

刘梓桐, 金 宁, 孟 鑫, 等. 硅肥对番茄生长及基质理化性质的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(10): 1914-1922.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.10.016

硅肥对番茄生长及基质理化性质的影响

刘梓桐, 金 宁, 孟 鑫, 金 莉, 徐之奇, 王莹莹, 张富鑫, 郁继华, 吕 剑
(甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了明确施用硅肥对基质栽培番茄植株生长的影响, 本试验以京番 501 号番茄为试验材料, 研究根施不同浓度硅肥对番茄生长、生理生化特性、基质酶活性和理化性状的影响。结果表明, 与不施用外源硅对照(CK)相比, 根施 1 mmol/L 的硅肥可以显著提高番茄植株株高、茎粗和叶面积, 显著提高叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量; 抑制番茄叶片超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)、丙二醛和脯氨酸积累; 显著提高过氧化物酶和过氧化氢酶活性。同时, 根施 1 mmol/L 硅肥, 基质蔗糖酶、磷酸酶活性均显著高于 CK。结合主成分分析, 根施 1 mmol/L 硅肥可通过提高光合色素含量、抗氧化酶活性和土壤酶活性, 降低番茄膜脂过氧化, 同时改善基质理化性质, 有效促进番茄生长发育。本研究结果可为基质栽培番茄的高效管理提供科学依据。

关键词: 番茄; 硅肥; 生理生化; 基质理化性质

中图分类号: S143.7; S641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2024)10-1914-09

Effects of silicon fertilizer on tomato growth and physicochemical properties of substrate

LIU Zitong, JIN Ning, MENG Xin, JIN Li, XU Zhiqi, WANG Yingying, ZHANG Fuxin, YU Jihua, LYU Jian

(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to clarify the effects of silicon fertilizer on the growth of tomato plants cultivated in substrates, this study used Jingfan 501 tomato as the experimental material to study the effects of root application of different concentrations of silicon fertilizer on tomato growth, physiological and biochemical characteristics, substrate enzyme activity and physical and chemical properties. The results showed that compared with no exogenous silicon control (CK), root application of 1 mmol/L silicon fertilizer could significantly increase the plant height, stem diameter and leaf area of tomato plants, significantly increase the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll, inhibit the accumulation of superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$), malondialdehyde and proline in tomato leaves, and significantly increase the activities of peroxidase and catalase. At the same time, the activities of sucrase and phosphatase in the substrate treated with 1 mmol/L silicon fertilizer were significantly higher than those in CK. Combined with principal component analysis, root application of 1 mmol/L silicon

fertilizer could effectively promote tomato growth and development by increasing photosynthetic pigment content, antioxidant enzyme activity and soil enzyme activity, reducing tomato membrane lipid peroxidation, and improving the physical and chemical properties of the substrate. The results of this study can provide a scientific basis for the efficient management of tomatoes cultivated in substrates.

Key words: *Solanum lycopersicum* L.; silicon fertilizer; physiology and biochemistry; substrate physico-

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 甘肃省科技重大专项(22ZD6NA009); 甘肃省拔尖领军人才培养计划项目(GSBJLJ-2021-14); 中央引导地方科技发展专项(23ZYQA0322); 甘肃农业大学伏羲青年英才项目(GAUFx-04Y03); 甘肃省优秀博士生项目(22JR5RA842)

作者简介: 刘梓桐(2000-), 女, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜学研究。(E-mail) liuzitong2000@126.com

通讯作者: 吕 剑, (E-mail) lvjiangs@126.com

chemical properties

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)果实风味浓郁,富含维生素C、胡萝卜素、番茄红素等营养物质。目前中国种植的番茄年产量超过 5.5×10^7 t,占世界总产量的30%以上,位居世界第一^[1]。设施栽培是中国番茄栽培的主要方式^[2]。随着现代农业发展及蔬菜产品需求量的持续增加,有机基质无土栽培因不受土壤条件限制已经成为许多设施生产的主要栽培方式^[3]。有机基质主要由有机废弃物如秸秆、椰糠、菇渣、稻壳、腐叶、锯末、畜禽粪便等经发酵或高温处理而成^[4-5]。近年来在中国西北戈壁、荒漠等非耕地区域大面积应用基质栽培,该技术可实现完全不依赖土壤,然而,基质栽培作为一种根域限制性栽培方式,其根际环境对水分、盐度、温度等因子的缓冲能力较差,基质理化性质波动大,稳定性不足,对植株的生长、果实品质和产量影响较大,且长期单一栽培模式会造成养分失调、基质理化性质恶化、微生态环境改变和病虫害加剧等问题^[6]。

硅(Si)在地壳中的含量仅次于氧,居第2位,是自然界第8大元素^[7],在植物生态系统中主要分布在植被、土壤有机质、土壤矿物质和土壤溶液中。土壤中有有效Si的含量仅有50~250 mg/kg,全球每年有 2.10×10^{10} ~ 2.40×10^{10} t Si被植物吸收^[8]。Si在提高作物抗逆性^[9-10]、增加产量和改善品质等方面发挥着重要作用^[11]。通过增施Si肥能够增加土壤有机质含量、全氮含量和阳离子交换量,促进水稻茎叶和籽粒中养分的积累,以及有效穗数和穗粒数的增加,从而促进水稻增产^[12]。在经济作物栽培中,施用液态Si肥后韭菜中总多酚、总黄酮、可溶性蛋白质和可溶性糖的含量均显著增加^[13]。此外,Si肥的应用还可以提高烟叶香气物质含量和香气质量,有效降低烟碱含量,降低病害发生率,提高烟叶产量^[14]。在番茄上的研究表明,Si肥有明显的增产效果,可减轻病害和白粉虱的危害,有效提高果实品质^[15]。

综上,硅对土壤栽培条件下植物的有益作用在多种作物上已被证实^[16-18],但是在基质无土栽培条件下施用效果鲜有报道。因此,本试验以京番501号番茄品种为试验材料,探究不同浓度Si肥对基质栽培条件下番茄生长、生理生化和基质理化性质的影响,以期对番茄基质无土栽培模式的优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在甘肃农业大学玻璃温室和园艺学院设施作物栽培生理实验室进行。京番501号属于红果番茄杂交种,中早熟,无限生长型,长势强,株形清秀,果实圆形,色泽亮丽,果实硬度高,连续坐果能力强,丰产稳产性好。种子购自京研益农种业有限公司。外源硅为九水偏硅酸钠($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$),购自上海源叶生物科技有限公司。栽培基质由炉渣、菌渣、牛粪、鸡粪、玉米秸秆按体积比13:5:5:2:14混合而成。基质总钾含量为11.78 g/kg,总磷含量为1.31 g/kg,总氮含量为0.51 g/kg,有效磷含量为82.81 mg/kg,有效钾含量为63.17 mg/kg,电导率(EC)为1 683.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$,pH值为6.37。

1.2 试验设计

挑选饱满一致的番茄种子进行55℃温汤浸种,然后置于28℃气候箱黑暗条件下催芽,80%种子露白后挑选发芽整齐一致的种子播于50孔育苗穴盘中,每穴播种1~2粒,苗期进行常规管理,待植株长出4~5片真叶后选择长势一致的植株定植于栽培基质中。试验一共设置5个处理,硅(Si)施用浓度分别为0 mmol/L(CK)、1 mmol/L(A)、2 mmol/L(B)、3 mmol/L(C)、4 mmol/L(D),每个处理20株。采用根施方式,每隔5 d每株浇灌1 L偏硅酸钠溶液。温室每天进行通风换气,监测室内温度,预防番茄幼苗染病,确保植株健康生长。每隔7 d对番茄植株株高、茎粗、叶面积进行测量,共检测3次(检测日期分别为2023年7月25日、2023年8月1日和2023年8月8日),从第1次施硅肥后的第30 d取样进行各项指标的测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标的测定 每个重复随机选取5株番茄幼苗,用直尺测量株高,从子叶下方1 cm处至植株生长点进行测量;用电子游标卡尺测量茎粗,从子叶下方1 cm处测量;用直尺测量叶片长(L)和宽(W),并按公式计算叶面积($A = 14.16 - 5.0 \times L + 0.94 \times L^2 + 0.47 \times W + 0.63 \times W^2 - 0.62 \times L \times W$ ^[19]);将番茄新鲜幼苗在105℃杀青15 min,75℃烘干至恒重后测量幼苗干重。

1.3.2 生理生化指标的测定 应用邹奇^[20]的方法检测光合色素含量,采用羟氨氧化法测定超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)含量^[21],采用 Su 等^[22]的方法测定过氧化氢(H_2O_2)含量,采用 TBA 法(硫代巴比妥酸法)测定丙二醛(MDA)含量,采用磺基水杨酸提取法测定脯氨酸(Pro)含量^[23-24],采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[25]。

1.3.3 基质酶活性和理化性质的测定 基质碱性磷酸酶活性采用对硝基苯酚钠比色法测定,基质脲酶活性采用苯酚钠比色法测定,基质蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[26]。基质容重与孔隙度采用环刀法测定^[27],pH 和电导率(EC)分别用 pHS-25 型 pH 计和雷磁 DDBJ-350F 型电导率测定仪进行测定。

1.4 数据分析

利用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件处理分析数

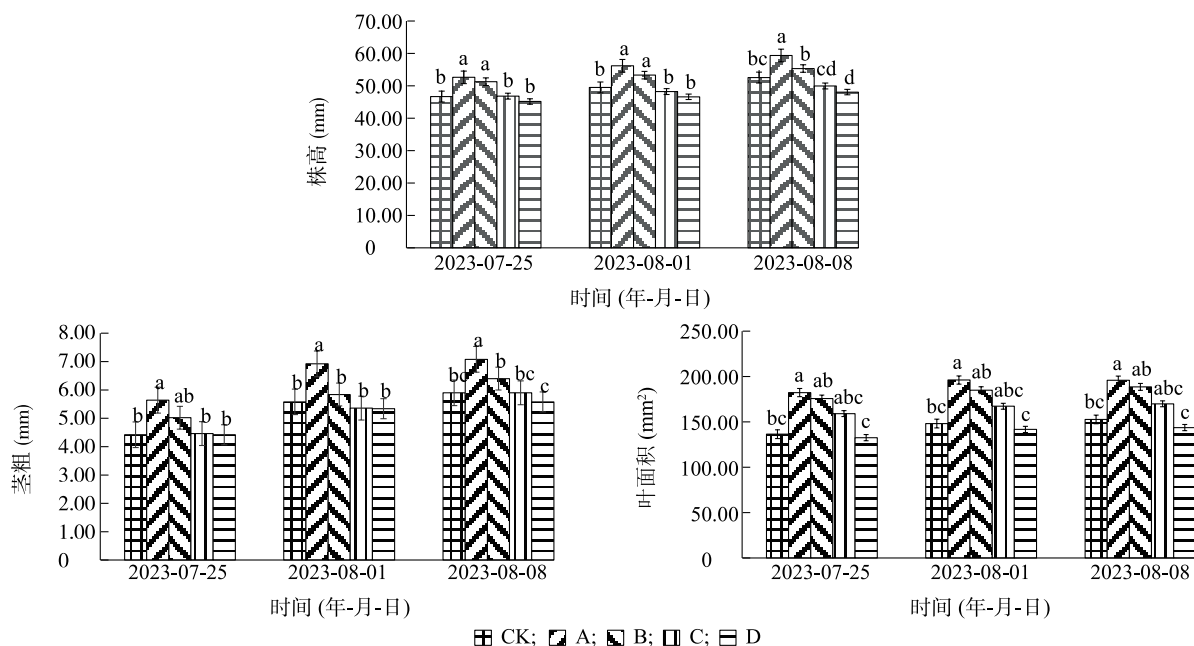
据,采用 Duncan's 多重比较法进行统计分析和差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 硅肥对番茄幼苗生长的影响

2.1.1 硅肥对番茄幼苗株高、茎粗和叶面积的影响

由图 1 可知,番茄植株的株高、茎粗和叶面积随着硅浓度的逐渐增加呈现出先上升后下降的趋势。相较于 CK, A 处理所测定的 3 次株高显著提高了 12.72%、13.54%、12.98%;茎粗显著提高了 27.60%、24.01%、20.00%;叶面积显著增加了 33.56%、32.37%、28.30%。说明较低浓度的硅(1 mmol/L)促进番茄植株生长效果较好,而 3~4 mmol/L 的硅浓度对番茄植株并无显著的促进作用。



CK:对照(不添加外源硅处理);A:硅浓度为 1 mmol/L;B:硅浓度为 2 mmol/L;C:硅浓度为 3 mmol/L;D:硅浓度为 4 mmol/L。同一检测日期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 1 硅肥对番茄幼苗株高、茎粗和叶面积的影响

Fig.1 Effects of silicon fertilizer on plant height, stem diameter and leaf area of tomato seedlings

2.1.2 硅肥根施对番茄根和地上部干鲜重的影响

由表 1 可知,番茄根和地上部干、鲜重随硅浓度的增加呈先增加后降低趋势,A 处理地上部干重和地上部鲜重相较于 CK 分别显著增加 57.79% 和 19.31%,根干重和根鲜重相较于 CK 分别显著增加

41.88% 和 55.16%;B 处理番茄地上部干重与 CK 相比也显著增加 36.63%。

2.2 硅肥对番茄叶片光合色素含量的影响

由表 2 可知,A 处理叶片光合色素含量为各组中最高,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量分别较

CK 显著提高了 7.41%、39.22% 和 20.71%。综上所述可知,1 mmol/L 硅肥处理有利于番茄叶片光合色素的合成。

表 1 硅肥对番茄植株干鲜重的影响

Table 1 Effects of silicon fertilizer on dry weight and fresh weight of tomato plants

处理	根鲜重(g, 1 株)	地上部鲜重(g, 1 株)	根干重(g, 1 株)	地上部干重(g, 1 株)
CK	7.85±0.97b	86.08±5.14b	1.17±0.11b	9.50±0.53c
A	12.18±0.79a	102.70±3.77a	1.66±0.12a	14.99±0.59a
B	9.50±0.92ab	90.05±1.28b	1.29±0.10ab	12.98±0.73b
C	8.83±0.32b	84.30±5.73b	1.23±0.07ab	9.54±0.53c
D	7.70±0.48b	79.48±5.96b	1.05±0.21b	9.09±0.54c

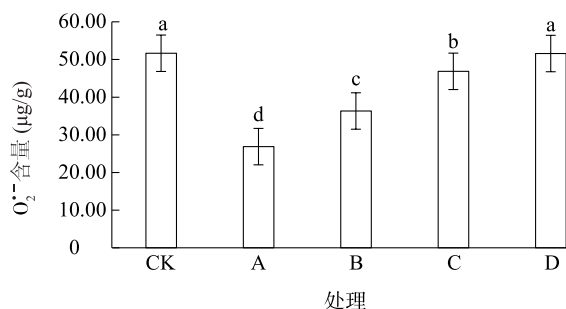
CK:对照(不添加外源硅处理);A:硅浓度为 1 mmol/L;B:硅浓度为 2 mmol/L;C:硅浓度为 3 mmol/L;D:硅浓度为 4 mmol/L。表中数据为平均值±标准差。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 2 硅肥对番茄叶片光合色素含量的影响

Table 2 Effects of silicon fertilizer on photosynthetic pigment content in tomato leaves

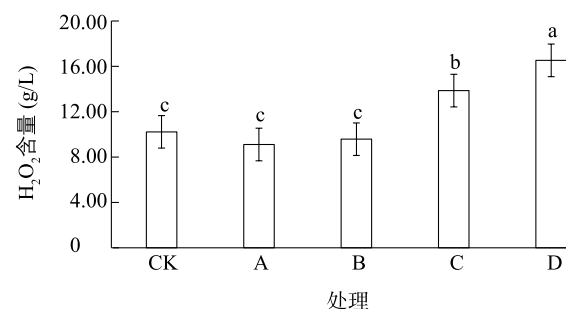
处理	叶绿素 a 含量 (mg/g, FW)	叶绿素 b 含量 (mg/g, FW)	总叶绿素含量 (mg/g, FW)
CK	1.35±0.01b	0.51±0.02b	1.98±0.03b
A	1.45±0.03a	0.71±0.09a	2.39±0.14a
B	1.35±0.03b	0.59±0.03ab	1.99±0.02b
C	1.33±0.02b	0.58±0.02ab	1.96±0.04b
D	1.36±0.04b	0.53±0.05b	1.97±0.08b

CK:对照(不添加外源硅处理);A:硅浓度为 1 mmol/L;B:硅浓度为 2 mmol/L;C:硅浓度为 3 mmol/L;D:硅浓度为 4 mmol/L。表中数据为平均值±标准差。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。



2.3 硅肥对番茄膜脂过氧化和抗氧化系统的影响

2.3.1 硅肥对番茄叶片 H₂O₂ 和 O₂⁻ 含量的影响 根施硅肥对番茄 H₂O₂ 及 O₂⁻ 的影响如图 2 所示, A~D 处理的番茄叶片 O₂⁻ 和 H₂O₂ 含量随硅浓度的增加呈上升趋势。与 CK 相比, A、B、C 处理显著降低了番茄叶片 O₂⁻ 含量, 其中 A 处理 O₂⁻ 含量较 CK 显著降低 48.00%。但随着硅浓度增加, O₂⁻ 和 H₂O₂ 含量逐渐回升, C 处理和 D 处理的 H₂O₂ 含量与 CK 相比显著上升 35.55% 和 61.65%。



CK:对照(不添加外源硅处理);A:硅浓度为 1 mmol/L;B:硅浓度为 2 mmol/L;C:硅浓度为 3 mmol/L;D:硅浓度为 4 mmol/L。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图 2 硅肥对番茄叶片 H₂O₂ 和 O₂⁻ 含量的影响

Fig.2 Effects of silicon fertilizer on the contents of H₂O₂ and O₂⁻ in tomato leaves

2.3.2 硅肥对番茄叶片 MDA 和 Pro 含量的影响

由图 3 可知, A~C 处理随着硅浓度的增加番茄叶片 MDA 含量逐渐上升, 随后保持平稳; A~D 处理随着硅浓度的增加, 番茄叶片 Pro 含量呈升高的趋势。各处理 MDA 含量相较于 CK 分别显著下降了 33.85%、17.71%、15.10%、15.10%; A 处理 Pro 含

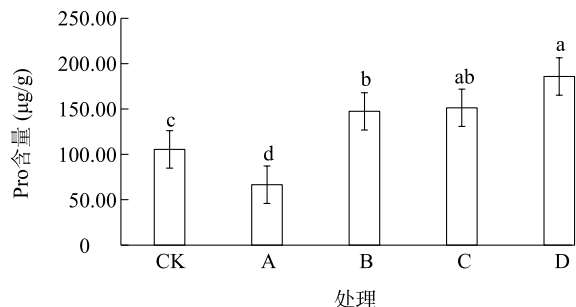
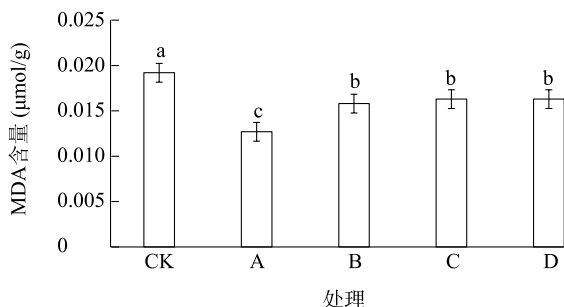
量较 CK 显著降低了 36.82%, B、C、D 处理与 CK 相比反而显著提高了番茄叶片 Pro 含量, 增幅分别为 39.81%、43.57% 和 76.35%。

2.3.3 硅肥对番茄叶片 CAT 和 POD 活性的影响

由图 4 可知, 随着硅浓度升高 CAT 和 POD 活性呈先升高后降低的趋势。与 CK 相比, 根施 Si 肥各处理

CAT 和 *POD* 活性均以 A 处理最高,与 CK 相比增幅分别为 55.72%和 75.62%,B 处理 *POD* 活性较 CK 显著上升 64.31%,C 处理和 D 处理 *CAT* 和 *POD* 活

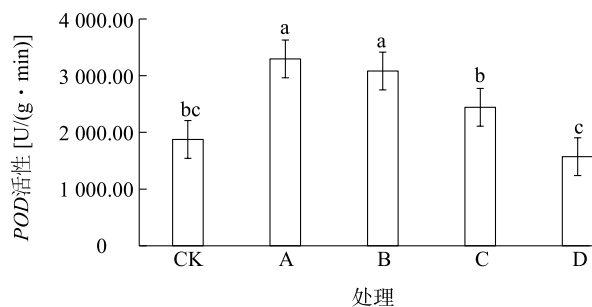
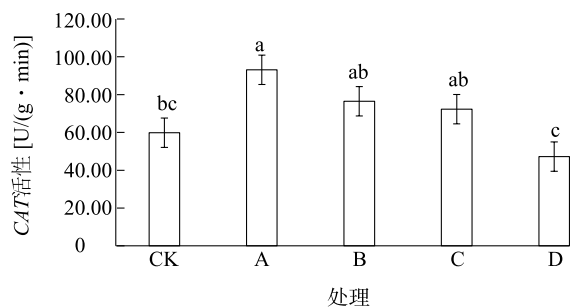
性与 CK 相比无显著差异。综上可知,根施 1 mmol/L 硅肥有利于提高番茄叶片抗氧化酶活性。



CK: 对照 (不添加外源硅处理); A: 硅肥浓度为 1 mmol/L; B: 硅浓度为 2 mmol/L; C: 硅浓度为 3 mmol/L; D: 硅浓度为 4 mmol/L。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 硅肥对番茄叶片丙二醛 (MDA) 和 Pro 含量的影响

Fig.3 Effects of silicon fertilizer on the contents of malondialdehyde (MDA) and proline (Pro) in tomato leaves



CK: 对照 (不添加外源硅处理); A: 硅浓度为 1 mmol/L; B: 硅浓度为 2 mmol/L; C: 硅浓度为 3 mmol/L; D: 硅浓度为 4 mmol/L。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 硅肥对番茄叶片过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 活性的影响

Fig.4 Effects of silicon fertilizer on the activities of catalase (CAT) and peroxidase (POD) in tomato leaves

2.4 硅肥对基质酶活性的影响

如图 5 所示,随着硅浓度升高蔗糖酶活性和磷酸酶活性呈现先上升后下降的趋势。A、B 处理的基质蔗糖酶活性较 CK 分别显著增加 93.80%、34.84%,但 D 处理的蔗糖酶活性较 CK 显著降低。与 CK 相比,A~D 处理磷酸酶活性均显著提高,增幅分别为 72.52%、46.16%、44.79%、44.18%,且 A 处理的磷酸酶活性最高。脲酶活性整体处于 1.58~1.82 mg/g 区间内,A~C 处理脲酶活性与 CK 无显著差异,D 处理脲酶活性显著低于 CK,由此可见,当硅浓度为 4 mmol/L 时,对脲酶活性呈现一定程度的抑制作用。

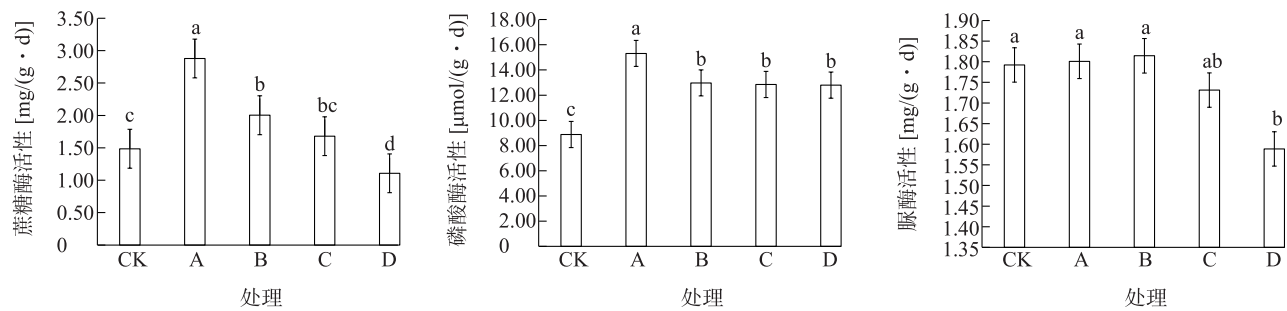
2.5 硅肥对基质理化性质的影响

由表 3 可知,B、D 处理 EC 值较 CK 分别显著增

加了 47.99%、78.05%。A~D 处理均显著提高了基质的孔隙度和容重,其中孔隙度相较于 CK 提高了 41.98%~75.12%;容重相比 CK 提高了 7.04%~11.28%。

2.6 硅肥对番茄植株生理生化及基质性质影响的主成分分析

2.6.1 硅肥对番茄植株影响的主成分分析 图 6 为基于主成分分析的不同浓度硅对番茄植株生理生化指标的分类模型。使用 PCA 对变量分离进行了研究,并突出区分 5 个处理的生理生化指标差异,可见两个主成分解释了 92.3% 的总方差,其中 PC1 和 PC2 分别占 84.3% 和 8.0%。基于番茄植株生理生化指标 5 个处理被良好分离,CK 以及 C、D、A、B 处理被 PC1 明显分离。



CK: 对照(不添加外源硅处理); A: 硅浓度为 1 mmol/L; B: 硅浓度为 2 mmol/L; C: 硅浓度为 3 mmol/L; D: 硅浓度为 4 mmol/L。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 硅肥对基质酶活性的影响

Fig.5 Effects of silicon fertilizer on substrate enzyme activities

表 3 硅肥对基质理化性质的影响

Table 3 Effects of silicon fertilizer on physicochemical properties of substrates

处理	EC 值 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	孔隙度 (%)	容重 (g/cm^3)
CK	764.00 \pm 95.13bcd	6.67 \pm 0.15ab	46.35 \pm 0.01c	0.71 \pm 0.72c
A	1 091.67 \pm 139.74abc	6.33 \pm 0.44b	65.81 \pm 0b	0.79 \pm 0.79a
B	1 130.67 \pm 77.59a	6.71 \pm 0.16ab	73.45 \pm 0.01ab	0.77 \pm 0.755ab
C	1 093.67 \pm 185.05ab	6.70 \pm 0.20ab	80.86 \pm 0a	0.76 \pm 0.74b
D	1 360.33 \pm 298.03a	6.86 \pm 0.06a	81.17 \pm 0a	0.76 \pm 0.74b

CK: 对照(不添加外源硅处理); A: 硅浓度为 1 mmol/L; B: 硅浓度为 2 mmol/L; C: 硅浓度为 3 mmol/L; D: 硅浓度为 4 mmol/L。表中数据为平均值 \pm 标准差。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

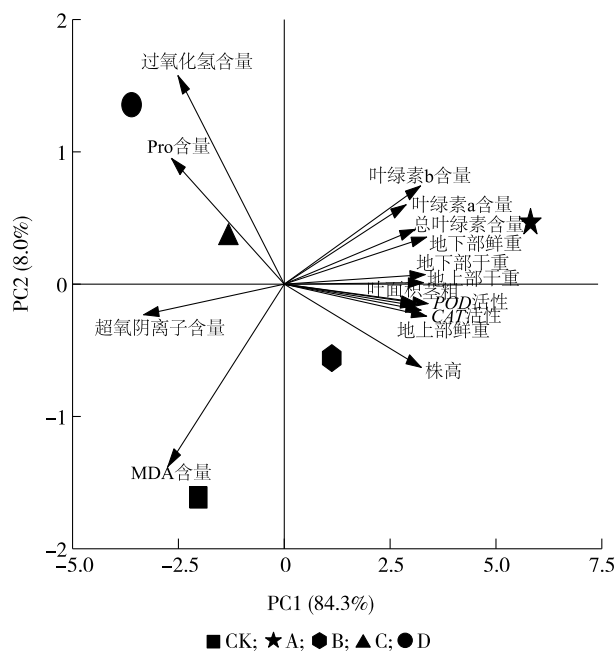
2.6.2 硅肥对基质理化性质和酶活性的主成分分析 图 7 为基于主成分分析的不同浓度硅根施下基质理化性质和酶活性的分类模型。使用 PCA 对变量分离进行了研究,并突出区分 5 个处理的基质理化性质和酶活性差异,可见两个主成了解释了 94.4% 的总方差,其中 PC1 和 PC2 分别占 49.6% 和 44.8%。基于基质理化性质和酶活性指标 5 个处理被明显分离,CK 和 A、B、C、D 处理被 PC1 明显分离。

3 讨论

据报道,合理施用硅肥可以减轻植物中的一些非生物胁迫因素的压力,包括干旱、盐胁迫、重金属毒性和养分失衡^[28],同时在促进作物生长发育和增产方面也有不同程度的效果。因此,本试验采用基质栽培,研究根施不同浓度硅对番茄幼苗的生理生化指标及基质理化性质的影响。结果表明,根施 1 mmol/L 硅可显著提高番茄株高、茎粗和叶面积,增强植株长势。陶建波等^[29]的研究结果表明,适量施用硅肥对苦荞形态的改良有非常好的效果,可以显著增加苦荞茎秆抗折力,降低株高、中心高,有效增

加茎秆壁厚度,提高茎秆机械强度,使苦荞抗倒伏能力大大增强。本研究同样观察到,根施 1 mmol/L 的硅显著增加了番茄的茎粗。陈卓等^[30]在辣椒上的研究表明,在正常田间管理的基础上加施硅肥后可使辣椒植株生长旺盛、果实发育良好,植株开展度、单果重以及结果数都有显著增加。在本研究中,根施浓度为 1 mmol/L 硅与 CK 相比,显著提高了番茄植株的地上和地下部分干、鲜重。但当硅浓度达到 3~4 mmol/L 时,对番茄植株干、鲜重的影响不理想,甚至出现抑制作用,这与小麦^[31]、玉米^[32]、黄瓜^[33-34]上的研究结果一致,可见外源硅对植物存在剂量效应,施用适量外源硅可以促进番茄生长,施用过量则会抑制其生长,不过硅肥施用的剂量效应是否与番茄植株吸收硅的能力有关,有待进一步研究。

脂质过氧化是活性氧(ROS)与生物膜的一系列复杂的氧化反应,是改变生物膜结构和功能的过程^[35]。正常条件下,通过植物自身的调节,其体内 ROS 含量处于平衡状态,不易发生膜脂过氧化现象。但在外界环境条件变得恶劣时,植物体内 ROS 含量会迅速上升,抗氧化酶活性下降,导致细胞膜脂质过氧化^[36-37],一系列生理生化代谢紊乱,植株生



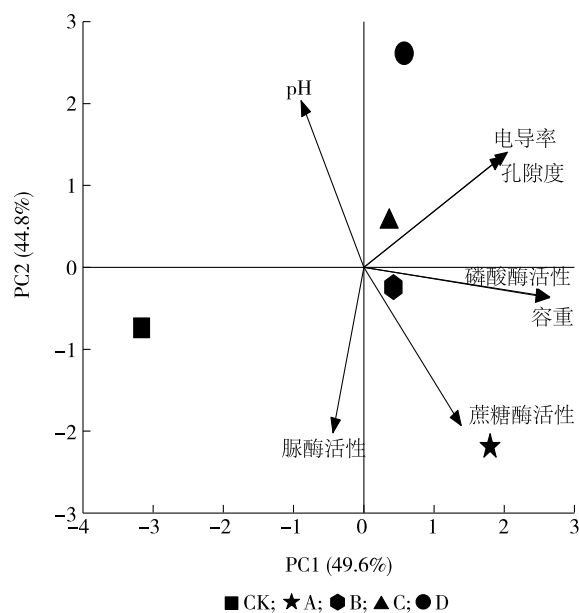
CK; 对照 (不添加外源硅处理); A: 硅浓度为 1 mmol/L; B: 硅浓度为 2 mmol/L; C: 硅浓度为 3 mmol/L; D: 硅浓度为 4 mmol/L。Pro: 脯氨酸; MDA: 丙二醛; POD: 过氧化物酶; CAT: 过氧化氢酶。

图 6 硅肥对番茄植株生理生化指标的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of silicon fertilizer on physiological and biochemical indices of tomato plants

长和生殖发育受到影响^[38]。硅被发现在许多作物中能缓解膜脂过氧化现象,提高作物抗逆性,促进植株生长。Shi 等^[39]对芍药研究发现,施用低浓度硅可使芍药中 MDA、 H_2O_2 和 O_2^- 迅速转化,最终减少细胞氧化损伤,提高幼苗耐盐性,促进芍药幼苗生长。赵培培^[40]通过研究低温对两种小麦种子萌发的影响,结果发现添加外源硅可以显著降低小麦 MDA 和 Pro 含量,清除多余的活性氧自由基,有效缓解低温对小麦的伤害。郭树勋等^[41]研究发现,外源硅降低了低温胁迫下番茄植株体内 H_2O_2 和 O_2^- 含量,缓解活性氧积累,增强番茄抵抗低温胁迫的能力。本试验结果发现,在基质栽培番茄过程中,根施 1 mmol/L 硅可显著提高番茄叶片 CAT 和 POD 活性,显著降低 MDA 和 O_2^- 含量。

饶立华等^[42]研究结果表明,施硅肥能减小水稻植株茎、叶之间的夹角,从而改善植物个体与群体的光照条件,同时叶肉细胞中的叶绿体增大、基粒增多,更有利于光合作用;施硅肥还可以提高植物根系活力,增加叶片和根系中的 ATP 含量,促进根系对



CK; 对照 (不添加外源硅处理); A: 硅浓度为 1 mmol/L; B: 硅浓度为 2 mmol/L; C: 硅浓度为 3 mmol/L; D: 硅浓度为 4 mmol/L。

图 7 硅肥对基质理化性质和酶活性的主成分分析

Fig. 7 Principal component analysis of silicon fertilizer on substrate physicochemical properties and enzyme activities

水分和养分的吸收。刘娇等^[43]研究结果表明,施用外源硅后烤烟光合色素含量增加,抗氧化酶活性提高,抗干旱能力增强。黄浩等^[44]在玉米上研究发现,施用外源硅能显著增加玉米植株的生物量,提高抗氧化酶活性,并能促进植物光合色素的合成,降低活性氧的积累。郭树勋等^[45]研究结果表明,喷施纳米硅可使番茄幼苗叶片光合色素含量增加,加快光合速率,并且能使根系细胞活力增强,可溶性糖、果糖、蔗糖和淀粉含量也相应增加。本研究同样发现根施 1 mmol/L 硅显著提高了番茄叶绿素含量,可有效促进番茄幼苗的光合作用。

土壤结构和土壤酶活性是植株生长环节中至关重要的因素,中国作为设施栽培大国,集约化生产已逐渐趋于成熟,但长期单一栽培模式造成了土壤养分缺乏、理化性质的恶化以及各种酶活性下降,土壤透气性和吸水性差,导致作物生长受限,品质降低^[46-48]。王永刚等^[49]研究发现,施硅肥可有效提高各种土壤酶的活性,促进土壤中有机成分的转化利用,改善土壤生物化学环境。张伟伟^[50]研究结果表明,土壤中蔗糖酶对增加土壤中易溶性营养物质起着重要作用,能反映土壤的生物化学活性;杨艳菊等^[51]研究结果表明,土壤磷酸酶参与有机磷的矿

化、水解等过程,是有机磷转化为无机磷过程中的关键酶。本试验结果表明,与CK相比根施1~4 mmol/L硅显著提高了基质磷酸酶活性,根施1~2 mmol/L硅显著提高了基质蔗糖酶活性,可能影响基质中营养物质的转化和吸收,为番茄生长提供更好的土壤环境,从而促进番茄植株生长。此外,本试验中施用硅肥还改善了基质的理化性质,其中基质容重和孔隙度与CK相比显著提高,这为番茄植株生长提供了良好的根系环境。贾茜茹^[52]在黄瓜上的研究表明,添加外源硅有效提高了镉胁迫下土壤碱性磷酸酶和脲酶的活性;郑仁兵等^[53]研究认为,施用含硅土壤调理剂有助于提高水稻土壤pH值,改善土壤酸性环境。这些研究结果与本试验部分结果相似,但轧宗杰^[54]发现施用硅调理剂降低了土壤的容重,这可能与栽培方式、栽培介质、外源硅的来源和施入方式以及基质管理方式不同等因素有关。另外,在本研究中,较低浓度的硅对基质酶活性有一定的提升作用,而浓度过高则出现了抑制作用;从基质理化性质来看,根施硅肥整体改善了基质理化性质,综合番茄生长及生理生化指标及主成分分析结果来看,硅肥的最佳施用浓度为1 mmol/L。

4 结 论

本研究通过根施不同浓度硅肥,综合番茄植株生理生化和基质理化性质两个方面评估硅肥的潜在价值。结果表明,与CK相比,基质栽培条件下根施1 mmol/L的硅能显著改善栽培基质的孔隙度和容重;显著提高基质蔗糖酶和磷酸酶活性等理化性质;番茄叶片光合色素含量显著增加,光合作用能力增强;显著提升番茄植株对氧化应激的耐受力,番茄植株生长状况得到显著改善。本研究结果可为硅肥在番茄基质栽培中的应用提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 田永强,高丽红. 设施番茄高品质栽培理论与技术[J]. 中国蔬菜,2021(2):30-40.
- [2] 李天来. 我国设施蔬菜科技与产业发展现状及趋势[J]. 中国农村科技,2016(5):75-77.
- [3] 石绍敏. 解读有机生态型无土栽培技术及展望[J]. 新农业,2019(23):78-79.
- [4] 高丽红,别之龙. 无土栽培学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2017.
- [5] 周金燕,严少华,罗 佳,等. 以奶白菜为例评估有机基质再生利用的可行性及障碍因子消解策略[J]. 江苏农业科学,2020,48(22):301-307.
- [6] 刘 蕊,杨素芬,谷利敏,等. 有机生态型无土栽培基质重复利用研究概述[J]. 中国瓜菜,2024,37(1):1-10.
- [7] DEBONA D, RODRIGUES F A, DATNOFF L E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses[J]. Annual Review of Phytopathology,2017,55:85-107.
- [8] 刘丽君,黄张婷,孟赐福,等. 中国不同生态系统土壤硅的研究进展[J]. 土壤学报,2021,58(1):31-41.
- [9] ISLAM W, TAYYAB M, KHALIL F, et al. Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology,2020,168:104641-104732.
- [10] 朱永兴,夏雨晨,刘乐承,等. 外源硅对植物抗盐性影响的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(3):498-509.
- [11] 宫海军,陈坤明,王锁民,等. 植物硅营养的研究进展[J]. 西北植物学报,2004,24(12):2385-2392.
- [12] 蒋 亚,蔡景行,吴道明,等. 硅肥对土壤理化性质及水稻产量与养分含量的影响[J]. 贵州农业科学,2023,51(7):50-55.
- [13] 杨晓飞. 硅肥施用对韭菜产量及品质的影响[J]. 农业技术与装备,2023(12):35-37.
- [14] 宋兴宜,刘昌华,郭 祥,等. 施用有机硅肥对提高烤烟农艺性状和质量的作用[J]. 中南农业科技,2023,44(9):3-5,16.
- [15] 李 志,吴 彦,温红霞,等. 温室番茄应用硅肥效果研究[J]. 宁夏农林科技,2015,56(3):34,42.
- [16] 王宏青. 外源硅对花生光合色素、光合能力及根系活力的影响[J]. 安徽农学通报,2023,29(16):35-38.
- [17] 栗国栋,刘嘉兴,石 玉,等. 外源硅对生菜生长、光合及品质特性的影响[J]. 北方园艺,2021(16):49-55.
- [18] 刘 月,刘海河,张彦萍,等. 外源硅对厚皮甜瓜果实品质及相关酶活性的影响[J]. 中国瓜菜,2021,34(12):28-32.
- [19] 张平艳. 硅对连作黄瓜幼苗生长及生理特性的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2014.
- [20] 邹 奇. 植物生理生化实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [21] 王爱国,罗广华. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J]. 植物生理学通讯,1990(6):55-57.
- [22] SU G X, AN Z F, ZHANG W H, et al. Light promotes the synthesis of lignin through the production of H₂O₂ mediated by diamine oxidases in soybean hypocotyls[J]. Journal of Plant Physiology,2005,162(12):1297-1303.
- [23] DHINDSA R S, PLUMB-DHINDSA P, THORPE T A. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase[J]. Journal of Experimental Botany,1981,32(1):93-101.
- [24] MA D Y, SUN D X, WANG C Y, et al. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways[J]. Journal of Plant Growth Regulation,2016,35(1):1-10.
- [25] GUNES A, INAL A, BAGCI E G, et al. Silicon mediates changes

- to some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown under B toxicity[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 113(2): 113-119.
- [26] 张海春, 张浩, 胡晓辉. 不同间作模式对温室连作番茄产量、土壤微生物和酶的影响[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(8): 1218-1223.
- [27] ZHANG Y, SHI Y, GONG H J, et al. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(10): 2151-2159.
- [28] 苏素苗, 杨春雷, 饶雄飞, 等. 硅对植物抗逆性影响的研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(6): 160-168.
- [29] 陶建波, 伍浩天, 王艺钢, 等. 硅肥和纳米土壤材料配施对苦荞倒伏的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(9): 25-35.
- [30] 陈卓, 马超, 李晓慧, 等. 加施硅肥及减施复合肥加施硅肥对辣椒性状及产量的影响[J]. *农业与技术*, 2023, 43(10): 10-13.
- [31] ALZHRANI Y, KUŞVURAN A, ALHARBY H F, et al. The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 154: 187-196.
- [32] PARVEEN A, LIU W, HUSSAIN S, et al. Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress[J]. *Plants*, 2019, 8(10): 431-445.
- [33] ADATIA M H, BESFORD R T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution[J]. *Annals of Botany*, 1986, 58(3): 343-351.
- [34] 吕剑. 外源硅缓解CA诱导的黄瓜自毒胁迫的生理与分子机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [35] 李孟洋, 巢建国, 谷巍, 等. 高温胁迫对不同产地茅苍术开花前叶片叶绿素荧光特征的影响[J]. *植物生理学报*, 2015, 51(11): 1861-1866.
- [36] YU J Q. Effects of root exudates and aqueous root extracts of cucumber (*Cucumis sativus* L.) and allelochemicals, on photosynthesis and antioxidant enzymes in cucumber[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2003, 31(2): 129-139.
- [37] 尚静, 刘晓慧, 朱宗文, 等. 外源2,4-表油菜素内酯对高温胁迫下西葫芦幼苗生长和AsA-GSH循环的影响[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(8): 2768-2776.
- [38] AHMED S, NAWATA E, HOSOKAWA M, et al. Alterations in photosynthesis and some antioxidant enzymatic activities of mung-bean subjected to waterlogging[J]. *Plant Science*, 2002, 163(1): 117-123.
- [39] SHI X L, XUE X, XU H M, et al. Amelioration of salt-induced damage on *Paeonia Ostii* 'Fengdan' by exogenous application of silicon[J]. *Agronomy*, 2023, 13(5): 1349-1363.
- [40] 赵培培. 低温下外源硅调控春小麦种子萌发与幼苗生长及生理生化机制研究[D]. 密山: 黑龙江八一农垦大学, 2014.
- [41] 郭树勋, 杨然, 胡晓辉, 等. 外源硅对不同低温胁迫下番茄根系生长及生理特性的影响[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(4): 50-57.
- [42] 饶立华, 覃莲祥, 朱玉贤, 等. 硅对杂交稻形态结构和生理的效应[J]. *植物生理学通讯*, 1986(3): 20-24.
- [43] 刘娇, 姜永雷, 蔺璟煜, 等. 外源硅对干旱胁迫下烟草生长及生理特性的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2023, 38(2): 306-313.
- [44] 黄浩, 路运才. 外源硅对低温胁迫下玉米和大豆幼苗的影响[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(5): 21-27.
- [45] 郭树勋, 代泽敏, 杨然, 等. 纳米硅对低温下番茄生长发育及碳水化合物积累的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(5): 742-749.
- [46] 妙佳源, 李夏, 周达, 等. 连作对谷子土壤酶活性及养分的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(3): 123-126, 152.
- [47] 李栢锦, 朱文桥, 黄坤, 等. 连作对烤烟农艺性状、根系形态与土壤养分的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(2): 67-72.
- [48] 程云飞, 李炳韵, 胡英宏, 等. 不同连作年限对菠萝园土壤养分及可培养微生物数量的影响[J]. *热带生物学报*, 2021, 12(2): 185-191.
- [49] 王永刚, 康怀启, 王会海, 等. 硅肥的研究及其在农业生产上的应用[J]. *中国果菜*, 2018, 38(8): 48-50, 64.
- [50] 张伟伟. 间作对西瓜生理生化特性及根际土壤特性影响的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2017.
- [51] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期施肥条件下栗褐土碱性磷酸酶活性及其与磷形态的关系[J]. *土壤*, 2013, 45(4): 678-682.
- [52] 贾茜茜. 硅对镉胁迫下黄瓜的产量品质及土壤性质的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
- [53] 郑仁兵, 王慧. 含硅土壤调理剂对土壤pH值及水稻产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2023(4): 22-25.
- [54] 轧宗杰. 旱直播栽培方式下硅调理剂施用对土壤理化性状和水稻产量影响研究[D]. 天津: 天津农学院, 2020.

(责任编辑: 黄克玲)