

秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响

李成芳¹, 寇志奎¹, 张枝盛¹, 曹凑贵¹, 吴海亚², 梅金安³, 翟中兵³, 张丛德³, 魏坦雄³, 刘诗晴³, 夏起昕⁴

(1.农业部华中作物生理生态与栽培重点开放实验室/华中农业大学植物科技学院, 武汉 430070; 2.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; 3.湖北省武穴市鄂东南现代农业展示中心, 湖北 黄冈 436300; 4.湖北省武穴市农业局, 湖北 黄冈 436300)

摘 要: 秸秆还田影响免耕稻田土壤固碳潜力, 相应地改变了温室气体的排放, 从而影响秸秆还田后稻田土壤固碳减排对减缓全球变暖的贡献。通过研究不同油菜秸秆还田量(0、3 000、4 000 kg·hm⁻² 和 6 000 kg·hm⁻²)对免耕稻田温室气体(CO₂、CH₄ 和 N₂O)排放和土壤碳固定的影响, 评估秸秆还田后温室气体增排的综合增温潜势对稻田固碳减缓全球变暖的贡献的抵消作用。结果表明, 秸秆还田显著提高 CO₂ 和 N₂O 排放, 降低 CH₄ 排放, 显著提高土壤有机碳含量, 有效地提高土壤碳固定, 从而有效地提高稻田土壤碳固定对温室气体增排的温室效应抵消作用。随着秸秆还田量的增加, 稻田土壤固碳减缓全球变暖的贡献相应增加, 因此必须考虑免耕稻田秸秆还田量的问题, 以有效发挥免耕稻田秸秆还田的固碳潜力和降低温室气体的排放。

关键词: 秸秆还田; 免耕稻田; 温室气体; 碳固定; 增温潜势

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)11-2362-06

Effects of Rape Residue Mulch on Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sequestration from No-tillage Rice Fields

LI Cheng-fang¹, KOU Zhi-kui¹, ZHANG Zhi-sheng¹, CAO Cou-gui¹, WU Hai-ya², MEI Jin-an³, ZHAI Zhong-bing³, ZHANG Cong-de³, WEI Tan-xiong³, LIU Shi-qing³, XIA Qi-xin⁴

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

Abstract: Carbon sequestrations by soils from no-tillage paddy fields are affected by crop residue mulch, which alter greenhouse gas emissions and thus influence the contribution of soil carbon sequestration to global warming. Therefore, this paper aims to study effects of rape residue mulch on greenhouse gas(CO₂, CH₄ and N₂O) emissions, and organic carbon sequestration by soils from no-tillage paddy fields, and to assess the contribution of carbon sequestration to global warming. The results showed that rape residue mulch significantly increased emissions of CO₂ and N₂O, decreased CH₄ emissions. Application of rape residues significantly increased soil organic C contents and thus C sequestration by soils. Increased application of rape residues decreased net global warming potentials. Hence, our results suggested that it was important for taking into account the application of rape residues to increase C sequestration potential and to alleviate greenhouse gas emissions due to residue mulch.

Keywords: residue returning; no-tillage paddy field; greenhouse gas; carbon sequestration; global warming potential

收稿日期: 2011-05-14

基金项目: 国家科技支撑计划: 粮食丰产科技工程(2011BAD16B02); 国家自然科学基金(31100319); 中央高校基本科研业务费专项资金(2010QC032)

作者简介: 李成芳(1978—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为农业生态学。E-mail: lichengfang@mail.hzau.edu.cn

秸秆施用作为一种低投入、可持续的秸秆资源利用方式,在我国广为提倡。秸秆施用能增加土壤有机质^[1]、土壤酶活性和土壤微生物量^[2],改善土壤理化性质^[3],影响作物生长,作物生长和土壤微生物等则是影响农田温室气体产生与排放的重要因素^[4],因此秸秆施用可能影响到农田温室气体的排放。研究表明,秸秆还田可以通过增加土壤有机碳的直接输入实现固碳。但秸秆还田后,稻田增排甲烷的温室效应会大幅抵消土壤固碳的减排效益,这是一项重要的温室气体泄漏^[5]。为此,应当在考虑秸秆还田土壤固碳的基础上,加强秸秆还田对稻田温室气体排放及综合增温潜力的影响研究。

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。然而,随着免耕面积的扩大,农作物秸秆产生量不断增加。作物秸秆作为一种生活燃料或通过田间就地焚烧培肥土壤已成为我国南方农村的习惯,这不仅浪费农业资源,还成为大气温室气体一个重要排放源。因此,提倡免耕秸秆直接还田,改善土壤肥力,提高土壤固碳,已广为认识^[6-7]。虽然免耕秸秆还田在很大程度上增加了土壤固碳潜力,但是由于在免耕条件下秸秆只能覆盖在土壤表层,改变了土壤表层微气候和微生物学特征,又会在一定程度上影响免耕农田温室气体的排放^[8-9],从而部分或全部抵消土壤固碳效果。因此,目前有关秸秆还田对大气温室气体浓度的贡献的研究还存在不确定性。本文通过研究不同油菜秸秆还田量对免耕稻田温室气体排放和碳固定的影响,分析免耕秸秆还田稻田温室气体的综合增温潜力对碳固定在减缓全球变暖的贡献的抵消作用,以期评价秸秆还田对农业温室气体减排和固持的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验田从2006年开始实行油菜-水稻双免耕制度,本研究于2009年5月下旬到10月上旬在湖北省武穴市大法寺镇中桂村华中农业大学试验基地进行。试验所用中稻(*Oryza sativa* L.)品种为两优培9。试验田地处115°30'E,29°55'N,海拔20 m,土壤为潯育型水稻土,泥沙田,肥力中等,土壤质地为重壤。2006年试验前土壤基本理化性状为:pH6.58,有机碳17.86 mg·kg⁻¹,全氮2.21 g·kg⁻¹,铵态氮13.15 mg·kg⁻¹,硝态氮3.78 mg·kg⁻¹,全磷0.53 g·kg⁻¹。所用的油菜秸秆含有机碳744.3 g·kg⁻¹,全氮15.34 g·kg⁻¹,全磷1.37 g·

kg⁻¹,全钾13.23 g·kg⁻¹。

试验共设4个处理:免耕不施用秸秆(0RRM);免耕施用3 000 kg·hm⁻²秸秆(烘干重;3000RRM);免耕施用4 000 kg·hm⁻²秸秆(4000RRM);免耕施用6 000 kg·hm⁻²秸秆(6000RRM)。3次重复,随机区组设计,12个小区,每个小区45 m²。小区之间设埂,覆塑料薄膜,埂高20 cm。

2009年6月1日用20%百草枯200 g除草,6月2日灌水浸泡,6月4日播种,播种量22.5 kg·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;6月10日水稻出苗,并施底肥,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 kg N·hm⁻²,105 kg P₂O₅·hm⁻²,240 kg K₂O·hm⁻²,底肥施84 kg N·hm⁻²复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15%:15%:15%),其余N用尿素平均分两次追施,追肥日分别为6月24日和7月19日,磷肥和钾肥作为基肥于播种前一次性施入,在水稻生长期不追施磷钾肥。油菜秸秆施用前切成5~7 cm长,在底肥施用后覆盖到土表。稻田进行浅水灌溉,水稻收获前半个月排干,10月2日收获。

1.2 温室气体采集与分析

2009年6月11日至10月2日进行CH₄与N₂O的采集,采用密闭箱-气相色谱法测定稻田CH₄与N₂O排放量。采样箱为高1.10 m、直径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,第二次追肥后约半月采样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。氧化亚氮检测器ECD,分离柱内填充料为80/100目PorapakQ,检测温度300℃,柱温65℃,载气为氮气,流速40 mL·min⁻¹。CH₄检测器为FID,载气为氮气,流速30 mL·min⁻¹;氢气为燃气,流速30 mL·min⁻¹;空气为助燃气,流速400 mL·min⁻¹。检测器温度为200℃,分离柱温度为55℃。氧化亚氮与甲烷排放通量根据下式计算^[10]:

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

式中: F 是气体流通量,mg·m⁻²·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,℃。

土壤CO₂排放采用静态箱—LI-6400便携式光合仪法测定。将直径25 cm、高30 cm的PVC筒下缘嵌入土壤表层约2 cm,待气体混合均匀后立即用LI-6400便携式光合测定仪测定土壤CO₂通量。Lou等^[11]研究指出,上午9:00至11:00土壤CO₂平均通量能

较好地反映土壤 CO₂ 日平均通量,因此本研究于上午 9:00 至 11:00 进行土壤 CO₂ 通量测定。采样时间与 CH₄ 的采集一致。

在水稻生育期间,温室气体累积排放量为相邻的两个采样时期的气体排放量累加,而相邻的两采样时期的气体排放量为平均排放通量与采样时间的乘积^[12]。

1.3 样品采集及分析

在水稻收获时,每个小区用内径 5 cm 取土器采集 0~20 cm 土样,S 型采样法采集 8 点,混合,室内自然风干,过 100 目筛备用;同时用内径 5 cm、高 20 cm 环刀采集 0~20 cm 土样,每个小区 3 次,用于测定土壤容重。

土壤有机碳采用重铬酸钾高温氧化法测定^[13]。

稻季土壤固碳量为收获时与种植前土壤碳库之差,而土壤碳库(SOCP)通过下式计算:

$$SOCP = SOC \times BD \times A \times H$$

式中: SOC 为土壤有机碳含量, g · kg⁻¹; BD 为土壤容重, g · cm⁻³; A 为稻田面积, m²; H 为耕层厚度, 本研究取 0.2 m。

为将稻田秸秆还田后稻田土壤固碳和温室气体的综合增温潜势进行对比,本研究通过下式将稻田土壤

固碳(TCS)折算为稻田固持大气 CO₂ 的量(ATCS)^[9]:

$$ATCS = TCS \times 44 / 12$$

ATCS 也表示稻田秸秆还田后稻田土壤固碳对减缓全球变暖的贡献,单位 kg CO₂-eqv · hm⁻²。

本研究以稻田土壤固碳对减缓全球变暖的贡献与温室气体的综合增温潜势的差值来表示净增温潜势。在过去的 100 a 增温尺度,CH₄ 与 N₂O 的增温系数分别为 25 和 298^[14],因此,净增温潜势 GWP(单位为 kg CO₂-eqv · hm⁻²)为^[15]:

$$GWP = (25 \times CH_4 + 298 \times N_2O) - ATCS$$

试验结果均以每次测得的 3 次重复分析的平均值与标准差来表示,试验数据采用 SPSS16.0 软件统计进行方差分析。

2 结果与分析

如图 1 所示,各处理土壤 CO₂ 排放通量在分蘖中期出现排放峰值。秸秆还田显著影响土壤 CO₂ 排放,土壤 CO₂ 累积排放量随秸秆施用量的增加而增加(表 1)。秸秆不还田处理 ORRM 土壤 CO₂ 累积排放量分别是处理 3000RRM、4000RRM 和 6000RRM 的 59%、36%和 33%。

各处理 CH₄ 排放通量的季节性变化如图 2 所示。

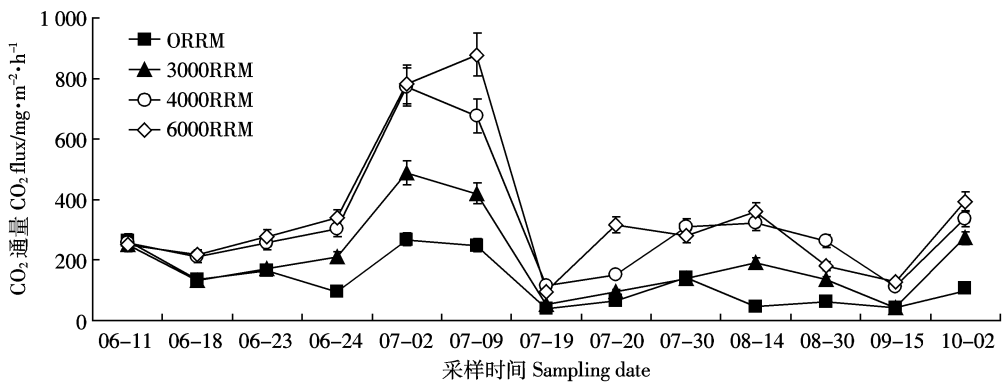


图 1 免耕秸秆还田稻田 CO₂ 通量的季节性变化
Figure 1 Seasonal changes in CO₂ fluxes from no-tillage paddy fields with rape residue mulch

表 1 稻季不同处理温室气体的累积排放量
Table 1 Cumulative emissions of greenhouse gas from different paddy fields

处理 Treatment	CO ₂ 累积排放量 Cumulative CO ₂ emissions/ kg CO ₂ · hm ⁻²	CH ₄ 累积排放量 Cumulative CH ₄ emissions/ kg CH ₄ · hm ⁻²	N ₂ O 累积排放量 Cumulative N ₂ O emissions/ kg N ₂ O · hm ⁻²
ORRM	2 776±215 c	2 722±102 a	0.33±0.11 d
3000RRM	4 706±301 b	1 845±142 b	0.51±0.12 c
4000RRM	7 746±498 a	1 141±123 c	0.63±0.15 b
6000RRM	8 326±355 a	764±112 d	0.90±0.18 a

同一列不同字母表示在 5%水平上差异显著。下同。
Different letters in a column mean significant difference at the level of 5%. The same as followed.

各处理土壤 CH₄ 排放通量均在苗期与收获成熟期呈排放低值,在分蘖盛期呈排放峰值。秸秆还田显著降低稻田 CH₄ 排放,即 CH₄ 累积排放量随秸秆施用量的增加而降低。秸秆不还田处理 ORRM 的 CH₄ 累积排放量分别是处理 3000RRM、4000RRM 和 6000RRM 的 1.48、2.39 倍和 3.56 倍。

各处理 N₂O 排放通量的季节性变化与如上两个温室气体的排放规律不同,N₂O 排放通量在每次施肥后第 1 d 出现峰值,而后逐渐降低(图 3)。秸秆还田显著影响 N₂O 排放,N₂O 累积排放量随秸秆施用量的增加而增加(表 1)。秸秆不还田处理 ORRM 的 N₂O 累积排放量分别是处理 3000RRM、4000RRM 和 6000RRM 的 65%、52%和 37%。

秸秆还田影响收获时土壤有机碳含量和土壤固碳量(表 2)。秸秆不还田处理 ORRM 的土壤有机碳含量分别为处理 3000RRM、4000RRM 和 6000RRM 的 96%、93%和 93%;土壤固碳量则为 34%、20%和 19%。

表 3 显示不同处理免耕秸秆还田影响稻田土壤固碳对减缓全球变暖的贡献和净温室潜势。稻田固碳对减缓全球变暖的贡献随秸秆还田量的增加而增加,净增温室潜势则随秸秆还田量的增加而降低。

3 讨论

3.1 温室气体排放通量的季节性变化

水稻生长前期,前作油菜残根枯叶留田,土壤有机质含量高,同时温度适宜土壤微生物的繁殖,使得

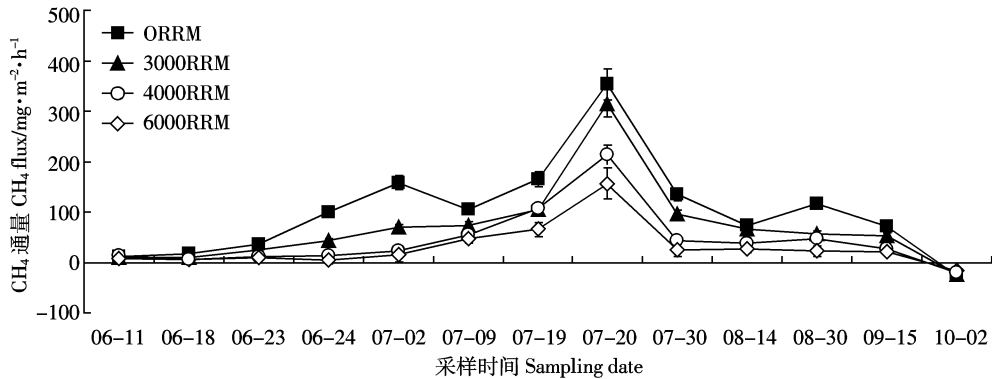


图 2 免耕秸秆还田稻田 CH₄ 通量的季节性变化

Figure 2 Seasonal changes in CH₄ fluxes from no-tillage paddy fields with rape residue mulch

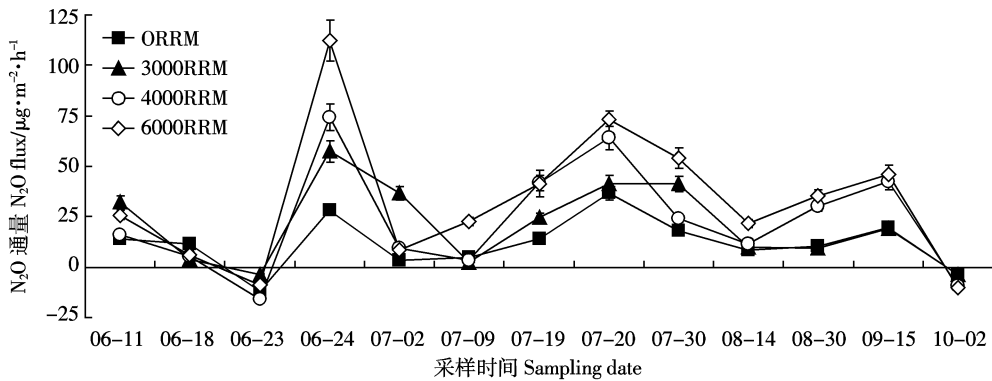


图 3 免耕秸秆还田稻田 N₂O 通量的季节性变化

Figure 3 Seasonal changes in N₂O fluxes from no-tillage paddy fields with rape residue mulch

表 2 稻季不同处理土壤有机碳与土壤固碳变化

Table 2 Differences in soil organic C and aboveground biomass of rice plants, and C sequestration in soil and aboveground rice plants from paddy fields under different treatments

处理 Treatment	试验前土壤有机碳含量 SOC contents before experiment/g·kg ⁻¹	2009 年收获时土壤有机碳含量 SOC contents at harvesting in 2009/g·kg ⁻¹	土壤固碳量 Soil C sequestration/kg·hm ⁻²
ORRM	17.86	18.21±1.64 c	288±36 c
3000RRM	17.86	18.91±2.71 b	853±71 b
4000RRM	17.86	19.62±2.45 a	1 435±116 a
6000RRM	17.86	19.68±2.22 a	1 486±130 a

表 3 免耕秸秆覆盖稻田土壤碳固定对减缓全球变暖的贡献
Table 3 Assessment of the mitigation benefit due to C sequestration by soils from no-tillage paddy fields with rape residue mulch

处理 Treatment	稻田土壤固碳对减缓全球变暖的贡献 The contribution of C sequestration in soils to global warming mitigation/kg CO ₂ -eqv·hm ⁻²	净温室潜势 Net global warming potential/kg CO ₂ -eqv·hm ⁻²
ORRM	1 054 c	67 094 a
300ORRM	3 128 b	43 149 b
400ORRM	5 262 a	23 451 c
600ORRM	5 450 a	13 919 d

秸秆降解和土壤碳矿化作用增强,因此土壤 CO₂ 排放逐渐加强;分蘖期水稻的生长旺盛,大量分泌物产生,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^[16]。

水稻生长初期,CH₄ 产生潜力小而氧化潜力高,且水稻植株、气泡和扩散途径排放 CH₄ 的能力又相对较弱,因此 CH₄ 排放通量较低^[17];水稻分蘖期,CH₄ 产生潜力明显增大而氧化潜力逐渐降低,且此时水稻根系和植株通气组织逐渐发达,有利于 CH₄ 从土壤中的排放,致使 CH₄ 排放峰出现^[18];水稻生长后期,由于稻田排干,土壤通气性得到改善,产甲烷菌受到抑制,使得 CH₄ 产生潜力显著降低^[19],CH₄ 排放通量呈现逐渐降低趋势。

在每次施氮肥后,N₂O 排放增加,这与 Xiong 等^[20]研究一致。这可能与施氮肥为硝化与反硝化作用提供反应底物有关^[21]。

3.2 秸秆还田对温室气体排放的影响

免耕稻田秸秆施用作为一种有机肥的投入,改善了土壤的理化性质,增加了土壤有机质的积累,促进了土壤微生物活性及残留根系的生长和活力^[22];同时,秸秆施用加速了微生物对有机物质的分解和矿物质的转化^[23],从而增加了 CO₂ 的排放量。秸秆覆盖在稻田表面,减少了秸秆与土壤的接触,部分稻草在土壤表层进行有氧降解,其降解产物在土壤氧化层中还还原产生 CH₄ 的可能性较小,主要以最终分解产物 CO₂ 的形式排放,降低了免耕稻田 CH₄ 排放^[24]。同时,稻田实行浅水灌溉,增加了土壤通气性,好氧微生物繁殖较快,CH₄ 产生的量小,CO₂ 的排放增加;还田秸秆富集土壤表层,土壤内部产甲烷基质供应能力的下降是其甲烷排放量减少的另一个原因^[8]。此外,秸秆与氮肥配合施用后,降低了稻田 C:N,促进了秸秆的降解,从而为土壤硝化与反硝化作用提供 C、N 反应底物,提高了 N₂O 排放^[25]。本研究与 Naser 等^[26]和 Curtin 等^[27]关于秸秆还田降低了 CO₂ 的排放而提高了 CH₄ 释放的报道并不一致,其原因可能与秸秆还田深度有关。

在他们的研究中还田秸秆经耕作后与土壤充分混匀,因此受土壤微生物作用强烈。

随着秸秆还田量的增加,为硝化与反硝化作用提供 C、N 反应底物随之增加,同时秸秆有氧降解也随之增加,因此稻田 CO₂ 和 N₂O 的排放随之增加,而 CH₄ 排放随之降低。

3.3 秸秆还田对免耕稻田碳固定的影响

本研究表明,秸秆施用后,在土壤微生物作用下分解,部分进入土壤,提高了土壤有机碳含量,从而土壤碳库增加,这与逯非等^[9]的秸秆还田具有可观的固碳潜力的观点一致。研究也指出,随着秸秆施用量的增加,土壤固碳量也随之增加,表明本研究地区免耕稻田土壤固碳潜力相当大,因此可在减缓全球变暖中起到重要的作用。

本研究表明,免耕稻田秸秆还田不仅能提高土壤固碳量,提高了稻田固碳对减缓全球变暖的贡献,同时也有效降低秸秆还田后稻田温室气体增排对稻田土壤固碳效益的抵消作用。然而,从本研究还可以看出,虽然免耕秸秆还田有效地增加了稻田土壤固碳潜力,但由于温室气体增排的温室效应对稻田土壤固碳减缓全球变暖的贡献的抵消作用非常明显,必须考虑免耕稻田秸秆还田量的问题,以有效发挥免耕稻田秸秆还田的固碳潜力和降低温室气体的排放。因此,秸秆还田作为一种固碳减排措施,在评价其减缓全球变暖的潜力和可行性时,温室气体增排这一泄漏因素是不容忽视^[9]。然而,由于本研究只是针对一个水稻生长季节的研究,还缺乏长期定位研究,通过加强长期定位研究可以有效地消除研究方面的不确定性。

4 结论

秸秆还田影响免耕稻田温室气体的排放、土壤固碳与水稻植株固碳。秸秆还田提高了土壤 CO₂ 与 N₂O 排放,降低了 CH₄ 排放,提高了土壤固碳量,从而有效地降低了温室气体增排的温室效应对稻田土壤固碳

减缓全球变暖的贡献的抵消作用。但由于温室气体的增温潜势对稻田土壤固碳减缓全球变暖的贡献的抵消作用非常明显,必须考虑免耕稻田秸秆还田适宜用量的问题。

参考文献:

- [1] Lennart M, Jan P. Impacts of rotations and crop residue treatments on soil organic matter content in two Swedish long-term experiments[J]. *Arch Agron Soil Sci*, 2006, 52(5):485-494.
- [2] Li J, Zhao BQ, Li XY, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility[J]. *Agr Sci China*, 2008, 7(3):336-343.
- [3] 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2):49-52.
- LAO X R, WU Z Y, GAO Y C. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility[J]. *Transactions of CSAE*, 2002, 18(2):49-52.
- [4] 胡正华, 杨燕萍, 李涵茂, 等. UV-B 增强与秸秆施用对土壤-大豆系统呼吸速率和 N_2O 排放的影响 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(4):539-543.
- HU Z H, YANG Y P, LI H M, et al. Combined effect of enhanced UV-B radiation and straw addition on respiration rate and N_2O emission from soil-soybean system[J]. *China Environ Sci*, 2010, 30(4):539-543.
- [5] 逯 非, 王效科, 韩 冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(1):99-108.
- LU F, WANG X K, HAN B, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(1):99-108.
- [6] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998:111-151.
- Shen S M. Soil fertility of China[J]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1998:111-115.
- [7] 韩 冰, 王效科, 逯 非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2):612-619.
- HAN B, WANG X K, LU F, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. *Acta Ecol Sinica*, 2008, 28(2):612-619.
- [8] 伍芬琳, 张海林, 李 琳, 等. 保护性耕作下双季稻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 CH_4 emission and greenhouse effects in double paddy soil with conservation tillage[J]. *Sci Agr Sinica*, 2008, 41(9):2703-2709.
- [9] Mutegei J K, Munkholm L J, Petersen B M, et al. Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy[J]. *Soil Biol Biochem*, 2010, 42:1701-1711.
- [10] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Adv Atmos Sci*, 1998, 15(4):569-579.
- [11] Lou Y S, Li Z P, Zhang T L. Carbon dioxide flux in a subtropical agricultural soil of China [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2003, 149:281-293.
- [12] Singh J S, Sing S, Raghubanshi A S, et al. Methane flux from rice/wheat agroecosystem as affected by crop phenology, fertilization and water lever[J]. *Plant Soil*, 1996, 183:323-327.
- [13] 鲁如坤. 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.
- Lu R K. Analysis methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999:107-108.
- [14] IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I. The physical science basis, summary for policymakers[R/OL]. 2007. <http://ipcc-wgl.ucar.edu/wgl/wgl1report.html>.
- [15] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. 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*, 2011, 17:2196-2210.
- [16] 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 CH_4 emission in black earth rice fields[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(12):2278-2280.
- [17] Ko J Y, Kang H W. The effects of cultural practices on methane emission from rice fields[J]. *Nutr Cy Agroecosyst*, 2000, 58:311-314.
- [18] 张晓艳, 马二登, 张广斌, 等. 麦季稻秆施用对后续稻季 CH_4 产生氧化及排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1827-1833.
- ZHANG X Y, MA E D, ZHANG G B, et al. Effects of rice straw application in wheat season on production, oxidation and emission of CH_4 during the following rice-growing season [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, 29(9):1827-1833.
- [19] Wang M X, Li J. CH_4 emission and oxidation in Chinese rice paddies[J]. *Nutr Cy Agroecosyst*, 2002, 64:43-55.
- [20] Xiong Z Q, Xin G X, Tsuruta H, et al. Measurement of nitrous oxide emissions from two rice-based cropping systems in China[J]. *Nutr Cy Agroecosyst*, 2002, 64:125-133.
- [21] Maljanen M, Martikkala M, Koponen H T, et al. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from experimental excreta patches in boreal agricultural soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, 39:914-920.
- [22] Ginting D, Kessavalou A, Eghball B, et al. Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure and compost applications[J]. *J Environ Qual*, 2003, 32:23-32.
- [23] 孙 星, 刘 勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响 [J]. 土壤, 2007, 39(5):782-786.
- SUN X, LIU Q, WANG D J, et al. Effect of long-term straw application on soil fertility[J]. *Soils*, 2007, 39(5):782-786.
- [24] 陈 苇, 卢婉芳, 段彬伍, 等. 稻草还田对晚稻稻田甲烷排放的影响 [J]. 土壤学报, 2002, 39(2):170-176.
- CHEN W, LU W F, DUAN B W, et al. Effect of rice straw manure on methane emission in late rice paddy fields[J]. *Acta Pedol Sinica*, 2002, 39(2):170-176.
- [25] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, et al. Denitrification, N_2O and CO_2 fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure[J]. *Biol Fertil Soils*, 2001, 34:375-389.
- [26] Naser H M, Nagata O, Tamura S, et al. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2007, 53:95-101.
- [27] Curtin D, Wang H, Selles F, et al. Tillage effects on carbon fluxes in continuous wheat and fallow-wheat rotations[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64:2080-2086.