植物营养与肥料学报 2013,19(5):1118-1128
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2013.0511

钙对水培青蒜苗生长、光合特性及品质的影响

李 贺,刘世琦*,陈祥伟,王 越,冯 磊,刘景凯
(山东农业大学园艺科学与工程学院,作物生物学国家重点实验室,
农业部黄淮地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室,泰安 271018)

摘要: 在水培条件下,研究不同钙水平对青蒜苗钙含量、生长、光合特性及品质的影响。供试 Ca^{2+} 浓度分别为 0、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mmol/L。结果表明,青蒜苗的钙含量随钙浓度的升高而升高,在 5.0 mmol/L 钙处理下达最大值;钙浓度在 0～3.0 mmol/L 范围内时,青蒜苗的生长量、色素含量、净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)及气孔导度(Gs)均随钙浓度的升高而增大,钙浓度高于 3.0 mmol/L 时则随之减小;同时,假茎和叶片中大蒜素、可溶性糖、维生素 C(Vc)、游离氨基酸及可溶性蛋白的含量也先随钙浓度的升高而升高,然后随之下降,在 3.0 mmol/L 钙浓度时达到最高,分别比不施钙处理最大提高 50.3%、84.7%、92.7%、53.5%、69.4% 和 66.1%、113.1%、105.8%、66.1%、60.1%。因此,钙能有效促进青蒜苗生长,增加叶片色素含量,改善光合特性,并明显提高假茎和叶片中大蒜素、可溶性糖、Vc、游离氨基酸及可溶性蛋白的含量,且 Ca^{2+} 浓度在 3.0 mmol/L 时效果最佳。

关键词: 青蒜苗; 钙; 生长; 光合特性; 品质
中图分类号: S663.9; Q945.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)05-1118-11

Effects of calcium on growth, photosynthetic characteristics and quality of aquicultural garlic seedlings

LI He, LIU Shi-qi*, CHEN Xiang-wei, WANG Yue, FENG Lei, LIU Jing-kai
(*College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops in Huanghuai Region, Taian, Shandong 271018, China*)

Abstract: Effects of different calcium (Ca) levels on calcium content, growth, photosynthetic characteristics and qualities of garlic seedlings were studied using nutrient solution culture. Six different Ca^{2+} concentration treatments: 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 and 5.0 mmol/L(T0, T1, T2, T3, T4, T5) were designed in the experiment. The results show that the Ca contents of garlic seedlings are increased with the increase of calcium concentration, and the Ca content reaches the maximum in the 5.0 mmol/L treatment. Within the calcium adding range of 0-3.0 mmol/L, the increments of pseudostems and leaves, pigment contents and photosynthetic parameters of leaves enhanced correspondently with the calcium concentrations, while in the range of 3.0-5.0 mmol/L, the three items decreased with the increase of the calcium concentrations. The contents of allicin, soluble sugar, vitamin C, free amino acid, soluble protein in pseudostems and leaves improved with the calcium concentrations increased from 0 to 3.0 mmol/L, and the highest increased values of these contents are 50.3%, 84.7%, 92.7%, 53.5%, 69.4% and 66.1%, 113.1%, 105.8%, 66.1%, 60.1%, while these indexes are also reduced when the calcium concentration is higher than 3.0 mmol/L. Thus, calcium could effectively improve the growth, photosynthesis and qualities of garlic seedlings, and the treatment of 3.0 mmol/L calcium concentration is the best.

Key words: garlic seedling; calcium; growth; photosynthetic characteristic; quality

收稿日期: 2012-12-20 **接受日期:** 2013-04-28
基金项目: 国家公益性行业科研专项(200903018); 山东省农业重大创新项目资助。
作者简介: 李贺(1988—),男,山东济宁金乡人,博士研究生,主要从事蔬菜栽培生理研究。E-mail:137050698@qq.com
* 通信作者 E-mail: liusq99@sdau.edu.cn

钙是植物生长发育所必需的营养元素之一,它不仅维持细胞壁、细胞膜的稳定性,而且作为第二信使,调节植物体内部各种生理生化过程[1]。有研究表明,Ca^{2+}参与了叶片气孔开闭的生理过程,并能增强 Rubisco 酶和 PEP 羧化酶的活性,从而提高 CO_2 羧化效率[2-3],缺钙可导致叶肉细胞液泡膜破裂,破坏类囊体片层结构,不利于叶片把捕获的光能转化为化学能[4-5]。Adams 认为缺钙是导致番茄脐腐病的根本原因[6],Bangerth 证实钙在植物体内的不合理分配是造成与钙有关的生理失调症的主要原因,而不是缺钙胁迫[7]。增加钙供应,花生的产量及品质明显提高[8];对大豆进行氯化钙拌种或喷施,可明显提高产量[9];土施或喷施硝酸钙均可增加大白菜、生菜、芹菜、甘蓝的 Ca、Mg、Fe 含量,显著提高产量,还可明显降低大白菜干烧心病和番茄脐腐病的发病率[10];沈志锦等采用不同钙水平水培蕹菜,表明蕹菜最适合的钙浓度为 80 mg/L[11]。

大蒜(*Allium sativum* L.)为百合科葱属一、二年生草本植物,是人们非常喜爱且具有诸多保健作用的蔬菜[12],但传统的土栽方式使目前大蒜栽培出现很多负面问题,如品种退化、土传病虫害严重、植株长势弱及产量和品质下降等[13]。无土栽培能克服土壤栽培的缺点,是目前生产绿色蔬菜、高档蔬菜的有效途径[14]。针对营养元素对水培大蒜生长特点影响的研究已见报道[15-17],但关于钙与大蒜生长发育关系的研究还未见报道。本文探讨了温室水培条件下,不同钙水平对青蒜苗生长发育及品质的影响,以期为大蒜无土栽培优质高产提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2011 年 10 月至 2012 年 5 月在山东农业大学科技创新园进行。以"金蒜 3 号"为试材,深液流技术(DFT)水培。采用微电脑控时器控制时间,每 3 h 供应营养液 6 min,30 min 内自动回流完毕。营养液以 Hoagland 和 Arnon 营养液为基础(除钙外),微量元素参照其通用配方,用去离子水配制,pH 控制在 6.0。试验设定 6 个 Ca^{2+} 浓度水平:0、1.0、2.0、3.0、4.0 及 5.0 mmol/L。钙由 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 和 $Ca(HCO_3)_2$ 提供,其他提供大量元素的化合物为 KNO_3、$MgSO_4 \cdot 7H_2O$、$NH_4H_2PO_4$ 及 $NaNO_3$,使各处理营养液中 N、P、K、Mg 及 S 的含量分别为 15.0、1.0、6.0、2.0 及 2.0 mmol/L。幼苗前期每隔 7 d 更换一次营养液,旺盛生长期则 3 d 更换一次。试验所用盆为 65 cm(L)×50 cm(W)×35 cm(H)硬质塑料盆,每盆定植大蒜 12 株,每个处理 20 盆。

1.2　分析测定方法

2011 年 10 月 15 日在覆盖聚乙烯无滴膜的拱棚内播种,播种蒜瓣饱满无瑕疵且大小一致,控制棚内温度 0～25 ℃,自然光周期。分别在播种后 80 d(2012 年 1 月 3 日)、110 d(2012 年 2 月 2 日)、140 d(2012 年 3 月 3 日)、170 d(2012 年 4 月 2 日)取样,测定水培青蒜苗的形态指标(株高、假茎长、假茎粗、叶宽)、叶片色素含量、营养品质指标(大蒜素、可溶性糖、维生素 C、游离氨基酸及可溶性蛋白)及钙含量,各处理取代表性植株 10 株,去除干老部分,混匀,3 次重复。于 2012 年 3 月 13 日测定青蒜苗的光合参数(净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度)。

用卷尺(精确到 1 mm)测量株高(将植株拉直,茎盘处到最长叶尖的距离)、假茎长(茎盘处至上端叶片与叶鞘明显分界处的距离)及叶宽(植株顶端以下第 4 片叶中间宽度),用游标卡尺(精确到 0.02 mm)测量假茎粗(假茎基部的最大直径)。色素、大蒜素、可溶性糖、维生素 C、游离氨基酸、可溶性蛋白及钙含量的测定分别采用丙酮比色法[18]、苯腙法[19]、蒽酮比色法[18]、2,6-二氯靛酚比色法[20]、茚三酮法[18]、考马斯亮蓝法[18]及 HNO_3-HClO_4 原子吸收分光光度法[21]。光合参数采用 CIRAS-1 光合仪于上午 8:30～10:00 进行测定,气温在 18～19 ℃,叶温在 19～20 ℃,光强为 1100～1200 μmol/($m^2 \cdot s$),外界 CO_2 浓度为 420 μmol/mol,测定部位为从上数第 4 片叶中间,每处理随机测 5 株,3 次重复。

试验数据采用 DPS6.55 和 Excel 进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　钙对青蒜苗钙含量的影响

由图 1 可知,施钙能显著提高青蒜苗的钙含量,各时期假茎和叶片钙含量均随着营养液钙浓度的升高而升高,5.0 mmol/L 处理时最大,此时比不施钙处理分别提高 27.8%～38.2% 和 28.6%～57.8%。

2.2　钙对青蒜苗生长的影响

从表 1 可以看出,各时期钙在 0～3.0 mmol/L 范围内,青蒜苗株高、假茎长、假茎粗及叶宽均随钙水平的提高而增大,在 3.0 mmol/L 处达到最大值,

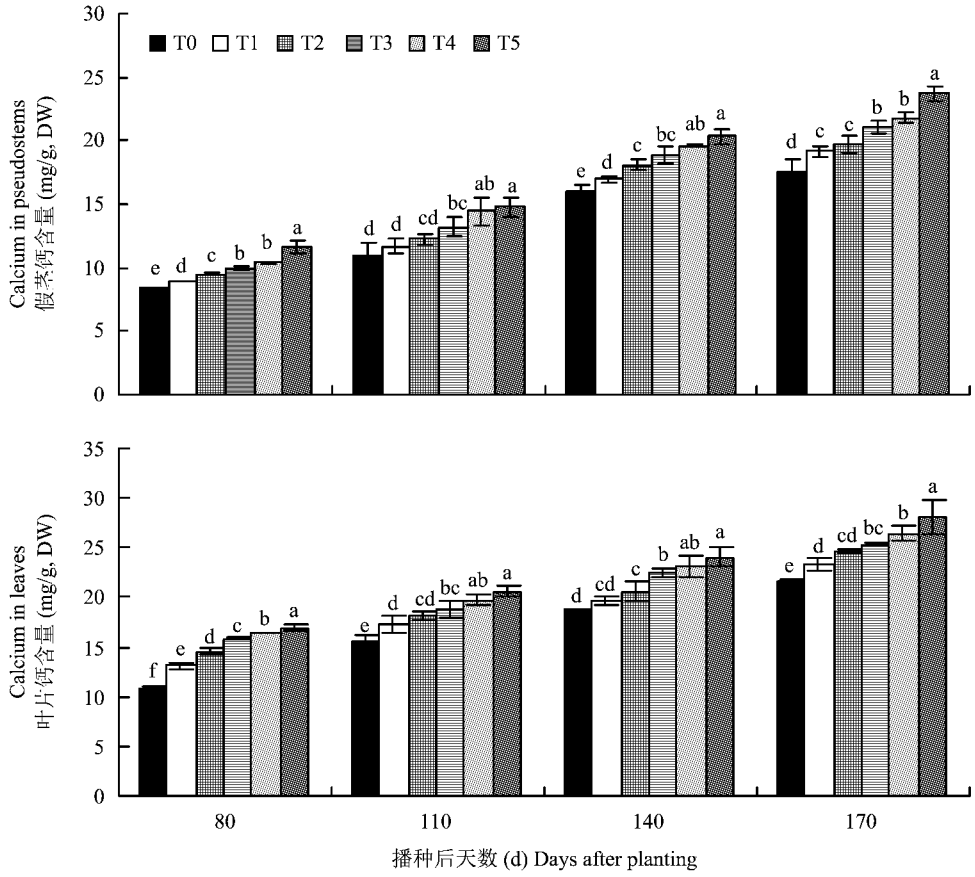

图1 钙对青蒜苗假茎、叶片钙含量的影响

Fig. 1 Effect of calcium in the nutrient solution on calcium content of garlic pseudostems and leaves

[注(Note):柱上不同字母表示同一采样期处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars at the same sampling date mean significantly different at the 5% level.]

播种后80 d较不施钙处理分别增加7.7%、28.6%、36.2%及53.1%;播种后110 d较不施钙处理分别增加24.7%、47.3%、23.3%及30.1%;播种后140 d较不施钙处理分别增加37.8%、36.9%、38.9%及25.3%;播种后170 d较不施钙处理分别增加24.2%、48.4%、19.7%及25.6%。当钙高于3.0 mmol/L时,各时期青蒜苗的上述形态指标则随钙水平的提高而减小。可见,钙能显著促进青蒜苗的生长,3.0 mmol/L处理的促进作用最大。

2.3 钙对青蒜苗叶片色素含量和光合参数的影响

2.3.1 钙对青蒜苗叶片色素含量的影响 图2显示,钙能明显促进青蒜苗叶片色素的合成,从而有效地促进光合作用。各时期3.0 mmol/L的钙浓度对叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)及类胡萝卜素合成的促进作用最大,播种后80 d较不施钙处理分别增加34.0%、95.5%、42.6%及62.0%;播种后110 d较不施钙处理分别增加33.3%、130.8%、47.8%及84.3%;播种后140 d较不施钙处理分别增加28.1%、77.8%、38.8%及80.7%;播种后170 d较不施钙处理分别增加19.4%、64.8%、29.3%及77.5%。可见,3.0 mmol/L处理对青蒜苗叶片色素合成的促进作用最大,最有利于光合作用的顺利进行。

2.3.2 钙对青蒜苗叶片光合参数的影响 表2表明,钙浓度在0~3.0 mmol/L范围内时,随钙水平的提高,青蒜苗叶片的净光合速率随之提高;钙浓度在3.0~5.0 mmol/L范围内时,净光合速率则随钙水平的提高而下降。蒸腾速率和气孔导度的变化趋势与净光合速率一致,胞间CO_2浓度则始终随钙水平的升高而减小。由此可以看出,钙能显著促进青蒜苗叶片的光合作用,且3.0 mmol/L处理对其促进效果最好。

2.4 钙对青蒜苗营养品质的影响

2.4.1 钙对青蒜苗大蒜素、可溶性糖及维生素C含

表 1　钙对青蒜苗株高、假茎长、假茎粗及叶宽的影响

Table 1　Effects of calcium in the nutrient solution on plant height, pseudostem length, pseudostem diameter and leaf width of garlic seedlings

播种后天数 Days after planting (d)	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	假茎长 Pseudostem length (cm)	假茎粗 Pseudostem diameter (mm)	叶宽 Leaf width (cm)
80	T0	36.52 ±0.51 cD	3.85 ±0.12 bB	9.97 ±0.06 eD	1.92 ±0.19 dD
	T1	37.24 ±0.13 bcCD	4.25 ±0.12 bAB	10.79 ±0.28 dCD	2.14 ±0.08 dCD
	T2	38.08 ±0.13 bBC	4.29 ±0.27 bAB	12.77 ±0.27 bAB	2.62 ±0.09 bcAB
	T3	39.34 ±0.45 aA	4.95 ±0.50 aA	13.58 ±0.49 abA	2.94 ±0.07 aA
	T4	38.91 ±0.18 aAB	4.89 ±0.16 aA	12.79 ±0.86 bAB	2.86 ±0.07 abAB
	T5	37.61 ±1.18 bCD	3.89 ±0.12 bB	11.75 ±0.29 cBC	2.51 ±0.21 cBC
110	T0	37.87 ±0.55 cD	5.31 ±0.65 cC	12.79 ±0.33 dD	2.39 ±0.26 dC
	T1	39.34 ±0.75 cCD	6.79 ±0.42 bB	13.31 ±0.51 cdCD	2.69 ±0.17 bcBC
	T2	41.66 ±1.41 bBC	7.34 ±0.19 abAB	13.77 ±0.24 bcCD	2.88 ±0.08 abcAB
	T3	47.24 ±0.75 aA	7.82 ±0.31 aA	15.77 ±0.57 aA	3.11 ±0.13 aA
	T4	43.18 ±0.77 bB	7.19 ±0.35 abAB	15.14 ±0.47 aAB	2.90 ±0.15 abAB
	T5	39.23 ±1.05 cCD	6.81 ±0.24 bB	14.25 ±0.58 bBC	2.62 ±0.09 cdBC
140	T0	53.10 ±1.31 eE	16.23 ±0.91 dD	15.68 ±0.24 fD	2.96 ±0.09 dD
	T1	57.89 ±2.22 dD	18.46 ±1.02 cC	16.72 ±0.18 eC	3.20 ±0.04 cCD
	T2	65.72 ±2.90 cBC	20.47 ±0.88 bB	18.07 ±0.12dB	3.40 ±0.06 bBC
	T3	73.15 ±1.28 aA	22.22 ±0.32 aA	21.78 ±0.49 aA	3.71 ±0.11 aA
	T4	69.55 ±2.08 bAB	20.70 ±0.93 bAB	20.94 ±0.32 bA	3.58 ±0.13 aAB
	T5	64.82 ±0.97 cC	17.93 ±0.89 cC	18.90 ±0.46 cB	3.27 ±0.09 bcC
170	T0	76.13 ±1.40 dC	23.81 ±0.28 eD	21.64 ±0.20 dD	3.05 ±0.07 eE
	T1	80.26 ±1.69 cC	32.02 ±0.38 cB	23.25 ±0.41 cC	3.33 ±0.08 dD
	T2	87.14 ±1.58 bB	33.54 ±0.71 bAB	24.22 ±0.29 bB	3.47 ±0.04 cC
	T3	94.55 ±1.29 aA	35.34 ±0.34 aA	25.91 ±0.19 aA	3.83 ±0.08 aA
	T4	91.71 ±1.19 aA	31.94 ±1.11 cB	24.79 ±0.42 bB	3.66 ±0.05 bB
	T5	86.12 ±1.65 bB	29.36 ±0.80 dC	22.88 ±0.45 cC	3.43 ±0.08 cCD

注(Note): 表中同一采样期同列数据后不同小、大写字母分别表示差异达5%和1%显著水平 Different small and capital letters in a column at the same sampling date mean significantly different at the 5% and 1% levels, respectively.

量的影响　从图 3 可以看出,钙能显著促进青蒜苗生成大蒜素,各时期假茎和叶片中大蒜素的含量均随钙水平的提高呈先升高后降低的趋势,且均在 T3 (3.0 mmol/L)处理处达到最大值;假茎和叶片中可溶性糖和维生素 C 含量的变化趋势与大蒜素一致。

由此可知, 3.0 mmol/L 的钙浓度最能促进青蒜苗生成可溶性糖、维生素 C 及大蒜素,钙过高或过低均不利于这 3 种营养品质指标的提高。

2.4.2　钙对青蒜苗游离氨基酸和可溶性蛋白含量的影响

图 4 表明,各时期青蒜苗假茎和叶片中游离氨基酸的含量随钙水平的提高呈先升高后下降的趋势,在 T3(3.0 mmol/L)处理达到最大值。假茎和叶片中可溶性蛋白含量的变化趋势与游离氨基酸相似,也在 T3(3.0 mmol/L)处理达到最大值。由此可见,钙在提高青蒜苗游离氨基酸和可溶性蛋白这 2 种营养品质指标中发挥重要作用,3.0 mmol/L 的钙浓度对它们的合成最有利。

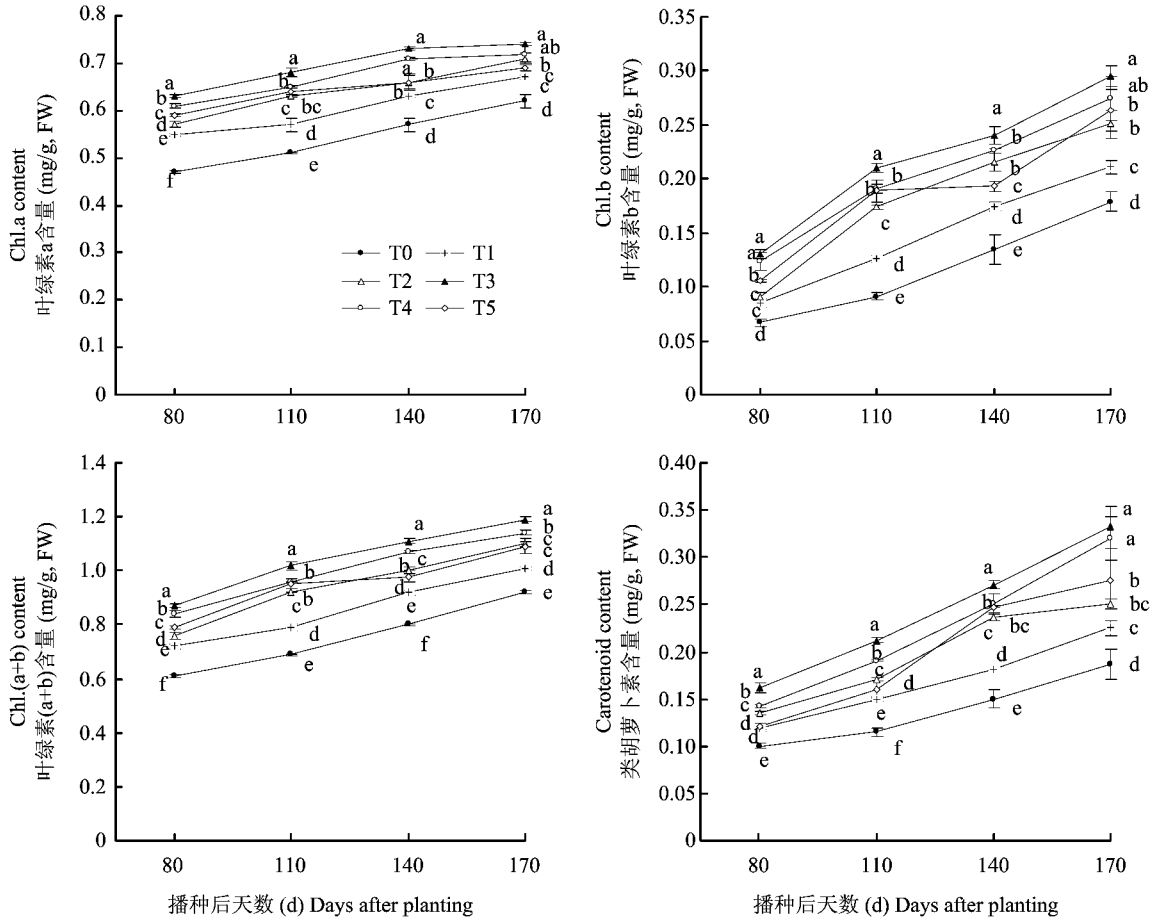

图2 钙对青蒜苗叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Fig. 2 Effects of calcium in the nutrient solution on the contents of chlorophyl and carotenoid in garlic leaves

[注(Note): 图中不同字母表示同一采样期处理间差异达5%显著水平 Different letters at the same sampling date mean significantly different at the 5% level.]

表2 钙对青蒜苗叶片光合参数的影响

Table 2 Effects of calcium in the nutrient solution on photosynthetic parameters of garlic leaves

处理 Treatment	净光合速率(Pn) Net photosynthetic rate [μmol/(m²·s)]	蒸腾速率(Tr) Transpiration rate [mol/(m²·s)]	气孔导度(Gs) Stomatal conductance [mmol/(m²·s)]	胞间 CO_2 浓度(Ci) Intercellular CO_2 conc. (μmol/mol)
T0	13.50 ±0.30 dC	2.97 ±0.31 eD	326.33 ±9.07 eD	357.00 ±8.00 aA
T1	15.13 ±0.55 cC	3.61 ±0.19 dC	331.00 ±4.58 eD	325.00 ±8.72 bB
T2	19.57 ±1.15 bB	4.54 ±0.13 bB	375.33 ±9.02 dC	309.33 ±5.69 cB
T3	23.93 ±0.61 aA	5.26 ±0.16 aA	460.67 ±6.03 aA	281.67 ±5.86 dC
T4	18.67 ±1.07 bB	4.43 ±0.14 bB	431.00 ±9.17 bB	280.33 ±4.04 dC
T5	14.47 ±0.74 cdC	4.04 ±0.18 cBC	408.67 ±13.65 cB	258.00 ±7.94 eD

注(Note): 表中同列数据后不同小、大写字母分别表示差异达5%和1%显著水平 Different small and capital letters in a column mean significantly different at the 5% and 1% levels, respectively.

3 讨论与结论

钙不仅是植物细胞分裂所必需的成分,而且是促进碳水化合物转运、转化以及其他营养元素吸收代谢[10, 22-31]的功能元素,所以,它能有效地促进植物生长。本试验结果表明,钙能显著促进青蒜苗各

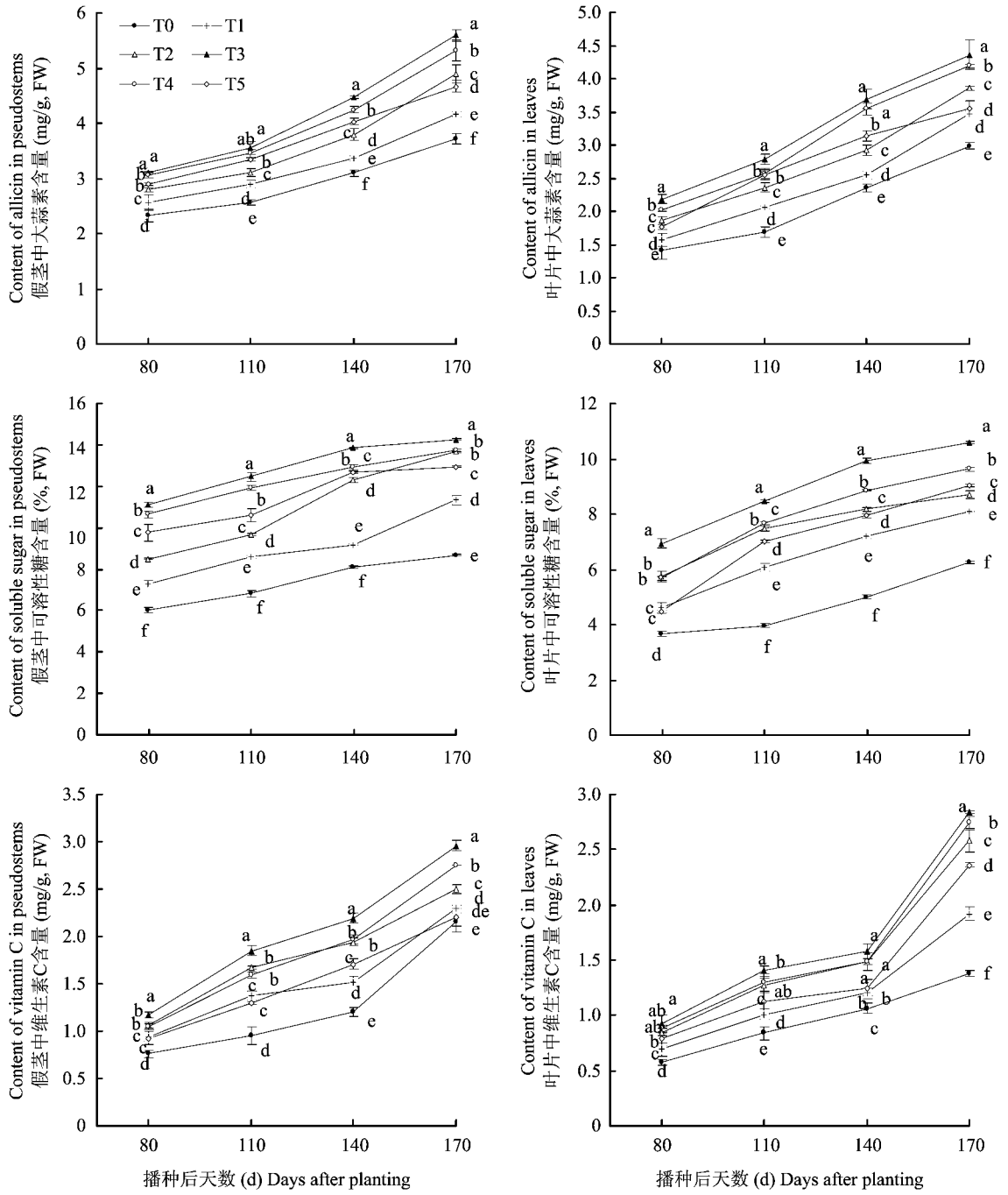

图 3　钙对青蒜苗大蒜素、可溶性糖及维生素 C 含量的影响

Fig. 3　Effects of calcium in the nutrient solution on the contents of allicin, soluble sugar and vitamin C in garlic seedlings

[注(Note):图中不同字母表示同一采样期处理间差异达 5% 显著水平 Different letters at the same sampling date mean significantly different at the 5% level.]

生长期的生长,且 3.0 mmol/L 的钙浓度对青蒜苗株高、假茎长、假茎粗及叶宽的促进作用最大,钙过高或过低均不利于青蒜苗生长。这与其他学者在黄瓜[32]、西瓜[33]、红葱[34]、烟草[35-36]、番茄[37]、枇杷[38]、大豆[39]、甘蔗[40]等作物上的研究类似。钙过量影响青蒜苗生长的原因可能是抑制了青蒜苗对其他元素的吸收[26, 41-43],也可能通过影响光合系统(破坏膜结构并导致电子传递链受阻)来抑制青蒜苗生长[44]。

钙以被动吸收为主,主要是在蒸腾作用下通过蒸腾水流进入植物体[45],植物所处的钙营养环境直接影响其对钙的吸收和分配。前人研究显示,钙处

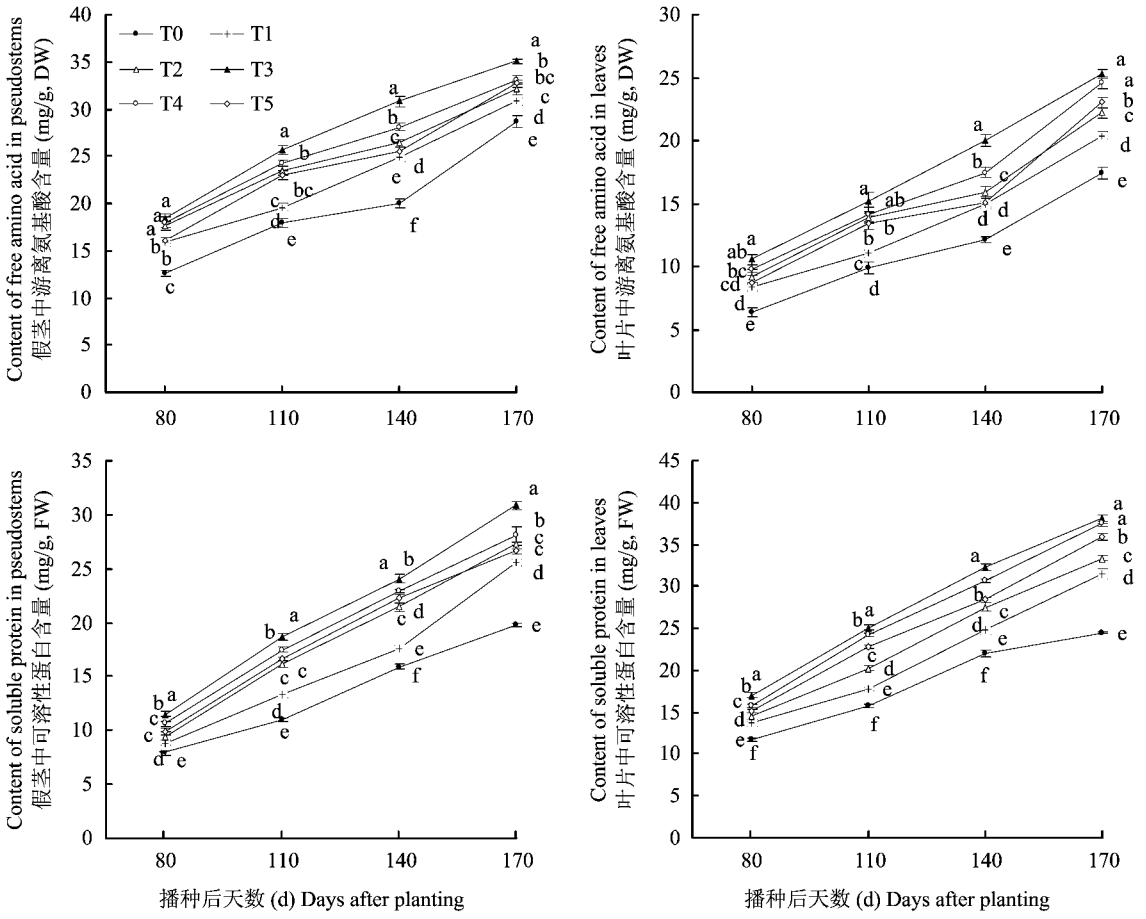

图4 钙对青蒜苗游离氨基酸和可溶性蛋白含量的影响

Fig. 4 Effects of calcium in the nutrient solution on the contents of free amino acid and soluble protein in garlic seedlings

[注(Note):图中不同字母表示同一采样期处理间差异达5%显著水平 Different letters at the same sampling date mean significantly different at the 5% level.]

理能明显增加植物体内的钙含量,其与钙供应量基本成正相关[28, 30, 46-47],本试验结果与之类似,即钙显著提高了青蒜苗假茎和叶片中的钙含量,并在最大钙浓度(5.0 mmol/L)时达到最大值。

钙能提高植物叶片色素含量和促进光合速率在柠檬[48]、牡丹[49]、甘草[50]、红葱[34]、花生[25, 51]等作物研究中均有报道。本研究结果显示,适量的钙能显著提高青蒜苗叶片叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)及类胡萝卜素的含量,同时能显著提高青蒜苗叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度;高钙或低钙均导致色素含量和光合速率下降,青蒜苗在3.0 mmol/L钙浓度时的光合状态最佳。缺钙时,青蒜苗叶片的净光合速率下降,气孔导度下降,而胞间CO_2浓度升高,说明缺钙导致光合速率下降的原因是非气孔限制,即光合机构活性降低[52];高钙时,青蒜苗叶片的净光合速率下降,气孔导度下降,同时胞间CO_2浓度也下降,说明高钙导致光合速率下降的原因是气孔限制[52-53]。

大蒜素是葱蒜类作物所特有的营养物质,对人体有诸多保健功效。有人指出,缺钙会抑制植物合成大蒜素[34],这在本研究中再一次得到证实。本研究结果显示,营养液中一定浓度的钙能显著提高青蒜苗假茎和叶片中大蒜素的含量,缺钙或高钙均不利于其合成。大蒜素的合成可能与钙硫的相互作用有关,因为大蒜素是含硫化合物,植物吸收Ca^{2+}的同时会将SO_4^{2-}带入[28],从而促进大蒜素的合成;缺钙则可能会抑制植物对硫的吸收,进而导致大蒜素合成受阻,高钙抑制大蒜素合成的原因还有待研究。

可溶性糖作为植物组织中的糖代表,是光合作用的初级产物,同时也是植物各种生理生化代谢途径的前提物质。本研究结果显示,营养液中一定浓度的钙能显著提高青蒜苗假茎和叶片中可溶性糖的

含量，缺钙或高钙均不利于其合成，这可能与钙影响光合作用这一前提直接相关。这与其他学者[46, 54-55]的研究结果类似。

维生素 C 为抗氧化物质，能清除活性氧自由基，降低膜脂过氧化，保护细胞[56]。本研究结果得出，营养液中一定浓度的钙能促进青蒜苗假茎和叶片中维生素 C 的合成。这与前人在其他作物[10, 26, 46, 55]上的研究结果类似，而与刘卫萍等指出的缺钙使红葱叶片和假茎中维生素 C 含量升高的观点不一致[34]。钙在一定浓度范围内促进维生素 C 合成的原因可能是钙提高了促进维生素 C 合成及积累的相关酶的活性，缺钙和高钙均可能抑制此类酶的活性。

植物体内的可溶性蛋白大部分是参与各种代谢的酶类，测定其含量是了解植物抗逆性的一个重要指标[57]；植物组织中的游离氨基酸（尤其是脯氨酸）的含量通常被认为是提高植物抗逆性的生理指标。钙可以提高农作物体内赖氨酸、蛋氨酸、脯氨酸、可溶性蛋白的含量，从而提高品质和抗逆性[25, 51, 58-59]。牟咏花等认为，缺钙可引起番茄花期叶片中蛋白质降解，阻止了 9 kd 蛋白组分的形成，而对 77 kd 蛋白组分的形成并未产生明显负面影响[60]。本研究结果显示，营养液中一定浓度的 Ca^{2+} 增加了青蒜苗假茎和叶片中游离氨基酸和可溶性蛋白的含量，提高了青蒜苗的品质和抗逆性，表明 Ca^{2+} 参与了氨基酸和蛋白质的合成代谢过程，这与张振兴等[61]的研究结果一致。钙促进氨基酸和蛋白质合成的原因可能是钙加速了植物对 N 的吸收代谢过程[25, 27]，缺钙和高钙均可能抑制此过程。

在水培条件下，钙对青蒜苗生长、光合特性、品质效应的结果分析表明，3.0 mmol/L 的钙浓度对青蒜苗各方面的影响效果最优。

参考文献：

[1] 陆景陵. 植物营养学（第 2 版）[M]. 北京：中国农业大学出版社，2003. 61-65.
Lu J L. Plant nutrition (2nd Ed.) [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. 61-65.

[2] Schwartz A, Ilan N, Grantz D A. Calcium effects on stomatal movements in commelina communis [J]. Plant Physiol., 1988, 87: 583-587.

[3] Assche F V, Clijsters H. Effects of metals on enzyme activity in plants [J]. Plant Cell Environ., 1990, 13(3): 195-206.

[4] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报，1999，16(4)：444-448.
Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance [J]. Chin. Bull. Bot., 1999, 16(4): 444-448.

[5] 周卫，林葆. 植物钙素营养机理研究进展[J]. 土壤学进展，1995，23(2)：12-17.
Zhou W, Lin B. The research progress of calcium nutrition mechanisms in plants [J]. Prog. Soil Sci., 1995, 23(2): 12-17.

[6] Adams P, Ho L C. Differential effects of salinity and humidity on growth and Ca status of tomato and cucumber grown in hydroponic culture [J]. Acta Hort., 1995, 401: 357-363.

[7] Bangerth F. Calcium-related physiological disorders of plants [J]. Ann. Rev. Phytopathol., 1979, 17: 97-122.

[8] 张君诚，张海平，官德义，庄伟建. 不同钙水平水培花生的生长表现及研究方法探讨[J]. 种子，2006，25(10)：51-52.
Zhang J C, Zhang H P, Guan D Y, Zhuang W J. The study of different calcium levels on growth expression of peanut and research methods [J]. Seed, 2006, 25(10): 51-52.

[9] 胡远富，王泽奇，施君信，郑桂萍. 氯化钙对大豆生长发育及抗逆性的促进效应研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报，2007，19(3)：39-42.
Hu Y F, Wang Z Q, Shi J X, Zheng G P. Study on the promoting effect of calcium chloride on the growth and resistance of soybean [J]. J. Heilongjiang BAYI Agric. Univ., 2007, 19(3): 39-42.

[10] 林葆，朱海舟，周卫. 硝酸钙对蔬菜产量与品质的影响[J]. 土壤肥料，2000，2：20-22.
Lin B, Zhu H Z, Zhou W. Effects of calcium nitrate on the yield and quality of vegetables [J]. Soils Fert., 2000, 2: 20-22.

[11] 沈志锦，彭克勤，张雪芹，等. 钙对蕹菜产量及生理生化指标的影响[J]. 湖南农业科学，2008，(3)：67-69.
Shen Z J, Peng K Q, Zhang X Q *et al*. Effect of Ca^{2+} on the yield, physiological and biochemical index of water spinach [J]. Hunan Agric. Sci., 2008, (3): 67-69.

[12] 刘世琦. 蔬菜栽培学简明教程[M]. 北京：化学工业出版社，2007. 173.
Liu S Q. Concise guide of olericulture [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. 173.

[13] 李树和，王震星，张洪顺. 大蒜有机生态型无土栽培技术[J]. 农业与技术，2003，23(5)：95-96.
Li S H, Wang Z X, Zhang H S. Garlic soilless cultivation techniques [J]. Agric. Tech., 2003, 23(5): 95-96.

[14] 王久兴，王子华. 现代蔬菜无土栽培[M]. 北京：科学技术文献出版社，2008. 329.
Wang J X, Wang Z H. Modern vegetables soilless culture [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 2008. 329.

[15] 刘中良，刘世琦，张自坤，等. 硫对设施水培大蒜光合特性和鳞茎品质的影响[J]. 园艺学报，2010，37(4)：581-588.
Liu Z L, Liu S Q, Zhang Z K *et al*. Effects of sulfur content in nutrient solution on photosynthetic characteristics and quality of garlic [J]. Acta Hort. Sin., 2010, 37(4): 581-588.

[16] 陈昆，刘世琦，张自坤，等. 钾素对水培大蒜生理和品质的影响[J]. 园艺学报，2011，38(3)：556-562.

Chen K, Liu S Q, Zhang Z K *et al*. Effects of potassium in nutrient solution on physiological characteristics and quality of garlic[J]. Acta Hort. Sin., 2011, 38(3): 556-562.

[17] 张涛, 刘世琦, 孙齐, 等. 水培条件下硼对青蒜苗光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 154-161.
Zhang T, Liu S Q, Sun Q *et al*. Effects of boron content in nutrient solution on photosynthetic characteristics and quality of garlic seedling[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(1): 154-161.

[18] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
Zhao S J, Shi G A, Dong X C. Guidance of plant physiology experiments [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.

[19] 屈姝存, 周朴华. 大蒜油提取及大蒜油与大蒜渣的化学成分分析[J]. 湖南农业大学学报, 1998, 24(3): 235-237.
Qu S C, Zhou P H. The extraction of dially thiosulfonate and the analyses of chemical composition of garlic oil and the residue[J]. J. Hunan Agric. Univ., 1998, 24(3): 235-237.

[20] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Wang X K. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments (2nd Ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[22] 王丽萍, 任良玉, 王冉, 陈贵林. 钙对黄瓜幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(1): 34-37.
Wang L P, Ren L Y, Wang R, Chen G L. Effects of calcium on the growth and antioxidant systems of cucumber seedlings[J]. J. Hebei Agric. Univ., 2004, 27(1): 34-37.

[23] 周恩生, 陈家驹, 王飞, 等. 钙胁迫下花生荚果微区特征及植株生理生化反应变化[J]. 福建农业学报, 2008, 23(3): 318-321.
Zhou E S, Chen J J, Wang F *et al*. Microanalysis characteristics of peanut pods and plant physiological and biochemical responses under Ca stress[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2008, 23(3): 318-321.

[24] 肖常沛. 不同供钙水平对黄瓜生长、养分吸收和酶活性的影响[J]. 广西热带农业, 2001, (2): 4-6.
Xiao C P. Effects of different calcium application levels on growth, absorption of nutrients and enzymatic activities of cucumber[J]. Guangxi Tropic. Agric., 2001, (2): 4-6.

[25] 周录英, 李向东, 王丽丽, 等. 钙肥不同用量对花生生理特性及产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 879-885.
Zhou L Y, Li X D, Wang L L *et al*. Effects of different Ca application rates on physiological characteristics, yield and quality of peanut[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(5): 879-885.

[26] 杨竹青. 钙镁肥对番茄产量品质和养分吸收的影响[J]. 土壤肥料, 1994, (2): 14-18.
Yang Z Q. Effects of calcium and magnesium fertilizer on yield, quality and absorption of nutrient of tomato[J]. Soils Fert., 1994, (2): 14-18.

[27] 杨志敏, 周燮. 钙对黄瓜幼苗吸收和同化铵态氮的影响[J]. 园艺学报, 1989, 16(3): 205-209.
Yang Z M, Zhou X. Influences of calcium on the NH_4^+-N uptake and assimilation of cucumber seedlings[J]. Acta Hort. Sin., 1989, 16(3): 205-209.

[28] 宋国菡, 杨力, 刘光栋, 等. 钙对结球甘蓝钙镁硫吸收分配影响的研究[J]. 山东农业大学学报, 1998, 29(4): 495-502.
Song G H, Yang L, Liu G D *et al*. The effect of calcium on the absorption and distribution of calcium, magnesium and sulfur in cabbage[J]. J. Shandong Agric. Univ., 1998, 29(4): 495-502.

[29] 应泉盛, 朱祝军, 李伟龙, 等. 氮、钙营养对青花菜花球品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2005, (5): 346-348.
Ying Q S, Zhu Z J, Li W L *et al*. Effect of nitrogen and calcium nutrition on ball-flower quality of broccoli [J]. J. Zhejiang Agric. Sci., 2005, (5): 346-348.

[30] 邓兰生, 涂攀峰, 龚林, 等. 滴施外源钙对香蕉生长及矿质营养吸收的影响[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(1): 34-39.
Deng L S, Tu P F, Gong L *et al*. Effect of calcium treatment by means of drip fertigation on growth and absorption of mineral nutrients in banana[J]. Acta Agric. Univ. Jiangxiensis, 2012, 34(1): 34-39.

[31] 肖常沛, 杨竹青. 不同钙、镁肥对蔬菜产量和品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2000, (4): 27-29.
Xiao C P, Yang Z Q. Effects of different calcium and magnesium fertilizer on the yield and quality of vegetables[J]. J. Changjiang Veget., 2000, (4): 27-29.

[32] 梁文娟, 王美玲, 孙晓琦, 等. 钙对日光温室黄瓜生长及产量的影响[J]. 中国蔬菜, 2008, (1): 18-19.
Liang W J, Wang M L, Sun X Q *et al*. Effect of calcium on growth and yield of cucumber in solar greenhouse[J]. China Veget., 2008, (1): 18-19.

[33] 赵晓美, 王红梅, 杨卫, 龙明华. 钙对西瓜幼苗生长、光合特性及保护性酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2012, (14): 144-146.
Zhao X M, Wang H M, Yang W, Long M H. Effects of different Ca^{2+} concentrations on the growth, photosynthetic characteristics, protective enzyme activity of watermelon seedling[J]. Northern Hort., 2012, (14): 144-146.

[34] 刘卫萍, 陈日远, 孙光闻, 刘厚诚. 不同钙素水平对红葱生长和品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2008, (2): 25-27.
Liu W P, Chen R Y, Sun G W, Liu H C. Effects of calcium levels on growth and nutrition quality of bunching onion[J]. China Veget., 2008, (2): 25-27.

[35] 汪邓民，周冀衡，朱显灵，等. K、Ca、Zn 离子对烤烟种子萌发及幼苗抗旱性的影响[J]. 中国烟草科学，1998，(1)：14-18.
Wang D M, Zhou J H, Zhu X L *et al*. The effects of K, Ca, Zn ions on seed germination of different flue cured tobacco genotypes and seedling drought resistance[J]. Chin. Tob. Sci., 1998, (1): 14-18.

[36] 杨宇虹，崔国明，黄必志，等. 钙对烤烟产质量及其主要植物学性状的影响[J]. 云南农业大学学报，1999，14(2)：148-152.
Yang Y H, Cui G M, Huang B Z *et al*. Effect of Ca^{2+} on yield, quality and botanical characteristics of tobacco[J]. J. Yunnan Agric. Univ., 1999, 14(2): 148-152.

[37] 杨丽娟，张玉龙，杨黾，常青. 灌水方式与施钙水平对盆栽番茄产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2011，30(2)：60-62.
Yang L J, Zhang Y L, Yang M, Chang Q. Effect of irrigation method on yield and quality of tomato under different calcium levels[J]. J. Irrig. Drain., 2011, 30(2): 60-62.

[38] 廖汝玉，金光，尹兰香，等. 不同浓度钙处理对枇杷小苗生长的影响[J]. 福建农业学报，2007，22(1)：27-30.
Liao R Y, Jin G, Yin L X *et al*. Effect of calcium concentration on the growth of loquat seedlings[J]. Fujian J. Agric. Sci., 2007, 22(1): 27-30.

[39] 高向阳，杨根平，许志强，徐凤彩. 水分胁迫下钙对大豆膜脂过氧化保护酶系统的影响[J]. 华南农业大学学报，1999，20(2)：7-12.
Gao X Y, Yang G P, Xu Z Q, Xu F C. Effect of calcium on anti-oxidant enzymes of lipid peroxidation of soybean leaves under water stress[J]. J. South China Agric. Univ., 1999, 20(2): 7-12.

[40] 胡永刚，常城. 硝酸铵钙对甘蔗产量及品质的影响[J]. 云南化工，2004，31(6)：46-47.
Hu Y G, Chang C. Effects of calcium ammonium nitrate on yield and quality of sugarcane[J]. Yunnan Chem. Technol., 2004, 31(6): 46-47.

[41] 吴洵. 茶树的钙镁营养及土壤调控[J]. 茶叶科学，1994，14(2)：115-121.
Wu X. Calcium and magnesium nutritions for tea plants and their soil controls[J]. J. Tea Sci., 1994, 14(2): 115-121.

[42] 赵鹏，谭金芳，介晓磊，等. 施钾条件下烟草钾与钙镁相互关系的研究[J]. 中国烟草学报，2000，6(1)：23-26.
Zhao P, Tan J F, Jie X L *et al*. The relationship between potassium and calcium/magnesium in tobacco when potash is applied[J]. Acta Tab. Sin., 2000, 6(1): 23-26.

[43] 范双喜，伊东正. 钙素对叶用莴苣营养吸收和生长发育的影响[J]. 园艺学报，2002，29(2)：149-152.
Fan S X, Yi D Z. Effects of calcium on nutrient absorption and growth and development of lactuca sativa var. longifolia lam. in nutrient film technique culture[J]. Acta Hort. Sin., 2002, 29(2): 149-152.

[44] 王跃华，张丽霞，孙其远. 钙过量对茶树光合特性及叶绿体超微结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(2)：432-438.
Wang Y H, Zhang L X, Sun Q Y. Effects of excessive calcium fertilization on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of tea tree[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 432-438.

[45] 周卫，汪洪. 植物钙吸收、转运及代谢的生理和分子机制[J]. 植物学通报，2007，24(6)：762-778.
Zhou W, Wang H. The physiological and molecular mechanisms of calcium uptake, transport, and metabolism in plants[J]. Chin. Bull. Bot., 2007, 24(6): 762-778.

[46] 李中勇，高东升，王闯，李政红. 土壤施钙对设施栽培油桃果实钙含量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(1)：191-196.
Li Z Y, Gao D S, Wang C, Li Z H. Effects of calcium application on calcium content and quality of nectarine under protected culture[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(1): 191-196.

[47] 周卫，林葆，朱海舟. 硝酸钙对花生生长和钙素吸收的影响[J]. 土壤通报，1995，26(5)：225-227.
Zhou W, Lin B, Zhu H Z. Effects of calcium nitrate on growth and calcium uptake of peanut[J]. Chin. J. Soil Sci., 1995, 26(5): 225-227.

[48] 周家荣，廖益，秦煊南. 硼钙营养对柠檬幼苗光合生理及根系活力的影响[J]. 西南农业大学学报，1998，20(4)：315-320.
Zhou J R, Liao Y, Qin X N. Effects of boron and calcium on photosynthetic physiology and root vigor of limon seedlings[J]. J. Southwest Agric. Univ., 1998, 20(4): 315-320.

[49] 陈向明，郑国生，张圣旺. 钙对保护地栽培牡丹光合特性的影响[J]. 园艺学报，2001，28(6)：572-574.
Chen X M, Zheng G S, Zhang S W. Effect of Ca^{2+} on photosynthetic characteristics of tree peony in protective field[J]. Acta Hort. Sin., 2001, 28(6): 572-574.

[50] 何桂芳，史秀霞，马凤琴，吴晓玲. 不同浓度钙对甘草生长和光合特性的影响[J]. 江苏农业科学，2012，(6)：384-385.
He G F, Shi X X, Ma F Q, Wu X L. Effects of calcium concentration on growth and photosynthetic characteristics of liquorice[J]. Jiangsu Agric. Sci., 2012, (6): 384-385.

[51] 周录英，李向东，王丽丽. 氮、磷、钾、钙肥不同用量对花生光合性能及产量品质的影响[J]. 花生学报，2006，35(2)：11-16.
Zhou L Y, Li X D, Wang L L. Effects of different application rates of N, P, K, Ca fertilizers on photosynthesis properties, yield and quality of peanut[J]. J. Peanut Sci., 2006, 35(2): 11-16.

[52] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯，1997，33(4)：241-244.
Xu D Q. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis[J]. Plant Physiol. Comm., 1997, 33(4): 241-244.

[53] 胡文海，喻景权. 低温弱光对番茄叶片光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 园艺学报，2001，28(1)：41-46.
Hu W H, Yu J Q. Effects of chilling under low light on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristic in tomato leaves[J]. Acta Hort. Sin., 2001, 28(1): 41-46.

[54] 张海平. 钙调控花生（*Arachis hypogaea* L.）生长发育的细胞生理机制研究[D]. 福州：福建农林大学硕士学位论文，2003.
Zhang H P. Study on physiology and cytology mechanism of peanut (*Arachis hypogaea* L.) growth and development regulated by calcium[D]. Fuzhou: MS thesis, Fujian Agriculture and Forestry University, 2003.

[55] 王萌，许孝瑞，刘成连，等. 钙营养对温室毛桃果实品质及生理生化特性的影响[J]. 中国农学通报，2009，25(8)：219-222.
Wang M, Xu X R, Liu C L *et al*. The effect of calcium on the fruit quality and physiological and biochemical characteristics of peach in greenhouse[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2009, 25(8): 219-222.

[56] 由继红，陆静梅，杨文杰. 钙对苜蓿幼苗抗寒性及相关生理指标影响的研究[J]. 草业学报，2003，12(1)：30-33.
You J H, Lu J M, Yang W J. Effects of Ca on cold tolerance and related physiological indices of alfalfa seedlings[J]. Acta Pratac. Sin., 2003, 12(1): 30-33.

[57] 史玉炜，王燕凌，李文兵，等. 水分胁迫对刚毛柽柳可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸含量变化的影响[J]. 新疆农业大学学报，2007，30(2)：5-8.
Shi Y W, Wang Y L, Li W B *et al*. Effects of water stress on soluble protein, soluble sugar and proline content in tamarix hispida[J]. J. Xinjiang Agric. Univ., 2007, 30(2): 5-8.

[58] 汪良驹，刘友良，马凯. 钙在无花果细胞盐诱导脯氨酸积累中的作用[J]. 植物生理学报，1999，25(1)：38-42.
Wang L J, Liu Y L, Ma K. The role of calcium in promotion of proline accumulation induced by salt stress in fig (*Ficus carica* L.) cells[J]. Acta Phytophysiol. Sin., 1999, 25(1): 38-42.

[59] 段咏新，宋松泉，傅家瑞. 钙对延缓杂交水稻叶片衰老的作用机理[J]. 杂交水稻，1997，12(6)：23-25.
Duan Y X, Song S Q, Fu J R. Mechanism of calcium on delaying senescence of leaves in hybrid rice[J]. Hybrid Rice, 1997, 12(6): 23-25.

[60] 牟咏花，陆定志，饶立华. 番茄花期缺钙与果实脐腐病关系研究[J]. 园艺学报，1992，19(3)：251-255.
Mu Y H, Lu D Z, Rao L H. Studies on the relationship between Ca-deficiency during flowering stage and blossom-end rot in tomato fruits[J]. Acta Hortic. Sin., 1992, 19(3): 251-255.

[61] 张振兴，孙锦，郭世荣，童辉. 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.
Zhang Z X, Sun J, Guo S R, Tong H. Effects of supplemental calcium on the photosynthetic characteristics and fruit quality of watermelon under salt stress[J]. Acta Hort. Sin., 2011, 38(10): 1929-1938.