

施磷对盐碱胁迫下番茄光合特性、 离子平衡和抗氧化能力的影响

李长虹¹, 魏雨欣¹, 索菲亚¹, 许静¹,
宋梅², 刘慧英¹, 刁明¹

(1.石河子大学农学院/特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室,新疆石河子 832003;

2.新疆生产建设兵团第七师农业科学研究所,新疆奎屯 833200)

摘要:为探究施磷水平对盐、碱胁迫下番茄光合特性、离子平衡和抗氧化能力的影响,以‘魁冠 B108’番茄为材料,采用黄沙基质盆栽试验,设置盐胁迫(NaCl,0.30%)和碱胁迫(NaHCO₃,0.35%),两种胁迫类型下设置0、50、100 mg·kg⁻¹三个施磷水平。于番茄移栽后15 d测定番茄生长指标、光合气体交换和叶绿素荧光参数、离子含量和抗氧化能力。结果表明:盐胁迫下,50 mg·kg⁻¹和100 mg·kg⁻¹施磷处理(YP₅₀、YP₁₀₀)相较于未施磷(YP₀)处理,地上部干质量分别提高121.88%和68.72%,地下部干质量分别提高158.33%和66.66%;碱胁迫下,50 mg·kg⁻¹和100 mg·kg⁻¹施磷水平处理(JP₅₀、JP₁₀₀)较未施磷处理(JP₀),地上部干质量分别提高100.00%和176.19%,地下部干质量分别提高88.89%和188.89%。在光合参数方面,盐胁迫下,YP₅₀和YP₁₀₀处理的叶片净光合速率较YP₀处理分别提高50.96%和39.95%,碱胁迫下则分别提高41.95%和67.79%;盐胁迫下,YP₅₀和YP₁₀₀处理的气孔导度较YP₀处理分别提高87.95%和51.27%、潜在光化学效率分别提高33.33%和12.28%,碱胁迫下JP₅₀和JP₁₀₀处理的实际光化学效率量子产额较JP₀处理分别提高26.47%和32.35%、相对PSII激发能压力分别降低22.03%和30.51%。在离子调控方面,盐胁迫下,YP₅₀和YP₁₀₀处理Na⁺含量较YP₀处理分别降低27.29%和14.13%、Cl⁻含量分别降低14.30%和9.09%,碱胁迫下,JP₅₀和JP₁₀₀处理叶片Na⁺含量较JP₀处理分别降低14.48%和26.27%、根系Cl⁻含量分别降低6.36%和14.83%。在抗氧化酶活性方面,盐胁迫下,YP₅₀和YP₁₀₀处理的超氧化物歧化酶活性较YP₀处理分别提高23.40%和11.08%、过氧化物酶活性分别提高36.98%和19.43%,碱胁迫下,JP₅₀和JP₁₀₀处理的超氧化物歧化酶活性较JP₀处理分别提高11.90%和23.98%、过氧化氢酶活性分别提高31.44%和49.16%、抗坏血酸过氧化物酶活性分别提高24.71%和38.80%;盐胁迫下,YP₅₀和YP₁₀₀处理的丙二醛含量较YP₀处理分别降低24.19%和12.53%,碱胁迫下,JP₅₀和JP₁₀₀处理的电解质渗透率较JP₀处理分别降低22.97%和37.12%,表明氧化胁迫损伤得到有效减轻。研究发现碱胁迫下施磷效果优于盐胁迫,且缓解盐、碱胁迫的适宜施磷水平存在差异,盐胁迫下50 mg·kg⁻¹施磷处理的促进作用最为显著,碱胁迫下则以100 mg·kg⁻¹施磷处理效果最佳。

关键词:番茄;盐碱胁迫;施磷;生长指标;光合参数;离子平衡;渗透调节

中图分类号:S641.2 文献标志码:A

Effects of phosphorus application on photosynthetic characteristics, ion balance, and antioxidant capacity of tomato under salt and alkaline stress

LI Changhong¹, WEI Yuxin¹, SUO Feiya¹, XU Jing¹,
SONG Mei², LIU Huiying¹, DIAO Ming¹

(1. College of Agriculture, Shihezi University, Key Laboratory of Special Fruit and Vegetable Cultivation Physiology and Germplasm Resources Utilization Corps, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Institute of Agricultural Sciences, Seventh Division, Xinjiang Production and Construction Corps, Kuitun, Xinjiang 833200, China)

Abstract: To investigate the effects of phosphorus application levels on the photosynthetic characteristics, ion balance, and antioxidant capacity of tomatoes under salt and alkali stress, ‘Kuiguan B108’ tomatoes were used as

the experimental material. A sand matrix pot experiment was conducted with two stress treatments: salt stress (0.30% NaCl) and alkali stress (0.35% NaHCO₃). For each stress type, three phosphorus application levels were established: 0, 50, and 100 mg · kg⁻¹. The growth index, photosynthetic gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters, ion content and antioxidant capacity of tomato were measured 15 days after tomato transplanting. The results showed that under salt stress, 50 mg · kg⁻¹ and 100 mg · kg⁻¹ phosphorus treatments (YP₅₀, YP₁₀₀) increased the aboveground dry weight by 121.88% and 68.72%, respectively, and the underground dry weight by 158.33% and 66.66%, respectively, compared with no phosphorus treatment (YP₀). Under alkali stress, the aboveground dry weight of 50 mg · kg⁻¹ and 100 mg · kg⁻¹ phosphorus treatments (JP₅₀, JP₁₀₀) were increased by 100.00% and 176.19%, and the underground dry weight was increased by 88.89% and 188.89%, respectively, compared with the non-phosphorus treatment (JP₀). In terms of photosynthetic parameters, under salt stress, the net photosynthetic rate of leaves treated with YP₅₀ and YP₁₀₀ increased by 50.96% and 39.95%, respectively, compared with YP₀ treatment. Under alkaline stress, JP₅₀ and JP₁₀₀ treatments increased photosynthetic rate by 41.95% and 67.79%, respectively, compared with JP₀ treatment. At the same time, under salt stress, the stomatal conductance of YP₅₀ and YP₁₀₀ treatments increased by 87.95% and 51.27% respectively, compared with YP₀ treatment, and the potential photochemical efficiency increased by 33.33% and 12.28% respectively. Under alkali stress, the actual photochemical efficiency quantum yield of JP₅₀ and JP₁₀₀ treatments increased by 26.47% and 32.35%, respectively, compared with JP₀ treatment, and the relative PSII excitation energy pressure decreased by 22.03% and 30.51%, respectively. In terms of ion regulation, under salt stress, YP₅₀ and YP₁₀₀ treatments significantly reduced the content of Na⁺ and Cl⁻ ions in tomato seedling leaves compared with YP₀ treatment. The content of Na⁺ decreased by 27.29% and 14.13% respectively, and the content of Cl⁻ decreased by 14.30% and 9.09% respectively. Under alkaline stress, the Na⁺ content of leaves treated with JP₅₀ and JP₁₀₀ decreased by 14.48% and 26.27%, respectively, and the Cl⁻ content of roots decreased by 6.36% and 14.83%, respectively. At the level of antioxidant enzyme activity, under salt stress, the activity of superoxide dismutase in YP₅₀ and YP₁₀₀ increased by 23.40% and 11.08%, respectively, and the activity of peroxidase increased by 36.98% and 19.43%, respectively, compared with YP₀. Under alkaline stress, the superoxide dismutase activity of JP₅₀ and JP₁₀₀ treatments increased by 11.90% and 23.98%, respectively, compared with JP₀, the catalase activity increased by 31.44% and 49.16%, respectively, and the ascorbate peroxidase activity increased by 24.71% and 38.80%, respectively. Under salt stress, the malondialdehyde content in the YP₅₀ and YP₁₀₀ treatments decreased by 24.19% and 12.53%, respectively, compared to YP₀. Under alkaline stress, the electrolyte permeability in the JP₅₀ and JP₁₀₀ treatments decreased by 22.97% and 37.12%, respectively, compared to JP₀, indicating that oxidative stress damage was effectively alleviated. The results showed that the effect of phosphorus application was more pronounced under alkaline stress than under salt stress, and the optimal phosphorus application level varied between the two conditions. Under salt stress, the most significant improvement was observed with a phosphorus application rate of 50 mg · kg⁻¹, whereas under alkaline stress, the best effect was achieved with a phosphorus application rate of 100 mg · kg⁻¹.

Keywords: tomato; saline-alkali stress; phosphorus application; growth indexes; photosynthesis parameters; ion equilibrium; osmotic regulation

新疆地处欧亚大陆腹地,为典型干旱地区,其丰富的土壤含盐母质及干燥少雨、强烈蒸发等特殊气候条件和地理格局,使新疆现有灌区耕地中遭受盐碱化危害的面积超过50%^[1-2]。过高的土壤盐分会使植物遭受渗透胁迫、离子毒害和氧化应激等^[3],而碱胁迫往往比盐胁迫对植物的影响更为严重^[4],这主要因为土壤较高的pH值导致Fe²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺和PO₄³⁻等发生沉积,从而影响植物对养

分的吸收,引起离子稳态失衡,进而干扰植物的各种代谢活动^[5]。因此,土壤盐碱化已成为影响新疆作物生长、限制农牧业可持续发展的重要因素之一^[6]。番茄(*Solanum lycopersicum* L.)是新疆露地及设施生产中广泛栽培的重要蔬菜作物^[7],其虽属于中等耐盐碱作物,但仍会受到盐碱胁迫的不利影响^[8]。因此,提高番茄耐盐碱性对于促进新疆番茄产业可持续发展具有重要意义。

磷是植物生长所必需的大量营养元素之一,其不仅是构成植物细胞和组织的重要化合物(如核酸、蛋白质和酶),还参与植物许多代谢过程,包括氮磷化合物的合成代谢、能量转移、光合调节和信号传导等^[9-11],因此在调节植物生长发育、产量形成和抗逆性方面发挥重要作用。研究发现,在土壤供磷量充足的条件下,玉米(*Zea mays*)的耐盐性提高^[12]。适当增施磷肥可促进小麦(*Triticum aestivum*)生长和根系下扎,提高耐盐性,进而提高产量^[13]。孙嘉璘等^[14]报道叶片喷施磷可以维持盐胁迫下棉花叶片和根系离子稳态,提高棉花耐盐性,但对碱胁迫的缓解作用较小。但目前磷素调控植物耐盐碱性的机制较为复杂,尚不完全清楚。此外,盐、碱胁迫通常相伴而生,而盐碱胁迫对植物的影响因离子种类和组成、胁迫程度及植物种类等不同而呈现多样性和复杂性。因此,本研究在单一盐胁迫(NaCl)和碱胁迫(NaHCO₃)条件下,探究不同施磷水平对番茄光合特性、离子平衡和抗氧化能力的影响,旨在揭示磷介导番茄耐盐、碱性的机制,为进一步深入解析耐盐碱机制和合理施磷肥提高番茄耐盐碱性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试番茄品种为‘魁冠 B108’,由西安常丰园种业有限公司提供。

1.2 试验设计与处理

试验于 2023 年 3—8 月在石河子大学农学院试验站进行。番茄种子干播于盛装有草炭:蛭石(1:1, V:V)基质的 72 孔穴盘中进行育苗,待幼苗长至“四叶一心”期时挑选长势均匀一致的幼苗移至直径 25 cm、高 22 cm 的营养钵中,每钵定植 2 株幼苗。每钵盛装 10 kg 黄沙基质,同时按有机肥 70 mg·kg⁻¹和复合肥 20 mg·kg⁻¹用量施入沙中拌匀。向供试黄沙基质分别添加 NaCl(0.30%,干基)和 NaHCO₃(0.35%,干基)设置盐胁迫和碱胁迫,其中 NaCl 和 NaHCO₃分别按要求的用量配置成溶液喷洒在基质表面(对照处理喷施等量去离子水),边喷边搅拌使其混合均匀。盐、碱处理下黄沙基质的盐碱度见表 1。在盐胁迫(NaCl)和碱胁迫(NaHCO₃)下分别设置 3 个施磷水平:0、50、100 mg·kg⁻¹(分别记作 YP₀、YP₅₀、YP₁₀₀和 JP₀、JP₅₀、JP₁₀₀),以无盐、碱胁迫且不施磷处理作为对照(CK),共计 7 个处理。供试磷源为 NH₄·H₂PO₄,为避免施加 NH₄·H₂PO₄

表 1 盐、碱胁迫下黄沙基质的电导率和 pH 值

Table 1 EC and pH value of yellow sand matrix under salt and alkali stress

处理 Treatment	电导率 EC/(mS·cm ⁻¹)	pH
对照 CK	0.27	7.52
盐胁迫 Salt stress(NaCl, 0.30%)	1.05	8.45
碱胁迫 Alkali stress(NaHCO ₃ , 0.35%)	0.87	9.76

中 N 元素的影响,添加尿素(CH₄N₂O)使各处理下 N 元素相同。试验中,每个处理重复 3 次。试验期间定期称重补水,其余均为常规管理。于番茄移栽 15 d 后测定生长指标、光合气体交换和叶绿素荧光参数,并取样用于离子含量和抗氧化能力指标测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长指标 株高采用卷尺测定从子叶到生长点的距离;茎粗采用游标卡尺测量子叶处的直径;地上和地下部干质量采用烘干法测定。根系生长指标使用根系扫描分析系统(Epson Perfection V850 Pro,日本爱普生)分析根系长度、面积、体积、根尖数等。

1.3.2 光合气体交换及叶绿素荧光参数 选取生长一致且受光方向相同的功能叶(生长点倒数第 3~4 片完全叶),使用 LI-6800 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定蒸腾速率(T_r)、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂浓度(C_i)。测定环境:光照度为 400 mol·m⁻²·s⁻¹,CO₂浓度为 400 μmol·mol⁻¹,流速为 500 μmol·s⁻¹;使用 IMAGING-PAM 调制叶绿素荧光成像仪(WALZ,德国)测量光系统 II(PSII)最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(NPQ)、PSII激发能压力($1-qP$)和光化学能量转化的有效量子产量 $Y(II)$ 。

1.3.3 根与叶片离子含量 分别称取烘干番茄叶片和根系样品 0.2 g,参照崔洪鑫等^[15]方法对样品进行消解。采用电感耦合-等离子体原子发射光谱法(ICP-ACE)测定 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量^[15],Cl⁻含量采用 Nazar 等^[16]方法进行测定。

1.3.4 活性氧(ROS)水平和氧化伤害指标 过氧化氢(H₂O₂)含量和超氧阴离子(O₂⁻)产生速率采用试剂盒(科铭公司,苏州)的方法测定。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)方法测定^[17],电解质渗透率采用电导法测定^[18]。

1.3.5 抗氧化酶活性 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用试剂盒(科铭公司,苏州)方法测定。

1.4 数据处理与统计分析

为了比较在盐、碱胁迫类型下施加不同磷素水平后番茄光合特性、离子含量和抗氧化能力的变化差异,数据均采用相对指标表示,即盐、碱胁迫下的指标与对照之比。

试验数据利用 Microsoft Excel 2019 软件进行计算,结果用平均值±标准误差来表示。运用 Origin 2022 绘图。使用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,统计分析采用单因素方差分析(One-way ANOVA),处理间的差异性比较采用 Duncan 多重比较法。

2 结果与分析

2.1 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄植株相对生长量的影响

由图 1(见 39 页)和表 2 可知,盐、碱胁迫处理(YP_0 、 JP_0)均抑制了番茄生长,且 JP_0 对番茄茎粗、地上部干质量和地下部干质量的抑制作用均显著大于 YP_0 处理;盐胁迫下,两个施磷水平处理(YP_{50} 和 YP_{100})的地上、地下部干质量相对 YP_0 均显著提高,分别提高了 121.88% 和 68.72%、158.33% 和 66.66%。 YP_{50} 处理下番茄的株高、茎粗、地上和地下部干质量均显著高于 YP_{100} 处理;碱胁迫下,两个施磷水平处理(JP_{50} 和 JP_{100})相对 JP_0 亦显著提高了番茄的株高、茎粗、地上和地下部干质量,增幅分别为 49.06% 和 52.83%、24.19% 和 32.26%、100.00% 和 176.19%、88.89% 和 188.89%,且 JP_{100} 处理下番茄的地上部干质量和地下部干质量均显著高于 JP_{50} 处理,而 JP_{50} 和 JP_{100} 处理间番茄的株高和茎粗无显著性差异。

2.2 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄相对根系生长量的影响

由表 3 可以看出, YP_0 和 JP_0 处理均抑制了番茄根系生长,且 JP_0 处理对番茄根长、根表面积、根体

积和根尖数的抑制作用均显著大于 YP_0 处理;与 YP_0 处理相比, YP_{50} 和 YP_{100} 处理均不同程度促进了盐胁迫下番茄根系生长,且 YP_{50} 处理下的根长、根表面积、根体积和根尖数均显著高于 YP_{100} 处理;与 JP_0 处理相比, JP_{50} 和 JP_{100} 处理亦显著提高了番茄根长、根表面积、根体积和根尖数,分别增加了 63.89% 和 113.89%、77.27% 和 150.00%、68.57% 和 117.14%、74.19% 和 116.13%,其中 JP_{100} 处理对根系生长的促进作用显著优于 JP_{50} 处理。

2.3 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄叶片相对气体交换参数的影响

如图 2 所示, YP_0 和 JP_0 处理均降低了番茄叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和气孔导度(G_s);与 YP_0 处理相比, YP_{50} 和 YP_{100} 处理均显著提高了番茄叶片的 P_n 、 T_r 、 C_i 和 G_s , YP_{50} 处理下 C_i 和 G_s 均显著高于 YP_{100} 处理;与 JP_0 处理相比, JP_{50} 和 JP_{100} 处理亦显著提高了番茄叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s ,分别增加了 41.95% 和 67.79%、53.46% 和 90.32%、54.52% 和 119.47%, JP_{100} 处理下 P_n 、 C_i 和 G_s 均显著高于 JP_{50} 处理。

2.4 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄叶片叶绿素荧光参数的影响

由图 3 可知,与 CK 相比, YP_0 、 JP_0 处理均分别显著降低了番茄叶片的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 、 NPQ 和 qP 值,显著提高了 $1-qP$ 值;与 YP_0 处理相比,两个施磷水平处理(YP_{50} 和 YP_{100})均显著提高了番茄叶片的 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 、 NPQ 和 qP 值,显著降低了 $1-qP$ 值。 YP_{50} 处理下 F_v/F_m 、 NPQ 和 qP 值显著高于 YP_{100} 处理, $1-qP$ 值显著低于 YP_{100} 处理, YP_{50} 和 YP_{100} 处理间 $Y(II)$ 值无显著性差异;与 JP_0 处理相比,两个施磷水平处理(JP_{50} 和 JP_{100})均显著提高了番茄叶片的

表 2 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄相对生长量的影响

Table 2 Effects of phosphorus levels on relative growth of tomato under salt and alkali stress

胁迫类型 Stress type	处理 Treatment	相对株高 Relative plant height	相对茎粗 Relative stem thickness	相对地上部干质量 Relative aboveground dry weight	相对地下部干质量 Relative underground dry weight
盐胁迫 Salt stress	YP_0	0.65±0.02cd	0.73±0.02c	0.32±0.01d	0.12±0.01e
	YP_{50}	0.86±0.05a	0.83±0.02a	0.71±0.04a	0.31±0.02a
	YP_{100}	0.68±0.15bc	0.76±0.05bc	0.54±0.03b	0.20±0.01c
碱胁迫 Alkali stress	JP_0	0.53±0.05d	0.62±0.05d	0.21±0.03e	0.09±0.01f
	JP_{50}	0.79±0.04ab	0.77±0.04abc	0.42±0.01c	0.17±0.01d
	JP_{100}	0.81±0.05ab	0.82±0.03ab	0.58±0.01b	0.26±0.01b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

表 3 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄相对根系生长量的影响

Table 3 Effects of phosphorus level on relative root growth of tomato under salt and alkali stress

胁迫类型 Stress type	处理 Treatment	相对根长 Relative root length	相对根表面积 Relative root surface area	相对根体积 Relative root volume	相对根尖数 Relative root tips number
盐胁迫 Salt stress	YP ₀	0.47±0.02d	0.31±0.02c	0.47±0.01f	0.49±0.03c
	YP ₅₀	0.85±0.01a	0.59±0.02a	0.82±0.02a	0.68±0.03a
	YP ₁₀₀	0.75±0.03b	0.46±0.02b	0.73±0.01c	0.56±0.01b
碱胁迫 Alkali stress	JP ₀	0.36±0.03e	0.22±0.01d	0.35±0.01e	0.31±0.01d
	JP ₅₀	0.59±0.02c	0.39±0.02b	0.59±0.03d	0.54±0.01b
	JP ₁₀₀	0.77±0.02b	0.55±0.09a	0.76±0.01b	0.67±0.03a

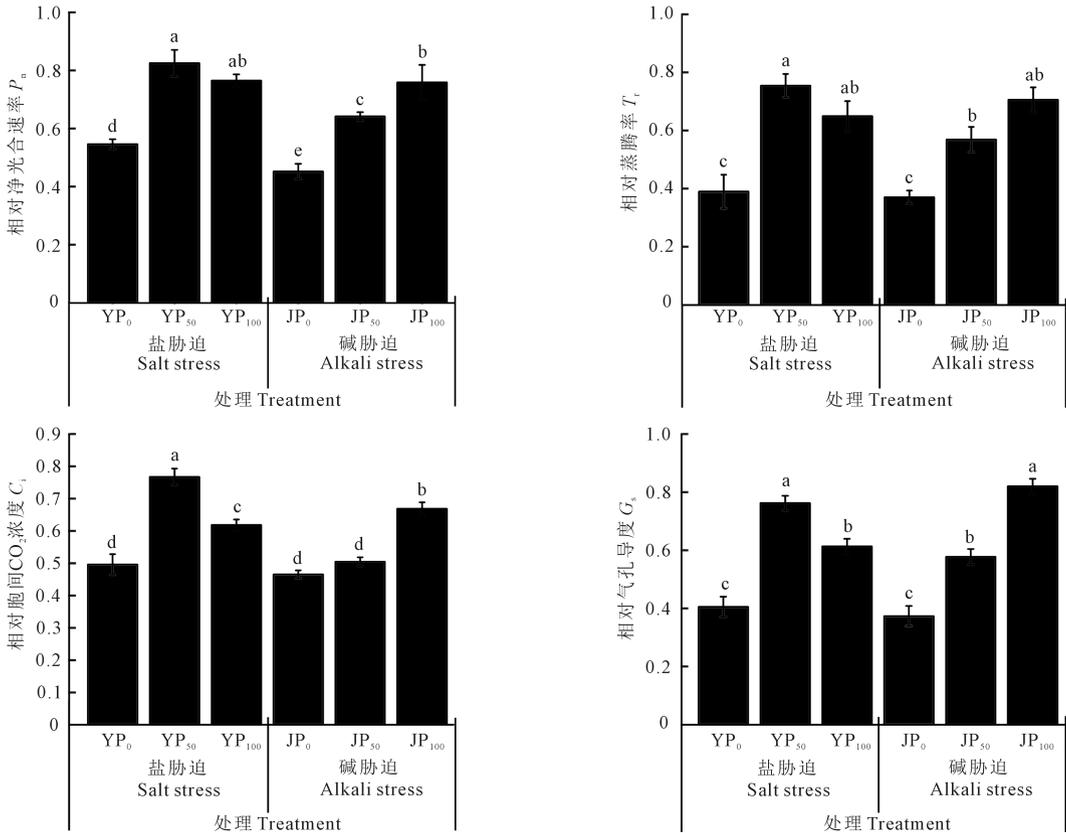


图 2 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄幼苗叶片相对气体交换参数的影响

Fig.2 Effects of phosphorus levels on relative gas exchange parameters of tomato seedling leaves under salt and alkali stress

F_v/F_m 、 $Y(II)$ 和 qP 值,显著降低了 $1-qP$ 值。JP₁₀₀ 处理下 F_v/F_m 和 NPQ 值显著性高于 JP₅₀ 处理,而 $Y(II)$ 、 qP 和 $1-qP$ 值与 JP₅₀ 处理间无显著性差异。

2.5 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄叶片及根系相对离子含量的影响

如图 4 所示,YP₀ 和 JP₀ 处理下番茄幼苗叶片和根系中 Na⁺、Cl⁻ 含量均有所提高,且 YP₀ 低于 JP₀ 处理;与 YP₀ 相比,YP₅₀ 和 YP₁₀₀ 均不同程度显著降低了番茄幼苗叶片和根系中 Na⁺、Cl⁻ 含量,Na⁺ 含量分别降低 27.29% 和 14.13%、14.30% 和 9.08%,Cl⁻ 含量分别降低 23.46% 和 14.64%、15.36% 和 8.58%,且

YP₅₀ 处理显著低于 YP₁₀₀ 处理;与 JP₀ 处理相比,JP₅₀ 和 JP₁₀₀ 亦显著降低了番茄幼苗叶片和根系中 Na⁺、Cl⁻ 含量,Na⁺ 含量分别降低 14.48% 和 26.27%、10.40% 和 13.45%,Cl⁻ 含量分别降低 11.99% 和 21.37%、6.35% 和 14.83%,其中 JP₁₀₀ 处理显著低于 JP₅₀ 处理。

如图 5 所示,盐和碱胁迫处理均降低了番茄幼苗叶片和根系中 K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 含量;与 YP₀ 相比,两个施磷处理 YP₅₀ 和 YP₁₀₀ 均能显著提高番茄叶片和根系中 K⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 含量,其中 YP₅₀ 处理下 K⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 含量均显著高于 YP₁₀₀ 处理;与 JP₀ 处理

相比,JP₅₀和JP₁₀₀亦显著提高了叶片和根系的K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺含量,其中JP₁₀₀处理下K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺含量显著高于JP₅₀处理。

图6显示,盐和碱胁迫处理均显著提高了叶片和根系中Na⁺/K⁺、Na⁺/Mg²⁺和Na⁺/Ca²⁺值;与YP₀处理相比,两个施磷水平处理(YP₅₀和YP₁₀₀)均不同程度

降低了番茄叶片和根系中Na⁺/K⁺、Na⁺/Mg²⁺和Na⁺/Ca²⁺值,且YP₅₀处理显著低于YP₁₀₀处理;与JP₀处理相比,两个施磷水平处理(JP₅₀和JP₁₀₀)亦显著降低了番茄叶片和根系中Na⁺/K⁺、Na⁺/Mg²⁺和Na⁺/Ca²⁺值,其中JP₁₀₀处理中上述3个指标均显著低于JP₅₀处理。

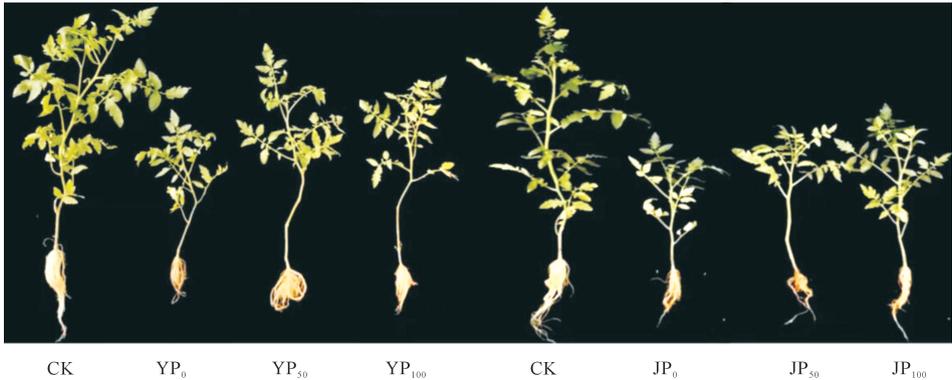


图 1 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄生长的影响

Fig.1 Effects of phosphorus levels on the growth of tomato under salt and alkali stress

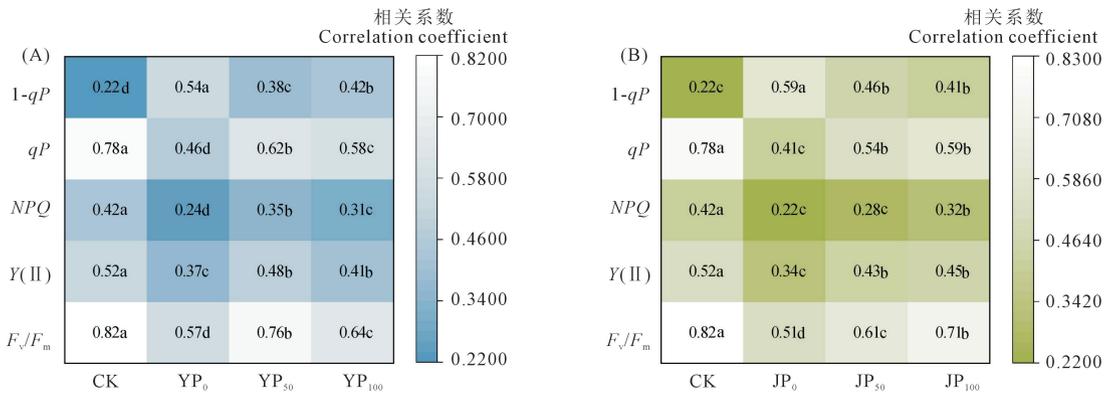


图 3 施磷水平对盐(A)、碱(B)胁迫下番茄幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

Fig.3 Effects of phosphorus levels on chlorophyll fluorescence parameters of tomato seedlings under salt (A) and alkali (B) stress

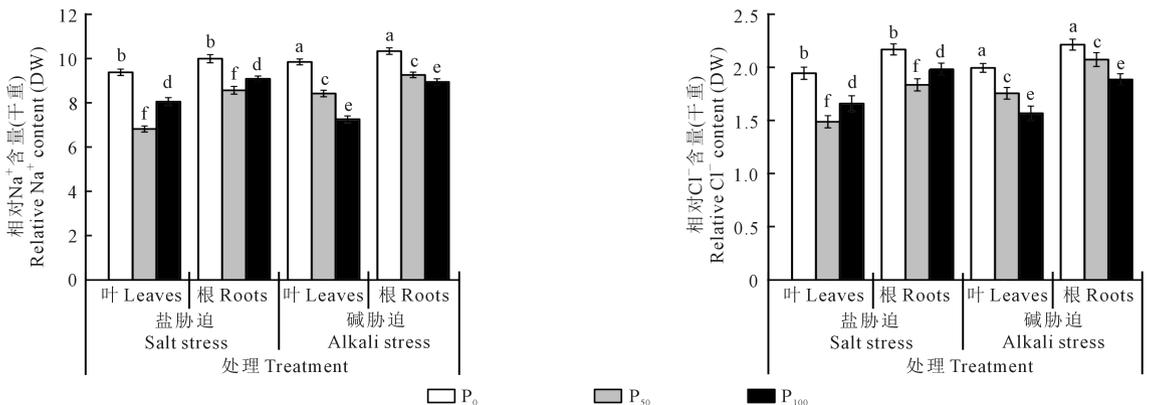


图 4 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄叶片和根系中相对Na⁺、Cl⁻的影响

Fig.4 Effects of phosphorus levels on relative Na⁺ and Cl⁻ in tomato leaves and roots under salt and alkali stress

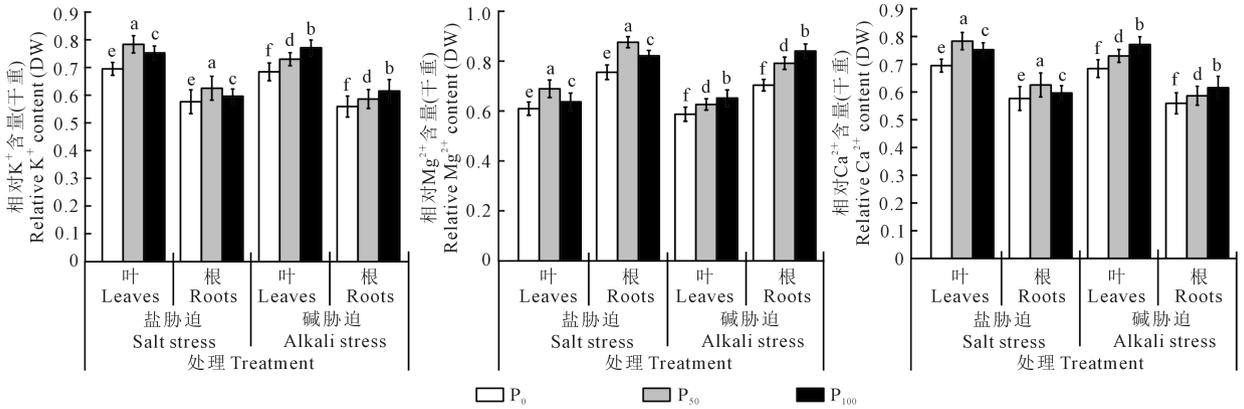


图 5 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄叶片和根系中相对 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的影响

Fig.5 Effects of phosphorus levels on relative K^+ 、 Mg^{2+} and Ca^{2+} in tomato leaves and roots under salt and alkali stress

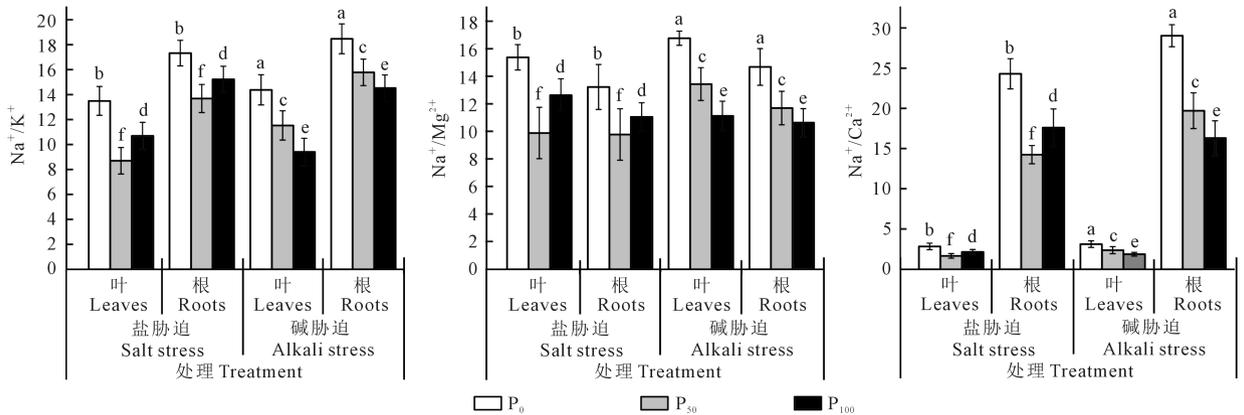


图 6 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄叶片和根系中相对 Na^+/K^+ 、 Na^+/Mg^{2+} 和 Na^+/Ca^{2+} 值的影响

Fig.6 Effects of phosphorus levels on relative Na^+/K^+ 、 Na^+/Mg^{2+} and Na^+/Ca^{2+} in tomato leaves and roots under salt and alkali stress

2.6 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄幼苗叶片相对 ROS 含量和氧化胁迫损伤的影响

由图 7 可知,盐、碱胁迫处理均诱导番茄叶片 O_2^- 、 H_2O_2 、MDA 含量及电解质渗透率有所增加;与 YP_0 处理相比,两个施磷水平处理 (YP_{50} 和 YP_{100}) 均不同程度降低了番茄叶片中 O_2^- 、 H_2O_2 、MDA 含量、电解质渗透率,分别降低了 49.34% 和 32.83%、56.04% 和 43.07%、24.19% 和 12.53%、38.11% 和 23.55%,且 YP_{50} 处理显著低于 YP_{100} 处理;与 JP_0 处理相比,两个施磷水平处理 (JP_{50} 和 JP_{100}) 亦显著降低了番茄叶片中 O_2^- 、 H_2O_2 、MDA 含量、电解质渗透率,分别降低了 30.40% 和 48.22%、37.36% 和 51.00%、13.27% 和 22.69%、22.97% 和 37.12%,其中 JP_{100} 处理均显著性低于 JP_{50} 处理。

2.7 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄幼苗叶片相对抗氧化酶活性的影响

由图 8 可知, YP_0 和 JP_0 处理均降低了番茄叶片中 SOD、POD、CAT 和 APX 活性。与 YP_0 处理相比,

两个施磷水平处理 (YP_{50} 和 YP_{100}) 均不同程度增加了番茄叶片中 SOD、POD、CAT、APX 活性,分别增加了 23.40% 和 11.08%、36.98% 和 19.43%、53.44% 和 21.20%、39.45% 和 25.65%,且 YP_{50} 处理显著高于 YP_{100} 处理;与 JP_0 处理相比,两个施磷水平处理 (JP_{50} 和 JP_{100}) 亦显著提高了叶片中 SOD、POD、CAT、APX 活性,分别增加了 11.90% 和 23.98%、28.65% 和 46.07%、31.44% 和 49.16%、24.71% 和 38.30%,其中 JP_{100} 处理显著高于 JP_{50} 处理。

3 讨论

植株生长过程对盐、碱胁迫非常敏感,因此生长状态是反映其对盐、碱环境耐受性的可靠指标^[19]。盐胁迫不仅阻碍作物根系对磷的吸收,而且盐、碱性土壤的磷素含量较低,尤其是碱胁迫下高 pH 值环境导致土壤固磷现象加剧,从而降低了土壤磷素的有效性。磷素作为植物生长所必需的大量营养元素,不仅在调控植物生长发育方面发挥重要作

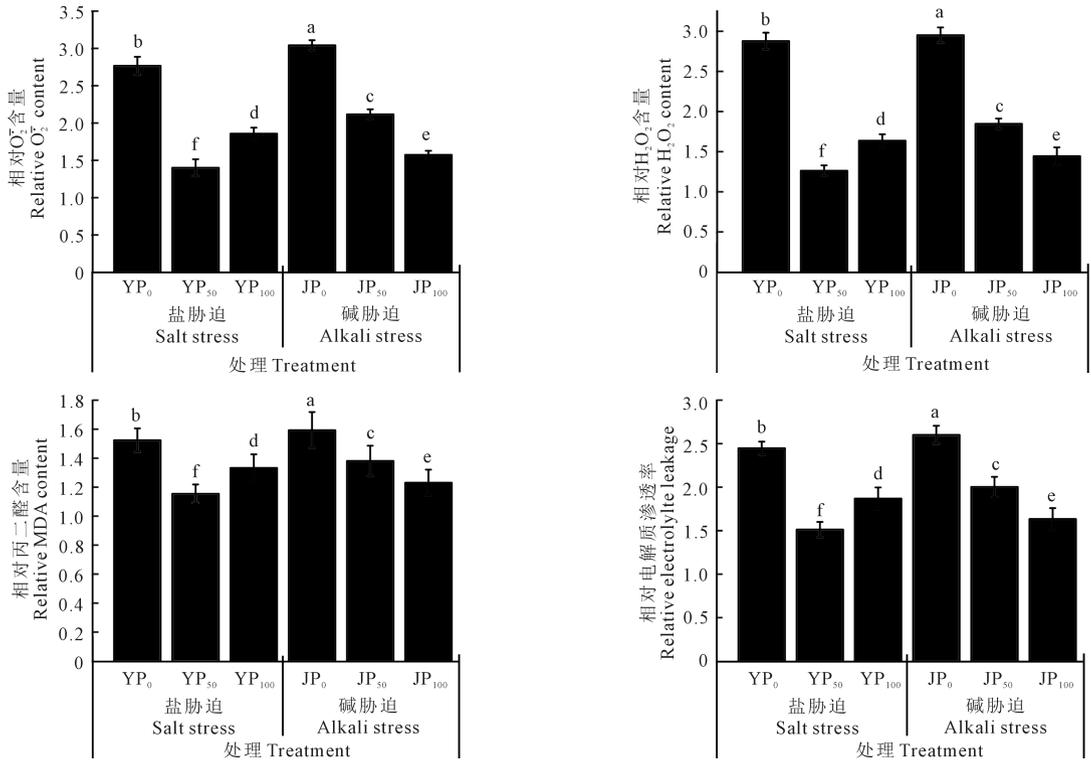


图 7 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄幼苗叶片相对 ROS 和膜透性的影响

Fig.7 Effects of phosphorus level on relative ROS and membrane permeability of tomato seedling leaves under salt and alkali stress

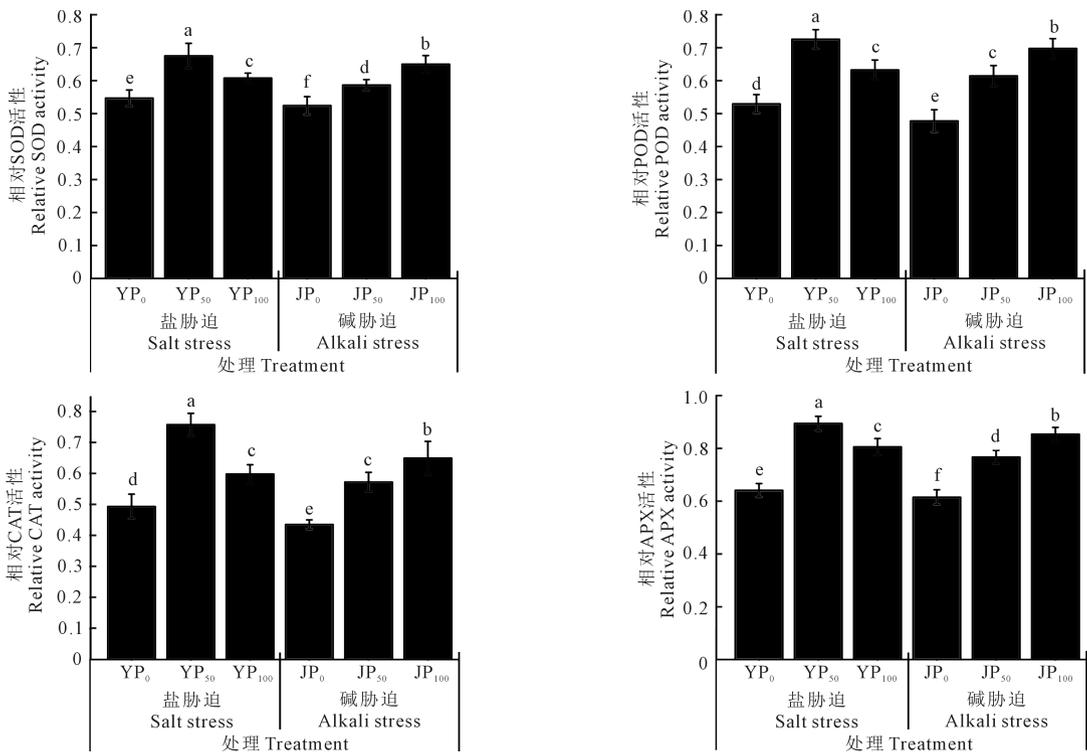


图 8 施磷水平对盐、碱胁迫下番茄幼苗叶片相对抗氧化酶活性的影响

Fig.8 Effect of phosphorus level on activity of relative phase-antioxidase in tomato seedling leaves under salt and alkali stress

用,还积极参与植物环境适应性的形成。生产及研究发现适当增施磷肥是实现作物高产、稳产的重要措施,同时有利于增强植株抗逆性^[10,20]。本研究结果亦表明,盐、碱胁迫均抑制了番茄的地上部和根系生长,尤其是碱胁迫的抑制作用更明显;而两个磷水平处理均可不同程度促进盐和碱胁迫下番茄的生长,但盐和碱胁迫下促进番茄生长的最适宜施磷水平不同(图 1、表 2 和表 3),这与前人在棉花上的研究结果趋势一致^[14]。说明合理施磷可有效缓解盐、碱胁迫对番茄生长的抑制作用。

光合作用是植株生长最基础的能量与物质代谢过程,也是对逆境胁迫极其敏感的生理过程之一。已有大量研究证实逆境抑制植物生长往往伴随着 P_n 的下降。逆境下 P_n 的降低主要包括气孔因素和非气孔因素的限制^[21]。本研究中,盐、碱胁迫下 P_n 的降低均伴随着 C_i 、 G_s 和 T_r 的降低(图 2),同时也伴随着 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 和 qP 值的显著降低和 $1-qP$ 值的显著提高(图 3),这表明盐和碱胁迫导致 P_n 降低均受气孔限制和非气孔限制因素的影响,即盐、碱胁迫不仅使叶肉细胞气孔扩散的阻抗增大而导致胞间光合底物(CO_2)浓度降低,而且还降低了光系统 II(PSII)的光化学反应效率和反应中心活性,从而造成光抑制^[22],这也与前人^[23]研究结果一致。适宜的施磷水平($50\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $100\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对盐、碱胁迫下维持较高的叶肉细胞气孔导度和光合底物浓度起到了积极作用,并促进了 PSII 的光化学效率,从而有效缓解了光抑制,其中盐胁迫下以施用 $50\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的磷和碱胁迫下施用 $100\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的磷对番茄光合作用的促进作用最好(图 2、3)。这些结果说明施磷是通过调控气孔和非气孔限制因素而提高盐、碱胁迫下番茄植株的光合能力的。

盐、碱环境均可打破植物细胞中已形成的各种离子平衡状态^[24],对植物造成渗透胁迫和离子毒害。孙景波等^[13]研究表明, Na^+ 的积累不仅抑制作物对大量元素(N、P、K、Ca、Mg 和 S)的摄取,而且还限制作物对微量元素(Fe、Cu、Zn、Mn、B 等)的吸收,限制了这些离子的生理功能。张永亮等^[25]研究也表明,施磷能够降低植株体内 Na^+ 含量。磷素有促进盐胁迫下沟叶结缕草(*Zoysia matrella*) Na^+ 分泌、限制 Na^+ 向地上部运输、降低叶片中 Na^+ 含量的作用。本研究表明,盐、碱胁迫下番茄幼苗生长受抑的同时是伴随着叶片和根系中 Na^+ 、 Cl^- 的积累,且盐、碱胁迫下番茄幼苗根系中的 Na^+ 、 Cl^- 含量均高于叶片(图 4)。施磷后均能使番茄幼苗降低根系对 Na^+ 、 Cl^- 的吸收能力及阻止 Na^+ 、 Cl^- 从根向叶运

输的能力,这与上述前人研究结果一致。此外,在盐、碱胁迫下,由于过量的 Na^+ 对 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 具有一定的拮抗作用^[26],同时高 pH 值环境会降低土壤中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的有效性,从而减少对矿质元素的吸收,打破离子平衡。因此,在盐胁迫与碱胁迫环境下,重建体内离子稳态成为植物应对逆境、展现耐性的关键策略之一。在胁迫下是否能维持高的 K^+/Na^+ 比值是植物耐盐碱性重要的判断标志^[27]。本研究表明,盐和碱胁迫均显著降低了番茄幼苗根系和叶片中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量(图 5),施磷后番茄幼苗根系和叶片中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量在盐和碱胁迫下均有所提高,且碱胁迫下随施磷水平的增加,番茄幼苗叶片和根系中 Na^+/Mg^{2+} 、 Na^+/K^+ 和 Na^+/Ca^{2+} 比值均呈上升趋势(图 6)。这与张永亮等^[25]关于盐胁迫下氮磷钾肥对藜草离子吸收与分布的研究结果相符,该研究发现,随着磷素水平上升,藜草叶片和根系中的 K^+ 含量均呈现增加趋势,同时叶片的 K^+/Na^+ 值也随磷素浓度升高而提高。而盐胁迫下,随施磷水平的增加,番茄幼苗叶片和根系中 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量呈先升高后降低趋势,这与前人研究结果不同,可能是由于植物在吸收矿质元素时,不同的阳离子和阴离子之间会发生竞争。磷素以磷酸根、磷酸氢根形式被根系吸收,其吸收和转运机制与钾、钙、镁等阳离子不同。然而,磷的过量供应可能改变根际环境,如影响土壤酸碱度和离子平衡,间接抑制植株对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的吸收,导致植株体内阳离子减少。

盐碱胁迫会破坏植物活性氧(ROS)代谢的动态平衡,诱导 ROS(如 O_2^- 和 H_2O_2 等)积累。ROS 会启动膜脂过氧化作用,从而造成膜的氧化损伤和破坏,引起电解质外渗^[28],严重时会导致植物死亡。MDA 是 ROS 启动膜脂过氧化的主要产物^[29]。因此 ROS 和 MDA 的含量及电解质渗透率常被分别作为判断氧化胁迫和膜脂过氧化程度及膜损伤的重要指标^[30]。为维持植物体内氧化还原平衡和保护细胞免受 ROS 的损害,细胞自身形成了严密的酶促和非酶促抗氧化系统^[31]。SOD 是抗氧化酶促防御系统的第一道防线^[32],它能催化 O_2^- 发生歧化反应产生 H_2O_2 和 O_2 , H_2O_2 随后主要被 POD、CAT 和 APX 等清除^[33-35]。本研究发现,盐和碱胁迫均导致抗氧化酶(SOD、POD、CAT 和 APX)活性降低、ROS 积累和氧化损伤发生(图 7、8)。这与陈雅琦等^[36]、陆启环等^[37]分别在盐胁迫对醉马草、小麦的影响,以及在盐碱胁迫对黄瓜影响^[38]的研究结果一致。磷作为植物必需的营养元素,是参与细胞膜合成的大量

元素,因此充足的磷供应可以增强细胞膜的稳定性和抗氧化能力。在本研究中,两个施磷水平处理均能不同程度提高抗氧化酶活性、降低 ROS 含量和减轻氧化损伤程度(图 7、8),说明施磷($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)均能够有效提高盐、碱胁迫下番茄植株的抗氧化能力,这与赵建涛等^[39]认为施磷量与苜蓿的抗氧化能力相关,合理的施磷量通过提高苜蓿叶片氮磷含量、增加抗氧化酶活性和抗氧化物质含量,从而增强苜蓿对环境的适应性等观点一致。值得注意的是,本试验是在短期盐、碱胁迫处理 15 d 之后测得的结果,但是在自然环境中盐和碱胁迫常常是复合存在的,这可能导致植物生长和生理反应的复杂性超出我们在短期试验中观察到的结果。因此,未来研究应结合长期培养试验,以更全面地探讨复合盐碱胁迫对植物的长期影响,从而揭示植物在持续胁迫下的适应机制和耐受性变化。

4 结 论

盐碱胁迫下,施磷($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)可通过提高番茄叶片光合能力、维持离子平衡和较高的 ROS 清除能力,有效缓解了盐、碱胁迫对番茄生长的抑制,提高了植株的耐盐碱性;此外,盐胁迫下施磷效果大于碱胁迫,且缓解盐和碱胁迫的适宜施磷水平不同。盐胁迫下,以 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施磷处理的缓解效应最为显著;而碱胁迫下,以 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施磷处理的效果最佳。

参 考 文 献:

- 田长彦, 买文选, 赵振勇. 新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7064-7068.
TIAN C Y, MAI W X, ZHAO Z Y. Research on key technologies for ecological management of saline-alkali land in the arid areas of Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7064-7068.
- 杨少辉, 季静, 王罡. 盐胁迫对植物的影响及植物的抗盐机理[J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(4): 70-76.
YANG S H, JI J, WANG G. Effects of salt stress on plants and the mechanism of salt tolerance[J]. World Sci-Tech R & D, 2006, 28(4): 70-76.
- 陆安桥. 湖南稷子耐盐碱特性及生物改良效果研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
LU A Q. Research on salt-alkali tolerance of millet in Hunan and the effects of biological improvement[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- 刘娜. 外源褪黑素和一氧化氮及其互作对番茄幼苗碱胁迫缓解效应的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
LIU N. The study on the alleviating effects of exogenous melatonin and nitric oxide and their interaction on alkaline stress in tomato seedlings[D]. Tyan: Shandong Agricultural University, 2015.
- 姚栋萍, 吴俊, 胡忠孝, 等. 水稻耐盐碱的生理机制及育种策略[J]. 杂交水稻, 2019, 34(4): 1-7.
YAO D P, WU J, HU Z X, et al. Physiological mechanism and breeding strategy of rice saline-alkali tolerance[J]. Hybrid Rice, 2019, 34(4): 1-7.
- 周昕南. AM 真菌对向日葵生长及耐盐碱性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
ZHOU X N. The effects of AM fungi on the growth and salt-alkali tolerance of sunflowers[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
- 巩彪. 氮信号调控番茄盐碱适应机理及 SAMS 和 GSNOR 基因的功能研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
GONG B. Research on the mechanism of nitrogen signal regulation on salt-alkali adaptation in tomato and the functions of SAMS and GSNOR genes[D]. Tyan: Shandong Agricultural University, 2014.
- 崔洪鑫. 番茄对盐碱胁迫的响应及转录应答研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2024.
CUI H X. Study on tomato response and transcriptional response to salt-alkali stress[D]. Shihezi: Shihezi University, 2024.
- 彭涛涛, 边少锋, 张丽华, 等. 高磷土壤不同施磷量对玉米生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(1): 41-44, 50.
PENG T T, BIAN S F, ZHANG L H, et al. Effect of different phosphate fertilizer application amount on growth and grain yield of maize on high phosphorus soil[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2015, 40(1): 41-44, 50.
- 杨开鑫, 赵建涛, 王旭哲, 等. 不同灌溉方式及施磷对紫花苜蓿产量、品质及水磷利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(21): 130-138.
YANG K X, ZHAO J T, WANG X Z, et al. Effects of different irrigation methods and phosphorus application on alfalfa yield, quality and water and phosphorus use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(21): 130-138.
- 王丽慧. 菊芋苗期氮磷钾缺乏症状与生理特性研究[D]. 西宁: 青海大学, 2013.
WANG L H. Study on nitrogen, phosphorus, and potassium deficiency symptoms and physiological characteristics of Jerusalem artichoke at seedling stage[D]. Xining: Qinghai University, 2013.
- 李威威, 丁效东, 刘庆, 等. 盐胁迫下硝态氮对甘薯生长及渗透调节的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(1): 6-12.
LI W W, DING X D, LIU Q, et al. Effect of nitrate on growth and osmotic regulation of sweet potato under salt stress[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(1): 6-12.
- 孙景波, 孙广玉, 刘晓东, 等. 盐胁迫对桑树幼苗生长、叶片水分状况和离子分布的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 543-548.
SUN J B, SUN G Y, LIU X D, et al. Effects of salt stress on mulberry seedlings growth, leaf water status, and ion distribution in various organs[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 543-548.
- 孙嘉璐, 侯振安. 磷对盐碱胁迫下棉花离子平衡及相关调控基因的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(4): 643-653.
SUN J L, HOU Z A. Effect of phosphorus on ionic balance and expression of related regulatory genes of cotton under salt and alkali stresses[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2022, 28(4): 643-653.
- 崔洪鑫, 关思慧, 柴亚倩, 等. 土壤盐碱胁迫程度对番茄光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2023, (17): 15-24.
CUI H X, GUAN S H, CHAI Y Q, et al. Effects of soil saline-alkali stress degree on photosynthetic characteristics of tomato[J]. Northern Horticulture, 2023, (17): 15-24.
- NAZAR R, IQBAL N, SYEED S, et al. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing nitrogen and sulfur assimilation and antioxidant metabolism differentially in two mungbean cultivars[J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(8): 807-815.
- 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-166.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical ex-

- periment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-166.
- [18] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 41-43.
- ZOU Q. Experimental instruction of plant physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 41-43.
- [19] 尉秋实, 赵明, 李昌龙, 等. 不同土壤水分胁迫下沙漠藜的生长及生物量的分配特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 7-12.
- WEI Q S, ZHAO M, LI C L, et al. Growth and biomass allocation of *Chilopsis linearis* under different soil water stresses[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(1): 7-12.
- [20] 龙继锐, 马国辉, 万宜珍, 等. 施氮量对超级杂交中稻生育后期剑叶叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(5): 501-507.
- LONG J R, MA G H, WAN Y Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer level on chlorophyll fluorescence characteristic in flag leaf of super hybrid rice at late growth stage[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(5): 501-507.
- [21] 杨叶萍, 余厚平, 史雅甜, 等. 不同浓度镉胁迫下苧麻(*Boehmeria nivea*(L.) Gaudich.)的光合特性[C]//2015年中国环境科学学会年会. 深圳: 中国环境科学学会, 2015: 4808-4813.
- YANG Y P, YU H P, SHI Y T, et al. Photosynthetic characteristics of ramie (*Boehmeria nivea*(L.) Gaudich.) under cadmium stress at different concentrations[C]//2015 Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences. Shenzhen: Chinese Society for Environmental Sciences, 2015: 4808-4813.
- [22] Talaat, B N. Effective microorganisms: an innovative tool for inducing common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) salt-tolerance by regulating photosynthetic rate and endogenous phytohormones production[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 250: 254-265.
- [23] 李俊, 李建明, 胡晓辉, 等. 亚精胺浸种对番茄幼苗抗盐碱的生理特性研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(9): 1788-1795.
- LI J, LI J M, HU X H, et al. Effects of pre-soaked seeds with spermidine on tomato seedling salinity-alkalinity tolerance[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(9): 1788-1795.
- [24] 朱延凯, 王振华, 李文昊. 不同盐胁迫对滴灌棉花生理生长及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 298-305.
- ZHU Y K, WANG Z H, LI W H. Effects of different salt stress on physiological growth and yield of cotton under drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 298-305.
- [25] 张永亮, 王学愿, 刘杨, 等. 盐胁迫下氮磷钾肥对藜蒿离子吸收与分布的影响[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1318-1323.
- ZHANG Y L, WANG X Y, LIU Y, et al. Effects of different NPK fertilizer rates on the ion absorption and distribution of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea*) under salt stress[J]. Acta Agrictoria Sinica, 2014, 22(6): 1318-1323.
- [26] 尹永祺. NaCl 及其联合 Ca^{2+} 处理下发芽大豆生理变化与 GABA 富集调控机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- YIN Y Q. Physiological changes and GABA enrichment regulation mechanisms of germinating soybeans under NaCl and Ca^{2+} treatments[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [27] 魏嘉, 蔡勤安, 李源, 等. 植物对盐碱胁迫响应机制的研究进展[J]. 山东农业科学, 2022, 54(4): 156-164.
- WEI J, CAI Q A, LI Y, et al. Research progress on response mechanism of the plant to saline-alkali stress[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(4): 156-164.
- [28] 张琳, 王甲辰, 左强, 等. 抗逆性肥料在黄瓜上的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(24): 14691-14692, 14713.
- ZHANG L, WANG J C, ZUO Q, et al. Research on the application of fertilizer containing the resisting material in cucumber growth[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(24): 14691-14692, 14713.
- [29] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991, (2): 84-90.
- CHEN S Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell[J]. Plant Physiology Communications, 1991, (2): 84-90.
- [30] 温泽林. 外源 GSH 介导 NO 调控番茄幼苗盐适应性研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- WEN Z L. Research on GSH mediated NO regulation of salt adaptation in tomato seedlings[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.
- [31] 冯巩俐. 茶多酚对盐胁迫下小麦幼苗活性氧非酶促清除系统的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- FENG G L. Effects of tea polyphenols on non-enzymatic reactive oxygen species scavenging systems in wheat seedlings under salt stress[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [32] 何瑞. 邻苯二甲酸二丁酯对海洋微藻生长的影响及机制[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
- HE R. The effect and mechanism of dibutyl phthalate on the growth of marine microalgae[D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.
- [33] 乔枫, 耿贵工, 陈志. 混合盐碱处理下蚕豆叶片生理指标的变化[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 162-165, 193.
- QIAO F, GENG G G, CHEN Z. Physiological responses of *Vicia faba* L. leaves to salt-alkali stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(3): 162-165, 193.
- [34] 王英男, 陶爽, 华晓雨, 等. 盐碱胁迫下 AM 真菌对羊草生长及生理代谢的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2187-2194.
- WANG Y N, TAO S, HUA X Y, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiological metabolism of *Leymus chinensis* under salt-alkali stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2187-2194.
- [35] 周敏, 王富豪, 张明浩, 等. 敌草胺对油菜抗氧化酶活性及相关基因表达的影响[J]. 西北农业学报, 2024, 33(5): 941-950.
- ZHOU M, WANG F H, ZHANG M H, et al. Effect of napropamide on activities of antioxidant enzymes and expression of related genes in *Brassica napus* L.[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2024, 33(5): 941-950.
- [36] 陈雅琦, 苏楷淇, 陈泰祥, 等. 混合盐碱胁迫对醉马草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(3): 137-157.
- CHEN Y Q, SU K Q, CHEN T X, et al. Effects of complex saline-alkali stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Achnatherum inebrians*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(3): 137-157.
- [37] 陆启环, 张毅, 穆平, 等. 两个小麦新品种的耐盐性分析[J]. 华北农学报, 2017, 32(2): 151-156.
- LU Q H, ZHANG T, MU P, et al. Analysis of salt tolerance between two new wheat varieties[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(2): 151-156.
- [38] 卢凤刚, 樊新华, 夏彦辉, 等. 盐碱混合胁迫对黄瓜幼苗根系主要生理代谢的影响[J]. 北方园艺, 2013, (15): 33-35.
- LU F G, FAN X H, XIA Y H, et al. Effect of salt and alkali mixed stresses on metabolize of cucumber seedling roots[J]. Northern Horticulture, 2013, (15): 33-35.
- [39] 赵建涛, 杨开鑫, 王旭哲, 等. 施磷对苜蓿叶片生理参数及抗氧化能力的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(3): 453-465.
- ZHAO J T, YANG K X, WANG X Z, et al. Effect of phosphorus application on physiological parameters and antioxidant capacity in alfalfa leaves[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(3): 453-465.