

不同水平钙肥对设施生姜生长、产量和根茎品质的影响

王兴翠¹, 张静¹, 范燕山², 彭佃亮¹, 杨文霞¹, 张敬敏¹

(1. 山东省高校设施园艺实验室·潍坊科技学院贾思勰农学院 山东寿光 262700;

2. 寿光格顿农业科技有限公司 山东寿光 262700)

摘要: 以莱芜大姜为试材, 通过温室盆栽试验, 采用根际增施的方法研究 2.5、5.0、7.5、10.0、12.5 g·株⁻¹ 5 个不同水平 Ca(NO₃)₂ 对生姜生长、产量及品质的影响。结果表明, 增施外源 Ca(NO₃)₂ 促进了生姜的生长, 提高了叶片色素含量、净光合速率及根茎的产量和品质。其中 Ca(NO₃)₂ 施用量≥7.5 g·株⁻¹ 时与不施钙(CK) 相比对生姜有显著的促长增产和提质作用, 在 10.0 g·株⁻¹ 时效果最显著, 采收期生姜叶片叶绿素含量和光合速率较 CK 显著提高 21.44% 和 34.37%, 单株产量显著增加 44.22%; 可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸及维生素 C 含量分别显著提高 28.13%、36.52%、19.15% 和 17.49%。Ca(NO₃)₂ 施入量在 12.5 g·株⁻¹ 时促进作用减弱。综上所述, 试验范围内外源 Ca(NO₃)₂ 均促进了生姜生长和产量增加, 改善了生姜根茎品质, 以外源钙施用量为 10.0 g·株⁻¹ 时, 更利于提高生姜产量和品质。

关键词: 生姜; Ca(NO₃)₂; 生长; 产量; 品质

中图分类号: S632.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)02-112-06

Effects of different levels of calcium fertilizer on the growth, yield, and rhizome quality of ginger in facilities cultivation

WANG Xingcui¹, ZHANG Jing¹, FAN Yanshan², PENG Dianliang¹, YANG Wenxia¹, ZHANG Jingmin¹

(1. Facility Horticulture Laboratory of Universities in Shandong/Jia Sixie Agricultural College, Weifang University of Science and Technology, Shouguang 262700, Shandong, China; 2. Shouguang Garden Agricultural Technology Co., Ltd., Shouguang 262700, Shandong, China)

Abstract: In the present work, ginger cultivar Laiwu ginger was used as the test material, a greenhouse² pot experiment was conducted to investigate the effects of 5 different levels (2.5, 5.0, 7.5, 10.0 and 12.5 g·plant⁻¹) of Ca(NO₃)₂ on growth, yield and the quality of ginger by adding it to the rhizosphere. The results showed that exogenous Ca(NO₃)₂ application promoted the growth of ginger, increased leaf pigment content, net photosynthetic rate, and rhizomes' yield and quality. When the Ca(NO₃)₂ applied dosage was≥7.5 g·plant⁻¹, it had a significant effect on ginger growth, yield, and quality improvement. And the promoting effect was most significant at 10.0 g·plant⁻¹. At the harvest period, compared with no applying Ca(NO₃)₂ (CK), the chlorophyll content and photosynthetic rate of ginger leaves increased by 21.44% and 34.37%, respectively, and the yield increased by 44.22%; the content of soluble sugar, soluble protein, amino acids, and vitamin C increased by 28.13%, 36.52%, 19.15%, and 17.49%, respectively. In summary, exogenous Ca(NO₃)₂ within the experimental range promoted the growth and yield of ginger, improved the quality of ginger rhizomes. The treatment with exogenous Ca(NO₃)₂ application rate of 10.0 g·plant⁻¹ was more conducive to improving yield and quality.

Key words: Ginger; Ca(NO₃)₂; Growth; Yield; Quality

Ca²⁺是植物所必需的矿质元素之一, 可以稳定细胞膜和细胞壁并促进细胞伸长和分裂, 在细胞的结构及调控植物生长发育、生理代谢过程中发挥重

要作用^[1]。此外, Ca²⁺作为细胞的功能物质, 对生物与非生物胁迫响应和第二信使传递也有重要意义。研究表明, 施钙能提高烟草^[2]、菊花^[3]、花生^[4]、茄

收稿日期: 2023-05-25; 修回日期: 2023-12-26

基金项目: 山东省高校设施园艺重点实验室项目(2018YY014); 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202001ZR0067G); 潍坊科技学院校级课题(2022XJSK06); 潍坊市科学技术发展计划项目(2021GX050); 潍坊科技学院学科建设设施园艺专项(2021XKJS26)

作者简介: 王兴翠, 女, 副教授, 主要从事蔬菜栽培生理生化及逆境调控研究。E-mail: xcwang124@163.com

通信作者: 张敬敏, 女, 教授, 主要从事植物营养与温室土壤可持续利用研究。E-mail: jmzhang1301@126.com

子^[5]、番茄^[6]、叶用莴苣^[7]和生姜^[8]等植物的抗氧化酶或活性物质的活性,缓解逆境伤害,从而提高他们的抗逆性并促进生长。适宜浓度的钙肥能提高菊花^[9]、茄子^[9]的叶绿素含量,增强番茄^[6]的光合性能,提升甜椒^[9]和黄金梨^[10]在高温胁迫下的光合速率和光系统 II 最大光化学效率,有效缓解盐胁迫对西瓜叶片的伤害,同时增加果实的可溶性糖含量^[11],促进大蒜根系发育,增强其抗病能力,减少二次生长并提高抽薹率^[12-13],调控马铃薯主茎生长^[14],促进山药地下产品器官的膨大及含钙量^[15]。

此外,Ca²⁺与作物的品质有着密切的关系。前人研究表明,新梢喷钙可提高苹果净光合速率,增加单果质量、维生素 C 含量和果皮亮度值^[16],提高桃的果实硬度和可溶性固形物含量^[17],使花生结果数和百果数增加^[18],籽仁中蛋白质含量增大^[19]。施 Ca 能增加茄子的干物质含量^[20],提高甜瓜^[21]和番茄^[22]的果实硬度、维生素 C 和可溶性糖含量,降低可滴定酸含量。袁伟玲等^[23]研究表明,叶面喷施钙可促进小白菜的生长,并增加叶片中维生素 C、可溶性糖和游离氨基酸含量。此外,施钙能改善大蒜^[13]、马铃薯^[14]和山药^[15]的产品质量。

生姜(*Zingiber officinale* Rosce.)为姜科多年生草本植物,具有喜温、怕热怕湿的特性,是我国重要的出口创汇蔬菜。其营养极其丰富,既是日常生活重要的调味蔬菜,也是一味重要的中药材。生姜生长期要经过 7—8 月光照最为强烈、高温且多雨的夏季,此段时间正值生姜幼苗生长期,强光照加上 35 °C 以上的高温,叶片容易烧伤致使生姜出现生长障碍而降低产量和品质^[24]。Ca²⁺能提高植物对逆境的抵抗能力,进而改善商品器官的品质^[25],但关于外源钙对生姜生长发育及品质改善的研究鲜有报道。因此,笔者以莱芜大姜为试验材料,研究根源施用硝酸钙对生姜生长发育及品质指标的影响,旨在探究外源钙对生姜的作用效应,为进一步确定钙肥的合理施用和深入研究钙对生姜高产优质的作用机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验生姜品种为莱芜大姜,购自山东省万兴食品有限公司生产基地。

1.2 试验设计

试验于 2020 年在潍坊科技学院试验基地温室大棚中进行。定植盆规格为直径 40 cm、深 30 cm。于 4 月 1 日芽长 1.0~1.5 cm 时播种,盆栽土壤氮、

磷、钾含量(w,后同)分别为 62.5、17.9、43.6 mg·kg⁻¹。以不施 Ca(NO₃)₂ 的处理为对照(CK),Ca(NO₃)₂ 设置 2.5、5.0、7.5、10.0、12.5 g·株⁻¹ 5 个处理水平,分别为 T1、T2、T3、T4、T5,生姜整个生育期分 3 次施入,其中 40%作为基肥,剩余 2 次施用时期为苗期 20%和根茎膨大期 40%,从尿素中扣除 Ca(NO₃)₂ 中所含的氮量。采用完全随机区组设计,每个处理设 3 次重复,共 18 个小区,每盆定植 1 株,每小区 15 株,共计 270 株。除硝酸钙施用量不同外,各处理水肥管理方法均一致。

1.3 指标测定

生长指标:分别于发棵期(7 月 26 日)、根茎膨大期(8 月 26 日)、收获期(10 月 28 日)每处理随机抽取 3 株,用清水冲洗后分别测定生姜样本的株高、茎粗、分枝数,根、茎、叶及根茎的鲜质量,然后放入烘箱中 105 °C 杀青 25 min,75 °C 烘干至恒质量,称其干质量。株高为第一主茎从地面上伸直的距离;茎粗为离地面 1 cm 粗度。

光合生理特性指标:分别于发棵期、根茎膨大期、收获期选 5 株生姜的展开功能叶(上数第 3~4 片),采用 95%无水乙醇浸提叶片色素,岛津 UV-2450 型分光光度计比色法测定^[26]。于 3 个时期的晴天用美国产 Li-6400 型便携式光合测定系统测定净光合速率(P_n)。同时在根茎膨大期,选择晴天 07:00—17:00 时间段,每隔 2 h 测定 1 次净光合速率。

产量及品质指标:收获期将每个处理所有单株收获,清洗后测定根茎质量,取平均值为各个处理的单株产量实测值。每处理选取 3 株长势一致的生姜植株,将根茎切碎混匀,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[26],采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量^[26],采用茚三酮显色法测定游离氨基酸含量^[26];采用 2,6-二氯酚靛酚比色法测定抗坏血酸含量^[26];采用酸洗涤法测定粗纤维含量^[27]。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行试验数据初步处理及绘图,采用 DPS 7.05 数据处理软件进行 LSD 法差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 外源 Ca(NO₃)₂ 对生姜不同发育期生长指标的影响

由表 1 可以看出,除 2.5 g·株⁻¹ 处理外,增施外源 Ca(NO₃)₂ 在生姜各生长期均可提高其株高、茎粗以及根、茎、叶、根茎的鲜质量,且株高以及根、

表1 不同施用量 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 对生姜不同发育期生长指标的影响

Table 1 Effects of different concentrations of $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ on the growth indicators of ginger at different stages

生育期 Growth period	处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	茎粗 Stem diameter/mm	分枝数 Shoots number	根鲜质量 Root fresh mass/ g	茎鲜质量 Stem fresh mass/ g	叶鲜质量 Leaf fresh mass/ g	根茎鲜质量 Rhizome fresh mass/ g
发棵期 Sprouting period	CK	67.70±2.17 b	12.13±1.00 b	3.33±0.59 a	23.54±2.85 c	74.74±4.81 d	44.19±5.84 c	119.23±10.23 d
	T1	66.25±2.28 b	12.96±0.71 b	3.67±0.17 a	26.71±3.02 c	80.54±4.52 d	43.83±3.03 c	126.12±14.14 d
	T2	68.80±2.31 a	13.23±2.19 b	3.33±0.19 a	29.61±5.45 b	96.78±3.68 c	67.17±4.23 b	188.32±9.61 c
	T3	70.20±1.83 a	13.12±0.88 b	3.67±0.16 a	32.63±3.67 b	106.56±5.86 b	73.95±5.45 a	233.25±13.36 a
	T4	70.30±1.40 a	15.81±1.26 a	3.67±0.20 a	42.36±2.56 a	126.96±6.21 a	78.59±6.73 a	235.97±11.32 a
根茎 Rhizome 膨大期 dilation period	CK	78.56±6.05 b	14.57±1.34 b	4.33±0.23 a	93.06±4.56 c	262.47±16.23 d	129.41±7.46 c	397.12±16.13 c
	T1	79.23±1.49 b	15.78±0.89 b	4.33±0.97 a	90.74±4.12 c	267.68±17.12 d	146.94±6.59 b	412.02±17.47 c
	T2	80.25±4.95 b	16.67±1.28 a	4.33±0.35 a	104.77±5.23 b	328.71±22.54 c	175.93±9.87 ab	543.24±34.16 b
	T3	96.34±2.85 a	17.80±0.87 a	4.67±0.82 a	110.16±8.43 a	390.92±27.31 b	193.82±16.21 a	598.45±28.13 b
	T4	97.70±3.96 a	17.94±0.45 a	4.67±0.44 a	117.26±17.63 a	437.35±39.42 a	194.12±15.22 a	686.35±23.67 a
采收期 Harvest period	CK	92.24±3.68 c	18.27±2.16 b	5.00±0.46 b	113.58±13.23 c	201.95±13.21 c	118.40±9.18 c	447.32±18.13 d
	T1	94.56±4.78 b	18.57±2.12 b	5.00±0.33 ab	108.14±16.33 c	264.92±15.78 c	126.82±5.52 c	554.35±20.42 c
	T2	99.23±1.15 b	19.42±2.10 a	5.33±0.27 a	122.86±5.62 c	373.11±21.22 b	140.27±7.23 b	589.56±23.35 c
	T3	106.45±6.78 a	20.23±0.79 a	5.33±0.17 a	146.62±9.07 b	433.58±25.31 a	176.84±22.14 a	654.23±26.21 b
	T4	107.07±2.79 a	20.53±1.09 a	5.67±0.17 a	177.25±8.23 a	499.98±34.94 a	192.71±18.95 a	727.69±25.21 a
	T5	106.13±2.16 a	19.82±1.23 a	5.33±0.23 a	158.14±13.22 b	457.36±36.47 a	199.18±17.26 a	683.65±17.46 b

注:表中同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

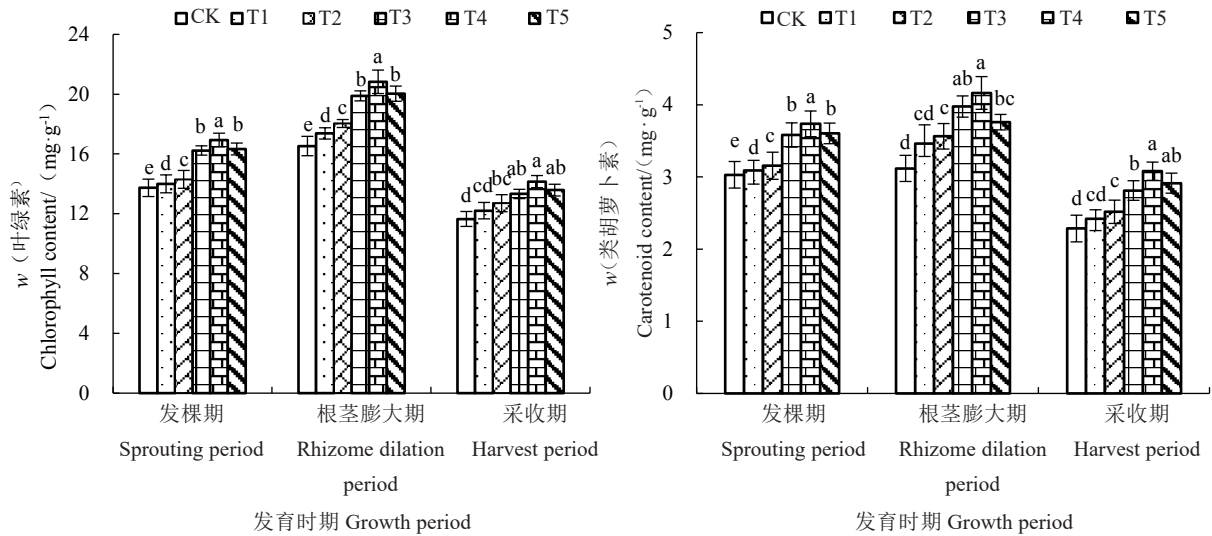
茎、根茎的鲜质量随 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量的增加呈先增加后减小的变化趋势,但发棵期和根茎膨大期外源 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理对生姜分枝数的增长无显著影响。在发棵期, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,生姜各生长指标与 CK 无显著差异;施用量 $\geq 5.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,除茎粗和分枝数外,其他各指标与对照相比均显著增长;当 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量达到 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,生姜的株高以及茎粗、根、茎、叶、根茎鲜质量生长指标都达到最大值,较 CK 分别显著提高了 3.84%、30.34%、79.95%、69.87%、77.85% 和 97.91%;而当 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量达到 $12.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时,除分枝数外,其他各生长指标均有所下降,且生姜茎和根茎鲜质量与 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 处理呈显著差异。在根茎膨大期和采收期,不同施用量 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 处理的生姜各生长指标的变化趋势与发棵期基本相似,在根茎膨大期, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $12.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 各测定指标均差异不显著;采收期 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量为 $12.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时根茎鲜质量与 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 处理呈显著差异,前者较后者降低 6.05%。

2.2 外源 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 对生姜不同发育时期叶片光合作用特性的影响

2.2.1 外源 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 对生姜不同发育时期叶片色素含量的影响 如图 1 所示,在生姜在生长发育过程中,随着 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量的增加,在整个生长期

叶片的叶绿素和类胡萝卜素含量均呈现先升高后降低的变化趋势。2 种色素含量均在根茎膨大期 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量为 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时达到最大值,且叶绿素含量均与其他处理呈显著差异;类胡萝卜素含量与 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量为 $7.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 处理差异不显著,与其他处理呈显著差异;与不施 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 的 CK 相比,生姜叶片 2 种色素含量分别显著提高了 25.99%、33.52%。采收期各处理的生姜叶片 2 种色素含量较前期均有下降,生姜叶片叶绿素和类胡萝卜素含量在 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量为 $12.5 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 与 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 时无显著差异。

2.2.2 外源 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 对生姜叶片净光合速率 P_n 的影响 由图 2-A 可以看出,在生姜根茎膨大期,其叶片的 P_n 日变化呈“双峰”曲线型,第一、二高峰分别出现在 11:00 和 15:00 时, P_n 在中午 13:00 时降低,有明显的光合“午休”现象;施加外源 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 可显著提高生姜叶片的 P_n ,且随着 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量的增加呈先升高后降低的变化趋势, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 施用量为 $10.0 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 处理的 P_n 两峰值分别较 CK 显著提高了 20.43% 和 17.34%。根际增施外源钙在生姜整个生长期不同程度地增加了叶片的 P_n ,在发棵期, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 5 个施用量梯度处理分别较 CK 显著提高 3.13%、5.25%、9.81%、13.00% 和 8.84%,说明施用外源 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 有利于提高发棵期生姜叶片的



注:同一时期不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same period indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

图 1 外源 Ca(NO₃)₂ 对生姜不同发育时期叶片色素含量的影响

Fig. 1 Effect of exogenous Ca(NO₃)₂ on the pigment content of ginger leaves at different developmental stages

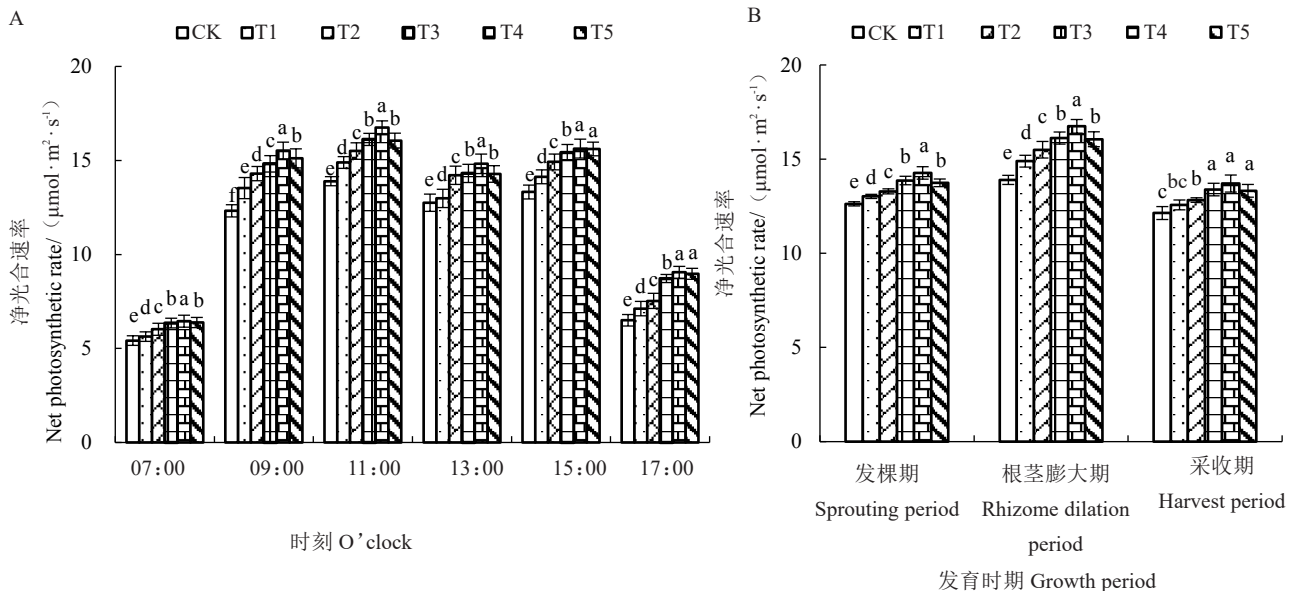


图 2 外源 Ca(NO₃)₂ 对生姜叶片净光合速率的影响

Fig. 2 Effect of exogenous Ca(NO₃)₂ on P_n of ginger leaves

P_n,但施用量过高时则减弱其对 P_n的促进作用;根茎膨大期生姜叶片的 P_n变化趋势同发棵期一致,采收期生姜叶片的 P_n在 Ca(NO₃)₂施用量为 7.5、10.0 和 12.5 g·株⁻¹时没有显著差异。

2.3 外源 Ca(NO₃)₂对生姜根茎产量及品质的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,Ca(NO₃)₂不同施用量对生姜的单株产量均有显著影响,施入量为 10.0 g·株⁻¹时生姜的产量最高,5 个梯度处理分别显

著增产 14.31%、21.09%、33.03%、44.22%和 37.31%,但 10.0 g·株⁻¹与 12.5 g·株⁻¹处理的生姜单株产量差异不显著。施用 Ca(NO₃)₂对生姜的品质有一定的提升作用,在一定范围内,随着 Ca(NO₃)₂施用量的增加其提升作用越显著,当施用量为 10.0 g·株⁻¹时,生姜根茎的干物质、可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸和抗坏血酸含量均达到最大值,与 CK 相比,分别显著提高 3.62%、28.13%、36.52%、19.15%和

表2 外源Ca(NO₃)₂对生姜产量和根茎品质的影响
Table 2 Effects of exogenous Ca(NO₃)₂ on ginger yield and rhizome quality

处理 Treatment	单株产量 Yield per plant/g	w(干物质) Dry matter content/ %	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/%	w(游离氨基酸) Free amino acid content/ (mg·g ⁻¹)	w(抗坏血酸) Ascorbic acid content/(mg·100 g ⁻¹)	w(粗纤维) Crude fiber content/%
CK	457.62±22.48 d	10.21±0.07 bc	1.28±0.02 e	1.15±0.01 e	0.47±0.02 c	1.82±0.04 c	1.13±0.01 a
T1	523.10±44.51 c	10.18±0.11 c	1.36±0.07 de	1.25±0.05 d	0.48±0.03 c	1.83±0.07 bc	1.14±0.05 a
T2	554.15±32.08 c	10.34±0.15 bc	1.45±0.05 cd	1.33±0.03 c	0.49±0.01 c	1.84±0.01 bc	1.13±0.03 a
T3	608.78±44.60 b	10.41±0.08 ab	1.47±0.05 bc	1.43±0.03 b	0.54±0.03 ab	1.95±0.07 b	1.14±0.01 a
T4	659.97±57.30 a	10.58±0.16 a	1.64±0.06 a	1.57±0.06 a	0.56±0.01 a	2.15±0.10 a	1.16±0.04 a
T5	628.38±49.79 ab	10.41±0.08 ab	1.55±0.06 b	1.47±0.03 b	0.53±0.05 b	2.08±0.04 a	1.17±0.03 a

17.49%，但当Ca(NO₃)₂施用量为12.5 g·株⁻¹时对生姜品质的提升作用减弱。生姜粗纤维含量在各处理之间没有显著差异，各施用Ca(NO₃)₂处理粗纤维含量均大于或等于CK，说明外源钙可以增加生姜根茎的粗纤维含量，但其作用效果不显著。

3 讨论与结论

有关钙与植物生长关系的研究表明，钙的增施可以促进植物生长发育^[28-30]。本研究结果表明，根际施用适宜浓度的Ca(NO₃)₂促进了各生长期生姜的生长，增加了生姜植株各部分的生物量，过量的外源钙(≥12.5 g·株⁻¹)则对生姜植株生长的促进作用减弱，这与钙有利于提高小白菜^[23]、花生^[31]农艺性状及产量的结论一致。光合作用是作物生产的物质基础，叶绿素含量的高低与植物叶片光合作用和物质合成速率关系密切^[32]。叶绿体中具有钙信号转导的所有先决条件，钙参与叶绿体中CO₂固定、蛋白磷酸化等光合进程的调控^[33]，小麦叶绿体和菠菜叶绿体的研究证实了钙的吸收具有强烈的光依赖性，钙离子是光合电子传递的必要因子^[34]。钙离子作为第二信使，其浓度的增加能激活植物细胞内钙离子信号转导蛋白的表达^[35]，进而调控植物细胞内各种酶的活性和细胞生理活性^[36]。研究表明，施钙能够有效降低生姜叶片的电解质渗透率，增加叶片色素含量，提高生姜的光合效率^[8]。本研究结果表明，5种不同施用量的硝酸钙均有利于提高生姜各生育期叶片的叶绿素和类胡萝卜素含量，促进净光合速率的增加，Ca(NO₃)₂施用量在10.0 g·株⁻¹时，促进作用最显著，施用量为12.5 g·株⁻¹时促进作用减弱，这说明适宜浓度的钙能提高CO₂羧化效率，进而提高光合效率。

钙能调节土壤中的Ca/N关系^[29]，促进植物体内有机物的运输，进而调控碳水化合物的分配^[37]，促进

碳水化合物向果实中运转^[30]。外源施钙可促进果实合成更多的游离氨基酸和蛋白质，进而增加维生素C含量，提升产品质量^[38]。研究发现，施钙均可促进组培和露天栽培马铃薯的生长，提高块茎产量和品质^[39]；番茄果实生物量和可溶性蛋白、游离氨基酸和维生素C含量也随着外源钙的施用而增加^[40]，笔者的研究在试验条件范围内与前人研究结果相似。外源钙处理可以抑制果胶酶、纤维素酶的活性而减缓细胞壁果胶、纤维素的降解^[41]，可显著提高寒富苹果果实纤维素和壶瓶枣果肉中总膳食纤维的含量^[42-43]，但对食用木薯块根的粗纤维含量增效作用较小^[44]，且氯化钙不利于鲜切生姜粗纤维的合成，对其有提质作用^[27]。本研究结果表明，外源Ca(NO₃)₂虽可提高生姜根茎中粗纤维的含量，但作用效果有限且与CK差异不显著，有关钙对生姜粗纤维含量的影响还需进一步研究。

综上所述，施钙处理能够有效增加叶片色素含量，提高生姜的净光合速率，适宜的Ca(NO₃)₂施用量可提升生姜的产量和品质。其中，10.0 g·株⁻¹的Ca(NO₃)₂施用量效果最佳，与CK相比，显著地促进了生姜的生长，且生姜叶片的色素含量、净光合速率、产量和品质指标均显著提高。

参考文献

- [1] 檀龙颜, 马洪娜. 植物响应钙离子胁迫的研究进展[J]. 植物生理学报, 2017, 53(7): 1150-1158.
- [2] 潘明君, 尹永强, 沈方科, 等. 调环酸钙对低温胁迫下烟草幼苗生理指标的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 288-293.
- [3] 苏江硕, 陈素梅, 管志勇, 等. 外源钙离子对NaCl胁迫下菊花幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 199-203.
- [4] 刘欣悦, 刘轶飞, 易伯涛, 等. 外源钙缓解花生低温光合障碍的调控机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 291-301.
- [5] 杜锦华, 樊德苗, 冯晓东. 氯化钙对高温胁迫下茄子幼苗生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(16): 5503-5511.
- [6] 徐龙超, 依艳丽, 周晓阳. 钙、磷平衡对番茄光合作用特性及防

- 御酶活性的影响[J].北方园艺,2013(9):190-193.
- [7] 杨景爱,康杰,谷建田.氯化钙对高温胁迫下叶用莴苣幼苗生理生化特性的影响[J].北京农学院学报,2016,31(4):31-34.
- [8] 王兴翠,张忠义,彭佃亮,等.外源钙对高温胁迫下苗期生姜生长及活性氧代谢的影响[J].安徽农业大学学报,2020,47(5):851-855.
- [9] 孙克香,杨莎,郭峰,等.高温强光胁迫下外源钙对甜椒(*Capsicum frutescens* L.)幼苗光合生理特性的影响[J].植物生理学报,2015,51(3):280-286.
- [10] 周君,肖伟,陈修德,等.外源钙对‘黄金梨’叶片光合特性及果实品质的影响[J].植物生理学报,2018,54(3):449-455.
- [11] 张振兴,孙锦,郭世荣,等.钙对盐胁迫下西瓜光合特性和果实品质的影响[J].园艺学报,2011,38(10):1929-1938.
- [12] 王志坚,王崇华,魏小兴,等.硫酸钙对大蒜生长发育和产量的影响[J].蔬菜,2012(4):58-60.
- [13] 李贺,孙亚丽,刘世琦,等.增施钙对镉胁迫下大蒜生理特性及品质的影响[J].园艺学报,2015,42(2):377-385.
- [14] 高静.钙肥对马铃薯生长生理、产量及品质的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [15] 季祥,张艳芳,邵盈,等.施加外源钙素对山药(*Dioscorea opposite* Thunb.)块茎膨大的影响[J].北方园艺,2021(5):8-14.
- [16] 刘丽,高登涛,魏志峰,等.调环酸钙对富士苹果生长及果实品质的影响[J].果树学报,2021,38(7):1084-1091.
- [17] 岳亚康,金朝阳,张铭,等.不同氮钙水平对设施桃果实品质的影响[J].中国果树,2021(4):55-58.
- [18] 王建国,张佳蕾,郭峰,等.钙与氮肥互作对花生干物质和氮素积累分配及产量的影响[J].作物学报,2021,47(9):1666-1679.
- [19] 王媛媛,王先芸,任嘉,等.钙肥不同用量对花生氮代谢的影响[J].安徽农业科学,2014,42(32):11289-11291.
- [20] 翁艳梅,王敏,伍壮生,等.不同用量氰化钙对茄子品质及土壤养分的影响[J].江苏农业科学,2013,41(1):182-183.
- [21] 薛琪敏,杜太生,杨慧,等.不同水钙处理对甜瓜生长、品质形成及产量的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(12):18-25.
- [22] 徐梦珠,王芽芽,张铨锋,等.红蓝光和外源钙对番茄果实生长及品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(3):101-110.
- [23] 袁伟玲,陈磊夫,刘志雄,等.外源钙对小白菜酶活性、钙含量及其产量和品质的影响[J].中国土壤与肥料,2020(6):254-261.
- [24] 王发胜.鲁南山区生姜生产中存在问题与解决方法[J].中国蔬菜,2020(8):100-102.
- [25] KIM K N, LEE J S, HAN H, et al. Isolation and characterization of a novel rice Ca^{2+} -regulated protein kinase gene involved in responses to diverse signals including cold, light, cytokinins, sugars and salts[J]. Plant Molecular Biology, 2003, 52(6):1191-1202.
- [26] 王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].3版.北京:高等教育出版社,2015.
- [27] 白琳,吕静祎,路研文,等.氯化钙处理对鲜切生姜保鲜的影响[J].包装与食品机械,2020,38(4):28-33.
- [28] 冯新维,黄莺,吴贵丽,等.不同钙浓度对烤烟生长及镁吸收的影响[J].作物杂志,2021(3):190-194.
- [29] 邓芳.不同钙肥对几种蔬菜生长和品质效应的影响[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [30] 陈厚锡.钙对红阳猕猴桃苗木生长及果实品质的影响[D].贵阳:贵州师范大学,2022.
- [31] 顾学花,孙莲强,张佳蕾,等.施钙对干旱胁迫下花生生理特性及产量的影响[J].花生学报,2013,42(2):1-8.
- [32] 周振翔.水稻叶片叶绿素含量对光合生理及产量的影响[D].江苏扬州:扬州大学,2016.
- [33] OZGEN S, PALTA J P, KLEINHENZ M D. Influence of supplemental calcium fertilization on potato tuber size and tube number[J]. Potatoes Healthy Food for Humanity, 2003, 619:329-336.
- [34] KREIMER G, MELKONIAN M, HOLTUM J A. Characterization of calcium fluxes across the envelope of intact spinach chloroplasts[J]. Planta, 1985, 166(4):515-523.
- [35] KAMTHAN A, KAMTHAN M, KUMAR A, et al. A calmodulin like EF hand protein positively regulates oxalate decarboxylase expression by interacting with E-box elements of the promoter[J]. Scientific Reports, 2015, 5:14578.
- [36] 毛国红,宋林霞,孙大业.植物钙调素结合蛋白研究进展[J].植物生理与分子生物学学报,2004,30(5):481-488.
- [37] 陈德伟,汤寓涵,石文波,等.钙调控植物生长发育的进展分析[J].分子植物育种,2019,17(11):3593-3601.
- [38] MEAGY M J, EATON T E, BARKER A V. Nutrient density in lettuce cultivars grown with organic or conventional fertilization with elevated calcium concentrations[J]. HortScience, 2013, 48(12):1502-1507.
- [39] 杜强.钙对马铃薯植株生长及块茎品质的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2013.
- [40] 姚棋,韩天云,梁祎,等.外源钙和EBR处理对番茄果实品质特性的影响[J].中国瓜菜,2021,34(10):74-79.
- [41] ORTIZ A, GRAELL J, LARA I. Cell wall-modifying enzymes and firmness loss in ripening ‘Golden Reinders’ apples: A comparison between calcium dips and ULO storage[J]. Food Chemistry, 2011, 128(4):1072-1079.
- [42] 裴健翔.外源钙对‘寒富’苹果果实钙代谢及果实品质影响的研究[D].北京:中国农业科学院,2019.
- [43] 王丁,付瑞敏,刘春雷,等.氢氧化钙对壶瓶枣果实营养品质及风味的影响[J].江苏农业科学,2021,49(21):196-200.
- [44] 陈会鲜,朱涵钰,李恒锐,等.外源钙对食用木薯产量及其品质的影响研究[J].中国土壤与肥料,2022(7):121-125.