

不同耕作方式下稻田土壤 CH₄ 和 CO₂ 的排放及碳收支估算

李成芳^{1,2}, 曹凑贵^{1,2}, 汪金平^{1,2}, 翟中兵³, 梅少华⁴

(1.农业部华中作物生理生态与栽培重点开放实验室, 华中农业大学, 武汉 430070; 2.华中农业大学植物科技学院, 武汉 430070; 3.湖北省武穴市大法寺镇农业技术推广服务中心, 湖北 黄冈 435404; 4.湖北省武穴市农业局, 湖北 黄冈 436300)

摘要: 二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)是重要的温室气体, 研究免耕稻田 CO₂ 和 CH₄ 排放有助于评价稻田免耕技术对全球气候变化及碳循环的影响。本文通过运用静态箱技术和田间原位碱液吸收法研究了免耕稻田土壤 CO₂ 和 CH₄ 的排放规律和排放量, 及其稻田碳(C)的收支状况。研究表明, 施肥提高了 CH₄ 排放, 而不影响 CO₂ 的排放; 免耕显著影响稻田 CH₄ 排放, 而 CO₂ 的排放不受耕作影响。对稻田 C 收支及平衡的分析表明, 施肥提高了稻田系统 C 的输入, 同时, 相对于翻耕处理, 免耕处理表现为大气 C 的“汇”, 表明了稻田免耕能将更多的碳累积于农田土壤碳库中, 有利于提高稻田生态系统在减缓气温上升过程中所发挥的作用。

关键词: 免耕; 稻田; CH₄; CO₂; 碳收支

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)12-2482-07

CH₄ and CO₂ Emissions from Paddy Soils and Assessment of Carbon Budget in Different Tillage Systems

LI Cheng-fang^{1,2}, CAO Cou-gui^{1,2}, WANG Jin-ping^{1,2}, ZHAI Zhong-bing³, MEI Shao-hua⁴

(1.Key Laboratory of Huazhong Crop Physiology, Ecology and Production, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3.Extend Service Center of Agricultural Technology, Dafashi Town in Wuxue, Huanggang 435404, China; 4.Agricultural Bureau of Wuxue City in Hubei Province, Huanggang 436300, China)

Abstract: Carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) both are important greenhouse gases. It is valuable for investigating CH₄ and CO₂ emissions from paddy soils to assess effects of no-tillage on global climate change and C budget. Field experiments were conducted to study CH₄ and CO₂ emissions from paddy soils and to assess C budget in different rice tillage systems. The four treatments were no-tillage + no fertilizer, conventional tillage + no fertilizer, no-tillage + compound fertilizer and conventional tillage + compound fertilizer in rice (*Oryza sativa* L.) cultivation. Fertilization enhanced CH₄ emissions but did not affect CO₂ emissions. No-tillage significantly decreased CH₄ emissions from rice fields but did not affect CO₂ emissions relative to tilled practice. Analysis of C budget in different rice tillage systems showed that fertilization increased input of C in rice systems; moreover, no-tillage rice fields acted as C sink compared with tilled rice fields, suggesting that application of no-tillage in rice fields could lead to C sequestration in paddy soils, and thus will contribute to alleviating global warming.

Keywords: no-tillage; rice field; CH₄; CO₂; carbon budget

大气中温室气体浓度的增加是导致全球变暖的主要因素, CO₂ 和 CH₄ 是大气中重要的温室气体, 同时又参与了全球碳循环。稻田被认为是大气 CH₄ 的主要人为释放源, 稻田 CH₄ 的排放量占总排放量的

10%~20%^[1]。稻田又被认为是大气 CO₂ 的汇^[2]。一方面, 通过光合作用固定大气中的 CO₂; 但是, 另一方面, 水稻和土壤的呼吸作用向大气释放 CO₂, 影响了大气中 CO₂ 的浓度和土壤碳的累积。稻田 CO₂ 和 CH₄ 的排在很大程度上受稻田水分管理措施和稻田环境的影响。研究发现, 间歇灌溉的稻田排水期 CO₂ 的净固定量低于淹水期^[3], 甲烷的排放量比长期淹水稻田减少 15%^[4]。邹建文等^[5]报道, 稻田土壤水分状况是

收稿日期: 2009-08-19

基金项目: 湖北省农业创新岗位

作者简介: 李成芳, 男, 博士, 讲师, 主要研究生态系统养分循环及温室效应。

通讯作者: 汪金平

稻田 CH_4 和无植株参与的稻田 CO_2 排放季节变化的主要驱动因子,稻田非淹水期 CO_2 排放与土温、气温呈极显著正相关。因此,对稻田 CO_2 和 CH_4 排放规律及碳的收支状况的研究,可以为研究全球温室气体排放总量及气候变化提供理论依据。

免耕作为一种省本、保持水土、提高农业效益的新型耕作方法在我国南方稻区已得到广泛推广。研究表明,免耕能维持土壤的温度在一个相对稳定的状态下^[6],保持土壤生物多样性^[7-8],提高土壤有机质和土壤酶活性^[7,9],改善土壤的结构^[9],降低温室气体排放^[10],有利作物的生长发育^[11-12]。然而,只有较少研究报道了免耕稻田土壤 CO_2 和 CH_4 排放及碳收支状况^[10,13]。为此,本文以常规耕作稻田为对比,研究了免耕稻田土壤 CO_2 和 CH_4 排放规律及其系统碳的收支状况,旨在为发展稻田免耕技术、减少温室气态的排放和提高土壤碳固定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验地点为湖北省武穴市大法寺镇中桂村华中农业大学试验基地,此试验田已连续 30 年实行油菜免耕-水稻翻耕轮作。试验田地处 $115^\circ 30' \text{E}$, $29^\circ 55' \text{N}$, 海拔 20 m, 土壤为潯育型水稻土,泥沙田。土壤肥力中等,质地为重壤。试验前土壤基本理化性状为: pH 值 6.58, 有机质 $31.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $3.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铵态氮 $2.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 硝态氮 $4.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $3.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效钾 $111 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

本研究选取 2008 年 5 月下旬到 10 月上旬试验进行研究。水稻为当地常规品种两优培 9 (*Oryza sativa* L.)。

1.2 试验处理及田间设计

试验共设 4 个处理: (1) 免耕不施肥 (NT0); (2) 翻耕不施肥 (CT0); (3) 免耕+复合肥 (NTC); (4) 翻耕+复合肥 (CTC), 3 次重复, 12 个小区, 随机区组设计。小区面积 45 m^2 , 小区之间设埂, 覆塑料薄膜, 埂高 20 cm, 每小区内四厢五沟, 厢宽 120 cm, 沟宽 30 cm、深 20 cm。5 月 28 日用 3% 克无踪除草, 泡田, 5 月 30 日用犁耙对耕作处理进行翻耕, 耕作深度为 20 cm, 耕作 3 次; 6 月 1 日播种, 播种量 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 直播前稻谷先于清水中浸泡 24 h, 后与早育保姆充分混匀; 稻谷直播后立即施底肥, 施肥方式与当地习惯相同: 水稻全生育期氮磷钾施用标准为: $210 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, $105 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, $240 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$, 底肥施 $84 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 复合

肥 ($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=15\%:15\%:15\%$), 其余 N 用尿素平均分 3 次追施, 追肥日前分别为 6 月 16 日、7 月 16 日和 8 月 6 日, 磷肥和钾肥作为基肥于播种前一次性施入, 在水稻生长期不追磷钾肥, 稻田进行浅水灌溉, 水稻于 10 月 10 日收割, 称重。

1.3 CH_4 测定

2008 年 6 月 3 日至 10 月 9 日进行甲烷的采集。采用密闭箱-气相色谱法测定稻田土壤 CH_4 排放量。采样箱为高 1.18 m、半径 0.3 m 的圆柱形不锈钢筒。水稻播种施肥后第 2 d 即开始收集, 此后每次追肥前后各采集 1 次, 第三追肥后约半月采样 1 次 (具体采样时间根据天气情况略有变化)。每次采样时间间隔为 8 min, 分别为 0、8、16 min, 抽取 20 mL 箱内混合均匀气体。用改装后的 Shimadzu GC-14B 气相色谱仪分析气样 CH_4 浓度。 CH_4 检测器为 FID, 载气为氮气, 流速是 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 氢气为燃气, 流速为 $25 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 空气为助燃气, 流速为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。检测器温度为 200°C , 分离柱温度为 80°C 。 CH_4 通量根据下面方程计算 (Zheng 等, 1998):

$$F = \rho \cdot h \cdot dC/dt \cdot 273 / (273 + T)$$

式中: F 是气体流通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 是标准状态下气体密度; h 是箱高; dC/dt 为采样箱内气体浓度变化率; T 为采样过程中采样箱内的平均温度, $^\circ \text{C}$ 。

1.4 土壤 CO_2 排放测定

采用田间原位碱液吸收法测定土壤 CO_2 排放通量^[14]。将盛有 20 mL 的 NaOH 溶液于直径 5 cm 钵盘中, 将瓶置于三脚架上, 立即罩上直径 25 cm、高 30 cm 的 PVC 筒, 将其下缘嵌入土壤表面约 2 cm。为了防止阳光直射, 在 PVC 筒上盖上木板。与此同时, 将装有碱液的钵盘置于完全封闭的 PVC 筒内, 进行田间培养, 作为对照。24 h 后收回钵盘, 带回实验室, 钵盘中加入 BaCl_2 溶液和酚酞指示剂, 用盐酸滴定。 CO_2 排放通量根据下面公式计算:

$$F = (V_0 - V) \times c \times M$$

式中: F 是气体流通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; V_0 为滴定对照所用盐酸的体积, mL; V 为滴定处理所用盐酸的体积, mL; c 为盐酸溶液浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; M 为摩尔质量, 以 C 表示。

1.5 土壤 C 库及植株固定 C

在水稻收获后, 用土钻随机采集 8 点耕层土壤, 混合, 风干, 过筛备用; 用铁铲每个小区取 8 株含根的水稻, 洗净烘干。用环刀法测定耕层土壤容重 (BD), 用重铬酸钾加热法测定土壤、地上部植株和地下根系

有机 C 含量^[15]。土壤 C 库量即耕层土壤重量与土壤有机 C 含量的乘积,而耕层土壤重量为耕层土壤体积与土壤容重的乘积。

水稻植株固定 C 量(C_t)包括地上部分固定 C 量(C_a)与地下根系固定 C 量(C_r)。水稻植株地上部分固定 C 量为:

$$C_a=0.41Y$$

式中: Y 为水稻生物量干物质重, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 0.41 为测定的地上部分植株 C 含量, %。

水稻地下部分根系固定 C 量则由下式粗略估算:

$$C_r=0.37\times Y\times P/(1-P)$$

式中: P 为根系分配系数, 本文取 P 为 0.30^[16]; 0.37 为测定的根系 C 含量, %。

1.6 数据处理

试验结果均以处理的 3 次重复的平均值来表示, 数据采用 EXCEL 软件统计、SPSS11.5 软件分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 通量

不同耕作处理稻田土壤 CO₂ 排放通量规律如图 1 所示。各处理土壤 CO₂ 排放通量的季节变化趋势基本一致。从稻谷直播后半个月左右, 土壤 CO₂ 排放通量不断升高, 从 4.23 上升到 8.96 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 随后 6 月中下旬到 8 月底, 土壤 CO₂ 排放通量呈现较低水平, 除 7 月 23 日 NTC 和 CTC 出现较大排放, 在 6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 左右波动; 在 9 月以后, 土壤 CO₂ 排放通量逐渐升高, 在成熟期出现排放高峰。施肥和耕作措施不影响土壤 CO₂ 排放。水稻生育期, 处理 NT0、CT0、NTC 和 CTC 土壤 CO₂ 平均排放通量分别为 6.21、6.11、6.77

和 6.41 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

2.2 CH₄ 通量

各处理稻田土壤 CH₄ 排放规律如图 2 所示。在整个水稻生育期, 各处理的 CH₄ 排放均表现出先升高后降低的趋势, 在水稻移栽初期和收获时均较低。播种前期各处理 CH₄ 排放通量均低于 10 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 在苗期, 随着水稻的生长, 各处理 CH₄ 排放通量均有所增加。在水稻分蘖盛期(7 月中旬), 各处理均出现排放高峰, 随后回落。在水稻孕穗期(8 月 6 日—8 月 8 日), 施肥处理 NTC 和 CTC 仍能保持较高的 CH₄ 排放通量(>20 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), 不施肥处理 NT0 和 CT0 则明显较低(接近于 10 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), 在水稻抽穗扬花期至齐穗期(8 月 20 日—9 月 9 日)期间, 各处理 CH₄ 排放通量均缓慢下降, 但从水稻齐穗之后(图 1 表示为 9 月 9 日)各处理 CH₄ 排放通量开始迅速下降, 直到水稻成熟, 各处理 CH₄ 排放通量已接近于 0 或呈负值。施肥显著提高了 CH₄ 的排放, NTC 和 CTC 土壤 CH₄ 平均排放通量分别为 16.39 和 20.87 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 是相应处理 NT0(10.42 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)和 CT0(13.48 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)的 1.57($P<0.05$)和 1.55 倍($P<0.05$)。免耕显著影响 CH₄ 排放: 对于未施肥处理, NT0 土壤 CH₄ 平均排放通量显著低 CT0 29%($P<0.05$); 施肥处理 CTC 是 NTC 土壤 CH₄ 平均排放通量的 1.27 倍。

2.3 土壤 C 库

从表 1 可知, 一个水稻生长季节后, 各处理土壤有机 C 含量增加, 导致各处理土壤 C 库相应增加, 说明稻田土壤具有 C 汇的功能。水稻收获后, 虽然不同耕作处理间有机 C 含量差异不显著, 但免耕处理有机 C 含量略高于翻耕处理, 导致处理 NT0 和 NTC 土壤 C 库净增量(2 262.71 与 2 331.45 $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$)相应

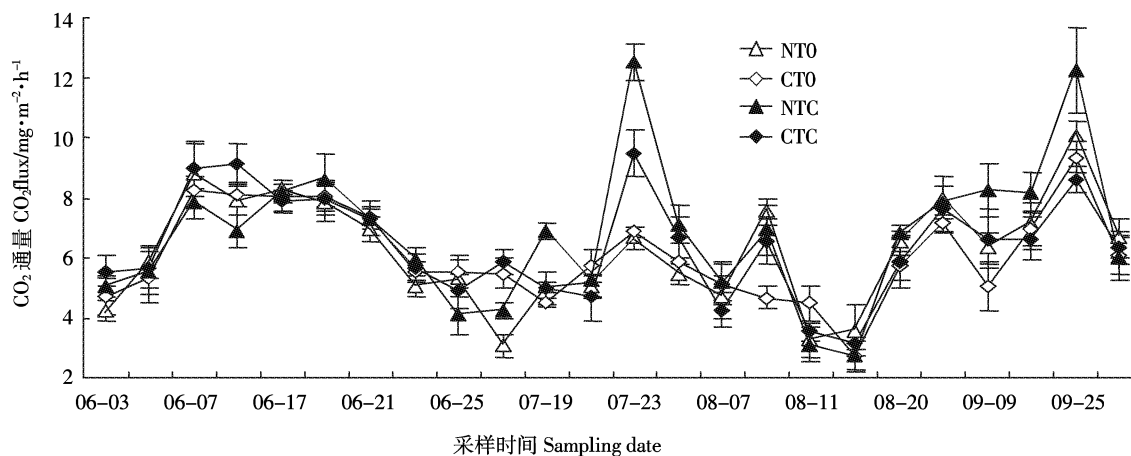


图 1 水稻生育期稻田土壤 CO₂ 排放通量季节变化

Figure 1 Seasonal variations of soil CO₂ emission fluxes during rice growing season

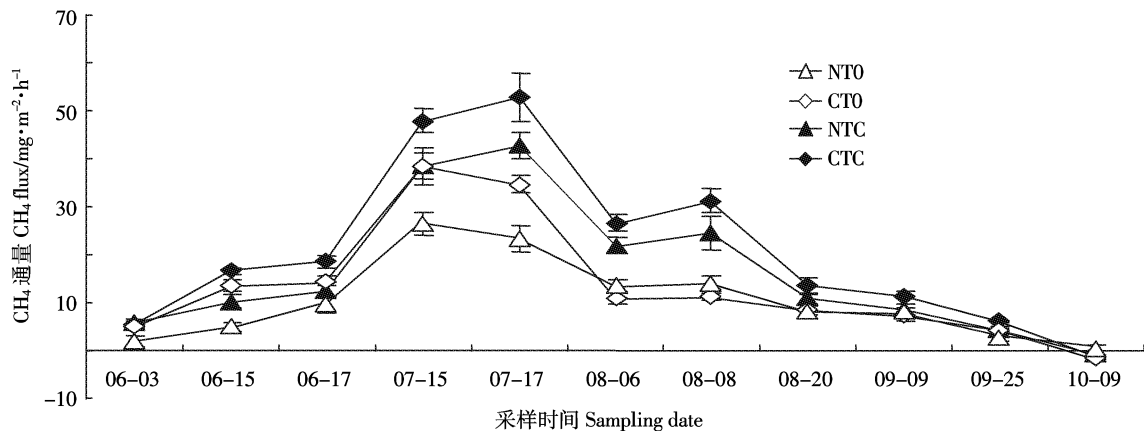


图 2 水稻生育期稻田土壤 CH₄ 排放通量季节变化

Figure 2 Seasonal variations of soil CH₄ emission fluxes during rice growing season

高于 CT0 和 CTC(1 252.55 和 1 122.30 kg C·hm⁻²),这也表明了稻田免耕促进 C 在土壤的累积。

2.4 水稻植株固定 C 量

由表 2 可知,施肥显著提高了水稻植株各部分对 C 的固定,而耕作措施对水稻生物量及固定 C 量没有影响。NTC 和 CTC 水稻植株固定 C 量分别是 NT0 和 CT0 的 1.41 和 1.43 倍。

3 讨论

3.1 CO₂ 排放

在水稻直播初期,土壤 CO₂ 排放少,此后逐渐升高,到分蘖期土壤 CO₂ 排放量达到较大值,分蘖期后有所降低,在稻田成熟期又有所增加,特别在收获期达到峰值。这可能由于水稻生长前期,前作油菜残根枯叶留田,使得稻田土壤有机质含量高,同时温度适宜土壤微生物的繁殖,使得土壤呼吸作用增强;又因水稻的生长,分泌物的增加,使得分蘖期土壤微生物的活动加剧,因此促进土壤 CO₂ 的排放^[7]。在水稻成熟期,土壤呼吸强度不降反升,这可能与土壤含水量

的变化有关^[5,17]。本研究,由于水稻田土壤长期处于淹水状态,土壤含水量很高,几近饱和状态,土壤中嫌气微生物占主体位置,好气微生物的活性受到抑制。在成熟期稻田排水后,土壤含水量减少,排水后水层对 CO₂ 传输的阻碍得以消除^[3];同时,排水后土壤的通气性增强,好气微生物开始活跃,加上气温仍然偏高,而这些条件均有利于土壤呼吸作用的增强,因此,即使在水稻生长末期,土壤呼吸仍呈上升趋势。

土壤释放的 CO₂ 主要是土壤微生物对土壤中动植物残体和有机物分解产生的。土壤微生物的分解受 C/N 的影响,C/N 过大或过小都会抑制微生物的分解作用^[18]。张亚丽等^[19]报道,尽管氮肥可以促进微生物的活动,提高土壤有机质的分解速率,导致土壤活性碳消耗太快,施氮肥后短期内可能激发土壤 CO₂ 的大量排放,但很快土壤呼吸又会下降,而且单施氮肥,缺乏碳源,造成 C/N 比下降,降低了土壤的活性,限制了土壤微生物量的增加,从而降低土壤 CO₂ 的排放。本研究中,复合肥与尿素配合使用对土壤 CO₂ 的排放影响不显著。这可能与土壤呼吸受多种因素的影响,氮

表 1 不同处理稻田 CH₄ 和 CO₂ 累积排放量和稻田土壤 C 库变化

Table 1 Cumulative emissions of CH₄ and CO₂, and changes in soil C storage in different rice fields

处理 Treatments	CH ₄ 累积排放量 Cumulative CH ₄ emissions/ kg C·hm ⁻²	CO ₂ 累积排放量 Cumulative CO ₂ emissions/kg C·hm ⁻²	种植前土壤 C 库 C storage before planting		收获后土壤 C 库 C storage after harvesting	
			有机 C 含量	土壤 C 库	有机 C 含量	土壤 C 库
			Organic C content/g·kg ⁻¹	C storage/kg C·hm ⁻²	Organic C content/g·kg ⁻¹	C storage/kg C·hm ⁻²
NT0	256.80a	2 079.40a	18.29	11 521.98	21.37a	13 784.69a
CT0	330.68b	2 083.62a			20.44a	12 774.53a
NTC	387.63b	2 244.80a			20.83a	13 853.43a
CTC	494.73c	2 140.84a			20.07a	12 644.28a

注:同一列不同字母表示在 5%水平上的差异显著,下同。

Note: Different letters in a row denoted significantly different at the level of 5%. same as followed.

表 2 水稻不同部分固定 C 量
Table 2 Carbon sequestration by rice plants in different treatments

处理 Treatments	地上部分 Overground parts of rice plants		地下部分 Roots		总固定 C 量 Total C sequestrations/kg C·hm ⁻²
	生物量 Biomass/kg·hm ⁻²	固定 C 量 C sequestrations/kg C·hm ⁻²	生物量 Biomass/kg·hm ⁻²	固定 C 量 C sequestrations/kg C·hm ⁻²	
NT0	13 579.74a	5 567.69a	5 819.89a	2 153.36a	7721.05a
CT0	13 325.83a	5 463.59a	5 711.07a	2 113.10a	7576.69a
NTC	19 081.85b	7 823.56b	8 177.94b	3 025.84b	10849.40b
CTC	19 048.46b	7 809.87b	8 163.63b	3 020.54b	10830.41b

肥的施用效应较为复杂有关^[18],因此关于施肥与土壤呼吸量的关系应受重视,需要深入分析研究。

土壤呼吸的主要碳源为土壤有机质,通常认为耕作措施破坏了土壤的团粒结构,使稳定的、被吸附的有机质易于分解,导致大量 CO₂ 释放^[20]。本研究并没有观测到耕作对 CO₂ 释放有显著的影响,这与 Hara-da 等^[10]的研究基本一致。这可能与本研究采样时间的滞后性有关。Al-Kaisi 和 Yin^[21]报道,土壤耕作后 6 h CO₂ 排放量远大于免耕土壤。本研究在稻田耕作 2 d 后进行采样,因此可能低估了耕作对土壤 CO₂ 排放造成的影响。此外,虽然耕作促使土壤 CO₂ 释放^[20,22],但免耕提高表层土壤有机质(表 1)和土壤酶活性^[7,9],增强了土壤呼吸作用,因此弥补了与翻耕土壤 CO₂ 释放量的差异。

3.2 CH₄ 排放

稻田 CH₄ 主要是由 CO₂/H₂ 及乙酸(CH₃COO-)等底物在极端厌氧条件下被产甲烷菌利用还原所形成^[23]。播种前期,部分油菜残茬留于土中,形成大量有机质,随着稻田淹水时间的延长及秧苗的生长,这些有机物不断分解,导致 CH₄ 排放呈上升趋势,进入水稻分蘖期,由于水稻植株通气组织比较发达,成为传输 CH₄ 的主要途径,同时,7 月中旬,白天田间气温基本保持在 30℃以上,处于厌氧状态下的产甲烷菌活动频繁,因此,甲烷大量排放。水稻生育后期,由于稻田落干,土壤的通气性增强,厌氧环境被破坏,厌氧细菌繁殖受抑制,因此甲烷排放减少。然而,对于前人报道的育秧水稻在移栽后不久迅速达到的第一个高峰^[24-25],本研究未能观测到,这可能是与取样的滞后性有关,需要在今后的研究中进行验证。

关于施肥对稻田 CH₄ 排放的影响国内外已有较多报道^[26-28]。与大多研究结果相同^[25,27]。本研究也表明,施肥处理 CH₄ 排放比不施肥处理要高,其原因可能是肥料的施用改变了水稻的生长状况,促进了水稻的根系生长和植株通气组织的发达;同时,施追肥(尿素)

提供了土壤微生物生长所需的碳素和氮素,促进了微生物的活性。

耕作方式对土壤的生态环境有着重要的影响,通过影响土壤的物理性状,化学性质和生物学过程直接或间接地影响着 CH₄ 排放^[29]。本研究表明,稻田免耕能减少 CH₄ 排放,这与前人的研究结果较为一致^[10,13,30]。其原因可能是耕作破坏了土壤原有结构,降低了土壤对 CH₄ 的氧化^[31],降低土壤 CH₄ 汇集的强度^[10,30];同时,稻田免耕条件下,更多的毛孔连贯在一起,更多的有利甲烷氧化菌繁殖的生态位存在,使得免耕稻田对 CH₄ 吸收强于常规翻耕稻田^[32]。

3.3 碳收支及平衡估算

本研究碳收支与平衡包括土壤固定 C 量、水稻固定 C 量、CH₄ 和 CO₂ 排放量等 4 部分。其中,C 输入项为土壤 C 库和水稻固定 C 量,而 C 输出项为 CH₄ 和 CO₂ 排放量。由表 3 可知,各处理 C 输入明显高于 C 输出,导致了各处理 C 净输入。施肥处理 NTC 和 CTC 的 C 净输入明显高于 NT0 和 CT0,可说明施肥通过提高水稻生物量增加稻田系统 C 的输入;同时,处理 NT0 和 NTC 的 C 净输入分别高于相应处理 CT0 和 CTC,表明了稻田免耕能将更多的碳累积于土壤碳库中,有利于提高稻田生态系统在减缓气温上升过程中所发挥的作用。然而,本研究并未观测水稻植株自养吸收作用,因此可能高估了稻田对 C 的固定作用。此外,需要指出,虽然施肥处理在水稻生长季比不施肥处理表现为较强的“汇”特征,但从施肥处理中移走的更多水稻秸秆可能通过焚烧等其他途径更多地以 CO₂ 形式返还大气,因此,应当考虑水稻秸秆处理问题,例如进行秸秆还田,以增加土壤碳库容量及提高农田生态系统在减缓气温上升过程中所发挥的作用。

4 结论

(1)施肥提高了稻田土壤 CH₄ 的排放,而不影响土壤 CO₂ 的排放。

表 3 不同稻田 C 收支及平衡估算(kg C·hm⁻²)
Table 3 Assessment of C budget in different rice fields(kg C·hm⁻²)

项目 Items	NT0		CT0		NTC		CTC	
	输入 Input	输出 Output	输入 Input	输出 Output	输入 Input	输出 Output	输入 Input	输出 Output
土壤固定 C 量 Soil C sequestrations	2 262.71		1 252.55		2 331.45		1 122.30	
水稻固定 C 量 C sequestrations by rice	7 721.05		7 576.69		10 849.40		10 830.41	
CH ₄ 排放量 Cumulative CH ₄ emissions		256.80		330.68		387.63		494.73
CO ₂ 排放量 Cumulative CO ₂ emissions		2 079.40		2 083.62		2 244.80		2 140.84
总量 Total	9 983.76	2 336.20	8 829.24	2 414.30	13 180.85	2 632.43	11 952.71	2 635.57
ΔC	7 647.56		6 414.94		10 548.42		9 317.14	

(2)稻田免耕降低了 CH₄ 的排放,但对土壤 CO₂ 的排放没有影响。

(3)施肥提高了稻田系统 C 的输入;稻田免耕表现出大气 C“汇”的功能。

参考文献:

[1] Sass R L, Fisher F M, Harcombe P A. Mitigation of methane emissions from rice fields: possible adverse effects of incorporated rice straw[J]. *Global Biogeochem Cy*, 1991, 5:275–287.

[2] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J]. *土壤学报*, 2002, 39(3):351–360.

Li Z P, Lin X X, Che Y P. Analysis for the balance of organic carbon pools and their tendency in typical arable soils of Eastern China[J]. *Acta Pedol Sinica*, 2002, 39(3):351–360.

[3] Miyata A, Leuning R, Denmead O T, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 102:287–303.

[4] Adhya T K, Bharati K, Mohanty S R, et al. Methane emission from rice fields at Cuttack, India[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2000, 58:95–105.

[5] 邹建文, 黄 耀, 宗良刚, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(6):758–764.

Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emssions from rice paddy and impact factors [J]. *Acta Sci Circum*, 2003, 23(6):758–764.

[6] 冯跃华, 邹应斌, Buresh R J, 等. 免耕直播对一季晚稻田土壤特性和杂交水稻生长及产量形成的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(11):1728–1736.

Feng Y H, Zou Y B, Buresh R J, et al. Effects of no-tillage and direct broadcasting on soil physical and chemical properties and growth and yield formation in hybrid rice [J]. *Acta Agron Sinica*, 2006, 32(11): 1728–1736.

[7] 高 明, 张 磊, 魏朝富, 等. 稻田长期垄作免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004a, 10(4):343–348.

Gao M, Zhang L, Wei CF, et al. Study of the changes of the rice yield and soil fertility on the paddy field under long-term no-tillage and ridge culture conditions[J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2004a, 10(4): 343–348.

[8] 高 明, 周保同, 魏朝富, 等. 不同耕作方式对稻田土壤动物、微生物及酶活性的影响研究[J]. *应用生态学报*, 2004b, 15(7):1177–1181.

Gao M, Zhou B T, Wei C F, et al. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004b, 15(7): 1177–1181.

[9] 李华兴, 卢维盛, 刘远金, 等. 不同耕作方法对水稻生长和土壤生态的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4):553–556.

Li H X, Lu W S, Liu Y J, et al. Effect of different tillage methods on rice growth and soil ecology[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, 12(4):553–556.

[10] Harada H, Kobayashi H, Shindo H. Reduction in greenhouse gas emissions by no-tilling rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: Life-cycle inventory analysis[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2007, 53: 668–677.

[11] Bhushan L, Ladha J K, Gupta R K, et al. Saving of water and labor in a rice wheat system with no-tillage and direct seeding technologies[J]. *A-gron J*, 2007, 99:1288–1296.

[12] Bhattacharyya R, Kundu S, Pandey S C, et al. Tillage and irrigation effects on crop yields and soil properties under the rice-wheat system in the Indian Himalayas[J]. *Agr Water Manage*, 2008, 95:993–1002.

[13] 肖小平, 伍芬琳, 黄凤球, 等. 不同稻草还田方式对稻田温室气体排放影响研究[J]. *农业现代化研究*, 2007, 28(5):629–632.

Xiao X P, Wu F L, Huang F Q, et al. Greenhouse air emission under different pattern of rice-straw returned to field in double rice area[J]. *Res Agr Modern*, 2007, 28(5):629–632.

[14] Anderson J P E. Soil respiration. In: Page L (eds). *Methods of soil analysis*, 2, Chemical and microbiological properties, AM. SOC. Agron Monogr, 1982, 92:831–871.

[15] 鲁如坤, 编. *土壤农业化学分析方法*[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999:107–108, 269–271.

Lu R K. *Methods of soil agricultural chemical analysis*[M]. Beijing: A-griculture, Science and Technology Press of China, 1999:107–108, 269–271.

[16] 潘根兴, 周 萍, 张旭辉, 等. 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[J]. *生态学报*, 2006, 26(11):3704–3710.

Pan G X, Zhou P, Zhang X H, et al. Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Lake region, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11), 3704–3710.

[17] 梁 巍, 岳 进, 吴吉力, 等. 微生物生物量 C、土壤呼吸的季节性变化与黑土稻田甲烷排放[J]. *应用生态学报*, 2003, 14 (12):2278–

2280.
Liang W, Yue J, Wu J L, et al. Seasonal variations of soil microbial biomass, respiration rate and CH₄ emission in black earth rice fields[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14 (12):2278–2280.
- [18] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(6): 992–999.
Meng F Q, Guan G H, Zhang Q Z, et al. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6), 992–999.
- [19] 张亚丽, 张 娟, 沈其荣, 等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12):1575–1578.
Zhang Y L, Zhang J, Shen Q R, et al. Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13 (12):1575–1578.
- [20] Follett R F. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils[J]. *Soil Tillage Res*, 2001, 61:77–92.
- [21] Al-Kaisi, MM, Yin X. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn–soybean rotations[J]. *J Environ Qual*, 2005,34:437–445.
- [22] Passianoto C C, Ahrens T, Feigl B J, et al. Emissions of CO₂, N₂O, and NO in conventional and no-till management practices in Rondônia, Brazil[J]. *Biol Fertil Soils*, 2003, 38:200–208.
- [23] 陈美慈, 闵 航, 钱泽澍. 水稻田优势产甲烷细菌的分离和特性[J]. *浙江大学学报*, 1992, 18(3):79–84.
Chen M C, Min H, Qian Z S. Isolation and characterization of dominant methanogens from paddy fields[J]. *J Zhejiang Uni*, 1992, 18(3):79–84.
- [24] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. *大气科学*, 1997, 21(2):231–237.
Zheng XH, Wang MX, Wang YS, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Adv Atmos Sci*, 1997, 21(2):231–237.
- [25] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田 CH₄ 的排放[J]. *生态学报*, 2008, 28(6):2878–2886.
Liu J J, Wu P P, Xie X L, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecol Sinica*, 2008, 28(6):2878–2886.
- [26] Henckel T, Conrad R. Characterization of microbial NO production, N₂O production and CH₄ oxidation initiated by aeration of anoxic rice field soil[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 40:17–36.
- [27] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management[J]. *Plant Soil*, 1997, 196:7–14.
- [28] 李 鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氮挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1):99–104.
Li X, Ju X T, Zhang L J, et al. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19(1):99–104.
- [29] Oorts K, Merckx R, Grehan E, et al. Determinants of annual fluxes of CO₂ and N₂O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France[J]. *Soil Till Res*, 2007,95:133–148.
- [30] 伍芬琳, 张海林, 李 琳, 等. 保护性耕作下双季稻农田甲烷排放特征及温室效应[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(9):2703–2709.
Wu F L, Zhang H L, Li L, et al. Characteristics of CH₄ emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage[J]. *Sci Agr Sinica*, 2008, 41(9):2703–2709.
- [31] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland[J]. *Soil Tillage Res*, 1999, 53:29–39.
- [32] Hutsch B W. Tillage and land use effects on methane oxidation rates and their vertical profiles in soil[J]. *Biol Fertil Soils*, 1998, 27: 284–292.