

张楠, 张鹤, 白百一, 等. 不同耐受型花生品种对盐胁迫的生理响应及其产量差异[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(2): 129-137.

ZHANG Nan, ZHANG He, BAI Baiyi, et al. Physiological responses and yield differences of different tolerant peanut cultivars to salt stress[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2): 129-137.

不同耐受型花生品种对盐胁迫的生理响应及其产量差异

张楠¹, 张鹤¹, 白百一², 史晓龙¹, 任婧瑶¹, 赵新华¹, 于海秋^{1,2}, 赵天宏¹

(1. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161; 2. 辽宁农业职业技术学院园艺学院, 辽宁营口 115009)

摘要: 土壤盐渍化制约了植物的地理分布, 耐盐品种的选择是提高盐渍化土地利用和维持盐胁迫下作物生长的重要途径。以前期筛选试验所鉴定的耐盐花生品种[农花5号(NH5)、铁花5号(TH5)、花育25号(HY25)]和盐敏感型花生品种[铁花2号(TH2)、阜花34号(FH34)、阜花23号(FH23)]为材料, 采用水培和田间产量验证的方法, 测定丙二醛(MDA)含量、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量, 探究盐胁迫下不同耐受型花生生理特性和产量的影响。结果表明: 盐胁迫导致花生膜系统损伤, 且盐敏感型花生品种的损伤程度更为严重, 相较对照, 各品种MDA含量上升2.44~2.75倍。盐胁迫提高了花生叶片的抗氧化酶活性, 变异系数分析显示, 耐盐型品种变异系数在10.71%~16.99%, 而盐敏感型花生品种变异系数最大为19.98%, 且耐盐型花生品种具有更好的抗氧化酶活性(SOD和POD)。此外, 相较于盐敏感型花生品种, 耐盐型花生品种可以通过更强的渗透调节能力维持渗透平衡和减轻细胞膜氧化。田间产量数据表明, 盐胁迫下各花生品种产量的降低主要是由饱果数减少和百仁重降低所致。综上, 不同耐受型花生品种对盐胁迫生理响应特性不尽相同, 基于生理特性及产量数据综合考量, NH5和HY25均呈现较好的耐盐性, 适合在东北盐渍土地种植。

关键词: 花生; 苗期; 生理; 盐胁迫; 产量

中图分类号: S5-3; X53

文章编号: 1000-1700(2024)02-0129-09

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Physiological Responses and Yield Differences of Different Tolerant Peanut Cultivars to Salt Stress

ZHANG Nan¹, ZHANG He¹, BAI Baiyi², SHI Xiaolong¹, REN Jingyao¹, ZHAO Xinhua¹,
YU Haiqiu^{1,2}, ZHAO Tianhong¹

(1. College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. School of Agriculture and Horticulture, Liaoning Agricultural Vocational and Technical College, Yingkou Liaoning 115009, China)

Abstract: Soil salinization restricts the geographical distribution of plants, and the selection of salt-tolerant cultivars is an important way to improve salinized land use and maintain crop growth under salt stress. In this study, salt-tolerant peanut cultivars Nonghua 5 (NH5), Tiehua 5 (TH5), Huayu 25 (HY25) and salt-sensitive peanut cultivars Tiehua 2 (TH2), Fuhua 34 (FH34), Fuhua 23 (FH23) identified in the previous screening experiment were used as materials. The malondialdehyde (MDA) content, the antioxidant enzymes activity, and the osmoregulatory substances content were determined by hydroponics and field yield verification methods. The effects of salt stress on the physiological characteristics and yield of different tolerant peanuts were explored. The results showed that: Salt stress caused the damage of peanut membrane

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-13)

第一作者: 张楠(1995-), 女, 博士研究生, 从事作物高产栽培与逆境生理研究, E-mail: zhangnann1995@163.com

通信作者: 史晓龙(1993-), 男, 博士, 讲师, 从事作物高产栽培与逆境生理研究, E-mail: xiaolongshi@syau.edu.cn

system, and the damage degree of salt-sensitive peanut cultivars was more serious. Compared with the control, the MDA content increased by 2.44 to 2.75 times. Salt stress increased the activity of antioxidant enzymes in peanut leaves. The coefficient of variation analysis demonstrated that the coefficient of variation of salt-tolerant cultivars was 10.71% to 16.99%, while that of salt-sensitive cultivars was 19.98%, and salt-tolerant peanut cultivars had better antioxidant enzyme (SOD and POD) activities. In addition, salt-tolerant peanut cultivars can maintain osmotic balance and reduce cell membrane oxidation through stronger osmotic regulation compared with salt-sensitive peanut cultivars. The field yield data demonstrated that the decrease of yield of peanut cultivars under salt stress was mainly caused by the decrease of full pod per plant and the hundred grain weight. In summary, the physiological response characteristics of different tolerant peanut cultivars to salt stress are different. Both NH5 and HY25 showed good salt tolerance and were suitable for planting in saline land in northeast China based on the comprehensive consideration of physiological characteristics and yield data.

Key words: peanuts; seedling stage; physiology; salt stress; yield

土壤盐渍化影响着全球数大约 1.0×10^9 hm^2 的耕地和 33% 的灌溉农田,盐渍化土壤中过高的土壤盐分严重制约了农业生产和粮食安全^[1-2]。在当前耕地资源紧缺的背景下,盐渍化土壤作为一种潜在的耕地资源,对其高效的开发与利用成为守住耕地面积红线的重要选择。

花生 (*Arachis hypogaea* L.) 是我国优质植物蛋白和植物油的重要来源^[3-4]。东北地区因其较低的黄曲霉毒素污染风险,已成为公认的优质花生生产基地,是中国四大花生产区之一^[5-6]。此外,花生具有极强的耐盐性和耐贫瘠性,为减少“粮油争地”压力,花生经常被种植在盐渍化等边际土壤中^[7]。耐盐遗传改良是缓解盐胁迫的有效措施,选育耐盐品种是耐盐遗传改良的基础^[8]。培育耐盐品种和扩大耕地面积是推进可持续和工业化绿色农业的重要举措^[9-10]。不同品种对环境条件表现出不同程度的敏感性,较比引进外来品种,选择或改良本地品种更能适应当地栽培条件^[11]。可以从根本上解决土壤盐碱化问题,提高作物产量和品质^[12]。为了确保花生在盐胁迫条件下正常生长和维持较高产量,耐盐品种的选育与改良成为打破这一窘境的重要举措^[13]。作物对盐胁迫的响应涉及生理、分子等多个层面。先后有学者对大豆^[14]、水稻^[15]、大麦^[16]、豌豆^[17]等应对盐胁迫时的生理响应做了大量研究,发现不同作物间对盐胁迫的响应存在差异,且不同品种间的响应机制也不尽相同。植物在遭受胁迫时,细胞内外产生离子浓度差,造成渗透胁迫,扰乱体内离子平衡^[18-19]。细胞膜作为植物细胞的屏障,在植物遭受盐胁迫时最先受到攻击,丙二醛(MDA)含量是衡量膜损伤程度的重要指标,当细胞膜完整性遭到破坏时,MDA含量升高^[20-21]。为了缓解盐胁迫带来的损伤,植物中的游离脯氨酸、可溶性蛋白等渗透调节物质可以主动积累,使其能够应对受损的细胞,维持细胞内外环境的稳态^[22]。

为探明不同耐受型花生品种对盐胁迫的生理响应和筛选出适合东北地区种植的耐盐花生品种。本研究以前期初步筛选出的 3 对不同耐受型花生品种为试材^[23],采用水培方式,研究了盐胁迫下不同基因型花生品种的细胞膜受损伤程度、活性氧清除能力和渗透调节物质积累情况,明确了不同基因型花生品种在盐胁迫下的生理特性变化规律。并通过田间耐盐性鉴定和产量及其相关因素分析,确定了适合东北地区种植的耐盐花生品种。研究结果为花生耐盐调控与改良提供了重要的生理依据,也为东北地区花生逆境栽培提供了种质选择。

1 材料与方 法

1.1 材 料

通过对沈阳农业大学花生研究所提供和搜集的花生种质进行萌发期种子活力指数测定、苗期 6 个形态指标测定、田间 9 个农艺性状测定,并结合聚类分析、隶属函数分析、灰色关联度分析、主成分分析等多元统计方法,筛选得到的^[23]耐盐型花生品种农花 5 号(NH5)、铁花 5 号(TH5)、花育 25 号(HY25)和盐敏感型花生品种铁花 2 号(TH2)、阜花 34 号(FH34)、阜花 23 号(FH23)为材料开展试验。

1.2 试验设计

选择均匀一致的花生种子浸泡于 1% 次氯酸钠溶液中消毒处理 10 min,消毒完毕后,用蒸馏水洗

净,置于25℃蒸馏水中充分浸泡8h,种子充分吸胀后利用纸床法置于25℃培养箱中催芽,将发芽整齐的种子播种在蛭石盆中。出苗后,小心取出长势相同的幼苗,去除子叶,移入含有1/2 Hoagland营养液的水培盆中。当花生幼苗长至三叶一心阶段,在1/2 Hoagland营养液中加入200 mmol·L⁻¹ NaCl进行盐胁迫处理。期间每天用蒸馏水补充蒸发减少的水量,同时每3d更换1次营养液。分别在NaCl处理前(0h)和处理后6,12,24,48,72,96,120h采集花生倒三叶置于液氮中冷冻,-80℃保存。每个处理随机选择15株,每个样品进行3次生物重复。

田间试验在沈阳农业大学试验基地(N41°50',E123°34')进行。该地区属温带半湿润大陆性气候,年平均气温6.2~9.7℃,降雨量在600~800mm。播种于2021年5月20日,收获于2021年9月28日。土壤盐胁迫处理通过在土壤中人工添加NaCl模拟,设置隔离池,简单来说,按20cm土壤耕层加入2.5g·kg⁻¹ NaCl(分析纯),均匀翻拌于土壤后以模拟0.25%(中度盐渍化)的土壤盐胁迫水平。施肥水平为传统田间管理的常规施肥水平,氮肥采用尿素(46%,N)160kg·hm⁻²、磷肥采用过磷酸钙(12%,P₂O₅)600kg·hm⁻²、钾肥采用硫酸钾(50%,K₂O)300kg·hm⁻²,以基肥方式施入。垄长3m,垄距0.6m,每垄株间距10cm,采用随机区组设计,每组重复3次。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生理指标测定 超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量参照LING^[24]的方法,分别利用光化学硝基氮蓝四唑法、愈创木酚法、硫代巴比妥酸法比色测定。游离脯氨酸含量参照SONG^[25]的方法测定。可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝G250比色法测定。各处理均3次生物学重复。

1.3.2 产量相关指标测定 花生成熟期,各处理随机选取长势一致的10株花生统计单株果数和单株饱果数,待花生荚果自然风干后称重,计算单株产量,并通过考种计算百果重和百仁重等产量构成因素。

1.4 数据分析与统计

使用Microsoft Excel 2016进行数据整理和分析。使用R v3.4.4对所得数据进行多重比较及相关性分析。使用GraphPad Prism 8.0.2及R v3.4.4软件绘制图表。

2 结果与分析

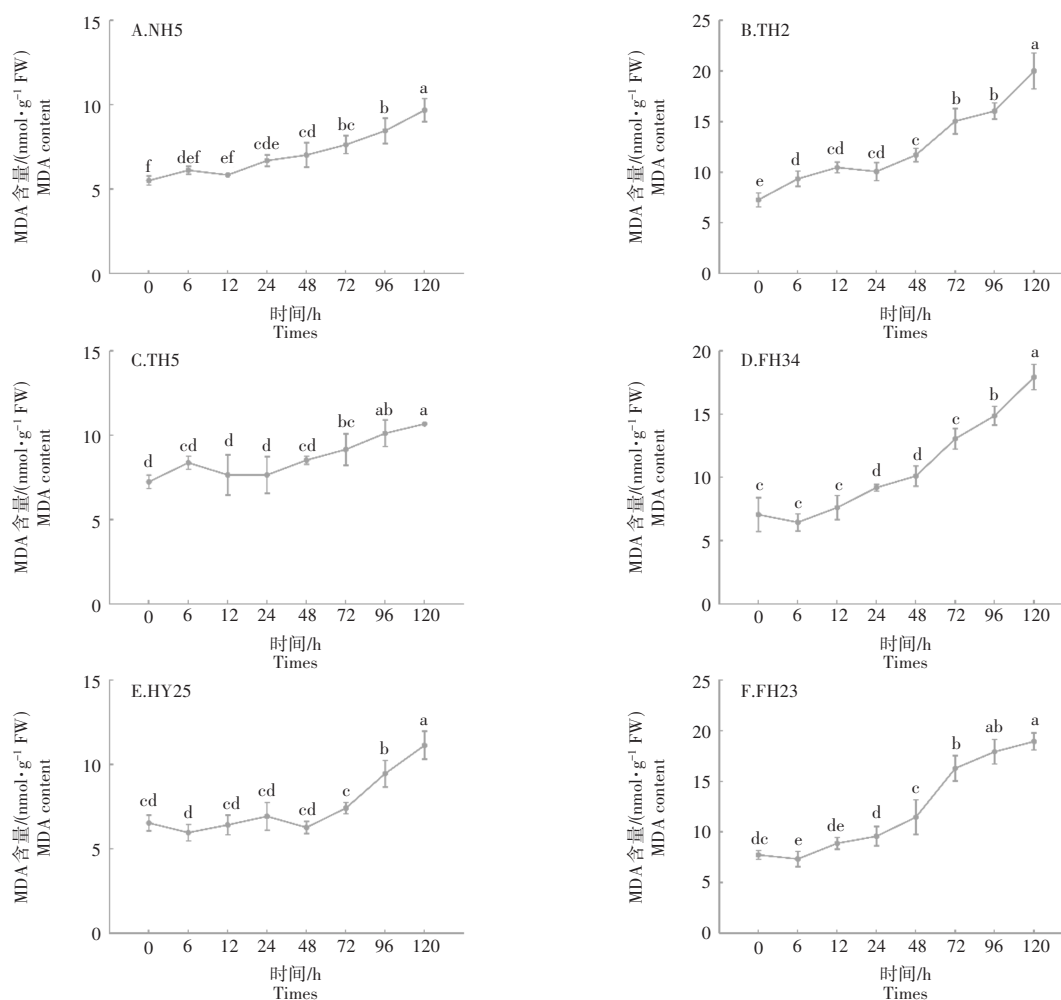
2.1 盐胁迫对花生幼苗叶片MDA含量的影响

由图1可知,盐胁迫时间的持续导致6个花生品种的MDA含量均呈上升趋势,且盐敏感型花生品种(TH2、FH34、FH23)的上升幅度远大于耐盐型花生品种(NH5、TH5、HY25)。在胁迫初期(6h和12h),耐盐型品种的变化幅度较为平缓,与0h相比无显著差异;随着胁迫时间的延长,MDA含量呈显著上升趋势,在120h达到峰值,且NH5、TH5和HY25的MDA含量较0h分别增加75.78%、47.35%和70.43%。盐敏感型花生品种在胁迫初期也表现出MDA含量的显著上升,其中TH2的增幅最大,与0h相比,12h增加43.95%。在胁迫120h时,TH2、FH34和FH23的MDA含量分别较0h增加2.75、2.54、2.44倍。

2.2 盐胁迫对花生幼苗叶片抗氧化酶的影响

由图2A可知,在盐胁迫条件下盐敏感型花生品种(TH2、FH34、FH23)叶片中的SOD活性、POD活性均要低于耐盐型花生品种(NH5、TH5、HY25)。在胁迫初期,NH5和HY25叶片SOD活性显著升高,其中NH5的SOD活性在6h时达到峰值(400.18 nmol·g⁻¹),HY25的SOD活性在12h时达到峰值(402.37 nmol·g⁻¹),分别较0h提高1.58倍和1.26倍。随着胁迫时间的延长,各品种SOD活性均较0h有所提高。在120h时,HY25的SOD活性与0h相比,提高24.97%,达401.54 nmol·g⁻¹。而FH34和FH23作为盐敏感型花生品种,在48h存在一个峰值,随着胁迫时间的延长,SOD活性呈显著降低趋势。

由图2B可知,POD活性随盐胁迫持续呈先升高后降低的趋势,且耐盐型品种中的增幅更大。在胁迫6h时,耐盐型品种POD活性的上升程度大于盐敏感型品种,其中NH5在6h时叶片中POD活性的增幅最大,较0h增加48.19%;而敏感型品种FH34增幅最小,仅增加9.75%。贯穿整个胁迫过程,耐盐型品种比盐敏感型品种具有更强的POD活性,其中HY25的POD活性最高,维持在1415.58~1823.87 nmol·g⁻¹之间,而敏感型品种TH2、FH34和FH23的POD活性处于较低水平,在729.99~1253.09 nmol·g⁻¹间浮动。



图中不同小写字母表示同一品种在不同胁迫时间上差异显著($p < 0.05$),下同

Different lowercase letters in the figure indicate significantly different between the different stress times points of same cultivars ($p < 0.05$), the same below

图1 盐胁迫对不同品种花生幼苗MDA含量的影响

Figure 1 Effects of salt stress on MDA content in peanut seedlings of different cultivars

2.3 盐胁迫对花生幼苗叶片中渗透调节物质的影响

由图3A可知,随着NaCl胁迫时间的延长,不同耐受型花生品种叶片中的游离脯氨酸含量均呈先上升后下降趋势,但达到峰值的时间存在差异,且达到峰值后的降幅不同。耐盐型花生品种中,NH5在96 h达到最大值,TH5在48 h达到最大值,HY25在72 h达到最大值,相较于0 h分别提高330.39%、294.13%和338.43%;在120 h虽略有降低,但仍保持在较高水平,相较于0 h分别提高310.54%、214.74%和279.68%。耐盐型花生品种盐胁迫120 h后,游离脯氨酸含量分别较峰值下降4.61%、19.14%和13.4%,但较0 h仍呈显著上升趋势。盐敏感品种中,TH2、FH34和FH23的游离脯氨酸含量均在72 h达到峰值,相较于0 h分别提高175.91%、456.41%和601.75%;盐胁迫120 h后,分别较峰值下降24.72%、56.05%和39.23%。

由图3B可知,可溶性蛋白含量表明,在盐胁迫初期(6 h和12 h)各品种可溶性蛋白含量均显著上升,其中NH5的增幅最大,是对照的2.02倍;其次分别是FH23和HY25,分别增加1.71倍和1.51倍。随着胁迫时间的延长,耐盐型品种NH5、TH5和HY25的可溶性蛋白含量变化趋势趋于稳定。而盐敏感型花生品种TH2、FH34和FH23的可溶性蛋白含量在胁迫96 h后和120 h后显著降低,其中FH23的降幅最明显,降幅达38.48%,其次是FH34,降幅25.87%。

2.4 盐胁迫下花生幼苗叶片中各生理指标的变异系数

由表1可知,通过对盐胁迫下不同耐受型花生品种生理指标进行变异系数分析,发现盐敏感型花

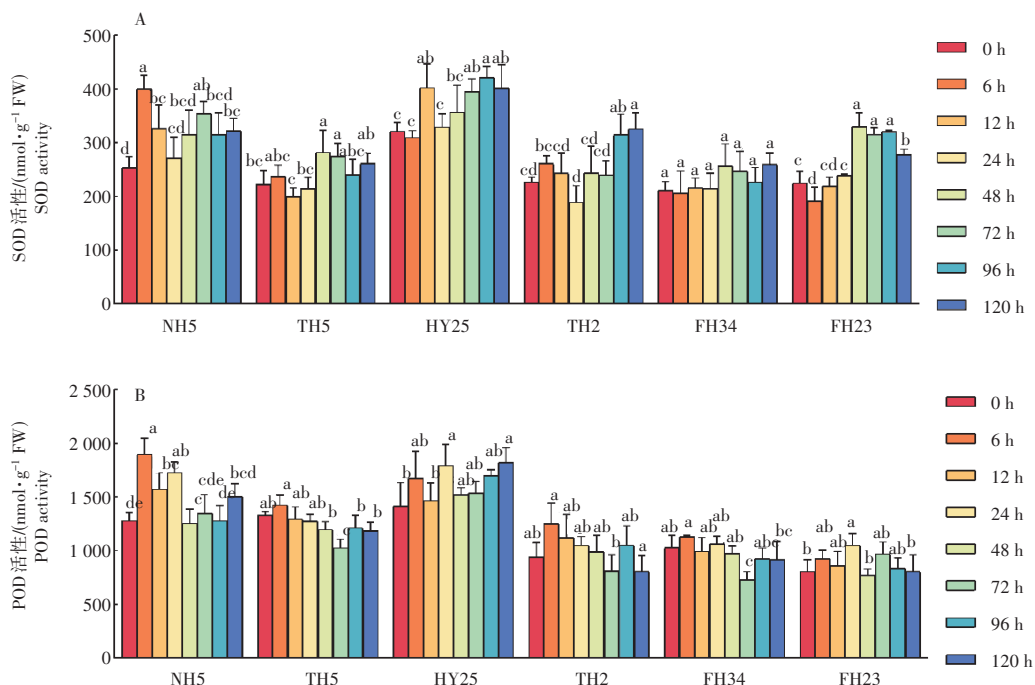


图2 盐胁迫对不同品种花生幼苗SOD和POD活性的影响

Figure 2 Effects of salt stress on SOD activity and POD activity in peanut seedlings of different cultivars

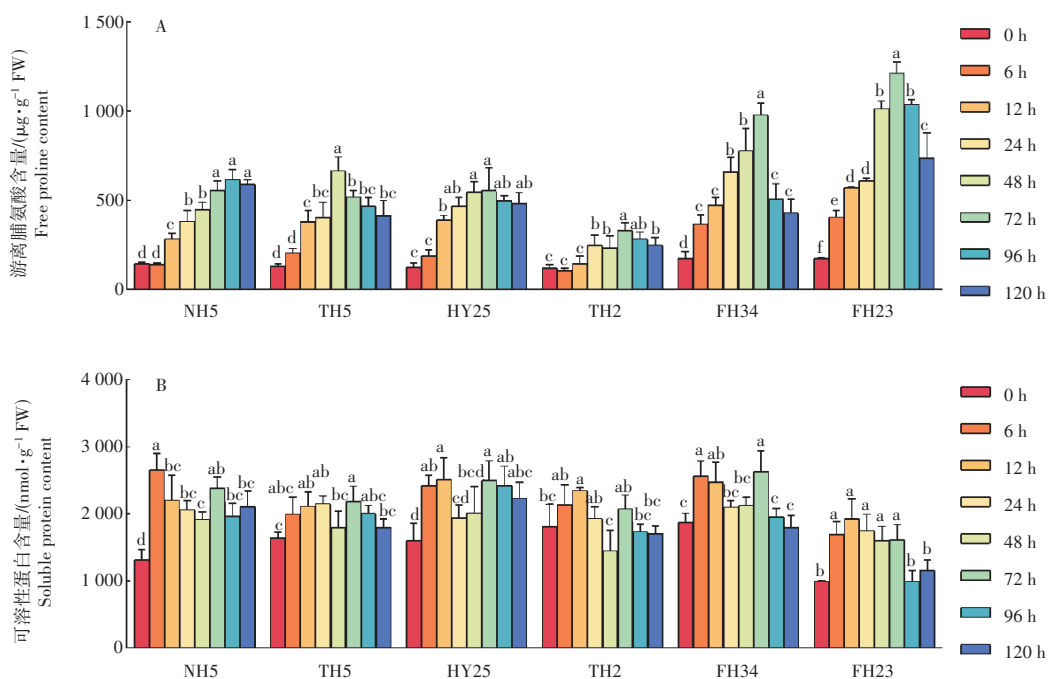


图3 盐胁迫对不同品种花生幼苗游离脯氨酸含量和可溶性蛋白含量的影响

Figure 3 Effects of salt stress on free proline content and soluble protein content in peanut seedlings of different cultivars

生品种FH23较其余5个品种,MDA含量、SOD活性、可溶性蛋白含量的变异系数最高,分别为37.53%、19.98%和26.34%。6个花生品种中脯氨酸含量的变异系数最高,其中耐盐型花生品种NH5、TH5和HY25的变异系数分别为47.10%、42.36%和40.10%,盐敏感型花生品种TH2、FH34和FH23的变异系数分别为39.92%、45.48%和47.04%。并且,耐盐型花生品种(NH5、TH5、HY25)中MDA含量的变异系数均低于盐敏感型花生品种。表明耐盐型花生叶片有更强的膜稳定性和抗氧化能力,进而展现出较强的耐盐性。

表1 不同花生品种在盐胁迫下各生理指标的变异系数

Table 1 Coefficients of variation of physiological indexes in different peanut cultivars under salt stress

品种 Cultivars	MDA含量		SOD活性		POD活性		游离脯氨酸含量		可溶性蛋白含量	
	MDA content		SOD activity		POD activity		Free proline content		Soluble protein content	
	平均值±标准差 Means±SD	变异系数/% CV	平均值±标准差 Means±SD	变异系数/% CV	平均值±标准差 Means±SD	变异系数/% CV	平均值±标准差 Means±SD	变异系数/% CV	平均值±标准差 Means±SD	变异系数/% CV
NH5	7.11±1.42	19.96	319.66±51.80	16.21	1 484.35±252.20	16.99	395.35±186.20	47.10	2 078.54±413.46	19.89
TH5	8.66±1.33	15.34	241.54±35.14	14.55	1 244.97±133.36	10.71	398.78±168.90	42.36	1 963.45±241.67	12.31
HY25	7.51±1.82	24.23	367.02±49.47	13.48	1 616.67±199.82	12.36	407.17±163.26	40.10	2 207.87±389.07	17.62
TH2	12.49±4.09	32.75	255.60±50.76	19.86	1 003.87±196.86	19.61	215.15±85.89	39.92	1 899.42±328.12	17.27
FH34	10.78±4.00	37.09	229.74±32.56	14.17	970.16±142.88	14.73	546.18±248.43	45.48	2 190.72±353.15	16.12
FH23	12.27±4.61	37.53	264.76±52.90	19.98	879.81±128.75	14.63	720.81±339.08	47.04	1 467.77±386.55	26.34

2.5 盐胁迫下花生幼苗叶片中各生理指标相关性分析

由图4可知,不同耐受型花生品种生理指标的相关性分析表明,MDA含量与POD活性、游离脯氨酸含量、可溶性蛋白含量均呈显著相关关系($p=0.001$),其中与POD活性和可溶性蛋白含量呈负相关关系,与游离脯氨酸含量呈正相关关系。POD活性与SOD活性和可溶性蛋白含量均有较强的正相关关系,相关系数分别为0.53和0.41($p=0.001$)。SOD活性与可溶性蛋白含量在0.01水平呈显著相关关系,相关系数为0.23。

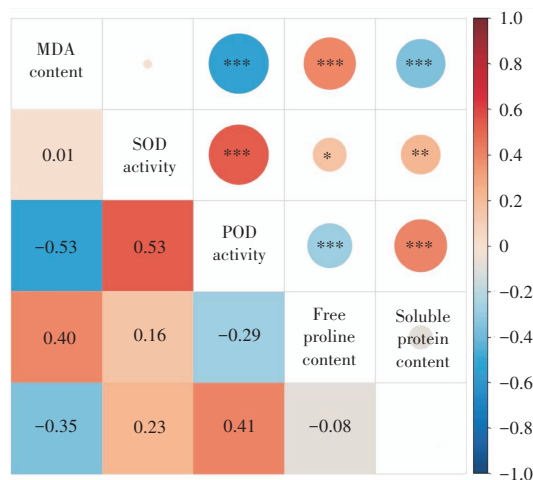
2.6 盐胁迫对花生产量及产量相关因素的影响

由图5可知,与对照相比,盐胁迫下6个花生品种的产量性状均表现出不同程度的下降趋势,NH5、TH5、HY25、TH2、FH34和FH23的单株产量分别下降33.85%、59.67%、28.70%、49.21%、50.36%和66.41%。其中TH5产量的降幅要大于盐敏感型花生品种TH2、FH34,说明即使TH5在萌发期、苗期表现出较强的耐盐性,但其生育后期的产量受盐胁迫影响较大。因此,基于田间产量数据,可将NH5和HY25确定为耐盐型花生品种,而TH5、TH2、FH34和FH23均为盐敏感型花生品种。从产量构成相关因素可知,盐胁迫均对花生的单株果数、单株饱果数、百果重、百仁重造成不利影响,且盐敏感品种所受到抑制程度要明显高于耐盐型品种。其中,NH5、TH5、FH34和FH23的单株饱果数下降幅度最大,分别为25.26%、54.17%、38.82%和42.05%。HY25和TH2的百仁重降幅最大,分别为28.35%和43.06%。

3 讨论与结论

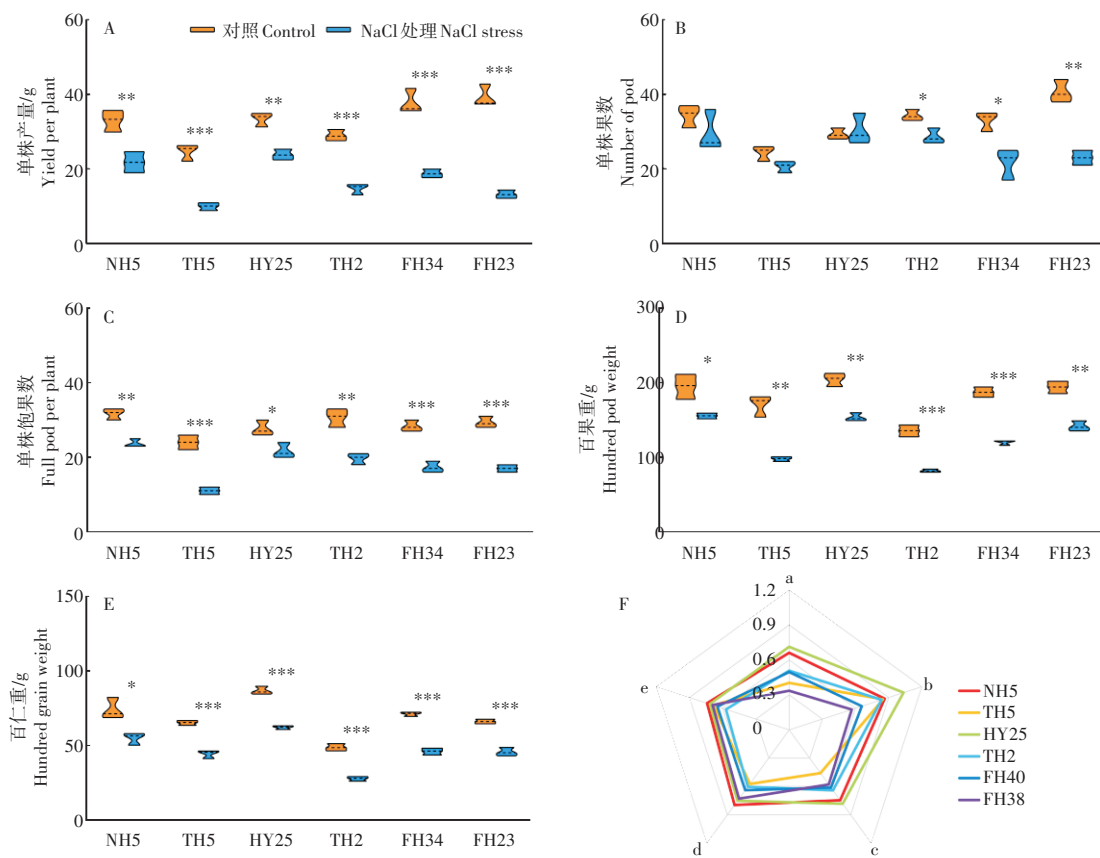
长期以来,土壤盐碱化严重制约了全球范围内的作物生长发育,因此作物响应盐胁迫的研究一直广受关注^[26-27]。花生作为优质植物蛋白、植物油的重要来源,具有极强的耐贫瘠性,通常被种植在干旱和盐渍化等边际土地上^[7,28-29]。因此,提高耐盐花生品种的选用和改良成为盐渍化地区增产、扩大耕地面积最有效和经济的途径^[16]。

盐渍化土壤中过高的土壤盐分会对作物造成盐胁迫,盐胁迫会导致作物体内Na⁺、Cl⁻等有毒离子大量积累,扰乱了作物体内离子平衡,造成渗透胁迫,从而影响作物的生长发育^[18]。细胞膜是植物遭遇盐胁迫时最先被攻击的部位^[20]。持续胁迫会严重破坏细胞膜完整性、流动性和选择通透性,导致大量胞内物质外渗,最终致使整个细胞功能丧失^[30]。丙二醛(MDA)是衡量细胞膜损伤程度的指标,植物



*、**、***分别代表在0.05,0.01,0.001水平上显著相关
Significant at 0.05, 0.01, and 0.001 levels is marked with
*, **, ***, respectively

图4 盐胁迫花生各生理指标相关系数矩阵
Figure 4 Correlation matrix of physiological indexes in peanut seedling stage under salt stress



F. 盐胁迫对花生产量性状影响雷达图。a. 单株产量; b. 单株果数; c. 单株饱满果数; d. 百果重; e. 百仁重。*、**、***分别代表在0.05, 0.01, 0.001水平上显著相关

F. Radar map of peanut yield traits under salt stress. a. Yield per plant; b. Number of pod; c. Full pod per plant; d. Hundred pod weight; e. Hundred grain weight. Significant at 0.05, 0.01, and 0.001 levels is marked with *, **, ***, respectively

图5 盐胁迫对花生产量性状的影响

Figure 5 Effect of salt stress on peanut yield traits

遭受胁迫时,MDA 含量升高^[21,31]。HUSSAIN 等^[32]研究表明,盐胁迫下,无论对盐胁迫的耐受性如何,MDA 含量均升高,且敏感品种比耐盐品种的上升幅度更大。这与本研究结果一致,盐胁迫后花生叶片中MDA 含量显著升高,盐敏感型花生品种FH34和FH23的增幅更大,表明其遭受了更严重的氧化损伤。脯氨酸是一种重要的渗透调节物质,在渗透调节中起重要作用^[33]。关于脯氨酸在渗透调节中的作用存在争议。有研究认为脯氨酸的积累有助于玉米自交系的渗透调节,增强耐盐性^[34]。另一种相反的观点认为脯氨酸并不直接参与缓解渗透胁迫,而是作为活性氧清除剂和膜结构稳定剂来抵抗胁迫条件^[35]。研究发现,花生叶片中脯氨酸上升幅度与耐盐性不呈正相关关系^[36]。盐胁迫下,盐敏感型品种叶片中积累更多脯氨酸和可溶性蛋白^[31]。本研究发现,在持续盐胁迫下,耐盐型花生品种中游离脯氨酸和可溶性蛋白含量呈平稳上升趋势,并保持在较高水平,而盐敏感型花生品种在胁迫后期呈显著下降趋势。说明耐盐型花生品种在盐胁迫下可以通过增加渗透调节物质的含量来维持渗透压平衡。同时,胁迫也伴随着活性氧清除酶的变化。GURMANI 等^[17]研究发现,盐胁迫下两个豌豆品种的SOD活性、POD活性均升高。本研究也发现类似趋势,且耐盐型花生品种相较盐敏感品种,可通过更强的SOD活性、POD活性来抵御盐胁迫造成的氧化损伤。

遭遇盐胁迫时,土壤中微量金属离子浓度升高,影响作物对营养元素和矿质元素的吸收和利用,进而抑制生殖生长^[37-38]。此外,盐胁迫易致土壤板结,导致果针下扎根十分困难,抑制花生荚果形成^[39]。田家明等^[40]认为百果重、百仁重的降低,是导致花生产量下降的关键因素。史晓龙等^[41]研究认为,盐胁迫下,荚果发育进程受到抑制,荚果数减少,最终导致花生荚果饱果数少,甚至有大量秕果、空果、烂果,严重影响花生产量和品质。盐胁迫通过影响花生出仁率、百果重、百仁重,严重影响不同抗性花生品种籽仁的生长发育,并严重减产^[36,42]。本研究发现,盐胁迫下6个花生品种的单株产量均有

所降低,其中NH5和HY25花生产量降幅小于其他4品种。TH5单株果数与对照相比虽未显著降低,但荚果空瘪、饱果数低导致单株产量较低。TH5在萌发期、幼苗期表现出较强的耐盐性,但其生育后期的产量受盐胁迫影响较大,这也说明花生在不同生育期对盐胁迫的耐受性不同^[43]。同时,盐敏感型花生品种减产的关键因素不同。饱果数减少是TH5、FH34和FH23减产的关键因素,百仁重降低是TH2产量受抑制的主要因素。作物的表型一直是驯化育种的重要依据^[44]。耐盐品种可作为作物育种的遗传资源,以保证未来产量的稳定^[32,45]。

综上,不同耐受型花生品种对盐胁迫的生理响应存在显著差异。遭受盐胁迫时,敏感型花生品种的膜系统更易遭受胁迫损伤,耐盐型花生品种通过更高的抗氧化酶活性和更强的渗透调节能力,展现出更强的耐盐性。此外,单株果数和百仁重的减少是盐胁迫导致花生产量降低的主要原因,且盐敏感型花生品种表现更为明显。整体而言,NH5和HY25在生理和产量层面均展现出较好的耐盐性。

参考文献:

- [1] ZHAO S S,ZHANG Q K,LIU M Y,et al.Regulation of plant responses to salt stress[J].International Journal of Molecular Sciences,2021,22(9):4609-4624.
- [2] LIANG S,WANG S N,ZHOU L L,et al.Combination of biochar and functional bacteria drives the ecological improvement of saline-alkali soil[J].Plants,2023,12(2):284-296.
- [3] BONKU R,YU J M.Health aspects of peanuts as an outcome of its chemical composition[J].Food Science and Human Wellness,2020,9(1):21-30.
- [4] 袁 洋,董奇琦,贾佩岩,等.间作下不同肥料对玉米花生生长发育、氮代谢及产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2022,53(2):129-139.
- [5] ZHANG C S,SELVARAJ J N,YANG Q L,et al.A survey of aflatoxin-producing *Aspergillus* sp. from peanut field soils in four agroecological zones of China[J].Toxins,2017,9(1):40-53.
- [6] 廖伯寿.我国花生生产发展现状与潜力分析[J].中国油料作物学报,2020,42(2):161-166.
- [7] SHI X L,ZHAO X H,REN J Y,et al.Influence of peanut,*Sorghum*,and soil salinity on microbial community composition in interspecific interaction zone[J].Frontiers in Microbiology,2021,12:678250-678262.
- [8] LIU P,ZHU Y,LIU H,et al.A combination of a genome-wide association study and a transcriptome analysis reveals circrnas as new regulators involved in the response to salt stress in Maize[J].International Journal of Molecular Sciences,2022,23(17):9755-9772.
- [9] RAZZAQ A,SALEEM F,WANI S H,et al.*De-novo* domestication for improving salt tolerance in crops[J].Frontiers in Plant Science,2021,12:681367-681381.
- [10] LIANG X Y,LI J F,YANG Y Q,et al.Designing salt stress-resilient crops: Current progress and future challenges[J].Journal of Integrative Plant Biology,2023.DOI:10.1111/jipb.13599.
- [11] FU B,LIANG J Y,ZHANG M M,et al.Influence of genotypic and environmental factors on tobacco leaves based on metabolomics[J].Life,2022,12(4):590-598.
- [12] XU T T,MENG S,ZHU X P,et al.Integrated GWAS and transcriptomic analysis reveal the candidate salt-responding genes regulating Na⁺/K⁺ balance in barley (*Hordeum vulgare* L.)[J].Frontiers in Plant Science,2022,13:1004477-1004497.
- [13] ZEESHAN M,LU M Q,NAZ S,et al.Resemblance and difference of seedling metabolic and transporter gene expression in high tolerance wheat and barley cultivars in response to salinity stress[J].Plants,2020,9(4):519-535.
- [14] MEHMOOD S,AHMED W,IKRAM M,et al.Chitosan modified biochar increases soybean (*Glycine max* L.) resistance to salt-stress by augmenting root morphology,antioxidant defense mechanisms and the expression of stress-responsive genes [J].Plants,2020,9(9):1173-1197.
- [15] ZHANG X,YANG F,MA H Y,et al.Evaluation of the saline-alkaline tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) mutants induced by heavy-ion beam mutagenesis[J].Biology,2022,11(1):126-138.
- [16] XU T T,MENG S,ZHU X P,et al.Integrated GWAS and transcriptomic analysis reveal the candidate salt-responding genes regulating Na⁺/K⁺ balance in barley (*Hordeum vulgare* L.)[J].Frontiers in Plant Science,2023,13:1004477-1004497.
- [17] RAZA GURMANI A,WANG X K,RAFIQUE M,et al.Exogenous application of gibberellic acid and silicon to promote salinity tolerance in pea (*Pisum sativum* L.) through Na⁺ exclusion[J].Saudi Journal of Biological Sciences,2022,29(6):103305-103313.
- [18] LIAQAT A,ALFATHI A,JAN S U,et al.Transcription elongation factor AtSPT4-2 positively modulates salt tolerance in *Arabidopsis thaliana*[J].BMC Plant Biology,2023,23(1):49-61.

- [19] 任婧瑶,王婧,艾鑫,等.干旱胁迫下花生苗期耐旱生理应答特性分析[J].中国油料作物学报,2022,44(1):138-146.
- [20] SUN M X,LIU X L,GAO H F,et al.Phosphatidylcholine enhances homeostasis in peach seedling cell membrane and increases its salt stress tolerance by phosphatidic acid[J].International Journal of Molecular Sciences,2022,23(5):2585-2601.
- [21] WANG H Y,LI Z B,REN H B,et al.Regulatory interaction of BcWRKY33A and BcHSFA4A promotes salt tolerance in non-heading Chinese cabbage[*Brassica campestris* (syn.*Brassica rapa*) ssp.*chinensis*][J].Horticulture Research,2022,9:uhac113-130.
- [22] XU J Y,CHEN Q S,LIU P P,et al.Integration of mRNA and miRNA analysis reveals the molecular mechanism underlying salt and alkali stress tolerance in tobacco[J].International Journal of Molecular Sciences,2019,20(10):2391-2408.
- [23] ZHANG N,ZHANG H,REN J Y,et al.Characterization and comprehensive evaluation of phenotypic and yield traits in salt-stress-tolerant peanut germplasm for conservation and breeding[J].Horticulturae,2024,10(2):147-164.
- [24] LING F L,SU Q W,JIANG H,et al.Effects of strigolactone on photosynthetic and physiological characteristics in salt-stressed rice seedlings[J].Scientific Reports,2020,10(1):6183-6190.
- [25] SONG Y,JIANG M,ZHANG H L,et al.Zinc oxide nanoparticles alleviate chilling stress in rice (*Oryza sativa* L.) by regulating antioxidative system and chilling response transcription factors[J].Molecules,2021,26(8):2196-2207.
- [26] ZHOU Z X,WANG J,YU Q H,et al.Promoter activity and transcriptome analyses decipher functions of CgbHLH001 gene (*Chenopodium glaucum* L.) in response to abiotic stress[J].BMC Plant Biology,2023,23(1):116-139.
- [27] TREJO-TÉLLEZ L I.Salinity stress tolerance in plants[J].Plants,2023,12(20):3520-3523.
- [28] ZHU H,JIANG Y N,GUO Y,et al.A novel salt inducible WRKY transcription factor gene,AhWRKY75,confers salt tolerance in transgenic peanut[J].Plant Physiology and Biochemistry:PPB,2021,160:175-183.
- [29] 史晓龙,郭佩,任婧瑶,等.基于花生//高粱间作模式的花生盐胁迫耐受性效应研究[J].中国农业科学,2022,55(15):2927-2937.
- [30] JI X Y,TANG J L,FAN W,et al.Phenotypic differences and physiological responses of salt resistance of walnut with four rootstock types[J].Plants,2022,11(12):1557-1576.
- [31] GUO X,AHMAD N,ZHAO S Z,et al.Effect of salt stress on growth and physiological properties of *Asparagus* seedlings[J].Plants,2022,11(21):2836-2849.
- [32] HUSSAIN S,BAI Z G,HUANG J,et al.1-methylcyclopropene modulates physiological,biochemical,and antioxidant responses of rice to different salt stress levels[J].Frontiers in Plant Science,2019,10:124-141.
- [33] CHEN J F,LIU Y,ZHANG T Y,et al.Integrated physiological and transcriptional dissection reveals the core genes involving nutrient transport and osmoregulatory substance biosynthesis in allohexaploid wheat seedlings under salt stress[J].BMC Plant Biology,2022,22(1):502-520.
- [34] CHEN F Q,FANG P,PENG Y L,et al.Comparative proteomics of salt-tolerant and salt-sensitive maize inbred lines to reveal the molecular mechanism of salt tolerance[J].International Journal of Molecular Sciences,2019,20(19):4725-4746.
- [35] KIM J,LIU Y M,ZHANG X Z,et al.Analysis of salt-induced physiological and proline changes in 46 switchgrass (*Panicum virgatum*) lines indicates multiple response modes[J].Plant Physiology and Biochemistry:PPB,2016,105:203-212.
- [36] 高荣嵘,杨莎,郭峰,等.盐旱交叉胁迫对花生生长发育和生理特性的影响[J].中国油料作物学报,2018,40(2):218-226.
- [37] TIAN T,WANG J G,WANG H J,et al.Nitrogen application alleviates salt stress by enhancing osmotic balance,ROS scavenging,and photosynthesis of rapeseed seedlings (*Brassica napus*)[J].Plant Signaling & Behavior,2022,17(1):2081419-2081430.
- [38] 修俊杰,赵新华,刘学良.花针期水氮互作对铁引花2号花生氮素累积与分配及产量的影响[J].沈阳农业大学学报,2022,53(4):454-461.
- [39] 任静.花生品种全生育期耐盐碱性鉴定及主要品质评价[D].哈尔滨:东北农业大学,2023.
- [40] 田家明,张智猛,戴良香,等.外源钙对盐碱土壤花生荚果生长及籽仁品质的影响[J].中国油料作物学报,2019,41(2):205-210.
- [41] 史晓龙,张智猛,戴良香,等.钙肥对盐胁迫下花生荚果发育动态的影响[J].中国农学通报,2019,35(20):6-12.
- [42] 戴良香,丁红,史晓龙,等.盐胁迫对不同生育时期花生根际土壤细菌群落和产量的影响[J].华北农学报,2021,36(5):59-67.
- [43] 闫彩霞,王娟,赵小波,等.全生育期鉴定筛选耐盐碱花生品种[J].作物学报,2021,47(3):556-565.
- [44] GUSTAFSSON C,WILLFORSS J,LOPES-PINTO F,et al.Identification of genes regulating traits targeted for domestication of field cress (*Lepidium campestre*) as a biennial and perennial oilseed crop[J].BMC Genetics,2018,19(1):36-50.
- [45] LAKSANA C,SOPHIPHUN O,CHANPRAME S.In vitro and in vivo screening for the identification of salt-tolerant sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) clones: molecular, biochemical, and physiological responses to salt stress[J].Saudi Journal of Biological Sciences,2023,30(6):103655-103667.