

钙对水培大蒜光合特性和品质的影响

李 贺, 刘世琦*, 王 越, 刘景凯, 冯 磊, 陈祥伟

(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, 山东泰安 271018)

摘要: 在水培条件下, 营养液设 6 个钙浓度 (0、1.0、2.0、3.0、4.0 和 5.0 mmol·L⁻¹), 研究钙对大蒜光合特性、食用器官 (蒜薹和鳞茎) 钙含量及品质的影响。结果显示: 蒜薹和鳞茎钙含量随营养液钙浓度的增加而增加; 在钙浓度 0~3.0 mmol·L⁻¹ 范围内, 大蒜叶片色素含量、净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (E) 及气孔导度 (G_s) 随钙浓度的升高而升高, 而后则随钙浓度的升高而降低; 蒜薹的鲜质量、直径及抽薹率和鳞茎的鲜质量及横径均随营养液钙浓度的升高而呈现先增大后减小的趋势, 在 3.0 mmol·L⁻¹ 钙浓度下最大; 同时, 蒜薹和鳞茎中大蒜素、可溶性糖、维生素 C、游离氨基酸及可溶性蛋白含量的变化趋势也是先随钙浓度的升高而升高, 而后随之下降, 在 3.0 mmol·L⁻¹ 钙浓度下达到最高值, 比低钙浓度 (1.0 mmol·L⁻¹) 处理分别增加 54.7% 和 72.1%、33.9% 和 33.9%、11.5% 和 5.2%、19.3% 和 21.5%、32.6% 和 29.6%。由此可见, 水培条件下栽培大蒜的钙浓度以 3.0 mmol·L⁻¹ 为好。

关键词: 大蒜; 钙; 光合特性; 品质

中图分类号: S 633.3

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2013) 06-1169-09

Effects of Calcium on Photosynthetic Characteristics and Quality of Garlic

LI He, LIU Shi-qi*, WANG Yue, LIU Jing-kai, FENG Lei, and CHEN Xiang-wei

(College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Agriculture Ministry Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (Huanghai Region), Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: In this experiment, the effects of calcium in nutrient solution on calcium content, photosynthetic characteristics and qualities of garlic were studied. Six different Ca²⁺ concentrations at 0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mmol·L⁻¹ were designed. The results indicated that the calcium contents of garlic bolt and bulb were increased with the increase of calcium concentrations. When the calcium concentrations were in the range of 0~3.0 mmol·L⁻¹, the pigment contents and photosynthetic parameters (P_n , E , G_s) of garlic leaves were enhanced with the increase of calcium concentrations, then they were decreased with the increase of calcium concentrations. The fresh weight of bolt and bulb, the bolt diameter, the bolting rate and the transverse diameter of bulb were increased at first and then decreased with the increase of calcium concentrations, these shape indexes under 3.0 mmol·L⁻¹ treatment were the highest. At the same time, the contents of allicin, soluble sugar, vitamin C, free amino acid and soluble protein in bolt and bulb were also improved with the increase of calcium concentrations ranging from 0 to 3.0 mmol·L⁻¹, these

收稿日期: 2013-03-25; 修回日期: 2013-05-14

基金项目: 国家公益性行业科研专项 (20080318); 山东省农业重大创新项目

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: liusq99@sda.edu.cn)

indexes under $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ treatment were increased by 54.7% and 72.1%, 33.9% and 33.9%, 11.5% and 5.2%, 19.3% and 21.5%, 32.6% and 29.6% compared to the treatment of $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ calcium concentration, then they were diminished with the increase of calcium concentrations greater than $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. Thus it can be seen that, the $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ calcium concentration was the best treatment to garlic under hydroponic condition.

Key words: garlic; calcium; photosynthetic characteristic; quality

钙是植物所必需的大量元素，同时又作为胞内第二信使参与植物生长发育与衰老、光合作用电子传递和光合磷酸化、细胞的向性运动及激素调控等生理生化过程(Ferguson & Drobak, 1988; Bush, 1995; 牟咏花, 1995; 陆景陵, 2003)。另外，钙与细胞壁结构有着很重要的关系，缺钙会导致细胞壁不能形成，影响细胞分裂与形成，进而影响根尖、茎尖等分生组织的形成(刘秀春, 2004)。目前，有关钙与植物生长发育关系的报道较多。Ward 等(1986)指出，钙能直接或间接地促进大麦植株的渗透调节作用，从而促进大麦在盐胁迫下的正常生长发育；Gong 等(1997)认为，经 Ca^{2+} 处理的玉米种子提高了抗逆性；张海平(2003)的研究显示，适量的钙能提高花生叶片的色素含量和光合速率，还能增加花生籽仁中脂肪和蛋白质的含量；肖常沛(2001)的研究表明，钙能促进黄瓜对养分的吸收，促进生长，缺钙则导致叶片早衰及生长量下降。

有关营养元素对大蒜(*Allium sativum L.*)生长发育影响的研究已见报道(刘中良 等, 2010; 陈昆 等, 2011; 张涛 等, 2012)，本试验旨在探究在水培条件下，钙对大蒜光合作用及品质的影响，根据试验各指标结果确定大蒜水培适宜的钙浓度，为提高大蒜产量及品质提供参考。

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。营养液以Hoagland和Arnon营养液为基础(钙除外)，微量元素参照其通用配方，用去离子水配制，控制pH 6.0。设定6个 Ca^{2+} 浓度：0、1.0、2.0、3.0、4.0和5.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，钙由 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 提供。幼苗期(2011年10月至2012年1月)每7 d更换1次营养液，旺盛生长期(2012年2月至5月)3 d更换1次。试验所用盆为65 cm(长)×50 cm(宽)×35 cm(高)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蒜瓣，控制棚内温度0~25℃，自然光周期。于2012年4月2日取样，测定大蒜叶片的色素含量。于2012年4月7日测定大蒜叶片的光合参数(净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度)。于2012年5月5日和18日分别收取蒜薹和鳞茎(蒜头)，测定单蒜薹鲜质量、蒜薹直径、抽薹率、单蒜头鲜质量、蒜头横径和营养品质(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。

蒜薹采收标准为，从鳞茎上部10 cm的位置采收；鳞茎采收标准为，从鳞茎上部膨大处向上2 cm的位置剪去上部假茎，去除根系。用MP200B电子天平称量蒜薹和鳞茎的鲜质量；用游标卡尺测量蒜薹直径和蒜头横径。抽薹率为抽薹大蒜株数占大蒜总株数的百分比。

色素、可溶性糖、游离氨基酸及可溶性蛋白的测定分别采用丙酮比色法、蒽酮比色法、茚三酮

法及考马斯亮蓝法(赵世杰等, 2002), 大蒜素、维生素C及钙含量的测定分别采用苯腙法(屈姝存和周朴华, 1998)、2, 6-二氯靛酚比色法(王学奎, 2006)及HNO₃-HClO₄-原子吸收分光光度法(鲍士旦, 2000)。每处理取样10株, 混匀, 3次重复。光合参数采用CIRAS-1光合仪于上午8:30—10:00进行测定, 气温19~20℃, 叶温21~22℃, 光强1200~1300 μmol·m⁻²·s⁻¹, 外界CO₂浓度为430 μmol·mol⁻¹, 测定部位为从上数第4片叶中间, 每个处理随机测5株, 3次重复。

试验数据采用DPS6.55和Excel进行统计分析。由于缺钙严重影响大蒜生长发育, 无钙处理的大蒜在2012年4月中下旬出现叶片发黄、生长点坏死现象, 5月1日基本全部死亡, 因此该处理不涉及蒜薹和鳞茎的结果和讨论。

2 结果与分析

2.1 不同浓度钙处理对蒜薹和鳞茎钙含量的影响

从图1可以看出, 随着营养液中钙浓度的增加, 蒜薹和鳞茎的钙含量均随之升高, 5.0 mmol·L⁻¹钙浓度处理比1.0 mmol·L⁻¹低钙处理分别提高216.1%和60.4%。

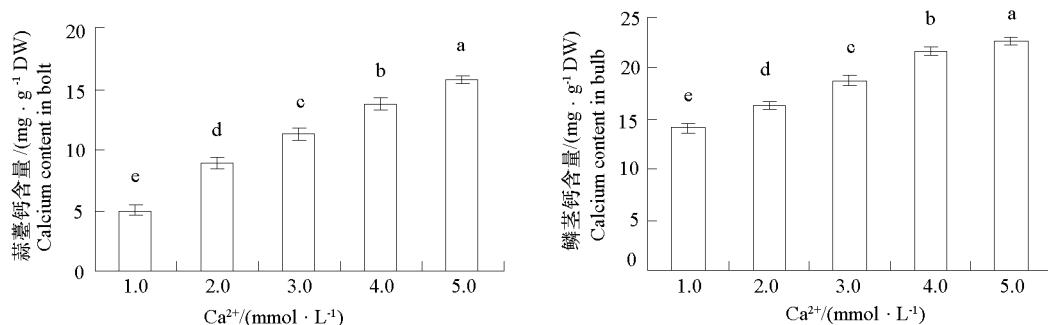


图1 钙对蒜薹和鳞茎钙含量的影响

不同小写字母表示差异达5%显著水平。

Fig. 1 Effect of calcium on calcium content of garlic bolts and bulbs

Different small letters mean significant at the 5% level.

2.2 不同浓度钙处理对大蒜叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

表1显示, 适量的钙能有效促进大蒜叶片色素的形成, 为光合作用提供前提条件。大蒜叶片中

表1 钙对大蒜叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Table 1 Effect of calcium on the content of chlorophyll and carotenoid in garlic leaves

Ca ²⁺ /(mmol · L ⁻¹)	叶绿素a/(mg · g ⁻¹ FW) Chl. a	叶绿素b/(mg · g ⁻¹ FW) Chl. b	叶绿素(a+b)/(mg · g ⁻¹ FW) Chl. (a+b)	类胡萝卜素/(mg · g ⁻¹ FW) Car.
0	0.62 d	0.179 d	0.92 e	0.187 d
1.0	0.67 c	0.211 c	1.01 d	0.225 c
2.0	0.71 b	0.251 b	1.10 c	0.251 bc
3.0	0.74 a	0.295 a	1.19 a	0.332 a
4.0	0.72 ab	0.275 ab	1.14 b	0.320 a
5.0	0.69 c	0.263 b	1.09 c	0.276 b

注: 表中同列数据后不同小写字母表示差异达5%显著水平。

Note: Different small letters in a column mean significant at the 5% level.

叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)及类胡萝卜素含量随营养液中钙浓度的升高均先升高后下降,在钙浓度 $3.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理中最高,比不施钙处理分别增加19.4%、64.8%、29.3%及77.5%。由此可见,当营养液中钙浓度为 $3.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,更有利于合成光合色素、促进光合作用及提高光能的转化效率。

2.3 不同浓度钙处理对大蒜叶片光合参数的影响

表2表明,钙能显著促进大蒜的光合作用。大蒜叶片的净光合速率随营养液钙浓度的升高呈现先升高后下降的趋势,在钙浓度 $3.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达最高;大蒜叶片的蒸腾速率和气孔导度的变化趋势与净光合速率一致,而胞间CO₂浓度随钙浓度的逐步升高而逐渐减小。可见,钙过低或过高均不利于大蒜进行光合作用,且钙对各个光合参数的影响是有差异的。

表2 钙对大蒜叶片光合参数的影响

Table 2 Effect of calcium on photosynthetic parameters of garlic leaves

$\text{Ca}^{2+}/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) P_n	蒸腾速率/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) E	气孔导度/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) G_s	胞间CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) C_i
0	8.93 f	4.16 d	220.67 f	278.33 a
1.0	19.73 e	5.90 c	287.00 e	249.33 b
2.0	24.67 c	6.13 b	324.00 d	238.00 c
3.0	26.97 a	6.34 a	356.33 a	228.33 d
4.0	25.90 b	6.14 b	344.33 b	218.00 e
5.0	23.57 d	5.87 c	332.00 c	209.67 f

注:表中同列数据后不同小写字母表示差异达5%显著水平。

Note: Different small letters in a column mean significant at the 5% level.

2.4 不同浓度钙处理对蒜薹和鳞茎外观品质的影响

由表3可知,适量的钙能有效改善蒜薹和鳞茎的外观品质。随营养液钙浓度的升高($1.0\sim3.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$),单蒜薹鲜质量、蒜薹直径、抽薹率、单蒜头鲜质量及蒜头横径均增大;当钙浓度继续升高($3.0\sim5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$),这些指标则减小。可见,营养液中过高或过低的钙均不利于大蒜外观品质的提高, $3.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的钙浓度对上述各指标的促进作用最大,比低钙处理($1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)分别提高55.1%、39.0%、386.6%、106.4%及22.1%。

表3 钙对大蒜薹和鳞茎外观品质的影响

Table 3 Effect of calcium on appearance quality of garlic bolts and bulbs

$\text{Ca}^{2+}/(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1})$	单蒜薹鲜质量/g Fresh weight of single bolt	蒜薹直径/mm Bolt diameter	抽薹率/% Bolting rate	单蒜头鲜质量/g Fresh weight of single bulb	蒜头横径/cm Transverse diameter
1.0	13.75 e	5.18 d	20.2	55.43 d	5.25 d
2.0	18.49 d	6.80 c	67.5	83.33 c	5.71 c
3.0	21.32 a	7.20 a	98.3	114.43 a	6.41 a
4.0	20.67 b	7.12 a	97.4	102.10 b	6.12 b
5.0	19.44 c	6.89 b	97.1	93.43 b	5.68 c

注:表中同列数据后不同小写字母表示差异达5%显著水平。

Note: Different small letters in a column mean significant at the 5% level.

2.5 不同浓度钙处理对蒜薹和鳞茎营养品质的影响

由表4可见,营养液中的钙浓度直接影响大蒜主要食用器官(蒜薹和鳞茎)的营养品质。在钙浓度 $1.0\sim3.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,蒜薹和鳞茎中大蒜素含量随着营养液钙浓度的升高而增加,在钙浓度 $3.0\sim5.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,大蒜素含量则随之减少。蒜薹和鳞茎中可溶性糖、维生素C、游离氨

基酸及可溶性蛋白含量的变化趋势与大蒜素相似。因此, 适量的钙能促进蒜薹和鳞茎中营养物质的形成, 且 $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钙浓度最有利于大蒜营养品质的提高。

表 4 钙对大蒜蒜薹和鳞茎营养品质的影响

Table 4 Effect of calcium on nutritional quality of garlic bolts and bulbs

器官 Organ	$\text{Ca}^{2+}/$ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	大蒜素/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Allicin	可溶性糖/ % Soluble sugar	维生素 C/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Vitamin C	游离氨基酸/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ DW) Free amino acid	可溶性蛋白/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) Soluble protein
蒜薹 Bolt	1.0	5.58 e	8.89 c	2.79 c	24.55 d	14.77 d
	2.0	6.38 d	11.73 a	2.91 bc	28.07 b	17.72 bc
	3.0	8.63 a	11.90 a	3.11 a	29.29 a	19.59 a
	4.0	7.96 b	11.53 a	2.98 b	27.37 b	18.15 b
	5.0	7.06 c	10.10 b	2.90 bc	26.09 c	16.75 c
鳞茎 Bulb	1.0	6.87 c	21.62 c	3.10 d	23.51 d	30.45 d
	2.0	10.12 b	23.77 b	3.19 b	25.05 c	34.05 c
	3.0	11.82 a	28.94 a	3.26 a	28.56 a	39.47 a
	4.0	11.73 a	24.25 b	3.15 bc	27.64 ab	36.97 b
	5.0	10.47 b	20.36 d	3.12 cd	26.92 b	33.72 c

注: 同列数据后不同小写字母表示相同器官差异达 5% 显著水平。

Note: Different small letters in a column mean significant at the 5% level of same organ.

3 讨论

钙以被动吸收为主, 主要在蒸腾作用下通过蒸腾水流进入植物体(周卫和汪洪, 2007), 植物的果实硬度与钙含量的高低有关(车玉红, 2005)。王萌等(2009)、邓兰生等(2012)、宋国菡等(1998)及张振兴等(2011)的研究均表明, 增加钙供应能明显提高植物体内的钙含量和细胞壁的强度。本研究结果与前人的类似, 即蒜薹和鳞茎钙含量与营养液中钙浓度呈正相关, 在钙浓度为最高时($5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)达到最大值。

缺钙会使单位叶面积叶绿素含量减少, 影响 α -淀粉酶、ATP 酶活性, 使光合淀粉水解受到影响(周家荣等, 1998), 还会导致叶肉细胞的液泡膜破裂, 类囊体片层结构破坏(周卫和林葆, 1995), 从而影响光合作用的顺利进行。Schwartz 等(1988)指出, Ca^{2+} 参与了气孔开闭的生理过程; Assche 和 Clijsters(1990)研究得出, 钙能提高植物叶片含水量, 使叶绿体膜结构保持稳定, 增强 Rubisco 酶和 PEP 羧化酶活性, 从而提高 CO_2 羧化效率。本研究结果显示, 适量的钙能显著提高大蒜叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)及类胡萝卜素的含量, 同时能提高大蒜叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度; 高钙或低钙均造成色素含量和光合效率下降, $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钙浓度能使大蒜保持最佳的光合状态; 缺钙时, 大蒜叶片净光合速率下降, 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(许大全, 1997); 高钙时, 大蒜叶片净光合速率下降, 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(许大全, 1997; 胡文海和喻景权, 2001)。这与龙明华等(2005)在甜瓜上的研究结果一致。

钙能促进植物体内碳水化合物的转化和其它营养元素的吸收代谢(杨志敏和周燮, 1989; 宋国菡等, 1998; 林葆等, 2000; 应泉盛等, 2005), 从而促进植物生长; 钙是细胞分裂所必需的成分, 缺钙会抑制植物正常的生长发育(王丽萍等, 2004)。本试验结果表明, 营养液中 $3.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的钙浓度对大蒜单蒜薹鲜质量、单蒜头鲜质量、抽薹率、蒜薹直径及蒜头横径的促进作用最大, 钙过高或过低均不利于大蒜正常的生长发育, 不利于外观品质的形成。这与梁文娟等(2008)在黄瓜

上、赵晓美等(2012)在西瓜上、刘卫萍等(2008)在红葱上以及汪邓民等(1998)和杨宇虹等(1999)在烟草上的研究结果类似。钙过高影响大蒜生长的原因可能是,过高的钙会抑制或拮抗其它元素的吸收(杨竹青,1994;吴洵,1994;赵鹏等,2000),进而影响正常的生长发育。

本研究的结果显示,一定浓度的钙能显著提高蒜薹和鳞茎大蒜素的含量,低钙或高钙均不利于其合成,3.0 mmol·L⁻¹钙处理的大蒜素含量最高,这与刘卫萍等(2008)在红葱上的研究结果类似。大蒜素是含硫化合物,植物吸收Ca²⁺的同时会将SO₄²⁻带入(宋国菡等,1998),进而促进大蒜素的合成;高钙则可能会抑制促进大蒜素合成的相关酶的活性,从而导致大蒜素的合成受阻。

钙能促进植物体内糖分的合成,缺钙会明显降低植物各器官可溶性糖的含量(张海平,2003;刘卫萍等,2008)。另外,朱娇等(2012)在百合切花上、王萌等(2009)在毛桃上以及李中勇等(2010)在油桃上的研究也表明了钙对植物合成可溶性糖尤为重要。本研究结果表明,一定浓度的钙能显著提高大蒜蒜薹和鳞茎可溶性糖的含量,3.0 mmol·L⁻¹钙处理的可溶性糖含量最高,低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。

本研究结果得出,适量的钙能提高大蒜蒜薹和鳞茎维生素C的含量,3.0 mmol·L⁻¹的钙对维生素C合成的促进作用最大,低钙或高钙均不利于其合成。这与其他学者在番茄(杨竹青,1994)、毛桃(王萌等,2009)、油桃(李中勇等,2010)上的研究结果类似,而与刘卫萍等(2008)指出的缺钙使红葱叶片和假茎维生素C含量升高的观点不一致。据本研究结果推测,适量的钙可能提高了促进维生素C合成及积累的相关酶的活性,这还有待进一步研究。

植物体内的可溶性蛋白大多数是参与各种代谢的酶类,游离氨基酸含量与果肉风味相关联(Keutgen & Pawelzik, 2008),二者还通常被认为是提高植物抗逆性的生理指标(胡远富等,2007;史玉炜等,2007)。钙能提高植物组织中可溶性蛋白和游离氨基酸含量在花生(周录英等,2006,2008)、无花果(汪良驹等,1999)、水稻(段咏新等,1997)等作物的研究中均有报道。本研究结果显示,营养液中一定浓度的钙增加了大蒜蒜薹和鳞茎游离氨基酸和可溶性蛋白的含量,提高了大蒜品质和抗逆性,且3.0 mmol·L⁻¹钙处理的效果最显著,由此表明Ca²⁺参与了氨基酸和蛋白质的合成代谢过程,这与张振兴等(2011)的研究结果一致,而与龙明华等(2005)报道的缺钙可引起甜瓜叶片可溶性蛋白含量升高的结论不一致。适量的钙促进氨基酸和蛋白质合成的原因可能是钙能加速植物体内对N的吸收代谢(杨志敏和周燮,1989;周录英等,2008),高钙或低钙均可能抑制该生理过程。

在水培条件下,适量的钙能改善大蒜叶片光合状况和提高大蒜品质,且钙浓度在3.0 mmol·L⁻¹时效果最好。

References

- Assche F V, Clijsters H. 1990. Effects of metals on enzyme activity in plants. *Plant Cell and Environment*, 13 (3): 195 - 206.
- Bao Shi-dan. 2000. Soil agricultural chemistry analysis. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
- Bush D S. 1995. Calcium regulation in plant cells and its role in signaling. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 46: 95 - 122.
- Chen Kun, Liu Shi-qi, Zhang Zi-kun, Zhang Tao, Meng Fan-lu. 2011. Effects of potassium in nutrient solution on physiological and quality of garlic. *Acta Horticulturae Sinica*, 38 (3): 556 - 562. (in Chinese)
- 陈昆, 刘世琦, 张自坤, 张涛, 孟凡鲁. 2011. 钾素对水培大蒜生理和品质的影响. 园艺学报, 38 (3): 556 - 562.
- Che Yu-hong. 2005. Study on the effect of calcium fertilizations on fruit quality and physiological and biochemical characteristics of Red Fuji apple [M. D. Dissertation]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University. (in Chinese)

- 车玉红. 2005. 钙肥对红富士苹果果品质及生理生化特性影响的研究[硕士论文]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- Deng Lan-sheng, Tu Pan-feng, Gong Lin, Ye Qian-qian, Chen Kang, Li Zhong-hua. 2012. Effect of calcium treatment by means of drip fertigation on growth and absorption of mineral nutrients in banana. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 34 (1): 34 - 39. (in Chinese)
- 邓兰生, 涂攀峰, 龚 林, 叶倩倩, 陈 康, 李中华. 2012. 滴施外源钙对香蕉生长及矿质营养吸收的影响. *江西农业大学学报*, 34 (1): 34 - 39.
- Duan Yong-xin, Song Song-quan, Fu Jia-rui. 1997. Effects of calcium on delaying senescence of leaves in hybrid rice. *Hybrid Rice*, 12 (6): 23 - 25. (in Chinese)
- 段咏新, 宋松泉, 傅家瑞. 1997. 钙对延缓杂交水稻叶片衰老的作用机理. *杂交水稻*, 12 (6): 23 - 25.
- Ferguson I B, Drobak B K. 1988. Calcium and the regulation of plant growth and senescence. *HortScience*, 23 (2): 262 - 266.
- Gong M, Chen S N, Song Y Q, Li Z G. 1997. Effect of calcium and calmodulin on intrinsic heat tolerance in relation to antioxidant systems in maize seedlings. *Functional Plant Biology*, 24 (3): 371 - 379.
- Hu Wen-hai, Yu Jing-quan. 2001. Effects of chilling under low light on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristic in tomato leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 28 (1): 41 - 46. (in Chinese)
- 胡文海, 喻景权. 2001. 低温弱光对番茄叶片光合作用和叶绿素荧光参数的影响. *园艺学报*, 28 (1): 41 - 46.
- Hu Yuan-fu, Wang Ze-qi, Shi Jun-xin, Zheng Gui-ping. 2007. Study on the promoting effect of calcium chloride to the growth and resistance of soybean. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University*, 19 (3): 39 - 42. (in Chinese)
- 胡远富, 王泽奇, 施君信, 郑桂萍. 2007. 氯化钙对大豆生长发育及抗逆性的促进效应研究. *黑龙江八一农垦大学学报*, 19 (3): 39 - 42.
- Keutgen A J, Pawelzik E. 2008. Quality and nutritional value of strawberry fruit under long term salt stress. *Food Chemistry*, 107 (4): 1413 - 1420.
- Li Zhong-yong, Gao Dong-sheng, Wang Chuang, Li Zheng-hong. 2010. Effects of calcium application on calcium content and quality of nectarine under protected culture. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 16 (1): 191 - 196. (in Chinese)
- 李中勇, 高东升, 王 闯, 李政红. 2010. 土壤施钙对设施栽培油桃果实钙含量及品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 16 (1): 191 - 196.
- Liang Wen-juan, Wang Mei-ling, Sun Xiao-qi, Wang Hong-tao, Ai Xi-zhen. 2008. Effect of calcium on growth and yield of cucumber in solar greenhouse. *China Vegetables*, (1): 18 - 19. (in Chinese)
- 梁文娟, 王美玲, 孙晓琦, 王洪涛, 艾希珍. 2008. 钙对日光温室黄瓜生长及产量的影响. *中国蔬菜*, (1): 18 - 19.
- Lin Bao, Zhu Hai-zhou, Zhou Wei. 2000. Effects of calcium nitrate on yield and quality of vegetables. *Soils and Fertilizers*, (2): 20 - 22. (in Chinese)
- 林 萍, 朱海舟, 周 卫. 2000. 硝酸钙对蔬菜产量与品质的影响. *土壤肥料*, (2): 20 - 22.
- Liu Wei-ping, Chen Ri-yuan, Sun Guang-wen, Liu Hou-cheng. 2008. Effects of calcium deficiency on growth and nutrition quality of bunching onion. *China Vegetables*, (2): 25 - 27. (in Chinese)
- 刘卫萍, 陈日远, 孙光闻, 刘厚诚. 2008. 不同钙素水平对红葱生长和品质的影响. *中国蔬菜*, (2): 25 - 27.
- Liu Xiu-chun. 2004. The calcium nutrient of deciduous fruit tree. *Northern Fruits*, (2): 4 - 5. (in Chinese)
- 刘秀春. 2004. 落叶果树的钙素营养. *北方果树*, (2): 4 - 5.
- Liu Zhong-liang, Liu Shi-qi, Zhang Zi-kun, Yang Ru, Chen Kun. 2010. Effects of sulfur content in nutrient solution on photosynthetic characteristics and quality of garlic. *Acta Horticulturae Sinica*, 37 (4): 581 - 588. (in Chinese)
- 刘中良, 刘世琦, 张自坤, 杨 茹, 陈 昆. 2010. 硫对设施水培大蒜光合特性和鳞茎品质的影响. *园艺学报*, 37 (4): 581 - 588.
- Long Ming-hua, Tang Xiao-fu, Yu Wen-jin, Liao Yi, Huang Wen-hao, Qin Rong-yao. 2005. Effects of different calcium levels on photosynthesis and protective enzyme activities of melon leaves. *Guaihai*, 25 (1): 77 - 82. (in Chinese)
- 龙明华, 唐小付, 于文进, 廖 易, 黄文浩, 秦荣耀. 2005. 不同钙素水平对厚皮甜瓜叶片光合作用和保护酶活性的影响. *广西植物*, 25 (1): 77 - 82.
- Lu Jing-ling. 2003. Plant nutrition. 2nd. Beijing: China Agricultural University Press: 61 - 65. (in Chinese)
- 陆景陵. 2003. 植物营养学. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社: 61 - 65.
- Mu Yong-hua. 1995. The role of calcium in fruit and vegetable physiology. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 7 (6): 499 - 501. (in Chinese)
- 牟咏花. 1995. 钙的生理功能及在果蔬生理中的重要性. *浙江农业学报*, 7 (6): 499 - 501.
- Qu Shu-cun, Zhou Pu-hua. 1998. The extraction of dially thiosulfonate and the analyses of chemical composition of garlic oil and the residue. *Journal of Hunan Agricultural University*, 24 (3): 235 - 237. (in Chinese)

- 屈姝存, 周朴华. 1998. 大蒜油提取及大蒜油与大蒜渣的化学成分分析. 湖南农业大学学报, 24 (3): 235 - 237.
- Schwartz A, Ilan N, Grantz D A. 1988. Calcium effects on stomatal movements in *commelinia communis*. *Plant Physiology*, 87: 583 - 587.
- Shi Yu-wei, Wang Yan-ling, Li Wen-bing, Gao Shu-min, Li Xia. 2007. Effects of water stress on soluble protein, soluble sugar and proline content in *Tamarix hispida*. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 30 (2): 5 - 8. (in Chinese)
- 史玉炜, 王燕凌, 李文兵, 高述民, 李霞. 2007. 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. 新疆农业大学学报, 30 (2): 5 - 8.
- Song Guo-han, Yang Li, Liu Guang-dong, Quan Wei-jie, Lu Gui-ju. 1998. The effect of calcium on the absorption and distribution of calcium, magnesium and sulfur in cabbage. *Journal of Shandong Agricultural University*, 29 (4): 495 - 502. (in Chinese)
- 宋国菡, 杨力, 刘光栋, 泉维洁, 卢桂菊. 1998. 钙对结球甘蓝钙镁硫吸收分配影响的研究. 山东农业大学学报, 29 (4): 495 - 502.
- Wang Deng-min, Zhou Ji-heng, Zhu Xian-ling, Yang Xiang-kui, Lu Guo-xin, Wang Yu-ke, Wang Yan-ting. 1998. The effects of K, Ca, Zn ion on seed germination of different flue-cured tobacco genotypes and seedling drought resistance. *Chinese Tobacco Science*, (1): 14 - 18. (in Chinese)
- 汪邓民, 周冀衡, 朱显灵, 阳向恒, 吕国新, 王玉科, 王彦亭. 1998. K、Ca、Zn 离子对烤烟种子萌发及幼苗抗旱性的影响. 中国烟草科学, (1): 14 - 18.
- Wang Liang-ju, Liu You-liang, Ma Kai. 1999. The role of calcium in promotion of proline accumulation induced by salt stress in fig (*Ficus carica L.*) cells. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 25 (1): 38 - 42. (in Chinese)
- 汪良驹, 刘友良, 马凯. 1999. 钙在无花果细胞盐诱导脯氨酸积累中的作用. 植物生理学报, 25 (1): 38 - 42.
- Wang Li-ping, Ren Liang-yu, Wang Ran, Chen Gui-lin. 2004. Effects of calcium on growth and antioxidant systems of cucumber seedlings. *Journal of Agriculture University of Hebei*, 27 (1): 34 - 37. (in Chinese)
- 王丽萍, 任良玉, 王冉, 陈桂林. 2004. 钙对黄瓜幼苗生长及抗氧化系统的影响. 河北农业大学学报, 27 (1): 34 - 37.
- Wang Meng, Xu Xiao-rui, Liu Cheng-lian, Yuan Yong-bing, Li Pei-huan, Wang Yong-zhang. 2009. The effect of calcium on the fruit quality and physiological and biochemical characteristics of peach in greenhouse. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 25 (8): 219 - 222. (in Chinese)
- 王萌, 许孝瑞, 刘成连, 原永兵, 李培环, 王永章. 2009. 钙营养对温室毛桃果实品质及生理生化特性的影响. 中国农学通报, 25 (8): 219 - 222.
- Wang Xue-kui. 2006. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiments. 2nd. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 王学奎. 2006. 植物生理生化实验原理和技术. 第2版. 北京: 高等教育出版社.
- Ward M R, Aslam M, Huffaker R C. 1986. Enhancement of nitrate uptake and growth of barley seedlings by calcium under saline conditions. *Plant Physiology*, 80 (2): 520 - 524.
- Wu Xun. 1994. Calcium and magnesium nutritions for tea plants and their soil controls. *Journal of Tea Science*, 14 (2): 115 - 121. (in Chinese)
- 吴洵. 1994. 茶树的钙镁营养及土壤调控. 茶叶科学, 14 (2): 115 - 121.
- Xiao Chang-pei. 2001. Effects of different calcium application levels on growth, absorption of nutrient and enzymatic activities of cucumber. *Guangxi Tropical Agriculture*, (2): 4 - 6. (in Chinese)
- 肖常沛. 2001. 不同供钙水平对黄瓜生长、养分吸收和酶活性的影响. 广西热带农业, (2): 4 - 6.
- Xu Da-quan. 1997. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis. *Plant Physiology Communications*, 33 (4): 241 - 244. (in Chinese)
- 许大全. 1997. 光合作用气孔限制分析中的一些问题. 植物生理学通讯, 33 (4): 241 - 244.
- Yang Yu-hong, Cui Guo-ming, Huang Bi-zhi, Zhang Jia-wei, Fang Liang. 1999. Effect of Ca^{2+} on yield, quality and botanical characteristics of tobacco. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 14 (2): 148 - 152. (in Chinese)
- 杨宇虹, 崔国明, 黄必志, 张家伟, 方亮. 1999. 钙对烤烟产质量及其主要植物学性状的影响. 云南农业大学学报, 14 (2): 148 - 152.
- Yang Zhi-min, Zhou Xie. 1989. Influences of calcium on the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ uptake and assimilation of cucumber seedlings. *Acta Horticulturae Sinica*, 16 (3): 205 - 209. (in Chinese)
- 杨志敏, 周燮. 1989. 钙对黄瓜幼苗吸收和同化铵态氮的影响. 园艺学报, 16 (3): 205 - 209.
- Yang Zhu-qing. 1994. Effects of calcium and magnesium fertilizer on yield and quality and absorption of nutrient of tomato. *Soils and Fertilizers*, (2): 14 - 18. (in Chinese)

- 杨竹青. 1994. 钙镁肥对番茄产量品质和养分吸收的影响. 土壤肥料, (2): 14 - 18.
- Ying Quan-sheng, Zhu Zhu-jun, Li Wei-long, Su Ying-jing, Zhao Jian-yang, Jin Chang-lin. 2005. Effect of nitrogen and calcium nutrition on ball-flower quality of broccoli. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, (5): 346 - 348. (in Chinese)
- 应泉盛, 朱祝军, 李伟龙, 苏英京, 赵建阳, 金昌林. 2005. 氮、钙营养对青花菜花球品质的影响. 浙江农业科学, (5): 346 - 348.
- Zhang Hai-ping. 2003. Study on physiology and cytology mechanism of peanut (*Arachis hypogaea L.*) growth and development regulated by calcium [M. D. Dissertation]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. (in Chinese)
- 张海平. 2003. 钙调控花生 (*Arachis hypogaea L.*) 生长发育的细胞生理机制研究[硕士论文]. 福州: 福建农林大学.
- Zhang Tao, Liu Shi-qi, Sun Qi, Meng Fan-lu, Chen Xian, Li He, Xia Yong-xiang. 2012. Effects of boron content in nutrient solution on photosynthetic characteristics and quality of garlic seedling. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 18 (1): 154 - 161. (in Chinese)
- 张 涛, 刘世琦, 孙 齐, 孟凡鲁, 陈 娴, 李 贺, 夏永香. 2012. 水培条件下硼对青蒜苗光合特性及品质的影响. 植物营养与肥料学报, 18 (1): 154 - 161.
- Zhang Zhen-xing, Sun Jin, Guo Shi-rong, Tong Hui. 2011. Effects of supplemental calcium on the photosynthetic characteristics and fruit quality of watermelon under salt stress. Acta Horticulturae Sinica, 38 (10): 1929 - 1938. (in Chinese)
- 张振兴, 孙 锦, 郭世荣, 童 辉. 2011. 钙对盐胁迫下西瓜光合特性和果实品质的影响. 园艺学报, 38 (10): 1929 - 1938.
- Zhao Peng, Tan Jin-fang, Jie Xiao-lei, Yue Cai-peng, Zhao Yue-ping, Han Yan-lai, Zheng Yi. 2000. The relationship between potassium and calcium/magnesium in tobacco when potash is applied. Acta Tabacaria Sinica, 6 (1): 23 - 26. (in Chinese)
- 赵 鹏, 谭金芳, 介晓磊, 岳彩鹏, 赵月平, 韩燕来, 郑 义. 2000. 施钾条件下烟草钾与钙镁相互关系的研究. 中国烟草学报, 6 (1): 23 - 26.
- Zhao Shi-jie, Shi Guo-an, Dong Xin-chun. 2002. Techniques of plant physiological experiment. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
- 赵世杰, 史国安, 董新纯. 2002. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社.
- Zhao Xiao-mei, Wang Hong-mei, Yang Wei, Long Ming-hua. 2012. Effects of different Ca^{2+} concentrations on the growth, photosynthetic characteristics, protective enzyme activity of watermelon seedling. Northern Horticulture, (14): 144 - 146. (in Chinese)
- 赵晓美, 王红梅, 杨 卫, 龙明华. 2012. 钙对西瓜幼苗生长、光合特性及保护性酶活性的影响. 北方园艺, (14): 144 - 146.
- Zhou Jia-rong, Liao Yi, Qin Xuan-nan. 1998. Effects of boron and calcium on photosynthetic physiology and root vigor of limon seedlings. Journal of Southwest Agricultural University, 20 (4): 315 - 320. (in Chinese)
- 周家荣, 廖 益, 秦煊南. 1998. 硼钙营养对柠檬幼苗光合生理及根系活力的影响. 西南农业大学学报, 20 (4): 315 - 320.
- Zhou Lu-ying, Li Xiang-dong, Wang Li-li. 2006. Effects of different application rates of N, P, K, Ca fertilizer on photosynthesis properties, yield and quality of peanut. Journal of Peanut Science, 35 (2): 11 - 16. (in Chinese)
- 周录英, 李向东, 王丽丽. 2006. 氮、磷、钾、钙肥不同用量对花生光合性能及产量品质的影响. 花生学报, 35 (2): 11 - 16.
- Zhou Lu-ying, Li Xiang-dong, Wang Li-li, Tang Xiao, Lin Ying-jie. 2008. Effects of different Ca applications on physiological characteristics, yield and quality in peanut. Acta Agronomica Sinica, 34 (5): 879 - 885. (in Chinese)
- 周录英, 李向东, 王丽丽, 汤 笑, 林英杰. 2008. 钙肥不同用量对花生生理特性及产量和品质的影响. 作物学报, 34 (5): 879 - 885.
- Zhou Wei, Lin Bao. 1995. The research progress of calcium nutrition mechanisms in plants. Progress in Soil Science, 23 (2): 12 - 17. (in Chinese)
- 周 卫, 林 葆. 1995. 植物钙素营养机理研究进展. 土壤学进展, 23 (2): 12 - 17.
- Zhou Wei, Wang Hong. 2007. The physiological and molecular mechanisms of calcium uptake, transport, and metabolism in plants. Chinese Bulletin of Botany, 24 (6): 762 - 778. (in Chinese)
- 周 卫, 汪 洪. 2007. 植物钙吸收、转运及代谢的生理和分子机制. 植物学通报, 24 (6): 762 - 778.
- Zhu Qiao, Pan Yuan-zhi, Zhao Li, Yue Jing, Mi Shi-hong. 2012. Effects of different N, P, K, Ca application levels on cut flower quality of *Lilium casa blanca*. Soil and Fertilizer Sciences in China, (3): 48 - 54. (in Chinese)
- 朱 峤, 潘远智, 赵 莉, 岳 静, 米仕洪. 2012. 不同氮、磷、钾、钙水平对香水百合切花品质效应的研究. 中国土壤与肥料, (3): 48 - 54.