

翻压紫云英水稻土游离氨基酸动态及剖面分异

杨静, 鲍清涛, 邢世和, 周碧青, 张黎明, 杨文浩

引用本文:

杨静, 鲍清涛, 邢世和, 周碧青, 张黎明, 杨文浩. 翻压紫云英水稻土游离氨基酸动态及剖面分异[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 373-383.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0550>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期施肥对稻田土壤可溶性有机氮和游离氨基酸剖面分异的影响

雷秀美, 王飞, 周碧青, 杨文浩, 聂三安, 邢世和

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1550-1559 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1267>

翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥对水稻Cu吸收转运的影响

喻成龙, 汤建, 喻惟, 倪国荣, 谢志坚, 康丽春, 荣勤雷, 周春火

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2095-2102 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0549>

绿肥配施减量化肥对土壤固氮菌群落的影响

方宇, 王飞, 贾宪波, 林陈强, 张慧, 陈龙军, 陈济琛

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1933-1941 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0509>

延长烤田时间减少紫云英翻压稻田甲烷排放

王赢, 林余涛, 杨文斌, 王家嘉, 左双宝, 宋朝辉, 周楠楠

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1836-1845 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1448>

紫云英翻压条件下生物炭基肥配施量对水稻Cd迁移累积的影响

喻成龙, 汤建, 郑琴, 倪国荣, 谢志坚, 荣勤雷, 郭乃嘉, 王惠明, 周春火

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2554-2560 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0759>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨静, 鲍清涛, 邢世和, 等. 翻压紫云英水稻土游离氨基酸动态及剖面分异[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 373-383.

YANG J, BAO Q T, XING S H, et al. Dynamic and profile variations of free amino acids in paddy soil applied with Chinese milk vetch[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(2): 373-383.



开放科学 OSID

翻压紫云英水稻土游离氨基酸动态及剖面分异

杨静¹, 鲍清涛¹, 邢世和^{1,2}, 周碧青^{1,2}, 张黎明^{1,2}, 杨文浩^{1,2*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福州 350002)

摘要:为探讨紫云英翻压后稻田土壤游离氨基酸(FAA)含量和组分的动态变化及其主控因素, 阐明稻田土壤FAA的剖面迁移特性, 本研究在等氮磷钾的条件下, 以单施化肥(CK)为对照, 研究了不同施用量紫云英(30 000 kg·hm⁻², CMV1; 45 000 kg·hm⁻², CMV2)翻压后对稻田土壤FAA含量和组成的影响以及其随生育期的波动情况, 并阐明FAA在水稻土剖面中的分布特征。结果表明: 紫云英翻压后, 不同处理稻田土壤FAA含量均呈现出先降低后上升至扬花期达到峰值后再缓慢降低的变化趋势。翻压紫云英可提高土壤FAA含量, CMV1处理和CMV2处理FAA含量均值分别较CK处理显著提高了14.01%和21.75%。不同采样期、不同施肥处理稻田土壤FAA以中性氨基酸含量最高(93.39%~97.52%), 酸性氨基酸次之(2.19%~5.86%), 碱性氨基酸含量最低(0~1.47%), 且均以肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸为主, 其合计占FAA总量的65.93%~82.65%。紫云英翻压后FAA具有向下迁移的趋势, 主要迁移至20~40 cm土层。中性氨基酸尤其是丝氨酸、甘氨酸和苏氨酸具有较强的迁移性。氨基酸不同组分对土壤性质的响应具有一定差异, 中性FAA与土壤pH、有机质、全氮、蛋白酶和细菌拷贝数显著相关, 碱性FAA与蛋白酶和细菌拷贝数显著相关, 而酸性FAA仅与细菌拷贝数显著相关。研究表明, 稻田土壤FAA含量、组成及迁移与紫云英翻压量和水稻生育期密切相关, 且对土壤性质的响应有所不同。

关键词:紫云英; 土壤; 水稻; 游离氨基酸; 组分; 剖面分布; 影响因素

中图分类号: S142 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)02-0373-11 doi:10.11654/jaes.2022-0550

Dynamic and profile variations of free amino acids in paddy soil applied with Chinese milk vetch

YANG Jing¹, BAO Qingtao¹, XING Shihe^{1,2}, ZHOU Biqing^{1,2}, ZHANG Liming^{1,2}, YANG Wenhao^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Ecosystem Health and Regulation, Fuzhou 350002, China)

Abstract: This study was conducted to investigate the dynamics of free amino acid (FAA) contents and components in paddy soil and their influencing factors, and to clarify the characteristics of FAA profile migration in paddy soil. In this study, a single application of chemical fertilizer (CK) was used as control under equal nitrogen, phosphorus, and potassium conditions, and different application rates of Chinese milk vetch [30 000 kg·hm⁻² (CMV1) and 45 000 kg·hm⁻² (CMV2)] were selected to investigate the dynamic and profile distribution characteristics of FAA content and composition in paddy soil. The FAA content in paddy soil decreased from the background to the seedling stage after CMV application and then increase rapidly to a peak at the blooming stage and then decreased slowly. The FAA contents in CMV1 and CMV2 treatments were significantly increased by 14.01% and 21.75% compared with CK treatment, respectively. The FAA content of neutral amino acids was the highest (93.39%~97.52%), followed by acid (2.19%~5.86%) and alkaline amino acids (0~1.47%) under different fertilization treatments during the sampling period, and the content of sarcosine, glycine, alanine, valine, isoleucine,

收稿日期: 2022-05-03 录用日期: 2022-08-16

作者简介: 杨静(1992—), 女, 福建南平人, 博士研究生, 主要从事可溶性有机氮与环境生态研究。E-mail: yangjing_0305@163.com

*通信作者: 杨文浩 E-mail: a199905@163.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671490); 福建农林大学优秀博士学位论文资助项目(324-1122yb080)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671490); The Scientific Research Foundation of the Graduate School of Fujian Agriculture and Forestry University(324-1122yb080)

leucine and phenylalanine was most abundant, accounting for 65.93%–82.65% of the FAA pool. FAA had a downward migration trend, mainly to 20–40 cm, and the mobility of serine, glycine, and threonine was high. The neutral FAA was significantly correlated with pH, organic matter, total nitrogen, protease, and bacterial copy number; alkaline FAA was significantly correlated with protease and bacterial copy number; and acidic FAA was only significantly correlated with bacterial copy number. Conclusively, FAA content, composition and migration in paddy soil were closely related to CMV application rate and rice growth period, and its responses to soil properties varied.

Keywords: Chinese milk vetch; soil; rice; free amino acid; composition; profile distribution; influencing factor

土壤游离氨基酸(Free amino acids, FAA)主要来源于土壤有机质的降解、土壤微生物的代谢活动以及植物根系的分泌等,其在土壤溶液和孔隙中以游离形式存在^[1]。FAA在土壤中周转速率快,一方面可作为营养物质被土壤微生物和植物吸收^[2],另一方面FAA的移动性强,易在土壤中迁移和损失^[3]。可见,土壤中FAA含量对植物氮素吸收和土壤氮循环至关重要,但不同利用类型土壤的FAA含量差异较大。国内外研究表明,林地、草地、菜地和蔗园土壤溶液中游离氨基酸浓度介于3.60~58.16、5.19~43.91、12.87~48.93 mg·kg⁻¹和0.22~2.42 mg·kg⁻¹。然而,目前的研究大多集中在旱地土壤中FAA的含量,而对长期淹水、人为干扰严重的水稻土中FAA含量和组分的动态研究较为有限。

肥料是农田生态系统有效氮的重要来源,不同的施肥方式对土壤氨基酸的贡献有所差异。研究表明尿素的添加会引起土壤微生物群落结构发生变化,并导致微生物细胞裂解后土壤释放氨基酸^[6],连续施用氮磷钾肥对土壤FAA含量的影响在不同的土壤上获得的结果各异,施氮磷钾肥能提高棕壤FAA的含量,却降低草甸土FAA的含量^[8]。施用有机物料能够增加FAA含量,施用厩肥和高量秸秆处理比不施肥处理的FAA含量分别增加205.1%和201.9%^[9]。麸酸有机复混肥和堆肥的施用使土壤FAA含量明显高于不

施肥和单施化肥,且差异达显著水平^[10-11]。可见,不同类型肥料成分及理化性质差异显著,因此,对FAA的影响也各异。紫云英是我国南方常见的豆科绿肥作物,施用于土壤可补充土壤有效氮,减少化肥用量^[12]。然而,目前关于紫云英翻压对土壤的影响研究主要集中于土壤肥力、土壤微生物和酶活性等方面^[13-14],而对紫云英翻压后稻田土壤FAA含量和组分变化规律的研究较为缺乏,其在稻田剖面中的分布和迁移特性尚不清楚。因此,本研究以亚热带地区常见的灰泥田为研究对象,根据等量氮磷钾投入的原则,设置田间定位试验,以单施化肥为对照,研究紫云英翻压后稻田土壤FAA含量和组分的动态变化及其主控因素,并阐明FAA在水稻土剖面中的分布特征,旨在为以后开展水稻土FAA在氮素循环中的作用及南方稻田合理翻压紫云英提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于福建省闽侯县白沙镇溪头村(119°04′10″E, 26°13′31″N),该地属于亚热带季风气候,年日照时长为1 813 h,年平均气温为19.5℃,年平均降水量为1 350 mm。水稻生育期内研究区的日均温与降水量如图1所示。供试土壤类型为灰泥田,土壤质地为黏土。试验田耕层土壤pH为5.60,有机质、全

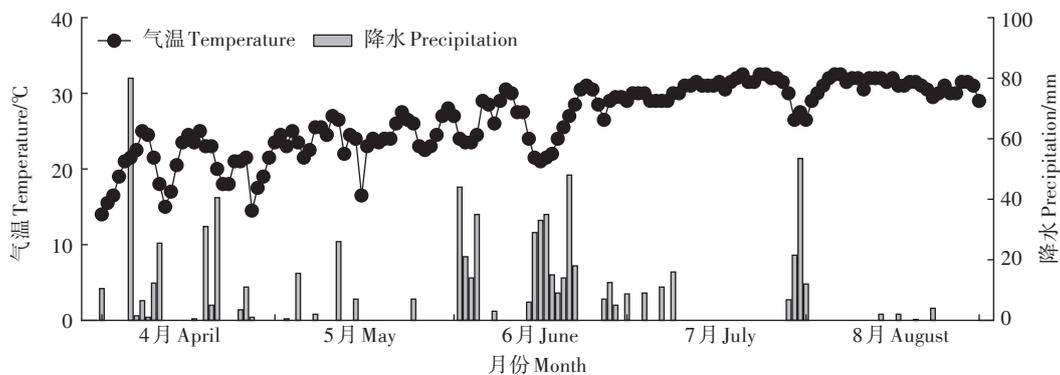


图1 水稻生育期内日均温和降水的动态变化

Figure 1 Dynamic changes of daily average temperature and precipitation in the experimental area during the rice growing period

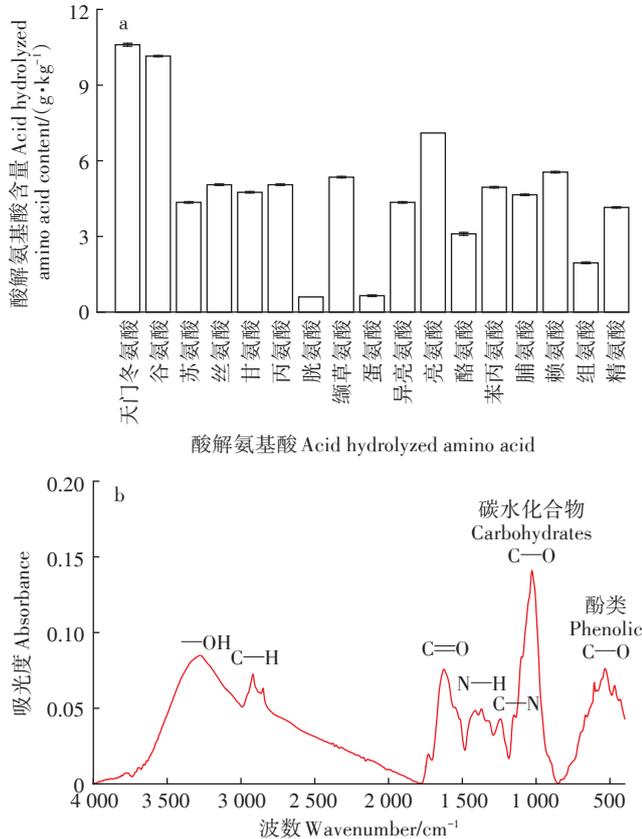


图2 紫云英酸解氨基酸含量和傅里叶红外光谱图

Figure 2 Acid hydrolysable amino acids and fourier infrared spectra of Chinese milk vetch

氮、有效磷和速效钾含量分别为20.45 g·kg⁻¹、1.04 g·kg⁻¹、5.19 mg·kg⁻¹和31.07 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验在等氮磷钾条件下设置3个不同处理:单施化肥(CK)、低量紫云英(鲜草施用量30 000 kg·hm⁻², CMV1)和高量紫云英(施用量45 000 kg·hm⁻², CMV2),每个处理3次重复。试验小区采用随机区组排列,小区面积为12 m²(3 m×4 m),在各小区间田埂处铺设薄膜以防窜渗。试验中施用的化肥分别为尿素481.7 kg·hm⁻²、过磷酸钙900 kg·hm⁻²和氯化钾300 kg·hm⁻²,尿素和氯化钾的50%用作基肥施用(紫云英翻压后第9天),50%作分蘖肥施用(紫云英翻压后第25天),过磷酸钙均作基肥施用。供试紫云英品种为“闽紫七号”,于2018年10月20日种植,2019年4月6日紫云英盛花期收获后进行异地鲜草翻压回田。紫云英鲜草含水量为900 g·kg⁻¹,干基养分中有机质、全氮、全磷、全钾、蛋白质和酸解氨基酸的含量分别为752.8、30.94、5.91、32.47、193.4 g·kg⁻¹和82.35 g·kg⁻¹,酸解氨基酸组分和傅里叶红外光谱如图2所示。施

表1 不同处理氮磷钾年施用量

Table 1 Annual N, P and K application amount in different treatments

处理 Treatment	肥料种类 Fertilizer type	施用量 Application amount/(kg·hm ⁻²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	化肥	225.02	108.00	180.00
CMV1	化肥	132.20	90.27	82.59
	紫云英	92.82	17.73	97.41
CMV2	化肥	85.79	81.40	33.88
	紫云英	139.23	26.60	146.12

用紫云英处理中氮磷钾不足的部分在施用基肥时用化肥补齐,各处理氮磷钾具体施用量见表1。试验区采用单季稻种植,于2019年4月16日(紫云英翻压后10 d)种植,水稻品种与农事管理措施均与当地保持一致。

1.3 样品采集与处理

根据水稻生育期和紫云英腐解规律,在紫云英翻压后第0(本底土壤)、10(插秧期)、17(幼苗期)、38(分蘖期)、80(扬花期)、122天(成熟期)分别采用五点取样法采集各处理小区0~20、20~40 cm和40~60 cm土层混合样品,土壤样品采集后装入自封袋中带回实验室。将采集的土壤样品去除植物残体、根系和侵入体后用于土壤FAA的测定。

1.4 测定方法

采用土壤常规农化分析方法测定土壤化学性质^[15]。土壤脲酶和蛋白酶活性分别采用靛酚蓝比色法与福林酚比色法测定^[16]。土壤细菌数量采用荧光定量PCR分析方法测定^[17]。土壤FAA含量和组分均采用70℃热水浸提-氨基酸自动分析仪(英国, Biochrom)测定:称取6 g新鲜土样于50 mL具塞三角瓶中,添加30 mL蒸馏水后在70℃恒温条件下浸提18 h,然后将三角瓶置于振荡器上振荡5 min后用0.45 μm微孔滤膜过滤,取10 mL浸提液加入0.25 g磺基水杨酸去除蛋白,并将pH微调节至2.2后用0.45 μm滤膜过滤,吸取1 mL滤液于氨基酸自动分析仪测定^[18]。

1.5 数据统计与分析

利用Excel 2007和SPSS 19.0软件进行数据统计分析,采用Origin 2022软件和Sigmaplot 14.0软件制图,不同处理间差异显著性分析采用单因素方差分析(One-way analysis of variance, ANOVA),利用双因素方差分析方法分析生育期、施肥处理及生育期与施肥处理间的交互作用对土壤氨基酸的影响,借助Origin 2022软件中的线性相关热图插件分析土壤FAA与影

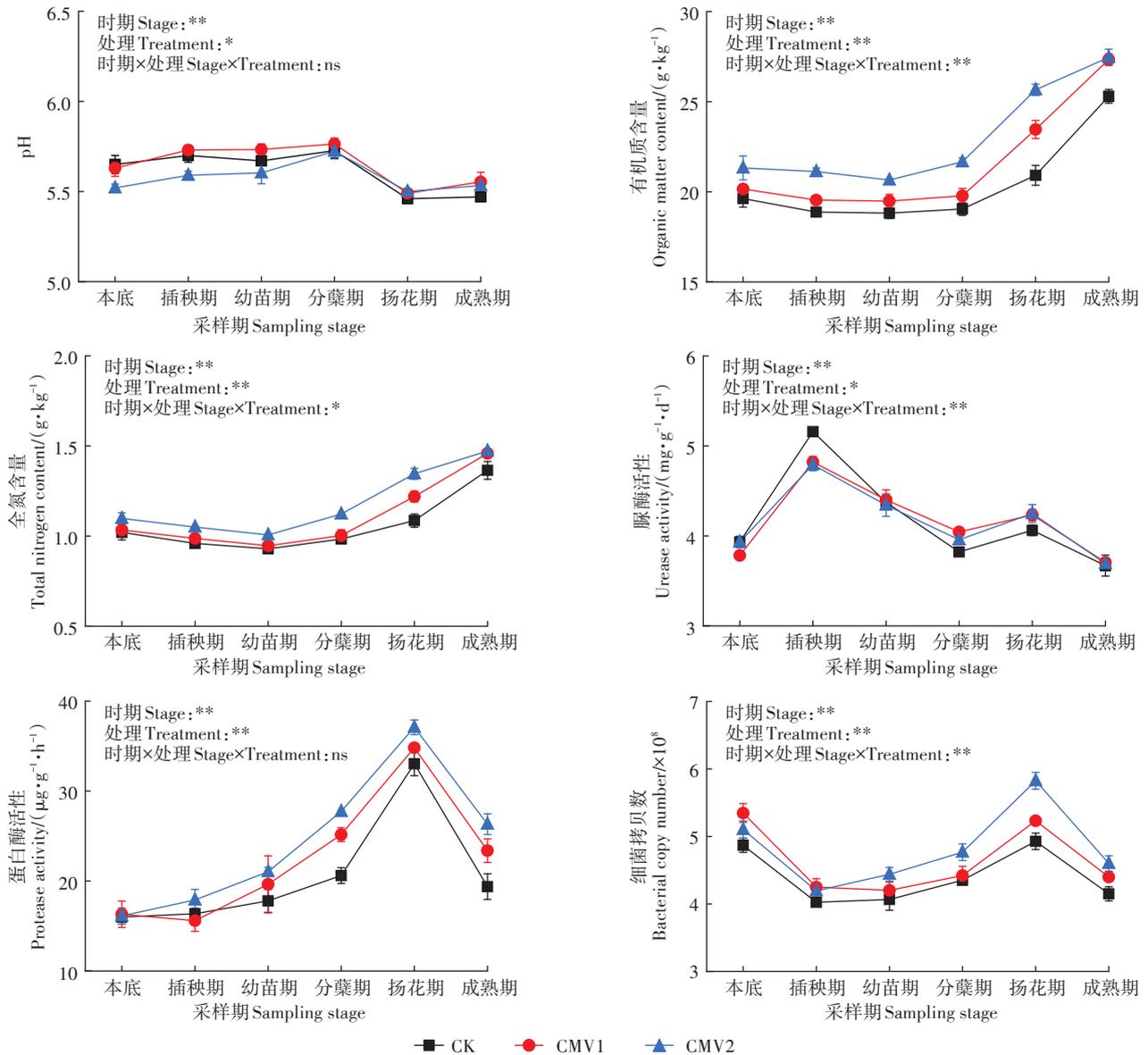
响因素之间的关系。

2 结果与分析

2.1 翻压紫云英稻田耕层土壤生化性质的动态变化

水稻生育期和施肥处理均可显著影响供试水稻土生化性质(图3)。紫云英翻压后,土壤pH呈现先缓慢升高后快速下降并逐渐趋于平稳的变化趋势,与本底土壤相比,水稻成熟期CK处理pH显著($P<0.05$)降低了0.18个单位,而翻压紫云英处理无显著变化。

紫云英翻压后土壤有机质和全氮含量均表现为翻压前期无显著变化,后期缓慢增加;水稻成熟期不同处理有机质和全氮含量较本底土壤分别显著提高33.33%~41.75%和28.80%~35.68%,且有机质和全氮含量(采样期均值)均表现为CMV2处理>CMV1处理>CK处理。翻压紫云英后不同处理脲酶活性均于水稻插秧期达到峰值,但不同处理间无显著差异。翻压紫云英后不同处理蛋白酶活性和细菌拷贝数均于水稻扬花期达到峰值,且不同处理间(采样期均值)均



“**”、“*”和“ns”分别表示方差分析差异显著($P<0.05$)、差异极显著($P<0.01$)和无显著差异。下同
 “**”, “*” and “ns” represent the significant difference ($P<0.05$), extremely significant difference ($P<0.01$) and no significant difference in ANOVA respectively. The same below

图3 水稻生育期不同施肥处理稻田土壤生化性质动态变化

Figure 3 Dynamics of soil biochemical properties under different fertilization treatments during the rice growth stage

表现为CMV2处理>CMV1处理>CK处理。可见,水稻不同生育期不同处理耕层土壤生化性质差异显著。

2.2 翻压紫云英稻田耕层土壤FAA含量的动态变化

水稻生育期、施肥处理及两者交互作用均对供试水稻土FAA含量具有显著影响(图4)。水稻生育期不同施肥处理均表现为紫云英翻压后FAA含量逐渐降低,至水稻幼苗期降至最低,幼苗期不同处理较本底土壤显著降低17.15%~30.23%;水稻幼苗期至扬花期,FAA含量快速增加至峰值,扬花期不同处理FAA含量较幼苗期提高77.79%~85.64%;随后FAA含量逐渐降低,水稻成熟期不同处理FAA含量较扬花期降低12.28%~17.28%。与本底土壤相比,水稻成熟期CK、CMV1处理和CMV2处理土壤FAA含量分别提高了8.83%,10.66%和27.21%。施用紫云英均可显著增加土壤FAA含量,与CK处理相比,CMV1和CMV2处理FAA含量(采样期内均值)分别提高了14.01%和21.75%。可见,施用紫云英可显著增加土壤FAA含量,且在水稻扬花期达到峰值。

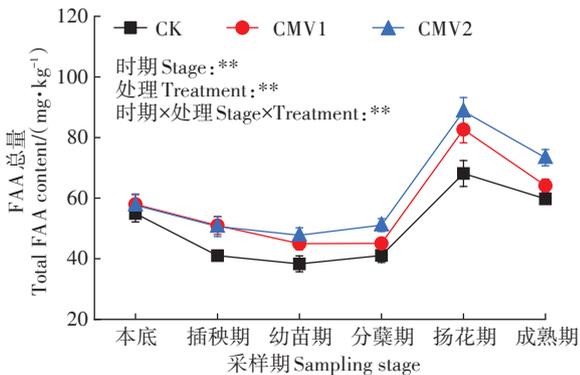


图4 水稻生育期不同施肥处理稻田土壤FAA含量动态变化
Figure 4 Dynamics of soil FAA content under different fertilization treatments during the rice growth stage

2.3 翻压紫云英稻田耕层土壤FAA组分的动态变化

水稻生育期不同施肥处理FAA组分具有多样性,共检测出15种中性氨基酸,2种酸性氨基酸和2种碱性氨基酸(图5)。不同施肥处理中性氨基酸、酸性氨基酸和碱性氨基酸含量的变化规律与FAA含量变化规律相似,分别占FAA库的93.39%~97.52%、2.19%~5.86%和0~1.47%,且碱性氨基酸仅在水稻幼苗期和扬花期存在。从单个氨基酸而言,稻田土壤中FAA均以肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸为主,合计占FAA总量的65.93%~82.65%。翻压紫云英可丰富耕层土壤FAA种类并增加

各氨基酸组分的含量,尤其是酸性氨基酸和碱性氨基酸。较CK处理相比,CMV1处理和CMV2处理酸性FAA含量(采样期内均值)分别显著提高了18.68%和177.80%,碱性FAA含量(采样期内均值)分别显著提高了50.22%和78.59%。可见,水稻不同生育期不同施肥处理FAA组成相似,均以中性氨基酸为主,但酸性氨基酸和碱性氨基酸对紫云英施用量的响应更为显著。

2.4 翻压紫云英稻田土壤FAA的剖面分异

根据水稻生育期耕层土壤FAA含量及组分的动态变化规律,选取FAA含量较低的幼苗期和较高的扬花期分析稻田土壤FAA的剖面差异。水稻幼苗期和扬花期FAA含量和种类均随土层增加而降低(图6)。就FAA含量而言,水稻幼苗期FAA含量表现为0~20 cm>20~40 cm≈40~60 cm,而扬花期表现为0~20 cm>20~40 cm>40~60 cm。水稻扬花期0~20 cm和20~40 cm的FAA含量均显著高于幼苗期,而40~60 cm无显著差异,说明FAA主要迁移至20~40 cm土层。水稻幼苗期CMV1处理和CMV2处理0~60 cm土层FAA含量分别较CK处理提高了13.35%和18.91%,扬花期CMV1处理和CMV2处理0~60 cm土层FAA含量分别较CK处理提高了17.10%和22.80%,说明施用紫云英增加了土壤剖面FAA的累积。就FAA组分而言,水稻幼苗期和扬花期,20~40 cm和40~60 cm土层中均只有中性氨基酸,与幼苗期相比,成熟期20~40 cm土层FAA增加了丝氨酸和甘氨酸,40~60 cm增加了苏氨酸。可见,随着水稻的生长FAA具有向下迁移的趋势,且主要迁移至20~40 cm土层;中性氨基酸尤其是丝氨酸、甘氨酸和苏氨酸迁移性较强。

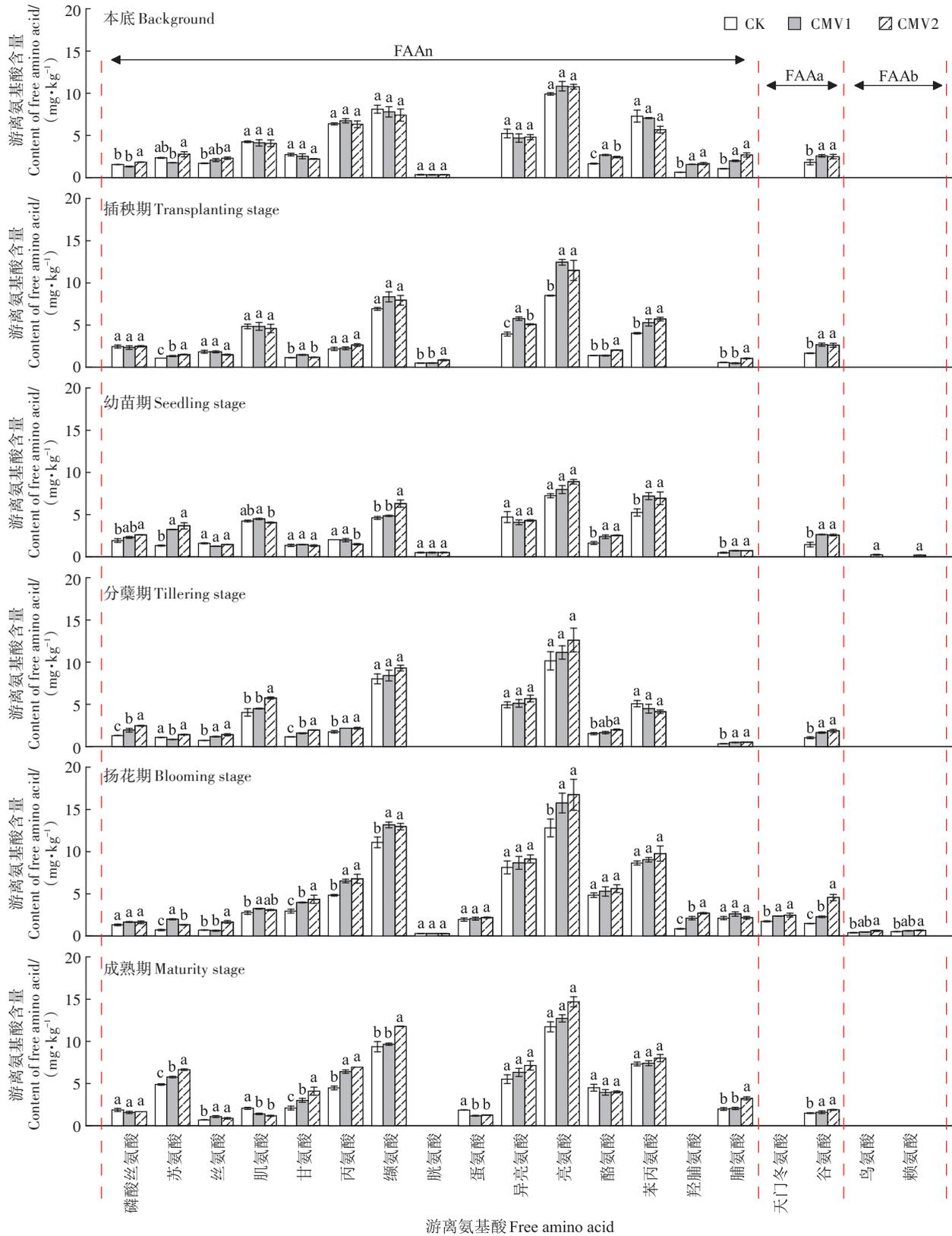
2.5 土壤生化性质对FAA的影响

采用线性相关分析研究紫云英翻压后稻田土壤FAA含量及组分与可能的影响因子间的关系(图7)。结果表明,FAA总量和中性FAA均与土壤有机质、总氮、蛋白酶和细菌拷贝数呈显著正相关,相关系数均高于0.72;均与pH呈显著负相关,相关系数分别为-0.78和-0.79。酸性FAA仅与细菌拷贝数显著正相关,相关系数为0.53。碱性FAA与蛋白酶和细菌拷贝数呈显著正相关,相关系数分别为0.83和0.61。可见,稻田土壤中FAA对土壤性质的响应较为复杂,且因FAA组分的不同而异。

3 讨论

3.1 施用紫云英对FAA含量的动态影响

土壤中FAA产生、组成和降解是一个动态的变



FAAn, FAAa and FAAb 分别表示土壤中性 FAA、酸性 FAA 和碱性 FAA, 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
 FAAn, FAAa and FAAb represent soil neutral FAA content, acidic FAA content and basic FAA, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图5 水稻生育期不同施肥处理稻田土壤 FAA 各组分含量动态变化

Figure 5 Dynamics of soil FAA composition under different fertilization treatments during the rice growth stage

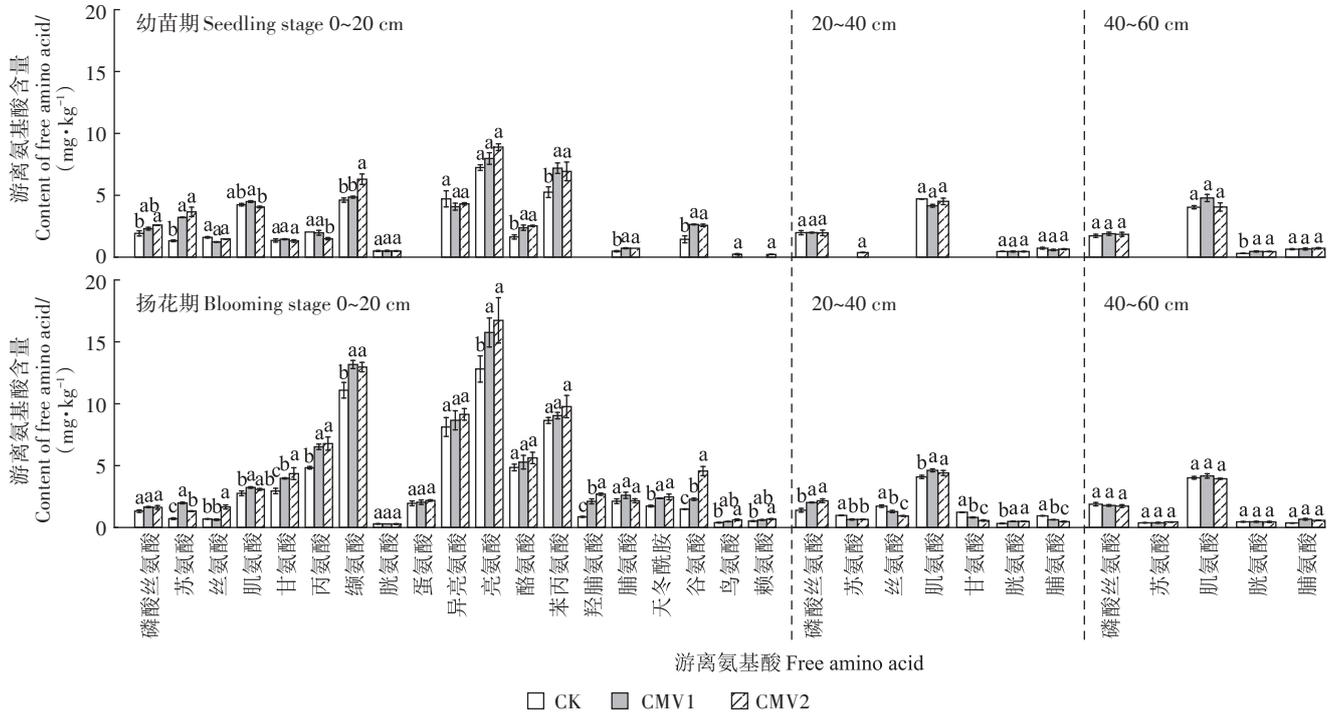
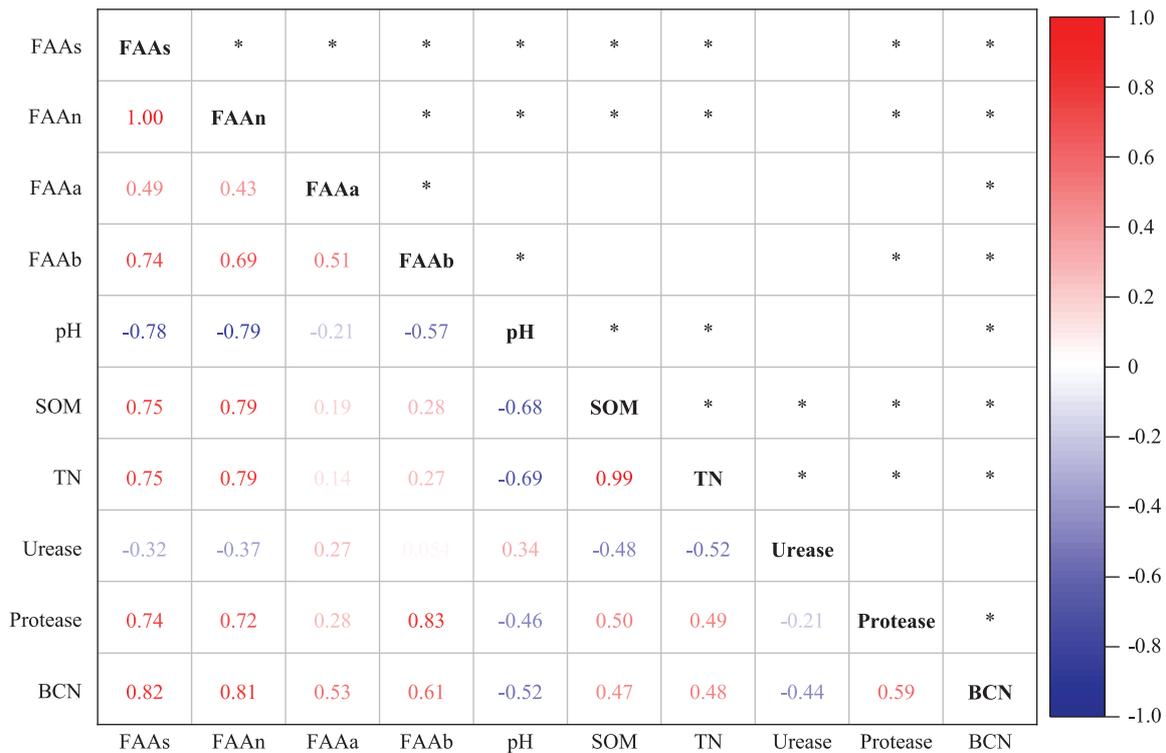


图6 水稻幼苗期和扬花期稻田土壤FAA剖面分布

Figure 6 FAA profile distribution of paddy soil at seedling stage and blooming stage



FAAs,FAAn,FAAa,FAAb,SOM,TN,Urease,Protease和BCN分别表示土壤FAA总量、中性FAA、酸性FAA、碱性FAA、有机质、总氮、脲酶、蛋白酶和细菌拷贝数;*表示显著相关($P<0.05$)

FAAs,FAAn,FAAa,FAAb,SOM,TN,Urease,Protease and BCN represent total soil FAA content, neutral FAA content, acidic FAA content, basic FAA content, organic matter, total nitrogen, urease, protease and bacterial copy number, respectively; *indicates significant correlation ($P<0.05$)

图7 稻田土壤FAA含量及组分与土壤性质的相关系数热图

Figure 7 Heat map of the correlation coefficient between FAA content and components in paddy soil and soil properties

化过程,受植物、土壤和施肥等因素影响^[5]。本研究结果表明紫云英翻压后 FAA 含量逐渐降低,至水稻幼苗期达到最低值,这主要是由于紫云英翻压后稻田灌水导致土壤中 FAA 含量被稀释,致使 FAA 含量降低。水稻幼苗期-扬花期土壤 FAA 含量快速增加并于扬花期达到峰值,究其原因是由于随着腐解时间的增加,紫云英的累积腐解量逐渐增加^[19],向土壤中释放的氮素累积量也较高^[20]。研究表明,在紫云英腐解的第90天,紫云英的累积腐解量可高达78.7%^[21]。另外,翻压第25天施用追肥为土壤细菌的繁殖提供了养分和能量,提高了土壤中蛋白酶活性及细菌数量(图3),从而促进大分子有机质分解成 FAA。本研究结果也表明蛋白酶和细菌拷贝数与 FAA 含量呈显著正相关(图7)。翻压80 d后,紫云英腐解进入缓慢分解期降低了 FAA 的来源^[21],此外,微生物为满足自身繁殖的需求而分解土壤中的氨基酸也导致了土壤氨基酸含量的降低^[22]。

施用紫云英可增加土壤 FAA 含量,且施用量越大效果越明显。施用的紫云英能够持续为土壤带来大量的含氮有机物质,供试紫云英的蛋白质含量为 $193.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,酸解氨基酸总含量为 $82.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且傅里叶红外光谱分析结果显示,供试紫云英的主要组成为碳水化合物、醇酚类、蛋白质等(图2),这些含氮物质分解后可显著增加土壤的 FAA 含量^[23]。另外,新鲜绿肥的翻压增加了土壤有机质和总氮含量,提高了土壤细菌数量(图3),促进了土壤有机质的矿化,微生物对有机质的分解是 FAA 的主要来源之一^[24]。本研究结果表明有机质和总氮与 FAA 含量呈显著正相关(图7)。Kieloaho 等^[25]的研究也表明有机质分解后释放出的蛋白质可降解为微生物和植物可利用的小分子有机氮。此外,紫云英翻压后土壤有机质含量的增加,可提高土壤对 FAA 的吸附,减低其迁移量^[23]。

3.2 施用紫云英对 FAA 组分的动态影响

本研究结果表明,土壤氨基酸以中性氨基酸含量最高,酸性次之,碱性氨基酸含量最低,与林地、草地及菜地关于 FAA 组分的研究结果一致^[4-7]。这主要是由于供试试验区位于亚热带,成土过程中由于脱硅富铁铝化作用,致使供试水稻土成酸性(pH为5.46~5.76),酸性条件下碱性氨基酸稳定性差,易被降解,故供试土壤中碱性氨基酸含量最低^[26]。中性氨基酸在各个采样期均有检出,是水稻土氨基酸最主要的成分,与土壤有机质、总氮、蛋白酶和细菌拷贝数显著相关(图7)。土壤有机质是土壤 FAA 的重要来源,紫云

英添加后土壤有机质和总氮含量增加,土壤蛋白酶活性和细菌数量提高(图3),促进了土壤有机质矿化为 FAA^[24]。氨基酸是两性电解质,中性氨基酸的等电点介于5~7之间,在酸性的土壤溶液中通常带正电荷,随着 pH 提高,氨基酸通常携带净中性电荷或负电荷,与土壤胶体的相互作用弱,易从土壤中损失,导致土壤 FAA 含量降低,故土壤 pH 与中性氨基酸呈显著负相关(图7)^[27-28]。本研究表明施用紫云英能够显著增加土壤中酸性和碱性 FAA 含量,这一方面是由于紫云英中含有丰富的酸性氨基酸和碱性氨基酸(图2),施用于土壤后在细菌和蛋白酶的作用下可显著增加土壤中的酸性和碱性 FAA。此外,施用紫云英处理提高土壤酸性 FAA 的另一方面原因可能是施用紫云英处理(CMV1处理和CMV2处理)细菌拷贝数较CK处理提高了5.64%和8.53%,土壤 FAA 是微生物分泌与自溶的产物,而微生物细胞壁中含有丰富的谷氨酸、谷氨酰胺、天门冬氨酸和天冬酰胺^[29]。本研究相关性分析结果表明酸性氨基酸仅与土壤细菌拷贝数显著相关(图7),表明酸性氨基酸主要来源于紫云英的分解导致细菌生物量增加。

本研究结果表明水稻生育期内不同施肥处理土壤中 FAA 的组分无显著差异,均以肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸为主,这与水稻土中 FAA 具有共同来源或是类似的生化过程有关^[4],这一结果与在林地生态系统中进行的研究结果一致^[1]。甘氨酸是农业生态系统中最丰富的氨基酸之一,且在有机物分解的过程中甘氨酸含量增加^[30]。丙氨酸、亮氨酸在微生物细胞壁,尤其是真菌细胞壁中含量丰富^[31]。研究表明异亮氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸在土壤中的产生和矿化相关,且其变化趋势相似^[6]。肌氨酸和缬氨酸作为非极性氨基酸,矿化程度较低,周转速率较慢,可能导致了其在水稻土中浓度较高^[32]。

3.3 施用紫云英对 FAA 剖面分布的影响

FAA 在土壤剖面中具有明显的垂直分布特征,施用紫云英增加了土壤剖面 FAA 的累积,尤其是0~20 cm 土层。究其原因:一方面是由于施入的紫云英和水稻根系分布主要集中于0~20 cm 土层。供试紫云英自身含有大量的含氮物质(如氨基酸、蛋白质),施用于土壤后主要累积在表层土壤中,酶底物充足,为0~20 cm 土层微生物活动提供了丰富的营养和能源,从而提高了有机物质的矿化速率^[24];此外,施用紫云英有利于水稻的生长,促进根系分泌物的分泌,已有

研究表明植物根系分泌物是土壤 FAA 的重要来源之一^[33-34]。另一方面与土壤对 FAA 的吸附作用有关。有研究表明,FAA 在土壤中的移动性受土壤吸附过程的影响^[23],本研究供试土壤质地较黏重(黏土),故 FAA 易被土壤吸附,下渗能力相对较弱,且稻田土壤犁底层在地下 20 cm 处,对水分下渗具有一定的截留作用^[35],因此仅有部分 FAA 迁移到下部土层。

FAA 作为小分子可溶性有机氮,在土壤中移动性强,易在土壤剖面中迁移。本研究深层土壤中仅有中性氨基酸,其是水稻土剖面中迁移的主要氨基酸组分,究其原因与土壤对中性氨基酸的吸附性较低有关。氨基酸等电点的 pH 与土壤溶液的 pH 之差越大,土壤对氨基酸的吸附性越强^[27]。碱性氨基酸的等电点远高于供试土壤溶液的 pH(5.46~5.76),在土壤溶液中带正电荷^[36],因此易被带负电荷的土壤吸附;酸性氨基酸的等电点在 3 左右,在土壤溶液中带负电荷^[36],带有负电荷的羧基可通过二价离子作为离子桥与土壤基质相结合而被吸附;而中性氨基酸等电点与土壤溶液较为接近,基本以偶极的形态存在,带正电荷的基团和带负电荷的基团距离太近,电荷相互抵消^[27],因此土壤对中性氨基酸的吸附能力较低,导致其易迁移至深层。Rothstein 等^[32]的研究也表明酸性土壤可同时吸附带正、负电荷的 FAA,导致土壤对酸性和碱性氨基酸的吸附较中性氨基酸强烈。土壤中不同 FAA 其自身性质存在较大差异,使其在土壤中的迁移能力有所不同,本研究表明甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸迁移性较强,这可能与土壤对氨基酸的吸附量有关,甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸作为中性氨基酸不易被土壤胶体吸附,因此在土壤剖面中移动性强。丝氨酸和苏氨酸作为亲水性氨基酸,易溶于土壤溶液中,并在重力水的作用下迁移至深层土壤^[37]。而甘氨酸是土壤中分子量最小、结构最简单的氨基酸^[38],小分子亲水性有机物质不易被土壤吸附,吸附后生物稳定性差,易在土壤剖面中迁移^[39]。此外,氨基酸在剖面的分布与其性质密切相关,极性氨基酸的矿化程度高于非极性氨基酸^[32],因此供试土壤中甘氨酸作为非极性氨基酸矿化程度较低,周转速率较慢,从而成为土壤剖面中氨基酸迁移的主要成分之一。

本研究探讨了施用紫云英对稻田土壤 FAA 含量、组成和剖面迁移的影响。然而稻田生态系统土壤 FAA 的动态是一个复杂的过程,不仅来源于紫云英的分解,还与土壤原有有机质、动植物残体的分解有关,导致紫云英的施用对 FAA 的具体贡献率尚未可知。

因此,今后研究可通过 N 同位素示踪法标记紫云英,研究翻压紫云英对土壤 FAA 总量及各组分的贡献率,以及紫云英腐解后释放出的 FAA 在土层中的迁移规律,从而进一步阐明稻田土壤 FAA 的来源与去向。

4 结论

(1) 稻田土壤游离氨基酸(FAA)含量与组成受绿肥输入及水稻生育期的显著影响。水稻生育期内 FAA 含量和种类呈现一定时间动态,于幼苗期最低,扬花期最高。

(2) 水稻生育期内耕层土壤氨基酸均以中性氨基酸中的肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸为主。施用紫云英可显著增加稻田各层土壤 FAA 含量,并促进 FAA 向下迁移,但由于供试稻田土壤质地较为黏重,FAA 主要迁移至 20~40 cm 土层。

(3) 稻田土壤中 FAA 含量及组分与土壤性质密切相关,中性 FAA 主要受土壤 pH、有机质、总氮、蛋白酶和细菌拷贝数的影响,酸性 FAA 主要受细菌拷贝数的影响,而碱性氨基酸主要受蛋白酶和细菌拷贝数的影响。

参考文献:

- [1] 郭新春,曹裕松,邢世和,闽北 3 种人工林土壤游离氨基酸组成及其差异研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 310-315. GUO X C, CAO Y S, XING S H. Composition of soil free amino acid and its difference in three plantations in southern China[J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 37(3): 310-315.
- [2] HILL E J, JONES D L, PATERSON E, et al. Hotspots and hot moments of amino acid N in soil: Real-time insights using continuous microdialysis sampling[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 131(1): 40-43.
- [3] NIE S A, ZHAO L X, LEI X M, et al. Dissolved organic nitrogen distribution in differently fertilized paddy soil profiles: Implications for its potential loss[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 262: 58-64.
- [4] WERDIN-PFISTERER N R, KIELLAND K, BOONE R D. Soil amino acid composition across a boreal forest successional sequence[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1210-1220.
- [5] 赵满兴,曹阳阳,白二磊,等. 黄土丘陵区不同植被恢复类型土壤游离氨基酸含量及其随季节动态分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 43-49. ZHAO M X, CAO Y Y, BAI E L, et al. Soil free amino acids and its seasonal dynamics in different vegetation restoration types in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(3): 43-49.
- [6] PEREZ P G, ZHANG R, WANG X L, et al. Characterization of the amino acid composition of soils under organic and conventional manage-

- ment after addition of different fertilizers[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4):890-901.
- [7] HOLST J, BRACKIN R, ROBINSON N, et al. Soluble inorganic and organic nitrogen in two Australian soils under sugarcane cultivation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 155:16-26.
- [8] 张旭东. 土壤中氨基酸特性及其与土壤肥力关系的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 1989. ZHANG X D. Characteristics of amino acids in soils and relationship between the characteristics and soil fertility [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 1989.
- [9] 李世清, 李生秀, 李东方. 长期施肥对半干旱农田土壤氨基酸的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(1):63-67. LI S Q, LI S X, LI D F. Effects of long-term application of fertilizers on amount of amino acid in soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(1):63-67.
- [10] 何春梅, 李昱, 王飞, 等. 麸酸有机复混肥对黄瓜产质、土壤游离氨基酸和微生物碳的影响[J]. *福建农业学报*, 2011, 26(4):627-631. HE C M, LI Y, WANG F, et al. Effects of monosodium glutamate organic compound fertilizer on cucumber yield and quality, and free amino acid and microbe-carbon contents in soils[J]. *Fujian Journal of Agriculture Science*, 2011, 26(4):627-631.
- [11] 秦宁. 短期猪粪堆肥处理对红壤土的改良效果及土壤颗粒稳定性的影响研究[D]. 济南: 山东大学, 2020. QIN N. Effects of short-term pig manure compost treatment on red soil improvement and soil particles stability[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [12] CHEN J R, QIN W J, CHEN X F, et al. Application of Chinese milk vetch affects rice yield and soil productivity in a subtropical double-rice cropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(8):2116-2126.
- [13] ZHOU X, LI Z M, XIE J, et al. Effect of reducing chemical fertilizer on rice yield, output value, content of soil carbon and nitrogen after utilizing the milk vetch[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(2):266-271.
- [14] GAO S J, CAO W D, ZHOU G P, et al. Bacterial communities in paddy soils changed by milk vetch as green manure: A study conducted across six provinces in south China[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(4):521-530.
- [15] 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, 2000. LU R K. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. GUAN S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [17] 聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 等. 双季稻田冬闲期土壤细菌数量及结构对施氮的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(6):889-896. NIE J W, WANG Y J, WU B K, et al. Response of soil bacterial quantity and community to nitrogen fertilization in double-cropping rice field during winter fallow period[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(6):889-896.
- [18] 杨静, 聂三安, 杨文浩, 等. 不同施肥水稻土可溶性有机氮组分差异及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4):955-966. YANG J, NIE S A, YANG W H, et al. Effects of various influencing factors of soil soluble organic nitrogen components under different long-term fertilization treatments in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4):955-966.
- [19] 李忠义, 何铁光, 蒙炎成, 等. 稻田豆科冬季绿肥腐解及养分释放特征研究[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(13):241-245. LI Z Y, HE T G, MENG Y C, et al. Study on characteristics of decomposition and nutrients release of leguminous green manures in winter in paddy fields[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(13):241-245.
- [20] 马艳芹, 杨文亨, 黄国勤. 不同施氮水平对紫云英腐解与土壤供氮特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(9):1745-1752. MA Y Q, YANG W T, HUANG G Q. Effects of nitrogen levels on decomposition of Chinese milk vetch and soil nitrogen supply characters[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(9):1745-1752.
- [21] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 亚热带单季稻区紫云英不同翻压量下有机碳和养分释放特征[J]. *草业学报*, 2012, 21(4):319-324. WANG F, LIN C, LI Q H, et al. A study on organic carbon and nutrient releasing characteristics of different *Astragalus sinicus* manure use levels in a single cropping region of subtropical China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4):319-324.
- [22] PAN W, TANG S, ZHOU J, et al. Plant-microbial competition for amino acids depends on soil acidity and the microbial community[J]. *Plant and Soil*, 2022, 475:457-471.
- [23] FISCHER H, MEYER A, FISCHER K, et al. Carbohydrate and amino acid composition of dissolved organic matter leached from soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11):2926-2935.
- [24] YANG J, YANG W H, WANG F, et al. Driving factors of soluble organic nitrogen dynamics in paddy soils: Structure equation modeling analysis[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(6):801-809.
- [25] KIELOAHO A J, PIHLATIE M, DOMINGUEZ C M, et al. Stimulation of soil organic nitrogen pool: The effect of plant and soil organic matter degrading enzymes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 96(1):97-106.
- [26] 王星, 崔晓阳, 郭亚芬. 寒温带林区不同林型土壤中游离氨基酸的研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(4):42-48. WANG X, CUI X Y, GUO Y F. A study on free amino acid in different forest types soil of cold-temperate forest region[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2016, 40(4):42-48.
- [27] 张旭东, 汪景宽, 张继宏, 等. 长期施肥对土壤中氨基酸吸附特性的影响[C]//迈向21世纪的土壤科学——提高土壤质量促进农业持续发展. 南京: 中国土壤学会, 1999:53-57. ZHANG X D, WANG J K, ZHANG J H, et al. Effects of long-term fertilization on soil amino acids adsorption properties[C]//Soil science towards the 21st century, improve the quality of the soil to promote sustainable development of agriculture. Nanjing: Soil Science Society of China, 1999:53-57.
- [28] JACKSON N N, HONG Z N, LU H L, et al. Adsorption of amino acids by montmorillonite and gibbsite: Adsorption isotherms and spectroscopic analysis[J]. *Applied Clay Science*, 2022, 219:106437.
- [29] FRIEDEL J, SCHELLER E. Composition of hydrolysable amino acids in soil organic matter and soil microbial biomass[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(3):315-325.

- [30] ROVIRA P, KURZ-BESSON C, HERNÁNDEZ P, et al. Searching for an indicator of N evolution during organic matter decomposition based on amino acids behaviour: A study on litter layers of pine forests[J]. *Plant and Soil*, 2008, 307(1/2): 149-166.
- [31] FENG Y, WANG J, YUAN K, et al. Vegetation affects pool size and composition of amino acids in Tibetan alpine meadow soils[J]. *Geoderma*, 2018, 310(1): 44-52.
- [32] ROTHSTEIN D E. Effects of amino-acid chemistry and soil properties on the behavior of free amino acids in acidic forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1743-1750.
- [33] HUANG C C, LIU S, LI R Z, et al. Spectroscopic evidence of the improvement of reactive iron mineral content in red soil by long-term application of swine manure[J]. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0146364.
- [34] YANG S H, PENG S Z, ZHENG X J, et al. Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields[J]. *Paddy and Water Environment*, 2015, 1(3): 71-80.
- [35] ISLAM M M, SAEY T, DE SMEDT P, et al. Modeling within field variation of the compaction layer in a paddy rice field using a proximal soil sensing system[J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30(1): 99-108.
- [36] WANG Y, DING B H, GAO S Y, et al. In vitro corrosion of pure Mg in phosphate buffer solution: Influences of isoelectric point and molecular structure of amino acids[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2019, 105: 110042.
- [37] 王路军. 极性及手性可调的色谱分离固定相研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016. WANG L J. Study of polarity and chirality tunable chromatographic separated stationary phase[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [38] 吴良欢, 陶勤南. 水稻氨基酸态氮营养效应及其机理研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 464-473. WU L H, TAO Q N. Effects of amino acid nitrogen on rice nitrogen nutrition and its mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 464-473.
- [39] 黄倩, 吴靖霆, 陈杰, 等. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(3): 446-452. HUANG Q, WU J T, CHEN J, et al. Adsorption of dissolved organic carbon (DOC) on soil: A review[J]. *Soils*, 2015, 47(3): 446-452.

(责任编辑:朱晓昱)