

盐胁迫对藜蒿扦插枝萌蘖生长及其 生理生化特性的影响

薛天源, 张千千, 王宇航, 何思晓, 董元火, 戴希刚, 曾长立*

(江汉大学 生命科学学院; 湖北省汉江流域特色生物资源保护开发与利用工程技术研究中心,
湖北 武汉 430056)

摘要:以武汉市汉南湘口基地采集的野生种藜蒿和栽培种藜蒿为试验材料,设置NaCl溶液为0、20、40 mmol/L 3个浓度梯度,以无盐胁迫处理的Hoagland营养液作为对照,筛选出藜蒿扦插枝半致死浓度,研究盐胁迫对藜蒿扦插枝萌蘖生长指标和生理指标的影响。结果表明:与对照相比,盐胁迫显著降低栽培种和野生种藜蒿扦插枝的存活率,野生种藜蒿扦插枝的盐胁迫半致死浓度为53.40 mmol/L,栽培种藜蒿扦插枝的盐胁迫半致死浓度为50.99 mmol/L。在盐胁迫处理下,野生种藜蒿扦插枝的株高、根长和侧根数受抑制不显著,并呈现出先升后降的趋势,栽培种扦插枝株高、叶片数、根长和侧根数被显著抑制;野生种藜蒿扦插枝在盐胁迫影响下,CAT、POD、APX、SOD活性均显著提高,MDA与脯氨酸含量呈现先降后升的趋势;而栽培种藜蒿扦插枝随着盐浓度的上升,CAT、POD、APX、SOD的活性显著增强,MDA和脯氨酸含量也显著提高;野生种藜蒿扦插枝抗氧化酶(CAT、POD、SOD)活性均低于栽培种。由此可以推测栽培种藜蒿扦插枝应对盐胁迫伤害更大,野生种藜蒿扦插枝耐盐性更强。

关键词:藜蒿;盐胁迫;扦插枝;生理指标;NaCl溶液

中图分类号:S567.239 文献标志码:A 文章编号:1673-0143(2024)03-0025-07

DOI:10.16389/j.cnki.cn42-1737/n.2024.03.003

Effect of Salt Stress on Growth, Physiological and Biochemical Properties of Sprouting Cuttings of *Artemisia selengensis*

XUE Tianyuan, ZHANG Qianqian, WANG Yuhang, HE Sixiao,
DONG Yuanhuo, DAI Xigang, ZENG Changli*

(School of Life Sciences; Hubei Engineering Research Center for Protection and Utilization of Special Biological
Resources in the Hanjiang River Basin, Jiangnan University, Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract: The wild and cultivated species of *Artemisia selengensis* collected from the Xiangkou base in Hannan, Wuhan, China, were subjected to three concentration gradients of 0,

收稿日期:2023-02-20

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2022BBA0064);武汉市产学研项目(CXY202203);江汉大学一流学科建设重大专项资助计划项目(2023XKZ026)

作者简介:薛天源(1999—),男,硕士生,研究方向:特色植物资源开发与利用。

*通信作者:曾长立(1970—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向:植物逆境生理;珍稀濒危植物保护与利用。E-mail:zengchangli@jhun.edu.cn

20, and 40 mmol/L NaCl solution, with the Hoagland nutrient solution without salt stress as the control. The half-lethal concentration of *Artemisia selengensis* cuttings was screened out, and the effect of salt stress on growth and physiological indicators of *Artemisia selengensis* cuttings was studied. The results showed that salt stress significantly reduced the survival rate of cultivated and wild species *Artemisia selengensis* cuttings compared to the control, with a half-lethal concentration of 53.40 mmol/L for wild species *Artemisia selengensis* cuttings and 50.99 mmol/L for cultivated species *Artemisia selengensis* cuttings. Under NaCl stress, the plant height, root length, and lateral root number of wild species *Artemisia selengensis* cuttings were not significantly inhibited and showed a trend of first increasing and then decreasing; the plant height, leaf number, root length, and lateral root number of cultivated species cuttings were significantly inhibited; the CAT, POD, APX, and SOD activities of the wild species *Artemisia selengensis* cuttings significantly increased under the influence of salt stress, and the MDA and proline contents showed a trend of first decreasing and then increasing; the activities of CAT, POD, APX, and SOD were significantly increased, and the contents of MDA and proline were significantly increased in the cuttings of cultivated *Artemisia selengensis* with the increase in salt concentration. In contrast, the activities of antioxidant enzymes (CAT, POD, and SOD) in the cuttings of wild species *Artemisia selengensis* were lower than those of cultivated species *Artemisia selengensis*. It can be assumed that the cultivated species of *Artemisia selengensis* are more vulnerable to salt stress and that the wild species of *Artemisia selengensis* cuttings are more salt tolerant.

Key words: *Artemisia selengensis*; salt stress; sprouting cuttings; physiological index; NaCl solution

藜蒿(*Artemisia selengensis* Turcz.)是菊科蒿属植物,学名为狭叶艾,又名青艾、萎蒿、水蒿、芦蒿等。我国藜蒿主要生长地区在鄱阳湖一带,属于我国南方的特色蔬菜^[1]。藜蒿功能多样,其嫩茎清香,食之有开胃理气、神清气爽的功效,也有清热、利湿、杀虫的药用功能。研究发现,藜蒿的主要化学成分有多酚类化合物、黄酮类化合物、酚酸类化合物、挥发油、多糖、萜类和生物碱^[2],可经加工制成藜蒿醋、藜蒿茶,具有多种功效^[3-4]。随着藜蒿需求量的增大,引发了藜蒿废弃物合理资源利用及生产过程中发病治理等问题^[5-6]。

盐胁迫是自然界中影响植物生长以及产量的重要环境因子^[7]。盐分对植物有渗透性和离子性双重影响,当盐浓度超过其正常水平时,土壤中的水势下降,导致植物根系发生渗透效应^[8-9]。植物对盐的耐受能力由多种生化途径决定,而多种生化途径有利于植物离子平衡的维持^[10-11]。土壤盐碱化对灌溉农业的长期可持续性发展造成严重危害^[12-15],目前与不良灌溉有关的盐碱化和内涝的可能性正在上升。到目前为止,全球土壤资源总量的3%以上受到盐胁迫的影响^[16]。近年来,在藜蒿种植过程中由于施肥过量、设施栽培温度高、灌水不当导致的次生盐渍化问题,使得藜蒿在盐胁迫环境下生长导致产量降低、品质下降。尽管有关农作物盐胁迫的研究报道较多,但关于藜蒿盐胁迫的研究较少。本研究测定了在不同浓度盐胁迫下藜蒿扦插枝的生长指标以及生理指标,以探究野生种藜蒿和栽培种藜蒿在盐胁迫下的生理变化,确定藜蒿扦插枝的盐胁迫半致死浓度,为藜蒿耐盐新品种的选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

试验藜蒿种质资源由湖北省汉江流域特色生物资源保护开发与利用工程技术研究中心提

供,于2022年1月初在武汉汉南湘口基地采集,以野生种藜蒿和栽培种藜蒿(扦插材料应选长势好,无病虫害,生长状况一致且良好的植株)各50株为试验材料。将两种试验材料各50株扦插于基质土中,置于温室大棚中培养45 d。再将藜蒿剪根移栽于塑料碗内,以Hoagland营养液水培,缓苗生长14 d后,减去根并保留两片真叶。

1.2 试验设计

取生长一致且健壮的野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝进行盐胁迫处理。设置0、20、40 mmol/L 3个浓度梯度的NaCl溶液,处理分别为:对照(Hoagland营养液)、Hoagland营养液 + 20 mmol/L NaCl、Hoagland营养液 + 40 mmol/L NaCl,野生种和栽培种藜蒿扦插枝每组处理各3株,设置两次重复,处理30 d。为了保持盐胁迫的环境,每3天换一次相应处理的营养液。选取野生种和栽培种藜蒿扦插枝各10株,初始盐胁迫处理为Hoagland营养液 + 20 mmol/L NaCl,每3天更换一次处理,每次更换NaCl溶液浓度递增5 mmol/L,筛选出藜蒿扦插枝半致死浓度。

1.3 测定方法

1.3.1 生长指标测定 使用直尺测量藜蒿扦插枝的整株株高、根系长度;将藜蒿扦插枝用水冲洗干净后吸干水分,用天平称量鲜重;记录藜蒿扦插枝的叶片数。

1.3.2 半致死浓度筛选 根据试验设计的浓度梯度,筛选出藜蒿扦插枝存活率达到一半时的NaCl浓度。藜蒿扦插枝叶片2/3以上黄化、萎蔫即视为死亡。

1.3.3 生理指标测定 取藜蒿扦插枝的叶片,不同盐浓度每组取2组重复的6株,取平均值。采用磺基水杨酸法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[17];采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性和过氧化物酶(POD)活性^[18];采用愈创木酚法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性^[18];采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[19];采用抗坏血酸法测定脯氨酸含量^[20]。

1.3.4 数据分析 采用Microsoft Excel 2016软件对实验数据进行统计绘图,采用SPSS 24.0软件中的One-way ANOVA对实验数据进行显著性检验分析。

2 结果与分析

2.1 藜蒿扦插枝盐胁迫半致死浓度筛选

不同浓度(20、25、30、35、40、45、50 mmol/L)NaCl处理下的藜蒿扦插枝存活率结果见图1。随着盐胁迫浓度增大,藜蒿扦插枝的存活率越来越低。通过直线回归方程可以得出,野生种藜蒿扦插枝存活率为50%时,NaCl处理浓度达到了53.40 mmol/L;而栽培种藜蒿扦插枝存活率为50%时,NaCl处理浓度为50.99 mmol/L。说明野生种藜蒿扦插枝的盐胁迫半致死浓度为53.40 mmol/L(图1A),而栽培种藜蒿扦插枝的盐胁迫半致死浓度为50.99 mmol/L(图1B)。

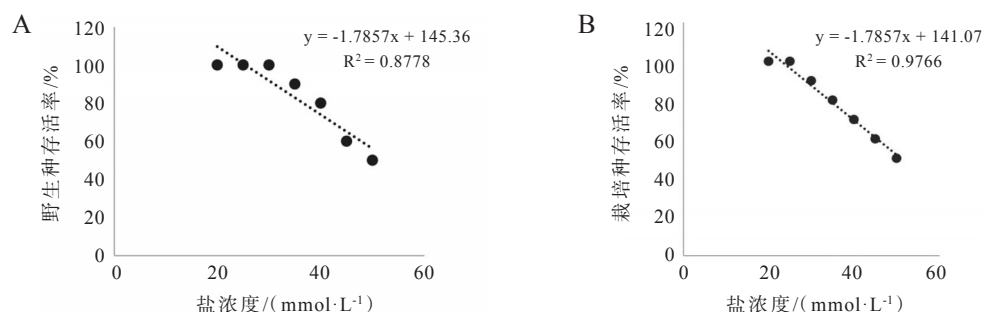


图1 盐胁迫对野生种藜蒿(A)和栽培种藜蒿(B)扦插枝存活率的影响

Fig. 1 Effects of salt stress with different concentrations on the survival rate of wild (A) and cultivated (B) species of *Artemisia selengensis* cuttings

2.2 盐胁迫对藜蒿扦插枝生长指标的影响

不同NaCl处理下野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝的株高、叶片数、根长、侧根数量以及鲜重的结果见表1。在20 mmol/L NaCl处理下,野生种藜蒿扦插枝的株高、根长、侧根数较对照有明显增长,但鲜重增加和叶片数减少也不明显。在40 mmol/L NaCl处理下,野生种藜蒿扦插枝的株高、根长、侧根数以及鲜重均无显著差异,叶片数显著下降。说明野生种藜蒿扦插枝在20 mmol/L NaCl处理下生长没有显著差异,但是随着盐浓度的增加,野生种藜蒿扦插枝在40 mmol/L NaCl处理下的生长受到显著抑制,说明野生种藜蒿具有一定的耐盐性。在20和40 mmol/L NaCl处理下,栽培种藜蒿扦插枝的株高、叶片数、根长、侧根数以及鲜重都有明显差异。说明随着盐胁迫浓度的增长,栽培种藜蒿扦插枝的生长受到抑制。

表1 不同浓度NaCl处理对野生种和栽培种藜蒿扦插枝生长的影响

Tab. 1 Effects of NaCl treatment with different concentrations on the growth of wild and cultivated species of *Artemisia selengensis* cuttings

资源类型	处理浓度/ (mmol·L ⁻¹)	株高/cm	叶片数	根长/cm	侧根数	鲜重/g
野生种	0	13.33 ± 0.46cd	23.67 ± 1.37b	7.63 ± 0.55d	4.67 ± 0.82b	2.38 ± 0.19bc
	20	14.26 ± 0.58b	20.40 ± 3.91b	9.10 ± 0.89c	6.00 ± 1.22a	2.90 ± 0.40b
	40	12.94 ± 0.11de	15.80 ± 3.35c	7.26 ± 0.70d	4.40 ± 1.14b	1.86 ± 0.31cd
栽培种	0	15.25 ± 1.00a	30.67 ± 3.88a	18.55 ± 1.12a	6.33 ± 0.82a	3.90 ± 0.80a
	20	14.13 ± 0.75bc	24.83 ± 5.30b	11.88 ± 1.16b	6.50 ± 1.05a	2.70 ± 0.30b
	40	12.30 ± 0.62e	13.20 ± 1.64c	9.86 ± 0.74c	3.60 ± 0.89b	1.37 ± 0.18d

注:表中数据均为平均值 ± 标准误;同列不同小写字母表示差异显著水平($P < 0.05$)。下表同。

2.3 盐胁迫对藜蒿扦插枝叶片4种酶活性的影响

不同NaCl胁迫处理下野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝的过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)和超氧化物歧化酶(SOD)活性见表2。

表2 不同NaCl处理对野生种和栽培种藜蒿扦插枝4种酶活性的影响

Tab. 2 Effects of NaCl treatment with different concentrations on activities of four enzymes in cuttings of wild and cultivated species of *Artemisia selengensis*

资源类型	处理浓度/ (mmol·L ⁻¹)	SOD/ (U·(g·min) ⁻¹)	POD/ (U·(g·min) ⁻¹)	CAT/ (U·(g·min) ⁻¹)	APX/ (mmol·(g·min) ⁻¹)
野生种	0	138.33 ± 3.56e	7.63 ± 0.43e	18.58 ± 0.81f	1.20 ± 0.08a
	20	146.80 ± 4.15d	9.60 ± 0.37d	25.86 ± 2.58e	1.89 ± 0.12b
	40	151.00 ± 4.00c	9.89 ± 0.90d	39.90 ± 4.07b	2.46 ± 0.33a
栽培种	0	140.67 ± 2.42e	12.72 ± 1.20c	32.27 ± 2.68d	1.36 ± 0.04a
	20	158.17 ± 3.06b	14.70 ± 0.64b	36.35 ± 2.13c	1.64 ± 0.14c
	40	162.40 ± 2.97a	17.52 ± 0.91a	43.92 ± 1.69a	1.90 ± 0.13b

由表2可知,随着盐胁迫浓度升高,野生种藜蒿扦插枝叶片的SOD活性呈现上升趋势,但是差异不显著。栽培种藜蒿扦插枝叶片的SOD活性随着盐胁迫浓度的上升增强,增长趋势与野生种藜蒿扦插枝相比较更为显著。说明盐胁迫对野生种藜蒿扦插枝和栽培种藜蒿扦插枝叶片的SOD活性有影响,栽培种藜蒿扦插枝受到的影响更大。

盐胁迫处理下野生种藜蒿扦插枝叶片的POD活性增强,20与40 mmol/L NaCl处理下POD活性差异不明显。随着盐浓度上升,栽培种藜蒿扦插枝叶片的POD活性显著上升。栽培种藜蒿扦插枝叶片的POD活性均高于野生种藜蒿。说明盐胁迫对野生种藜蒿与栽培种藜蒿扦插枝叶片的

POD活性产生了影响,且浓度越大酶活性越强,对栽培种藜蒿扦插枝叶片的POD活性提高更加明显。

随着NaCl浓度升高,野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝的CAT活性均在增强,并且CAT活性变化显著,栽培种藜蒿扦插枝叶片的CAT活性均高于野生种藜蒿。在NaCl浓度为40 mmol/L时,野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝的CAT的活性达到最大。说明NaCl胁迫影响了野生藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝叶片的CAT活性,浓度越大,活性越高。

随着NaCl浓度增大,野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝叶片的APX活性也在不断增强,且变化显著。在20和40 mmol/L NaCl处理下,野生种藜蒿扦插枝叶片的APX活性均高于栽培种藜蒿。说明NaCl胁迫影响了野生种藜蒿与栽培种藜蒿扦插枝叶片的APX活性,且浓度越大活性越高,野生种藜蒿扦插枝受到的影响大于栽培种藜蒿扦插枝。

2.4 盐胁迫对藜蒿扦插枝叶片丙二醛(MDA)和脯氨酸含量的影响

不同NaCl胁迫处理下野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝的MDA和脯氨酸含量见表3。

表3 不同浓度NaCl处理对野生种和栽培种藜蒿扦插枝丙二醛(MDA)和脯氨酸含量的影响

Tab. 3 Effects of NaCl treatment with different concentrations on the content of malondialdehyde (MDA) and proline in cuttings of wild and cultivated species of *Artemisia selengensis*

资源类型	处理浓度/(mmol·L ⁻¹)	MDA含量/%	脯氨酸含量/%
野生种	0	3.46 ± 0.08b	0.46 ± 0.04c
	20	3.29 ± 0.23b	0.41 ± 0.03c
	40	4.08 ± 0.26a	0.72 ± 0.09a
栽培种	0	2.92 ± 0.20a	0.34 ± 0.06d
	20	3.40 ± 0.35b	0.55 ± 0.04b
	40	3.98 ± 0.22a	0.73 ± 0.04a

由表3可知,随着NaCl浓度升高,野生种藜蒿扦插枝MDA含量呈先下降后上升的趋势,20 mmol/L NaCl胁迫处理与对照相比,MDA含量变化并不明显,在40 mmol/L盐胁迫处理时,MDA含量变化显著。而随着盐胁迫浓度升高,栽培种藜蒿扦插枝的MDA含量上升较快,差异显著。说明在NaCl胁迫下,野生种与栽培种藜蒿扦插枝叶片的MDA含量均受到了影响,并且栽培种藜蒿扦插枝受到的影响大于野生种藜蒿。同时,随着盐浓度上升,野生种藜蒿扦插枝叶片的脯氨酸含量也是先下降后上升,在20 mmol/L NaCl胁迫处理下,脯氨酸含量降低,但在40 mmol/L NaCl胁迫处理下,脯氨酸含量升高。而栽培种藜蒿扦插枝叶片的脯氨酸含量随着盐浓度的升高处于上升趋势,差异明显。说明盐胁迫对野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝叶片的脯氨酸含量均产生了影响,并且栽培种藜蒿扦插枝受到的影响大于野生种藜蒿扦插枝。

3 讨论与结论

本研究中不同浓度的NaCl胁迫对野生种藜蒿和栽培种藜蒿扦插枝的株高、叶片数、根长、根系数、鲜重的影响并不相同。随着盐胁迫浓度的提高,野生种藜蒿扦插枝的生长在20 mmol/L NaCl处理下无显著变化,但在40 mmol/L NaCl处理下受到显著性抑制,而栽培种藜蒿扦插枝在遭受到盐胁迫时只表现出了胁迫伤害表现,生长受到抑制。李晓庆等^[21]研究显示杜梨在盐胁迫环境下,根系的伸长生长受到抑制,侧根的数量减少,这与本研究的结论一致。而对于野生种藜蒿与栽培种藜蒿扦插枝在较低浓度盐胁迫下生长趋势不同这一现象,推测可能是由于野生种藜蒿与栽培种藜蒿扦插枝的耐盐能力不同,对不同浓度的盐胁迫反应也不同。

在高盐胁迫条件下,生物膜系统是最先受到损害的部位之一^[22]。盐胁迫加剧了生物膜膜的过氧化反应,使生物膜受到损伤,膜的透性发生变化。膜脂过氧化反应的重要产物之一是MDA,植物叶片细胞生物膜系统受损的重要表现之一是MDA含量的升高。本研究发现,野生种藜蒿扦插枝叶片的MDA含量在较低浓度的盐胁迫下差异不明显,在较高浓度盐胁迫时呈现上升趋势。而栽培种藜蒿扦插枝叶片的MDA含量随盐胁迫浓度升高呈上升趋势,差异明显。李贵吉等^[23]研究发现,马铃薯在盐胁迫的环境下生长后,子叶膜脂过氧化反应增强,叶片细胞中MDA含量升高,这与本研究的结论一致。CAT、POD、APX、SOD是清除植物体内活性氧的主要酶和保护酶,保护酶会通过清除细胞中多余的自由基和过氧化物来保护植物体^[24]。现有研究^[25]表明,植物在逆境中生长受到伤害时,抗氧化酶与植物细胞内多余的活性氧(ROS)、羟基自由基、过氧化氢(H₂O₂)呈负相关,以此来缓解植物造成的伤害。本研究在20 mmol/L NaCl处理下,野生种藜蒿扦插枝叶片的酶活性增强较为明显,盐胁迫的浓度越高,栽培种藜蒿扦插枝叶片的酶活性越强。植物在盐胁迫环境下生长,导致细胞内的渗透势失衡,而脯氨酸作为植物细胞中的重要有机调节物质,在盐胁迫时会大量合成来维持植物细胞内的渗透势平衡。本研究中,在盐胁迫下,野生藜蒿扦插枝叶片脯氨酸含量呈先下降后上升的趋势;栽培种藜蒿扦插枝叶片脯氨酸含量持续增长。总体来看,在一定浓度范围内,NaCl胁迫的浓度越高,脯氨酸的含量也越高。而野生种藜蒿扦插枝叶片的脯氨酸含量呈现先下降后上升的趋势,说明野生种藜蒿扦插枝与栽培种藜蒿扦插枝的耐盐能力存在一定差异。有研究^[26]表明盐度显著增加了小麦基因型的叶片游离脯氨酸、丙二醛含量以及过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性,这与本研究栽培种藜蒿结果相似。

本试验从栽培种和野生种藜蒿扦插枝对藜蒿生长指标以及生理生化特征进行研究,使用多个指标对其耐盐性评价,形成综合评价体系,使得到的结论更具说服力。使用SPSS 24.0软件对实验数据进行显著性检验分析,明确各项指标分别对野生种和栽培种藜蒿扦插枝影响的差异。可以得出野生种藜蒿扦插枝NaCl胁迫的半致死浓度为53.40 mmol/L;栽培种藜蒿扦插枝NaCl胁迫的半致死浓度为50.99 mmol/L。在盐胁迫处理下,通过野生种和栽培种藜蒿扦插枝的生长生理特征对比,野生种藜蒿扦插枝的株高、根长、侧根数受抑制程度显著低于栽培种藜蒿扦插枝,野生型藜蒿扦插枝抗氧化酶(CAT、POD、SOD)含量低于栽培种藜蒿。由此可以推测栽培种藜蒿应对盐胁迫伤害更大,野生种藜蒿扦插枝耐盐性更强。本研究为后续藜蒿选育耐盐性品种提供理论基础,后期进一步试验可收集全国不同地区优质野生性藜蒿种质,进行盐胁迫试验,筛选出耐盐优质野生种藜蒿。

参考文献(References)

- [1] 李双梅,柯卫东,黄新芳,等. 藜蒿的研究概况[J]. 长江蔬菜,2017,440(18):49-55.
- [2] 黄小芮,何聪芬. 藜蒿主要化学成分及活性研究进展[J]. 中国野生植物资源,2020,39(8):1-6.
- [3] 付自建,张枫源,向福,等. 藜蒿醋饮的配方优化与抗氧化活性评价[J]. 中国酿造,2017,36(12):96-100.
- [4] 曾长立,于真,戴希刚,等. 藜蒿茶浸取液抑菌效果研究[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2019,47(2):175-180.
- [5] 熊芳利. 藜蒿废弃物资源化利用研究初探[D]. 武汉:江汉大学,2018.
- [6] 古松,王建中,杨波,等. 长江流域藜蒿青枯病发生特点及防控技术[J]. 长江蔬菜,2022,543(1):62-63.
- [7] 齐琪,马书荣,徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J]. 分子植物育种,2020,18(8):2741-2746.
- [8] PARIHAR P, SINGH S, SINGH R, et al. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a re-

- view [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22:4056—4075.
- [9] RAHNAMA A, JAMES R A, POUSTINI K, et al. Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil [J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(3):255—263.
- [10] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(3):324—349.
- [11] JAMES R A, BLAKE C, BYRT C S, et al. Major genes for Na⁺ exclusion, Nax1 and Nax2 (wheat HKT1; 4 and HKT1; 5), decrease Na⁺ accumulation in bread wheat leaves under saline and waterlogged conditions [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(8):2939—2947.
- [12] MANASA M R K, KATUKURI N R, NAIR S S D, et al. Role of biochar and organic substrates in enhancing the functional characteristics and microbial community in a saline soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 269:110737.
- [13] DAVOODI K, DARZI—NAFTCHALI A, AGHAJANI—MAZANDARANI G. Evaluating drainmods to predict drainage water salinity and groundwater table depth during winter cropping in heavy-textured paddy soils [J]. *Irrigation and Drainage*, 2019, 68(3):559—572.
- [14] PULIDO—BOSCH A, RIGOL—SANCHEZ J P, VALLEJOS A, et al. Impacts of agricultural irrigation on groundwater salinity [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77:1—14.
- [15] SINGH A. Managing the environmental problems of irrigated agriculture through the appraisal of groundwater recharge [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92:388—393.
- [16] FAO. Management of salt affected soils: soil management under FAO SOILS PORTAL [M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [17] 郝建军,康宗利,于洋. 植物生理学实验技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [18] 李合生,孙群,赵世杰. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [20] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [21] 李晓庆,王星斗,樊艳,等. 盐胁迫对杜梨吸收根生长指标的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(5):62—67.
- [22] CUI F, SUI N, DUAN G, et al. Identification of metabolites and transcripts involved in salt stress and recovery in peanut [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018(9):217—225.
- [23] 李贵吉,杜洋洋. 马铃薯在盐胁迫下的响应研究[J]. *云南农业科技*, 2022(2):9—10.
- [24] MITTLER R, VANDERAUWERA S, GOLLERY M, et al. Reactive oxygen gene network of plants [J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(10):490—498.
- [25] PANDEY P, SRIVASTAVA R K, RAJPOOT R, et al. Water deficit and aluminum interactive effects on generation of reactive oxygen species and responses of antioxidative enzymes in the seedlings of two rice cultivars differing in stress tolerance [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23:1516—1528.
- [26] AL HINAI M S, ULLAH A, AL—RAJHI R S, et al. Proline accumulation, ion homeostasis and antioxidant defence system alleviate salt stress and protect carbon assimilation in bread wheat genotypes of Omani origin [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 193:104687.

(责任编辑:胡燕梅)