植物营养与肥料学报 2016, 22(5): 1366–1373
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15319
http://www.plantnutrifert.org

钙水平对大葱生长及氮代谢的影响

张 逸，王 允，刘灿玉，张志焕，韩 敏，曹逼力，徐 坤 *
（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，
山东农业大学园艺科学与工程学院，山东泰安 271018）

摘要:【**目的**】通过探讨钙对大葱生长及氮代谢的影响，明确钙在提高大葱产量和品质中的作用，为优化大葱施肥技术提供理论依据。【**方法**】以‘昭和’和‘章丘’大葱为试材，进行了砂培试验和田间试验。用砂培试验营养液钙水平设 0、4、6、8 mmol/L 4 个处理。于大葱越夏期 (7 月 17 日)、叶丛速生期 (9 月 11 日) 及假茎充实期 (10 月 20 日)取大葱叶片测定不同形态氮含量以及硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合酶(GOGAT)和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性，于收获期 (11 月 13 日) 测定大葱生长量、产量及品质。田间试验设置 0、225、450、675 kg/hm^2 4 个水平 (以 CaO 计)，于收获期 (11 月 13 日) 测定产量。【**结果**】砂培大葱株高、茎粗、根及茎叶鲜重均随营养液钙水平提高而显著增加，至钙水平达 6 mmol/L 时表现较好，单株生长量达 211.13 g，钙水平继续增加至 8 mmol/L 时，单株生长量仅 185.83 g，与 4 mmol/L 的 183.29 g 无显著差异；除根系鲜重外，‘章丘’大葱株高、茎粗及茎叶鲜重均显著高于‘昭和’大葱。适量增加钙水平亦可显著提高大葱叶片 GOGAT、GDH、NR、GS 活性，以叶丛速生期影响最大。大葱叶片铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮 (NO_3^--N)、可溶性蛋白、游离氨基酸含量均随营养液钙水平提高而呈先增加后降低，均以叶丛速生期最高。两品种大葱品质相关指标均以钙水平 6 mmol/L 时最高，8 mmol/L 时有所降低。钙水平为 6 mmol/L 时，盆栽大葱产量显著高于其它处理，‘章丘’和‘昭和’分别较对照增产 79.94% 和 74.42%。大田试验，‘章丘’和‘昭和’大葱均以施用 CaO 450 kg/hm^2 产量最高，分别较对照提高 12.30%、19.00%。【**结论**】适量施钙可显著促进大葱生长，提高叶片氮代谢酶活性及不同形态氮含量，提高产量及品质。综合分析表明，以营养液钙水平 6 mmol/L、土壤施钙 450 kg/hm^2 时最有利于大葱的生长及产量品质的提高。

关键词: 大葱；钙；产量；品质；氮代谢
中图分类号: S633.1；S606$^+$.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)05–1366–08

Effect of calcium level on growth and nitrogen metabolism of Welsh onion

ZHANG Yi, WANG Yun, LIU Can-yu, ZHANG Zhi-huan, HAN Min, CAO Bi-li, XU Kun *
(*State Key Laboratory of Crop Biology/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Horticultural Crop Biology and Germplasm Creation in Huang-Huai Region/College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China*)

Abstract:【**Objectives**】The effect of calcium (Ca) on growth and nitrogen metabolism of Welsh onion (*Allium fistulosum* L.) was investigated to clarify the role of Ca in improving the yield and quality, and provide a theoretical basis for the optimization fertilization technique.【**Methods**】Welsh onion cultivars ‘Zhaohe’and ‘Zhangqiu’ were used as test materials in sand cultural and feild trails. Four Ca^{2+} levels of 0, 4, 6, 8 mmol/L in sand cutural trail and four CaO application rate of 0, 225, 450, 675 kg/hm^2 in field trail were designed. Different forms of nitrogen and activities of nitrate reductase (NR), glutamine synthetase (GS), glutamate synthase (GOGAT), glutamate dehydrogenase (GDH) in onion leaves were determined during seedling over-summer stage (Jul. 17), vigorous growth stage (Sept. 11) and cauloid forming stage (Oct. 20). The growth, yield and quality of

收稿日期: 2015–07–17　　**接受日期:** 2015–11–27
基金项目: 山东省现代农业产业技术创新体系（SDAIT-02-022-05）资助。
作者简介: 张逸（1990—），女，山东济宁人，硕士，主要从事蔬菜栽培生理方面的研究。E-mail：superus@sdau.edu.cn
* 通信作者 E-mail：xukun@sdau.edu.cn，Tel：0538-8241783

Welch onion were measured at harvest stage (Nov. 13). 【**Results**】With the increase in solution Ca level, plant height, cauloid diameter of potted Welsh onion as well as root and shoot fresh weight were increased significantly, and reached peak in 6 mmol/L Ca level with biomass per plant of 211.13 g. Continue increase to 8 mmol/L, the biomass significantly decreased to 185.83 g. 'Zhangqiu' showed significantly higher plant height, cauloid diameter and shoot fresh weight compared to 'Zhaohe', while the root fresh weight was not the case. Appropriate Ca application enhanced the activities of GOGAT, GDH, NR and GS dramatically in Welsh onion leaves particularly in the most sensitive vigorous growth stage. The content of NH_4^+-N, NO_3^--N, soluble protein and free amino acid increased with growth stage and reach peak at vigorous growth stage. All the quality-related indexes of two cultivars were highest at 6 mmol/L Ca level, the yield of 'Zhangqiu' and 'Zhaohe' was significantly increased by 79.94%, 74.42% in 6 mmol/L, respectively, compared to the control. For the field trial, the yields in treatment with CaO of 450 kg/hm^2 were increased by 12.30%, 19.00%, respectively. 【**Conclusions**】The appropriate application of Ca can enhance the growth, improve enzyme activities of nitrogen metabolism and the contents of different nitrogen forms of Welsh onion, therefore the yield and quality. Comprehensively, the nutrient solution containing Ca of 6 mmol/L and soil CaO supplying at 450 kg/hm^2 are the most conducive to improve the growth, quality and yield of Welsh onion.

Key words: welsh onion; calcium; yield; quality; nitrogen metabolism

钙是植物生长的必需营养元素，外源钙可调节作物基因表达、维持细胞功能、促进生长发育[1]，亦可通过调节氮代谢提高植株对环境的耐受性[2]。钙螯合剂 EGTA 可导致小麦叶片 GS、NR 活性下降，NO_3^--N 含量变化与这两种氮代谢酶活性变化趋势基本一致[3]，表明植物钙素与氮代谢有密切联系。缺钙引起莴苣叶片生长量下降，叶绿素含量降低，缘腐病加重[4]，也可导致马铃薯试管苗结薯量大幅降低[5]。厚皮甜瓜开花结果期叶面喷施硝酸钙溶液，可提高果实产量和品质[6]。

大葱(*Allium fistulosum* L. *var. giganteam* Makino)为以叶鞘(假茎)、叶片为产品的蔬菜，其氮吸收积累量较高[7]。前人研究表明，充足的氮素供应促进大葱生长[8]，且氮素对大葱产量的影响显著高于磷、钾[9]；提高供氮水平，还可显著增加大葱可溶性蛋白含量，但降低了 Vc 及可溶性糖含量[8]；增施钙素，不仅可促进青蒜的生长，亦可显著改善产品品质[10]。但关于大葱产量品质形成对钙的响应尚未见报道。为此，本试验以'昭和'、'章丘'大葱为试材，采用无土栽培辅以大田验证的方法，研究钙对大葱生长及氮代谢的影响，旨在揭示钙影响大葱产量品质形成的生理机制。

1　材料与方法

1.1　试材培养

试验在 2013 年预备试验基础上，于 2014 年在山东农业大学园艺试验站进行。供试品种为市售的'昭和'大葱和'章丘'大葱，于 3 月 25 日播种育苗，6 月 20 日苗高 35 cm 左右、具 4 片真叶时栽植于高 28 cm、直径 25 cm 的塑料盆内，栽培基质为经酸洗、纯净水冲洗的石英砂，营养液为华南农业大学研制的叶菜 A 配方[11]，通过调整配方中钙 (Ca^{2+}) 水平，设置 4 个处理，分别为 0 (CK)、4、6、8 mmol/L，营养液以纯净水配制，其 pH 值用 0.01 mol/L 的 KOH 调节至 7.0 左右。每盆栽植大葱 6 株，每处理栽植 36 盆，分为 3 组，随机区组排列。大葱生长期间每天浇一次营养液，浇施量以盆底刚刚漏水为度，每 20 d 左右用纯净水洗盐一次。大葱生长中后期假茎加套直径为 3 cm 的黑色塑料管，以保障假茎生长。

大田试验葱苗定植期为 6 月 21 日，定植行距 80 cm，株距 4 cm。供试钙肥为 $CaCl_2$，分别设 0、225、450、675 kg/hm^2 4 个水平 (以 CaO 计)，于葱苗定植时一次性施入。试验小区面积 57.6 m^2，重复 3 次，随机区组排列。其他管理均按常规方法进行。

1.2　测试指标及方法

于大葱越夏期 (7 月 17 日)、叶丛速生期 (9 月 11 日) 及假茎充实期 (10 月 20 日)选取大葱植株上数第 3 片功能叶测定氮代谢相关指标，包括硝酸还原酶 (NR)、谷氨酰胺合成酶 (GS)、谷氨酸合酶 (GOGAT)、谷氨酸脱氢酶 (GDH) 活性，硝态氮 (NO_3^--N)、铵态氮 (NH_4^+-N)、可溶性蛋白、游离氨基酸含量；2014 年 11 月 13 日大葱收获时，每小区随机取 5 株，测定大葱生长量及相关品质指标，包括

游离氨基酸、可溶性蛋白、可溶性糖、丙酮酸、Vc含量。

NR活性采用活体法[12]测定；GS、GDH、GOGAT活性参照Cren和Hirel[13]的方法；NO_3^--N含量采用水杨酸法[12]测定；NH_4^+-N含量参照Krom[14]的方法；可溶性蛋白以考马斯亮蓝法[12]测定；游离氨基酸以茚三酮溶液显色法[12]测定；大葱假茎可溶性糖以蒽酮法[12]测定；丙酮酸以2,4-二硝基苯肼显色法[15]测定；Vc以钼蓝比色法[16]测定。

试验数据用Excel和DPS软件进行处理和统计分析，Duncan新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 供钙水平对大葱生长的影响

表1是不同钙水平处理盆栽大葱收获时生长量统计分析结果。可以看出，两品种大葱根系鲜重无显著差异，但株高、茎粗及茎叶鲜重则以‘章丘’大葱显著高于‘昭和’大葱，分别增加了3.71%、8.07%和7.32%。不同钙水平处理的株高、茎粗、根及茎叶鲜重均存在极显著差异，如Ca^{2+}水平为4、6、8 mmol/L处理的大葱株高分别较CK增加了9.91%、24.45%、9.06%，茎叶鲜重则分别增加了56.49%、80.59%和59.15%，表明钙水平显著影响了大葱的生长。

2.2 供钙水平对大葱叶片氮代谢相关酶活性的影响

2.2.1 供钙水平对大葱叶片NR活性的影响 由图1可以看出，越夏期大葱叶片NR活性处理间无显著差异，叶丛速生期NR活性较越夏期显著升高，且以6 mmol/L Ca^{2+}水平处理显著高于其他处理，4、8 mmol/L次之，分别较对照增加了132.64%、65.96%、43.03%；

表1 水培试验不同钙水平处理单株大葱生长量

Table 1 Growth and biomass of individual Welsh onion plant in hydro culture experiment under different Ca^{2+} levels

项目 Item		株高(cm) Plant height	假茎直径(cm) Cauloid diameter	根系鲜重(g) Root weight	茎叶鲜重(g) Aerial part weight	单株鲜重(g) Plant weight
品种 Cultivar	昭和 Zhaohe	82.66 bA	2.85 bA	24.26 aA	147.20 bA	171.46 bA
	章丘 Zhangqiu	85.73 aA	3.08 aA	25.26 aA	157.97 aA	183.23 aA
Ca^{2+}(mmol/L)	0	75.95 cC	2.34 cC	18.43 cC	100.69 dC	119.12 cC
	4	83.48 bB	2.99 bB	25.74 bB	157.57 cB	183.31 bB
	6	94.52 aA	3.59 aA	29.29 aA	181.84 aA	211.13 aA
	8	82.83 bB	2.95 bB	25.58 bB	160.25 bB	185.83 bB

注（Note）：同品种大葱的生长量为四个钙水平下大葱生长量的平均值The growth and biomass of the same varieties of Welsh onion is the average amount of four Ca^{2+} levels；四个钙水平下的大葱生长量是两个大葱品种的平均值Under the four Ca^{2+} levels, growth and biomass of Welsh onion is the average value of the two varieties. 同列数据后不同大、小写字母分别表示处理间差异在1%、5%显著水平Values followed by different capital and small letters are significantly different among treatments at 1% and 5% levels, respectively.

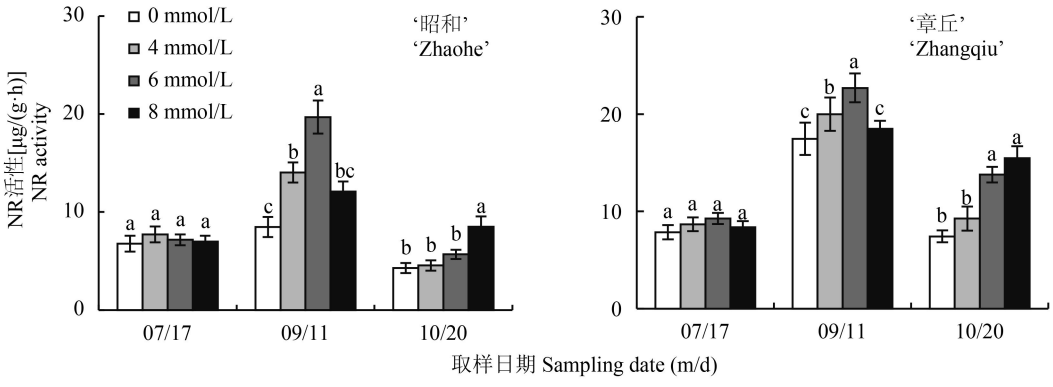

图1 不同钙水平大葱叶片NR活性

Fig. 1 NR activity in leaves of Welsh onion under different Ca^{2+} levels

[注（Note）：方柱上不同字母表示同一样日期不同钙水平间在5%水平差异显著 Different letters above the bars mean significance at 5% level among different Ca^{2+} levels at the same sampling date.]

假茎充实期叶片 NR 活性显著下降，且除 8 mmol/L Ca^{2+} 水平处理较高外，其他处理间均无显著差异。

2.2.2 供钙水平对大葱叶片 GS、GDH、GOGAT 活性的影响　图 2 可见，不同钙水平处理大葱叶片 GS 活性在越夏期无显著差异，在叶丛速生期以 Ca^{2+} 6 mmol/L 最高，‘昭和’、‘章丘’分别较 CK 提高了 36.67%、33.51%，继续增加 Ca^{2+} 水平至 8 mmol/L，GS 活性降低；假茎充实期仍以 6 mmol/L Ca^{2+} 水平处理为好。GOGAT 与 GS 活性变化相似，亦以叶丛速生期较高，越夏期‘昭和’以 6 mmol/L Ca^{2+} 水平处理最高，‘章丘’则以 8 mmol/L 活性最高；至假茎充实期两品种 GOGAT 活性均有较大的降低，但处理间的差异与越夏期一致。

GDH活性越夏期‘昭和’大葱以 6 mmol/L Ca^{2+} 水平处理较高，4 mmol/L 次之，较对照分别增加了 108.68% 和 58.62%；‘章丘’大葱则以 8 mmol/L Ca^{2+} 水平处理较高，6 mmol/L 次之，较对照分别增加了 186.44% 和 121.04%。随生育期的延长，两品种 GDH 活性均逐渐降低，至假茎充实期‘昭和’大葱各处理间无显著性差异，‘章丘’大葱所有钙处理均显著高于对照。

2.3　供钙水平对大葱叶片不同形态氮含量的影响

图 3 显示，Ca^{2+} 水平对不同生长期大葱 NO_3^--N 含量均有显著影响，如叶丛速生期‘昭和’大葱 NO_3^--N 含量以 8 mmol/L Ca^{2+} 水平处理显著高于其他处理；至假茎充实期，虽然 NO_3^--N 含量有所下降，但

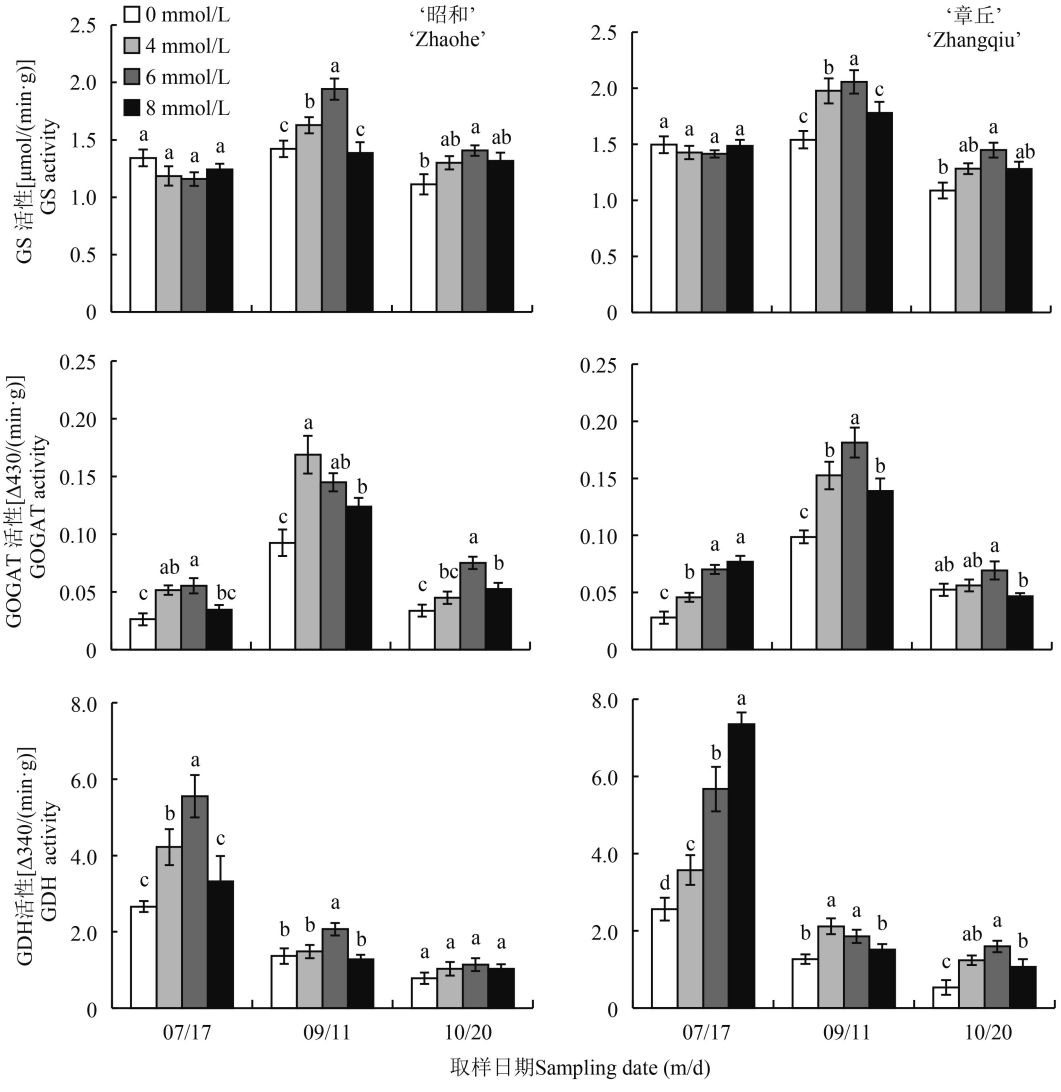

图 2　不同钙水平大葱叶片 GS、GDH、GOGAT 活性

Fig. 2　GS, GDH, GOGAT activities in leaves of Welsh onion under different Ca^{2+} levels

[注（Note）：方柱上不同字母表示同一样日期不同钙水平间在 5% 水平差异显著 Different letters above the bars mean significance at 5% level among different Ca^{2+} levels at the same sampling date.]

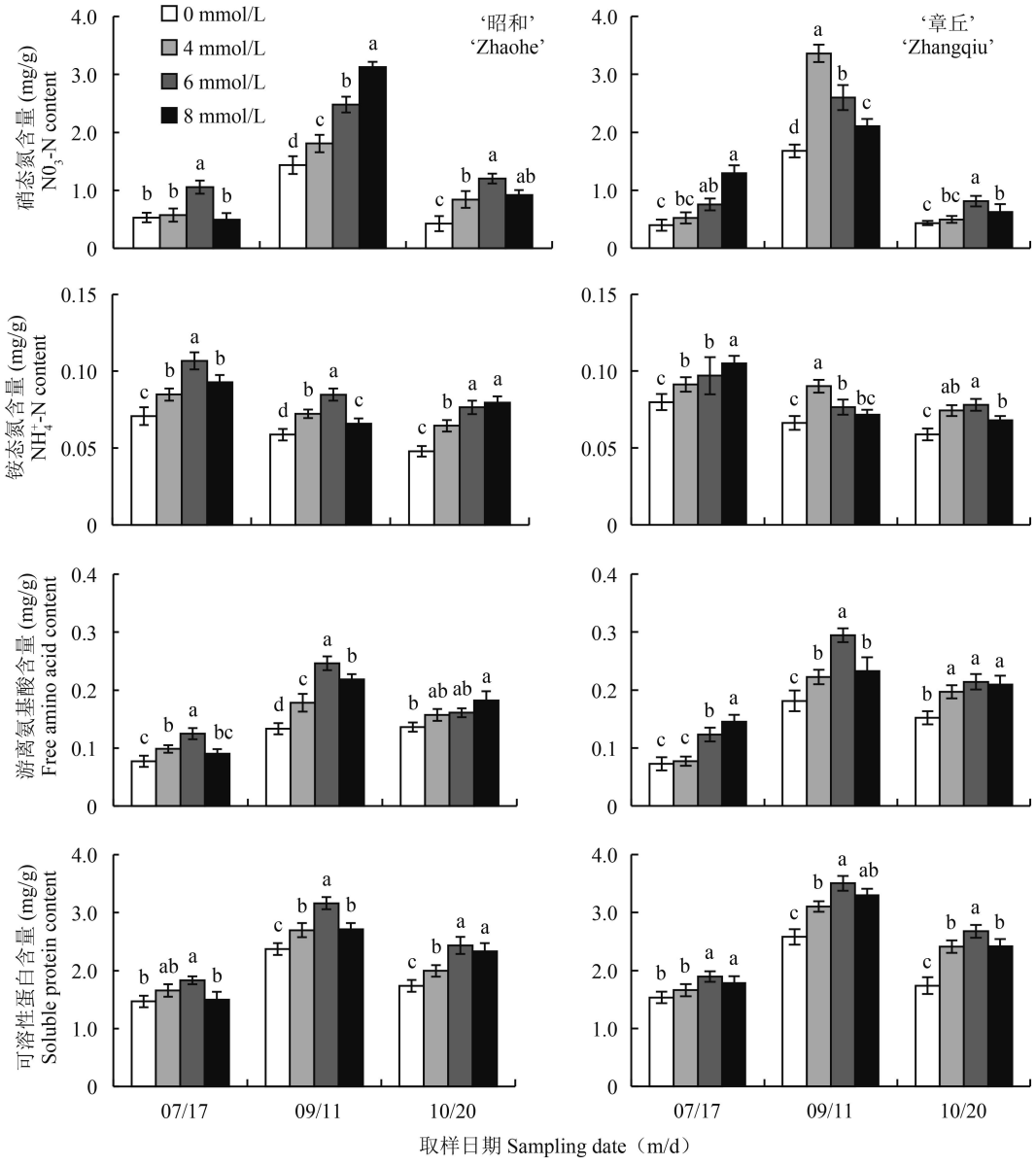

图 3 不同钙水平大葱叶片不同形态氮含量的影响

Fig. 3 Contents of nitrogen of different forms in leaves of Welsh onion under different Ca^{2+} levels

[注（Note）：方柱上不同字母表示同一样日期不同钙水平间在 5% 水平差异显著 Different letters above the bars mean significance at 5% level among different Ca^{2+} levels at the same sampling date.]

施钙处理均显著高于CK。‘章丘’大葱处理间变化与‘昭和’大葱基本一致。两品种大葱不同生长期叶片 NH_4^+-N 含量随生长的进行均呈下降的趋势，但所有钙处理均高于 CK，如在叶丛速生期，‘昭和’、‘章丘’大葱 6 mmol/L Ca^{2+} 水平处理的 NH_4^+-N 含量较 CK 分别增加了 44.40%、15.54%。

大葱不同生长期叶片游离氨基酸含量在不同处理间差异均达显著水平，以叶丛速生期含量较高，且钙处理均显著高于对照，‘昭和’大葱、‘章丘’大葱 6 mmol/L Ca^{2+} 水平处理的游离氨基酸含量分别较对照增加了 84.44%、62.64%；至假茎充实期，两品种游离氨基酸含量虽均有所下降，但均高于越夏期，且处理间差异显著。可溶性蛋白与氨基酸的变化基本一致。

2.4 供钙水平对大葱品质、产量的影响

表 2 表明，钙水平对大葱假茎品质有显著影响，但对两品种品质指标的影响作用程度不同。综合分析表明，各品质指标基本以 Ca^{2+} 6 mmol/L 处理较好，如可溶性蛋白含量，‘昭和’大葱、‘章丘’大葱分别为 3.42 mg/g、3.75 mg/g，较对照分别增加了 21.71%、

44.79%。钙水平对大葱产量亦有显著影响，如 Ca^{2+} 水平为 4、6、8 mmol/L 的处理，‘昭和’单株产量分别较 CK 增加了 44.06%、74.42% 和 55.28%，而‘章丘’则分别较 CK 增加了 63.21%、79.94% 和 56.71%。

为验证盆栽试验结果，还进行了大田施钙试验(表 3)，可以看出，施钙显著提高了大葱产量，且两品种均以施用 CaO 450 kg/hm² 增产率较高，‘昭和’、‘章丘’大葱分别达 12.30%、19.00%。

表 2　水培试验不同钙水平大葱品质及产量

Table 2　Quality and yield of Welsh onion under different Ca^{2+} levels in hydro culture experiment

品种 Cultivar	Ca^{2+} level (mmol/L)	游离氨基酸 Free amino acid (mg/g)	可溶性蛋白 Soluble protein (mg/g)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	丙酮酸 Pyruvate (mg/g)	维生素 C Vc (mg/g)	单株产量 Yield per plant (g/plant)
‘昭和’ ‘Zhaohe’	0	0.56 c	2.81 b	0.79 c	0.47 c	0.18 b	116.05 d
	4	0.62 bc	3.30 a	0.97 ab	0.63 a	0.25 a	167.18 c
	6	0.72 a	3.42 a	1.02 a	0.54 b	0.30 a	202.41 a
	8	0.64 b	2.82 b	0.92 b	0.51 b	0.21 b	180.20 b
‘章丘’ ‘Zhangqiu’	0	0.80 b	2.59 c	1.00 b	0.75 b	0.30 b	122.18 c
	4	0.91 a	3.41 b	1.03 b	0.84 a	0.32 b	199.41 b
	6	0.84 ab	3.75 a	1.16 a	0.79 a	0.38 a	219.85 a
	8	0.71 c	3.16 b	1.01 b	0.67 b	0.39 a	191.46 b

注（Note）：同列数据后不同小写字母表示同一品种不同处理间差异在5% 显著水平 Values followed by different small letters are significantly different among treatments for a cultivar at 5% level.

表 3　田间试验不同钙水平大葱产量

Table 3　Yield of Welsh onion under different calcium levels in field experiment

施钙量(kg/hm²) Ca rate	昭和 Zhaohe		章丘 Zhangqiu	
	产量 Yield (t/hm²)	增产率 Increase (%)	产量 Yield (t/hm²)	增产率 Increase (%)
0	70.01 c		74.74 c	
225	74.95 b	7.05	81.17 b	8.60
450	78.63 a	12.30	88.94 a	19.00
675	73.57 b	5.08	80.25 b	7.36

注（Note）：供试土壤有效钙含量为 1966.8 mg/kg Available Ca content in tested soil was 1966.8 mg/kg; 钙肥为 $CaCl_2$，施用量以 CaO 计 Calcium source was $CaCl_2$, and application rate was calculated as CaO.

3　讨论与结论

增施钙肥能够促进作物生长，提高产量[17]，这与钙素可促进植株对矿质元素的吸收[18]，提高叶片氮代谢酶活性[3]，增强植株的光合能力[19]不无关系。本研究表明，适当提高钙水平可以促进盆栽大葱生长，但‘昭和’和‘章丘’大葱的增产率显著不同，显示大葱不同基因型对钙响应敏感程度存在差异，大田施钙对大葱产量的影响与盆栽结果变化趋势一致，Koyama 等[20]在莴苣上的研究也有类似结果。

NR 作为氮同化的关键酶，与植物吸收利用氮素密切相关，其活性大小可衡量氮代谢强度[21]。由于 NR 属诱导酶，其活性受反应底物 NO_3^- 水平的调控[22]，因此本研究中适量提高钙水平，叶丛速生期大葱叶片 NR 活性及 NO_3^--N 含量均升高，表明钙促进了大葱对氮素的吸收利用。GS 是处于氮代谢中心的多功能酶，参与多种氮代谢的调节[23]，而 GOGAT 在无机氮转化为有机氮的过程中起关键作用[24]，GDH 在 NH_4^+ 的合成中起初始性作用，并在谷氨酸合成循环中起补充作用[23]，生成的谷氨酸或谷氨酰胺在转氨酶作用下形成多种氨基酸或酰胺，进而合成蛋白质[25]。叶丛速生期大葱叶片 GS、GOGAT 活性较高，且随钙水平增加而增强，这可能与大葱叶丛速生期需氮量较高有关，GOGAT、GS 的同向变化则可能与反应产物的正反馈调节有关[26]。在葡萄[27]等作

物上研究已证实，适量提高钙水平则 GDH 活性增强，且随生长进行活性亦增强[28]，本研究中虽钙处理可显著提高 GDH 活性，但各处理活性均以越夏期较高，可能与 GDH 蛋白酶具较高热稳定性有关[28]。铵态氮含量的变化与 GDH 相似，表明 NH_4^+ 可能作为一种信号，诱导了 GDH 活性的增加[29]。游离氨基酸、可溶性蛋白含量变化均随钙水平提高而增加，且以叶丛速生期含量较高。可见，大葱适量施钙，可显著提高氮代谢相关酶活性及不同形态氮含量，促进大葱对氮素的吸收与代谢。

前人关于钙素与有关品质指标关系的研究尚不完全一致。刘卫萍等[30]研究发现，随钙素水平升高，红葱叶片和假茎内大蒜素和可溶性糖含量升高，Vc 含量则降低。张利云等[6]研究表明，10～30 mmol/L 硝酸钙处理能够显著提高厚皮甜瓜中可溶性固形物和可溶性糖含量，但对 Vc 含量无显著影响。李贺等[10]研究表明，钙能显著提高青蒜大蒜素、可溶性糖、Vc、游离氨基酸及可溶性蛋白的含量。本试验研究表明，适量提高钙水平可显著增加两品种大葱假茎可溶性糖、可溶性蛋白、丙酮酸、游离氨基酸、Vc 含量，表明适量施钙可显著改善大葱的品质。

综上，适量提高营养液钙水平可显著促进大葱对氮的吸收，提高大葱叶片氮代谢水平，促进大葱生长，提高产量并改善品质，其中砂培营养液钙 (Ca^{2+}) 水平以 6 mmol/L、土壤施钙 (以 CaO 计) 以 450 kg/hm^2 较好。

参 考 文 献：

[1] Henriksson E, Henriksson K N. Salt-stress signaling and the role of calcium in the regulation of the *Arabidopsis* ATHB7 gene [J]. Plant, Cell and Environment, 2005, 28(2): 202–210.

[2] Ma R, Zhang M, Li B, *et al*. The effects of exogenous Ca^{2+} on endogenous polyamine levels and drought-resistant traits of spring wheat grown under arid conditions [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 63(1): 177–190.

[3] 王学奎, 李合生, 刘武定, 等. 钙螯合剂对小麦幼苗氮代谢和干物重的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 42–47.
Wang X K, Li H S, Liu W D, *et al*. Effects of calcium chelator on the nitrogen metabolism and dry matter accumulation in wheat seedings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(1): 42–47.

[4] 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, Ito T. Effects of calcium on nutrient absorption and growth and development of *Lactuca sativa* var. *longifolia* Lam. in nutrient film technique culture [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2002, 29(2): 149–152.

[5] 杜强, 李朝周, 秦舒浩, 等. 钙水平对马铃薯试管薯产量、质量和生理病害的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1502–1509.
Du Q, Li C Z, Qin S H, *et al*. Effects of $CaCl_2$ concentrations on the yield, quality and physiological disorder of potato microtubers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(6): 1502–1509.

[6] 张利云, 刘海河, 张彦萍, 朱立保. 硝酸钙对厚皮甜瓜坐果节位叶片衰老及果实产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 490–495.
Zhang L Y, Liu H H, Zhang Y P, Zhu L B. Effects of calcium nitrate on leaf senescence in fruiting nodes and yield and quality of fruits of muskmelon[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 490–495.

[7] 石健, 李炜蔷, 侯丽丽, 等. 氮磷钾配施对大葱产量及养分吸收利用特性的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(6): 847–852.
Shi J, Li W Q, Hou L L, *et al*. Effects of N, P, K combined application on the yield, nutrition absorption and utilization characteristics of *Allium fistulosum* [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(6): 847–852.

[8] 孔灵君, 徐坤, 王磊, 等. 氮硫互作对越冬大葱生长及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1272–1278.
Kong L J, Xu K, Wang L, *et al*. Influence of nitrogen and sulfur interaction on growth and quality of Chinese spring onion[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1272–1278.

[9] 林昌华, 白由路, 罗国安, 谢祝捷. 氮、磷、钾肥对大葱商品性状及其产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 649–655.
Lin C H, Bai Y L, Luo G A, Xie Z J. Effects of N, P and K application on merchandise properties and yields of welsh-onion (*Allium fistulosum*)[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(3): 649–655.

[10] 李贺, 刘世琦, 陈祥伟, 等. 钙对水培青蒜苗生长、光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1118–1128.
Li H, Liu S Q, Chen X W, *et al*. Effects of calcium on growth, photosynthetic characteristics and quality of aquicultural garlic seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(5): 1118–1128.

[11] 刘士哲. 现代实用无土栽培技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001. 121–124.
Liu S Z. Modern practical soilless cultivation technique [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001. 121–124.

[12] 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2002. 40–99.
Zhao S J, Liu H S, Dong X C. Techniques of plant physiological experiment[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002. 40–99.

[13] Cren M, Hirel B. Glutamine synthetase in higher plant: regulation of gene and protein expression from the organ to the cell[J]. Plant and Cell Physiology, 1999, 40(12): 1187–1193.

[14] Krom M D. Spectrophotometric determination of ammonia: a study of a modified Berthelot reaction using salicylate and dichloroisocyanurate[J]. Analyst, 1980, 105(1249): 305–316.

[15] 西北农业大学. 基础生物化学实验指导[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986. 110–111.
Northwestern Agricultural University. Guide of biochemistry experiment [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986. 110–111.

[16] 李军. 钼蓝比色法测定还原型维生素C[J]. 食品科学, 2000, 21(8): 42–45.
Li J. Molybdenum blue colorimetric method for the determination of reduced vitamin [J]. Food Science, 2000, 21(8): 42–45.

[17] Gangwar S, Singh V P. Indole acetic acid differently changes growth and nitrogen metabolism in *Pisum sativum* L. seedlings under chromium (VI) phytotoxicity: implication of oxidative stress [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(2): 321–328.

[18] 李贺, 刘世琦, 刘中良, 等. 钙对大蒜生理特性及主要矿质元素吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3626–3634.
Li H, Liu S Q, Liu Z L, *et al*. Effects of calcium on physiological characteristics and main mineral elements absorption of garlic [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(17): 3626–3634.

[19] 李中勇, 张媛, 韩龙慧, 徐继忠. 氮钙互作对设施栽培油桃叶片光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 893–900.
Li Z Y, Zhang Y, Han L H, Xu J Z. The interactive effects of nitrogen and calcium on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of nectarine under protected culture [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(4): 893–900.

[20] Koyama R, Sanada M, Itoh H, *et al*. In vitro evaluation of tipburn resistance in lettuce (*Lactuca sativa*. L)[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2012, 108(2): 221–227.

[21] 王丽萍, 孙锦, 郭世荣, 等. 白籽南瓜嫁接对不同盐胁迫下黄瓜幼苗氮代谢和蛋白表达的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 689–698.
Wang L P, Sun J, Guo S R, *et al*. Effects of graft with pumpkin rootstock on nitrogen metabolism and protein expression in the cucumber seedlings under iso-osmotic $Ca(NO_3)_2$ or NaCl stress [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 689–698.

[22] 黄彩变, 王朝辉, 王小英, 李生秀. 菠菜硝态氮累积和还原与植株生长的关系[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 613–618.
Huang C B, Wang X H, Wang X Y, Li S X. Nitrate accumulation and reduction in spinach and their relations to plant growth[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(4): 613–618.

[23] Miflin B J, Habash D Z. The role of glutamine synthetase and glutamate dehydrogenase in nitrogen assimilation and possibilities for improvement in the nitrogen utilization of crops [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(370): 979–987.

[24] Lam H M, Coschigano K T, Oliveira I C. The molecular-genetics of nitrogen assimilation into amino acids in higher plants[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1996, 47(1): 569–593.

[25] 许振柱, 周广胜. 植物氮代谢及其环境调节研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 511–516.
Xu Z Z, Zhou G S. Research advance in nitrogen metabolism of plant and its environmental regulation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 511–516.

[26] Britto D T, Kronzucker H J. NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review [J]. Journal of Plant Physiology, 2002, 159(6): 567–584.

[27] Loulakakis. C A, Roubelakis-Angelakis K A. Intracellular localization and properties of NADH-glutamate dehydrogenase from *Vitis vinifera* L.: purification and characterization of the major leaf isoenzyme[J]. Journal of Experimental Botany, 1990, 41(10): 1223–1230.

[28] 黄国存, 田波. 高等植物中的谷氨酸脱氢酶及其生理作用[J]. 植物学通报, 2001, 18(4): 396–401.
Huang G C, Tian B. The physiological role of glutamate dehydrogenase in higher plants [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2001, 18(4): 396–401.

[29] Ferrario-Mery S, Hodges M, Hirel B, Foyer C H. Photorespiration-dependent increases in phosphoenolpyruvate carboxylase, isocitrate dehydrogenase and glutamate dehydrogenase in transformed tobacco plants deficient in ferredoxin-dependent glutamine–α-ketoglutarate aminotransferase[J]. Planta, 2002, 214(6): 877–886.

[30] 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 deficiency on growth and nutrition quality of Bunching Onion [J]. China Vegetables, 2008, (2): 25–27.