

# 脱盐味精尾液对 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫下小白菜种子萌发和幼苗生长的影响

许猛<sup>1,2</sup>, 袁亮<sup>1</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 李燕婷<sup>1\*</sup>, 赵秉强<sup>1</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081;

2 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

**摘要:**【目的】外源氨基酸能够缓解氯化钠对作物的胁迫, 但其能否缓解毒害作用更大的碱性盐 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 胁迫尚无定论。本文研究了富含多种氨基酸的脱盐味精尾液制剂 (以下简称尾液) 对  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下小白菜种子萌发、幼苗生长和生理指标的影响, 旨在为该制剂在农业生产中, 特别是盐碱土地地区的推广应用提供科学依据和理论指导。【方法】供试脱盐味精尾液粗蛋白含量为 47.62%, 游离氨基酸以谷氨酸、丙氨酸、天门冬氨酸、脯氨酸、甘氨酸、亮氨酸、色氨酸等为主, 总含量为 15.4%,  $\text{Na}^+$  含量 1.2%, pH 3.9 (固水比为 1 : 250)。以小白菜 (*Brassica chinensis* L.) 种子和幼苗为供试材料, 分别进行萌发试验和幼苗培养试验。种子萌发采用标准发芽试验方法, 种子在 0、0.05、0.1、0.2、0.4、0.8 g/L 尾液中浸种 12 h 后, 分别移至含 5 mL 0、10、20、30 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液的培养皿中萌发, 测定其发芽势、发芽率、胚根长和胚芽长。幼苗培养试验选取整齐一致的幼苗, 缓苗后, 于营养液中分别加入 0、0.05、0.1、0.2、0.4、0.8 g/L 的尾液和 0、2.5、5、10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  进行培养。在碱害明显后, 取样测定生长量、SPAD 值、根长、株高以及叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化氢酶 (CAT) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性、丙二醛 (MDA) 含量、超氧阴离子自由基 ( $\text{O}_2^-$ ) 产生速率、脯氨酸 (Pro) 含量等生理指标。【结果】1) 在同一浓度的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 随尾液浓度的增加, 小白菜种子的发芽势、发芽率、胚根长和胚芽长均表现出先上升后下降的变化规律, 以添加 0.1 g/L 尾液的缓解效果最佳。2) 在同一浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 低浓度尾液 (0.05~0.1 g/L) 能够提高小白菜幼苗生长量、SPAD 值, 同时保持 Pro 含量, 提高抗氧化酶活性, 降低  $\text{O}_2^-$  产生速率和 MDA 含量; 当尾液浓度增加到 0.4 g/L 和 0.8 g/L 时, 叶片  $\text{O}_2^-$  产生速率和 MDA 含量明显上升, 同时小白菜生长量、SPAD 值、根长和株高均大幅下降, 显著抑制了小白菜幼苗的生长。3) 在 2.5 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 尾液浓度以 0.05 g/L 效果最好, 而在 5 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 尾液浓度以 0.1 g/L 效果最好。【结论】脱盐味精尾液可在一定浓度范围内缓解  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对小白菜种子萌发和幼苗生长的抑制作用。在外源  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度为 10~30 mmol/L 时, 用 0.1 g/L 尾液浸种能够促进种子萌发, 缓解  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对小白菜种子萌发的抑制作用; 在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  2.5~10 mmol/L 条件下, 在营养液中补充 0.05~0.1 g/L 的尾液能够提高小白菜幼苗叶片抗氧化酶活性, 增强叶片光合作用, 显著提高幼苗生长量, 缓解  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对小白菜生长的抑制作用。

**关键词:** 氨基酸; 脱盐味精尾液;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫; 小白菜; 种子萌发; 幼苗生长

## Effects of desalinated wastewater containing monosodium glutamate on germination and growth of pakchoi under $\text{Na}_2\text{CO}_3$ stress

XU Meng<sup>1,2</sup>, YUAN Liang<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LI Yan-ting<sup>1\*</sup>, ZHAO Bing-qiang<sup>1</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences /Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** 【Objectives】Exogenous amino acids have been proved of alleviating the stress of NaCl on crops, but not yet about their effects on that of alkaline salt ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). In this study, we investigated the effects of a

收稿日期: 2018-07-13 接受日期: 2019-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200402)。

联系方式: 许猛 E-mail: xumeng0635@qq.com; \* 通信作者 李燕婷 Tel: 010-82108664, E-mail: liyanting@caas.cn

preparation made of gourmet powder tail liquid, aiming at providing more support for the recycle of the tail liquid in agriculture, particularly in salt-alkaline soil. **【 Methods 】** The tested tail liquid contained total crude protein 47.62%, total free amino acid 15.4%,  $\text{Na}^+$  1.2% and the pH was 3.9 (solid: water ratio of 1 : 250). Seed germination experiment showed that seeds of pakchoi were presoaked in solutions containing 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 g/L of tail liquid for 12 h, then they were loaded inside germination dishes containing 5 mL of 0, 10, 20, 30 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  solution. The germination potential, percentage of germination and lengths of radicle and plumules were measured. Hydroponic experiment showed that pakchoi seedlings were cultivated in nutrient solutions containing 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 g/L of the tail liquid solution, and 0, 2.5, 5, 10 mmol/L of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , respectively. The fresh weight, SPAD value, root length, shoot height, content of SOD, POD, CAT,  $\text{O}_2^-$  producing rate, proline and MDA content in pakchoi leaves were measured when  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress was observed. **【 Results 】** 1) Under the same  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration, germination potential, percentage of germination, lengths of radicle and plumule of pakchoi showed a trend of increasing first and then decreasing with the increase of tail liquid concentration. Pakchoi grew best at 0.1 g/L preparation concentration under all the tested  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress condition. 2) Under the same  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration, seedling fresh weight, SPAD value, SOD, POD, CAT activities increased, and the  $\text{O}_2^-$  producing rate and MDA content decreased within low concentrations of tail liquids (0.05–0.1 g/L). When the concentration of tail liquid was in range of 0.4–0.8 g/L, pakchoi growth was severely inhibited, and fresh weight, SPAD value, root length, shoot height decreased greatly, while  $\text{O}_2^-$  producing rate and MDA content in leaves increased. 3) Under 2.5 mmol/L of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 0.05 g/L of tail liquid was the best option, while 0.1 g/L of tail liquid was the best concentration under 5 mmol/L and 10 mmol/L of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress conditions. **【 Conclusions 】** The desalted tail liquid of gourmet powder could alleviate the inhibitory of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress on seed germination and seedling growth of pakchoi. Within stresses range of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  10–30 mmol/L, adding 0.1 g/L of the tail liquid into the hydroponic solution is satisfactory in promoting pakchoi seed germination. Under 2.5–10 mmol/L of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress, addition of 0.05–0.1 g/L tail liquid is effective in improving antioxidant enzyme activity of leaves, reducing cells membrane permeability, enhancing leaf photosynthesis, which is the key of higher resistance to  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress and healthy growth of pakchoi.

**Key words:** amino acids; desalinated monosodium glutamate wastewater;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  stress; pakchoi (*Brassica chinensis* L.); seed germination; seedling growth

在盐碱土地地区, 盐害会严重影响种子萌发和幼苗生长, 造成作物后续生育时期生长质量乃至最终产量的大幅下降<sup>[1-4]</sup>。在评价作物耐盐碱能力和筛选耐盐碱品种时种子萌发和幼苗期也是必要或决定性的阶段<sup>[4-7]</sup>。除种植耐盐碱品种外, 使用有效的外源物质也是减轻盐害的重要手段<sup>[2]</sup>。作为一类生物活性物质, 外源氨基酸具有调节作物生长发育、促进养分吸收利用、提高作物产量、改善作物品质、提高肥料利用率等多重增效作用<sup>[8-12]</sup>。大量研究表明<sup>[13-15]</sup>, 在  $\text{NaCl}$  胁迫下外源氨基酸还能够通过抗氧化酶系统和渗透调节途径改善作物生理特性, 增强叶片光合作用, 促进生长发育, 提高作物抗盐胁迫能力。除中性盐外, 盐碱土中还存在大量的碱性盐。碱性盐 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 不仅会引起盐害, 还会导致介质 pH 上升, 对种子萌发和幼苗的毒害作用大于中性盐 ( $\text{NaCl}$ )<sup>[16-18]</sup>;

以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  为主的苏打盐碱土在我国分布也较为广泛<sup>[19]</sup>。因此研究外源氨基酸是否能够缓解  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对作物的胁迫作用具有重要意义。

Sun 等<sup>[20]</sup>研究发现外源脯氨酸能够通过渗透调节系统提高植物体内脯氨酸含量以及提高抗氧化酶活性等以缓解作物遭受的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫。外源氨基酸能够诱导抗碱胁迫响应基因的表达, 提高烟草幼苗体内多种渗透调节物质含量, 提高抗氧化酶活性, 缓解幼苗膜脂过氧化程度, 维持幼苗正常生长<sup>[21]</sup>; 外源丝氨酸在碱性土上可以增加大豆根瘤数量, 促进大豆植株和根系生长, 提高大豆产量<sup>[22]</sup>。相对于中性盐, 关于外源氨基酸在缓解作物碱性盐胁迫中的作用研究报道较少, 而对混合/复合氨基酸的作用更鲜见报道。味精尾液是谷氨酸工业生产过程中产生的废液, 富含多种游离氨基酸, 是一种廉价易得的混

合氨基酸材料<sup>[9, 23]</sup>。然而味精尾液中钠离子含量较高, 直接施用也会造成盐害。本文采用以味精尾液为原料经脱盐浓缩、低温干燥等专利工艺技术(专利号: ZL201410026086.5)制得的脱盐味精尾液制剂, 研究在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下对小白菜种子萌发和幼苗生长的影响及作用机理, 为脱盐味精尾液在农业生产中, 特别是盐碱土地地区的推广应用提供科学依据和理论指导。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试材料

供试作物: 不结球白菜 (*Brassica chinensis* L.), 品种名上海青。

脱盐味精尾液制剂(以下简称尾液): 采用中国农业科学院农业资源与农业区划研究所专利技术(ZL201410026086.5)对工业味精尾液采用脱盐浓缩、低温干燥等工艺制得, 其粗蛋白含量 47.62%; 游离氨基酸含量 15.4%、谷氨酸 11.6%、丙氨酸 1.56%、天门冬氨酸 0.49%、脯氨酸 0.46%、甘氨酸 0.18%、亮氨酸 0.17%、色氨酸 0.16%、其他氨基酸 0.78%; Na<sup>+</sup>含量 1.2%; pH 3.9(固水比为 1 : 250)。

### 1.2 试验设计与样品测定

1.2.1 萌发试验 脱盐味精尾液制剂共设置六个浓度处理: 0、0.05、0.1、0.2、0.4、0.8 g/L。挑选整齐饱满的小白菜种子用 10% NaClO 消毒 15 min 后, 用灭菌蒸馏水冲洗 3 次, 吸去多余水分, 用不同浓度尾液浸种 12 h。浸种完后, 再用蒸馏水冲洗 3 次, 吸去多余水分。将浸种后的种子均匀摆入铺有 2 层无菌滤纸的 9 cm 培养皿内, 分别加入 5 mL 含 0、

10、20、30 mmol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的碱液后, 置于 25℃ 人工气候箱内培养。试验期间以称重法补充蒸馏水, 每皿 50 粒, 重复 4 次。

每天记录种子发芽数, 以胚芽达到种子长度的一半以上或胚根达到种子长度为发芽。第 2 天计算发芽势; 第 4 天结束试验并计算发芽率, 测定胚根长、胚芽长。发芽势 (%) = 前 2 天总发芽数/供试种子总数 × 100; 发芽率 (%) = 前 4 天总发芽数/供试种子总数 × 100。

1.2.2 幼苗生长发育试验 采用穴盘育苗, 待小白菜幼苗长到 2 叶 1 心时选择整齐一致的幼苗, 移至含有 1/2 Hoagland 营养液中缓苗。缓苗后, 分别加入浓度为 0、2.5、5、10 mmol/L 的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和尾液于全 Hoagland 营养液中, 处理浓度及各处理营养液的 pH 及电导率值见表 1。每个处理重复 3 次, 各重复 3 棵幼苗。每两天更换一次营养液。培养 10 天后, 进行指标测定。

测定根长(最长根)、株高、生长量(地上部、地下部重量之和), 最大叶片 SPAD 值采用日本产 SPAD-502 叶绿素仪测定; 叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化学还原法<sup>[24]</sup>测定, 过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法<sup>[24]</sup>测定, 过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外线吸收法<sup>[25]</sup>测定, 所有酶活性单位以样品鲜重为基准; 叶片丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法<sup>[25]</sup>, 叶片超氧阴离子自由基(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)产生速率采用羟胺氧化法<sup>[25]</sup>测定, 脯氨酸(Pro)含量采用磺基水杨酸法<sup>[26]</sup>测定。

### 1.3 数据处理

试验数据用 Excel 2013、DPS 9.0 进行统计分析, 采用 LSD 法进行差异显著性检验。

表 1 各处理营养液 pH 及 EC 值 (μS/cm)

Table 1 pH and electrical conductivities (EC) of nutrient solutions after adding different amounts of tail liquid and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

尾液用量 (g/L) Tail liquid addition	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 处理水平 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> level (mmol/L)							
	0		2.5		5		10	
	pH	EC	pH	EC	pH	EC	pH	EC
0	6.00	1554.0	9.38	1607.1	10.25	2050.2	10.66	2748.3
0.05	5.60	1598.3	9.22	1761.8	10.12	2059.0	10.56	2751.1
0.1	5.31	1639.3	9.05	1812.4	10.00	2075.3	10.46	2753.7
0.2	4.81	1671.7	8.84	1913.2	9.72	2130.1	10.28	2764.5
0.4	4.41	1781.1	8.51	2113.4	9.41	2308.0	10.00	2833.9
0.8	3.95	1996.8	8.19	2517.4	9.06	2681.3	9.64	3077.0

## 2 结果与分析

### 2.1 脱盐味精尾液对 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫下小白菜种子萌发的影响

随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的提高, 蒸馏水浸种小白菜种子的发芽势迅速下降, 严重抑制了种子的萌发。在无  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫 (0 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 下, 尾液本身同样会抑制发芽势, 且尾液浓度达到 0.4 g/L 时抑制作用达到显著性水平。而在 10、20、30 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 小白菜种子发芽势随尾液浓度的增加均呈先上升后下降的趋势, 且均以 0.1 g/L 添加效果最好, 与不添加尾液相比发芽势分别提高 32.35%、18.87% 和 94.74% (图 1)。

脱盐味精尾液可缓解  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对小白菜种子发芽的抑制作用。在不施用尾液的条件下,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

浓度越高对小白菜种子发芽的抑制作用也明显越强; 在无  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 尾液本身会降低种子发芽率, 且浓度达到 0.8 g/L 时最显著。在各浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下小白菜种子发芽率随尾液浓度增加均呈现先上升后下降的趋势, 以 0.1 g/L 尾液效果最好, 与不添加相比发芽率分别提高 6.56%、14.95% 和 72.73% (图 1)。

随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的提高, 小白菜胚根长下降非常迅速, 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  强烈抑制了胚根的伸长。在对照 (0 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 条件下, 除 0.8 g/L 尾液处理胚根长显著下降 55.41% 外, 其它处理与不添加相比差异不显著。在 10、20、30 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下, 随尾液浓度提高, 胚根长呈现先上升后下降的趋势, 以 0.1 g/L 尾液促进胚根伸长的效果最好 (图 2)。

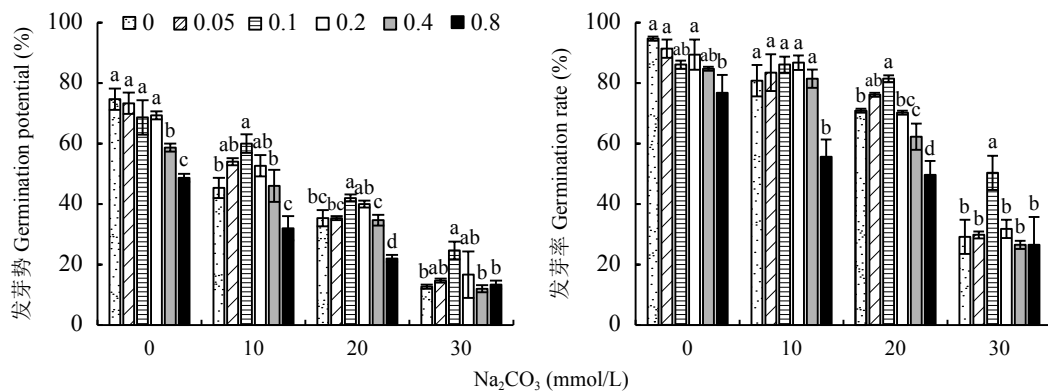


图 1 不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下脱盐味精尾液对小白菜种子发芽势和发芽率的影响

Fig. 1 Germination potential and rate of pakchoi seeds under different  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and tail liquid addition levels

[注 (Note): 图例表示尾液加入浓度 (g/L); 柱上不同字母表示相同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下不同尾液加入量间差异达 0.05 显著水平。Legends represent the treating concentrations of tail liquid (g/L); different letters above the bars represent significant differences among tail liquid treatments at the same  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration at the 0.05 level.]

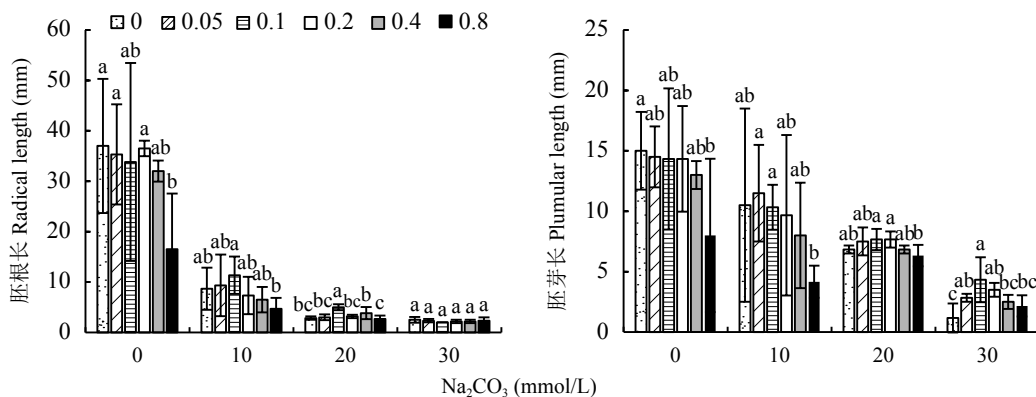


图 2 不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下脱盐味精尾液对小白菜胚根长和胚芽长的影响

Fig. 2 Length of root and plumule of pakchoi under different  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and tail liquid addition levels

[注 (Note): 图例表示尾液加入浓度 (g/L); 柱上不同字母表示相同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下不同尾液加入量间差异达 0.05 显著水平。Legends represent the treating concentrations of tail liquid (g/L); different letters above the bars represent significant differences among tail liquid treatments at the same  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration at the 0.05 level.]



$\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度越高, 对小白菜种子胚芽长的抑制作用越强烈。在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 与不添加尾液相比, 除 0.8 g/L 尾液处理胚芽长显著下降 46.67% 外, 其它处理与不添加尾液差异均不显著。在 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下与不添加尾液相比, 0.05 g/L 尾液处理胚芽长增加 9.52%, 之后随着尾液浓度的升高, 胚芽长呈现下降的趋势。在 20 mmol/L 和 30 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 随尾液浓度的上升, 胚芽长均呈现先上升后下降的趋势, 以 0.1 g/L 尾液效果最好 (图 2)。

## 2.2 脱盐味精尾液对 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫下小白菜幼苗生长的影响

随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的上升, 不添加尾液处理的小白菜生长量呈现下降的趋势, 在 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下生长量仅为对照条件下 (0 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 的 56.9%, 严重阻碍了幼苗的生长。在对照条件下, 尾液本身同样会显著降低生长量, 且随尾液浓度的增加, 抑制作用增强。在不同碱浓度胁迫条件下, 随尾液浓度增加, 小白菜生长量均呈现先升后降的趋势: 在 2.5 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 以 0.05 g/L 尾液的效果最好, 与不添加尾液相比其生长量显著提高 13.8%; 而在 5 mmol/L 和 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 以 0.1 g/L 的效果最好, 与不添加尾液相比生长量分别显著提高 40.7% 和 32.0%; 高浓度 (0.4~0.8 g/L) 尾液在各碱浓度条件下均会显著抑制小白菜的生长。在同一尾液浓度下, 随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度上升, 鲜重均表现出先升后降的趋势 (图 3)。

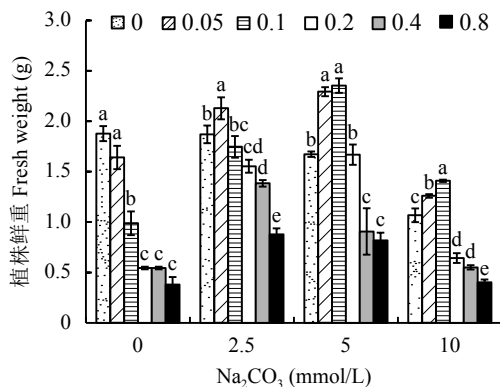


图 3 不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下脱盐味精尾液对小白菜鲜重的影响

Fig. 3 Fresh weight of pakchoi under different  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and tail liquid addition levels

[注 (Note): 图例表示尾液加入浓度 (g/L); 柱上不同字母表示相同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下不同尾液加入量处理间差异达 0.05 显著水平。Legends represent the treating concentrations of tail liquid (g/L); different letters above the bars represent significant differences among tail liquid treatments at the same  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration at the 0.05 level.]

随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度上升, 不添加尾液处理的小白菜叶片 SPAD 值先保持平稳, 但在 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下 SPAD 值迅速下降仅为对照的 56.86%。在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 与不添加尾液相比, 添加 0.05 g/L 尾液处理叶片 SPAD 值基本持平, 之后随着尾液浓度的增加, SPAD 值迅速下降, 0.1 g/L 尾液处理 SPAD 值即显著下降 47.36%。在各碱胁迫条件下, 随尾液浓度增加, SPAD 值均呈现先上升后下降的趋势: 在 2.5 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 以 0.05 g/L 尾液效果最好, 与不添加相比 SPAD 增加 13.77%, 而在 5 mmol/L 和 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下以 0.1 g/L 效果最好; 高浓度 (0.2~0.8 g/L) 尾液在各碱浓度下均会明显降低 SPAD 值 (图 4)。

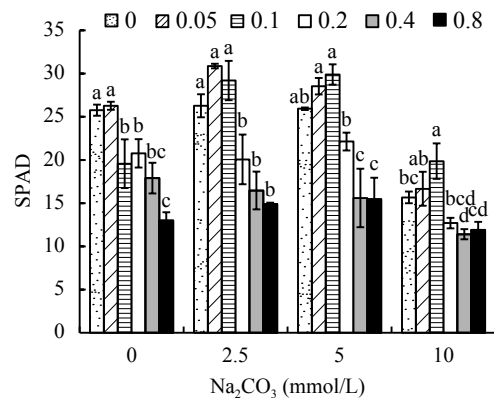


图 4 不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下脱盐味精尾液对小白菜 SPAD 值的影响

Fig. 4 SPAD values of pakchoi under different  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and tail liquid addition levels

[注 (Note): 图例表示尾液加入浓度 (g/L); 柱上不同字母表示相同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下不同尾液加入量处理间差异达 0.05 显著水平。Legends represent the treating concentrations of tail liquid (g/L); different letters above the bars represent significant differences among tail liquid treatments at the same  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration at the 0.05 level.]

表 2 表明, 随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的上升, 不添加尾液处理株高呈现先升后降的趋势, 在 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下株高仅为对照的 70.44%, 表明高  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度会显著抑制小白菜茎的伸展。在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 随尾液浓度增加, 株高呈现一直下降的趋势。在各碱浓度胁迫下, 随尾液浓度的上升, 小白菜株高呈现先升后降的趋势: 在 2.5、5 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下以 0.05 g/L 添加量对促进株高的效果最好, 与不添加处理相比株高分别增加 4.22%、4.00%, 但差异不显著; 在 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下, 以 0.1 g/L 添加量植株最高, 与不添加处理相比株高显著增加 17.25%。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度越高对不添

表 2 不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下脱盐味精尾液对小白菜株高和根长的影响Table 2 Shoot and root length of pakchoi under different  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentrations and tail liquid addition levels

指标 Index	尾液用量 (g/L) Tail liquid addition	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 水平 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ level (mmol/L)			
		0	2.5	5	10
株高 Shoot height (cm)	0	12.1 a	13.4 ab	12.5 a	8.5 b
	0.05	10.9 a	14.0 a	13.0 a	9.1 ab
	0.1	9.0 b	12.7 ab	12.6 a	10.0 a
	0.2	6.1 c	11.9 bc	11.6 a	7.0 c
	0.4	6.5 c	10.2 cd	8.7 b	6.6 c
	0.8	5.1 c	8.3 d	7.3 b	5.2 d
根长 Root length (cm)	0	9.3 a	8.8 a	8.4 a	5.4 a
	0.05	6.0 b	7.1 a	9.5 a	5.8 a
	0.1	3.7 c	3.9 b	5.9 b	4.3 b
	0.2	1.2 d	3.8 b	4.2 bc	1.8 c
	0.4	1.2 d	2.2 b	2.2 c	1.1 c
	0.8	1.3 d	2.0 b	2.4 c	1.2 c

注 (Note): 同列不同字母表示同一指标相同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下不同尾液加入量间差异达 0.05 显著水平 Different letters in same column represent significant differences among tail liquid treatments at the same  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration at the 0.05 level.

加尾液处理的小白菜根长抑制作用越强。在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下尾液本身同样会抑制根的伸长, 且尾液浓度越高抑制作用越强。在 2.5 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 随尾液浓度的增加, 根长同样一直下降, 除 0.05 g/L 处理外其它处理均与不添加处理达到差异显著性水平。在 5、10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 与不添加处理相比, 除 0.05 g/L 处理根长分别增加 13.10% 和 8.07% 外, 其余尾液处理均显著抑制小白菜根的伸长。

### 2.3 脱盐味精尾液对 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫下小白菜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的上升, 0 g/L 尾液处理叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 活性呈现先上升后下降的趋势, 在 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下的 SOD 活性为对照条件 (0 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 下的 78.50%, 显著抑制了 SOD 的活性。在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 与不添加尾液处理相比, 随着尾液浓度的上升, SOD 活性呈现先升后降的趋势, SOD 活性最高的 0.1 g/L 处理显著上升 34.17%, 而最低的 0.8 g/L 处理下降 10.01%。在 2.5、5、10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫下, 小白菜叶片 SOD 活性随尾液浓度增加均呈现先上升后下降的趋势, 以 0.1 g/L 尾液效果最好。

随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的上升, 0 g/L 尾液处理叶片过氧化物酶 (POD) 活性呈现先上升后下降的趋势。

在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 与不添加尾液处理相比, POD 活性呈现“持平-上升-下降”的趋势, 以 0.2 g/L 处理活性最高, 显著增加 43.66%。在 2.5、5、10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 各浓度尾液能促进或保持 POD 活性, 以 0.05 g/L 或 0.1 g/L 尾液添加效果最好 (表 3)。

随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的上升, 0 g/L 尾液处理叶片 CAT 活性呈现先上升后下降的趋势。在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 随尾液浓度的增加, 各处理小白菜叶片 CAT 活性也呈现先上升后下降的趋势, 均高于 0 g/L 处理。在 2.5、5、10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 各尾液处理均能提高或保持小白菜叶片 CAT 活性, 0.8 g/L 尾液对提高小白菜叶片 CAT 活性的效果最好 (表 3)。

### 2.4 脱盐味精尾液对 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫下小白菜幼苗叶片活性氧和丙二醛 (MDA) 含量的影响

高浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  会显著提高无尾液处理叶片的活性氧 ( $\text{O}_2^-$ ) 产生速率。与对照相比, 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下产生速率提高 58.71%。在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 与无尾液处理相比,  $\text{O}_2^-$  产生速率呈现先下降后上升的趋势, 0.05 g/L 处理的产生速率下降 10.74%, 而 0.2~0.8 g/L 处理增幅达 38.32%~69.99%。在 2.5、5、10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下, 0.05~0.2 g/L 尾液会使小白菜叶片  $\text{O}_2^-$  产生速率下降; 而高浓度尤其是 0.8 g/L 尾液则会加快或保持  $\text{O}_2^-$  产生速率

表 3 不同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下脱盐味精尾液对小白菜叶片抗氧化酶活性的影响  
 Table 3 Activities of antioxidative enzymes in pakchoi leaves under different  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentrations and tail liquid addition levels

指标 Index	尾液用量 (g/L) Tail liquid addition	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ 水平 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ level (mmol/L)			
		0	2.5	5	10
SOD 活性 (U/g, FW) SOD activity	0	367.76 bc	426.03 b	428.70 b	288.70 c
	0.05	415.32 abc	467.99 ab	477.55 a	384.22 ab
	0.1	493.42 a	549.08 a	467.30 ab	433.97 a
	0.2	481.14 a	515.31 ab	466.06 ab	349.39 bc
	0.4	437.26 ab	430.34 b	378.21 d	334.88 bc
	0.8	330.97 c	441.21 b	385.73 cd	292.40 c
POD 活性 [U/(g·min), FW] POD activity	0	2413.70 bc	2702.18 c	3431.99 b	2241.49 ab
	0.05	2617.69 bc	2828.66 c	3788.31 ab	3100.30 a
	0.1	2297.14 c	4763.32 a	3876.38 ab	1966.10 b
	0.2	3467.48 a	3669.90 bc	3424.33 b	1939.55 b
	0.4	2993.72 ab	3940.92 ab	4291.21 ab	1397.80 b
	0.8	2699.47 bc	3178.32 bc	4411.82 a	1700.48 b
CAT 活性 [U/(g·min), FW] CAT activity	0	231.27 d	696.41 b	207.47 d	383.34 d
	0.05	601.72 bc	757.77 ab	528.67 c	694.74 bc
	0.1	738.48 ab	614.26 b	705.78 bc	437.87 d
	0.2	858.80 a	847.21 ab	945.21 ab	608.94 c
	0.4	700.68 ab	710.33 b	916.44 ab	839.32 b
	0.8	423.22 cd	1111.70 a	1037.28 a	1004.93 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一指标相同  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下不同尾液加入量处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters in same column represent significant differences among tail liquid treatments at the same  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  concentration at the 0.05 level.

(表 4)。随  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的增加, 无尾液处理叶片的 MDA 含量呈现一直上升的趋势, 与对照相比, 在 10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下 MDA 含量显著增加达 54.83%。在 0~10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下, 随尾液浓度增加, 小白菜叶片 MDA 含量均呈现先下降后上升的趋势。在各浓度  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 0.05~0.4 g/L 尾液均能降低小白菜叶片 MDA 含量 (表 4)。

### 2.5 脱盐味精尾液对 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫下小白菜幼苗叶片脯氨酸含量的影响

随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度的上升, 无尾液处理叶片的 Pro 含量呈现“下降-上升-下降”的趋势。在不加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  条件下, 除 0.05 g/L 处理叶片的脯氨酸含量与无尾液处理相比基本持平外, 其它处理均显著增加。在 2.5、5、10 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下, 低浓度 (0.05~0.1 g/L) 尾液脯氨酸含量与不添加处理基本持平, 高浓度 (0.2~0.8 g/L) 尾液会显著增加小白菜叶片脯氨酸含量 (图 5)。

## 3 讨论

### 3.1 脱盐味精尾液对 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 胁迫下小白菜种子萌发的影响

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度越高对小白菜种子萌发的抑制作用越强。在 30 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下胚芽突破种皮后不再伸长, 而胚根则在 20 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下突破种皮后不再伸长。这说明  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对胚根的抑制作用要大于胚芽, 与蔺吉祥等<sup>[18]</sup>和马红媛等<sup>[27]</sup>研究结果一致。试验发现, 有的幼苗在 15 mmol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  环境中即死亡, 说明  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对小白菜幼苗的抑制作用要大于种子。这是因为种子有种皮的保护, 能抵挡一定程度的逆境胁迫<sup>[18]</sup>。

外源物质浸种能够“激活”作物的耐碱能力, 使作物提前适应碱性盐环境, 是提高作物抗碱性的有效手段之一<sup>[28-29]</sup>。在本试验  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度条件下, 以 0.1 g/L 尾液浸种处理种子萌发质量最好, 可明显

表 4 不同 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度下脱盐味精尾液对小白菜叶片 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率和丙二醛 (MDA) 含量的影响  
Table 4 O<sub>2</sub><sup>-</sup> producing rate and MDA content of pakchoi leaves under different Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and tail liquid addition levels

指标 Index	尾液用量 (g/L) Tail liquid addition	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 水平 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> level (mmol/L)			
		0	2.5	5	10
O <sub>2</sub> <sup>-</sup> 产生速率 O <sub>2</sub> <sup>-</sup> producing rate [mol/(g·min), FW]	0	0.30 bc	0.28 ab	0.42 a	0.48 a
	0.05	0.27 c	0.18 b	0.36 b	0.43 ab
	0.1	0.34 abc	0.20 b	0.26 c	0.34 b
	0.2	0.52 a	0.18 b	0.26 c	0.42 ab
	0.4	0.42 abc	0.27 ab	0.40 ab	0.53 a
	0.8	0.48 ab	0.38 a	0.42 a	0.52 a
MDA 含量 MDA content (μmol/g, FW)	0	10.70 d	14.63 b	14.95 a	16.57 a
	0.05	6.60e	9.64 cd	13.38 ab	9.96 c
	0.1	11.90 d	8.20 d	12.05 bc	11.62 bc
	0.2	15.11 c	10.15 cd	11.50 bc	10.23 c
	0.4	19.64 b	12.10 bc	9.96 c	14.40 ab
	0.8	25.79 a	22.61 a	11.44 bc	16.14 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一指标相同 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度下不同尾液加入量处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters in same column represent significant differences among tail liquid treatments at the same Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> concentration at the 0.05 level.

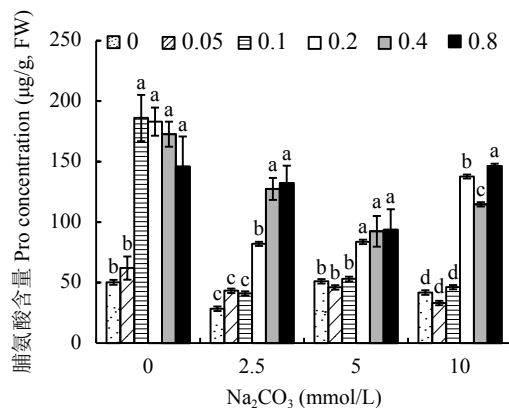


图 5 不同 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度下脱盐味精尾液对小白菜叶片脯氨酸含量的影响

Fig. 5 Proline concentration of pakchoi leaves under different Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and tail liquid addition levels

[注 (Note): 图例表示尾液加入浓度 (g/L); 柱上不同字母表示相同 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浓度下不同尾液添加浓度处理间差异达 0.05 显著水平 Legends represent the treating concentrations of tail liquid (g/L); different letters above the bars are significantly different among tail liquid treatments with the same Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> concentration at the 0.05 level.]

缓解 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 对种子萌发的抑制, 这可能是因为碱性盐会导致渗透胁迫和离子毒害, 造成种子内部蛋白酶等代谢不正常, 而尾液中的氨基酸在浸种过程中可随种子吸水作用进入种子内部, 不仅可以提高种子蛋白酶、淀粉酶的活性, 还可以降低细胞内的渗

透势, 缓解渗透胁迫, 增强种子活力, 从而维持正常的萌发过程<sup>[30-32]</sup>。此外, 种子萌发的代谢强度与细胞质膜的完整性密切相关, 外源氨基酸可以提高种子抗氧化酶活性, 缓解碱性盐胁迫下活性氧累积对细胞质膜的伤害<sup>[33-34]</sup>。而尾液浓度过高 (> 0.4g/L) 则会加剧渗透胁迫对种子的抑制, 同时尾液本身呈酸性并含有一定的盐分, 浓度过高也会造成酸害和盐害, 抑制种子萌发。

### 3.2 脱盐味精尾液对 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下小白菜幼苗生长的影响

研究证明<sup>[35]</sup>, 氨基酸在碱性环境下能被小白菜直接吸收, 可提供碳、氮营养, 参与植株体内的碳、氮转化, 调控代谢循环, 促进作物生长。在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下, 适宜浓度的尾液增强了幼苗的光合作用, 促进了茎的伸展, 增加了幼苗生长量, 从而有效缓解了 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫对小白菜幼苗的伤害。然而, 脱盐味精尾液浓度过高也会影响作物生长。水培试验营养液最佳 pH 为 5.5~6.5<sup>[36-37]</sup>, 但本文所用尾液呈酸性, 浓度过高则使得营养液 pH 下降迅速 (表 1), 阻碍了小白菜幼苗正常生长; 同时, 尾液本身也含有一定浓度的盐, 用量过高也会与 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 一样造成盐害。因此, 在无 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 条件下, 随尾液浓度升高小白菜幼苗生长受到抑制, 幼苗不能正常生长。在不同盐碱胁迫下应使用适宜浓度的尾液。



另外, 脱盐味精尾液可通过抗氧化酶系统降低 MDA 含量和  $O_2^-$  产生速率, 从而减轻膜脂过氧化对植物造成的伤害, 起到缓解小白菜所受  $Na_2CO_3$  胁迫的作用, 这与 Sun 等<sup>[20]</sup>和尤本武等<sup>[21]</sup>研究结果一致。叶是光合作用的主要器官, 盐害会严重破坏植物叶片细胞膜的结构和功能, 进而影响物质积累。 $O_2^-$  和 MDA 是表征细胞膜功能正常与否的重要指标, 两者含量升高均表明细胞膜受损, 导致离子外渗; 此外, MDA 还会引起生物大分子, 如蛋白质、核酸等的交联聚合, 造成代谢紊乱<sup>[2, 38]</sup>。盐害中,  $Na^+$  还破坏叶绿体结构, 引起叶绿素降解, 致使叶绿素含量下降, 并对叶片光系统 II 反应中心造成损伤, 使光合电子传递和 PSII 的光合作用活力被抑制, 从而减弱光合作用, 使得物质和能量积累不足, 抑制植株生长<sup>[2, 39-40]</sup>。但是在不同  $Na_2CO_3$  浓度下, 尾液处理对抗氧化酶的效应表现不一, 在 2.5 mmol/L  $Na_2CO_3$  条件下, 效果最佳的 0.05 g/L 尾液处理能较为均衡地提升三种酶的活性, 而在 5 mmol/L  $Na_2CO_3$  条件下, 效果最好的 0.1 g/L 尾液处理对提高 CAT 活性的作用最为突出, 但在 10 mmol/L  $Na_2CO_3$  条件下, 效果最好的 0.1 g/L 尾液处理叶片 POD 活性反而有所下降 (表 3、表 4)。其原因尚待进一步深入研究。

综上, 脱盐味精尾液之所以能够缓解碱性盐胁迫, 可能是由于尾液本身呈酸性能中和一部分  $Na_2CO_3$  的碱害, 但效果表现最好的尾液处理使营养液 pH 值下降幅度有限 (只有 0.2 左右, 表 1)。所以, 更可能的原因是尾液中甘氨酸、丝氨酸、脯氨酸等多种游离氨基酸共同发挥的作用。该结果也为味精尾液的减量化和资源化利用提供了新途径。目前氨基酸营养的机理研究远远落后于市场应用, 在以后的研究中, 除了确定氨基酸类物质的使用量、使用时期、使用方法外, 还应进一步明确其中各成分发挥的作用以及各成分之间可能存在的协同、拮抗作用, 为氨基酸的进一步开发、利用提供依据。

## 4 结论

1) 适宜浓度的脱盐味精尾液能够明显缓解  $Na_2CO_3$  (10~30 mmol/L) 对小白菜种子萌发的抑制作用, 提高小白菜种子的发芽势、胚根长和胚芽长, 以 0.1 g/L 尾液用量效果最好, 发芽率较清水对照提高 6.56%~72.73%。

2) 适宜浓度的脱盐味精尾液能够通过提高叶片抗氧化酶活性, 缓解  $O_2^-$  产生速率过快和 MDA 含量过高对幼苗造成的伤害, 增强叶片光合作用, 促进小白菜幼苗生长, 从而缓解  $Na_2CO_3$  (2.5~10 mmol/L)

对小白菜幼苗生长的抑制作用, 其中以 0.05~0.1 g/L 尾液用量的效果最好。

## 参 考 文 献:

- [1] Rehman H U, Nawaz Q, Basra S M, *et al.* Seed priming influence on early crop growth, phenological development and yield performance of linola (*Linum usitatissimum* L.)[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(5): 990-996.
- [2] 王俭珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5565-5577.  
Wang Q Z, Liu Q, Gao Y N, *et al.* Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [3] Finch-Savage W E. Influence of seed quality on crop establishment, growth, and yield[M]. Food Products Press, 1994. 363-385.
- [4] Parihar P, Singh S, Singh R, *et al.* Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015, 22(6): 4056-4075.
- [5] Schiop S T, Al H M, Sestras A F, *et al.* Identification of salt stress biomarkers in Romanian Carpathian populations of *Picea abies* (L.) Karst[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8): 980-981.
- [6] Tang C, Adams H, Longnecker N E, *et al.* A method to identify lupin species tolerant of alkaline soils[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1996, 36: 595-601.
- [7] Senguttuvel P, Raju N S, Padmavathi G, *et al.* Identification and quantification of salinity tolerance through salt stress indices and variability studies in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Sabrao Journal of Breeding & Genetics*, 2016, 48(2): 172-179.
- [8] Yi Z, Li Z, Hu X H. Exogenous spermidine-induced changes at physiological and biochemical parameters levels in tomato seedling grown in saline-alkaline condition[J]. *Botanical Studies*, 2014, 55(1): 1-8.
- [9] 陈清, 陈宏坤. 水溶性肥料生产与施用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015. 56-61.  
Chen Q, Chen H K. Water soluble fertilizer production and application[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2015. 56-61.
- [10] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 1-7.  
Zhao B Q. Modification of conventional fertilizers for enhanced property and function[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 1-7.
- [11] Colla G, Nardi S, Cardarelli M, *et al.* Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 196: 28-38.
- [12] Calvo P, Nelson L, Kloepper J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. *Plant & Soil*, 2014, 383(10): 3-41.
- [13] Ertani A, Schiavon M, Muscolo A, *et al.* Alfalfa plant-derived biostimulant stimulate short-term growth of salt stressed *Zea mays* L. plants[J]. *Plant & Soil*, 2013, 364(3): 145-158.
- [14] Lucini L, Rouphael Y, Cardarelli M, *et al.* The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce grown under saline conditions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 182(2): 124-133.
- [15] Mostafa G G. Improving the growth of fennel plant grown under salinity stress using some biostimulants[J]. *American Journal of Plant Physiology*, 1973, 10(2): 77-83.

- [16] Gupta U C, Kening W U, Liang S. Micronutrients in soils, crops, and livestock[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(5): 110–125.
- [17] Liu J, Guo W Q, Shi D C. Seed germination, seedling survival, and physiological response of sunflowers under saline and alkaline conditions[J]. *Photosynthetica*, 2010, 48(2): 278–286.
- [18] 蔺吉祥, 李晓宇, 唐佳红, 等. 盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  代谢的影响[J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(6): 1148–1152.  
Lin J X, Li X Y, Tang J H, *et al.* Effects of salt and alkali stresses on seed germination, early seedling growth and the metabolize of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  in shoot of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(6): 1148–1152.
- [19] 魏博娴. 中国盐碱土的分布与成因分析[J]. *水土保持应用技术*, 2012, 32(6): 27–28.  
Wei B X. Distribution and genetic analysis of saline-alkali soil in China[J]. *Application Technology of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(6): 27–28.
- [20] Sun Y L, Hong S K. Exogenous proline mitigates the detrimental effects of saline and alkaline stresses in *Leymus chinensis* (Trin.)[J]. *Journal of Plant Biotechnology*, 2010, 37(4): 529–538.
- [21] 尤本武, 董建江, 刘紫薇, 等.  $\beta$ -氨基丁酸诱导烟草抗碱初步研究[J]. *中国烟草学报*, 2017, 23(1): 86–94.  
You B W, Dong J J, Liu Z W, *et al.* Preliminary study on  $\beta$ -BABA-induced resistance to alkaline stress in tobacco[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2017, 23(1): 86–94.
- [22] Sudadi S, Suryono S. Exogenous application of tryptophan and indole acetic acid (IAA) to induce root nodule formation and increase soybean yield in acid, neutral and alkaline soil[J]. *Agrivita*, 2015, 37(1): 37–44.
- [23] 张健. 氨基酸发酵尾液对水溶肥料的增效作用与机理研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2017.  
Zhang J. Study on synergistic effect and mechanism of amino acid fermentation tail liquid on water soluble fertilizer[D]. Tai'an, Shandong: MS Thesis of Shandong Agricultural University, 2017.
- [24] 李合生, 孙群, 赵世杰. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.  
Li H S, Sun Q, Zhao S J. The experiment principle and technique on plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [25] 刘萍, 李明军. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
Liu P, Li M J. Plant physiology experiment guide[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [26] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.  
Zhao S J, Shi G A, Dong X C. Plant physiology experiment guide[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.
- [27] 马红媛, 梁正伟, 黄立华, 等. 4种多年生禾本科牧草种子萌发对  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4): 766–771.  
Ma H Y, Liang Z W, Huang L H, *et al.* Germination characteristics of four perennial grasses (Poaceae) seeds in responses to sodium carbonate stress[J]. *Journal of Agriculture Environment Science*, 2009, 28(4): 766–771.
- [28] Zhang Y, Hu X H, Shi Y, *et al.* Beneficial role of exogenous spermidine on nitrogen metabolism in tomato seedlings exposed to saline-alkaline stress[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2013, 138(1): 38–49.
- [29] Hu X, Zhang Y, Shi Y, *et al.* Effect of exogenous spermidine on polyamine content and metabolism in tomato exposed to salinity-alkalinity mixed stress[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2012, 57(8): 200–209.
- [30] 安华燕. 有机碳营养浸种剂的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学硕士学位论文, 2016.  
An H Y. The research of the  $\text{C}_2$ - $\text{C}_4$  organic acids and alcohols for seed priming[D]. Hefei: MS Thesis of Hefei University of Technology, 2016.
- [31] Müntz K, Belozersky M A, Dunaevsky Y E, *et al.* Stored proteinases and the initiation of storage protein mobilization in seeds during germination and seedling growth[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(20): 1741–1752.
- [32] Sheng Y D, Xiao H Y, Guo C L, *et al.* Effects of exogenous gamma-aminobutyric acid on  $\alpha$ -amylase activity in the aleurone of barley seeds[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2018, 127(6): 39–96.
- [33] Tan L, Chen S, Wang T, *et al.* Proteomic insights into seed germination in response to environmental factors[J]. *Proteomics*, 2013, 13(12–13): 1850–1870.
- [34] 赵艳艳, 胡晓辉, 邹志荣, 等. 不同浓度5-氨基乙酰丙酸(ALA)浸种对NaCl胁迫下番茄种子发芽率及芽苗生长的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 62–70.  
Zhao Y Y, Hu X H, Zou Z R, *et al.* Effects of seed soaking with different concentrations of 5-aminolevulinic acid on the germination of tomato (*Solanum lycopersicum*) seeds under NaCl stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 62–70.
- [35] Ma Q X, Cao X C, Xie Y N, *et al.* Effect of pH on the uptake and metabolism of glycine in pakchoi (*Brassica chinensis* L.)[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2017, 133(2): 139–150.
- [36] Pardossi A, Incrocci L, Salas M C, *et al.* Managing mineral nutrition in soilless culture[A]. Orsini F, Dubbeling M, de Zeeuw H, Gianquinto G. Rooftop urban agriculture[M]. Springer, 2017. 325–326.
- [37] 马庆旭, 吴良欢, 曹小闯, 等. 营养液pH和氮形态对小白菜生长、氮素吸收及品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 64–68, 177.  
Ma Q X, Wu L H, Cao X C, *et al.* Effect of pH and nitrogen forms of hydroponic nutrient solution on the growth, nitrogen absorption and edible quality of pakchoi (*Brassica chinensis* L.)[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 64–68, 177.
- [38] 刘卫国, 丁俊祥, 邹杰, 等. NaCl对齿肋赤藓叶肉细胞超微结构的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3556–3563.  
Liu W G, Ding J X, Zou J, *et al.* Ultrastructural responses of *Syntrichia caninervis* to a gradient of NaCl stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3556–3563.
- [39] Kalaji H M, Jajoo A, Oukarroum A, *et al.* Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, 38(4): 102.
- [40] Wang H M, Wang W J, Wang H Z, *et al.* Effect of inland salt-alkaline stress on  $\text{C}_4$ , enzymes, pigments, antioxidant enzymes, and photosynthesis in leaf, bark and branch chlorenchyma of poplars[J]. *Photosynthetica*, 2013, 51(1): 115–126.