

氨基酸肥料和鼠李糖脂配施对 番茄耐盐性和产量的影响

户可欣¹,高钦遥¹,许世奇¹,何彦臻¹,王旭东^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要:以中度盐渍土为试验土壤,以普罗旺斯番茄品种为试验材料,探索了不同配比氨基酸肥料和鼠李糖脂对番茄生长发育、耐盐性和产量的影响。结果表明:在中度盐渍化土壤常规施肥(氮磷钾复合肥 N:P₂O₅:K₂O=20:10:15 基施,高钾复合肥 N:P₂O₅:K₂O=10:5:25 追施)条件下,氨基酸肥料单施(灌施氨基酸肥料 300 L·hm⁻²)显著提高了番茄脯氨酸含量,较常规施肥提高 13.9%。氨基酸肥料配施 24 L·hm⁻² 鼠李糖脂处理可进一步提高番茄耐盐性和降低细胞氧化损伤,与氨基酸肥料单施相比,该处理下过氧化物酶活性和脯氨酸含量分别显著增加 31.4%和 20.6%,叶片超氧阴离子(O₂⁻)产生速率、丙二醛含量和 Na⁺/K⁺ 分别显著降低 23.8%、26.6%和 43.0%。同时,氨基酸肥料配施 24 L·hm⁻² 鼠李糖脂处理的番茄产量、可溶性糖和 Vc 含量最高,较氨基酸肥料单施处理分别显著增加 38.5%、14.2%和 18.2%。总体来看,以 300 L·hm⁻² 氨基酸肥料配施 24 L·hm⁻² 鼠李糖脂效果最佳,可有效缓解盐胁迫对细胞膜的损伤,提高叶片渗透调节能力和光合作用,增强番茄的耐盐性,实现产量和品质协同提升。

关键词:番茄;氨基酸肥料;鼠李糖脂;耐盐性;产量

中图分类号:S641.2; S606⁺.2 文献标志码:A

Effects of amino acid fertilizer and rhamnolipid on salt tolerance and yield of tomato

HU Kexin¹, GAO Yiyao¹, XU Shiqi¹, HE Yanzhen¹, WANG Xudong^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Moderately saline soil was used as the test soil and Provence tomato varieties were used as the test materials to explore the effects of different ratios of amino acid fertilizer and rhamnolipid on the growth and development, salt tolerance and yield of tomato. The results showed that under the condition of conventional fertilization in moderately saline soil (nitrogen phosphorus potassium compound fertilizer N:P₂O₅:K₂O=20:10:15 basal application, high potassium compound fertilizer N:P₂O₅:K₂O=10:5:25 follow-up application), the application of amino acid fertilizer alone (irrigation of 300 L·hm⁻² amino acid fertilizer) significantly increased tomato proline content, with a 13.9% increase compared to CF. The combination of amino acid fertilizer and 24 L·hm⁻² rhamnolipid treatment could further improve tomato salt tolerance and reduce cell oxidative damage, compared with the application of amino acid fertilizer alone, this treatment significantly increased peroxidase activity and proline content by 31.4% and 20.6%, respectively, and the rate of superoxide anion (O₂⁻) production, malondialdehyde content, and Na⁺/K⁺ in leaves were significantly reduced by 23.8%, 26.6%, and 43.0%, respectively. Meanwhile, amino acid fertilizer applied with 24 L·hm⁻² rhamnolipid treatment had the highest tomato yield, soluble sugar and Vc content, which increased by 38.5%, 14.2%, and 18.2%, respectively, compared with amino acid fertilizer applied

alone treatment. Overall, 300 L · hm⁻² amino acid fertilizer with 24 L · hm⁻² rhamnolipid has the best effect, which can effectively alleviate the damage of salt stress on the cell membrane, improve the osmotic regulating ability and leaf photosynthesis, and then enhance the salt tolerance of tomato to achieve a synergistic enhancement of yield and quality.

Keywords: tomato; amino acid fertilizer; rhamnolipid; salinity tolerance; yield

受气候变化和人类活动的影响,全球土壤盐渍化现象呈加剧趋势,土地生产力降低。据报道,预计到 2050 年,全球 50% 的可耕地都可能受到盐渍化的影响^[1]。盐渍土中高浓度的盐离子会降低植物的光合效率和养分吸收能力,导致植物生理代谢紊乱,影响植物生长发育,从而使农作物产量降低^[2]。盐胁迫下植物通常会受到渗透胁迫、离子毒性和氧化胁迫。渗透胁迫会降低植物根系吸水能力,导致内部脱水,诱发“生理干旱”,阻碍其生长发育^[3]。离子毒性干扰植物生理和代谢过程,影响植物离子吸收和光合作用,阻碍蛋白质合成^[4]。此外,盐胁迫打破了活性氧(ROS)产生与清除之间的平衡,使其在植物细胞中过量积累,进而导致膜脂过氧化反应,甚至引起细胞膜系统的降解^[5]。虽然植物可通过上调酶或非酶清除系统,促进次生代谢物积累和离子分配等来缓解盐胁迫,但植物自身调节能力有限。因此,开发新型肥料或调节剂进一步提高植物在盐胁迫方面的调节能力,提高植物耐盐性,对盐渍土的开发利用以及作物产量和品质提高具有重要意义^[6]。

国内外一些研究表明,氨基酸肥料施入土壤后,不仅能促进根系养分吸收,还可增强作物抗性,提高果实品质^[7]。许猛等^[8]发现盐胁迫下氨基酸肥料浸种可提高小白菜种子蛋白酶和淀粉酶活性,维持幼苗叶片脯氨酸含量和提高抗氧化酶活性,进而促进种子萌发和幼苗耐盐性。谢荔等^[9]试验证明,叶面喷施混合氨基酸肥料能够提高葡萄叶片的光化学 PSII 系统作用,增强叶片光合作用,降低葡萄可滴定酸含量和浆果可溶性糖含量。鼠李糖脂是一种表面活性剂,具有抗菌性、无毒性和良好的水溶性,已在环境修复和农业中有所应用^[10]。近年来有研究发现,鼠李糖脂可降低细胞表面张力,促进植物对养分的吸收,其本身可作为碳源为土壤微

生物增殖提供物质基础,调整植物根系结构和形态以缓解逆境^[11]。课题组前期研究发现,鼠李糖脂可提高盐胁迫下番茄植株的光合作用和抗氧化防御能力,进而提高番茄产量和耐盐性^[12]。但氨基酸肥料和鼠李糖脂配施在提高植物耐盐性方面研究还少见报道,有必要对其进行深入研究。

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)是中国西北地区广泛种植的经济作物,同时也是植物研究的模式物种。2021 年我国设施番茄栽培面积达 111.3 × 10⁴ hm²^[13]。由于设施环境比较密闭,过量施用化肥以及不合理的栽培和灌溉措施极易引起土壤板结及次生盐渍化现象,导致微生物群落结构失衡,养分供给不足,土壤生产力降低^[14]。土壤盐渍化已成为番茄设施栽培及优质高产的限制因素之一。因此,本研究以普罗旺斯番茄品种为试验材料,探索了在中度盐渍土条件下不同配比氨基酸肥料和鼠李糖脂对番茄产量、品质和耐盐性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试番茄品种为普罗旺斯,采购于杨凌种苗育苗中心。氨基酸液体肥购买于陕西博秦生物工程有限公司,氨基酸含量为 105 g · L⁻¹,以丙氨酸、甘氨酸和赖氨酸为主;微量元素(铁锰铜锌)含量为 23 g · L⁻¹,pH 值为 5.5。鼠李糖脂溶液浓度为 200 g · L⁻¹,pH 值为 7,购买于陕西德冠生物科技有限公司。

1.2 研究区概况

该试验于 2022 年 12 月至 2023 年 6 月在陕西省渭南市大荔县沙苑农场(109°83'E, 34°69'N)进行,试验地面积为 0.73 hm²,供试土壤为轻壤土,依据盐碱地农业利用土壤分级分类标准,该地属中度盐渍化土壤^[15]。土壤基础性质见表 1。

表 1 试验区土壤基础指标

Table 1 Soil base indicators in the test area

pH	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkalihydrolysable nitrogen/(g · kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg · kg ⁻¹)	盐分 Salinity /(g · kg ⁻¹)
8.4	10.28	0.49	55.87	15.59	138.75	3.9

1.3 试验设计

本试验共设置 8 个处理:1.不施化肥(CK);2.常规施肥(CF);3.常规施肥+氨基酸肥料(CFA);4.常规施肥+鼠李糖脂(CFR);5.常规施肥+氨基酸肥料+鼠李糖脂,氨基酸肥料与鼠李糖脂配施比例为 50:1(CFAR1);6.常规施肥+氨基酸肥料+鼠李糖脂,氨基酸肥料与鼠李糖脂配施比例为 50:2(CFAR2);7.常规施肥+氨基酸肥料+鼠李糖脂,氨基酸肥料与鼠李糖脂配施比例为 50:4(CFAR3);8.常规施肥+氨基酸肥料+鼠李糖脂,氨基酸肥料与鼠李糖脂配施比例为 50:5(CFAR4)。各处理具体内容见表 2。供试番茄品种为普罗旺斯,小区种植面积为 66 m²(6.6 m×10 m),番茄定植株行距为 35 cm×50 cm,定植密度为 57 000 株·hm⁻²。每个处理设置 3 次重复。

施肥方式采用滴灌施肥,滴灌灌水量每次为 250~270 m³·hm⁻²。处理中氮磷钾复合肥(N:P₂O₅:K₂O=20:10:15)于 2022 年 12 月 7 日施基肥,高钾复合肥(N:P₂O₅:K₂O=10:5:25)分别于 2023 年 2 月 15 日、3 月 15 日、4 月 15 日和 5 月 15 日进行追施。氨基酸肥料和鼠李糖脂分别在第一、二、三和四穗果膨大期随水灌施。

1.4 测定指标

在第一穗果坐果期,通过称量植株的地上部来测定植株鲜质量。结果以每棵植株的克数表示。在果成熟期,采收第一、二、三和四穗果成熟果实,统计整个收获期番茄产量。

在第一穗果坐果期测定叶片生理指标。利用 TYS-4N 叶绿素计(北京金科利达电子科技有限公司)测定叶绿素含量,利用 Li-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定净光合速率和蒸腾速率。叶片过氧化物酶活性(POD)采用愈创木酚法测定,酶活性单位以样品鲜质量为基准;丙二醛含量

(MDA)采用硫代巴比妥酸法测定;超氧阴离子(O₂⁻)产生速率采用硝基蓝四氮唑(NBT)比色法测定;脯氨酸含量采用磺基水杨酸比色法^[16]测定;叶片中钠钾离子采用 HNO₃和 HClO₄混合液(V:V,4:1)消煮,原子吸收分光光度计法^[15]测定。

在第一穗果成熟期测定番茄品质。可溶性糖采用硫酸-蒽酮比色法^[16]测定;维生素 C 含量采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[16]测定。

1.5 数据分析

采用 Excel 和 SPSS(IBM,SPSS 24)软件进行数据处理和分析,差异性检验采用单因素方差分析和最小显著性差异检验,P<0.05 为显著性差异,采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

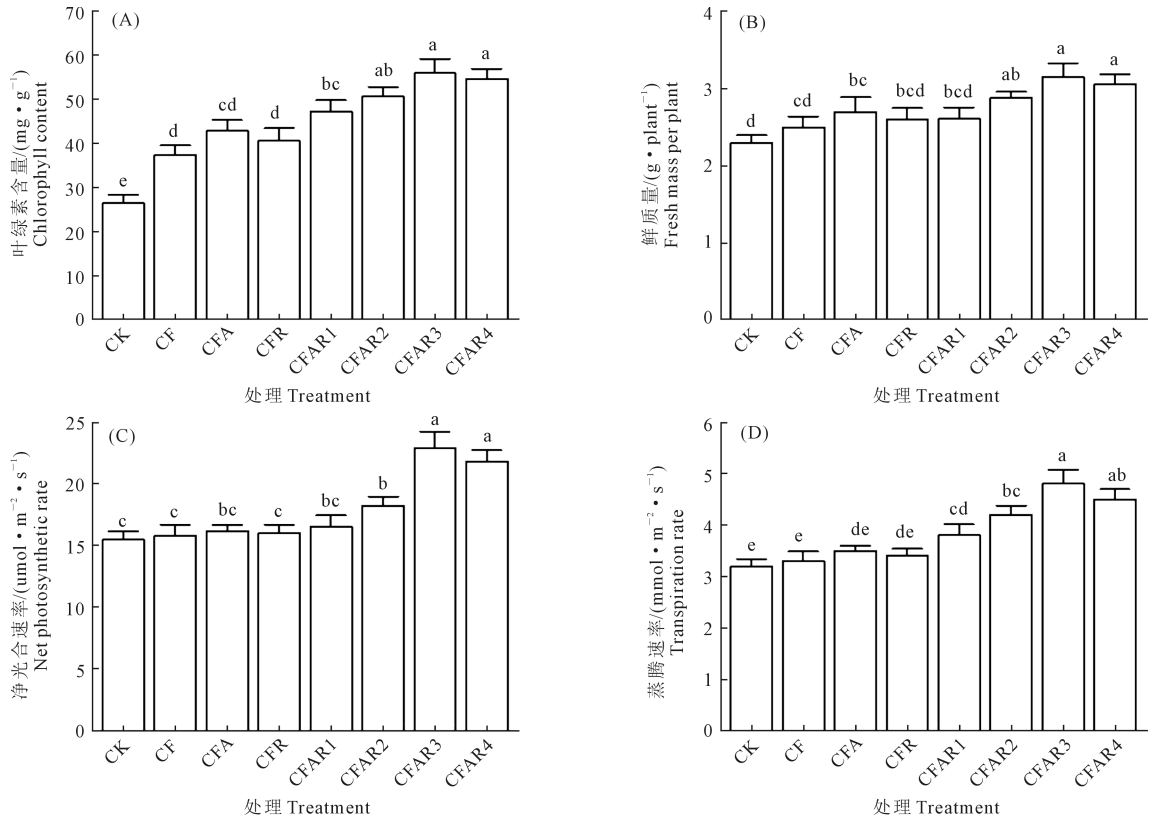
2.1 氨基酸肥料与鼠李糖脂对盐渍化土壤番茄生长和光合特性的影响

从图 1 可以看出,与常规施肥相比,单一施用氨基酸肥料和鼠李糖脂对番茄生长和光合特性无显著影响。与单一施用氨基酸肥料和鼠李糖脂相比,二者配施均提高了植株鲜质量、叶绿素含量、净光合速率和蒸腾速率,且均以 CFAR3 处理最佳。其中,CFAR3 处理较 CFA 和 CFR 处理分别显著提高番茄植株鲜质量 30.6% 和 37.7%;不同配比间,CFAR2、CFAR3 及 CFAR4 处理间无显著差异,CFAR3 和 CFAR4 较 CFAR1 处理分别显著提高植株鲜质量 18.7% 和 15.9%。与 CFA、CFR 及 CFAR1 处理相比,CFAR3 处理叶绿素含量分别显著增加 16.7%、21.2%、20.7%。与 CFA 和 CFR 处理相比,CFAR3 和 CFAR4 显著提高了叶片净光合速率和蒸腾速率,均以 CFAR3 处理最高,净光合速率分别提高了 41.4% 和 43.1%,蒸腾速率分别提高了 37.1% 和 41.2%。

表 2 各处理肥料投入量

Table 2 Fertilizer inputs in each treatment

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer		氨基酸肥料+鼠李糖脂 Amino acid fertilizer + rhamnolipid		配比 Ratio
	氮磷钾复合肥基肥 NPK compound fertilizer base fertilizer/(kg·hm ⁻²)	高钾复合肥追肥 High K compound fertilizer topdressing/(kg·hm ⁻²)	氨基酸肥料 Amino acid fertilizer /(L·hm ⁻²)	鼠李糖脂 Rhamnolipid /(L·hm ⁻²)	
CK	0	0	0	0	
CF	750	150	0	0	
CFA	750	150	300	0	
CFR	750	150	0	6	
CFAR1	750	150	300	6	50:1
CFAR2	750	150	300	12	50:2
CFAR3	750	150	300	24	50:4
CFAR4	750	150	300	30	50:5



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ under different treatments. The same below.

图 1 氨基酸肥料和鼠李糖脂对番茄生物量和光合特性的影响

Fig.1 Effects of amino acid fertilizer and rhamnolipid on tomato biomass and photosynthetic characteristics

2.2 氨基酸肥料与鼠李糖脂对盐渍化土壤番茄叶片细胞氧化损伤的影响

MDA 和 O_2^- 过量积累会导致细胞结构和功能的破坏,通常可反映细胞膜受到的氧化伤害程度。氨基酸肥料与鼠李糖脂配施可缓解番茄叶片细胞氧化损伤。如图 2 所示,与单一施用氨基酸肥料和鼠李糖脂相比,二者配施均显著降低了叶片中 MDA 含量。其中,CFAR1、CFAR2、CFAR3 和 CFAR4 处理中 MDA 含量较 CFA 处理分别降低了 15.2%、24.1%、26.6%和 25.3%。单施氨基酸肥料和鼠李糖脂处理间 O_2^- 产生速率无显著差异,氨基酸肥料与鼠李糖脂配施配施处理中,CFAR2、CFAR3 和 CFAR4 处理可进一步降低 O_2^- 产生速率,其中以 CFAR3 处理最低,较 CFA 显著降低 26.6%;不同配比间,CFAR3 和 CFAR4 处理较 CFAR1 处理显著降低 O_2^- 产生速率,降幅均为 20%。

2.3 氨基酸肥料与鼠李糖脂对盐渍化土壤番茄耐盐性的影响

由图 3 可以看出,与 CF 处理相比,CFA 处理中脯氨酸含量显著提高 14.0%,但 POD 活性和 Na^+/K^+

无显著影响。与单施氨基酸肥料和鼠李糖脂相比,二者配施在不同程度上提高了 POD 活性和脯氨酸含量,其中,CFAR3 处理较 CFA 和 CFR 处理分别显著提高了 31.4%、38.8% (POD 活性) 和 20.6%、25.8% (脯氨酸含量);配施处理中,CFAR3 和 CFAR4 处理 POD 活性和脯氨酸含量较 CFAR1 处理均显著提高。CFAR2、CFAR3 和 CFAR4 处理可显著降低番茄叶片中 Na^+/K^+ ,其中以 CFAR3 处理最低,与 CFA 和 CFR 处理相比分别降低 43.0% 和 42.4%,配施处理中,CFAR2、CFAR3 和 CFAR4 处理较 CFAR1 处理显著降低 25.1%、45.6%和 32.6%。

2.4 氨基酸肥料与鼠李糖脂对盐渍化土壤番茄根系养分含量的影响

由图 4 可知,单一施用氨基酸肥料和鼠李糖脂处理的根系全氮含量与二者配施无显著差异。CFAR3 处理全磷含量较 CFR 处理显著提高 17.0%,但其他配施处理全磷含量与单施处理间无显著差异。与 CFA 和 CFR 处理相比,CFAR3 处理显著提高了根系全钾含量,增幅分别为 13.9%和 13.6%。氨基酸肥料和鼠李糖脂不同配比处理间全氮、全磷和全钾均无显著差异。

2.5 氨基酸肥料与鼠李糖脂对盐渍化土壤番茄产量和品质的影响

由图 5 可知,与常规施肥相比,单一施用氨基酸肥料和鼠李糖脂处理对番茄产量、果实可溶性糖和 Vc 含量并无显著影响。但二者配施能有效提高番茄产量,与 CFA 和 CFR 处理相比,CFAR2、CFAR3 和 CFAR4 处理的番茄产量显著提高,分别增加了 17.6% 和 24.9%、38.5% 和 47.2%、34.6% 和 43.0%,表明氨基酸肥料和鼠李糖脂配施比单施进一步提高番茄产量;而不同配比处理间,CFAR3 和 CFAR4

处理显著高于 CFAR1 和 CFAR2 处理,以 CFAR3 处理效果最佳。在果实品质上,CFA 和 CFR 处理间可溶性糖和 Vc 含量均无显著差异;而 CFAR3 处理较 CFA 和 CFR 处理显著提高了 14.2% 和 14.6% (果实可溶性糖) 和 18.2% 和 19.5% (Vc 含量)。

2.6 主要生理指标与产量的途径分析

由表 3 可知,鲜质量对番茄产量的直接作用最大,直接作用系数为 0.3420,脯氨酸对番茄产量的直接作用最小,直接作用系数为 0.0240。POD 活性与产量的相关系数为 0.9640,直接途径系数为 -0.0310,

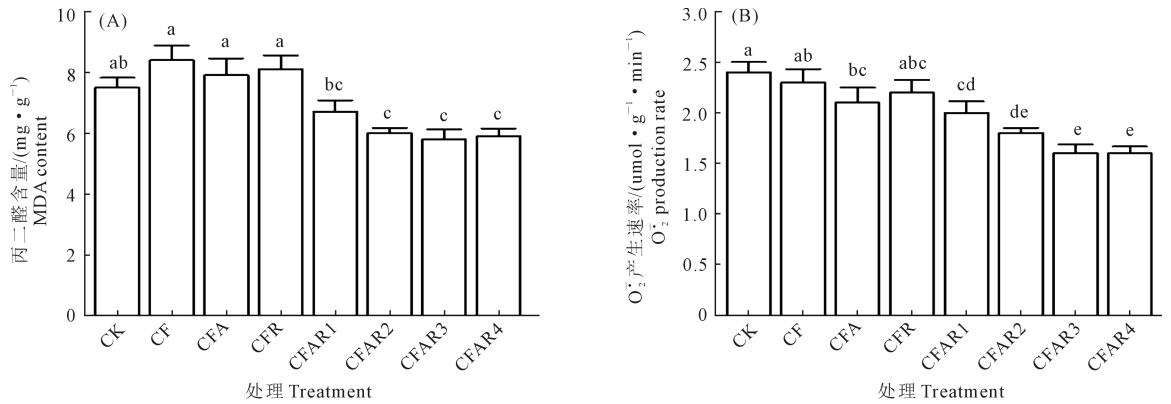


图 2 氨基酸肥料和鼠李糖脂对番茄叶片氧化损伤的影响

Fig.2 Effects of amino acid fertilizer and rhamnolipid on oxidative damage in tomato leaves

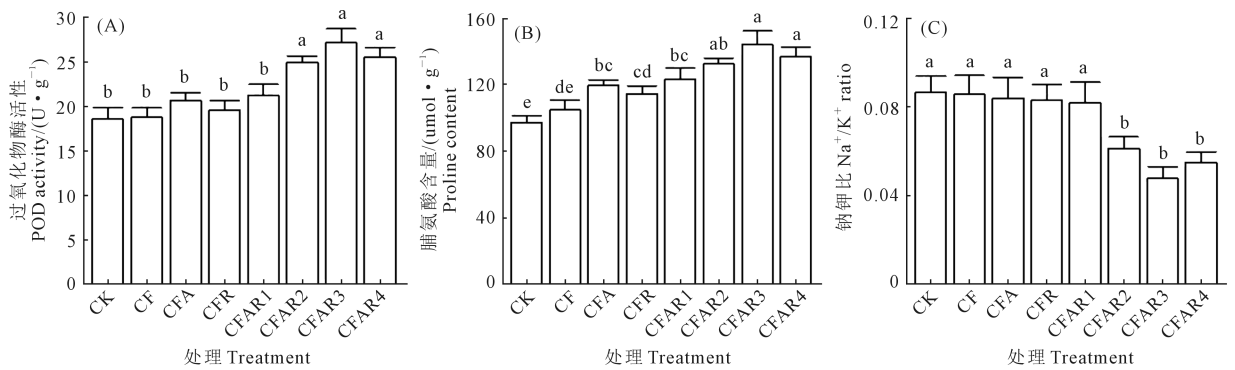


图 3 氨基酸肥料和鼠李糖脂对番茄耐盐性的影响

Fig.3 Effects of amino acid fertilizer and rhamnolipid on salt tolerance of tomato

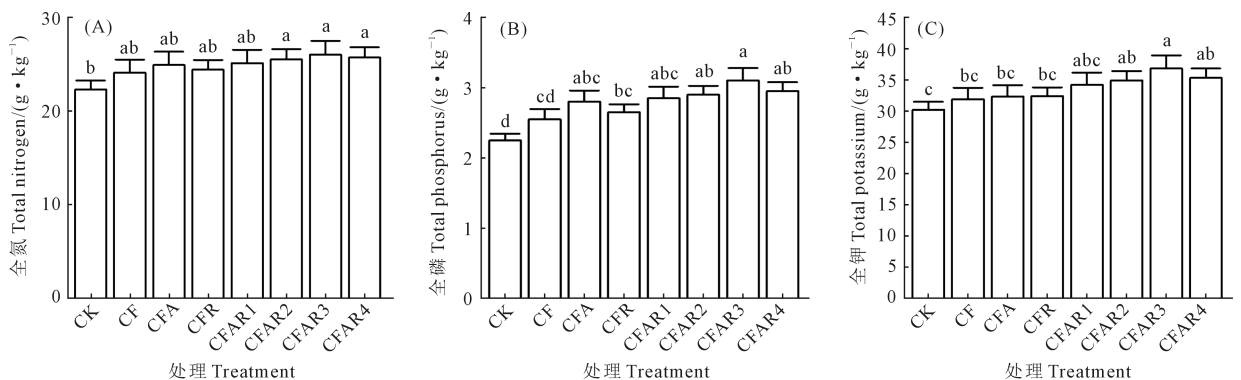


图 4 氨基酸肥料和鼠李糖脂对番茄根系养分含量的影响

Fig.4 Effects of amino acid fertilizer and rhamnolipid on nutrient contents in tomato root

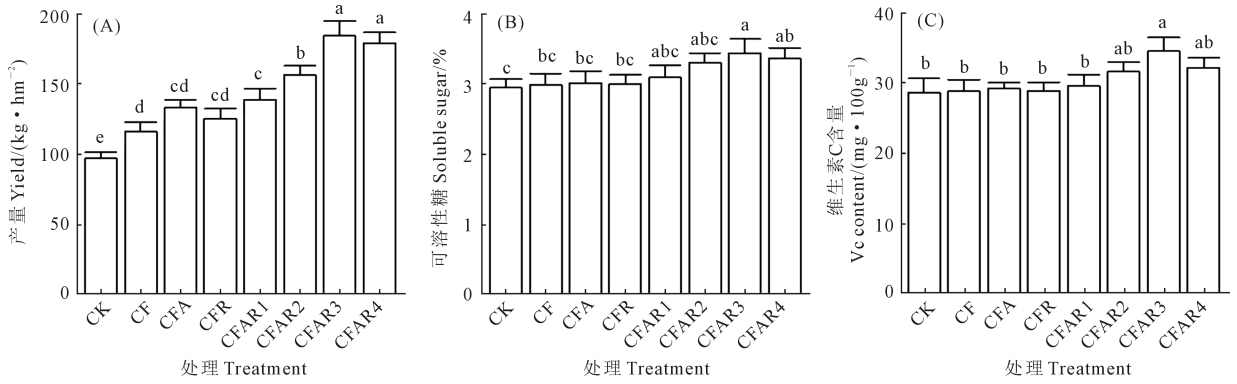


图 5 氨基酸肥料和鼠李糖脂对番茄产量和品质的影响

Fig.5 Effects of amino acid fertilizer and rhamnolipid on yield and quality in tomato

可见,POD 活性对产量的间接影响最大,总间接通径系数为 0.9944,鲜质量对产量的间接贡献最小,总间接通径系数为 0.6277。超氧阴离子、MDA 和钠钾比对产量起到一定负间接作用,总间接通径系数分别为-0.6796、-0.7190 和-0.8923。

3 讨论

ROS 大量积累导致细胞产生脱脂化现象,MDA 是膜脂过氧化的最终产物,两者含量升高均表明细胞膜受损,导致离子外渗^[17]。本研究发现,单一施用氨基酸肥料(CFA)和鼠李糖脂(CFR)均可在不同程度上提高抗氧化酶活性和脯氨酸含量,降低叶片 MDA 和 O₂⁻产生速率,一方面可能是氨基酸肥料施入土壤后,为植物提供了外源赖氨酸,研究证明,赖氨酸是植物遭受胁迫后代谢途径的前体物质,其代谢产物谷氨酸和 α-氨基己二酸半醛可提高番茄抗逆性^[18];另一方面,外源氨基酸可促进脯氨酸的生物合成酶和基因的表达,并提高 POD 活性^[19]。脯氨酸除了作为渗透调节物质,它还能够作为逆境胁迫信号物质,稳定细胞氧化还原过程和保护细胞膜的完整性^[19]。因此,CFA 处理中 MDA 含量和 O₂⁻产生速率降低可归因于氨基酸肥料能够提供赖氨酸,进而诱导抗逆代谢产物合成,并通过提高抗氧化酶活性和渗透调节作用提高植物耐盐能力。许猛等^[8]研究同样表明,外源氨基酸可提高小白菜叶片 POD 活性和脯氨酸含量,缓解氧化损伤,增强小白菜幼苗耐盐性。本研究发现,与常规施肥相比,单一施用鼠李糖脂处理对提高番茄耐盐性也有一定作用,这可能是因为鼠李糖脂作为表面活性剂,可以通过增强细胞膜的通透性来促进酶的释放,并对酶的稳定性具有改善作用^[20-21]。邢芳芳等^[22]认为,鼠李糖脂被植株吸收后,能够促进植株体内部分抗性基因的表达,进而激活植物自身免疫系统,提

表 3 盐胁迫下各生理指标与产量的通径分析

Table 3 Path analysis of various physiological indicators and yield under salt stress

指标 Index	与 Y 的简单相关系数 Correlation coefficients	直接通径系数 DPC	总间接通径系数 TIPC
X ₁	0.9710	0.2650	0.7055
X ₂	0.9340	0.2700	0.6639
X ₃	-0.9020	-0.2220	-0.6796
X ₄	-0.7550	-0.0360	-0.7190
X ₅	0.9810	0.0240	0.9564
X ₆	0.9640	-0.0310	0.9944
X ₇	0.9700	0.3420	0.6277
X ₈	-0.8160	0.0770	-0.8923

注: X₁: 叶绿素; X₂: 净光合速率; X₃: 超氧阴离子; X₄: MDA; X₅: 脯氨酸; X₆: POD 活性; X₇: 鲜质量; X₈: 钠钾比; Y: 产量。

Note: X₁: Chlorophyll content; X₂: Net photosynthetic rate; X₃: O₂⁻ production rate; X₄: MDA; X₅: Proline content; X₆: POD activity; X₇: Fresh weight; X₈: Na⁺/K⁺; Y: Yield.

高抗逆性。单一施用改良剂处理中以氨基酸肥料对番茄耐盐性的影响效果最好,而氨基酸肥料和鼠李糖脂配施进一步缓解了盐分对番茄的伤害程度,且不同配比中以 CFAR3 处理效果最佳。这可能是因为二者施入土壤后,鼠李糖脂发挥表面活性剂的作用,增强了根系细胞膜的通透性,进而促进根系对氨基酸的吸收。

在盐胁迫下,高浓度的 Na⁺在植物细胞中积累,最终达到毒性水平,导致离子稳态被破坏。K⁺在盐胁迫下起着非常关键的作用,植株中 K⁺含量与耐盐性之间存在很强的正相关性^[23]。因此,调节植物 Na⁺/K⁺平衡是提高其耐受盐胁迫的关键策略之一^[24]。研究证实,盐胁迫下,Na⁺在植物细胞和组织中过量积累,导致 Na⁺和 K⁺竞争结合位点,从而减少植物对 K⁺的吸收^[25]。本研究发现,施用氨基酸

肥料和鼠李糖脂能够降低番茄叶片中的 Na^+/K^+ , 表明氨基酸肥料和鼠李糖脂处理可以在土壤盐渍化条件下维持离子稳态, 进而缓解离子毒性。Yang 等^[25]提出 Na^+ 的液泡区隔化是降低高盐浓度下植物细胞离子毒性的主要机制, 细胞质中 Na^+ 的减少可防止细胞损伤。因此本研究中叶片 Na^+ 的降低可能是由于某些氨基酸或鼠李糖脂扩大了根系细胞中积累 Na^+ 的液泡, 从而减少了 Na^+ 向叶片的转运。 K^+ 与氨基酸和蛋白质代谢之间关系密切。研究表明, K^+ 可提高硝酸还原酶和氨基转氨酶活性, 对叶片氮代谢有显著影响^[26]。氨基酸肥料可促进氮代谢, 且赖氨酸和 K^+ 在核糖开关中存在离子协同作用^[27], 这可能与氨基酸肥料提高叶片 K^+ 含量有关。鼠李糖脂已被证实能够移除废水中的 Na^+ ^[28]。但目前并没有关于鼠李糖脂如何在盐渍土条件下降低 Na^+ 和增强 K^+ 的详细信息, 需要进一步研究和探索。

本研究表明, 单施氨基酸肥料和鼠李糖脂及二者配合施用均可改善番茄植株光合作用和养分含量。氨基酸肥料中的氨基酸作为有机氮源和碳源可被植物直接吸收利用, 为番茄直接提供生长所需的速效养分^[29]。同时, 外源氨基酸具有生物刺激素的作用, 被植物吸收后, 可调控代谢能力, 提高植株耐盐能力^[8]。许猛等^[30]研究也发现, 外源复合氨基酸肥料增效剂可促进棉花对氮磷钾养分的吸收利用。研究表明, 甘氨酸可以抑制植物冠层衰老和抑制叶绿素分解, 有效促进光合电子的传递^[31], 外源氨基酸肥料不仅提高了番茄对甘氨酸的吸收, 还可通过提高叶片 PS II 反应中心的光化学效率, 使反应中心受体侧的活性得到明显刺激, 进而提高番茄叶片的叶绿素含量和光合能力^[32]。鼠李糖脂本身可以作为碳源, 其疏水基可与有机物和微量元素螯合, 进而提高土壤养分有效性^[33]。另一方面, 鼠李糖脂的亲水基团可通过提高土壤保水性, 降低土壤渗透势, 提高细胞水势, 促进叶绿体片层中捕光 Chl a/b-pro 复合体的合成, 从而提高叶绿体含量^[33-34]。与单一施用氨基酸肥料和鼠李糖脂相比, 氨基酸肥料配施不同浓度鼠李糖脂可进一步提高叶片光合和根系养分含量, 这可能是因为单施处理的施用量较低, 对番茄光合和养分的影响不明显, 而二者联合施用具有叠加效果, 进而对植物产生更大的改善作用。光合作用是提高作物产量的最重要因素之一^[35], 氨基酸肥料和鼠李糖脂单施或配施在不同程度上提高了叶片光合作用, 为番茄产量和品质的提升奠定了基础。本研究发现, 与单施氨基酸肥料相

比, 其与 $24 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 鼠李糖脂配施可显著提高番茄产量, 这也与该处理下根系养分和抗盐能力的提高相呼应。

Vc 和可溶性糖是评价果实品质的主要指标^[36]。曹小艳等^[37]研究发现, 低浓度氨基酸可提高葡萄中可溶性糖和 Vc 含量, 改善葡萄品质。氨基酸肥料和鼠李糖脂能显著增加果实中 Vc 和可溶性糖含量, 这可能是由于糖类(蔗糖、葡萄糖和果糖)是光合产物, 而氨基酸肥料和鼠李糖脂的应用增加了叶片中叶绿素含量, 从而促进果实中可溶性糖的积累^[38]。另外, 研究表明, 在逆境条件下一些合成 Vc 关键酶的表达受到抑制, 从而降低果实中 Vc 含量^[39], 因此, 氨基酸肥料和鼠李糖脂也可能通过促进 Vc 关键酶的表达提高果实品质。

4 结 论

在中度盐渍土壤常规施肥条件下, 氨基酸肥料和鼠李糖脂均能在不同程度上增强番茄耐盐性。单施处理中以氨基酸肥料对番茄生长效果最佳, 氨基酸肥料单施(灌施氨基酸肥料 $300 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$)较常规施肥显著提高 13.9% 的脯氨酸含量。而氨基酸肥料与不同浓度鼠李糖脂配施可进一步改善番茄耐盐性、产量和品质, 其中, 以 $300 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氨基酸肥料配施 $24 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 鼠李糖脂 (50 : 4) 效果最为显著, 与氨基酸肥料单施相比, 该处理下过氧化物酶 (POD) 活性和脯氨酸含量分别显著增加 31.4% 和 20.6%, 叶片超氧阴离子产生速率、丙二醛含量和 Na^+/K^+ 分别显著降低 23.8%、26.6% 和 43.0%。同时, 氨基酸肥料配施 $24 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ 鼠李糖脂处理的番茄产量、可溶性糖和 Vc 含量最高, 较氨基酸肥料单施处理分别显著增加 38.5%、14.2% 和 18.2%。

参 考 文 献:

- [1] DALLAKOPOULOS I N, TSANIS I K, KOUTROULIS A, et al. The threat of soil salinity: a European scale review[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 727-739.
- [2] 杨妮, 万绮雯, 李逸民, 等. 外源亚精胺对盐胁迫下茶树光合特性及关键酶基因表达的影响[J]. 园艺学报, 2022, 49(2): 378-394.
YANG N, WAN Q W, LI Y M, et al. Effects of exogenous spermidine on photosynthetic characteristics and gene expression of key enzymes under salt stress in tea plant[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(2): 378-394.
- [3] QIN C, AHANGER M A, ZHOU J, et al. Beneficial role of acetylcholine in chlorophyll metabolism and photosynthetic gas exchange in *Nicotiana benthamiana* seedlings under salinity stress[J]. Plant Biology (Stuttgart, Germany), 2020, 22(3): 357-365.
- [4] 程贝, 王卫华, 吴忠东. 非均匀盐胁迫对番茄幼苗耐盐性的影响[J]. 园艺学报, 2018, 45(5): 887-896.
CHENG B, WANG W H, WU Z D. Effects of non-uniform salt stress

- on salt tolerance of tomato seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2018, 45(5): 887-896.
- [5] DEMIRAL T, TURKAN I. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53(3): 247-257.
- [6] FENG D, GAO Q, LIU J, et al. Categories of exogenous substances and their effect on alleviation of plant salt stress[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 142: 126656.
- [7] 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 and Soil*, 2013, 364(1): 145-158.
- [8] 许猛, 袁亮, 李伟, 等. 复合氨基酸肥料增效剂对 NaCl 胁迫下小白菜种子萌发和苗期生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 992-1000.
- XU M, YUAN L, LI W, et al. Effects of a fertilizer synergist containing compound amino acids on seed germination and seedling growth of pakchoi under NaCl stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(4): 992-1000.
- [9] 谢荔, 成学慧, 冯新新, 等. 氨基酸肥料对“夏黑”葡萄叶片光合特性与果实品质的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2013, 36(2): 31-37.
- XIE L, CHENG X H, FENG X X, et al. Effects of an amino acid fertilizer on the leaf photosynthesis and fruit quality of ‘Summer Black’ grape[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(2): 31-37.
- [10] ZHAO F, WANG B X, YUAN M L, et al. Comparative study on antimicrobial activity of mono-rhamnolipid and di-rhamnolipid and exploration of cost-effective antimicrobial agents for agricultural applications[J]. *Microbial Cell Factories*, 2022, 21(1): 221.
- [11] 许世奇, 何彦臻, 李瑞, 等. 不同改良剂对盐渍土西瓜耐盐性和生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(10): 2301-2312.
- XU SHI Q, HE Y Z, LI R, et al. Effects of different amendments on salt tolerance and growth of watermelon in saline soils[J]. *Journal of agro-environment science*, 2023, 42(10): 2301-2312.
- [12] HU K X, XU S Q, GAO Y Y, et al. Choline chloride and rhamnolipid combined with organic manures improve salinity tolerance, yield, and quality of tomato[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2023, 42(7): 4118-4130.
- [13] 韩玉薪, 杨福鑫, 岳焕芳, 等. 膜下滴灌灌水控制下设施番茄品质和水分利用效率分析[J]. *北方园艺*, 2023, (18): 43-53.
- HAN Y X, YANG F X, YUE H F, et al. Analysis of tomato quality and water use efficiency of facilities under the control of submembrane drip irrigation water[J]. *Northern Horticulture*, 2023, (18): 43-53.
- [14] 李英楠. 设施黄瓜促生耐盐菌的筛选及其应用效果[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
- LI Y N. Screening and application effect of growth promoting and salt tolerant bacteria in greenhouse cucumber[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 266-271.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 266-271.
- [16] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 143-144.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetable[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 143-144.
- [17] CUI D J, YIN Y, WANG J Q, et al. Research on the physio-biochemical mechanism of non-thermal plasma-regulated seed germination and early seedling development in *Arabidopsis*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1322.
- [18] KISHOR P B K, SURAVAJHALA R, RAJASHEKER G, et al. Lysine, Lysine-Rich, serine, and serine-rich proteins; link between metabolism, development, and abiotic stress tolerance and the role of ncRNAs in their regulation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 546213.
- [19] EL MOUKHTARI A, CABASSA-HOURTON C, FARISSI M, et al. How does proline treatment promote salt stress tolerance during crop plant development? [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 1127.
- [20] ADETUNJI C, OLOKE J, KUMAR A, et al. Synergetic effect of Rhamnolipid from *Pseudomonas aeruginosa* C1501 and phytotoxic metabolite from *Lasiodiplodia pseudotheobromae* C1136 on *Amaranthus hybridus* L. and *Echinochloa crus-galli* weeds [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(15): 13700-13709.
- [21] HELLE S S, DUFF S J, COOPER D G. Effect of surfactants on cellulose hydrolysis[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1993, 42(5): 611-617.
- [22] 邢芳芳, 孟祥坤, 徐文凤, 等. 鼠李糖脂在农业上的应用研究[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(16): 109-111.
- XING F F, MENG X K, XU W F, et al. Studies on the application of Rhamnolipids in agriculture[J]. *Applied Engineering Technology*, 2023, 43(16): 109-111.
- [23] WU H H, ZHU M, SHABALA L, et al. K⁺ retention in leaf mesophyll, an overlooked component of salinity tolerance mechanism; a case study for barley[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2015, 57(2): 171-185.
- [24] SOFY M R, ELHAWAT N, ALSHAAL T. Glycine betaine counters salinity stress by maintaining high K⁺/Na⁺ ratio and antioxidant defense via limiting Na⁺ uptake in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 200: 110732.
- [25] YANG Y Q, GUO Y. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses[J]. *New Phytologist*, 2018, 217(2): 523-539.
- [26] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 1-10.
- XUE X X, WU X P, WANG W B, et al. Progress of potassium, magnesium and their interaction in plant-soil system[J]. *Soils*, 2019, 51(1): 1-10.
- [27] MARTON MENENDEZ A, NESBITT D J. Ionic cooperativity between lysine and potassium in the lysine riboswitch: single-molecule kinetic and thermodynamic studies[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2023, 127(11): 2430-2440.
- [28] MUNOZ C C, BASSI A, LIU L. Investigation of micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) using rhamnolipid for heavy metal removal from desalter effluent[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2022, 100(9): 2322-2330.
- [29] 郭赋涵. 化肥肥施土壤改良剂对盐碱地改良及水稻产量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- GUO F H. Effects of chemical fertilizers combined with soil amendments on saline soil improvement and rice yield[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.