植物营养与肥料学报 2012,18(3):699-705
Plant Nutrition and Fertilizer Science

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

曹小闯,吴良欢*,陈贤友,韩科峰
(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,
浙江省亚热带土壤和植物营养重点实验室,杭州 310058)

摘要: 采用局部无菌水培方法,研究了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。结果表明,与单一硝态氮处理相比,20%氨基酸部分替代硝态氮处理小白菜产量下降,硝酸盐及可溶性淀粉含量也显著降低,其中以20%谷氨酸(Glu)处理最低,分别为1490.8 mg/kg、1.77 mg/g;提高了小白菜全氮、可溶性蛋白、可溶性糖、游离氨基酸的含量,改变其根系形态结构及根系活力;同时,20%甘氨酸(Gly)、20%混合氨基酸(AAS)处理显著提高根系分泌物中铵态氮、游离氨基酸、总有机碳及总氮、可溶性蛋白的含量,根系分泌物中有机氮占总氮的百分比在Gly、Glu、AAS处理中分别提高了5.6%、11.2%、12.8%。表明氨基酸部分替代硝态氮可改善小白菜的品质,其生物量与各根系分泌物呈明显的负相关($0.7<r<0.83$,$P<0.05$),且氨基酸种类显著影响其生物量、根系形态以及根系分泌物各组分含量。

关键词: 小白菜;氨基酸;硝态氮;产量;品质;根际分泌物;局部无菌培养
中图分类号: S634.3;S143.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)03-0699-07

Effects of partial replacing NO_3^--N with amino acid on yield, quality and root secretion of pakchoi (*Brassica chinensis* L.)

CAO Xiao-chuang, WU Liang-huan*, CHEN Xian-you, HAN Ke-feng
(*College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University/*
Ministry of Education's Key Lab of Environmental Remediation and Ecosystem Health/
Zhejiang Provincial Key Lab of Subtropic Soil and Plant Nutrition, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Effects of partial (20%) replacing NO_3^--N with Gly, Glu and mixed amino acids in the nutrient solution on biomass, quality and root secretion of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) were studied under the partial sterile hydroponics cultivation. Compared to the single nitrate treatment, the 20% partial replacing NO_3^--N with amino acids could significantly reduce biomass with decreasing of nitrate and soluble starch content in the edible part of pakchoi after 24 day's treatment. The nitrate and soluble starch contents in the treatment of 20% replacing of NO_3^--N by Glu are lowest at 1490.8 mg/kg and 1.77 mg/g, while the contents of soluble protein, soluble sugar, free amino acid and total N in leaves and roots are improved. The treatments of partial replacing NO_3^--N could change the root morphology structure and root activity, and the contents of NH_4^+-N, free amino acids, total organic C, total N and soluble protein are also significantly increased in the treatments of 20% Gly and 20% of mixed amino acid replacing NO_3^--N. Compared to the treatment of single nitrate, the ratios of organic nitrogen to total nitrogen in the root secretions are increased by 5.6%, 11.2% and 12.8% in the treatments of 20% Gly, 20% Glu and 20% of mixed amino acids replacing NO_3^--N, respectively. Therefore, partial replacement of NO_3^- by amino acids could improve the quality of pakchoi, there is a negative relationship between the biomass of pakchoi

收稿日期: 2011-10-15　　**接受日期:** 2012-01-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(30871595,31172032)资助。
作者简介: 曹小闯(1985—),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事植物有机营养研究。E-mail: caoxiaochuang@126.com
*通讯作者 E-mail: lhwu@zju.edu.cn

and the root secretion ($0.7 < r < 0.83$, $P < 0.05$), and the types of amino acid could significantly affect biomass, root morphology structure and the amount of root secretion.

Key words: *Brassica chinensis* L; amino acid; nitrate; yield; quality; root secretion; partial sterile cultivation

近年来,随着"有机农业"和"有机食品"发展的不断高涨,植物的有机营养问题越来越引起人们的高度重视。研究发现,植物不仅能吸收、同化氨基酸、核酸、磷脂等小分子有机氮化物,而且还能吸收利用如血红蛋白、溶菌酶、核糖核酸酶等高分子有机氮化物[1-2],其中氨基酸态氮是植物有机氮养分的重要来源。植物能被动分泌且主动吸收根际分泌的有机氮化物[3],这是植物主动适应环境变化的机制之一。小白菜中含有大量的维生素、矿物质、碳水化合物、维生素等营养物质,是人们日常生活中重要的植物性食品,在现代蔬菜设施栽培中人们为了提高蔬菜产量,盲目施用大量的化学氮肥,导致严重的硝酸盐积累,危害人类健康[4]。已有研究发现,有机氮部分替代无机氮可降低蔬菜硝酸盐含量,然而由于所采用的试验材料及环境条件的不同,特别是在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,很多研究者对已取得的试验结果存在很大的争议[5-6],对无菌条件下根系分泌物含氮化合物的组成及数量知之不多,且对氨基酸部分替代硝态氮对作物品质、根系结构以及根际分泌物的影响也不甚清楚。本文以双子叶植物小白菜(*Brassica chinensis* L.)为供试作物,在局部无菌水培条件下研究了单一或混合氨基酸部分替代硝态氮对小白菜的产量、品质以及根际分泌物的影响,以期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 试验材料与设计

试验于2010年7～9月份在浙江大学华家池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",试验设4个处理:1)100%硝态氮;2)20%甘氨酸+80%硝态氮;3)20%谷氨酸+80%硝态氮;4)4%甘氨酸+4%谷氨酸+4%丙氨酸+4%脯氨酸+4%天冬氨酸+80%硝态氮,分别记为 NO_3^-、Gly、Glu、AAS,每个处理中总氮的浓度都为12.5 mmol/L,除氮外其它养分配方参考MS培养基的无机盐组成稍加改变而成,其主要成分参见表1。上述无氮营养液采用121℃高压灭菌,硝态氮和氨基酸采用超滤膜灭菌(通过孔径为0.22 μm的微孔滤膜),然后添加到121℃高压灭菌的无氮营养液中。

表1 无氮营养液中各元素的组成成分(mmol/L)

Table 1 Chemical composition of the nutrient solution without N

化合物 Compound	浓度 Concentr.	化合物 Compound	浓度 Concentr.
K_2SO_4	2.0	$FeSO_4$	0.01
KH_2PO_4	2.0	H_3BO_3	0.008
$CaCl_2$	4.0	$MnCl_2$	0.01
$NaMoO_4$	0.0001	Na_2EDTA	0.005
$ZnSO_4 \cdot 7(H_2O)$	0.001	$MgSO_4 \cdot 7(H_2O)$	1.4
$CuSO_4 \cdot 5(H_2O)$	0.0004		

将小白菜种子于25℃下浸泡12 h后,按照莫良玉等[7]组合灭菌方法进行灭菌,然后将消毒种子播于含约10 mL营养琼脂培养基的培养皿中(直径约为60 mm),每皿播种子15～20粒,盖上盖用封口膜封好,置于白天温度25℃,夜间温度22℃,空气湿度为60%,光照强度为6000 lux的植培台上发芽,并同时进行菌检。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(上端有直径0.5 cm小孔的盖)中,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。4 d后幼苗从离心管中长出来后去掉玻璃纸,每个离心管保留1株幼苗,然后用南大704硅橡胶密封小孔;7 d后,把苗转移到另一批灭菌且装有50 mL 1/2强度的霍格兰营养液的离心管中,培养7 d后,将营养液更换为处理液,pH为6.0左右,每个处理设15个重复,每支离心管定植1株无菌苗,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24 d后取样测定[8]。

培养24 d后收集根系分泌物,收集后立即加入微生物抑制剂(ampicillin),用Parafilm密封,然后置于-24℃冰箱中冰冻保存[9]。

1.2 测定项目与方法

小白菜收获后称重。功能叶片叶绿素含量用SPAD-502叶绿素计测定,以顶端第3、4片叶的叶

绿素计读数(SPAD)平均值表示。根系形态用(STD1600, Epson, Nagano, Japan)型根系扫描仪进行测量。小白菜地上部经烘干、粉碎后,用浓 H_2SO_4 $-H_2O_2$ 法进行消解,采用半微量凯氏定氮法测定样品的含氮量[10-11]。小白菜新鲜功能叶片游离氨基酸含量用水合茚三酮比色法测定;硝酸盐含量用硫酸-水杨酸法测定;可溶性蛋白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、淀粉含量用蒽酮比色法测定。根系活力用 TTC 法测定[12]。

幼苗培养 24 d 后,采用浸根法[13]收集根系分泌物。具体方法:用蒸馏水清洗根部 3 ~ 5 次,再用无菌水清洗,用滤纸吸干根表面水分,然后将根系放入盛有无菌水并包有铝箔的 50 mL 离心管中,将离心管放入无菌植培台上连续培养收集 6 h。根系分泌物的收集、分离所用器具均经高压蒸汽灭菌,然后于 60℃条件下抽真空旋转蒸发、浓缩。其中,根系分泌物中硝态氮测定采用紫外分光光度法,铵态氮测定采用靛粉蓝比色法[14];用 TOC 仪测定根系分泌物中的可溶性总碳(TC)、可溶性总氮(TN)。可溶性总氮减去无机氮($IN = NO_3^- + NH_4^+$)含量记为根系分泌物中可溶性有机氮(SON)的含量:即,SON = TN - IN,其中可溶性有机氮分为游离氨基酸态氮(FAAS)和其它可溶性有机氮(包括大分子蛋白质、有机酸、酶类,以 QSON 表示),即,QSON = SON - FAAS。

1.3　数据处理

数据采用 Statistica 5.5(StaSoft Inc, USA)软件进行统计分析,显著性检验采用 Daucan's 新复极差法($P < 0.05$)。

2　结果与分析

2.1　氨基酸部分替代硝态氮对小白菜生长及产量的影响

无菌培养 24 d 后,与单一硝态氮处理(NO_3^-)相比,Glu 和 Gly 处理小白菜功能叶片 SPAD 值显著增大(表 2),分别增加了 10.1% 和 10.4%,AAS 处理中 SPAD 值显著降低,降低了 7.1%,叶绿素含量的提高可能是由于外源氨基酸态氮(Gly、Glu)可被小白菜直接吸收利用,并且可以转变为其它氨基酸,如谷氨酸,而谷氨酸是叶绿素合成的底物。氨基酸部分替代硝态氮各处理都显著降低小白菜的地上部和地下部鲜重,各处理地上部和地下部鲜重大小顺序依次为 NO_3^- > Glu > Gly > AAS,干重变化趋势与此相同,Glu 处理中小白菜生物量降低幅度最小。不同处理间根冠比都达到了显著性差异,与 NO_3^- 处理相比,Gly、Glu、AAS 三个处理根冠比分别降低了 35.1%、9.5%、23.6%。

2.2　氨基酸部分替代硝态氮对小白菜生理指标的影响

表 3 看出,氨基酸部分替代硝态氮对小白菜品质的影响因氨基酸种类的不同而异,氨基酸部分替代硝态氮可以在一定程度上改善小白菜品质。Gly、Glu、AAS 三个处理显著降低小白菜叶片硝酸盐含量,与 NO_3^- 处理相比,分别降低了 13.0%、30.0%、15.3%,但 Gly 和 AAS 处理间没有显著差异;此外,Gly、Glu、AAS 三个处理小白菜可溶性淀粉的含量也

表 2　局部无菌水培条件下氨基酸部分替代硝态氮培养 24 d 后对小白菜幼苗生长的影响

Table 2　Effects of partial replacement of NO_3^--N by amino acid on the growth of pakchoi seeding after 24 days under the partial sterile hydroponics cultivation

处理 Treatment	功能叶片 SPAD 值 SPAD value of flag leaves	地上部 Shoot		根 Root		根冠比(鲜基) Root/Shoot ratio (Fresh wt.)
		鲜重 Fresh wt. (g/plant)	干重 Dry wt. (g/plant)	鲜重 Fresh wt. (g/plant)	干重 Dry wt. (g/plant)	
NO_3^-	34.7 ±0.5 b	6.1 ±0.1 a	0.4 ±0.01 a	0.9 ±0.03 a	0.06 ±0.002 a	0.15 ±0.0063 a
Gly	38.2 ±0.5 a	4.2 ±0.2 c	0.2 ±0.02 c	0.4 ±0.04 c	0.03 ±0.003 c	0.10 ±0.0091 d
Glu	38.3 ±0.3 a	5.1 ±0.1 b	0.3 ±0.02 b	0.7 ±0.02 b	0.04 ±0.002 b	0.13 ±0.0052 b
AAS	32.2 ±0.6 c	3.4 ±0.1 d	0.2 ±0.02 c	0.4 ±0.02 c	0.03 ±0.002 d	0.11 ±0.0079 c

注(Note): AAS—Mixed amino acids. 表中数据为平均数 ± 标准误 Data in the table represent means ± SE ($n = 4$);同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$),采用邓肯多重比较 These data with different letters within a column are significantly different ($P < 0.05$) using Duncan's multiple range test.

表3 局部无菌水培条件下氨基酸部分替代硝态氮培养24 d后对小白菜生理指标的影响

Table 3 Effects of partial replacement of NO_3^--N by amino acid on the physiological indexes of pakchoi after 24 days under the partial sterile hydroponics cultivation

处理 Treatment	硝酸盐 Nitrate (mg/kg)	可溶性蛋白 Soluble protein (mg/g)	可溶性淀粉 Soluble starch (mg/g)	可溶性糖 Soluble sugar (mg/kg)	游离氨基酸 Free amino acid (mg/kg)	叶全氮 Leaf-N (g/kg)
NO_3^-	2122 ±22 a	8.8 ±0.2 c	3.8 ±0.1 a	4.6 ±0.2 c	200 ±12 c	34.7 ±0.3 c
Gly	1847 ±18 b	13.1 ±0.3 a	2.7 ±0.1 b	7.3 ±0.6 b	328 ±14 a	41.5 ±0.6 a
Glu	1491 ±16 c	11.0 ±0.3 b	1.8 ±0.2 c	10.5 ±1.1 a	257 ±44 bc	38.1 ±1.6 b
AAS	1798 ±21 b	11.5 ±0.1 b	2.0 ±0.2 c	7.4 ±0.6 b	347 ±10 a	43.1 ±1.3 a

注(Note): AAS—Mixed amino acids. 表中数据为平均数±标准误 Data in the table represent means ±SE ($n=4$);同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$),采用邓肯多重比较 These data with different letters within a column are significantly different ($P<0.05$) using Duncan's multiple range test.

都显著降低,其大小顺序为 NO_3^- > Gly > AAS > Glu,且与 NO_3^- 处理相比,分别降低了28.9%、52.9%、47.5%,Glu 和 AAS 两处理间没有显著差异。

值得注意,与 NO_3^- 处理相比,Gly、Glu、AAS 三个处理提高小白菜可溶性蛋白含量的幅度分别为49.5%、25.6%、31.3%,Gly 处理小白菜可溶性蛋白含量达到13.1 mg/g,这可能由于 Gly 的分子量小,易于被小白菜吸收进而转化为蛋白质有关;Gly、Glu、AAS 三个处理小白菜游离氨基酸含量分别提高了63.5%、28.1%、73.1%,AAS 处理中游离氨基酸含量最高,达到了347.05 mg/kg,分析原因可能与小白菜对分子态氨基酸(尤其是小分子氨基酸)的吸收同化有关,地下部吸收的分子态氨基酸在根系即经脱氨基、转氨基作用被同化,由代谢产生的各种氨基酸迅速转移到地上部参与蛋白质的合成。Glu 处理中可溶性糖含量最高,达到了10.54 mg/kg,相对于 NO_3^- 处理,Gly、Glu、AAS 处理分别提高了58.1%、128.6%、60.3%;与 NO_3^- 处理相比,20%氨基酸部分替代硝态氮(Gly、Glu、AAS 处理)显著提高小白菜叶片全氮含量,提高幅度分别为19.6%、9.8%、24.2%;AAS 处理中叶片全氮含量最高,达到了43.1 g/kg,说明小白菜能高效利用有机氮。

2.3 氨基酸部分替代硝态氮对小白菜根系形态结构的影响

局部无菌条件下,20%氨基酸态氮部分替代硝态氮对小白菜总根长、根体积、根系活力的影响表现出相同的趋势(表4),即 Glu > Gly > NO_3^- > AAS,Glu 处理促进根毛的生长,根系活力增强,与 NO_3^- 处理相比,其根系总根长、根体积、根系活力分别增加28.2%、19.0%、44.9%;相反,AAS 处理显著降低了小白菜总根长、根体积和根系活力,分别降低了11.1%、24.3%、25.9%;Gly、Glu、AAS 三个处理中根表面积显著降低,分别降低了28.9%、16.4%、35.7%。不同氨基酸部分替代硝态氮对小白菜根系直径影响差异不大,与 NO_3^- 处理相比,仅 AAS 处理根直径显著增大,其它各处理间无显著差异。

2.4 氨基酸部分替代硝态氮对小白菜根系分泌物的影响

表5看出,不同氨基酸处理对小白菜根系分泌物中各组分含量的影响很大。与单一 NO_3^- 处理相比,Gly、Glu、AAS 三个处理根系分泌物中的硝态氮含量分别降低了19.5%、27.7%、17.1%;相反,20%氨基酸部分替代硝态氮显著提高各处理中铵态氮、游离氨基酸、总有机碳以及总氮的含量,各处理根系分泌物中铵态氮、游离氨基酸、总有机碳和总氮含量的变化趋势均为 AAS > Gly > Glu > NO_3^-,但变幅不等。以游离氨基酸为例,与单一 NO_3^- 处理相比,Gly、Glu、AAS 三个处理根系分泌物中的游离氨基酸含量分别提高了48.9%、46.2%、122.0%,这说明20%氨基酸部分替代硝态氮能促进根际游离氨基酸的分泌;与 NO_3^- 处理相比,Gly、AAS 处理都显著提高了根系分泌物中可溶性蛋白含量,分别提高了130.9%,268.3%,但 Glu 处理与其无显著差异。已有研究指出,根际分泌物成分复杂,含有多种含氮化合物,本试验中无机氮只占总氮的很少一部

表 4　局部无菌水培条件下氨基酸态氮部分替代硝态氮培养 24 d 后对小白菜根系形态及根系活力的影响

Table 4　Effects of partial replacement of NO_3^--N by amino acid on the root morphology and root activity of pakchoi after 24 days under the partial sterile hydroponics cultivation

处理 Treatment	总根长 Root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm^2)	根直径 Root diameter (mm)	根体积 Root volume (cm^3)	根系活力 Root activity [mg/(g·h)]
NO_3^-	567 ±41 bc	260 ±20 a	0.9 ±0.02 b	3.7 ±0.3 b	0.36 ±0.042 bc
Gly	645 ±21 ab	185 ±11 bc	0.9 ±0.02 b	4.0 ±0.1 ab	0.44 ±0.047 ab
Glu	727 ±64 a	217 ±17 ab	0.9 ±0.03 b	4.5 ±0.2 a	0.53 ±0.054 a
AAS	504 ±6 c	167 ±8 c	1.1 ±0.03 a	2.8 ±0.3 c	0.27 ±0.025 c

注(Note):AAS—Mixed amino acids. 表中数据为平均数 ± 标准误 Data in the table represent means ± SE (n = 4);同列数据后不同字母表示差异显著(P < 0.05),采用邓肯多重比较 These data with different letters within a column are significantly different (P < 0.05) using Duncan's multiple range test.

表 5　局部无菌水培条件下氨基酸部分代替硝态氮培养 24 d 后对小白菜根系分泌物的影响(μg/g, DM)

Table 5　Effects of partial replacement of NO_3^--N by amino acid on the composition of root exudates of pakchoi after 24 days under the partial sterile hydroponics cultivation

处理 Treatment	硝态氮 NO_3^--N	铵态氮 NH_4^+-N	总有机碳 Total organic C	总氮 Total N	游离氨基酸 Free amino acid	可溶性蛋白 Soluble protein
NO_3^-	173 ±7 a	101 ±6 c	338 ±35 c	741 ±7 c	328 ±17 c	1.4 ±0.03 c
Gly	139 ±5 bc	210 ±1 b	635 ±8 b	1114 ±70 b	488 ±14 b	3.2 ±0.09 b
Glu	125 ±5 c	140 ±7 a	581 ±8 b	1025 ±50 b	480 ±20 b	1.2 ±0.03 c
AAS	143 ±3b	239 ±14 a	819 ±47 a	1578 ±64 a	728 ±13 a	5.1 ±0.06 a

注(Note):AAS—Mixed amino acids. 表中数据为平均数 ± 标准误 Data in the table represent means ± SE (n = 4);同列数据后不同字母表示差异显著(P < 0.05),采用邓肯多重比较 These data with different letters within a column are significantly different (P < 0.05) using Duncan's multiple range test.

分(24%～37%),大部分(60%以上)以游离氨基酸等有机氮形式存在,且分泌的氨基酸类氮所占比重(约45%)不依替代氨基酸种类的不同而改变(图1),此时有机氮尤其是游离氨基酸可能充当植物生长环境中的"临时氮库",可以一定程度上缓解植物对外界氮营养需求。

2.5　氨基酸部分替代硝态氮对小白菜根际分泌物不同形态氮含量分配比例的影响

小白菜根系分泌物中不同形态氮的含量在氨基酸部分替代硝态氮各处理中表现出明显差异(图1)。本试验中所用营养液无机氮与氨基酸态氮的初始比例为 4∶1,但在局部无菌培养 24 d 后,根系分泌物中的氮形态主要以有机氮为主,NO_3^-、Gly、Glu、AAS 四个处理中有机氮分别是无机氮的 1.70 倍、2.18 倍、2.87 倍、3.13 倍;与 NO_3^- 处理相比,Gly、Glu、AAS 三个处理都降低小白菜根系分泌物中无机氮占总氮的百分比,分别降低了 5.6%、

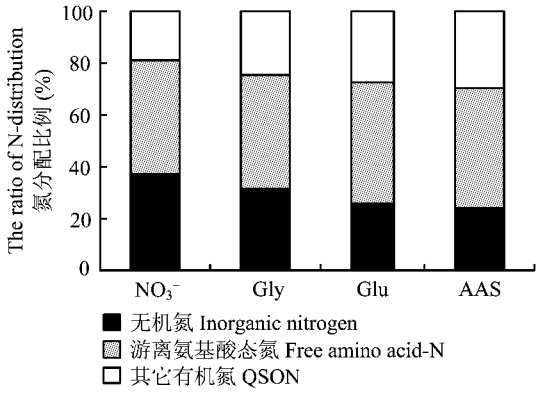

图 1　氨基酸态氮部分替代硝态氮培养 24 d 对小白菜根系分泌物中不同氮含量分配比例的影响

Fig. 1　Effects of partial replacement of NO_3^--N by amino acid on the ratios of different nitrogen contents in root exudates of pakchoi after 24 days of cultivation

[注(Note):QSON = Total N − Free amino acid-N − Inorganic N]

11.2%、12.8%；NO_3^-、Gly、Glu、AAS 四个处理根系分泌物中的有机氮都以氨基酸态氮为主，其占根系分泌物中总氮的百分比分别为 44.26%、43.84%、46.79%、46.16%，各处理间没有显著差异。氨基酸态氮占根系分泌物中总氮的百分比不依所替代氨基酸的种类而有所改变，但影响小白菜根系分泌物中其它有机氮占根系分泌物中总氮的百分比，与 NO_3^- 处理相比，Gly、Glu、AAS 处理中其它有机氮（比如蛋白质、有机酸、酶类）占分泌物总氮的百分比分别提高了为6.04%、8.62%、10.89%。

3 讨论与结论

已经证实，氨基酸部分替代硝态氮可以明显降低作物体内硝酸盐含量[15]，改善作物品质[16-17]；但也有人发现氨基酸态氮虽能改善作物品质，但却不能提高作物的产量，这与所采用的作物以及氨基酸类型、浓度及培养环境等有关[18]。本试验中小白菜地上部、地下部鲜重或干重，均以 NO_3^- 处理最大，进一步说明小白菜属喜硝植物，氨基酸部分替代硝态氮对小白菜的生长发育表现出一定的抑制作用，与前人的研究结果一致[5,19-20]，其中以 Glu 处理降低幅度最低，并且可以显著改善小白菜营养品质，这与葛体达等[20]的研究结果一致，其为开发新型氨基酸有机肥降低小白菜硝酸盐含量提供理论依据。在严格局部无菌条件下避免了微生物对有机氮化物的分解，发现氨基酸部分替代硝态氮提高了小白菜叶片可溶性糖、游离氨基酸、可溶性蛋白和全氮含量，且降低叶片硝酸盐以及可溶性淀粉含量，可一定程度改善小白菜的营养品质。

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，根系的代谢状况直接影响到地上部的生长及其品质的高低[21-23]。大量研究指出，养分缺乏对植物造成生理胁迫，将导致植物生理代谢的异常变化和根系原生质膜透性的增加，同时植物本身也可通过改变根系形态结构、分泌有机物等措施应对环境胁迫[24]。本试验 Gly、Glu 处理根系形态特征发育良好，尤其是根毛的生长有利于植物对养分的吸收；相反，AAS 处理抑制了小白菜地上部和地下部的生长发育，这可能和小白菜根系对不同氨基酸的吸收能力以及氨基酸的化学特性有关，Gly、Ala 属于小分子简单氨基酸，植物根系易于吸收转化利用，而 Asp、Pro 等氨基酸结构复杂、分子量大，小白菜对这些氨基酸态氮吸收能力较弱；此外，氨基酸降低了小白菜叶片硝酸盐的含量，由于植株硝态氮营养水平下降也会抑制小白菜地上部和地下部的生长发育。

已有研究表明，在植物—土壤的“根际对话”（Rhizosphere talk）中，植物起主导作用，根际分泌物起“语言”的作用，禾谷类作物一生中大约有 30%～60% 的光合产物转移到地下部，其中有 40%～90% 是以有机或无机分泌物的形式释放到根际[25]。当遭受环境胁迫时，植物根系既可以通过释放化感物质（酚、有机酸等）的方式提高植物对氮、磷及金属离子的吸收，提高抗逆性等生理作用，又可以主动吸收根际分泌物[26-27]，增加植物在逆境条件下的相对竞争能力。本研究各处理中小白菜地上部和地下部生物量的变化趋势都为 NO_3^- > Glu > Gly > AAS。根系主要分泌物含量（NH、TN、TOC、FAAS、可溶性蛋白）与小白菜的生物量呈明显的负相关；Gly、Glu、AAS 处理中小白菜的地上部生长发育受到一定程度抑制，但其根系活力明显增强，根系分泌物中除硝态氮外各组分含量均显著增加，AAS 处理各主要分泌物是 NO_3^- 处理的 2.13～3.60 倍，这似乎说明其根系形态特征以及根系分泌物含量的变化可以在一定程度上缓解小白菜的氮营养胁迫，是小白菜主动适应环境胁迫的机制之一。由于氮的有效性是形成作物产量的主要限制因素，因此其不能从根本上改变小白菜生物量的变化趋势，但通过改变根系形态特征及根际分泌物组成的“根际对话”，提高了根际中养分的循环和生物有效性，在调节其根际环境微生态系统的动态平衡，促进不同生态系统种间、种内物种的共存等方面可能发挥重要作用。

值得一提的是，与 NO_3^- 处理相比，本试验中 Gly、Glu、AAS 处理根系分泌物中有机氮占总氮的百分比分别提高了 5.6%、11.2%、12.8%，不同处理中有机氮主要以游离氨基酸的形式存在，因此我们推测在应对外界环境营养胁迫时根系分泌物中氨基酸态氮可能作为植物潜在的“临时氮库”，其重要性应引起人们的重视。此外，氨基酸态氮对小白菜氮素营养贡献率以及根际分泌物中不同形态氮化物的流向等问题有待进一步研究。

参 考 文 献：

[1] Koga N, Yamagata M, Matsumoto S *et al*. Evidence for direct organic nitrogen uptake by plants using specific tracer proteins [A]. Host W J *et al*. Plant nutrition-food security and sustainability of agro-ecosystems[M]. Dordrech: Kluwer Academic Publishers, 2001. 212-213.

[2] 莫良玉，吴良欢，陶勤南. 高等植物对有机氮吸收与利用研

究进展[J]. 生态学报, 2001, 22(1): 118-124.
Mo L Y, Wu L H, Tao Q N. Advances in study of plant organic nitrogen nutrition[J]. Acta Ecol. Sin., 2001, 22(1): 118-124.

[3] Jones L, Darrah R. Amino-acid influx at the soil-root interface of *Zea mays* L. and its implications in the rhizosphere[J]. Plant Soil, 1994, 164: 1-14.

[4] 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 Addit. Contam., 1996, 13(5): 541-552.

[5] Wang H J, Wu L H, Wang M Y *et al*. Effects of amino acid replacing on growth, nitrate accumulation and macroelement concentrations in Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 595-600.

[6] 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]. Sci. Hortic., 1996, 65: 203-208.

[7] 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 L Y, Wu L H, Tao Q N. Studies on combinative sterilization method to seed for plant organic nutrient experiments[J]. J. Zhejiang Univ. (Agric. Life Sci.), 2000, 26(6): 643-646.

[8] 朱维琴, 吴良欢, 陶勤南. 水稻有机营养研究中完全及局部无菌培养方法探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 516-521.
Zhu W Q, Wu L H, Tao Q N. Studies on totally and partially enclosed sterile culture methods used in the research of rice organic nutrition[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(5): 516-521.

[9] Warren C R, Adams P R. Uptake of nitrate, ammonium and glycine by plants of Tasmanian wet eucalypt forests[J]. Tree Physiol., 2007, 27: 413-419.

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

[11] 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 Soil., 1998, 201(2): 231-239.

[12] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Wang X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment (2nd edn.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[13] Szmigielska A M, Van Rees K C J, Cieslinski G *et al*. Determination of low molecular weight dicarboxylic acids in root exudates by gas chromatography[J]. J. Agric. Food. Chem., 1995, 43(4): 956-959.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Method of soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.

[15] Inal A, Tarakcioglu C. Effects of nitrogen forms on growth, nitrate accumulation, membrane permeability and nitrogen use efficiency of hydroponically grown bunch onion under boron deficiency and toxicity[J]. J. Plant Nutr., 2001, 24(10): 1521-1534.

[16] 钟晓红, 石雪晖, 肖浪涛. 色氨酸提高草莓果实品质和产量试验[J]. 中国果树, 2001, (2): 4-7.
Zhong X H, Shi X H, Xiao L T. The experiment of tryptophan improving the quality and yield of Strawberry(*Fragaria ananassa Duchesne* L.)[J]. China Fruits, 2001, (2): 4-7.

[17] 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), 2005, 27(3): 60-63.
Wu Y R, Gao X R, Chen G L *et al*. Effect of exogenous amino acids on the quality of non-heading cabage and lettuce[J]. J. Southwest Agric. Univ. (Nat. Sci.), 2005, 27(3): 60-63.

[18] Redhaiman K N A. Nitrate accumulation and metabolism in lettuce cultivars as influenced by ammonium: nitrate ratios in recirculating nutrient solution[J]. India J. Agric. Res., 2001, 35(4): 219-225.

[19] Wang H J, Wu L H, Zhu Y H *et al*. Growth, nitrate accumulation, and macronutrient concentration of pakchoi as affected by external nitrate-N: amino acid-N ratio[J]. J. Plant Nutr., 2008, 31: 1789-1799.

[20] 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 T D, Huang D F, Lu B *et al*. Effect of inorganic and organic nitrogen supply on accumulation of carbohydrate and nitrogen in tomato seedlings under hydroponic culture [J]. Chin. J. Appl. Environ. Biol., 2008, 14(5): 604-609.

[21] 李春俭, 马玮, 张福锁. 根际对话及其对植物生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 178-183.
Li C J, Ma W, Zhang F S. Rhizosphere talk and its impacts on plant growth[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(1): 178-183.

[22] 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 S Q, Han X Z, Li X H *et al*. Root morphology of soybean (*Glycinemax* L.) under phosphorus deficiency stress[J]. Syst. Sci. Compr. Stud. Agric., 2010, 26(2): 192-196.

[23] 陈际型. 钾素营养对水稻根系生长和养分吸收的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(2): 182-188.
Chen J X. Effect of K nutrition on rice root growth and nutrient uptake[J]. Acta Pedol. Sin., 1997, 34(2): 182-188.

[24] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙, 等. 根系分泌物生态学研究[J]. 生态学杂志, 2002, 21(6): 57-62.
Chen L C, Liao L P, Wang S L *et al*. A review for research of root exudates ecology[J]. Chin. J. Ecol., 2002, 21(6): 57-62.

[25] Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere[J]. Plant Soil, 1990, 129: 1-10.

[26] Paterson E, Sim A. Rhizodeposition and C-partitioning of Lolium perenne in axenic culture affected by nitrogen supply and defoliation [J]. Plant Soil., 1999, 216: 155-164.

[27] Jones D L, Darrah P R. Amino-acid influx at the soil-root interface of *Zea Mays* L. and its implications in the rhizosphere [J]. Plant Soil., 1994, 163: 1-12.