

长期不同施肥模式对大麦-双季稻田根际土壤有机氮组分的影响^①

郭勇¹, 文丽², 石丽红², 张腊梅³, 程凯凯², 李超², 郑华斌¹, 唐海明^{2*}

(1 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 3 宁乡市农业农村局, 湖南宁乡 410600)

摘要: 根际土壤有机氮组分在土壤养分和作物氮素营养中具有重要作用。本研究依托长期(37年)定位施肥试验田, 设置4个施肥处理: 不施肥对照(CK)、单独施用化肥(CF)、秸秆还田+化肥(RF)和30%有机肥+70%化肥(OM), 于晚稻成熟期测定大麦-双季稻田根际土壤基础理化性质、微生物生物量氮和有机氮组分(氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸解氨态氮、酸解未知态氮、非酸解性氮)含量。研究表明: 相对CK处理, RF和OM处理显著增加了稻田根际土壤有机碳、全氮、铵态氮和硝态氮的含量。RF和OM处理土壤微生物生物量氮含量分别比CK处理增加了19.8%和30.7%。酸解性氮作为根际土壤全氮的主体部分, 占全氮的59.61%~72.06%; 各处理根际土壤酸解性氮含量大小顺序表现为OM>RF>CF>CK。各施肥处理中, 酸解有机氮中的氨基糖态氮、氨基酸态氮和酸解未知态氮含量均以OM处理最大, 分别比CK处理增加139.3%、47.9%和110.0%; 酸解氨态氮以RF处理最大, 比CK处理增加69.9%。土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮与土壤氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸解未知态氮以及微生物生物量氮均呈极显著($P<0.01$)正相关。因此, 秸秆、有机肥配施化肥均能有效提高大麦-双季稻田根际土壤的供氮能力, 是改善稻田土壤肥力的有效手段。

关键词: 长期施肥; 双季稻; 根际土壤; 有机氮组分; 酸解性氮

中图分类号: S158 文献标志码: A

Effects of Long-term Application of Fertilizers on Rhizosphere Soil Organic Nitrogen Fraction in Barley-Double Cropping Rice Field

GUO Yong¹, WEN Li², SHI Lihong², ZHANG Lamei³, CHENG Kaikai², LI Chao², ZHENG Huabin¹, TANG Haiming^{2*}

(1 College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2 Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China; 3 Ningxiang Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Ningxiang, Hunan 410600, China)

Abstract: Rhizosphere soil organic nitrogen (SON) fraction play an important role in soil nutrients and crop nitrogen (N) nutrition. This study was based on a long-term (37 years) located fertilization experimental field, including four fertilization treatments: without fertilizer input as a control (CK), chemical fertilizer alone (CF), rice straw residue and chemical fertilizer (RF), and 30% organic manure and 70% chemical fertilizer (OM). At the maturity stage of late rice, the rhizosphere soil basic physiochemical properties, microbial biomass N (MBN) and SON fractions, including amino acid N, amino sugar N, ammonia N, hydrolysable unknown N, non-hydrolysable N in barley-double cropping rice field were determined. The results indicated that RF and OM significantly increased the contents of soil organic carbon (SOC), total N, ammonium N and nitrate N in rhizosphere soil compared to CK. Soil MBN content was significantly increased by 19.8% and 30.7% under RF and OM, respectively, compared to CK. Rhizosphere soil acid hydrolyzable N was the main component of soil total N, accounting for 59.61%–72.06% of total N. The content of acid hydrolyzable N in rhizosphere soil was in order of OM>RF>CF>CK. Soil amino sugar N, amino acid N and hydrolysable unknown N contents were found significantly highest under OM, increased by 139.3%, 47.9% and 110.0%, respectively, compared to CK. Soil ammonia N content was significantly highest under RF, with an increase of 69.9% over CK. SOC, total N, ammonium N and nitrate N contents all showed a significantly positive correlation with soil amino acid N, amino sugar N, hydrolysable unknown N and MBN contents. Therefore, the application of rice straw or organic manure and chemical

①基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2022JJ40232)和湖南省土壤肥料研究所所长基金项目(2022tfs201, 2022tfs101)资助。

* 通讯作者(tanghaiming66@163.com)

作者简介: 郭勇(2000—), 男, 湖南隆回人, 硕士研究生, 主要从事耕作生态与土壤培肥研究。E-mail: guoyong2000@outlook.com

fertilizer is an effective practice for improving soil fertility, which can effectively increase the capacity of rhizosphere soil N supply in barley-double cropping rice field.

Key words: Long-term fertilization; Double cropping rice; Rhizosphere soil; Organic nitrogen fraction; Acid hydrolyzable nitrogen

氮是限制土壤生产力重要的营养元素^[1], 农田生态系统氮素主要来源于施用的化肥和有机肥料。然而现阶段我国作物生产主要依赖于化肥, 并且农户为追求农田高产, 常常过量施用化肥, 降低了肥料利用效率, 肥料养分利用率低的连带效应是给环境带来不良影响, 如氮肥的渗漏和地表径流引起的地下水污染和富营养化作用、温室气体 N_2O 排放增加、大气氮沉降量升高等^[2-3]。我国有机肥料年产实物量约 57 亿 t, 能够提供氮磷钾 ($N+P_2O_5+K_2O$) 总养分约 7 300 万 t, 其中 N 约 3 000 万 t、 P_2O_5 约 1 300 万 t、 K_2O 约 3 000 万 t^[4]。合理利用有机肥料替代部分化肥对保护生态和优化农业生产氮肥投入具有重要意义。有机肥有利于土壤氮素的积累和土壤供氮潜力的提高^[5]。同时, 秸秆还田能为土壤中的微生物提供丰富的碳源, 增强微生物活性, 提高土壤氮素有效性和土壤肥力^[6]。因此, 施用有机肥和秸秆还田均有利于改善土壤有机质和土壤生产力, 促进农业的可持续发展^[7-9]。

土壤氮素通过微生物的同化作用后大部分以有机氮的形式存在于土壤中, 继而通过微生物作用形成较稳定的有机氮, 因此, 土壤中氮的输入量和种类对土壤有机氮组分有重要的影响。根据 Bremner 酸水解分级方法, 土壤有机氮组分包括土壤酸解性氮和非酸解性氮, 而酸解性氮组分包括酸解氨态氮、氨基酸态氮、氨基糖态氮和酸解未知氮^[10]。它们的形态和有效性在农田土壤氮素保持和氮素供应中起着关键作用。目前已有大量研究发现, 土壤有机氮组分与土地利用方式、耕作、施肥和灌溉等关系密切^[11-14], 肥料是农田土壤有机氮的主要来源, 它对土壤有机氮组分的含量及分配有重要影响。吴多基等^[1]的研究表明, 长期有机肥替代部分化肥能有效提高红壤性水稻土酸解氨态氮和氨基糖态氮的含量。董姝含等^[15]研究发现, 秸秆还田有利于提高土壤总氮和各酸解氮的含量, 以及土壤酸解态氮占土壤总氮的比例, 但降低了未酸解态氮占土壤总氮的比例。但也有研究发现施用有机肥反而降低了土壤氨基糖态氮的含量^[16-17]。Tian 等^[18]认为, 在撂荒地添施氮肥能够增加土壤氨基糖态氮含量, 但降低了土壤氨基酸态氮含量。张电学等^[19]发现, 化肥氮主要进入土壤酸解氨态氮和氨基酸态氮库, 而有机肥料氮则主要进入土壤氨基酸态氮库。因

此, 土壤有机氮组分变化对不同施肥模式的响应不同, 目前没有得到统一的响应规律。

根际作为作物-土壤-微生物三者相互作用的土壤微域, 是作物和土壤进行物质和能量交换的重要界面^[20]。近年来, 部分学者开展了不同施肥措施(制度)对双季稻田土壤有机碳、氮组分和微生物群落功能多样性等方面影响的研究^[16,21-22], 但在大麦-双季稻周年多熟制条件下, 关于稻田根际土壤有机氮组分变化对长期施肥的响应还有待进一步开展研究。因此, 本文以南方双季稻主产区典型水稻土长期定位施肥试验田为平台, 开展长期不同施肥措施对大麦-双季稻种植方式下晚稻成熟期稻田根际土壤有机氮组分影响的研究, 其研究结果对于选择施肥模式、改善稻田土壤生产力具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于湖南省双季稻主产区宁乡市农技推广中心(28°07'52.55"N, 112°18'47.84"E), 该地海拔 36.1 m, 年均气温、年均降水量和蒸发量分别为 16.8 °C、1 553.70 mm 和 1 353.9 mm, 无霜期为 274 d。试验田土壤为水稻土, 中等土壤肥力, 种植制度为大麦-双季稻。1986 年该定位试验开始前稻田 0~20 cm 土壤的理化特性为: 有机质 29.39 g/kg、全氮 2.01 g/kg、全磷 0.59 g/kg、全钾 20.6 g/kg、有效磷 12.87 mg/kg、速效钾 33.0 mg/kg、碱解氮 144.1 mg/kg、pH 6.85。

1.2 试验设计与田间管理

长期定位施肥试验设 4 个处理: ①氮磷钾化肥处理(CF); ②稻草秸秆还田+化肥处理(RF); ③30% 有机肥+70% 化肥处理(OM); ④不施肥对照处理(CK)。每处理 3 次重复, 每个小区面积 66.7 m² (长 10 m, 宽 6.67 m), 各小区间水泥埂隔开, 田埂比稻田表面高出 35 cm, 埋深 100 cm, 保证小区间不渗漏, 能独立排灌。

各处理以等氮量为基准, 不足的氮磷钾用化肥补足, 确保每一年早稻和晚稻季各施肥处理 N、 P_2O_5 和 K_2O 总施用量均一致。早稻生育期: CF、RF 和 OM 处理 N、 P_2O_5 和 K_2O 量分别为 142.5、54.0 和 63.0 kg/hm²; 晚稻和大麦生育期: CF、RF 和 OM 处理 N、 P_2O_5

和 K_2O 量分别为 157.5、43.2 和 81.0 kg/hm^2 。OM 处理施用有机肥为腐熟鸡粪，早稻、晚稻和大麦季，OM 处理有机肥施用量分别为 2 625.0、2 670.0 和 $2 670.0 \text{ kg/hm}^2$ (N 1.77%、 P_2O_5 0.80% 和 K_2O 1.12%)。RF 处理早稻、晚稻和大麦季秸秆还田量分别为 2 850.0、3 000.0 和 $3 000.0 \text{ kg/hm}^2$ (N 9.1%、 P_2O_5 1.3% 和 K_2O 18.9%)。各施肥处理 N 和 K_2O 作基肥和追肥 2 次施入，基肥在耕地时施入，早稻和晚稻的追肥均在移栽后 7~10 d 施用，大麦追肥在分蘖期施用，基、追肥比例均按 7:3 施用；有机肥、秸秆和 P_2O_5 均在耕地时作基肥一次性施入。早、晚稻均采用人工移栽，移栽行株距均为 $25.0 \text{ cm} \times 25.0 \text{ cm}$ 。其他管理措施同常规的大田生产。

1.3 土壤样品采集

在 2022 年晚稻成熟期，采集 CK、CF、RF 和 OM 4 个施肥处理水稻根际土壤样品。采用“抖根法”进行根际土壤样品的采集：将水稻根系从土壤中挖出，仔细剥离根系外围土壤，收集粘附在根系周围 (0~4 mm) 的土壤作为根际土壤样品，每个小区选择 15 穴水稻根际土壤组成一个样品，将样品充分混匀，重复 3 次。土壤混合均匀后，部分土壤装自封袋，置于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱用于铵态氮、硝态氮和微生物生物量氮测定；另一部分土壤，于室内风干后过 2 mm 筛用于理化性质和土壤有机氮组分的测定。

1.4 土壤样品测定

根据鲍士旦^[23]的方法测定土壤 pH、全氮、铵态氮、硝态氮和有机碳含量。土壤微生物生物量氮的测定采用氯仿熏蒸法^[24]。对土壤样品进行室内恒温培养试验，土壤有机氮组分采用 Bremner 法^[10]测定，其中：酸解性氮采用凯氏法测定；酸解氨态氮采用 MgO 氧化蒸馏法测定；酸解氨态氮+氨基糖态氮采用

磷酸-硼砂缓冲液(pH 11.2)蒸馏法测定，而氨基糖态氮为酸解氨态氮及氨基糖态氮与酸解氨态氮的差值；氨基酸态氮采用茚三酮氧化、磷酸-硼砂缓冲液蒸馏法测定；非酸解性氮和酸解未知氮均用差减法获得，非酸解性氮=全氮-酸解性氮，酸解未知态氮=酸解性氮-酸解氨态氮-氨基酸态氮-氨基糖态氮。

1.5 数据处理

各测定指标分析前均进行了方差齐性和正态性分布检验。使用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析，采用最小显著差数检验法 (LSD 法, $\alpha=0.05$) 进行多重比较。采用 Pearson 法对土壤有机氮组分、微生物生物量氮与 pH、全氮、有机碳、铵态氮、硝态氮的关系进行相关性分析。图、表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 根际土壤理化性质和微生物生物量氮

由表 1 可知,长期不同施肥处理对根际土壤理化性质具有明显的影响。相比无肥对照(CK)处理,化肥(CF)、秸秆还田+化肥(RF)和 30%有机肥+70%化肥(OM)处理均提高了根际土壤 pH,但 CK、CF、RF 和 OM 处理间土壤 pH 均无显著性差异。OM 和 RF 处理根际土壤全氮和有机碳含量均显著($P<0.05$)高于 CK 和 CF 处理,CK 和 CF 处理间根际土壤全氮和有机碳含量均无显著性差异。与 CK 处理相比,OM 和 RF 处理根际土壤全氮含量分别增加了 66.5% 和 26.0%。OM 处理根际土壤 C/N 显著低于 CK、CF 和 RF 处理,CK、CF 和 RF 处理间土壤 C/N 均无显著性差异。此外,长期不同施肥处理显著($P<0.05$)提高了根际土壤铵态氮和硝态氮含量,其中以 OM 处理的土壤铵态氮和硝态氮含量最高,分别比 CK 处理增加 100.0% 和 115.4%。

表 1 长期施肥处理下根际土壤理化性质
Table 1 Physiochemical properties of rhizosphere soils under different long-term fertilization treatments

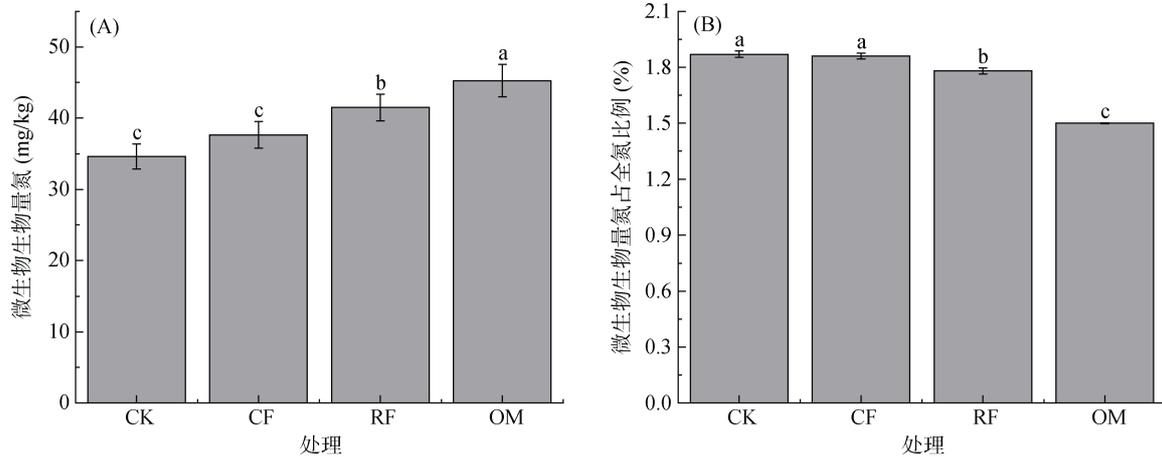
处理	pH	全氮(g/kg)	有机碳(g/kg)	C/N	铵态氮(g/kg)	硝态氮(g/kg)
CK	6.22 \pm 0.33 a	1.85 \pm 0.09 c	19.67 \pm 1.00 c	10.63 \pm 0.10 a	0.13 \pm 0.01 d	0.13 \pm 0.01 d
CF	6.33 \pm 0.32 a	2.02 \pm 0.11 c	21.42 \pm 1.13 c	10.59 \pm 0.06 a	0.17 \pm 0.01 c	0.17 \pm 0.01 c
RF	6.70 \pm 0.34 a	2.33 \pm 0.13 b	24.83 \pm 1.24 b	10.66 \pm 0.05 a	0.21 \pm 0.01 b	0.21 \pm 0.02 b
OM	6.82 \pm 0.34 a	3.03 \pm 0.16 a	29.63 \pm 1.49 a	9.79 \pm 0.02 b	0.26 \pm 0.01 a	0.28 \pm 0.02 a

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)；下同。

由图 1A 可知,各施肥处理根际土壤微生物生物量氮含量为 32.89~47.53 mg/kg,平均为 39.76 mg/kg。长期不同施肥处理提高了根际土壤的微生物生物量氮含量,以 OM 处理最高,RF 次之;CF 处理土壤微

生物生物量氮含量比 CK 处理增加 8.69%,但二者间无显著性差异;而 RF 和 OM 处理土壤微生物生物量氮含量均显著($P<0.05$)高于 CK 处理,分别比 CK 处理增加 19.8% 和 30.7%。

土壤微生物生物量氮占全氮的比例在不同施肥处理间的变化如图 1B 所示。结果表明,各施肥处理的土壤微生物生物量氮占全氮的比例与微生物生物量氮的大小变化顺序相反。CK 和 CF 处理的微生物生物量氮占全氮的比例均显著($P<0.05$)高于 RF 和 OM 处理,而 RF 和 OM 处理间无显著性差异。各施肥处理微生物生物量氮占全氮的比例大小顺序表现为 CK>CF>RF>OM。



(图柱上方小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$))

图 1 长期施肥处理下根际土壤微生物生物量氮含量(A)和微生物生物量氮占全氮的比例(B)

Fig. 1 MBN contents of rhizosphere soils (A) and proportions to total nitrogen (B) under different long-term fertilization treatments

表 2 长期施肥处理下根际土壤酸解性氮和非酸解性氮含量及占土壤全氮比例

Table 2 Contents of acid hydrolysable nitrogen and non-hydrolysable nitrogen of rhizosphere soils and proportions to total soil nitrogen under different long-term fertilization treatments

处理	酸解性氮		非酸解性氮	
	含量(mg/kg)	比例(%)	含量(mg/kg)	比例(%)
CK	1 101.1 ± 13.2 d	59.61 ± 2.34 b	748.9 ± 8.9 b	40.39 ± 2.34 a
CF	1 220.2 ± 27.4 c	60.46 ± 3.71 b	803.2 ± 13.2 b	39.54 ± 3.71 a
RF	1 675.5 ± 19.3 b	72.06 ± 3.53 a	654.5 ± 13.7 b	27.96 ± 3.53 b
OM	1 848.5 ± 25.2 a	61.15 ± 2.05 b	1 178.2 ± 13.6 a	38.85 ± 2.05 a

根际土壤非酸解性氮含量变化范围为 654.5 ~ 1 178.2 mg/kg, 占土壤全氮的 27.96% ~ 40.39%。各施肥处理间根际土壤非酸解性氮含量表现为 OM>CF>CK>RF。相对 CF、CK 和 RF 处理, OM 处理土壤非酸解性氮含量显著($P<0.05$)增加, 增幅分别达 14.4%、22.7% 和 57.3%。RF 处理土壤非酸解性氮占土壤全氮的比例(27.96%)显著($P<0.05$)低于 CK、CF 和 OM 处理。

2.3 根际土壤酸解性氮组分含量

2.3.1 氨基酸态氮 4 种施肥处理根际土壤氨基酸态氮含量变化范围为 420.1 ~ 621.2 mg/kg, 占土壤全氮总量的 20.57% ~ 23.16% (表 3)。各施肥处理土壤氨基酸态氮含量大小顺序表现为 OM>RF>CF>CK。与

2.2 根际土壤酸解性氮和非酸解性氮含量

不同施肥处理对根际土壤酸解性氮影响如表 2 所示。4 种施肥处理土壤酸解性氮的含量范围为 1 101.1 ~ 1 848.5 mg/kg, 其大小顺序表现为 OM>RF>CF>CK。土壤酸解性氮占土壤全氮的 59.61% ~ 72.06%, RF 处理土壤酸解性氮占土壤全氮的比例最高(72.06%), OM 处理次之(61.15%)。

CK 处理相比, RF 和 OM 处理均显著($P<0.05$)增加了根际土壤氨基酸态氮含量, 尤以 OM 处理增加幅度最大(47.9%); 而 CF 处理土壤氨基酸态氮含量与 CK 处理间无显著性差异。

2.3.2 氨基糖态氮 各施肥处理根际土壤氨基糖态氮含量变化范围为 79.6 ~ 190.5 mg/kg, 占土壤全氮的 3.90% ~ 6.31% (表 3)。施肥对土壤氨基糖态氮含量产生了显著性影响($P<0.05$), 各施肥处理土壤氨基糖态氮含量大小顺序表现为 OM>CF>RF>CK。其中, 相对 CK 处理, OM 处理土壤氨基糖态氮含量增加幅度最大(139.3%), CF 处理次之(38.4%); RF 处理氨基糖态氮含量显著($P<0.05$)低于 CF 处理, RF 处理氨基糖态氮含量比 CF 处理降低 20.1 mg/kg(18.3%)。

表 3 长期施肥处理下根际土壤酸解性氮组分含量(mg/kg)及占土壤全氮比例(%)

Table 3 Contents of acid-hydrolyzable nitrogen components (mg/kg) of rhizosphere soils and proportions to total soil nitrogen (%) under long-term fertilization treatments

处理	氨基酸态氮		氨基糖态氮		酸解氨态氮		酸解未知态氮	
	含量	比例	含量	比例	含量	比例	含量	比例
CK	420.1 ± 27.0 c	22.70 ± 0.34 ab	79.6 ± 1.9 d	4.31 ± 0.13 b	261.2 ± 1.6 c	14.14 ± 0.61 b	340.2 ± 26.5 c	18.46 ± 1.88 b
CF	426.1 ± 14.6 c	21.09 ± 0.88 bc	110.2 ± 1.7 b	5.46 ± 0.28 a	310.3 ± 7.7 b	15.35 ± 0.42 b	373.6 ± 42.3 c	18.56 ± 2.49 b
RF	549.2 ± 14.3 b	23.61 ± 1.03 a	90.1 ± 1.9 c	3.90 ± 0.12 b	443.8 ± 15.9 a	19.09 ± 1.09 a	591.8 ± 19.7 b	25.47 ± 1.61 a
OM	621.2 ± 5.4 a	20.57 ± 0.98 c	190.5 ± 7.9 a	6.31 ± 0.47 a	322.4 ± 12.1 b	10.68 ± 0.75 c	714.3 ± 44.3 a	24.37 ± 0.38 a

2.3.3 酸解氨态氮 各施肥处理根际土壤酸解氨态氮含量变化范围为 261.2 ~ 443.8 mg/kg, 占土壤全氮的 10.68% ~ 19.09%(表 3)。相较 CK 处理, CF、RF 和 OM 处理均显著($P < 0.05$)增加了根际土壤酸解氨态氮的含量, 以 RF 处理增加幅度最大(69.9%), OM 处理次之(23.4%)。与 CF 处理相比, RF 处理根际土壤酸解氨态氮含量显著($P < 0.05$)增加了 43.02%, 但 OM 与 CF 处理间土壤酸解氨态氮含量无显著性差异。

2.3.4 酸解未知态氮 各施肥处理根际土壤酸解未知态氮含量变化范围为 340.2 ~ 714.3 mg/kg, 占土壤全氮含量的 18.46% ~ 25.47%(表 3)。与 CK 处理相比, CF、RF 和 OM 处理根际土壤酸解未知态氮含量分别增加了 9.8%、74.0% 和 110.0%。RF 和 OM 处

理的土壤酸解未知态氮占全氮的比例均显著($P < 0.05$)高于 CF 和 CK 处理, 且以 RF 处理最大(25.47%)。

2.4 根际土壤有机氮与土壤理化性质的关系

根际土壤有机氮组分与土壤理化性质相关性见表 4。氨基酸态氮、氨基糖态氮、酸解未知态氮、非酸解性氮、微生物生物量氮含量均与土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮含量呈显著正相关关系。此外, 土壤 pH 与土壤氨基酸态氮、酸解未知态氮、非酸解性氮和微生物生物量氮含量均呈显著正相关关系。土壤微生物生物量氮含量与土壤 pH、全氮、有机碳、铵态氮、硝态氮的相关系数最大; 在酸解性氮各组分中, 以氨基酸态氮与各土壤理化性质相关系数最大。

表 4 根际土壤有机氮与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlations between organic nitrogen and physicochemical properties of rhizosphere soils

指标	酸解性氮				非酸解性氮	微生物生物量氮
	氨基酸态氮	氨基糖态氮	酸解氨态氮	酸解未知态氮		
pH	0.705*	0.444	0.413	0.635*	0.637*	0.885**
全氮	0.932**	0.881**	0.226	0.913**	0.805**	0.955**
有机碳	0.946**	0.826**	0.370	0.927**	0.753**	0.982**
铵态氮	0.934**	0.809**	0.470	0.929**	0.672*	0.976**
硝态氮	0.940**	0.844**	0.417	0.932**	0.698*	0.968**

注: *, **分别表示相关性达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平。

3 讨论

3.1 长期施肥对根际土壤理化特性的影响

诸多研究结果表明, 添加有机物料有助于提高土壤有机碳和全氮含量, 进而提升土壤肥力^[16,19,21]。在本研究中, RF 和 OM 处理的根际土壤有机碳含量显著高于 CF 和 CK 处理, 这可能是由于有机物料(秸秆和有机肥)均含有丰富的碳基质, 长期施入有机物料会明显提高根际土壤中碳的还田量, 增加作物根系分泌物和土壤微生物活性, 有助于土壤活性有机碳的增加, 同时也有利于增强根际土壤碳素固持能力^[25];

另一方面可能是作物根系和微生物菌丝通过缠绕作用直接形成大团聚体, 稳定土壤结构, 缓解土壤有机碳的快速分解, 从而提高根际土壤有机碳含量^[26]。本研究发现, 相对 CK 处理, CF、RF 和 OM 处理根际土壤全氮含量均有不同程度的提高, 但 RF 和 OM 处理土壤全氮量提升效果显著高于 CF 处理, 这与大多数研究结果一致^[16,19,21]。其原因可能是: 一方面长期外源有机物料(秸秆和有机肥)的输入, 土壤氮源增加, 相应的土壤氮素可利用性也随之增强; 另一方面是有机物料较多的氮源和养分为土壤微生物的生长和繁殖提供了良好的营养环境, 尤其是与氮素利用相

关的固氮菌数量增加^[27], 相应的固氮速率增强, 提高了土壤氮素固持能力。因此, 长期采用秸秆、有机肥配施化肥在提高根际土壤碳氮储存方面的效果明显优于单施化肥处理。

土壤微生物生物量氮作为土壤氮库的敏感指标, 在土壤氮素循环与转化过程中起着重要的调节作用^[13]。目前已有大量研究发现施加不同肥料均在不同程度上影响土壤微生物生物量氮含量^[11,13,16]。本研究表明, 长期采用秸秆、有机肥配施化肥后土壤微生物生物量氮含量提升效果明显优于长期单施化肥处理。究其原因可能是长期采用有机物料(秸秆和有机肥)配施化肥后氮、磷、钾等营养元素均衡, 且所释放的养分能为根际微生物提供较多的能源与养分, 促进根际土壤微生物生长繁殖^[28], 提高土壤微生物量及其活性; 而单施化肥处理提供的速效养分不能长久保持, 同时不能为微生物生长繁殖提供足够的外来碳源和能源, 因此在土壤微生物生物量氮含量的提升效果上远不如长期采用有机物料配施化肥处理。此外, 根际自身的代谢活动会产生分泌物, 有助于根际土壤微生物生长和活动^[29], 增强了微生物固定矿质氮速率, 进而提高土壤微生物生物量氮含量。本研究发现, 相对 CK 和 CF 处理, RF 和 OM 处理均显著提高了根际土壤微生物生物量氮含量, 而土壤微生物生物量氮占全氮的比例与之正好相反, 造成这一现象的原因在于施用有机物料(有机肥和秸秆)下土壤全氮含量的增加幅度(25.95% ~ 63.78%)远高于土壤微生物生物量氮含量(19.83% ~ 30.70%)(表 1、图 1)。

3.2 长期施肥对根际土壤有机氮组分的影响

土壤有机氮组分含量及分配受不同施肥模式和肥料类型的影响^[14,30-31]。董姝含等^[30]的研究发现, 秸秆还田有利于土壤酸解性氮及各酸解有机氮组分含量的提高, 但对土壤非酸解性氮含量无显著的影响。李萌等^[5]在稻麦轮作条件下的研究表明, 猪粪替代氮肥可以提高土壤酸解性氮、氨基酸态氮和酸解未知氮的含量。本研究结果表明, 在长期(37年)定位施肥试验条件下, 长期采用秸秆、有机肥配施化肥后根际土壤有机氮及各组分含量均发生了明显变化。在相同试验处理条件下, 本研究中根际土壤酸解有机氮组分含量与石丽红等^[21]在非根际土壤上研究结果不一致, 这可能是因为根际土壤易受根际效应和根系活动的影响, 导致根际土壤微生物丰富度和活力均高于非根际土壤, 而土壤酸解性氮库处于动态平衡之中, 它的含量高低取决于土壤微生物矿化-同化过程对各组分的直接或间接影响^[31]。因此在根系分泌物及土壤微

生物协同作用下, 导致根际土壤有机氮组分向无机态氮转化速率高于非根际土壤, 而作物最先接触吸收利用根际土壤部分的速效氮, 从而造成根际土壤酸解性氮明显低于非根际土壤, 进而影响各酸解有机氮组分含量分配。在本研究中, 4种施肥处理根际土壤酸解性氮含量均高于非酸解性氮含量, 其中土壤酸解性氮含量以 OM 处理最大, 这与李世清等^[11]的研究结果一致, 说明土壤酸解性氮是土壤全氮的主要组成部分, 30% 有机肥处理有利于土壤酸解性氮含量增加。其原因可能是畜禽粪便类有机肥含有较多的氨基酸、脂肪酸和蛋白质, 长期施入土壤后通过根际微生物的作用成为土壤酸解性氮库的来源; 同时, 新形成土壤有机质腐殖化过程中也会提高土壤腐殖质对酸解性氮的固持^[21]。在酸解性氮组分中, 本研究发现, 与 CK 和 CF 处理相比, RF 和 OM 处理根际土壤酸解未知态氮含量的增加幅度均明显高于土壤氨基酸态氮、氨基糖态氮和酸解氨态氮含量(表 3), 表明秸秆和 30% 有机肥处理增加的土壤酸解性氮组分主要集中在分解程度较低的酸解未知氮上, 这与巨晓棠等^[17]的研究结果一致。这可能是由于酸解未知态氮包括了杂环态氮、土壤腐殖质化过程的产物和部分酸解未释放的固定态铵^[14], 长期添加外源肥料(秸秆和有机肥)增加了土壤酸解未知态氮来源的组分, 同时促进土壤微生物的数量和活性增加, 有助于有机氮各组分间相互转化, 在转化过程中可能产生了酸解未知态氮。本研究各施肥处理间, 根际土壤氨基酸态氮、氨基糖态氮和酸解未知态氮含量以 OM 处理最大, 这与前人的研究结果有所不同^[19]。造成这种差异的原因可能是不同畜禽粪便类有机肥 C/N 等性质差异显著, 施入土壤后改变了土壤环境, 根际土壤也受根际分泌物和根际微生物活动影响, 从而影响微生物同化的无机氮在易矿化有机氮库和难矿化有机氮库中的分配比例^[32], 进而造成土壤酸解有机氮各组分含量的不同。RF 处理根际土壤酸解氨态氮含量显著高于 CK、CF 和 OM 处理, 这可能是因为秸秆长期施入稻田土壤后, 其水解过程中会产生氨基酸和氨基糖等, 且秸秆具有吸附作用会吸附土壤中氮素产生吸附性铵^[33]; 同时配施化肥中的尿素作为酰胺态氮直接添加到土壤中, 会明显提高土壤中酰胺类化合物的含量, 上述物质均是土壤中酸解氨态氮的主要来源^[10]。在本研究中, RF 和 OM 处理提高土壤供氮潜力和土壤肥力的效果均优于 CK 和 CF 处理, 这是因为长期采用秸秆、有机肥配施化肥一方面补充了作为土壤供氮潜力表征的氨基酸态氮和酸解氨态氮等易矿化氮库^[14],

另一方面增加了酸解未知态氮等难矿化氮库库容, 进而提高了土壤氮素的供应强度和容量^[21]。

3.3 根际土壤有机氮与土壤理化性质的相关性

本研究结果表明, 根际土壤全氮和有机碳含量与大部分土壤有机氮含量均呈极显著($P < 0.01$)的正相关关系(表 4), 这与石丽红等^[21]的研究结果相似, 说明长期施肥条件下根际土壤全氮和有机碳含量变化特征可以用来表征土壤有机氮组分及质量的变化趋势。主要原因是施肥提高了土壤有机碳和全氮含量, 而土壤微生物又以碳氮为营养来源, 导致参与氮循环的根际微生物活性增强, 从而有利于氮素转化, 进而影响土壤有机氮组分含量及分配^[34]。此外, 进一步发现, 微生物生物量氮含量与土壤铵态氮和硝态氮含量呈极显著($P < 0.01$)正相关(表 4), 这是因为土壤微生物生物量氮具有易矿化、周期短等特点, 是土壤中活性可矿化氮源^[35], 随着土壤微生物生物量氮含量的增加, 微生物生物量氮被微生物利用矿化成无机氮速率加快, 有利于提高土壤无机氮供应能力, 促进作物生长。因此长期采用秸秆、有机肥配施化肥有利于土壤氮素转化利用。此外, 在酸解有机氮组分中, 土壤 pH、全氮、有机碳、铵态氮、硝态氮与土壤氨基酸态氮含量的相关系数最大。因此, 长期不同施肥模式通过改变各根际土壤理化特性, 进而影响根际土壤有机氮组分和微生物生物量氮含量的变化。

本研究初步探讨长期施肥下晚稻根际土壤的微生物生物量氮和有机氮组分的变化, 但关于长期施肥对大麦-双季稻各个主要生育期土壤有机氮组分及其微生物作用机制仍需进一步研究。

4 结论

南方双季稻区, 在大麦-双季稻三熟制条件下长期不同施肥处理对稻田根际土壤理化性质、微生物生物量氮和有机氮组分均具有显著影响。长期采用有机无机肥配施有利于增加稻田根际土壤的全氮、有机碳、铵态氮、硝态氮和微生物生物量氮含量, 其中以 30% 有机肥配施化肥效果为最佳。酸解性氮是根际土壤有机氮的主要组成部分, 长期不同施肥处理影响土壤各有机氮组分含量及分配。相对于无肥和单施化肥处理, 长期采用秸秆、30% 有机肥配施化肥有利于提高土壤酸解性氮含量, 而土壤非酸解性氮含量以 30% 有机肥处理最大。在酸解性组分中, 长期采用秸秆、30% 有机肥配施化肥对根际土壤氨基酸态氮和酸解未知态氮的提升效果明显优于单施化肥处理; 土壤氨基糖态氮含量以 30% 有机肥处理最高, 而秸

秆配施化肥对酸解氨态氮提升效果最为明显。因此, 长期采用有机肥、秸秆还田配施化肥均有利于提高稻田土壤保氮能力和改善土壤肥力。

参考文献:

- [1] 吴多基, 姚冬辉, 范钊, 等. 长期绿肥和秸秆还田替代部分化肥提升红壤性水稻土酸解有机氮组分比例及供氮能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 227-236.
- [2] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [3] 杨静, 郭文圻, 杨文浩, 等. 紫云英翻压后稻田土壤可溶性有机氮迁移特性与损失风险[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 786-796.
- [4] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [5] 李萌, 王昌全, 李冰, 等. 猪粪替代氮肥对稻麦轮作条件下土壤有机氮组分的影响[J]. 土壤, 2016, 48(3): 449-454.
- [6] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
- [7] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1381-1392.
- [8] Khan A U H, Iqbal M, Islam K R. Dairy manure and tillage effects on soil fertility and corn yields[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(10): 1972-1979.
- [9] 文春燕, 熊运华, 王萍, 等. 减施化肥配施不同有机肥对优质籼稻产量和品质的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2): 280-287.
- [10] Bremner J M. Organic forms of nitrogen[C]// Black C A. Methods of Soil Analysis. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1965: 1238-1255.
- [11] 李世清, 李生秀, 邵明安, 等. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(6): 859-864.
- [12] Wu H Q, Du S Y, Zhang Y L, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse soil organic nitrogen fractions and soil-soluble nitrogen pools[J]. Agricultural Water Management, 2019, 216: 415-424.
- [13] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 83-90.
- [14] 吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 等. 土壤有机氮组分研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1240-1246.
- [15] 董姝含, 吕慧捷, 周锋, 等. 玉米土壤有机氮组分的生长季动态变化及其对当季和长期秸秆还田的响应[J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 73-80.
- [16] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 等. 长期施肥对太湖地区黄泥土有机氮和有机碳的影响[J]. 土壤, 2008, 40(1): 93-99.
- [17] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 长期施肥对土壤有机氮组成的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(1): 87-91.

- [18] Tian J H, Wei K, Condon L M, et al. Effects of elevated nitrogen and precipitation on soil organic nitrogen fractions and nitrogen-mineralizing enzymes in semi-arid steppe and abandoned cropland[J]. *Plant and Soil*, 2017, 417(1): 217–229.
- [19] 张电学, 韩志卿, 吴素霞, 等. 不同施肥制度对褐土有机氮及其组分的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(3): 201–206.
- [20] Zhang F, Shen J, Li L, et al. An overview of rhizosphere processes related with plant nutrition in major cropping systems in China[J]. *Plant and Soil*, 2004, 260(1): 89–99.
- [21] 石丽红, 唐海明, 孙耿, 等. 长期不同施肥模式对双季稻田土壤酸解有机氮组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3345–3351.
- [22] 唐海明, 肖小平, 李微艳, 等. 长期施肥对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 402–408.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [25] 唐海明, 程凯凯, 肖小平, 等. 不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 465–473.
- [26] 江春玉, 刘萍, 刘明, 等. 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 138–149.
- [27] 徐一兰, 唐海明, 李益锋, 等. 长期施肥大麦生育期双季稻田土壤微生物和酶活性动态变化特征[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(13): 12–20.
- [28] 唐海明, 肖小平, 李超, 等. 冬季覆盖作物秸秆还田对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6559–6569.
- [29] Richardson A E, Barea J M, McNeill A M, et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1): 305–339.
- [30] 董姝含, 贺章咪, 王婉琦, 等. 土壤有机氮组分的年际变化及其对秸秆还田的响应[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11): 2963–2970.
- [31] 张世汉, 武均, 张仁陟, 等. 不同氮水平下秸秆、生物质炭添加对旱作农田土壤酸解有机氮组分的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1): 92–100.
- [32] Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(1): 75–85.
- [33] Wang Y, Li M, Pei J B, et al. Dynamics of maize straw-derived nitrogen in soil aggregates as affected by fertilization[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(7): 2882–2890.
- [34] Meier I C, Finzi A C, Phillips R P. Root exudates increase N availability by stimulating microbial turnover of fast-cycling N pools[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 106: 119–128.
- [35] Breuer L, Huisman J A, Keller T, et al. Impact of a conversion from cropland to grassland on C and N storage and related soil properties: Analysis of a 60-year chronosequence[J]. *Geoderma*, 2006, 133(1/2): 6–18.