



李红玲, 陈垣, 郭凤霞, 等. 水杨酸对 NaHCO_3 胁迫下黄芪幼苗生长及生理特性的调节效应[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(1): 50–59.

LI H L, CHEN Y, GUO F X, et al. Effects of salicylic acid on growth and physiological characteristics of *Astragalus mongholicus* seedlings under NaHCO_3 stress[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(1): 50–59.

水杨酸对 NaHCO_3 胁迫下黄芪幼苗生长及生理特性的调节效应

李红玲, 陈垣*, 郭凤霞, 梁伟, 董鹏斌, 王红燕

(甘肃农业大学 农学院/生命科学技术学院/甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】探究外源水杨酸(SA)缓解盐碱胁迫黄芪种子萌发及幼苗生长生理特性的效应。【方法】以蒙古黄芪为供试材料, 利用 100 mmol/L 的 NaHCO_3 溶液模拟盐碱胁迫, 分别设置 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mmol/L 外源 SA 对黄芪种子萌发、幼苗生长进行调节, 并以未加 SA 无 NaHCO_3 胁迫处理为对照 1 (CK_1), 未加 SA 及 NaHCO_3 胁迫为对照 2 (CK_2), 测定蒙古黄芪种子萌发指标、幼苗生长及生理指标。【结果】 NaHCO_3 胁迫下 (CK_2) 黄芪种子萌发、幼苗生长及生理受到明显抑制, 与 CK_1 相比, 黄芪种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别降低 93.96%、93.45%、97.26%、97.50%, 幼苗株高、单株鲜重、根系活力分别降低 35.97%、37.61%、72.65%; 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性及可溶性蛋白、脯氨酸(Pro)受到不同程度的抑制, 叶片质膜透性、丙二醛(MDA)含量显著增加; 与 CK_2 相比, 添加不同浓度外源 SA 后蒙古黄芪种子萌发及幼苗生长显著提高 ($P < 0.05$), 叶片质膜透性及膜脂过氧化产物 MDA 含量分别降低了 40.21%~56.56%、20.09%~46.39%, 抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性及根系活力得到不同程度增强, 渗透调节物质游离脯氨酸、可溶性蛋白积累量显著提高了 7.63%~86.95%、5.51%~41.75%。【结论】外源 SA 可以有效调节 NaHCO_3 胁迫对黄芪种子萌发及幼苗生长的抑制, 缓解渗透压并降低膜脂过氧化对黄芪幼苗带来的损伤, 增强黄芪种子及幼苗对盐碱胁迫的适应性及抗盐碱能力, 其以 0.3 mmol/L 缓解效果最佳。

关键词: 水杨酸; 蒙古黄芪; NaHCO_3 胁迫; 种子萌发; 幼苗生长; 生理特性

中图分类号: S567.23*9 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)01-0050-10



Effects of salicylic acid on growth and physiological characteristics of *Astragalus mongholicus* seedlings under NaHCO_3 stress

LI Hongling, CHEN Yuan*, GUO Fengxia, LIANG Wei,
DONG Pengbing, WANG Hongyan

(College of Agronomy, College of Life Sciences and Technology, Gansu Provincial State Key Lab of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

收稿日期: 2023-08-20 修回日期: 2023-09-18

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA846)、甘肃省农业农村厅基金项目(2022GSCYJQ07-33)和甘肃省农牧厅基金项目(GARS-ZYC-1)

Project supported by Nature Science Foundation of Gansu Province (22JR5RA846), Department of Agriculture and Rural Affairs of Gansu Province(2022GSCYJQ07-33) and Agriculture and Pastoral Department of Gansu Province (GARS-ZYC-1)

作者简介: 李红玲, 硕士生, orcid.org/0009-0000-5698-1205, 1744213372@qq.com; *通信作者: 陈垣, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事药用植物栽培与育种研究, orcid.org/0009-0002-4555-6400, chenyan@gsau.edu.cn。

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the physiological effects of exogenous Salicylic acid (SA) on the mitigation of seed germination and seedling growth in *Astragalus mongolicus* under saline-alkali stress conditions. [Method] *Astragalus mongolicus* was utilized as the test material, and saline-alkali stress was simulated using a 100 mmol/L NaHCO_3 solution. Exogenous SA solutions with concentrations of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mmol/L were set to modulate seed initiation and seedling growth in *Astragalus mongolica*. Two control groups, treatment without SA and NaHCO_3 stress as control 1 (CK_1), and the treatment without SA and NaHCO_3 stress as control 2 (CK_2) were designed, and the seed germination index, seedling growth and physiological index of *Astragalus mongolicus* were measured. [Result] In response to NaHCO_3 induced stress in CK_2 , *Astragalus* experienced substantial inhibition in seed germination, seedling growth, as well as physiological and biochemical processes. Compared with CK_1 , the germination rate, germination potential, germination index, and vitality index of *Astragalus* seeds exhibited significant reductions of 93.96%, 93.45%, 97.26%, and 97.50%, respectively. Seedling height, fresh weight, and root activity showed substantial reductions of 35.97%, 37.61%, and 72.65%, respectively. Moreover, the activities of antioxidant enzymes, the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), soluble protein and proline (Pro) were inhibited to varying degrees, while the permeability of plasma membrane and the content of malondialdehyde (MDA) experienced significant increases. In comparison with CK_2 , the introduction of exogenous salicylic acid (SA) resulted in significant enhancements in the germination and seedling growth of *Astragalus mongolica* ($P < 0.05$). Furthermore, there were notable reductions in plasma membrane permeability and the content of membrane lipid peroxidation product malondialdehyde (MDA), ranging from 40.21% to 56.56% and 20.09% to 46.39%, respectively. The activities of antioxidant enzymes, including SOD, POD, and CAT, as well as root activity, displayed varying degrees of enhancement. Additionally, there was a noteworthy increase in the accumulation of free proline and soluble proteins, which are essential osmoregulatory substances, by percentages ranging from 8.86% to 25.57% and 13.10% to 42.13%, respectively. [Conclusion] Exogenous Salicylic acid has proven to be a potent regulator of the inhibitory effects of NaHCO_3 stress on both seed germination and seedling growth in *Astragalus*. It alleviates effectively osmotic pressure and mitigates damage caused by membrane lipid peroxidation in *Astragalus* seedlings. Furthermore, it enhances the adaptability and salt-alkali resistance of both *Astragalus* seeds and seedlings when exposed to salt-alkali stress. The concentration of 0.3 mmol/L exhibits the optimal alleviating impact.

Keywords: salicylic acid; *Astragalus mongolicus*; NaHCO_3 stress; seed germination; seedling growth; physiological characteristic

【研究意义】盐碱胁迫严重影响作物发育及生存,全球有超过 20% 农田受到盐碱胁迫的影响,且这一比例随着气候和人类活动的影响逐年加剧^[1-3]。中国是世界上盐碱地分布面积最广的国家之一,盐碱地主要分布于西北、华北、东北及沿海地区,其中在陕、甘、宁、青、蒙、新六省(区)分布的盐碱土面积占全国的 69%^[4],严重制约了生态农业的可持续发展。因此,探究增强植物耐盐碱性的途径,对合理改良和利用干旱地区盐碱土壤资源具有重要意义。【前人研究进展】盐碱胁迫包括盐胁迫、碱胁迫以及盐碱共同胁迫,其中,盐胁迫主要是由中性盐 NaCl 和 Na_2SO_4 引起,而碱胁迫则是由碱性盐 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 引起^[5]。Yang 等^[10]研究指出碱性盐土壤中的 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 对植物的危害大于中性盐 (NaCl 、 Na_2SO_4),除了渗透胁迫和离子毒害外,还增加了 pH 胁迫,使植物细胞受到离子毒害、渗透胁迫而限制诸多的营养元素吸收,抑制细胞内酶活性与蛋白质合成,导致营养失衡、生理生化紊乱,干扰正常代谢过程^[11],从而破坏植物的正常生长生理,如离子浓度和抗氧化酶的活性^[12]。水杨酸(salicylic acid, SA)的化学名称为邻羟基苯甲酸,以游离态的小分子酚类化合物普遍存在于植物体内,是调节植物生长的重要外源激素类物质^[13-15],具有提高非生物抗逆性的作用,能够有效的提高植物内的抗氧化酶活性,增强对活性氧的清除能力,从而缓解盐碱胁迫对植物内细胞造成的伤害^[15],增强植物抗盐碱性促进幼苗茁壮成长^[16]。有关外源 SA 缓

解植物盐碱危害方面的报道较多:如汤菊香等^[17]用0.9 mmol/L外源SA显著提高盐胁迫下玉米根系、叶片的POD、SOD、APX活性及相对含水量,并显著降低其膜透性和丙二醛含量,但显著抑制了根系、叶片的CAT活性;李润枝等^[18]用0.5 mmol/L外源SA处理甘草种子,明显促进盐胁迫下(200 mmol/L NaCl)甘草种子胚根伸长,增加幼苗鲜重,降低胚根中丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量,提高过氧化物酶(POD)活性;Chen等^[19]用外源SA引发增加了羊草萌发种子中O₂的内流,从而提高了呼吸强度,引发了萌发种子的一系列生理变化;其次在月季(*Rosa chinensis*)^[20]、高粱(*Sorghum bicolor*)^[21]、棉花(*Gossypium spp*)^[22]、白榆(*Ulmus pumila*)^[23]等多种植物中也均已证实。【本研究切入点】黄芪为豆科植物多年生草本,有蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao] 和膜荚黄芪 [*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge.] 两类基原植物,具有脱毒排脓、补气升阳、固表止汗、利水消肿和生津养血等功效,为补气圣品^[24]。由于黄芪野生资源匮乏,药材来源90%靠人工栽培,种植区域主要分布在我国西北部干旱和半干旱地区^[25],如内蒙古、山西、甘肃和青海等地区^[26],但由于该地区常年降水量小、干旱缺水,蒸发量大,土壤表层盐分积聚引起土层pH升高、土壤理化性质改变,严重影响黄芪种子萌发及幼苗生长发育。目前,关于蒙古黄芪研究大多集中在单一干旱胁迫、盐碱胁迫对生长生理特性、化学成分积累^[27-29]及抗逆性品种选育^[30]方面,其不同浓度外源物质对重碳酸盐胁迫下蒙古黄芪种子萌发及幼苗生长生理的研究却鲜有报道。【拟解决的关键问题】以蒙古黄芪为材料,通过100 mmol/L NaHCO₃和不同浓度外源SA对蒙古黄芪种子及幼苗进行处理,探究外源SA对NaHCO₃胁迫下蒙古黄芪种子萌发及幼苗生长生理特性的调节效应,以期为盐碱地生产优质高产的黄芪种苗提供相应的理论支持。

1 材料及方法

1.1 试验材料

种子采收自甘肃陇西县园艺村,经甘肃农业大学陈垣教授鉴定为豆科植物多年生草本植物蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao] 种子,存放于阴凉干燥处。

1.2 试验设计

利用重碳酸盐(100 mmol/L NaHCO₃)模拟盐碱胁迫,并设置不同浓度外源水杨酸(SA:0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 mmol/L)缓解胁迫。用NaHCO₃及不同浓度外源SA溶液体积比1:1配置处理溶液,依次标记为NaS₁、NaS₂、NaS₃、NaS₄、NaS₅,将无NaHCO₃胁迫且未添加外源SA蒸馏水处理记作CK₁,NaHCO₃胁迫未添加外源SA记作CK₂,每3个重复,共21个处理。

1.3 蒙古黄芪种子萌发及幼苗培养

选取籽粒健壮饱满、大小均匀的足量蒙古黄芪种子,清水冲洗干净后,用98%浓硫酸处理5 min,用无菌水冲洗7~8次干净,用体积分数75%的乙醇溶液浸泡0.5 min,再用无菌水冲洗3~4次,放在0.1%的升汞溶液中消毒5 min,最后用无菌水冲洗5~8次待用,采用拌种法双层滤纸发芽床试验,处理液始终贯穿整个处理过程。

采用土壤盆栽式进行幼苗试验。购买一次性的塑料盆栽盒装入混有基质的土壤,每盒播种经过处理露白的蒙古黄芪种子20粒,定期加入清水,待出芽长至3 cm左右时选择长势一致的植株,用100 mmol/L NaHCO₃溶液及不同浓度外源SA混合溶液进行喷施,喷至叶片有水滴自然滴落,处理7 d后进行指标测定。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 种子萌发指标

种子播种后第1天开始记录。

$$\text{发芽势} = (\text{3 d内种子发芽总数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽率} = (\text{7 d内种子发芽总数} / \text{供试种子数}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数(GI)} = \sum(G_t/D_t) \quad (3)$$

式(3)中, G_t 为试验终期内第 t 天种子的发芽数, D_t 表示试验发芽天数, Σ 为总和;

$$\text{活力指数(VI)} = \text{GI} \times S \quad (4)$$

式(4)中, S 表示幼苗的平均长度,cm。

1.4.2 幼苗早期生物量测定

处理后第 10 天,每个处理选取 5 株幼苗,用无菌滤纸擦拭供试幼苗表面附着杂质,测定其株高、根长、单株鲜重。

1.4.3 幼苗早期生理指标测定

根系活力:用 TTC 法测定根系活力,由 TTC 即氯化三苯基四氮唑(又称红四氮唑)会被根系细胞内的脱氢酶给还原,其产物便成红色,利用 TTC 的还原力来反映根系活力的强弱^[31-33]。

抗氧化酶活性的测定:用冰浴研磨、冷冻离心法进行抗氧化酶液的提取。采用 NBT 光化还原法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性^[33];愈创木酚比色法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性^[33];用紫外吸收法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性^[33]。

渗透调节物质:磺基水杨酸法进行游离脯氨酸提取,用水合茚三酮法测定其含量,采用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量,用 DDSJ-308A 电导率仪测定其叶片电导率^[33]。

1.5 数据处理

用 Excel 2010 软件进行数据整理绘图与分析,用 SPSS 22.0 软件对数据进行处理与单因素方差分析(one-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 水杨酸对 NaHCO₃胁迫下蒙古黄芪种子萌发的调节

如表 1 所示,100 mmol/L NaHCO₃(CK₂)胁迫显著降低了黄芪种子发芽率、发芽势、发芽指数及活力指数,分别为 3.33%、3.67%、1.25%、0.34%。利用不同浓度外源 SA 可不同程度提高盐碱胁迫下黄芪种子各项萌发指标,且均达到差异显著水平($P<0.05$),但 NaS₁、NaS₂、NaS₄、NaS₅之间差异不显著($P>0.05$),整体表现随 SA 浓度的增加,各指标呈现先升高后下降的趋势。综合得出,与 CK₂相比,NaS₃处理各指标达到最高值,且与各处理间差异显著($P<0.05$),较 CK₂增加了 14.5 倍,与 CK₁相比差异不显著($P>0.05$);NaS₄处理呈下降趋势,且较 NaS₃较减小了 9.00%。表明 NaHCO₃胁迫能够抑制黄芪种子的萌发,而外源 SA 为 0.3~0.4 mmol/L 时对黄芪种子对碱胁迫下黄芪种子的萌发及碱害缓解作用最佳。

表 1 外源 SA 对 NaHCO₃胁迫下的蒙古黄芪种子萌发的影响

Tab.1 Effect of exogenous SA on seed germination of *Astragalus mongolica* under NaHCO₃ stress

处理 Treatments	发芽势/% Germination percentage	发芽率/% Germination potential	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigour index
CK ₁	53.33±7.26 ^a	60.33±6.23 ^a	45.88±6.03 ^a	87.72±19.49 ^a
CK ₂	3.33±0.88 ^d	3.67±0.88 ^d	1.25±0.60 ^d	0.34±0.19 ^d
NaS ₁	26.00±3.06 ^c	32.67±1.45 ^c	17.78±2.18 ^c	18.07±4.25 ^{cd}
NaS ₂	29.67±2.06 ^c	33.67±3.38 ^c	20.51±1.42 ^c	23.53±4.49 ^{cd}
NaS ₃	48.33±8.82 ^{ab}	53.33±7.13 ^{ab}	35.15±6.59 ^{ab}	76.63±18.53 ^{ab}
NaS ₄	39.33±2.96 ^{abc}	45.00±1.73 ^c	25.43±2.13 ^{bc}	47.63±6.36 ^{bc}
NaS ₅	33.33±7.26 ^c	36.00±6.08 ^c	21.80±4.94 ^c	16.27±5.65 ^{cd}

同列数据(平均值±标准差)后不同字母表示在 5% 水平显著($n=3$,最小差异显著法)。NaS₁、NaS₂、NaS₃、NaS₄、NaS₅分别表示用 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mmol/L SA 溶液对蒙古黄芪种子进行引发处理,CK₁表示未添加外源 SA 无 NaHCO₃胁迫蒸馏水处理,CK₂表示存在 NaHCO₃胁迫但未添加 SA。

Values (mean±SD) followed by different letters are significantly different at $P<0.05$ ($n=3$, LSD). NaS₁, NaS₂, NaS₃, NaS₄ and NaS₅ denotes *Astragalus mongolica* seeds triggered with SA solutions at 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mmol/L, respectively. CK₁ indicated that there was no NaHCO₃ stress and no SA was added for distilled water treatment. CK₂ indicates that NaHCO₃ stress is present but no SA is added.

2.2 水杨酸对 NaHCO₃胁迫下蒙古黄芪幼苗早期生物量的调节

如表 2 所示,在 NaHCO₃(CK₂)胁迫下幼苗长势最弱,与 CK₁相比,株高、根长和单株鲜重分别减小了 35.90%、30.92%、37.60%。添加不同浓度外源 SA 处理后,NaHCO₃胁迫下黄芪幼苗生长显著提高($P<0.05$),其单株鲜重、株高和根长增长随着 SA 浓度的增加而增加。在盐碱胁迫下,以 NaS₃、NaS₄处理效果

最佳,其 NaS₃株高、根长、单株鲜重较 CK₂分别增加了 60.55%、51.93%、35.62%,NaS₄较 CK₂分别增加了 52.40%、70.17%、27.40%;SA 处理后单株鲜重均小于 CK₁,NaS₁、NaS₂、NaS₄、NaS₅株高均小于 CK₁,NaS₁、NaS₂根长均大于 CK₂,NaS₃、NaS₄与 CK₁相比无显著差异($P>0.05$)。

表 2 外源 SA 对 NaHCO₃胁迫下的蒙古黄芪幼苗生物量的影响

Tab.2 Effects of exogenous SA on the biomass of *Astragalus mongolica* seedlings under NaHCO₃ stress

处理 Treatments	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	单株鲜重/g Per plant fresh weight
CK ₁	8.040±0.364 ^{ab}	2.62±0.144 ^{ab}	0.117±0.015 ^a
CK ₂	5.153±0.294 ^c	1.81±0.169 ^c	0.073±0.007 ^c
NaS ₁	7.080±0.380 ^{bc}	2.18±0.202 ^{bc}	0.081±0.006 ^b
NaS ₂	7.480±0.402 ^{ab}	2.34±0.384 ^{bc}	0.091±0.007 ^b
NaS ₃	8.273±0.380 ^a	2.75±0.163 ^{ab}	0.099±0.010 ^{ab}
NaS ₄	7.853±0.338 ^{ab}	3.08±0.254 ^a	0.093±0.008 ^{ab}
NaS ₅	7.080±0.285 ^{bc}	2.63±0.271 ^{ab}	0.088±0.006 ^b

同列数据(平均值±标准差)后不同字母表示在 5% 水平显著($n=3$,最小差异显著法)。NaS₁、NaS₂、NaS₃、NaS₄、NaS₅分别表示用 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 mmol/L 浓度的 SA 溶液对蒙古黄芪种子进行引发处理,CK₁表示未添加外源 SA 无 NaHCO₃胁迫蒸馏水处理,CK₂表示存在 NaHCO₃胁迫但未添加 SA。

Values (mean±SD) followed by different letters are significantly different at $P<0.05$ ($n=3$, LSD). NaS₁, NaS₂, NaS₃, NaS₄ and NaS₅ denotes *Astragalus mongolica* seeds triggered with SA solutions at 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mmol/L, respectively, CK₁ indicated that there was no NaHCO₃ stress and no SA was added for distilled water treatment. CK₂ indicates that NaHCO₃ stress is present but no SA is added.

2.3 水杨酸对碱胁迫下蒙古黄芪幼苗根系活力的调节

由图 1 可知,由 100 mmol/L NaHCO₃(CK₂)胁迫处理后的幼苗根系活力显著降低($P<0.05$),较 CK₁降低了 72.65%,说明高浓度的盐胁迫会使黄芪幼苗的根系活力明显下降,严重影响黄芪幼苗的生长代谢。添加外源 SA 后,各处理幼苗根系活力均大于 CK₂,且 NaS₂、NaS₃、NaS₄、NaS₅与 CK₂间差异显著($P<0.05$)。NaS₄处理幼苗根系活力显著高于其余外源 SA 处理($P<0.05$),且较 CK₂增加了 2.6 倍,说明对幼苗根系活力受到碱性盐伤害的调节效果较好。此外,从根系生长及活力来看,以 NaS₄处理缓解碱胁迫效果最佳,NaS₃处理次之,而 NaS₃与 NaS₅效果最低。

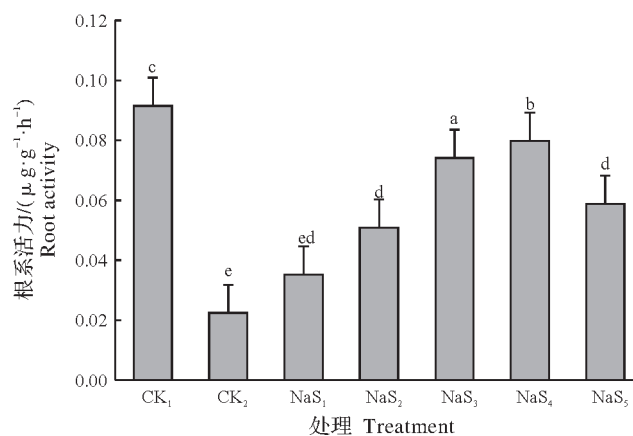
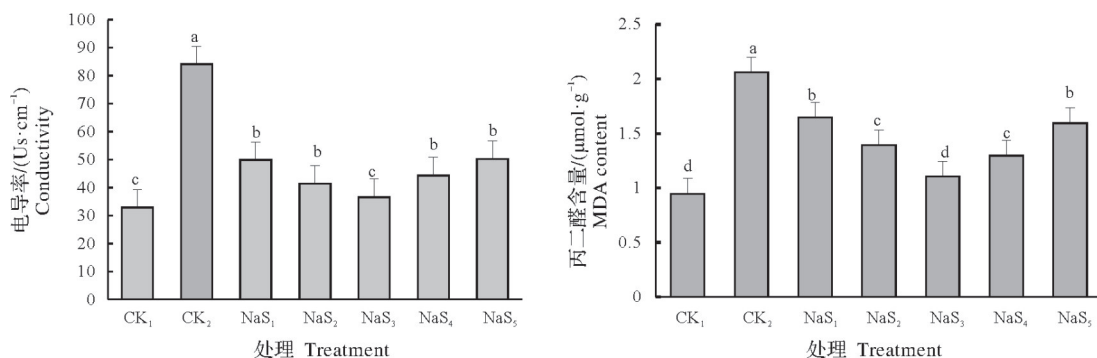


图 1 外源 SA 对 NaHCO₃胁迫下黄芪幼苗根系活力的影响

Fig.1 Effects of exogenous SA on root activity of *Astragalus mongolica* seedlings under NaHCO₃ stress

2.4 水杨酸对盐碱胁迫下蒙古黄芪幼苗电导率及丙二醛含量的调节

由图 2 可知,NaHCO₃胁迫使黄芪叶片质膜透性及膜脂过氧化程度增大,较 CK₁分别增加了 1.56 倍、1.18 倍;添加不同浓度外源 SA 处理后,幼苗叶片电导率及 MDA 含量均显著低于 CK₂($P<0.05$),整体变化波动范围分别为 40.21%~56.46%、20.09%~46.39%,且细胞膜脂过氧化程度显著低于 CK₂;NaS₃降低幅度最大,其电导率及 MDA 含量较 CK₂分别降低了 46.41%、54.46%。NaS₁、NaS₂、NaS₄、NaS₅处理电导率及 MDA 含量均显著高于 CK₁($P<0.05$),NaS₃处理 MDA 与 CK₁相比未达到显著水平($P>0.05$)。

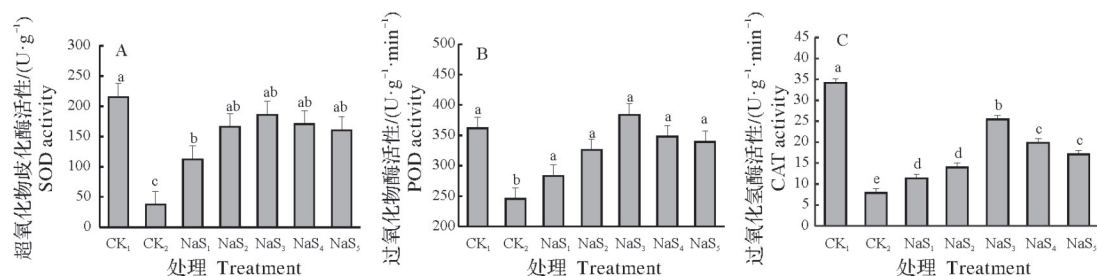
图2 外源SA对 NaHCO_3 胁迫下黄芪幼苗叶片电导率、丙二醛MDA含量的影响Fig.2 Effects of exogenous SA on conductivity and MDA content of *Astragalus mongolica* seedlings under NaHCO_3 stress

2.5 水杨酸对盐碱胁迫下蒙古黄芪幼苗早期抗氧化酶活性的调节

由图3A可知,添加外源SA处理后,幼苗SOD活性随着SA浓度的增加发生了大幅度变化,且均显著高于CK₂ ($P < 0.05$),NaS₃处理SOD活性最高,较CK₂增加了3.96倍;NaS₂、NaS₃、NaS₄、NaS₅处理SOD活性与CK₁相比差异不显著 ($P > 0.05$)。

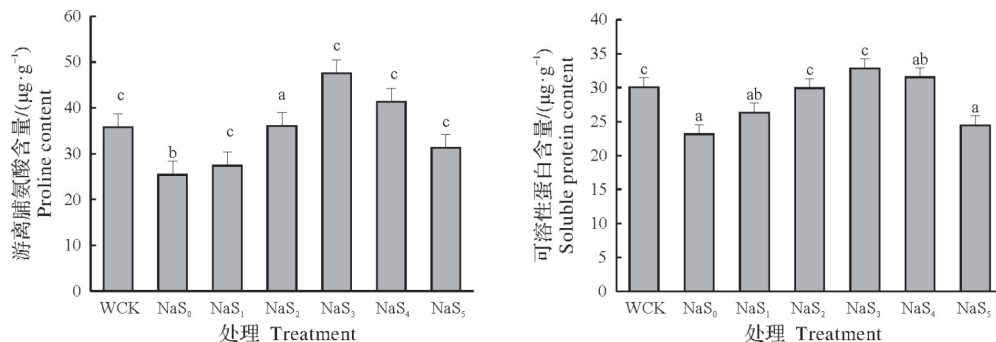
由图3B可知,在 NaHCO_3 (CK₂)胁迫下的黄芪幼苗POD活性显著下降 ($P < 0.05$),较CK₁降低了22.95%,添加不同浓度SA后,随着SA溶液浓度变化幼苗POD活性含量得到显著提高,且各处理组较CK₂分别增加了15.40%、32.69%、56.36%、41.73%、38.16%,但与CK₁相比差异不显著 ($P > 0.05$),说明不同浓度的外源SA溶液可以有效地提高使盐碱胁迫下黄芪幼苗POD活性。

由图3C可知, NaHCO_3 胁迫下,黄芪幼苗CAT活性显著下降,通过不同浓度的外源SA溶液处理后,CAT活性呈先上升后缓慢下降的变化趋势,且各处理均显著高于CK₂ ($P < 0.05$)。NaS₃处理幼苗CAT活性增长最快,且与NaS₁、NaS₂、NaS₄、NaS₅相比差异显著 ($P < 0.05$),较CK₂增加了2.23倍。由此可以看出,不同浓度的外源SA处理可以使得蒙古黄芪幼苗内的CAT活性显著提高,可以对盐碱胁迫幼苗CAT活性起到有效的缓解作用,当外源SA浓度为0.3 mmol/L时,缓解效果最佳。

图3 外源SA对 NaHCO_3 胁迫下黄芪幼苗过氧化物酶SOD、POD、CAT的影响Fig.3 Effects of exogenous SA on SOD, ATC and POD of *Astragalus mongolica* seedlings under NaHCO_3 stress

2.6 水杨酸对盐碱胁迫下蒙古黄芪幼苗早期渗透的调节

由图4可知,与CK₁相比, NaHCO_3 胁迫(CK₂)处理使脯氨酸和可溶性蛋白含量分别显著降低了

图4 外源SA对 NaHCO_3 胁迫下黄芪幼苗渗透调节物质影响Fig.4 Effects of exogenous SA on osmotic adjustment substances of *Astragalus mongolica* seedlings under NaHCO_3 stress

22.95%、28.94%;添加不同浓度外源SA后,各处理幼苗可溶性蛋白积累变化波动较小,而游离脯氨酸含量波动幅度较大。外源SA各处理幼苗脯氨酸和可溶性蛋白含量均显著高于CK₂处理($P<0.05$),且NaS₃处理可溶性蛋白、游离脯氨酸含量较CK₂分别降低了25.56%、42.43%,即缓解效果最佳。NaS₂、NaS₃处理幼苗可溶性蛋白含量与CK₁差异显著($P<0.05$),NaS₁、NaS₃、NaS₄、NaS₅与CK₁差异不显著($P>0.05$)。

3 讨 论

3.1 水杨酸对NaHCO₃胁迫下蒙古黄芪幼苗早期生长的调节效应

重碳酸性盐是限制植物正常生长的物质之一,直接影响种子萌发和植株的生长发育,会导致植物体生长速率减缓,发育速度加快,以及植株失水或黄化,盐碱浓度过高时甚至引起植物萎蔫甚至死亡^[34]。本研究用100 mmol/L NaHCO₃模拟盐碱胁迫处理后,蒙古黄芪种子的发芽率、发芽势、发芽指数与活力指数均受到抑制,添加不同浓度外源SA后蒙古黄芪种子各项萌发指标得到显著提高,这与梁小燕等^[35]关于外源水杨酸对盐胁迫下大黄种子萌发及幼苗生长研究结果一致。根系调控着植物吸收土壤水分、营养物质的能力,植物生长过程中根系是与土壤直接接触的部位,土壤中盐碱胁迫会导致离子失衡,使得黄芪根系呼吸作用受阻,使根长、根系活力、单株鲜重、株高均显著下降,进而影响作物对于水分和矿质的吸收^[36];而添加SA溶液后,可有效缓解NaHCO₃对于根苗生长的抑制,改善幼苗的根系活力,增强黄芪幼苗对盐碱胁迫的适应性,其中以0.3 mmol/L外源SA溶液效果最佳。由此可以得出,适宜的浓度的外源SA可以有效的调节盐碱胁迫对黄芪种子萌发、幼苗生长及根系吸收养分抑制作用。

3.2 水杨酸对NaHCO₃胁迫下蒙古黄芪幼苗早期生理特性的调节效应

细胞膜透性是植物抗逆性的生理指标之一,膜透性对于植物维持细胞的微环境和正常的代谢起着重要的作用,与植物抗盐能力息息相关。植物在盐碱胁迫下会促进细胞代谢产生过量的活性氧^[37],活性氧通过破坏细胞的大分子结构,增大质膜通透性,破坏细胞膜系统加剧膜脂过氧化的程度,膜脂过氧化产物丙二醛MDA的含量也会增加,而植物细胞内抗氧化酶对活性氧具有很好的清除能力,可以使得植物体内活性氧的产生和清除达到平衡^[38],其主要有超氧歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等,SOD是第一道防线,能清除细胞中超量的超氧阴离子,将其歧化为H₂O₂和O²⁻,在POD和CAT的催化作用下,转化成无毒的H₂O和O₂^[39]。本试验研究中,100 mmol/L NaHCO₃对黄芪幼苗处理后,叶片质膜透性及膜脂过氧化程度增大,MDA含量显著升高,抗氧化酶SOD、POD、CTA活性显著下降,说明高浓度重碳酸性盐对黄芪幼苗内细胞膜的损害极大,抗氧化酶系统也受到了一定程度影响。添加不同浓度外源SA处理后,黄芪幼苗抗氧化酶活性显著提高,质膜透性减小及膜脂过氧化损伤也显著减轻,在外源SA浓度为0.3 mmol/L时,其电导率及MDA含量分别较CK₂降低了46.41%、54.46%,抗氧化酶SOD、POD、CAT较CK₂显著增加了3.96倍、1.56倍、2.23倍,即缓解效果最佳。因此,外源水SA可以有效的缓解黄芪幼苗早期受到的碱害,降低叶片质膜透性和缓解膜脂过氧化程度,提高抗氧化酶活性而增强黄芪幼苗早期耐盐性,这与相关学者对甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch)^[18]、黄瓜(*Cucumis sativus* L.)^[40]盐碱胁迫的研究结果一致。

植物的渗透调节物质在盐碱胁迫的适应中起着重要作用,其可溶性蛋白、游离脯氨酸等一些代谢产物均发挥了重要作用。植物通过积累这些渗透保护物质来响应渗透胁迫,这些物质存在于细胞质中,在渗透胁迫下可以维持细胞膨胀^[41]。本研究中,NaHCO₃胁迫下蒙古黄芪幼苗可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量均有不同程度降低,添加外源SA后可溶性蛋白、脯氨酸含量呈先降低后升高的趋势,这与相关学者在棉花(*Gossypium herbaceum* L.)^[42]、沙打旺水(*Astragalus adsurgens*)^[43]等作物上的研究结果一致。而可溶性蛋白有较强的持水力,植物在逆境下增加可溶性蛋白含量可以提高渗透调节能力,降低因渗透胁迫造成的伤害^[44];脯氨酸作为渗透保护剂,有利于维持细胞膜的稳定、清除活性氧,并且作为信号分子激发植物抗胁迫能力^[36]。外源SA促进了NaHCO₃胁迫下蒙古黄芪幼苗脯氨酸、可溶性糖含量的积累,缓解细胞渗透压,有效促进幼苗根系对水分、营养物的吸收利用,当外源SA浓度为0.3 mmol/L时,幼苗脯氨酸、可溶性糖含量的积累量达到最大,且与各处理差异显著,故外源SA处理可通过增加黄芪幼苗可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量来适应盐碱胁迫。

4 结 论

NaHCO_3 胁迫显著抑制了黄芪种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,降低了SOD、POD和CAT活性,以及可溶性蛋白、游离脯氨酸含量的积累,并显著增加了黄芪幼苗叶片质膜透性及MDA含量。添加不同浓度外源SA处理可显著提高黄芪种子发芽指标,有利于幼苗生长,提高抗氧化酶活性以及渗透调节能力、细胞稳定性,进一步降低了膜脂过氧损伤及叶片质膜透性,提高了黄芪幼苗的抗盐碱能力,以0.3 mmol/L外源SA调节效果最佳。外源水杨酸在耐盐碱性方面的作用以及作用机理还有待更进一步研究,研究结果为提高盐碱地黄芪种植安全、盐碱地生产优质高产的黄芪种苗提供相应的理论支持。

参考文献 References:

- [1] ZHANG J H, BAI Z G, JIE H, et al. Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance[J]. Soil and tillage research, 2019, 195: 104372-104372.
- [2] SHRIVASTAVA P, KUMAR R. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation[J]. Saudi journal of biological sciences, 2015, 22(2): 123-131.
- [3] 李彬, 王志春, 孙志高, 等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 154-158.
LI B, WANG Z C, SUN Z G, et al. Research on saline land resources and sustainable use in China[J]. Agricultural research in the arid areas, 2005, 23(2): 154-158.
- [4] 周杰, 王志春, 杨帆. 盐碱土壤植物修复机制研究进展[J/OL]. 生态学杂志, 2023: 1-11 [2023-9-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230508.1525.002.html>.
ZHOU J, WANG Z C, YANG F. Research progress about phytoremediation mechanisms in saline-alkali soils[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 2023: 1-11 [2023-9-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230508.1525.002.html>.
- [5] WANG X P, JIANG P, MA Y, et al. Physiological strategies of sunflower exposed to salt or alkali stresses: restriction of ion transport in the cotyledon node zone and solute accumulation[J]. Agronomy journal, 2015, 107(6): 2181-2192.
- [6] 李子英, 丛日春, 杨庆山, 等. 盐碱胁迫对柳树幼苗生长和渗透调节物质含量的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8511-8517.
LI Z Y, CONG R C, YANG Q S, et al. Effects of saline-alkali stress on growth and osmotic adjustment substances in willow seedlings[J]. Acta ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8511-8517.
- [7] FENG N J, YU M L, LI Y, JIN D, ZHENG D F. Prohexadione calcium alleviates saline-alkali stress in soybean seedlings by improving the photosynthesis and up-regulating antioxidant defense[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2021, 220: 112369.
- [8] 张会慧, 龙静泓, 王均睿, 等. 不同种类盐胁迫对高粱幼苗生长及叶片光合机构功能的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 161-172.
ZHANG H H, LONG J H, WANG J R, et al. Effects of different salt stress conditions on growth of *Sorghum* seedlings and function of leaf photosynthetic apparatus[J]. Chinese journal of ecology, 2019, 38(1): 161-172.
- [9] NAKASHIMA K, ITO Y, YAMAGUCHI-SHINOZAKI K. Transcriptional regulatory networks in response to abiotic stresses in *Arabidopsis* and grasses[J]. Plant physiology, 2009, 149(1): 88-95.
- [10] YANG C, CHONG J, LI C, et al. Osmotic adjustment and ion balance traits of an alkali resistant halophyte *Kochia sieversiana* during adaptation to salt and alkali conditions[J]. Plant & soil, 2007, 294(1/2): 263-276.
- [11] 邓平, 赵英, 王霞, 等. 水杨酸对 NaHCO_3 胁迫下桂西北喀斯特地区青冈栎种子萌发的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 114-122.
DENG P, ZHAO Y, WANG X, et al. Effects of salicylic acid on germination of *Cyclobalanopsis glauca* seeds under NaHCO_3 stress in Karst area of northwest Guangxi[J]. Journal of Nanjing forestry university (natural science edition), 2019, 45(4): 114-122.
- [12] DEHGHAN-HARATI Z, MAHDAVI B, HASHEMI S E. Ion contents, physiological characteristics and growth of *Carum copiticum* as influenced by salinity and alkalinity stresses[J]. Biologia futura, 2022, 73(3): 301-308.
- [13] PENG D L, WANG W J, LIU A R, et al. Comparative transcriptome combined with transgenic analysis reveal the involvement of salicylic acid pathway in the response of *Nicotiana tabacum* to triclosan stress[J]. Chemosphere volume, 2021, : 270: 129456.
- [14] 郝统. 新型改良剂对碱胁迫下大豆萌发和根系影响的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
HAO T. Study on effects of new improves on germination and root system of soybean under alkali stress[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019.

- [15] 范丽霞. 外源水杨酸对干旱胁迫下结缕草生长及生理影响[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013: 5-6.
FAN L X. Effects of exogenous salicylic acid on growth and physiology of *Zoysia* grass under drought stress[D]. Shenyang: Liaoning University, 2013: 5-6.
- [16] 李秀华. 外源物质水杨酸(SA)对盐胁迫下水飞蓟种子萌发与幼苗生理特性的影响[J]. 种子, 2020, 39(12): 113-115.
LI X H. Effects of exogenous substances salicylic acid(SA) on seed germination and seedling physiological characteristics of milk thistle under salt stress[J]. Seeds, 2019, 39(12): 113-115.
- [17] 汤菊香, 赵元增, 单长卷. 水杨酸对盐胁迫下新单29玉米幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(6): 93-95.
TANG J X, ZHAO Y Z, SHAN C J. Effects of salicylic acid on physiological characteristics of Xindan 29 maize seedlings under salt stress[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2015, 43(6): 93-95.
- [18] 李润枝, 靳晴, 李召虎, 等. 水杨酸提高甘草种子萌发和幼苗生长对盐胁迫耐性的效应[J]. 作物学报, 2020, 46(11): 1810-1816.
LI R Z, JIN Q, LI Z H, et al. Effects of salicylic acid on seed germination and seedling growth tolerance of *Glycyrrhiza uralensis* under salt stress[J]. Acta cropologica Sinica, 2019, 46(11): 1810-1816.
- [19] CHEN H N, TAO L Y, SHI J M, et al. Exogenous salicylic acid signal reveals an osmotic regulatory role in priming the seed germination of *Leymus chinensis* under salt-alkali stress[J]. Environmental and experimental botany, 2021, 188(4): 10449.
- [20] 包颖, 魏琳燕, 陈超. 水杨酸和茉莉酸甲酯对盐胁迫下月季品种月月粉生理特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2020, 35(6): 1040-1045.
BAO Y, WEI L Y, CHEN C. Effects of salicylic acid and methyl jasmonate on physiological characteristics of monthly powder of rose cultivars under salt stress[J]. Journal of Yunnan agricultural university (natural science edition), 2019, 35(6): 1040-1045.
- [21] DEHNAVI A R, ZAHEDI M, LUDWICZAK A, et al. Foliar application of salicylic acid improves salt tolerance of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench][J]. Plants, 2022, 11(3): 368.
- [22] 王立红, 张巨松, 李星星, 等. 外源水杨酸对盐胁迫下棉花幼苗光合作用的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(9): 1864-1871.
WANG L H, ZHANG J S, LI X X, et al. Effects of exogenous salicylic acid on photosynthesis of cotton seedlings under salt stress[J]. Chinese journal of nuclear agriculture, 2016, 30(9): 1864-1871.
- [23] 高明远, 甘红豪, 李清河, 等. 外源水杨酸对盐胁迫下白榆生理特性的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31(6): 138-143.
GAO M Y, GAN H H, LI Q H, et al. Effects of exogenous salicylic acid on physiological characteristics of white elm under salt stress[J]. Research in forestry sciences, 2018, 31(6): 138-143.
- [24] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 315-318.
National pharmacopoeia commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (part I)[S]. Beijing: China Press of Traditional Chinese Medicine, 2020: 315-318.
- [25] 贾鑫, 王晓琴. 盐旱交叉胁迫对蒙古黄芪幼苗生长发育及总黄酮成分积累的影响[J]. 中药材, 2019, 42(6): 1215-1221.
JIA X, WANG X Q. Effects of cross-salt and drought stress on the growth and development of *Astragalus mongolicus* seedlings and the accumulation of total flavonoids[J]. Chinese medicine, 2019, 42(6): 1215-1221.
- [26] 赵佳琛, 王艺涵, 金艳, 等. 经典名方中黄芪的本草考证[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(10): 337-346.
ZHAO J C, WANG Y H, JIN Y, et al. Herbal textual research on astragali radix in famous classical formulas[J]. Chinese journal of experimental formulae, 2022, 28(10): 337-346.
- [27] 张倩倩, 李光跃, 苏优拉, 等. 干旱胁迫对蒙古黄芪和膜荚黄芪不同器官黄酮类成分积累的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(7): 1201-1208.
ZHANG Q Q, LI G Y, SU Y L, et al. Accumulation of flavonoids in different organs of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao and *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge seedlings under drought stress[J]. Acta botanica Sinica, 2020, 40(7): 1201-1208.
- [28] 贾鑫, 孙窗舒, 李光跃, 等. 干旱胁迫对蒙古黄芪生长和生理生化指标及其黄芪甲苷积累的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(3): 501-509.
JIA X, SUN S S, LI G Y, et al. Effects of drought stress on growth and physiological characteristics and accumulation of astragaloside IV secondary Mongolia of *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao[J]. Acta botanica Sinica, 2018, 38(3): 501-509.
- [29] 韩多红, 张勇, 晋玲. 碱性盐及混合盐碱胁迫对蒙古黄芪种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 中草药, 2013, 44(12): 1661-1666.
HAN D H, ZHANG Y, JIN L. Effects of basic salt and mixed salt-alkali stress tolerance on seed germination and seedling physiological characteristics of *Astragalus membranaceus* var. *mongolicus*[J]. Chinese traditional and herbal drugs, 2013, 44

- (12):1661-1666.
- [30] 赵锐明,郭凤霞,安黎哲,等.蒙古黄芪幼苗对盐胁迫的生长和生理响应[J].西北林学院学报,2016,31(3):23-29.
ZHAO R M, GUO F X, AN L Z, et al. Growth and physiological response of *Astragalus Mongolicus* seedlings to salt stress[J]. Journal of northwest forestry university, 2016, 31(3):23-29.
- [31] 朱秀云,梁梦,马玉.根系活力的测定(TTC法)实验综述报告[J].广东化工,2020,47(6):211-212.
ZHU X Y, LIANG M, MA Y. Experimental review report of root activity determination (TTC method)[J]. Guangdong chemical industry, 2020, 47(6):211-212.
- [32] 王志恒,杨秀柳,邹芳,等.旱盐交叉胁迫对甜高粱种子萌发和生理特性的影响[J].中国农业科技导报,2021,23(2):37-49.
WANG Z H, YANG X L, ZOU F, et al. Effects of drought and salt cross stress on germination and physiological characteristics of sweet sorghum seeds[J]. Chinese journal of agricultural science and technology, 2019, 23(2):37-49.
- [33] 陈刚,李胜.植物生理实验[M].北京:高等教育出版社,2014.
CHEN G, LI S. Plant physiology experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [34] 李俊伟.燕麦对盐胁迫和碱胁迫的响应机制[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
LI J W. The Mechanism of oat response to salt stress and alkali stress[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. 2022.
- [35] 梁小燕,李依民,高静,等.外源水杨酸对盐胁迫下大黄种子萌发及幼苗生长的影响[J].西北植物学报,2022,42(11):1919-1926.
LIANG X Y, LI Y M, GAO J, et al. Effect of exogenous salicylic acid on germination and seedling growth of rhubarb under salt stress[J]. Acta botanica sinica of northwest China, 2022, 42(11):1919-1926.
- [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] 刘建新,王鑫,李博萍.外源一氧化氮供体SNP对NaCl胁迫下黑麦草幼苗叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响[J].草业学报,2010,19(2):82-88.
LIU J X, WANG X, LI B P. Effects of exogenous nitric oxide donor SNP on ascorbate-glutathione cycle in leaves of ryegrass seedlings under NaCl stress[J]. Journal of pratacultural science, 2010, 19(2):82-88.
- [38] 郑森,郭毅,王丽敏.干旱胁迫对红宝石海棠根系形态及生理特性的影响[J].中国农业科技导报,2020,22(3):26-28.
ZHENG M, GUO Y, WANG L M. Effects of drought stress on root morphology and physiological characteristics of *Malus rubies*[J]. Chinese journal of agricultural science and technology, 2019, 22(3):26-28.
- [39] 邵长安,闫志坚,白健慧.外源水杨酸对盐碱胁迫下燕麦抗氧化酶活性的影响[J].北方农业学报,2019,47(1):13-17.
SHAO C A, YAN Z J, BAI J H. Effects of exogenous salicylic acid on antioxidant enzyme activities of *Avena sativa* L. under salt-alkali stress[J]. Journal of northern agriculture, 2019, 47(1):2-15.
- [40] 王晓宁,魏永义,周伟,等.水杨酸对盐胁迫下黄瓜种子萌发和幼苗根系生长的影响[J].分子植物育种,2022,20(2):524-528.
WANG X N, WEI Y Y, ZHOU W, et al. Effects of salicylic acid on seed germination and seedling root growth of cucumber under salt stress[J]. Molecular plant breeding, 2022, 20(2):524-528.
- [41] 于捷,艾楷棋,何雅倩,等.红光与远红光比值对盐胁迫下番茄幼苗抗氧化能力的影响[J].西北植物学报,2018,38(8):1487-1497.
YU J, AI K Q, HE Y Q, et al. Effect of ratio of red light to far red light on antioxidant capacity of tomato seedlings under salt stress[J]. Acta botanica sinica of northwest China, 2018, 38(8):1487-1497.
- [42] 徐雪雯,王兴鹏,王洪博,等.水杨酸对盐胁迫下棉苗生长及生理的调控作用[J].作物杂志,2023(3):188-194.
XUX W, WANFG X P, WANG H B, et al. Effects of salicylic acid on growth and physiology of cotton seedlings under salt stress[J]. Crop journal, 2023(3):188-194.
- [43] 王宝增,张一名,张江丽,等.水杨酸对盐胁迫下沙打旺幼苗生长的影响[J].草业学报,2016,25(8):74-80.
WANG B Z, ZHANG Y M, ZHANG J L, et al. Effects of salicylic acid on seedling growth of *Adenophorus adsurgens* under salt stress[J]. Acta pratacultural Sinica, 2016, 25(8):74-80.
- [44] DU C X, LI J, GUO S R, et al. Effects of exogenous spermdine on the growth and soluble protein expression in cucumber seedlings under NaCl stress[J]. Acta botanica boreali-occidentalia Sinica, 2007, 27(6):1179-1184.