

施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异 及其矿化特性的影响^①

马力¹, 杨林章^{1*}, 肖和艾², 夏立忠¹, 李运东¹, 刘晓春³

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 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, 长沙 410125;
3 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 利用始于1990年的湖南桃园红壤水稻土长期定位试验, 研究了长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土剖面有机碳含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布, 有机碳密度和变异幅度, 以及有机碳矿化特性的影响。结果表明, 长期施肥和秸秆还田使红壤稻田土壤表层有机碳含量显著升高, 秸秆还田对有机质的累积作用明显优于仅施化肥处理。施肥或秸秆还田使0~25 cm和0~50 cm土层的有机碳密度均明显提高, 且有机碳变异幅度也明显增大。0~10 cm表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与对照的差异最大, 而施化肥或秸秆还田处理之间的差异不大。各施肥处理土壤有机碳在培养初期的矿化速率较大, 并在1~3周内迅速降低且逐渐达到稳定状态。秸秆还田使各处理有机碳矿化速率的提高较明显, 各处理的平均矿化速率为 CO_2 47.75~31.16 ml/(kg·d), 稳定矿化速率为 CO_2 40~60 ml/(kg·d), 12周培养期内累积矿化量大小为 $\text{CK}+\text{C}>\text{NP}+\text{C}>\text{N}+\text{C}>\text{NPK}+\text{C}>\text{NP}>\text{NPK}>\text{N}>\text{NK}>\text{CK}$ 。长期施化肥和秸秆还田, 均使土壤有机碳的累积矿化量提高, 而秸秆还田作用更明显。因此, 长期施肥和秸秆还田作为土壤有机碳累积的途径, 有利于提高红壤水稻土的养分供应能力, 并且能够维持稻田生态系统有机碳库的缓冲性和长期稳定性。

关键词: 施肥; 秸秆还田; 水稻土; 有机碳; 分布; 变异; 矿化

中图分类号: S151.9; S153.6

土壤有机碳库在维持土壤肥力和农业生态系统稳定方面有着重要作用。作为全球生态系统中最大的碳库, 有机碳固定和矿化过程对全球大气 CO_2 浓度起到重要的调节作用^[1-3]。红壤是我国亚热带地区重要的土壤资源, 在长期水耕熟化过程中发育而成的红壤水稻土在南方稻作区分布很广^[4]。稻田生态系统是土壤生态系统的子系统, 也是农田生态系统的重要组成部分^[5]。长期水耕熟化过程对水稻土有机碳库的累积将对稻田土壤生态系统稳定性产生重要影响。目前, 研究农业土壤有机碳的分布转化是研究陆地生态系统碳循环和全球变化的重要领域之一^[6-13]。

土壤有机质 ^{13}C 同位素自然丰度($\delta^{13}\text{C}$)受生长植物类型、土壤质地和有机质分解特征的影响很大, $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化可以反映土壤有机碳来源、分解周转规律和受施肥耕作的影响程度^[14-16]。目前, 虽然利用长期定位试验研究水稻土有机碳循环的相关报道较多^[17-20], 但水稻土有机碳库的分布变异及养分供应强度

与长期施肥、耕作及气候因素之间关系和作用机理, 仍尚不明确, 稻田土壤的固碳潜力问题也存在不确定性^[10]。长期定位试验是研究施肥、作物及耕作活动对土壤生态系统长期影响的主要手段^[21], 本研究利用始于1990年的湖南桃园地区红壤水稻土长期定位试验, 并运用 ^{13}C 稳定性同位素自然丰度指标, 深入探讨了长期施肥对水稻土剖面有机碳分布和分解状况、有机碳密度和变异幅度、以及有机碳矿化特性的影响, 旨在为阐明长期施肥和秸秆还田作用下红壤水稻土有机碳库的变化机理, 及其碳循环过程与稻田土壤生态系统稳定性之间的联系提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点是位于湖南省桃源县的中国科学院桃源农业生态站宝洞峪试验场(111°33' E, 28°55' N), 该地属于中亚热带向北亚热带过渡的季风湿润气候区,

①基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2005CB121108)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-407)资助。

* 通讯作者(lzyang@issas.ac.cn)

作者简介: 马力(1979—), 男, 安徽阜阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤生态系统养分循环与面源污染控制方面研究。E-mail: lma@issas.ac.cn

年均温 16.5℃, 降雨量 1447.9 mm, 日照 1531.4 h, 太阳辐射 322.6 kJ/cm², 无霜期 283 天, 代表区域为江南红壤丘陵单、双季稻作复合农业生态类型区。供试土壤为第四纪红色黏土发育的水稻土, 试验前的土壤背景值如下: pH (H₂O) 5.74, 有机质 23.3 g/kg, 全氮 1.39 g/kg, 全磷 0.604 g/kg, 全钾 14.94 g/kg, 速效氮 53.4 mg/kg, 速效磷 14.7 mg/kg, 速效钾 67.7 mg/kg。

1.2 试验设计

试验始于 1990 年, 以“早稻-晚稻-绿肥”种植制度为基础, 设 9 个处理, 3 次重复, 完全随机区组排列, 小区面积 33.2 m² (4.1 m × 8.1 m), 各小区之间用水泥田埂分隔, 其地下埋深 0.5 m, 地表露出 0.2 m。

处理设计如下: ①不施肥对照 (CK); ②不施化肥, 仅用稻草秸秆还田 (CK + C); ③施化学氮肥 (N); ④化学氮肥 + 秸秆还田 (N + C); ⑤化学氮磷肥 (NP); ⑥化学氮磷肥 + 秸秆还田 (NP + C); ⑦化学氮钾肥 (NK); ⑧化学氮磷钾肥 (NPK); ⑨化学氮磷钾肥 + 秸秆还田 (NPK + C)。其中处理 2、4、6 和 8 收获的稻草秸秆和绿肥直接还田, 收获稻谷的 80% (1994 年后减为 50%) 及全部空瘪谷喂猪, 猪粪尿还田。处理 1、3、5 和 7 收获的稻谷和稻草秸秆全部移出小区。供试的氮肥为尿素, 磷肥为过磷酸钙, 钾肥为氯化钾, 各处理化肥的施肥量见表 1 [22]。

表 1 试验设计及各处理施肥量

Table 1 Experimental design and fertilizer application rates of different treatments

编号	处理	氮肥 (N) (kg/(hm ² ·a))	磷肥 (P ₂ O ₅) (kg/(hm ² ·a))	钾肥 (K ₂ O) (kg/(hm ² ·a))	秸秆
1	CK	0	0	0	-
2	CK+C	0	0	0	稻秸秆还田
3	N	183	0	0	-
4	N+C	183	0	0	稻秸秆还田
5	NP	183	90.4	0	-
6	NP+C	183	90.4	0	稻秸秆还田
7	NK	183	0	238.6	-
8	NPK	183	90.4	238.6	-
9	NPK+C	183	90.4	238.6	稻秸秆还田

1.3 土壤样品采集

土壤样品于 2007 年 11 月水稻收获后采集, 每个小区用土钻取耕层土壤 (0 ~ 15 cm) 和剖面土壤 (0 ~ 50 cm) 样品, 根层土按对角线法取 5 个点组成一个混合样品, 剖面土样按每隔 10 cm 一个层次采取。新鲜根层土样略微风干后挑去作物根系, 过 10 目筛并保存于 4℃ 冰箱中, 供矿化培养试验使用。剖面土样充分风干后挑去作物根系, 用瓷研钵磨细, 过 20 和 100 目筛, 供理化性质分析使用。

1.4 土壤有机碳矿化好气培养试验

称取过 10 目筛的新鲜土样 20 g 于 250 ml 培养瓶中, 根据土壤含水量计算出田间持水量 60% 时的需水量, 均匀地加入瓶内土壤中。吸取 5 ml 0.1 mol/L NaOH 溶液于 10 ml 特制吸收瓶中, 将盛 NaOH 溶液的吸收瓶置于培养瓶内, 瓶口用聚乙烯塑料薄膜封好, 并拧紧瓶盖, 于 28℃ 恒温箱中培养。在培养第 1 周每天测定 1 次, 以后第 7、10、14、17、21、28、35、42、

49、56 天时取出容量瓶, 用去 CO₂ 的蒸馏水定容, 从中吸取 5.0 ml 于 50 ml 三角瓶中, 加 1 mol/L BaCl₂ 溶液 2 ml, 酚酞作指示剂, 用标准盐酸滴定至褪色。根据土壤呼吸的 CO₂ 释放量计算不同培养时期土壤有机碳的矿化速率和矿化量 [23-25]。

1.5 土壤有机碳稳定性同位素自然丰度 (δ¹³C‰) 测定

将自然风干土样仔细剔除植物残屑, 碾磨过 100 目筛, 加盐酸去除土壤中含有的碳酸盐, 用蒸馏水洗滌至中性, 在 55℃ ~ 60℃ 下烘干并磨碎, 取一定量的土壤样品 (约含 5 mg C) 在 MAT251 型质谱仪上测定稳定碳同位素比值。稳定性碳同位素的自然丰度 (δ¹³C) 用样品的同位素比值与标准样品的同位素比值的千分差表示 (单位 ‰), R_{standard} 采用国际 PDB 标准 (Pee Dee Belemnite 标准, $R_{\text{PDB}} = 0.0112372$), δ¹³C 分析精度为 0.1‰, 由国际标准形式给出 δ¹³C (‰) 值的计算公式 [26-27]:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

式中, $R = (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})$, R_{sample} 为样品的相对丰度, R_{standard} 为标准样品的相对丰度。

1.6 土壤有机碳密度及变异幅度计算

土壤有机碳密度是统计土壤有机碳储量的主要参数, 其本身也是反映土壤养分特性的重要指标, 它是由土壤有机碳含量、体积质量 (容重) 和砾石 (粒径 > 2 mm) 含量计算得到的。本研究分别计算不同层次土壤有机碳密度以统计其储量, 并计算 0 ~ 25 cm 土层和 25 ~ 50 cm 土层有机碳储量的变异幅度。

0 ~ X cm 有机碳密度用以下公式计算^[18, 28]:

$$D_{0-X} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{X_i-X_{i+1}} \times (X_{i+1}-X_i) \times \theta_i \times (1-\delta_i)}{100} \quad (2)$$

式中, D_{0-X} 为单位面积 (1 m²) 0 ~ X cm 土层有机碳密度 (g/m²); i 为土壤层次序数 ($i = 1, 2, \dots, n$), X 为土层深度 (cm), $X_{i+1}-X_i$ 为第 i 层的土层厚度, $C_{X_i-X_{i+1}}$ 为 $X_{i+1}-X_i$ cm 土层的有机碳含量 (g/kg); θ_i 为第 i 层的土壤体积质量 (kg/m³); δ_i 为第 i 层土壤中 > 2 mm 砾石的比例。

$$D_{25-50} = D_{0-50} - D_{0-25} \quad (3)$$

式中, D_{25-50} 为单位面积 (1 m²) 25 ~ 50 cm 土层的有机碳密度 (g/m²)。

土壤 0 ~ 25 cm 和 25 ~ 50 cm 土层的有机碳密度变异幅度 (V) 用公式 (4) 计算:

$$V(\%) = \frac{(D_{0-25} - D_{25-50}) \times 100}{D_{25-50}} \quad (4)$$

1.7 常规项目测定及数据分析

土壤有机碳用重铬酸钾容量法测定^[25], 体积质量用环刀法测定^[29], 试验数据用 SAS (Statistical analysis system) 8.0 数据处理系统和 Excel2007 软件进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥红壤水稻土有机碳分布变异特征

2.1.1 长期施肥红壤水稻土剖面有机碳分布特征

经历近 20 年的长期定位施肥试验, 红壤水稻土不同施肥处理剖面有机碳含量分布发生了明显分异, 本文选择了对照 CK、仅秸秆还田处理 CK+C、纯化肥处理 NPK、以及纯化肥加秸秆还田处理 NPK+C 共 4 个处理进行分析, 以着重讨论施化肥和秸秆还田对有机

碳分布的影响。由图 1 看出, 随土层深度的增加, 各处理红壤水稻土剖面有机碳含量逐渐降低, 0 ~ 30 cm 土壤深度范围有机碳含量分布的差异较为明显, 与对照 CK 相比, 施肥和秸秆还田使该深度范围土壤有机碳含量显著增加。0 ~ 10 cm 土层秸秆还田处理 CK+C 和 NPK+C 土壤有机碳含量明显高于 NPK 和 CK 处理, 有机碳含量 NPK+C > CK+C > NPK > CK ($p < 0.05$), 说明施肥对促进稻田土壤有机碳累积的作用相当明显, 而秸秆还田在红壤水稻土中对有机质的累积作用优于仅施化肥处理。10 ~ 20 cm 土层, 秸秆处理有机碳含量仍高于化肥处理和对照, 而施化肥与否则对有机碳的影响不大。> 30 cm 土层, 各处理之间的差异趋于减少, 说明秸秆还田和施化肥主要影响的仍是 0 ~ 30 cm 范围的上层土壤。分析结果显示, 各施肥处理剖面有机碳含量与土层深度均呈显著的对数负相关关系 ($p < 0.05$), 不同处理具有较一致的规律。

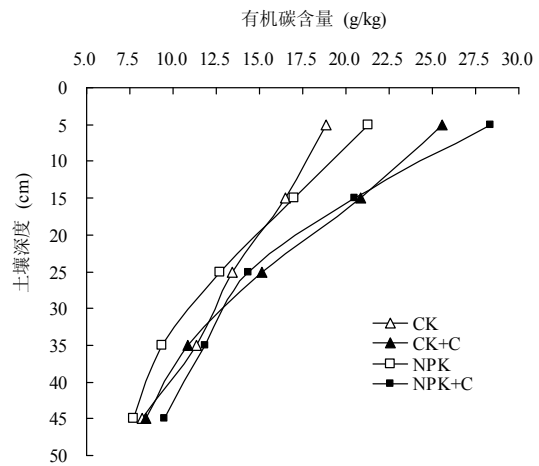


图 1 不同施肥处理水稻土有机碳剖面分布

Fig.1 Distributions of organic carbon in paddy soil profiles under different fertilizer treatments

在长期施肥和水耕过程中该试验区土壤保持均一, 并且种植植物类型保持一致, 因此认为各处理小区土壤的相同深度 $\delta^{13}\text{C}$ 背景值也是一致的, 不同施肥处理土壤剖面之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异, 能够反映长期不同的施肥方式对该地红壤水稻土有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响。由图 2 看出, 与不施肥对照相比, 长期施肥的红壤稻田土壤剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 值均有升高, 其中 0 ~ 10 cm 表层与对照的差异最大, 而施化肥或秸秆还田处理之间的差异则不大, 施肥处理土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的降低说明在长期施肥过程中土壤中累积了新的有机碳, 这部分有机碳来源于施肥输入的新有机物质, 施肥或秸秆还田促进了

土壤有机碳的积累。随着土层深度增加,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐升高,且各施肥处理与对照之间的差异趋于减小。说明下层土壤有机碳的分解程度较高,且土层深度越深,从上层土壤向下迁移的新有机碳的量越少,30~40 cm 深度已经差异较小,这反映了人为耕作施肥过程积累的新有机碳可能只影响到 0~40 cm 的稻田土壤剖面,而对下层土壤有机碳库的影响较小。

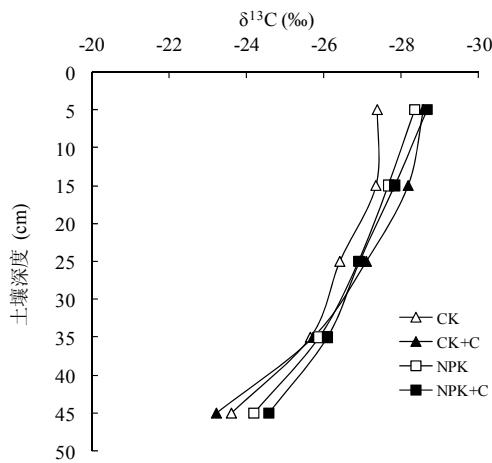


图 2 不同施肥处理土壤剖面 ^{13}C 自然丰度 ($\delta^{13}\text{C}$) 变化

Fig. 2 Changes of $\delta^{13}\text{C}$ in paddy soil profiles under different fertilizer treatments

2.1.2 长期施肥红壤水稻土剖面有机碳密度及变异幅度 有机碳密度是表示土壤剖面不同层次有机碳储量的重要指标,其数值大小反映相同层次或深度范围土壤有机养分库的大小。变异幅度 (V) 反映土壤上层和下层有机碳密度之间的差异,数值越大表明上下层土壤有机碳的变异程度越大。有机质在分解过程中会由表层向下层迁移,下层土壤有机碳因受作物根系和施肥影响较上层小而相对稳定,因此,如表层无新有机碳添加或上层有机碳分解转化速度与下层相近,则可能上下层之间的有机碳差异趋于变小,变异幅度也趋于减小。

按式 (4) 计算各处理土壤 0~25 cm 和 25~50 cm 土层有机碳密度的变异幅度 (表 2),由表 2 看出,0~25 cm 土层和 0~50 cm 土层范围秸秆还田处理 CK+C 和 NPK+C 的有机碳密度高于仅施化肥处理和对照处理,而化肥和秸秆配施处理的有机碳密度高于仅秸秆还田处理。各处理与对照差异显著,0~25 cm 土层和 0~50 cm 土层 NPK+C 处理土壤有机碳密度分别比对照 CK 提高了 29.62% 和 17.74%,说明长期施肥和秸秆还田都能促进红壤水稻土有机碳的累积,而两者配

施是最好的途径,可能更有利于提高水稻土养分循环稳定性和养分供应能力。从有机碳变异幅度结果可以看出,施肥和秸秆还田均引起土壤上下层有机碳之间的差异显著增大,引起变异幅度增大的因素主要是土壤上层有机碳累积量的增大。上层增加的有机碳可能主要是化肥和秸秆还田施入后新形成的有机碳,下层有机碳增加不明显,说明该试验地区红壤水稻土中上层新有机碳向下的迁移量不大,主要累积在 0~30 cm 范围的上层土壤。

表 2 不同施肥处理水稻土有机碳密度及变异幅度

Table 2 Soil organic carbon densities and variations in paddy soils under different fertilizer treatments

处理	D_{0-25} (g/m^2)	D_{0-50} (g/m^2)	变异幅度 V (%)
CK	4 982.95 bA	8 345.20 aA	45.09 bA
CK+C	6 172.81 abA	9 665.22 aA	76.42 aA
NPK	5 312.81 abA	8 424.66 aA	72.91 abA
NPK+C	6 458.93 aA	10 145.03 aA	76.23 aA

注:同列不同小写字母和写字母分别表示处理间在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平差异显著,下同。

2.2 长期施肥对水稻土有机碳矿化特征的影响

土壤有机碳矿化是土壤有机碳循环的重要过程,有机质矿化过程中向空气中排放 CO_2 形成土壤呼吸,是土壤有机碳输出的重要途径,也是稻田生态系统碳素循环的重要组成部分。土壤呼吸作用强度能反映土壤有机质分解及土壤有效养分的供应状况^[5,20-21]。由图 3 和表 3 看出,长期施肥的红壤水稻土各处理在好气培养初期的有机碳矿化速率最大,而随后则急剧降低,在培养 3 天后基本达到稳定,其矿化速率随着培养时间延长无显著降低,说明该红壤水稻土有机碳的矿化过程在较短时间内就能达到稳定。不同施肥处理之间的有机碳矿化速率存在显著差异,各处理在培养第 1 天时的矿化速率最大,其中化肥氮磷配施秸秆还田的处理 NP+C 矿化速率最高为 CO_2 210.61 ml/(kg·d),比对照提高了 52.48%,说明长期化肥配施秸秆可以显著促进土壤有机质的分解矿化,引起呼吸作用增强。各处理的最大矿化速率大小为 NP+C > CK+C > N+C > NPK+C > NP > N > NPK > CK > NK ($p < 0.05$)。3 天后稳定的矿化速率约 CO_2 40~60 ml/(kg·d),稳定后各处理的矿化速率大小仍为 NP+C > CK+C > N+C > NPK+C > NP > N > NPK > CK ($p < 0.05$),在整个培养期内,所有秸秆还田处理土壤的有机碳矿化速率均高

于仅施化肥处理和对照，说明秸秆施入明显提高了土壤有机碳的矿化强度，使土壤呼吸作用明显高于仅施化肥处理和对照，其原因是秸秆输入为土壤微生物提供了丰富的碳源和氮源，增强了微生物群落的活性，使土壤呼吸作用得到增强，也提高了土壤的养分供应强度。各处理在培养期内的平均矿化速率范围在 CO_2 47.75 ~ 31.16 ml/(kg·d)，且秸秆还田处理明显高于化肥处理和对照。

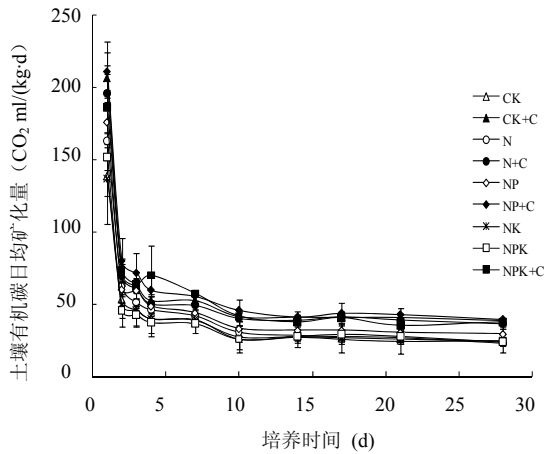


图 3 不同施肥处理水稻土有机碳日均矿化速率变化

Fig. 3 Daily mineralization rates of organic carbon in paddy soils under different fertilizer treatments

由图 4 看出，红壤水稻土各处理有机碳的累积矿化量均随着培养时间的延长逐渐升高，不同处理与对照的变化趋势一致，并且从矿化曲线的斜率变化可以看出，在整个 12 周的培养期内，各处理可以逐渐达到并保持一个较稳定的矿化速率，使累积矿化量一直保

持稳定增加的趋势。从图 4 和表 3 看出，无论单纯秸秆还田处理还是秸秆配施化肥处理，其累积矿化量始终高于仅施化肥处理和对照，其中单独秸秆还田处理的累积矿化量保持最大，而单施化肥处理中氮磷配施处理为最大，两者 12 周后的累积矿化量分别比对照提高了 66.8% 和 19.37%，说明秸秆还田对提高土壤有机碳矿化量有明显作用，其效果显著优于单施化肥，而该试验地红壤水稻土施钾与否对有机碳矿化速率和矿化量并无明显影响。各处理在 12 周培养期内累积矿化量大小为 $\text{CK}+\text{C} > \text{NP}+\text{C} > \text{N}+\text{C} > \text{NPK}+\text{C} > \text{NP} > \text{NPK} > \text{N} > \text{NK} > \text{CK}$ ($p < 0.05$)，其中不施磷处理的累积矿化量较低，说明施磷可能对提高土壤微生物活性，促进有机碳的矿化有比较重要的作用。各处理累积矿化量与培养时间均呈极显著的线性正相关关系 ($p < 0.05$)，不同处理的矿化规律表现较好的一致性。

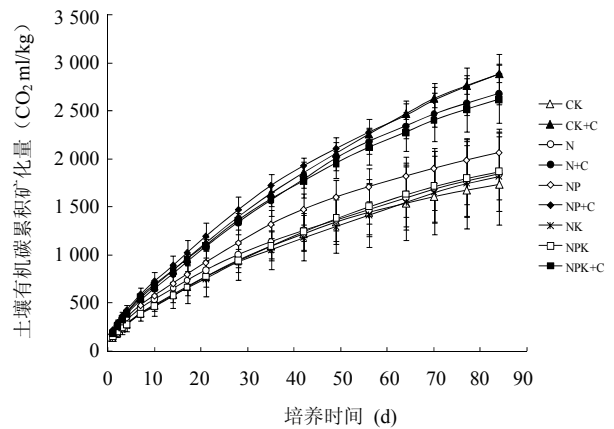


图 4 不同施肥处理水稻土有机碳累积矿化量变化

Fig. 4 Cumulative mineralizations of organic carbon in paddy soils under different fertilizer treatments

表 3 各处理土壤的最大矿化速率、平均矿化速率、稳定矿化速率和累积矿化量

Table 3 Maximal, average and stable mineralization rates and cumulative mineralization rates in paddy soils under different fertilizer treatments

处理	最大矿化速率 (CO_2 ml/(kg·d))	平均矿化速率 (CO_2 ml/(kg·d))	稳定矿化速率 (CO_2 ml/(kg·d))	累积矿化量 (CO_2 ml/(kg·d))
CK	138.12 eC	31.16 cC	20.26 bC	1729.77 bC
CK + C	206.36 abA	47.75 aA	33.44 aA	2885.34 aA
N	163.12cd eABC	34.47 bcC	21.30 bC	1842.99 bC
N + C	195.92 abcAB	45.19 aAB	31.24 aAB	2678.70 aAB
NP	175.48 bcdABC	37.69 bBC	23.91 bBC	2064.84 bBC
NP + C	210.61 aA	49.60 aA	33.66 aA	2883.79 aA
NPK	151.81 deBC	32.22 bcC	21.64 bC	1867.56 bC
NPK + C	185.95 abcAB	45.64 aAB	30.64 aAB	2621.34 aAB

注：平均矿化速率为 8 周内矿化速率的平均值，稳定矿化速率为第 1 周至第 12 周矿化速率的平均值。

表 4 结果反映了 12 周培养期内, 红壤水稻土不同施肥处理土壤有机碳的总矿化强度和 1 周矿化速率稳定后土壤的稳定矿化率, 可以看出在好气培养条件下红壤水稻土 12 周内的总矿化量仍只占有有机碳含量的很小一部分, 约 6% 左右。与不施肥对照相比, 无论单施化肥、秸秆还田或两者结合, 土壤的总矿化强度均无显著差异, 仅施秸秆处理的数据略高于对照和仅施化肥处理。各处理的稳定矿化率约在 75%~80%, 说明第 1 周矿化速率稳定以后的 11 周时间内矿化掉的是该 6% 土壤有机碳的绝大部分, 结合图 4 可以看出直到培养后期, 红壤水稻土仍然保持一个较稳定的矿化速率, 该速率较太湖地区水稻土的稳定矿化速率高,

其培养后期的矿化潜力也明显高于太湖地区水稻土。各处理之间的稳定矿化率的数据差异不显著, 只有仅施秸秆处理的数据略高于仅施化肥处理和对照。虽然长期施肥土壤的有机碳矿化速率与对照相比显著提高, 不同施肥方式之间也存在差异, 但各处理的矿化速率均在一定时期内达到稳定, 且总矿化强度、稳定矿化速率和矿化率的变化范围不大, 这说明长期不同的施肥方式并不是改变土壤有机质矿化速率的决定因素, 土壤有机碳的矿化强度是受气候、母质、作物类型、耕作措施等因素共同作用的^[22]。矿化速率的稳定也反映湖南长期试验点红壤稻田土壤生态系统的有机碳库具有较强缓冲性。

表 4 不同施肥处理土壤总矿化强度和稳定矿化率

Table 4 Soil total mineralization intensities and stable mineralization rates in paddy soils in different fertilizer treatments

处理	矿化强度 (%)	稳定矿化率 (%)	处理	矿化强度 (%)	稳定矿化率 (%)
CK	5.12 abA	77.19 abA	CK+C	6.44 aA	80.87 aA
N	5.47 abA	75.28 bA	N+C	6.21 abA	80.36 aA
NP	5.60 abA	76.97 abA	NP+C	6.36 abA	79.60 abA
NPK	5.04 bA	78.81 abA	NPK+C	5.45 abA	78.46 abA

注: 矿化强度为总矿化量与土壤有机碳含量比值, 稳定矿化率为第 2 周至第 12 周矿化量与总矿化量比值。

3 结论与讨论

长期施肥和秸秆还田使湖南红壤稻田土壤表层有机碳含量显著升高, 秸秆还田对有机质的累积作用明显优于仅施化肥处理, 且主要影响的是 0~30 cm 范围的上层土壤。0~25 cm 和 0~50 cm 土层施肥或秸秆还田使得有机碳密度均明显提高, 施化肥和秸秆还田都能明显促进土壤有机碳的累积, 但两者配施是最好的途径。在水耕条件下施化肥和秸秆还田也使有机碳变异幅度明显增大。各施肥处理 0~10 cm 表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与对照的差异最大, 而施化肥或秸秆还田处理之间的差异不大。随土壤深度的增加, 土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐升高, 而各施肥处理与对照之间的差异趋于减小。施肥积累的新有机碳可能只影响到 0~40 cm 的土壤剖面。

红壤水稻土各施肥处理土壤有机碳在培养初期的矿化速率较大, 而在随后的 1~3 周内迅速降低并逐渐达到稳定状态, 在 12 周的培养期内, 各处理土壤有机碳均能达到一个较稳定的矿化速率和矿化强度。秸秆还田及其与化肥配施也使土壤有机碳最大矿化速率与对照差异显著, 而秸秆还田的作用更明显。各处理的

平均矿化速率为 CO_2 47.75~31.16 ml/(kg·d), 稳定矿化速率为 CO_2 40~60 ml/(kg·d), 红壤水稻土培养后期的矿化潜力较高。不同施肥处理的累积矿化量与培养时间分别呈极显著对数正相关和线性正相关。无论单纯秸秆还田处理还是秸秆配施化肥处理, 其累积矿化量始终高于仅施化肥处理和对照, 而单纯秸秆还田处理 CK+C 累积矿化量最大。因此, 长期施化肥、有机肥或秸秆还田, 均能使土壤有机碳的累积矿化量提高, 而施秸秆的作用更明显。不同施肥处理土壤有机碳矿化强度和稳定矿化率的相对稳定状态表明, 土壤在长期水耕种稻、施化肥和秸秆还田条件下, 其碳库的循环和转化速率仍是保持相对稳定的。因此, 湖南红壤地区长期施肥和秸秆的稻田土壤碳库和养分供应能力仍具有较强缓冲性和稳定性。

参考文献:

- [1] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题——兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议. 南京农业大学学报, 2002, 25(3): 100-109
- [2] Chen JS, Chiu CY. Characterization of soil organic matter in different particle-size fractions in humid subalpine soils by

- CP/MAS ^{13}C NMR. *Geoderma*, 2003, 117: 129-141
- [3] Barrios E, Buresh RJ, Sprent JI. Organic matter in soil particle size and density fractions from maize and legume cropping systems. *Soil Biol. Biochem.*, 1996, 28(2):185-193
- [4] 陈惟财, 王凯荣, 谢小立. 长期不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体中碳、氮分布的影响. *土壤通报*, 2009, 40(3): 523-528
- [5] 徐琪, 杨林章, 董元华. 中国稻田生态系统. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1-8
- [6] 向艳文, 郑圣先, 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 聂军. 长期施肥对红壤水稻土水稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2 415-2 424
- [7] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴, 樊后保. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳动态变化的影响. *土壤*, 2008, 40(2): 237-242
- [8] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 赵其国. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38(4): 522-528
- [9] Xu Q, Rui WY, Bian XM, Zhang WJ. Regional differences and characteristics of soil organic carbon density between dry land and paddy field in china. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(8): 981-987
- [10] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析. *土壤学报*, 2006, 43(1): 46-52
- [11] Zhang W, Yu YQ, Sun WJ, Huang Y. Simulation of soil organic carbon dynamics in Chinese rice paddies from 1980 to 2000. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 1-10
- [12] Zhang XH, Li LQ, Pan GX. Topsoil organic carbon mineralization and CO_2 evolution of three paddy soils from South China and the temperature dependence. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19: 319-326
- [13] Daliasa P, Andersonb JM, Bottner P, Coûteaux MM. Long-term effects of temperature on carbon mineralisation processes. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 1 049-1 057
- [14] 沈其荣, 殷士学, 杨超光, 陈巍. ^{13}C 标记技术在土壤和植物营养研究中的应用. *植物营养与肥科学报*, 2000, 6(1): 98-10
- [15] 朱书法, 刘丛强, 陶发祥. ^{13}C 方法在土壤有机质研究中的应用. *土壤学报*, 2005, 42(3): 495-530
- [16] 张晋京, 窦森, 张大军. 长期施肥对土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响的初步研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 382-387
- [17] 周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响. *植物营养与肥科学报*, 2006, 12(6): 765-771
- [18] 慈恩, 杨林章, 马力, 唐玉姝, 程月琴, 殷士学. 长期耕作水稻土的有机碳分布和稳定性同位素特征. *水土保持学报*, 2007, 5(21): 72-75, 179
- [19] Zheng JF, Zhang XH, Li LQ, Zhang PJ, Pan GX. Effect of long-term fertilization on C mineralization and production of CH_4 and CO_2 under anaerobic incubation from bulk samples and particle size fractions of a typical paddy soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 120(2/4): 129-138
- [20] Yang CM, Yang LZ, Zhu OY. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 133-142
- [21] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值. *植物营养与肥科学报*, 1995, 1(1): 1-9
- [22] 周卫军. 红壤稻田系统养分循环与 C、N 转化过程 (博士学位论文). 武汉: 华中农业大学, 2002
- [23] Anderson JP. *Soil Respiration, Methods of Soil Analysis. Part 2.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. Madison, WI: ASA and SSSA, 1982: 831-871
- [24] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544-552
- [25] 文启孝. *土壤有机质研究法*. 北京: 农业出版社, 1984: 19-38
- [26] Betting J, Bernard L, Heiner F. Carbon dynamics determined by natural ^{13}C abundance in microcosm experiments with soils from long-term maize and rye monocultures. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(9): 1 193-1 202
- [27] Wolf DC, Legg JO, Boutton TW. Isotopic methods for the study of soil organic matter dynamics // *Methods of Soil Analysis. Part 2: Microbiological and Biochemical Properties*. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 1994: 865-906
- [28] Pan GX, Li LQ, Wu LS, Zhang XH. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 179-92
- [29] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版, 2000: 111-123

Effects of Fertilization and Straw Returning on Distribution and Mineralization of Organic Carbon in Paddy Soils in Subtropical China

MA Li¹, YANG Lin-zhang¹, XIAO He-ai², XIA Li-zhong¹, LI Yun-dong¹, LIU Xiao-chun³

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China*; 3 *Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China*)

Abstract: Based on a long-term fertilization experiment of paddy field setup in 1990 and located in Taoyuan County of Hunan Province, the effects of fertilization and straw returning on soil organic carbon (SOC) distribution over soil depth, density and variation, stable carbon isotope natural abundance ($\delta^{13}\text{C}$), and mineralization characteristics of organic carbon were studied. Results showed that long-term amendments of fertilizer and crop straw returning significantly increased SOC in the top soil, straw returning were better than chemical fertilizer in organic carbon accumulation; SOC density of chemical fertilizer and crop straw treatments in 0 - 25 cm and 0 - 50 cm were significantly increased, but variation range of SOC density was also increased with long-term amendments; Significant differences of the $\delta^{13}\text{C}$ with CK were found in 0 - 10 cm soil layer, but no significant differences among chemical fertilizer treatments and crop straw treatments; Organic carbon mineralization of different treatments reached the peak in the initial stage, and gradually leveled off and stable in 1 - 3 weeks followed; The average mineralization rates varied in the range of 47.75 - 31.16 CO_2 ml/(kg·d) and stable mineralization rates in the range of 40 - 60 CO_2 ml/(kg·d), cumulative mineralization amounts of different treatments in 12 weeks were in the decreasing order of CK+C>NP+C>N+C>NPK+C>NP>NPK>N>NK>CK; Amendments of fertilizer and crop straws increased SOC cumulative mineralization, but the effects of crop straws returning were more significant than chemical fertilizer; Therefore, as a way of SOC accumulation long-term amendments of chemical fertilizer and crop straws improved supplying capability of soil nutrient, and benefited for buffering and stabilizing organic carbon pool in paddy soil ecosystem.

Key words: Fertilization, Straw returning, Paddy soil, Organic carbon, Distribution, Variation, Mineralization