

红壤丘陵双季稻稻田农田生态系统不同施肥下 碳汇效应及收益评估

李洁静, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095)

摘要:收集江西一个红壤水稻田长期肥料试验中产量、施肥量、土壤有机碳等资料,结合对农田生产中各项生产资料和管理活动的投入进行调查,对不同施肥处理下系统的生产力、碳投入排放与碳收集效应进行分析,并估算系统的碳汇,评价了不同处理下生产力的碳成本与碳汇效益。结果表明,种植双季稻下化肥配施和化肥有机肥配施下的稻田总碳汇分别为 -2.2 和 $-3.2 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,但在两季生产中并无显著差异;相应地,有机无机肥配施比纯化肥配方施肥产量提高了 30%左右,而碳汇量提高了 50%左右。证明有机无机配合施肥是一种可以增产增汇的关键农业生产管理途径。

关键词:红壤丘陵;稻田生态系统;碳平衡;碳汇;施肥

中图分类号:X16 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2520-06

Estimation of Net Carbon Balance and Benefits of Rice-rice Cropping Farm of a Red Earth Paddy Under Long Term Fertilization Experiment from Jiangxi, China

LI Jie-jing, PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHANG Xu-hui

(Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Data of crop yield, soil C stock, fertilizer application rate were collected of a longterm fertilization trial in Jiangxi red soil region. A consultant survey of agrochemical inputs, management inputs and labor input for the local production system was conducted. A analysis of productivity, C inputs and C sequestration was evaluated and net C balance was estimated under different fertilization schemes. The results showed that total annual C balance of the double rice system ranged from $-2.2 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ under compound chemical fertilizers and $3.2 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ under combined inorganic with organic fertilizers. The net C balance was not significantly different between the fertilization treatments studied. However, annual C sink and grain productivity was enhanced respectively by up to 50% and by 30% under combined inorganic with organic fertilization compared to compound chemical fertilization. It is suggesting that combined fertilization of inorganic fertilizers with organic fertilizers would be a critical option of agricultural management practices to enhance the rice productivity and C sink effect of the rice paddy field.

Keywords: red soil region; rice paddy ecosystem; C balance; C sink; fertilization

控制大气温室气体浓度升高已经越来越成为社会关注的焦点和技术发展的方向。对于森林和草原生态系统在减缓大气温室气体上升中的“缓冲器”的作用已经有很多科学资料积累^[1-3]。因而,生态系统固碳减排受到科学界和社会的广泛重视^[4]。农田生态系统是人类扰动最频繁、对人类的各种耕作措施最敏感的

生态系统,但对该系统碳平衡研究较少^[5-6]。水稻是我国主要的农作物之一。2004 年我国水稻播种面积为 $28.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全球水稻播种面积的 18.75%, 仅次于印度(28%), 但水稻产量居世界各国首位, 占全球水稻产量的 29.32%, 比印度高出 8 个百分点^[7]。因此, 对稻田生态系统 CO_2 通量在不同时间尺度的变化特征及量化研究可以为评价全球稻田生态系统对大气 CO_2 的源/汇贡献提供十分有价值的技术支持^[8]。笔者前期已对太湖地区农田生态系统净碳汇效应及经济收益作了评估^[9], 本研究旨在通过对江西红壤双季稻农田生态系统的净碳汇效应及经济收益的评估来

收稿日期:2009-09-22

基金项目:农业部财政项目“中国农田土壤碳汇评价”

作者简介:李洁静(1984—),女,硕士,主要从事碳循环与碳经济研究。

E-mail: Yuyiqingchen_123@yahoo.com.cn

通讯作者:潘根兴

进一步探讨稻作农业的固碳减排效应,说明稻田良好管理可以取得经济效益和环境效益的双赢。

1 材料与方法

1.1 供试稻田系统(土壤、农作制及施肥处理)

研究对象为红壤性水稻土稻-稻轮作系统,是江西省红壤研究所长期肥料试验观测基地的一部分,位于江西进贤县(116°20′24″N, 28°15′30″E),为典型低丘红壤地区(海拔高度 25~30 m,坡度 5°),土壤类型是第四纪红粘土发育的水稻土^[10]。该地年均降雨量 1 549 mm,年蒸发量 1 100~1 200 mm,干湿季节明显,3—6月为雨季,降雨量占全年雨量的 61%~69%;7—9月为旱季,蒸发量占全年蒸发量的 40%~50%;无霜期 289 d,年积温 6 480 ℃;年均气温 17.3 ℃,最冷月(1月)气温为 4.6 ℃,极端最低温可达-10 ℃左右,并常伴有雨雪或冰冻;夏季晴旱酷热,最热月(7月)平均气温一般在 28.0~29.8 ℃,极端最高温达 40 ℃以上;日照时数 1 600~1 900 h。

长期试验从 1981 年开始实施^[10]。试验处理分为:CK(不施肥),NPK(无机肥),NPKM(无机肥和有机肥配施)。肥料用量:NPK 处理每季作物施 N 90 kg·hm⁻²、P₂O₅ 45 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²;NPKM 处理早稻施 N 90 kg·hm⁻²、P₂O₅ 45 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²和紫云英(鲜)22 500 kg·hm⁻²,晚稻施 N 90 kg·hm⁻²、P₂O₅ 45 kg·hm⁻²、K₂O 75 kg·hm⁻²和猪粪(湿)22 500 kg·hm⁻²。小区面积 46.67 m²,3次重复,随机排列。1981 年试验开始时耕层土壤 pH 6.9,有机碳 16.3 g·kg⁻¹,全氮 1.49 g·kg⁻¹,全磷 0.48 g·kg⁻¹,全钾 10.39 g·kg⁻¹。有效磷(NaHCO₃-P)4.15 mg·kg⁻¹,速效钾(NH₄OAc-K)80.52 mg·kg⁻¹,粘粒(<0.001 mm)24.1%。

1.2 研究方法

研究方法基本同文献[9]。本研究对象是稻田生态系统,其边界是不同试验田块,是受人类活动影响的“自然-经济-社会”复合区,属于农业生态系统。碳固定-排放及经济投入-收益分析的对象是土壤-作物系统及系统中附加的人类活动。田块物质投入和产出的数据为 1981—2001 年 20 年间的平均值。研究所涉及的只是特定的作物从播种到收获产品期间的物质循环及经济价值,不涉及产品的去向。农产品收获后的经济效益均以 2007 年的市场价格进行估算。所有数据均采用 Excel 软件进行统计分析。

1.2.1 碳平衡估算途径

系统净碳源/汇效应用作物地上部对大气 CO₂ 的

同化吸收与碳在土壤中的固定形式,即土壤有机碳 SOC 减去生产中的物质投入及人工管理投入所需的碳成本(能源消耗换算成 CO₂)的平衡来估算。作物地上部对大气 CO₂ 的同化吸收通过该系统 1981 年后历年产量的平均值换算为作物的 NPP(净初级生产力),土壤有机碳用该生态系统 1983—2003 年的土壤有机质含量换算得到。

(1)系统的碳吸收(C_a):

系统对大气 CO₂ 的吸收同化量可用下式估算:

$$C_a = C_{\text{crop}} + C_{\text{SOC}} \quad (1)$$

式中: C_{crop} 表示作物地上部固碳; C_{SOC} 表示土壤有机碳。

(2)系统的碳排放(C_e):

在此仅为生产活动涉及的碳排放(E_h), E_h 包括:投入农用化学品涉及的能源碳排放(C_{ac})、农田人工管理投入的碳排放(C_m)和农田操作人工投入的碳排放(C_l),见文献[9]。

(3)系统的净碳汇(C_s)可以通过吸收与排放的碳平衡来计算:

$$C_s = E_h - C_{\text{crop}} - C_{\text{SOC}} \quad (2)$$

1.2.2 碳分项估算的参数选择及依据

(1)作物地上部 NPP 由下式估算:

$$C_{\text{crop}} = (Y_{se} + Y_{st}) \times C_f \quad (3)$$

式中: Y_{se} 为籽粒产量, Y_{st} 为秸秆产量; C_f 为作物合成单位生物量干物质所吸收的大气碳,水稻取值 0.41^[11]。

(2)土壤有机碳由下式估算:

$$C_{\text{SOC}} = W_s \times (X_t - X_o) / 1.724 \quad (4)$$

式中: W_s 为每公顷 0~15 cm 耕作层土重,通过供试土壤的容重换算; X_t 为当年土壤的有机质含量; X_o 为试验起始年土壤的有机质含量;1.724 为有机质与碳的换算系数。

(3)生产管理投入的碳排放:

基本参数及计算见文献[9]。

1.2.3 系统的经济流估算

净收益=产量收益-物质投入成本-管理成本 (5)

物质投入成本=种子成本+化肥成本+农药成本+灌溉水 (6)

管理成本=(灌溉+耕作+收获)机电费+生产管理人工费 (7)

调查得到的农田物质投入数量与价格列于表 1。

2 结果与分析

2.1 系统的净碳汇

红壤农田生态系统不同施肥处理下作物产量见

表 1 每公顷农田生产的年投入量与价格
Table 1 Amount and dosage of annual inputs and the price(CNY,2007)

投入 Input	数量 Amount and dosage	价格 Market price(CNY)
种子 Seeds	水稻 Rice 60.0 kg·hm ⁻²	水稻 Rice 3.6 kg ⁻¹
化肥 Fertilizers	年总计 Annual total N 90 kg·hm ⁻² P45 kg·hm ⁻² , K 75 kg·hm ⁻²	N 2.4 kg ⁻¹ , P 2.3 kg ⁻¹ , K 1.8 kg ⁻¹
农药 pesticides	年总计 Annual total 7.5 kg·hm ⁻²	5.5 kg ⁻¹
灌溉 Irrigation	年总计 Annual total 7000 t·hm ⁻²	450 元·hm ⁻² ·a ⁻¹
机电 Diesel and power	耗油 Diesel consumption 37.5 L·hm ⁻² 耗电 Electricity consumption 70 kW·hm ⁻²	柴油 Diesel 8.0 L ⁻¹ 电 Electricity 0.80 kW ⁻¹ ·h ⁻¹
人工 Labors	13~22 人·天 13~22 person per day	25~30(人·天) ⁻¹ one person per day

资料来源:江西省红壤研究所 Data obtained from Jiangxi Institute of Red Soil.(2007)

图 1。从试验起始年 1981 年到 2002 年,CK 处理的产量一直处于最低水平,这与 CK 处理得不到充足的养分供应有关。NPK 处理虽给作物补充养分,其产量效应不及有机无机肥配施处理。

不同施肥处理下农田生态系统生产中的碳吸收和排放情况如表 2 所示。经计算得到:早稻季碳吸收介于(2.14±0.05)~(4.02±0.02) t C·hm⁻²·a⁻¹,晚稻季与早稻季差别不大,介于(2.37±0.07)~(3.87±0.06) t C·hm⁻²·a⁻¹;生态系统的碳排在早稻季介于(0.6~0.7)t C·hm⁻²·a⁻¹,在晚稻季介于(0.8~0.9)t C·hm⁻²·a⁻¹。其中,

表 2 不同施肥处理下农田生态系统生产中碳吸收及排放估算(t C·hm⁻²·a⁻¹)

Table 2 Estimation of carbon adsorption and emission in agricultural ecosystem production under different fertilizer treatments(t C·hm⁻²·a⁻¹)

碳流通 Carbon flux	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
	CK	NPK	NPKM	CK	NPK	NPKM
碳汇 C sink						
作物固碳 Carbon assimilation	2.07±0.06	3.38±0.03	3.86±0.03	2.29±0.08	3.34±0.05	3.71±0.06
SOC	0.08±0.00	0.09±0.00	0.17±0.00	0.08±0.00	0.09±0.00	0.17±0.00
小计 Subtotal	2.14±0.05	3.47±0.03	4.02±0.02	2.37±0.07	3.43±0.05	3.87±0.06
C 源 C emissions						
劳动力 Labor	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
灌溉 Irrigation	0.15	0.15	0.15	0.38	0.38	0.38
机耕 Tillage	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
化肥 Chemical fertilizer	0	0.09	0.09	0	0.09	0.09
农药 Pesticides	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
小计 Subtotal	0.57	0.66	0.67	0.80	0.89	0.90

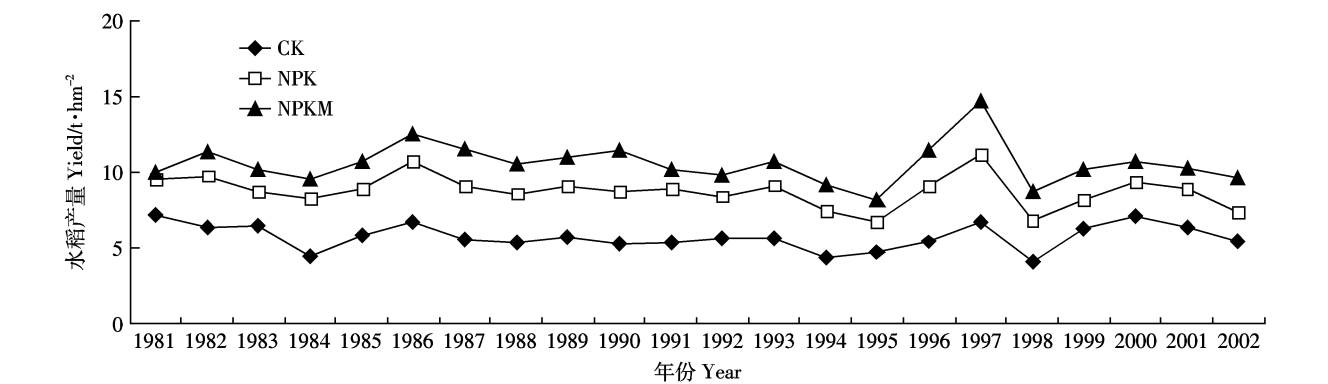


图 1 江西红壤不同施肥处理下产量效应
Figure 1 Grain yield under different fertilizer treatments in red soil region in Jiangxi

生产管理投入的碳排放(碳成本组成)在早稻季占 31%~35%,而在晚稻季为 48%~54%,可见在红壤地区物质投入与管理投入的碳成本基本处于同一水平。

将早稻季和晚稻季的碳吸收和排放数据分别加和得到系统的全年碳吸收与排放量。经估算,整个生态系统各种施肥处理下全年净碳固定达到 $(4.51 \pm 0.12) \sim (7.90 \pm 0.08) \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,各施肥处理表现为 $\text{NPKM} > \text{NPK} > \text{CK}$,有机无机肥的碳汇效应是单施化肥的 1.1 倍。全年碳排放为 $1.4 \sim 1.6 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,同样表现为 $\text{NPKM} > \text{NPK} > \text{CK}$ 。由此可以看出,在红壤地区可以通过较小的碳投入获得较高的固碳效应。

将碳吸收和碳排放值综合估算可以得到系统的净碳汇。经计算,NPK 和 NPKM 处理系统净碳汇(扣除 CK 处理碳汇)分别为 (-2.21 ± 0.12) 和 $(-3.21 \pm 0.16) \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,有机无机肥配施的碳汇量是化肥处理的 1.5 倍。在早稻生长季,NPK 和 NPKM 处理的碳汇量分别为 (-1.24 ± 0.06) 和 $(-1.79 \pm 0.06) \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,有机肥处理的碳汇量是化肥处理的 1.4 倍。晚稻生长季,NPK 和 NPKM 处理的碳汇量分别为 (-0.97 ± 0.06) 和 $(-1.42 \pm 0.10) \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,有机肥处理的碳汇量是化肥处理的 1.5 倍。总的来看,早稻季和晚稻季的碳汇量差别不大,且均为 $\text{NPKM} > \text{NPK} > \text{CK}$ 。可见,合理的有机无机肥配施可以取得较好的固碳增汇效果。

2.2 系统的经济流

早稻、晚稻季农田生态系统经济效益的估算结果如图 2 所示。经计算,早稻季 NPK 和 NPKM 处理的经济效益分别是 CK 处理的 1.6 和 1.8 倍,而配合施肥处理比单施化肥处理每公顷高约 900 元。晚稻季 CK、NPK、NPKM 的经济收益分别为 3 733.3、5 997.3 和 7 305.8 $\text{CNY} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,NPK 和 NPKM 处理的经济效益远高于 CK 处理,分别是 CK 处理的 1.6 和 2.0 倍,

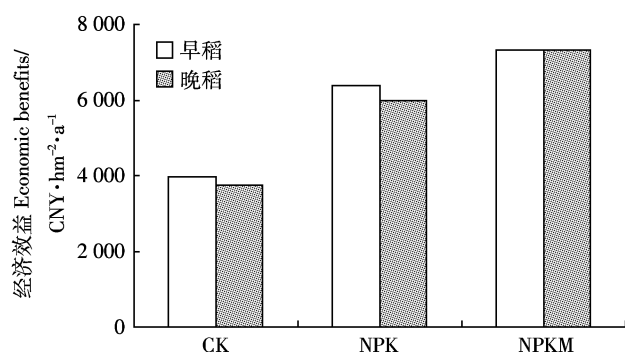


图 2 早/晚稻季不同施肥处理下的经济效益

Figure 2 Economic benefits of early and late rice under different fertilizer treatments

且有机无机肥配施处理的经济效益优于化肥处理。从早稻季和晚稻季各施肥处理的经济效益可以看出,施肥处理的经济效益均远高于无肥处理;同时,有机无机肥配施处理的经济效益明显高于化肥处理,而这些均与相同实验条件下各施肥处理的碳汇效应相吻合。

由此可以得出,良好施肥管理措施下的稻作农业对农田生态系统固碳减排有重要贡献,是目前缓解气候变化固碳增汇的一条有效途径。

3 讨论

3.1 与太湖地区农田生态系统碳汇效应的比较

农田生态系统在缓解温室气体排放方面发挥着很大作用,以稻作农业为主要农业产业的太湖地区及江西红壤带,二者在固碳减排方面发挥什么样的作用,其碳汇效应及经济收益有何不同,本节将从以下几方面进行比较和分析。

3.1.1 碳成本的比较

红壤地区由于各种生产管理措施造成的碳排放(即碳成本),处理 CK、NPK 和 NPKM 在早稻季分别为 0.57、0.66 和 $0.67 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,晚稻季分别为 0.80、0.89 和 $0.90 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,均为施肥处理的碳成本大于无肥处理。太湖地区各种生产管理的碳成本,处理 NF、CF 和 CFM/CFS(二者的平均值)在水稻生长季分别为 1.86、2.28 和 $2.31 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,油菜生长季分别为 0.19、0.61 和 $0.63 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,仍然是施肥处理的碳成本高于无肥处理。而将红壤地区和太湖地区的碳成本相比较,可以发现,同是水稻生长季,红壤地区的碳成本要小于太湖地区,其原因可能在于红壤地区的肥料施用量与太湖地区有所不同。太湖地区每年施肥 $\text{N } 427.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而红壤地区则为 $\text{N } 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,仅氮肥量就相差近 5 倍。而且,两个地区的灌溉情况也有所不同,太湖地区水稻生长季每次灌溉 2 h,平均灌溉 15 次。而在红壤地区同样的灌水时长,早稻季仅灌水 2 次,晚稻灌水 5 次。另外,不同地区使用动力机械的电机效率也有所不同。红壤地区使用电机功耗为 $10 \text{ kW} \cdot \text{h}$,太湖地区为 $14 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。这些差异均导致红壤地区的碳投入量要小于太湖地区。

3.1.2 碳汇效应的比较

不同农田生态系统不同施肥处理下的碳汇效应可见表 3。总体来看,红壤和太湖地区不同施肥处理的碳汇效应趋势是一致的,均为 $\text{NPKM} > \text{NPK} > \text{CK}$ 。具体到不同的处理,CK 和 NPK 处理红壤地区碳汇量显

著高于太湖地区,NPKM 处理两个地区的碳汇量无明显差异。其原因可能在于估算两个地区的碳汇效应所采用的方法不同所致。从表中可看出,单位施肥量的产量和单位施肥量的碳汇量均为红壤地区显著高于太湖地区,前者红壤地区 NPK 和 NPKM 处理分别是太湖地区的 3.5 和 3.3 倍,后者红壤地区 NPK 和 NPKM 处理分别是太湖地区的 4.9 和 2.4 倍,可见红壤地区肥料的产量和环境效应较好。

根据作物的产量变化来计算,单位产量的碳投入见表 3。从表中可看出,单位产量的碳投入红壤地区明显小于太湖地区,且两个地区均有 $\text{NPKM} < \text{NPK} < \text{CK}$ 的趋势。单位碳汇的碳投入同样是红壤地区小于太湖地区,且呈现 $\text{NPKM} < \text{NPK} < \text{CK}$ 的趋势。经计算,每增产 1 t 稻谷,红壤地区 NPK 和 NPKM 处理均会达到增加 $0.7 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 碳汇的效果,太湖地区 CF 和 OF 处理每增产 1 t 稻谷可增加碳汇 0.5 和 $1.0 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。并且,良好施肥管理措施下的稻作农业对构建气候友好的新型农业具有非常积极的意义。

3.1.3 经济投入及收益的比较

红壤和太湖地区不同稻田生态系统的经济投入见表 3。从表中可见,两个生态系统各处理经济投入相差不大,均为 $\text{NPKM} > \text{NPK} > \text{CK}$ 。不同稻田生态系统的经济收益见图 4。若仅以两个地区水稻收益作比较,很显然,红壤地区的收益情况不及太湖地区,这种差异在施肥区比较明显。油菜季收益明显不及水稻

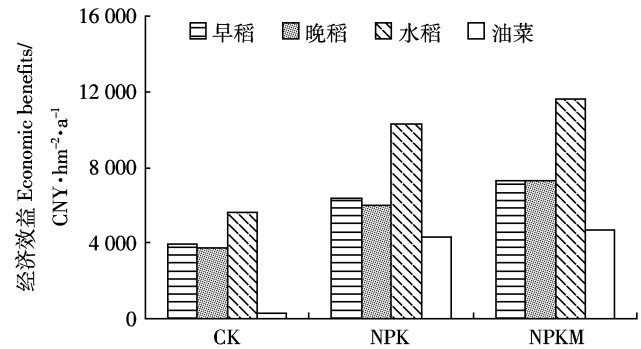


图 3 不同农田生态系统不同施肥处理下的经济效益

Figure 3 Economic benefits under different fertilizer treatments in different cropland ecosystem

季,并且,无论红壤地区还是太湖地区,其经济收益都呈现 $\text{NPKM} > \text{NPK} > \text{CK}$ 的趋势。

红壤地区 CK 和 NPK 处理单位碳汇的经济投入远远小于太湖地区,而有机无机肥配施处理单位碳汇的经济投入稍高于太湖地区。可见红壤地区可以通过较小的投入获得较高的碳汇效应,这也说明水田耕作相对于水旱轮作有较小的环境成本和较好的环境效应。另外,合理的肥料配施也显示出低成本高碳汇的良好环境效应。因此,合理的有机无机肥配施下的水田耕作更有利于取得经济效益和环境效益的双赢。

3.2 不确定性分析

由于本试验基于生态系统生物量生产和长期试验条件下土壤有机质的数据及大田生产中生产资料

表 3 不同农田生态系统不同施肥处理下单位产量、碳汇的碳投入和经济投入比较

Table 3 Carbon input and economic input for per ton grain yield and per ton carbon sink under different fertilizer treatments in different cropland ecosystem

项目	红壤农田生态系统 Rice paddy ecosystem in red soil region			太湖农田生态系统 Rice paddy ecosystem in Tai Lake region		
	CK	NPK	NPKM	NF	CF	OF
稻谷产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) Grain yield	5.80	8.80	10.60	4.28	6.68	8.46
净碳汇($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) Net C sink	-3.14	-5.35	-6.35	-0.91	-2.90	-6.96
肥料效益($\text{t grain} \cdot \text{t fertilizer}^{-1}$) Grain yield on fertilization	27.62	41.90	50.48	7.70	12.01	15.22
施肥碳汇($\text{tC} \cdot \text{t fertilizer}^{-1}$) C sink on fertilization	-14.95	-25.48	-30.24	-1.64	-5.22	-12.52
碳成本($\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2}$) C cost	1.37	1.54	1.55	1.86	2.28	2.31
碳汇碳成本($\text{tC} \cdot \text{tC}^{-1}$) Carbon cost	-0.44	-0.29	-0.24	-2.04	-0.79	-0.33
单位产量碳成本($\text{tC} \cdot \text{t grain}^{-1}$) C cost per ton grain yield	0.24	0.18	0.15	0.43	0.34	0.27
经济投入($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) Economic Cost	2 689.40	3 545.80	4 558.30	2 135.80	3 744.70	4 626.10
碳汇经济成本($\text{元} \cdot \text{tC}^{-1}$) Cost per ton C sink	-856.50	-662.77	-717.84	-2 347.03	-1 291.28	-664.67

注:OF 列数值表示猪粪与化肥配施处理 CFM 和秸秆与化肥配施处理 CFS 的平均值。红壤总的肥料施用量为 $0.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N 、 P_2O_5 和 K_2O 总量),太湖地区为 $0.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

Note: OF stands for the average of combined fertilization of chemical fertilizers with straw return and combined fertilization of chemical fertilizers with manure return. The amount of fertilizers is $0.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (amount of N , P_2O_5 and K_2O) in red soil region, while $0.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in Tai Lake region.

投入和价格进行的,对系统碳汇的估计值和经济效益可能与大田生产还有一定的差距,这使其不确定性可能来自以下两个方面:

(1)中国的农田多数为农户经营,很少有像国外大规模的农事操作,因此其各项经济投入的数据在不同地区,甚至不同农户都有所不同。另外,中国政府在农业灌溉水及电力消耗方面都有不同程度的补贴,这使在调查计算经济成本时,各项农业投入的变异性很大。这是中国目前的农田经营管理方式下普遍存在的问题,也给经济成本的估算增加了不确定性因素。

(2)生态系统对大气 CO₂ 的吸收同化,地上部采用作物地上部的 NPP 来估算,而地下部则通过长期试验条件下各处理的土壤有机质来换算。前者是一个年度通量值,后者则是作物的根茬、凋落物长期经过土壤动物及微生物分解矿化、腐殖化的综合结果,其反映的碳的固定值可能要小于年度碳投入量。何念祖等^[12]研究表明,浙江省三熟制高产稻田上,作物的年根茬生物量中,早稻根茬约占 30%,晚稻根茬占近 50%,因此本研究作物固碳的数值在 30%~50%水平上小于实际情况,从而年度碳汇的估计值也要小于实际情况。然而,在 CO₂ 通量观测值及土壤呼吸基底值极少的红壤地区(江西),此仍不失为一种研究生态系统碳源/汇趋势的可行方法。

4 结论

供试稻田生态系统无论碳投入-排放还是经济投入-收益在早稻季和晚稻季间都没有显著差异,但均表现出有机无机肥配施>单施化肥>无肥的效果。将红壤稻-稻系统和太湖稻-油轮作系统作比较,红壤系统可以通过较小的碳投入和经济投入获得较高的碳汇效应,但经济收益不及太湖地区。综合比较可以得出,水田耕作相对于旱作有更高的碳汇效应及经济收益,并且,合理的有机无机肥配施可以取得经济效益和环境效益的双赢成果。

参考文献:

- [1] Russell C A, Voroney R P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I Relationship to environmental variables and estimates of C respired[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, 301:309.
- [2] Ham J M, Knapp A K. Fluxes of CO₂, water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89:1-14.
- [3] Fang J Y, et al. Change in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292:2320-2322.
- [4] Houghton L J T, et al. eds. *Climate Change, 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001:185-236.
- [5] 刘允芬. 农业生态系统碳循环研究[J]. *自然资源学报*, 1995, 10(1):1-8.
LIU Yun-fen. A study on the carbon cycle in the agro-ecological system of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 1995, 10(1):1-8.
- [6] 黄 斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1):156-160.
HUANG Bin, WANG Jing-guo, GONG Yuan-shi, et al. Soil respiration and carbon balance in winter wheat and summer maize fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):156-160.
- [7] FAO. <http://faostat.fao.org/faostat/>, 2005.
- [8] 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 等. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征[J]. *环境科学*, 2007, 28(2):283-288.
ZHU Yong-li, TONG Cheng-li, WU Jin-shui, et al. Characteristics of CO₂ flux seasonal variation in subtropical paddy field ecosystem[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2):283-288.
- [9] 李洁静, 潘根兴, 张旭辉, 等. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7):1670-1676.
LI Jie-jing, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui, et al. An evaluation of net carbon sink effect and cost/benefits of a rice-rapeseed rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7):1670-1676.
- [10] 周 萍, Alessandro Piccolo, 潘根兴, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 III. 两种水稻土颗粒有机质结构特征的变化[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3):79-89.
ZHOU Ping, ALESSANDRO Piccolo, PAN Gen-xing, et al. Changes of structural characteristics of particulate organic matter about III: Two kinds of paddy soil on base of accumulation mechanism of organic carbon in southern typical paddy soil under long-term experiments[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3):79-89.
- [11] 赵荣钦, 秦明周, 黄爱民. 农田固碳的潜力[J]. *生态环境*, 2004, 13(1):81-84.
ZHAO Rong-qin, QIN Ming-zhou, HUANG Ai-min. Practices and potential of cropland to sequester carbon[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1):81-84.
- [12] 何念祖, 倪吾钟. 不同肥料管理对三熟制高产稻田土壤有机碳消长与平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1996, 2(4):315-321.
HE Nian-zu, NI Wu-zhong. Effect of growth and decline of soil organic carbon on triple cropping high-yielding paddy under different fertilizer management[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1996, 2(4):315-321.