

余 忆,汪 伟,万何平,等. 盐胁迫下氮素对生菜形态建成及生理生化特性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):165-170.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.17.023

# 盐胁迫下氮素对生菜形态建成及生理生化特性的影响

余 忆,汪 伟,万何平,伍晓明,曾长立

(江汉大学生命科学学院/湖北省汉江流域特色生物资源保护开发与利用工程技术研究中心,湖北武汉 430000)

**摘要:**随着保护地园艺的快速发展,保护土壤免受次生盐渍化威胁的问题日益突出,其中施肥不当是造成土壤盐渍化的重要原因。在保护地园艺的生产过程中,多叶蔬菜是施氮量最大的种类之一,但与氮素对盐胁迫下多叶蔬菜的调控相关的研究目前较少。本研究以生菜(*Lactuca sativa* L.)为试验材料,采用水培试验,重点研究了盐胁迫下不同氮素水平对生菜生理生化特性的影响。采用双因素水平设计,在霍格兰营养液中,分别设计了4个不同浓度的氮素水平(0,110,220,330 mg/L)处理生菜,然后用0,100,200 mmol/L NaCl 溶液分别进行盐胁迫处理。盐胁迫第10天分别测定生理生化指标。结果表明,110~220 mg/L 氮素水平对生菜的抗盐性具有明显的影响,能促进植株生长;能显著降低丙二醛(MDA)含量,显著提高可溶性蛋白含量,显著增强细胞保护酶超氧化物歧化酶(SOD)与过氧化物酶(POD)活性。在氮素及盐胁迫效应比较中,氮素和盐胁迫对 SOD 和 POD 活性的效应非常接近;而在 MDA 含量与盐害指数上,盐浓度为特效;在可溶性蛋白含量中,氮素水平为特效。氮素效应和盐胁迫效应均高于氮素-盐胁迫间的互作效应。

**关键词:**生菜;氮素;盐胁迫;形态建成;生理生化特性

**中图分类号:**S636.201 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)17-0165-06

盐渍化已逐渐成为制约农业发展的重大因素之一,全球范围内的土壤盐碱化都日益严重,对植物的形态建成和生态分布造成了严重影响,是制约粮食产量,恶化粮食危机的重要原因之一<sup>[1-2]</sup>。土壤中的高盐主要通过渗透胁迫、离子毒性和活性氧累积三大次生胁迫对植物造成伤害,最直观且肉眼可见地表现为抑制作物发芽,导致植物鲜质量、可溶性蛋白含量、株高、根系等一系列指标下降,这类对植物生长的抑制作用随盐浓度升高而加剧<sup>[3]</sup>。

研究表明,适量施加氮肥是缓解盐分对植物不利影响的重要手段之一<sup>[4-5]</sup>。

氮作为植物必需营养元素中需求量最大的元素,广泛参与植物体内养分利用及生物合成以保证植物健康生长,对作物产量与品质起关键性作用<sup>[6]</sup>。为提高产量,部分种植者过量施加氮肥,然而氮素因其高溶于水的特性,过度使用极易导致次生盐渍化和连作障碍,不仅会降低其产量,还会对土壤、环境造成无法弥补的损害,不利于可持续发展。此外,硝酸盐作为植物最重要的氮源之一,过量摄入会威胁人体健康,增加患癌风险<sup>[7-8]</sup>。综上所述,无论从生态可持续发展的角度还是从粮食质与量的角度来看,精准化施氮都是亟待解决的问题。

生菜属于菊科莴苣属,是一种在我国南北方广泛种植的叶菜类蔬菜,由于其含有丰富的无机盐、

收稿日期:2022-11-24

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0100202-25)。

作者简介:余 忆(1998—),女,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为植物逆境生理。E-mail:378522319@qq.com。

通信作者:曾长立,博士,教授,博士生导师,研究方向为植物营养生理与逆境生理。E-mail:zengchangli@jhun.edu.cn。

版社,1994:155-242。

- [32] Herrick J D, Thomas R B. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on the photosynthetic light response of sun and shade leaves of canopy sweetgum trees (*Liquidambar styraciflua*) in a forest ecosystem[J]. *Tree Physiology*, 1999, 19: 779-786.
- [33] 陈模芳,韦小丽,张 怡. 紫楠实生幼苗的光合生理特性[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(10): 55-58.
- [34] 孙 婧,王 刚,孟艳琼,等. 不同环境下黄山杜鹃光合特性及

其与主要环境因子的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(3): 9-12.

- [35] 张斌斌,马瑞娟,沈志军,等. 窄叶桃叶片秋季光合特性研究[J]. *果树学报*, 2011, 28(5): 763-769.
- [36] 张文标,金则新,柯世省,等. 木荷光合特性日变化及其与环境因子相关性分析[J]. *广西植物*, 2006(5): 492-498.
- [37] 王晓红,纪明山. 入侵植物小飞蓬光合日变化及其与环境因子相关性分析[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(8): 121-124.

维生素和烟酸且具有相当高的营养价值而深受人们喜爱<sup>[9]</sup>。近年来,随着设施园艺的快速发展以及生菜消费需求逐年增长,深入研究生菜在胁迫环境下的生长情况有利于提高其产量,满足市场需求。生菜属于耐盐性较强的蔬菜作物,但不同品种间的耐盐性存在较大差异,使得生菜成为盐胁迫对植物损伤机制相关研究的绝佳材料之一<sup>[10]</sup>。田甜等研究发现,盐胁迫下,适量的氮素能促进饲用油菜有机渗透调节物质的累积,从而缓解盐损伤<sup>[11]</sup>;张永亮等研究发现,氮肥能促进藜草地上部和地下部生长<sup>[12]</sup>;隋利等发现,氮素的施加可以维持植物抗氧化酶、氮代谢酶活性,促进鲜质量和干质量的增加,从而缓解盐胁迫对紫苏幼苗生长的抑制<sup>[13]</sup>。此外,氮肥施用技术在生菜盐胁迫方面的研究也已有诸多报道,然而盐胁迫下氮素对生菜的生理调控作用却罕有研究<sup>[14-17]</sup>。因此,本研究基于氮素水平和不同盐浓度设计双因素试验,重点研究盐胁迫下不同氮素水平对生菜生理生化特性的影响,探讨氮素对植物抗盐性的作用机制,明晰氮素水平与盐胁迫双因素中的主效应,确定提高生菜耐盐性的最适氮素浓度,以期为盐碱地和次生盐渍化土壤上安全种植生菜提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

采用原生意大利生菜品种进行试验。

### 1.2 试验设计

本试验于 2019 年在江汉大学生命科学学院植物逆境生理学实验室进行。挑选饱满一致的健康生菜种子均匀播于装有栽培基质的穴盘中,每穴播 3~4 粒种子,覆土 1 cm,置于恒温培养箱中进行培养。待幼苗长至 3 张真叶后,选取生长良好、长势基本一致的生菜幼苗,洗净根部基质,用泡沫板定植于装有霍格兰营养液的黑色塑料桶中,进行水培试验。霍格兰全营养液中的硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )总量为 196.21 mg/L,铵态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )总量为 23.78 mg/L,总氮含量约为 220 mg/L, $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为 8.25 : 1。因此,根据霍格兰全营养液中的总氮含量,本试验设计了 4 个氮素水平,浓度分别为 0、110、220、330 mg/L;同时,设置 3 个不同盐浓度,分别为 0、100、200 mmol/L,采用 2 因素随机区组设计,共得到 12 个处理组合。每桶种植 6 株,3 次重复。

### 1.3 指标测定

盐胁迫后,每隔 3 d 更换 1 次营养液,并测定形态指标,包括株高(子叶节到生长点之间的距离)、叶长、叶宽、全株鲜质量。盐胁迫后 10 d 调查盐害指数,盐害级别标准为 0 级:无症状;1 级:轻度盐害,叶尖、叶缘 1/5 变黄;2 级:中度盐害,叶尖、叶缘 1/2 变黄;3 级:重度盐害,叶尖、叶缘大部分变黄;4 级:极重度盐害,叶落茎枯,死亡。盐害指数 =  $\Sigma(\text{盐害等级} \times \text{相应盐害等级株数}) / (\text{总调查株数} \times \text{盐害最高值}) \times 100\%$ 。

样品装入纸袋,在烘箱中以 85 °C 杀青 20 min,之后以 65 °C 烘干 10 h,最后研磨成粉末以供生理生化指标的测定。丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法<sup>[18]</sup>。超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法<sup>[19]</sup>。POD 活性测定采用愈创木酚法<sup>[20]</sup>。可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法<sup>[21-22]</sup>。

### 1.4 数据分析

在 Excel 2007 下建立数据库,通过 DPS 2000 进行方差分析,用最小显著差数法(LSD)进行多重比较分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮素水平对盐胁迫下生菜形态建成的影响

不同浓度的氮素水平对盐胁迫下生菜的形态建成的影响见表 1。盐胁迫对生菜株高、叶宽、叶长、鲜质量等均有显著影响。氮素处理对生菜的这些形态建成指标也有显著影响,并且对盐胁迫有缓解作用。其中在低浓度的盐胁迫(100 mmol/L)时,110 mg/L 的氮素水平对盐胁迫下生菜的各项形态建成指标有显著的影响,对生菜受到的盐害有明显的缓解作用,而中、高浓度的氮素水平(220、330 mg/L)对生菜的各项形态指标有抑制作用。在高浓度的盐胁迫(200 mmol/L)下,高浓度的氮素对生菜受到的盐害有一定的缓解作用,其中以 330 mg/L 的氮素对 200 mmol/L 盐胁迫下生菜叶长和鲜质量的影响最为显著,具有明显的缓解作用。

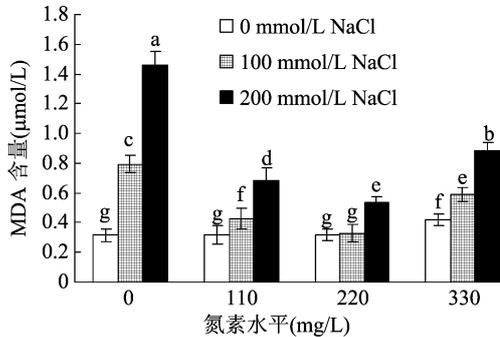
### 2.2 不同氮素水平对盐胁迫下生菜丙二醛含量的影响

氮素处理后对盐胁迫下生菜 MDA 含量的影响见图 1。由图 1 可知,盐浓度对 MDA 含量具有显著影响,MDA 含量具有随盐浓度提高而升高的变化趋

表 1 施氮水平对盐胁迫下生菜形态建成的影响

氮素水平 (mg/L)	株高增量 (cm)			叶宽增量 (cm)			叶长增量 (cm)			鲜质量增量 (g)		
	0 mmol/L	100 mmol/L	200 mmol/L	0 mmol/L	100 mmol/L	200 mmol/L	0 mmol/L	100 mmol/L	200 mmol/L	0 mmol/L	100 mmol/L	200 mmol/L
0	4.90a	1.71c	-2.45e	0.33a	0.15ab	-0.68cde	5.30a	2.25c	-2.73f	0.87c	-0.74d	-2.53f
110	3.47b	2.63b	-2.60e	0.40a	0.20a	-0.73de	4.32ab	3.27bc	-2.07f	1.85ab	0.96bc	-2.15ef
220	3.48b	0.46d	-2.60e	0.32a	-0.45cd	-1.08e	3.35bc	-0.05d	-2.18f	2.08a	-1.13d	-2.84f
330	2.13c	-0.66d	-2.42e	0.20a	-0.28bc	-0.62cd	2.15c	-0.53de	-1.67e	0.65c	-1.05d	-1.47de

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。表 2 同。



柱上不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。图 2、图 3 同

图 1 不同施氮水平对盐胁迫下生菜 MDA 含量的影响

势。外源氮素对 MDA 含量的影响表现为:在盐浓度为 0 mmol/L 下,除了高氮(330 mg/L)处理外,其他处理的 MDA 含量差异并不显著;在 100 mmol/L 盐浓度下,不施氮素处理的 MDA 含量最高,与同水平下的其他处理间差异均达到了显著水平,而 220 mg/L 和 330 mg/L 处理间差异并不显著,但与 110 mg/L 相比,差异达到显著水平。而在高盐(200 mmol/L)浓度下,施加外源氮素对生菜 MDA 含量有显著影响,并在氮素为 220 mg/L 时,生菜的 MDA 含量最低,其缓解盐害的效果明显。综合可知,MDA 的含量随着盐浓度的增加而增加,高盐浓度(200 mmol/L)下,110、220、330 mg/L 的氮素均有明显缓解盐害的效应,其 MDA 含量与不施氮素处理相比分别降低了 55.4%、73.5% 和 46.2%,在氮素水平为 220 mg/L 时其缓解效果最显著,而高浓度的氮素处理并不能降低 MDA 含量,反而会增加膜脂过氧化程度,对植物细胞造成伤害。

### 2.3 不同氮素水平对盐胁迫下生菜叶片中 SOD、POD 活性的影响

SOD、POD 是植物细胞的保护性酶,均可以减轻活性氧对植物的伤害,这 2 种酶的活性间接反映了植物抗性的强弱。不同氮素水平对盐胁迫下生菜叶片中 SOD、POD 活性的影响见图 2。由图 2 可以看出,氮素可以显著提高盐胁迫下生菜叶片中的 SOD 和 POD 活性。就 SOD 活性而言,盐胁迫对生

菜 SOD 活性有显著影响,较低的盐浓度能够显著提高生菜的 SOD 活性,而高浓度盐对生菜的 SOD 活性有明显的抑制作用。外源氮素对生菜 SOD 活性亦有显著影响,与不施氮处理相比,施加氮素能显著提高生菜 SOD 活性,其中氮水平为 220 mg/L 时,对生菜 SOD 活性的提高最为显著;而当氮水平为 330 mg/L 时,SOD 活性又显著降低,表现为明显的抑制作用。说明高浓度氮素会抑制生菜的 SOD 活性。此外,盐胁迫对生菜叶片中的 POD 活性也有显著影响,表现为低浓度的盐胁迫能提高生菜的 POD 活性,而高浓度的盐胁迫对 POD 活性则有显著的抑制作用。施用外源氮素可以显著提高盐胁迫下生菜的 POD 活性,与不施氮处理相比,110 mg/L 与 220 mg/L 的施氮水平能显著提高生菜 POD 活性,而 330 mg/L 的氮素处理则可以显著降低生菜 POD 活性。

### 2.4 不同氮素水平对盐胁迫下生菜可溶性蛋白含量的影响

可溶性蛋白含量高低与作物营养价值及抗逆性有密切联系。由图 3 可知,盐胁迫对生菜可溶性蛋白含量有显著影响,低盐浓度(100 mmol/L)处理后可溶性蛋白含量显著增加,高盐浓度(200 mmol/L)处理后可溶性蛋白含量显著降低。而外源氮素对生菜可溶性蛋白含量也有显著影响,与不施氮处理相比,110、220、330 mg/L 氮素处理后可溶性蛋白含量显著增加,其中 220 mg/L 氮素处理后可溶性蛋白含量最高,而 330 mg/L 氮素处理的可溶性蛋白含量与 110 mg/L 氮素处理的可溶性蛋白含量相比显著降低。说明合适浓度的氮素水平对提高生菜可溶性蛋白含量有显著效果。

### 2.5 不同氮素水平对盐胁迫下生菜盐害指数的影响

由表 2 可知,盐胁迫对盐害指数具有显著的影响,盐浓度越高盐害指数越大。而不同氮素水平对于盐害指数的影响依据盐浓度不同而呈现差异。

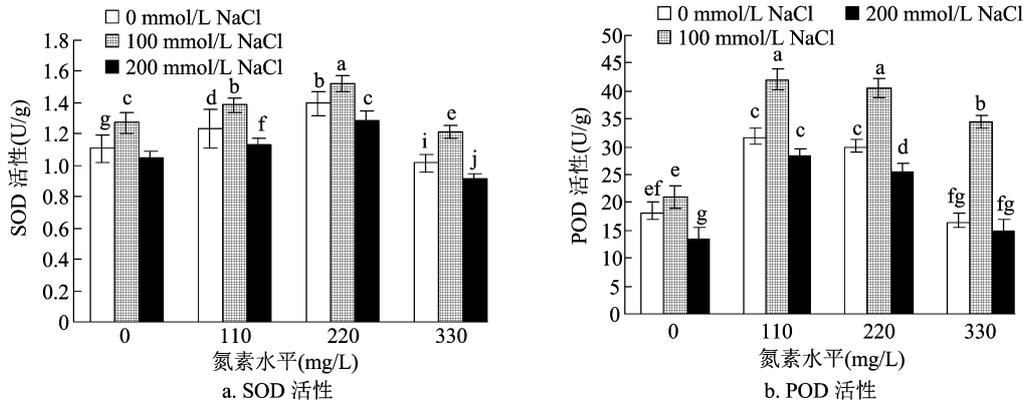


图2 不同施氮水平对盐胁迫下生菜保护性酶活性的影响

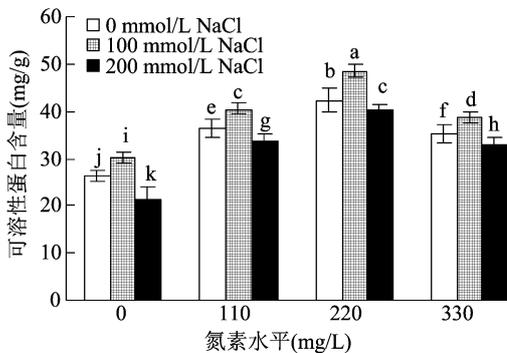


图3 不同施氮水平对盐胁迫下生菜可溶性蛋白含量的影响

表2 不同施氮水平对盐胁迫下生菜盐害指数的影响

氮素水平 (mg/L)	盐害指数(%)	
	100 mmol/L	200 mmol/L
0	58.99d	81.00a
110	52.33e	63.33c
220	50.33e	69.99b
330	53.67e	72.66b

在 100 mmol/L 盐浓度下,与不施氮处理相比,增施氮素可以显著降低盐害指数,但低氮、中氮与高氮

处理之间差异并不显著。但 200 mmol/L 盐浓度下,不施氮处理的盐害指数最高,达 81.00%,而 330 mg/L 氮素处理位居第二,110 mg/L 氮素处理的盐害指数最低,只有 63.33%,该处理与 220、330 mg/L 氮素处理相比差异达到显著水平。这充分说明低氮水平在一定程度上可以缓解盐胁迫造成的伤害,降低盐害指数,而高氮水平并不能缓解盐害效益。

## 2.6 各指标、各氮素水平与盐胁迫效应的比较

将各指标按双因素(氮素和盐胁迫)完全随机化模型进行方差分析,进而估算出 5 个指标各变异分量的期望均方。由表 3 可知,氮素和盐浓度对 SOD 和 POD 活性的影响非常接近;而在 MDA 含量与盐害指数上,盐浓度为主效应;在可溶性蛋白含量中,氮素水平为主效应。氮素效应和盐胁迫效应均高于氮素-盐胁迫间的互作效应。综上可知,对于氮素效应和盐胁迫效应而言,在不同指标上表现出了明显的差异,同时氮素-盐胁迫间的交互作用相比而言较小。

表3 各指标变异分量的期望均方

指标	变异分量				$\sigma_1^2/\sigma_3^2$	$\sigma_1^2/\sigma_2^2$	$\sigma_2^2/\sigma_3^2$
	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$	$\sigma_3^2$	$\sigma_4^2$			
MDA 含量	0.375 0	0.925 7	0.122 5	0.002 4	3.06	0.41	7.56
可溶性蛋白含量	467.000 0	161.000 0	2.780 0	0.020 4	167.99	2.90	57.91
SOD 活性	0.206 1	0.194 4	0.001 6	0.000 1	128.81	1.06	121.50
POD 活性	541.560 0	591.060 0	33.812 5	4.250 0	16.02	0.90	17.48
盐害指数	0.016 7	0.192 6	0.003 4	0.000 6	4.91	0.13	56.64

注: $\sigma_1^2$ 、 $\sigma_2^2$ 、 $\sigma_3^2$ 、 $\sigma_4^2$  分别为氮素水平、盐胁迫浓度、氮素-盐胁迫互作和误差项的期望均方。

## 3 讨论与结论

离子毒害和盐离子导致的渗透效应和营养效

应是盐胁迫对植物最主要的损害之一,直观表现在产量与质量上<sup>[23-28]</sup>。本研究中,盐胁迫对生菜的各项形态指标有显著的抑制作用,氮素处理后生菜的

鲜质量显著增加,对胁迫损伤起到显著的缓解作用,与 Phan 等的研究结果<sup>[29]</sup>相一致,证明对盐胁迫下的植物施加适当量的氮元素是提高植物胁迫耐性的有效手段之一。盐胁迫对生长的抑制随盐浓度升高而加剧,氮素处理的效果也随之下降,但增加施用浓度后仍能观察到明显变化。同时,氮素浓度高于一定值时植物的生长状况表现出恶化趋势,这与吴海一等的结果<sup>[30]</sup>一致,表明盐胁迫缓释外源物不是浓度越高效果越好,进一步验证了精准施氮的重要性。

氮素是植物体内许多重要物质的结构组分,如叶绿素、可溶性蛋白质和游离氨基酸等都是含氮物质,其中可溶性糖和可溶性蛋白是植物细胞中重要的渗透调节物质,能促进植物细胞吸水,维持细胞膨压和渗透势,缓解植物在逆境胁迫下受到的伤害,因此其含量高低能反映逆境中植物的耐受能力<sup>[31-33]</sup>。本研究中,低浓度盐处理下生菜的可溶性蛋白增多,但是随着盐浓度升高,对生菜可溶性蛋白含量的促进作用逐渐转变为显著的抑制作用。同样,施氮也可以提高生菜的可溶性蛋白含量,其中在 220 mg/L 的氮素水平下提升最为显著。

MDA 是活性氧启动膜脂过氧化过程中产生的主要产物之一,是自由基作用于脂质发生氧化反应后的最终产物,其含量高低是衡量植物在逆境胁迫下活性氧伤害程度大小的常用指标<sup>[34-36]</sup>。MDA 含量能间接反映细胞膜结构的完整性,即质膜的稳定性,与植物抗盐能力密切相关,MDA 含量越低,植物的抗逆性越强。本试验中,盐浓度越高,生菜的 MDA 含量越高,而盐胁迫下施氮能显著降低生菜叶片中的 MDA 含量,其中以 220 mg/L 氮素水平降低生菜 MDA 含量最为显著,继而减轻膜脂过氧化作用带来的不利影响。

SOD、POD、CAT 是植物体内酶促防御系统的 3 个重要保护酶,SOD 能催化体内的歧化反应,使超氧自由基转化为  $H_2O_2$  和  $O_2$ , $H_2O_2$  再通过 CAT 和 POD 分解成没有毒害的  $H_2O$  和  $O_2$ ,从而使需氧生物体免受伤害<sup>[37-38]</sup>。三者协同作用,保证了对超氧自由基的清除能力,使细胞免受毒害,提高对盐胁迫的抗性。有研究表明,与抗性相关的酶,如 POD、PPO、SOD 等,在处理 24 h 其活性都有明显的变化,其中 POD 活性变化最早,说明 POD 活性的提高是遇到抗性最初阶段的标志。已有研究表明,随着施氮量提高,饲用油菜体内 SOD、POD、CAT 等酶的

活性呈先上升后降低趋势<sup>[39]</sup>,本试验结果与之基本一致。此外本研究还发现,低浓度的盐胁迫,能通过激发植物自身抵抗盐胁迫的机制提高生菜 SOD 和 POD 活性,并提高胁迫耐性,这与 Nasrallah 等的研究结果<sup>[40]</sup>一致,如在低浓度的盐胁迫下,植物受到的伤害较小,能利用自身产生的保护酶去除超氧自由基,继而免受伤害。随着盐胁迫的浓度升高,对生菜 SOD 和 POD 活性的激发逐渐转变为抑制作用,此时施加氮素能显著提高生菜的抗氧化酶活性,以此来增强对盐胁迫的抗性。

盐害指数是将植物在盐胁迫中受到损伤程度数字化的有效方法之一,对横向比较不同品种不同生长条件下植物所受的胁迫程度至关重要,是盐胁迫下植物研究的一项重要形态指标。从试验结果可以看出,盐浓度对盐害指数的影响显著。与对照相比,氮素能够显著降低盐害指数,提高植物耐盐性,缓解植物在盐胁迫受到的伤害。但不同氮素浓度间的缓解作用不一致,缓解程度随氮素浓度上升而上升,到达一定程度时开始下降,但是否与盐浓度的变化相关还需进一步验证。从各指标、各氮素水平与盐胁迫效应的比较可以看出,2 个因素对 SOD 和 POD 活性的影响差别不大,在 MDA 含量和盐害指数上,盐浓度占主效应,而在可溶性蛋白含量中,氮素水平占主效应,这也许是造成基于两者的最佳施氮浓度有所差异的原因。值得注意的是,在盐胁迫中,增施氮素能够有效缓解植物受到的高盐损伤程度,但不能随氮浓度的增加而彻底解除植物受到的伤害。

#### 参考文献:

- [1]肖爽,韩雨辰,号宇然,等. 聚乙二醇引发对盐胁迫下棉种萌发及生理特性的影响[J]. 核农学报,2021,35(1):202-210.
- [2]Zhao C Z,Zhang H,Song C P,et al. Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity [J]. The Innovation,2020,1(1):100017.
- [3]Shokri - Gharelo R,Noparvar P M. Molecular response of canola to salt stress: insights on tolerance mechanisms [J]. PeerJ,2018,6:4822.
- [4]黄志勇,顾闽峰,王乃顶,等. 苏北沿海滩涂盐肥对油菜产量及离子分布的效应[J]. 江苏农业科学,2017,45(8):48-51.
- [5]芦治国,华建峰,殷云龙,等. 盐胁迫下氮素形态对海滨木槿幼苗生长及生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(3):91-98.
- [6]Candido V,Boari F,Cantore V,et al. Interactive effect of nitrogen and azoxystrobin on yield,quality,nitrogen and water use efficiency of wild rocket in southern Italy[J]. Agronomy,2020,10(6):849.

- [7] Htwe N M P S, Ruangrak E. A review of sensing, uptake, and environmental factors influencing nitrate accumulation in crops[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2021, 44(7): 1054 – 1065.
- [8] 苏苑君. 水培生菜营养液最佳配比与品质调控试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 23 – 25.
- [9] Lee D Y, Choi G H, Megson D, et al. Effect of soil organic matter on the plant uptake of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulphonic acid (PFOS) in lettuce on granular activated carbon – applied soil[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(5): 2193 – 2202.
- [10] Aslam M, Qureshi R H, Ahmed N. A rapid screening technique for salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Plant and Soil*, 1993, 150(1): 99 – 107.
- [11] 田甜, 王海江, 王金刚, 等. 盐胁迫下施加氮素对饲用油菜有机渗透调节物质积累的影响[J]. *草业学报*, 2021, 30(10): 125 – 136.
- [12] 张永亮, 王学愿. 氮、磷、钾肥对 NaCl 胁迫下通草 1 号藜草生长的影响[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2018, 33(4): 350 – 357.
- [13] 隋利, 易家宁, 王康才, 等. 不同氮素形态及其配比对盐胁迫下紫苏生理特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3277 – 3283.
- [14] 张士良, 薛连秋, 郭鹏, 等. 保护地土壤次生盐渍化成因及防控措施[J]. *现代化农业*, 2008(3): 15 – 16.
- [15] 夏立忠, 杨林章, 王德建. 苏南设施栽培中旱作人为土养分与盐分状况的研究[J]. *江苏农业科学*, 2001, 29(6): 43 – 46, 69.
- [16] 童有为, 陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究[J]. *园艺学报*, 1991, 18(2): 159 – 162.
- [17] 赵风艳, 吴凤芝, 刘德, 等. 大棚菜地土壤理化特性的研究[J]. *土壤肥料*, 2000(2): 11 – 13.
- [18] 张清航, 张永涛. 植物体内丙二醛(MDA)含量对干旱的响应[J]. *林业勘查设计*, 2019(1): 110 – 112.
- [19] 李丽, 高建华. 几种食用菌子实体中 SOD 活性测定方法的比较[J]. *山西农业科学*, 2015, 43(11): 1411 – 1415.
- [20] 张龙翔. 生化实验方法和技术[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [21] 焦洁. 考马斯亮蓝 G-250 染色法测定苜蓿中可溶性蛋白含量[J]. *农业工程技术*, 2016, 36(17): 33 – 34.
- [22] 柳荫, 吴凤智, 陈龙, 等. 考马斯亮蓝法测定核桃水溶性蛋白含量的研究[J]. *中国酿造*, 2013, 32(12): 131 – 133.
- [23] Shah A N, Tanveer M, Abbas A, et al. Targeting salt stress coping mechanisms for stress tolerance in *Brassica*: a research perspective[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 158: 53 – 64.
- [24] Shen L, Zhao E P, Liu R E, et al. Transcriptome analysis of eggplant under salt stress: AP2/ERF transcription factor SmERF1 acts as a positive regulator of salt stress[J]. *Plants*, 2022, 11(17): 2205.
- [25] Ma L A, Liu X H, Lv W J, et al. Molecular mechanisms of plant responses to salt stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 934877.
- [26] Yang Z M, Dong T T, Dai X B, et al. Comparative analysis of salt responsive microRNAs in two sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] cultivars with different salt stress resistance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 879819.
- [27] Singroha G, Kumar S, Gupta O P, et al. Uncovering the epigenetic marks involved in mediating salt stress tolerance in plants[J]. *Frontiers in Genetics*, 2022, 13: 811732.
- [28] Liu Y J, Wang L, Li X, et al. Detailed sphingolipid profile responded to salt stress in cotton root and the *GhIPCSI* is involved in the regulation of plant salt tolerance[J]. *Plant Science*, 2022, 316: 111174.
- [29] Phan N T H, Heymans A, Bonnaville M, et al. Nitrogen use efficiency of rice cultivars (*Oryza sativa* L.) under salt stress and low nitrogen conditions[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(3): 1789 – 1803.
- [30] 吴海一, 丁刚, 徐智广. 不同氮浓度下盐胁迫对坛紫菜 (*Pyropia haitanensis*) 生长和光合作用的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(5): 1210 – 1217.
- [31] Rania B S, Waild B R, Mohamed B T, et al. *Lobularia maritima* thioredoxin-h2 gene mitigates salt and osmotic stress damage in tobacco by modeling plant antioxidant system[J]. *Plant Growth Regulation*, 2022, 97(1): 101 – 115.
- [32] Li W J, Meng R, Liu Y, et al. Heterografted chrysanthemums enhance salt stress tolerance by integrating reactive oxygen species, soluble sugar, and proline[J]. *Horticulture Research*, 2022, 9: uhac073.
- [33] Hai X A, Mi J Z, Zhao B P, et al. Foliar application of spermidine reduced the negative effects of salt stress on oat seedlings[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 846280.
- [34] Liu H, Hu H R, Tang K L, et al. Overexpressing hemp salt stress induced transcription factor genes enhances tobacco salt tolerance[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 177: 114497.
- [35] Zhang Q K, Dai X R, Wang H P, et al. Transcriptomic profiling provides molecular insights into hydrogen peroxide-enhanced *Arabidopsis* growth and its salt tolerance[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 866063.
- [36] 杨芳, 乔岩, 金中辉, 等. 高温胁迫对马铃薯幼苗活性氧代谢及生理特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(11): 97 – 103.
- [37] Che Y H, Yao T T, Wang H R, et al. Potassium ion regulates hormone, Ca<sup>2+</sup> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> signal transduction and antioxidant activities to improve salt stress resistance in tobacco[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 186: 40 – 51.
- [38] Ragaey M M, Sadak M S, Dawood M F A, et al. Role of signaling molecules sodium nitroprusside and arginine in alleviating salt-induced oxidative stress in wheat[J]. *Plants*, 2022, 11(14): 1786.
- [39] 田甜. 盐胁迫下施加氮素对饲用油菜生理生化特性及品质的影响[J]. 石河子: 石河子大学, 2022: 25 – 27.
- [40] Nasrallah A K, Atia M A M, Abd El – Maksoud R M, et al. Salt priming as a smart approach to mitigate salt stress in faba bean (*Vicia faba* L.)[J]. *Plants*, 2022, 11(12): 1610.