

于雪娇, 胡冰洁, 袁 宏, 等. 氨基酸增值尿素对水稻生长和根系分泌物的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(9): 1834-1842.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.09.005

氨基酸增值尿素对水稻生长和根系分泌物的影响

于雪娇, 胡冰洁, 袁 宏, 叶文玲, 张国漪

(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230001)

摘要: 水稻是中国最重要的粮食作物之一, 合理施用氮肥对提高水稻产量至关重要。本研究以氨基酸增值尿素为试验材料, 以水稻为研究对象, 分析氨基酸增值尿素对水稻生长、根际微生物和根系分泌有机酸的影响。结果表明, 与单施尿素处理相比, 施用氨基酸增值尿素处理能够促进水稻生长, 根体积和根尖数分别提高了 25.28% 和 16.94%。不同施肥处理下根际土壤优势菌群的相对丰度存在差异, 与单施尿素处理相比, 施用氨基酸增值尿素处理的 *Proteobacteria*、*Bacteroidetes*、*Firmicutes* 的相对丰度增加, *Acidobacteria* 的相对丰度下降, *Sphingomonas* 相对丰度增加。在优势菌群多样性方面, 氨基酸增值尿素处理的 Chao1 指数高于其他处理。与单施尿素处理相比, 施用氨基酸增值尿素处理的水稻根系分泌的有机酸中草酸、乙酸占比减少, 酒石酸占比增加。相关性分析发现, *Bacteroidetes*、*Firmicutes*、*Proteobacteria* 的相对丰度与丁二酸含量、酒石酸含量呈正相关。综上所述, 氨基酸增值尿素可以促进水稻生长, 根系有机酸分泌, 改变根际土壤菌群多样性。

关键词: 氨基酸增值尿素; 水稻; 微生物群落; 有机酸

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)09-1834-09

Effects of amino acid value-added urea on rice growth and root exudates

YU Xue-jiao, HU Bing-jie, YUAN Hong, YE Wen-ling, ZHANG Guo-yi

(College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230001, China)

Abstract: Rice is one of the most important food crops in China, and reasonable application of nitrogen fertilizer is very important to improve rice yield. In this study, amino acid value-added urea was used as the experimental material, and rice was taken as the research object to analyze the effects of amino acid value-added urea on rice growth, rhizosphere microorganisms and organic acid secretion in roots. Compared with single urea treatment, the application of amino acid value-added urea could promote the growth of rice, and the root volume and the number of root tips were increased by 25.28% and 16.94%, respectively. The relative abundance of dominant bacteria in rhizosphere soil was different under different fertilization treatments. Compared with urea treatment, the relative abundance of *Proteobacteria*, *Bacteroidetes* and *Firmicutes* increased, the relative abundance of *Acidobacteria* decreased, and the relative abundance of *Sphingomonas* increased in the treatment of amino acid value-added urea. In terms of the diversity of dominant bacteria, the Chao1 index of amino acid value-added urea treatment was higher than that of other treatments. Compared with single urea treatment, the proportion of oxalic acid and acetic acid in amino acid value-added urea treatment decreased, and the proportion of tartaric acid increased.

Correlation analysis results showed that the relative abundance of *Bacteroidetes*, *Firmicutes* and *Proteobacteria* was positively correlated with succinic acid content and tartaric acid content. In summary, amino acid value-added urea can promote rice growth, root organic acid secretion, and change the diversity of bacteria in rhizosphere soil.

收稿日期: 2023-02-12

基金项目: 安徽省教育厅科研项目 (KJ2021A0138)

作者简介: 于雪娇 (1998-), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事植物营养学研究。(E-mail) 2421564611@qq.com

通讯作者: 张国漪, (E-mail) 2012034@ahau.edu.cn

Key words: amino acid value-added urea; rice; microbial community; organic acids

水稻是重要的粮食作物,全球一半以上人口以稻米为主食^[1]。在水稻的种植过程中,尿素施用量较大,对环境造成了严重的影响。前人研究发现,以植物源(腐植酸、氨基酸、海藻提取物等)为增效载体,将尿素、复合肥等普通化学肥料进行改性增效而形成的增值肥料,在提高肥料利用率的同时,还能提升作物产量和品质^[2]。

工业生产氨基酸纯品时会产生大量的发酵尾液^[3],氨基酸发酵尾液中有蛋白质、菌体、氨基酸等营养物质,具有较高的回收利用价值。新型氨基酸增值尿素(Amino acid enhanced urea, AU)是在尿素熔融过程中加入氨基酸而创制的一种成本低、增效好的尿素产品。有研究结果表明,氨基酸肥料效果好、肥效快并且能够一定程度改善作物品质和生态环境^[4]。因此,通过氨基酸与氮肥复配研制增效氮肥,是减肥增效、提升氮素利用率的重要技术途径。

土壤微生物是土壤中的生命成分,其数量高低在一定程度上反映了土壤的肥力水平高低^[5]。根系分泌物是植物影响根际微生物环境的重要物质^[6],通过影响微生物生长、繁殖及群落种类,进而影响作物生长^[7]。

当前氨基酸肥料的应用主要有叶面喷施氨基酸肥料、化肥减氮配施氨基酸肥料等,对氨基酸肥料肥效的研究主要集中在研究植株生长以及作物的产量和品质等方面^[8-9],而关于氨基酸增值尿素对根系分泌物中有机酸的影响,以及有机酸的改变与根际微生物相互作用对土壤养分影响的研究较少。本研究拟以水稻为试验对象,通过盆栽试验探究氨基酸增值尿素对水稻土壤理化性质、根际微生物和根系分泌有机酸的影响,以及各指标间的相关性,分析施用氨基酸增值尿素带来的影响,以期在氨基酸增值尿素在农业生产中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试作物为水稻两优 8106。试验于安徽农业大学农萃园盆栽基地进行,供试土壤为安徽农业大学农萃园田间土壤耕层土,土壤有机质含量为 8.27 g/kg,全氮含量为 1.80 g/kg,碱解氮含量为 161.50 mg/kg,有效磷含量为 8.39 mg/kg,速效钾含量为

180.93 mg/kg,pH 值为 6.81。氨基酸增值剂由中国农业科学院资源与农业区划研究所提供,其中氨基酸含量约为 35%,成分以丝氨酸、谷氨酸、缬氨酸和甘氨酸为主。所有肥料作为基肥一次性施入土壤。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理:不施氮肥(CK)、施用氨基酸增值剂(AA)、施用尿素(U)、施用氨基酸增值尿素(AU)。试验用盆高 18.0 cm,直径 12.5 cm 的黑色小桶,每桶装 2 kg 土壤,施肥情况见表 1。每桶移栽 10 株水稻秧苗,分于 5 穴,每个处理重复 5 次。

水稻移栽后 60 d 进行整桶破坏性取样,10 株水稻全部取出。收集 2 份根际土壤,一份于 -80 ℃ 条件下冷冻保存在无菌离心管中,用于测序分析微生物群落,另一份晒干研磨后用于测定常规理化性质。

根系分泌物的收集:用蒸馏水和无菌水清洗水稻根部后,用无菌滤纸吸干水分放入离心管中,加入 50.0 ml 无菌水,用锡纸包裹离心管,将离心管放在培养室中连续收集根系分泌物 6 h 后,将收集到的根系分泌物过 0.45 μm 的滤膜,去除残根和杂质,装入 50.0 ml 离心管,冷冻干燥后将样品溶解于流动相中,再用 0.22 μm 的滤膜抽滤到 1.5 ml 进样小瓶,冷藏等待测定。将水稻根部冲洗后,测定植株地上部分鲜质量和根系鲜质量以及根系形态,以每株数值为计量单位。

表 1 不同处理的氮肥类型和施肥量

Table 1 Types and amounts of nitrogen fertilizer under different treatments

处理	氮肥类型	施肥量 (mg/kg)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	不施氮肥	0	150	150
AA	氨基酸增值剂	300	150	150
U	尿素	300	150	150
AU	氨基酸增值尿素	300	150	150

1.3 测定方法

土壤全氮含量用凯氏定氮法进行测定,铵态氮含量用氯化钾浸提靛酚蓝比色法进行测定,硝态氮含量用酚二磺酸比色法进行测定^[10]。用 WinRHIZO 根系扫描分析系统扫描测定根系形态。

有机酸含量采用超高效液相色谱 (HPLC) VAR-
IAN Prostar 和紫外检测器测定。液相色谱测定条件
为: Agilent588905-902 HC-C18 色谱柱、柱温 25 ℃、
流动相为 KH_2PO_4 和乙腈 (体积比为 99:1)、紫外波
长 210 nm、进样量 20 μl 。根据前期标准品的测定
结果,用保留时间判断有机酸的种类、用峰面积计算
有机酸的质量浓度。

土壤微生物 DNA 提取及测序委托北京百迈客
生物科技有限公司完成。

1.4 数据处理和分析

采用 Excel 2017、SPSS (24.0) 进行数据分析,利
用 Canoco 5、origin 2022 等软件绘图。

2 结果与分析

2.1 氨基酸增值尿素对水稻生长的影响

表 2 显示,与 CK 相比,施用氮肥处理的水稻株
高、根长、地上部鲜质量和地下部鲜质量均增加。不
同氮肥处理对水稻生长的影响存在差异,AA 处理
的地上部鲜质量显著低于 U 处理和 AU 处理;AU 处
理的水稻株高和根长均显著高于 U 处理和 AA 处
理;AU 处理的水稻地下部鲜质量显著高于 AA 处
理。上述研究结果表明,氨基酸增值尿素对水稻生
长具有一定促进作用。

表 2 氨基酸增值尿素对水稻生长的影响

Table 2 Effects of amino acid value-added urea on rice growth

处理	地上部鲜质量 (g, 1 株)	地下部鲜质量 (g, 1 株)	株高 (cm)	根长 (cm)
CK	5.53c	0.18b	33.78c	12.50c
AA	8.22b	0.22b	44.36bc	17.32b
U	12.99a	0.38ab	55.42b	20.36b
AU	13.30a	0.42a	60.78a	23.44a

CK、AA、U、AU 见表 1。同列数据后不同小写字母表示不同处理间
差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 氨基酸增值尿素对水稻根系的影响

表 3 显示,不同氮肥处理对水稻根系生长的影
响存在差异。AA 处理的水稻根直径显著小于 AU
处理;U 处理的水稻根投影面积最大。AU 处理和
U 处理的水稻根表面积、根体积、根尖数均显著高
于 AA 处理;AU 处理的水稻根体积、根尖数显著高
于 U 处理,分别增加 25.28% 和 16.94%。说明氨
基酸增值尿素对水稻根系生长发育具有促进作用。

表 3 氨基酸增值尿素对水稻根系的影响

Table 3 Effects of amino acid value-added urea on root of rice

处理	根直径 (mm)	根投影面积 (cm^2)	根表面积 (cm^2)	根体积 (cm^3)	根尖数
CK	0.65b	11.45b	6.92b	1.25d	2 523c
AA	0.72b	13.59a	6.43b	1.43c	2 582c
U	1.02ab	15.48a	7.86a	1.78b	3 736b
AU	1.23a	14.23a	8.23a	2.23a	4 369a

CK、AA、U、AU 见表 1。同列数据后不同小写字母表示不同处理间
差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 氨基酸增值尿素对水稻根际土壤养分的影响

表 4 显示,与 CK 相比,施用氮肥处理的水稻根
际土壤 pH 值均下降,表现为 $\text{U} < \text{AU} < \text{AA} < \text{CK}$ 。AU
处理和 U 处理的铵态氮含量均显著高于 AA 处理;
不同处理的水稻根际全氮含量存在差异,表现为
 $\text{CK} < \text{AA} < \text{U} < \text{AU}$,施肥处理提高了水稻根际土壤的全
氮含量。

表 4 氨基酸增值尿素对水稻根际土壤养分含量的影响

Table 4 Effects of amino acid value-added urea on nutrient content
in rice rhizosphere soil

处理	pH 值	硝态氮含量 (mg/kg)	铵态氮含量 (mg/kg)	全氮含量 (g/kg)
CK	6.75a	3.53c	15.47c	0.52c
AA	6.42ab	4.02b	16.18b	0.85b
U	6.24b	4.31a	25.85a	0.89ab
AU	6.37b	4.17ab	26.91a	0.98a

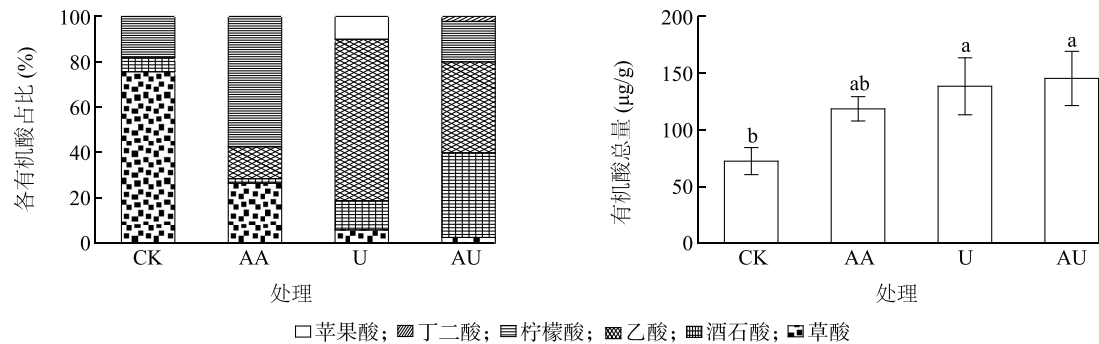
CK、AA、U、AU 见表 1。同列数据后不同小写字母表示不同处理间
差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 氨基酸增值尿素对水稻根系分泌有机酸的影响

图 1 显示,CK 中水稻根系分泌的有机酸主要
为草酸、柠檬酸和酒石酸,占比分别为 75.58%、
18.25% 和 6.17%,有机酸总量为 72.38 $\mu\text{g/g}$; AA
处理中水稻根系分泌的有机酸主要为草酸、柠檬
酸、乙酸和酒石酸,占比分别为 26.47%、57.51%、
14.01% 和 2.01%,有机酸总量为 118.48 $\mu\text{g/g}$; U
处理中水稻根系分泌的有机酸主要为草酸、酒石
酸、乙酸和苹果酸,占比分别为 5.83%、12.84%、
71.22% 和 10.11%,有机酸总量为 138.38 $\mu\text{g/g}$;
AU 处理中水稻根系分泌的有机酸主要为草酸、酒
石酸、乙酸、柠檬酸和丁二酸,占比分别为 2.54%、
37.29%、40.15%、17.81% 和 2.21%,有机酸总量
为 145.34 $\mu\text{g/g}$ 。

施肥可以提高根系分泌的有机酸总量,且 AU 处理的有机酸总量最高。CK 和 AA 处理中草酸占比较高,U 处理和 AU 处理中草酸占比较低,乙酸占

比较高。与 U 处理相比,AU 处理的草酸和乙酸占比减少,酒石酸占比增加,分泌的有机酸种类增加。



CK、AA、U、AU 见表 1。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
图 1 不同施肥处理对水稻根系分泌有机酸的影响
Fig.1 Effects of different fertilization treatments on organic acid secretion of rice root

2.5 水稻根系分泌的有机酸和根际土壤环境因子的冗余分析

对有机酸和土壤环境因子进行冗余分析 (RDA),结果(图 2)表明,排序轴 1(41.67%)和排序轴 2(25.02%)累计解释有机酸组分变异的 66.69%。铵态氮含量和 pH 值对有机酸组分影响最大, P 值分别为 0.002 和 0.006;草酸含量与土壤 pH 值呈正相关,但草酸含量和土壤全氮含量、铵态氮含量、硝态氮含量呈负相关;酒石酸含量、丁二酸含量与铵态氮含量、全氮含量、硝态氮含量呈正相关,与 pH 值呈负相关;乙酸含量、苹果酸含量与 pH 值亦呈负相关。

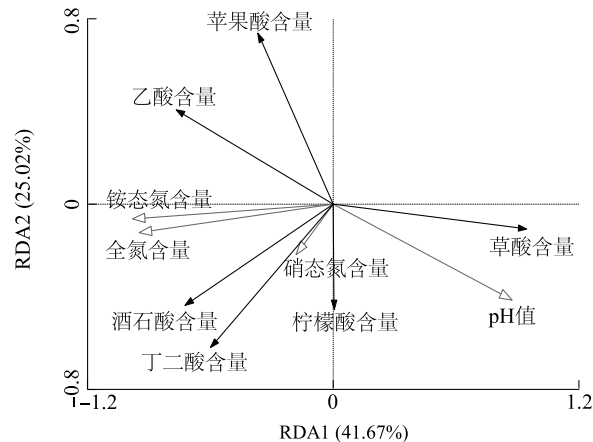


图 2 水稻根系分泌的有机酸组分和土壤环境因子的冗余分析
Fig.2 Redundancy analysis of organic acid components secreted by rice roots and soil environmental factors

2.6 氨基酸增值尿素对水稻根际土壤菌群多样性的影响

对不同处理下的水稻根际土壤菌群多样性进行研究,使用 QIIME 软件对物种多样性进行分析,包括 Chao1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数。结果(表 5)表明,土壤菌群的操作分类单元 (Operational taxonomic unit, OTU) 数量为 1 432~1 524, AU 处理和 U 处理的 OTU 数量显著高于 AA 处理。AU 处理的 Chao1 指数显著高于 U 处理和 AA 处理,表明 AU 处理的群落组成比 U 处理和 AA 处理丰富,AU 处理的群落多样性有一定提高。

表 5 土壤菌群的 α 多样性分析

Table 5 The α diversity analysis of soil microbiota					
处理	OTU 数量	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度 (%)
CK	1 437b	1 346c	5.10b	0.018a	97a
AA	1 432b	1 503b	5.41ab	0.024a	96a
U	1 524a	1 513b	5.49a	0.022a	97a
AU	1 506a	1 587a	5.59a	0.019a	97a

CK、AA、U、AU 见表 1。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。OTU:土壤菌群的操作分类单元。

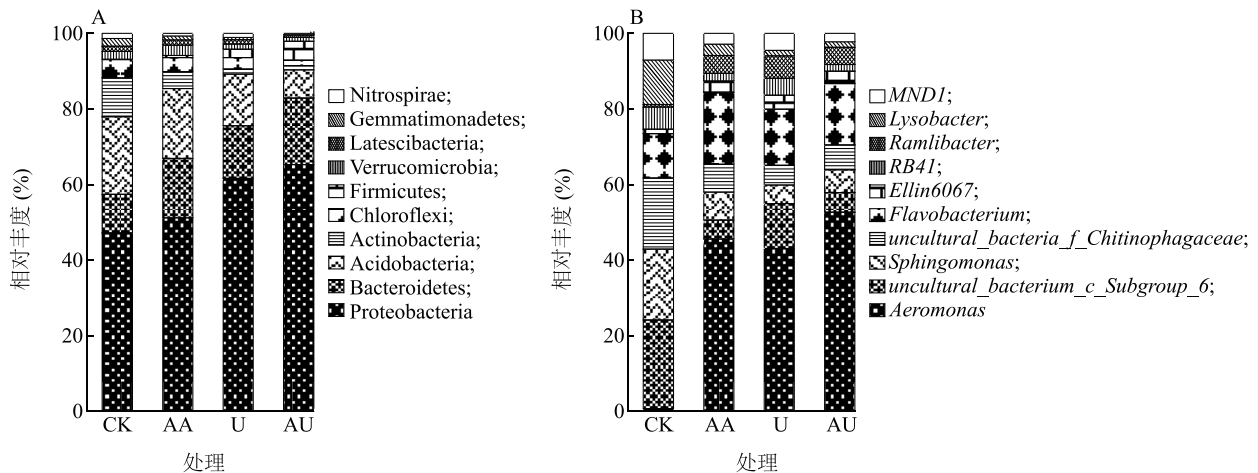
2.7 氨基酸增值尿素对水稻根际土壤菌群组成的影响

通过高通量 Illumina Miseq 技术对水稻根际土壤样品的测序结果进行分析,图 3A 显示,在门水平上,水稻根际土壤样品中相对丰度大于 1%

的前 10 个优势菌群有 Nitrospirae、Gemmatimonadetes、Latescibacteria、Verrucomicrobia、Firmicutes、Chloroflexi、Actinobacteria、Acidobacteria、Bacteroidetes、Proteobacteria, 其中相对丰度最高的是 Proteobacteria、Bacteroidetes、Acidobacteria。在门水平上, 各处理优势菌群种类无明显变化, 但菌群的相对丰度存在差异。另外, 不同施肥处理没有改变水稻根际土壤中的前 3 个优势菌群。与 U、AA 处理相比, AU 处理下 Proteobacteria、Bacteroidetes、Firmicutes 的相对丰度增加, Acidobacteria 的相对丰度下降。

图 3B 显示, 在属水平上, 水稻根际土壤样品中相对丰度较高的前 10 个优势菌群为 *MND1*、*Ly-*

sobacter、*Ramlibacter*、*RB41*、*Ellin6067*、*uncultural_bacteria_f_Chitinophagaceae*、*Sphingomonas*、*Aeromonas*、*Flavobacterium*、*uncultural_bacterium_c_Subgroup_6*。施肥处理中, 相对丰度最高的前两个优势菌群为 *Aeromonas* 和 *Flavobacterium*。不同施肥处理间优势菌群种类无明显变化, 但相对丰度存在差异。与 CK 相比, 施肥处理下 *Aeromonas* 的相对丰度明显增加, *uncultural_bacterium_c_Subgroup_6* 和 *Sphingomonas* 的相对丰度明显下降。与 U、AA 处理相比, AU 处理的 *Aeromonas* 的相对丰度增加。与 U 处理相比, AU 处理的 *Sphingomonas* 和 *Flavobacterium* 的相对丰度增加。



CK、AA、U、AU 见表 1。

图 3 不同施肥处理下水稻根际土壤中细菌门和属分类水平群落组成

Fig.3 The community composition of soil bacteria at phylum and genus levels under different fertilization treatments

2.8 水稻根系分泌的有机酸与根际土壤微生物群落组成的相关性

对根系分泌的有机酸与根际土壤门水平前 10 种优势菌群的相关性进行分析, 结果(图 4)表明, 除了 Bacteroidetes、Firmicutes 和 Proteobacteria 外, 草酸含量与其他菌群相对丰度均有较高的相关性。Bacteroidetes 相对丰度与丁二酸含量呈正相关, Firmicutes 相对丰度与酒石酸含量呈正相关。

2.9 水稻根系分泌的有机酸、根际土壤环境因子、根际土壤微生物群落三者间的相关性

图 5 显示, pH 值与草酸含量、多数菌群相对丰度呈正相关, 表明多种优势菌群受土壤酸碱度影响; 丁二酸含量、酒石酸含量与全氮含量、铵态氮

含量、硝态氮含量以及 Bacteroidetes 相对丰度、Firmicutes 相对丰度、Proteobacteria 相对丰度之间呈正相关关系。

3 讨论

3.1 氨基酸增值尿素对水稻生长和根际土壤养分的影响

本研究结果表明, 氨基酸增值尿素可以促进作物生长, 这一结果与前人的研究结果^[11]一致。与单施尿素相比, 施用氨基酸增值尿素可以显著提高水稻的株高、根长、根体积、根尖数。施用氨基酸增值尿素对作物生长具有一定的促进作用, 可能是因为氨基酸能够提高土壤中部分酶的活性, 从而促进植

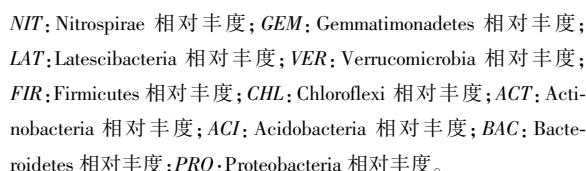


Fig.4 Redundancy analysis of organic acids secreted by rice roots and microbial communities in rhizosphere soil

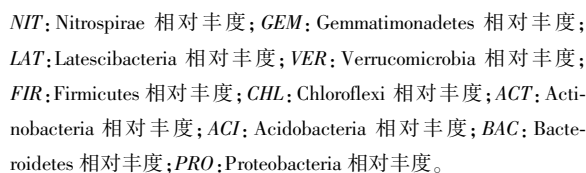


Fig.5 Redundancy analysis of organic acids secreted by rice roots, rhizosphere soil environmental factors and rhizosphere soil microbial communities

在本研究中,施用氨基酸增值尿素处理的水稻根际土壤硝态氮含量、铵态氮含量和全氮含量与单施尿素处理差异不显著。巨晓棠等^[15]研究发现,氨基酸和尿素熔融复合后,有利于土壤对铵态氮和全氮的保蓄,使尿素态氮含量在土壤中保持稳定。

3.2 氨基酸增值尿素对水稻根际土壤微生物的影响

本研究结果表明,不同施肥处理对于水稻根际土壤微生物群落结构具有一定的影响,氨基酸增值尿素处理下微生物群落的丰富度和物种多样性均高于尿素处理。通过对根际土壤微生物进行分析发现,施用氨基酸增值尿素明显影响水稻根际菌群结构,这与前人研究结果^[16]一致。在门、属 2 个水平上,比较不同施肥处理下水稻根际土壤菌群组成,发现部分优势菌群的相对丰度发生明显变化。在门水平上,前人研究发现,Proteobacteria 和 Acidobacteria 是水稻根际土壤中的优势菌群^[17]。其中,Proteobacteria 属于富营养型细菌,Acidobacteria 属于寡营养型细菌^[18]。土壤养分是影响菌群分布的主要因素之一,当土壤养分升高时,富营养型细菌丰度会随之升高,而寡营养型细菌丰度会随之下降^[19]。植物根际土壤中 Bacteroidetes 的相对丰度越高,植物对逆境的抗性越强^[20]。在本研究中,Acidobacteria、Bacteroidetes 和 Proteobacteria 在各处理中都占有较高的相对丰度,与单施尿素处理相比,施用氨基酸增值尿素处理的 Bacteroidetes、Proteobacteria 相对丰度明显增加,Acidobacteria 相对丰度明显下降,表明施用氨基酸增值尿素可以使土壤养分含量提高,并且能够增强水稻的抗逆性。

在属水平上进行分析,发现与单施尿素处理相比,施用氨基酸增值尿素处理的 *Sphingomonas*、*Flavobacterium* 相对丰度增加。*Sphingomonas* 是一种潜在的有益细菌属,可以缓解疾病症状、抑制病原体生长,也可以促进植株的生长和 N、Ca、Zn、S 等养分的吸收^[21]。*Flavobacterium* 可以溶解土壤中的磷,从而增加植物对磷素的吸收^[22]。

物生长^[12]。有研究结果表明,施用氨基酸增值尿素

Sphingomonas、*Flavobacterium* 均对作物有益。因此, *Sphingomonas* 和 *Flavobacterium* 相对丰度的增加, 对植物生长起到一定的促进作用。

3.3 水稻根系分泌的有机酸对根际土壤养分及根际土壤微生物的影响

根系分泌物作为重要的媒介, 在根系-土壤-微生物之间具有传递营养的重要功能^[23]。根系的增加会对分泌物产生影响, 特别是分泌物中的有机酸。在本研究中, 与不施氮肥对照相比, 施肥处理提高了有机酸分泌的总量, 其中氨基酸增值尿素处理下有机酸分泌总量最高, 说明氨基酸增值剂的加入提高了水稻根系分泌有机酸的含量。在本研究中, 不同施肥处理的有机酸组成有所改变, 与单施尿素处理相比, 氨基酸增值尿素处理的酒石酸、丁二酸和柠檬酸的占比增加。前人研究结果表明, 酒石酸的分泌有利于提高氮素利用率, 从而使水稻产量增加^[24]。丁二酸分泌量的增加, 能够增加水稻籽粒中镁、钾等元素含量, 降低锌、铅等元素毒性^[25]。柠檬酸的分泌有利于促进土壤镉转化为可利用形式, 提高了作物对镉的吸收和富集^[26]。

对水稻根系分泌的有机酸和根际土壤环境因子进行冗余分析发现, 二者存在一定相关性。有研究结果表明, 根系分泌的有机酸能够改善土壤结构, 促进土壤中养分溶解, 从而提高作物对养分的吸收, 最终促进作物生长^[27]。在本研究中, 全氮含量、铵态氮含量、硝态氮含量与酒石酸含量、丁二酸含量呈正相关, 硝态氮含量、pH 值与柠檬酸含量呈正相关。酒石酸含量增加与氮供应量增加具有一致性^[28], 说明酒石酸含量与全氮含量、铵态氮含量、硝态氮含量均呈正相关。丁二酸是影响微生物氮循环和硝化作用的重要因素^[29], 因此, 丁二酸含量与氮含量具有相关性。

对水稻根系分泌的有机酸组分与根际土壤微生物群落进行冗余分析发现, 水稻根际微生物群落与根系分泌的有机酸具有相关性。前人研究结果表明, 根系分泌物改变会影响根际微生物群落组成和比例^[30]。本研究发现, 草酸含量与多数菌群相对丰度呈正相关; *Bacteroidetes*、*Firmicutes*、*Proteobacteria* 的相对丰度与丁二酸含量、酒石酸含量呈正相关, 与前人研究结果^[31]一致。有益细菌增多能够提升养分的可用性, 刺激植物生长发育^[32]。因此, *Bacteroidetes*、*Firmicutes*、*Proteobacteria* 等有益细菌相对

丰度的增加有利于根系分泌更多的有机酸, 当有机酸含量增多时, 有利于根际养分的释放, 从而促进作物的生长。

根系分泌的有机酸组分、根际土壤微生物群落及根际土壤环境因子三者间的冗余分析结果表明, 土壤 pH 值与草酸含量、多数菌群的相对丰度存在正相关关系; 酒石酸含量、丁二酸含量与全氮含量、铵态氮含量以及 *Proteobacteria*、*Bacteroidetes* 的相对丰度呈正相关。有研究结果表明, 根系分泌的有机酸与土壤养分之间存在密切关系, 因此根系分泌的有机酸能够对水稻生长起到一定促进作用^[33], 同时有机酸也是许多微生物的营养来源^[34], 且根系分泌的有机酸有助于根际养分的释放, 影响土壤微生物组成^[35]。土壤中草酸含量会影响 pH 值和菌群的重组^[36], 从而影响微生物群落的丰富度和多样性^[37]。酒石酸和丁二酸在提高土壤养分利用率和作物生产力方面发挥着重要作用^[38]。

4 结 论

与单施尿素相比, 施用氨基酸增值尿素可以促进水稻幼苗生长、水稻根系生长以及根系形态建成。与不施氮肥对照相比, 施用氨基酸增值尿素降低了根际土壤 pH 值, 土壤生态环境得到改善, 对微生物的生长有益。与单施尿素处理相比, 施用氨基酸增值尿素处理提高了微生物群落的丰富度, 改变了土壤中部分优势菌群的相对丰度, 影响了根系分泌有机酸的种类以及含量。因此, 氨基酸增值尿素是一种良好的、可以替代部分尿素的氮素肥料。

参考文献:

- [1] CHEN Y Y, FAN P S, MO Z W, et al. Deep placement of nitrogen fertilizer affects grain yield, nitrogen recovery efficiency, and root characteristics in direct-seeded rice in South China[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, 40(1): 379-387.
- [2] 赵秉强. 增值肥料概论[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.
- [3] 张 健, 李燕婷, 袁 亮, 等. 氨基酸发酵尾液可促进樱桃番茄对水溶肥料氮素的吸收利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 114-121.
- [4] SOURI M K, HATAMIAN M. Aminocheates in plant nutrition: a review[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42(1): 67-78.

- [5] 程林,章力干,张国漪,等. 氨基酸增值尿素对水稻苗期生长及根际微生物菌群的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(1):35-44.
- [6] DESSAUX Y, GRANDCLÉMENT C, FAURE D. Engineering the rhizosphere[J]. Trends in Plant Science,2016,21(3):266-278.
- [7] JIN J, WANG M, LU W, et al. Effect of plants and their root exudate on bacterial activities during rhizobacterium-plant remediation of phenol from water[J]. Environment International,2019,127:114-124.
- [8] 王俊鹏,李飞,唐玉海,等. 氨基酸肥料对设施砂培番茄生长的影响[J]. 磷肥与复肥,2022,37(9):46-49.
- [9] 梁道满. 氨基酸水溶肥料在玉米上应用效果[J]. 现代化农业,2022(6):14-16.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [11] 许猛,袁亮,李伟,等. 复合氨基酸肥料增效剂对 NaCl 胁迫下小白菜种子萌发和苗期生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(4):992-1000.
- [12] LIU Q, MENG X, LI T, et al. The growth promotion of peppers (*Capsicum annuum* L.) by *Trichoderma guizhouense* NJAU4742-based biological organic fertilizer: possible role of increasing nutrient availabilities[J]. Microorganisms,2020,8(9):1296.
- [13] CARLOS F S, KUNDE R J, DE SOUSA R O, et al. Urease inhibitor reduces ammonia volatilization and increases rice grain yield under irrigation delay[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2022,122(3):313-324.
- [14] 朱荣,柳丽丽,齐永波,等. 稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应[J]. 农业环境科学学报,2021,40(9):1935-1943.
- [15] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用[J]. 中国农业大学学报,2002,7(3):52-56.
- [16] FENG Z, WU P, XIE X, et al. Feather-based compost drastically regulates soil microbial community and lettuce growth in a subtropical soil: the possible role of amino acids[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2021,21(1):709-721.
- [17] ZHU J, PENG H, JI X H, et al. Effects of reduced inorganic fertilization and rice straw recovery on soil enzyme activities and bacterial community in double-rice paddy soils[J]. European Journal of Soil Biology,2019,94:103116.
- [18] KARIMI B, TERRAT S, DEQUIEDT S, et al. Biogeography of soil bacteria and archaea across France[J]. Science Advances,2018,4(7):1808.
- [19] LEFF J W, JONES S E, PROBER S M, et al. Consistent responses of soil microbial communities to elevated nutrient inputs in grasslands across the globe[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(35):10967-10972.
- [20] MIKULA K, KONIECZKA M, TAF R, et al. Tannery waste as a renewable source of nitrogen for production of multicomponent fertilizers with biostimulating properties[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(4):8759-8777.
- [21] ZHIMO V Y, KUMAR A, BIASI A, et al. Compositional shifts in the strawberry fruit microbiome in response to near-harvest application of *Metschnikowia fructicola*, a yeast biocontrol agent[J]. Post-harvest Biology and Technology,2021,175:111469.
- [22] KUZMINA L Y, GILVANOVA E A, GALIMZYANOVA N F, et al. Characterization of the novel plant growth-stimulating strain *Advenella kashmirensis* IB-K1 and evaluation of its efficiency in saline soil[J]. Microbiology,2022,91(2):173-183.
- [23] 毛梦雪,朱峰. 根系分泌物介导植物抗逆性研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(10):1649-1657.
- [24] 徐国伟,陆大克,王贺正,等. 施氮和干湿灌溉对水稻抽穗期根系分泌有机酸的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(4):516-525.
- [25] BAKHSHANDEH E, PIRDASHTI H, LENDEH K S. Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice[J]. Ecological Engineering,2017,103:164-169.
- [26] QIN L, LI Z, LI B, et al. Organic acid excretion in root exudates as a mechanism of cadmium uptake in a *Sonchus asper-Zea mays* intercropping system[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2021,107:1059-1064.
- [27] TIZIANI R, MIRAS-MORENO B, MALACRINÒ A, et al. Drought, heat, and their combination impact the root exudation patterns and rhizosphere microbiome in maize roots[J]. Environmental and Experimental Botany,2022,203:105071.
- [28] HE H, WU M, GUO L, et al. Release of tartrate as a major carboxylate by alfalfa (*Medicago sativa* L.) under phosphorus deficiency and the effect of soil nitrogen supply[J]. Plant and Soil,2020,449(1/2):169-178.
- [29] LI Y, LI Y, YANG M, et al. Changes of microbial functional capacities in the rhizosphere contribute to aluminum tolerance by genotype-specific soybeans in acid soils[J]. Biology and Fertility of Soils,2020,56(6):771-783.
- [30] TIAN B, PEI Y, HUANG W, et al. Increasing flavonoid concentrations in root exudates enhance associations between arbuscular mycorrhizal fungi and an invasive plant[J]. ISME Journal,2021,15(7):1919-1930.
- [31] GLICK B R, GAMALARO E. Recent developments in the study of plant microbiomes[J]. Microorganisms,2021,9(7):1533.
- [32] KOUR D, RANA K L, YADAV A N, et al. Microbial biofertilizers: bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology,2020,23:101487.
- [33] CHIANESE S, FENTI A, IOVINO P, et al. Sorption of organic pollutants by humic acids: a review[J]. Molecules,2020,25(4):918.

- [34] KAWASAKI A, OKADA S, ZHANG C, et al. A sterile hydroponic system for characterising root exudates from specific root types and whole-root systems of large crop plants[J]. *Plant Methods*, 2018, 14: 114.
- [35] MAZZOLI R. Current progress in production of building-block organic acids by consolidated bioprocessing of lignocellulose[J]. *Fermentation*, 2021, 7(4): 248.
- [36] CHEN D, WANG X, ZHANG W, et al. Persistent organic fertilization reinforces soil-borne disease suppressiveness of rhizosphere bacterial community[J]. *Plant and Soil*, 2020, 452(1/2): 313-328.
- [37] LEBRUN M, MIARD F, BUCCI A, et al. The rhizosphere of *Salix viminalis* plants after a phytostabilization process assisted by bio-char, compost, and iron grit: chemical and (micro)-biological analyses[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(34): 47447-47462.
- [38] SINDHU S S, SEHRAWAT A, GLICK B R. The involvement of organic acids in soil fertility, plant health and environment sustainability[J]. *Archives of Microbiology*, 2022, 204(12): 720.

(责任编辑:王 妮)