

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.014

引用格式:蒋优,路璐,黄梦琪,等.NaCl胁迫对苏丹草形态、生理及解剖结构的影响[J].草地学报,2026,34(2):518—530
JIANG You, LU Lu, HUANG Meng-qi, et al. The Impact of NaCl Stress on the Morphology, Physiology, and Anatomical Structure of *Sorghum sudanense*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):518—530

NaCl胁迫对苏丹草形态、生理及解剖结构的影响

蒋 优^{1,2}, 路 璐^{1,2}, 黄梦琪^{1,2}, 王清屿^{1,2}, 张 博^{1,2}, 李陈建^{1,2*}

(1. 西部干旱荒漠区草地资源与生态实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆农业大学草业学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为研究苏丹草(*Sorghum sudanense*)对盐胁迫的适应性变化,本研究以10份不同耐盐级别的苏丹草为材料,于萌芽期用不同浓度NaCl溶液进行胁迫处理,研究不同耐盐级别的苏丹草材料在盐胁迫下形态、生理特征及叶片解剖结构的变化规律。结果表明:盐胁迫对苏丹草的形态指标造成显著影响,尤其在高盐浓度下;盐胁迫能显著提高苏丹草叶片的丙二醛、脯氨酸、可溶性蛋白含量;随着盐浓度的提升,耐盐材料的过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性持续上升,然而敏盐材料的两种酶活性则呈现先升后降的变化模式;盐胁迫显著增加了高耐苏丹草材料叶片的中脉厚度、维管束直径、泡状细胞厚度及下表皮细胞厚度,显著降低了高敏苏丹草材料叶片的中脉厚度、叶片厚度、维管束直径等。主成分分析结果表明,脯氨酸含量、维管束直径、叶片厚度、上表皮细胞厚度等可作为苏丹草耐盐性筛选的关键指标。

关键词:苏丹草;盐胁迫;生理特征;解剖结构

中图分类号:S544.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0518-13

The Impact of NaCl Stress on the Morphology, Physiology, and Anatomical Structure of *Sorghum sudanense*

JIANG You^{1,2}, LU Lu^{1,2}, HUANG Meng-qi^{1,2}, WANG Qing-yu^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, LI Chen-jian^{1,2*}

(1. Laboratory of Grassland Resources and Ecology in Western Arid Desert Region, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to study the adaptability of *Sorghum sudanense* to salt stress, 10 varieties of *Sorghum sudanense* with different salt tolerance grades were used as materials and treated with different concentrations of NaCl solution at the germination stage to study the morphological indexes physiological characteristics, and leaf anatomical structure changes. The results showed that salt stress had a significant effect on the morphological indexes of *S. sudanense*, especially under high salt concentration. In addition, salt stress could significantly increase the contents of malondialdehyde, proline and soluble protein in *S. sudanense* leaves. With the increase of salt concentration, the activities of peroxidase and superoxide dismutase in salt-tolerant materials continued to increase, while the activities of the two enzymes in salt-sensitive materials increased first and then decreased. Salt stress significantly increased the thickness of midvein, thickness of vascular bundle, thickness of bulliform cells and thickness of lower epidermal cell of high-sensitivity *S. sudanense* leaves, and significantly decreased the thickness of midvein, thickness of leaf and thickness of vascular bundle of high-sensitivity *S. sudanense* leaves. Principal component analysis (PCA) was used to screen proline, thickness of vascular bundle, thickness of leaf and thickness of upper epidermal cell as the key indexes for salt tolerance screening of *S. sudanense*.

Key words: *Sorghum sudanense*; Salt stress; Physiological characteristics; Anatomical structure

苏丹草(*Sorghum sudanense*)作为一种重要的饲草,具有再生速度快、高产、适应性强等特点,在我国

各地广泛种植^[1]。然而,苏丹草在盐碱地上的种植受到很大限制,其产量和品质有所下降。徐玉鹏等^[2]经

收稿日期:2025-03-02;修回日期:2025-05-05

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01A72);第九师草原野生优良牧草选育研究项目(2023JS006);塔吉克斯坦草地资源退化评估及可持续利用发展策略研究(2023YFE0102600)资助

作者简介:蒋优(1999-),女,汉族,贵州毕节人,硕士研究生,主要从事草种质资源育种与生产研究,E-mail:2012279855@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: 378952150@qq.com

研究发现苏丹草在0.1%的盐渍土中能正常生长,但是当盐浓度高于0.4%时其生长将会受到抑制,高于0.8%则停止生长。谭皓等^[3]发现随盐浓度的升高,苏丹草体内Na⁺呈现逐渐升高的趋势,而K⁺则与之相反,脯氨酸和可溶性蛋白质含量均呈现先升高后下降的趋势。因此,进行苏丹草的耐盐研究,解析其应对盐胁迫的反应变化规律,对于培育耐盐苏丹草新品种及扩大盐碱地种植均具有重要意义。

植物在面对盐分胁迫时,会启动一系列复杂的生理生化反应来适应这种逆境环境,这种适应能力(即耐盐性)在不同植物或同一植物的不同品种之间存在着显著的差异^[4]。研究表明,植物在盐胁迫下会通过调节渗透调节物质、抗氧化酶活性等生理指标来适应盐环境^[5-6]。植物为适应周围不良环境,其结构形态也会发生变化^[7]。叶片作为对环境变化

最为敏感的器官之一,在盐胁迫下,叶片的大小、厚度及解剖结构容易受到影响,因此其解剖结构特征的变化与植物的耐盐性密切相关^[8]。鉴于此,本研究以不同耐盐级别的苏丹草材料为研究对象,于萌芽期用0, 50, 100, 150, 200 mmol·L⁻¹ 5个浓度的NaCl溶液进行胁迫处理,研究不同耐盐级别的苏丹草材料在不同盐浓度胁迫下的形态、生理特征及叶片解剖结构变化规律,以期对苏丹草今后的耐盐育种工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为课题组前期试验结果筛选出的10份不同耐盐级别的苏丹草,见表1。

表1 10份供试材料名称及耐盐级别

Table 1 Names and salt tolerance levels of the 10 test materials

名称 Name	耐盐级别 Salt-resistant grade	名称 Name	耐盐级别 Salt-resistant grade
NX035	高耐 High resistance	2707	中耐 Medium resistant
GS0227	高耐 High resistance	97-1	敏盐 Sensitive salts
新草1号 Xincao No.1	耐盐 Salt resistant	00278	敏盐 Sensitive salts
519	耐盐 Salt resistant	00276	高敏 High sensitive
HZK0-1	中耐 Medium resistant	B478	高敏 High sensitive

1.2 试验方法

以10份不同耐盐级别的苏丹草为试验材料,设置0, 50, 100, 150, 200 mmol·L⁻¹ 5个水平的NaCl浓度处理。选用籽粒饱满的苏丹草种子,利用75%的酒精消毒30 s,蒸馏水清洗3~5次。将25粒种子放入直径9 cm的培养皿中,采用双层滤纸发芽法进行萌发试验,重复3次。置于人工气候培养箱培养,设置光照/黑暗12 h/12 h,温度25℃/25℃。每天添加蒸馏水以维持盐浓度基本一致。处理第2 d开始记录每天发芽种子数量,统计发芽势、发芽率。7 d后从每皿中选取5株具有代表性的幼苗植株测量相对发芽指数(Relative germination index, RGI)、相对发芽势(Relative germination potential, RGP)、相对发芽率(Relative germination rate, RGR)、相对根长(Relative root length, RRL)、相对芽长(Relative shoot length, RSL)、相对根鲜重(Relative root fresh weight, RRFW)、相对芽鲜重(Relative shoot fresh weight, RSFW)、相对根干重(Relative root dry weight, RRDW)、相对芽干重(Relative shoot dry weight, RSDW)、相对根冠比(Relative root crown ratio, RRCR)、相对活力指数(Relative vigor index,

RVI),截取第一片完全展开叶片的中间部分进行解剖结构观察,同时选取叶片测定丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性、游离脯氨酸(Proline, Pro)及可溶性蛋白(Soluble protein, SP)含量等生理指标。

发芽势(%)=第3 d发芽数/试验种子数×100%

发芽率(%)=第7 d发芽数/试验种子数×100%

相对指标=胁迫处理指标/对照指标

采用石蜡切片法,番红-固绿双重染色。于Nikon-E100光学显微镜下观察叶片的解剖结构并拍照。用NIS-Elements D 4.10.00软件测量中脉厚度、叶片厚度、维管束直径、维管束鞘细胞直径、泡状细胞厚度、上表皮细胞厚度及下表皮细胞厚度。

丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定^[9],游离脯氨酸(Pro)含量采用茚基水杨酸法测定^[10],超氧化物歧化酶(SOD)活性采用NBT光还原法测定^[11],过氧化物歧化酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[12],可溶性蛋白(SP)采用考马斯亮蓝G-250(Coomassie Brilliant Blue G-250)染色法测定^[12]。

1.3 数据分析

利用 Excel 2021 统计各测量指标数据,用 SPSS 21 软件进行单因素方差分析及对各指标进行显著性检验,用 Origin 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对不同耐盐级别苏丹草形态指标的影响

由表 2 可知,随着盐浓度的增加,8 个相对指标总体呈现逐渐下降的趋势,相对发芽势减少 31%~100%,相对发芽率减少 11%~77%,相对根长减少

62%~100%,相对芽长减少 36%~78%,相对根鲜重减少 37%~100%,相对芽鲜重减少 30%~66%,相对根干重减少 58%~100%,相对芽干重减少 40%~92%。由此可见,盐胁迫对苏丹草发芽势及根的抑制作用远大于对发芽率及芽的抑制作用。‘NX035’的 8 个相对指标分别下降 67%,31%,67%,36%,43%,52%,65%,46%,‘B478’的 8 个相对指标分别下降 100%,62%,100%,78%,100%,66%,100%,92%。由此可见,敏盐类材料的降低趋势显著高于耐盐类材料。总体来看,盐胁迫对苏丹草材料的多个形态指标产生了显著的抑制作用,且在较高盐浓度下更为突出。

表 2 盐胁迫对苏丹草形态指标的影响

Table 2 Effects of salt stress on morphological indicators of *Sorghum sudanense*

指标 Index	浓度 Concentration/ (mmol·L ⁻¹)	NX035	GS0227	新草 1 号 Xincao No.1	519	HZK0-1	2707	97-1	00278	00276	B478
相对发芽势	0	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}
	50	1.07±0.08 ^{ABa}	0.92±0.08 ^{Bab}	0.96±0.09 ^{Ba}	1.13±0.09 ^{Aa}	0.67±0.03 ^{Cb}	0.54±0.17 ^{Cbc}	0.38±0.08 ^{Db}	0.94±0.10 ^{Ba}	0.61±0.03 ^{Cb}	0.34±0.02 ^{Db}
	100	0.86±0.08 ^{ABcb}	0.82±0.05 ^{ABcb}	0.93±0.07 ^{Aa}	0.91±0.09 ^{ABb}	0.73±0.16 ^{BCDb}	0.71±0.12 ^{CDb}	0.22±0.09 ^{Ec}	0.62±0.07 ^{Db}	0.59±0.12 ^{Db}	0.07±0.13 ^{Ec}
	150	0.38±0.04 ^{De}	0.68±0.02 ^{Bc}	0.89±0.07 ^{Aa}	0.56±0.10 ^{BCc}	0.59±0.11 ^{BCDb}	0.46±0.06 ^{CDc}	0.07±0.07 ^{Ed}	0.50±0.05 ^{CDb}	0.39±0.10 ^{De}	0.04±0.06 ^{Ec}
	200	0.33±0.06 ^{BCc}	0.44±0.07 ^{Bd}	0.69±0.05 ^{Ab}	0.27±0.06 ^{CDd}	0.39±0.14 ^{BCc}	0.27±0.03 ^{CDd}	0.02±0.04 ^{Fd}	0.17±0.15 ^{DEc}	0.08±0.04 ^{EFd}	0.00±0.00 ^{Fc}
相对发芽率	0	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}
	50	1.04±0.04 ^{ABa}	0.96±0.15 ^{ABCa}	1.00±0.10 ^{ABCa}	1.07±0.16 ^{ABa}	1.01±0.17 ^{ABCa}	0.83±0.15 ^{BCab}	0.84±0.05 ^{BCb}	1.16±0.27 ^{Aa}	0.93±0.09 ^{ABCa}	0.75±0.05 ^{Cb}
	100	0.95±0.08 ^{Aa}	0.99±0.05 ^{Aa}	1.02±0.08 ^{Aa}	0.92±0.13 ^{Aa}	1.02±0.18 ^{Aa}	0.96±0.17 ^{Aa}	0.61±0.08 ^{Bc}	0.62±0.13 ^{Bb}	0.89±0.18 ^{Aa}	0.80±0.18 ^{Bb}
	150	0.73±0.11 ^{BCb}	0.88±0.09 ^{ABa}	0.94±0.15 ^{Aa}	1.00±0.11 ^{Aa}	1.03±0.05 ^{Aa}	0.68±0.12 ^{BCb}	0.56±0.15 ^{Bc}	0.63±0.10 ^{Bb}	0.62±0.11 ^{Bb}	0.56±0.14 ^{Bc}
	200	0.69±0.13 ^{BCb}	0.70±0.04 ^{BCb}	0.82±0.15 ^{ABa}	0.89±0.08 ^{Aa}	0.64±0.05 ^{BCb}	0.61±0.12 ^{Cb}	0.23±0.04 ^{Dd}	0.39±0.15 ^{Db}	0.35±0.13 ^{De}	0.38±0.02 ^{De}
相对根长	0	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}
	50	0.74±0.09 ^{ABcb}	0.93±0.21 ^{Aa}	0.96±0.17 ^{Aa}	0.74±0.11 ^{ABCB}	0.89±0.20 ^{ABa}	0.56±0.10 ^{Cb}	0.45±0.18 ^{Cb}	0.75±0.34 ^{ABCB}	0.47±0.03 ^{Cb}	0.59±0.01 ^{CB}
	100	0.70±0.10 ^{Bb}	0.57±0.12 ^{BCb}	0.55±0.09 ^{BCb}	0.56±0.09 ^{BCb}	0.93±0.21 ^{Aa}	0.21±0.08 ^{Dc}	0.29±0.12 ^{Dbc}	0.47±0.24 ^{BCDc}	0.28±0.10 ^{De}	0.42±0.11 ^{CDc}
	150	0.42±0.08 ^{Ac}	0.45±0.07 ^{Ab}	0.49±0.06 ^{Abc}	0.48±0.05 ^{AcD}	0.52±0.20 ^{Ab}	0.11±0.01 ^{Bcd}	0.17±0.08 ^{Bc}	0.45±0.19 ^{Abc}	0.22±0.08 ^{Bcd}	0.22±0.03 ^{Bd}
	200	0.33±0.04 ^{ABc}	0.17±0.04 ^{CDc}	0.34±0.12 ^{ABc}	0.38±0.08 ^{Ad}	0.25±0.05 ^{BCb}	0.08±0.02 ^{DEd}	0.12±0.06 ^{Dc}	0.14±0.07 ^{Dc}	0.12±0.04 ^{Dd}	0.00±0.00 ^{Ec}
相对芽长	0	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}
	50	1.16±0.35 ^{ABb}	0.98±0.25 ^{ABa}	1.06±0.16 ^{ABa}	0.94±0.12 ^{ABa}	0.70±0.17 ^{Bb}	0.88±0.18 ^{ABa}	0.89±0.18 ^{ABab}	1.03±0.12 ^{ABa}	0.96±0.11 ^{ABa}	0.85±0.07 ^{ABb}
	100	1.04±0.26 ^{ABb}	0.76±0.20 ^{ABCDab}	0.85±0.17 ^{ABCB}	0.90±0.01 ^{ABa}	0.55±0.05 ^{Dhc}	0.84±0.08 ^{ABCDa}	0.67±0.14 ^{BCDb}	0.72±0.22 ^{BCDc}	0.57±0.05 ^{CDb}	0.57±0.13 ^{CDc}
	150	0.64±0.16 ^{ABCb}	0.65±0.15 ^{ABCb}	0.78±0.02 ^{Abc}	0.59±0.11 ^{ABCDb}	0.49±0.16 ^{CDbc}	0.83±0.11 ^{Aa}	0.37±0.12 ^{Dc}	0.75±0.18 ^{ABbc}	0.54±0.10 ^{BCDc}	0.36±0.05 ^{CD}
	200	0.64±0.11 ^{Ab}	0.44±0.03 ^{BCc}	0.59±0.07 ^{Ac}	0.51±0.13 ^{ABb}	0.35±0.10 ^{CDc}	0.44±0.02 ^{BCb}	0.24±0.10 ^{Dc}	0.32±0.01 ^{CDEd}	0.38±0.06 ^{BCDc}	0.22±0.06 ^{Ec}
相对根鲜重	0	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}
	50	1.13±0.05 ^{Aa}	1.02±0.13 ^{ABa}	0.93±0.18 ^{ABa}	0.95±0.28 ^{ABa}	0.97±0.13 ^{ABa}	1.06±0.12 ^{ABa}	0.81±0.11 ^{Bab}	1.15±0.15 ^{Aa}	0.80±0.08 ^{Bab}	0.90±0.08 ^{ABab}
	100	0.96±0.28 ^{ABb}	0.74±0.15 ^{ABb}	0.52±0.08 ^{Bb}	1.06±0.28 ^{Aa}	0.83±0.32 ^{ABa}	0.51±0.12 ^{Bb}	0.72±0.14 ^{ABb}	1.05±0.12 ^{ABb}	0.68±0.23 ^{ABb}	0.78±0.18 ^{ABb}
	150	0.74±0.18 ^{ABCb}	0.53±0.08 ^{BCDc}	0.30±0.13 ^{De}	0.98±0.34 ^{Aa}	0.58±0.28 ^{BCDab}	0.35±0.16 ^{Dhc}	0.60±0.13 ^{BCDhc}	0.78±0.20 ^{ABbc}	0.40±0.18 ^{CDc}	0.55±0.09 ^{BCDc}
	200	0.57±0.08 ^{Ac}	0.26±0.04 ^{BCd}	0.24±0.12 ^{BCc}	0.40±0.20 ^{ABb}	0.35±0.22 ^{ABb}	0.26±0.13 ^{BCc}	0.40±0.15 ^{ABc}	0.63±0.24 ^{Ac}	0.20±0.14 ^{BCc}	0.00±0.00 ^{Dd}
相对芽鲜重	0	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}
	50	1.03±0.26 ^{Aa}	0.89±0.13 ^{Aa}	1.11±0.10 ^{Aa}	0.87±0.17 ^{ABab}	0.61±0.04 ^{Bb}	1.06±0.04 ^{Aa}	0.89±0.13 ^{ABb}	1.11±0.22 ^{Aa}	0.96±0.14 ^{Aa}	0.86±0.09 ^{ABa}
	100	1.08±0.22 ^{ABa}	0.61±0.27 ^{CDb}	0.82±0.16 ^{ABCb}	0.76±0.10 ^{BCDb}	0.43±0.18 ^{Db}	0.98±0.07 ^{ABab}	1.11±0.31 ^{Aa}	0.90±0.11 ^{ABCa}	0.60±0.07 ^{CDb}	0.56±0.14 ^{CDb}
	150	0.57±0.05 ^{BCb}	0.58±0.13 ^{BCb}	0.72±0.06 ^{ABb}	0.52±0.06 ^{BCDc}	0.42±0.22 ^{CDb}	0.86±0.12 ^{Ab}	0.75±0.09 ^{ABb}	0.89±0.25 ^{Aa}	0.50±0.11 ^{BCDc}	0.32±0.07 ^{De}
	200	0.48±0.08 ^{ABb}	0.41±0.07 ^{BCb}	0.54±0.06 ^{ABc}	0.40±0.14 ^{Bc}	0.37±0.20 ^{Bb}	0.70±0.10 ^{Ac}	0.40±0.12 ^{Bc}	0.37±0.08 ^{Bb}	0.42±0.11 ^{Bb}	0.34±0.20 ^{Bc}
相对根干重	0	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}
	50	0.90±0.14 ^{ABCa}	1.15±0.19 ^{Aa}	0.99±0.14 ^{ABa}	1.06±0.27 ^{ABa}	1.01±0.14 ^{ABa}	0.89±0.10 ^{ABCa}	0.58±0.07 ^{Cb}	0.73±0.04 ^{BCb}	0.90±0.09 ^{ABCB}	0.74±0.39 ^{BCab}
	100	0.84±0.15 ^{Aa}	0.85±0.09 ^{Ab}	0.81±0.12 ^{ABa}	0.80±0.28 ^{ABa}	0.81±0.39 ^{ABa}	0.44±0.12 ^{Bc}	0.22±0.02 ^{Cc}	0.48±0.18 ^{ABCB}	0.69±0.27 ^{ABbc}	0.44±0.09 ^{BCbc}
	150	0.64±0.04 ^{ABCb}	0.65±0.06 ^{ABCB}	0.50±0.07 ^{BCDc}	0.78±0.23 ^{ABa}	0.83±0.42 ^{Aa}	0.35±0.10 ^{CDc}	0.21±0.10 ^{Dc}	0.35±0.03 ^{CDEd}	0.46±0.19 ^{BCDc}	0.17±0.04 ^{Ed}
	200	0.35±0.03 ^{ABCB}	0.42±0.06 ^{Ad}	0.39±0.07 ^{Ac}	0.24±0.16 ^{ABCb}	0.26±0.19 ^{ABCb}	0.19±0.10 ^{BCc}	0.18±0.06 ^{BCc}	0.28±0.09 ^{ABCD}	0.10±0.09 ^{CDd}	0.00±0.00 ^{Dd}
相对芽干重	0	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}	1.00±0.00 ^{Aa}
	50	1.18±0.38 ^{Aa}	0.93±0.14 ^{ABCB}	1.00±0.03 ^{ABa}	0.97±0.23 ^{ABa}	0.61±0.08 ^{Cb}	0.86±0.07 ^{ABCa}	0.82±0.15 ^{BCab}	0.96±0.15 ^{ABa}	0.99±0.14 ^{ABa}	0.77±0.14 ^{BCb}
	100	1.21±0.32 ^{Aa}	0.87±0.15 ^{BCab}	0.91±0.08 ^{Ba}	0.73±0.02 ^{BCDab}	0.58±0.08 ^{CDb}	0.94±0.17 ^{ABCa}	0.79±0.18 ^{BCDab}	0.76±0.21 ^{BCDab}	0.71±0.15 ^{BCDab}	0.52±0.11 ^{De}
	150	0.66±0.13 ^{ABb}	0.75±0.09 ^{ABbc}	0.78±0.06 ^{ABb}	0.68±0.12 ^{ABb}	0.53±0.12 ^{BCb}	0.84±0.12 ^{Aa}	0.58±0.19 ^{ABbc}	0.57±0.27 ^{ABb}	0.63±0.14 ^{ABb}	0.30±0.07 ^{Dd}
	200	0.54±0.19 ^{ABb}	0.60±0.14 ^{Ac}	0.60±0.05 ^{Ac}	0.58±0.20 ^{Ab}	0.36±0.13 ^{BCc}	0.50±0.09 ^{ABCB}	0.42±0.11 ^{ABc}	0.21±0.03 ^{CDc}	0.50±0.04 ^{ABb}	0.08±0.04 ^{De}

注:不同大写字母表示同一浓度不同材料间差异显著,不同小写字母表示同一材料不同浓度间差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different uppercase letters indicate significant differences between materials at the same concentration of salt, while different lowercase letters indicate significant differences between salt treatments of the same material ($P<0.05$), the same as below

2.2 盐胁迫对苏丹草生理指标的影响

2.2.1 盐胁迫对苏丹草叶片丙二醛含量的影响

由图1可知,随着盐浓度的上升,10份苏丹草叶片MDA含量均呈现逐渐增加的趋势,但不同耐盐级别材料的

MDA含量增幅存在差异。其中,高耐材料(NX035, GS0227)MDA含量较CK平均增加138%,而高敏材料(00276, B478)平均增加156%,敏盐材料增加趋势更为显著,且耐盐品种的MDA含量低于盐敏感品种。

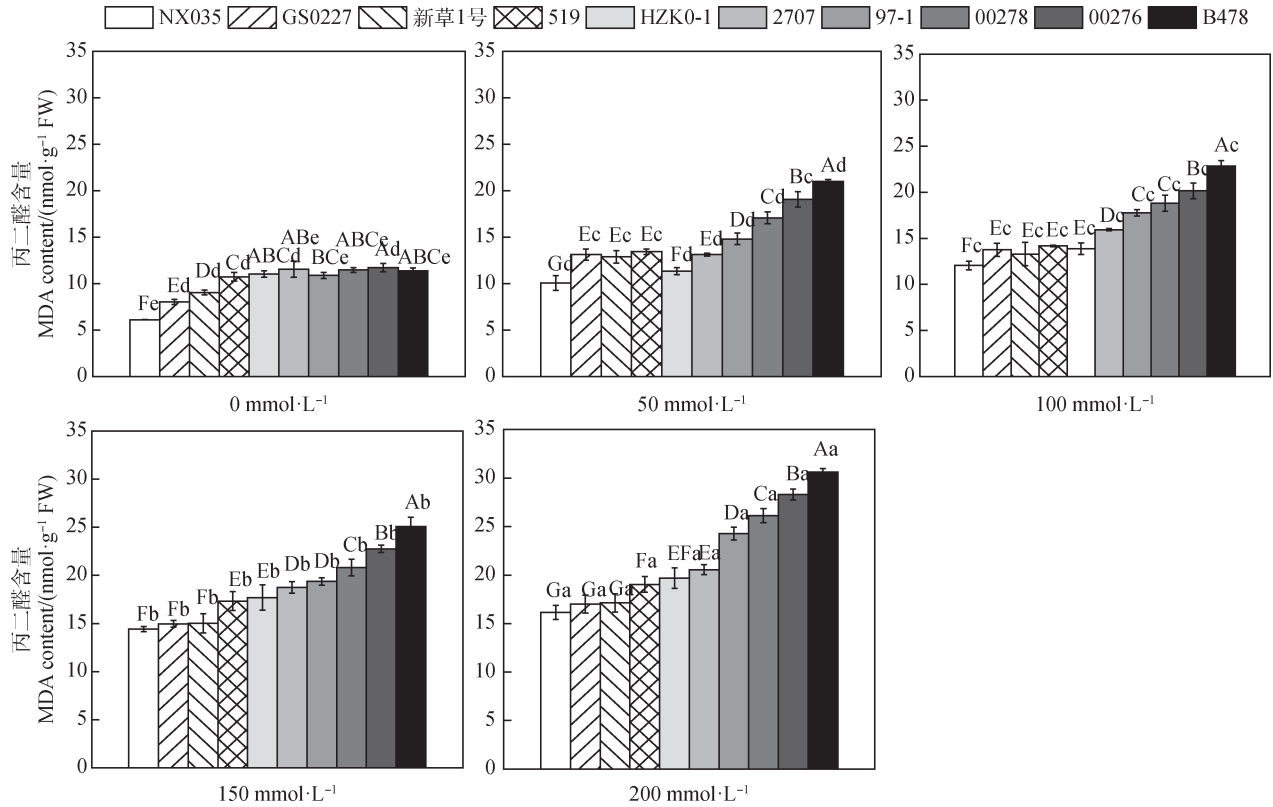


图1 盐胁迫下10份苏丹草丙二醛含量变化

Fig. 1 Changes in MDA content of 10 *Sorghum sudanense* under salt stress

2.2.2 盐胁迫对苏丹草叶片过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性的影响 由图2可知,随着盐浓度的上升,耐盐类苏丹草POD酶活性呈现逐渐增加的趋势,其中高耐材料(NX035, GS0227)较CK平均增加163%;而敏盐(敏盐、高敏)类苏丹草则呈现先增加后下降的趋势,在盐浓度为150 mmol·L⁻¹时四个敏盐材料的POD酶活性均达到峰值,当盐浓度为200 mmol·L⁻¹时POD酶活性均显著下降,但所有处理下的POD酶活性始终高于CK。

由图3可知,随着盐浓度的上升,耐盐类苏丹草SOD酶活性呈现逐渐增加的趋势,其中高耐材料(NX035, GS0227)平均增加147%,耐盐材料(新草1号、519)平均增加107%,中耐材料(HZK0-1, 2707)平均增加42%,而敏盐苏丹草则呈现先增加后下降的趋势,敏盐品种97-1和00278在100 mmol·L⁻¹时SOD酶活性达到峰值,当盐浓度大于

100 mmol·L⁻¹时SOD酶活性显著下降,而高敏品种00276和B478在50 mmol·L⁻¹时SOD酶活性达到峰值,当盐浓度大于50 mmol·L⁻¹时SOD酶活性显著下降。

总体来看,耐盐材料的POD和SOD酶活性大多高于敏盐材料,且随着盐浓度的升高不同耐盐性材料之间的差异性也升高。

2.2.3 盐胁迫对苏丹草叶片可溶性蛋白及脯氨酸含量的影响 由图4可知,随着盐浓度的上升,10份苏丹草叶片可溶性蛋白含量均呈现逐渐增加的趋势。在无盐胁迫时,各苏丹草材料的可溶性蛋白含量差异均不显著,但在盐胁迫下不同耐盐级别材料的可溶性蛋白含量增幅差异较大。其中,高耐材料(NX035, GS0227)的可溶性蛋白含量较CK平均增加393%,而高敏材料(00276, B478)平均增加175%,高耐材料增加趋势显著高于高敏材料。无

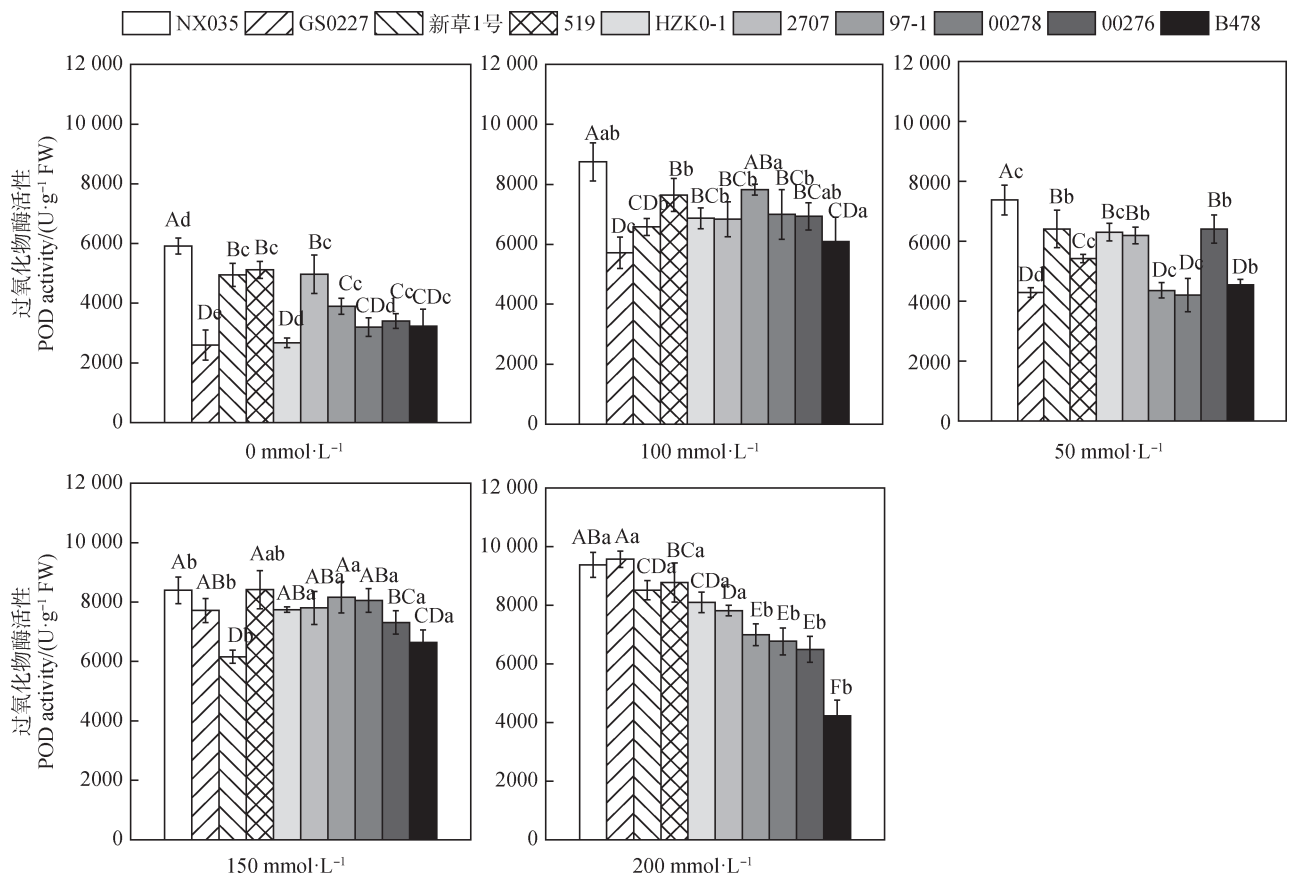


图2 盐胁迫下10份苏丹草POD活性变化

Fig. 2 Changes in POD activity of 10 *Sorghum sudanense* under salt stress

盐胁迫时,苏丹草可溶性蛋白含量的多少与耐盐性强弱无关,当盐浓度 $\geq 1500 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其可溶性蛋白含量越高,耐盐性也就越强。

由图5可知,脯氨酸含量随着盐浓度的增加而逐渐增加,不同材料在不同盐浓度胁迫下的脯氨酸含量增幅存在差异。其中,高耐材料(NX035, GS0227)脯氨酸含量较CK平均增加203%,而高敏材料(00276, B478)平均增加66%,高耐材料增加趋势显著高于高敏材料。在低盐浓度下,大多数苏丹草脯氨酸含量之间无显著差异,随着盐浓度的升高,各耐盐级别苏丹草脯氨酸含量之间差异显著,且耐盐性越强,其脯氨酸含量越高。

2.3 盐胁迫对苏丹草解剖结构的影响

2.3.1 苏丹草叶片解剖结构特征 苏丹草叶片由表皮、叶肉、叶脉三部分组成(以NX035为例)(图6)。表皮分化为一层细胞,细胞排列整齐紧密,叶肉细胞形状较规则,大小不均匀,没有栅栏组织和

海绵组织的分化,每个维管束都被一层结构紧密、细胞较大的维管束鞘所包围。此外,在两个维管束之间,上表皮细胞中存在一些较大的薄壁细胞,被称为泡状细胞。这些泡状细胞通常几个连在一起,在横切面上呈现出扇形排列的特征。

2.3.2 盐胁迫对叶片中脉厚度及叶片厚度的影响 由表3可知,随着盐浓度的上升,高耐苏丹草材料的叶片中脉厚度呈现逐渐增加的趋势,200 mmol·L⁻¹时的中脉厚度较CK平均增加了49%。耐盐材料在盐浓度为150 mmol·L⁻¹时中脉厚度较CK显著增加,当盐浓度为200 mmol·L⁻¹时显著下降,盐胁迫对中耐材料的叶片中脉厚度无显著影响。敏盐(敏盐、高敏)材料叶片中脉厚度则随着盐浓度的升高逐渐降低,低盐浓度下苏丹草越耐盐其中脉厚度越厚,高浓度则正好相反。由表4可知,盐胁迫对耐盐(高耐、耐盐、中耐)苏丹草材料的叶片厚度无显著影响,但敏盐(敏盐、高敏)材料叶片厚度则随着盐浓度的升高逐渐降低,大多数苏丹草材料间的叶片厚度无显著差异。

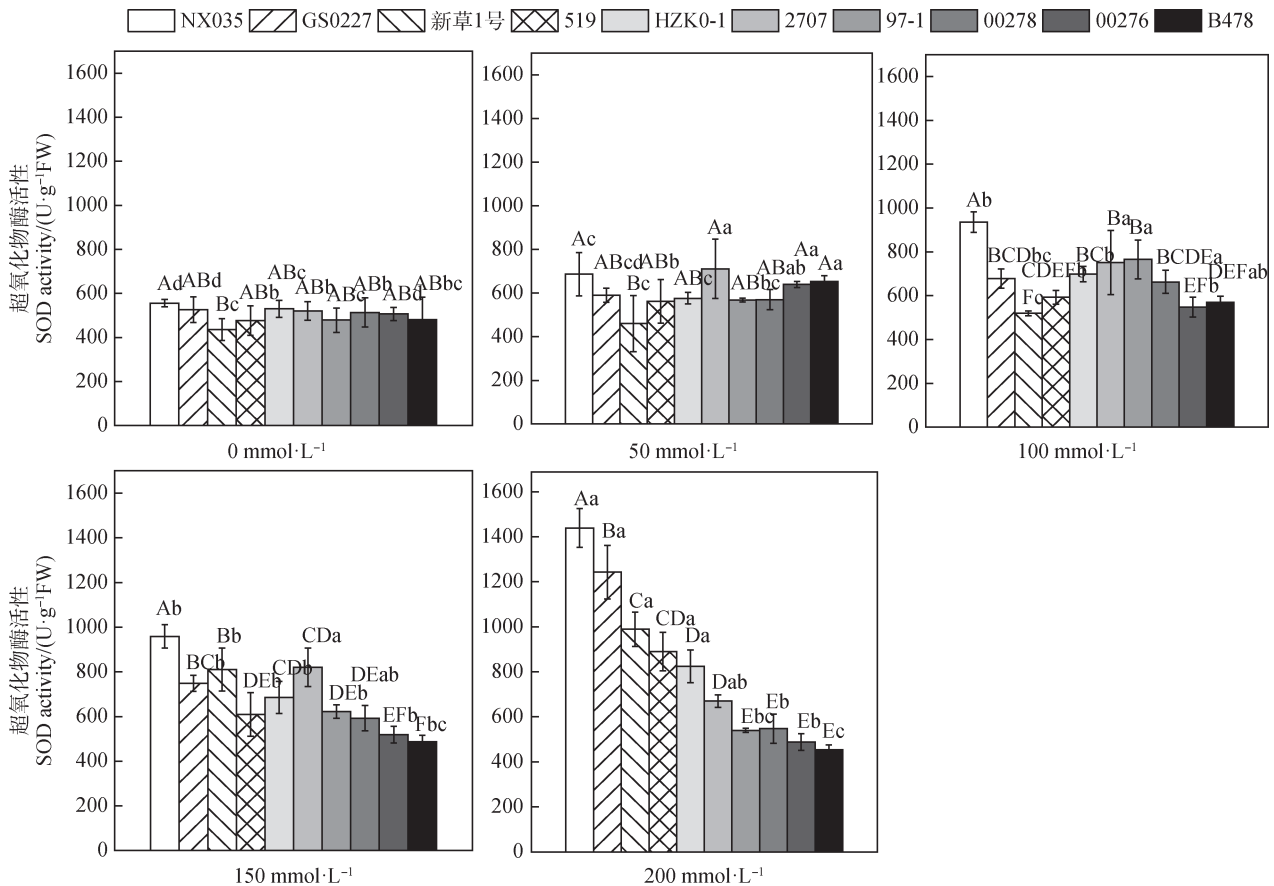


图3 盐胁迫下10份苏丹草SOD活性变化

Fig. 3 Changes in SOD activity of 10 *Sorghum sudanense* under salt stress

2.3.3 盐胁迫对维管束直径及维管束鞘细胞的影响 由表5可知,低浓度下高敏材料的维管束直径显著高于高耐材料,随着盐浓度的升高,高耐盐材料的叶片维管束直径呈现逐渐增加的趋势,高敏材料的叶片维管束直径呈现逐渐降低的趋势,最终高耐材料的维管束直径显著高于高敏材料,而耐盐、中耐、敏盐三个耐盐级别材料的叶片维管束直径随着盐浓度的升高呈现先增加后下降的趋势。从表6可以看出盐胁迫对苏丹草叶片维管束鞘细胞直径无显著影响,大多数苏丹草材料间的维管束鞘细胞直径无显著差异。

2.3.4 盐胁迫对泡状细胞厚度、上表皮细胞厚度及下表皮细胞厚度的影响 由表7可知,高耐盐、耐盐、中耐盐三个耐盐级别的苏丹草叶片泡状细胞厚度随着盐浓度的升高呈现逐渐增加的趋势,敏盐材料的泡状细胞厚度随着盐浓度的升高呈现先增加后下降的趋势,而高敏盐材料随着盐浓度的升高,其泡状细胞厚度呈现逐渐下降的趋势。

由表8可知,盐胁迫对耐盐(高耐盐、耐盐、中耐盐)材料的上表皮细胞厚度无显著影响,而对敏盐(敏盐、高敏盐)材料来说,盐胁迫显著降低了其上

表皮细胞厚度。

由表9可以看出,高耐盐及耐盐两个耐盐级别的苏丹草叶片下表皮细胞厚度随着盐浓度升高呈现逐渐增加的趋势,而其余耐盐级别的下表皮细胞厚度随着盐浓度的升高呈现先增加后下降的趋势。

低浓度下高敏材料的泡状细胞厚度、上表皮细胞厚度及下表皮细胞厚度均显著高于高耐材料,随着盐浓度的升高,最终高耐材料的泡状细胞厚度、上表皮细胞厚度及下表皮细胞厚度均显著高于高敏材料。

2.4 主成分分析

对苏丹草的12个生理及解剖结构指标进行主成分分析,获得因子载荷和贡献率(表10)。共提取出4个主成分,累计贡献率高达85.326%,可有效反映供试材料耐盐性的绝大部分信息。其中Pro在PC1中具有最高的因子载荷,为0.962,TVB在PC2中具有最高的因子载荷,为0.950,TL在PC3中具有最高的因子载荷,为0.782,TUE在PC4中具有最高的因子载荷,为0.736。因此,Pro,TVB,TL,TUE四个指标可作为苏丹草耐盐性筛选的关键指标。

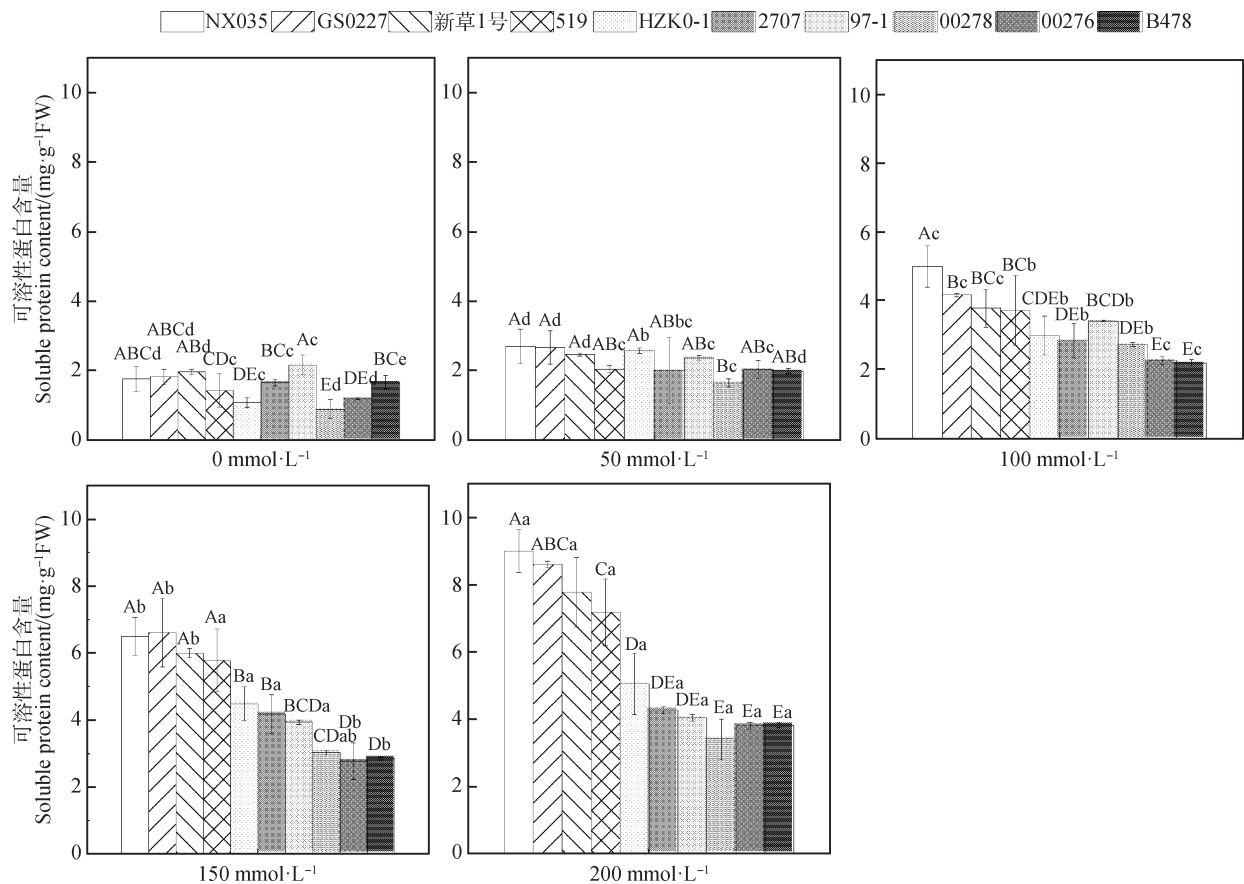


图4 盐胁迫下10份苏丹草可溶性蛋白含量变化

Fig. 4 Changes in Soluble protein content of 10 *Sorghum sudanense* under salt stress

3 讨论

3.1 盐胁迫对植物形态指标的影响

植物在盐胁迫下生长发育会受到明显的抑制,抑制程度受盐浓度、植物耐盐级别以及胁迫时间的影响^[13-14]。在本研究中,随着盐浓度的增加,苏丹草的相对发芽势、相对发芽率、相对根长、相对芽长、相对根鲜重、相对芽鲜重、相对根干重、相对芽干重均呈现显著下降的趋势,抑制了苏丹草的正常生长。樊有存等人也发现盐胁迫对植物的生长发育及产量具有抑制作用^[15],与本研究结果一致。

3.2 盐胁迫对植物生理特征的影响

植物在非生物胁迫下会产生大量的活性氧,从而使植物受到损伤。丙二醛(MDA)是细胞膜不饱和脂肪酸发生过氧化作用得到的最终产物,其含量高低和细胞膜受损情况成正比,与抗逆能力成反比^[16]。孙璐等人经研究发现,不同耐盐级别高粱材料的MDA含量在盐胁迫下均随着盐浓度的升高而逐渐增加,耐盐材料的增幅显著小于敏盐材料,且

耐盐材料的MDA含量始终低于敏盐材料^[17],与本研究结果一致。吐尔逊^[18]、袁柳娇^[19]、石诗叠等^[20]的研究也表明,随着浓度和时间的增加,植物叶片中丙二醛含量呈上升趋势。

抗氧化酶(POD和SOD)是植物内源ROS的清除剂,也是植物受到环境胁迫时的重要防御体系。POD作为适应酶,主要清除逆境胁迫下植物体内产生的活性氧,使其含量保持在较低水平,减少其对膜系统造成的损伤,其活性高低表征着植物抗逆能力的强弱^[21]。SOD作为重要的保护酶,可以清除植物体内由于盐胁迫而产生的超氧阴离子,但同时也会产生氧化能力极强的ROS^[22]。在本研究中耐盐(高耐、耐盐、中耐)苏丹草材料的POD和SOD酶活性均随着盐浓度的升高而呈现逐渐增加的趋势,但敏盐(敏盐、高敏)材料的POD和SOD酶活性则呈现先增加后下降的趋势,可能是因为耐盐品种倾向于保持较高水平的抗氧化酶活性,而敏盐材料的抗氧化酶活性稍低,低盐胁迫下苏丹草叶片POD和SOD酶活性会增高,从而清除植物体内产生的自由基,以防止细胞受到伤害,如果植物细胞承受的应

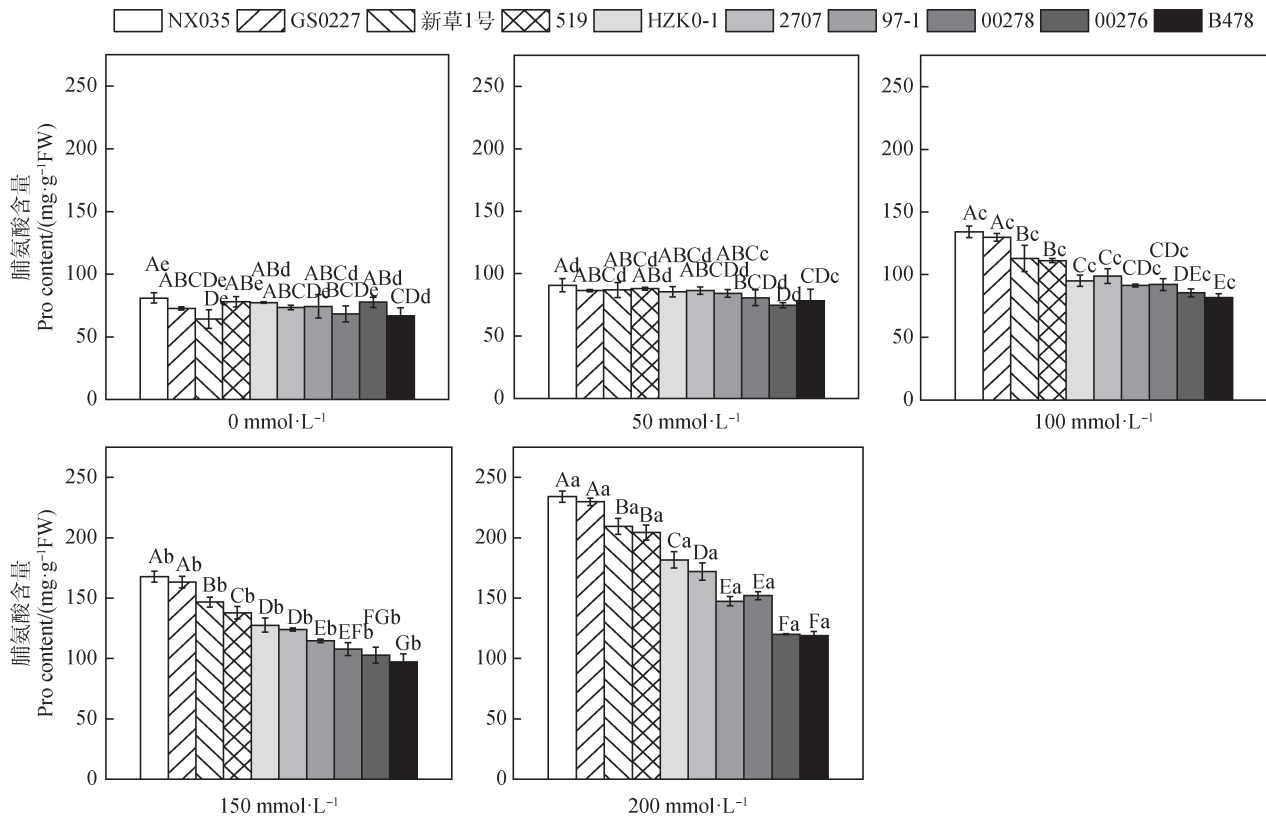


图5 盐胁迫下10份苏丹草脯氨酸含量变化

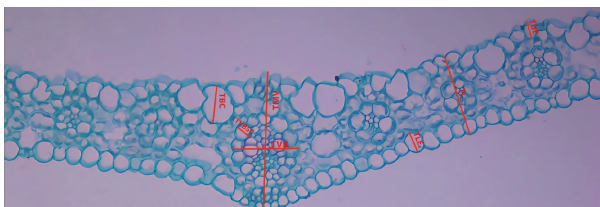
Fig. 5 Changes in Pro content of 10 *Sorghum sudanense* under salt stress

图6 NX035叶片解剖结构

Fig. 6 Anatomical structure of NX035 leaf blade

注:TMV表示中脉厚度;TL表示叶片厚度;TVB表示维管束直径;TVBSC表示维管束鞘细胞直径;TBC表示泡状细胞厚度;TUE表示上表皮细胞厚度;TLE表示下表皮细胞厚度

Note: TMV represents thickness of midvein; TL represents thickness of leaf; TVB represents thickness of vascular bundle; TVBSC represents thickness of vascular bundle sheath cells; TBC represents thickness of bulliform cells; TUE represents thickness of upper epidermal cell; TLE represents thickness of lower epidermal cell

激压力超过其承受能力,就会使得细胞受到严重破坏,进而导致其酶活性下降^[23]。且本研究中SOD酶活性达到峰值的浓度低于POD酶活性达到峰值的浓度,可能是因为在植物抗氧化系统中,SOD扮演着至关重要的角色。它作为第一道防线,负责将具有强氧化性的超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)转化为相对无害的氧气(O_2)和过氧化氢(H_2O_2)。随后,POD将 H_2O_2 进一步分解为水和氧气,最终清除活性氧,保护植

物细胞免受氧化损伤^[24],因此,SOD酶活性的降低会阻碍 $O_2^{\cdot-}$ 的转化,进而影响POD酶的活性,导致活性氧清除能力下降,最终损害植物细胞。

可溶性蛋白质虽非直接作用于渗透调节,但它们可能对细胞具有保护功能^[25]。本研究发现10份不同耐盐级别的苏丹草材料可溶性蛋白含量均随着盐浓度的升高而逐渐增加,但耐盐材料增加的趋势显著高于敏盐材料增加的趋势。阎艳霞等^[26]通过试验也得出了相同的结论。脯氨酸在细胞中扮演着关键角色,它有助于防止细胞质脱水、维持蛋白质结构稳定、避免酶的变性失活,并保持氮平衡,是一种关键的有机渗透调节分子^[27]。本研究发现10份不同耐盐级别的苏丹草材料脯氨酸含量均随着盐浓度的升高而逐渐增加,但不同材料在不同盐浓度胁迫下的脯氨酸含量增幅存在差异,耐盐材料增加的趋势显著高于敏盐材料。这与前人^[28-31]的研究结果一致。

3.3 盐胁迫对植物解剖结构的影响

叶片的解剖特征揭示了植物在逆境环境下采取的适应策略,为研究植物对生态环境的适应机制提供了重要基础^[32]。中脉结构主要反映在逆境环

表 3 盐胁迫下不同耐盐级别苏丹草叶片中脉厚度

Table 3 Thickness of midvein in different salt tolerance levels of *Sorghum sudanense* leaves under salt stress 单位: μm

浓度 Concentration/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NX035	GS0227	新草 1 号 Xincao No.1	519	HZK0-1	2707	97-1	00278	00276	B478
0	156.62±4.79 ^{DEc}	142.23±9.06 ^{Fc}	141.54±6.11 ^{Fb}	152.39±9.04 ^{EFb}	158.53±7.81 ^{DEa}	149.58±7.92 ^{EFa}	165.95±6.94 ^{CDa}	173.50±5.86 ^{BCa}	197.14±9.10 ^{Aa}	185.42±4.96 ^{ABa}
50	168.11±8.54 ^{BCbc}	159.75±12.14 ^{CDbc}	151.87±7.92 ^{Db}	167.26±8.60 ^{BCab}	151.25±7.85 ^{DEa}	145.17±4.86 ^{Da}	158.10±7.04 ^{CDab}	175.75±7.92 ^{ABa}	183.95±6.20 ^{Aa}	172.44±8.05 ^{ABCb}
100	178.22±5.41 ^{Ab}	163.23±11.47 ^{ABCDbc}	146.05±3.70 ^{Db}	171.90±16.48 ^{ABab}	155.11±4.74 ^{BCDa}	163.18±10.37 ^{ABCDa}	158.03±1.53 ^{BCDab}	152.59±15.32 ^{CDb}	146.35±8.69 ^{Db}	169.04±8.08 ^{ABCb}
150	181.39±7.09 ^{ABb}	180.44±8.66 ^{ABb}	167.81±3.78 ^{ABCa}	186.58±13.68 ^{ABa}	160.04±1.89 ^{Ca}	158.96±17.01 ^{Ca}	150.21±3.45 ^{Chc}	148.98±13.31 ^{Ch}	154.30±16.84 ^{Ch}	166.13±5.39 ^{BCb}
200	223.04±21.47 ^{Aa}	220.88±22.09 ^{Aa}	141.92±4.56 ^{BCb}	149.87±9.10 ^{BCb}	147.86±7.02 ^{BCa}	150.63±5.75 ^{BCa}	144.78±4.43 ^{BCc}	128.63±8.45 ^{Cc}	147.91±11.03 ^{BCb}	152.63±5.37 ^{Bc}

表 4 盐胁迫下不同耐盐级别苏丹草叶片厚度

Table 4 Thickness of leaf of different salt tolerance levels of *Sorghum sudanense* under salt stress 单位: μm

浓度 Concentration/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NX035	GS0227	新草 1 号 Xincao No.1	519	HZK0-1	2707	97-1	00278	00276	B478
0	98.69±4.55 ^{Aa}	97.02±1.27 ^{Aa}	85.46±11.76 ^{BCa}	80.06±3.14 ^{Ca}	81.54±4.31 ^{Ca}	79.33±2.22 ^{Ca}	94.28±2.70 ^{ABa}	97.19±3.54 ^{Aa}	100.04±3.22 ^{Aa}	95.41±7.29 ^{Aa}
50	97.09±1.57 ^{Aa}	89.66±8.50 ^{ABa}	90.00±6.28 ^{ABa}	83.48±7.13 ^{Ba}	84.86±7.79 ^{Ba}	81.62±3.93 ^{Ba}	92.97±6.00 ^{ABa}	92.12±6.20 ^{ABab}	97.64±6.57 ^{Ab}	85.96±4.51 ^{ABab}
100	89.12±9.83 ^{Aa}	88.92±3.02 ^{Aa}	91.10±8.15 ^{Aa}	85.45±6.82 ^{Aa}	87.82±4.57 ^{Aa}	86.88±5.11 ^{Aa}	88.00±1.97 ^{Ab}	88.08±10.56 ^{Ab}	88.73±0.87 ^{Abc}	86.10±0.99 ^{Ab}
150	93.50±3.58 ^{Aa}	92.06±2.71 ^{Aa}	91.07±3.33 ^{ABa}	86.90±0.84 ^{ABCa}	90.51±2.61 ^{ABa}	83.72±9.16 ^{BCa}	87.30±1.60 ^{ABCab}	91.94±2.29 ^{ab}	92.32±6.71 ^{Abc}	81.00±2.50 ^{Cb}
200	89.67±4.19 ^{Aa}	87.22±6.17 ^{Aa}	81.33±4.27 ^{Aa}	82.51±3.85 ^{Aa}	85.74±2.72 ^{Aa}	82.70±8.76 ^{Aa}	83.91±4.32 ^{Ab}	84.09±4.35 ^{Ab}	84.84±3.91 ^{Ac}	69.64±7.28 ^{Bc}

表 5 盐胁迫下不同耐盐级别苏丹草叶片维管束直径

Table 5 Thickness of Vascular bundle of different salt tolerance levels of *Sorghum sudanense* leaves under salt stress 单位: μm

浓度 Concentration/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NX035	GS0227	新草 1 号 Xincao No.1	519	HZK0-1	2707	97-1	00278	00276	B478
0	51.31±0.62 ^{Ed}	49.05±0.68 ^{Ec}	55.77±0.91 ^{Ed}	58.44±0.57 ^{Bc}	48.97±0.87 ^{Ed}	57.62±1.20 ^{BCb}	50.60±0.68 ^{Ec}	56.62±1.24 ^{CDb}	69.07±0.82 ^{Aa}	67.68±0.62 ^{Aa}
50	59.51±1.13 ^{Dc}	55.87±0.65 ^{Ed}	59.31±0.50 ^{Dc}	59.21±0.66 ^{Dc}	63.71±0.48 ^{Ba}	59.19±0.68 ^{Da}	58.67±0.57 ^{Da}	60.02±0.24 ^{Da}	65.43±0.89 ^{Ab}	62.01±1.09 ^{Cb}
100	60.69±0.96 ^{Bc}	59.80±1.35 ^{BCc}	65.02±0.83 ^{Aa}	63.68±0.46 ^{Aa}	63.48±0.62 ^{Aa}	58.18±0.16 ^{Cab}	53.66±0.66 ^{Db}	58.13±1.54 ^{CDb}	64.65±1.17 ^{Ab}	60.56±0.98 ^{Bc}
150	63.88±0.62 ^{Ab}	62.61±0.57 ^{ABb}	61.47±1.34 ^{BCb}	60.52±0.91 ^{Cb}	61.90±0.67 ^{BCb}	55.85±0.63 ^{Ec}	49.57±0.64 ^{Gcd}	54.26±0.63 ^{Fc}	58.80±0.87 ^{Dc}	58.80±0.62 ^{Dd}
200	66.42±0.63 ^{Aa}	67.01±1.25 ^{ABa}	53.76±0.48 ^{Ec}	55.09±0.75 ^{Dd}	56.01±0.86 ^{CDc}	55.39±0.61 ^{Dc}	48.80±0.27 ^{Fd}	52.78±0.74 ^{Ec}	56.89±0.32 ^{BCd}	57.64±0.38 ^{Bd}

表 6 盐胁迫下不同耐盐级别苏丹草叶片维管束鞘细胞直径

Table 6 Thickness of vascular bundle sheath cells of different salt tolerance levels of *Sorghum sudanense* leaves under salt stress 单位: μm

浓度 Concentration/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NX035	GS0227	新草 1 号 Xincao No.1	519	HZK0-1	2707	97-1	00278	00276	B478
0	11.50±1.45 ^{ABa}	10.00±1.50 ^{BCa}	12.29±1.40 ^{Aa}	10.81±1.12 ^{ABCa}	10.23±0.39 ^{BCa}	10.96±1.13 ^{ABCa}	9.25±0.15 ^{Ca}	10.10±0.17 ^{BCa}	12.21±0.41 ^{Aa}	12.33±0.29 ^{Aa}
50	12.22±0.97 ^{Aa}	12.82±1.77 ^{Aa}	11.98±0.80 ^{Aa}	11.41±0.99 ^{Aa}	11.94±0.97 ^{Aa}	10.99±0.11 ^{Aa}	10.95±1.68 ^{Aa}	11.28±0.62 ^{Aa}	12.52±1.26 ^{Aa}	12.12±0.31 ^{Aa}
100	11.61±3.03 ^{Aa}	12.20±1.07 ^{Aa}	12.16±1.71 ^{Aa}	11.71±1.92 ^{Aa}	10.88±0.47 ^{Aa}	11.27±0.91 ^{Aa}	10.25±0.65 ^{Aa}	11.02±0.63 ^{Aa}	11.66±0.68 ^{Aa}	11.92±0.30 ^{Aa}
150	12.28±0.39 ^{ABa}	11.71±1.25 ^{ABa}	12.64±1.09 ^{Aa}	11.37±0.56 ^{cABCa}	11.49±1.63 ^{ABCa}	10.60±0.52 ^{BCa}	9.90±0.67 ^{Ca}	10.70±0.56 ^{BCa}	11.31±0.34 ^{BCa}	11.37±0.86 ^{ABCa}
200	11.07±0.68 ^{ABa}	11.62±1.72 ^{ABa}	10.36±0.71 ^{ABa}	10.40±0.87 ^{ABa}	11.79±1.41 ^{ABa}	12.29±1.56 ^{Aa}	9.96±0.67 ^{Ba}	10.2±0.84 ^{Ba}	11.67±0.60 ^{ABa}	11.44±0.54 ^{ABa}

表 7 盐胁迫下不同耐盐级别苏丹草叶片泡状细胞厚度

Table 7 Thickness of Bulliform cells of *Sorghum sudanense* leaves of different salt tolerance levels under salt stress 单位: μm

浓度 Concentration/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NX035	GS0227	新草 1 号 Xincao No.1	519	HZK0-1	2707	97-1	00278	00276	B478
0	21.52±1.16 ^{Ec}	22.56±0.97 ^{Ec}	22.53±0.91 ^{Ed}	19.18±1.28 ^{Fd}	22.89±0.98 ^{Ec}	25.77±1.68 ^{Dc}	29.34±0.85 ^{Cb}	28.71±1.32 ^{Cc}	34.53±0.33 ^{Ba}	38.16±0.49 ^{Aa}
50	29.25±0.84 ^{Bb}	29.37±0.81 ^{Bb}	28.55±1.16 ^{Bc}	24.60±0.43 ^{Cc}	24.32±1.89 ^{Cc}	25.58±1.44 ^{Cc}	32.92±0.97 ^{Aa}	33.18±1.62 ^{Ab}	31.48±0.94 ^{Ab}	33.59±1.51 ^{Ab}
100	30.44±1.76 ^{BCDb}	31.20±2.05 ^{BCDb}	29.76±1.66 ^{CDbc}	28.37±1.39 ^{Db}	33.29±1.04 ^{Bb}	28.55±0.58 ^{Db}	32.02±1.11 ^{BCa}	36.39±2.41 ^{Aa}	28.91±0.74 ^{Dc}	32.33±1.46 ^{BCb}
150	33.32±1.71 ^{BCDa}	31.28±1.82 ^{CDab}	31.21±1.31 ^{CDab}	28.73±1.54 ^{DEFb}	37.75±0.96 ^{Aa}	35.75±0.77 ^{ABa}	27.56±1.65 ^{Fb}	33.53±1.80 ^{BCab}	28.23±0.56 ^{EFc}	30.62±2.65 ^{CDab}
200	33.53±0.84 ^{Ba}	32.70±2.01 ^{Ba}	32.10±0.71 ^{Ba}	32.10±1.65 ^{Ba}	38.03±1.31 ^{Aa}	37.99±1.62 ^{ABa}	23.30±0.51 ^{Dc}	29.29±0.64 ^{Cc}	25.50±0.84 ^{Dd}	24.18±1.47 ^{Dc}

境中植物对水分和营养条件的适应能力^[33],耐盐性不同的植物在盐胁迫下其中脉厚度的变化情况也

是复杂多变的。本研究发现高耐苏丹草材料的叶片中脉厚度呈现逐渐增加的趋势,耐盐材料随着盐

表 8 盐胁迫下不同耐盐级别苏丹草叶片上表皮细胞厚度

Table 8 Thickness of upper epidermal cells of *Sorghum sudanense* leaves of different salt tolerance levels under salt stress

单位: μm

浓度 Concentration/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NX035	GS0227	新草 1 号 Xincao No.1	519	HZK0-1	2707	97-1	00278	00276	B478
0	$12.05\pm 0.14^{\text{Ca}}$	$12.73\pm 0.52^{\text{Ca}}$	$11.96\pm 0.86^{\text{Ca}}$	$11.90\pm 0.21^{\text{Ca}}$	$12.19\pm 0.37^{\text{Ca}}$	$12.04\pm 0.80^{\text{Ca}}$	$16.38\pm 1.28^{\text{Aa}}$	$14.41\pm 1.05^{\text{Ba}}$	$14.24\pm 0.76^{\text{Ba}}$	$15.98\pm 0.76^{\text{Aa}}$
50	$12.93\pm 0.26^{\text{CDa}}$	$12.33\pm 0.32^{\text{Da}}$	$12.39\pm 0.39^{\text{Da}}$	$12.07\pm 0.83^{\text{Da}}$	$12.11\pm 0.44^{\text{Da}}$	$12.13\pm 0.80^{\text{Da}}$	$15.32\pm 0.39^{\text{Ab}}$	$13.18\pm 0.55^{\text{BCDab}}$	$13.92\pm 0.80^{\text{BCab}}$	$14.10\pm 0.76^{\text{Bb}}$
100	$12.26\pm 1.03^{\text{BCa}}$	$11.82\pm 0.45^{\text{Ca}}$	$12.55\pm 0.91^{\text{ABCa}}$	$12.28\pm 0.26^{\text{BCa}}$	$12.16\pm 0.34^{\text{BCa}}$	$11.89\pm 0.52^{\text{Ca}}$	$13.77\pm 0.97^{\text{Abc}}$	$12.52\pm 0.86^{\text{ABCb}}$	$12.78\pm 0.61^{\text{ABCBc}}$	$13.33\pm 0.54^{\text{ABbc}}$
150	$12.97\pm 0.66^{\text{Aa}}$	$12.33\pm 0.89^{\text{ABa}}$	$11.47\pm 0.94^{\text{Ba}}$	$12.28\pm 0.09^{\text{ABa}}$	$12.52\pm 0.41^{\text{ABa}}$	$12.42\pm 0.46^{\text{ABa}}$	$12.49\pm 0.96^{\text{ABd}}$	$12.34\pm 0.42^{\text{ABb}}$	$12.18\pm 0.73^{\text{ABc}}$	$12.33\pm 0.59^{\text{ABc}}$
200	$12.05\pm 0.59^{\text{ABa}}$	$11.47\pm 0.92^{\text{ABa}}$	$11.92\pm 0.48^{\text{ABa}}$	$11.75\pm 0.40^{\text{ABa}}$	$12.53\pm 0.27^{\text{Aa}}$	$11.86\pm 0.52^{\text{ABa}}$	$11.34\pm 0.97^{\text{ABd}}$	$10.10\pm 0.68^{\text{Cc}}$	$10.90\pm 0.32^{\text{BCd}}$	$11.06\pm 0.70^{\text{BCd}}$

表 9 盐胁迫下不同耐盐级别苏丹草叶片下表皮细胞厚度

Table 9 Thickness of lower epidermal cells of different salt tolerance levels of *Sorghum sudanense* leaves under salt stress

单位: μm

浓度 Concentration/ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NX035	GS0227	新草 1 号 Xincao No.1	519	HZK0-1	2707	97-1	00278	00276	B478
0	$12.94\pm 0.91^{\text{Dd}}$	$15.49\pm 0.98^{\text{Cb}}$	$16.12\pm 1.42^{\text{BCd}}$	$15.41\pm 0.53^{\text{Cb}}$	$15.81\pm 0.48^{\text{BCd}}$	$16.72\pm 0.37^{\text{BCc}}$	$17.29\pm 0.51^{\text{ABc}}$	$15.57\pm 1.16^{\text{Cb}}$	$18.61\pm 1.02^{\text{Ab}}$	$18.85\pm 0.83^{\text{Ad}}$
50	$15.99\pm 0.66^{\text{Ec}}$	$16.80\pm 0.65^{\text{DEb}}$	$18.01\pm 0.74^{\text{CDc}}$	$16.42\pm 0.72^{\text{Eb}}$	$17.74\pm 0.45^{\text{Dc}}$	$17.07\pm 0.28^{\text{DEc}}$	$19.38\pm 0.95^{\text{Eb}}$	$17.98\pm 0.67^{\text{CDa}}$	$18.98\pm 0.49^{\text{BCb}}$	$20.55\pm 0.72^{\text{Aab}}$
100	$18.68\pm 1.02^{\text{BCb}}$	$17.58\pm 0.79^{\text{Cb}}$	$18.95\pm 0.92^{\text{BCbc}}$	$19.01\pm 1.03^{\text{Ba}}$	$18.73\pm 0.32^{\text{BCb}}$	$18.74\pm 0.32^{\text{BCb}}$	$22.18\pm 0.78^{\text{ABa}}$	$19.01\pm 0.89^{\text{Ba}}$	$20.93\pm 0.14^{\text{Aa}}$	$21.19\pm 0.50^{\text{Aa}}$
150	$20.26\pm 0.49^{\text{BCa}}$	$21.20\pm 1.22^{\text{ABa}}$	$20.65\pm 0.76^{\text{BCab}}$	$19.79\pm 0.68^{\text{BCDa}}$	$19.57\pm 0.21^{\text{CDa}}$	$22.12\pm 0.65^{\text{Aa}}$	$20.32\pm 1.20^{\text{BCb}}$	$18.30\pm 0.27^{\text{Ba}}$	$18.51\pm 1.32^{\text{Db}}$	$19.73\pm 0.33^{\text{BCDbc}}$
200	$20.70\pm 0.65^{\text{ABa}}$	$22.08\pm 1.79^{\text{ABa}}$	$21.14\pm 0.85^{\text{ABa}}$	$20.26\pm 1.75^{\text{ABa}}$	$15.89\pm 0.32^{\text{Cd}}$	$19.76\pm 1.06^{\text{BCb}}$	$17.17\pm 0.63^{\text{Cc}}$	$16.05\pm 0.82^{\text{Cb}}$	$16.25\pm 0.96^{\text{Cc}}$	$17.86\pm 1.16^{\text{Cd}}$

表 10 主成分分析

Table 10 Principal component analysis

指标 Index	成份 Component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
丙二醛 MDA	-0.901	0.320	0.105	0.026
过氧化物酶 POD	0.812	-0.249	-0.022	-0.010
超氧化物歧化酶 SOD	0.874	-0.122	0.164	0.358
可溶性蛋白 SP	0.940	-0.097	-0.143	0.097
脯氨酸 Pro	0.962	-0.151	-0.059	0.021
中脉厚度 TMV	0.500	0.479	0.353	0.370
叶片厚度 TL	0.344	0.110	0.782	-0.029
维管束直径 TVB	0.200	0.950	-0.061	-0.048
维管束鞘细胞直径 TVBSC	0.361	0.862	-0.232	0.109
泡状细胞厚度 TBC	-0.560	0.176	0.379	0.347
上表皮细胞厚度 TUE	-0.448	-0.357	0.191	0.736
下表皮细胞厚度 TLE	-0.141	0.047	-0.777	0.520
贡献率 Contribution rate/%	42.636	18.828	13.667	10.195
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	42.636	61.464	75.131	85.326

浓度的升高呈现先增加后下降的趋势,盐胁迫对耐材料的叶片中脉厚度无显著影响,敏盐(敏盐、高敏)材料叶片中脉厚度则随着盐浓度的升高逐渐降低。为了应对盐胁迫引起的水分缺失,植物会调整叶片结构,使其增厚。这种增厚作用能在一定程度上降低蒸腾速率,从而增强叶片的保水性能。因此,较厚的叶片有助于植物更好地储存水分,以维持正常生长^[34],但本研究中敏盐和高敏材料的叶片厚度随着盐浓度的升高而逐渐降低,宗建伟等人也发现随 NaCl 浓度增加,百合(*Lilium*)的叶片厚度均

呈现逐渐减小的趋势^[35],可能是其耐盐能力弱,在盐胁迫下其叶片结构遭到破坏,从而导致其叶片厚度降低。

维管束直径增加有利于提高水分输导能力,在一定程度上稀释了组织中 Na^+ 浓度,促进了营养物质和光合产物运输^[36]。本研究发现高耐苏丹草材料的维管束直径随着盐浓度的升高而逐渐增加,而高敏苏丹草材料的维管束直径则随着盐浓度的升高而逐渐降低,从而增加了组织中的 Na^+ 浓度,降低了营养物质和光合产物的运输效率,最终也就导致

了其耐盐性较弱。李瑞强等人也发现无芒雀麦 (*Bromus inermis*) 维管束直径随盐浓度的升高而逐渐降低^[37]。维管束鞘细胞是光合作用暗反应发生、吸收合成有效营养物质的主要场所^[38], 本研究发现苏丹草叶片维管束鞘细胞直径受盐胁迫影响不显著。

泡状细胞能够储存水分, 在叶片卷曲过程中扮演关键角色, 并显著影响细胞水势的维持^[39]。在盐分较高的环境中, 泡状细胞会变得更加发达。当水分不足时, 这些细胞会失水收缩, 而在水分供应恢复时, 它们则会吸水膨胀, 以此适应高盐分的逆境^[40]。刘智微等研究结果表明, ‘苏牧2号’象草 (*Pennisetum purpureum* Schumacher ‘Sumu No. 2’) 叶片泡状细胞长度随盐胁迫浓度增加而增加^[41]。在本研究中耐盐(高耐、耐盐、中耐)材料的泡状细胞厚度随着盐浓度的升高而逐渐增加, 与刘智微等人的研究结果一致, 而高敏材料的泡状细胞厚度随着盐浓度的升高而逐渐减少。表皮细胞是叶片应对逆境胁迫的重要屏障, 植物在盐胁迫中会选择增加表皮细胞厚度来减少水分的蒸腾^[42]。在本研究中, 耐盐(高耐、耐盐、中耐)苏丹草叶片上表皮细胞受盐胁迫影响不显著, 但敏盐(敏盐、高敏)苏丹草叶片上表皮细胞随盐浓度的升高呈现逐渐减少的趋势, 耐盐(高耐、耐盐)苏丹草材料的下表皮细胞随盐浓度的升高呈现逐渐增加的趋势, 其余耐盐级别(中耐、敏盐、高敏)苏丹草材料的下表皮细胞厚度则呈现先增加后减小的趋势, 说明3个耐盐级别材料在较低盐浓度胁迫下选择增加表皮细胞厚度的方式来增加储水能力, 而高盐浓度胁迫下由于高渗环境导致表皮细胞失水变小。

4 结论

盐胁迫对苏丹草的形态指标造成显著影响, 尤其在高盐浓度下。此外, 盐胁迫能显著提高苏丹草叶片的MDA、Pro及SP含量。随着盐浓度的提升, 耐盐材料的POD和SOD酶活性持续上升, 然而敏盐材料的两种酶活性则呈现先升后降的变化模式。盐胁迫显著增加了高耐苏丹草材料叶片的中脉厚度、维管束直径、泡状细胞厚度及下表皮细胞厚度, 显著降低了高敏苏丹草材料叶片的中脉厚度、叶片厚度、维管束直径等; 成分分析结果表明脯氨酸含量、维管束直径、叶片厚度、上表皮细胞厚度四个指

标可作为苏丹草耐盐性筛选的关键指标

参考文献

- [1] HUANG Y, WU J, LIN J, et al. CcNAC6 acts as a positive regulator of secondary cell wall synthesis in Sudan grass (*Sorghum sudanense* S.) [J]. *Plants*, 2024, 13(10): 1352
- [2] 徐玉鹏, 武之新, 赵忠祥. 苏丹草的适应性及在我国农牧业生产中的发展前景 [J]. *草业科学*, 2003, 20(7): 23-25
XU Y P, WU Z X, ZHAO Z X. The adaptability and the developing foreground of Sudan grass in the produce of agriculture and animal husbandry in China [J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(7): 23-25
- [3] 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
- [4] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681
- [5] WANG X, SONG Z, TI Y, et al. Physiological response and transcriptome analysis of *Prunus mume* to early salt stress [J]. *Plant Biochemistry and Biotechnology*, 2022, 31(2): 330-342
- [6] LI Q, QIN Z, HU X X, et al. Physiology and gene expression analysis of potato (*Solanum tuberosum* L.) in salt stress [J]. *Plants*, 2022, 11(12): 1565
- [7] 谷俊, 耿贵, 李冬雪, 等. 盐胁迫对植物各营养器官形态结构影响的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2017, 33(24): 62-67
GU J, GENG G, LI D X, et al. Effect of salt stress on plant nutritional organs' morphology and structure: research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(24): 62-67
- [8] ALBALADEJO I, MECO V, PLASENCIA F, et al. Unravelling the strategies used by the wild tomato species *Solanum pennellii* to confront salt stress: from leaf anatomical adaptations to molecular responses [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 135: 1-12
- [9] 崔庆利. 水分胁迫对沙棘细胞膜透性及丙二醛含量的影响 [J]. *现代农业科技*, 2017(11): 139, 145
CUI Q L. Effects of water stress on cell membrane permeability and malondialdehyde content of *Hippophae rhamnoides* [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(11): 139, 145
- [10] THOMPSON D I, EDWARDS T J, VAN STADEN J. A novel dual-phase culture medium promotes germination and seedling establishment from immature embryos in South African *Disa* (Orchidaceae) species [J]. *Plant Growth Regulation*, 2007, 53(3): 163-171
- [11] 胡小荣, 陶梅, 卢新雄, 等. α -淀粉酶和超氧化物歧化酶等位酶与水稻种子超干保存遗传完整性的研究 [J]. *植物遗传资源学报*, 2007, 8(2): 228-230
HU X R, TAO M, LU X X, et al. Study on the genetic integrity

- of ultra-dried seed of rice with isozyme of α -amy and SOD[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2007, 8(2): 228-230
- [12] 王明春. 豌豆蚜危害对四种苜蓿品种(系)可溶性蛋白和单宁含量变化的影响[J]. 现代农业, 2020(8): 24-25
- WANG M C. Effects of pea aphid damage on changes of soluble protein and tannin content of four alfalfa varieties (lines) [J]. Modern Agriculture, 2020(8): 24-25
- [13] 陈年来, 马国军, 张玉鑫, 等. 甜瓜种子萌发和幼苗生长对NaCl胁迫的响应[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 814-819
- CHEN N L, MA G J, ZHANG Y X, et al. Responses of seed germination and seedling growth of muskmelon to NaCl stress [J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(5): 814-819
- [14] 周英, 谢科, 蔡汉, 等. 盐胁迫下外源褪黑素和丛枝菌根真菌对月季幼苗生长生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 370-380
- ZHOU Y, XIE K, CAI H, et al. Influence of exogenous melatonin and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological characteristics of Rosa chinensis seedling under salt stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(3): 370-380
- [15] 樊有存, 张红岩, 杨旭升, 等. 蚕豆耐盐相关基因VfHKT1;1的克隆、生物信息学分析及表达特性[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(4): 756-765
- FAN Y C, ZHANG H Y, YANG X S, et al. Cloning, bioinformatics analysis and gene expression pattern of VfHKT1;1 in *Vicia faba* L. [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(4): 756-765
- [16] 雷雪峰, 曹会志, 董烨文, 等. 偃麦草属三种植物幼苗干旱、盐渍交叉适应生理基础比较[J]. 中国草地学报, 2013, 35(6): 14-18
- LEI X F, CAO H Z, DONG Y W, et al. Comparison of the physiological basis of cross adaptation of three *Elytrigia* seedlings under drought and saline stress [J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(6): 14-18
- [17] 孙璐, 黄瑞冬. 高粱幼苗保护酶系统对盐胁迫的初期响应[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(2): 134-137
- SUN L, HUANG R D. Responses to salt stress of protective enzyme system in sorghum seedlings [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(2): 134-137
- [18] 吐尔逊·吐尔洪, 再吐尼古丽·库尔班, 阿扎提·阿布都古力. NaCl胁迫下3个甜高粱品种生理指标的比较研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3): 60-65
- Tuerxun·Tuerhong, Zaituniguli·Kuerban, Azhati·Abuduguli. The comparison study on the effects of NaCl stress on the physiological characters of sweet sorghum varieties [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(3): 60-65
- [19] 袁柳娇, 黄文琳, 陈崇志, 等. 盐胁迫对广藿香叶片生理特性、超微结构及药效成分的影响[J]. 生物技术通报, 2025, 41(1): 230-239
- YUAN L J, HUANG W L, CHEN C Z, et al. Effects of Salt Stress on physiological characteristics, ultrastructure and medicinal components of *Pogostemon cablin* leaves [J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(1): 230-239
- [20] 石诗叠, 王华磊, 罗春丽, 等. NaCl胁迫对滇黄精幼苗生长和生理特性的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(12): 54-60
- SHI S D, WANG H L, LUO C L, et al. Effects of NaCl stress on seedling growth and physiological characteristics of *Polygonatum kingianum* coll. et hems [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(12): 54-60
- [21] 黄禹翕, 赵雨潼, 高佳昕, 等. 盐碱胁迫下甜高粱生理生化指标及综合评价方法的研究进展[J]. 新农业, 2021(18): 45-47
- HUANG Y X, ZHAO Y T, GAO J X, et al. Research progress on physiological and biochemical indexes and comprehensive evaluation methods of sweet sorghum under saline-alkali stress [J]. New Agriculture, 2021(18): 45-47
- [22] 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
- QI Q, MA S R, XU W D. Advances in the effects of salt stress on plant growth and physiological mechanisms of salt tolerance [J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(8): 2741-2746
- [23] 李峰, 高宏云, 张翀, 等. 盐胁迫对燕麦生长及生理指标的影响[J]. 作物杂志, 2024(6): 140-146
- LI F, GAO H Y, ZHANG C, et al. Effects of salt stress on growth and physiological indexes of oat [J]. Crops, 2024(6): 140-146
- [24] 王智明, 张峰举, 许兴. 植物耐盐生理生化指标研究进展[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(7): 1493-1496
- WANG Z M, ZHANG F J, XU X. Advances on physiological and biochemical indexes of salt tolerance in plant [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(7): 1493-1496
- [25] 朱广龙, 武启迪, 钱寅森, 等. 盐分胁迫对高粱生长与生理特征的影响及耐盐调控机理研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 49-57
- ZHU G L, WU Q D, QIAN Y S, et al. Research progress on effects of salt stress on growth and physiological characteristics of sorghum and regulation mechanism of salt tolerance [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(14): 49-57
- [26] 阎艳霞, 王玉魁, 张东. 不同枣品种对NaCl胁迫的适应性研究[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(4): 398-401
- YAN Y X, WANG Y K, ZHANG D. Study on physiological adaptability of different jujube species to NaCl stress [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008, 42(4): 398-401
- [27] 王雪娟, 周毅, 吴燕, 等. 盐胁迫对盆栽滁菊生理特性的影响[J]. 广西植物, 2014, 34(6): 828-832
- WANG X J, ZHOU Y, WU Y, et al. Influence of salt stress on physiological characteristics of *Chrysanthemum morifolium* cv. Chuju [J]. Guihaia, 2014, 34(6): 828-832
- [28] 笪亚玲, 尉淑珍. NaCl胁迫对向日葵幼苗生长发育的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(30): 26-28, 32
- ZAN Y L, WEI S Z. Effect of salt stress on seedling growth of sunflower [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(30): 26-28, 32
- [29] 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
- [30] 王胜, 丁雪梅, 时彦平, 等. 盐胁迫对沙滩黄芩生长及其生理特性的影响[J]. *山东林业科技*, 2015, 45(5): 33-37
- WANG S, DING X M, SHI Y P, et al. Effect of salt stress on growth and physiological characteristics in *Scutellaria strigillosa* [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2015, 45 (5): 33-37
- [31] 柳福智, 羊健麟. 盐胁迫对甘草愈伤组织渗透调节的影响[J]. *植物生理学报*, 2015, 51(7): 1038-1044
- LIU F Z, YANG J L. Effects of salt stress on osmotic regulation of *Glycyrrhiza uralensis* callus [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(7): 1038-1044
- [32] 赖杭桂, 李瑞梅, 符少萍, 等. 盐胁迫对植物形态结构影响的研究进展[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(12): 55-57
- LAI H G, LI R M, FU S P, et al. Research advance in influence of salt stress on plant morphological structure [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(12): 55-57
- [33] 申惠翡, 赵冰, 徐静静. 15 个杜鹃花品种叶片解剖结构与植株耐热性的关系[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3895-3904
- SHEN H F, ZHAO B, XU J J. Relationship between leaf anatomical structure and heat resistance of 15 *Rhododendron* cultivars [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 3895-3904
- [34] 岑湘涛, 沈伟, 牛俊乐, 等. 基于植物叶片解剖结构的抗逆性评价研究进展[J]. *北方园艺*, 2021(18): 140-147
- CEN X T, SHEN W, NIU J L, et al. Research progress of stress resistance evaluation based on the anatomy of plant leaves [J]. *Northern Horticulture*, 2021(18): 140-147
- [35] 宗建伟, 李晓倩, 张创, 等. 盐胁迫对百合生理特性及叶片解剖结构的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2024, 43(1): 166-175
- ZONG J W, LI X Q, ZHANG C, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics and leaf anatomical structure of lily [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43 (1): 166-175
- [36] GONG Z Z, XIONG L M, SHI H Z, et al. Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency [J]. *Science China Life Sciences*, 2020, 63(5): 635-674
- [37] 李瑞强, 王玉祥, 孙玉兰, 等. 盐胁迫对无芒雀麦幼苗叶片形态及解剖结构的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(6): 1450-1459
- LI R Q, WANG Y X, SUN Y L, et al. Effects of salt stress on leaf morphology and anatomical structure of *Bromus inermis* seedlings [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(6): 1450-1459
- [38] 马彦军, 许晶晶, 韩谨如, 等. 3 个种群黑果枸杞叶片解剖结构的耐盐性分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(4): 100-105
- MA Y J, XU J J, HAN J R, et al. The salt-tolerance of three *Lycium ruthenicum* populations in relation to leaf anatomical structure [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(4): 100-105
- [39] 张霞, 孙旭春, 钟小仙, 等. 海盐胁迫下苏牧 2 号象草叶片解剖结构的适应性变化[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(4): 162-164
- ZHANG X, SUN X C, ZHONG X X, et al. Adaptive changes of anatomical structure of Su Mu No. 2 elephant grass leaves under sea salt stress [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42 (4): 162-164
- [40] CLARKE J M. Effect of leaf rolling on leaf water loss in *Triticum* spp [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1986, 66(4): 885-891
- [41] 刘智微, 钟小仙, 吴娟子, 等. 海盐胁迫对苏牧 2 号象草叶片解剖结构的影响[J]. *中国草地学报*, 2012, 34(6): 36-43
- LIU Z W, ZHONG X X, WU J Z, et al. Influence of sea salt stress on anatomical structure of leaf of elephant grass Sumu No. 2 [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(6): 36-43
- [42] 李瑞强, 王玉祥, 孙玉兰, 等. 盐胁迫对无芒雀麦叶片解剖结构的影响及耐盐性评价 [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231204.1039.004,2023-12-04/2024-11-07>
- LI R Q, WANG Y X, SUN Y L, et al. Effects of salt stress on leaf anatomical structure and salt tolerance evaluation of three *Bromus inermis* [J]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20231204.1039.004,2023-12-04/2024-11-07>

(责任编辑 闵芝智)