

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0873

成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 2015. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. 环境科学学报, 35(6): 1887-1895

Cheng C, Zeng Y J, Yang X X, et al. 2015. Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(6): 1887-1895

## 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响

成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 黄山, 罗亢, 石庆华, 潘晓华, 商庆银\*

江西农业大学, 双季稻现代化生产协同创新中心/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 南昌 330045

收稿日期: 2014-07-21

修回日期: 2014-08-19

录用日期: 2014-08-19

**摘要:** 免耕技术近年来在南方稻区被广泛推广应用, 但该项技术是否有利于减缓稻田综合温室效应目前并不清楚. 因此, 本文以双季稻-紫云英为研究对象, 利用静态箱-气相色谱法分别研究不同耕作方式对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放、双季稻产量、土壤固碳、稻田净综合增温潜势 (GWP) 和温室气体强度 (GHGI) 的影响. 试验处理包括常规翻耕 (CT)、旋耕 (RT) 和免耕 (NT). 结果表明, 稻田周年  $\text{CH}_4$  累积排放量为  $233.5 \sim 404.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , NT 和 RT 处理分别比 CT 增加 73.1% 和 35.1%. 晚稻生长季  $\text{CH}_4$  排放量占周年  $\text{CH}_4$  排放量的 53.7%~66.5%, 其中, 晚稻移栽至烤田期间  $\text{CH}_4$  累积排放通量占晚稻季排放总量的 77.0%~81.3%. 稻田  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量为  $4.00 \sim 4.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (以 N 计), 但各处理之间没有显著差异. 稻田年固碳量为  $0.36 \sim 1.31 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (以 C 计), 其中, NT 处理比 CT 和 RT 处理分别增加 148.4% 和 261.0%. 双季稻周年产量为  $15.2 \sim 17.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 耕作方式对产量没有显著影响. 稻田净 GWP 为  $5095.4 \sim 7788 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (以  $\text{CO}_2$  当量计), 其中, RT 和 NT 处理分别比 CT 增加 52.8% 和 32.2%. 稻田 GHGI 为  $0.30 \sim 0.46 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (以每 kg 粮食产量产生的  $\text{CO}_2$  当量计), 其中, RT 和 NT 处理分别显著高于 CT 处理 50.1% 和 45.3%. 综上所述, 免耕在短期内会增加稻田温室效应, 但可以促进土壤固碳量的显著增加, 因此, 其固碳减排的长期效应还有待观测.

**关键词:** 耕作方式; 甲烷; 氧化亚氮; 土壤固碳; 增温潜势; 温室气体强度; 稻田

文章编号: 0253-2468(2015)06-1887-09

中图分类号: X17

文献标识码: A

## Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems

CHENG Chen, ZENG Yongjun, YANG Xiuxia, HUANG Shan, LUO Kang, SHI Qinghua, PAN Xiaohua, SHANG Qingyin\*

Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Jiangxi Agricultural University Nanchang 330045

Received 21 July 2014;

received in revised form 19 August 2014;

accepted 19 August 2014

**Abstract:** In recent years, no-tillage (NT) technology is widely adopted in the rice-growing area of Southern China. However, it was not clear whether the technology could mitigate the greenhouse effect in rice paddy. The effects of different tillage methods on annual methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emissions, soil carbon sequestration, net global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) were studied by field experiments in double rice-cropping systems in 2013–2014. Methane and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes were measured using static chamber method, and the soil carbon sequestration was estimated by the changes in topsoil (0–20 cm) organic carbon (SOC) density. The treatments included NT, rotary tillage (RT) and conventional tillage (CT) in this paper. The results showed that annual  $\text{CH}_4$  emissions ranged from  $233.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  for the CT plots to  $404.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  for

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目 (No.2012BAD14B14); 江西省教育厅青年科学基金项目 (No.GJJ14306); 江西省高等学校科技落地计划项目 (No.12063)

**Supported by** the National Key Technology R&D Program (No.2012BAD14B14), the Young Scientist Fund of Jiangxi Education Department (No. GJJ14306) and the Ground Plan of Science and Technology in Jiangxi (No.12063)

**作者简介:** 成臣 (1990—), 男, E-mail: chengchenzm@163.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: sqyt@163.com

**Biography:** CHENG Cheng (1990—), male, E-mail: chengchenzm@163.com; \* Corresponding author, E-mail: sqyt@163.com

the NT plots, 53.7%~66.5% of which derived from the late-rice season. Annual  $N_2O$  emission was  $4.00\sim 4.82\text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  in the double rice-cropping systems. Topsoil SOC sequestration rate was estimated to be  $0.36\text{ t(C)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  for the RT plots and  $1.31\text{ t(C)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  for the NT plots. Annual grain yield was  $15.2\sim 17.1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  for the double cropping rice. Compared with the CT, NT slightly enhanced the net annual GWP, while it was remarkably enhanced by RT. The GHGI significantly increased for the RT and NT plots as compared to the CT plots. The results of this preliminary study suggested that RT and NT could increase comprehensive greenhouse effect under the short-term experiment in Chinese double rice-cropping systems. However, further studies are needed find out the long-term effect of NT on carbon sequestration and mitigation.

**Keywords:** tillage methods; methane; nitrous oxide; soil carbon sequestration; GWP; GHGI; rice paddy

## 1 引言( Introduction)

近百年来,全球气候正在发生以变暖为主要特征的显著变化,人类社会生产生活引起的温室气体排放是全球气候变暖的主要原因(张玉铭等,2011).其中, $CO_2$ 、 $CH_4$ 和 $N_2O$ 是最重要的温室气体,对温室效应的贡献率近80%(Kiehl *et al.*, 1997).据 IPCC (2007)评估报告, $CO_2$ 、 $CH_4$ 和 $N_2O$ 的浓度分别由工业革命之前的280 ppm、715 ppb和270 ppb增加到2005年的379 ppm、1774 ppb和319 ppb.农田作为陆地的主要组成部分,它是温室气体的重要排放源.全球每年农业温室气体排放量为 $5.1\sim 6.1\text{ Pg}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 $CO_2$ 当量计),占全球人为温室气体排放总量的10%~12%(Smith *et al.*, 2007).同时,农业技术具有较大的减排潜力.据估计,到2030年全球农业技术的温室气体减排潜力可达 $5.5\sim 6.0\text{ Pg}$ (以 $CO_2$ 当量计),主要通过增加土壤碳固定及减少 $CH_4$ 或 $N_2O$ 的排放来实现(Smith *et al.*, 2008).

免耕或少耕作为农业可持续发展的新技术,拥有巨大的固碳潜力.与常规耕作相比,免耕土壤有机碳的平均滞留时间可以增加1倍(姜勇等,2007).朱强根等(2010)研究发现,免耕对土壤有机质有明显的改善作用,且有机质随施秸秆量的增加而增加.据报道,旋耕处理土壤有机碳(SOC)含量比翻耕(0~15 cm土层)处理可以提高14.5%;就秸秆还田而言,旋耕秸秆还田处理的SOC含量比翻耕秸秆处理分别提高19.4%,旋耕秸秆还田处理SOC含量比旋耕提高9.8%,翻耕秸秆还田处理SOC含量比翻耕提高5.3%(van Groenigen *et al.*, 2011).已有研究证明,土壤有机碳含量、碳储量代表了土壤肥力的高低(李秀英等,2005;孔凡磊等,2010),然而较高的土壤碳储量又增强了农田土壤温室气体排放(Lal, 2004).因此,在评价农田固碳措施的潜力时,还应考虑其温室效应.由于 $CO_2$ 、 $CH_4$ 和 $N_2O$ 这3种温室气体的增温潜势不同,只有计算它们的综合温室效应才能准确评价某一农业管理措施对温室效应的贡献(Mosier *et al.*, 2006; Shang *et al.*, 2011; 逯非等,

2010).净综合增温潜势(Global Warming Potential, GWP)作为一种相对指标,可以用来比较不同温室气体对气候的潜在效应(Mosier *et al.*, 2006; Shang *et al.*, 2011).随着人口的增长,人类对稻谷的需求将继续增加.因此,在评价农田生态系统净GWP的同时,综合考虑其生产效益是十分必要的.van Groenigen等(2010)研究认为,产量尺度下的全球增温潜势即温室气体强度(Greenhouse Gas Intensity, GHGI)能够更加全面科学地评估农业生产对农田温室气体排放和作物产量的双重影响.

我国是世界上最大的水稻生产国,2012年水稻种植面积为 $30.14\times 10^6\text{ hm}^2$ ,约占世界水稻种植面积的20%,约占我国作物种植面积的28%(朱德峰等,2013).少耕或免耕作为一种节省成本、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(章秀福等,2006;吴建富等,2009; Tang *et al.*, 2012; 汲文峰等,2013).然而,目前有关免耕对我国稻田净GWP和GHGI的影响还知之甚少.为此,本试验以南方双季稻稻田为研究对象,初步探讨不同耕作方式对农田净GWP和GHGI的影响,从而更全面地评价不同耕作方式对稻田生态环境带来的影响,并为稻田温室效应的有效控制提供理论依据.

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 试验设计

试验地点位于江西省进贤县温圳镇杨溪村( $116^{\circ}5'28''E$ ,  $28^{\circ}20'10''N$ ),供试土壤为第四纪红色粘土发育的潴育型水稻土.试验前20 cm耕层土壤有机碳含量 $34.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮 $2.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $107.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷 $44.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $pH=5.1$ .

试验时间为2013年3月至2014年4月,所有小区均采取双季稻和冬季紫云英的种植方式.试验设计3种耕作方式,分别为:①翻耕(CT),即水稻移栽前用铧式犁深耕翻地1遍,再用旋耕机旋地2遍;②旋耕(RT),即水稻移栽前用旋耕机旋地4遍;③免耕(NT),即不进行整地,水稻免耕种植.每个处理

分别设 3 次重复,各小区面积均为 54 m<sup>2</sup>,随机区组排列.双季稻种植季水分管理统一采用间歇灌溉的模式,即插秧后田间保持浅水层,在分蘖末期烤田,

复水后采用干湿交替的灌溉方式至收获前 1~2 周.各处理水层深度变化见图 1,其他管理措施采用当地常规方式.

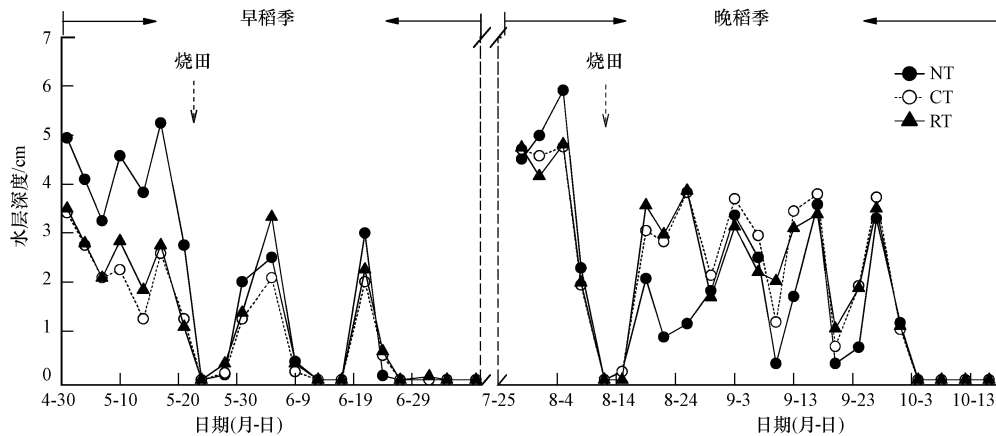


图 1 水稻生长季田间水层深度变化

Fig.1 Variation of water depth under different treatments during the double rice growing seasons in 2013

本试验中氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素(含 N 46.4%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)和氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 60%),分别以 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 计.早稻季 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 用量分别为 150、75 和 135 kg·hm<sup>-2</sup>,其中,氮肥按  $m(\text{基肥}):m(\text{分蘖肥}):m(\text{穗肥})=5:2:3$  施用,磷肥做基肥一次性施用,钾肥按  $m(\text{基肥}):m(\text{穗肥})=7:3$  施用.晚稻季 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 用量分别为 180、75 和 150 kg·hm<sup>-2</sup>,其中,氮肥按  $m(\text{基肥}):m(\text{分蘖肥}):m(\text{穗肥})=4:2:4$  施用,磷肥和钾肥施肥比例同早稻.基肥在移栽前 1 d 翻耕后施入,早稻分别于 2013 年 5 月 2 日和 5 月 31 日施分蘖肥和穗肥,晚稻分别于 2013 年 7 月 30 日和 8 月 21 日施分蘖肥和穗肥.冬季各处理所有小区种植紫云英,来年开春后将各处理收获的紫云英鲜草按三等分施于同处理的各小区中,作为早稻基肥;早稻收获后,将各小区水稻秸秆粉碎施入相应小区中作晚稻基肥.晚稻收获后各小区水稻秸秆施入相应小区表层作为紫云英的覆盖物,次年与紫云英一同施用作早稻基肥.

供试早稻和晚稻品种分别为中嘉早 17 和五丰优 T025.早稻于 2013 年 3 月 25 日播种,采用塑盘育秧,4 月 22 日移栽,7 月 12 日收割;晚稻于 6 月 30 日播种,7 月 22 日移栽,10 月 26 日收割.紫云英在晚稻收割前 25 d 播种,播种量为 30~37.5 kg·hm<sup>-2</sup>.

## 2.2 测定项目

2.2.1 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的采集与测定 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 采用静态箱法采集,静态箱采用不锈钢板制成,规格为

50 cm×50 cm×50 cm(当水稻生长高度超过 50 cm 时增加一个同规格双向开口的箱体,即高度变为 100 cm).箱体外部包有海绵和铝箔纸,以防太阳照射致使箱内温度升高过快.箱内顶部装有 12 V 小风扇用于混匀气体,箱体中部安装抽气孔.每小区固定采样底座 1 个,底座上部有 5 cm 深的凹槽,测定时加水密封.水稻生长季采样间隔为每 3~4 d 1 次,紫云英生长季一般为 15 d 1 次.采样期间同时记录日平均气温的变化(图 2).采集时间为 8:00—11:00,采样时按 0、10、20 和 30 min 的时间间隔用 50 mL 注射器抽取箱内气体,来回抽动 3 次以完全混匀气体,抽出 50 mL 保存于真空采样袋后迅速带回实验室分析.CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 气体浓度采用 Agilent 7890b 气相色谱测定,CH<sub>4</sub> 检测器为 FID,检测温度 300 ℃,柱温 60 ℃,载气为 99.999% 高纯氮气,流速 30 mL·min<sup>-1</sup>;N<sub>2</sub>O 检测器为 ECD,检测温度 300 ℃,柱温 60 ℃,载气为 99.999% 高纯氦/甲烷气(95% 氦气+5% 甲烷),流速 40 mL·min<sup>-1</sup>.气体排放通量计算公式为(蔡祖聪等,2009):

$$F = \rho \times h \times dc/dt \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中,  $F$  为气体排放通量 (mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 或 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>),  $\rho$  为标准状态下气体的密度 (kg·m<sup>-3</sup>),  $h$  是采样箱的净高度 (m),  $dc/dt$  为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率,  $T$  为采样过程中采样箱内的平均温度 (℃).

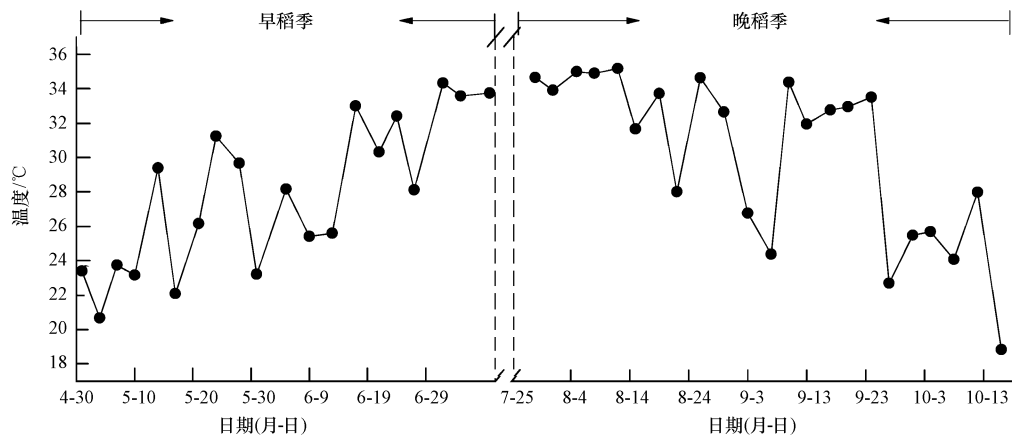


图2 水稻生长季气温变化

Fig.2 Variation of air temperature during the double rice growing seasons in 2013

2.2.2 土壤样品的采集和分析 供试土样分别于2013年3月早稻移栽前和2014年4月紫云英收获后采集.采用环刀法测定土壤容重(中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室,1978).各小区按S形路线随机取5个点的土样,采样深度为20 cm.土样充分混匀后拣去植物残根和石砾等,经风干、磨碎过筛,采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量(鲍士旦,2006).耕层土壤固碳量由下式求得(Pan *et al.*, 2003):

$$D_{oc} = 0.1 \times ([SOC]_i - [SOC]_0) \times \gamma \times H \quad (2)$$

式中, $D_{oc}$ 为土壤固碳量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,以C计), $[SOC]_i$ 为试验第*i*年后土壤有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $[SOC]_0$ 为试验前土壤有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), $\gamma$ 为试验前后土壤的平均容重( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), $H$ 为土壤厚度(20 cm).

2.2.3 农田净增温潜势(GWP)和温室气体强度(GHGI)的计算 农田净GWP以农田排放 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的综合增温潜势与土壤固碳减缓全球变暖贡献的差值来表示(Shang *et al.*, 2011).在GWP的估算中, $\text{CO}_2$ 常用来作为参考气体, $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放量通过GWP值转换成 $\text{CO}_2$ 的当量(Mosier *et al.*, 2006).在100年时间尺度上,单位质量 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的GWP分别为 $\text{CO}_2$ 的25倍和298倍(IPCC, 2007).农田净GWP( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,以 $\text{CO}_2$ 当量计)计算公式如下:

$$\text{GWP} = 25 \times [\text{CH}_4] + 298 \times [\text{N}_2\text{O}] - 44/12 \times D_{oc} \quad (3)$$

GHGI表示农业中生产单位产量的粮食对气候的潜在影响( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,以每kg粮食产量产生的 $\text{CO}_2$

当量计)(Mosier *et al.*, 2006):

$$\text{GHGI} = \text{GWP}/Y \quad (4)$$

式中, $Y$ 为周年产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ).

### 2.3 数据处理

试验数据均采用Microsoft excel 2013和JMP10.0(SAS Institute, Cary, NC, USA, 2011)统计软件处理.

## 3 结果(Results)

### 3.1 $\text{CH}_4$ 排放通量季节变化

早稻生长季,各处理 $\text{CH}_4$ 排放量均在生育中期较高,前期和后期较低,但各处理变化幅度有较大差异(图3).旋耕(RT)和翻耕(CT)处理在整个早稻季变化趋势较为一致;免耕处理(NT)在生育前期和中期的排放量较高,而生育后期与CT和RT处理接近.就整个早稻季而言,NT处理 $\text{CH}_4$ 累积排放通量分别显著高于RT和CT处理77.4%和90.6%( $p < 0.05$ ),而RT和CT处理之间没有显著差异(表1).

晚稻生长季,不同处理的 $\text{CH}_4$ 排放速率变化趋势基本一致.晚稻移栽一周后 $\text{CH}_4$ 排放通量即达到整个生育期的最高峰,尤其是NT和RT处理具有较高的 $\text{CH}_4$ 排放峰;中期烤田以后,各处理 $\text{CH}_4$ 排放速率迅速降低;复水以后,除了NT处理出现一个短暂且微弱的排放峰外,各处理一直维持极低的 $\text{CH}_4$ 排放速率(图3).整个晚稻季,NT和RT处理的 $\text{CH}_4$ 累积排放通量没有显著差异,分别显著高于CT处理60.7%和55.3%( $p < 0.05$ ,表1).晚稻季较高的 $\text{CH}_4$ 累积排放通量主要来自于生育初期的 $\text{CH}_4$ 排放高峰,其中,NT、CT和RT处理从移栽至烤田期间 $\text{CH}_4$ 累

积排放通量分别占整个晚稻季排放总量的 77.0%、77.5% 和 81.3%。

周年  $\text{CH}_4$  累积排放通量计算是从早稻移栽开始至次年早稻移栽之间,包括早稻季、晚稻季和紫云英生长季。统计表明,晚稻季  $\text{CH}_4$  排放占周年排放量

的 53.7%~66.5%,而紫云英生长季  $\text{CH}_4$  排放量几乎可以忽略不计(表 1)。与 CT 处理相比,NT 和 RT 处理周年  $\text{CH}_4$  累积排放通量分别增加了 73.1% 和 35.1%。方差分析表明,NT 处理显著高于 CT 处理 ( $p < 0.05$ ,表 1),但 RT 和 CT 处理之间没有显著差异。

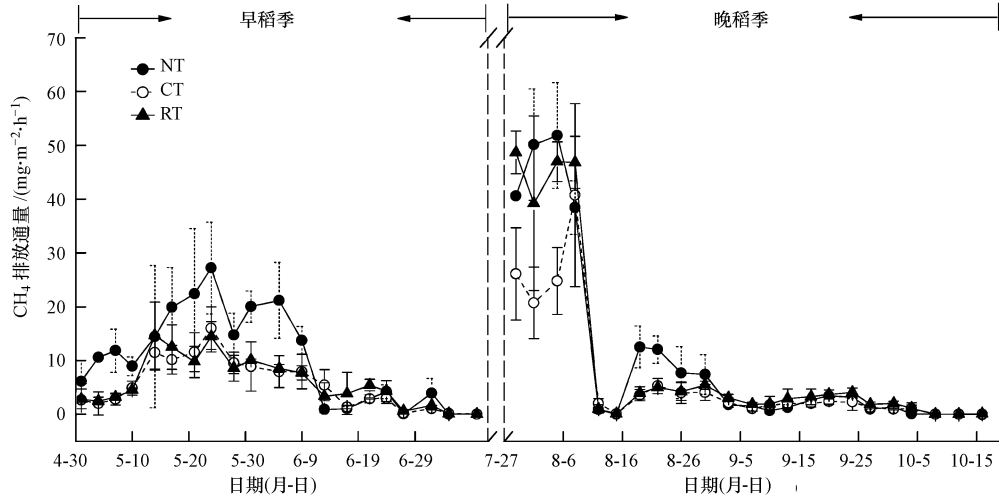


图 3 双季稻种植季  $\text{CH}_4$  排放通量季节变化(2013 年)

Fig.3 Variation of  $\text{CH}_4$  fluxes during double rice growing seasons under different tillage methods in 2013

表 1 不同耕作方式下  $\text{CH}_4$  累积排放量(2013—2014 年)

Table 1 Seasonal and annual  $\text{CH}_4$  emissions under the different tillage methods in 2013—2014

处理	$\text{CH}_4$ 累积排放通量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )			
	早稻季	晚稻季	紫云英生长季	周年
NT	186.7±37.1 <sup>a</sup>	217.1±30.5 <sup>a</sup>	0.17±0.12 <sup>b</sup>	404.0±17.5 <sup>a</sup>
CT	98.0±27.1 <sup>b</sup>	135.1±43.5 <sup>b</sup>	0.42±0.08 <sup>a</sup>	233.5±64.7 <sup>b</sup>
RT	105.3±12.4 <sup>b</sup>	209.8±12.2 <sup>a</sup>	0.28±0.03 <sup>ab</sup>	315.4±24.1 <sup>ab</sup>

注:不同字母表示在 0.05 水平上差异显著(下同)。

### 3.2 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量季节变化

早稻生育前期田间处于淹水状态,所有处理均表现为大气  $\text{N}_2\text{O}$  微弱的源或汇;中期烤田以后开始干湿交替灌溉, $\text{N}_2\text{O}$  排放速率不断增加,并出现较大的排放峰,但生育后期排放量相对微弱(图 4)。晚稻季水分管理 with 早稻季基本一致,二者具有相似的排放规律,但在晚稻季没有观测到较高的排放峰。方差分析表明,不同耕作方式对稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响并

不显著,各处理在双季稻种植季  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放通量均没有显著差异(表 2)。

紫云英生长季田间处于无水层状态,CT、NT 和 RT 处理  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量较高,分别占周年累积排放通量的 52.4%、57.9% 和 49.9%(表 2)。就周年而言,各处理之间均没有显著差异,但 NT 和 RT 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放通量分别比 CT 处理增加 20.5% 和 3.6%。

表 2 不同耕作方式下  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量(以 N 计)(2013—2014 年)

Table 2 Seasonal and annual  $\text{N}_2\text{O}$  emissions under different tillage methods in 2013—2014

处理	$\text{N}_2\text{O}$ 累积排放通量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )			
	早稻季	晚稻季	紫云英生长季	周年
NT	1.09±0.86 <sup>a</sup>	0.94±0.34 <sup>a</sup>	2.79±0.34 <sup>a</sup>	4.82±1.05 <sup>a</sup>
CT	0.98±0.52 <sup>a</sup>	0.92±0.24 <sup>a</sup>	2.10±1.08 <sup>a</sup>	4.00±1.69 <sup>a</sup>
RT	1.02±0.48 <sup>a</sup>	1.05±0.32 <sup>a</sup>	2.07±0.57 <sup>a</sup>	4.14±1.32 <sup>a</sup>

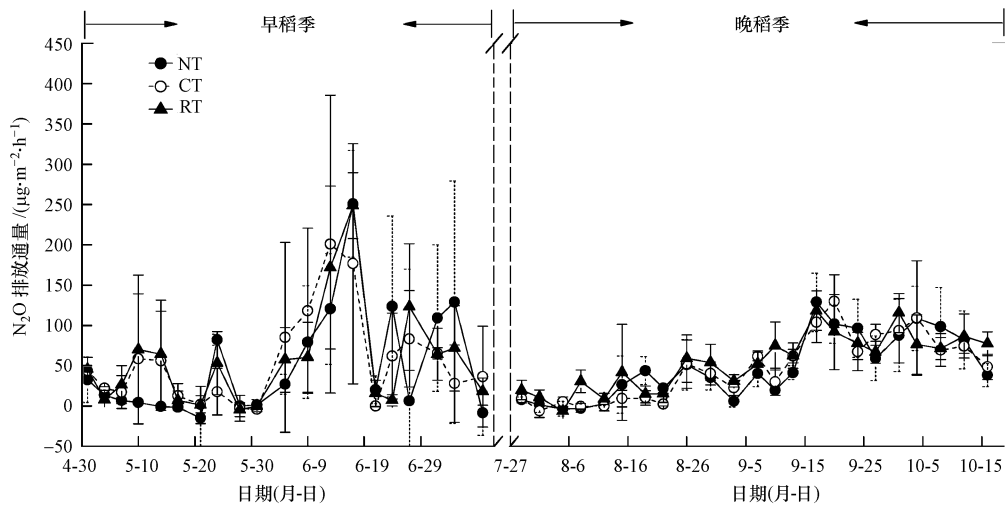


图 4 双季稻种植季 N<sub>2</sub>O 排放通量季节变化 (2013 年)

Fig.4 Variation of N<sub>2</sub>O fluxes during double rice growing seasons under different tillage methods in 2013

3.3 土壤固碳量

方差分析表明,各处理之间的土壤容重没有显著差异,但不同耕作方式对耕层有机碳含量和土壤

固碳量(以 C 计)有显著影响(表 3).其中,NT 处理土壤固碳量分别比 CT 和 RT 处理增加了 148.4%和 261.0%.

表 3 不同耕作方式对土壤容重、有机碳含量和土壤固碳量的影响(2014 年)

Table 3 Soil bulk density, content and sequestration rate of soil organic carbon (SOC) under different tillage methods in 2014

处理	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	土壤有机碳含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤固碳量/(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
NT	0.97±0.05 <sup>a</sup>	34.7±0.24 <sup>a</sup>	1.31±0.47 <sup>a</sup>
CT	0.93±0.08 <sup>a</sup>	34.3±0.16 <sup>ab</sup>	0.53±0.30 <sup>ab</sup>
RT	0.93±0.13 <sup>a</sup>	34.2±0.01 <sup>b</sup>	0.36±0.02 <sup>b</sup>

3.4 双季稻产量、稻田净 GWP 和 GHGI

不同耕作方式对早稻和晚稻产量均没有显著影响,但对净 GWP 和 GHGI 有显著影响(表 4).与 CT 处理相比,RT 和 NT 处理净 GWP 分别增加了

52.8%和 32.2%,其中,RT 处理显著高于 CT 处理.温室气体强度由净 GWP 和双季稻产量的比值计算得出.RT 和 NT 处理较高的净 GWP 对 GHGI 贡献较大,分别显著高于 CT 处理 50.1%和 45.3%.

表 4 不同耕作方式对双季稻产量、净增温潜势和温室气体强度的影响

Table 4 Annual rice grain yield, global warming potential(GWP) and greenhouse gas intensity(GHGI) under different tillage methods

处理	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			净增温潜势 GWP/(kg·hm <sup>-2</sup> )	温室气体强度 GHGI/(kg·kg <sup>-1</sup> )
	早稻	晚稻	周年		
NT	8.01±1.36 <sup>a</sup>	7.22±1.19 <sup>a</sup>	15.23±0.88 <sup>a</sup>	6735.0±1339.3 <sup>ab</sup>	0.44±0.07 <sup>a</sup>
CT	7.79±0.41 <sup>a</sup>	8.95±1.52 <sup>a</sup>	16.74±1.85 <sup>a</sup>	5095.4± 752.4 <sup>b</sup>	0.30±0.02 <sup>b</sup>
RT	8.68±0.35 <sup>a</sup>	8.41±0.63 <sup>a</sup>	17.09±0.92 <sup>a</sup>	7788.0± 724.9 <sup>a</sup>	0.46±0.04 <sup>a</sup>

4 讨论 (Discussion)

4.1 稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放特征

本研究稻田 CH<sub>4</sub> 累积排放量为 233.5 ~ 404.0 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,介于 Huang 等(2004)和 Cai 等(2000)的研究范围之内,与前人采用中期烤田的稻田研究

结果相一致,但显著低于持续淹水管理方式下的研究结果 (Cai, 1997; Yan *et al.*, 2005; Zou *et al.*, 2005;Khalil *et al.*, 2008).从作物生长季节来看,对 CH<sub>4</sub>累积排放通量贡献最大的是晚稻生长季,而晚稻季较高的 CH<sub>4</sub>排放量主要来自于生育初期的排放高峰,占整个晚稻季排放总量的 77.0% ~ 81.3%.这

与以往双季稻种植体系的研究结果大体相同(Yang *et al.*, 2010; 白小琳等, 2010). 主要由于晚稻移栽初期新鲜秸秆的施用, 加之气温较高(图 2), 有利于产甲烷菌的生长活动.

在水稻种植季, 稻田  $N_2O$  累积排放量较为微弱, 这与以往的研究结果相一致(Akiyama *et al.*, 2005; Zou *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2010). 尽管冬季稻田不施用任何肥料, 在非水稻种植季仍可观测到大量的  $N_2O$  排放, 这可能受以下几方面因素的综合影响. 首先, 从水稻种植季间歇灌溉条件转变为排水晒田的好氧条件, 有利于土壤  $N_2O$  的产生, 故在水稻收获以后的冬闲期出现较高的  $N_2O$  排放量(表 2). 其次, 水稻种植季淹水环境为随后的非水稻季  $N_2O$  的产生创造更为有利的土壤湿度条件(Liu *et al.*, 2010). 土壤含水量适中, 通气性良好, 硝化细菌和反硝化细菌活性得以提高, 此时土壤硝化作用及反硝化作用都能以较高速率进行且以  $N_2O$  为主要产物. 第三, 当土壤水分含量下降并由湿土逐渐变为干土的短时间内, 土壤颗粒孔隙增大, 有利于闭蓄态  $N_2O$  的快速释放. 此外, 淹水条件下抑制了水稻种植季土壤有机氮的矿化, 但在随后的非水稻季可以产生更多的土壤矿质态氮, 有利于  $N_2O$  的产生(Bouwman *et al.*, 2002; Yan *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2004; Akiyama *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2010).

#### 4.2 不同耕作方式对稻田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的影响

耕作方式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  $CH_4$  和  $N_2O$  排放(Zheng *et al.*, 2004). 目前关于耕作方式对稻田  $CH_4$  排放的影响的报道并不一致. 大多数研究表明, 少耕或免耕会减少  $CH_4$  的排放(伍芬琳等, 2008; 李成芳等, 2009; 白小琳等, 2010). 他们认为耕作破坏了土壤原有结构, 减少了土壤  $CH_4$  氧化程度, 对未扰动土壤进行耕作可大大降低土壤  $CH_4$  汇集的强度. 还有研究者报道, 在不施肥条件下, 免耕可以显著增加稻田  $CH_4$  排放(代光照, 2009). 本研究表明, NT 处理双季稻种植季  $CH_4$  累积排放通量均显著高于 CT 处理(表 1), 主要有以下几个方面的原因. 首先, 免耕可以更好地维持缺氧环境而产生更多的  $CH_4$ . 从图 1 可以看出, 在中期烤田以前, 免耕处理均具有较高的田间水层覆盖, 这可能与免耕条件下表层土壤相对平坦有关, 从而有利于维持较为理想的淹水厌氧环境. 其次, 免耕处理采用秸秆覆盖的方式进行还田, 而这种还田方式不利于烤田和间歇灌溉期间

土壤水分的蒸发散失. 有研究表明, 免耕覆盖作用可减小表层土壤水分蒸发, 增强地面水入渗, 从而改善土壤结构, 增加土壤充水空隙(Beheydt *et al.*, 2008; 李玲玲等, 2005). Simona 等(2004)认为土壤充水空隙是决定  $CH_4$  释放情况的重要因素之一. 在一定范围内, 土壤充水空隙与  $CH_4$  的释放呈正相关(Jarecki *et al.*, 2008). 此外, 土壤中  $CH_4$  的释放与土壤温度呈反比关系. Ussiri 等(2009)研究认为, 免耕引起土壤温度降低可能在一定程度上促进了  $CH_4$  的释放. 因此, 免耕方式下温室气体的排放情况是由不同免耕地区的环境条件决定的, 它会随着影响因素的变化而变化, 只有结合当地实际情况才能对温室气体的排放做出正确的评价.

相比传统翻耕, 旋耕和免耕对  $N_2O$  排放的影响结果也不一致. 有些研究认为, 旋耕和免耕促进土壤  $N_2O$  排放(Steinbach *et al.*, 2006; 白小琳等, 2010). 还有一些研究者报道, 旋耕和免耕能够减少土壤  $N_2O$  排放(代光照, 2009; Gregorich *et al.*, 2008), 或者没有明显影响(Choudhary *et al.*, 2002; 秦晓波等, 2014). 这些结果的出现主要与  $N_2O$  排放的时空变异和不确定性有很大关系. 本研究表明, 不同耕作方式对稻田  $N_2O$  排放的季节变化模式无明显影响, 各处理之间  $N_2O$  季节累积排放通量也没有显著差异. 有研究认为, 免耕对稻田  $N_2O$  排放的影响主要表现在长时间尺度上, 短期试验结果并不具充分的代表性(Six *et al.*, 2004). 因此, 不同耕作方式下稻田  $N_2O$  的长期潜在温室效应不能完全忽略.

#### 4.3 不同耕作方式对稻田净 GWP 和 GHGI 的影响

本研究表明, 双季稻稻田净温室气体强度(GHGI)与 Qin 等(2010)施用有机肥但采取中期烤田的稻田测定结果相似( $0.24 \sim 0.74 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 但低于 Li 等(2006)根据 DNDC 模型计算的持续淹水稻田的结果( $3.22 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ). 农田生态系统净 GHGI 的大小主要与土壤固碳量、作物产量、农田向大气释放  $CH_4$  和  $N_2O$  量有直接的关系(Mosier *et al.*, 2006; Shang *et al.*, 2011). 从短期试验来看, 不同耕作方式对双季稻产量没有影响显著, 但在免耕条件下  $CH_4$  排放比常规翻耕显著增加, 从而导致 GHGI 的显著增加. 相反, 免耕代替传统翻耕能有效增加土壤有机碳库(表 3), 主要因为免耕减少了土壤扰动, 减缓了有机碳降解, 土壤团聚体结构中的碳也更趋于稳定, 使得 SOC 含量高于传统耕作的土壤(Wright *et al.*, 2005). 因此, 与 CT 处理相比, NT

处理下净增温潜势(GWP)有增加的趋势,但是二者之间并没有显著差异.与CT处理相比,RT处理可以显著增加稻田周年净GWP和GHGI,主要与RT处理下CH<sub>4</sub>排放增加而土壤固碳量下降有很大的关系.因此,如何减少水稻种植季CH<sub>4</sub>排放对减缓稻田温室效应具有十分重要的作用,这与以往的研究结果相一致(Shang *et al.*, 2011;谭雪明等,2013).然而,由于不同耕作方式对土壤固碳的显著影响,并且稻田温室气体排放会随着环境因素的变化而变化,在长期条件下稻田净GWP和GHGI如何变化还有待进一步验证.

## 5 结论(Conclusions)

1)在短期试验条件下,不同耕作方式对双季稻田CH<sub>4</sub>排放、土壤固碳、净增温潜势(GWP)及温室气体强度(GHGI)有显著影响,但对稻田N<sub>2</sub>O排放和双季稻产量影响不大.晚稻生长季对周年CH<sub>4</sub>累积排放通量贡献最大,而晚稻季较高的CH<sub>4</sub>排放主要来自于移栽至烤田期,占整个晚稻季排放总量的77.0%~81.3%.

2)与翻耕相比,旋耕处理可以显著增加稻田周年净GWP和GHGI,主要与旋耕处理下CH<sub>4</sub>排放增加而土壤固碳量下降有很大的关系.与常规翻耕相比,免耕处理可以显著提高水稻种植季CH<sub>4</sub>排放,从而导致GHGI的显著增加.免耕处理净GWP比翻耕增加32.2%,但二者之间并没有显著差异,主要因为免耕条件下土壤有机碳固定量比翻耕增加148.4%.因此,免耕条件下稻田固碳减排的长期效应还有待观测.

**责任作者简介:**商庆银,男,博士,讲师,主要从事农田碳氮循环与温室气体排放、作物高产栽培的研究.目前在国内外核心期刊上发表10多篇论文,其中SCI收录4篇.

## 参考文献(References):

- Akiyama H, Yagi K, Yan X Y. 2005. Direct N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy fields: summary of available data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1): GB105, doi: 10.1029/2004GB002378
- 白小琳,张海林,陈阜,等.2010.耕作措施对双季稻田CH<sub>4</sub>与N<sub>2</sub>O排放的影响[J].*农业工程学报*, 26(1): 282-289
- 鲍士旦.2006.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社
- Beheydt D, Boeckx P, Ahmed H P, *et al.* 2008. N<sub>2</sub>O emission from conventional and minimum-tilled soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 44(6): 863-873
- Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. 2002. Emissions of N<sub>2</sub>O and NO from fertilized fields: summary of available measurement data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 6-1-6-13
- Cai Z C. 1997. A category for estimate of CH<sub>4</sub> emission from rice paddy fields in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49(1/3): 171-179
- Cai Z C, Tsuruta H, Minami K. 2000. Methane emissions from rice fields in China: Measurements and influencing factors [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(D13): 17231-17242
- 蔡祖聪,徐华,马静.2009.稻田生态系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放[M].合肥:中国科学技术大学出版社
- Choudhary M A, Akramkhanov A, Saggat S. 2002. Nitrous oxide emissions from a New Zealand cropped soil: Tillage effects, spatial and seasonal variability [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1/3): 33-43
- 代光照.2009.免耕施肥对稻田土壤生物学特性及温室气体排放的影响[D].武汉:华中农业大学
- Gregorich E G, Rochette P, St-Georges P, *et al.* 2008. Tillage effects on N<sub>2</sub>O emissions from soils under corn and soybeans in eastern Canada [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(2): 153-161
- Huang Y, Zhang W, Zheng X H, *et al.* 2004. Modeling methane emission from rice paddies with various agricultural practices [J]. *Journal of Geophysical Research*, 109(D8): D08113, doi: 10.1029/2003JD004401
- IPCC. 2007. Technical Summary// Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC* [M]. New York: Cambridge University Press. 31-34
- Jarecki M K, Parkin T B, Chan A S K, *et al.* 2008. Greenhouse gas emissions from two soils receiving nitrogen fertilizer and swine manure slurry [J]. *Journal of Environmental Quality*, 37(4): 1432-1438
- 汲文峰,黄海东,黄小毛.2013.保护性耕作技术在华南两熟区的应用与发展路径[J].*华中农业大学学报*, 32(5): 134-140
- 姜勇,庄秋丽,梁文举.2007.农田生态系统土壤有机碳库及其影响因素[J].*生态学杂志*, 26(2): 278-285
- Khalil M A K, Shearer M J, Rasmussen R A, *et al.* 2008. Methane and nitrous oxide emissions from subtropical rice agriculture in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G3): G00A05, doi: 10.1029/2007JG000462
- Kiehl J T, Trenberth K E. 1997. Earth's annual global mean energy budget [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2): 197-208
- 孔凡磊,陈阜,张海林,等.2010.轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J].*农业工程学报*, 26(8): 150-155
- Lal R. 2004. Agricultural activities and the global carbon cycle [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70(2): 103-116
- Li C S, Salas W, DeAngelo B, *et al.* 2006. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years [J]. *Journal of Environmental Quality*, 35(4): 1554-1565
- 李成芳,曹凌贵,汪金平,等.2009.不同耕作方式下稻田土壤CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的排放及碳收支估算[J].*农业环境科学学报*, 28(12):



- 2482-2488
- 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等.2005.免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响[J].水土保持学报,19(5): 94-96
- 李秀英,赵秉强,李絮花,等.2005.不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J].中国农业科学,38(8): 1591-1599
- Liu S W, Qin Y M, Zou J W, *et al.* 2010. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N<sub>2</sub>O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 408(4): 906-913
- 逯非,王效科,韩冰,等.2010.稻田秸秆还田:土壤固碳与甲烷增排[J].应用生态学报,21(1): 99-108
- Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, *et al.* 2006. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in Northeastern Colorado [J]. *Journal of Environmental Quality*, 35(4): 1584-1598
- Pan G X, Li L Q, Wu L S, *et al.* 2003. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils [J]. *Global Change Biology*, 10(1): 79-92
- 秦晓波,李玉娥,万运帆,等.2014.耕作方式和稻草还田对双季稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响[J].农业工程学报,30(11): 216-224
- Qin Y M, Liu S W, Guo Y Q, *et al.* 2010. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in Southeast China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 46(8): 825-834
- Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, *et al.* 2011. 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*, 17(6): 2196-2210
- Simona C, Ariangelo D P R, John G, *et al.* 2004. Nitrous oxide and methane fluxes from soils of the Orinoco savanna under different land uses [J]. *Global Change Biology*, 10(11): 1947-1960
- Six J, Stephen M O, Breidt F J, *et al.* 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term [J]. *Global Change Biology*, 10(2): 155-160
- Smith P, Martino D, Cai Z C, *et al.* 2007. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118(1/4): 6-28
- Smith P, Martino D, Cai Z C, *et al.* 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363(1492): 789-813
- Steinbach H S, Alvarez R. 2006. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in Pampean agroecosystems [J]. *Journal of Environmental Quality*, 35(1): 3-13
- 谭雪明,黄山,熊超,等.2013.不同栽培模式对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J].江苏农业科学,41(12): 341-344
- Tang X H, Luo Y J, Lv J K, *et al.* 2012. Mechanisms of soil aggregates stability in purple paddy soil under conservation tillage of Sichuan Basin, China // Li D L, Chen Y Y. *Computer and Computing Technologies in Agriculture V* [M]. Berlin Heidelberg: Springer. 355-370
- Ussiri D A N, Lal R, Jarecki M K. 2009. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio [J]. *Soil and Tillage Research*, 104(2): 247-255
- van Groenigen J W, Velthof G L, Oenema O, *et al.* 2010. Towards an agronomic assessment of N<sub>2</sub>O emissions: a case study for arable crops [J]. *European Journal of Soil Science*, 61(6): 903-913
- van Groenigen K J, Hastings A, Forristal D, *et al.* 2011. Soil C storage as affected by tillage and straw management: An assessment using field measurements and model predictions [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140(1/2): 218-225
- Wright A L, Hons F M. 2005. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 41(2): 95-100
- 伍芬琳,张海林,李琳,等.2008.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,41(9): 2703-2709
- 吴建富,潘晓华,石庆华.2009.免耕抛栽对水稻产量及其源库特性的影响[J].作物学报,35(1): 162-172
- Yan X Y, Akimoto H, Ohara T. 2003. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia [J]. *Global Change Biology*, 9(7): 1080-1096
- Yan X Y, Yagi K, Akiyama H, *et al.* 2005. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields [J]. *Global Change Biology*, 11(7): 1131-1141
- Yang X X, Shang Q Y, Wu P P, *et al.* 2010. Methane emissions from double rice agriculture under long-term fertilizing systems in Hunan, China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137(3/4): 308-316
- 章秀福,王丹英,符冠富,等.2006.南方稻田保护性耕作的研究进展与研究对策[J].土壤通报,37(2): 346-351
- 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.2011.农田土壤主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J].中国生态农业学报,19(4): 966-975
- Zheng X H, Han S H, Huang Y, *et al.* 2004. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N<sub>2</sub>O emission from Chinese croplands [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(2): GB2018, doi: 10.1029/2003GB002167
- 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.1978.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社
- 朱德峰,陈惠哲,徐一成,等.2013.我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策[J].中国稻米,19(4): 1-4
- 朱强根,朱安宁,张佳宝,等.2010.保护性耕作下土壤动物群落及其与土壤肥力的关系[J].农业工程学报,26(2): 70-76
- Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, *et al.* 2005. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue, and fertilizer application [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2): GB2021, doi: 10.1029/2000GB002401