

DOI: 10.5846/stxb201310282596

张蕾, 尹力初, 易亚男, 高德才, 付薇薇, 王泽浩. 改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO₂ 排放特征. 生态学报, 2015, 35(5): 1399-1406.

Zhang L, Yin L C, Yi Y N, Gao D C, Fu W W, Wang Z H. Effects of fertilization reforming on the CO₂ flux in paddy soils with different fertilities. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1399-1406.

改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO₂ 排放特征

张蕾, 尹力初*, 易亚男, 高德才, 付薇薇, 王泽浩

湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128

摘要: 利用一个长达 30a 水稻土长期定位试验, 在保证原有定位试验继续正常开展的前提下, 将原化肥处理改施有机肥, 原有机肥处理改施化肥或者增施有机肥。通过观测田间试验 2012—2013 年双季稻轮作周期内不同肥力水平稻田土壤施肥管理改变后的土体 CO₂ 排放通量 (F_{CO_2}), 研究不同后续施肥管理对不同肥力红壤性水稻土 CO₂ 排放的影响。结果表明: 变更施肥能明显改变 CO₂ 排放动态变化, 其中长期施用有机肥处理改施化肥后其 F_{CO_2} 明显减小, 长期施用化肥或有机肥处理增施有机肥后其 F_{CO_2} 显著增大。有机肥和土壤有机碳均可促进土体 CO₂ 排放, 有机肥处理有机物料碳添加量与 CO₂-C 年排放量呈极显著的正相关关系 ($r=0.9015^{**}$, $n=21$), 单施化肥处理土壤有机碳含量与土体 CO₂-C 年排放量符合线性方程: $y=10.962x-68.86$ ($R^2=0.7507$, $n=9$, $P<0.01$)。长期施用有机肥土壤改施化肥会导致其有机碳矿化损失, 土壤有机碳含量越高, 矿化损失量越多, 最终其有机碳水平将与长期施用化肥的土壤有机碳平衡值一致; 长期施用化肥或有机肥土壤改施或增施有机肥可促进土壤有机碳积累, 外源添加碳越多, 土壤积累碳越多; 相同有机肥施用量下土壤有机碳含量越高, 有机物料表观分解率越大, 积累于土壤中的有机碳越少, 不同有机碳水平土壤在相同有机肥管理下其有机碳最终会达到相同的平衡值。在有机碳水平较低 (<20.46 g/kg) 红壤稻田上增施有机肥是提升已培肥水稻土有机碳含量的可持续发展措施, 而在有机碳水平较高 (>14.45 g/kg) 红壤稻田上应避免改施化肥。总之, 在有机碳含量较高或者较低的中国南方红壤性水稻土上, 持续的有机肥施用是保持或者提高其有机碳水平的必要措施。

关键词: 水稻土; 变更施肥; CO₂ 排放; 有机碳

Effects of fertilization reforming on the CO₂ flux in paddy soils with different fertilities

ZHANG Lei, YIN Lichu*, YI Yanan, GAO Decai, FU Weiwei, WANG Zehao

College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Abstract: Paddy soils show significant potential of carbon sequestration. The soil organic carbon (SOC) content of red paddy soils have been reported to be steady after 30 years' cultivation and it varies with different fertilization practice. In this study, three red paddy soils, which cultivated under different organic fertilization treatments in a 30 years fertilizer experiment in Changsha, China, was adjusted to the following seven treatments without compromising the original experiment: the original high organic fertilization treatment (HOM), the high organic fertilization treatment changed from the original normal organic fertilization treatment (N-H), the original normal organic fertilization treatment (NOM), the normal organic fertilization treatment changed from chemical fertilization (C-N), the chemical fertilization treatment changed from high organic fertilization treatment (H-C), the chemical fertilization treatment changed from normal organic fertilization treatment (N-C), the original chemical fertilization treatment (CF). CO₂ flux of the three original and four

基金项目: 国家自然科学基金 (41371250); 湖南省研究生科研创新项目 (CX2012B287)

收稿日期: 2013-10-24; 网络出版日期: 2014-07-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lcyin0418@sohu.com

changed treatments was measured to study the effects of the following-up fertilization reforming on the CO₂ flux in red paddy soils with different fertilities in 2012—2013. The results clearly showed that the following-up changing of fertilization had obvious impacts on the dynamics of CO₂ flux. The CO₂ flux in the soils under long-term organic fertilization treatments decreased after the adjustment from organic fertilization to chemical fertilization. However, the CO₂ flux in the soils under long-term chemical fertilization treatments increased remarkably after the adjustment from chemical fertilization to organic fertilization. The results also indicated that both organic fertilizer and soil organic carbon (SOC) had important impacts on CO₂ flux. The amount of organic carbon inputted by organic fertilizers had a significantly positive relationship with the total amount of annual CO₂-C flux ($r=0.9015^{**}$, $n=21$), and the inherent SOC content (x) also had a positive relationship with the total amount of annual CO₂-C (y) ($y = 10.962x - 68.86$, $R^2 = 0.7507$, $n = 9$, $P < 0.01$) in the paddy soils received chemical in 2012. The fertilization reforming from organic fertilization to chemical fertilization would lead to the loss of SOC in paddy soils due to its mineralization, and the SOC loss increased with the rising of inherent SOC content. The SOC content in the paddy soils under long-term organic fertilization would be consistent with that in the paddy soils under long-term chemical fertilization after the fertilization reforming from organic to chemical fertilization for a certain time. The fertilization reforming from chemical to organic fertilization, or from low organic to high organic fertilization would lead to the SOC accumulation in paddy soils, and the accumulating rate of SOC had a positive relationship with the amount of the inputted organic material. Under same organic fertilization treatment, the apparent decomposition rate of organic material applied in the soils with high SOC content was larger than that in the soils with low SOC content, which would result in lower SOC accumulation. So, the paddy soils with different SOC content would have the same SOC level when they received same organic fertilization management for a certain time. As a conclusion, the sustained organic fertilization in red paddy soils with high or low SOC content is essential to maintain or improve the soil organic carbon content in Southern China.

Key Words: paddy soil; fertilization reforming; CO₂ flux; soil organic carbon

近年来,温室气体的不断增加导致全球气候持续变暖和环境恶化,其中最重要的温室气体是 CO₂,农业土壤是大气 CO₂ 主要来源之一,因此增加土壤碳储量和减少土壤 CO₂ 排放对减缓全球温室效应极其重要^[1-2]。CO₂ 是土壤碳排放的主要形式之一,土壤碳排放与土壤有机碳动态变化密切相关,测定土壤 CO₂ 排放通量的年际变化是估测农田土壤截获碳的方法之一^[3]。目前,水稻土特有的水耕熟化过程使其有机碳容量明显大于其他农用土壤,其巨大固碳潜力已得到科学界的一致认可^[4-6]。中国南方红壤性水稻土固碳速率较其他类型水稻土高,良好施肥下的饱和固碳量以富氧化铁的红壤性水稻土最高^[7]。因此,研究中国南方红壤性水稻土的 CO₂ 排放规律并估测其有机碳动态变化对明确水稻土的固碳减排功能和缓解温室效应功能具有重要意义。

在影响土壤 CO₂ 排放的众因素中,施肥作为一种强烈的田间管理措施,能显著地影响稻田土壤 CO₂ 排放。众多研究表明,有机肥及有机无机配施能显著地增加 CO₂ 的排放^[8-9],而单施化肥对 CO₂ 排放无影响^[10-12]或有增强作用^[9]均有报道。大量文献资料表明,有机无机配施是促进土壤固碳的适宜措施^[13-15],有机肥直接促进水稻土有机碳增长^[16],无机肥则通过促进作物生长和增加作物输入碳(主要包括根系和根际分泌物)间接增加土壤有机碳^[17]。目前,有关施肥影响南方红壤性水稻土 CO₂ 排放通量的报道多利用长期定位试验,以比较红壤性水稻土在培肥过程中 CO₂ 排放通量对不同施肥措施的反应,从而估测土壤有机碳的动态变化。据李忠佩等^[18]研究表明,红壤稻田水耕利用 30a 之后其有机碳含量达到平衡,土壤基本培肥,不同施肥措施培肥的土壤有机碳含量及土壤肥力不同。而对于已培肥红壤性水稻土在不同后续施肥措施下的 CO₂ 排放规律及有机碳变化则鲜有涉及。因此本试验利用一个已有 30a 历史的红壤性水稻土土壤肥力长期定位试验,在保证原有定位试验继续开展的前提下,变更原有 3 种施肥处理部分平行的施肥,测定原施肥处理

和改施肥处理在一个双季稻轮作周期内的 CO₂ 排放通量,研究不同后续施肥管理下不同肥力红壤性水稻土 CO₂ 排放的变化规律,揭示已培肥红壤性水稻土变更施肥后其有机碳的变化规律,为估测已培肥红壤性水稻土在不同后续施肥下土壤有机碳的变化动态提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 长期定位试验及其变更

该定位试验位于湖南农业大学校园内,四周及顶部围有永久性不锈钢围网,占地面积 128 m²,由 3 组双排平行的水泥池组成,半地下式,每排设 6 个小区,相邻小区之间水泥间隔厚 20 cm,共计 36 个小区。组内中间设有水槽控制水位,组间及四周设有 2 m 深的排水沟。各小区供试面积 1.44 m²,池深 1.5 m,底层铺 15 cm 厚的卵石与粗砂。供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土(定位试验开始前一年把耕性红壤分层填入,然后淹水种稻)。试验从 1982 年春季开始淹水种稻连续进行至今。研究前 10a 曾设置了稻-稻-冬闲、稻-稻-绿肥、稻-稻-油菜等 3 种稻作制处理,但由于冬季不施肥,油菜很难生长,从 1993 年起稻作制统一变更为稻-稻-冬闲。该定位试验设置 2 个地下水位深度(20 与 80 cm)以及 3 个不同有机肥施用水平(高量有机肥、常量有机肥、单施化肥)作为试验处理,设立 2 因素多水平的长期定位试验,共 6 个处理。各个处理的重复数并不一致,其中 20 cm 地下水位下的常量有机肥处理有 12 次重复,而 80 cm 地下水位下的化肥处理及高量有机肥处理只有 3 次重复,其余处理都有 6 次重复。

本研究选择 20 cm 地下水位下的 3 个不同有机肥施用水平处理(高量有机肥(HOM)、常量有机肥(NOM)、全施化肥(CF))作为试验处理,其中 NOM 有 12 次重复,HOM 和 CF 都有 6 次重复。在本试验开展前从“常量有机肥处理”和“高量有机肥处理”各随机选取 3 个小区,然后统一变更为“化肥处理”,得到常改化处理(N-C)和高改化处理(H-C);同时从“常量有机肥处理”中随机选取 3 个小区变更为“高量有机肥处理”,得到常改高处理(N-H);从“化肥处理”中随机选择 3 个小区变更为“常量有机肥处理”,得到化改常处理(C-N)。利用新增加的 4 个处理(N-C,H-C,C-N,N-H)和原有的 3 个处理(CF,NOM,HOM),以开展本试验所设计的研究内容。

以化肥处理施肥水平为标准,其施肥量为:每季施 N 150 kg/hm²,N:P:K=1:0.5:0.67,无机 N、P、K 肥分别以尿素、氯化钾、过磷酸钙施入,有机肥源为粉碎过后的玉米秸秆;其中,常量有机 N 为化肥 N 的 1/3,高量有机 N 为化肥 N 的 2/3。为保持各处理间施肥水平的基本一致,有机肥处理小区肥料不足部分用化肥补足。肥料均在水稻移栽前一次性施入土壤。2012 年 3 月采集供试小区耕作层土壤(0—15 cm),风干后过 20 目和 100 目筛测定其基本理化性质指标,变更施肥前 HOM、NOM、CF 的土壤有机碳含量及 N、P、K 含量见表 1。3 种施肥处理肥力水平高低顺序为:HOM > NOM > CF。较高生产力水平下红壤稻田有机碳平衡值为(19±1) g/kg^[19],由此可判断供试 HOM、NOM 水稻土有机碳基本达到较高生产力水平下的平衡值,而 CF 有机碳未达到较高生产力水平下的平衡值,处于不饱和状态。

表 1 供试土壤 NPK 含量及有机碳含量

Table 1 The amount of nitrogen, phosphorus, potassium and organic carbon in different fertilization treatments

处理 Treatments	有机碳含量 Soil organic carbon/ (g/kg)	pH	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	速效氮 Available N/ (mg/kg)	速效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Exchangeable K/ (mg/kg)
高量有机肥(HOM)	20.46	5.51	1.39	1.31	12.50	22.3	12.4	91.3
常量有机肥(NOM)	18.67	5.33	1.57	1.32	12.49	17.9	9.2	79.0
化肥(CF)	14.45	5.58	1.70	1.29	12.47	12.8	6.8	60.5

HOM:高量有机肥处理 High organic fertilization treatment;NOM:常量有机肥处理 Normal organic fertilization treatment;CF:化肥处理 Chemical fertilization treatment

1.2 CO₂ 样品的采集、测定与计算

采用静态箱法采集 CO₂ 气体样品,在翻耕土壤并施肥后,于每季水稻移栽前安置 PVC 采样箱,采样箱中不种植水稻。其中顶箱体积为 30 cm×30 cm×10 cm,外面覆有泡沫绝热材料(用来防止箱内温度上升过快,造成与设施内自然环境不符的小环境);底座高 20 cm,插入犁底层以阻止水稻根系进入采样箱区域的土壤。水稻移栽后开始采集气样,在代表土壤日平均 CO₂ 排放通量的 9:00—10:00 点之间采集气样^[20],每隔 7d 采集 1 次样品,如遇不适天气则适当调整采样时间间隔。采样时,首先测定每个小区采气底座区域的水层高度,再将采样箱置于采样底座上,并用水密封,然后按 0、10、20 和 30 min 的时间间隔用 50 mL 注射器从采气箱中部的采气孔插入,来回抽动 3 次完全混匀气体后采集气体,同时测定 5 cm 处的土温。气体采集后立即带回实验室,使用气相色谱分析仪(GC7900)测定样品中 CO₂ 浓度,检测器为 FID,柱温 200 °C,检测温度 360 °C,以 N₂ 作为载气,H₂ 作为燃气,通过标准气体和待测气体的峰面积来计算待测气体的浓度,然后计算 CO₂ 排放速率,CO₂ 通量计算公式为:

$$F = \rho \times V/A \times \Delta C / \Delta t \times 273 / (273 + T)$$

式中, F 为排放通量(mg C m⁻² h⁻¹); ρ 为标准状态下 CO₂-C 的密度, $\rho = 0.536$ kg/m³; V 为采气箱内有效空间体积(m³); A 为采气箱覆盖的土壤面积(m²); ΔC 为气体浓度差; Δt 为时间间隔(h); T 为采样时箱内温度(°C)。

CO₂-C 累积排放量计算公式为:

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中, M 为土壤 CO₂-C 累积呼吸量(mg C/m²); F 为 CO₂ 排放通量(mg C m⁻² h⁻¹), i 为采样次数, t 为采样时间。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel for Windows 2007 绘制 CO₂ 排放季节变化动态图。有机物料的表现分解率定义为土壤 CO₂-C 年累积排放量占有机物料添加碳的百分比。以施肥为因素,采用单因素方差分析方法,检验不同施肥对土壤有机碳、各时期 CO₂ 年累积排放量的影响程度和不同土壤有机碳水平对有机物料表现分解率的影响程度,采用多重比较法(LSD, $P < 0.05$) 比较不同施肥处理之间土壤有机碳、各时期 CO₂ 年累积排放量、有机物料表现分解率差异的显著性。以土壤有机碳含量和 CO₂ 年累积排放量为指标,采用回归分析方法检验 CO₂ 排放量与有机碳含量的关系;以有机物料碳添加量与 CO₂ 年累积排放量为指标,采用相关分析方法检验有机物料碳添加量与 CO₂-C 年排放量的关系。

2 结果

2.1 CO₂ 排放特征

2.1.1 CO₂ 排放动态变化

不同施肥处理下土体 CO₂-C 排放通量(F_{CO_2-C})具有明显的季节变化,化肥与有机肥处理下的季节变化略有差异(图 1),化肥处理(CF、N-C、H-C)下土体 F_{CO_2-C} 的变幅较小,而有机肥处理(C-N、NOM、N-H、HOM)下土体 F_{CO_2-C} 的变幅相对较大。早、晚稻淹水生长期间,化肥处理下土体 F_{CO_2-C} 主要随气温的变化而改变,而有机肥处理下土体 F_{CO_2-C} 随有机肥施用时间的延长而减弱。无论在化肥或有机肥处理下,土体 F_{CO_2-C} 在早、晚稻成熟烤田期都显著增加。休闲期各施肥处理下土体 F_{CO_2-C} 均相对较小,其随气温的降低而逐渐减小,且在气温最低时(1 °C)达到最小值(0.005 mgC m⁻² h⁻¹)。各施肥处理(CF、N-C、H-C、C-N、NOM、N-H、HOM)的 F_{CO_2-C} 均在早稻烤田期达到峰值,分别为 162.38、281.08、395.78、303.42、337.78、426.34、489.19 mgC m⁻² h⁻¹。整个观测时期,化肥处理的 F_{CO_2-C} 显著小于有机肥处理,常量有机肥处理(C-N、NOM)的 F_{CO_2-C} 明显小于高量有机肥处理(N-H、HOM),且增施有机肥处理 C-N、N-H 的 F_{CO_2-C} 分别显著大于 CF、NOM,改施化肥处理 N-C、H-C 的 F_{CO_2-C} 分别明显小于 NOM、HOM。

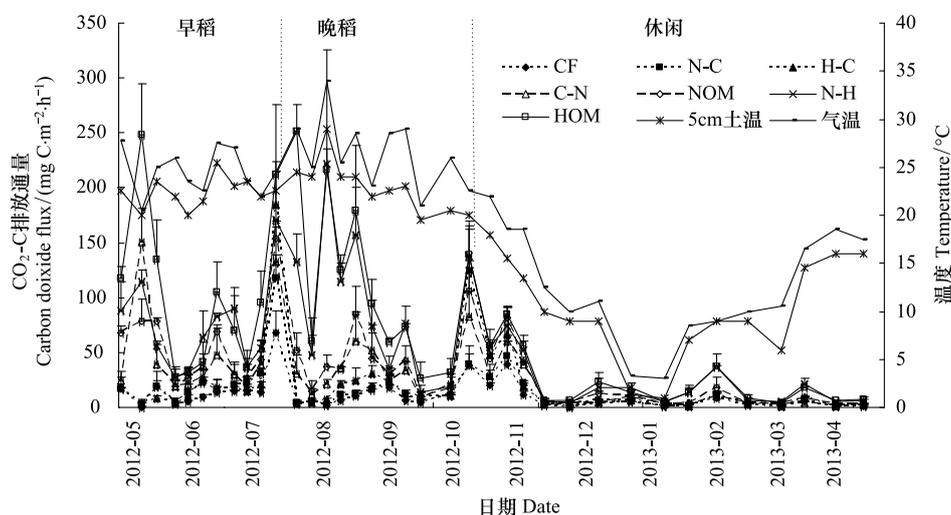


图 1 不同施肥处理水稻土 CO₂ 排放通量动态变化

Fig.1 Dynamics of CO₂ flux in different fertilization treatments

CF: 化肥处理 Chemical fertilization treatment; NOM: 常量有机肥处理 Normal organic fertilization treatment; HOM: 高量有机肥处理 High organic fertilization treatment; N-C: 常量有机肥改施化肥处理 Chemical fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment; H-C: 高量有机肥改施化肥处理 Chemical fertilization treatment changed from original high organic fertilization treatment; C-N: 化肥改施常量有机肥处理 Normal organic fertilization treatment changed from chemical fertilization treatment; N-H: 常量有机肥改施高量有机肥处理 High organic fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment

2.1.2 各时期 CO₂-C 累积排放量

在早稻、晚稻生长期和休闲期各施肥处理 CO₂-C 累积排放量 (Σ CO₂-C) 大小均为: HOM > N-H > NOM > C-N > H-C > N-C > CF, 其中在早、晚稻生长期, 各处理 Σ CO₂-C 差异较大, 有机肥处理 Σ CO₂-C 远远大于化肥处理; 而在休闲期, 有机肥处理的 Σ CO₂-C 降幅较大, 各处理 Σ CO₂-C 差异变小 (图 2)。各施肥处理年 Σ CO₂-C 大小分别为: HOM (522.31 g/m²) > N-H (411.32 g/m²) > NOM (260.01 g/m²) > C-N (216.17 g/m²) > H-C (149.06 g/m²) > N-C (113.32 g/m²) > CF (83.20 g/m²) (图 2)。统计与分析结果表明, 各时期增施有机肥处理 C-N、N-H 的 Σ CO₂-C 分别极显著大于 CF、NOM (P < 0.01), 改施化肥处理 N-C、H-C 的 Σ CO₂-C 分别明显小于 NOM、HOM (P < 0.01)。

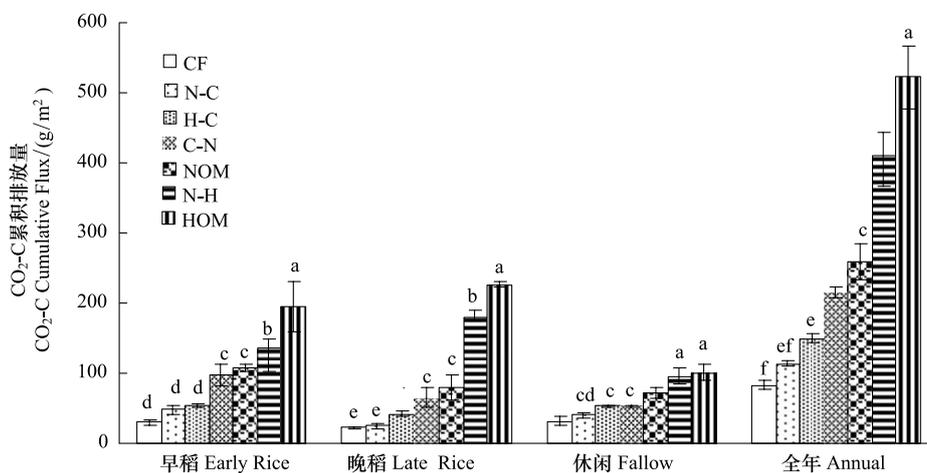


图 2 不同时期各施肥处理水稻土 CO₂ 累积排放量

Fig.2 The cumulative CO₂ flux of different fertilization treatments during different periods

小写字母表示不同施肥处理间 CO₂-C 累积排放量在 P < 0.05 水平有差异

2.2 土壤有机碳和外源添加碳对 CO₂-C 年排放量的影响

2.2.1 土壤有机碳对 CO₂-C 年排放量的影响

各处理年 Σ CO₂-C 大小关系为: H-C > N-C > CF, NOM > C-N, HOM > N-H, 表明当施肥相同时, 土壤固有有机碳含量高者的土体年 Σ CO₂-C 较大。化肥处理中, CF 与 H-C 的年 Σ CO₂-C 差异达到极显著水平 ($P < 0.01$), 而 N-C 与 CF 和 H-C 的年 Σ CO₂-C 差异均不显著, N-C 和 H-C 比 CF 平均每年分别多分解释放出 30.12 和 65.86 gCO₂-C/m²。CF、N-C、H-C 的年 Σ CO₂-C 占其土壤有机碳储量(0—15 cm 耕作层)的比例分别为 3.06%、3.80%、4.39%, 三者之间差异显著 ($P < 0.05$), 说明化肥处理下土壤有机碳含量越高处理的有机碳矿化速率越大。由 CF、N-C、H-C 土壤有机碳含量和年 Σ CO₂-C 可拟合出单施化肥水稻土的土壤固有有机碳含量(x)和土体 CO₂-C 年排放量(y)之间满足线性方程: $y = 10.962x - 68.86$ ($R^2 = 0.7507, n = 9, P < 0.01$) (图 3)。

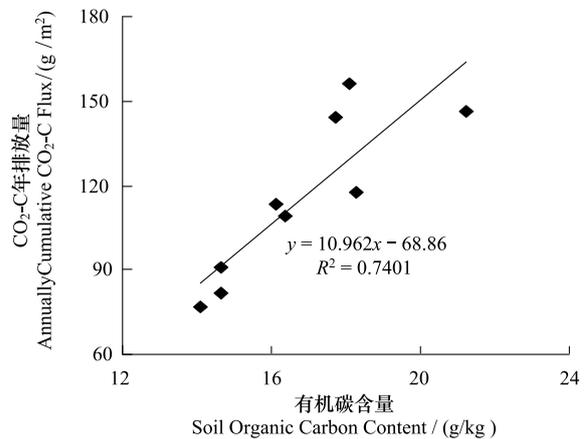


图 3 化肥处理土壤固有有机碳含量与 CO₂-C 年排放量之间的关系

Fig.3 Relationships between the inherent SOC content and the total amount of annual CO₂-C in the paddy soils received chemical fertilization

有机肥处理中, NOM、HOM 分别比 C-N、N-H 多释放 43.84 gCO₂-C/m² 和 110.99 gCO₂-C/m², 且差异均达到显著关系 ($P < 0.05$), C-N、NOM、N-H、HOM 的年 Σ CO₂-C 占其土壤有机碳储量的比例分别为 7.47%、7.79%、10.84%、14.46%, C-N 与 NOM 以及 N-H 与 HOM 之间的年 Σ CO₂-C 占其土壤有机碳储量的比例差异不显著, 说明有机肥处理下土壤有机碳含量对其 CO₂-C 排放量有一定的促进, 但效果不显著。

2.2.2 外源添加碳对 CO₂-C 年排放量的影响

统计分析结果表明高量有机肥处理 (N-H、HOM) 土体年 Σ CO₂-C 极显著 ($P < 0.01$) 高于常量有机肥处理 (C-N、NOM), 二者又均极显著高于化肥处理 (CF、N-C、H-C) ($P < 0.01$), 有机物料碳添加量与年 Σ CO₂-C 呈极显著的正相关关系 ($r = 0.9015^{**}, n = 21$), 表明随着有机物料添加量的增加, 土体年 Σ CO₂-C 逐渐增大。

2.3 土壤有机碳对外源添加碳表观分解率的影响

常量有机肥处理中, C-N 年 Σ CO₂-C 显著小于 NOM ($P < 0.05$), C-N 每年平均比 NOM 少释放 43.84 gCO₂-C/m²; 高量有机肥处理中, HOM 的年 Σ CO₂-C 极显著大于 N-H ($P < 0.01$), N-H 平均每年比 HOM 少分解释放出 110.99 g/m² 的 CO₂-C。从表观上看, 有机肥处理排放的 CO₂-C 均由有机物料碳分解释放, 各有机肥处理释放的 CO₂-C 占有有机物料添加碳的比例可视为有机物料的表现分解率。由表 2 可知, C-N 和 N-H (土壤有机碳含量低) 的有机物料表现分解率分别显著小于 NOM 和 HOM (土壤有机碳含量高)。

表 2 CO₂-C 年累积排放量占外源添加碳的比例

Table 2 Percentages of the total amount of annual CO₂-C accounting for exogenous addition carbon

处理 Treatments	外源添加碳量/g Exogenous addition carbon	Σ CO ₂ -C/外源添加碳/% Σ CO ₂ -C/ Exogenous addition carbon
C-N	431.1	50.14±1.82b
NOM	431.1	60.31±5.95a
N-H	862.2	47.71±3.69b
HOM	862.2	60.58±5.22a

N-C: 常量有机肥改施化肥处理 Chemical fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment; H-C: 高量有机肥改施化肥处理 Chemical fertilization treatment changed from original high organic fertilization treatment; C-N: 化肥改施常量有机肥处理 Normal organic fertilization treatment changed from chemical fertilization treatment; N-H: 常量有机肥改施高量有机肥处理 High organic fertilization treatment changed from original normal organic fertilization treatment; 同一列数据后标识小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

淹水植稻期间,化肥处理 F_{CO_2} 与温度变化一致,但有机肥处理 F_{CO_2} 受温度的影响相对较小,其在施肥后明显增加,并随时间的延长而逐渐减小;烤田期排水落干致使各施肥处理 F_{CO_2} 均明显增大,休闲期各处理 F_{CO_2} 变化主要受气温影响,与温度变化基本同步(图 1)。因此,施肥和水热因子综合影响 CO₂ 排放动态变化,且在整個观测时期,增施有机肥处理 F_{CO_2-C} 显著增大,改施化肥处理 F_{CO_2-C} 显著减小,表明变更施肥能明显影响 F_{CO_2} 动态变化。不同观测期间 CO₂ 累积排放量大小均表现为:高量有机肥处理(HOM>N-H)>常量有机肥处理(NOM>C-N)>化肥处理(H-C>N-C>CF),这一结果表明有机肥能显著增强土体呼吸,与前人研究结果一致^[7-8,21],有机物料碳添加量与年 ΣCO_2-C 之间呈极显著正相关关系($r=0.9015^{**}$, $n=21$);该结果还说明在相同施肥条件下,有机碳含量越高的水稻土排放 CO₂ 越多,由此证明土壤有机碳是影响土壤呼吸的关键因素,张东秋等^[22]、李海防等^[23] 和李长生等^[24] 也得出相似结论。

供试 CF、N-C、H-C(施用等量化肥而土壤固有有机碳不同)的 CO₂ 年排放量随有机碳含量的增加而增加(图 2),表明土壤有机碳含量越高,矿化分解为 CO₂ 的底物越充足,CO₂ 排放越大,土壤有机碳矿化损失越多。在单施化肥水稻土上以 CO₂-C 形式损失的有机碳量可根据土壤固有有机碳含量(x)和土体年 ΣCO_2-C (y)之间的线性方程: $y=10.962x-68.86$ ($R^2=0.7507$, $n=9$)进行估算;同时这也表明,长期施用有机肥的已培肥水稻土改用单一化肥后,其已有的有机碳平衡被破坏,前期施用有机肥积累的土壤有机碳将分解损失,最终将与长期单一施用化肥的土壤有机碳水平一致。以 CF、N-C、H-C 3 个施肥处理年 ΣCO_2-C 差值为基础,在不考虑 CH₄-C 的前提下,长期施用常量有机肥和高量有机肥的水稻土改施化肥后,其 15 cm 耕层土壤有机碳分别大概需要 25a 和 16a 达到长期施用化肥水稻土的有机碳水平(14.45 g/kg)。但实际上,该时间的估测并不精确,因为稻田是 CH₄ 的重要排放源^[25],并且土壤有机碳的积累速度会逐年减小^[18]。

C-N、N-H(固有土壤有机碳含量相对较低)分别比 NOM、HOM(固有土壤有机碳含量相对较高)少释放 43.84 gCO₂-C/m² 和 110.99 gCO₂-C/m²,这一结果清楚地表明,在有机碳含量相对较低的水稻土上改施或增施有机肥会促进一部分有机物料碳积累于水稻土中,且有机物料碳施用量越多,积累于水稻土中的碳越多,陈义等^[26] 和 Li 等^[27] 均得出相似结论。因此,在有机碳含量较低的已培肥水稻土上增施有机肥会打破原有有机碳平衡,使土壤有机碳容量扩大。CF 和 NOM 改施或增施有机肥后,其原有有机碳平衡遭到破坏,有机碳容量扩大,促进一部分有机物料碳积累于土壤中,以致 C-N 和 N-H 的有机物料表观分解率分别显著小于 NOM 和 HOM 的有机物料碳表观分解率(表 2)。由此可见,等量有机物料施用于有机碳水平不等的水稻土上,土壤有机碳含量越高,有机物料表观分解率越大,土壤有机碳的进一步积累越困难。进而说明土壤有机碳含量不同的水稻土在相同的有机肥管理下,其土壤有机碳将达到相同的平衡水平。假定供试常量和高量有机肥处理土壤有机碳已经达到相应的平衡水平,以 C-N、NOM 和 N-H、HOM 两组处理 CO₂-C 年累积排放量差值为基础,在不考虑 CH₄-C 的前提下,长期施用化肥的处理改为常量有机肥和高量有机肥后,分别需要 17a 和 3a 可达到平衡有机碳含量(18.67 g/kg 和 20.46 g/kg)。

在土壤有机碳含量高于已培肥水稻土有机碳平衡值(14.45 g/kg)的水稻土上单施化肥会导致土壤有机碳的损失,在土壤有机碳含量低于高生产力土壤有机碳平衡值(20.46 g/kg)的水稻土上增施有机肥能促进水稻土碳积累。由此可以看出,增施有机肥是提升土壤有机碳(未达到高生产力土壤有机碳平衡值)的适宜后续施肥措施,在已培肥的水稻土上减少其有机肥施用量或者完全改施化肥都将导致其土壤有机碳的损失。因此,在已培肥红壤水稻土上施用有机肥而避免施用化肥的意义不仅在于促进土壤有机碳增长,而且还在于保持土壤已有有机碳水平。

4 结论

变更施肥能明显改变 CO₂ 排放动态变化,有机肥和土壤有机碳均能促进红壤性水稻土土体 CO₂ 排放。

长期施用有机肥的红壤性水稻土改施化肥后其前期施用有机肥积累的土壤有机碳将分解损失,最终与长期单一施用化肥的土壤有机碳水平相一致。长期施用化肥(有机肥)的红壤性水稻土上改施(增施)有机肥能促进其有机碳的积累,有机碳水平不同的水稻土在相同有机肥管理下,其土壤有机碳水平最终会达到相同的新平衡。增施有机肥是提升红壤稻田土壤固碳功能的可持续发展措施,避免有机肥改施化肥是防止红壤稻田土壤有机碳损失的有效途径。

参考文献 (References):

- [1] Rastogi M, Singh S, Pathak H. Emission of carbon dioxide from soil. *Current Science*, 2002, 82(5): 510-517.
- [2] Guo L P, Lin E D. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: a review of work in China. *Chemosphere Global Change Science*, 2001, 3(4): 413-418.
- [3] 雷宏军, 李保国, 白由路, 黄元仿, 李江科. 黄淮海平原区不同农作措施下耕层土壤有机质矿化与 CO₂ 排放估算. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2035-2042.
- [4] Wissing L, Kölbl A, Vogelsang V, Fu J R, Cao Z H, Kögel-Knabner I. Organic carbon accumulation in a 2000-year chronosequence of paddy soil evolution. *Catena*, 2011, 87(3): 376-385.
- [5] Wang S Q, Yu G R, Zhao Q J, Nui D, Chen Q M, Wu Z F. Spatial characteristics of soil organic carbon storage in China's croplands. *Pedosphere*, 2005, 15(4): 417-423.
- [6] 潘根兴, 李恋卿, 郑聚锋, 张旭辉, 周萍. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题. *土壤学报*, 2008, 45(5): 901-914.
- [7] 周萍, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制 V. 碳输入与土壤碳固定. *中国农业科学*, 2009, 42(12): 4260-4268.
- [8] Iqbal J, Hu R G, Lin S, Hatano R, Feng M L, Lu L, Ahamadou B, Du L J. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications; A case study in Southern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(3/4): 292-302.
- [9] 张旭博, 徐明岗, 张文菊, 林昌虎, 段英华, 蔡泽江, 张崇玉. 添加有机物料后红壤 CO₂ 释放特征与微生物生物量动态. *中国农业科学*, 2011, 44(24): 5013-5020.
- [10] 武文明, 杨光明, 沙丽清. 西双版纳地区稻田 CO₂ 排放通量. *生态学报*, 2009, 29(9): 4983-4992.
- [11] Li C F, Kou Z K, Yang J H, Cai M L, Wang J P, Cao C G. Soil CO₂ fluxes from direct seeding rice fields under two tillage practices in central China. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(23): 2696-2704.
- [12] Ahmad S, Li C F, Dai G Z, Zhan M, Wang J P, Pan S G, Cao C G. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1): 54-61.
- [13] 潘根兴, 周萍, 张旭辉, 李恋卿, 郑聚锋, 邱多生, 储秋华. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响——以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例. *生态学报*, 2006, 26(11): 3704-3710.
- [14] Cai Z C, Qin S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 708-715.
- [15] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, Adhya T K, Rao K S, Manna M C. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124:119-130.
- [16] Tong C L, Xiao H A, Tang G Y, Wang H Q, Huang T P, Xia H A, Keith S J, Li Y, Liu S L, Wu J S. Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1): 8-14.
- [17] Gong W, Yan X Y, Wang J Y. The effect of chemical fertilizer application on carbon input and export in soil — A pot experiment with wheat using natural ¹³C abundance method. *Geoderma*, 2012, 189-190: 170-175.
- [18] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 尹瑞玲, 施亚琴. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析. *土壤学报*, 2003, 40(3): 344-352.
- [19] 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.
- [20] 汤洁, 韩源, 刘森, 李昭阳, 李娜, 张楠. 吉林西部不同土地利用方式下的生长季土壤 CO₂ 排放通量日变化及影响因素. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 33-37.
- [21] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO₂ 释放和土壤微生物量的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 469-472.
- [22] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778-785.
- [23] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 张杏锋. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展. *生态环境*, 2007, 16(6): 1781-1788.
- [24] 李长生, 肖向明, S. Frolking, B. Moore III, W. Salas, 邱建军, 张宇, 庄亚辉, 王效科, 戴昭华, 刘纪远, 秦小光, 廖柏寒, R. Sass. 中国农田的温室气体排放. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 493-503.
- [25] 黄耀, 张稳, 郑循华, 韩圣慧, 于永强. 基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计. *生态学报*, 2006, 26(4): 980-988.
- [26] 陈义, 吴春艳, 水建国, 王家玉. 长期施用有机肥对水稻土 CO₂ 释放与固定的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2468-2473.
- [27] Li Z P, Liu M, Wu X C, Han F X, Zhang T L. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 2010, 106(2): 268-274.