DOI:10.11686/cyxb2025387 http://cyxb.magtech.com.cn
金敏，李敏，黑金霞，等. 不同浓度NaCl处理对4种耐盐植物根系形态的影响及耐盐性评价. 草业学报，2026，35(9)：75－86.
JIN Min, LI Min, HEI Jin-xia, *et al*. Effects of different concentrations of NaCl on the root morphology of four salt-tolerant plant species and assessment of their salt tolerance. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(9): 75－86.

# 不同浓度NaCl处理对4种耐盐植物根系形态的影响及耐盐性评价

金敏[1]，李敏[1]，黑金霞[1]，张桂银[1]，张峰举[2]，陈淑娟[3]，毛桂莲[1*]
（1. 宁夏大学生命科学学院，宁夏 银川 750021；2. 宁夏大学生态环境学院，宁夏 银川 750021；3. 石嘴山市农业技术推广服务中心，宁夏 石嘴山 753600）

**摘要**：为了评价不同浓度NaCl处理对4种耐盐植物的耐盐性，为“以种适地”策略的盐碱地改良提供种质资源，本研究设置CK(0)、$T_1$(100 mmol·$L^{-1}$)、$T_2$(200 mmol·$L^{-1}$)、$T_3$(300 mmol·$L^{-1}$)、$T_4$(400 mmol·$L^{-1}$)共5个浓度的NaCl处理，对野榆钱菠菜、盐地碱蓬、盐角草和田菁4种耐盐植物的根系形态、生理特性进行分析研究，并评价其耐盐性。结果表明：1)根系响应：NaCl显著抑制盐地碱蓬、野榆钱菠菜和田菁的根长、根表面积和根体积($P<0.05$)，但促进根直径的扩张及根系活力的提升，表明植物通过增强根系代谢活性和导水组织厚度降低水分运输障碍，从而维持耐盐性。2)氧化应激：盐胁迫下植物体内的膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)和过氧化氢($H_2O_2$)含量整体上升，其中田菁响应最显著($T_2$处理下地上部$H_2O_2$含量较CK提高68%，$T_1$处理地上部MDA含量较CK提高61%)。野榆钱菠菜地上部和地下部的过氧化物酶(POD)活性在$T_1$处理下分别较CK提高36%、8%，而盐地碱蓬地下部过氧化氢酶(CAT)活性在$T_2$处理达到峰值(增幅为12%)，说明3种保护酶[超氧化物歧化酶(SOD)、POD、CAT]需协同清除活性氧以减轻膜损伤。3)离子调控：盐地碱蓬和盐角草在$Na^+$和$Ca^{2+}$吸收中表现最优($T_2$处理下盐地碱蓬地上部的$Na^+$含量增幅为8.3%，$Ca^{2+}$含量增幅为98%)。田菁地上部的$Na^+$显著低于地下部，暗示其通过选择性离子吸收抵御盐胁迫。4)耐盐性评价：主成分分析筛选出SOD活性、$Na^+$、$K^+$含量、POD活性及根系活力作为耐盐性评价的核心指标，隶属函数综合评价结果表明4种植物耐盐性排序为盐角草＞盐地碱蓬＞野榆钱菠菜＝田菁。

**关键词**：盐胁迫；根系结构；抗氧化酶；离子含量

## Effects of different concentrations of NaCl on the root morphology of four salt-tolerant plant species and assessment of their salt tolerance

JIN Min[1], LI Min[1], HEI Jin-xia[1], ZHANG Gui-yin[1], ZHANG Feng-ju[2], CHEN Shu-juan[3], MAO Gui-lian[1*]
1. *College of Life Science, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*; 2. *College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*; 3. *Shizuishan Agricultural Technology Promotion Service Center, Shizuishan* 753600, *China*

**Abstract**: The aim of this work was to evaluate the salt tolerance of four salt-tolerant plant species under different NaCl concentrations, with the goal of identifying germplasm resources for the “matching species to the land” strategy for saline-alkali soil improvement. The four halophytes were *Atriplex aucheri*, *Suaeda salsa*, *Salicornia europaea*, and *Sesbania cannabina*. These plant species were subjected to five NaCl treatments: CK (control), $T_1$ (100 mmol·$L^{-1}$), $T_2$ (200 mmol·$L^{-1}$), $T_3$ (300 mmol·$L^{-1}$), and $T_4$ (400 mmol·$L^{-1}$). Their root morphology and

收稿日期：2025-09-23；改回日期：2025-11-05
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFD1900600)和宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF03036)资助。
作者简介：金敏(2000－)，女，宁夏固原人，在读硕士。E-mail: 3199926479@qq.com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: fransis-0327@163.com

physiological characteristics were analyzed, and their salt tolerance was evaluated. The main results were as follows: 1) In terms of the root response, NaCl had significant negative effects on the root length, root surface area, and root volume of *S. salsa*, *A. aucheri*, and *S. cannabina* ($P<0.05$), but increased root diameter and root activity. This result indicates that these plants maintain salt tolerance by boosting root metabolic activity and thickening water-conducting tissues to reduce hydraulic limitations. 2) In terms of oxidative stress, NaCl stress led to increased contents of membrane lipid peroxidation products, namely malondialdehyde (MDA), and increased hydrogen peroxide ($H_2O_2$) contents. *S. cannabina* exhibited the most pronounced $H_2O_2$ and MDA responses, with the $H_2O_2$ content in root increased by 68% in $T_2$ vs. CK and the shoot MDA content increased by 61% in $T_1$ vs. CK. In *A. aucheri*, the shoot and root peroxidase (POD) activities were increased by 36% and 8%, respectively, in $T_1$ compared with CK. Root catalase (CAT) activity in *S. salsa* peaked at $T_2$ (a 12% increase compared with CK), suggesting that the three protective enzymes [superoxide dismutase (SOD), POD, and CAT] act synergistically to scavenge reactive oxygen species and mitigate membrane damage. 3) In terms of ion homeostasis, *S. salsa* and *S. europaea* demonstrated superior $Na^+$ and $Ca^{2+}$ uptake. In the $T_2$ treatment, the $Na^+$ content in the shoot of *S. salsa* was increased by 8.3%, and the $Ca^{2+}$ content was increased by 98%. In *S. cannabina*, the shoot $Na^+$ content was significantly lower than the root $Na^+$ content compared to CK, implying that it resists salt stress through selective ion uptake. 4) The salt tolerance of the four species was evaluated by principal component analysis and a membership function analysis. The principal component analysis revealed that SOD activity, $Na^+$ and $K^+$ contents, POD activity, and root vitality are core indicators for salt tolerance assessment. The results of the membership function analysis showed that the four species could be ranked from most to least salt tolerant as follows: *S. europaea*>*S. salsa*>*A. aucheri*=*S. cannabina*.

**Key words**: salt stress; root structure; antioxidant enzymes; ion content

土壤盐碱化作为威胁农业生态安全的全球性问题,严重制约着我国干旱和半干旱地区农业的可持续发展[1],我国引黄灌区盐碱化耕地占比超过30%,盐碱荒地面积达5.6万$hm^2$,在灌溉和施肥方式不当等人为因素和自然因素的共同作用下,这一比例还在进一步扩大[2]。因此,基于“以种适地”策略筛选耐盐植物种质,是提升盐碱地生产力和生态稳定性的关键途径。

逆境条件下,根系作为植物吸收养分和代谢的主要器官,最先感知环境的变化[3],其形态可塑性(如根长、根表面积、根直径)是植物适应逆境的重要策略[4]。研究表明,盐胁迫可诱导根系构型重塑、导水组织增厚以维持水分吸收[5],以及根尖离子区隔化减少$Na^+$转运[6]。自然界存在多种类型的耐盐碱植物,如“吃盐植物”碱蓬(*Suaeda glauca*)、盐角草(*Salicornia europaea*)等能直接在土壤含盐量为1.0~5.0 g·$kg^{-1}$、pH≤9的盐碱地种植,并有效降低土壤盐分,将盐碱地改良为正常土壤。野榆钱菠菜(*Atriplex aucheri*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、盐角草和田菁(*Sesbania cannabina*)等均为耐盐性较强的优质饲草植物,研究发现,盐地碱蓬能够在3%的盐度下存活并完成生命周期[7];野榆钱菠菜在含盐量为200 mmol·$L^{-1}$ NaCl的盐碱地上能正常生长[8];盐角草在200~400 mmol·$L^{-1}$ NaCl处理下,生长状态最佳[9];田菁在0.8%的土壤盐分下生长基本不受影响[10]。

目前,有关植物耐盐性的鉴定多集中于单一物种的耐盐性分析,而不同植物可能通过不同形态适应盐胁迫(如肉质化、泌盐结构等),难以统一比较[11]。相比之下,生理指标能够更直接地反映植物在盐胁迫下的适应机制,因而具有更高的可靠性和可比性。因此,本研究通过室内盆栽试验系统比较4种植物野榆钱菠菜、盐地碱蓬、盐角草和田菁苗期的根系生长,通过生理指标在统一的盐胁迫下对4种植物耐盐性进行评价,旨在为盐碱地适生植物选育提供理论依据,同时也为盐碱地的改良利用提供重要的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试植物为盐地碱蓬、盐角草、野榆钱菠菜和田菁,其中田菁来自市售,其他3种植物种子均由中国科学院新

疆生态与地理研究所提供，试验于宁夏大学文萃校区智能温室进行。

### 1.2　材料培养及处理

于2024年9－10月进行室内盆栽试验，将基质和沙土1∶1混合装入花盆中，每盆装5 kg。挑选饱满的种子用1%赤霉素处理30 min后再用0.1%高锰酸钾消毒30 min，用蒸馏水冲洗2～3次，至溶液澄清无色后，将种子均匀地置于铺有2层湿润滤纸的培养皿中，待种子萌发露白后播于盆中，每盆10粒，正常管理。待种子出苗2周后，保留长势一致的幼苗，每盆建植5株。1个月后开始盐胁迫处理。试验共设置5个NaCl溶液浓度，分别为CK、$T_1$（100 mmol·$L^{-1}$）、$T_2$（200 mmol·$L^{-1}$）、$T_3$（300 mmol·$L^{-1}$）和$T_4$（400 mmol·$L^{-1}$），每个处理重复3次，胁迫处理7 d后取样。

### 1.3　指标测定

**1.3.1　根系构型和根系活力的测定**　用台式扫描仪（Epson Expression 1200XL，中国上海）对植物根系进行扫描并保存图像，用WinRHIZO根系分析系统软件分析总根长、平均直径、总根表面积和总根体积等根系构型参数；采用氯化三苯基四氮唑（2，3，5-triphenyltetrazolium chloride，TTC）还原法[12]测定植物的根系活力，重复3次。

**1.3.2　生理指标的测定**　1）丙二醛（malondialdehyde，MDA）含量采用硫代巴比妥酸法[13]测定；过氧化氢（hydrogen peroxide，$H_2O_2$）含量使用Solarbio过氧化氢含量检测试剂盒（可见分光光度法）进行测定。2）抗氧化酶活性参照代红军等[14]的方法，称取0.5 g样品预冻1 h后放入预冷的研钵中，分次加入5 mL冰冷的50 mmol·$L^{-1}$ pH 7.0的磷酸缓冲液［内含1%聚乙烯吡咯烷酮（polyvinyl pyrrolidone，PVP）］，在冰浴中充分匀浆，匀浆液于低温离心机4000 r·$min^{-1}$离心20 min，留上清液待测。超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化物酶（peroxidase，POD）和过氧化氢酶（catalase，CAT）的测定均参照高俊凤[15]的方法进行。其中SOD活性采用硝基四氮唑蓝（nitroblue tetrazolium，NBT）光化还原法测定，POD活性采用愈创木酚法测定，CAT活性采用紫外吸收法测定，重复3次。

**1.3.3　离子含量的测定**　植物材料取样后烘干，将其研磨粉碎后过0.2 mm筛，称取50 mg干样，加入10 mL去离子水，在沸水条件下浸提1 h，用滤纸过滤，滤液即为待测溶液。采用原子吸收光谱仪（ICE3500，美国Thermo Fisher）测定样品中的$Na^+$、$K^+$、$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$含量，每个处理设置3次重复。

### 1.4　耐盐性综合评价

对评价植物耐盐性的生理指标进行相关性和主成分分析，基于特征值＞1的标准提取主成分，作为4种植物的耐盐性评价关键指标。通过隶属函数法[16]计算4种植物在盐胁迫下的综合隶属函数值，以评价其耐盐碱性。植物耐盐碱性得分最终用隶属函数计算，公式如下：

$$X_{ij}=(X_{ij}-X_{j\min})/(X_{j\max}-X_{j\min})$$

式中：$X_{ij}$表示$i$植物$j$指标的隶属函数值；$X_{j\max}$和$X_{j\min}$则表示$i$耐盐植物在$j$指标中相对应的最大值和最小值。

### 1.5　数据处理

利用Excel 2016软件对各指标数据进行整理计算，使用SPSS 25.0软件进行单因素方差、相关性和主成分分析，采用Origin 2022进行绘图。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同浓度NaCl处理对耐盐植物根系形态的影响

**2.1.1　根系活力**　在不同浓度NaCl处理下，4种植物的根系活力均不同程度的高于CK（图1），且随着盐浓度的升高逐渐增大，在$T_4$处理下达到最大值，野榆钱菠菜、盐地碱蓬、盐角草和田菁分别与CK相比提高了29%、18%、99%和124%，说明NaCl处理提升了4种耐盐植物的根系活力，增强了其根系吸收水分和养分的能力。不同植物的根系活力大小为野榆钱菠菜＞盐地碱蓬＞盐角草＞田菁。

**2.1.2** 根系构型　4种植物的根系生长均受到盐处理的显著影响(图2)。随着盐浓度增加,盐角草的根长、根表面积和根直径较CK有所增加,其中根直径在$T_1$处理下增加35%;但盐角草和野榆钱菠菜的根长、根表面积和根体积较CK均有所减小,当盐浓度达到300 mmol·$L^{-1}$时较其他处理稍有增加,其中野榆钱菠菜的根体积在$T_3$处理下较CK增加了8.08%。根直径在NaCl处理下呈现不同的变化趋势,除田菁外,其他3种作物的根直径较对照均不同程度的增加,其中盐地碱蓬增幅最为明显,在$T_4$处理下达到最大值,增幅为35.83%;盐角草在$T_1$处理达到最大值,增幅为35.17%;野榆钱菠菜各处理间无显著差异。总体来讲,4种植物中野榆钱菠菜根系最为发达,田菁和盐地碱蓬次之,盐角草的根系构型在逆境条件下最为稳定。

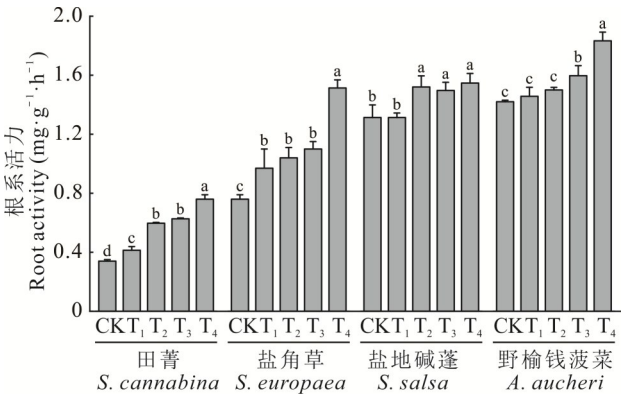



**图1　不同浓度NaCl处理对4种植物根系活力的影响**

**Fig. 1　Effects of different concentrations of NaCl treatment on the root activity of the four plants**

$T_1$～$T_4$分别代表100、200、300和400 mmol·$L^{-1}$ NaCl处理,不同小写字母表示不同NaCl处理间差异显著($P<0.05$),下同。$T_1$－$T_4$ represent treatments with 100, 200, 300, and 400 mmol·$L^{-1}$ NaCl, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different NaCl treatments ($P<0.05$), the same below.

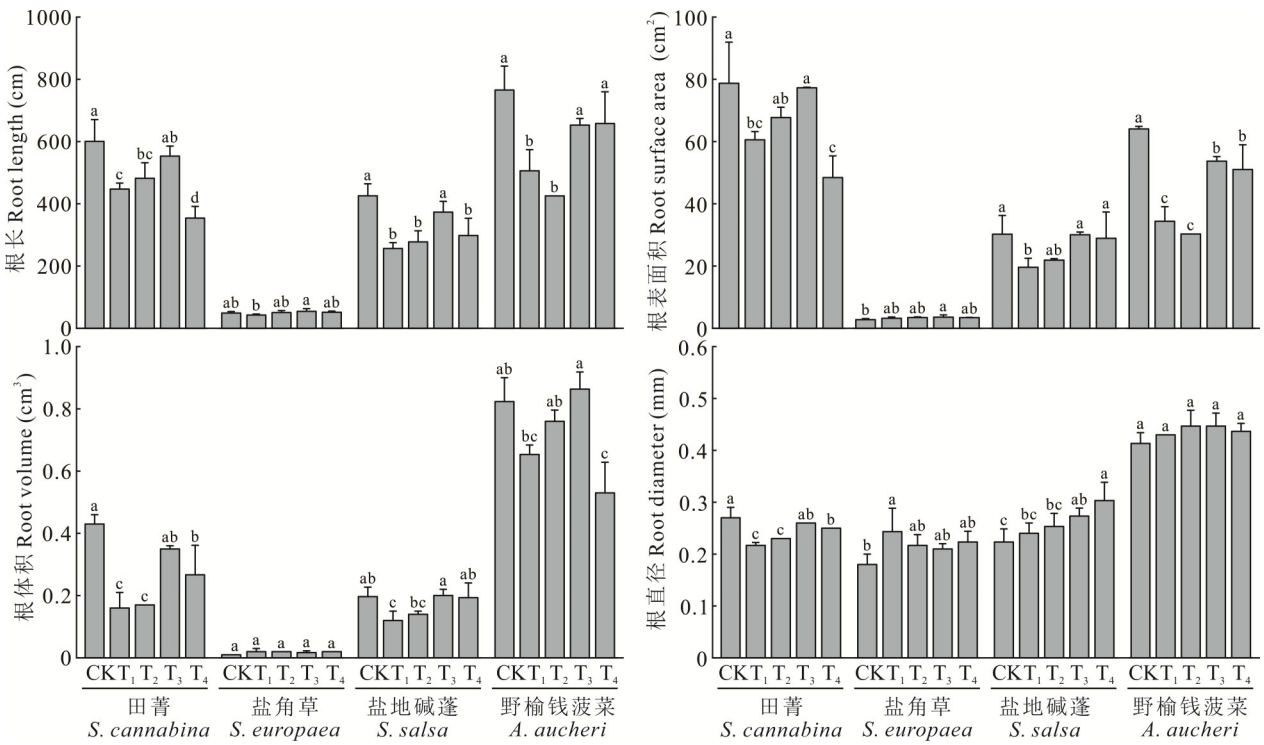



**图2　不同浓度NaCl处理对4种植物根系构型的影响**

**Fig. 2　Effects of different concentrations of NaCl treatment on the root system architecture of the four plants**

**2.2**　不同浓度NaCl处理对耐盐植物生理指标的影响

**2.2.1**　盐胁迫对MDA和$H_2O_2$含量的影响　4种植物的地上部和地下部对NaCl的响应存在差异(图3)。在不同浓度NaCl处理下,野榆钱菠菜地上部的MDA含量均高于CK,在$T_2$处理下增幅最大,为20%;盐地碱蓬在$T_3$处理下地上部的MDA含量较CK增加27%;田菁在$T_1$处理下地上部的MDA含量较CK增加61%;而盐角草地上部的MDA含量随着盐浓度的增大整体呈下降趋势。盐地碱蓬地下部的MDA含量随着盐浓度的增加呈波动变化趋势;盐角草地下部的MDA含量在$T_1$处理下最高;而野榆钱菠菜和田菁地下部的MDA含量在各处理下

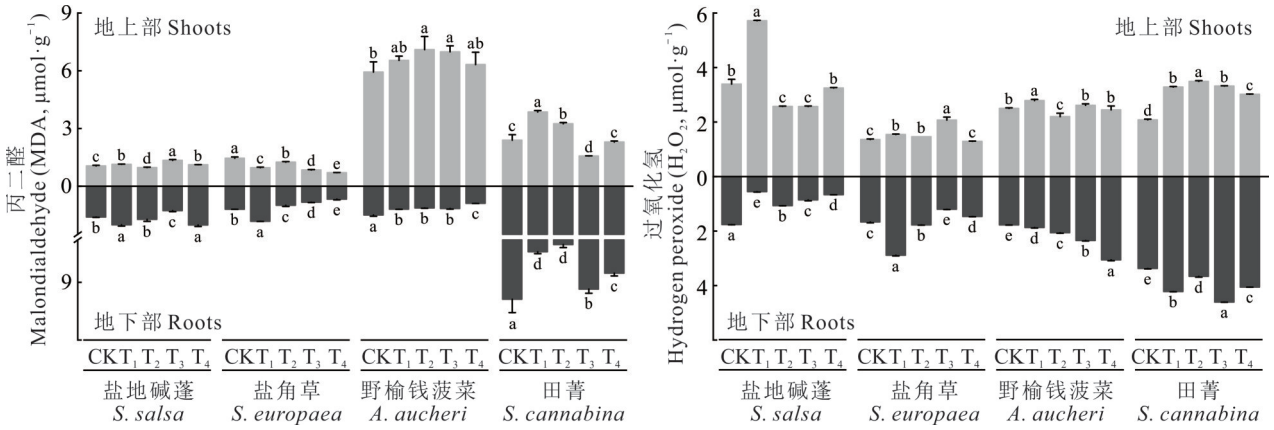



**图 3　不同浓度 NaCl 处理对 4 种植物丙二醛和过氧化氢含量的影响**

**Fig. 3　Effects of different concentrations of NaCl treatment on malondialdehyde and hydrogen peroxide content in the four plants**

均降低，盐角草和野榆钱菠菜在 $T_4$ 处理下分别较 CK 降低 44% 和 41%，田菁在 $T_2$ 处理下较 CK 降低 29%。在 $T_1$ 处理下，4 种植物地上部的 $H_2O_2$ 含量较 CK 均显著增加，其中盐地碱蓬、田菁和野榆钱菠菜分别较 CK 提高 68%、58% 和 11%。田菁和盐角草分别在 $T_2$、$T_3$ 处理下达到峰值，较 CK 分别提高 68% 和 52%。盐地碱蓬地下部的 $H_2O_2$ 含量与其地上部的变化趋势相反，各处理均显著低于 CK，在 $T_1$ 处理下降低 69%，盐角草地下部的 $H_2O_2$ 含量随着 NaCl 浓度的增加呈先增大后减小的趋势，在 $T_1$ 处理下较 CK 提高 74%，田菁和野榆钱菠菜地下部的 $H_2O_2$ 含量变化与其地上部较为一致，随着 NaCl 浓度的增加呈上升趋势，分别在 $T_3$ 和 $T_4$ 处理下达到峰值，较 CK 分别增加 37% 和 72%。

**2.2.2**　盐胁迫对耐盐植物抗氧化系统的影响　1）SOD 活性：总体上 4 种植物地上部和地下部的 SOD 活性变化趋势相反（图 4）。盐地碱蓬和盐角草地上部 SOD 活性随着 NaCl 浓度的增大整体呈上升趋势，在 $T_4$ 处理下分别较 CK 增加 116% 和 34%，而盐地碱蓬地下部则相反，整体呈下降趋势，其在 $T_3$ 处理时降幅最大，为 24%。除 $T_1$ 外，盐角草地上部的 SOD 活性均高于 CK，而地下部的 SOD 活性随着 NaCl 浓度的增大先升高后降低，但整体上地下部的 SOD 活性大于地上部，地上部和地下部的最大增幅分别为 79% 和 8%。盐胁迫下野榆钱菠菜和田菁地上部的 SOD 活性均低于 CK，野榆钱菠菜整体上呈下降趋势，而田菁地上部的 SOD 活性随 NaCl 浓度的增大先降低后升高。盐处理下，野榆钱菠菜地下部的 SOD 活性显著高于 CK，其在 $T_3$ 处理下较 CK 提高 35%，田菁地下部的 SOD 活性则呈先增大后减小的趋势，在 $T_2$ 处理

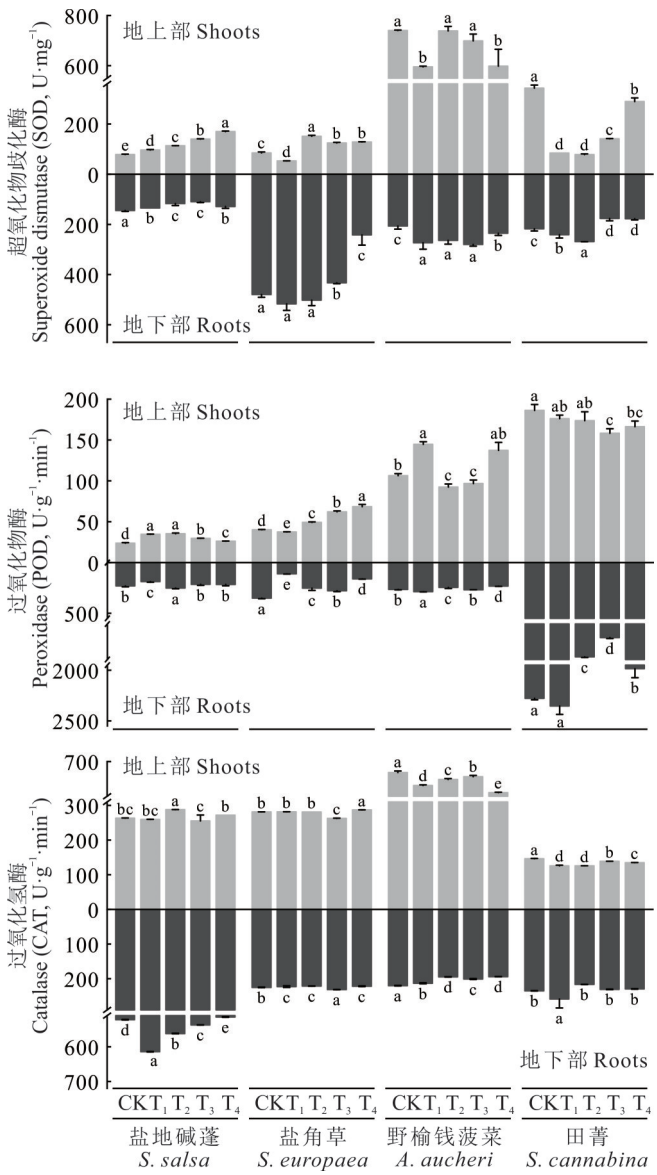



**图 4　不同浓度 NaCl 处理对 4 种植物抗氧化酶活性的影响**

**Fig. 4　Effects of different concentrations of NaCl treatment on antioxidant enzyme activities in the four plants**

下较CK提高23%。

2)POD活性:随着NaCl浓度的增大,盐地碱蓬的地上部和地下部的POD活性大体呈先升高后降低的趋势,其地上部和地下部的POD活性在$T_2$处理下分别较CK提高48%和9%。野榆钱菠菜地上部和地下部的POD活性在$T_1$处理下分别较CK提高36%和8%。在盐胁迫下,盐角草地上部和地下部的POD活性的变化趋势相反,其地上部的POD活性逐渐增大,而地下部均低于CK,在$T_4$处理下,盐角草地上部的POD活性较CK增加71%;在$T_1$处理下,其地下部的POD活性较CK减小69%。整体上田菁的POD活性高于其他3种植物,但其地上部的POD活性随着NaCl浓度的增大呈降低趋势,在地下部除$T_1$处理外,均显著低于CK,在$T_3$处理田菁地上部和地下部的下降幅度分别为15%和41%。

3)CAT活性:盐地碱蓬地下部的CAT活性明显高于地上部,随着NaCl浓度的升高,其地上部和地下部的CAT活性均呈先升高后降低的趋势,$T_2$处理下盐地碱蓬地上部的CAT活性较CK提高了9%,$T_1$处理下盐地碱蓬地下部的CAT活性较CK提高了18%。盐角草的CAT活性随着NaCl浓度的增大有所波动,$T_4$处理下其地上部的CAT活性较CK提高2%。在盐胁迫下,野榆钱菠菜地上部和地下部的CAT活性均显著低于CK,在$T_4$处理下,分别较CK降低9%和12%。田菁地上部的CAT活性均低于CK,地下部在$T_1$处理下提高10%,其余处理与CK无显著差异。

### 2.3 不同浓度NaCl胁迫对耐盐植物离子含量的影响

**2.3.1 钠离子** 除田菁地下部的钠离子($Na^+$)含量略高于地上部外,其余3种植物地上部的$Na^+$含量均明显高于地下部(图5)。随着NaCl浓度的升高,盐地碱蓬和盐角草地上部的$Na^+$含量整体呈上升趋势,盐角草地下部的$Na^+$积累呈波动变化,田菁和野榆钱菠菜地上部的$Na^+$含量波动较大,分别在$T_4$和$T_2$处理达到最大值。在低NaCl浓度($T_2$)处理下,野榆钱菠菜和盐地碱蓬地上部的$Na^+$含量较CK提高7.3%和8.3%,在高NaCl浓度(>300 mmol·$L^{-1}$)处理下,田菁和盐角草地上部的$Na^+$含量较CK提高6.6%和5.4%。盐胁迫下田菁、野榆钱菠菜

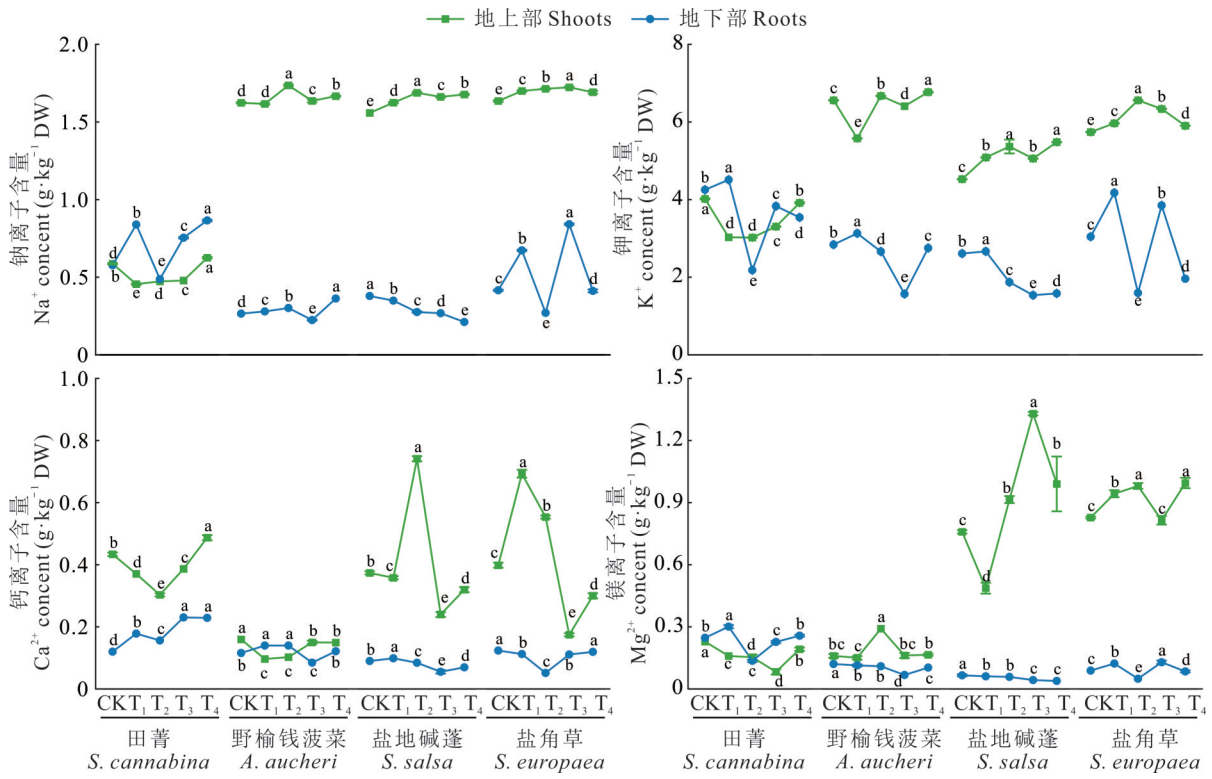



**图5 不同浓度NaCl处理对4种耐盐植物离子含量的影响**

**Fig. 5 Effects of different concentrations of NaCl treatment on ion content in the four plants**

DW: 干重 Dry weight.

和盐角草地下部的$Na^+$含量呈波动趋势，而盐地碱蓬地下部的$Na^+$含量随NaCl浓度的增加逐渐降低，说明在盐胁迫下盐地碱蓬的$Na^+$呈现由下向上的运移特征。

**2.3.2　钾离子**　　盐胁迫下4种植物体内钾离子($K^+$)的变化趋势与钠离子较为一致，以维持相对稳定的钠钾比。野榆钱菠菜、盐地碱蓬和盐角草地上部$K^+$含量较高，不同处理间差异显著；地下部$K^+$含量相对较低且处理间差异显著。田菁地上部和地下部$K^+$含量在不同处理下均有显著变化，整体呈波动趋势。4种植物地下部$K^+$含量均在$T_1$处理下达到最高。

**2.3.3　钙离子**　　野榆钱菠菜地上部和地下部钙离子($Ca^{2+}$)含量整体较低，且变化趋势呈现互补关系，但$T_2$和$T_3$处理间变化幅度不大，说明野榆钱菠菜对$Ca^{2+}$的吸收和转运能力有限，且受外界条件影响较小。田菁、盐地碱蓬和盐角草的地上部$Ca^{2+}$含量整体上高于地下部，在不同处理下地上部的钙离子含量波动更大。盐地碱蓬和盐角草地上部的$Ca^{2+}$含量在$T_2$和$T_1$处理下分别较CK提高98%和74%，说明在低NaCl浓度(<200 mmol·$L^{-1}$)处理下，这2种植物的地上部能大量吸收$Ca^{2+}$以提高抗逆能力。

**2.3.4　镁离子**　　田菁和野榆钱菠菜的镁离子($Mg^{2+}$)含量相对较低，不同处理间存在显著差异，田菁地上部$Mg^{2+}$含量随着盐浓度的增加整体呈下降趋势，而野榆钱菠菜的地上部在$T_2$处理下显著升高。盐地碱蓬和盐角草地上部的$Mg^{2+}$含量较高，变化趋势与钙离子含量较为一致，分别在$T_3$和$T_4$处理下较CK提高了75%和20%。4种植物地下部的$Mg^{2+}$含量整体上呈下降趋势，其中盐地碱蓬的下降趋势随着胁迫程度增加逐渐减小。

**2.4　4种耐盐植物的耐盐性评价**

**2.4.1　相关性分析**　　对4种植物的10个生理指标进行相关性分析(图6)，SOD活性与CAT活性、$K^+$、$Mg^{2+}$含量呈显著正相关($P<0.05$)；CAT活性和$Ca^{2+}$含量、$H_2O_2$含量呈显著正相关；$Na^+$与根系活力、SOD活性、$K^+$和$Ca^{2+}$含量均呈显著负相关。整体上各指标之间都有一定程度的相关性，因此可以作为主要指标来评价4种耐盐植物对盐胁迫的耐受性。

**2.4.2　主成分分析**　　对4种植物的10个生理指标进行主成分分析，基于特征值>1的标准筛选主成分，统计主成分的特征值、贡献率及累积贡献率。前3个主成分的累积贡献率达67.474%(表1)，可以代替10个生理指标来评价其耐盐性。

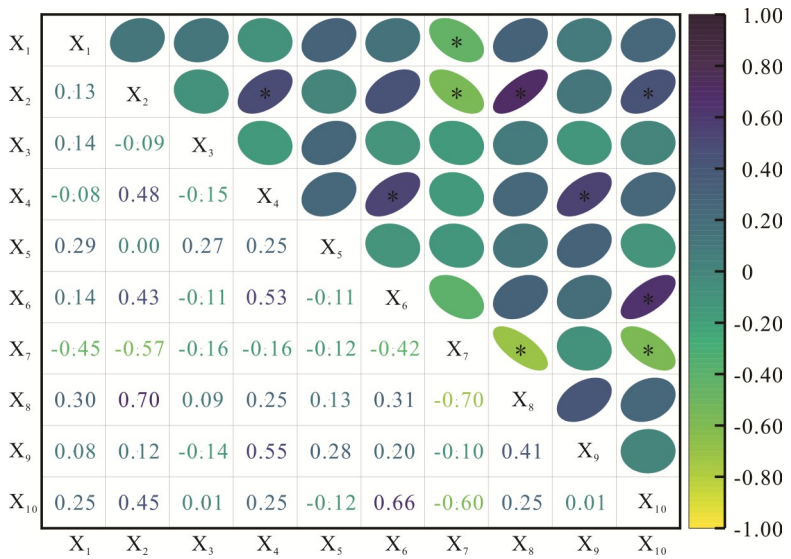



**图6　生理指标的相关性分析**

**Fig. 6　Correlation analysis of physiological indicators**

$X_1$～$X_{10}$分别表示根系活力，超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性，丙二醛、过氧化氢、钠离子、钾离子、钙离子和镁离子含量。*表示相关性在0.05水平上显著。$X_1$—$X_{10}$ represent root activity, superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activity, malondialdehyde (MDA), hydrogen peroxide ($H_2O_2$), $Na^+$, $K^+$, $Ca^{2+}$, and $Mg^{2+}$ content, respectively. * indicates that the correlation is significant at the 0.05 level.

主成分载荷矩阵(表2)显示,对第1主成分产生正向影响的主要指标有SOD、CAT、$H_2O_2$、$K^+$、$Mg^{2+}$,产生负向影响的主要指标是$Na^+$,其中SOD、$Na^+$、$K^+$的载荷数值绝对值在0.75以上,说明这些指标对第1主成分起决定作用。对第2主成分起决定作用的指标是根系活力和POD,载荷数值分别是0.604、0.684。MDA和$Ca^{2+}$均对第3主成分产生正向影响,载荷数值分别是0.714和0.705,可以反映盐胁迫下植物在苗期的生长状况。

**2.4.3** 耐盐性综合评价 分别计算3个主成分综合指标对应的隶属函数值和各试验材料在盐胁迫下的隶属度(D)值(表3),以D值总和评价植物的耐盐性,总和越大说明耐盐性越强,反之越弱。结果表明,耐盐能力较强的是盐角草和盐地碱蓬;田菁和野榆钱菠菜耐盐性较差。

## 3 讨论

### 3.1 不同浓度NaCl处理对耐盐植物根系生长的影响

逆境条件下,根系形态可塑性揭示了生态适应策略的分异,根系通过形态可塑性重构(如根长延伸、直径增粗)优化土壤资源获取能力,是植物逆境适应的核心策略,如根系直径的增加可以通过导水组织增厚降低水力失效风险[17],本试验中,盐角草的根长、根表面积和根体积在各处理下有所增加,说明NaCl处理并未抑制盐角草的根系生长,其根系直径较CK显著增加,根系导水组织扩张提高了其对养分的吸收能力,这也是盐角草比较耐盐的原因之一[18],而盐地碱蓬、野榆钱菠菜和田菁的根系生长均受到了盐处理的明显影响,随着NaCl浓度的增加,3种植物的根长、根表面积和根体积均明显降低,但盐地碱蓬的根直径在NaCl处理下逐渐增加,在300 mmol·$L^{-1}$盐处理下显著增加35.83%,根直径增加是盐地碱蓬和盐角草的根系应对盐胁迫的有效方式。整体上4种耐盐植物根系生长受NaCl处理的影响呈现浓度依赖性和种间特异性,低浓度(<200 mmol·$L^{-1}$)抑制多数植物根系生长,中浓度(300 mmol·$L^{-1}$)可促进部分植物根系构型的优化,高浓度(400 mmol·$L^{-1}$)则产生显著抑制作用。

**表1 各指标主成分的方差贡献率**

**Table 1 Variance contribution rates of principal components for each index**

| 元件 Element | 初始特征值 Initial eigenvalue | | |
|---|---|---|---|
| | 特征值 Eigenvalue | 方差贡献率 Variance contribution rate (%) | 累积贡献率 Accumulation contribution rate (%) |
| $X_1$ | 3.535 | 35.353 | 35.353 |
| $X_2$ | 1.643 | 16.426 | 51.779 |
| $X_3$ | 1.570 | 15.695 | 67.474 |
| $X_4$ | 0.937 | 9.374 | 76.848 |
| $X_5$ | 0.837 | 8.374 | 85.222 |
| $X_6$ | 0.589 | 5.891 | 91.113 |
| $X_7$ | 0.371 | 3.706 | 94.820 |
| $X_8$ | 0.274 | 2.738 | 97.558 |
| $X_9$ | 0.191 | 1.909 | 99.467 |
| $X_{10}$ | 0.053 | 0.533 | 100.000 |
| 元件 Element | 提取平方和载入 Extract square sum load | | |
| | 特征值 Eigenvalue | 方差贡献率 Variance contribution rate (%) | 累积贡献率 Accumulation contribution rate (%) |
| $X_1$ | 3.535 | 35.353 | 35.353 |
| $X_2$ | 1.643 | 16.426 | 51.779 |
| $X_3$ | 1.570 | 15.695 | 67.474 |

**表2 主成分载荷矩阵**

**Table 2 Principal component loading matrix**

| 指标 Item | 主成分 Principal component | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| 根系活力 Root activity | 0.398 | 0.604 | 0.009 |
| 超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase | 0.791 | −0.110 | −0.119 |
| 过氧化物酶 Peroxidase | 0.003 | 0.684 | 0.069 |
| 过氧化氢酶 Catalase | 0.582 | −0.508 | 0.445 |
| 丙二醛 Malondialdehyde | 0.167 | 0.425 | 0.714 |
| 过氧化氢 Hydrogen peroxide | 0.705 | −0.346 | −0.228 |
| $Na^+$ | −0.804 | −0.364 | 0.225 |
| $K^+$ | 0.777 | 0.198 | 0.117 |
| $Ca^{2+}$ | 0.411 | −0.258 | 0.705 |
| $Mg^{2+}$ | 0.684 | −0.039 | −0.478 |

根系活力的大小反映了植物对养分的吸收能力和植物根系的整体代谢水平,是衡量根系功能的重要指标,本试验中,当NaCl浓度较低时,田菁和盐地碱蓬的根系活力增长缓慢,低浓度NaCl对其根系活力促进作用不明显,当NaCl浓度高于100 mmol·$L^{-1}$后,其根系活力逐步上升,这与梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、囊果碱蓬

**表 3　盐胁迫下 4 种植物的隶属函数值及综合评价**

**Table 3　Membership function values and comprehensive evaluation of the four plants under salt stress**

| 品种 Variety | 处理 Treatment | 综合指标值 Comprehensive index value | | | 隶属函数值 Membership function value | | | D 值 D-value | 总和 Sum | 排名 Rank |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $\mu_1$ | $\mu_2$ | $\mu_3$ | | | |
| 盐地碱蓬 *S. salsa* | CK | −0.88 | −0.19 | −1.14 | 0.19 | 0.43 | 0.27 | 0.27 | 2.61 | 2 |
| | $T_1$ | −0.99 | −0.58 | 0.61 | 0.16 | 0.34 | 0.76 | 0.34 | | |
| | $T_2$ | 0.45 | 1.35 | 1.29 | 0.59 | 0.81 | 0.94 | 0.72 | | |
| | $T_3$ | 1.39 | −1.95 | −0.07 | 0.86 | 0.00 | 0.57 | 0.59 | | |
| | $T_4$ | 1.18 | −0.34 | 0.52 | 0.80 | 0.40 | 0.73 | 0.69 | | |
| 盐角草 *S. europaea* | CK | −0.39 | 0.01 | −2.14 | 0.33 | 0.48 | 0.00 | 0.29 | 2.62 | 1 |
| | $T_1$ | −0.06 | 0.88 | −0.78 | 0.43 | 0.70 | 0.37 | 0.48 | | |
| | $T_2$ | 1.34 | 0.26 | −0.42 | 0.85 | 0.54 | 0.47 | 0.69 | | |
| | $T_3$ | −0.31 | −0.84 | 1.50 | 0.36 | 0.27 | 1.00 | 0.49 | | |
| | $T_4$ | 0.77 | 0.09 | 0.83 | 0.68 | 0.50 | 0.82 | 0.67 | | |
| 田菁 *S. cannabina* | CK | 1.07 | 0.95 | 0.13 | 0.77 | 0.72 | 0.62 | 0.72 | 2.29 | 3 |
| | $T_1$ | −0.83 | −1.27 | −0.68 | 0.21 | 0.17 | 0.40 | 0.24 | | |
| | $T_2$ | −1.09 | −1.16 | 0.52 | 0.13 | 0.19 | 0.73 | 0.28 | | |
| | $T_3$ | −1.19 | 0.74 | 0.06 | 0.10 | 0.66 | 0.61 | 0.35 | | |
| | $T_4$ | 0.55 | 0.73 | 1.10 | 0.62 | 0.66 | 0.89 | 0.69 | | |
| 野榆钱菠菜 *A. aucheri* | CK | −0.53 | 2.10 | −0.58 | 0.29 | 1.00 | 0.43 | 0.50 | 2.29 | 3 |
| | $T_1$ | −1.52 | −0.80 | 0.07 | 0.00 | 0.28 | 0.61 | 0.21 | | |
| | $T_2$ | 1.85 | −0.85 | −1.26 | 1.00 | 0.27 | 0.24 | 0.65 | | |
| | $T_3$ | −0.26 | 0.77 | −1.01 | 0.37 | 0.67 | 0.31 | 0.43 | | |
| | $T_4$ | −0.55 | 0.12 | 1.47 | 0.29 | 0.51 | 0.99 | 0.51 | | |

(*Suaeda physophora*)和钠猪毛菜(*Salsola nitraria*)根系活力的研究结果一致[19],说明植物的根系能适应并响应盐胁迫,但相比其他植物,田菁整体的根系活力相对较低。盐角草和野榆钱菠菜在 NaCl 浓度为 0～300 mmol·$L^{-1}$ 时,根系活力呈波动上升趋势,说明它们在逐步适应盐胁迫环境,在 NaCl 浓度为 300～400 mmol·$L^{-1}$ 时,根系活力显著上升,说明它们在高盐环境下仍能有效提升根系活力。由此可见,盐角草和野榆钱菠菜在高盐环境下展现出强大的根系活力,在盐碱地改良等生态修复工程中具有较大的应用潜力,田菁虽然整体根系活力相对较低,但在中、高盐浓度下根系活力的上升也表明它具备一定的耐盐能力。

### 3.2　不同浓度 NaCl 处理对植物生理特性的影响

本试验结果显示,不同植物地上部和地下部的保护酶活性对 NaCl 浓度变化的响应不同。在 NaCl 处理下野榆钱菠菜地上部 SOD 活性高,而盐角草地下部 SOD 活性最高;4 种植物地下部的 POD 活性均高于地上部;盐地碱蓬和田菁地下部 CAT 活性均高于地上部,而野榆钱菠菜和盐角草的地上部活性更高;野榆钱菠菜和田菁地上部 CAT 活性随 NaCl 浓度升高而降低,且体内 $H_2O_2$ 的积累较多;盐地碱蓬和盐角草的地上部和地下部 MDA 含量均较低,说明盐胁迫下植物地上部保护酶对膜脂过氧化程度的防御反应,是其耐盐性较强的主要原因之一。盐地碱蓬和野榆钱菠菜地上部 $H_2O_2$ 含量高于地下部,盐角草和田菁地下部含量高于地上部。地上部的 $H_2O_2$ 含量在不同浓度盐胁迫下变化较小,地下部的 $H_2O_2$ 含量则随着盐浓度的升高而增大,而地上部的 SOD 和 CAT 活性也呈升高趋势说明野榆钱菠菜的地上部保护酶对活性氧具有一定的清除效果。同时 $H_2O_2$ 含量的变化与 CAT 活性有一定的相关性。野榆钱菠菜和田菁地上部 CAT 活性随盐浓度升高而降低,盐地碱蓬地下部 CAT 活性最高,这与 MDA 含量变化一致,说明 3 种保护酶 SOD、POD 和 CAT 需协调才能清除活性氧,降低对膜的损伤[15]。

无机离子是植物在逆境胁迫下进行渗透调节的主要物质之一,在植物的生命活动中发挥重要作用,盐胁迫会导致土壤渗透势降低,影响植物对水分的吸收,耐盐植物可以通过离子来调节渗透平衡,进而维持植物的正常生理功能[20]。$K^+$和$Na^+$可作为渗透调节物质,调节细胞的渗透势,帮助植物适应盐胁迫环境,参与一些酶的激活和代谢过程,在非耐盐植物中,过量的$Na^+$会导致离子毒害和生理干旱等问题[21];$Ca^{2+}$和$Mg^{2+}$不仅参与细胞中的多种酶促反应和物质代谢过程,在植物对逆境胁迫的响应和调节中也发挥重要作用。前人研究发现植物地上部与地下部的离子含量变化不一致[11],在本试验中,野榆钱菠菜的地上部$Na^+$含量在不同NaCl处理下有所增加,地下部的含量相对较低,说明野榆钱菠菜对$Na^+$的吸收和向上运输有一定调控作用,尽量减少$Na^+$在地上部的积累以减轻毒害;盐角草对$Na^+$有很强的耐受性和吸收能力,且变化相对稳定;盐地碱蓬具有较强的吸收$Na^+$并向地上部运输的能力,利用$Na^+$进行渗透调节,并将离子吸收后区隔化或肉质化,减缓盐胁迫的伤害;田菁对$Na^+$和$K^+$的吸收和转运受外界NaCl浓度的影响较大,在盐胁迫下会吸收较多$Na^+$并向上运输,地上部$K^+$含量在低NaCl浓度(100 mmol·$L^{-1}$)处理下较高。田菁对$Ca^{2+}$的吸收和分配受盐胁迫影响显著;从离子平衡角度分析,在盐胁迫下,田菁是否通过拒绝离子的吸收进入植物体内来减少对植物的伤害从而提高其耐盐性还有待于进一步的研究。盐地碱蓬和盐角草地上部能大量吸收$Ca^{2+}$以提高抗逆能力,但盐角草更注重维持地下部$Ca^{2+}$含量的相对稳定。4种植物地下部的$Mg^{2+}$含量整体上均呈下降趋势,盐角草地上部和地下部$Mg^{2+}$含量在各处理下相对稳定,且地上部含量高于地下部,表明盐角草对离子的吸收和分配有自身较为稳定的调控机制。总之盐角草的地上部对4种离子的吸收均高于其他3种植物,也是其盐胁迫下叶片肉质化的主要原因。

### 3.3 耐盐性综合评价

植物苗期是盐胁迫环境限制物种分布的决定性生育时期,显著影响幼苗的形态建成和生理代谢过程,是耐盐性评价的重要时期[22]。植物的耐盐性是多种因素共同调控的结果,单一类型的指标尤其是形态指标因物种的差异难以评价不同植物的耐盐性[23],利用相关性分析、主成分分析及隶属函数分析等方法对各类指标进行综合筛选,构建评价体系,能够较为准确、全面的体现不同植物的耐盐能力[24]。本研究对影响4种耐盐植物耐盐性的10个生理指标的相关性分析发现,整体上各生理指标之间都有一定程度的相关性,因此可以作为主要指标来评价4种耐盐植物对盐胁迫的耐受性。通过主成分分析,提取出3个主成分进行隶属函数综合分析,根据综合评价值D值进行耐盐性排序,4种供试植物的耐盐性强弱依次为盐角草>盐地碱蓬>野榆钱菠菜=田菁。

## 4 结论

本研究探究不同浓度NaCl处理对4种耐盐植物根系生长、生理特性的影响及耐盐性差异。结果表明,NaCl处理对4种植物根系生长的影响呈种间特异性,盐角草的根系生长及其在高盐环境下根系活力表现最优,盐地碱蓬通过增粗根系直径适应盐胁迫。保护酶系统与离子平衡的协同调控是植物耐盐的关键机制,盐角草地上部离子吸收能力强,保护酶活性协调稳定,膜脂过氧化损伤轻。基于10项生理指标的主成分与隶属函数综合评价,确定超氧化物歧化酶、钠离子、钾离子、过氧化物酶及根系活力为植物苗期耐盐性评价的核心指标,4种植物中盐角草和盐地碱蓬耐盐性最强,在盐碱地生态修复中具有更高应用价值。

## 参考文献 References:

[1] Ma K, Rao L Y. Research lineage and hot spot analysis of soil salinization in China. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(11): 90-102.
马凯, 饶良懿. 我国土壤盐碱化问题研究脉络和热点分析. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 90-102.

[2] Zhu Q M, He L L, Wu T D, *et al*. Comprehensive evaluation on salt stress of 10 wild *Ophiopogoneae* germplasms in Southern region of Gansu Province. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5): 1588-1601.
朱奇萌, 何琳琳, 吴廷达, 等. 甘肃南部地区10份野生沿阶草种质资源耐盐性综合评价. 草地学报, 2025, 33(5): 1588-1601.

[3] Guo M Y, Liu Y L, Li X X, *et al*. Growth and physiological responses of 'Zhongmu No. 3' alfalfa cultivar to different saline-alkali stresses. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2): 509-517.

郭美莹, 刘亚玲, 李晓霞, 等. '中苜3号'紫花苜蓿对不同盐碱胁迫的生长和生理响应. 草地学报, 2026, 34(2): 509－517.

[4] Shan L S. Studies on morphology and function of root of typical desert plant and its drought-resistant physiology characteristics on northwest China. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
单立山. 西北典型荒漠植物根系形态结构和功能及抗旱生理研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.

[5] Zhou H H, Li W H. Responses and adaptation of xylem hydraulic conductivity to salt stress in *Populus euphratica*. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(1): 81－91.
周洪华, 李卫红. 胡杨木质部水分传导对盐胁迫的响应与适应. 植物生态学报, 2015, 39(1): 81－91.

[6] Liu X, Liu X H, Song S, *et al*. Regulation of ion homeostasis for salinity tolerance in plants. Plant Physiology Journal, 2023, 59(4): 715－726.
刘晓, 刘晓红, 宋姝, 等. 盐碱胁迫下植物体内离子平衡调控的机制. 植物生理学报, 2023, 59(4): 715－726.

[7] Bu X Q, Li S S, Duan Y N, *et al*. Effects of nitric oxide on stress resistance and feed quality of *Suaeda salsa* under saline-alkali stress. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(9): 60－69.
卜祥琪, 李姗姗, 段莹娜, 等. 一氧化氮对盐碱胁迫下盐地碱蓬抗逆性及饲用品质的影响. 草业学报, 2024, 33(9): 60－69.

[8] Li A Q, Zhao X D, Feng Y L, *et al*. Effect of NaCl stress with different concentrations on seed germination and seedlings growth of *Suaeda salsa*. Journal of Northwest Minzu University (Natural Science Edition), 2017, 38(4): 41－45.
李爱卿, 赵晓东, 冯玉兰, 等. 不同浓度NaCl处理对盐地碱蓬萌发及生长的影响. 西北民族大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 41－45.

[9] Wang W H, Jiang L. Effects of sodium stress on seed germination and seedling growth of *Atriplex aucheri*. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(6): 23－29.
王伟华, 姜黎. 四种钠盐胁迫对野榆钱菠菜种子萌发特性和幼苗生长的影响. 中国草地学报, 2020, 42(6): 23－29.

[10] Lv S L, Tai F, Guo J, *et al*. Phosphatidylserine synthase from *Salicornia europaea* is involved in plant salt tolerance by regulating plasma membrane stability. Plant and Cell Physiology, 2020, 62(1): 66－79.

[11] He T T, Liu C, Zhu X M, *et al*. Physiological response of *Sesbania cannabina* to salt stress and its effect on soil. Hunan Agricultural Sciences, 2021(10): 44－46.
贺亭亭, 刘冲, 朱小梅, 等. 田菁在盐胁迫环境中的生理响应及其对土壤的影响. 湖南农业科学, 2021(10): 44－46.

[12] Li J X, Zhang T C, Ren X Y, *et al*. Responses of potato root architecture and physiological indexes to drought stress at different growth stages. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(12): 1848－1855.
李佳欣, 张天赐, 任晓月, 等. 不同生育期马铃薯根系构型及生理指标对干旱胁迫的响应. 西北植物学报, 2024, 44(12): 1848－1855.

[13] Wang Y Y, Chai C W, Ji Y F, *et al*. Effects of drought stress on protective enzyme activities and osmotic regulatory substances in desert plant *Haloxylon ammodendron* seedlings. Pratacultural Science, 2025, 42(2): 288－294.
汪媛艳, 柴成武, 纪永福, 等. 干旱胁迫对荒漠植物梭梭幼苗保护酶活性和渗透调节物质的影响. 草业科学, 2025, 42(2): 288－294.

[14] Dai H J, Ke Y Q, Pan T G. Effects of NaCl stress on active oxygen metabolism in sweet potato leaves of seedling stage and its relation to salt-tolerance. Journal of Ningxia Agricultural Sciences, 2001, 22(1): 15－18.
代红军, 柯玉琴, 潘廷国. NACl胁迫下甘薯苗期叶片活性氧代谢与甘薯耐盐性的关系. 宁夏农学院学报, 2001, 22(1): 15－18.

[15] Gao J F. Experimental guidance for pant physiology. Beijing: Higher Education Press, 2006: 203－214.
高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2006: 203－214.

[16] Chen X M, Liu H J, Yang Z, *et al*. Effects of salt-alkali stress on seed germination traits of alfalfa and its salt tolerance evaluation. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024(3): 64－70.
陈雪梅, 刘骅峻, 杨曌, 等. 盐碱胁迫对苜蓿种子萌发性状的影响及耐盐碱性评价. 黑龙江农业科学, 2024(3): 64－70.

[17] Chen S Y, Tang Y, He T, *et al*. Xylem embolism characteristics and hydraulic safety risks of nine tree species in the Qinling Mountains. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(9): 1213－1222.
陈思佚, 唐燕, 何腾, 等. 秦岭9个树种的木质部栓塞特性与水力安全风险. 植物生态学报, 2024, 48(9): 1213－1222.

[18] Knipfer T, Fricke W. Water uptake by seminal and adventitious roots in relation to whole-plant water flow in barley (*Hordeum vulgare* L.). Journal of Experimental Botany, 2011, 62(2): 717－733.

[19] Yi L P, Ma J, Li Y. Effects of salt stress on root characteristics and vigor of three desert halophytes at seedling stage. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2006, 36(Z2): 86－94.

弋良朋, 马健, 李彦. 盐胁迫对3种荒漠盐生植物苗期根系特征及活力的影响. 中国科学(D辑): 地球科学, 2006, 36(Z2): 86－94.

[20] Li X L, Tian G Q, Zhang C, *et al*. Research advance in mechanism of adaptation to salinity stress and strategies of germplasm enhancement for salinity tolerance in sorghum. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(11): 2073－2084.
李兴龙, 田国庆, 张晨, 等. 高粱在盐胁迫下的适应性生理分子机制及耐盐种质创新策略. 植物遗传资源学报, 2025, 26(11): 2073－2084.

[21] Li C H, Wei Y X, Sofia, *et al*. Effects of phosphorus application on photosynthetic characteristics, ion balance, and antioxidant capacity of tomato under salit and alkaline stress. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(3): 34－44.
李长虹, 魏雨欣, 索菲亚, 等. 施磷对盐碱胁迫下番茄光合特性、离子平衡和抗氧化能力的影响. 干旱地区农业研究, 2025, 43(3): 34－44.

[22] Zhang J P, Song Q J, Cregan P B, *et al*. Genome-wide association study for flowering time, maturity dates and plant height in early maturing soybean (*Glycine max*) germplasm. BMC Genomics, 2015, 16(1): 217.

[23] Wang Y R, Yuan B C, Sun Y T, *et al*. Evaluation of salt tolerance of *Centrosema pubescens* germplasm during seedling stage under salt stress. Pratacultural Science, 2025, 42(10): 1－18.
王燕茹, 袁秉琛, 孙郁婷, 等. 盐胁迫下蝴蝶豆种质苗期耐盐性评价. 草业科学, 2025, 42(10): 1－18.

[24] Wang X L, Yang J, Chen W F, *et al*. Effects of salt stress on the growth status and physiological characteristics of three shrubby plants. Subtropical Agriculture Research, 2024, 20(2): 135－144.
王晓玲, 杨洁, 陈维峰, 等. 盐胁迫对3种灌木植物生长及生理特性的影响. 亚热带农业研究, 2024, 20(2): 135－144.