

## 红壤双季稻田土壤活性碳、氮周年变化及影响因素

陈春兰<sup>1,2</sup>, 涂成<sup>1,2</sup>, 陈安磊<sup>1,2\*</sup>, 侯海军<sup>1,2</sup>, 刘波<sup>3</sup>, 谢小立<sup>1,2</sup>, 魏文学<sup>1,2</sup>, 孙志龙<sup>4</sup>

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所/亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南长沙 410125;

2 中国科学院桃源农业生态试验站, 湖南桃源 415700; 3 湖南省桃源县农业局, 湖南桃源 415700;

4 湖南省宁乡县回龙铺镇农业综合服务中心, 湖南宁乡 410606)

**摘要:**【目的】研究红壤稻田土壤活性碳、氮含量及其周年变化和影响因素, 为弄清红壤双季稻田土壤活性碳、氮季节变化规律, 提高土壤养分利用效率提供理论依据。【方法】以红壤稻田长期定位试验(1990年开始)为对象, 选择不施肥(CK)、单施 NPK 化肥(NPK)和有机物(紫云英、稻草)+NPK 化肥(NPKM)三个施肥处理, 在早稻、晚稻、休闲期取 0—20 cm 土样, 动态监测稻田土壤几种重要活性碳、氮成分, 包括无机态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), 可溶性有机碳、氮(DOC、DON)和微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)的周年动态变化。【结果】稻田土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量在早稻期间呈下降状态, 晚稻期间变化较平缓, 休闲期呈先上升后下降的趋势。土壤无机氮主要以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 形式存在, 其含量范围为 14.9~31.6 mg/kg, 其休闲期含量略低于生育期( $P > 0.05$ ); 周年土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量(< 3 mg/kg)远小于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量, 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量呈现此消彼长的趋势( $P < 0.01$ )。稻田土壤 DOC、DON 周年变化趋势相似( $P < 0.01$ ), 在生育期呈下降状态, 休闲期呈先上升后下降趋势, 休闲期土壤 DOC、DON 含量略低于生育期( $P > 0.05$ )。休闲期土壤 MBC、MBN 含量分别为 463~701 mg/kg、31.1~52.4 mg/kg, 比生育期分别提高 25.4%~36.9% 和 62.8%~125.9%。总体来看, 稻田休闲期土壤活性碳(DOC+MBC)、氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+DON+MBN)含量高于生育期含量, 较生育期增幅分别为 10.8%~19.6%、10.3%~34.8%。不同施肥处理结果表明, 仅施用化肥(NPK 处理)对活性碳、氮影响较小( $P > 0.05$ ), 有机物还田能显著提高水稻生育期和休闲期的土壤活性碳、氮含量( $P < 0.05$ ), NPKM 与 CK 相比活性碳、氮在水稻生育期分别提高 53.8% 和 81.2%, 而在休闲期分别提高了 43.5% 和 63.2%。相关性分析结果表明, 稻田休闲期土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、DOC、DON 含量不仅与土壤 SOC、TN 含量密切相关( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ), 还受温度、水分含量等环境因子影响, 如休闲期土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量与 5 cm 处土壤温度呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ), 而土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量与该土层温度呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ), 土壤 DOC 和 DON 与土壤含水量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ )。【结论】长期化肥配施紫云英及秸秆还田能显著提高稻田土壤周年活性碳、氮含量, 其活性含量与土壤有机碳、全氮含量呈显著正相关关系; 休闲期稻田能维持较高的活性碳、氮含量, 且比水稻生育期有一定程度增加。休闲期土壤无机氮含量变化主要受土壤温度影响, 土壤可溶性碳、氮含量变化主要受土壤含水量的影响。

**关键词:** 红壤稻田; 休闲期; 无机态氮; 可溶性有机碳; 可溶性有机氮; 微生物量碳; 微生物量氮

## Annual variation of active carbon and nitrogen contents and the related factors in red paddy soils of subtropical China

CHEN Chun-lan<sup>1,2</sup>, TU Cheng<sup>1,2</sup>, CHEN An-lei<sup>1,2\*</sup>, HOU Hai-jun<sup>1,2</sup>, LIU Bo<sup>3</sup>,

XIE Xiao-li<sup>1,2</sup>, WEI Wen-xue<sup>1,2</sup>, SUN Zhi-long<sup>4</sup>

(1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Chinese Academy of Sciences; Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 2 Taoyuan Station of Agroecology Research, Chinese Academy of Sciences, Taoyuan, Hunan 415700, China; 3 Agricultural Bureau of Taoyuan County of Hunan Province, Taoyuan, Hunan 415700, China; 4 Huilongpu Integrated Service Center for Agriculture of Ningxiang County, Ningxiang, Hunan 410606, China)

收稿日期: 2017-05-31 接受日期: 2017-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31200339); 科技部国家重点研发计划项目(2016YFD0200307, 2017YFD0301504); 杂交水稻国家重点实验室(湖南杂交水稻研究中心)开放课题基金(2016KF07); 科技部国际合作项目(2015DFA90450)资助。

联系方式: 陈春兰 E-mail: ccl@isa.ac.cn; \* 通信作者 陈安磊 E-mail: alchen@isa.ac.cn

**Abstract: [ Objectives ]** Active carbon and nitrogen play important roles in soil carbon and nitrogen cycle. This study aimed to determine the difference of active carbon and nitrogen contents in soils affected by fertilization and other factors through the year in the subtropical double-rice region of China. **[ Methods ]** A long-term field experiment on reddish paddy soil was conducted. The three treatments were CK (non-fertilizer), NPK (N, P, and K fertilizer application), and NPKM (NPK fertilizer, milk vetch and rice straw application). The characteristics and variation trends of inorganic nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ), dissoluble organic carbon and nitrogen (DOC and DON) and microbial biomass carbon and nitrogen (MBC and MBN) in soils were investigated during the rice growing and fallow periods. **[ Results ]** The  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  contents in paddy soils fluctuated in all treatments and showed three general trends: decreased during the early rice stage, stable during late rice period, and increased then decreased during the fallow period.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , the main form of inorganic nitrogen in soils, was in range of 14.9–31.6 mg/kg, and no significant difference was found between the rice growing period and fallow period. The contents of soil  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , less than 3.0 mg/kg, were far lower than those of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  contents, and there was a reciprocal relationship between them ( $P < 0.01$ ). Both of soil DOC and DON had a similar annual variation with a declining trend in the rice growing period and an increasing first and decreasing later trend in the fallow period. The contents of MBC and MBN in soils were 463–701 mg/kg and 31.1–52.4 mg/kg during the non-rice growing period, which were increased by 25.4%–36.9% and 62.8%–125.9%, compared to those in the rice-growing period, respectively. Overall, the total contents of active carbon (DOC + MBC) and nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N} + \text{DON} + \text{MBN}$ ) in soils in the non-rice growing period were increased by 10.8%–19.6% and 10.3%–34.8%, respectively, compared with those in the rice-growing period. The total contents of active carbon or nitrogen in soils in the NPKM treatment were significantly higher than those in the NPK and CK treatments ( $P < 0.05$ ). The active carbon and nitrogen contents in the NPKM treatment were increased by 53.8% and 81.2% in the growth season, and by 43.5% and 63.2% in the fallow season, compared with those in the CK treatment. No significant differences were found between the NPK and CK treatments during the two periods. During the fallow period, soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , DOC, and DON had significant and positive correlations with SOC and TN; Soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and soil  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  were significantly correlated with soil temperature at 5 cm ( $P < 0.01$  and  $P < 0.05$ ); Soil DOC and DON were significantly correlated with soil water contents ( $P < 0.01$  and  $P < 0.05$ ). **[ Conclusions ]** Combined application of milk vetch and rice straw and chemical fertilizers could significantly increase the contents of active carbon and nitrogen in soils, which were positively correlated with soil organic carbon and total nitrogen contents. Compared with the rice growing period, the contents of active carbon and nitrogen in soils maintained high levels during the fallow period, which were affected by SOC and TN, and environmental factors, i.e., soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and soil  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  were significantly correlated with soil temperature at 5 cm, and soil DOC and DON were significantly correlated with soil water contents.

**Key words:** red paddy; fallow period; inorganic nitrogen; dissolved organic carbon; dissolved organic nitrogen; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen

碳、氮循环是农田生态系统最基本的物质循环过程, 强烈地受到人为作用的影响和调控, 对农田生态系统的稳定性、生产力及其环境效应具有关键性的影响作用<sup>[1]</sup>。土壤活性碳、氮是土壤碳、氮循环中最为重要和活跃的组分, 不仅能直接反映土壤碳、氮积累变化特征, 还能敏感反映土壤环境变化对土壤碳、氮分解和转化的影响<sup>[2-3]</sup>。施肥是农业生产中一项重要的管理措施, 长期向农田中输入大量

的碳氮元素, 会对土壤活性碳、氮含量产生重要影响。骆坤等<sup>[4]</sup>的研究表明长期的有机肥施入尤其是有机无机肥配施能显著提高黑土表层和亚表层土壤有机碳、氮活性。有研究<sup>[5]</sup>显示作物秸秆和化肥配施更有助于土壤轻组有机碳累积, 粪肥配施氮磷钾化肥则对 MBC 和 DOC 的积累效果更为突出。化肥配施紫云英则可显著提高土壤微生物量, 改善稻田土壤的微生态环境<sup>[6]</sup>。汤宏等<sup>[7]</sup>研究发现间歇灌溉条件

下, 低量秸秆还田较高质量秸秆还田可提高水稻土壤微生物量碳、氮和土壤可溶性有机碳、氮的含量。已有许多研究表明, 单施化肥或施用有机肥可提高水稻生育期土壤可溶性碳、氮含量<sup>[8-11]</sup>。综合来看, 施肥管理对土壤活性碳、氮含量产生了重要影响。稻田冬季休闲也是农田生态系统中一个重要的管理模式, 红壤丘陵区稻田休闲期具有时间较长、水稻生长季养分残留多、休闲期温度变化幅度大以及干湿交替频繁等特点, 但是目前对稻田休闲期活性碳氮的研究较少。

另外, 有研究报道  $N_2O$  的排放是冬闲期稻田温室气体观测中不可忽视的部分<sup>[12-14]</sup>, 占全年排放量的近 70%<sup>[15]</sup>, 而此过程是微生物作用过程, 也是土壤活性碳氮的转化过程, 然而目前对稻田休闲期该过程中土壤活性碳氮的动态变化研究较少。为此, 本文以湖南典型红壤双季稻田为研究对象, 进行为期一年的试验 (早稻、晚稻、休闲期), 研究稻田土壤活性碳、氮养分含量的动态变化, 并重点分析休闲期与生育期之间的差异及其在休闲期对土壤温度、土壤含水量等主要环境因子的响应, 以期丰富科学数据并为稻田温室气体排放管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地位于中国科学院桃源农业生态试验站内, 该地区年平均降雨量 1440 mm, 年平均气温 16.5℃, 日照时数 1520 h。供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土。施肥制度长期定位试验始于 1990 年, 种植制度为双季稻 + 绿肥 (或者冬闲模式), 晚稻收割后及整个休闲期无翻耕。试验开始时土壤基本肥力性状为: 有机碳 15.0 g/kg、全氮 1.78 g/kg、pH 5.74、土壤容重 1.25 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

本研究共选取长期定位试验的 3 个处理: 1) 不施化肥, 收获物全部移出系统 (CK); 2) 施化肥氮、磷、钾, 收获物移出系统 (NPK); 3) 在施化肥氮、磷、钾的基础上, 稻草及紫云英还田 (NPKM), 具体为早、晚稻稻草收获后切碎直接还田, 晚稻收割前播种紫云英 (*Astragalus sinicus* L.), 春耕时将紫云英翻压作绿肥施用。供试化肥为尿素 (N 45%)、过磷酸钙 ( $P_2O_5$  12%) 和氯化钾 ( $K_2O$  60%)。施肥情况: 1990—1996 年为 N 262.5 kg/hm<sup>2</sup>、P 39.3 kg/hm<sup>2</sup>、K 137.0 kg/hm<sup>2</sup>; 1997—2015 年为 N 182.3 kg/hm<sup>2</sup>、P

39.3 kg/hm<sup>2</sup>、K 197.2 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 样品采集及测试分析方法

于 2014 年 5 月至 2015 年 4 月分两个时段: 水稻生育期 (2014.04.26—2014.11.04), 稻田休闲期 (2014.11.05—2015.04.22), 每月采集土样 1 到 3 次 (2014 年采样时间为 4 月 26 日、5 月 30 日、6 月 29 日、7 月 8 日、8 月 4 日、8 月 22 日、8 月 27 日、9 月 2 日、9 月 21 日、11 月 2 日、12 月 2 日、12 月 8 日、12 月 17 日、12 月 24 日、12 月 30 日, 2015 年采样时间为 1 月 9 日、1 月 16 日、1 月 22 日、2 月 11 日、2 月 18 日、3 月 3 日、3 月 12 日、3 月 21 日、3 月 27 日、4 月 16 日), 每个小区按“S”形取 12 点小样 (0—20 cm), 组成一个混合土样, 捡去可见植物残体后, 保存在 4℃ 冷库并于一个星期内完成各项指标测定。依据气温特征选取 4 次代表性土样 (生育期和休闲期各 2 次, 时间分别为 2014 年的 6 月 29 日、8 月 4 日、12 月 17 日和 2015 年 3 月 21 日), 用于测定土壤微生物量碳 (MBC)、氮 (MBN) 指标。并于 2014 年 4 月 15 日春耕前采集一次土样, 风干过筛, 用于测定土壤有机碳、全氮等基本理化性质。

利用氯仿熏蒸浸提法测定土壤 MBC、MBN<sup>[16]</sup>。土壤可溶性有机碳 (DOC)、 $NH_4^+$ -N 和  $NO_3^-$ -N 用 0.5 mol/L  $K_2SO_4$  溶液浸提<sup>[17]</sup>, 分别用岛津 Vwp 有机碳分析仪、FIAstar 5000 流动注射仪测定, 土壤含水量用烘干法测定。土壤有机碳和全氮分别采用重铬酸钾容量法外加加热法, 半微量开氏法测定<sup>[18]</sup>。

土壤可溶性有机氮 (DON) 为未熏蒸土样浸提液全氮 (TKN) 与  $NH_4^+$ -N 含量的差值 (开氏法无法将  $NO_3^-$ -N 还原成  $NH_4^+$ -N, 浸提液全氮不包括  $NO_3^-$ -N), 即土壤  $DON = TKN - NH_4^+$ -N,  $DIN$  (土壤无机氮) =  $NH_4^+$ -N +  $NO_3^-$ -N,  $TDN$  (土壤可溶性全氮) =  $TKN + NO_3^-$ -N。

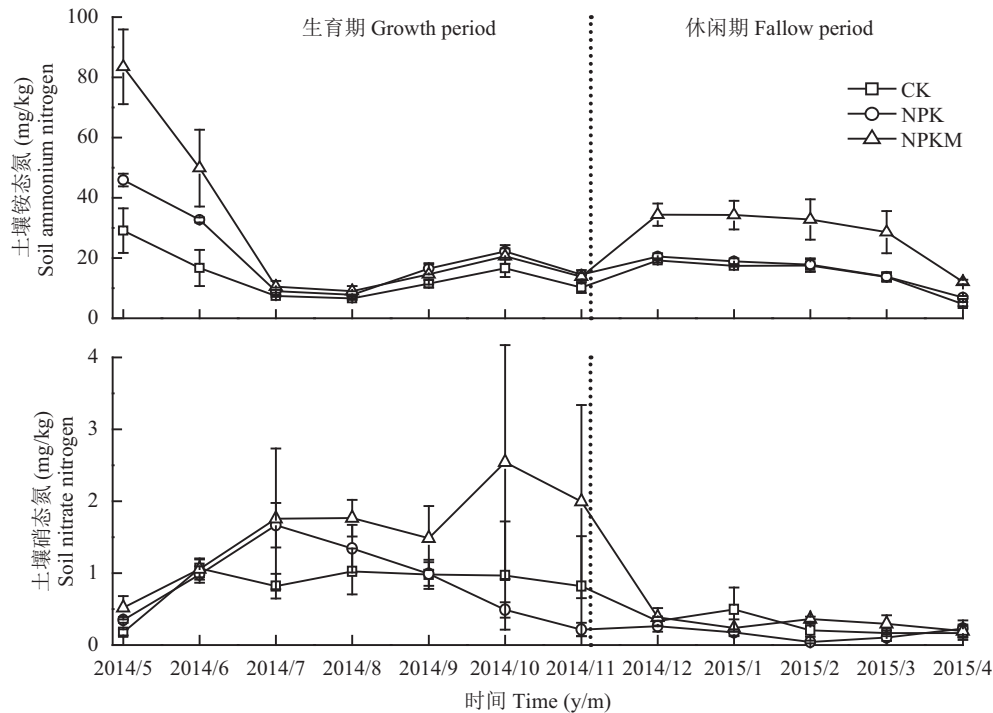
### 1.4 数据处理

采用加权法计算各指标的月均值及各时期含量。利用软件 SPSS18.0 和 Origin 7.5 对数据进行统计分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田土壤无机态氮周年变化特征

图 1 表明, 稻田土壤  $NH_4^+$ -N 含量在全年中呈现 3 个变化阶段, 早稻期间从全年最高含量下降, 晚稻期间变化较平缓, 休闲期土壤  $NH_4^+$ -N 含量总体呈现

图1 土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量动态变化Fig. 1 Dynamics of soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents

先上升后下降的趋势。休闲初期(11月)土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量较低,且处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 12月急剧增加,之后处于平稳状态,3月开始下降,休闲末期(4月)约降至休闲初期水平,且此变化过程中不同处理之间  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量呈现差异,表现为NPKM显著高于NPK、CK处理 ( $P < 0.05$ ),NPK和CK处理之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

稻田土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量全年变化与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量变化呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ),生育期土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量较高,休闲期土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量较低,并呈现下降趋势。早稻期间,NPKM处理和NPK处理土壤中

$\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 晚稻期间CK处理  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量波动变化趋势较平稳,NPK处理呈现下降趋势,NPKM处理出现波动上升状态,使晚稻期间大部分时间内(8—11月)  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著高于NPK、CK处理 ( $P < 0.05$ )。休闲初期(11月)  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量较高,且NPKM处理土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ); 12月急剧下降,之后处于平稳状态,且各处理之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

如表1所示,不管是生育期还是休闲期,稻田土壤中无机态氮主要以  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  形式存在,并且均是NPKM处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量显著高于NPK、CK处理

表1 水稻生育期和稻田休闲期土壤铵态氮、硝态氮含量

Table 1 Soil  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  contents during the rice cultivation and fallow periods

时期 Period	处理 Treatment	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/kg)	<i>CV</i> (%)	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ (mg/kg)	<i>CV</i> (%)	$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$
生育期 Growth period	CK	14.9 ± 1.7 c	56.6	0.89 ± 0.18 ab	40.0	17.4 b
	NPK	22.2 ± 0.8 bc	65.9	0.94 ± 0.11 a	51.4	24.2 b
	NPKM	31.6 ± 5.0 a	94.6	1.47 ± 0.27 a	45.3	24.8 b
休闲期 Fallow period	CK	16.3 ± 1.8 c	40.0	0.89 ± 0.38 ab	70.5	28.4 b
	NPK	16.6 ± 0.4 c	31.9	0.24 ± 0.08 b	48.1	83.9 a
	NPKM	27.3 ± 4.0 ab	39.8	0.28 ± 0.05 b	120.0	103.7 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Data followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

( $P < 0.05$ ), NPK 和 CK 处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。生育期 NPKM 处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量分别是 NPK 和 CK 处理的 1.4、2.1 倍。休闲期土壤保持较高的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量, 比生育期略低 ( $P > 0.05$ )。休闲期 NPKM 处理土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量分别是 CK 和 NPK 处理的 1.7 和 1.6 倍。稻田休闲期土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著低于生育期 ( $P < 0.05$ ), 而各处理之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。休闲期 CK 处理  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  比值略高于生育期, 是生育期的 1.6 倍, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ ); NPK、NPKM 处理显著高于生育期 ( $P < 0.05$ ), 分别是生育期的 3.5、4.2 倍, 说明生育期硝

化作用可能强于休闲期。

## 2.2 稻田土壤可溶性有机碳、氮周年变化特征

同稻田土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量变化类似, 稻田土壤 DOC 含量在水稻生育期初期达到全年最高, 之后逐渐下降; 稻田休闲期土壤 DOC 含量呈现先上升后下降的趋势 (图 2)。休闲期各处理土壤 DOC 含量表现为 NPKM 处理显著高于 NPK 和 CK 处理 ( $P < 0.05$ ), NPK 和 CK 处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。休闲期土壤 DOC 平均含量为 163~199 mg/kg, 略低于生育期 DOC 含量 (表 2)。不同施肥处理结果表明, 不管是生育期还是休闲期, NPK 和 CK 处理中土壤 DOC 含

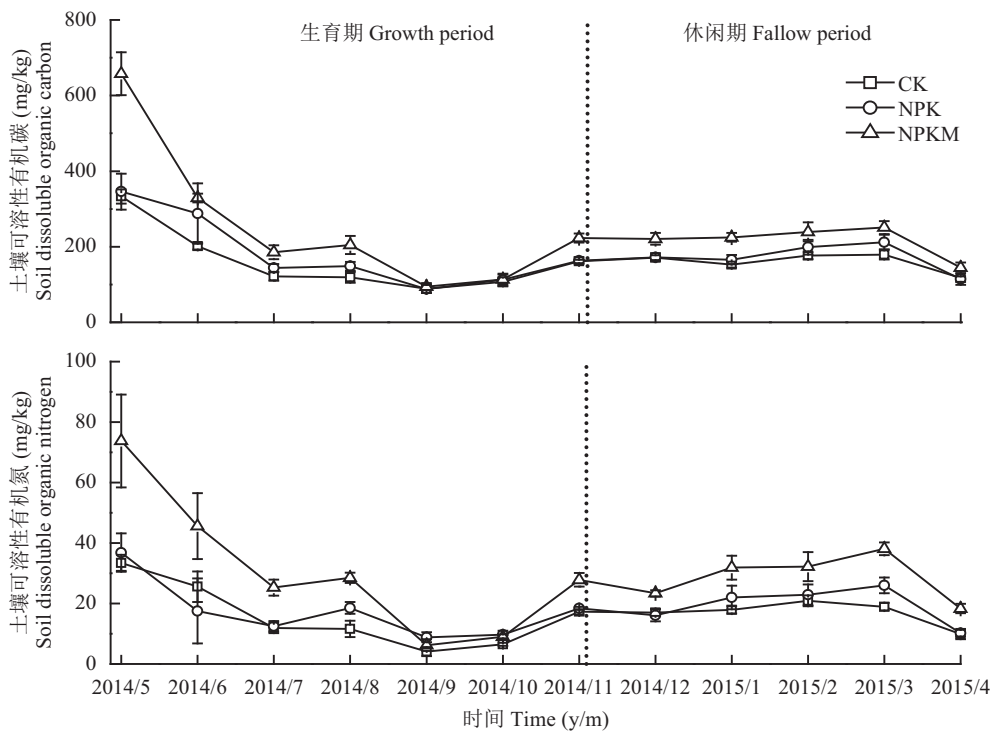


图 2 土壤可溶性有机碳、氮的动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil dissolvable organic carbon and nitrogen contents

表 2 水稻生育期和稻田休闲期土壤可溶性有机碳 (DOC)、氮 (DON) 含量

Table 2 Soil dissolvable organic carbon and nitrogen contents during the rice cultivation and fallow periods

时期 Period	处理 Treatment	DOC (mg/kg)	CV (%)	DON (mg/kg)	CV (%)
生育期 Growth period	CK	165 ± 12 b	57.1	15.9 ± 0.2 c	74.0
	NPK	190 ± 17 b	55.3	18.0 ± 3.0 c	59.7
	NPKM	253 ± 33 a	79.4	32.4 ± 4.4 a	80.3
休闲期 Fallow period	CK	163 ± 4 b	14.4	17.7 ± 1.2 c	22.1
	NPK	169 ± 11 b	19.9	19.7 ± 2.4 bc	29.2
	NPKM	199 ± 7 b	17.3	26.2 ± 1.0 ab	24.6

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Data followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.



量均无显著差异 ( $P > 0.05$ ), NPKM 处理 DOC 含量休闲期显著低于生育期 ( $P < 0.05$ ); 并且生育期 NPKM 处理土壤 DOC 含量显著高于 NPK 和 CK 处理 ( $P < 0.05$ ), 分别是 NPK 和 CK 处理的 1.3 和 1.5 倍, 休闲期 NPKM 处理土壤 DOC 含量是 NPK 和 CK 处理的 1.2 倍, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

稻田土壤 DON 含量变化趋势与 DOC 变化趋势极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。不同施肥处理结果表明: NPKM 处理显著提高土壤 DON 含量 ( $P < 0.05$ , 表 2), 在水稻生育期, 分别是 NPK、CK 处理的 1.8、2.0 倍, 休闲期分别是 NPK、CK 处理含量的 1.3、1.5 倍; 而 NPK 处理与 CK 处理无显著差异 ( $P > 0.05$ )。稻田休闲期, 各处理土壤 DON 含量与生育期对应处理相比无显著差异 ( $P > 0.05$ , 表 2)。

### 2.3 稻田土壤微生物生物量碳、氮特征

从表 3 可以看出, 稻田生育期 NPKM 处理土壤 MBC 含量分别是 NPK、CK 处理的 1.7 和 1.5 倍, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。稻田休闲期各处理土壤 MBC 含量均高于生育期对应处理, CK、NPK 和 NPKM 处理分别提高了 27.5%、36.9% 和 25.4%。休闲期不同施肥处理的结果表明, NPKM 处理 MBC 含量显著高于 NPK 和 CK 处理 ( $P < 0.05$ ), 是 NPK 和 CK 处理的 1.5 倍, NPK 处理 MBC 含量与 CK 处理差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

同样, 稻田生育期各处理土壤 MBN 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ), NPKM 处理 MBN 含量略高于 NPK、CK 处理 (分别 1.2 和 1.3 倍)。稻田休闲期各处理土壤 MBN 含量明显高于生育期对应处理, CK、NPK 和 NPKM 处理比生育期分别提高 80.3%、62.8% 和 125.9%。休闲期 NPK 处理土壤 MBN 含量与 CK 无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 而 NPKM 处理土壤

MBN 含量是 NPK、CK 的 1.7 倍 ( $P < 0.05$ )。

从休闲期各处理土壤微生物量含量看, 施用化肥未能增加休闲期土壤中的微生物含量, 而秸秆及紫云英还田可能是增加稻田休闲期土壤微生物量的主要原因。

### 2.4 稻田土壤活性碳、氮比值关系

稻田生育期和休闲期 NPKM 处理中土壤活性有机碳 (DOC+MBC) 含量均显著高于 NPK、CK 处理 ( $P < 0.05$ , 表 4), NPK, CK 处理间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。休闲期土壤活性有机碳 (DOC + MBC) 含量较生育期有明显提高, 提高幅度为 10.8%~19.6%。休闲期土壤 MBC/DOC 比率高于生育期, 其中 NPKM 处理达到显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

土壤 TDN (可溶性全氮) 包括 DON (可溶性有机氮) 和 DIN (可溶性无机氮), 稻田休闲期施肥处理 (NPK、NPKM) 土壤 TDN 含量显著低于生育期对应处理 TDN 含量 ( $P < 0.05$ ), 分别低 13.4%、16.6%。休闲期 MBN/DON 为 1.5~2.0, 高于生育期 (0.7~1.1), 其中 NPKM 处理达到显著差异 ( $P < 0.05$ )。总的来说, 休闲期土壤活性氮 (TDN + MBN) 含量为 64.7~105.6 mg/kg, 较生育期增加 10.3%~34.8%。

NPKM 处理土壤活性碳 (DOC+MBC)、氮含量 (TDN+MBN) 与 CK 处理相比显著提高 ( $P < 0.05$ ); 而 NPK 处理与 CK 处理相比无显著差异 ( $P > 0.05$ )。这说明施用化肥对稻田土壤活性碳、氮含量的提升没有显著作用, 而秸秆与紫云英还田促进了土壤活性碳、氮含量的升高。

### 2.5 稻田休闲期土壤活性碳氮相关性分析

稻田休闲期土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量与 SOC 和 TN 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ , 表 5), 与 5 cm 土壤温度呈极

表 3 水稻生育期和稻田休闲期土壤微生物量碳 (MBC)、氮 (MBN) 含量  
Table 3 Soil MBC and MBN contents during the rice growth and fallow periods

时期 Period	处理 Treatment	MBC (mg/kg)	CV (%)	MBN (mg/kg)	CV (%)
生育期 Growth period	CK	363 ± 67 b	32.1	17.3 ± 5.2 b	52.1
	NPK	336 ± 28 b	14.6	19.1 ± 1.7 b	15.2
	NPKM	559 ± 51 ab	15.9	23.2 ± 2.5 b	18.8
休闲期 Fallow period	CK	463 ± 58 b	21.8	31.2 ± 4.1 ab	22.9
	NPK	460 ± 61 b	22.9	31.1 ± 6.9 ab	38.6
	NPKM	701 ± 143 a	35.4	52.4 ± 15.8 a	52.4

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Data followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

表 4 水稻生育期和稻田休闲期土壤各形态活性碳、氮组分比例

Table 4 The contents and ratios of different active carbon and nitrogen during the rice cultivation and fallow periods

时期 Period	处理 Treatment	DOC + MBC (mg/kg)	MBC/DOC	TDN (mg/kg)	DON/TDN (%)	TDN + MBN (mg/kg)	MBN/DON
生长期 Growth period	CK	528 ± 79 c	2.2 b	30.6 ± 2.2 d	52.5 a	48.0 ± 6.7 c	1.1 b
	NPK	526 ± 34 c	1.8 b	41.9 ± 1.2 c	42.7 a	61.0 ± 2.9 bc	1.1 ab
	NPKM	812 ± 69 ab	2.3 b	63.8 ± 2.1 a	50.8 a	87.0 ± 3.2 ab	0.7 b
休闲期 Fallow period	CK	627 ± 63 bc	2.8 ab	33.5 ± 2.4 d	53.0 a	64.7 ± 6.6 bc	1.7 ab
	NPK	629 ± 70 bc	2.7 ab	36.3 ± 2.0 cd	53.8 a	67.3 ± 8.5 bc	1.5 ab
	NPKM	900 ± 142 a	3.5 a	53.2 ± 3.7 b	49.7 a	105.6 ± 18.8 a	2.0 a

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Data followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

表 5 稻田休闲期土壤活性碳、氮与土壤养分及环境因子的相关分析 ( $n = 144$ )Table 5 Correlation between soil active organic carbon, nitrogen and SOC, TN contents and main affecting factors during the fallow period ( $n = 144$ )

指标 Index	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	DOC	DON
土壤有机碳 SOC	0.672**	0.259	0.477*	0.773**
土壤全氮 Total N	0.667**	0.251	0.474*	0.769**
土壤含水量 Soil moisture	0.139	-0.071	0.453**	0.463*
5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm	-0.354**	0.342*	-0.024	0.029

注 (Note): \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ); 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量与 5 cm 处土壤温度呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ); 休闲期土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量与土壤含水量均无显著相关性 ( $P > 0.05$ )。休闲期土壤 DOC 含量与土壤 TN 和 SOC 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与土壤含水量呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ); DON 含量与 SOC 和 TN 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与土壤含水量呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ); 土壤 DOC 和 DON 含量与 5 cm 处土壤温度均无显著相关性 ( $P > 0.05$ )。

### 3 讨论

土壤活性碳氮是土壤有机质中最活跃的部分, 其对外界环境变化响应非常敏感, 且周转迅速, 对揭示土壤环境和质量变化具有重要的生态学意义<sup>[2]</sup>。不同施肥处理往往造成植物残体、根系残留物及根系分泌物在土壤中的积累不同, 使土壤微生物可利用底物数量不同, 从而影响土壤养分积累与周转。本研究不同施肥处理的结果表明, NPKM 处理中不同成分活性碳、氮含量均高于只施化肥的 NPK 和不施肥的 CK 处理。这可能与长期施用紫云英及稻草可以直接向土壤补充大量活性有机物质、显著提高

土壤 SOC 和 TN 含量有关<sup>[19]</sup>。如图 3 所示, 本研究 NPKM 处理土壤有机碳及全氮含量显著高于 NPK 与 CK 处理 ( $P < 0.05$ )。并且相关分析表明土壤活性碳、氮含量与土壤 SOC、TN 呈显著正相关关系 (表 5)。这表明土壤肥力状况是影响稻田土壤活性碳、氮含量的重要因素之一。另外, NPKM 处理紫云英和秸秆还田等措施改善了土壤物理性状, 促进了微生物的生长<sup>[20-21]</sup>, 从而促进碳氮元素各形态在土壤中的转化速率, 提高各形态在土壤中的含量<sup>[22]</sup>。张文峰等<sup>[23]</sup>的研究结果显示, 红壤性水稻土耕作层土壤活性有机碳以 NPKM 处理最高, 显著高于不施肥处理 CK, 而在 NPK 处理中虽有所提高, 但与 CK 差异不显著, 与本研究结果相似。

水稻生育期施肥处理 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量高于休闲期 (表 1), 主要是因为生育期化肥尿素的施入, 使土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量出现高峰, 随着水稻植株对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的吸收及 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的转化, 呈逐渐下降趋势 (图 1); 不施肥处理生育期 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量略低于休闲期也间接说明了施肥是导致 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量较高的主要原因。稻田休闲期土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量呈增加趋势, 且保持较高含量, 可能原因有: 一是稻田休闲期温度较低

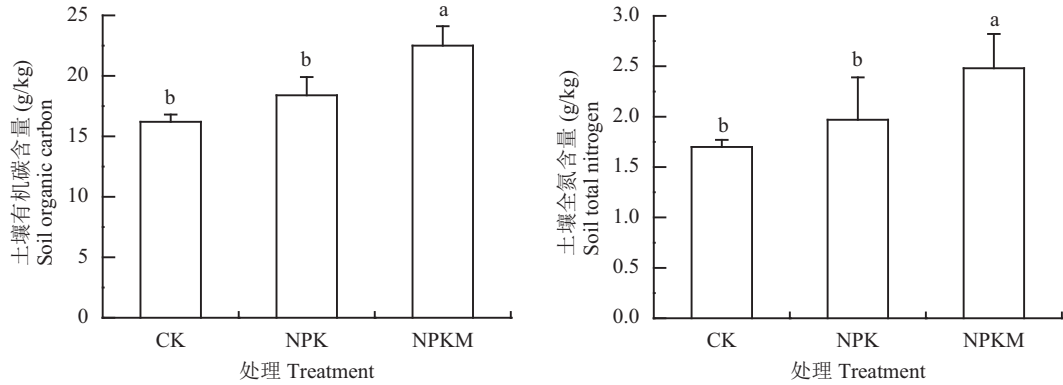


图3 长期不同施肥处理土壤有机碳和土壤全氮含量差异

Fig. 3 Effect of the long-term different fertilization on soil organic carbon and total nitrogen content

(图4, 低于15℃气温占据时间较长, 有研究发现硝化作用的最适温度范围是15℃~35℃<sup>[24-25]</sup>), 使参与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N转化相关的微生物活性较低; 二是稻田休闲期虽然处于排水落干状态, 但无翻耕, 土壤水分含量较高(图5), 土体中氧气含量较少, 抑制了硝化作用; 三是稻田休闲期杂草对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N吸收较生育期水稻植株吸收少; 另外有研究表明红壤水稻田休闲期土壤固定态铵含量降低, 部分释放进入土体<sup>[26]</sup>, 这也可能是休闲期NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量出现增加趋势的原因之一。休闲期稻田土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量急剧下降, 并保持较低水平, 且显著低于生育期( $P < 0.05$ ), 一方面可能与土体中氧气浓度低有关, 休闲期土壤无翻耕, 含水量较大, 硝化作用仅在表层土壤进行, 生育期水稻根系的泌氧能力扩大了硝化作用的范围, 使根际土壤也可进行硝化作用, 从而使休闲期土壤中

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量显著低于生育期, 并且这一结果与休闲期NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量呈增长趋势相吻合。另一方面可能由于N<sub>2</sub>O排放损失, 有研究表明红壤稻田休闲期N<sub>2</sub>O的排放通量大于或相似于早稻生长期和晚稻生长期<sup>[12]</sup>, 这些使冬闲期稻田土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的积累速率降低, 从而导致休闲期稻田土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量显著低于生育期。

相关分析发现休闲期NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量与5cm土壤温度呈极显著负相关, 而NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量与该层土壤温度呈显著正相关, 可能是由于随着温度升高, 硝化微生物活性增强, 促使NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N向NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N转化。由此可见, 稻田休闲期温度是无机氮转化的主要影响因素之一。

土壤可溶性有机碳氮在土壤总有机碳、全氮含量中所占比例很小, 却是土壤有机质中较为活跃的

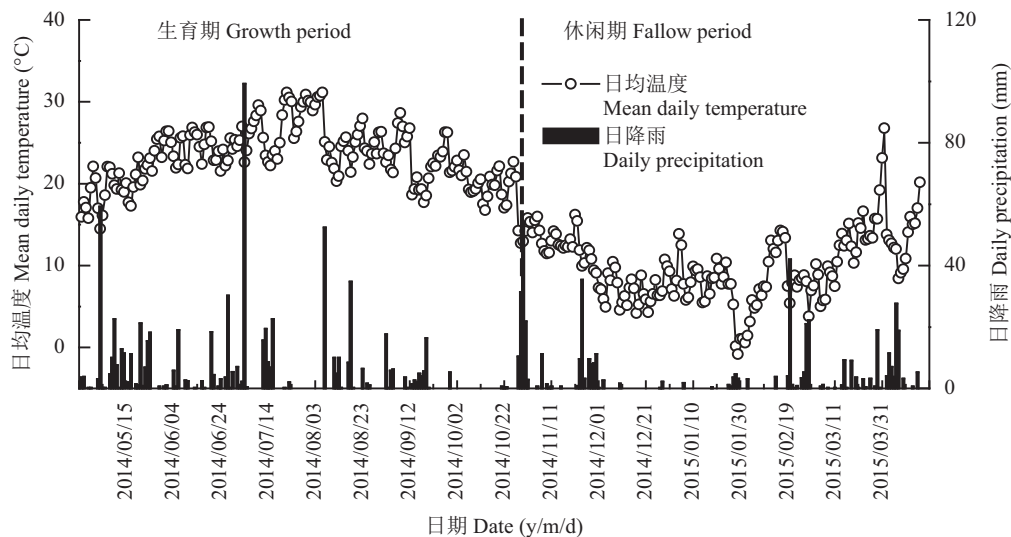


图4 研究区水稻生育期和稻田休闲期日均温度和日降雨量变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of mean daily temperature and daily precipitation during the rice cultivation and fallow seasons in the study area



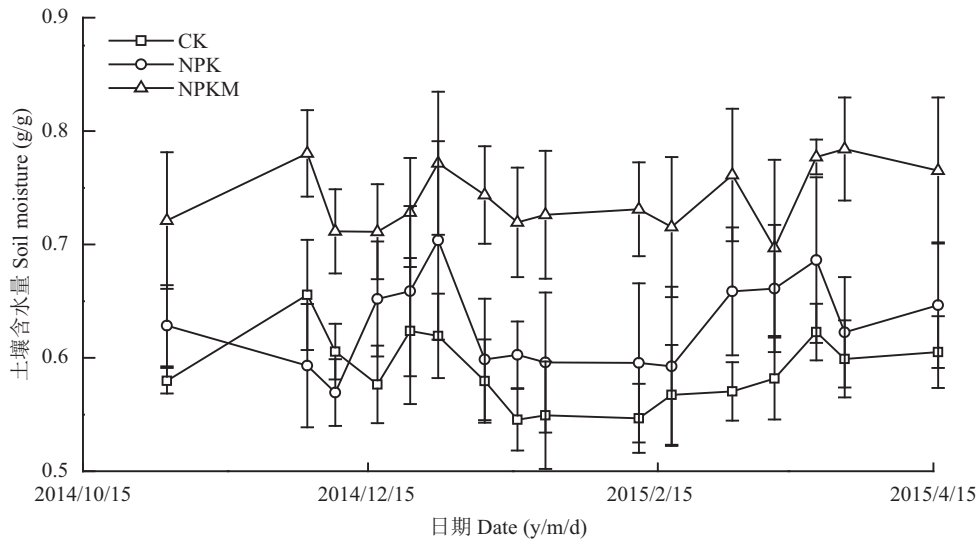


图 5 稻田休闲期土壤含水量的变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of soil moisture during the fallow period

组分, 与土壤能量和物质转化关系密切<sup>[3]</sup>。稻田休闲期 DOC、DON 含量保持上升趋势, 并维持较高含量, 可能与休闲期土壤微生物数量增加 (表 3) 有关, 微生物代谢死亡促进 DOC、DON 含量增加, 而低温使微生物活性降低, 减弱对 DOC、DON 的分解速率。本研究中稻田休闲期土壤 DOC、DON 含量略低于生育期, 但差异不显著; 这可能与稻田淹水状态有利于土壤 DOC 的积累<sup>[27]</sup>有关; 并且水稻生育期温度较高 (图 4), 而土壤对 DOC、DON 的吸附能力随着温度的升高而降低, 从而增加了土壤溶液中 DOC、DON 的含量<sup>[28-29]</sup>; 另外通过变异系数分析 (表 2), 生育期土壤 DOC、DON 的变异系数是休闲期的 2.8~4.6 倍, 变异的主要来源可能是施肥以及休闲期可溶性有机碳氮累积作用使早稻生育初期有较高的 DOC、DON 含量 (图 2), 这些可能是土壤 DOC 和 DON 含量在生育期和休闲期产生差异的主要原因。另外, 休闲期稻田 DOC、DON 含量与土壤含水量有显著的正相关关系, 王飞等<sup>[17]</sup>在红壤地地上的研究也有类似结果, DON 的动态变化主要受土壤含水量的影响。

土壤中 DOC、DON 含量与土壤微生物量密切相关<sup>[30]</sup>, 微生物量是土壤养分循环和转化的动力, 又是重要的植物养分储备库, 其对土壤环境因子的变化极为敏感<sup>[31]</sup>。本研究中稻田休闲期土壤 MBC 和 MBN 含量较生育期有明显提高。休闲期植物生物量减少, 根系对养分的吸收降低, 减弱与土壤微生物对养分的竞争; 另外, 休闲期排水使土壤含水量降低, 土壤表层处于好氧状态, 微生物繁殖增强, 从

而使土壤微生物量增加。

本研究结果及分析显示稻田休闲期土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DOC 等活性物质含量较高, 给土壤碳氮元素进入后续的微生物转化过程备足底物, 并且休闲期持续时间较长 (本研究达 169 天), 使微生物活动在稻田休闲期对土壤碳氮转化的累积作用不可忽视, 所以对稻田休闲期碳氮元素转化过程的研究具有重要意义。

## 4 结论

稻田土壤活性碳氮含量与土壤有机碳、全氮含量呈显著正相关; 长期化肥配合绿肥及秸秆还田的循环利用使土壤活性碳、氮含量显著高于仅施化肥处理土壤中的含量, 而单独施用化肥未能显著提高土壤中活性碳、氮含量。休闲期稻田土壤活性碳、氮含量 (DOC + MBC、TDN + MBN) 高于生育期,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量显著低于生育期。休闲期土壤无机氮含量变化主要受土壤温度影响,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量变化与土壤温度呈极显著负相关,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量与土壤温度呈显著正相关; 土壤 DOC、DON 含量变化与土壤含水量有显著正相关关系。

## 参考文献:

- [1] 李海波, 韩晓增, 王凤. 长期施肥条件下土壤碳氮循环过程研究进展[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 383-388.  
Li H B, Han X Z, Wang F. Review of soil carbon and nitrogen cycle under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 383-388.
- [2] Ding G, Liu X, Herbert S, et al. Effects of cover crop management on soil organic matter[J]. Geoderma, 2006, 130(3-4): 229-239.

- [3] Näsholm T, Ekblad A, Nordin A, *et al.* Boreal forest plants take up organic nitrogen[J]. *Nature*, 1998, 392(6679): 914–916.
- [4] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 676–684.  
Luo K, Hu R G, Zhang W J, *et al.* Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 676–684.
- [5] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 李海波. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3565–3574.  
Liang Y, Han X Z, Song C, Li H B. Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of Mollisol in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3565–3574.
- [6] 万水霞, 朱宏斌, 唐杉, 等. 紫云英与化肥配施对安徽沿江双季稻区土壤生物学特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 387–395.  
Wan S X, Zhu H B, Tang S, *et al.* Effects of *Astragalus sinicus* manure and fertilizer combined application on biological properties of soil in Anhui double cropping rice areas along the Yangtze River[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 387–395.
- [7] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 240–246.  
Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, *et al.* Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 240–246.
- [8] 黄威, 陈安磊, 王卫, 等. 长期施肥对稻田土壤活性有机碳和氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(9): 1854–1861.  
Huang W, Chen A L, Wang W, *et al.* Effect of long-term fertilization on active organic carbon and nitrogen in paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9): 1854–1861.
- [9] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土活性碳的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 554–559.  
Yuan Y H, Li H X, Huang Q R, *et al.* Effects of long-term different fertilization on labile organic carbon in red paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 554–559.
- [10] 郑亮, 沈健林, 邹冬生, 等. 猪粪化肥配施对双季稻稻田土壤活性碳氮含量及水稻产量的影响[J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(5): 633–639.  
Zheng L, Shen J L, Zou D S, *et al.* Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on soil carbon and nitrogen fertility and grain yield in double-rice ecosystem[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(5): 633–639.
- [11] 郝晓辉. 长期施肥对亚热带稻田土壤有机碳氮及微生物学特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学博士学位论文, 2008.  
Hao X H. Effect of long-term fertilization on soil organic carbon, organic nitrogen and microbial properties in subtropical paddy soil [D]. Wuhan: PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2008.
- [12] 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 等. 不同土地利用方式下冬季 $N_2O$ 排放及其影响因素[J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 2968–2974.  
Wu Y Z, Zhang M M, Qin H L, *et al.*  $N_2O$  flux in winter and its affecting factors under different land use patterns[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(8): 2968–2974.
- [13] 余佳, 刘刚, 马静, 等. 红壤丘陵区冬闲稻田  $CH_4$  和  $N_2O$  排放通量的研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 55–58.  
Yu J, Liu G, Ma J, *et al.*  $CH_4$  and  $N_2O$  fluxes from winter fallow paddy fields in a hilly area of southeast China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 55–58.
- [14] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, *et al.* Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196–2210.
- [15] Chen Z D, Chen F, Zhang H L, Liu S L. Effects of nitrogen application rates on net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in double-rice cropping systems of the Southern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(24): 24781–24795.
- [16] 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. 54–74.  
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, *et al.* Soil microbial biomass determination methods and application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 54–74.
- [17] 王飞, 王卫, 陈安磊, 等. 红壤坡地不同土地利用方式下表层土壤活性碳、氮特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 215–220.  
Wang F, Wang W, Chen A L, *et al.* Effects of land use patterns on red soil active carbon and nitrogen in the slope land of hilly area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 215–220.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 344–352.  
Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, *et al.* Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 344–352.
- [20] Tu C, Ristaino J B, Hu S. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: effects of organic inputs and straw mulching[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(2): 247–255.
- [21] Pan G X, Zhou P, Li Z P, *et al.* Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(3): 274–280.
- [22] 丁婷婷, 王百群, 何瑞清, 张燕. 施用秸秆对土壤可溶性有机碳氮及矿质氮的影响[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 72–77.  
Ding T T, Wang B Q, He R Q, Zhang Y. Effect of addition amounts of straw on soil dissolved organic carbon, nitrogen and mineral nitrogen[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 72–77.
- [23] 张文锋, 袁颖红, 周际海, 等. 长期施肥对红壤性水稻土碳库管理指数和双季水稻产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(4): 569–575.  
Zhang W F, Yuan Y H, Zhou J H, *et al.* Effects of long-term fertilization on the carbon management index and double rice yield in

- red paddy soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(4): 569–575.
- [24] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.  
Zhu Z L, Wen Q X. *Soil nitrogen in China*[J]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
- [25] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 $N_2O$ 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, 18(5): 1–6.  
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of temperature on  $N_2O$  production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5): 1–6.
- [26] 彭英湘, 陈安磊, 黄威, 等. 长期施肥对红壤稻田土壤固定态铵的影响[J]. *农业现代化研究*, 2013, 34(3): 376–380.  
Peng Y X, Chen A L, Huang W, *et al.* Effect of long-term fertilization on fixed ammonium in a red paddy soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2013, 34(3): 376–380.
- [27] 陈香碧, 王媛华, 胡乐宁, 等. 红壤丘陵区水田和旱地土壤可溶性有机碳矿化对水分的响应[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 752–758.  
Chen X B, Wang A H, Hu L N, *et al.* Response of mineralization of dissolved organic carbon to soil moisture in paddy and upland soils in hilly red soil region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 752–758.
- [28] Vance G F, David M B. Dissolved organic carbon and sulfate sorption by spodosol mineral horizons[J]. *Soil Science*, 1992, 154(2): 136–144.
- [29] 赵满兴, 王文强, 周建斌. 温度对土壤吸附有机肥中可溶性有机碳、氮的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 842–846.  
Zhao M X, Wang W Q, Zhou J B. Effects of temperature on adsorption of soluble organic carbon and nitrogen from manure on arable soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 842–846.
- [30] 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(3): 488–500.  
Li W J, Peng B F, Yang Q Y. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting Lake of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3): 488–500.
- [31] Jimenez M P, Horra A M, Pruzzo L, Palma R M. Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 302–306.