

Spd 对 NaCl 胁迫下小白菜幼苗生长、AsA-GSH 循环及氮代谢的影响

赵肖琼¹, 梁泰帅², 张恒慧¹

(1. 太原工业学院环境与安全工程系 太原 030008; 2. 山西医科大学药学院 太原 030001)

摘要: 为了阐明 Spd(亚精胺)调控小白菜的耐盐生理机制, 选用小白菜为试材, 通过营养液培养试验探究叶面喷施 0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 mmol·L⁻¹ Spd 溶液对 100 mmol·L⁻¹ NaCl 模拟盐胁迫条件下小白菜幼苗生长、AsA-GSH(抗坏血酸-谷胱甘肽)循环及氮代谢的影响。结果表明, NaCl 胁迫显著抑制小白菜幼苗的生长以及 AsA-GSH 循环、氮代谢的正常运转。相比于其他浓度 Spd, 1.2 mmol·L⁻¹ Spd 对小白菜幼苗 NaCl 胁迫的缓解效果最佳, 能明显降低 MDA 含量, 显著增加幼苗的株高、根长、单株鲜质量和干质量; 能显著提升 AsA-GSH 循环中抗氧化剂(AsA、GSH)含量和 APX 等关键酶活性, AsA/DHA 和 GSH/GSSG 比值较 NT 处理分别显著增加了 15.93% 和 6.08%; 能显著提升氮代谢关键酶活性, NR、NIR、GS、GOGAT 和 GDH 活性较 NT 处理分别显著增加了 57.09%、28.47%、127.01%、28.79% 和 37.56%, 促进 NO₃⁻-N 的吸收转化。综上所述, 喷施适宜浓度的 Spd(1.2 mmol·L⁻¹) 能通过增强 AsA-GSH 循环及氮代谢来提升小白菜幼苗的耐盐性, 有效减轻 NaCl 胁迫对幼苗的氧化伤害, 从而促进植株生长。

关键词: 小白菜; Spd; NaCl 胁迫; 生长; AsA-GSH 循环; 氮代谢

中图分类号: S634.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2022)04-051-05

Effect of spermidine on the growth, AsA-GSH cycle and nitrogen metabolism of *Brassica chinensis* L. seedlings under NaCl stress

ZHAO Xiaojiong¹, LIANG Taishuai², ZHANG Henghui¹

(1. Department of Environmental and Safety Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, Shanxi, China; 2. College of Pharmacy, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi, China)

Abstract: In order to clarify the salt-tolerant physiological mechanism by Spd-regulated of *Brassica chinensis* L., a nutrient solution culture experiment was conducted to explore the effects of foliar-spraying different concentrations of spermidine (Spd) solutions (0.4, 0.8, 1.2, 1.6 and 2.0 mmol·L⁻¹) on the growth, AsA-GSH cycle and nitrogen metabolism of *Brassica chinensis* L. cultivar Shanghaiqing under 100 mmol·L⁻¹ NaCl simulated salt stress to clarify the salt tolerant physiological mechanism regulated by Spd. The results showed that NaCl stress obviously inhibited the growth, AsA-GSH cycle and nitrogen metabolism of *Brassica chinensis* L. seedlings. Compared with other concentrations of Spd, 1.2 mmol·L⁻¹ Spd had a better alleviation effect on NaCl stress, significantly reduced the contents of MDA and increased the plant height, root length, fresh weight and dry weight of the seedling. Spd at 1.2 mmol·L⁻¹ significantly promoted the contents of antioxidants (AsA, GSH), the key enzyme activities such as APX in AsA-GSH cycle and the ratios of AsA/DHA and GSH/GSSG by 15.93% and 6.08%, compared to NT treatment. Moreover, 1.2 mmol·L⁻¹ Spd significantly improved the activities of NR, NIR, GS, GOGAT and GDH in nitrogen metabolism by 57.09%, 28.47%, 127.01%, 28.79% and 37.56%, respectively, compared to NT treatment and thus to promote the absorption and transformation of NO₃⁻-N. In summary, foliar-spraying appropriate concentration of Spd (1.2 mmol·L⁻¹) can improve the salt tolerance of *Brassica chinensis* L. seedlings by promoting the AsA-GSH cycle, nitrogen metabolism and reducing the oxidative damage, thereby increasing plant growth under NaCl stress.

Key words: *Brassica chinensis* L.; Spermidine; NaCl stress; Growth; AsA-GSH cycle; Nitrogen metabolism

小白菜(*Brassica chinensis* L.)又名不结球白菜、青菜, 具有适应环境能力强、生长周期短、生物产量高、四季可供应等优点, 是我国栽培历史悠久且栽培面积最大的蔬菜之一^[1]。小白菜叶片鲜嫩、

收稿日期: 2021-09-09; 修回日期: 2021-10-13

基金项目: 山西省应用基础研究计划资助项目(201801D221279); 2021年太原工业学院院级教学改革研究项目(JG202119)

作者简介: 赵肖琼, 女, 讲师, 主要研究方向为植物逆境生理及分子机制。E-mail: xiaoqiong_zhao@126.com

味道清香、富含多种营养成分以及抗癌活性物质硫代葡萄糖苷,深受广大消费者的喜爱^[2]。近年来,随着设施蔬菜栽培的快速发展,不科学的栽培技术和管理措施导致土壤次生盐渍化问题日趋加重,严重制约了小白菜等设施蔬菜栽培的可持续发展^[3]。盐害条件下,植物体内发生离子毒害和渗透胁迫,导致植物细胞内活性氧(ROS)过度积累,破坏了细胞膜结构,扰乱了植物正常的生理代谢和生长发育,最终造成作物产量减少^[4-5]。因此,深入探究提升小白菜耐盐性的途径及生理机制,对于解决小白菜盐害问题具有重要意义。

亚精胺(Spd)是植物体内常见的一种多胺(PAs)物质,以游离态等形式存在^[6-7]。近年来的研究发现,Spd是植物非生物逆境胁迫中关键的生长促进化合物,一是作为直接的胁迫保护物质,二是作为胁迫信号转导中的“第二信使”参与抗逆机制的构建^[8]。向丽霞等^[9]研究表明,叶面喷施Spd能够增强高温胁迫下叶绿素前体合成关键酶胆色素原脱氨酶的活性,提升番茄幼苗的叶绿素合成能力及耐热性。邹芳等^[10]研究发现,1.2 mmol·L⁻¹的Spd能够提升干旱胁迫下甜高粱幼苗的光合效率、渗透调节物质可溶性糖和脯氨酸含量、抗氧化酶活性,从而减轻干旱胁迫对甜高粱的氧化伤害。刘书锦等^[11]研究表明外源Spd能够促进重金属砷胁迫下水稻种子的萌发及幼苗生长,减少水稻幼芽和根系对砷的吸收累积,缓解砷对水稻的毒害效应。目前,关于Spd对NaCl胁迫下小白菜幼苗生长、抗坏血酸-谷胱甘肽(AsA-GSH)循环及氮代谢影响的研究尚未见报道。因此,笔者以上海青小白菜为试材,通过营养液培养试验探究外源不同浓度Spd处理对NaCl胁迫下小白菜幼苗生长、AsA-GSH循环及氮代谢的影响,筛选出Spd的最佳喷施浓度,揭示Spd提升小白菜耐盐性的生理机制,可望为盐渍区域设施蔬菜的高效持续化生产奠定理论基础。

1 材料与方 法

1.1 材 料

试验小白菜品种为上海青,购自南京秋田种业研究所;Spd购自上海金穗生物科技有限公司。

1.2 试 验 设 计

试验于2021年3—5月在太原工业学院环境与安全工程系生物学实验室进行,设置培养条件为昼/夜温度25℃/20℃,光照度10 000 lx,光照时间14 h·d⁻¹,相对湿度80%。选用健康饱满的小白菜种

子进行穴盘育苗,挑取生长一致的2叶1心小白菜幼苗植株定植于装有1/2 Hoagland营养液(2 L)的塑料盆中,缓苗3 d后,依据预试验结果共设置7个处理(表1)。其中,配制含有100 mmol·L⁻¹NaCl的营养液模拟盐胁迫,采用完全随机设计,每处理12株,3次重复。每天9:00向叶面喷施蒸馏水或Spd溶液,以叶片两面全部湿润为止,连续喷施10 d后取样测定小白菜植株的各项指标。

表1 试验处理设置

处理	c(NaCl)/(mmol·L ⁻¹)	c(Spd)/(mmol·L ⁻¹)
CK(对照)	0	0.0
NT	100	0.0
NT+0.4 Spd	100	0.4
NT+0.8 Spd	100	0.8
NT+1.2 Spd	100	1.2
NT+1.6 Spd	100	1.6
NT+2.0 Spd	100	2.0

1.3 测定指标和方法

1.3.1 生长指标 分别利用直尺测量小白菜幼苗的株高、根长,百分之一电子天平测定单株鲜质量,105℃烘干至恒质量后再测定单株干质量。

1.3.2 叶片生理指标 丙二醛(MDA,硫代巴比妥酸法)含量及硝酸还原酶(NR,活体法)活性的测定按照高俊凤^[12]的方法;AsA-GSH循环抗氧化剂AsA、GSH,氧化还原物质脱氢抗坏血酸(DHA),氧化型谷胱甘肽(GSSG)含量及关键酶抗坏血酸过氧化物酶(APX)、单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)、谷胱甘肽还原酶(GR)活性的测定按照赵肖琼等^[13]和王俊力等^[14]的方法;硝态氮(NO₃⁻-N,紫外分光法)、铵态氮(NH₄⁺-N,紫外分光法)含量及亚硝酸还原酶(NiR)、谷氨酰胺合成酶(GS)活性测定参考马晓华等^[15]的方法;谷氨酸合成酶(GOGAT)、谷氨酸脱氢酶(GDH)活性测定参照车永梅等^[16]的方法。每个指标测定均3次重复。

1.4 数据 分析

通过WPS 2019和SPSS 19.0软件进行数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 Spd对NaCl胁迫下小白菜幼苗生长的影响

由表2可知,NT处理显著抑制了小白菜幼苗的生长,其株高、根长、单株鲜质量和干质量较CK分别降低了23.36%、28.36%、25.15%和40.91%。喷

施 Spd 能不同程度缓解 NaCl 胁迫下小白菜幼苗的生长,且缓解程度随着喷施 Spd 浓度的增加先升后降,NT+1.2 Spd 处理的小白菜幼苗株高、根长、单株鲜质量和干质量较 NT 处理分别显著增加了 23.05%、33.27%、25.41%和 53.85%,增幅最大。

表 2 Spd 对 NaCl 胁迫下小白菜幼苗生长的影响

处理	株高/cm	根长/cm	单株鲜质量/ g	单株干质量/ g
CK	10.53±0.31 a	7.30±0.20 a	3.26±0.05 a	0.22±0.02 a
NT	8.07±0.15 e	5.23±0.31 d	2.44±0.06 e	0.13±0.01 f
NT+0.4 Spd	8.50±0.26 de	5.67±0.21 cd	2.68±0.09 d	0.15±0.01 e
NT+0.8 Spd	8.93±0.15 d	6.47±0.06 b	2.82±0.08 c	0.17±0.01 cd
NT+1.2 Spd	9.93±0.35 b	6.97±0.15 a	3.06±0.07 b	0.20±0.01 b
NT+1.6 Spd	9.43±0.40 c	6.47±0.35 b	2.84±0.04 c	0.18±0.01 c
NT+2.0 Spd	8.63±0.23 d	5.77±0.38 c	2.76±0.08 cd	0.16±0.01 de

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

表 3 Spd 对 NaCl 胁迫下小白菜幼苗叶片 MDA 和 AsA-GSH 循环相关物质含量的影响

处理	b(MDA)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	b(AsA)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	b(DHA)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	AsA/DHA	b(GSH)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	b(GSSG)/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	GSH/GSSG
CK	2.93±0.20 e	0.84±0.06 e	0.17±0.022 d	4.97±0.33 c	0.39±0.02 f	0.08±0.003 f	5.03±0.07 c
NT	5.49±0.15 a	1.08±0.03 d	0.18±0.005 cd	5.90±0.18 b	0.53±0.02 e	0.09±0.006 e	5.76±0.18 b
NT+0.4 Spd	5.00±0.09 b	1.21±0.02 c	0.20±0.001 abc	6.13±0.12 ab	0.59±0.01 d	0.10±0.003 d	5.87±0.32 ab
NT+0.8 Spd	4.32±0.14 cd	1.37±0.05 b	0.21±0.024 ab	6.50±0.53 ab	0.66±0.01 b	0.11±0.002 ab	5.96±0.01 ab
NT+1.2 Spd	2.90±0.09 e	1.49±0.06 a	0.22±0.003 a	6.84±0.35 a	0.71±0.02 a	0.12±0.002 a	6.11±0.08 a
NT+1.6 Spd	4.18±0.11 d	1.35±0.03 b	0.20±0.015 abc	6.61±0.47 ab	0.63±0.01 c	0.11±0.002 bc	5.80±0.04 b
NT+2.0 Spd	4.53±0.19 c	1.21±0.02 c	0.19±0.012 bcd	6.55±0.43 ab	0.60±0.01 cd	0.10±0.002 cd	5.80±0.07 b

2.3 Spd 对 NaCl 胁迫下小白菜幼苗叶片 AsA-GSH 循环关键酶活性的影响

从表 4 可以看出,NT 处理显著增强了 AsA-GSH 循环 4 种关键酶的活性,APX、DHAR、

2.2 Spd 对 NaCl 胁迫下小白菜幼苗叶片 MDA 和 AsA-GSH 循环相关物质含量的影响

从表 3 可以看出,与 CK 相比,NT 处理下 MDA、AsA、GSH、GSSG 含量及 AsA/DHA、GSH/GSSG 比值均显著增加,分别增加了 87.37%、28.57%、35.90%、12.50%和 18.71%、14.51%,而 DHA 含量变化不明显。NaCl 胁迫下,MDA 含量随着喷施 Spd 浓度的增加先降后升,而 AsA、DHA、GSH、GSSG 含量及 AsA/DHA、GSH/GSSG 比值随着喷施 Spd 浓度的增加先升后降。与 NT 相比,NT+1.2 Spd 处理的 AsA、DHA、GSH、GSSG 含量及 AsA/DHA、GSH/GSSG 比值分别显著增加了 37.96%、22.22%、33.96%、33.33%和 15.93%、6.08%,增幅最大;而 MDA 含量显著下降了 47.18%,降幅最大。

MDHAR 和 GR 活性较 CK 分别增加了 38.91%、22.08%、13.98%和 16.54%。喷施 Spd 能不同程度地增强 AsA-GSH 循环 4 种关键酶的活性,且增强程度随着喷施 Spd 浓度的增加先升后降,NT+1.2

表 4 Spd 对 NaCl 胁迫下小白菜幼苗叶片 AsA-GSH 循环关键酶活性的影响

处理	APX 活性/($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	DHAR 活性/($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	MDHAR 活性/($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	GR 活性/($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)
CK	10.23±0.37 e	17.71±1.20 f	137.44±5.68 e	71.03±2.20 d
NT	14.21±0.22 d	21.62±0.97 e	156.65±5.79 d	82.78±2.29 c
NT+0.4 Spd	15.70±0.28 c	23.68±0.78 cd	166.08±5.47 c	85.15±3.83 c
NT+0.8 Spd	16.64±0.50 b	25.47±0.68 b	174.62±6.88 bc	91.48±1.65 b
NT+1.2 Spd	18.21±0.30 a	27.11±1.00 a	192.23±2.66 a	98.24±3.57 a
NT+1.6 Spd	16.92±0.37 b	24.98±0.71 bc	180.97±1.70 b	91.84±2.76 b
NT+2.0 Spd	16.43±0.57 b	23.19±0.74 d	167.43±5.68 c	84.90±2.23 c

Spd 处理的 APX、DHAR、MDHAR 和 GR 活性较 NT 处理分别显著增加了 28.15%、25.39%、22.71%和 18.68%,增幅最大。

2.4 Spd 对 NaCl 胁迫下小白菜幼苗叶片氮代谢的影响

由表 5 可以看出,与 CK 相比,NT 处理下

NO_3^- -N 含量及 NR、NIR、GS、GOGAT 活性分别显著降低了 27.70%和 38.11%、30.66%、58.10%、27.18%,而 NH_4^+ -N 含量及 GDH 活性分别显著增加了 53.70%和 23.41%。喷施 Spd 能不同程度提升 NO_3^- -N 含量及氮代谢 5 种关键酶活性,且提升程度随着喷施 Spd 浓度的增加先升后降,NT+1.2 Spd 处

表5 Spd对NaCl胁迫下小白菜幼苗叶片氮代谢的影响

处理	w(NO ₃ ⁻ -N)/ (μg·g ⁻¹)	b(NH ₄ ⁺ -N)/ (μmol·g ⁻¹)	NR 活性/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	NIR 活性/ (μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	GS 活性/ (μmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	GOGAT 活性/ (μmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)	GDH 活性/ (μmol·mg ⁻¹ ·min ⁻¹)
CK	105.93±12.47 a	79.52±5.62 c	4.33±0.20 a	12.46±0.47 a	3.27±0.14 a	142.85±6.24 a	45.45±2.04 f
NT	76.59±6.75 d	122.22±6.12 a	2.68±0.13 e	8.64±0.58 e	1.37±0.11 d	104.02±5.11 f	56.09±2.66 e
NT+0.4 Spd	89.08±4.71 c	116.52±4.75 a	3.11±0.11 d	9.51±0.51 d	1.94±0.18 c	112.83±2.72 e	60.43±1.74 d
NT+0.8 Spd	95.94±2.86 abc	96.44±4.53 b	3.62±0.06 c	10.58±0.45 bc	2.56±0.10 b	125.69±3.43 c	66.10±2.64 c
NT+1.2 Spd	101.56±2.86 ab	86.48±4.67 c	4.21±0.10 ab	11.10±0.51 b	3.11±0.11 a	133.97±4.01 b	77.16±1.68 a
NT+1.6 Spd	94.07±2.86 bc	103.08±7.08 b	4.02±0.13 b	10.16±0.18 cd	2.62±0.13 b	123.97±5.41 cd	72.41±2.51 b
NT+2.0 Spd	85.33±3.90 cd	114.63±3.56 a	3.44±0.09 c	9.35±0.32 de	1.78±0.08 c	116.45±2.70 de	63.11±2.28 cd

理的NO₃⁻-N含量及NR、NIR、GS、GOGAT、GDH活性较NT处理分别显著增加了32.60%和57.09%、28.47%、127.01%、28.79%、37.56%，增幅最大，而NH₄⁺-N含量显著降低29.24%，降幅最大。

3 讨论与结论

生物量等形态特征是植物遭遇盐胁迫的综合反映，且植物在幼苗阶段对盐胁迫更为敏感^[10]。本试验中，100 mmol·L⁻¹ NaCl胁迫下小白菜幼苗的株高、根长、单株鲜质量和干质量均显著降低，说明NaCl胁迫对小白菜幼苗植株的生长产生抑制效应，而叶面喷施0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 mmol·L⁻¹ Spd溶液能不同程度地改善NaCl胁迫下小白菜幼苗的生长状况，并以1.2 mmol·L⁻¹ Spd溶液对NaCl胁迫下小白菜幼苗生长的促进效果最佳，这与海霞等^[17]和邹芳等^[10]的研究结果类似。

盐胁迫下植物细胞内ROS积累量显著增加引发了膜脂过氧化产物MDA的产生，且MDA的积累一定程度可以作为评价植物自身氧化胁迫程度和耐受性的关键指标^[17]。AsA-GSH循环是植物体内重要的非酶促抗氧化保护系统，主要通过抗氧化剂AsA、GSH以及关键酶APX、MDHAR、DHAR、GR共同作用维持细胞的氧化还原平衡^[18]。AsA-GSH循环中，APX催化AsA和H₂O₂反应生成MDHA和H₂O^[19]，部分MDHA可通过非酶促歧化反应进一步氧化为DHA，而MDHA和DHA可分别通过MDHAR和DHAR催化再生为AsA^[20]，同时GSH在DHAR催化下生成GSSG，GSSG可在GR催化下重新形成GSH^[19]。此外，AsA/DHA、GSH/GSSG比值可以反映植物细胞内的氧化还原状态，是激活植物抗逆基因的重要信号^[13]。研究发现，燕麦^[18]、小麦^[21-22]、甜玉米^[23]等能够通过调控AsA-GSH循环的抗氧化剂含量和关键酶活性来协调植株体内的氧化还原平衡。本试验也得到类似结果，NaCl胁迫下小白菜幼苗叶片MDA积累量明

显高于CK，说明NaCl胁迫加剧了小白菜幼苗的质膜氧化伤害，同时激发了AsA-GSH循环抗氧化系统，主要表现为抗氧化剂(AsA、GSH)和GSSG含量、氧化还原状态(AsA/DHA、GSH/GSSG比值)及关键酶APX、MDHAR、DHAR、GR活性显著提高。叶面喷施Spd溶液可进一步提升NaCl胁迫下的APX、MDHAR、DHAR、GR活性，维持植株体内较高水平的抗氧化剂(AsA、GSH)含量及氧化还原状态(AsA/DHA、GSH/GSSG比值)，保证ASA-GSH循环的高效运行，从而加快清除MDA的过度累积。其中，以喷施1.2 mmol·L⁻¹ Spd溶液时NaCl胁迫下小白菜幼苗叶片AsA-GSH循环的运行效果最优。

氮代谢是植物体内关键的基础代谢途径之一，包括NO₃⁻-N和NH₄⁺-N两种形态无机氮的还原、同化和利用等过程^[24]。NR、NIR、GS、GOGAT和GDH是氮代谢途径的关键酶^[25]，它们的活性能够反映植株的营养状况和氮素同化水平。其中，NR是NO₃⁻还原的调节酶和限速酶，负责催化NO₃⁻还原为NO₂⁻，NO₂⁻经NIR继续还原为NH₄⁺，产生的NH₄⁺迅速进入NH₄⁺同化途径；GS是NH₄⁺同化GS/GOGAT途径(95%以上的NH₄⁺通过该途径进行NH₄⁺同化)第一步的关键酶，催化NH₄⁺和谷氨酸形成谷氨酰胺，然后谷氨酰胺和α-酮戊二酸在GOGAT催化下形成谷氨酸；GDH是另一条NH₄⁺同化途径的关键酶，催化NH₄⁺-N和α-酮戊二酸缩合形成谷氨酸^[26]。研究发现，氮代谢主要通过调节离子吸收、含氮化合物含量及氮代谢关键酶活性影响植物耐盐性，且调控机制因植物种类不同存在差异性^[26]。本试验结果显示，NaCl胁迫下小白菜幼苗叶片NO₃⁻-N含量及NR、NIR活性均显著降低，说明植株对NO₃⁻-N的吸收转运以及NO₃⁻的还原受到抑制，而NH₄⁺-N积累量增多并显著高于CK，对植株生长形成NH₄⁺毒害效应；同时GS、GOGAT活性较CK显著减弱，而GDH活性显著增强，表明NaCl胁迫

导致小白菜 NH_4^+ 同化途径发生改变, GOGAT/GS 途径减弱, GDH 途径加强, 这与车永梅等^[16]和张毅等^[27]的研究结果一致。喷施 $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Spd 溶液能显著增加小白菜幼苗叶片的 NO_3^- -N 含量及 NR、NIR、GS、GOGAT、GDH 活性, 而降低 NH_4^+ -N 含量, 说明 Spd 能有效促进植株体内 NO_3^- -N 的累积以及 NO_3^- 的还原, 协同加强 GS/GOGAT 途径和 GDH 途径对 NH_4^+ 的同化, 从而缓解 NaCl 胁迫引发的小白菜幼苗氮代谢紊乱。

综上所述, $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫对小白菜幼苗的正常生长产生明显的负效应, 叶面喷施 Spd 溶液不同程度促进了小白菜幼苗对 NaCl 胁迫适应性的增强。其中, $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Spd 溶液对小白菜 NaCl 胁迫的缓解效果最佳, 能够通过增强植株的 AsA-GSH 循环及氮代谢, 降低脂质过氧化水平, 最终表现为促进 NaCl 胁迫下小白菜幼苗生长。

参考文献

- [1] 王占娣, 张啦, 丁百莲, 等. 小白菜次生代谢物质对小菜蛾雌虫行为的调节作用[J]. 农药学报, 2021, 23(2): 323-330.
- [2] 王晓, 陈冰洁, 刘晨霞, 等. ClO_2 缓释熏蒸处理对小白菜保鲜效果的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(6): 160-163.
- [3] 徐芬芬, 叶利民, 夏晓蕾. 小白菜抗盐胁迫的根系响应机制[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 178-181.
- [4] 刘珂, 张嘉欣, 杜清洁, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下香椿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(5): 53-58.
- [5] 任艳芳, 何俊瑜, 杨军, 等. 外源 H_2O_2 对盐胁迫下小白菜种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7745-7756.
- [6] 林必博, 王锋, 周济铭. 亚精胺提高植物抗旱性作用机理的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(9): 6-10.
- [7] 段九菊, 郭世荣, 康云艳, 等. 盐胁迫对黄瓜幼苗根系生长和多胺代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 57-64.
- [8] 僧珊珊, 王群, 张永恩, 等. 外源亚精胺对淹水胁迫玉米的生理调控效应[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1042-1050.
- [9] 向丽霞, 胡立盼, 孟森, 等. 叶面喷施亚精胺对高温胁迫下番茄叶绿素合成代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(5): 846-851.
- [10] 邹芳, 杨秀柳, 黄思麒, 等. 外源亚精胺对干旱胁迫下甜高粱幼苗生长及生理生化指标的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(4): 44-52.
- [11] 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 等. 外源亚精胺对 As^{5+} 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1505-1512.
- [12] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 赵肖琼, 梁泰帅, 赵润柱. 壳寡糖对 PEG 胁迫下小麦叶片 AsA-GSH 循环的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(12): 8-12.
- [14] 王俊力, 王岩, 赵天宏, 等. 臭氧胁迫对大豆叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2068-2075.
- [15] 马晓华, 胡青荻, 章彦君, 等. 氮素形态对铁线莲光合特性及氮代谢的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(3): 276-284.
- [16] 车永梅, 徐青, 杨德翠, 等. 水稻 86 响应碱胁迫调节氮代谢的生理与分子机制[J]. 核农学报, 2021, 35(6): 1291-1299.
- [17] 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.
- [18] 刘建新, 欧晓彬, 王金成, 等. 外源 NO 对镉胁迫下燕麦幼苗叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(4): 478-486.
- [19] 马玉华. 逆境胁迫对苹果抗坏血酸代谢相关酶活性及基因表达的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [20] 王伟青. 小麦旗叶灌浆过程中光合作用及其籽粒灌浆之间的关系研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [21] 杨颖丽, 吕丽荣, 李晶, 等. 盐胁迫下 2 种小麦幼苗抗坏血酸-谷胱甘肽循环的比较[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 65-70.
- [22] 郑永兴, 李鸽子, 康国章. 小麦应对 Cu^{2+} 胁迫的生理响应及 ASA-GSH 合成酶基因表达[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(1): 21-29.
- [23] 杨敏, 李向岭, 韩金玲, 等. 烟酰胺胁迫对甜玉米幼苗活性氧积累、抗氧化系统及相关基因表达的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(9): 2182-2193.
- [24] 刘玉兵, 王军伟, 罗鑫辉, 等. LED 光质对芹菜生长、品质及氮代谢关键酶活性的影响[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(12): 71-76.
- [25] 江浩昭, 张继业, 刘厚诚. 蓝光比例对植物工厂小白菜生长及品质的影响[J]. 照明工程学报, 2020, 31(4): 166-171.
- [26] 王新磊, 吕新芳. 氮代谢参与植物逆境抵抗的作用机理研究进展[J]. 广西植物, 2020, 40(4): 583-591.
- [27] 张毅, 石玉, 胡晓辉, 等. 外源 Spd 对盐碱胁迫下番茄幼苗氮代谢及主要矿质元素含量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1401-1408.