



刘盼盼,褚睿,刘召梅,等. 不同盐碱水平对黄瓜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 南京农业大学学报,2026,49(3):491-501.

Liu P P,Chu R,Liu Z M,et al. Effects of different levels of saline-alkali on the growth and physiological characteristics of cucumber seedlings[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2026,49(3):491-501.

不同盐碱水平对黄瓜幼苗生长及生理特性的影响

刘盼盼,褚睿,刘召梅,王鑫,鲁鹏飞,陈书霞*

(西北农林科技大学园艺学院/陕西省蔬菜工程技术研究中心,陕西 杨凌 712100)

摘要:[目的]本文旨在探讨不同水平盐碱处理对黄瓜幼苗生长及生理特性的影响,为黄瓜耐盐碱栽培提供参考依据。[方法]以当地主栽品种‘博耐 526’为试验材料,将 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃、Na₂CO₃ 按照浓度比 1:9:1:9 配制成 25(T1)、50(T2)、75(T3)、100(T4)、125(T5)、150(T6)、175(T7)、200(T8) mmol·L⁻¹ 共 8 个浓度梯度的混合盐碱溶液,以清水(CK)为对照,对黄瓜幼苗进行定量处理。分别在处理 5、10、15 d 测定生长指标,在处理 7 d 测定叶绿素含量、光合参数、根系活力、抗氧化酶活性等生理指标,并利用主成分分析法对黄瓜幼苗在盐碱胁迫下的评价指标进行分析。[结果]在盐碱处理 5 和 10 d,黄瓜幼苗株高、茎粗、叶面积、叶片数明显受到抑制,15 d 时各处理指标比对照显著下降,其中 T8 处理的株高、茎粗、叶面积、叶片数下降最显著,分别比对照显著降低 85.68%、56.54%、66.94%、53.52%。T1—T3 低浓度盐碱处理下,黄瓜幼苗叶片干重、叶片鲜重、根长、根尖数、蒸腾速率、净光合速率和叶片 K⁺ 含量比对照显著减少,分别是对照的 15.35%~32.53%、7.04%~16.90%、14.25%~32.50%、17.88%~26.85%、6.68%~46.30%、15.76%~36.15% 和 7.80%~19.79%;但 T4—T8 高浓度盐碱处理下,幼苗叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、叶片 Mg²⁺ 含量增加至对照的 13.84%~25.42%、1.63%~39.74%、1.41%~15.47% 和 3.75%~8.83%。主成分分析结果显示,株高、茎粗、干重、鲜重、根尖数、蒸腾速率、净光合速率以及叶片 K⁺ 含量等可作为 T1—T3 低浓度盐碱处理下的植株生长状况评价指标;总叶绿素、类胡萝卜素、叶片 Mg²⁺ 含量等指标可以作为 T4—T8 等高浓度盐碱处理下的植株生长状况评价指标。[结论]低浓度盐碱处理下的评价指标为株高、茎粗、干重、鲜重、根尖数、蒸腾速率、净光合速率以及叶片 K⁺ 含量;高浓度盐碱处理下的评价指标为总叶绿素、类胡萝卜素、叶片 Mg²⁺ 含量。

关键词:盐碱胁迫;黄瓜;幼苗;生长指标;生理特性;评价指标

中图分类号:S642.2

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)03-0491-11

Effects of different levels of saline-alkali on the growth and physiological characteristics of cucumber seedlings

LIU Panpan, CHU Rui, LIU Zhaomei, WANG Xin, LU Pengfei, CHEN Shuxia*

(College of Horticulture/Shaanxi Vegetable Engineering Research Center, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract:[Objectives] The paper aimed to explore the effects of different levels of saline-alkali treatment on the growth and physiology characteristics of cucumber seedlings, in order to lay the foundation for saline-alkali tolerant cultivation of cucumber. [Methods] The saline-alkali mixtures of 25(T1), 50(T2), 75(T3), 100(T4), 125(T5), 150(T6), 175(T7) and 200(T8) mmol·L⁻¹ separately were prepared using NaCl, Na₂SO₄, NaHCO₃ and Na₂CO₃ according to 1:9:1:9 concentration ratio, and the clear water (CK) was as the control. The seedlings of cucumber were quantitatively treated. The indexes of seedling growth were measured at 5, 10 and 15 d after treatment, and physiological indexes including of chlorophyll content, photosynthetic parameters, root activity and antioxidant were measured at 7 d after treatment. Principal component analysis(PCA) was used to analyze the indexes of cucumber seedlings under saline-alkali stress. [Results] The plant height, stem diameter, leaf area and leaf number of cucumber seedlings were significantly inhibited at 5 and 10 d after saline-alkali treatment, and the indexes decreased significantly at 15 d compared with those of the control, and the plant height, stem diameter, leaf area and leaf number of T8 treatment decreased the most significantly, which were significantly reduced by 85.68%, 56.54%, 66.94% and 53.52%, respectively, compared with the control. The leaf dry weight, leaf fresh weight, root length, root tip number, transpiration rate, net photosynthetic rate and leaf K⁺ content significantly decreased compared with those of the control under the lower concentration saline-alkali treatments such as T1—T3, which were 15.35%—32.53%, 7.04%—16.90%, 14.25%—32.50%, 17.88%—26.85%, 6.68%—46.30%, 15.76%—36.15% and 7.80%—19.79%, respectively. However, the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids and leaf Mg²⁺ increased under the higher concentration

收稿日期:2025-02-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFE0206900)

*通信作者:陈书霞,教授,博导,主要从事蔬菜生理生态与生物技术研究,E-mail:shuxiachen@nwsuaf.edu.cn。

saline-alkali treatments such as T4–T8, which increased by 13.84%–25.42%, 1.63%–39.74%, 1.41%–15.47% and 3.75%–8.83% of the control. The principal component analysis showed that plant height, stem diameter, dry weight, fresh weight, root tip number, transpiration rate, net photosynthetic rate and leaf K^+ content could be used as evaluation indicators for plant growth under T1–T3 low concentration salinity-alkali treatments. Total chlorophyll, carotenoids, leaf Mg^{2+} content and other indexes could be used as evaluation indicators for high saline-alkali concentration treatments such as T4–T8. [Conclusions] The indexes which were plant height, stem diameter, dry weight, fresh weight, root tip number, transpiration rate, net photosynthetic rate and leaf K^+ content could be used as the evaluation ones at the lower saline-alkali concentration treatments, and the total chlorophyll, carotenoids and leaf Mg^{2+} content could be used as the evaluation ones at the higher saline-alkali concentration treatment.

Keywords: saline-alkali stress; cucumber; seedlings; growth indicators; physiological characteristics; evaluation indicators

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 是葫芦科一年生草本植物。作为设施栽培中的重要作物, 其栽培面积逐年扩大^[1]。然而, 随着农业产业化进程的逐步加快, 施肥结构不合理, 连续重茬及设施相对封闭的栽培环境导致土壤次生盐渍化问题日趋严重, 直接影响蔬菜作物的产量和经济效益, 严重影响了设施黄瓜产业的健康发展^[2]。但目前有关盐碱胁迫对黄瓜生长和生理方面影响的研究, 多数以中性盐 NaCl 为研究对象^[3], 忽略了实际中存在盐碱混合胁迫对黄瓜影响的主要问题。因此, 明确不同水平盐碱胁迫对黄瓜幼苗生长以及生理影响, 明确不同盐碱胁迫程度下黄瓜生长状况的评价指标, 对黄瓜耐盐碱栽培及育种至关重要。

相对于其他作物, 黄瓜对盐碱胁迫更加敏感, 盐渍土壤会显著降低黄瓜幼苗的正常生长和品质产量^[4]。盐胁迫对黄瓜幼苗造成的损害表现为抑制株高和根系生长, 水分吸收减少, 叶片枯萎黄化及萎蔫, 在极端情况下, 可能会导致幼苗死亡^[5]。研究表明, 盐碱胁迫对花生幼苗的生长产生显著抑制作用, 随着胁迫浓度增加, 不同品种地上部及地下部干、鲜重均下降; 盐碱胁迫增加及土壤盐分升高引起根系过度吸收盐离子, 土壤水势降低, 植物水分吸收受阻, 导致植株缺水, 植株的生长受到抑制, 生物量减少, 从而降低了干、鲜重的积累^[6]。此外, 盐碱胁迫下, 栽培介质中积累的大量 Na^+ 会对植物产生离子毒害, 打破原有的离子平衡, 影响生理代谢平衡和光合作用、呼吸作用等关键代谢过程^[7]。在高浓度盐碱胁迫下, 植物体遭受生理干旱, 更加严重抑制了植株生长发育, 导致作物光合能力下降, 膜脂过氧化程度增加, 活性氧 (ROS) 累积, 细胞膜结构被破坏, 营养吸收产生障碍等^[8–9]。盐碱胁迫对植物的影响贯穿整个生长周期, 尤其在幼苗期的反应更敏感^[10–11]。

土壤盐碱化的日益加剧对黄瓜生产造成巨大损失。因此, 本研究以黄瓜品种‘博耐 526’为试材, 探究不同盐碱水平对黄瓜幼苗生长以及生理特性的影响, 并采用主成分分析法对不同盐碱水平对黄瓜幼苗生长、生理特性等影响进行综合分析, 以明确黄瓜幼苗在盐碱胁迫下的评价指标, 对黄瓜耐盐碱育种及栽培提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以当地黄瓜主栽品种‘博耐 526’为供试黄瓜品种。将 NaCl、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 、 $NaHCO_3$ 按照浓度比为 1:9:1:9 的比例配制不同浓度的复合盐碱溶液。具体成分组成见表 1。

表 1 不同浓度复合盐碱的成分组成

Table 1 Composition of saline-alkali in different concentrations

处理 Treatment	盐碱浓度/(mmol·L ⁻¹) Saline-alkali concentration	盐碱组成及浓度/(mmol·L ⁻¹) Saline-alkali composition and concentration				pH 值 pH value
		NaCl	Na_2SO_4	Na_2CO_3	$NaHCO_3$	
CK	0	0.00	0.00	0.00	0.00	7.24
T1	25	1.25	11.25	1.25	11.25	8.98
T2	50	2.50	22.50	2.50	22.50	9.02
T3	75	3.75	33.75	3.75	33.75	9.05
T4	100	5.00	45.00	5.00	45.00	9.07
T5	125	6.25	56.25	6.25	56.25	9.08
T6	150	7.50	67.50	7.50	67.50	9.10
T7	175	8.75	78.75	8.75	8.75	9.11
T8	200	10.00	90.00	10.00	90.00	9.12

1.2 试验设计

试验在人工气候室进行,培养条件:光照强度为 $360 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,昼/夜温度为 $(26\pm 1)^\circ\text{C}/(20\pm 1)^\circ\text{C}$,光周期为 16 h/8 h,相对湿度为 70%。试验共设 8 个盐碱胁迫处理:25(T1)、50(T2)、75(T3)、100(T4)、125(T5)、150(T6)、175(T7)、200(T8) $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,以清水为对照(CK)。黄瓜种子经过浸种、催芽后播种至苗钵(口径、底径、盆高分别为 7.0、5.0、7.3 cm)内,将苗钵放置托盘进行基质育苗,每个处理 3 次重复,每 30 株为 1 次重复。待幼苗长至第 1 片真叶时,进行浇灌 1/2 的霍格兰营养液,长至 2 叶 1 心时进行盐碱处理,此时不浇营养液。对照(CK)使用等量的清水,每个苗钵浇灌 40 mL 盐碱溶液,每隔 2 d 处理 1 次,直至取样结束。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 黄瓜幼苗生长指标 处理 5 d 时,各处理随机挂牌标记 9 株幼苗,每隔 5 d 测量 1 次株高、茎粗、叶长、叶宽、叶片数,共测 3 次,并计算叶面积及统计盐害指数^[12]。

1.3.2 黄瓜幼苗盐害分级标准及盐害指数计算方法 根据试验情况并参考曹齐卫等^[13]的方法,对耐盐碱性分级标准定义。0 级:植株生长正常,未受到盐碱伤害;1 级:生长基本正常,植株少数叶片出现轻度卷曲;2 级:生长受抑制,植株一半叶片出现卷曲;3 级:生长基本停止,叶片多数变黄或卷曲;4 级:生长停止,植株死亡。具体表型见图 1。盐害指数^[14]计算公式:盐害指数 = $\sum (\text{代表级数} \times \text{株数}) / (\text{总株数} \times \text{最高级数}) \times 100\%$ 。

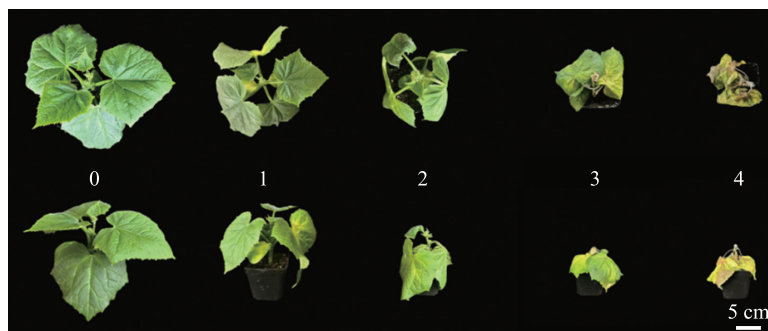


图 1 黄瓜幼苗盐害分级标准(0~4 级)

Fig. 1 The grading standards of cucumber seedlings under the saline-alkali damage(0-4 grade)

1.3.3 黄瓜幼苗生物量 处理 10 d 时,各处理随机选取 5 株,采集全植株,分离根、茎和叶,称量鲜重;随后在 105°C 杀青 30 min, 80°C 烘干至恒重,获得根、茎、叶干重。

1.3.4 黄瓜幼苗根系形态指标 处理 7 d 时,每处理随机选取 3 株幼苗,将根系清洗干净后,用根扫描仪进行扫描,测量根长、根表面积、根体积、根平均直径,并统计根尖数。

1.3.5 黄瓜幼苗生理指标 处理 7 d 时,每处理随机选取 3 株幼苗,采用高俊凤^[15]的方法测定叶绿素含量、光合参数、叶绿素荧光参数、根系活力、抗氧化酶活性、丙二醛和离子含量等生理指标。

1.3.6 基质理化性质 处理 28 d 时,各处理随机选 3 株,采集基质样品,收集其根际土壤,风干后研磨过 1 mm 筛,用于基质理化性质的测定。参照陆欣等^[16]和鲍士旦^[17]的方法测定 pH 值、EC 及盐分含量。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2019 软件进行数据整理,采用 GraphPad Prism 9.5.0 软件制作图表,使用 SPSS 23.0 软件进行数据显著性分析,采用主成分分析法分析不同盐碱水平对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响。

2 结果与分析

2.1 不同盐碱水平对黄瓜幼苗生长的影响

由图 2 和表 2 可见,在不同盐碱水平处理下,幼苗的盐害指数随着时间的增加而增加。处理 5 和 10 d T3 处理的盐害指数均为 0%。盐碱浓度大于等于 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时盐害指数增加,处理 15 d 时, T3 处理盐害指数开始上升至 10.83%。T8 处理盐害指数达到 57.78%,出现较明显的盐害胁迫。

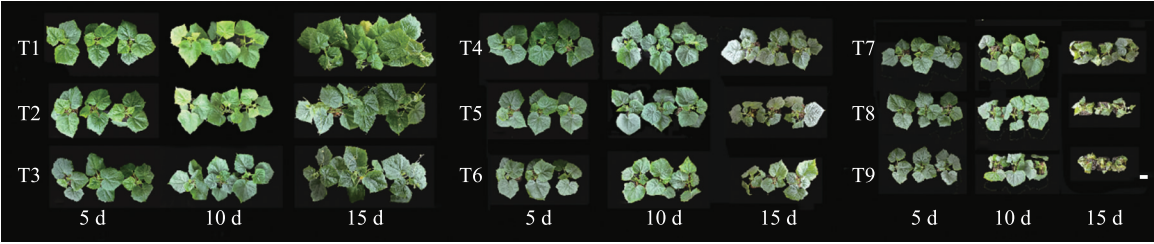


图 2 不同盐碱水平处理后幼苗的性状表现(标尺为 5 cm)

Fig. 2 Performance of seedlings treated by the different levels of saline-alkali(Bar=5 cm)

表 2 不同盐碱水平对黄瓜盐害指数影响

Table 2 Effects of different levels of saline-alkali on the salt damage index of cucumber seedlings		%								
处理时间/d	Treatment time	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
5	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	2.08	6.02	9.72
10	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.81	6.63	10.71	13.27
15	15	0.00	0.00	0.00	10.83	25.56	30.00	41.39	51.67	57.78

由图 3 可见,随着处理时间的延长,不同盐碱水平处理对黄瓜幼苗株高和茎粗抑制明显。与 CK 相比,T8 处理 5、10、15 d 黄瓜幼苗株高分别显著降低 29.78%、65.01%、85.68%,茎粗分别显著降低 32.25%、40.45%、56.54%($P<0.05$)。由图 4 可见,与 CK 相比,不同盐碱水平处理的黄瓜植株叶面积和叶片数均降低,并且随盐碱处理浓度的增加抑制效果越明显;处理 15 d,与对照相比,T1—T8 处理叶面积和叶片数均显著降低,说明不同水平盐碱胁迫对黄瓜幼苗的株高、茎粗、叶面积和叶片数均有抑制作用,且随着施用浓度的增加抑制作用越明显。

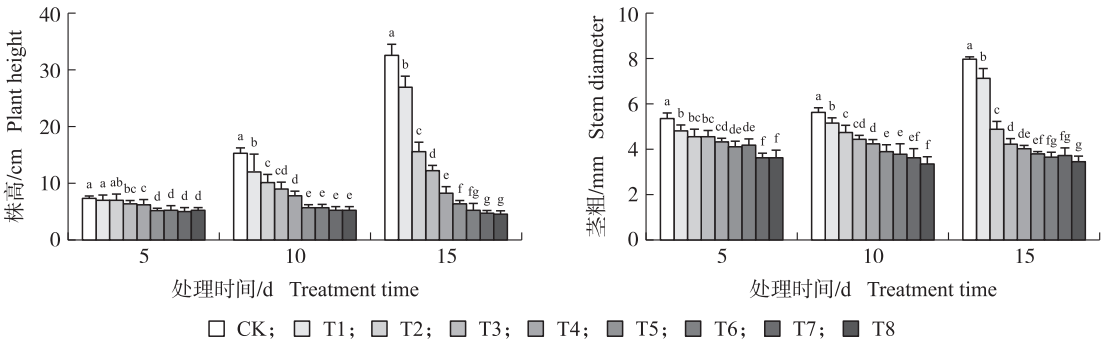


图 3 不同盐碱水平对黄瓜幼苗株高和茎粗的影响

Fig. 3 Effect of different levels of saline-alkali on the plant height and stem diameter of cucumber seedlings

不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below.

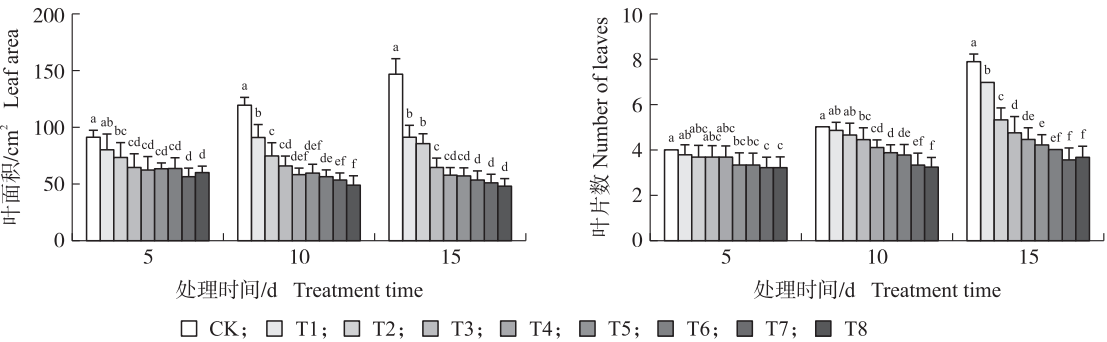


图 4 不同盐碱水平对黄瓜幼苗叶面积和叶片数的影响

Fig. 4 Effect of different levels of saline-alkali on the leaf area and number of leaves of cucumber seedlings

2.2 不同盐碱水平对黄瓜幼苗生物量的影响

由表3可见,不同盐碱水平处理黄瓜幼苗叶片、茎、根系鲜重显著低于对照处理,T1—T8处理分别比对照显著下降15.35%~62.43%、17.06%~76.07%、29.41%~71.12%。不同盐碱水平处理黄瓜幼苗叶片、茎、根系干重低于对照处理,T1—T8处理的叶片、茎和根系干重分别下降7.04%~30.99%、5.56%~33.33%、12.50%~50.00%。表明盐碱胁迫不利于黄瓜幼苗叶片、茎和根系鲜物质和干物质的积累。

表3 不同盐碱水平对黄瓜幼苗植株干、鲜重的影响

Table 3 Effect of different levels of saline-alkali on the dry and fresh quality of cucumber seedlings

g

处理 Treatment	鲜重 Fresh weight			干重 Dry weight		
	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
CK	8.73±0.30 ^a	8.44±0.60 ^a	1.87±0.03 ^a	0.71±0.02 ^a	0.36±0.02 ^a	0.08±0.00 ^a
T1	7.39±0.15 ^b	7.00±0.46 ^b	1.32±0.05 ^b	0.66±0.02 ^b	0.34±0.01 ^a	0.07±0.01 ^{ab}
T2	6.03±0.13 ^c	4.79±0.14 ^c	1.25±0.02 ^b	0.61±0.02 ^c	0.28±0.01 ^{bc}	0.07±0.00 ^{ab}
T3	5.89±0.26 ^c	4.59±0.51 ^{cd}	1.03±0.08 ^c	0.59±0.01 ^c	0.28±0.02 ^b	0.06±0.00 ^{bc}
T4	4.63±0.32 ^d	3.42±0.29 ^{de}	0.77±0.04 ^d	0.58±0.01 ^{cd}	0.22±0.02 ^{cd}	0.05±0.00 ^{cd}
T5	3.94±0.07 ^{de}	2.61±0.11 ^{ef}	0.73±0.02 ^d	0.58±0.01 ^{cd}	0.18±0.01 ^{de}	0.05±0.01 ^{cd}
T6	3.67±0.15 ^e	2.18±0.09 ^f	0.63±0.06 ^{de}	0.54±0.01 ^{de}	0.19±0.02 ^{de}	0.05±0.00 ^{bcd}
T7	3.41±0.07 ^e	2.30±0.11 ^{ef}	0.60±0.07 ^{de}	0.53±0.01 ^{de}	0.15±0.01 ^{de}	0.04±0.00 ^d
T8	3.28±0.19 ^e	2.02±0.12 ^f	0.54±0.04 ^e	0.49±0.01 ^e	0.24±0.01 ^e	0.04±0.00 ^d

2.3 不同盐碱水平对黄瓜幼苗根系生长的影响

由图5可见,T1—T8处理的根长均显著小于CK。T1处理根表面积与对照相比显著增加12.84%,T4—T8处理根表面积与对照相比均显著降低;T1、T2处理根体积显著增加,分别是对照的1.28和1.42倍。根平均直径随着盐碱浓度的增加先增加后减小,T2处理的根平均直径最大,但差异不显著。T1—T8处理的根尖数均显著小于CK。T1、T2处理的根系活力均提高,分别比对照提高4.23%和13.56%。

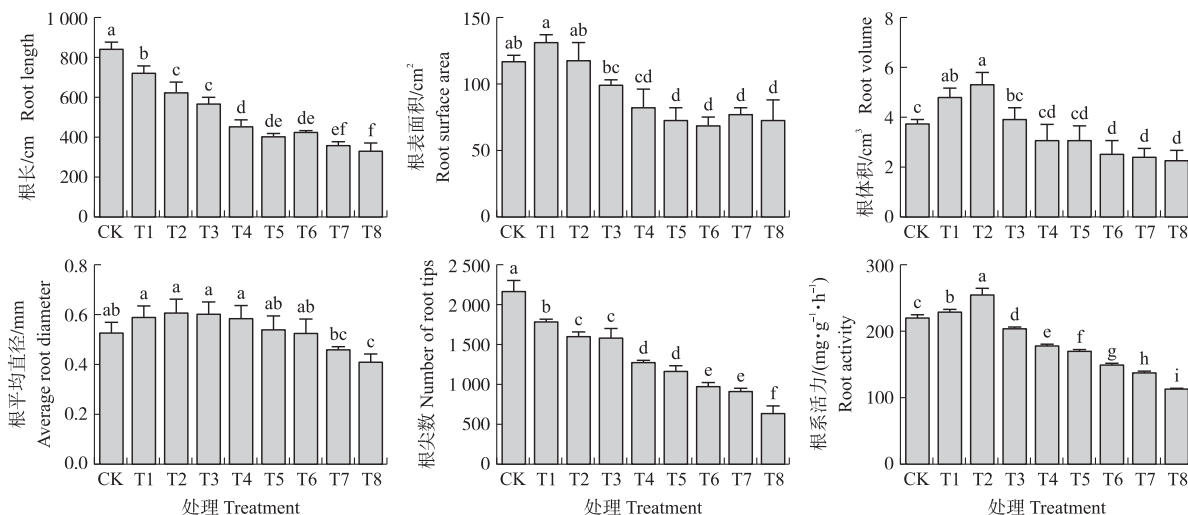


图5 不同盐碱水平对黄瓜根系生长的影响

Fig. 5 Effect of different levels of saline-alkali on the root growth of cucumber seedlings

2.4 不同盐碱水平对黄瓜幼苗叶片光合色素的影响

由表4可见,随着盐碱浓度的增加,黄瓜幼苗叶绿素含量发生显著变化。与对照相比,T1—T7处理叶绿素a、b含量以及总叶绿素含量增加,其中,T5处理叶绿素a、b含量以及总叶绿素含量最大,分别比对照增加20.27%、28.44%和22.68%;T8处理叶绿素a、b含量和总叶绿素含量降低,与CK处理无显著差异。与CK相比,T1—T8处理类胡萝卜素含量增加,其中T1和T8处理无显著差异。

2.5 不同盐碱水平对黄瓜幼苗叶绿素荧光的影响

由图6可见,与对照相比,T2处理黄瓜叶片 F_v/F_m 和NPQ均显著增加,T5—T8处理叶片 F_v/F_m 和NPQ有所下降;T3处理两者达到最大值,与CK差异显著。因此,低浓度盐碱胁迫能够提升光系统Ⅱ最大光化学量子效率、光系统Ⅱ实际光化学量子效率、光化学猝灭系数和非光化学猝灭系数来满足植株的光合效率的需要。

表 4 不同盐碱水平对黄瓜幼苗光合色素含量的影响

Table 4 Effect of different levels of saline-alkali on photosynthetic pigment content in cucumber seedlings $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	类胡萝卜素含量 Carotenoid content	总叶绿素含量 Total chlorophyll content
CK	$24.43\pm0.62^{\text{d}}$	$9.21\pm0.19^{\text{d}}$	$7.82\pm0.01^{\text{d}}$	$33.64\pm0.79^{\text{ef}}$
T1	$25.50\pm0.53^{\text{d}}$	$9.80\pm0.23^{\text{d}}$	$8.18\pm0.23^{\text{cd}}$	$35.30\pm0.56^{\text{de}}$
T2	$28.23\pm0.16^{\text{ac}}$	$11.54\pm0.26^{\text{e}}$	$8.72\pm0.12^{\text{ab}}$	$39.77\pm0.29^{\text{c}}$
T3	$30.03\pm0.26^{\text{b}}$	$12.11\pm0.14^{\text{bc}}$	$8.96\pm0.13^{\text{ab}}$	$42.14\pm0.14^{\text{b}}$
T4	$30.64\pm0.51^{\text{ab}}$	$12.87\pm0.21^{\text{b}}$	$9.03\pm0.11^{\text{a}}$	$43.51\pm0.31^{\text{b}}$
T5	$31.66\pm0.27^{\text{a}}$	$14.24\pm0.27^{\text{a}}$	$8.84\pm0.25^{\text{ab}}$	$45.89\pm0.54^{\text{a}}$
T6	$30.29\pm0.43^{\text{ab}}$	$12.05\pm0.37^{\text{bc}}$	$8.75\pm0.09^{\text{ab}}$	$42.34\pm0.80^{\text{b}}$
T7	$27.81\pm0.39^{\text{e}}$	$9.36\pm0.41^{\text{d}}$	$8.48\pm0.18^{\text{bc}}$	$37.17\pm0.74^{\text{d}}$
T8	$24.12\pm0.43^{\text{d}}$	$7.92\pm0.25^{\text{e}}$	$7.93\pm0.13^{\text{d}}$	$32.05\pm0.68^{\text{f}}$

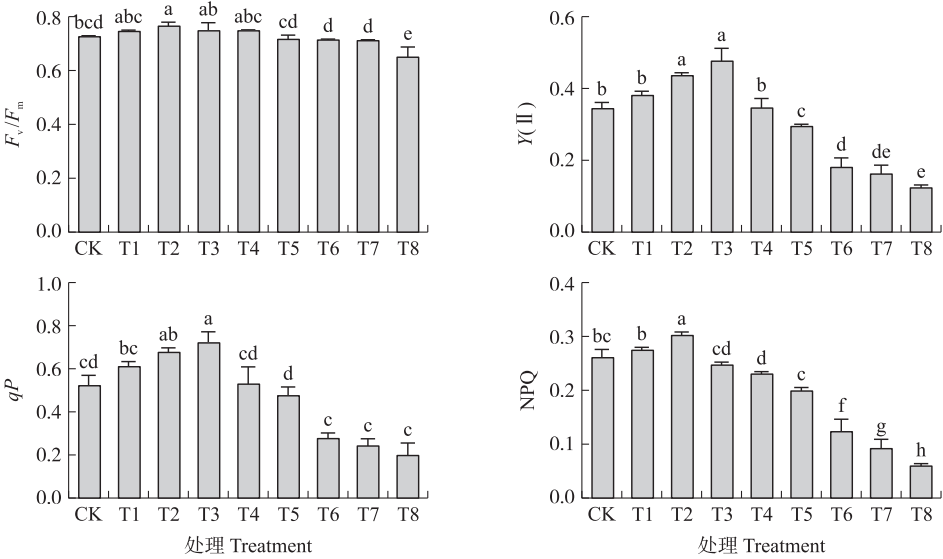


图 6 不同盐碱水平对黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响

Fig. 6 Effect of different levels of saline-alkali on the chlorophyll fluorescence parameters of cucumber seedling

F_v/F_m : PS II 最大光化学量子效率 PS II maximum photochemical quantum efficiency; $Y(II)$: 实际光化学量子效率 PS II actual photochemical quantum efficiency; qP : 光化学淬灭系数 Photochemical quenching coefficient; NPQ : 非光化学淬灭系数 Non-photochemical quenching coefficients. 下同 The same as follows.

2.6 不同盐碱水平对黄瓜幼苗光合参数影响

由图 7 可见,随盐碱胁迫程度的增加,蒸腾速率、净光合速率和气孔导度均下降,其中,T1—T8 处理叶片的蒸腾速率、净光合速率和气孔导度均显著低于 CK 处理。胞间 CO_2 浓度呈上升趋势,T2—T8 处理分别显著增加 8.14%、17.97%、18.88%、21.99%、27.96%、29.83%和 31.42%。由此可见,不同盐碱水平可降低蒸腾速率、净光合速率和气孔导度的同时增加胞间 CO_2 浓度。

2.7 不同盐碱水平对黄瓜抗氧化体系的影响

由图 8 可见,超氧化物歧化酶(SOD)活性在 T4 处理下 7 d 达到最高,与 CK 相比显著增加 10.49%;过氧化氢酶(CAT)活性在 T2—T8 处理下均显著下降。 H_2O_2 和丙二醛(MDA)含量分别在 T7 和 T6 处理下 7 d 达到最高,与 CK 相比显著增加 85.96%和 292.21%。

2.8 不同盐碱水平对黄瓜幼苗离子分布的影响

由图 9 可见,与对照相比, Na^+ 含量主要分布在植株根系当中。与对照相比,T1—T4 处理叶片中 Na^+ 含量降低,而 T6—T8 处理显著升高;在根系中 T1—T8 处理 Na^+ 含量均显著升高。与对照相比, K^+ 含量在植株叶片和根系当中随着盐碱浓度的增加均呈下降趋势。与对照相比, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量分别在 T3 或 T4 处理达到最大,其中,T3 处理 Ca^{2+} 含量在叶和根中分别增加 103.72%和 23.49%;T4 处理 Mg^{2+} 含量在叶中增加 8.83%;T4 处理 Mg^{2+} 含量在根中增加 7.07%。综上,在低盐碱胁迫下黄瓜幼苗通过叶片和根系中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量维持盐胁迫下黄瓜幼苗的离子平衡。

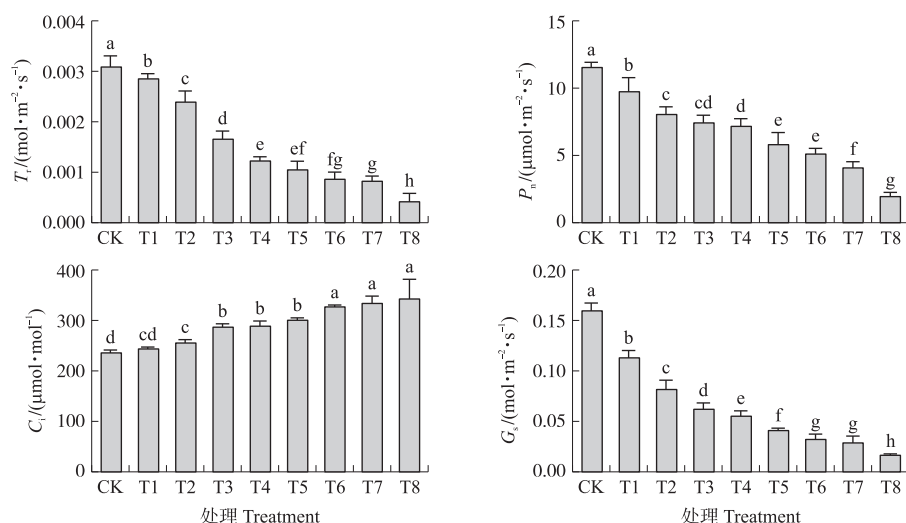


图7 不同盐碱水平对黄瓜幼苗光合参数的影响

Fig. 7 Effect of different levels of saline-alkali on photosynthetic parameters in cucumber seedling

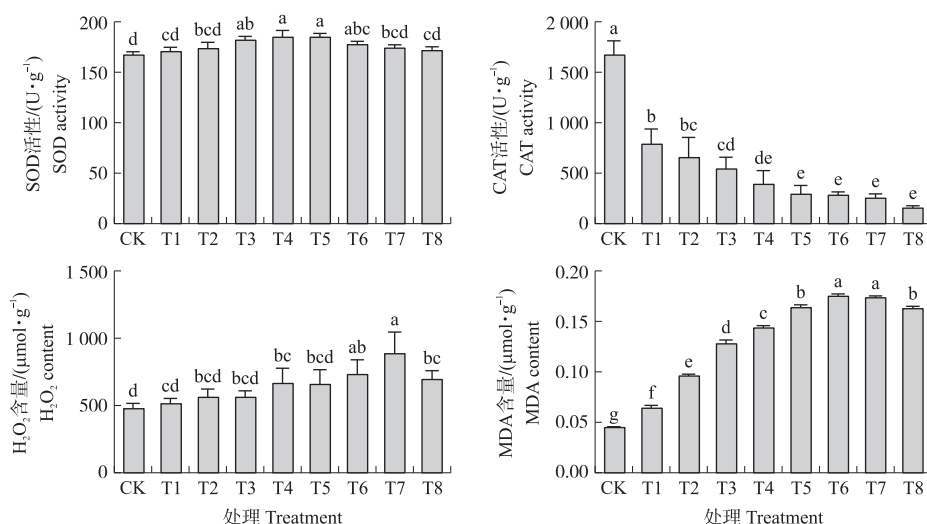


图8 不同盐碱水平对黄瓜幼苗抗氧化体系的影响

Fig. 8 Effect of different levels of saline-alkali on the antioxidant system in cucumber seedling

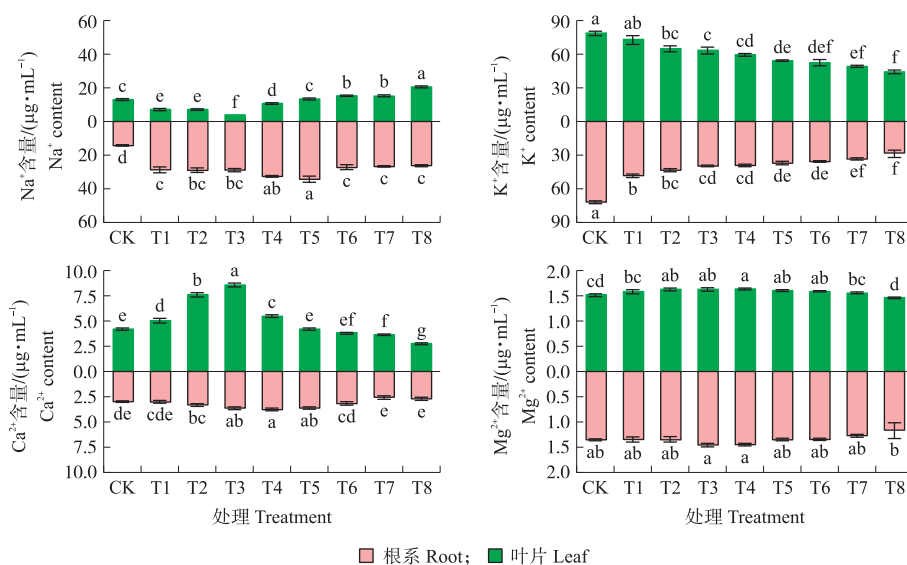


图9 不同盐碱水平对黄瓜幼苗离子分布的影响

Fig. 9 Effect of different levels of saline-alkali on the ion distribution in cucumber seedling

3 讨论与结论

3.1 不同盐碱水平对黄瓜幼苗植株生长的影响

作物不同生长期对耐盐碱表现存在差异,其中,苗期是作物对盐碱胁迫最敏感的阶段之一^[18]。有研究显示,盐碱胁迫抑制大豆幼苗的株高、根长、茎粗、根干重、根鲜重、叶干重、叶鲜重,表明盐碱胁迫能够抑制大豆幼苗生长,并影响幼苗干物质及鲜物质的积累^[19]。株高、茎粗、叶面积等是植株生长状况的直接反映^[20]。本研究中,随着盐碱程度的增加对黄瓜幼苗的株高、茎粗以及叶面积的抑制作用逐渐加重,并且随着处理时间的延长抑制作用更明显,这可能是由于盐碱程度越高的基质具有更强的渗透胁迫、离子胁迫危害以及更严重的胁迫^[21]。生物量是反映植物生长状况的重要指标。本研究结果表明,在不同盐碱水平下,黄瓜幼苗各部位的鲜物质以及干物质的分配均有所减少,不同盐碱水平处理对黄瓜幼苗叶片、茎、根系鲜重和干重低于对照处理,说明盐碱胁迫不利于黄瓜幼苗各部位鲜物质和干物质的积累,这与张碧茹等^[22]的研究结果一致。

植物根系形态决定了植物获取水分的能力,故根系的形态建成对植株生长发育至关重要^[23]。植物在盐碱胁迫条件下吸收过多的金属离子,从而破坏细胞内正常的离子平衡,干扰细胞生理生化代谢过程,影响各种酶的活性和功能,进而抑制植物的生长发育^[24]。本研究发现,不同盐碱水平下黄瓜幼苗的根长和根尖数均降低,且随着盐碱浓度的增加抑制作用更明显,这与王婷等^[25]在甜瓜上的研究结果一致;但是随着盐碱水平增加,根表面积、根体积、根平均直径以及根系活力在低浓度复合盐碱下提高,高浓度复合盐碱下降降低,这可能是在低浓度盐碱胁迫下植株通过提高根系活力来抵抗侵害,这与程贝等^[26]在番茄上的研究结果一致。

3.2 不同盐碱水平对黄瓜幼苗生理特性的影响

光合作用为植物的生长、发育和繁殖提供了物质和能量基础^[27]。叶绿素是植物进行光合作用的重要物质,与光能的吸收和转换密切相关^[28]。本试验中,随着盐碱水平的提高,叶绿素和类胡萝卜素的含量在低浓度复合盐碱下提高,而在高浓度复合盐碱下降降低,说明低浓度盐碱水平下植物通过提高光合色素含量来提高承受胁迫的能力,这与刘善江等^[29]的结果有所不同,但与李程^[30]在土壤次生盐渍化对黄瓜生长发育影响试验中得出的结论相似。本研究发现,在叶绿素荧光参数方面,T3处理PSⅡ实际光化学量子效率、光化学猝灭系数含量最大,故T3处理对叶绿素荧光参数的胁迫效应最为明显,可有效抵御环境胁迫带来的伤害,这与刘建等^[31]的研究结果一致。此外,不同盐碱水平能够抑制蒸腾速率、净光合速率以及气孔导度,这与巩志勇等^[8]研究结果一致。

本研究表明,随着混合盐碱处理浓度增大, H_2O_2 含量及膜脂氧化产物MDA含量均呈先上升后下降趋势,说明植株体内的 H_2O_2 与MDA含量可以作为潜在的盐碱胁迫鉴定指标。T7浓度胁迫下 H_2O_2 含量达到最大值,而T6处理MDA含量最大,这可能是因为MDA含量对盐碱胁迫的表现更敏感^[32-34]。在盐碱胁迫条件下,基质中含有大量的氯化钠、硫酸钠等盐类,植物的根系会吸收过多的 Na^+ 。导致 Na^+ 大量聚集而 K^+ 吸收困难,二者造成拮抗,产生离子毒害,植物的生长发育受到严重影响^[35]。同时,植物体内 Na^+ 与 Ca^{2+} 也存在离子拮抗作用, Na^+ 的大量积累抑制植物根系对 Ca^{2+} 的吸收, Ca^{2+} 不足会破坏细胞膜的选择透过性以及阻碍细胞膜上的信号转导^[36]。本试验结果表明,低浓度的盐碱胁迫下 Na^+ 的大量积累在根系,高浓度的盐碱胁迫下 Na^+ 含量逐渐在叶片中增加,而 K^+ 含量在叶片和根系中持续下降, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 含量均随盐碱水平的增加呈先增加后下降趋势,说明在低浓度下,植物体通过 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 含量来维持离子平衡。

综上所述,复合盐碱对黄瓜幼苗的生长生理特性均有不同程度的影响。低盐碱浓度T1—T3处理降低黄瓜幼苗的株高、茎粗、鲜重、干重、根尖数、蒸腾速率、净光合速率以及叶片 K^+ 含量比对照显著减少;高盐碱浓度处理T4—T8处理黄瓜幼苗总叶绿素、类胡萝卜素、叶片 Mg^{2+} 含量显著增加。主成分分析结果显示,株高、茎粗、鲜重、干重、根尖数、蒸腾速率、净光合速率以及叶片 K^+ 含量等指标可以作为T1—T3等低盐碱浓度处理的评价指标,总叶绿素、类胡萝卜素、叶片 Mg^{2+} 含量等指标可以作为T4—T8等高盐碱浓度处理的评价指标。

参考文献 References:

- [1] 翟彩娇,程玉静,仇亮,等. 瓜类作物对盐胁迫的响应及其耐盐性增强措施研究进展[J]. 江苏农业学报,2024,40(5):952-960.

- Zhai C J, Cheng Y J, Qiu L, et al. Research progress on the response of cucurbit crops to salt stress and the enhancement measures of salt tolerance[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2024, 40(5): 952–960 (in Chinese with English abstract).
- [2] 申佳丽, 魏彦凤, 丁增伟, 等. 蚯蚓粪与脱硫石膏配施对设施黄瓜连作障碍的效应研究[J]. 核农学报, 2024, 38(6): 1163–1174.
- Shen J L, Wei Y F, Ding Z W, et al. Effect of combined application of earthworm manure and desulfurization gypsum on continuous cropping obstacles of cucumber in facility[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(6): 1163–1174 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李荣, 焦志阳, 银珊珊, 等. 喷施褪黑素对黄瓜幼苗耐盐效应研究[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(1): 53–58.
- Li R, Jiao Z Y, Yin S S, et al. Effects of melatonin spraying on salt tolerance of cucumber seedlings[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(1): 53–58 (in Chinese with English abstract).
- [4] Liu D R, Dong S Y, Bo K L, et al. Identification of QTLs controlling salt tolerance in cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings[J]. Plants, 2021, 10(1): 85.
- [5] 沈季雪, 蒋景龙, 田云, 等. NaCl 胁迫对黄瓜幼苗生长及细胞膜透性的影响[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(8): 19–24.
- Shen J X, Jiang J L, Tian Y, et al. Effects of NaCl stress on growth and cell membrane permeability of cucumber seedlings[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, 44(8): 19–24 (in Chinese with English abstract).
- [6] 徐婷, 李锁丞, 王海江, 等. 盐碱胁迫下花生生长及生理特性的研究[J]. 西北农业学报, 2023, 32(6): 866–877.
- Xu T, Li S C, Wang H J, et al. Study on growth and physiological characteristics of peanut under saline-alkali stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2023, 32(6): 866–877 (in Chinese with English abstract).
- [7] 冯凯月, 赵鑫焱, 李子妍, 等. 植物响应盐碱胁迫的分子机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2024, 40(10): 122–138.
- Feng K Y, Zhao X Y, Li Z Y, et al. Research advances in the molecular mechanisms of plant response to saline-alkali stress[J]. Biotechnology Bulletin, 2024, 40(10): 122–138 (in Chinese with English abstract).
- [8] 巩志勇, 辛建华, 商小雨, 等. 盐碱胁迫下香椿幼苗光合及抗逆生理特性[J]. 西北植物学报, 2021, 41(7): 1199–1209.
- Gong Z Y, Xin J H, Shang X Y, et al. Photosynthetic characteristics and stress tolerance physiology of *Toona sinensis* seedlings under saline-alkali stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(7): 1199–1209 (in Chinese with English abstract).
- [9] Dou J H, Tang Z Q, Yu J H, et al. Effects of exogenous melatonin on the growth and photosynthetic characteristics of tomato seedlings under saline-alkali stress[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 5172.
- [10] 白晶芝, 赵源, 吴凤芝. 盐碱胁迫对黄瓜嫁接苗根际土壤细菌和真菌群落结构及丰度的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1626–1635.
- Bai J Z, Zhao Y, Wu F Z. Effects of saline-alkali stress on structure and abundance of bacteria/fungi community in rhizosphere soil of grafted cucumber seedlings[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(11): 1626–1635 (in Chinese with English abstract).
- [11] 吴鹏, 吕剑, 郁继华, 等. 褪黑素对盐碱复合胁迫下黄瓜幼苗光合特性和渗透调节物质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1901–1910.
- Wu P, Lü J, Yu J H, et al. Effects of melatonin on photosynthetic properties and osmoregulatory substance contents of cucumber seedlings under salt-alkali stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1901–1910 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李锡香, 朱德蔚. 黄瓜种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- Li X X, Zhu D W. Descriptors and Data Standard for Cucumber[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese).
- [13] 曹齐卫, 杜连达, 杨宗辉, 等. 黄瓜耐盐种质资源的筛选与评价[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 865–875.
- Cao Q W, Du L D, Yang Z H, et al. Screening and evaluation of cucumber salt-tolerant germplasm[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(5): 865–875 (in Chinese with English abstract).
- [14] 门立志, 王毅, 曹云娥, 等. 不同黄瓜品种苗期耐盐性指标筛选与评价体系构建[J]. 中国蔬菜, 2013(22): 20–26.
- Men L Z, Wang Y, Cao Y E, et al. Salt tolerance indexes screening of different cucumber cultivars at seedling stage and construction of its evaluation system[J]. China Vegetables, 2013(22): 20–26 (in Chinese with English abstract).
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Gao J F. Experimental Guidance for Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese).
- [16] 陆欣, 谢英荷. 土壤肥料学[M]. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
- Lu X, Xie Y H. Soil and Fertilizer Science[M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2011 (in Chinese).
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [18] 高彩婷, 刘景辉, 张玉芹, 等. 短期盐胁迫下燕麦幼苗的生理响应[J]. 草地学报, 2017, 25(2): 337–343.
- Gao C T, Liu J H, Zhang Y Q, et al. Physiological responses of oats seedlings to short-term salt stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(2): 337–343 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张欣林, 李思琪, 国爽, 等. *N*-乙酰-*L*-半胱氨酸缓解盐碱胁迫对大豆幼苗生长抑制[J]. 大豆科学, 2025, 44(1): 96–105.
- Zhang X L, Li S Q, Guo S, et al. *N*-acetyl-*L*-cysteine alleviates the inhibition of salt alkali stress on the growth of soybean seedlings[J]. Soybean Science, 2025, 44(1): 96–105 (in Chinese with English abstract).
- [20] Bi Y P, Zhou B B, Ren P Q, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on cotton physiology and growth under water and salt stress[J]. Agricultural Water Management, 2024, 303: 109038.
- [21] Lv B S, Li X W, Ma H Y, et al. Differences in growth and physiology of rice in response to different saline-alkaline stress factors[J]. Agronomy

- Journal, 2013, 105(6): 1889.
- [22] 张碧茹, 米俊珍, 赵宝平, 等. 盐碱胁迫下燕麦幼苗生长生理差异及耐盐碱阈值[J]. 西北农业学报, 2024, 33(10): 1849–1857.
Zhang B R, Mi J Z, Zhao B P, et al. Physiological difference and saline-alkali tolerance threshold of oat seedlings under saline-alkali stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024, 33(10): 1849–1857 (in Chinese with English abstract).
- [23] 马凤捷, 杨春胤, 宿翠翠, 等. 蚯蚓粪和微生物菌剂互作对蜜瓜生长和土壤养分的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2023(9): 25–34.
Ma F J, Yang C Y, Su C C, et al. Effects of interaction between vermicompost and microbial agents on growth of honey dew melon and soil nutrients[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(9): 25–34 (in Chinese with English abstract).
- [24] 罗达, 宋锋惠, 卢明艳, 等. 盐胁迫对平欧杂种榛根系生理生化特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(4): 29–33, 45.
Luo D, Song F H, Lu M Y, et al. Effects of salt stress on the physiological and biochemical characteristics of Pingou hybrid hazelnut root systems[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(4): 29–33, 45 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王婷, 王玉州, 王梦珂, 等. 两个甜瓜品种芽苗期对盐碱胁迫的响应及耐性差异[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(1): 57–64.
Wang T, Wang Y Z, Wang M K, et al. Differences in salt alkali stress response and tolerance between two melon varieties during bud seedling stage[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025, 38(1): 57–64 (in Chinese with English abstract).
- [26] 程贝, 王卫华. 水培番茄侧根对盐胁迫的响应[J]. 中国蔬菜, 2019(8): 47–53.
Cheng B, Wang W H. Response of tomato lateral root to salt stress under hydroponic condition[J]. China Vegetables, 2019(8): 47–53 (in Chinese with English abstract).
- [27] 方怡然, 薛立. 盐胁迫对植物叶绿素荧光影响的研究进展[J]. 生态科学, 2019, 38(3): 225–234.
Fang Y R, Xue L. Research advances in the effect of salt stress on plant chlorophyll fluorescence[J]. Ecological Science, 2019, 38(3): 225–234 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王晓蕾, 张云鹤, 牟金猛, 等. 苏打盐碱胁迫对水稻光合特性及产量的影响[J]. 作物杂志, 2024(1): 193–203.
Wang X L, Zhang Y H, Mu J M, et al. Effects of soda and saline-alkali stress on photosynthetic characteristics and yield of rice[J]. Crops, 2024(1): 193–203 (in Chinese with English abstract).
- [29] 刘善江, 马笑蕊. 不同氯离子浓度对黄瓜生长的影响[J]. 北京农业科学, 2000(6): 31–32, 34.
Liu S J, Ma X R. Effects of different chloride ion concentrations on cucumber growth[J]. Beijing Agricultural Sciences, 2000(6): 31–32, 34 (in Chinese).
- [30] 李程. 宁夏日光温室土壤次生盐渍化对黄瓜生长发育影响的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
Li C. Study on the effect of secondary salinization of soil on the growth and development of cucumber in solar greenhouse in Ningxia[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [31] 刘建, 齐宝林, 于洪柱, 等. 盐碱胁迫对3种柳枝稷生长性状、叶片性状及叶绿素荧光特性的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2023(1): 85–91.
Liu J, Qi B L, Yu H Z, et al. Effects of saline alkali stress on growth traits, leaf traits and chlorophyll fluorescence of three switchgrass species[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2023(1): 85–91 (in Chinese with English abstract).
- [32] Xu Z J, Wang F, Ma Y B, et al. Transcription factor SlAREB1 is involved in the antioxidant regulation under saline-alkaline stress in tomato[J]. Antioxidants, 2022, 11(9): 1673.
- [33] 张楠, 张鹤, 白百一, 等. 不同耐受型花生品种对盐胁迫的生理响应及其产量差异[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(2): 129–137.
Zhang N, Zhang H, Bai B Y, et al. Physiological responses and yield differences of different tolerant peanut cultivars to salt stress[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2): 129–137 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王硕, 杨钧汇, 徐静婷, 等. 番茄生长素外排载体基因 *SIPIN8* 在抵抗盐胁迫中的功能[J]. 东北农业大学学报, 2025, 56(6): 52–62.
Wang S, Yang J H, Xu J T, et al. Function of tomato auxin transporter gene *SIPIN8* in resistance to salt stress[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2025, 56(6): 52–62 (in Chinese with English abstract).
- [35] 靳娟, 王依, 鲁晓燕, 等. NaCl 胁迫对酸枣幼苗离子吸收与分配的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(5): 853–862.
Jin J, Wang Y, Lu X Y, et al. Effects of NaCl stress on ion absorption and distribution in sour jujube seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2015, 42(5): 853–862 (in Chinese with English abstract).
- [36] 闫道良, 朱祥龙, 杨巧玲, 等. 盐胁迫对香菇草克隆生长及其钠、钾离子平衡的影响[J]. 浙江林业科技, 2014, 34(2): 1–4.
Yan D L, Zhu X L, Yang Q L, et al. Effect of salt stress on the clonal growth and accumulation of Na^+ , K^+ in *Hydrocotyle vulgaris* [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2014, 34(2): 1–4 (in Chinese with English abstract).

责任编辑: 范雪梅