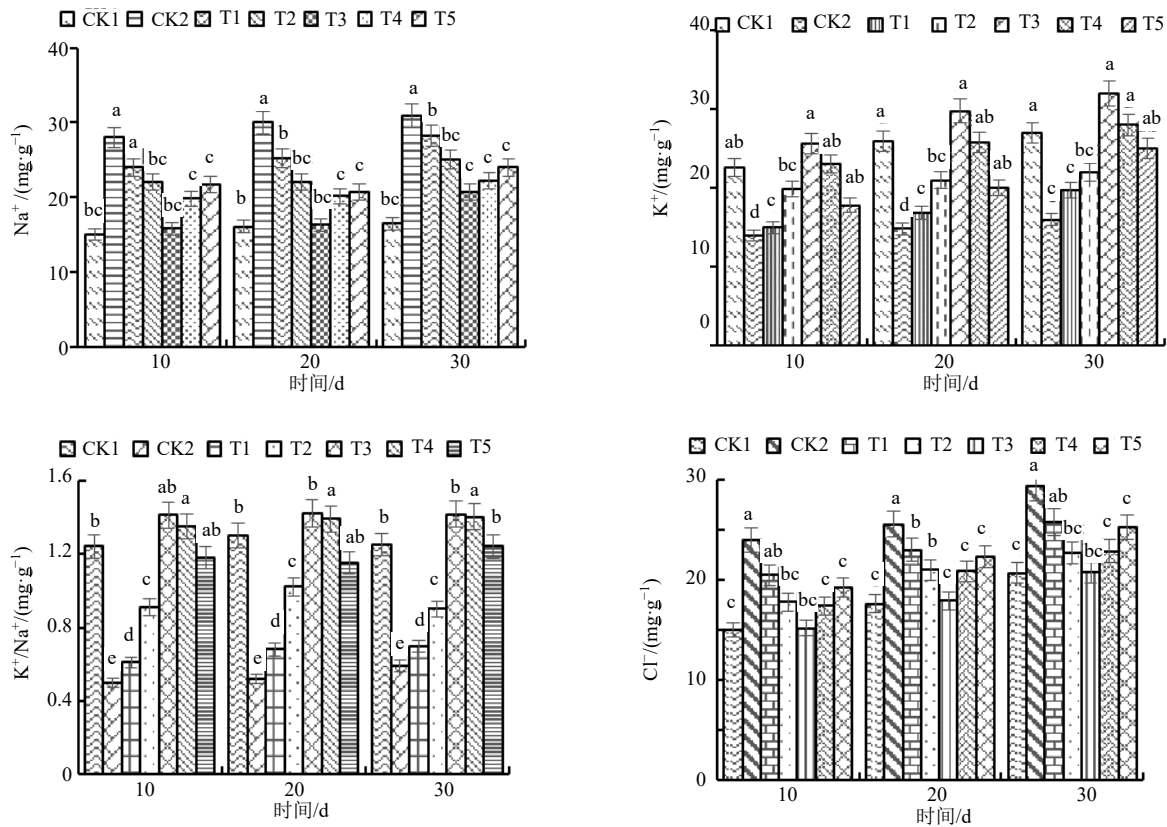


图 3 NaCl 胁迫下不同浓度外源 IAA 对甘草幼苗中 Na⁺浓度、K⁺浓度、K⁺/Na⁺和 Cl⁻的影响
 Fig. 3 Effects of different concentrations of exogenous IAA on Na⁺ concentrations, K⁺ concentrations, K⁺/Na⁺ and Cl⁻ in *G. uralensis* under NaCl stress

较于 CK2 下降了 31%，差异显著。由图 4 可知，相较于其他盐胁迫处理，T3 处理下 10、20、30 d 3 个阶段的甘草幼苗可溶性糖含量都非常接近 CK1，说明外源 IAA 对 200 mmol/L NaCl 胁迫下的甘草幼苗累积过多可溶性糖具有一定抑制作用，有利于甘草幼苗在逆境下健壮生长。T4、T5 处理下的甘草幼苗可溶性糖含量随外源 IAA 浓度梯度不断增高而增加，相较于 T3 分别增加了 11%、30%，甘草幼苗内可溶性糖呈现上升趋势，该变化说明，施加外源 IAA 的最适浓度应为 15 mmol/L，此浓度最有利于 200 mmol/L NaCl 胁迫下甘草幼苗内可溶性糖含量的正常生成。

从图 4 可知，受到 200 mmol/L NaCl (CK2) 胁迫后甘草幼苗内 Pro 含量相较于 CK1 高出 44%，差异显著。随着施加不同浓度梯度外源 IAA，甘草幼苗内 Pro 含量相较于 CK2 呈现降低趋势，在 T3 处理下，甘草幼苗内 Pro 含量显著降低并接近于 CK1，与其相差 4%。相较于 CK2 降低了 41%，差异显著。T3 处理相较于 T1、T2、T4、T5 处理分别降低了

34%、21%、23%、37%。由此可知，施加外源 IAA 浓度为 15 mmol/L 时，受到 200 mmol/L NaCl 胁迫的甘草幼苗内 Pro 含量最接近非 NaCl 胁迫下的含量，说明施加适宜浓度的外源 IAA 可降低 NaCl 胁迫下甘草幼苗内 Pro 含量，有利于甘草幼苗正常生长发育。

3.5 不同浓度的外源 IAA 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗中 MDA 含量的影响

从图 5 可知，在受到 200 mmol/L NaCl (CK2) 胁迫后甘草幼苗内 MDA 含量最高，相较于 CK1 增加了 27%，差异显著。如图所示，随处理天数增加，甘草幼苗中的 MDA 含量呈现不断升高的趋势，但随着施加的外源 IAA 浓度的不断增加，甘草幼苗中的 MDA 含量开始呈现降低趋势、逐渐靠近 CK1，在 T3 处理下，最为接近 CK1，差值为 1%。相较于 CK2，T3 显著降低 28%，其他浓度梯度外源 IAA 处理相较于 CK2 的降低范围在 8%~27%，由此可知，施加外源 IAA 可以减少 NaCl 胁迫下甘草幼苗细胞内 MDA 的生成，增强其抵抗力，且说明 15 mmol/L

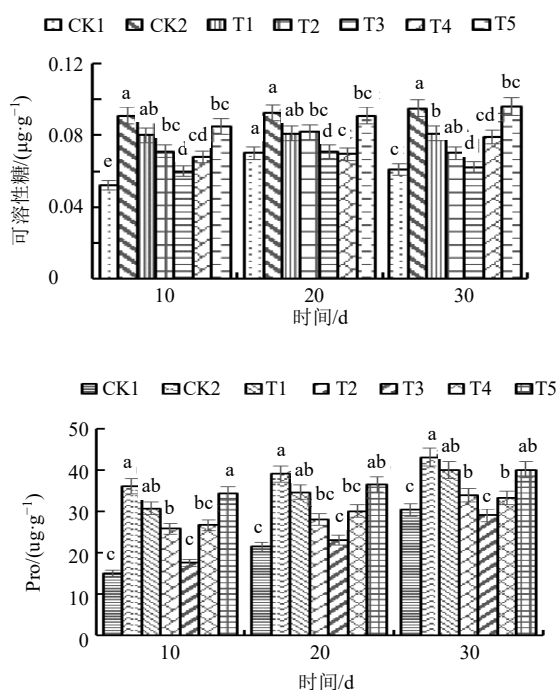


图 4 NaCl 胁迫下不同浓度外源 IAA 对甘草幼苗中可溶性糖和 Pro 的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of exogenous IAA on soluble sugars and Pro content in *G. uralensis* seedlings under NaCl stress

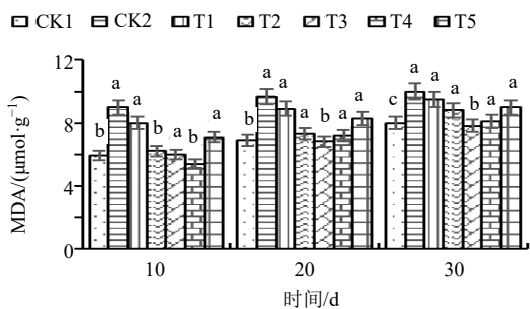


图 5 NaCl 胁迫下不同浓度外源 IAA 对甘草幼苗中 MDA 的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of exogenous IAA on MDA under NaCl stress

外源 IAA 是缓解 200 mmol/L NaCl 下甘草幼苗细胞内 MDA 大量生成的最适浓度梯度。

3.6 不同浓度的外源 IAA 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗中抗氧化酶 POD、SOD、CAT 活性的影响

图 6 所示, 相较于 CK1, 在受到 200 mmol/L NaCl (CK2) 胁迫后甘草幼苗内 POD 活性降到最低。在施加外源 IAA 后, 甘草幼苗内 POD 活性

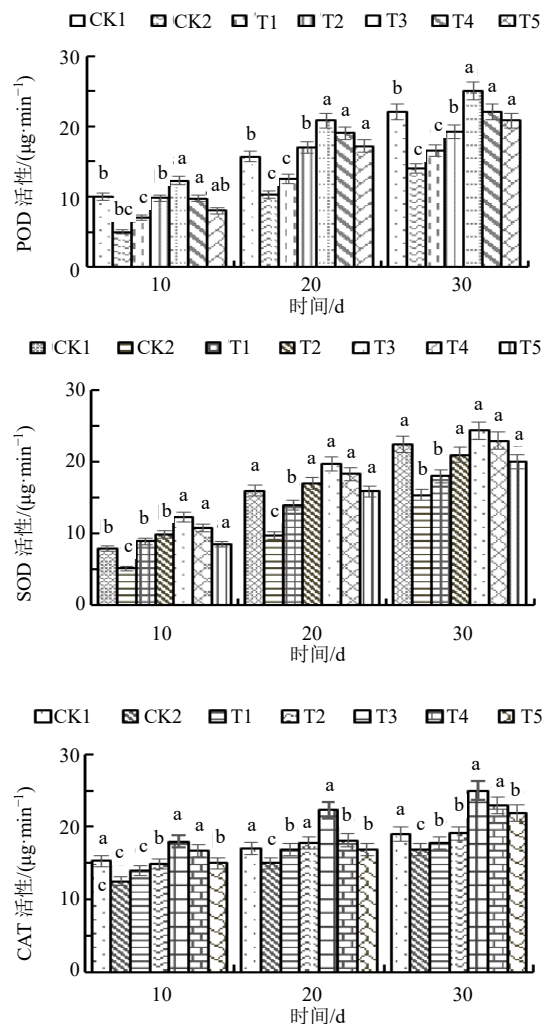


图 6 NaCl 胁迫下不同浓度外源 IAA 对甘草幼苗中 POD、SOD、CAT 活性的影响

Fig. 6 Effects of different concentrations of exogenous IAA on POD, SOD, and CAT activities in *G. uralensis* under NaCl stress

随之浓度不同而变化。其中外源 IAA 为 15 mmol/L (T3) POD 活性最高, 相较于 CK1 增加了 18%, 相较于 CK2 增加了 50%。从图 6 可以看出, T4、T5 处理下甘草幼苗内 POD 活性有所降低但变化平稳, 说明外源 IAA 浓度梯度过高会降低 POD 的活性。综上所述, 15 mmol/L 的外源 IAA 浓度不仅可以有效增加 NaCl 胁迫下甘草幼苗内 POD 活性, 更是其最适浓度。

由图 6 可知, 受到 NaCl (CK2) 胁迫后, 甘草幼苗内 SOD 活性降至最低, 随着外源 IAA 浓度不断增大后, 甘草幼苗内 SOD 活性又开始升高, 在 T3 时达到顶峰, 而后又开始下降, 不过其活性均高于

200 mmol/L NaCl 胁迫 (CK2) 处理, 尤其在外源 IAA 浓度为 15 mmol/L (T3) 时活性最高, 较于 CK2 高出 46%。T4、T5 处理下甘草幼苗内 SOD 活性略有下降, 说明外源 IAA 浓度过高会降低 SOD 的活性。综上可知, 15 mmol/L 的外源 IAA 可以有效提高 NaCl 胁迫下甘草幼苗内 SOD 活性, 是其最适浓度。

由图 6 可知, 当受到 200 mmol/L NaCl (CK2) 胁迫时, 甘草幼苗内 CAT 活性最低, 在外源 IAA 浓度为 5 mmol/L (T1) 和 10 mmol/L (T2) 时 CAT 活性相较于 CK2 分别增加了 9% 和 14%, 在外源 IAA 浓度为 15 mmol/L (T3) CAT 活性相较于 CK2 增加了 32%, 说明在 T1、T2、T3 处理下甘草幼苗内 CAT 呈现逐渐升高的趋势。但 T4、T5 处理下 CAT 活性相较于 T3 有所下降, 说明外源 IAA 浓度过高会降低 CAT 活性。综上可知, 15 mmol/L 的外源 IAA 可以有效提高 NaCl 胁迫下甘草幼苗内 CAT 活性, 是其最适浓度。

3.7 不同浓度的外源 IAA 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗中总黄酮含量的影响

图 7 所示, 在受到 200 mmol/L NaCl (CK2) 胁迫后甘草幼苗内总黄酮含量最低, 说明 NaCl 胁迫会降低甘草幼苗中总黄酮含量。在施加不同浓度外源 IAA 后, 可发现总黄酮含量在不断升高, 当外源 IAA 浓度为 15 mmol/L (T3) 时甘草幼苗中总黄酮含量最高。后续伴随外源 IAA 浓度不断增加, T4、T5 处理下甘草幼苗中合成的总黄酮含量呈现降低趋势。总的来说 10、20、30 d 的甘草幼苗总黄酮含量在不断增加, 相较于 10 d, 20 d 和 30 d 时总黄酮含量分别增加了 24% 和 30%。相较于 CK1, CK2 的

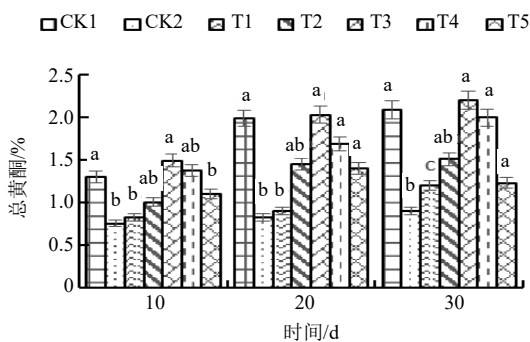


图 7 NaCl 胁迫下不同浓度外源 IAA 对甘草幼苗中总黄酮含量的影响

Fig. 7 Effect of different concentrations of exogenous IAA on total flavonoids content in *G. uralensis* seedlings under NaCl stress

总黄酮含量降低了 54%, 差异显著; 相较于 CK1、CK2, T3 分别增加了 6% 和 57%。由此可知, 15 mmol/L 外源 IAA 不但能减弱 200 mmol/L NaCl 胁迫对甘草幼苗总黄酮的影响, 还能促进其总黄酮的累积。

4 讨论

植物对盐最敏感的时期是种子萌发和幼苗生长期^[20]。研究表明, NaCl 胁迫是抑制植物生长的最主要和最普遍的无机因素之一^[21]。本实验中, 在 200 mmol/L NaCl 胁迫时, 甘草幼苗的生理状况变差、生长量显著降低。施加不同浓度外源 IAA 后, 甘草幼苗生长状况明显变好, 且 IAA 浓度为 15 mmol/L 时甘草幼苗生长状况最好, 与 NaCl 胁迫下生长状况差异显著。这说明当甘草幼苗受 NaCl 胁迫后, 施加适宜浓度的外源 IAA 能有效缓解甘草幼苗受到的各种伤害。

植物通过光合作用吸收光能, 把无机物合成富含有机物, 释放 O₂ 是绿色植物最重要的反应之一^[22]。叶绿体是绿色植物最重要的质体, 是参与光合作用主要场所, 其对生长环境中的非生物胁迫非诚敏感, 在 NaCl 胁迫下叶绿体的生长受到影响, 导致植物生长的能量来源减少^[23]。有研究表明, 受 NaCl 胁迫后, 植物吸收无机盐和水的能力大大减弱, 导致合成叶绿素的相关蛋白含量减少, 从而影响了色素的合成, 极大削弱植物光合能力而影响植物的正常生长^[24]。也有研究表明, NaCl 胁迫后限制了叶片气孔开放, 使植物净光合速率、气孔导度和细胞间 CO₂ 浓度降低, 光合作用大幅减弱, 影响植物正常生长^[25-26]。虽然 IAA 调节植物生长的作用机制还没有完全明晰, 但是有研究指出, IAA 可显著提高微藻细胞叶绿素含量进而整体提高微藻细胞光合活性^[27]。本研究中, 甘草幼苗受到 NaCl 胁迫后施加外源 IAA 确实使其幼苗内叶绿素含量稳定升高, 缓解了盐胁迫对甘草幼苗在逆境下生长中叶绿素合成的抑制, 这与上述报道结果一致。

植物在生长过程中, K⁺能调控植物体内的离子平衡、控制渗透、稳定细胞渗透压, 在高等植物体内是含量较高的阳离子, 对植物在逆境条件下抗盐行经极为重要^[28]。本研究表明, 受到 NaCl 胁迫后, 甘草幼苗内 K⁺ (CK2) 含量显著降低, 而施加适宜浓度的外源 IAA 后甘草幼苗内 K⁺ 含量呈现增高趋势, 尤其是 T3 处理下 K⁺ 含量增至盐胁迫处理中最高, 说明外源 IAA 浓度为 15 mmol/L 可有效促进甘

草幼苗内 K^+ 的累积,使甘草幼苗维持接近正常水平 (CK1) 离子平衡。有研究表明,植物受到 NaCl 胁迫后,植物根系会吸收大量 Na^+ 与 Cl^- , 不仅削弱植物吸水能力,使植物产生离子毒害,且 Na^+ 会抑制植物吸收 K^+ , 使植物细胞内离子平衡状态被打破^[29]。本研究中,受到 NaCl (CK2) 胁迫后甘草幼苗内 Na^+ 和 Cl^- 含量大大增加,在施加不同浓度外源 IAA 后 Na^+ 和 Cl^- 含量相较于 CK2 均有降低,且外源 IAA 浓度为 15 mmol/L (T3) 时降至最低接近于 CK1; 外源 IAA 对 NaCl 胁迫下 K^+/Na^+ 含量的变化趋势与 K^+ 变化趋势相同,说明在施加外源 IAA 后 K^+ 含量增加、 Na^+ 含量降低,致使离子平衡状态有所恢复,说明适宜浓度的外源 IAA 可缓解盐离子浓度过高带来的离子毒害。而 IAA 浓度为 15 mmol/L (T3) 时甘草幼苗内 K^+ 、 Na^+ 、 K^+/Na^+ 及 Cl^- 值最接近于无盐胁迫状态 (CK1), 适合植物正常生长状态。

有研究表明,逆境胁迫下植物的渗透调节基因表达会极大增强来形成大量渗透调节物质,而渗透调节物质通过提高植物细胞渗透压来增强细胞吸水保水能力^[30]。Pro 是植物在盐胁迫下产生的一种主要渗透调节物质,在盐胁迫条件下,Pro 在植物体内会大量生成以升高渗透压、保护细胞结构不受影响^[31]。本研究中,施加外源 IAA 降低了 NaCl 胁迫下甘草幼苗内 Pro 含量,IAA 浓度为 15 mmol/L 时缓解作用最明显。可溶性糖也是植物用来升高细胞渗透压以提高细胞吸水能力的一种主要渗透调节物质之一,但可溶性糖累积过多也会造成一定的渗透胁迫从而抑制植物正常生长^[32]。本研究表明,在受到 200 mmol/L NaCl (CK2) 胁迫后,甘草幼苗内可溶性糖含量急剧上升,施加外源 IAA 后,甘草幼苗内的可溶性糖含量逐渐降低,在 T3 处理下降至受到盐胁迫后最低,接近于 CK1,而后随 IAA 浓度增加而又呈现升高趋势。说明甘草幼苗受 NaCl 胁迫后,施加的 IAA 浓度为 15 mmol/L 时,甘草幼苗内可溶性糖含量降至接近于无 NaCl (CK1) 胁迫时,即该浓度是最适合甘草幼苗可溶性糖正常生成的浓度。

植物体的膜结构具有选择透过性,能够依植物体自身的需求有选择性的透过所需的物质,从而调控植物细胞正常代谢、促进植物细胞正常生长^[33]。当植物受到盐胁迫时,细胞膜因过氧化产生大量 MDA,从而加剧膜损伤,MDA 可反映植物细胞膜的损伤程度^[34-35]。研究表明,适宜浓度的外源 IAA

可以抑制 NaCl 胁迫下植物体内 MDA 含量的增加,从而缓解逆境胁迫带来的损害,进而促进植株健康生长^[36-37]。本研究表明,在 NaCl 胁迫下,致使甘草幼苗中 MDA 含量增加,在施加适宜浓度的外源 IAA 后,可降低甘草幼苗中 MDA 的含量,在外源 IAA 浓度为 15 mmol/L 时效果最明显,有效减小了 NaCl 胁迫下对甘草幼苗细胞膜的伤害。

植物在逆境条件下维持自身正常生长的主要抗氧化酶为 POD、SOD 和 CAT 等^[38],研究表明,抗氧化酶能够清除植物在逆境条件所产生的过量活性氧,并改善该条件下细胞的氧化还原稳态,提高植物的抗盐能力^[39-40]。本研究表明,施加适宜浓度的外源 IAA (T1~T3) 后,甘草幼苗中抗氧化酶 POD、SOD、CAT 活性与 NaCl 胁迫下 (CK2) 相比较显著升高。虽然随着 IAA 浓度的增加,抗氧化酶活性呈现下降趋势 (T4~T5),但均高于 NaCl 胁迫状态 (CK2)。即适宜浓度 IAA (15 mmol/L) 对提高甘草幼苗内的抗氧化酶活性有促进作用,有利于甘草幼苗在 NaCl 胁迫下对抗离子毒害维持自身正常生长。

黄酮类化合物是植物次生代谢产物的一个重要家族,被广泛认为与植物的抗性有关^[41]。本研究中,在高浓度 NaCl (CK2) 胁迫下,甘草总黄酮含量下降。在施加不同浓度的外源 IAA 后,促进盐胁迫下甘草总黄酮的不断累积,从而使甘草幼苗产生耐盐性。本研究表明,黄酮类化合物可增强甘草幼苗抗盐胁迫的能力,在草幼苗抗盐胁迫中发挥着非常重要的作用。当外源 IAA 的浓度为 15 mmol/L (T3) 时,甘草幼苗中总黄酮的含量累积达到最高点,而后随 IAA 浓度增高 (T4~T5) 又开始降低。这说明只有适宜的外源 IAA 浓度才有助于促进 NaCl 胁迫下甘草幼苗内总黄酮的累积,从而提高甘草幼苗的抗盐性,促进甘草幼苗的生长。

综上所述,在受到 NaCl 胁迫条件下,甘草幼苗的生长状况变差,其叶片中叶绿素含量、 K^+ 及 K^+/Na^+ 含量、抗氧化酶活性以及甘草总黄酮含量降低;甘草幼苗内的 Na^+ 和 Cl^- 含量、Pro 含量、MAD 含量以及可溶性糖含量增加以对抗高盐环境。当施加不同浓度的外源 IAA 后,NaCl 胁迫下的甘草幼苗的生长状况、叶绿素含量、相关离子含量、抗氧化酶活性、总黄酮含量及渗透调节物质都有所增加和缓解,但随着外源 IAA 浓度的增加,该缓解作用越来越弱。说明适宜浓度的外源 IAA 才有利于缓解

盐胁迫对甘草幼苗的各种损害,提高甘草幼苗的生活力和耐盐性。本研究结果表明,适宜浓度的外源 IAA 可缓解 NaCl 胁迫对甘草幼苗生长发育的伤害,当浓度为 15 mmol/L 时缓解效果达到最佳状态,即该浓度是缓解 NaCl 胁迫下甘草幼苗生长发育受损危机的最适浓度。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Wang Z J, Zhuang J J, Zhao A P, *et al.* Types, harms and improvement of saline soil in Songnen Plain [J]. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 2018, 322: 052059.
- [2] Wu C, Yin Y L, Yang X M, *et al.* A Markov-based model for predicting the development trend of soil microbial communities in saline-alkali land in Wudi County [J]. *Concurr Comput Pract Exp*, 2019, 31(10): e4754.
- [3] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲垦利县夏季土壤水盐空间变异及土壤盐分微域特征 [J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 1040-1049.
- [4] 曹栋栋, 陈珊宇, 秦叶波, 等. 水杨酸调控盐胁迫下羽衣甘蓝种子萌发的机理 [J]. *植物学报*, 2020, 55(1): 49-61.
- [5] Maathuis F J M, Ahmad I, Patishtan J. Regulation of Na⁺ fluxes in plants [J]. *Front Plant Sci*, 2014, 5: 467.
- [6] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 56.
- [7] 杨发苍, 晏瑛. 盐胁迫对甘草种子萌发及幼苗生理指标的影响 [J]. *农业开发与装备*, 2019(8): 101.
- [8] Meng F N, Xiang D, Zhu J S, *et al.* Molecular mechanisms of root development in rice [J]. *Rice*, 2019, 12(1): 1.
- [9] Abdel L A A, Hasanuzzaman M, Tahjib-ul-arif M. Mitigation of salinity stress by exogenous application of cytokinin in faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Not Bot Horti Agrobo*, 2021, 49(1): 12192.
- [10] Chen Z H, Li M T, Yuan Y, *et al.* Ectopic expression of cucumber (*Cucumis sativus* L.) CsTIR/AFB genes enhance salt tolerance in transgenic *Arabidopsis* [J]. *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 2017, 131(1): 107-118.
- [11] Garrido-Vargas F, Godoy T, Tejos R, *et al.* Overexpression of the auxin receptor AFB3 in *Arabidopsis* results in salt stress resistance and the modulation of NAC4 and SZF1 [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(24): 9528.
- [12] 李笑语. 两种甘草响应盐胁迫的转录组比较分析及其茎尖遗传转化体系的建立 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [13] 何子华. 盐胁迫下胀果甘草和乌拉尔甘草渗透调节特征的比较分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [14] 陈刚, 李胜. 植物生理学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 56.
- [15] 余茜, 马淼, 赵红艳. 光果甘草不同愈伤组织中总黄酮含量的比较 [J]. *种子*, 2011, 30(7): 4-7.
- [16] Vaishnav A, Jain S, Kasotia A, *et al.* Effect of nitric oxide signaling in bacterial-treated soybean plant under salt stress [J]. *Arch Microbiol*, 2013, 195(8): 571-577.
- [17] 刘爱荣, 赵可夫. 盐胁迫下盐芥渗透调节物质的积累及其渗透调节作用 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, 31(4): 389-395.
- [18] 张殿忠, 汪沛洪, 赵会贤. 测定小麦叶片游离脯氨酸含量的方法 [J]. *植物生理学通讯*, 1990, 26(4): 62-65.
- [19] Zhou B Y, Guo Z F, Xing J P, *et al.* Nitric oxide is involved in abscisic acid-induced antioxidant activities in *Stylosanthes guianensis* [J]. *J Exp Bot*, 2005, 56(422): 3223-3228.
- [20] 罗君, 彭飞, 王涛, 等. 黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum*) 种子萌发及幼苗生长对盐胁迫的响应 [J]. *中国沙漠*, 2017, 37(2): 261-267.
- [21] 王丽燕, 赵可夫. 玉米幼苗对盐胁迫的生理响应 [J]. *作物学报*, 2005, 31(2): 264-266.
- [22] 王静静, 张文鹏, 徐当会. NaCl 胁迫下钙对沙拐枣 (*Calligonum arborescens*) 株高及光合特性的影响 [J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 167-174.
- [23] 杨瑾, 廉华, 王彦宏, 等. 外源海藻糖对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生理指标的影响 [J]. *河南农业科学*, 2009, 38(12): 97-100.
- [24] Wang R G, Chen S L, Deng L, *et al.* Leaf photosynthesis, fluorescence response to salinity and the relevance to chloroplast salt compartmentation and anti-oxidative stress in two poplars [J]. *Trees*, 2007, 21(5): 581-591.
- [25] 郭启芳, 马千全, 孙灿, 等. 外源甜菜碱提高小麦幼苗抗盐性的研究 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(9): 1680-1686.
- [26] 杨立飞, 朱月林, 胡春梅, 等. NaCl 胁迫下营养液栽培嫁接西瓜生长动态及叶片生理生化特性的研究 [J]. *西南农业学报*, 2005, 18(4): 439-443.
- [27] 屈延辉. 植物激素和光质调节提高小球藻油脂产率的实验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [28] Frans J M M, Anna A. K⁺Nutrition and Na⁺Toxicity: The basis of cellular K⁺/Na⁺Ratios [J]. *Ann Bot*, 1999, 84(2): 123-133.
- [29] 李合生. 现代植物生理学 [M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 56.
- [30] 耿兴敏. 植物逆境交叉胁迫适应性研究进展 [J]. *林业科技开发*, 2014(4): 14-18.
- [31] 钟华, 董洁, 董宽虎. 盐胁迫对扁蓿豆幼苗脯氨酸积累及其代谢关键酶活性的影响 [J]. *草业学报*, 2018, 27(4): 189-194.
- [32] 王嘉佳, 唐中华. 可溶性糖对植物生长发育调控作用的研究进展 [J]. *植物学研究*, 2014(3): 71-76.
- [33] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: I.

- occurrence in higher plants [J]. *Plant Physiol*, 1977, 59(2): 309-314.
- [34] 肖冬宇, 吴端阳, 文雪, 等. 两种小麦在盐胁迫下早期幼苗生长及生理生化指标变化规律 [J]. 湖北农业科学, 2021, 60(15): 29-33.
- [35] 李娜娜, 刘同歌, 黄志慧, 等. 草本资源植物菥蓂对盐胁迫下生理生态及次生代谢产物响应 [J]. 草业学报, 2022, 31(11): 181-190.
- [36] 赵颖, 魏小红, 李桃桃. 外源 NO 对混合盐碱胁迫下藜麦种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 草业学报, 2020, 29(4): 92-101.
- [37] 张会灵, 吴正景, 郭大龙, 等. IAA 和 SA 对盐胁迫下萝卜幼苗生理特性的影响 [J]. 北方园艺, 2017(8): 32-34.
- [38] 谢晓红. 植物抗氧化酶系统研究进展 [J]. 化工管理, 2015(32): 99-100.
- [39] 杨建军, 张国斌, 郁继华, 等. 盐胁迫下内源 NO 对黄瓜幼苗活性氧代谢和光合特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3778-3788.
- [40] Foyer C H, Noctor G. Tansley Review No. 112 : Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signalling [J]. *New Phytologist*, 2000, 146(3): 359-388.
- [41] Song Z H, Yang Q, Dong B Y, *et al.* Melatonin enhances stress tolerance in pigeon pea by promoting flavonoid enrichment, particularly luteolin in response to salt stress [J]. *J Exp Bot*, 2022, 73(17): 5992-6008.

[责任编辑 时圣明]