

外源甘氨酸态氮、硝态氮和铵态氮的浓度配比 对小白菜生长和品质的影响

曹小闯¹, 李晓艳², 朱练峰¹, 张均华¹, 禹盛苗¹, 金千瑜¹, 吴良欢^{2*}

(1.中国水稻研究所, 水稻生物学国家重点实验室, 杭州 310006; 2.浙江大学环境与资源学院, 教育部环境修复与生态健康重点实验室, 杭州 310058)

摘要:为优化不同形态氮浓度配比, 提高设施栽培蔬菜营养品质, 在局部无菌水培条件下, 研究了不同外源甘氨酸态氮、硝态氮和铵态氮的浓度比对小白菜生物量、根系形态及营养品质的影响。结果表明, 小白菜生物量及其营养品质受外源氮浓度组成影响差异显著($P<0.05$)。在高甘氨酸态氮($2500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)和铵态氮($2500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)、低硝态氮($250\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)浓度处理中, 小白菜生物量最高, 达 $94.5\ \text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$, 且小白菜总根长、根表面积、根体积、根系活力等指标的变化趋势与生物量一致; 在高甘氨酸态氮、低无机氮浓度处理中, 小白菜可溶性蛋白、游离氨基酸和可溶性糖含量最高, 分别为 26.2 、 126 、 $24.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且硝酸盐含量较高无机氮处理显著降低($P<0.05$)。适当提高甘氨酸态氮浓度、降低无机氮(尤其是硝态氮)浓度能够一定程度改善其营养品质。

关键词:氮浓度与配比; 氨基酸; 生物量与品质; 根系形态; 局部无菌培养

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)10-1846-07 doi:10.11654/jaes.2015.10.002

Effects of Different Ratios of Exogenous Glycine, Nitrate and Ammonium on Growth and Quality of Pakchoi (*Brassica chinensis* L.)

CAO Xiao-chuang¹, LI Xiao-yan², ZHU Lian-feng¹, ZHANG Jun-hua¹, YU Sheng-miao¹, JIN Qian-yu¹, WU Liang-huan^{2*}

(1.State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China; 2.Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Plants not only absorb nitrate(NO_3^--N) and ammonium(NH_4^+-N), but also have the ability to take up intact amino acids, such as glycine($\text{Gly}-\text{N}$). It has been known that exogenous nitrogen(N) form in fertilizers is a major factor determining the nitrate accumulation and nutritional quality of plant edible parts. However, the effects of applying different N form mixture on plant growth and nutritional quality are still poorly understood. In this study, the effects of different concentrations and forms of exogenous $\text{Gly}-\text{N}$, NO_3^--N , and NH_4^+-N on biomass, root morphology and nutritional quality of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) were explored under partial sterile hydroponic cultivation condition. Results showed that the biomass and nutritional quality of pakchoi was significantly affected by the ratios of three N forms($P<0.05$). The highest pakchoi biomass($94.5\ \text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}$) was achieved in the treatment supplied with high $\text{Gly}-\text{N}$ ($2500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), high NH_4^+-N ($2500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), and low NO_3^--N ($250\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). The total root length, total root surface area, total root volume, and root activity followed a similar variation trend to the pakchoi biomass. Simultaneous applications of high $\text{Gly}-\text{N}$ and low inorganic N resulted in the highest content of total soluble proteins, total free amino acids, and total soluble sugars in pakchoi plants(about $26.2\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $126\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and $24.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively). Accumulation of nitrate was significantly decreased by high $\text{Gly}-\text{N}$ and low inorganic N treatments, compared with the high inorganic N treatments($P<0.05$). It suggests that appropriate formula of N sources, particularly higher $\text{Gly}-\text{N}$ while in lower NO_3^--N , can partly improve the nutritional quality of pakchoi under sterile hydroponic conditions. Our results shed light on nutritional quality improvement of vegetables by optimizing the composition of different N forms in protected vegetable cultivation.

Keywords: nitrogen concentration and form ratio; amino acid; biomass and quality; root morphology; partial sterile cultivation

收稿日期: 2015-04-21

基金项目: 浙江省自然科学基金(LQ15C130004); 国家自然科学基金(31172032, 31172032, 30900880); 国家重点基础研究发展 973 计划(2015CB150502)

作者简介: 曹小闯(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 从事有机营养与食品安全研究。E-mail: caoxiaochuang@126.com

* 通信作者: 吴良欢 E-mail: finm@zju.edu.cn

近年来,人们为了提高蔬菜产量,盲目施用大量的化学氮肥,导致严重的硝酸盐累积,进而危害人类健康^[1]。业已证明,植物不仅能够吸收硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)等无机氮,还能直接吸收环境中氨基酸态氮^[2-3]。氨基酸态氮部分替代 NO_3^- -N 能够降低蔬菜叶片硝酸盐含量,并可提高其可溶性糖及游离氨基酸含量,从而改善蔬菜的营养品质^[4-5],且不同形态氮(无机氮、有机氮)比例显著影响作物体内硝酸盐含量及其碳、氮代谢^[6-7]。然而,目前的研究大多集中于单一无机氮、有机氮部分替代无机氮对作物生长和碳、氮代谢的影响,混合氮源浓度配比对作物体内碳水化合物积累和氮素吸收影响的报道尚不多见。常规培养条件下,有机氮尤其是氨基酸态氮易于被微生物分解,且不同形态氮素之间也可以相互转化。因此,当前已取得的试验结果存在很大争议^[8-9],而且无菌条件下不同外源氮浓度配比对作物生长、根系结构以及品质指标的影响也并不十分清楚。

甘氨酸(Gly)是土壤中含量较高的一种氨基酸,也是分子量最小、结构最简单的氨基酸^[10];与其他氨基酸相比,甘氨酸不易被微生物分解^[11],且长久以来一直是植物氨基酸态氮研究的理想氮源。因此,本文选择甘氨酸(Gly-N)作为供试氨基酸态氮,以双子叶植物小白菜(*Brassica chinensis* L.)为供试材料,旨在探讨无菌条件下小白菜幼苗生长、氮素吸收及品质等对不同外源氮浓度组成(Gly-N、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N)的响应,为蔬菜养分综合高效管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2014 年 3—5 月在浙江大学紫金港校区植物有机营养实验室内进行,供试作物为小白菜(*Brassica chinensis* L.),品种为浙白 6 号。将小白菜种子于 25 ℃下浸泡 12 h 后,按照莫良玉等^[12]组合灭菌方法进行灭菌,然后将消毒种子播于含 10 mL 营养琼脂培养基的培养皿中(直径约为 60 mm),每皿播种 15~20 粒,盖上培养皿的盖子并用封口膜封好,置于白天温度 25 ℃、夜间温度 22 ℃、空气湿度为 60%、光照强度为 15 000 lx 的植培台上发芽,并同时进行了菌检。种子发芽后,选取无菌的种子 3 粒点播于已灭菌且装满琼脂(0.1%)的 50 mL 塑料离心管(上端带有直径 0.5 cm 小孔的塑料盖),并包上已灭菌的玻璃纸,然后置于无菌植培台上(离心管用铝箔包裹,以保证植物根系在黑暗条件下生长),光照和温度条件与

发芽时相同,且整个实验期间保持一致,培养好的无菌幼苗供下一阶段使用。

1.2 试验设计

试验采用水培法,供试氮源为 Gly-N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 三种混合氮源,每种氮源设 250、2500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 两个水平,共 8 个处理(表 1),其总氮浓度分别为 750、3000、3000、5250、3000、5250、5250、7500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。除氮外,其他养分配方参考 MS 培养基的无机盐组成稍加改变,主要成分为:2.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ K_2SO_4 , 2.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 , 4.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 , 1.4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.000 1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaMoO_4 , 0.000 4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.001 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.008 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ H_3BO_3 , 0.01 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ MnCl_2 , 0.005 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2EDTA , 0.01 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ FeSO_4 。上述无氮营养液采用 121 ℃高压灭菌 30 min, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、Gly-N 采用 0.22 μm 微孔滤膜灭菌,然后添加到 121 ℃高压灭菌的无氮营养液中。

待培养好的无菌幼苗从离心管中长出后去掉玻璃纸,每个离心管保留一株幼苗,然后用南大 704 硅橡胶密封小孔;3 d 后,把无菌苗转移到另一批灭菌且装有上述 1/2 强度营养液的 50 mL 离心管中;再培养 3 d 后,将营养液更换为完全营养液,pH 为 6.0 左右。每个处理设 8 个重复,随机排列。每 3 d 更换一次营养液,去掉污染幼苗,局部无菌培养 21 d 后收获。

1.3 测定项目与方法

小白菜收获时将地上部和根系分开,并分别称

表 1 不同处理中外源氮浓度组成

Table 1 Concentrations of exogenous Gly-N, NO_3^- -N, and NH_4^+ -N in different treatments

处理 *	Gly-N/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^- -N/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ -N/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
gna	250	250	250
gnA	250	250	2500
gNa	250	2500	250
gNA	250	2500	2500
Gna	2500	250	250
GnA	2500	250	2500
GNa	2500	2500	250
GNA	2500	2500	2500

注:* 各处理中组合代码“g”、“n”和“a”分别表示低氮浓度(250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的 Gly-N、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N;“G”、“N”和“A”分别表示高氮浓度(2500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的 Gly-N、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N。下同。

Note: * Combined treatment codes "g", "n", and "a" represent low concentrations (250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) of Gly-N, NO_3^- -N and NH_4^+ -N, respectively; while "G", "N", and "A" represent the high concentrations (2500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) of Gly-N, NO_3^- -N and NH_4^+ -N, respectively. The same below.

重。根系形态结构(包括总根长、根表面积、根直径、根体积和根尖数)用根系扫描仪(STD1600, Epson, Nagano, Japan)进行扫描分析。样品烘干后粉碎,用浓硫酸-双氧水法进行消解,样品氮含量采用半微量凯氏定氮法测定^[13-14];游离氨基酸总量采用水合茚三酮比色法测定;可溶性蛋白总量采用考马斯亮蓝染色法测定,并用牛血清白蛋白作标准曲线;可溶性糖总量采用蒽酮比色法测定;根系活力采用 TTC 法测定;硝酸盐含量采用水杨酸比色法测定^[15]。

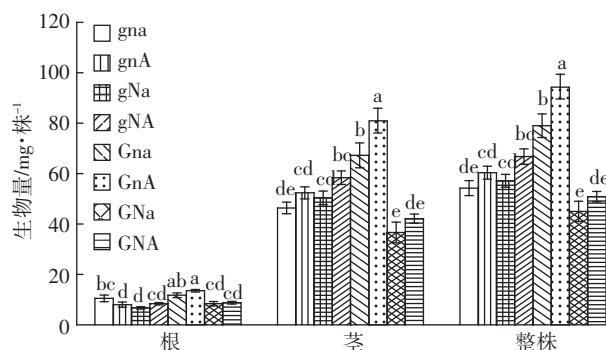
1.4 数据分析

数据采用 STATISTICA 5.5(StaSoft Inc, USA)软件进行 ANOVA 方差分析,图表中各指标不同处理间显著性检验采用 Duncan 新复极差法($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同外源氮浓度对比对小白菜生物量及氮含量的影响

如图 1 所示,不同处理中各外源氮浓度对比对小白菜地上部和根系生物量的影响差异显著($P < 0.05$)。GnA 处理中小白菜根系、地上部和整株生物量最高,分别达 13.5、81.0、94.5 $\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$,且显著高于其他 7 个处理(根系生物量除外, $P < 0.05$)。低 Gly-N 浓度条件下($250 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),小白菜的地上部、整株生物量在 gna、gnA 和 gNa 处理间差异不显著。高 Gly-N 浓度条件下($2500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),GnA 处理整株生物量较 Gna、GNa 和 GNA 处理分别增加了 19.6%、110%和 85.7%。虽然 GNA 处理中氮浓度是 gna 处理的 10 倍,但前者



图中不同小写字母表示各部位不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$)
between different treatments of root, shoot and whole plant of pakchoi.
The same below

图 1 局部无菌水培条件下不同外源氮浓度对比对小白菜生物量的影响

Figure 1 Effects of different exogenous nitrogen forms on biomass of pakchoi under localized sterile hydroponic cultivation

整株生物量仅较后者增加了 6.60%。等氮量条件下($3000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),Gna 处理中整株生物量显著高于 gna 和 gNa 处理($P < 0.05$);在 $5250 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,低 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的 GnA 处理中整株生物量显著高于高 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的 gNA 和 GNa 处理($P < 0.05$)。

如图 2 所示,GnA 处理中小白菜根系、地上部和整株氮含量显著高于其他各处理($P < 0.05$)。GNA 处理中营养液氮浓度最高,但其植株总氮含量较 Gna 和 GnA 处理分别降低了 22.8%和 44.3%。在等氮量条件下($3000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),整株氮含量的大小顺序为 $\text{Gna} > \text{gNa} > \text{gna}$;在 $5250 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,整株氮含量的顺序为 $\text{GnA} > \text{gNA} > \text{GNa}$ 。

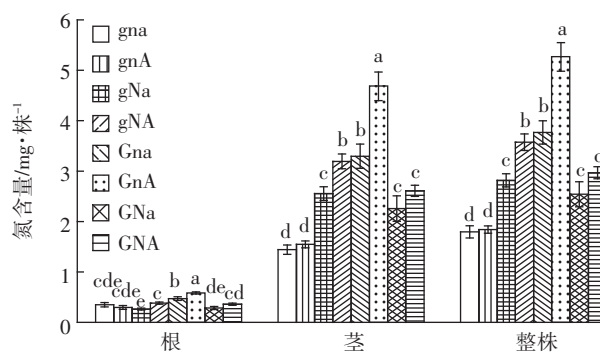


图 2 局部无菌水培条件下不同外源氮浓度对比对小白菜氮含量的影响

Figure 2 Effects of different exogenous nitrogen forms on nitrogen content of pakchoi under localized sterile hydroponic cultivation

三因素方差分析显示,Gly-N、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 三种氮源对小白菜整株生物量均存在显著的主效应($P < 0.05$),即三种氮源不同浓度均显著影响小白菜的生长,且 Gly-N 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的交互效应也显著影响小白菜的生长(表 2)。然而,Gly-N、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 三种氮源的主效应及其交互效应对小白菜全氮含量影响均不显著。

2.2 不同外源氮浓度对比对小白菜根系形态和根系活力的影响

由表 3 可知,GnA 处理中小白菜根系总根长、根表面积、根体积及根系活力最高,分别达 359 cm 、129 cm^2 、2.50 cm^3 、0.680 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$,且均显著大于其他各处理(除 Gna 外, $P < 0.05$)。在高 Gly-N 浓度条件下,增加 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度(如 GNa 和 GNA)显著抑制小白菜根系形态特征的增长,其总根长、根表面积、根体积及根系活力显著低于 Gna 和 GnA 处理。低 Gly-N 浓度条件下,gNA 处理小白菜各主要根系形态指标值最高。

表 2 甘氨酸、硝态氮和铵态氮对小白菜生物量和氮含量的主效应及其交互效应分析

Table 2 Main and interaction effects of Gly-N, NO₃-N, and NH₄⁺-N on biomass and nitrogen content of pakchoi using three-factor analysis of variance(ANOVA)

效应	生物量		氮含量	
	F	P	F	P
Gly	10	0.002 3	0.54	0.47
NO ₃ ⁻	48	<0.001	0.11	0.74
NH ₄ ⁺	14	<0.001	0.00	0.99
Gly×NO ₃ ⁻	79	<0.001	0.00	0.95
Gly×NH ₄ ⁺	0.37	0.54	0.010	0.93
NO ₃ ⁻ ×NH ₄ ⁺	0.33	0.57	0.019	0.88
Gly×NO ₃ ⁻ ×NH ₄ ⁺	2.0	0.17	0.00	0.97

小白菜主要根系形态指标和根系活力变化趋势与生物量变化趋势相似,其总根长、根表面积、根体积、根系活力均呈现 GNa>Gna>gNa>gnA>gNa>gna>(GNa, GNA)的变化趋势。不同外源氮浓度配比对小白菜根系直径影响差异不大,gna 处理中根直径最低,为 0.901 mm,其他各处理间差异不显著。

2.3 不同外源氮浓度配比对小白菜品质指标的影响

由图 3 可知,不同处理中小白菜叶片可溶性蛋白、游离氨基酸、可溶性糖及硝酸盐含量因外源氮浓度配比的不同而差异显著($P<0.05$)。Gna 处理中可溶性蛋白、游离氨基酸和可溶性糖含量最高,分别达 26.2、126、24.0 mg·kg⁻¹。等氮量条件下(3000 μmol·L⁻¹),Gna 处理可溶性蛋白、游离氨基酸和可溶性糖含量较 gnA 和 gNa 处理平均值分别增加了 17.3、11.5 倍和 1.10 倍。在 5250 μmol·L⁻¹ 条件下,GnA 和 GNa 处理中可溶性蛋白和可溶性糖含量较 gNA 处理显著增加($P<0.05$),但游离氨基酸含量增加趋势不显著,

GNa 处理甚至较 gNA 处理降低了 47.0%。高 Gly-N 浓度处理中,高 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度(如 GNA 处理)显著降低可溶性蛋白、游离氨基酸和可溶性糖含量,而低 Gly-N 浓度处理中此趋势不明显。

此外,不同外源氮浓度组成也显著影响小白菜硝酸盐含量。无菌培养 21 d 后,小白菜叶片硝酸盐含量在 gna 处理中最低,为 34.2 mg·kg⁻¹;在 GNa 和 GNA 处理中最高,且显著大于其他各处理($P<0.05$)。在等氮量条件下(3000 μmol·L⁻¹),小白菜叶片硝酸盐含量的大小顺序为 gNa>Gna>gnA;在 5250 μmol·L⁻¹ 条件下,小白菜叶片硝酸盐含量的大小顺序为 GNa>gNA>GnA。

3 讨论

氮素是调控植物生长发育的关键因素,不同形态氮源对植物生物量和氮素吸收有很大影响^[6]。本试验结果表明,小白菜的生物量和氮含量受外源氮浓度及其组成影响差异显著,在高 Gly-N 和 NH₄⁺-N 浓度、低 NO₃⁻-N 浓度处理中(GnA)达到最高。低 Gly-N 浓度条件下,受氮浓度影响小白菜整株生物量在各处理间差异不显著。高 Gly-N 浓度条件下,增加 NO₃⁻-N 浓度(如 GNa 和 GNA)使小白菜生物量和氮含量显著降低,我们推测小白菜对 Gly-N 和 NO₃⁻-N 的吸收可能存在激烈竞争;NH₄⁺-N 则表现出相反的趋势,低 NO₃⁻-N 浓度条件下提高 NH₄⁺-N 浓度显著增加小白菜生物量和氮含量(如 GnA),表明适当增加混合氮源中 Gly-N 和 NH₄⁺-N 浓度、降低 NO₃⁻-N 浓度有利于小白菜生物量的增加。Wu 等^[17]发现无菌条件下小麦生物量随着外源 Gly-N:NH₄⁺-N 比例的增加而增大,与 Gunes 等^[9]对洋葱的研究结果以及我们前期的试验结果一致^[4]。高浓度外源 Gly-N 和 NH₄⁺-N 增加了小白

表 3 局部无菌水培条件下不同外源氮浓度配比对小白菜根系形态及根系活力的影响

Table 3 Effects of different exogenous nitrogen forms on root morphology and root activity of pakchoi under localized sterile hydroponic cultivation

处理	总根长/cm	根表面积/cm ²	根直径/mm	根体积/cm ³	根尖数/个	根系活力/mg·h ⁻¹ ·g ⁻¹
gna	187±11de	58.6±4.6de	0.897±0.034b	1.40±0.11cd	311±24d	0.413±0.026de
gnA	213±12d	86.9±7.1c	0.991±0.035ab	1.77±0.15bc	410±29cd	0.487±0.039cd
gNa	237±15cd	74.8±6.8cd	1.01±0.031ab	1.64±0.13bc	462±41c	0.473±0.035cd
gNA	282±19bc	95.7±8.4bc	1.08±0.040a	1.87±0.20bc	514±45abc	0.543±0.038bc
Gna	325±25ab	116±10ab	1.01±0.031ab	2.13±0.21ab	628±38a	0.624±0.046ab
GnA	359±26a	129±10a	1.02±0.031ab	2.50±0.26a	593±46ab	0.677±0.046a
GNa	146±10e	48.6±3.1e	1.19±0.052a	1.42±0.12cd	485±36bc	0.410±0.026de
GNA	156±10e	52.4±3.9de	1.20±0.064a	1.22±0.10d	421±33cd	0.343±0.018e

注:表中不同小写字母表示各指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$) between different treatments of root morphology and root activity of pakchoi.

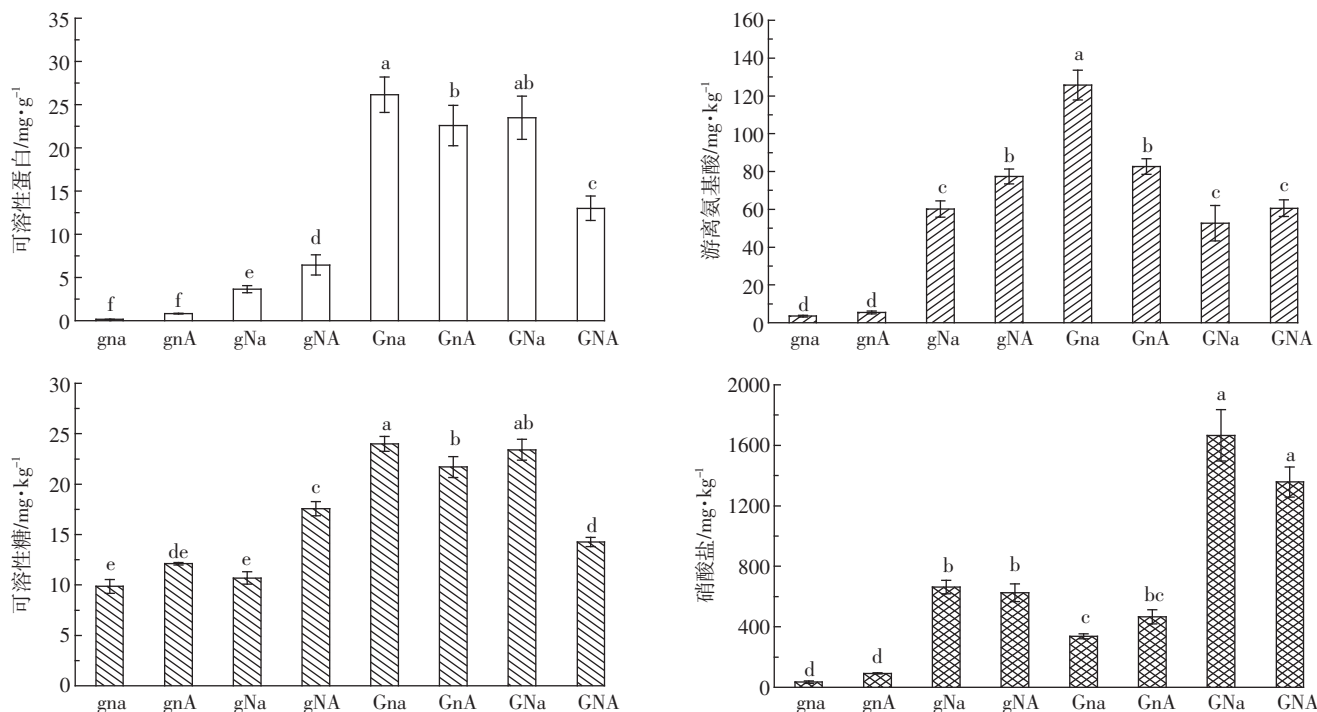


图3 局部无菌水培条件下不同外源氮浓度对比对小白菜品质指标的影响

Figure 3 Effects of different exogenous nitrogen forms on quality indicators of pakchoi under localized sterile hydroponic cultivation

菜叶片生物量和全氮含量,表明除 NO_3^- -N 外小白菜还易于吸收还原态形式的氨基酸态氮和 NH_4^+ -N,并增强体内氮代谢过程。这可能与蔬菜体内存在氮代谢的反馈调节机制有关;也可能由于 NH_4^+ -N 主要在根部同化,而 NO_3^- -N 既会在根部也会运到地上部同化。故两者配合施用可以使植株各部位累积的碳水化合物即碳架得到合理和高效利用,可节省能量,使植物以少量能耗贮存较多氮素^[18]。此外, NH_4^+ -N 在植物体内的同化比 NO_3^- -N 所需的能量更少,因此从理论上植物应倾向于利用 NH_4^+ -N 作为氮源。但目前外源氨基酸对植物 NH_4^+ -N 吸收、转运机理等方面的影响仍不十分清楚。

小白菜作为喜硝植物,当 NO_3^- -N 的同化速率超过其吸收速率时,就容易造成体内硝酸盐的累积^[19]。高 NO_3^- -N 浓度处理中(如 gNa 和 GNa 处理),小白菜硝酸盐含量较低 NO_3^- -N 浓度处理(如 gnA 和 GnA)显著增加,可间接证明小白菜硝酸盐含量主要来源于外源 NO_3^- -N。作为 NO_3^- -N 的还原产物,氨基酸对氮代谢具有反馈调节作用,当植株本身具有足量还原态氮时,植物不会吸收或仅吸收少量的 NO_3^- -N,以节省 NO_3^- -N 的吸收、还原及最终氨基酸合成所用能量^[20]。因此混合氮源条件下,小白菜会优先吸收 Gly-N,从而抑制植株根系对 NO_3^- -N 的吸收,进而减少体内硝

酸盐含量。此外,不同形态氮源间的相互作用也可能是小白菜体内硝酸盐含量降低的原因之一。与 Gna 处理相比,GnA 处理显著增加小白菜生物量和氮含量,但其硝酸盐含量却处于较低水平,表明在低 NO_3^- -N 浓度条件下,高浓度的外源 NH_4^+ -N 会抑制高亲和力的 NO_3^- -N 的吸收,与 Nazoa 等^[21]和 Vidmar 等^[22]的研究结果一致。有研究指出氨基酸能够抑制根系中 HvNRT2 转录基因的表达,进而阻碍编码 NO_3^- -N 转运蛋白 mRNA 合成,而该转运蛋白与 NO_3^- -N 的吸收紧密相关^[22]。Aslam 等^[23]发现虽然氨基酸能够诱导 NO_3^- -N 转运蛋白,但编码 NO_3^- -N 转运蛋白的 mRNA 周转速率却显著增加。考虑到小白菜吸收的 NH_4^+ -N 和氨基酸态氮在其体内并不能转化成硝酸盐^[24],因此适当增加外源氨基酸态氮和 NH_4^+ -N 水平有利于降低蔬菜的硝酸盐污染。

长久以来,与单一供应 NH_4^+ -N 或 NO_3^- -N 相比,铵硝混合氮源可显著提高植物生长速率,增加吸氮总量和蛋白质含量,改善植物的营养品质^[25-27]。本试验在严格的局部无菌条件下发现,在无机氮中添加适量的氨基酸态氮能够在不影响小白菜产量的前提下,提高可溶性蛋白、游离氨基酸、可溶性糖含量,降低硝酸盐含量,改善小白菜的营养品质。氨基酸态氮和 NH_4^+ -N 部分替代 NO_3^- -N 后,小白菜叶片的可溶性糖含量上

升。这可能与液泡中 NO_3^- -N 的数量减少,可溶性糖和氨基酸进入液泡维持渗透平衡有关^[28]。从叶片中游离氨基酸与可溶性蛋白含量的变化分析,小白菜在高 Gly-N、低 NO_3^- -N 浓度处理中对氮吸收利用效率较高,氮代谢速度快,叶片游离氨基酸含量增加,蛋白质含量相应提高。氨基酸含量及其组成是评价蔬菜营养品质的重要指标^[29]。但也有人发现氨基酸虽能显著改善作物品质,却不能提高作物产量。这可能与作物种类及氨基酸类型、氮浓度等有关^[5,7,30]。

作物产量的形成是养分供应水平与根际环境条件共同作用的结果,根系形态及其根际环境也影响到地上部的生长及品质^[31]。本研究表明不同外源氮浓度组成对小白菜根系形态的影响主要表现在根系长度、根表面积、根体积及根系活力上,其与小白菜生物量变化趋势高度相似,呈现出 $\text{GnA} > \text{Gna} > \text{gNA} > \text{gnA} > \text{gNa} > \text{gna} > (\text{GNa}, \text{GNA})$ 的变化趋势,表明良好的根系形态特征有利于地上部的生长发育。高 Gly-N 和 NH_4^+ -N 浓度、低 NO_3^- -N 浓度处理有利于促进小白菜根系总根长、根表面积、根体积和根系活力,但各处理间根系直径差异不显著。值得注意的是,在低 NO_3^- -N 浓度条件下,增加混合氮源中 NH_4^+ -N 的浓度有利于根系形态特征的发育。这可能是由于吸收 NH_4^+ -N 后产生的根际酸化可以部分抵消 NO_3^- -N 吸收产生的根际碱化,形成适宜于根系生长的环境^[32]。然而,高浓度 NH_4^+ -N 抑制作物生长,容易造成光合产物向根部运输减少,制约根系生长发育,产生细根或黑根,出现根茎比降低等现象^[33]。因此,寻求适宜的氮浓度组成对构建理想的植物根系形态特征具有重要意义。当前外源有机氮调控根系吸收特性的相关研究较少,进一步揭示混合氮源条件下水稻根系功能与养分利用间的内在联系也是氮营养吸收研究的发展趋势。

4 结论

局部无菌水培条件下,提高混合氮源中 Gly-N 浓度、降低无机氮(尤其是 NO_3^- -N)浓度,能够提高小白菜生物量、可溶性蛋白、游离氨基酸和可溶性糖含量,并降低硝酸盐含量,一定程度改善小白菜营养品质。小白菜的总根长、根表面积、根体积、根系活力等指标变化趋势与生物量变化趋势一致,表明良好的根系形态特征和根系活力有利于地上部的生长发育。

参考文献:

[1] Dich J, Jrvinen R, Knekt P, et al. Dietary intakes of nitrate, nitrite and

- NDMA in the Finnish mobile clinic health examination survey[J]. *Food Additives and Contaminants Part A: Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 1996, 13(5):541-552.
- [2] Näsholm T, Ekblad A, Nordin A, et al. Boreal forest plants take up organic nitrogen[J]. *Nature*, 1998, 392(6679):914-916.
- [3] Persson J, Näsholm T. Amino acid uptake: A widespread ability among boreal forest plants[J]. *Ecology Letters*, 2008, 4(5):434-438.
- [4] 曹小闯, 吴良欢, 陈贤友, 等. 氨基酸部分替代硝态氮对小白菜产量、品质及根际分泌物的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3):699-705.
- CAO Xiao-chuang, WU Liang-huan, CHEN Xian-you, et al. Effects of partial replacing NO_3^- -N with amino acid on yield, quality and root secretion of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3):699-705.
- [5] 葛体达, 黄丹枫, 芦波, 等. 无机氮和有机氮对水培番茄幼苗碳水化合物积累及氮素吸收的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(5):604-609.
- GE Ti-da, HUANG Dan-feng, LU Bo, et al. Effect of inorganic and organic nitrogen supply on accumulation of carbohydrate and nitrogen in tomato seedlings under hydroponic culture[J]. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2008, 14(5):604-609.
- [6] 许如意, 别之龙, 黄丹枫. 不同氮素形态配比对网纹甜瓜干物质分配和氮代谢的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊):147-150.
- XU Ru-yi, BIE Zhi-long, HUANG Dan-feng. Effects of different nitrogen forms on the dry matter accumulation and leaf nitrogen metabolism of muskmelon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(Suppl):147-150.
- [7] 武彦荣, 高秀瑞, 陈贵林, 等. 外源氨基酸对不结球白菜和生菜品质的影响[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2007, 27(1):60-63.
- WU Yan-rong, GAO Xiu-rui, CHEN Gui-lin, et al. Effect of exogenous amino acids on the quality of non-heading cabbage and lettuce[J]. *Journal of South west Agricultural University(Natural Science)*, 2007, 27(1):60-63.
- [8] Wang H J, Wu L H, Wang M Y, et al. Effects of amino acid replacing on growth, nitrate accumulation and macroelement concentrations in pak-choi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5):595-600.
- [9] Gunes A, Inal A, Akta M. Reducing nitrate content of NET grown winter onion plants (*Allium cepa* L.) by partial replacement of NO_3^- with amino acid in nutrient solution[J]. *Scientia Horticulture*, 1996, 65(2):203-208.
- [10] Bardgett R D, Streeter T C, Bol R. Soil microbes compete effectively with plants for organic-nitrogen inputs to temperate grasslands[J]. *Ecology*, 2003, 84(5):1277-1287.
- [11] Lipson D A, Raab T K, Schmidt S K, et al. Variation in competitive abilities of plants and microbes for specific amino acids[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(3):257-261.
- [12] 莫良玉, 吴良欢, 陶勤南. 植物有机营养研究中供试种子组合灭菌方法比较[J]. *浙江大学学报:农业与生命科学版*, 2000, 26(6):643-646.
- MO Liang-yu, WU Liang-huan, TAO Qin-nan. Studies on combinative sterilization method to seed for plant organic nutrient experiments[J].

- Journal of Zhejiang University(Agricultural & Life Science)*, 2000, 26(6):643-646.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:44-48.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:44-48.
- [14] Groleau R V, Plantureux S, Guckert A. Influence of plant morphology on root exudation of maize subjected to mechanical impedance in hydroponic conditions[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201(2):231-239.
- [15] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 二版. 北京: 高等教育出版社, 2006:135-212.
WANG Xue-kui. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006:135-212.
- [16] Engels C, Marschner H. Influence of the form nitrogen supply on root uptake and translocation of nutrients in the xylem exudates of maize(*Zea mays* L.)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44:1695-1701.
- [17] Wu L H, Mo L Y, Fan Z L, et al. Absorption of glycine by three agricultural species under sterile sand culture conditions[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(3):286-292.
- [18] Hawkesford M, Horst W, Kichry T, et al. Functions of macronutrients [M]/Marschner P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Waltham: Academic Press, 2011:135-151.
- [19] Chen B M, Wang Z H, Li S X, et al. Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables[J]. *Plant Science*, 2004, 167(3):635-643.
- [20] Padgett P E, Leonard R T. Regulation of nitrate uptake by amino acids in maize cells suspension culture and intact roots[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155/156:159-161.
- [21] Nazoa P, Vidmar J J, Timothy T J, et al. Regulation of the nitrate transporter gene At NRT2. 1 in *Arabidopsis thaliana*: Responses to nitrate, amino acid and developmental stage[J]. *Plant Molecular Biology*, 2003, 52(3):689-703.
- [22] Vidmar J J, Zhou D M, Siddiqi Y, et al. Regulation of high-affinity nitrate transporter genes and high-affinity nitrate influx by nitrogen pools in roots of barley[J]. *Plant Physiology*, 2000, 123(1):307-318.
- [23] Aslam M, Travis R L, Rains D W. Differential effect of amino acids on nitrate uptake and reduction systems in barley roots[J]. *Plant Science*, 2001, 160(2):219-228.
- [24] Wang H J, Wu L H, Tao Q N, et al. Glutamine nitrogen and ammonium nitrogen supplied as a nitrogen source is not converted into nitrate nitrogen of plant tissues of hydroponically grown Pak-choi (*Brassica chinensis* L.)[J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(2):21-23.
- [25] 李庆余, 徐新娟, 顾海龙, 等. 氮素形态对樱桃番茄果实发育中氮代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9):2335-2341.
LI Qing-yu, XU Xin-juan, GU Hai-long, et al. Effects of applying different nitrogen form on cherry tomato nitrogen metabolism during fruit development[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9):2335-2341.
- [26] 刘赵帆, 张国斌, 郁继华, 等. 氮肥形态及配比对花椰菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7):1923-1930.
LIU Zhao-fan, ZHANG Guo-bin, YU Ji-hua, et al. Effects of different nitrogen forms and their ratios on broccoli yield, quality, and nutrient absorption[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7):1923-1930.
- [27] 陈磊, 朱月林, 杨立飞, 等. 氮素不同形态配比对菜用大豆生长、种子抗氧化酶活性及活性氧代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3):768-772.
CHEN Lei, ZHU Yue-lin, YANG Li-Fei, et al. Effects of nitrogen forms and ratios on plant growth, seed antioxidant enzyme activities and reactive oxygen metabolism of vegetable soybean[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3):768-772.
- [28] 陈贵林, 高秀瑞. 氨基酸和尿素替代硝态氮对水培不结球白菜和生菜硝酸盐含量的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2):187-191.
CHEN Gui-lin, GAO Xiu-rui. Effect of partial replacement of nitrate by amino acid and urea on nitrate content of nonheading Chinese cabbage and lettuce in hydroponics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(2):187-191.
- [29] 于占东, 何启伟, 王翠花, 等. 大白菜主要营养品质性状的遗传效应研究[J]. 园艺学报, 2005, 32(2):244-248.
YU Zhang-dong, HE Qi-wei, WANG Cui-hua, et al. Studies on genetic effects of important nutrient quality characters in Chinese cabbage[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(2):244-248.
- [30] Kuzyakov Y, Raskatov A, Kaupenjohann M. Turnover and distribution of root exudates of *Zea mays*[J]. *Plant and Soil*, 2003, 254(2):317-327.
- [31] 王树起, 韩晓增, 李晓慧, 等. 缺磷胁迫下的大豆根系形态特征研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(2):192-196.
WANG Shu-qi, HAN Xiao-zeng, LI Xiao-hui, et al. Root morphology of soybean(*Glycinemax* L.) under phosphorus deficiency stress[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2010, 26(2):192-196.
- [32] Gerendás J, Zhu Z, Bebdixen R, et al. Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1997, 160(2):239-251.
- [33] Hinsinger P, Plassard C, Tang C, et al. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1-2):43-59.