

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.015

引用格式:王晗睿,白小明,胡水琴,等.10个野生一年生早熟禾种质耐盐性综合评价[J].草地学报,2026,34(9):3305–3319
WANG Han-rui, BAI Xiao-ming, HU Shui-qin, et al. Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance in Ten Wild *Poa annua* Germplasm Resources[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3305–3319

10个野生一年生早熟禾种质耐盐性综合评价

王晗睿,白小明*,胡水琴,冉福,阮倩,俞发红

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,农业农村部饲草种质创新与新品种选育重点实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃兰州730070)

摘要:为研究西北地区一年生早熟禾(*Poa annua* L.)种质资源耐盐性强弱,本试验以兰州(LZ)、酒泉(JQ)、麦积(MJ)、张掖(ZY)、湟中(HZ)、武威(WW)、白银(BY)、金昌(JC)、西和(XH)和舟曲(ZQ)10个地方野生一年生早熟禾种质为材料,采用盆栽模拟法,探究了不同土壤含盐量(0.2%,0.5%,0.8%,1.1%)处理对一年生早熟禾生长、细胞膜系统及渗透调节系统的影响,并对其耐盐性进行了综合评价。结果表明:随盐胁迫程度的加剧,10个野生一年生早熟禾种质的株高、叶长、叶宽、钾离子及钙离子含量均呈下降趋势,相对电导率、丙二醛含量、游离脯氨酸含量、可溶性糖含量及钠离子含量呈上升趋势,耐盐性由强至弱依次是LZ>JQ>BY>JC>ZY>WW>HZ>ZQ>XH>MJ。土壤含盐量为0.8%时,兰州和酒泉种质盐害等级轻于其他种质,耐盐性较强,具有在西北土壤盐渍化地区种植潜力。

关键词:一年生早熟禾;盐胁迫;生长特性;渗透调节;钾钠离子;耐盐性

中图分类号:S688.4

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3305-15

Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance in Ten Wild *Poa annua* Germplasm Resources

WANG Han-rui, BAI Xiao-ming*, HU Shui-qin, RAN Fu, RUAN Qian, YUN Fa-hong

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University; Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education; Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province; Key Laboratory of Forage Germplasm Innovation and New Variety Breeding of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: To investigate the salt tolerance of wild Annual bluegrass (*Poa annua* L.) germplasm resources in Northwest China, ten wild populations collected from Lanzhou (LZ), Jiuquan (JQ), Maiji (MJ), Zhangye (ZY), Huangzhong (HZ), Wuwei (WW), Baiyin (BY), Jinchang (JC), Xihe (XH), and Zhouqu (ZQ) were used as experimental materials. A pot experiment was conducted to investigate the effects of different soil salinity levels (0.2%, 0.5%, 0.8%, and 1.1%) on plant growth, cell membrane system, and osmotic adjustment system of *P. annua*, and to comprehensively evaluate their salt tolerance. The results showed that with increasing salt stress, plant height, leaf length, leaf width, and potassium and calcium ion contents of the ten germplasms decreased gradually, whereas relative electrical conductivity, malondialdehyde content, free proline content, soluble sugar content, and sodium ion content increased. The overall salt tolerance of the germplasms was ranked as LZ>JQ>BY>JC>ZY>WW>HZ>ZQ>XH>MJ. At a soil salinity level of 0.8%, the LZ and JQ exhibited lower salt injury than the others, indicating stronger salt tolerance, and suggesting their potential for cultivation in saline soils of Northwest China.

Key words: *Poa annua* L.; Salt stress; Growth traits; Osmotic adjustment; Na⁺ and K⁺ concentrations; Salt tolerance

收稿日期:2025-09-09;修回日期:2025-10-23

基金项目:甘肃省林业和草原局甘肃省草原健康和退化评估科技支撑项目(LCJ20240177);甘肃省林业和草原局草原生态修复治理项目(LCJ20240172);甘肃省高校产业支撑计划项目“野生羊茅和草地早熟禾优异种质资源挖掘、创新与应用”(2025CYZC-040)资助

作者简介:王晗睿(2002-),女,汉族,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事草坪草抗性研究,E-mail: 1073323120089@st.gsau.edu.cn; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: baixm@gsau.edu.cn

土壤盐渍化是全球范围内威胁干旱半干旱地区灌溉农业可持续发展的重要问题之一^[1]。据联合国粮农组织统计,全球有超过4.24亿公顷的表土(0~30 cm)和8.33亿公顷的底土(30~100 cm)受到盐分影响^[2],并且土壤盐渍化正在以每年200万公顷的速度扩张^[3]。我国约 3.7×10^8 hm²的可利用盐碱地^[4],其中近期具备农业改良利用潜力的约 6.7×10^6 hm²,主要集中在西北地区。调查显示,当前我国盐碱耕地的分布范围正逐步扩大,盐碱化程度持续加重,尤其是西北地区的耕地次生盐碱化问题日益突出^[4]。盐碱土地作为重要的土地资源,面积大,分布范围广,对农作物生长及草原建设和草坪建植构成了严重威胁。研究表明,草本植物是盐碱地生态植被的重要组成部分,对盐碱地修复具有重要作用^[5],因此,筛选和培育耐盐植物是盐碱地改良与利用的重要途径^[6],而建立草本植物种质资源耐盐评价体系是其耐盐育种和种质创新的基础^[7]。

一年生早熟禾(*Poa annua* L.)是禾本科冷季型草坪草,其植株低矮、叶片浅绿、分蘖力强,生长期可连续开花并形成紧密的圆锥花序。该草种具有耐践踏、耐修剪、成坪快、存活率高等特性,常作为冬春短期观赏草坪建植及秋末草坪交播或补播的先锋草种,近年来作为一种新型草坪草资源受到广泛关注^[8]。在耐盐性研究方面,白小明等^[9]通过对8份野生早熟禾种质进行耐盐性评价,筛选出耐盐性较强的小药早熟禾;李娟霞等^[10]比较了不同盐分类型对一年生早熟禾种子萌发及幼苗生长的影响,发现碱性盐的胁迫效应显著强于中性盐,其毒性强弱依次为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3 > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaCl}$ 。值得注意的是,我国西北地区属典型内陆盐碱地,土壤盐分以氯化物和硫酸盐为主,且不同盐分类型的盐碱土常呈交错分布,因此,开展针对混合盐胁迫的草坪草适应性研究具有重要意义^[11]。

目前,国内外关于一年生早熟禾的研究,主要集中在盐胁迫对种子萌发、耐寒性^[12]、pH适应性^[13]以及萌发温度^[14]等方面。如李娟霞等^[10]的研究表明,在不同盐分类型及盐浓度处理下,4个野生一年生早熟禾种源的种子萌发和幼苗生长均受到不同程度的抑制,其中,永昌种源一年生早熟禾种子萌发特性优于其他种源。关于一年生早熟禾苗期盐胁迫的研究较少。因此,本研究通过测定10个野生一年生早熟禾材料在盐胁迫下的形态与生理指标,系统评估其

耐盐性,旨在筛选耐盐性突出的种质资源,为耐盐品种选育及耐盐鉴定体系的建立提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的10个野生一年生早熟禾种质于2024年5—6月采集于甘肃和青海境内,其地理位置见表1。

1.2 试验设计

取饱满、均一且无病虫害的野生一年生早熟禾种子播种于直径19 cm、深12 cm的塑料花盆中,栽培基质进行灭菌处理后按农田土:沙:有机质:羊粪为7:1:1:1体积比混合,每盆装混合基质1.9 kg(混合基质含盐量0.2%)。定期浇水,保证苗期正常生长,在室外生长60天。

本试验采用NaCl进行盐胁迫处理,设置0.2%(CK,对照)、0.5%(T₁)、0.8%(T₂)及1.1%(T₃)四个土壤含盐量处理水平。每个处理设置4次重复。试验材料生长60 d后按设置的含盐量进行盐胁迫处理,每盆灌入150 mL相应含盐量的盐溶液。胁迫期间,根据称重法每48 h加水一次,每个花盆下放有托盘,如有溶液渗出则及时倒回花盆,维持土壤含水量在同一水平。胁迫一周后测定相关指标。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态指标测定方法 株高:用直尺测定其绝对高度,用cm表示。叶长、叶宽:用游标卡尺测定,用mm表示。

1.3.2 生理生化指标 盐害等级(Salt hazard grade):每盆选取30片叶子,测量每片叶子枯黄的长度比例,计算盐害指数(Salt hazard index),根据盐害指数确定盐害等级。参考徐景超^[15]的方法并作适当改进,确定植物盐害分级标准:0级,无盐害症状,叶片正常;1级,轻度盐害,叶片的叶尖、叶缘发黄萎缩,盐害指数0~20%;2级,中度盐害,叶片的叶尖、叶缘发黄枯萎,轻微脱叶,盐害指数20%~50%;3级,重度盐害,叶片的叶缘及大部分叶面发黄枯萎,严重脱叶,盐害指数50%~80%;4级,极重度盐害,叶片枯萎甚至死亡,盐害指数大于80%。相对电导率(Relative conductivity, REC)采用电解质外渗法测定^[16]。丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含

表 1 试供材料
Table 1 Materials for test

编号 Code	材料名称 Material name	采样地 Sampling place	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	生境 Habitat
LZ	一年生早熟禾(兰州) <i>Poa annua</i> L.(Lanzhou)	甘肃兰州市安宁区 Anning District, Lanzhou City, Gansu Province	103°42'E	36°52'N	1543	绿化带 Green belt
MJ	一年生早熟禾(麦积) <i>P. annua</i> L.(Maiji)	甘肃天水市麦积区 Maiji District, Tianshui City, Gansu Province	105°85'E	34°57'N	1124	路边 Roadside
ZY	一年生早熟禾(张掖) <i>P. annua</i> L.(Zhangye)	甘肃张掖市甘州区 Ganzhou District, Zhangye City, Gansu Province	100°09'E	38°36'N	1478	路边 Roadside
JQ	一年生早熟禾(酒泉) <i>P. annua</i> L.(Jiuquan)	甘肃酒泉市肃州区 Suzhou District, Jiuquan City, Gansu Province	98°50'E	39°71'N	1853	公园 Garden
HZ	一年生早熟禾(湟中) <i>P. annua</i> L.(Huangzhong)	青海西宁市湟中区 Huangzhong District, Xining City, Qinghai Province	101°78'E	36°51'N	2677	路边 Roadside
WW	一年生早熟禾(武威) <i>P. annua</i> L.(Wuwei)	甘肃武威市凉州区 Liangzhou District, Wuwei City, Gansu Province	102°64'E	37°93'N	1465	公园 Garden
BY	一年生早熟禾(白银) <i>P. annua</i> L.(Baiyin)	甘肃白银市白银区 Baiyin District, Baiyin City, Gansu Province	104°19'E	36°53'N	1702	公园 Garden
JC	一年生早熟禾(金昌) <i>P. annua</i> L.(Jinchang)	甘肃金昌市金川区 Jinchuan District, Jinchang City, Gansu Province	102°18'E	38°51'N	1568	公园 Garden
XH	一年生早熟禾(西和) <i>P. annua</i> L.(Xihe)	甘肃陇南市西和县 Xihe County, Longnan City, Gansu Province	105°30'E	34°04'N	1503	农田 Farmland
ZQ	一年生早熟禾(舟曲) <i>P. annua</i> L.(Zhouqu)	甘肃甘南州舟曲县 Zhouqu County, Gannan Prefecture, Gansu Province	104°22'E	33°46'N	1420	路边 Roadside

量采用硫代巴比妥酸比色法测定^[17]。游离脯氨酸(Free prolin, Pro)含量采用茚三酮-磺基水杨酸法测定^[18]。可溶性蛋白(Soluble proline, SP)含量采用考马斯亮蓝法测定^[18]。可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量采用蒽酮法测定^[19]。钠离子、钾离子、钙离子含量:分别取植物叶片与根系样品,经烘干至恒重后研磨粉碎。准确称取 0.5 g 粉末置于消煮管中,按设定程序进行分阶段消煮:依次于 120℃保持 30 min、150℃保持 30 min、215℃保持 60 min;消煮液冷却后,用蒸馏水定容,采用原子吸收分光光度计测定其中钠、钾、钙离子的含量^[20]。

1.4 耐盐性综合评价方法

主成分分析法:对野生一年生早熟禾在盐胁迫下的 14 个指标(包括株高、叶长、叶宽、相对电导率和丙二醛、游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量,叶片及根系钠离子、钾离子和钙离子含量)进行主成分分析,提取特征值大于 1 的主成分,得到其中特征向量较大的指标作为 10 份一年生早熟禾种质耐盐性评价的关键指标^[21]。

隶属函数法综合评价:通过主成分分析提取的关键综合指标权重由其方差贡献率确定,权重计算公式为: $W_j = P_j / \sum_{i=1}^n P_j$ 。式中: P_j 为某个综合指标的贡献率^[22]。根据隶属函数公式,计算主成分分

析法筛选出的单个指标隶属函数值。在采用隶属函数法进行综合评价时,为消除各指标量纲差异,需依据其与植物耐盐性的相关性,分别对原始测定值进行标准化转换:与耐盐性呈正相关的指标,其隶属函数值公式为: $U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$;与耐盐性呈负相关的指标,其隶属函数值公式为: $U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$;式中: $U(X_i)$ 指某个指标的隶属函数值, X_i 则是该指标测定值, $X_{\max}$ 是 10 个供试材料中该指标的最大值, $X_{\min}$ 是 10 个供试材料中该指标的最小值^[22]。

1.5 数据处理及分析

采用 Excel 2021 进行数据统计、整理及绘图, SPSS 27.0 处理数据并进行单因素方差分析、主成分分析,采用单因素方差分析(ANOVA)对多组样本进行分析处理,采用 Duncan 极差法开展多重比较,应用模糊数学中隶属函数法对 10 个野生一年生早熟禾种质进行耐盐性综合性评价^[23]。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对一年生早熟禾形态特征的影响

2.1.1 盐胁迫下一年生早熟禾的盐害等级 对一年生早熟禾进行盐胁迫处理后,10 个种质的植株叶

片均出现不同程度的发黄、萎蔫等现象(图 1)。土壤含盐量 0.8% 时,LZ 和 JQ 种质的盐害等级为 2 级,其余种质为 3 级,说明 LZ 和 JQ 种质的生长状态受盐胁迫的影响相对较小(表 2)。

表 2 不同含盐量处理下一年生早熟禾的盐害等级

Table 2 The salt damage grade of the next year of *Poa annua* L. was treated with different salt concentrations

土壤含盐量 Soil salt content/%	盐害等级 Salt hazard grade/grade									
	LZ	JC	ZY	WW	HZ	BY	ZQ	JQ	MJ	XH
0.2(CK)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5(T ₁)	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
0.8(T ₂)	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3
1.1(T ₃)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

注:CK,T₁,T₂和 T₃分别表示土壤含盐量为 0.2%,0.5%,0.8%和 1.1%的处理。下同
Note: CK, T₁, T₂, and T₃ denote treatments with soil salinity contents of 0.2%, 0.5%, 0.8%, and 1.1%, respectively. The same as below

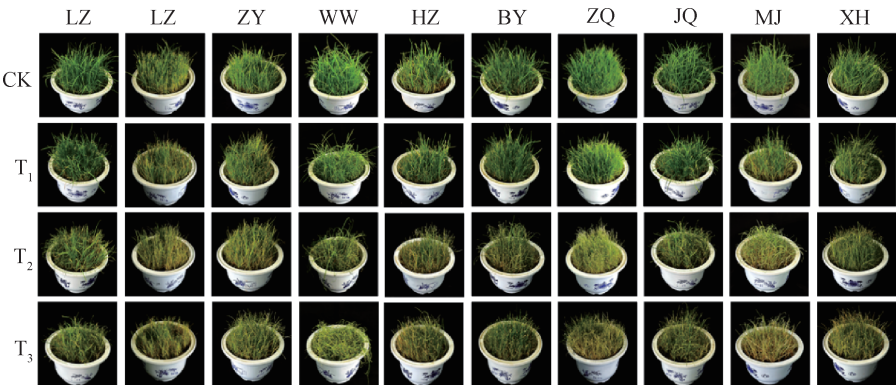


图 1 盐胁迫对一年生早熟禾种质生长的影响

Fig. 1 Effect of salt stress on germplasm growth of *P. annua* L. accessions

2.1.2 盐胁迫对一年生早熟禾株高的影响 由图 2 可知,随着土壤含盐量的升高,10个野生一年生早熟禾种质株高呈下降趋势。T₁处理下,JC,WW,HZ,ZQ和 JQ 种质的株高显著低于对照(CK)($P<0.05$),

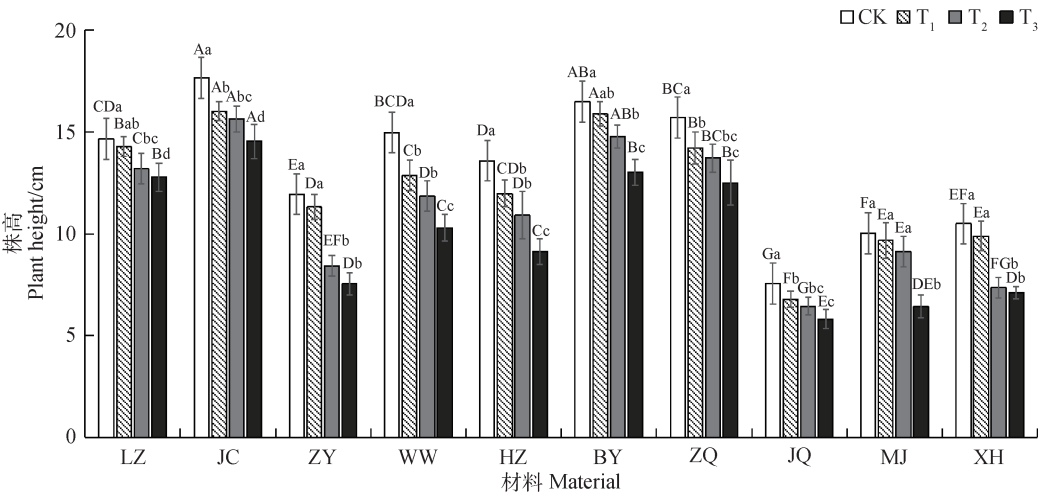


图 2 盐胁迫对一年生早熟禾株高的影响

Fig. 2 The effect of salt stress on the plant height of *Poa annua* L.

注:不同小写字母表示同一材料不同处理间差异显著,不同大写字母表示同一处理下不同材料间差异显著($P<0.05$)。CK,T₁,T₂和 T₃分别表示土壤含盐量为 0.2%,0.5%,0.8%和 1.1%的处理。下同
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different gradients of the same material, different uppercase letters under the same treatment indicate significant differences between the 10 materials ($P<0.05$). CK, T₁, T₂, and T₃ denote treatments with soil salinity contents of 0.2%, 0.5%, 0.8%, and 1.1%, respectively. The same as below

其余种质的株高与CK相比差异不显著,其中WW降低幅度最大,LZ降低幅度最小,相比CK分别降低了14.16%和2.59%。 T_3 处理下,所有种质的株高均显著低于CK($P<0.05$),ZY降幅最大,LZ降幅最小,分别较CK降低了36.89%和12.74%。 T_3 处理下,JC种质株高显著大于其他种质($P<0.05$),JQ种质株高显著小于除MJ外的其他种质($P<0.05$)。

2.1.3 盐胁迫对一年生早熟禾叶长、叶宽的影响
由图3可知,随着土壤含盐量的升高,10个野生一年生早熟禾种质的叶长整体呈下降趋势。 T_1 处理下,除JQ,MJ和XH种质的叶长显著低于CK外($P<0.05$),

其余种质的叶长与CK差异不显著,其中HZ降幅最小,JQ降幅最大,分别较CK下降了1.79%和20.19%。 T_2 处理下,除LZ,ZQ,JQ,MJ和XH种质的叶长显著低于CK外($P<0.05$),其余种质的叶长与CK相比差异不显著,其中ZY降幅最小,JQ降幅最大,分别较CK下降了5.95%和27.95%。 T_3 处理下,除JC外,其余9个种质的叶长均显著低于CK($P<0.05$),其中JC降幅最小,MJ降幅最大,分别较CK下降了14.25%和48.61%;JC种质叶长显著大于除WW和BY以外的其他种质($P<0.05$),JQ种质叶长最短,显著小于除MJ和XH以外的其他种质($P<0.05$)。

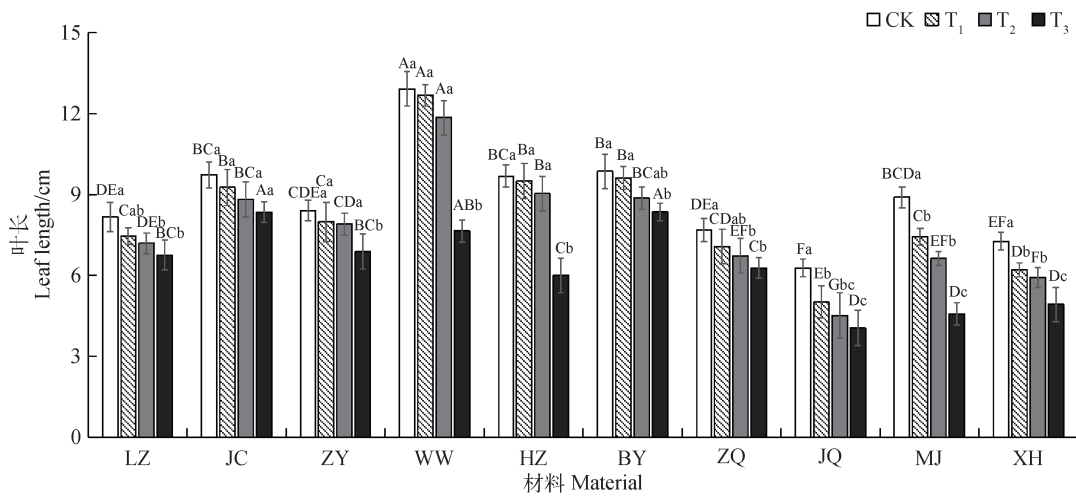


图3 盐胁迫对一年生早熟禾叶长的影响

Fig. 3 The effect of salt stress on the leaf length of *Poa annua* L.

如图4所示,随着土壤含盐量的升高,10个野生一年生早熟禾种质的叶宽呈下降趋势。 T_1 处理下,仅HZ和MJ的叶宽显著小于CK($P<0.05$),BY降幅最小,MJ降幅最大,两者较CK分别下降了

1.48%和36.27%。 T_2 处理下,JC,HZ,ZQ,JQ和MJ的叶宽显著小于CK,ZY降幅最小,MJ降幅最大,两者较CK分别下降了

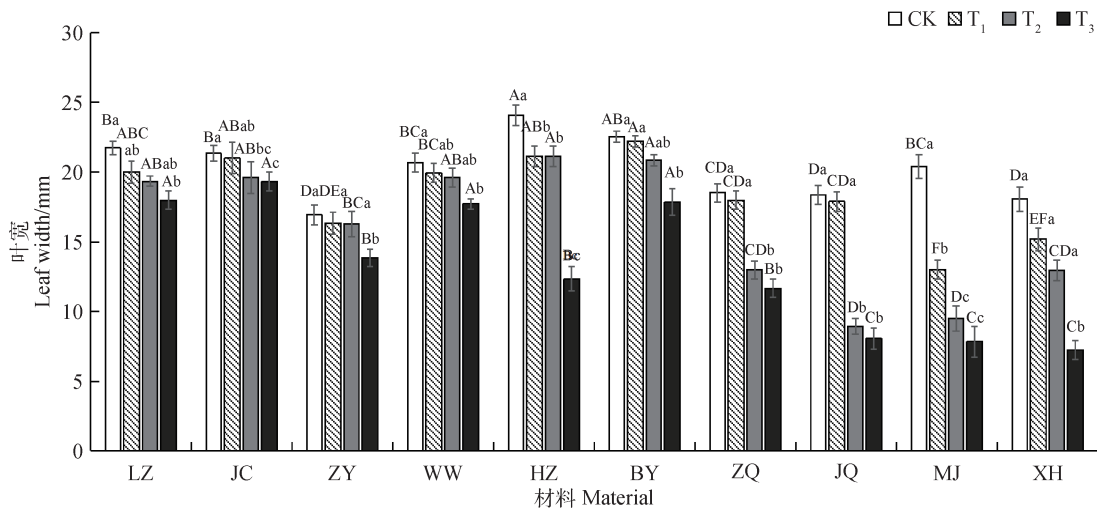


图4 盐胁迫对一年生早熟禾叶宽的影响

Fig. 4 Effect of salt stress on Leaf width of *Poa annua* L.

JC降幅最小,MJ降幅最大,与CK相比分别下降了9.38%和61.44%;LZ,JC,WW和BY种质叶宽显著大于其他种质($P<0.05$),JQ,MJ和XH种质叶宽显著小于其他种质($P<0.05$)。

2.2 盐胁迫对一年生早熟禾细胞膜系统的影响

2.2.1 盐胁迫对一年生早熟禾叶片相对电导率的影响

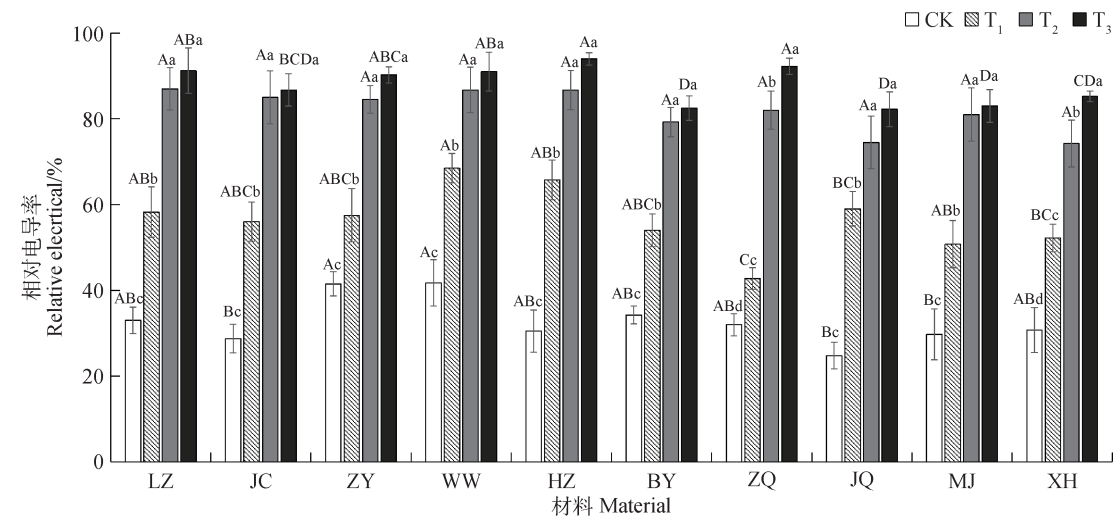


图5 盐胁迫对一年生早熟禾叶片相对电导率的影响

Fig. 5 Effect of salt stress on the relative electrical conductivity of leaves of *Poa annua* L.

2.2.2 盐胁迫对一年生早熟禾叶片丙二醛含量的影响 由图6可知,随着土壤含盐量的升高,供试材料叶片丙二醛含量逐渐升高。T₁处理下,所有种质叶片丙二醛含量与CK均差异不显著,与CK相比MJ种质增幅最大,为60.07%,JQ增幅最小,为2.73%。T₂处理下,LZ,JC,BY,ZQ,JQ,MJ和

一年生早熟禾种质叶片相对电导率呈逐渐升高趋势。T₁处理下,所有种质的叶片相对电导率均显著高于CK($P<0.05$),其中JQ种质增幅最大,为138.38%,ZQ增幅最小,为33.59%。T₃处理下,除ZQ和XH外,其余种质与T₂处理相比均差异不显著,JQ种质与CK相比增幅最大,ZY增幅最小,分别增长了232.32%和117.47%。BY,JQ,MJ和XH种质叶片相对电导率显著小于除JC外的其他种质($P<0.05$)。

XH种质丙二醛含量与CK相比显著升高($P<0.05$),其中MJ种质增幅最大,为310.32%,WW增幅最小,为56.45%。T₃处理下,所有种质丙二醛含量均显著高于CK($P<0.05$),其中LZ,ZY和WW的丙二醛含量显著高于T₂处理($P<0.05$),MJ种质与CK相比增幅最大,为355.27%,JQ增幅

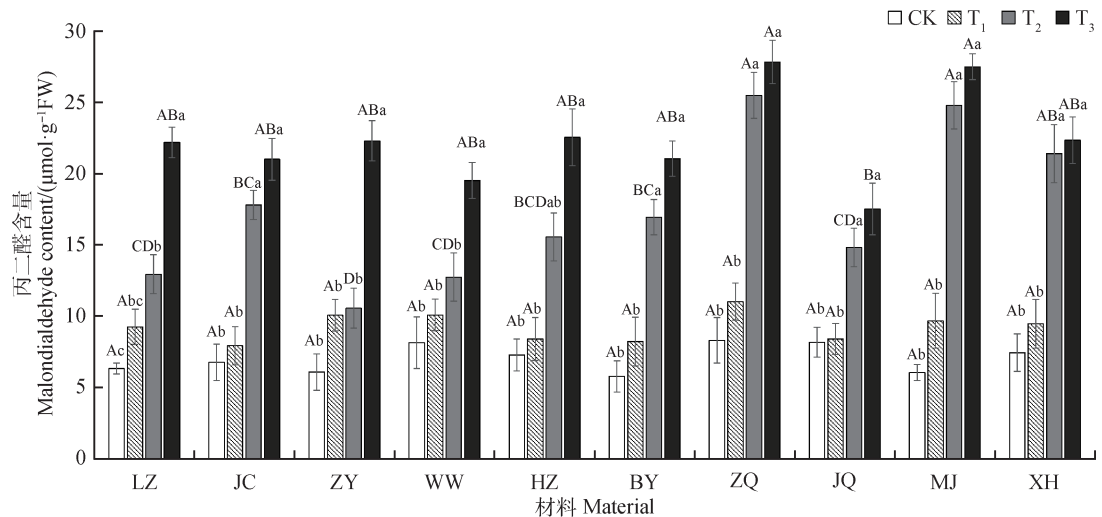


图6 盐胁迫对一年生早熟禾叶片丙二醛含量的影响

Fig. 6 Effect of salt stress on malondialdehyde content in leaves of *Poa annua* L.

最小,为114.61%;JQ种质叶片丙二醛含量显著小于ZQ和MJ种质($P<0.05$),除JQ以外的其他种质叶片丙二醛含量差异不显著。

2.3 盐胁迫对一年生早熟禾渗透调节物质的影响

2.3.1 盐胁迫对一年生早熟禾叶片游离脯氨酸含量的影响 由图7可知,随着土壤含盐量的升高,10个种质叶片游离脯氨酸含量呈逐渐升高趋势。 T_1 处理下,LZ和JQ种质与CK相比显著升高($P<0.05$),

MJ种质增幅最大,为165.70%,JC种质增幅最小,为18.50%。 T_2 处理下,所有种质的游离脯氨酸含量均与CK相比显著升高($P<0.05$),JQ种质增幅最大,为551.81%,ZY增幅最小,为170.38%。 T_3 处理下,除HZ和MJ种质丙二醛含量与 T_2 处理差异不显著外,其余材料与 T_2 处理均差异显著($P<0.05$),相较于CK,JQ丙二醛含量增幅最大,达656.72%,JC增幅最小,为242.35%;ZQ种质游离脯氨酸含量显著小于WW,JQ和XH种质($P<0.05$)。

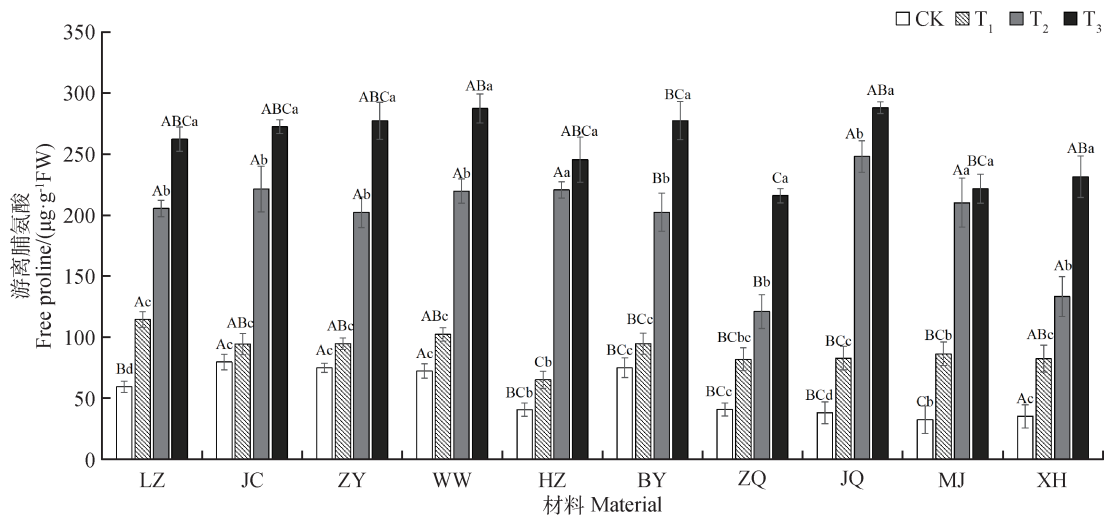


图7 盐胁迫对一年生早熟禾叶片游离脯氨酸含量的影响

Fig. 7 The effect of salt stress on the content of free proline in the leaves of *Poa annua* L.

2.3.2 盐胁迫对一年生早熟禾叶片可溶性糖含量的影响 由图8可知,随着土壤含盐量的升高,各种质叶片可溶性糖含量呈逐渐升高趋势。 T_1 处理下,除JQ和XH种质可溶性糖含量与CK差异显著外($P<0.05$),其余种质与CK相比均差异不显著,

ZQ种质增幅最大,为76.45%,HZ增幅最小,为2.61%。 T_2 处理下,ZY,WW和HZ种质与CK差异不显著,其余种质与CK均差异显著($P<0.05$),其中MJ种质增幅最大,为159.67%,HZ增幅最小,为13.30%。 T_3 处理下,所有种质叶片可溶性

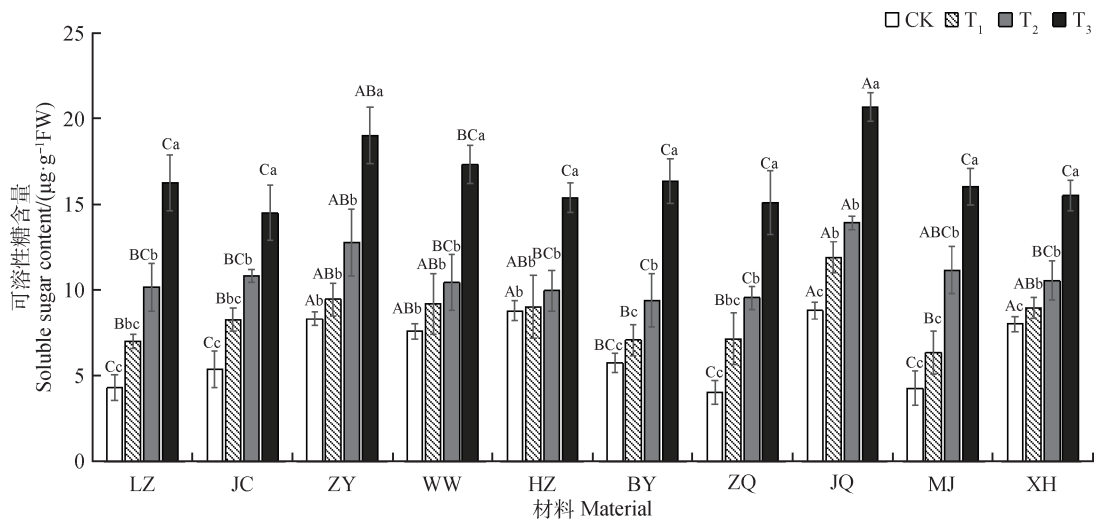


图8 盐胁迫对一年生早熟禾叶片可溶性糖含量的影响

Fig. 8 Effect of salt stress on the soluble sugar content in the leaves of *Poa annua* L.

糖含量与CK相比显著升高($P<0.05$), LZ种质增幅最大, 为277.30%, HZ增幅最小, 为74.91%; JQ种质叶片可溶性糖含量显著大于除ZY外的其他种质($P<0.05$), 除ZY和JQ外, 其余8个种质叶片可溶性糖含量差异不显著。

2.3.3 盐胁迫对一年生早熟禾叶片可溶性蛋白含量的影响 由图9可知, 随着土壤含盐量的升高, LZ, JC, ZY, WW, ZQ, MJ和XH种质叶片可溶性蛋白含量呈先上升后下降趋势, HZ, BY和JQ种质叶片可溶性蛋白含量呈逐渐上升趋势。T₁处理下, 10个种质叶片可溶性蛋白含量与CK相比显著升高

($P<0.05$), WW种质增幅最大, 为46.97%, XH增幅最小, 为5.45%。T₂处理下, LZ, JC, ZY, WW, ZQ, MJ和XH种质叶片可溶性蛋白含量达到最大值, WW种质与CK相比增幅最大, 为115.15%, XH增幅最小, 为17.09%。T₃处理下, HZ, BY和JQ种质叶片可溶性蛋白含量达到最大值, 所有种质与CK相比显著升高($P<0.05$), JQ种质增幅最大, 为71.83%, MJ增幅最小, 为10.80%; JQ种质叶片可溶性蛋白含量显著大于其他种质($P<0.05$), MJ种质叶片可溶性蛋白含量显著小于其他种质($P<0.05$)。

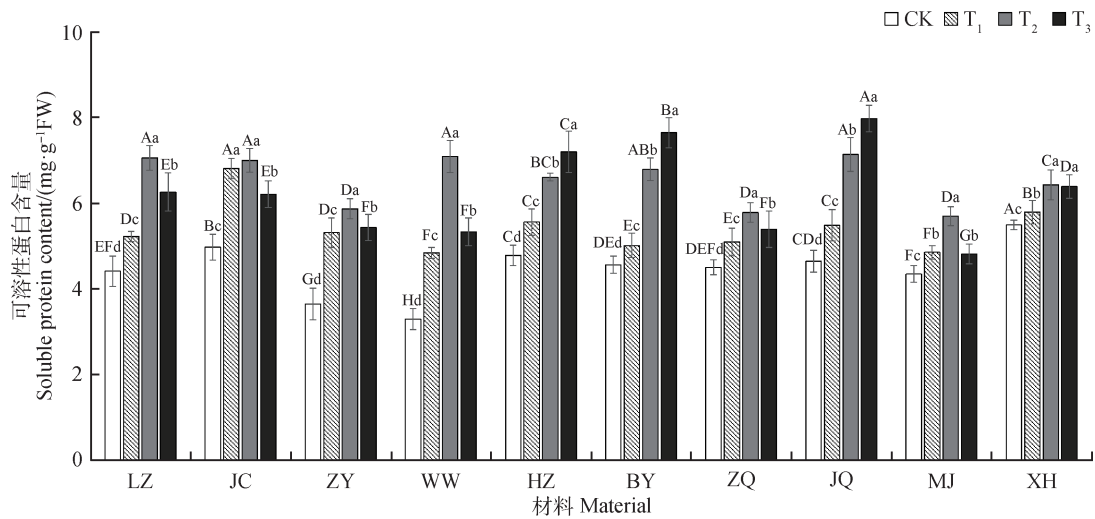


图9 盐胁迫对一年生早熟禾叶片可溶性蛋白含量的影响

Fig. 9 Effect of salt stress on the content of soluble protein in the leaves of *Poa annua* L.

2.4 盐胁迫对一年生早熟禾 Na⁺含量的影响

2.4.1 盐胁迫对叶片 Na⁺含量的影响 由图10可知, 随着土壤含盐量的升高, 10个种质叶片 Na⁺含

量呈逐渐升高趋势。T₁处理下, 仅WW种质与CK相比差异显著($P<0.05$), 其余种质与CK差异不显著, WW种质增幅最大, 为11.21%, XH增幅最

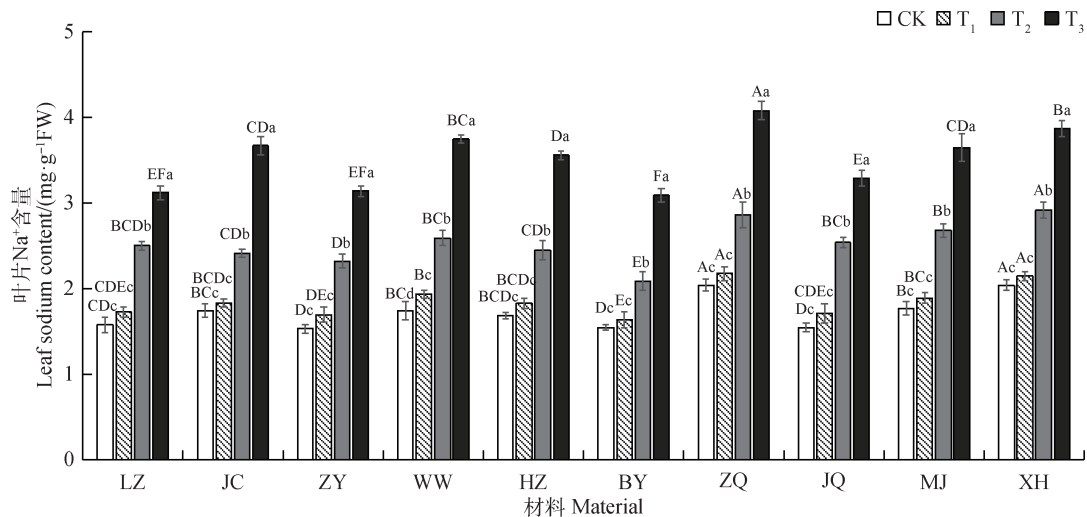


图10 盐胁迫对一年生早熟禾叶片钠离子含量的影响

Fig. 10 Effects of salt stress on sodium ion content in leaves of *Poa annua* L.

小,为5.15%。 T_2 处理下,所有种质叶片 Na^+ 含量与CK相比显著升高($P<0.05$),JQ种质增幅最大,为64.27%,BY增幅最小,为35.15%。 T_3 处理下,WW种质叶片 Na^+ 含量与CK相比增幅最大,为115.52%,XH增幅最小,为89.71%;ZQ种质叶片 Na^+ 含量显著大于其他种质($P<0.05$),LZ,ZY和BY种质之间无显著差异。

2.4.2 盐胁迫对根系 Na^+ 含量的影响 由图11可知,随着土壤含盐量的升高,10个种质根系 Na^+ 含量呈逐渐升高趋势。 T_1 处理下,WW和JQ种质根系

Na^+ 含量与CK相比显著升高($P<0.05$),JQ种质增幅最大,为27.90%,ZQ增幅最小,为5.80%。 T_2 处理下,所有种质根系 Na^+ 含量与CK相比均显著升高($P<0.05$),JQ种质增幅最大,为65.61%,BY增幅最小,为36.25%。 T_3 处理下,所有种质根系 Na^+ 含量显著高于 T_2 处理($P<0.05$),WW种质根系 Na^+ 含量与CK相比增幅最大,为117.08%,ZQ增幅最小,为290.88%;XH种质根系 Na^+ 含量显著大于除ZQ的其他种质($P<0.05$),JC,ZY和BY种质根系 Na^+ 含量显著小于除JQ的其他种质($P<0.05$)。

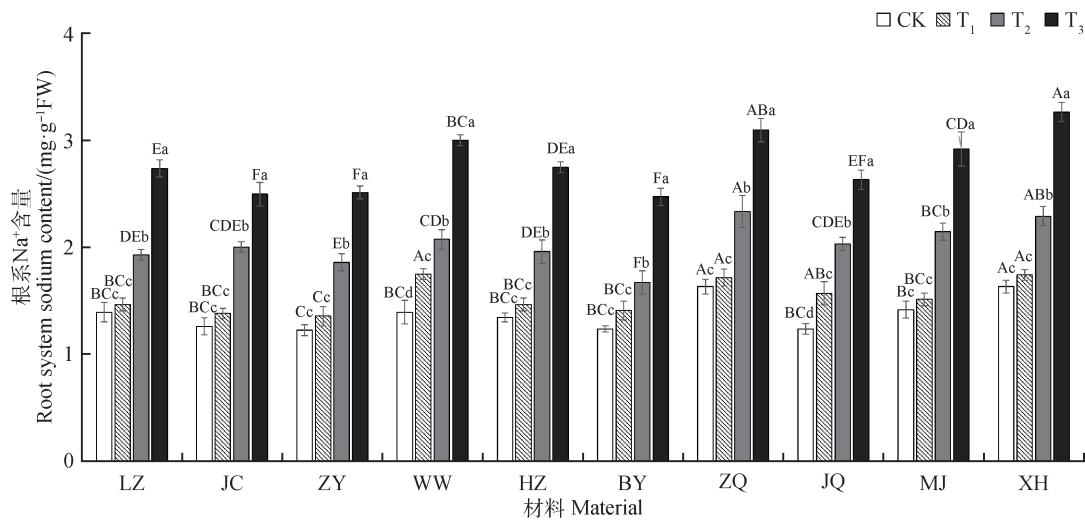


图11 盐胁迫对一年生早熟禾根系钠离子含量的影响

Fig. 11 Effects of salt stress on sodium ion content in root system of *Poa annua* L.

2.5 盐胁迫对一年生早熟禾 K^+ 含量的影响

2.5.1 盐胁迫对叶片 K^+ 含量的影响 由图12可知,随着土壤含盐量的升高,各种质叶片 K^+ 含量呈逐渐下降的趋势。 T_1 处理下,除WW,BY,JQ,MJ

和XH外,其余种质叶片 K^+ 含量均与CK相比显著下降($P<0.05$),ZY降幅最大,BY降幅最小,分别下降了8.28%和3.14%。 T_2 处理下,所有种质叶片 K^+ 含量与对照相比显著降低($P<0.05$),ZQ种

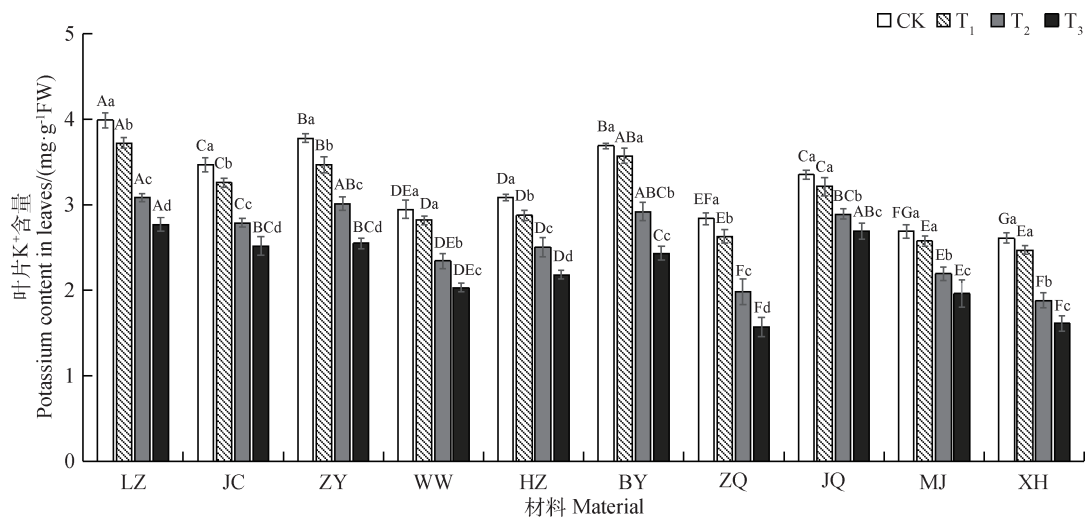


图12 盐胁迫对一年生早熟禾叶片钾离子含量的影响

Fig. 12 Effects of salt stress on potassium ion content in leaves of *Poa annua* L.

质降幅最大,为30.25%,JQ种质降幅最小,为13.79%。 T_3 处理下,ZQ降幅最大,JQ降幅最小,相比CK分别降低了44.69%和19.72%;LZ种质叶片 K^+ 含量显著大于除JQ外的其他种质($P<0.05$),ZQ和XH种质叶片 K^+ 含量显著小于其他种质($P<0.05$)。

2.5.2 盐胁迫对根系 K^+ 含量的影响 由图13可知,随着土壤含盐量的增加,各种质根系 K^+ 含

量呈逐渐下降的趋势。从 T_1 处理开始,所有种质各处理与CK相比均显著下降($P<0.05$),且各材料 T_1 , T_2 , T_3 处理间均差异显著($P<0.05$)。 T_3 处理下,ZQ根系 K^+ 含量降幅最大,JQ降幅最小,相比CK分别降低了51.99%和31.19%;JQ种质根系 K^+ 含量显著大于其他种质($P<0.05$),ZQ种质根系 K^+ 含量显著小于其他种质($P<0.05$)。

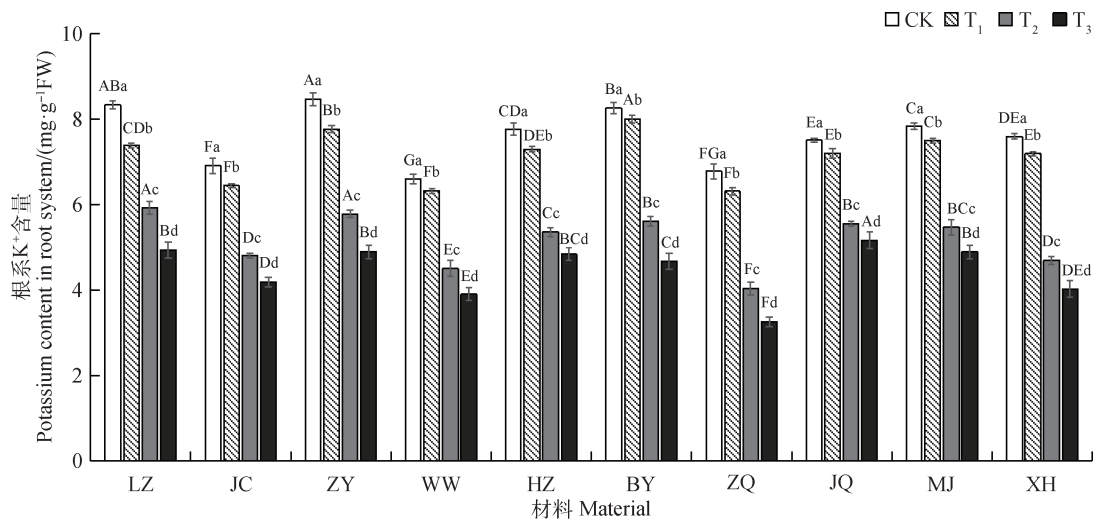


图13 盐胁迫对一年生早熟禾根系钾离子含量的影响

Fig. 13 Effects of salt stress on potassium ion content in root system of *Poa annua* L.

2.6 盐胁迫对一年生早熟禾 Ca^{2+} 含量的影响

2.6.1 盐胁迫对叶片 Ca^{2+} 含量的影响 由图14可知,随着土壤含盐量的升高,LZ,ZY和ZQ种质叶片 Ca^{2+} 含量呈先上升后下降的趋势, T_1 处理最高,其余7个种质叶片 Ca^{2+} 含量逐渐下降。 T_1 处理下,LZ和ZY种质与CK相比显著上升($P<0.05$),JC,WW,

HZ,BY和XH种质与CK相比显著下降($P<0.05$),JC降幅最大,为15.93%。 T_2 处理下,所有种质与CK相比均显著降低($P<0.05$),LZ种质降幅最大,为33.11%,WW种质降幅最小,为15.70%。 T_3 处理下,除WW,BY和JQ叶片 Ca^{2+} 含量显著低于 T_2 处理外($P<0.05$),其余7个种质叶片 Ca^{2+} 含量与 T_2 处

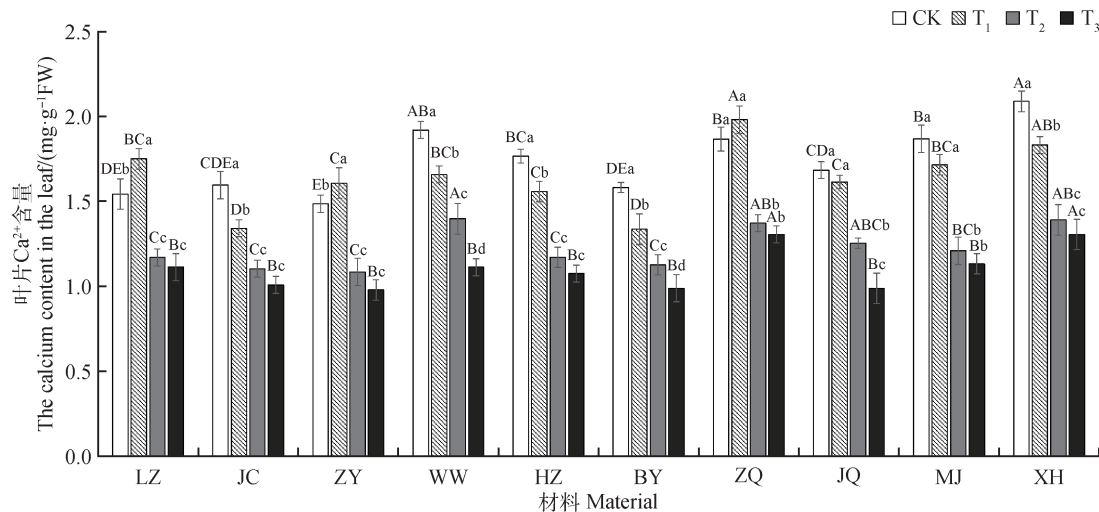


图14 盐胁迫对一年生早熟禾叶片钙离子含量的影响

Fig. 14 Effects of salt stress on calcium ion content in leaves of *Poa annua* L.

理差异不显著,JQ降幅最大,ZQ降幅最小,相比CK分别降低了21.17%和4.90%;除ZQ和XH种质叶片 Ca^{2+} 含量显著大于其他种质($P<0.05$)外,其余种质之间无显著差异。

2.6.2 盐胁迫对根系 Ca^{2+} 含量的影响 由图15可知,随着土壤含盐量的升高,除JC和ZQ种质根系 Ca^{2+} 含量呈先上升后下降的趋势外,其余种质呈逐渐降低的趋势。 T_1 处理下,JC种质根系 Ca^{2+} 含量与CK相比显著上升($P<0.05$),LZ,WW,HZ,BY和MJ种质与CK相比显著下降($P<0.05$),LZ降幅最

大,为15.27%。 T_2 处理下,所有种质根系 Ca^{2+} 含量与CK相比均显著降低($P<0.05$),XH种质降幅最大,为34.89%,JC种质降幅最小,为23.58%。 T_3 处理下,除WW和JQ根系 Ca^{2+} 含量显著低于 T_2 处理外($P<0.05$),其余8个种质根系 Ca^{2+} 含量与 T_2 处理差异不显著,WW降幅最大,JC降幅最小,相比CK分别降低了41.66%和27.34%。HZ,ZQ和MJ种质根系 Ca^{2+} 含量显著大于除JC,WW和XH的其他种质($P<0.05$),LZ和JQ种质根系 Ca^{2+} 含量显著小于除ZY和BY的其余种质($P<0.05$)。

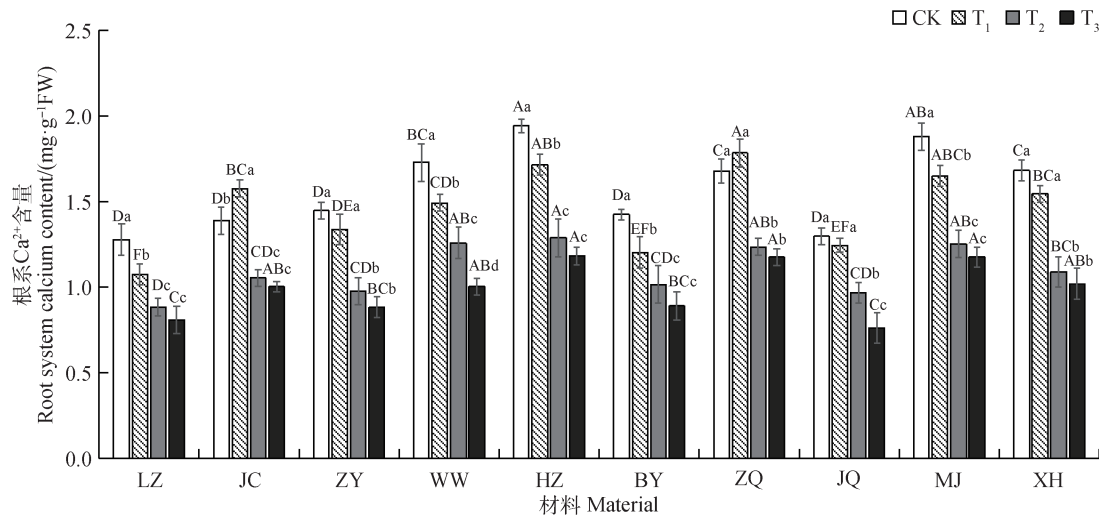


图15 盐胁迫对一年生早熟禾根系钙离子含量的影响

Fig. 15 Effects of salt stress on calcium ion content in root system of *Poa annua* L.

2.7 盐胁迫下一年生早熟禾种质耐盐性评价

2.7.1 盐胁迫下一年生早熟禾耐盐指标主成分分析

通过主成分降维的方法对盐胁迫下一年生早熟禾的14个生理指标进行主成分分析,结果表明,第1至第4主成分累积贡献率为88.202%(表3),可作为评价耐盐性的主要指标。因此,选第1至第4主成分中较大特征向量的叶长、叶宽、相对电导率、丙二醛含量、可溶性蛋白含量、叶片钾离子含量、根系钾离子含量和叶片钙离子含量8个指标作为评价一年生早熟禾种质耐盐性的关键指标。

2.7.2 盐胁迫下一年生早熟禾种质耐盐性综合评价

以8个指标作为一年生早熟禾耐盐性评价指标,通过隶属函数法进行综合评价,结果显示,10个一年生早熟禾种质的隶属函数值在0.26~0.68之间(表4),其中LZ综合评价价值最高,耐盐性最强;MJ综合评价价值最低,耐盐性最弱。耐盐性由强至弱依次是 LZ>JQ>BY>JC>ZY>WW>HZ>ZQ>XH>MJ。

3 讨论

3.1 盐胁迫对一年生早熟禾生长状况的影响

多数植物幼苗在遭受盐胁迫时,会出现叶片卷缩^[24],以及株高、根长、含水量等降低的生理干旱症状。这实际上是植株对逆境的一种适应机制,也是其自我保护的一种方式^[25],盐胁迫下表型变化是最为直观的表现。本试验中,随着土壤含盐量的升高,10个一年生早熟禾种质盐害情况均逐步加重,不同种质在同一处理下盐害情况有一定的差异,这表明不同种质材料的耐盐性存在差异。随着盐胁迫强度的增加,10个一年生早熟禾种质的株高、叶长和叶宽均呈现下降趋势,相同盐分处理下,不同种质之间的盐害程度存在明显差异。1.1%盐浓度胁迫下,ZY株高降幅最大,LZ降幅最小,这种差异直观地体现了不同种质在耐盐能力方面的显著区别。贾新平等^[26]的研究证实,随着NaCl盐胁迫增强,海滨雀稗的株高、叶长和叶宽均呈显著下降趋势。一年生早熟禾在高浓度盐胁迫下株高、叶长和叶宽显著降低,这与

表 3 一年生早熟禾种质耐盐指标主成分分析

Table 3 Principal component analysis of salt tolerance index of wild *Poa annua* L.

变量 Variable	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
	Principal component 1	Principal component 2	Principal component 3	Principal component 4
株高 plant height	0.008	0.273	0.009	0.264
叶长 Leaf length	0.041	0.27	0.041	0.002
叶宽 Leaf width	0.064	0.259	0.026	-0.085
相对电导率 Relative conductivity	0.04	-0.14	0.022	0.631
丙二醛 Malondialdehyde	0.113	-0.017	0.478	0.018
游离脯氨酸 Free proline	0.13	0.042	0.299	-0.181
可溶性糖 Soluble sugar	0.089	-0.17	0.193	-0.406
可溶性蛋白 Soluble protein	0.085	-0.056	0.198	0.593
叶片钠离子 Leaf sodium ions	0.13	-0.021	-0.249	-0.039
根系钠离子 Root sodium ions	0.126	0.067	-0.299	0.101
叶片钾离子 Leaf potassium ions	0.138	0.02	-0.172	-0.072
根系钾离子 Root potassium ions	0.103	-0.134	-0.398	-0.014
叶片钙离子 Leaf calcium ions	-0.133	-0.016	0.2	0.036
根系钙离子 Root calcium ions	-0.122	0.038	-0.247	0.051
特征值 Eigenvalue	6.787	3.411	1.193	0.957
贡献率 Contribution rate/%	48.479	24.365	8.522	6.836
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	48.479	72.845	81.366	88.202

表 4 一年生早熟禾隶属函数值及耐盐性综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of membership function and salt tolerance of 10 wild *Poa annua* L.

材料 Material	隶属函数值 Subordinate function vaule								综合评价值 Comprehensive evaluate	排序 Rank
	H	LL	REC	MDA	SP	LK	RK	LCa		
LZ	1.00	0.91	0.49	0.43	0.51	0.56	0.54	1.00	0.68	1
JC	0.80	1.00	0.27	0.60	0.23	0.69	0.60	0.36	0.57	4
ZY	0.00	0.89	1.00	0.37	0.63	0.48	0.47	0.56	0.55	5
WW	0.23	0.23	1.00	0.90	0.84	0.54	0.53	0.00	0.53	6
HZ	0.17	0.31	0.21	0.60	0.65	0.62	0.68	0.20	0.43	7
BY	0.66	0.97	0.80	0.38	0.93	0.43	0.41	0.32	0.61	3
ZQ	0.68	0.88	0.38	0.50	0.15	0.00	0.00	0.85	0.43	8
JQ	0.57	0.38	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05	0.63	2
MJ	0.04	0.00	0.46	0.00	0.00	0.70	0.69	0.19	0.26	10
XH	0.19	0.48	0.48	0.64	0.09	0.26	0.24	0.32	0.34	9

孙聪聪等^[27]的研究结果一致,即 0.3% 的 NaCl 盐胁迫会显著抑制银杏幼苗的叶长、叶宽及叶面积增长。

3.2 盐胁迫对一年生早熟禾细胞膜系统的影响

植物细胞膜是控制物质进出细胞以及实现细胞间信息交流的关键结构,它作为选择性屏障,能有效阻挡有害物质进入细胞^[28]。盐胁迫导致植物体内渗透势升高,抑制其对水分和养分的吸收,进而损伤膜脂与膜蛋白,增加质膜透性^[29]。相对电导率是表征植物细胞膜受损程度的关键指标,其升高直接反映质膜透性增大及细胞膜结构破坏^[30]。本试验结果表明,盐胁迫下 10 个一年生早熟禾种质的相对电导率均显著上升,表明质膜透性增大、电解质外渗加剧。在 0.5% 土壤含盐量下,质膜透性增幅较小;当含盐量增至 0.8% 时,所有种质较对照

(CK)均表现出显著增强的膜透性,且种质间差异显著;而在 1.1% 高盐胁迫下,各供试种质的质膜系统均遭受严重破坏,JQ 种质与对照相比增幅最大,ZQ 种质与对照相比增幅最小。

丙二醛(MDA)是植物细胞膜发生脂质过氧化作用时形成的关键产物。在逆境胁迫条件下,植物体内 MDA 会大量积累^[31],其含量高低可直接反映细胞膜受损的严重程度,同时也可用于评估植物对逆境胁迫的抵抗能力强弱,因此成为衡量植物耐盐性的重要生理指标之一^[32]。MDA 含量反映膜过氧化的强度,其含量高低和细胞膜受损情况呈正比,与抗逆性呈反比^[33]。本试验中,随着盐胁迫程度的加剧,10 个一年生早熟禾种质叶片中 MDA 含量均呈持续上升趋势,JQ 种质较对照(CK)增幅最小,ZQ 种质较对照(CK)增幅最大,一年生早熟禾叶片质膜过氧化

作用加重。这与刘文瑜等^[34]有关NaCl胁迫对藜麦幼苗生长和生理特性的影响研究结果一致。

3.3 盐胁迫对一年生早熟禾渗透调节系统的影响

在盐逆境条件下,一年生早熟禾通过积累游离脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质作出响应,且二者含量均与胁迫强度呈正相关。这表明游离脯氨酸和可溶性糖在一年生早熟禾遭受盐胁迫时发挥了渗透调节功能,帮助其维持细胞内的水分平衡和渗透压稳定。而可溶性蛋白含量在胁迫初期上升,但随着胁迫程度的加剧又逐渐下降,说明可溶性蛋白在一年生早熟禾抵御渗透失衡过程中虽有一定贡献,但其调节能力存在局限性^[35]。本试验结果表明,在盐胁迫条件下,耐盐性较强的种质(如JQ和BY)游离脯氨酸含量的增加幅度较大,而耐盐性较弱的种质(如MJ和ZQ)游离脯氨酸含量的增幅较小。此外,耐盐性较弱的种质(如MJ和ZQ)在0.5%的盐胁迫下,可溶性蛋白含量表现出下降趋势或降幅较大;相比之下,耐盐性较强的种质(如JQ)在1.1%的盐胁迫下,其可溶性蛋白含量才开始下降。

在盐胁迫环境中,植株对Na⁺的过度摄取会抑制K⁺的吸收与利用,两种离子呈现显著拮抗,成为Na⁺毒害的关键机制之一。Ca²⁺是维持植物细胞膜结构与功能的关键因子。在盐胁迫下,Na⁺的过量积累会竞争性抑制植物对Ca²⁺的吸收,扰乱细胞离子稳态,进而导致植株营养失衡^[36],不利于植物的生长发育。盐胁迫下,Na⁺大量进入细胞直接影响Ca²⁺在细胞内的分布^[37]。本试验表明,在盐胁迫环境中,植物细胞内的Ca²⁺与Na⁺含量常呈现此消彼长的负相关关系。随着Na⁺的过量积累,Na⁺会逐步取代质膜上的Ca²⁺,破坏膜结构的稳定性与选择性,导致膜通透性异常升高。这一变化引发Na⁺持续内流,同时细胞内营养物质和渗透调节物质向外渗漏,有毒物质逐渐积累。此外,膜脂过氧化作用加剧,类囊体膜等生物膜系统的结构与功能受损,最终严重抑制植物的正常生长发育^[38]。

3.4 一年生早熟禾耐盐性综合评价

主成分分析可以将多个变量简化成少数综合变量且可以评价品种对环境的适应性^[39]。隶属函数法结合主成分分析的综合指标,能够有效评估不同种质资源的耐盐性差异^[40],准确反映其耐盐能力的强弱。植物的耐盐性是由多个基因相互作用调控的,

同时还受遗传背景和环境条件的双重影响^[41]。采用综合评价法能够更全面地揭示不同种质材料在耐盐性上的差异^[42]。朱奇萌等^[43]通过主成分分析及隶属函数分析综合评价了10份野生沿阶草种质苗期耐盐性,筛选出苗期较为耐盐的2份沿阶草种质。本试验通过主成分分析,以叶长、叶宽、相对电导率、丙二醛含量、可溶性蛋白含量、叶片钾离子含量、根系钾离子含量和叶片钙离子含量作为耐盐评价指标,通过隶属函数分析对10个一年生早熟禾种质耐盐性进行综合评价。研究结果表明:兰州(LZ)和酒泉(JQ)种质综合表现较好,而西和(XH)和麦积(MJ)种质综合表现较差,该研究可为一年生早熟禾耐盐性研究提供一定的理论依据。后续建议开展田间试验验证,以评估其在实际生境中的适应性与稳定性。

4 结论

随着土壤含盐量的持续升高,10个野生一年生早熟禾种质的生长受到显著抑制,表现为植株矮化和叶片萎蔫。盐胁迫导致其细胞膜系统严重受损,膜透性增大、膜脂过氧化加剧和电解质大量外渗,使其渗透调节系统发生改变。隶属函数综合评价结果表明,兰州(LZ)及酒泉(JQ)种质耐盐性较强,麦积(MJ)和西和(XH)种质耐盐性较弱;10个野生一年生早熟禾种质耐盐性由强至弱排序为:LZ>JQ>BY>JC>ZY>WW>HZ>ZQ>XH>MJ。该结果为我国耐盐草坪草种质资源的选育提供了重要的理论依据与支撑。本试验采用盆栽法,建议后续开展大田验证研究,以进一步提升研究成果的实践指导价值与应用潜力。

参考文献

- [1] 董彦斌,潘海珠,王磊,等. 土壤盐渍化遥感研究的文献计量与可视化分析[J]. 中国农业资源与区划,2024,45(9):236-248
DONG Y B, PAN H Z, WANG L, et al. Bibliometric visualization analysis of soil salinization remote sensing [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024, 45(9):236-248
- [2] WALCHE A, HAILE W, KIFLU A, et al. Spatial analysis and mapping of intensity and types of agricultural salt-affected soils around Abaya and Chamo Lakes, South Ethiopia Rift Valley[J]. Heliyon, 2024, 10(13):e33410
- [3] TÓTH G, HERMANN T, DA SILVA M R, et al. Monitoring soil for sustainable development and land degradation neutrality [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(2):57
- [4] 冯起,尹鑫卫,朱猛,等. 统筹推进西北地区盐碱地综合治理

- 利用:现状、挑战与对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(12):2060-2073
- FENG Q, YIN X W, ZHU M, et al. Overall promotion of integrated management and utilization of saline-alkali land in North-west China: conditions, challenges, and recommendations[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(12):2060-2073
- [5] 火旭堂, 贾昊, 曹兵. NaCl处理对4种牧草植物种子萌发的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(4):1096-1101
- HUO X T, JIA H, CAO B. Effects of NaCl treatment on seed germination of four herbage plants[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(4):1096-1101
- [6] 刘小京. 环渤海缺水盐碱地改良利用技术研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10):1521-1527
- LIU X J. Reclamation and utilization of saline soils in water-scarce regions of Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10):1521-1527
- [7] 朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望[J]. 世界林业研究, 2018, 31(4):70-75
- ZHU J F, CUI Z R, WU C H, et al. Research advances and prospect of saline and alkali land greening in China[J]. World Forestry Research, 2018, 31(4):70-75
- [8] 郭彦军. 重庆市区主要的草坪草种及其利用特点[J]. 草原与草坪, 2002, 22(2):46-50
- GUO Y J. The main turf grass varieties in Chongqing and their utilization characteristics[J]. Grassland and Turf, 2002, 22(2):46-50
- [9] 白小明, 王靖婷, 贺佳圆, 等. 8个野生早熟禾种子萌发期耐盐性研究[J]. 草地学报, 2013, 21(3):546-555
- BAI X M, WANG J T, HE J Y, et al. Salt resistance of eight wild *Poa* L. Varieties during seed germination stages[J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(3):546-555
- [10] 李娟霞, 白小明, 张翠, 等. 不同盐分类型对一年生早熟禾种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7):1131-1140
- LI J X, BAI X M, ZHANG C, et al. Effects of different salt types on seed germination and seedling growth of *Poa annua*[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7):1131-1140
- [11] 刘森, 王志春, 杨福, 等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):1-8
- LIU M, WANG Z C, YANG F, et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):1-8
- [12] 吕优伟, 贺佳圆, 白小明, 等. 9个野生早熟禾对低温胁迫的生理响应及苗期抗寒性评价[J]. 草地学报, 2014, 22(2):326-333
- LV Y W, HE J Y, BAI X M, et al. Evaluation of physiological responses and resistances of nine wild *Poa* to low temperature[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(2):326-333
- [13] 田彦锋, 白小明, 张晓俊, 等. 4种野生早熟禾对土壤酸碱性的生理响应[J]. 草业科学, 2017, 34(12):2445-2453
- TIAN Y F, BAI X M, ZHANG X J, et al. Physiological response of four wild *Poa* to soil pH[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(12):2445-2453
- [14] 田晓岚, 白小明, 闫玉邦, 等. 一年生早熟禾种子萌发适宜温度研究[J]. 草原与草坪, 2024, 44(1):183-192
- TIAN X L, BAI X M, YAN Y B, et al. Study on suitable temperature for seed germination of *Poa annua*[J]. Grassland and Turf, 2024, 44(1):183-192
- [15] 徐景超. 不同种类麦冬耐盐性及盐胁迫缓解效应的研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2023:13
- XU J C. Study on salt tolerance of different species of lilyturf and its alleviating effect of salt stress[D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2023:13
- [16] 林晓华, 卓一林, 柳丽芳, 等. NaCl胁迫对荒漠苔藓齿肋赤藓膜结构稳定性的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(8):3483-3491
- LIN X H, ZHUO Y L, LIU L F, et al. Membrane stability of the desert moss *Syntrichia caninervis* Mitt. during NaCl stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8):3483-3491
- [17] 吴一鸣, 崔会婷, 张昆, 等. 两种白颖苔草对梯度NaCl胁迫的生理生化响应及综合评价[J]. 草地学报, 2024, 32(3):736-745
- WU Y M, CUI H T, ZHANG K, et al. Physiological, biochemical responses and comprehensive evaluation of two *Carex rigescens* varieties in response to gradient NaCl stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(3):736-745
- [18] 裴书瑶, 曹红霞, 张泽宇, 等. 盆栽番茄对NaCl和Na₂SO₄微咸水灌溉的生理响应[J]. 中国农业科学, 2024, 57(3):570-583
- PEI S Y, CAO H X, ZHANG Z Y, et al. Physiological response of potted tomatoes to NaCl and Na₂SO₄ brackish water irrigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(3):570-583
- [19] DE AZEVEDO NETO A D, PRISCO J T, ENÉAS-FILHO J, et al. Hydrogen peroxide pre-treatment induces salt-stress acclimation in maize plants[J]. Journal of Plant Physiology, 2005, 162(10):1114-1122
- [20] 姜黎, 赵振勇, 张科, 等. 角果碱蓬异型性种子植株生长生理指标的差异研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6):1668-1673
- JIANG L, ZHAO Z Y, ZHANG K, et al. Comparison of growth and ecophysiological index of plants grown from heteromorphic seeds of *Suaeda corniculata*[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6):1668-1673
- [21] 孟晨, 鲁雪莉, 宋亦汝, 等. 11份益母草种质材料苗期耐盐性评价与鉴定[J]. 草业学报, 2024, 33(5):196-203
- MENG C, LU X L, SONG Y R, et al. Evaluation and identification of salt tolerance of 11 *Leonurus* germplasm lines at the seedling stage[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2024, 33(5):196-203
- [22] 李春萍, 邱轶辉, 夏厚胤, 等. 紫花苜蓿多父本F₁代低蒸腾及产量性状的隶属函数分析[J]. 草地学报, 2021, 29(7):1416-1422
- LI C P, QIU Y H, XIA H Y, et al. Membership function analysis of low transpiration and yield traits in alfalfa multi-paternal hybrid F₁ Generation[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(7):1416-1422
- [23] 包凤轩, 陈宁, 王楠, 等. 基于隶属函数法鉴定抗寒苜蓿种质苗期耐苏打盐碱性[J]. 草地学报, 2024, 32(12):3827-3835
- BAO F X, CHEN N, WANG N, et al. Identification of soda saline-alkali tolerance of cold-resistant alfalfa germplasm at seedling stage based on membership function method[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12):3827-3835
- [24] 闫敏. 骏枣对混合盐碱胁迫的生理生化响应[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022:45

- YAN M. Physiological and biochemical responses to mixed saline-alkali stress of 'junzao' jujube[D]. Ala'er: Tarim University, 2022:45
- [25] 谭皓,雷菲. 盐胁迫对苏丹草幼苗生长和渗透调节物质含量的影响[J]. 南方农业, 2019, 13(28):28-30, 34
- TAN H, LEI F. Effects of salt stress on the growth and osmotic adjustment substances of *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. seedlings[J]. South China Agriculture, 2019, 13(28):28-30, 34
- [26] 贾新平,邓衍明,孙晓波,等. 盐胁迫对海滨雀稗生长和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(12):204-212
- JIA X P, DENG Y M, SUN X B, et al. Impacts of salt stress on the growth and physiological characteristics of *Paspalum vaginatum*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(12):204-212
- [27] 孙聪聪,赵海燕,郑彩霞. NaCl胁迫对银杏幼树渗透调节物质及脯氨酸代谢的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(3):470-476
- SUN C C, ZHAO H Y, ZHENG C X. Effects of NaCl stress on osmolyte and proline metabolism in *Ginkgo biloba* seedling[J]. Plant Physiology Journal, 2017, 53(3):470-476
- [28] 徐昌文,钱虹萍,罗鹏云,等. 植物膜蛋白的囊泡转运及调控机制的研究进展[J]. 科学通报, 2023, 68(7):762-778
- XU C W, QIAN H P, LUO P Y, et al. Advances in vesicle trafficking of membrane proteins and their regulatory mechanisms[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(7):762-778
- [29] 何勇清,方佳,余敏芬,等. 植物质膜内在水通道蛋白PIPs的分子生物学研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(3):446-452
- HE Y Q, FANG J, YU M F, et al. Advances in molecular biology for plasma membrane intrinsic proteins (PIPs): a review[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2012, 29(3):446-452
- [30] PENG N, GUO S T, TANG Y M, et al. Cold stress responses of different genotypes of *Miscanthus* assessed by relative electrical conductivity and LT50[J]. Plants, 2025, 14(12):1760
- [31] 张署军,尹本丰,张庆,等. 荒漠藓类植物齿肋赤藓对4年积雪深度变化的生理生化响应[J]. 生态学报, 2023, 43(2):838-848
- ZHANG S J, YIN B F, ZHANG Q, et al. Ecophysiological and biochemical responses of desert moss *Syntrichia caninervis* to changes of snow depth in four years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2):838-848
- [32] 姜瑛,周萌,吴越,等. 不同燕麦品种耐盐性差异及其生理机制[J]. 草业科学, 2018, 35(12):2903-2914
- JIANG Y, ZHOU M, WU Y, et al. Evaluation of salt tolerance and its underlying physiological mechanisms in different oats[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(12):2903-2914
- [33] 柯梅,侯钰荣,魏鹏,等. 干旱胁迫下心叶驼绒藜生理响应特性[J]. 草业科学, 2023, 40(5):1349-1357
- KE M, HOU Y R, WEI P, et al. Physiological responses of *Krascheninnikovia ewersmannia* under drought stress [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(5):1349-1357
- [34] 刘文瑜,杨发荣,黄杰,等. NaCl胁迫对藜麦幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37(9):1797-1804
- LIU W Y, YANG F R, HUANG J, et al. Response of seedling growth and the activities of antioxidant enzymes of *Chenopodium quinoa* to salt stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(9):1797-1804
- [35] 高娅楠,韩烈保,许立新. 乙烯利对干旱胁迫下草地早熟禾抗氧化酶基因表达的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(10):2200-2213
- GAO Y N, HAN L B, XU L X. Effects of ethephon on the anti-oxidant enzyme genes expression of *Poa pratensis* under drought stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(10):2200-2213
- [36] 潘晶,黄翠华,罗君,等. 盐胁迫对植物的影响及AMF提高植物耐盐性的机制[J]. 地球科学进展, 2018, 33(4):361-372
- PAN J, HUANG C H, LUO J, et al. Effects of salt stress on plant and the mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi enhancing salt tolerance of plants [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(4):361-372
- [37] 海霞,米俊珍,赵宝平,等. 外源亚精胺对盐胁迫下燕麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(6):1003-1011
- HAI X, MI J Z, ZHAO B P, et al. Effects of exogenous spermidine on the growth and physiological characteristics in oat seedlings under salt stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(6):1003-1011
- [38] 景艳霞,袁庆华. NaCl胁迫对苜蓿幼苗生长及不同器官中盐离子分布的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(2):134-139
- JING Y X, YUAN Q H. Effects of salt stress on seedling growth of alfalfa (*Medicago sativa*) and ion distribution in different alfalfa organs[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2):134-139
- [39] 马林龙,曹丹,刘艳丽,等. 基于主成分分析的不同茶树品种在湖北地区的适应性评价[J]. 热带作物学报, 2020, 41(7):1335-1346
- MA L L, CAO D, LIU Y L, et al. Evaluation of adaptability of different tea cultivars in Hubei based on principal components analysis[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(7):1335-1346
- [40] 王利群,南丽丽,马香香,等. 30份苜蓿种质苗期耐盐性综合评价[J]. 中国草地学报, 2025, 47(7):70-82
- WANG L Q, NAN L L, MA X X, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 30 alfalfa germplasms at seedling stage[J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(7):70-82
- [41] 罗静,杜珊珊,孙绘健,等. 陆地棉种质资源种子萌发期耐盐性综合评价[J]. 中国农学通报, 2025, 41(3):25-35
- LUO J, DU S S, SUN H J, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of upland cotton germplasm at seeds germination stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(3):25-35
- [42] 邹敏,陶涛,田时炳,等. 139份砧用茄子种质资源苗期耐盐性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(2):22-31
- ZOU M, TAO T, TIAN S B, et al. Evaluation of salt tolerance in the seedling stage of 139 eggplant germplasm resources for rootstock[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(2):22-31
- [43] 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[J]. 草地学报, 2025, 33(5):1588-1601
- 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 [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5):1588-1601

(责任编辑 闵芝智)