

# 洞庭湖地区长期施肥条件下双季稻田生态系统净碳汇效应及收益评估

彭 华<sup>1,2</sup>, 纪雄辉<sup>1,2</sup>, 刘昭兵<sup>1,2</sup>, 石丽红<sup>1,2</sup>, 田发祥<sup>1,2</sup>, 李洪顺<sup>3</sup>

(1.湖南省土壤肥料研究所,湖南 长沙 410125;2.湖南省农业环境研究中心,湖南 长沙 410125;3.中南大学研究生院隆平分院,湖南 长沙 410125)

**摘要:**以农业部望城红壤水稻土生态环境重点野外观测试验站的长期定位肥力效应试验稻田为研究对象,利用历年作物产量、凋落物固碳和农田 CO<sub>2</sub> 排放等观测资料及生态系统的物质和管理投入等调查资料,估算了年碳汇平衡和经济收益,以及不同施肥处理的固碳速率、潜力及表土碳密度。结果表明,不同施肥处理下年碳汇量介于 0.82~4.70 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,增施有机肥(猪粪、稻草)的处理 NPK+RS、NK+PM 和 NP+RS 的碳汇量分别是相应的仅施化肥处理 NPK、NK 和 NP 的 1.1、1.7 和 1.4 倍。不同处理生态系统物质投入的碳成本介于 0.03~0.65 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,人工管理的碳成本介于 1.42~1.48 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,年经济收益介于 1.17×10<sup>3</sup>~8.71×10<sup>3</sup> CNY·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,有机肥配施的经济效益是单施化肥的 1.1~1.6 倍。不同施肥处理固碳速率介于 25.83~51.98 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,不同施肥处理表土碳密度介于 29.21~43.24 t·hm<sup>-2</sup>。增施有机肥能够提高土壤固碳速率和表土碳密度。与单施化肥相比,有机无机配施处理的生态系统生产力较高,也表现出较高的碳汇效应和经济收益,是促进土壤固碳减排的一项重要措施。

**关键词:** 稻田生态系统,长期施肥,碳汇,经济收益

中图分类号:X171.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)12-2526-07

## Evaluation of Net Carbon Sink Effect and Economic Benefit in Double Rice Field Ecosystem Under Long-term Fertilization

PENG Hua<sup>1,2</sup>, JI Xiong-hui<sup>1,2</sup>, LIU Zhao-bing<sup>1,2</sup>, SHI Li-hong<sup>1,2</sup>, TIAN Fa-xiang<sup>1,2</sup>, LI Hong-shun<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Fertilizer in Hunan Province, Changsha 410125, China; 2. Hunan Agricultural Environment Research Center, Changsha 410125, China; 3. Longping Branch of Central South University, Changsha 410125, China)

**Abstract:** The annual C balance, economic benefit, Soil C sequestration rate and C density of surface soil in long-term fertilization double rice ecosystem were estimated, based on measurement of grain yield, litter C content and field CO<sub>2</sub> emission as well as investigation of material and management inputs, in Wangcheng Field Reddish Paddy Soil Pivotal Observational and Experimental Station of Agricultural Ministry. The calculated annual C sink under different fertilizations ranged from 0.82 to 4.70 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, which C sink effect under combined inorganic/organic fertilization was 1.1, 1.7 and 1.4 times as that under relative chemical fertilization. C cost of material and management input ranged from 0.03 to 0.65 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> and 1.42 to 1.48 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, respectively. Annual economic benefit ranged from 1.17 to 8.71 CNY·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, and combined fertilization enhanced 1.1~1.6 times higher than chemical fertilization. Soil C sequestration rate under different fertilization ranged 3.98 to 16.30 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, C density of surface soil under different fertilization ranged 32.82 to 37.24 t·hm<sup>-2</sup>. It indicated that increasing organic manure fertilizer has great effect on improving C sequestration rate and C density of surface soil. Comparing with that under chemical fertilization, The paddy ecosystem could not only have higher productivity, but also present greater net C sink and higher economic benefit under combined inorganic/organic fertilization. So it's an effective measure to increasing carbon sequestration and emission mitigation in soil.

**Keywords:** paddy ecosystem; long-term fertilization; carbon sink; economic benefit

收稿日期 2009-09-22

基金项目 国家科技支撑计划课题(2008BAD95B02,2007BAD89B11)

作者简介 彭 华(1982-)男,湖南古丈县人,助理研究员,硕士,主要从事农业环境科学研究。E-mail: phlove10@163.com

通讯作者 纪雄辉 E-mail: jixionghui@sohu.com

随着联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告正式提交,以全球变暖为主要表现的全球气候急剧变化及其与不断增加的大气温室气体的关系已经被接受为无可争议的事实,切实减少温室气体排放、增加碳汇成为缓解气候变化的首要任务<sup>[1]</sup>。大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高可能引起的全球气候变化已受到世界各国的普遍重视。人类正在努力寻找各种能够减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的技术措施。在本世纪前 20~30 年这一稳定大气 CO<sub>2</sub> 浓度的关键时期内,作为《京都议定书》认可的固碳方法之一,农田土壤固碳在一系列固碳减排措施中将处于重要地位<sup>[2]</sup>。近年来,农田土壤碳固定的研究已经成为国际全球变化研究的一个重要热点。研究表明,通过改进和优化耕作措施,如采用保护性耕作措施、扩大水田种植面积、增加秸秆还田、增加有机肥施用和采用轮作等,可以减少农田土壤的 CO<sub>2</sub> 净排放,稳定甚至增加土壤有机碳储量<sup>[3]</sup>。据 Lal 等<sup>[4]</sup>研究,全球耕地总固碳潜力为 0.75~1.0 Pg·a<sup>-1</sup>, IPCC 第四次评估报告剔除全球农业固碳 1 600~4 300 Mt CO<sub>2</sub> eq·a<sup>-1</sup>,其中 90%来自土壤固碳<sup>[5]</sup>。韩冰等<sup>[3]</sup>指出提高化肥施用量、秸秆还田量、有机肥施用量和推广免耕,可以将我国农田土壤的总固碳量提高到 182.1 Tg·a<sup>-1</sup>。可见,中国农田土壤可以作为一种非常重要的固碳措施,应纳入全球 CO<sub>2</sub> 减排措施中去。

Pan<sup>[6]</sup>认为,我国农田土壤具有显著的固碳减排潜力,其中稻作农业的土壤固碳潜力十分突出。据报道,近 20 年来我国南方稻田生态系统土壤有机碳含量普遍呈升高趋势,表现为重要的碳“汇”<sup>[7]</sup>。郑聚峰等<sup>[8]</sup>研究表明不同施肥措施下土壤固碳以及土壤温室气体排放的差异,但还不清楚稻田生态系统的净碳汇效应及不同施肥下的差异。目前,国内外对农田生态系统碳排放和固定等方面研究较多,而对碳循环和土壤碳汇效应的研究报道还较少。全面考虑农田生态系统的整体固碳减排效应,研究土壤碳的固定、积累与周转及其对气候变化的反馈机制,对于正确评估土壤碳固定在温室气体减排中的作用,加强农业碳汇相关技术体系的研究构建具有重要意义。本文以农业部望城水稻土生态环境重点野外观测实验站为研究对象,利用文献和调查资料,估算了不同施肥下的表土碳密度及固碳潜力,同时对稻田生态系统涉及的各个环节碳流量进行定量估算,分析不同施肥管理措施下净固碳效率和经济效益,为气候变化友好型稻作农业技术提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试稻田生态系统

农业部望城水稻土生态环境重点野外观测试验站位于湖南省长沙市望城县黄金乡(N112°80' E28°37', H100 m)。土壤类型为第四纪红土发育的水稻土(普通筒育水耕人为土)。属于中亚热带季风湿润气候区,年均气温 17.5 °C,≥10 °C积温 5 450 °C·d,年日照时数 1 700 h,全年降雨量 1 300~1 400 mm,主要集中在 4~6 月,约占全年的 50%~60%,年均无霜期大约为 300 d。1981 年试验开始前耕层(0~15 cm)土壤 pH 6.6(水土比为 1:2.5),有机质 34.7 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 2.05 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 151.0 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 10.2 mg·kg<sup>-1</sup>,全钾 10.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 14.1 g·kg<sup>-1</sup>。

野外观测试验站始于 1981 年,所研究的 7 个施肥处理分别是:(1)不施肥(CK) (2)施氮钾肥(NK); (3)施氮磷肥(NP) (4)施氮磷钾肥(NPK) (5)施氮钾+猪粪(NK+PM) (6)施氮磷+稻草(NP+RS) (7)施氮磷钾+稻草(NPK+RS),小区试验设 3 次重复,各小区单独排灌,小区和灌排渠埂用水泥硬化。

各处理中的 N、P、K 化肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。氮肥按早稻 150 kg N·hm<sup>-2</sup>和晚稻 180 kg N·hm<sup>-2</sup>施入,其中 50%的 N 于移栽前基肥施入,剩余 50%于分蘖期追肥施入,磷肥按早、晚稻每季 38.7 kg P·hm<sup>-2</sup>基肥施入,钾肥按早、晚稻每季 99.6 kg K·hm<sup>-2</sup>基肥施入,猪粪按早、晚稻每季 15 t·hm<sup>-2</sup>基肥施入,稻草按早、晚稻 2.1 t·hm<sup>-2</sup>,切碎成 10~20 cm 后基肥翻入稻田。

早、晚稻品种(组合)分别为常规籼稻品种和杂交晚稻组合,均为当时的主推品种。在整个水稻生育期间的其他田间管理措施如病虫害防治、灌溉等,与当地大田管理一致。

### 1.2 研究方法

本研究对象是稻田生态系统,物质投入和产出的数据为 1981—2007 年间平均值。研究所涉及为水稻从播种到收获产品期间的物质循环及经济价值,不考虑收获产品去向。所有田间小区数据采用 Excel 软件和 SPSS13.0 软件进行统计分析。

#### 1.2.1 固碳速率的计算方法

计算各施肥处理的土壤固碳速率时,采用不同施肥措施农田土壤碳变化量减去空白区(不施肥区)土壤碳变化量:

$$SCR_{\text{r}}=DSOC_{\text{r}}-DSOC_{\text{c}}$$

式中  $SCR_F$  为农田土壤固碳速率  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  ;  $DSOC_F$  为不同施肥处理农田土壤碳年变化量  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  ;  $DSOC_0$  为不施肥农田土壤碳年变化量  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  .

$DSOC_F$  和  $DSOC_0$  可根据下式的  $DSOC$  计算 :

$$DSOC=(SOC_2-SOC_1)/n$$

式中  $DSOC$  为土壤碳年变化量  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  ;  $SOC_2$  为经过长期定位试验  $n$  年后土壤碳库的末值  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ;  $SOC_1$  为长期定位试验布置前土壤碳库的初值  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ;  $n$  为长期定位试验的年数.

土壤的有机碳库( $SOC$ )可用下式估算 :

$$SOC=SOC'\times BD\times H\times 10$$

式中  $SOC$  为土壤有机碳库  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  ;  $SOC'$  为土壤有机碳含量  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  ;  $BD$  为土壤容重  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  ;  $H$  为土层厚度  $\text{cm}$  ,按当地稻田平均耕层厚度取值  $15\text{ cm}$  ,下同.

### 1.2.2 固碳潜力估算

固碳潜力按照下式计算 :

$$CSP=(CSR_2-CSR_1)\cdot S$$

式中  $CSP$  为施用化肥的农田土壤固碳潜力  $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$  ;  $CSR_1$  为农业措施 1 下的固碳速率 ;  $CSR_2$  为农业措施 2 下的固碳速率 ;  $S$  为耕地面积  $\text{hm}^2$  .这里以 2007 年湖南省稻田面积进行估算不同措施下稻田土壤固碳潜力.

本文仅考虑增施有机肥(猪粪和稻草)的固碳潜力,以常规 NPK 施肥为对照,分别计算 NP+RS、NPK+RS、NK+PM 处理的固碳潜力.

### 1.2.3 表土碳密度估算

表土碳密度采用下列公式<sup>[9-10]</sup>估算出 :

$$DOC=SOC\times r\times H\times 10^{-1}$$

式中  $DOC$  为碳密度  $\text{t}\cdot\text{C}\cdot\text{hm}^{-2}$  ;  $SOC$  为有机碳含量  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  ;  $r$  为土壤容重  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  ;  $H$  为耕层土壤厚度  $\text{cm}$  .

### 1.2.4 碳平衡估算途径

系统净碳源/汇效应用系统对大气  $\text{CO}_2$  的同化吸收减去土壤碳排放、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  $\text{CO}_2$ )的平衡来估算.系统的大气  $\text{CO}_2$  同化吸收通过该系统历年产量的平均值换算为作物的 NPP(净初级生产力),土壤碳排放由土壤-植物系统的呼吸估算.计算方法参照李洁静<sup>[11]</sup>碳平衡估算途径.

### 1.2.5 系统经济流估算

净收益=产量收益-物质投入成本-管理成本

物质投入成本=种子成本+化肥成本+农药成本+灌溉水

管理成本=(灌溉+耕作+收获)机电费+生产管理

人工费

农田生产投入与价格参照表 1.

表 1 每公顷稻田双季稻生产的投入与价格

Table 1 Amount and dosage of inputs per area and price of unit input in double rice production

投入 Input	数量 Amount and dosage	价格 Price
种子 Seeds	60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	3.5 元 $\cdot\text{kg}^{-1}$
化肥 Chemical fertilizer	N 330 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$	2.1 元 $\cdot\text{kg}^{-1}$
	P 77.4 $\text{kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$	2.0 元 $\cdot\text{kg}^{-1}$
	K 199.2 $\text{kg K}\cdot\text{hm}^{-2}$	1.6 元 $\cdot\text{kg}^{-1}$
农药 Pesticide	6.183 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	4.0 元 $\cdot\text{kg}^{-1}$
灌溉水 Irrigational water	年总计 4 901 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	1.0 元 $\cdot\text{kg}^{-1}$
机电消耗 Diesel and power consumption	柴油 Diesel 69.6 $\text{L}\cdot\text{hm}^{-2}$	4.63 元 $\cdot\text{L}^{-1}$
电 Electricity	40 $\text{kW}\cdot\text{hm}^{-2}$	0.55 元 $\cdot\text{kW}^{-1}$
人工 Labors	45~51 $\text{person}\cdot\text{d}\cdot\text{hm}^{-2}$	30~40 元 $\text{person}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$

注:各项投入和价格为 2008 年湖南省统计局数据.

Note: Each inputs and price was from Hunan Statistical Yearbook in 2008.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤固碳速率、固碳潜力

分析长期试验下各处理的土壤固碳速率(表 2)表明,2007 年不同施肥措施的农田土壤碳库变化量范围介于  $2\ 921.1\sim 4\ 324.61\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  .不同施肥措施下土壤碳年变化量大小顺序为  $\text{NPK+RS}>\text{NK+PM}>\text{NP+RS}>\text{NPK}>\text{NP}>\text{NK}>\text{CK}$  (图 1),有机无机配施表现为碳积累的“汇”效应,而不施肥和施用化肥表现为碳排放的“源”效应.

进一步计算土壤固碳速率表明,不同施肥措施下固碳速率大小关系为  $\text{NPK+RS}>\text{NK+PM}>\text{NP+RS}>\text{NPK}>\text{NP}>\text{NK}$  .其中,在施入等量化肥的基础上,增施稻草的 2

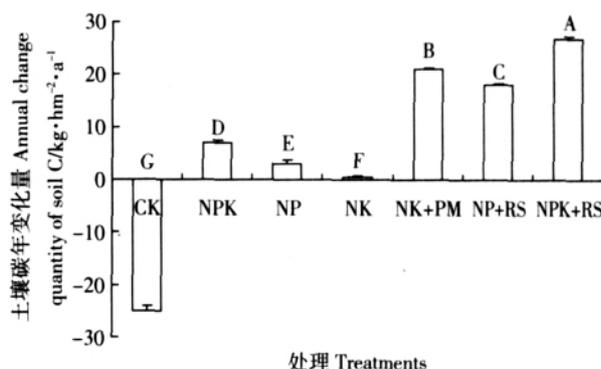


图 1 长期定位试验下不同施肥处理土壤碳年变化量

Figure 1 Annual change of soil C in different fertilization treatments under long-term experiment

表 2 长期定位试验下土壤固碳速率及湖南稻田固碳潜力估算

Table 2 Soil C sequestration rate under long-term experiment and its potential access of rice field in Hunan

处理 Treatments	1980			2007			固碳速率 Rate of C sequestration/ kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>	固碳潜力 Potential of C sequestration/ kt C·a <sup>-1</sup>
	土壤容重 Soil bulk density/ g·cm <sup>-3</sup>	耕层厚度 Depth of plough layer/ cm	有机碳库 Organic C sink/ kg·hm <sup>-2</sup>	土壤容重 Soil bulk density/ g·cm <sup>-3</sup>	耕层厚度 Depth of plough layer/ cm	有机碳库 Organic C sink/ kg·hm <sup>-2</sup>		
CK	1.19±0.02	15±0.05	3 600.5±10.26	1.11 ±0.04	14.8±1.04	2 921.1±30.11	/	/
NPK	1.19±0.02	15±0.05	3 600.5±10.26	1.17 ±0.01	17.7±0.93	3 788.5±10.27	32.13±0.74	93.68±1.52
NP	1.19±0.02	15±0.05	3 600.5±10.26	1.08 ±0.02	18.5±1.00	3 680.7±21.46	28.13±1.66	83.20±6.24
NK	1.19±0.02	15±0.05	3 600.5±10.26	1.04 ±0.02	17.2±1.22	3 599.6±14.94	25.83±0.89	73.29±6.89
NK+PM	1.19±0.02	15±0.05	3 600.5±10.26	1.08 ±0.02	18.5±1.32	4 170.73±6.20	46.28±0.92	134.78±3.78
NP+RS	1.19±0.02	15±0.05	3 600.5±10.26	1.07 ±0.03	17.8±1.68	4 092.07±5.96	43.37±1.14	126.10±4.60
NPK+RS	1.19±0.02	15±0.05	3 600.5±10.26	1.07 ±0.02	18.9±0.75	4 324.61±10.95	51.98±1.52	151.59±6.27

注 根据湖南省统计年鉴资料,2007 年湖南省稻田面积为 2 916 km<sup>2</sup> 计算固碳潜力。

Note :The area of rice field in Hunan was 2 916×10<sup>3</sup> hm<sup>2</sup> in 2007 according to Hunan Statistical Yearbook in 2008.

个处理 NP+RS 和 NPK+RS 的固碳速率分别是不施稻草的 NP 和 NPK 处理的 1.6、1.7 倍, 配施猪粪 NK+PM 处理的固碳速率是不施猪粪 NK 处理的 1.8 倍。结果证明, 增施有机肥(稻草、猪粪)能促进土壤碳库年变化量朝“汇”的方向发展, 土壤固碳速率显著提高。

依据不同施肥处理土壤固碳速率可计算出不同施肥措施下湖南省稻田土壤固碳潜力(表 2)。可以看出, 采用配施有机肥(秸秆、猪粪)湖南省稻田固碳潜力将达到(73.29±6.89)~(151.59±6.27)kt C·a<sup>-1</sup>, 是单施化肥处理的 1.1~1.8 倍。表明增施有机肥料能够促进土壤固碳, 增加土壤有机碳库的贮量, 是固碳减排的一项有效的措施, 对减缓全球气候变暖趋势具有现实意义。

## 2.2 表土碳密度

根据长期定位试验 2007 年有机碳量计算该年表土碳密度(图 2)表明, 不同施肥处理下, 耕层土壤碳密度介于 29.21~43.24 t·hm<sup>-2</sup>, 其结果与潘根兴<sup>[12]</sup>、张琪等<sup>[7]</sup>的水稻表土碳密度 30.86~34.30 t·hm<sup>-2</sup> 和 32.92 t·hm<sup>-2</sup> 接近, 高于低丘红壤 0~20 cm 有机碳密度(20.90 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[13]</sup>和安徽省水稻土耕层平均有机碳密度的估计值(27.70 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[14]</sup>。不同施肥处理耕层土壤碳密度大小为 NPK+RS>NP+PM>NP+RS>NPK>NP>NK>CK。施用化肥各处理表土碳密度较不施肥略有增加, 而施用有机肥处理 NP+RS、NPK+RS、NP+PM 的耕层土壤碳密度分别比不施肥提高了 40.1%、48.0%和 42.8%。

## 2.3 系统的净碳汇

计算不同施肥措施下稻田生态系统生产中各环节的碳流量(表 3)可以看出, 整个生态系统中不同施肥处理下全年水稻的碳吸收(净碳固定)介于 4.2~

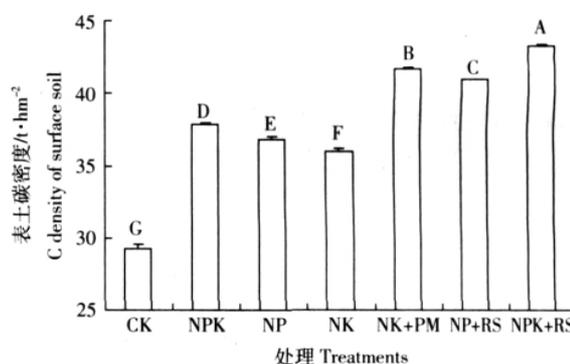


图 2 2007 年长期试验各施肥处理的表土碳密度

Figure 2 C density of surface soil of different fertilization treatment under long-term and fix-position in 2007

8.9 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 之间, 各施肥处理大小顺序为 NPK+RS>NPK>NK+PM>NP+RS>NP>NK>CK。表明施肥有利于农田生态系统固碳, 且配施有机肥又显著大于单施化肥。其中, 以 NPK+RS 处理水稻碳吸收较 NPK 增加 6.47%, NP+RS 比 NP 增加 14.9%, NK+PM 比 NK 增加 25.3%。

不同施肥处理稻田土壤全年碳排放在 3.3~4.3 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 之间, 其大小顺序为 NPK>NPK+RS>NP>NK>NK+PM>NP+RS>CK。表明单施化肥情况下土壤呼吸大大提高, 增加了碳的排放。稻田生产管理投入的碳排放(碳成本组成)约占 42%~51%, 表明水稻生产中的碳成本在整个系统碳平衡中占有重要的份额。

由表 2 可以看出, 水稻生长季不同施肥处理下土壤碳平衡均为碳汇, 施肥处理碳汇均大于 CK, 表明施肥能促进水稻生长季节的土壤碳汇。其中, NPK+RS 处理碳汇量最大, 达 -4.70 t C·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 大于 NPK 处理, NP+RS 和 NK+PM 处理碳汇均大于 NP 与 NK。分

表 3 不同施肥处理下农田生态系统生产中碳流通估算( $t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )Table 3 Carbon flux estimation in agricultural ecosystem production under different fertilizer treatments( $t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )

处理 Treat- ments	碳吸收 C adsorption			生态系统碳排放 C emission from ecosystem			投入碳排放 C emission through input					净碳汇 Net C sink		
	作物固碳 C assimilation through crop	凋落物 固碳 C in litterfall	小计 Subtotal	生长期排放 Growing period	休闲期 排放 Non- crop period	小计 Subtotal	劳动力 Labor	灌溉 Irrigation	机耕 Tillage	化肥 Chemical fertilizer	农药 Pesticides	小计 Subtotal	碳平衡 C balance	减 CK -CK
CK	4.06	0.15	4.21	1.79	0.15	1.94	0.41	0.83	0.18	0	0.03	1.45	-0.82	
NPK	8.04	0.3	8.34	1.98	0.17	2.15	0.42	0.83	0.18	0.61	0.03	2.08	-4.11	-3.29
NP	6.32	0.24	6.56	1.94	0.16	2.1	0.43	0.83	0.18	0.59	0.03	2.06	-2.40	-1.58
NK	6.21	0.23	6.43	1.92	0.16	2.08	0.42	0.83	0.18	0.6	0.03	2.06	-2.29	-1.47
NK+PM	7.78	0.29	8.07	1.88	0.16	2.04	0.45	0.83	0.18	0.6	0.03	2.09	-3.94	-3.12
NP+RS	7.26	0.27	7.53	1.86	0.16	2.02	0.45	0.83	0.18	0.59	0.03	2.08	-3.43	-2.61
NPK+RS	8.56	0.32	8.88	1.91	0.16	2.07	0.46	0.83	0.18	0.61	0.03	2.11	-4.70	-3.88

析水稻生长季节不同施肥处理土壤净碳汇量(扣除 CK 处理碳汇)表明,有机无机肥配施的净碳汇量为 $-2.61 \sim -3.88 t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ,NPK 配合施肥为 $-3.29 t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ,而 NP、NK 处理分别为 $-1.58$ 和 $-1.48 t C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。其中,NPK+RS 较 NPK 提高 17.9%,NP+RS 较 NP 提高 65.2%,NK+PM 较 NK 提高 112%,可见,施用有机肥能显著促进稻田土壤碳汇。

#### 2.4 系统经济流

根据调查每公顷农田生产的投入与价格(表 3)估算不同施肥处理农田生态系统经济效益(图 3)表明,双季稻田施肥条件下的经济效益显著高于不施肥对照 3~6 倍。不同施肥处理系统经济效益大小关系为 NPK+RS > NK+PM > NPK > NP+RS > NK > NP > CK。施肥量相同的情况下,增施稻草、猪粪处理的净收益比施化肥处理每公顷高出约 938~3 000 元。这与不同施肥措施下水稻碳汇效应的变化趋势一致,即产量越高、经济效益越大其碳汇量也越大。

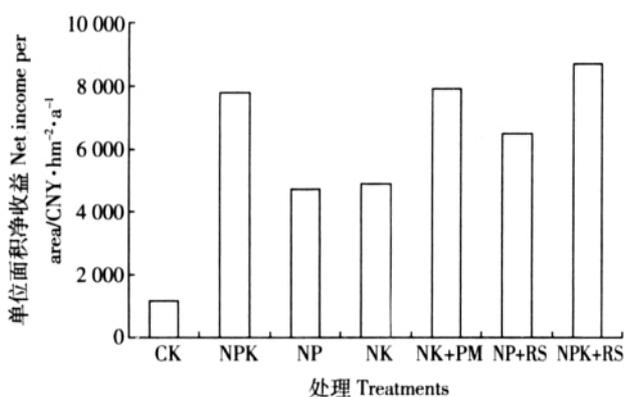


图 3 长期定位试验下不同施肥处理下经济收益比较

Figure 3 Comparison of economic profit in different fertilization treatments under long-term and fix-position experiment

### 3 讨论

#### 3.1 土壤固碳速率、固碳潜力

农田土壤总的固碳潜力相当于目前我国能源活动碳排放量的 23.9%,对于全球 CO<sub>2</sub> 减排具有重要作用<sup>[3]</sup>。增加农田土壤有机碳的固定不仅可减少大气 CO<sub>2</sub> 含量,而且对保障国家粮食安全具有举足轻重的作用<sup>[15]</sup>。有研究表明,近 20 年来,水稻土中普遍存在固碳趋势,且在南方大于北方<sup>[9]</sup>。潘根兴等<sup>[9]</sup>利用国家稻田长期定位监测点和部分长期定位试验结果分析,华南地区稻田表层土壤固碳潜力为 87.3 Tg(6.67×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>)。李忠佩<sup>[13]</sup>依据江西省余江县水稻土有机碳储量估算出我国亚热带地区水稻土过去 20 年固定大气 CO<sub>2</sub> 量(555.1±88.7)Tg,目前估计还可平均固碳(5 150±1 063)kg·hm<sup>-2</sup>,在保持现实较高生产力水平下,我国亚热带地区水稻土未来可新固定大气 CO<sub>2</sub> 量(441.0±84.7)Tg。韩冰<sup>[3]</sup>分析发现,提高化肥施用量、秸秆还田量、有机肥施用量和推广免耕,可以使我国农田土壤固碳量分别提高到 94.91、42.23、41.38 和 3.58 Tg·a<sup>-1</sup>,合计 182.1 Tg·a<sup>-1</sup>。我们通过对长期定位试验不同施肥措施下稻田固碳速率分析表明,土壤固碳速率范围在 25.83~51.98 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,施肥能够增加表层土壤碳库,促进土壤对碳的固定作用,尤其是增施有机肥(稻草、猪粪)的效果更为显著。进一步对长期施肥条件下固碳潜力估算表明,增施有机肥的 NPK+RS、NP+RS 和 NK+PM 的固碳潜力远高于其他化肥处理。表明单施化肥增加了土壤呼吸,减少了土壤对表层碳的储存。这与潘根兴<sup>[12]</sup>、郑聚峰等<sup>[8]</sup>关于长期施用有机肥或有机无机肥配施可显著增加土壤表层碳库、降低土壤呼吸排放的结论相吻合。很多研究也已报道,增

加有机肥的施用能够增加土壤表层碳储量和提高土壤固碳。

### 3.2 不同施肥处理表土碳密度

有资料表明<sup>[16]</sup>,我国自然土壤表土有机碳密度为  $(50 \pm 47) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而耕作土壤平均仅为  $(35 \pm 32) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,水田为  $(46.9 \pm 25.7) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,表土平均碳密度略小于全球平均值,是欧盟平均值的 70%~75%,表明我国土壤碳储存与欧盟还有很大差距。本研究表土碳密度介于  $29.21 \sim 43.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,也处于较低的密度水平。可能与所在的区域植被覆盖、地理气候、栽种农作物方式、品种、施肥情况等控制植被生产力和凋落物分解速率的关键环境有关,而且环境中不确定因子存在明显差异,必然对其凋落物有机碳的周转产生重要影响。我国土壤碳密度偏低,反映了我国生态系统总体质量较低,应对与抵御气候变化的自然能力较弱,但这也提供了固碳减排的巨大空间。周萍<sup>[17]</sup>对长期不同施肥处理下水稻土有机碳进行研究,得出化肥与猪粪配施处理,有机质的输入导致其 TOC 和 POC 含量显著高于不施肥处理、单施化肥和化肥与秸秆配施处理下。潘根兴<sup>[12]</sup>研究表明,施肥增加了土壤有机碳含量,其中以有机无机肥配施增加最多,其耕层土碳密度大小顺序为化肥与猪粪配施 > 化肥与秸秆配施 > 化肥。这些结果与本研究可得出一致结论,施用有机废弃物改良土壤结构和提高土壤有机碳含量以及耕层土碳密度。

### 3.3 水稻生态系统的碳汇效应

Kern 和 Johnson<sup>[18]</sup>提出 3 种增加生态系统土壤碳汇的管理原则,即维持现有土壤有机质的水平、恢复退化土壤中有机质、扩大土壤有机库的承载力。金琳<sup>[19]</sup>估算了施化肥、施有机肥、配施、秸秆还田和免耕等农田管理措施对中国的碳汇效应,其中配施的作用较为明显,可使 SOC 增长  $0.889 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,秸秆还田和施有机肥的效果相当,其土壤有机碳的年增加量分别为  $0.597$  和  $0.545 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,施化肥 SOC 每年增加  $0.129 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,施单一氮、磷、钾肥几乎不能使 SOC 增加,甚至起负作用。此外,管理措施中免耕、配施和秸秆还田的增碳汇潜力较大。本研究稻田生态系统的碳汇分析表明,作物固碳是主要的碳汇来源,占碳汇来源的 96% 以上,因此,可以把增加作物产量的因素作为增加生态系统碳汇的调控措施。试验中 NPK 配施有机肥处理水稻产量最高,其固碳速率和固碳潜力也同时高于其他施肥处理。潘根兴等<sup>[12]</sup>研究,化肥配施有机肥处理水稻产量最高且最稳定,孟

磊等<sup>[20]</sup>研究表明,有机肥处理可通过提高作物生产力进而增加系统碳汇,这与本研究结论一致。不同施肥处理净碳汇效应明显不同,各处理碳汇量介于  $-0.82 \sim -4.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  之间,其中 NPK 配施有机肥的碳汇最高,与李洁静等<sup>[11]</sup>报道的有机无机肥配施下净碳量是单施化肥下的 3 倍的规律表现一致。此外,朱咏莉<sup>[21]</sup>采用静态箱法对亚热带稻田生态系统  $\text{CO}_2$  排放进行了定位观测,在水稻整个生长期,稻田生态系统从大气中净吸收碳量为  $3.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,郝庆菊<sup>[22]</sup>根据土壤异养呼吸速率及农作物生物量对三江平原农田生态系统进行估算,水稻生长季稻田碳汇量为  $(-6.19 \pm 0.21) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,与本研究水稻生长季各施肥处理下水稻均表现为碳汇一致。但由于采用估算的方法和土壤条件、耕作施肥的差异可能导致估算结果存在偏差。

### 3.4 水稻生产系统碳汇效应估算的不确定性

本研究估算结果是基于长期定位试验条件下稻田生态系统中生物量生产数据以及调查大田生产中生产资料投入和价格进行换算,估算出的碳汇量以及经济效益可能与实际情况存在一定的差异。人为活动产生的碳排放存在差异,因为不同地区、不同耕作方式、不同施肥制度所需要的人力不同,使计算结果造成差异;燃料使用的差异,同一种燃料碳含量存在很大差别,导致在生产化肥、杀虫剂以及耕燃油、灌溉耗电对化石燃料的利用计算中采用了不同的碳排放系数,这也给计算结果带来了不确定性。在综合估算中,由于试验田间观测数据的不足,借鉴了相同或相近的气候条件、管理模式田间生态系统的研究结果,这也增加了估算结果的不确定性。此外,小区试验可能在产量以及其他可观测的数据与大田实际情况存在一定的差异,估算结果不能排除田间小区试验的局限性,虽然长期定位试验获得了较为连续稳定的观测数据,但结果不能完全基于大田实际情况进行稻田生态系统碳汇的评估。

## 4 结论

本文利用长期定位试验数据估算了不同施肥措施下稻田固碳速率和固碳潜力,不同施肥的土壤固碳速率和固碳潜力分别介于  $25.83 \sim 51.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $73.29 \sim 151.59 \text{ kt} \cdot \text{a}^{-1}$ ,表现为增施有机肥能够提高固碳速率和固碳潜力。不同施肥处理下稻田表土碳密度为  $29.21 \sim 43.24 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,增施有机肥的能提高土壤表土碳密度。不同施肥处理水稻生长季节均为碳汇,大小顺序为  $\text{NPK} + \text{RS} > \text{NPK} > \text{NK} + \text{PM} > \text{NP} + \text{RS} > \text{NP} > \text{NK} > \text{CK}$ ,且增施有机肥的碳汇效应高于化肥。总之,有机无机

肥配施具有较高的净碳汇和经济效益,能促进稻田高产稳产和可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] UNFCCC, Fact Sheet. The Need for Mitigation. <http://unfccc.int/press/items/2794.php>. 2008.
- [2] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20: 229–236.
- [3] 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): 0612–0619.  
HAN Bing, WANG Xiao-ke, LU Fei, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 0612–0619.
- [4] Lal R, Burce J P. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect[J]. *Environmental Science & Policy*, 1999(2): 177–185.
- [5] Smith P, Martino D, Cai Z-C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 2008, 363: 789–813.
- [6] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(5): 282–289.  
PAN Gen-xing. Soil organic carbon stock, dynamics and climate mitigation of China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5): 282–289.
- [7] 张琪, 李恋卿, 潘根兴, 等. 近 20 年来宜兴市城水稻土有机碳动态及驱动因素[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 236–242.  
ZHANG Qi, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Dynamics of topsoil organic carbon of paddy soils at Yixing over the last 20 years and the driving factor[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 236–242.
- [8] 郑聚峰, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO<sub>2</sub> 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 485–494.  
ZHENG Ju-feng, ZHANG Xu-hui, PAN Gen-xing, et al. Diurnal variation of soil basal respiration and CO<sub>2</sub> emission from a typical paddy soil after rice harvest under long-term different fertilizations[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 485–494.
- [9] PAN Gen-Xing, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China, paddy soil[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79–92.
- [10] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74: 47–62.
- [11] 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): 1664–1670.  
LI Jie-jing, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui, et al. Net carbon sink effect and cost/benefit evaluation in a rice-rape rotation ecosystem in Taihu Lake region of China under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1664–1670.
- [12] 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[J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3704–3710.  
PAN Gen-xing, ZHOU Ping, ZHANG Xu-hui, 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 Tai Lake region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3704–3710.
- [13] 李忠佩. 低丘红壤有机碳库的密度及变异[J]. *土壤*, 2004, 36(3): 292–297.  
LI Zhong-pei. Density of soil organic carbon pool and its variation in hilly red soil region[J]. *Soils*, 2004, 36(3): 292–297.
- [14] 许文旺, 潘根兴, 侯鹏程. 不同土地利用对表层土壤有机碳密度的影响[J]. *水土保持学报*, 2005(6): 193–196, 200.  
XU Wen-wang, PAN Gen-xing, HOU Peng-cheng. Impact of different land use on topsoil organic density in Anhui[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 193–200.
- [15] 孙文娟, 黄耀, 张稳, 等. 农田土壤固碳潜力研究的关键科学问题[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 966–1004.  
SUN Wen-juan, HUANG Yao, ZHANG Wen, et al. Key issues on soil carbon sequestration potential in agricultural soils[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2008, 23(9): 966–1004.
- [16] 陈安磊, 谢小立, 陈惟财, 等. 长期施肥对红壤稻田耕层土壤碳储量的影响[J]. *环境科学*, 2009, 5(5): 1267–1272.  
CHEN An-lei, XIE Xiao-li, CHEN Wei-cai, et al. Effect of long-term fertilization on soil plough layer carbon storage in a reddish paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2009, 5(5): 1267–1272.
- [17] 周萍, 张旭辉, 潘根兴. 长期不同施肥对太湖地区黄泥土总有机碳及颗粒态有机碳含量及深度分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 765–771.  
ZHOU Ping, ZHANG Xu-hui, PAN Gen-xing. Effect of different fertilization practices on total organic carbon and particulate organic carbon content and depth distribution in yellow soil of Tai Lake region, China[J]. *Plant Nutrition and Fertilization Science*, 2006, 12(6): 765–771.
- [18] Kern J S, Johnson M G. Consequences of tillage impacts on national soil and atmospheric C levels[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 200–210.
- [19] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 734–743.  
JIN Lin, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3): 734–743.
- [20] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 45(5): 769–776.  
MENG Lei, CAI Zu-cong, DING Wei-xin. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 45(5): 769–776.
- [21] 朱咏莉, 吴金水, 周卫军, 等. 亚热带稻田生态系统 CO<sub>2</sub> 排放及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(2): 151–154.  
ZHU Yong-li, WU Jin-shui, ZHOU Wei-jun, et al. CO<sub>2</sub> emission from the paddy ecosystem in subtropical region and its influence factors[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(2): 151–154.
- [22] 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原农田生态系统 CO<sub>2</sub> 收支研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1556–1560.  
HAO Qiu-ju, WANG Yue-si, SONG Chang-chun, et al. CO<sub>2</sub> budget in agroecosystems in the Sanjing Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1556–1560.