

雷秀美, 王 飞, 周碧青, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1550–1559.
LEI Xiu-mei, WANG Fei, ZHOU Bi-qing, et al. Effects of long-term fertilization on soil soluble organic nitrogen and free amino acid profile variations in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1550–1559.

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¹, 王 飞^{1,2}, 周碧青^{1,3}, 杨文浩^{1,3}, 聂三安^{1,4}, 邢世和^{1,3*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350003; 3. 土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福州 350002; 4. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002)

摘 要:为探讨长期不同施肥对稻田土壤可溶性有机氮(SON)和游离氨基酸(FAA)剖面分异的影响, 阐明长期施肥稻田土壤 SON 和 FAA 的剖面迁移特性。以不施肥(CK)、单施氮磷钾化肥(NPK)、氮磷钾配施牛粪(NPKM)和氮磷钾结合秸秆还田(NPKS)4种处理的稻田长期(33年)施肥定位试验小区为研究对象, 采用带总氮检测器的总有机碳分析仪(TOC-TN)、连续流动注射和氨基酸自动分析仪测定不同深度(0~20、20~40 cm和40~60 cm)土层 SON、FAA 及其组分的含量。结果表明: 长期不同施肥水稻土 SON 含量剖面分异较明显, 0~20、20~40 cm和40~60 cm 土壤 SON 含量分别为 24.14~49.80、11.30~13.86 mg·kg⁻¹和 6.35~9.38 mg·kg⁻¹; 不同处理0~20 cm 土壤 SON 含量表现为 NPKS>NPKM>NPK=CK, NPKS 处理较 NPK 和 CK 分别提高 67.1% 和 106.3%, NPKM 处理较 NPK 和 CK 分别提高了 28.5% 和 58.7%; 不同土层 SON 与可溶性总氮(TSN)的比值为 40.0%~69.3%。长期不同施肥水稻土 FAA 含量也存在较明显剖面差异, 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm 土壤 FAA 含量分别为 8.15~15.91、0.83~2.13 mg·kg⁻¹和 0.69~0.99 mg·kg⁻¹, FAA/SO_N 比例的均值分别为 35.3%、12.6% 和 11.2%; NPKM 和 NPKS 处理 0~20 cm 土壤均包含 20 种 FAA, 较 CK 和 NPK 处理增加了 3 种易分解的碱性氨基酸(鸟氨酸、赖氨酸和精氨酸); NPK、NPKM 和 NPKS 处理 20~40 cm 土壤均包含 10 种 FAA, 较 CK 处理增加了 3 种中性氨基酸(缬氨酸、胱氨酸和苯丙氨酸), 而 40~60 cm 土壤则均包含 7 种 FAA, 较 CK 处理增加了 2 种中性氨基酸(异亮氨酸和胱氨酸); 不同处理不同深度土壤 FAA 组成均以中性氨基酸占优势。研究表明: 土壤 SON、FAA 含量与组分及其剖面分异和施肥模式密切相关, 长期化肥配施牛粪和秸秆能增加 0~20 cm 土壤 SON、FAA 含量且丰富 FAA 种类。

关键词: 长期施肥; 水稻土; 可溶性有机氮; 游离氨基酸; 剖面差异

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)07-1550-10 doi:10.11654/jaes.2018-1267

Effects of long-term fertilization on soil soluble organic nitrogen and free amino acid profile variations in paddy fields

LEI Xiu-mei¹, WANG Fei^{1,2}, ZHOU Bi-qing^{1,3}, YANG Wen-hao^{1,3}, NIE San-an^{1,4}, XING Shi-he^{1,3*}

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 3. University Key Lab of Soil Ecosystem Health and Regulation, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 4. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to investigate the effects of long-term fertilization on the profile differentiation of soluble organic nitrogen (SON) and free amino acid (FAA) in paddy soils, the leaching characteristics of SON and FAA in long-term fertilized paddy soils were determined.

收稿日期: 2018-10-10 录用日期: 2019-01-29

作者简介: 雷秀美(1994—), 女, 福建南平人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤氮素循环与环境效应研究。E-mail: leixiumei_0312@163.com

*通信作者: 邢世和 E-mail: fafuxsh@126.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671490); 福建农林大学国际合作项目(KXB16016A)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671490); International Cooperative Project of Fujian Agriculture and Forestry University(KXB16016A)

The SON contents, FAA amounts, and FAA types, in paddy field soil sampled at 0~20 cm, 20~40 cm, and 40~60 cm depth, with a 33-year history of different fertilization, were analyzed. The fertilization regimes included control (CK), chemical fertilizer (NPK), cow manure combined with chemical fertilizer (NPKM), and rice straw combined with chemical fertilizer (NPKS). The results showed that the profile differentiation of SON contents varied greatly in the sampled soil layers. The SON contents in the 0~20 cm layer showed the following order after different treatments: NPKS>NPKM>NPK=CK. The soil SON in the 0~20 cm layer, under NPKM and NPKS treatments, included 20 types of FAA, and showed increases in three types of basic amino acids (ornithine, lysine, and arginine), compared with CK and NPK treatments. The soil SON in the 20~40 cm layer, under NPK, NPKM, and NPKS treatments, contained 10 types of FAA, and increased levels of three neutral amino acids (proline, cystine, and phenylalanine), compared with CK treatment. The soil SON in the 40~60 cm layer, under NPK, NPKM, and NPKS treatments, contained seven types of FAA, and increased levels of two types of neutral amino acids (isoleucine and cystine), compared with CK treatment. The FAA compositions in the paddy field under different treatments were dominated by neutral amino acids. Overall, profile differentiations of SON and FAA in the paddy fields were closely related to fertilization and SON contents, and both the amounts and types of FAA in the 0~20 cm layer of the paddy soil could be increased by long-term fertilizations with NPKS and NPKM.

Keywords: long-term fertilization; paddy soil; soluble organic nitrogen; free amino acids; profile difference

自然界土壤中绝大多数氮素是以有机态氮的形式存在,其中可以溶于水和盐溶液的那部分有机氮称为可溶性有机氮(Soluble organic nitrogen, SON),是土壤有机氮中最活跃的组分^[1]。SON既能在微生物作用下转化为无机氮被植物吸收利用,也能直接被植物吸收利用,在氮循环过程中起着至关重要的作用^[2]。此外,SON移动性很强,易随水分移动进入水体而污染水源^[3],土壤SON的组分及存在形态对土壤氮素有效利用和移动有着重要的影响。游离氨基酸(Free amino acid, FAA)是土壤SON的重要组成部分^[4],相较于SON的其他组分(如蛋白质、多肽、酚类、单宁和氨基酸-腐植酸复合物等),FAA具有易被植物吸收和随水分淋溶而迁移等特点,在无菌的条件下,植物甚至能利用FAA作为唯一氮源完成整个生命周期^[5]。因此,土壤SON及其重要组分FAA的含量不仅对农田生态系统氮素循环具有影响,而且其在土壤剖面中的迁移可能导致氮素的面源污染。

一般认为,土壤SON主要来源于有机质的分解、土壤微生物的代谢、根系的分泌及施入的肥料等^[6],其中施肥是农业生产中提高土壤肥力的重要措施,必然影响土壤SON含量和FAA组分,但不同类型肥料的成分及理化性质不同,因而影响效果也不同^[7]。有研究表明,长期施用化肥对土壤耕层活性氮和有机氮组分含量无显著影响^[8],长期化肥配施秸秆和化肥配施有机肥,均显著提高了土壤有机氮各组分含量,其中以氨基酸态氮含量增加的幅度最高^[9]。富东英等^[10]也得出了相同结果,可见,施肥对耕层土壤SON和FAA组分具有显著影响。土壤SON是一个可移动氮源,可以从表层迁移到深层,在降雨量大或灌溉地区

是土壤氮素的重要损失形态^[11]。水田由于频繁淹水耕作、干湿交替的特殊耕作方式,其剖面SON含量和FAA组分可能有别于其他土壤。但是,目前国内外对于长期不同施肥后稻田土壤剖面SON含量、FAA含量和组分的分配变化规律及其差异尚未见报道。为此,本研究利用亚热带地区33年不同施肥定位试验区,研究长期不同施肥灰黄泥田土壤SON含量和FAA组分的剖面差异,旨在探讨长期不同施肥对水田土壤SON含量和FAA成分剖面分布的影响,揭示长期不同施肥水田土壤SON和FAA组分在剖面中的迁移特性及其差异,为深入研究长期不同施肥条件下水田生态系统土壤SON的环境效应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究以福建省农业科学院位于福州市闽侯县白沙镇(119°04'10"E, 26°13'31"N)的长期不同施肥定位监测试验区为对象,该试验区地处亚热带季风性气候区,年均气温19.5℃,年日照时数1 812.5 h,无霜期311 d,年均降水量1 350 mm。初始土壤类型为灰黄泥田,成土母质为低丘红壤坡积物,定位试验始于1983年,初始耕层(0~20 cm)土壤基本理化性质:质地类型为重壤土,pH 4.9,有机质21.6 g·kg⁻¹,碱解氮141.0 mg·kg⁻¹,有效磷12.0 mg·kg⁻¹,速效钾41.0 mg·kg⁻¹。试验区1983—2004年采用双季稻轮作,2005年至今种植单季稻,水稻品种每3~4年更换一次,与当地主栽品种保持一致。

1.2 试验设计

试验设置不施肥(CK)、单施氮磷钾化肥(NPK)、

氮磷钾配施牛粪(NPKM)和氮磷钾配施秸秆(NPKS) 4个处理,每个处理3次重复。小区面积为12 m²(3 m×4 m),各小区用水泥埂隔开,采用随机区组排列,水稻的行距和株距均为20 cm,每个小区水稻种植密度为25株·m⁻²。CK处理不施用任何肥料,其余处理年氮、磷和钾施用量均值见表1,施用的氮、磷、钾化肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾,其中尿素和氯化钾50%作基肥施用,50%作分蘖肥于基肥施用15 d后追施,过磷酸钙全部作基肥施用。牛粪和秸秆全部作基肥施用,每茬施用量分别为3750 kg·hm⁻²和4500 kg·hm⁻²。

1.3 样品采集与分析方法

2016年种稻前采用对角线多点采样法采集各试验小区0~20、20~40 cm和40~60 cm的土壤样品,同时各个土层中段采用容重圈取样器采集容重圈样品。采集的不同深度土壤样品分为两部分:一部分鲜样直接用于土壤SON、FAA、相关酶活性和微生物生物量碳氮的分析,未能及时测定的鲜样置于4℃(短期)或-20℃(长期)冰箱中恒温保存;另一部分样品在室温下风干过1 mm和2 mm筛用于土壤相关理化性质测定。

土壤有机质和全氮采用碳氮元素分析仪法(C/N vario, Elements, 德国)测定^[12];容重、毛管和通气孔隙度采用环刀法测定^[13];土壤pH值采用电位法(PHS-3E, 雷磁, 中国)测定(土/水=1:2.5)^[14];土壤蛋白酶活性和谷氨酰胺酶活性分别采用福林比色法和奈氏比色法测定^[15];微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸浸提-水浴法测定^[16]。参照Chen等^[17]的土壤SON分析方法,称取14 g鲜土于100 mL具塞三角瓶中,加入70 mL蒸馏水,置于70℃恒温振荡器上加热浸提18 h后振荡5 min,浸提液经离心和0.45 μm微孔有机滤膜

过滤。采用带有氮检测器的总有机碳分析仪(TOC-L, CPH/CPN, Shimadzu, 日本)测定可溶性有机碳(Total soluble carbon, SOC)和可溶性总氮(Total soluble nitrogen, TSN);采用连续流动注射分析仪(Flowsys, Systeal, 意大利)测定NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N含量;利用加和法计算可溶性无机氮(Soluble inorganic nitrogen, SIN)含量,即SIN=NH₄⁺-N+NO₃⁻-N+NO₂⁻-N;利用差减法计算SON含量,即SON=TSN-SIN。取10 mL上述滤液,加入0.25 g磺基水杨酸去蛋白,以5000 r·min⁻¹离心5 min,微调节pH至2.2后用0.45 μm滤膜过滤,吸取1 mL滤液,采用茚三酮显色-氨基酸自动分析仪(Biochrom LTD, Cambridge, 英国)测定浸提液中的FAA及其组成^[18]。

1.4 数据统计方法

数据处理采用Microsoft Excel 2010,图形处理采用Sigmaplot 12.5和Origin 7.5,统计分析采用SPSS 21.0。不同深度及不同处理间差异显著性采用单因素方差分析(One-way analysis of variance, ANOVA),*P*<0.05表示差异显著,*P*<0.01表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥土壤基本理化和生化性质剖面差异

表2结果表明,长期(33年)不同施肥处理稻田不同深度之间土壤基本理化和生化性质差异显著(*P*<0.05),表现为随土壤深度的增加,pH和容重增大,有机质、全氮、毛管孔隙度、通气孔隙度、蛋白酶活性和谷氨酰胺酶活性减小,而MBN先降后升。

从不同施肥处理比较来看,长期施肥对土壤理化和生化性质的影响主要表现在0~20 cm土壤。0~20 cm土壤有机质、全氮、容重、通气孔隙度、蛋白酶活性、谷氨酰胺酶活性和MBN在不同施肥处理间差异显

表1 不同处理(NPK、NPKM、NPKS)氮、磷、钾年施用量均值(kg·hm⁻²)

Table 1 Annual N, P and K application rate in NPK, NPKM, NPKS treatments(kg·hm⁻²)

处理 Treatments	施肥品种 Fertilizer varieties	施氮量 Nitrogen content	总施氮量 Total nitrogen application	施磷量 Phosphorus content	总施磷量 Total phosphorus application	施钾量 Potassium content	总施钾量 Total potassium application
NPK	化肥	103.5	103.5	27.0	27.0	135.0	135.0
NPKM	化肥	103.5	162.8	27.0	60.0	135.0	178.9
	牛粪	59.3		33		43.9	
NPKS	化肥	103.5	153.0	27.0	44.1	135.0	226.8
	秸秆	49.5		17.1		91.8	

注:NPK为单施氮磷钾,NPKM为氮磷钾+牛粪,NPKS为氮磷钾+稻草还田,下同。施磷量以P₂O₅计,施钾量以K₂O计。

Note: NPK, chemical fertilizer; NPKM, chemical fertilizer + cattle manure; NPKS, chemical fertilizer + straw, the same as below. The application rates of phosphorus and potassium were calculated as P₂O₅ and K₂O, respectively.

表2 长期不同施肥处理稻田不同深度土层基本理化和生化性质
Table 2 Soil physicochemical and biochemical properties in various depth layers of paddy field in different long-term fertilization treatments

深度 Depth/cm	处理 Treatments	pH	有机质 Soil organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	容重 Bulk density/ g·cm ⁻³	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	通气孔隙度 Ventilation porosity/%	蛋白酶 Protease/ μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹	谷氨酰胺酶 Glutamine/ mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹	MBN/ mg·kg ⁻¹
0~20	CK	5.30±0.54Ba	25.90±0.17Ac	1.24±0.10Ac	1.18±0.04Ba	44.0±1.7Aa	8.7±0.2Ac	11.38±1.24Ac	49.16±0.16Ac	49.81±1.24Ac
	NPK	5.28±0.08Ba	30.23±0.31Abc	1.52±0.11Ab	1.09±0.03Bb	45.8±2.9Aa	10.8±0.3Ab	13.41±0.80Abc	52.42±1.22Ab	57.61±1.82Ab
	NPKM	5.22±0.11Ca	37.13±3.61Aa	1.90±0.04Aa	1.02±0.01Cc	46.9±1.5Aa	11.7±0.5Aa	15.43±0.03Ab	53.85±0.93Ab	57.57±1.34Ab
	NPKS	5.40±0.22Ba	34.90±4.65Aab	1.88±0.08Aa	1.02±0.03Bc	47.7±2.7Aa	10.9±0.4Ab	18.71±1.74Aa	60.97±1.29Aa	67.07±1.52Aa
20~40	CK	6.15±0.48ABa	14.00±0.82Ba	0.80±0.10Ba	1.46±0.02Aa	38.2±0.8Ba	5.8±0.3Bc	7.32±0.24Bc	37.02±0.90Bb	11.15±0.40Cb
	NPK	6.04±0.32Aa	12.93±2.45Ba	1.00±0.10Ba	1.48±0.04Aa	36.0±1.5Ba	6.6±0.5Bb	11.57±0.41Bb	38.20±0.56Bab	13.04±0.14Ba
	NPKM	5.83±0.41Ba	14.70±0.98Ba	1.03±0.15Ba	1.47±0.02Ba	34.2±2.1Ba	9.1±0.1Ba	14.50±0.09Ba	39.06±0.45Ba	12.62±0.54Ca
	NPKS	5.93±0.22Ba	13.73±1.19Ba	0.97±0.12Ba	1.47±0.03Aa	37.1±2.9Ba	5.2±0.4Bc	14.21±0.87Ba	38.26±1.00Bab	12.97±0.81Ca
40~60	CK	6.51±0.17Aa	11.03±0.40Ca	0.80±0.10Ba	1.51±0.06Aa	36.8±4.1Ba	4.7±0.6Ca	6.97±1.77Bb	22.73±0.89Cc	15.32±0.54Bc
	NPK	6.30±0.30Aa	10.47±0.74Bab	0.70±0.10Ca	1.52±0.06Aa	35.9±0.6Ba	5.5±0.1Ca	7.63±0.99Cb	25.38±0.81Cb	15.22±0.75Bc
	NPKM	6.45±0.12Aa	9.23±0.38Cb	0.80±0.00Ca	1.53±0.04Aa	37.5±3.5Ba	4.6±0.4Ca	10.05±0.34Ca	28.49±0.62Ca	18.74±0.80Bb
	NPKS	6.62±0.49Aa	11.03±1.12Ba	0.83±0.06Ba	1.52±0.03Aa	36.8±2.4Ba	4.9±0.6Ba	10.72±0.97Ca	25.55±0.32Cb	21.68±0.45Ba

注:数据表示为平均值±标准差($n=3$),大写字母代表同一处理不同深度间的差异显著性,小写字母代表同一深度不同处理间的差异显著性,不同字母表示在0.05水平(Duncan检验)有显著差异。

Note: The data in the table are Mean±SD ($n=3$). Capital letters represent the significance of the differences between different depths in the same treatment, and the lowercase letters represent the differences between the different treatments at the same depth ($P<0.05$, Duncan test).

著($P<0.05$),同一土层不同施肥处理间pH和毛管孔隙度的差异均不显著($P>0.05$)。与CK相比,施肥处理可以显著提高0~20 cm土壤全氮、通气孔隙度、谷氨酰胺酶活性和MBN,同时显著降低土壤容重,且以有机无机配施处理效果更为显著,NPKS处理0~20 cm土壤蛋白酶活性显著高于其他3个处理。在20~40 cm和40~60 cm土壤中,施肥处理能提高蛋白酶活性、谷氨酰胺酶活性以及MBN,并且也以有机无机配施处理效果更为显著。可见,长期化肥配施牛粪和稻秆处理可不同程度提高0~60 cm水田土壤全氮、蛋白酶活性和谷氨酰胺酶活性以及MBN,显著降低土壤容重,但以0~20 cm土壤影响更为显著。

2.2 长期不同施肥土壤SON剖面差异

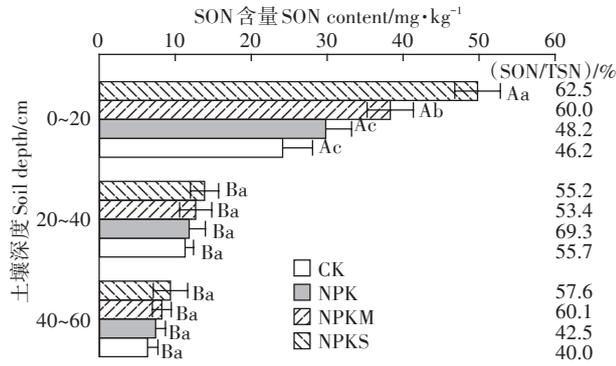
由图1结果可见,长期不同施肥稻田土壤SON含量均随土壤深度增加呈递减趋势,0~20、20~40 cm、40~60 cm土壤SON含量分别为24.14~49.80、11.30~13.86 mg·kg⁻¹和6.35~9.38 mg·kg⁻¹。其中0~20 cm与20~40、40~60 cm土壤SON含量之间的差异达显著水平($P<0.05$),而20~40 cm与40~60 cm土壤SON含量之间的差异则不显著($P>0.05$)。在0~20 cm土壤中,有机无机配施稻田土壤SON含量表现为NPKS>NPKM,且均大于单施化肥和不施肥处理。与NPK和CK处理相比,有机无机配施可显著提高土壤SON含

量($P<0.05$),NPKS处理较NPK和CK处理分别提高了67.1%和106.3%,NPKM处理较NPK和CK处理分别提高了28.5%和58.7%;与CK处理相比,NPK处理可提高SON含量,但差异并不显著($P>0.05$)。在20~40 cm和40~60 cm土壤中,不同施肥处理间土壤SON含量差异均不显著($P>0.05$)。长期不同施肥处理稻田不同土层SON/TSN比例为40.0%~69.3%,其中20~40 cm土层SON/TSN比例均值(58.4%)高于0~20 cm和40~60 cm土层(分别为50.1%和54.2%)。可见,长期不同施肥处理尤其是NPKS处理对供试稻田0~20 cm土壤SON含量影响较为显著,且SON是供试土壤TSN的主要组成成分。

2.3 长期不同施肥土壤FAA含量与组分割面差异

2.3.1 长期不同施肥土壤FAA含量剖面差异

图2结果表明,长期不同施肥处理0~20、20~40 cm和40~60 cm土壤FAA含量分别为8.15~15.91、0.83~2.13 mg·kg⁻¹和0.69~0.99 mg·kg⁻¹,其中0~20 cm土壤FAA含量显著高于20~40 cm和40~60 cm土壤($P<0.05$);而20~40 cm与40~60 cm土壤FAA含量间无显著差异($P>0.05$)。在0~20 cm土壤中,施肥处理FAA含量显著高于CK处理,且以有机无机配施处理的差异更为显著($P<0.05$),而在20~40 cm和40~60 cm土壤中不同施肥处理间土壤FAA含量差异不显



大写字母代表同一处理不同深度间的差异显著性,小写字母代表同一深度不同处理间的差异显著性,不同字母表示在0.05水平(Duncan检验)有显著差异。下同

Capital letters represent the significance of the differences between different depths in the same treatment, and the lowercase letters represent the differences between the different treatments at the same depth ($P < 0.05$, Duncan test). The same below

图1 长期不同施肥处理稻田各土层SON含量及SON占TSN百分比

Figure 1 Soil SON content and the ratio of SON/TSN in different layers of paddy field in different long-term fertilization treatments

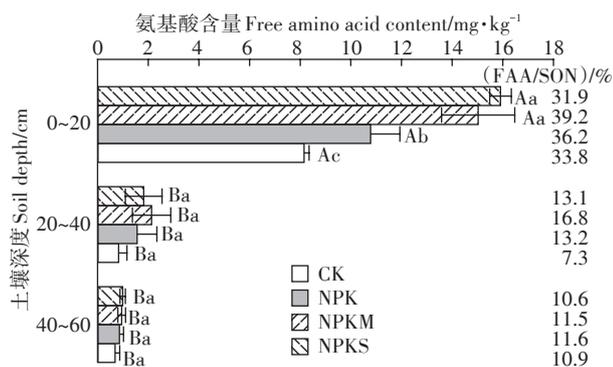


图2 长期不同施肥处理稻田各土层FAA含量及FAA占SON百分比

Figure 2 Soil FAA content and the ratio of FAA/SON in different layers of paddy field in different long-term fertilization treatments

著。可见,有机无机配施比NPK处理能更显著提高FAA含量,且施肥处理对土壤FAA含量的影响主要在表层。图2结果还表明,不同深度土层FAA/SON的比例差异较大,各处理0~20 cm土壤FAA/SON均较高(31.9%~39.2%),而20~40 cm和40~60 cm土壤的FAA/SON则相对较低,仅分别为7.3%~16.8%和10.6%~11.6%。不同施肥处理0~20、20~40 cm和40~60 cm土壤FAA/SON的均值分别为35.3%、12.6%和11.2%。在0~20 cm和20~40 cm土壤中FAA/SON均以NPKM处理较高,分别表现为NPKM>NPK>CK>NPKS和NPKM>NPK>NPKS>CK,而在40~60 cm土壤

中FAA在SON中所占比例各处理较相近。可见,长期以无机肥配施牛粪可提高0~40 cm土壤FAA在SON中的比例,单施无机肥效果次之。

2.3.2 长期不同施肥土壤FAA组剖面差异

图3结果表明,长期不同施肥处理稻田土壤SON中FAA种类及其含量均随土壤深度增加而减少。0~20 cm土壤SON中包含2种酸性氨基酸、15种中性氨基酸和3种碱性氨基酸(图3a),而20~40 cm和40~60 cm土壤SON中只分别包含10种和7种中性氨基酸(图3b和图3c)。在0~20 cm土壤中,CK和NPK处理都包含丝氨酸、肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、缬氨酸、胱氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸、蛋氨酸、磷酸丝氨酸、羟脯氨酸、脯氨酸、天冬酰胺和谷氨酸等17种FAA,NPKM和NPKS处理均包含20种FAA,较CK和NPK处理增加了鸟氨酸、赖氨酸和精氨酸,鸟氨酸含量表现为NPKS>NPKM,赖氨酸和精氨酸含量均表现为NPKM>NPKS,且这3种氨基酸含量均较低,分别为0.02~0.14、0.12~0.14 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和0.12~0.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同处理甘氨酸、苏氨酸、酪氨酸、蛋氨酸、磷酸丝氨酸、天冬酰胺和谷氨酸含量均表现为NPKS>NPKM>NPK>CK,异亮氨酸和羟脯氨酸含量表现为NPKM>NPKS>NPK>CK,丙氨酸各处理含量相近,为1.03~1.37 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施肥可不同程度地提高肌氨酸含量,NPK、NPKM和NPKS处理较CK分别提高了127.5%、58.0%和73.9%。与NPK和CK处理相比,有机无机配施更能提高丝氨酸和胱氨酸含量,均表现为NPKS>NPKM>CK>NPK,有机无机配施处理下缬氨酸、脯氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸含量有所减少,缬氨酸和脯氨酸含量均表现为NPK>CK>NPKS>NPKM,亮氨酸和苯丙氨酸含量均表现为NPK>CK>NPKM>NPKS。

在20~40 cm土壤中,CK处理土壤SON包含丝氨酸、肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、苏氨酸和异亮氨酸等7种FAA,NPK、NPKM和NPKS处理均包含10种FAA,较CK处理增加了缬氨酸、胱氨酸和苯丙氨酸。含量较高的FAA组分包括肌氨酸(0.51~0.53 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、丙氨酸(0.12~0.31 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和亮氨酸(0.09~0.33 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其他FAA组分含量均较低(0.01~0.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。不同处理土壤SON中的丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、缬氨酸和苯丙氨酸含量均表现为NPKM>NPKS>NPK>CK,而肌氨酸和胱氨酸各处理含量相近,分别为0.51~0.53 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和0.04~0.04 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在40~60 cm土壤中,CK处理土

壤SON中包含丝氨酸、肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸和亮氨酸等5种FAA,NPK、NPKM、NPKS处理则包含7种FAA,较CK处理增加了异亮氨酸和胱氨酸。不同处理含量较高的FAA组分均为肌氨酸(0.46~0.57 mg·kg⁻¹),其他FAA含量均较低(0.01~0.11 mg·kg⁻¹),且不同处理之间FAA组分含量相近。可见,长期不同施肥处理均可增加不同深度土层FAA的种类,尤其是有机无机配施效果更明显;FAA种类随土壤深度增加而明显减少,但对不同深度土层FAA各组分含量的影响规律较为复杂。

由图4结果可见,0~20 cm土壤中CK处理的中性和酸性FAA分别占FAA总量的90.6%和9.4%,NPK处理的中性和酸性FAA分别占FAA总量的91.3%和8.7%,NPKM处理的碱性、中性和酸性FAA分别占FAA总量的2.3%、89.6%和8.1%,NPKS处理的碱性、中性和酸性FAA分别占FAA总量的2.4%、89.0%和8.6%。可见,长期施肥处理能够影响稻田0~20 cm土壤SON的FAA组成及其含量,不同处理稻田土壤

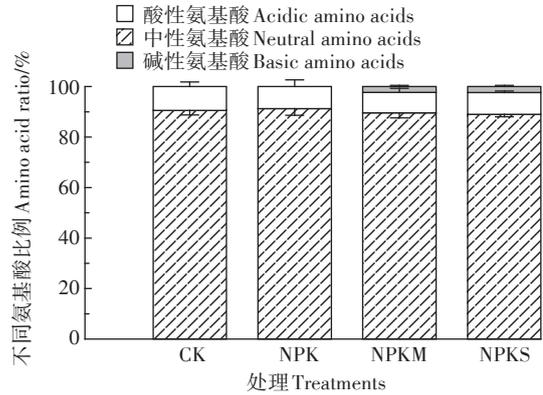


图4 长期不同施肥处理稻田表层(0~20 cm)土壤中中性、酸性和碱性氨基酸占总氨基酸的比例

Figure 4 The percentage of neutral, acidic and basic amino acids to total amino acids in 0~20 cm layers of paddy field under different long-term fertilization treatments

FAA组成均以中性氨基酸占优势,长期有机无机配施处理稻田土壤SON中的碱性FAA比例增加。

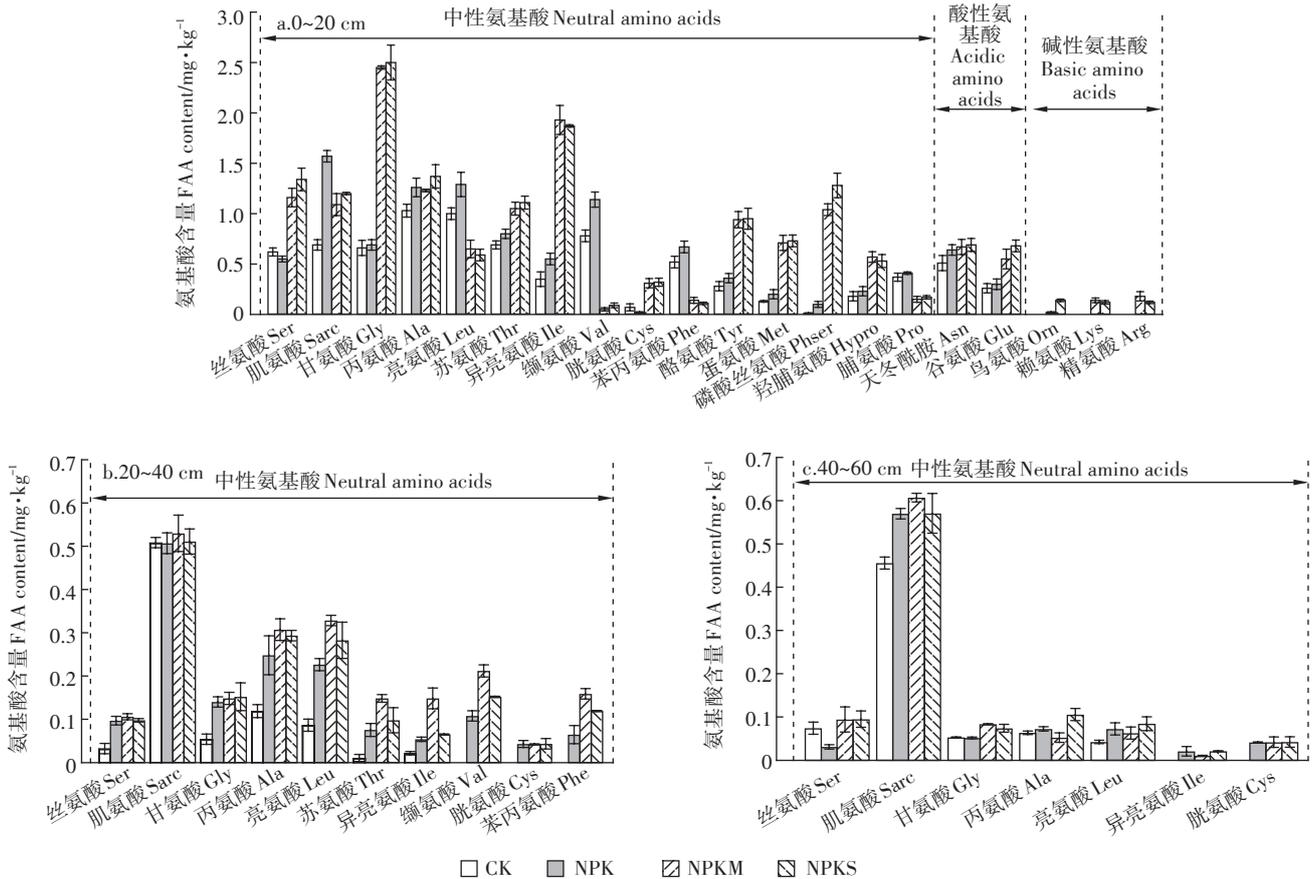


图3 长期不同施肥稻田土壤FAA组分及其含量

Figure 3 The FAA compositions and contents of paddy field in different long-term fertilization treatments

3 讨论

3.1 长期不同施肥对稻田土壤SON剖面分异的影响

土壤SON主要来源于有机质分解、土壤微生物代谢、根系分泌及肥料投入等^[6]。有研究表明,施用有机肥能增加土壤有机质含量,提高土壤微生物量和相关土壤酶活性^[19]。本研究表明长期施肥能不同程度地提高稻田各土层SON含量,但以0~20 cm土壤SON含量提高更为明显。这主要是因为连年施入的肥料及作物残体积累于耕层,导致供试稻田0~20 cm土壤有机质含量明显增加,为土壤微生物繁殖和活动提供了营养和能量,土壤MBN、蛋白酶活性和谷氨酰胺酶活性显著高于20~40 cm和40~60 cm土壤(表2),从而促进0~20 cm土壤中复杂有机氮矿化形成SON;此外,水稻根系主要分布于0~20 cm土壤中,根系分泌物也可为该土层土壤提供SON来源,进而导致0~20 cm土壤SON含量显著高于20~40 cm和40~60 cm土壤。

在0~20 cm土壤中,单施化肥与CK处理相比未能显著提高SON含量($P<0.05$),而NPKS和NPKM处理的SON含量则显著高于NPK和CK处理,这是因为单施化肥处理虽然能较显著提高土壤微生物量和谷氨酰胺酶活性,但对土壤SON含量具有显著影响的土壤有机质含量和蛋白酶活性与CK处理相比则差异不显著,而长期配施秸秆和牛粪等有机物料,可为土壤持续提供外源有机质,不仅显著提高了土壤有机质含量,而且显著提高了土壤微生物生物量、蛋白酶和谷氨酰胺酶活性,致使NPKM和NPKS处理土壤中存在数量较多的大分子有机氮在土壤微生物和蛋白酶等作用下向SON转化^[20]。此外,长期施用有机肥可使土壤疏松多孔、容重降低(表2),进而提高有机氮的矿化率,有利于SON的形成^[21]。单施化肥处理的氮素投入量也明显低于NPKS和NPKM处理(表1),且输入的化肥氮易被水稻吸收并经过各种途径损失^[22],致使单施化肥处理的土壤SON含量较CK处理虽有所增加,但差异未达到显著水平,因此单施化肥并不能明显提高土壤SON含量。本研究还表明秸秆配施(NPKS)对土壤SON含量的影响更为显著,较牛粪配施(NPKM)提高30.0%,这主要是由于输入的有机物料组成成分及其分解速率不同所致,牛粪中多含氨基酸、脂肪酸、多糖等易矿化的小分子化合物^[23],在土壤中易被微生物矿化为无机氮;而水稻秸秆的主要成分为难分解的纤维素、半纤维素和木质素等,回田120 d后水稻秸秆的腐解量仅为54.58%~26.76%^[24],有相当

一部分的复杂有机氮会滞留于土壤中,故长期施肥条件下NPKS处理的外源有机氮易在土壤中积累,从而在土壤微生物作用下增加SON的形成。

受不同施肥处理输入土壤的物质组分及其数量差异以及SON在土壤中淋溶特性的影响,不同施肥处理对不同土层SON的影响程度也各异,0~20 cm的不同施肥处理土壤SON含量差异较为显著,而20~40 cm和40~60 cm土壤SON含量差异则不显著,这是由于供试的灰黄泥田上下土层质地类型均为重壤土,土壤较为黏重,长期施肥虽然显著降低表层土壤的容重,但20~40 cm和40~60 cm土层的容重仍较大(1.46~1.53 g·cm⁻³),土壤通气和毛管孔隙度较低(分别为4.6%~9.1%和34.2%~38.2%),土层较为紧实,SON的淋溶作用较弱,致使NPKS、NPKM和NPK处理20~40 cm和40~60 cm土壤的SON含量虽然略高于CK,但差异未达显著水平。

土壤SON是氮库中较为活跃的组分之一,SON与TSN的比例对土壤氮素的转化、迁移和供应有重要影响^[25]。本研究发现不同施肥处理0~20、20~40 cm和40~60 cm土层SON/TSN的均值大于50%,即长期不同施肥处理下供试稻田土壤SON与TIN含量基本相当,且20~40 cm土层SON的含量高于TIN,表明SON可能比可溶性无机氮更易于向下迁移而积累于20~40 cm土层。因此,农田生态系统中氮素以SON形态淋溶流失造成的面源污染应得到高度关注。

3.2 长期不同施肥对稻田土壤FAA及组分割面分异的影响

土壤环境中FAA与矿质氮一样,均可被植物和微生物直接吸收利用,其在土壤中的含量可以反映土壤氮素供应情况^[26]。本研究中长期不同施肥处理对0~20 cm土壤FAA含量影响显著($P<0.05$),表现为NPKS=NPKM>NPK>CK,这是因为有机物料施入土壤后,输入的含氮有机物在土壤微生物和相关酶的作用下通过解聚作用分解成小分子的SON^[20],SON进一步分解产生FAA,致使NPKS和NPKM处理的FAA含量显著高于NPK和CK处理;而NPK处理中由于有N素的投入,N可以经微生物和酶的作用进一步合成FAA^[27],致使NPK处理的FAA含量也高于CK处理。从不同土层FAA含量差异来看,FAA含量随土层加深呈递减趋势,其中0~20 cm土壤FAA含量显著高于20~40 cm和40~60 cm土壤($P<0.05$);而20~40 cm与40~60 cm土壤FAA含量间无显著差异($P<0.05$),这与土壤SON的分布状况一致(图1)。随着土层的加

深,FAA含量占SON的比例也呈递减趋势,表明施肥对土壤FAA的影响主要表现在0~20 cm土壤。研究表明土壤中FAA可被植物和微生物迅速吸收和转化^[5],故FAA不会在土壤中大量积累,相较于SON中分子量较大的非FAA类含N有机物而言,FAA并非是土壤SON迁移淋失的主体,故20~60 cm土壤中FAA/SON的值较0~20 cm低。因此,FAA迁移所致的环境效应主要存在于耕层土壤。

从具体的FAA种类来看,与CK和NPK处理相比,有机无机配施使0~20 cm土壤中增加了3种碱性FAA(鸟氨酸、赖氨酸和精氨酸),其余FAA组分的含量除亮氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸和脯氨酸稍有减少外,均有大幅度增加。与CK处理相比,NPK处理除丝氨酸和胱氨酸含量稍有减少外,其余FAA组分的含量均呈增加趋势。在20~40 cm和40~60 cm土壤中,与CK处理相比,施肥处理分别增加了3种中性FAA(缬氨酸、胱氨酸和苯丙氨酸)和2种中性FAA(胱氨酸和异亮氨酸),且各组分FAA含量都有增加,导致施肥处理的FAA总量大于CK处理,但不同处理间差异性并不显著,这可能是由于有机物料直接施入耕层土壤中,而20~60 cm土壤容重较大(表2),导致有机物料难以进入该土层,从而导致对该土层虽然有影响但效果不显著。

从单一种FAA来看,不同施肥处理0~20 cm土壤丝氨酸、甘氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、胱氨酸、酪氨酸、蛋氨酸、磷酸丝氨酸、羟脯氨酸、天冬酰胺和谷氨酸含量均表现为有机无机配施较NPK和CK处理高,且有机无机配施土壤中出现3种碱性氨基酸(鸟氨酸、赖氨酸和精氨酸)。研究表明,土壤中FAA受较少的几种相对丰富的FAA所控制^[28]。在本研究中,NPK和CK处理的相对丰富的FAA种类基本相似,均为丝氨酸、肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、苏氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸和天冬酰胺(除NPK处理中多了异亮氨酸),但NPK处理($9.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)中相对丰富的FAA含量总和高于CK处理($6.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。NPKM和NPKS处理中相对丰富的FAA种类也相似,均为丝氨酸、肌氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、酪氨酸、蛋氨酸、磷酸丝氨酸、羟脯氨酸、天冬酰胺和谷氨酸,但NPKS处理($14.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)中相对丰富的氨基酸含量总和高于NPKM处理($14.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。在自然土壤溶液或浸提液中,一般以丙氨酸、谷氨酸、甘氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、丝氨酸、色氨酸和缬氨酸为主^[7],李世清等^[29]研究不同生态系统土壤FAA组成

时发现赖氨酸、甘氨酸、天门冬氨酸、丙氨酸、谷氨酸、精氨酸、缬氨酸、苏氨酸和亮氨酸等为主要氨基酸。在本研究中,CK和NPK处理土壤中主要FAA与已有研究结果相似,而NPKM和NPKS处理中蛋氨酸、磷酸丝氨酸和羟脯氨酸也为主要FAA,4个处理中,肌氨酸含量均较为丰富,同时在20~60 cm土壤中,肌氨酸含量也相对较高,造成这一现象的原因尚不明晰。研究表明微生物在土壤FAA形成中起主要作用^[30],施用的有机肥可以为蛋氨酸、磷酸丝氨酸和羟脯氨酸的合成提供原料。土壤中FAA的组成、产生和降解是一个复杂的动态变化过程,对单一氨基酸含量变化及其机理还有待进一步研究。

根据Campbell等^[31]的分类,本研究中不同处理不同深度土壤FAA组成均以中性氨基酸占优势,究其原因可能是本研究中土壤呈中性至酸性(表2),土壤中的碱性氨基酸很快会被分解或中和^[32]。李世清等^[29]对不同生态系统12个土样的研究也发现中性氨基酸占氨基酸总量比例最大。在0~20 cm土壤中包含酸性、中性和碱性氨基酸,但化学稳定性较低的碱性氨基酸(鸟氨酸、赖氨酸、精氨酸)仅存在于NPKM和NPKS处理土壤,推测可能是有机肥的配施增加了土壤有机质含量,从而为碱性氨基酸的合成提供了物料来源,即使化学性质不稳定但因为储量大,在动态变化中的碱性氨基酸仍能存在于土壤中。

4 结论

(1)长期不同施肥处理对水稻土SON含量的剖面分异具有一定影响,但对0~20 cm土壤SON和FAA的影响较20~40 cm和40~60 cm土壤更为显著($P < 0.05$);同一土层的有机无机施肥处理SON含量均显著高于化肥和对照处理。

(2)长期不同施肥处理对水稻土的FAA种类及其含量的剖面分异影响较明显,不同施肥处理均以0~20 cm土壤的FAA/SON比例较大(31.9%~39.2%)。

(3)有机无机施肥处理可以增加不同深度土壤的FAA种类,不同施肥处理不同深度土壤FAA组成均以中性氨基酸占优势,但化肥配施牛粪和秸秆可使0~20 cm土壤中存在3种易分解的碱性氨基酸(鸟氨酸、赖氨酸和精氨酸)。因此,不同施肥对水稻土SON和FAA均具有一定影响,但有机无机配施的影响更为显著。

参考文献:

[1] 赵路红,李昌珍,康迪,等.黄土丘陵区退耕地土壤可溶性氮组分

- 季节变化与水热关系[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 689-697.
- ZHAO Lu-hong, LI Chang-zhen, KANG Di, et al. Dynamic change in soil soluble nitrogen under farmland converted to forest in the loess hilly region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 689-697.
- [2] 周碧青, 陈成榕, 杨文浩, 等. 茶树对可溶性有机和无机态氮的吸收与运转特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 189-195.
- ZHOU Bi-qing, CHEN Cheng-rong, YANG Wen-hao, et al. Uptake and transport characteristics of soluble organic and inorganic nitrogen by tea plant[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 189-195.
- [3] Kessel C V, Clough T, Groenigen J W V. Dissolved organic nitrogen: An overlooked pathway of nitrogen loss from agricultural systems? [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2): 393-401.
- [4] Paul J P, Williams B L. Contribution of α -amino N to extractable organic nitrogen (DON) in three soil types from the Scottish uplands[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(4): 801-803.
- [5] 曹小闯, 吴良欢, 马庆旭, 等. 高等植物对氨基酸态氮的吸收与利用研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 919-929.
- CAO Xiao-chuang, WU Liang-huan, MA Qing-xu, et al. Advances in studies of absorption and utilization of amino acids by plants: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 919-929.
- [6] 张亚亚, 李军, 郭颖, 等. 土壤可溶性有机氮的研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1661-1669.
- ZHANG Ya-ya, LI Jun, GUO Ying, et al. Soluble organic nitrogen in soil: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(6): 1661-1669.
- [7] Perez P G, Zhang R, Wang X L, et al. Characterization of the amino acid composition of soils under organic and conventional management after addition of different fertilizers[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 890-901.
- [8] 郝小雨, 马星竹, 高中超, 等. 长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4707-4716.
- HAO Xiao-yu, MA Xing-zhu, GAO Zhong-chao, et al. Variation characteristics of fractions of active nitrogen and organic nitrogen under different long-term fertilization practices in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4707-4716.
- [9] 王媛, 周建斌, 杨学云. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1173-1180.
- WANG Yuan, ZHOU Jian-bin, YANG Xue-yun. Effects of different long-term fertilization on the fractions of organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(6): 1173-1180.
- [10] 富东英, 田秀平, 薛菁芳, 等. 长期施肥与耕作对白浆土有机态氮组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1127-1131.
- FU Dong-ying, TIAN Xiu-ping, XUE Jing-fang, et al. Effects of long-term culture fertilization and tillage patterns on the speciation of organic nitrogen in albic soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1127-1131.
- [11] 张宏威, 康凌云, 梁斌, 等. 长期大量施肥增加设施菜田土壤可溶性有机氮淋溶风险[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 99-107.
- ZHANG Hong-wei, KANG Ling-yun, LIANG Bin, et al. Long-term heavy fertilization increases leaching risk of soil soluble organic nitrogen in vegetable greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(21): 99-107.
- [12] 李贤红, 陈为峰, 宋希亮, 等. 垦殖对黄河三角洲盐渍土碳氮分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 1018-1027.
- LI Xian-hong, CHEN Wei-feng, SONG Xi-liang, et al. Effects of reclamation on distribution of soil carbon and nitrogen in saline soil of the Yellow River Delta[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4): 1018-1027.
- [13] 万丹, 梁博, 聂晓刚, 等. 西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带性[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1065-1074.
- WAN Dan, LIANG Bo, NIE Xiao-gang, et al. Research on vertical zonation of soil physical properties in Sygera Mountain, Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1065-1074.
- [14] 郭京霞, 冯莲莲, 张起佳, 等. 不同钙质钝化剂对稻田土壤溶液中Cd浓度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 1984-1991.
- GUO Jing-xia, FENG Lian-lian, ZHANG Qi-jia, et al. Effects of limestone, slaked lime and dolomite on cadmium concentration in the solution of paddy rice soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 1984-1991.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 302-309.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 302-309.
- [16] 陈果, 刘岳燕, 姚槐应, 等. 一种测定淹水土壤中微生物生物量碳的方法: 液氮熏蒸浸提-水浴法[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 981-988.
- CHEN Guo, LIU Yue-yan, YAO Huai-ying, et al. A method for measuring microbial biomass c in waterlogged soil: Chloroform fumigation extraction-water bath method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 981-988.
- [17] Chen C R, Xu Z H, Zhang S L, et al. Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical Australia[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277(1/2): 285-297.
- [18] 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 Xin-chun, CAO Yu-song, XING Shi-he. Composition of soil free amino acid and its difference in three plantations in southern China[J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Sciences)*, 2013, 37(3): 310-315.
- [19] Piaszczyk W, Błońska E, Lasota J. Study on the effect of organic fertilizers on soil organic matter and enzyme activities of soil in forest nursery[J]. *Soil Science Annual*, 2017, 68(3): 125-131.
- [20] Geisseler D, Horwath W R, Joergensen R G, et al. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(12): 2058-2067.
- [21] 邵兴芳, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 326-335.
- SHAO Xing-fang, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, et al. Changes of soil carbon and nitrogen and characteristics of nitrogen mineralization

- under long-term manure fertilization practices in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2):326-335.
- [22] 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.
- [23] 吴景贵, 吕岩, 王明辉, 等. 有机肥腐解过程的红外光谱研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3):259-266.
WU Jing-gui, LÜ Yan, WANG Ming-hui, et al. Study on decomposition of organic fertilizers by FTIR[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3):259-266.
- [24] 胡宏祥, 马中文, 邵致远. 还田秸秆腐解特征研究[J]. *湖南农业科学*, 2012(5):44-46.
HU Hong-xiang, MA Zhong-wen, SHAO Zhi-yuan. Decomposition characteristics of returned straw[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(5):44-46.
- [25] 杨绒, 周建斌, 赵满兴. 土壤中可溶性有机氮含量及其影响因素研究[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1):15-18.
YANG Rong, ZHOU Jian-bin, ZHAO Man-xing. Contents of soluble organic nitrogen in soil and its influencing factor[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1):15-18.
- [26] Feng Y L, Wang J, Yuan K, et al. Vegetation affects pool size and composition of amino acids in Tibetan alpine meadow soils[J]. *Geoderma*, 2018, 310:44-52.
- [27] 曹小闯, 钟楚, 马庆旭, 等. 不同典型地带性土壤氮素分布特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3):688-696.
CAO Xiao-chuang, ZHONG Chu, MA Qing-xu, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen and its influence factors in different typical zonal soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3):688-696.
- [28] 张小静, 王文颖, 李文全, 等. 高寒草甸土壤可溶性有机氮库动态变化格局[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(5):623-627.
ZHANG Xiao-jing, WANG Wen-ying, LI Wen-quan, et al. Dynamic of soil dissolved organic nitrogen in alpine meadow[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2016, 52(5):623-627.
- [29] 李世清, 李生秀, 杨正亮. 不同生态系统土壤氨基酸氮的组成及含量[J]. *生态学报*, 2002, 22(3):379-386.
LI Shi-qing, LI Sheng-xiu, YANG Zheng-liang. Constituent and amount of amino acid in different ecological system soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3):379-386.
- [30] Sowden F J, Chen Y, Schnitzer M. The nitrogen distribution in soils formed under widely differing climatic conditions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41(10):1524-1526.
- [31] Campbell C A, Zentner R P, Knipfel J E, et al. Thirty-year crop rotations and management practices effects on soil and amino nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(3):739-745.
- [32] 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 Xing, CUI Xiao-yang, GUO Ya-fen. 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.