

# 长期施肥对水稻土碳氮矿化与团聚体稳定性的影响<sup>①</sup>

李奕<sup>1,2</sup>, 刘玲玲<sup>3</sup>, 房焕<sup>2,4</sup>, 李大明<sup>5</sup>, 柳开楼<sup>5</sup>, 彭新华<sup>2</sup>, 彭显龙<sup>1\*</sup>, 周虎<sup>2\*</sup>

(1 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 湖南农业大学资源与环境学院, 长沙 410128; 4 中国科学院大学, 北京 100049; 5 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西省红壤研究所, 南昌 331717)

**摘要:** 水稻土有机碳、氮矿化过程对水稻土质量和作物养分吸收具有重要的作用, 但是它们对施肥措施的影响及其与土壤结构之间的关系尚不清楚。本研究基于红壤性水稻土长期施肥定位试验, 分析了不施肥(CK)、施用常量化肥(NPK)、2倍化肥(NPK2)和常量化肥配施有机肥(NPKOM)等处理下水稻土碳氮矿化特征, 并研究了其与土壤团聚体稳定性的关系。结果表明 NPKOM 处理显著提高了土壤有机碳和全氮含量( $P < 0.05$ ), 而单施化肥处理(NPK2 和 NPK)则同 CK 处理没有显著差异。土壤有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化率均为 NPKOM > NPK2 > NPK > CK 处理, 其中 NPKOM 处理显著高于其他处理( $P < 0.05$ ), 而后 3 个处理间没有显著差异。土壤氮矿化速率、累积矿化量和矿化率同土壤碳矿化的规律一致, NPKOM、NPK2 和 NPK 处理累积矿化氮量较 CK 处理分别提高 110.0%、29.4% 和 8.8%, 矿化率分别提高 110.8%、25.6% 和 13.0%。单施化肥处理(NPK 和 NPK2)的平均质量直径(MWD)分别降低了 17.1% 和 15.5%, 而 NPKOM 处理则增加了 19.4%。相关分析表明, 土壤碳氮矿化主要取决于土壤有机碳氮含量, 而与土壤团聚体水稳定性无直接关系。在今后研究中, 应重点分析土壤孔隙结构与有机碳氮周转的关系。

**关键词:** 水稻土; 碳氮矿化; 团聚体水稳定性

**中图分类号:** S152.4; S153.6 **文献标识码:** A

农田土壤有机碳氮及其周转过程决定了土壤肥力及其可持续能力<sup>[1]</sup>。施肥是维持和提高土壤肥力的主要手段<sup>[2]</sup>。大量研究表明, 相较于长期不施肥处理, 长期平衡施用化肥和有机肥化肥配施不仅可显著提高水稻产量<sup>[3]</sup>, 同时也能增加作物地下生物量, 进而提高土壤有机质的投入量。一些研究发现长期施用化肥和有机肥均可显著提高土壤有机碳含量<sup>[4]</sup>, 然而也有报道指出长期施用化肥并没有提高水稻土有机碳氮含量<sup>[5]</sup>。有机物投入量增加但土壤有机碳氮含量却没有增加, 表明不同施肥处理下土壤有机质矿化速率可能不同。马天娥等<sup>[6]</sup>分析了黄土高原沟壑区黄盖黑垆土在长期不同施肥处理下有机碳的矿化, 发现化肥处理提高了土壤碳矿化速率; 而吴萌等<sup>[7]</sup>则发现常熟乌栅土和重庆紫色土区域化肥处理并没有提高土壤碳矿化速率。

土壤有机碳氮的矿化过程受到土壤理化性质、微生物和环境因素等多方面的影响<sup>[8-9]</sup>。其中, 土壤团聚体的破碎和团聚过程往往伴随着土壤有机碳氮的

矿化和累积, 因此团聚体的稳定性可能会影响有机碳氮的矿化过程<sup>[10]</sup>。Yan 等<sup>[5]</sup>研究表明, 江西红壤水稻土上有机无机配施可以促进团聚体胶结进而形成大团聚体, 提高大团聚体的数量和稳定性。郝瑞军等<sup>[10]</sup>发现, 大团聚体(>0.25 mm)比微团聚体(<0.25 mm)含有更多的 C、N 和易分解的土壤有机质, 并研究了不同大小团聚体的矿化速率。总体而言, 对于团聚体稳定性与有机碳氮矿化的关系尚不明确。

本研究基于长期施肥定位试验, 分析了不同施肥处理下团聚体水稳定性, 并通过室内培养试验分析土壤有机碳氮的矿化, 研究不同施肥方式对土壤有机碳氮矿化和团聚体水稳定性的影响, 并探讨团聚体水稳定性和碳氮矿化之间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

长期定位试验位于江西省红壤研究所(116°10'

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300900)和国家自然科学基金项目(41471183; 41877022)资助。

\* 通讯作者(px10508@163.com; zhouhu@issas.ac.cn)

作者简介: 李奕(1993—), 女, 辽宁铁岭人, 硕士研究生, 主要从事土壤结构与氮素周转关系研究。E-mail: lyi3278@163.com

E, 28°15'N)。该地区为亚热带季风气候, 年均气温 18.1 °C, 年均降雨量 1 727 mm。土壤为第四纪红黏土发育的猪育型水稻土, 种植制度为“早稻-晚稻-冬闲”。长期定位试验开始于 1981 年。试验开始时耕层(0~20 cm)土壤基本性质为: 有机碳 16.3 g/kg, 全氮 1.6 g/kg, 全磷 0.48 g/kg, 全钾 10.4 g/kg, pH 为 6.9。

## 1.2 试验设计

本研究选取该长期试验点 4 个施肥处理: 对照(CK)、施化肥(NPK)、施 2 倍化肥(NPK2)和常量有机无机肥配施(NPKOM)处理。每处理 3 个重复, 随机区组排列, 每个小区面积 46.67 m<sup>2</sup>。供试化肥为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 有机肥为猪粪。NPK 处理为每水稻季施入化肥 N 90.0 kg/hm<sup>2</sup>、P 45.0 kg/hm<sup>2</sup>、K 75.0 kg/hm<sup>2</sup>, NPK2 处理化肥用量为 NPK 处理的 2 倍, NPKOM 处理在晚稻季施用猪粪 22 500 kg/hm<sup>2</sup>。在水稻种植前, 有机肥作基肥一次施入, 尿素和氯化钾在水稻返青后和分蘖盛期分二次追施, 有机肥氮、磷、钾含量与 NPK 处理施肥量相当。耕作管理措施与大田相同。

## 1.3 土壤样品采集与分析

2015 年 10 月水稻收获后, 采集各小区 0~20 cm 耕层土壤样品, 每个小区随机采集 3 点混合为一个样品。在室内将样品中的石砾、落叶残体和根茬移除, 用手沿土体自然裂隙轻轻掰碎样品, 过 8 mm 筛, 风干, 留待团聚体分析。取一部分风干土样过 0.15 mm 筛, 利用元素分析仪(Vario MAX 型, Elementar 公司, 德国)测定土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)。

团聚体分级采用湿筛法, 将 20 g 过 8 mm 筛风干土样在烧杯中用去离子水浸泡 10 min, 然后轻轻放入套筛(2、0.25 和 0.053 mm)的最上级筛子中, 启动湿筛仪并控制其转速维持在 30 r/min、上下振幅 4 cm, 振荡 10 min。然后取出套筛, 将各级团聚体分别冲洗至已知重量铝盒中, 在烘箱中 105 °C 下烘干后称重, 得到各级团聚体所占比例。其中, <0.053 mm 团聚体所占比例通过差减法计算。根据各级团聚体所占比例计算平均重量直径 MWD<sup>[11]</sup>:

$$MWD = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i$$

式中:  $n$  为筛子的个数;  $r_i$  为第  $i$  个筛子孔径(mm);  $r_{i-1}$  为第  $i-1$  个筛子孔径(mm);  $m_i$  为第  $i$  个筛子的团聚体重量所占比例(%)。每个样品重复 3 次。

## 1.4 矿化培养试验

土壤有机碳矿化测定采用室内恒温培养、碱液吸

收法<sup>[7]</sup>。称取风干土样 20.00 g 于 500 ml 培养瓶中, 加水至田间持水量的 60%, 随机排列置于 25 °C 的恒温培养箱中, 预培养 5 d。之后将盛有 5 ml 0.25 mol/L 的 NaOH 溶液的特制玻璃瓶置于培养瓶底, 加盖密封后继续培养, 分别在第 1、3、5、7、14、21 和 28 天取出玻璃瓶, 同时换入另一批同样规格的盛有 5 ml 0.25 mol/L 的 NaOH 溶液的玻璃瓶继续培养。用称重法校正土壤水分含量, 定期向土中补充水分至初始重量。试验于 35 d 时结束。每处理 3 次重复。将取出的玻璃瓶内 NaOH 溶液洗入 150 ml 三角瓶, 然后加入 1 ml 1 mol/L BaCl<sub>2</sub> 溶液及 2 滴酚酞指示剂, 用 0.125 mol/L 标准酸滴定, 根据 CO<sub>2</sub> 的释放量计算培养期内土壤有机碳的矿化量。有机碳的累积矿化量为培养各阶段矿化量之和, 矿化速率为各培养阶段每天矿化量, 矿化率为 35 d 累积矿化量占 SOC 的百分比。

土壤有机氮矿化测定采用 Waring 的连续淹水密闭法<sup>[12]</sup>。称取过 2 mm 筛的风干土样 10.00 g 于 20 ml 的顶空瓶中, 加入 10 ml 蒸馏水, 使土壤全部湿润并驱出土中空气, 达到完全淹水条件, 用螺纹盖拧紧瓶口, 随机排列置于 25 °C 恒温培养箱, 每处理 3 次重复。从培养之日起, 分别在第 1、7、14、21 和 28 天取出一组顶空瓶, 将样品转移至三角瓶中, 加入 90 ml 2.0 mol/L 的 KCl 溶液, 150 r/min 震荡机中震荡 40 min, 过滤, 收集上清液, 利用连续流动分析仪测定培养后的无机氮含量。各阶段测得的有机氮矿化量即为该阶段的累积矿化量, 矿化速率为各培养阶段每天矿化量, 矿化率为 28 d 氮累积矿化量占 TN 的百分比。

## 1.5 数据处理

利用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析。矿化数据采用重复测定方差分析, 其他土壤性质进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 并用 LSD 法进行多重比较, 显著性水平为 0.05。相关分析采用 Pearson 的双侧检验法。利用 Origin 19.0 绘图软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 长期不同施肥措施对土壤碳氮含量的影响

长期有机无机配施处理(NPKOM)的有机碳(SOC)和全氮(TN)含量显著高于化肥处理(NPK、NPK2)和 CK 处理, 而 NPK、NPK2 和 CK 处理之间没有显著差异。土壤 C/N 介于 8.18~8.59, 各处理间没有显著差异。碳和氮的矿化速率高低顺序均为 NPKOM>NPK2>NPK>CK 处理。与 CK 处理相比, NPK、NPK2 和 NPKOM 的碳矿化速率和氮矿化速率分别提高 9.2%、11.1%、19.8% 和 13.0%、25.6%、

110.8%。

表 1 不同施肥处理土壤有机碳、全氮含量，碳氮比，碳矿化率(C<sub>d35</sub>/SOC)和氮矿化率(N<sub>d28</sub>/TN)

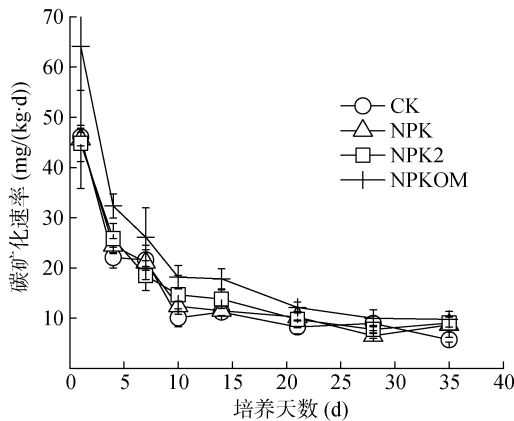
Table 1 SOC, TN, C:N, and mineralization rates of C and N under different fertilization treatments

处理	SOC (g/kg)	TN (g/kg)	C/N	C <sub>d35</sub> /SOC	N <sub>d28</sub> /TN
CK	20.9 b	2.55 b	8.18 a	2.07 b	7.53 c
NPK	20.3 b	2.45 b	8.29 a	2.26 ab	8.51 bc
NPK2	21.2 b	2.46 b	8.59 a	2.30 ab	9.46 b
NPKOM	24.8 a	2.92 a	8.50 a	2.48 a	15.87 a

注：同列数据小写字母不同表示处理间差异达到  $P < 0.05$  显著水平，下表同。

### 2.2 长期不同施肥措施对土壤碳矿化的影响

长期不同施肥对土壤有机碳矿化速率的影响随时间发生显著变化( $P < 0.05$ )(图 1),且各处理的土壤有机碳矿化速率呈现相同的趋势。初始矿化速率最高为 45 ~ 66.8 mg/(kg·d), 然后迅速降低到第 10 天的 10 ~ 20 mg/(kg·d), 之后缓慢降低直至平缓, 在培养试验结束时(35 d)降至小于 10 mg/(kg·d)。培养期间 NPKOM 处理的有机碳矿化速率始终最高, 在第 1、4 和 14 天显著高于 CK、NPK 和 NPK2 处理( $P < 0.05$ ), 后 3 个处理之间差异不显著。



(数值为 3 个重复的平均值 ± 标准误差, 下同)

图 1 不同施肥处理土壤有机碳矿化速率

Fig. 1 Mineralization rates of SOC under different fertilization treatments

长期不同施肥对土壤矿化碳累积量的影响随时间发生显著变化( $P < 0.05$ )(图 2)。各处理矿化碳累积量变化趋势一致, 均表现为在培养前期快速增加, 后期增加缓慢, 并始终保持 NPKOM > NPK2 > NPK > CK 的趋势。有机无机肥配施处理矿化碳累积量显著高于其他处理( $P < 0.05$ )(第 1 天除外), 单施化肥处理(NPK 和 NPK2)矿化碳累积量同 CK 处理没有显著性差异。在

培养结束时, NPKOM 处理矿化碳累积量(C<sub>d35</sub>)为 589 mg/kg, 比 CK、NPK 和 NPK2 处理分别提高 42.7%、32.8% 和 27.3%。

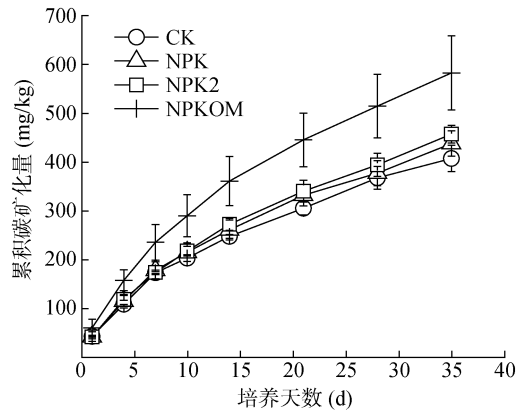


图 2 不同施肥处理土壤矿化碳累积量

Fig. 2 Cumulative mineralized C under different fertilization treatments

土壤矿化碳累积量占土壤有机碳(SOC)总量的比例为 2.07% ~ 2.48%(表 1), 总体趋势为 NPKOM > NPK2 > NPK > CK, NPKOM 处理矿化率较 NPK2、NPK 和 CK 处理分别提高了 7.8%、9.7% 和 19.8%, NPKOM 处理矿化比例显著高于 CK 处理( $P < 0.05$ ), 其他处理间差异不显著。

### 2.3 长期不同施肥措施对土壤氮矿化的影响

在整个培养周期内, 各施肥处理对土壤有机氮矿化速率的影响随时间发生显著变化( $P < 0.05$ )(图 3), 其中 NPK 和 CK 处理间氮矿化速率没有显著差异, 均随培养时间延长逐渐降低。NPKOM 和 NPK2 处理氮矿化速率在培养第一周时没有差异, 均显著高于 NPK 和 CK 处理( $P < 0.05$ )。培养第二周时, NPKOM 和 NPK2 表现出相反的趋势, NPKOM 氮矿化速率快速升高, 达 19.5 mg/(kg·d), 显著高于其他处理( $P < 0.05$ ); 而 NPK2 处理则降低至 3.9 mg/(kg·d), 低于 NPK 和 CK 处理。第三周 NPKOM 处理氮矿化速率迅速降低, 到第四周时降至 3.7 mg/(kg·d), 与其他处理没有差异。

长期不同施肥对土壤矿化氮累积量的影响随时间发生显著变化( $P < 0.05$ )(图 4), 均随培养时间的延长而增加(图 4), 在前两周矿化曲线斜率相对较大, 增加幅度较大, 随后几周曲线趋于平缓。与 CK 处理相比, 不同施肥处理均不同程度地提高了土壤有机氮矿化累积量。有机无机肥配施处理矿化氮累积量显著高于其他处理( $P < 0.05$ )(第 7 天除外), 第 28 天时含量达 307.50 mg/kg, 比 CK 处理高 110.0%; NPK2 处理较 CK 处理提高 29.4%, 差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。除

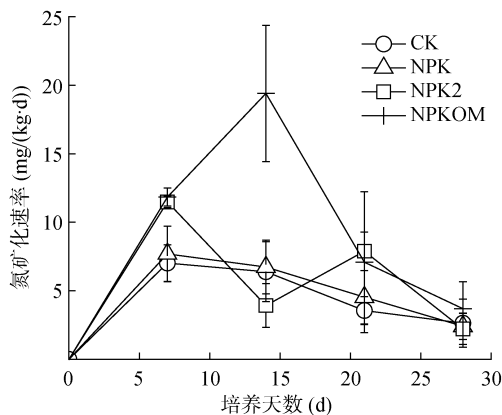


图 3 不同施肥处理土壤氮矿化速率

Fig. 3 Mineralization rates of N under different fertilization treatments

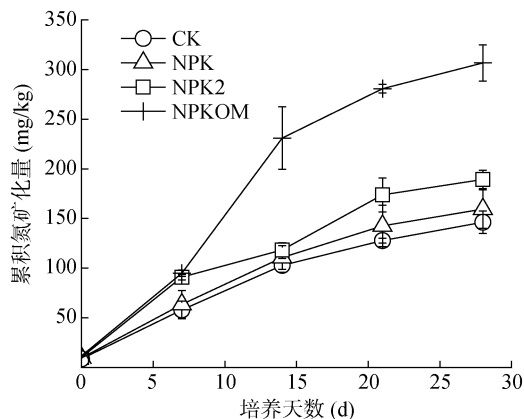


图 4 不同施肥处理土壤矿化氮累积量

Fig. 4 Cumulative mineralized N under different fertilization treatments

第 1 天外，NPK 与 CK 处理间矿化量没有显著差异。

培养 28 d 后氮累积矿化率为 7.53% ~ 15.87% (表 1)，总体趋势为：NPKOM>NPK2>NPK>CK，其中，NPKOM 处理矿化率较 NPK2、NPK 和 CK 处理分别提高了 67.8%、86.5% 和 110.8%( $P<0.05$ )；NPK2 与 NPK 处理间差异不显著，但是显著高于 CK 处理 ( $P<0.05$ )；NPK 和 CK 处理间没有显著差异。结果表明，单施化肥且化肥达到一定量时能有效提高土壤氮矿化率，有机无机肥配施则能进一步提高土壤氮矿化率。

### 2.4 长期不同施肥措施对土壤团聚体稳定性的影响

不同施肥处理土壤各级团聚体比例表现出相似

规律(表 2)。各处理中 0.25 ~ 2 mm 团聚体所占比例最高，为 43.5% ~ 46.7%；<0.053 mm 团聚体所占比例最低，为 4.7% ~ 6.1%。NPKOM 处理能提高较大粒径水稳性团聚体(> 2 mm 和 0.25 ~ 2 mm)的比例，与 CK、NPK、NPK2 处理相比，分别增加 9.8%、14.9% 和 14.2%，但没达到显著性差异水平。NPK 处理的 <0.25 mm 团聚体含量分别较 CK、NPK2 和 NPKOM 提高 10.6%、1.5% 和 42.1%。同 CK 处理相比，单施化肥处理(NPK 和 NPK2)MWD 分别降低了 17.1% 和 15.5%，而 NPKOM 处理则增加了 19.4%，各处理间均未达到显著性差异水平。

表 2 不同施肥处理土壤水稳性团聚体分布特征

Table 2 Aggregate size distributions under different fertilization treatments

处理	水稳性团聚体分布(%)				MWD
	>2 mm	0.25 ~ 2 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm	
CK	26.2 ± 9.8 a	43.5 ± 3.7 a	24.4 ± 6.2 a	5.8 ± 1.0 a	1.29 ± 0.4 a
NPK	19.9 ± 12.0 a	46.7 ± 3.2 a	27.6 ± 7.9 a	5.8 ± 1.0 a	1.07 ± 0.5 a
NPK2	20.6 ± 11.3 a	46.4 ± 2.0 a	26.8 ± 7.8 a	6.1 ± 1.7 a	1.09 ± 0.4 a
NPKOM	32.0 ± 22.2 a	44.5 ± 13.5 a	18.8 ± 7.1 a	4.7 ± 1.9 a	1.54 ± 0.8 a

### 2.5 土壤有机碳、氮矿化与土壤团聚体稳定性和有机碳、氮含量之间的关系

相关分析表明(表 3)，土壤有机碳、氮的累积矿化量( $C_{d35}$ 、 $N_{d28}$ )同有机碳(SOC)和全氮(TN)均具有显著的正相关( $P<0.05$ )，说明土壤有机碳、氮含量是土壤碳、氮矿化的决定因子。水稻土团聚体稳定性(MWD)同 SOC 和 TN 相关性不显著，与碳、氮的累积矿化量相关性不显著。

表 3 土壤碳氮累积矿化量与有机碳、全氮和团聚体稳定性的相关分析

Table 3 Correlation coefficients between cumulative mineralized C, N and SOC, TN and MWD

	SOC	TN	$C_{d35}$	$N_{d28}$	MWD
SOC	1				
TN	0.96**	1			
$C_{d35}$	0.91**	0.87*	1		
$N_{d28}$	0.85**	0.74*	0.89*	1	
MWD	0.01	-0.11	-0.12	0.29	1

注：样本数  $n=12$ ，\*表示相关性达到  $P<0.05$  显著水平，\*\*表示相关性达到  $P<0.01$  显著水平。

## 3 讨论

长期平衡施用化肥或有机肥化肥配施显著提高

了水稻产量<sup>[5,13-14]</sup>。本研究中各处理水稻根茬和地下生物量全部还田,产量的提高意味着有机质投入量的增加。虽然长期化肥有机肥配合施用提高了有机碳和全氮含量,但单独施用化肥并没有提高水稻土有机碳氮含量(表 1),这与郭振等<sup>[15]</sup>研究结果一致。主要是由于长期施用化肥导致土壤 C/N 下降,加速了土壤有机碳库的分解,使土壤中累积的有机碳总量减少<sup>[16]</sup>。有机物投入量增加但是土壤有机碳氮却没有增加,表明单独施用化肥处理下土壤有机碳氮矿化速率可能高于不施肥处理。本试验印证了该结果,在整个培养过程中,单施化肥处理的碳矿化速率均高于 CK 处理(第 7 和 28 天除外),同样,单施化肥处理的氮矿化速率也高于 CK 处理(NPK2 处理的第 14、28 天除外)(图 1、图 3)。

本研究中,有机碳矿化速率总体趋势为 NPKOM>NPK2>NPK>CK(图 1),NPKOM 处理显著高于其他处理,其他处理间差异不显著,土壤有机碳累积矿化率也呈现相同的趋势(表 1)。土壤有机碳的矿化特征反映了土壤的固碳能力,一般认为土壤有机碳累积矿化率越低,表明土壤的固持碳氮的能力越强,反之则越弱<sup>[17]</sup>。本研究中,NPKOM 处理有机碳投入量显著高于其他处理,虽然其累积矿化率最高,但是土壤 SOC 含量仍为最高。单独施用化肥处理(NPK2 和 NPK)有机碳的投入主要来源于水稻根茬和地下生物量,尽管总量均高于 CK 处理,但是由于其有机碳累积矿化率也高于 CK 处理,导致处理间土壤 SOC 含量没有显著差异<sup>[5]</sup>。吴萌等<sup>[7]</sup>发现常熟乌栅土和重庆紫色土区域化肥处理并没有提高土壤碳矿化速率;而苗淑杰等<sup>[18]</sup>对东北黑土和张旭博等<sup>[19]</sup>对南方红壤的研究均发现与不施肥处理相比,化肥处理提高了土壤有机碳矿化速率。这些结果表明,由于土壤性质和环境的影响,不同的土壤类型对长期施用化肥的响应并不一致。

土壤氮矿化速率、累积矿化量和矿化率同土壤碳矿化具有类似的规律。NPKOM、NPK2 和 NPK 处理累积矿化氮量较 CK 处理分别提高 110.0%、29.4% 和 8.8%,矿化率分别提高 110.8%、25.6% 和 13.0%。同土壤有机碳含量变化规律类似,NPKOM 处理由于大量的有机氮投入,虽然氮累积矿化率最高,但该处理土壤的 TN 含量仍显著高于其他处理;而 NPK2 和 NPK 处理通过根茬和地下生物量带入的有机氮投入量高于 CK 处理,但是因为矿化率也高于 CK 处理,因而处理间 TN 含量没有显著差异。

土壤结构是影响碳氮转化的重要因素<sup>[20-21]</sup>,但是

关于土壤结构对碳氮矿化的定量分析却很少,原因之一是土壤结构没有一个简单的、统一的定量指标<sup>[22]</sup>。团聚体是土壤结构的构成单元<sup>[23-24]</sup>,大量研究用团聚体稳定性表征土壤结构的稳定性和团聚程度<sup>[25]</sup>。为了研究土壤碳氮矿化同土壤结构之间的关系,本研究分析了不同施肥处理土壤团聚体水稳定性。发现与不施肥处理相比,有机无机配施处理土壤团聚体水稳定性有所增加,而单施化肥处理团聚体水稳定性有所降低,这与 Yan 等<sup>[5]</sup>和郭菊花等<sup>[26]</sup>结果一致。通过分析发现,土壤碳氮矿化主要取决于土壤有机碳氮含量,而同土壤团聚体水稳定性之间的相关性不显著。土壤团聚体及其稳定性经常被用来表征土壤结构,但是对于水稻土而言,在采样和分析过程中,团聚体水稳性的分析受到很多人为因素的影响,并不能很好地表征水稻土结构特征。在土壤有机碳氮周转过程中,土壤孔隙特征对土壤中水分、气体和微生物等可能具有更加重要的作用。因此,在今后研究中,应重点分析土壤孔隙结构分布与有机碳氮周转速率的关系<sup>[27-28]</sup>。

## 4 结论

长期化肥和有机肥配施能够显著提高土壤有机碳和全氮含量,而单施化肥处理则同不施肥处理间没有显著差异。有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化率在各处理间趋势为 NPKOM>NPK2>NPK>CK,NPKOM 处理显著高于其他 3 个处理( $P<0.05$ ),3 个处理间差异不显著。土壤氮矿化速率、累积矿化量和矿化率同土壤碳矿化具有类似的规律。NPKOM、NPK2 和 NPK 处理累积矿化氮量较 CK 处理分别提高 110.0%、29.4% 和 8.8%,矿化率分别提高 110.8%、25.6% 和 13.0%。单施化肥处理团聚体水稳定性有所降低,而 NPKOM 处理团聚体水稳定性则有所增加。土壤碳氮矿化主要取决于土壤有机碳氮含量,而同土壤团聚体水稳定性相关性不显著。

## 参考文献:

- [1] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 950-960
- [2] 关强,蒲瑶瑶,张欣,等. 长期施肥对水稻根系有机酸分泌和土壤有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 115-121
- [3] 李忠芳,张水清,李慧,等. 长期施肥下我国水稻土基础地力变化趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1394-1402

- [4] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 543-551
- [5] Yan X, Zhou H, Zhu Q H, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130(6): 42-51
- [6] 马天娥, 魏艳春, 杨宪龙, 等. 长期施肥措施下土壤有机碳矿化特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 8-16
- [7] 吴萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1705-1714
- [8] 刘艳丽, 张斌, 胡锋, 等. 干湿交替对水稻土碳氮矿化的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4): 554-560
- [9] 彭显龙, 刘洋, 于彩莲, 等. 寒地稻田土壤氮素矿化特征的研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(4): 702-709
- [10] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍, 等. 好气与淹水条件下水稻土各粒级团聚体有机碳矿化量[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1944-1950
- [11] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1949, 14: 20-23
- [12] Waring S A, Bremner J M. Ammonium production in soil under water logged conditions as an index of nitrogen availability[J]. *Nature*, 1964, 201: 951-952
- [13] Rasool R, Kukal S S, Hira G S. Soil physical fertility and crop performance as affected by long term application of FYM and inorganic fertilizers in rice-wheat system[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96(1/2): 64-72
- [14] Shen J, Li R, Zhang F, et al. Crop yields, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil[J]. *Field Crops Research*, 2004, 86(2/3): 225-238
- [15] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 1-12
- [16] 邓婵娟. 长期施肥对稻田土壤氮素转化特征及酶活性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008
- [17] 郭振, 王小利, 徐虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1168-1174
- [18] 苗淑杰, 周连仁, 乔云, 等. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1068-1075
- [19] 张旭博, 徐明岗, 林昌虎, 等. 施肥对红壤有机碳矿化特征的影响[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(6): 99-102
- [20] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783
- [21] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2007, 124(1): 3-22
- [22] 周虎, 吕贻忠, 李保国. 土壤结构定量化研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 501-506
- [23] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 64(2): 681-689
- [24] 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
- [25] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 422-429
- [26] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 117-123
- [27] Bouckaert L, Sleutel S, Van Loo D, et al. Carbon mineralisation and pore size classes in undisturbed soil cores[J]. *Soil Research*, 2013, 51(1): 14-22
- [28] Sleutel S, Bouckaert L, Buchan D, et al. Manipulation of the soil pore and microbial community structure in soil mesocosm incubation studies[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 45: 40-48

## Effects of Long-term Fertilization on Paddy Soil Carbon and Nitrogen Mineralization and Aggregates Stability

LI Yi<sup>1,2</sup>, LIU Lingling<sup>3</sup>, FANG Huan<sup>2,4</sup>, LI Daming<sup>5</sup>, LIU Kailou<sup>5</sup>,  
PENG Xinhua<sup>2</sup>, PENG Xianlong<sup>1\*</sup>, ZHOU Hu<sup>2\*</sup>

(1 College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 School of Resources and Environmental Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331717, China)

**Abstract:** Mineralization of soil organic carbon (SOC) and nitrogen (N) plays an important role in maintaining soil quality and providing nutrients for crop growth. However, the response of carbon (C) and N mineralization to fertilization strategies and their relationship with soil structure are not clear. In this study, the effects of different fertilization strategies on the mineralization of SOC and N of a paddy soil were analyzed based on a long-term field experiment. The relationship between carbon (C) and N mineralization and the water stability of soil aggregates was also studied. The field experiment had 4 fertilization treatments: no fertilizer (CK), chemical fertilizer (NPK), double chemical fertilizer (NPK2) and chemical fertilizer plus organic manure (NPKOM). Results showed that NPKOM treatment significantly increased SOC and total nitrogen (TN) contents compared to CK; however, no significant difference was found between the treatments of chemical fertilizers (NPK2 and NPK) and CK treatments. The mineralization rates, cumulative mineralization and mineralization ratio of SOC all showed the same trend as NPKOM>NPK2>NPK>CK, where NPKOM treatment was significantly higher than other treatments while there was no significant difference among NPK2, NPK and CK treatments. The mineralization rates, cumulative mineralization, and N mineralization ratio showed the same trends as SOC. Compared with CK treatment, NPKOM, NPK2 and NPK treatments increased N cumulative mineralization by 110.0%, 29.4% and 8.8% respectively, and increased N mineralization rate by 110.8%, 25.6% and 13% respectively. Compared to CK treatment, the mean weight diameter (MWD) of water-stable aggregates of NPK2 and NPK treatments decreased by 17.1% and 15.5%, respectively, while NPKOM treatment increased MWD by 19.4%. Correlation analysis shows that the mineralization of SOC and N mainly depended on SOC and N content, and was not correlated with the water stability of soil aggregates. Future research should focus on the effect of soil pore structure on the turnover of SOC and N.

**Key words:** Paddy soil; Carbon and Nitrogen mineralization; Aggregate water stability