

外源亚精胺对硝酸钙胁迫下小白菜 生长与光合作用及其品质的影响

鲁莹^{1,2}, 束胜¹, 朱为民², 郭世荣^{1*}

(1 南京农业大学 园艺学院/江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210095; 2 上海市农业科学院 园艺研究所/上海市设施园艺技术重点实验室, 上海 201106)

摘要: 以小白菜品种‘寒笑’为实验材料, 采用营养液栽培法, 研究了 80 mmol/L 硝酸钙胁迫下, 叶面喷施 0.5 mmol/L 亚精胺(Spd)对小白菜生长、光合作用及其品质的影响。结果表明, (1) $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫显著抑制了小白菜幼苗生长, 使植株的株高、根长、叶面积、根体积、干鲜重显著降低, 而叶面喷施 Spd 可有效缓解胁迫对生长的抑制。(2) $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫处理植株叶绿素含量比正常营养液培养处理(对照)显著下降了 54.72%, 而叶面喷施 Spd 可以有效缓解 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对光合色素含量的抑制, 并且使植株类胡萝卜素含量比 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫处理显著提高 53.33%。(3) $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫显著降低了小白菜幼苗光合作用效率, 使植株净光合速率(P_n)比对照显著下降 34.45%, 而叶面喷施 Spd 可以有效缓解 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对 P_n 的抑制, 使植株 P_n 比 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫处理显著提高 28.11%。(4) $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫显著降低了小白菜幼苗品质, 其植株维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白含量比对照显著降低, 同期有机酸、硝酸盐含量却比对照显著升高, 而叶面喷施 Spd 可以显著改善上述小白菜营养指标。研究认为, 外源亚精胺可有效缓解 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对小白菜生长和光合作用的抑制, 提高 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫环境条件下小白菜的品质。

关键词: 小白菜; 亚精胺; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫; 生长; 光合作用; 品质

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effects of Exogenous Spermidine on the Growth and Quality of Pakchoi Seedlings under Calcium Nitrate Stress

LU Ying^{1,2}, SHU Sheng¹, ZHU Weimin², GUO Shirong^{1*}

(1 College of Horticulture/Laboratory of Modern Protected Agricultural Technology and Equipment Engineering in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Horticultural Research Institute/Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201106, China)

Abstract: ‘Hanxiao’ was selected as material to study the effects of 0.5 mmol/L exogenous spermidine (Spd) on the growth and quality of pakchoi seedlings under 80 mmol/L calcium nitrate stress by hydropo-
nic culture. The results showed that: (1) The stress of 80 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ significantly reduced plant growth, plant height, root length, leaf area, root volume, fresh and dry weight. Spraying 0.5 mmol/L Spd on leaf significantly promoted the growth of seedlings. (2) The stress of 80 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ significantly reduced the contents of photosynthetic pigments. Compared with CK treatment, chlorophyll content in seedlings declined 54.72% with $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ treatment. Spraying 0.5 mmol/L Spd on leaf significantly promoted the contents of photosynthetic pigments in seedlings. Compared with $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ treatment, carotenoid con-

收稿日期: 2014-10-20; **修改稿收到日期:** 2015-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(31071831, 31272209); 国家‘十二五’科技支撑计划项目(2013BAD20B05); 江苏省科技成果转化专项(BA2014147); 教育部新教师类博士点基金(20130097120015); 江苏省农业三新工程项目(SXGC[2014]256, SXGC[2015]321)

作者简介: 鲁莹(1991—), 女, 硕士, 主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: luyinghy@163.com

*** 通信作者:** 郭世荣, 教授, 博士生导师, 主要从事蔬菜生理与设施园艺研究。E-mail: srguo@njau.edu.cn

cent in seedlings increased 53.33% with NS treatment [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{Spd}$]. (3) The stress of 80 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ significantly reduced photosynthesis. Compared with CK treatment, P_n of seedlings declined 34.45% with $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ treatment. Spraying 0.5 mmol/L Spd on leaf significantly promoted P_n of seedlings. Compared with $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ treatment, P_n of seedlings increased 28.11% with NS treatment. (4) The stress of 80 mmol/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ significantly reduced quality. Compared with CK treatment, the contents of vitamin C, soluble sugar and soluble protein of seedlings significantly declined, nitrate and organic acid significantly increased with $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ treatment. Spraying 0.5 mmol/L Spd on leaf significantly promoted seedlings above-mentioned nutritive index. These results indicated that exogenous Spd significantly promoted the growth, photosynthesis and improved the quality of pakchoi seedlings under calcium nitrate stress.

Key words: pakchoi seedlings; spermidine; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress; growth; photosynthesis; quality

小白菜 (*Brassica campestris* ssp. *chinensis*) 属十字花科芸薹属白菜亚种的一个变种, 又称不结球白菜、青菜、油菜等, 原产于中国。小白菜现占长江中下游大、中城市蔬菜复种面积的 30%~40%, 在北方地区的栽培也发展迅速^[1]。近年来, 小白菜设施栽培发展较快, 导致土壤次生盐渍化现象普遍存在^[2]。研究表明, 设施土壤中的阳离子以 Ca^{2+} 为主^[3], 阴离子主要是 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- , 其中 NO_3^- 占阴离子总量的一半以上^[4]。因此, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 大量积累是引起设施土壤次生盐渍化的主要原因^[5]。绿叶蔬菜易富集硝酸盐, 一旦小白菜体内过量积累硝酸盐时, 其生长和品质会明显受到影响。

多胺(PAs) 是一类广泛存在于植物体内, 具有强烈生理活性的低分子量脂肪族含氮碱, 与逆境胁迫(如盐胁迫)关系密切^[6]。常见的多胺主要包括腐胺(Put)、亚精胺(spermidine, Spd)和精胺(Spm)等。多胺在调节植物生长发育、控制形态建成、提高植株抗性、延缓衰老等方面具有重要作用^[7]。研究发现, 在盐胁迫条件下, 抗盐性较强的黄瓜品种的根系中 Spd 和 Spm 累积量高于抗盐性较弱的黄瓜品种^[8]; 春小麦在受到干旱胁迫时, Spd 与 Spm 的含量与 SOD 和 POD 活性呈正相关^[9]; 盐胁迫下植物体内 Spd 和 Spm 浓度普遍上升^[10], 这是植物自身的保护性反应。3 种多胺中, Spd 在提高植物抗性上起重要作用。外源 Spd 可提高冷胁迫下香蕉叶片中可溶性糖含量, 增强植株的抗冷性^[11], 可以提高白刺花幼苗的抗旱性^[12], 并可明显减轻盐胁迫对黄瓜幼苗^[13]、滨藜^[14]、甜瓜^[15]的胁迫伤害。但目前未见 Spd 缓解 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下小白菜生长和品质抑制的报道。本实验以小白菜为实验材料, 研究叶片喷施外源 Spd 对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下小白菜生长、植株光合作用和品质的影响, 探讨外源 Spd 对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下幼苗伤害的缓解作用及机理, 为外源 Spd 应用于设施绿叶蔬菜高效优质安全栽培

提供有效途径和理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与处理

实验在南京农业大学塑料大棚内进行。实验选用的小白菜品种为‘寒笑’, 种子由南京农业大学白菜课题组提供。种子经消毒、浸种、催芽后播于装有石英砂的育苗盘中, 棚内昼、夜温度控制在 20~25 °C、15~18 °C, 自然光照。幼苗前期浇清水, 2 叶 1 心后浇 1/2 Hoagland 营养液, 待幼苗 4 叶 1 心时, 挑选生长一致的幼苗移栽到装有 1/2 倍 Hoagland 营养液的水培箱中, 调节营养液 pH 为 (6.5±0.1), EC 值为 2.2~2.5 mS·cm⁻¹, 气泵间歇通气 40 min·h⁻¹, 每箱定植 12 株。

缓苗 3 d 后, 开始实验处理, 共设置 4 个处理: 对照, (正常营养液栽培, CK); 对照加亚精胺处理 (CS); 硝酸钙处理 (N); 硝酸钙加亚精胺处理 (NS)。称取 377.6 g 硝酸钙施入水培箱中, 使营养液中硝酸钙浓度达到 80 mmol·L⁻¹; 亚精胺浓度为 0.5 mmol·L⁻¹, 分别在硝酸钙处理后 0、3、6、9 d 傍晚喷施 CS 和 NS 两组处理植株叶片表面和背面, CK 和 N 两组处理喷施等量清水。处理 10 d 后, 测定小白菜生长、色素含量、光合速率和产品品质等指标。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 生长指标 用直尺测小白菜株高和主根长; 取植株用蒸馏水冲洗、吸干后, 测植株鲜重; 105 °C 杀青 15 min, 75 °C 烘干至恒重, 测植株干重。并用叶面积/根系扫描仪 (Epson Expression 1680) 对小白菜植株进行叶面积和根系扫描, 叶面积为从基部数第三片真叶的面积, 总根表面积按常规方法测定。

1.2.2 光合色素含量 参照沈伟其^[16]的方法, 称取新鲜叶片 0.1 g, 剪碎混匀, 加入 15 mL 大试管中, 加入 10 mL 混合提取液 (乙醇: 丙酮: 水 = 4.5: 4.5: 1), 于暗中浸提 24 h, 分别测定 440、

645、663 nm 处吸光度值 OD_{440} 、 OD_{645} 、 OD_{663} 。再依据相关公式计算光合色素含量。

1.2.3 光合作用参数 用美国 Li-Cor 公司的 Li-6400 便携式光合仪,于上午 9:00~11:30 测定基部起第三片完全展开功能叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。测定时使用开放气路,利用 6400PS 提供光照,叶室温度为 $(25\pm1)^\circ C$,光量子通量密度(PPFD)为 $700\ \mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$, CO_2 浓度为 $(380\pm10)\ \mu mol\cdot mol^{-1}$,相对湿度(RH)为 50%。由光合测定系统读出。

1.2.4 品质指标 维生素 C 含量测定采用 2,6-二氯酚钠盐滴定法^[17];有机酸含量测定采用酸碱中和滴定法^[17];可溶性蛋白质含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[17];可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[17];硝酸盐含量测定采用酚二磺酸比色法^[17]。

1.3 数据统计分析

用 SAS 软件 Duncan 法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 亚精胺对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下小白菜植株生长的影响

由表 1 可知,与对照(CK)相比,叶面喷施 Spd 处理(CS)对小白菜幼苗生长无明显影响; $Ca(NO_3)_2$ 胁迫处理(N)小白菜幼苗的株高、根长、叶面积、根体积、鲜重和干重则分别比 CK 显著降低了 48.02%、36.72%、59.15%、67.59%、72.64%、62.96%;而在

$Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶面喷施 Spd 处理(NS)的幼苗的株高、根长、叶面积、根体积、鲜重和干重分别比 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫处理(N)显著增加了 15.63%、22.73%、68.72%、90.85%、102.06%、114.00%。同时,小白菜幼苗各生长指标在 N、NS 处理下均显著低于对照。表明外源 Spd 能有效够缓解 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫对小白菜幼苗生长的抑制,促进幼苗生长,增加小白菜产量。

2.2 亚精胺对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下小白菜叶片光合色素含量的影响

表 2 显示,叶面喷施 Spd 处理(CS)的小白菜幼苗光合色素含量比 CK 明显增加; $Ca(NO_3)_2$ 胁迫处理(N)下小白菜幼苗的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量、类胡萝卜素含量分别比 CK 降低 51.42%、62.50%、54.72%、55.88%,而叶绿素 a/b 却比 CK 增加 21.46%;而在 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下叶面喷施 Spd 处理(NS)植株的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量、类胡萝卜素含量分别比 $Ca(NO_3)_2$ 处理(N)显著提高 38.82%、13.33%、32.17%、53.33%,其叶绿素 a/b 也比 $Ca(NO_3)_2$ 处理(N)明显提高 23.32%,但未达显著水平。可见, $Ca(NO_3)_2$ 胁迫明显抑制了小白菜幼苗光合色素的积累,外源 Spd 能够有效缓解 $Ca(NO_3)_2$ 对光合色素含量的抑制。

2.3 亚精胺对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下小白菜幼苗光合作用参数的影响

由图 1 可以看出,与对照相比,叶面喷施外源

表 1 亚精胺对硝酸钙胁迫下小白菜生长的影响

Table 1 Effects of Spd on the growth of *B. chinensis* seedling under $Ca(NO_3)_2$ stress

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	主根长 Root length/cm	叶面积 Leaf area/cm ²	根体积 Root volume/cm ³	单株鲜重 Fresh weight/g	单株干重 Dry weight/g
CK	18.47±0.55 a	18.00±1.14 a	73.63±8.35 a	15.52±1.04 a	19.52±0.92 b	1.35±0.14 ab
CS	19.67±0.45 a	18.47±0.75 a	84.33±5.30 a	17.59±0.84 a	26.63±1.05 a	1.55±0.19 a
N	9.60±0.17 c	11.57±0.33 c	30.08±2.14 c	5.03±0.68 c	5.34±0.35 d	0.50±0.07 c
NS	11.10±0.12 b	14.20±0.35 b	50.75±3.59 b	9.60±0.66 b	10.79±0.71 c	1.07±0.06 b

注:CK. 对照,正常营养液培养;CS. 对照+0.5 mmol·L⁻¹亚精胺;N. 80 mmol·L⁻¹硝酸钙;NS. 80 mmol·L⁻¹硝酸钙+0.5 mmol·L⁻¹亚精胺;同列不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同。

Note: CK. Control; CS. CK+0.5 mmol·L⁻¹ Spd; N. 80 mmol·L⁻¹ $Ca(NO_3)_2$; NS. 80 mmol·L⁻¹ $Ca(NO_3)_2$ +0.5 mmol·L⁻¹ Spd; The different normal letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below.

表 2 亚精胺对 $Ca(NO_3)_2$ 胁迫下小白菜幼苗光合色素含量的影响

Table 2 Effects of Spd on the contents of photosynthetic pigments in *B. chinensis* under $Ca(NO_3)_2$ stress

处理 Treatments	叶绿素 a Chlorophyll a (mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chlorophyll b (mg·g ⁻¹)	叶绿素总量 Chlorophyll a+b (mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	类胡萝卜素 Catotenoids (mg·g ⁻¹)
CK	1.75±0.04 b	0.80±0.13 a	2.54±0.14 b	2.33±0.42 b	0.34±0.02 b
CS	2.25±0.01 a	1.10±0.14 a	3.35±0.14 a	2.11±0.29 b	0.63±0.03 a
N	0.85±0.07 d	0.30±0.02 b	1.15±0.09 d	2.83±0.13 ab	0.15±0.01 d
NS	1.18±0.01 c	0.34±0.02 b	1.52±0.01 c	3.49±0.20 a	0.23±0.03 c

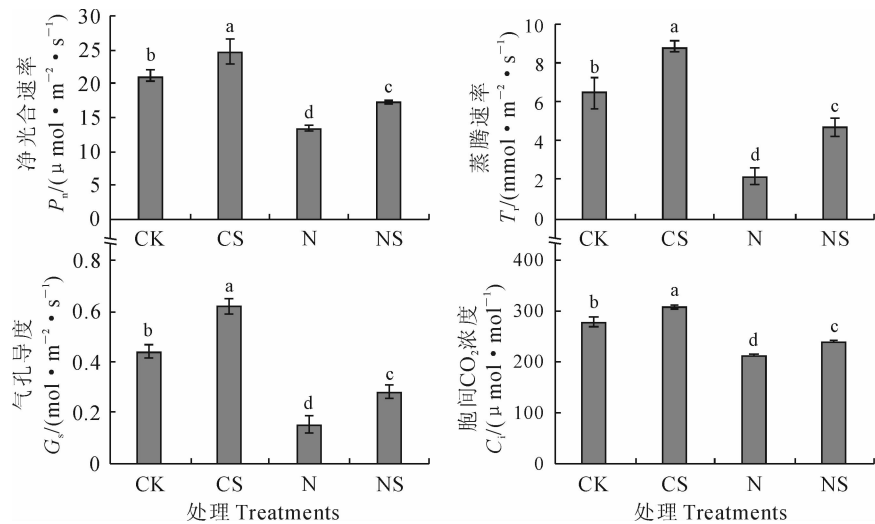


图1 亚精胺对Ca(NO₃)₂胁迫下小白菜幼苗光合作用的影响

Fig. 1 Effects of Spd on gas exchange parameters in *B. chinensis* seedling under Ca(NO₃)₂ stress

表3 亚精胺对Ca(NO₃)₂胁迫下小白菜幼苗品质的影响

Table 3 Effects of Spd on the quality of *B. chinensis* seedling under Ca(NO₃)₂ stress

处理 Treatment	维生素C含量 Vitamin C content /(mg·g ⁻¹)	可溶性糖含量 Soluble sugar content/(μg·g ⁻¹)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)	有机酸含量 Organic acid content/%	硝酸盐含量 Nitrates content /(mg·g ⁻¹)
CK	1.58±0.03 a	17.82±0.95 b	174.27±9.58 b	2.40±0.08 c	1.07±0.03 c
CS	1.67±0.07 a	21.54±1.22 a	204.76±6.46 a	2.07±0.04 d	1.02±0.03 c
N	1.02±0.02 c	14.01±0.28 c	119.35±7.59 d	3.40±0.09 a	2.19±0.03 a
NS	1.28±0.05 b	17.11±0.2 b	149.86±2.73 c	2.75±0.14 b	1.88±0.11 b

Spd 处理(CS)能显著增加小白菜叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i ；Ca(NO₃)₂ 胁迫处理(N) 则使幼苗的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 分别比对照显著降低 34.45%、66.56%、65.91% 和 22.94%；Ca(NO₃)₂ 胁迫下叶面喷施外源 Spd(NS) 的幼苗 P_n 、 T_r 和 G_s 、 C_i 分别比胁迫处理显著增加 28.11%、12.61% 和 86.67%、117.59%，但仍均显著低于相应对照。即叶面喷施外源 Spd 能一定程度上缓解 Ca(NO₃)₂ 对小白菜叶片光合参数抑制作用。

2.4 亚精胺对Ca(NO₃)₂胁迫下小白菜幼苗品质的影响

与对照相比，叶面喷施 Spd 处理(CS)的小白菜幼苗品质显著提高；Ca(NO₃)₂ 胁迫处理(N)小白菜幼苗的维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量分别比对照降低了 35.15%、21.38%、31.51%，而有机酸和硝酸盐含量则分别比对照显著增加了 41.66% 和 104.67%；而在Ca(NO₃)₂胁迫下叶面喷施 Spd (NS)幼苗的维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白则分别比 Ca(NO₃)₂ 胁迫处理(N)显著增加了 24.89%、22.13%和 25.56%，而有机酸和硝酸盐含量则分别比Ca(NO₃)₂ 胁迫显著降低19.12%和 14.16% (表 3)。但处理 N 和 NS 幼苗的硝酸盐含量均显著高于对照

和 Spd 处理(表 3)。可见，叶面喷施外源 Spd 能够缓解 Ca(NO₃)₂胁迫对小白菜幼苗品质的不利影响，提高体内可溶性糖、可溶性蛋白和维生素 C 含量，降低有机酸和硝酸盐含量，改善幼苗品质。

3 讨论

盐胁迫对植物的危害是多方面的，包括渗透胁迫、离子毒害和细胞内离子平衡的破坏等^[18]，一般表现为植株矮化、生物量降低^[19]。生物量是植物对盐胁迫响应的综合体现及对盐胁迫的综合反应^[20]，也是衡量胁迫耐性时的常用指标^[21]。本实验表明，80 mmol/L Ca(NO₃)₂ 胁迫显著抑制小白菜幼苗的生长，降低其生物量的积累，致使幼苗的株高、根长、叶面积、根体积和干、鲜重显著降低。叶面喷施 0.5 mmol/L 的 Spd 能明显缓解 Ca(NO₃)₂ 的抑制作用，促进小白菜幼苗的生长，提高幼苗生物量。

叶绿素含量是反映光合强度的重要指标，盐胁迫直接或间接地影响到叶绿素的含量^[22]。绝大部分的叶绿素 a、全部叶绿素 b 和类胡萝卜素是聚光色素，具收集、传递光能给少数反应中心色素叶绿素 a 分子^[23]。类胡萝卜素既是光合色素，又是内源抗氧化

剂,在细胞内可吸收剩余能量,淬灭活性氧,从而防止细胞膜脂过氧化,全部的叶绿素和类胡萝卜素都包埋在类囊体膜中^[19]。Chl a/Chl b 值的变化能反映叶片光合活性的强弱^[24]。本实验中, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下小白菜幼苗叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量明显下降,这可能是由于胁迫下叶绿体类囊体膜的完整性受到破坏,加速了光合色素的降解;同时,由于类胡萝卜素含量的降低,减少了对活性氧的淬灭,导致细胞内积累较多的氧自由基,破坏叶绿体膜结构,进一步加速了叶绿素的分解。本研究还发现, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下叶绿素 a/叶绿素 b 值增大,表明 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对叶绿素 b 的破坏作用大于叶绿素 a,叶绿素 b 降解的幅度大于叶绿素 a。叶面喷施外源 0.5 mmol/L 的 Spd 能够提高 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下小白菜叶片的叶绿素含量,同时提高类胡萝卜素含量,淬灭活性氧,减轻胁迫对叶绿体结构的伤害,促进光合作用的进行。

盐胁迫条件下,植物叶片气孔收缩,气孔导度降低,限制了 CO_2 向叶绿体的输送和叶片水分的蒸发,从而抑制了叶片的光合作用和蒸腾作用^[25]。导致光合速率降低的因素包括气孔限制和非气孔限制两类^[26]。若气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)同时下降则证明气孔因素是主要的,若 G_s 下降而 C_i 升高则表明非气孔因素是主要的^[27]。本实验中, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下,小白菜幼苗叶片 G_s 和 C_i 同时下降表明气孔限制是降低光合速率的主要因素;叶面喷施 0.5 mmol/L 的 Spd 可以提高植株的 G_s ,从而使植株的 P_n 增加。这说明外源 Spd 可以缓解 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫造成的气孔限制,提供较高浓度的 CO_2 ,从而维持较高的净光合速率。

不结球白菜干物质、维生素 C、有机酸、可溶性蛋

白质、可溶性糖含量是重要的营养指标^[26]。维生素 C 是人体身体不可缺少的重要维生素之一^[28],也是衡量蔬菜品质的首要指标^[29]。可溶性糖既是高等植物的主要光合产物,又是碳水化合物代谢和暂时贮藏的主要形式,在植物碳代谢中占有重要位置^[30],还作为渗透调节物质在植物逆境响应过程中起重要作用^[31]。可溶性蛋白的含量是衡量小白菜品质优劣的重要指标之一。蔬菜食用部分硝酸盐含量是蔬菜卫生品质中的一个限制指标,因为尽管硝酸盐离子本身无毒,但由它还原形成的亚硝酸离子对人体健康有害^[32]。提高干物质、维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白质含量和适当降低有机酸和硝酸盐含量,是不结球白菜品质的主要目标^[27]。本实验中, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫显著降低小白菜幼苗干物质、维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白质含量,有机酸和硝酸盐含量显著增加;叶面喷施 0.5 mmol/L 的 Spd 可以显著提高干物质、维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白质含量和适当降低有机酸和硝酸盐含量。表明 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫显著降低小白菜的品质,而外源 Spd 可以有效缓解 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫对小白菜幼苗品质的抑制作用,从而使其维持较好的品质。

综上所述,在 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫条件下,喷施外源 0.5 mmol/L Spd 能够显著提高小白菜幼苗的光合色素含量和净光合速率,改善光合作用效率;促进植株的生长,显著提高植株产量,并提高维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白含量,降低有机酸和硝酸盐含量,改善植株品质,从而有效减轻胁迫造成的不良影响。因此,外源 Spd 可以提高小白菜抗盐耐盐的能力,但是,要深入研究外源 Spd 对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫条件下小白菜生长的影响,还需要展开进一步的实验。

参考文献:

- [1] HOU X L(侯喜林). Advances in breeding of non-heading Chinese cabbage[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*(南京农业大学学报), 2003, **26**(4): 111—115(in Chinese).
- [2] YUE D(岳冬), SHU SH(束胜), *et al.* Effects of exogenous Brassinolide on the growth and physiological and quality of *Brassica chinensis* under Calcium Nitrate stress[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*(沈阳农业大学学报), 2013, **44**(5): 696—699(in Chinese).
- [3] LI D P(李东坡), WU ZH J(武志杰), LIANG CH H(梁成华), *et al.* Characteristics and regulation of greenhouse soil environment[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2004, **23**(5): 192—197(in Chinese).
- [4] WU X G(吴兴国). Causes and preventive measures of salt accumulation on face soil in vegetable greenhouse[J]. *Journal of Zhejiang-Wanli University*(浙江万里学院学报), 2001, **14**(3): 19—21(in Chinese).
- [5] TONG Y W(童有为), CHEN D F(陈淡飞). Study on the cause and control of secondary saline soils in greenhouses[J]. *Acta Horticulturae Sinica*(园艺学报), 1991, **18**(2): 159—162(in Chinese).
- [6] ROY P, NIYOGI K, SENGUPTA D N, *et al.* Spermidine treatment to rice seedlings recovers salinity stress-induced damage of plasma membrane and PM-bound H^+ -ATPase in salt-tolerant and salt-sensitive rice cultivars[J]. *Plant Science*, 2005, 168: 583—591.
- [7] PENG X Y(彭晓赞), ZHAO Y L(赵运林), ZHOU X M(周小梅). The relationship between polyamines and stresses in plants[J]. *Journal of Hunan City University*(湖南城市学院学报), 2008, **17**(1): 56—60(in Chinese).

- [8] DUAN J J(段九菊), GUO SH R(郭世荣), FAN H F(樊怀福), *et al.* Effects of salt stress on proline and polyamine metabolisms in the roots of cucumber seedlings[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2006, **26**(12): 2 486—2 492(in Chinese).
- [9] CHEN K M(陈坤明), ZHANG CH L(张承烈). Polyamine contents in the spring wheat leaves and their relations to drought-resistance [J]. *Acta Phytophysiologica Sinica* (植物生理学报), 2000, **26**(5): 381—386(in Chinese).
- [10] ZAPATA P J, SERRANO M, PRETEL M T, *et al.* Polyamines and ethylene changes during germination of different plant species under salinity[J]. *Plant Science*, 2004, 167: 781—788.
- [11] CHEN L F(陈丽芳), LU W(陆 巍), SUN J(孙 瑾), *et al.* Effects of exogenous spermidine on photosynthesis and carbohydrate accumulation in roots and leaves of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under salt stress[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2011, **34**(3): 31—36(in Chinese).
- [12] WANG Q(王 强), XU H F(徐洪峰), HAO M X(郝梦霞). Effects of exogenous on the growth of *Sophora davidii* seedlings under drought stress[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis* (浙江农业学报), 2014, **26**(4): 954—960(in Chinese).
- [13] DUAN J J(段九菊), GUO SH R(郭世荣), *et al.* Effects of exogenous Spermidine on reactive oxygen species levels and antioxidant enzymes activities of cucumber seedlings under salt stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2006, **33**(3): 639—641(in Chinese).
- [14] JIANG X Y(江行玉), ZHAO K F(赵可夫), DOU J X(窦君霞), *et al.* The effects of exogenous Spermidine and dicyclohexylamine on the content of endogenous polyamines and salt resistance of *Atriplex* under NaCl stress[J]. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 2001, **35**(3): 188—190(in Chinese).
- [15] XUE SH Y(薛淑媛), ZHU SH D(朱世东), LI X(李 雪), *et al.* Effects of exogenous spermidine on photosynthetic characteristics and ultra structure of salt-stressed muskmelon seedlings[J]. *Jiangsu J. of Agr. Sci.* (江苏农业学报), 2013, **29**(3): 613—618(in Chinese).
- [16] SHEN W Q(沈伟其). Extraction of mixed solution for determination of chlorophyll content in rice Leaf blade[J]. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 1988, (3): 62—64(in Chinese).
- [17] 李合生, 陈翠莲, 洪玉枝, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [18] LIU Y L(刘友良), MAO C Q(毛才良), WANG L J(汪良驹). Recent progress in studies on salinity tolerance in plants[J]. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 1987(4): 1—7(in Chinese).
- [19] QIN J(秦 景), DONG W Y(董雯怡), HE K N(贺康宁), *et al.* Effects of salt stress on growth and photosynthetic physiological features of *Hippophae rhamnoides* seedlings[J]. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18**(3): 1 031—1 036(in Chinese).
- [20] WEI G Q(魏国强), ZHU H J(朱祝军), FANG X ZH(方学智), *et al.* The effects of NaCl stress on plant growth, chlorophyll fluorescence characteristics and active oxygen metabolism in seedlings of two cucumber cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(11): 1 754—1 759(in Chinese).
- [21] SAIRAM R K, RAO K V, SRIVASTAVA G C. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration[J]. *Plant Science*, 2002, 163: 1 037—1 046.
- [22] SHI Q H(史庆华), ZHU ZH J(朱祝军), KHALIDA AL-AGHABARY, *et al.* Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl treatment on photosynthesis in leaves of tomato[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2004, **10**(2): 188—191(in Chinese).
- [23] CHEN J M(陈健妙), ZHENG Q(郑 青), LIU ZH P(刘兆普), *et al.* Growing and photosynthetic response of *Jatropha curcas* L. seedlings to salt stress[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(3): 1 356—1 365(in Chinese).
- [24] SAKAKI T, KONDO N, SUGAHARA K. Breakdown of photosynthetic pigment and lipids in spinach leaves with ozone fumigation; Role of active oxygen[J]. *Physiologia Plantarum*, 1983, 59: 28—34.
- [25] FANG Y(房 用), LIU D X(刘德玺), MA ZH R(马昭让), *et al.* Tests on the adaptation and salt and alkali resistance of *Hippophae rhamnoides* L. in seashore[J]. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2005, **33**(2): 38—39(in Chinese).
- [26] BERRY J A, DOWNTON W J S. Environmental regulation of photosynthesis[C]//GOVIND J. Photosynthesis (Vol II). New York: Academic Press, 1982: 263—345.
- [27] ZENG G P(曾国平), CAO SH CH(曹寿椿). Analysis of genetic effects of some nutrient quality characters in non-heading Chinese Cabbage[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 1997, (2): 26—27(in Chinese).
- [28] HUANG W(黄 威), LIU Y C(刘永灿), LI H H(李会合). Study on the relationship between nitrate and nutrient quality of vegetable [J]. *Journal of Chongqing University of Arts and Sciences* (重庆文理学院学报), 2011, **30**(3): 34—37(in Chinese).
- [29] HU CH M(胡春梅), HOU X L(侯喜林). Relationship of major nutrient components with low temperature tolerance in non-heading Chinese cabbage[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2010, **33**(3): 37—41(in Chinese).
- [30] LONG Y G(龙永根), LIU F(刘 方), ZHANG Q X(张巧香), *et al.* The effect of different fertilizers on yield and quality of cabbage[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology* (山地农业生物学报), 2013, **32**(4): 310—313(in Chinese).
- [31] MORSY M R, JUVE L, HAUSMANN J F, *et al.* Alteration of oxidative and carbohydrate metabolism under abiotic stress in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes contrasting in chilling tolerance[J]. *J. Plant Physiol.*, 2007, 164: 157—167.
- [32] HUANG J F(黄建凤), XU X M(徐小梦), *et al.* Physiological mechanisms for the difference of nitrate accumulation in two cultivars of non-heading Chinese cabbage[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2011, **34**(1): 74—78(in Chinese).

(编辑: 裴阿卫)