

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

潘根兴¹, 周 萍¹, 张旭辉¹, 李恋卿^{1,*}, 郑聚锋¹, 邱多生², 储秋华²

(1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2. 江苏省吴江市芦墟镇农业技术推广站, 吴江 222300)

摘要: 肥料施用对农田土壤生产力及土壤碳循环的影响是农业与陆地生态系统碳循环及全球变化研究的重要科学问题。以太湖地区黄泥土的长期肥料定位试验为例, 研究不同施肥处理对水稻土-作物系统作物碳同化及土壤碳固定的影响。所研究的肥料施用处理包括不施肥(NF)、单施化肥(CF)、化肥与秸秆配施(CFS)以及化肥与猪粪配施(CFM) 4 个处理, 始于 1987 年, 一直实行稻-油轮作, 实行少耕。连续观测水稻和油菜的产量, 并于 2004 年和 2005 年分别采集了土壤剖面样品和耕作层(0~5cm 和 5~15cm)土壤, 测定土壤总有机碳含量。研究表明, 不同施肥处理对水稻产量有显著影响, 尤其以配施有机无机肥处理水稻产量显著最高且最为稳定, 而对油菜产量的影响不明显。施肥显著提高了耕层土壤碳密度, 而对全土碳密度没有显著影响。施肥处理的固碳速率介于 0.1~0.4t/(hm²·a), 配施有机肥处理显著高于单施化肥处理。相关分析表明, 土壤固碳速率与作物根茬+有机肥源碳的总碳输入量呈显著的对数关系。这提示土壤有机碳积累主要与作物产量有关, 而并非依赖于有机肥源碳输入。因此, 与作物产量直接关联的作物碳输入的增加是土壤中碳固定提高的重要途径。施入 N 素对水稻碳同化和土壤碳固定的效应均为化肥配施有机肥处理显著高于单施化肥处理, 这揭示化肥配施有机肥是提高与稳定稻田生产力和促进土壤固碳和温室气体减排的双赢措施。当然, 不同施肥下上述效应的差异可能与土壤-作物系统中碳分配和土壤生物碳利用的差异有关。

关键词: 水稻土; 土壤碳固定; 长期试验; 施肥措施; 水稻产量

文章编号: 1000-0933(2006)11-3704-07 **中图分类号:** S154.1, Q948 **文献标识码:** A

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, China

PAN Gen-Xing¹, ZHOU Ping¹, ZHANG Xu-Hui¹, LI Lian-Qing^{1,*}, ZHENG Ju-Feng¹, QIU Duo-Sheng², CHU Qiu-Hua²

(1. Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Agricultural Extension Service, Luxu Township, Wujiang Municipality, Suzhou 222300, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3704~3710.

Abstract: Effect of fertilization on crop productivity and C cycling of cropland soils has been one of the foci in research of C cycling and global change. Taking an example of a long-term fertilization trial in a Ferric-accumulic Stagnic Anthrosols from the Tai Lake region, China, the effect of different fertilization treatments on crop C assimilation as indicated by grain yield and soil C sequestration was studied in this paper. The fertilization treatments studied were: no fertilizer application(NF), chemical fertilizers only(CF), combined fertilization of chemical fertilizers and straw return(CFS) and pig manure(CFM), respectively. The treatment plots were arranged in random block design in triplicates. The trials had been performed with rotation of rice and rape under minimum tillage consistently since 1987. The yield of rice and rapeseed was measured every year. Whole soil profile was sampled by depth interval sampling procedure in 2004 and topsoil samples from 0~5cm and 5~15cm were collected in 2005 after

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40231016)

收稿日期: 2006-04-19; **修订日期:** 2006-09-08

作者简介: 潘根兴(1958~), 男, 浙江浦江人, 博士, 教授, 从事土壤碳循环与全球变化研究。E-mail: panggenxing@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lianqingli@hotmail.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No 40231016)

Received date: 2006-04-19; **Accepted date:** 2006-09-08

Biography: PAN Gen-Xing, Ph. D., Professor, mainly engaged in soil C cycling and global change. E-mail: panggenxing@yahoo.com.cn

rice harvest. Soil organic carbon (SOC) content of the samples was determined with the wet combustion method. Significant difference in mean rice yield was observed between the treatments but in rape. Higher and more stable yield of rice was found under CFM and CFS than under CF. Effect of fertilization on C content and storage of topsoil but of whole profile was recognized. There had been a prominent topsoil C sequestration at rates of $0.1 \sim 0.4 \text{ t}/(\text{hm}^2 \text{ a})$ under fertilization. The increase of topsoil SOC content and storage was in proportional to the mean annual crop yield as described by well correlations of SOC content and C sequestration rate with root biomass input and total OC input to the soil. This demonstrated a key role of enhanced biomass C input in C sequestration of the paddy. Moreover, effect of applied N both on rice C assimilation as indicated by grain yield and soil C sequestration turned stronger under combined fertilizations. This, in turn, evidenced a Win Win effect of enhancing and stabilizing crop productivity and C sequestration and greenhouse gas mitigation as well by paddies. However, the difference in the above mentioned N effect could be in association with the difference in C partitioning in soil-crop system and C source utilization by soil organisms, which deserved further study.

Key words: paddy soil; soil carbon sequestration; long-term trial; fertilization practice; rice yield

土壤有机碳的积累不仅可以提高土壤生产力,还能减缓大气 CO_2 浓度的提高。因此农业中土壤有机碳的储存与动态变化对于正确评价农业产业对全球气候变化的影响具有重要的理论意义^[1,2]。水稻土作为一种特殊利用方式下形成的人为耕作土壤,具有较高的碳密度和较大的固碳潜力^[3~5]。最近研究显示,近 20a 来我国农田土壤有机碳呈增长趋势,尤其是南方红壤丘陵地区和太湖地区更为明显^[5~7]。但是,这种变化与我国稻作生产水平的提高有何关系?施肥作为最强烈和广泛的人为管理措施对这种关系有何影响?这些问题对于深刻理解稻田碳循环特点及其全球变化效应是十分重要的。对太湖地区一个长期肥料试验稻田的研究表明,不同施肥影响稻田土壤有机碳的含量、形态分布及温室气体的产生和释放^[8~10]。本文从作物产量变化与土壤有机碳储量变化角度,研究该长期肥料定位试验中不同施肥处理对土壤-作物系统的碳固定的影响,为评价不同施肥对农田生态系统碳循环与生产力耦合关系的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤样品采自江苏省吴江市金家坝镇的长期肥料定位试验站。当地属亚热带季风气候,1980~1990 年间平均年降雨量 1100mm。供试土壤为黄泥土 (Ferric-accumlic Stagnic Anthrosols),是太湖地区代表性水稻土,其基本性质见表 1^[11]。

1.2 肥料试验处理^[11]

试验始于 1987 年,4 个施肥处理区分别是:不施肥区 (简称无肥区, NF)、单施化肥区 (简称化肥区, CF)、化肥与猪粪配施区 (简称常规区, CFM) 和化肥与秸秆配施区 (简称秸秆区, CFS)。每个处理设置 3 个重复,随机排列。单个小区面积为 25 m^2 ,除无肥区外各小区每年化肥施用量均为 $\text{N } 427.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$, P_2O_5 $45 \text{ kg}/\text{hm}^2$, K_2O $54 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。秸秆区每年加施 4500kg 鲜重的秸秆,秸秆还田为每季作物各占 50%,作物收获后打碎翻入土壤。常规区则加施 16800kg 鲜重的猪粪肥,在秋季水稻收割后表施。一直实行水稻-油菜轮作,水稻收割后免耕栽种油菜。不同施肥处理下耕层土壤的基本性质见表 2。

1.3 土壤采样与样品分析

表 1 供试土壤试验前基本性质 (1987 年采样和测定)

Table 1 Basic properties of the studied soil sampled and measured in 1987

土壤深度 Depth (cm)	有机碳 SOC (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	pH (H_2O)	粘粒 Clay ($< 2 \mu\text{m}$ g/kg)	CEC (cmol/kg)
0~5	16.40	1.72	5.60	249.30	20.20
5~15	16.00	1.68	6.00	279.70	20.90

表 2 各施肥小区土壤 (0~15cm) 基本性质 (2004 年采样测定)

Table 2 Basic properties of the studied soil (0~15cm) of each plot sampled and measured in 2004

处理 Treatment	容重 Bulk weight (g/cm^3)	TOC (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	pH (H_2O)
无肥 NF	1.10	16.18	1.65	6.13
化肥 CF	1.18	17.43	1.78	5.93
常规 CFM	1.18	19.38	1.97	5.74
秸秆 CFS	1.14	19.24	1.84	5.88

2004 年在每个小区随机选取剖面点一个,采用深度间隔采样法采集不同深度样品。2005 年 6 月于油菜收割后 2d 内在田间按网格线采样法每小区随机采集七点,采集 0~5cm 和 5~15cm 深度的耕层土壤。土壤采样均用荷兰 Eijkelkamp 不锈钢土芯采样器钻取,样品盛于塑料自封袋,拣去作物残根和石砾等,自然风干,磨碎过 2mm 筛备用。四分法取少量过 2mm 筛的风干土,进一步拣去可见作物残体和碎屑等,磨碎过 0.15mm 筛。土壤有机碳测定用重铬酸钾外加热法^[12]。

1.4 计算方法

1.4.1 表土和全土碳密度估算 采用下列公式^[5,13]求得表土碳密度:

$$\text{Doc}(\text{Top soil}) = \text{SOC} \times \gamma \times H_i \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中,Doc 为碳密度(tC/hm^2);SOC 为有机碳含量(g/kg); γ 为土壤容重(g/cm^3); H_i 为土壤厚度(cm)。

采用下式估算 1m 深全土的碳密度^[14]:

$$\text{Doc}(1\text{m}) = \sum_{j=1}^n \text{SOC}_j \times \gamma_j \times H_j \times 10^{-1} \quad (2)$$

式中, j 为 1m 深土壤中的深度取样样品,其中的容重由下式^[13]估算得到:

$$\gamma = 1.3770 \times e^{-0.0048 \times \text{SOC}} \quad (3)$$

1.4.2 有机物质输入碳的估算 作物根茬输入碳可由下式估算:

$$I_c = Y_c \times P_r \times C_r \times D_r \quad (4)$$

式中, I_c 为作物根茬碳输入量($\text{kgC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$), Y 作物产量($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$), P_r 为根茬分配系数,本文取 P_r 0.30, C_r 为根茬含碳量(37%), D_r 作物根茬腐解转化率,本文取 0.40^[15]。

而通过有机肥施入的碳可用下式估算:

$$T_{of} = Q_{of} \times C_{of} \times D_{of} \quad (5)$$

式中, T_{of} 为有机肥碳输入量($\text{kgC}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$), Q_{of} 为有机肥施用量($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$), C_{of} 为有机肥含碳量(%),本文中水稻秸秆、油菜秸秆和猪粪的碳含量分别取 37%、37%和 38%, D_{of} 为有机肥的腐解转化率,这里分别取 0.30、0.30 和 0.25^[16,17]。

1.5 统计分析

数据处理用 Microsoft Excel 2000 进行,所有数据测定结果以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示,并采用 TTEST 进行不同施肥处理间差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥下作物产量的变化

长期不同施肥处理下各小区历年水稻和油菜产量结果列于图 1。从水稻产量的年际变化来看,前 5 年属

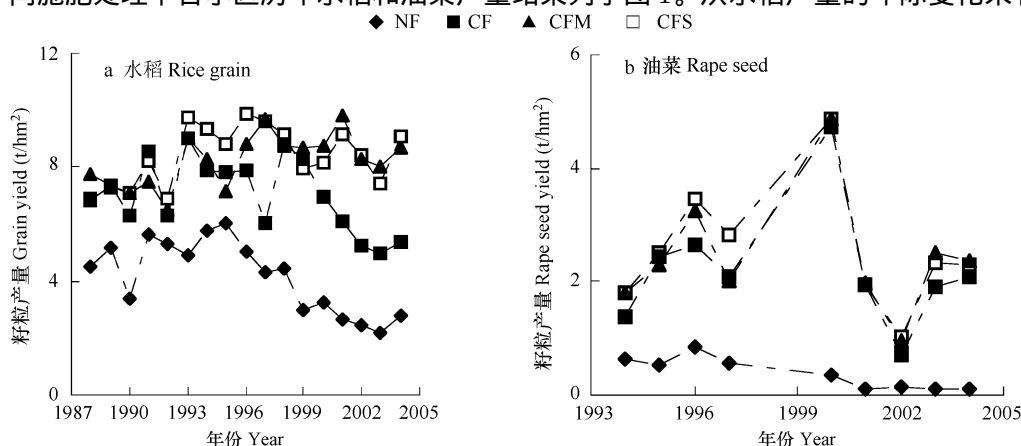


图 1 长期不同施肥下作物产量的年际变化

Fig. 1 The annual variation of crop yield under different fertilizations

于施肥处理的调整期,不同施肥处理间尚未表现出显著的变化。5年后常规区和秸秆区保持高产且稳定,平均年产量分别为 $8.24\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $8.42\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其年际变异系数分别为 11.12% 和 12.17%。化肥区试验 5a 后平均年产量为 $7.04\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,变异系数高达 18.21%。虽然其平均年产量也较高,但表现出大幅度的年际波动性,且 11a 后产量有持续下降的趋势。无肥区的产量水平明显较低,只达 $4\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 左右,并且试验 8 年后一直处于持续下降的趋势。

自 1993 年栽种油菜至今,无肥区的油菜产量呈逐年下降的趋势。说明处理 8a 后,其土壤肥力已不能满足油菜正常生长的需要。而化肥区、常规区和秸秆区的油菜产量年际变化格局相似,其平均产量相互间没有明显差异。表明该试验中化肥配施有机肥或秸秆对油菜产量没有明显的影响。不过,该水稻土上油菜产量与水稻相比很不稳定,可能是气候的变化对油菜生产的影响较大。看起来,不同的施肥主要是影响了水稻的生产力,而并没有明显影响油菜的生产力变化,而不施肥下,油菜不能正常结籽,而水稻仍能保持一定的子粒产量。

2.2 不同施肥下耕层土壤有机碳含量变化

本试验结果(表 3)表明,经过连续 17a 的长期肥料定位处理,各小区土壤有机碳含量与试验前相比均有明显变化。在 0~5cm 表层,无肥区、化肥区、常规区、秸秆区土壤有机碳含量与试验前相比分别平均增加 1.79、1.92、4.12、3.64g/kg,其中以有机无机肥配施下增加最多。而在 5~15cm 土层,无肥区土壤有机碳含量下降了 0.82g/kg,这可能是因为作物根系生长和土壤矿化需要消耗有机物,而土壤有机质又得不到补充。常规区与秸秆区有机碳含量增加最多,分别达到 2.81 和 2.84g/kg,显著高于无肥区,化肥区有机碳含量也有少量增加(0.99g/kg)。

2.3 不同施肥下碳密度变化

不同施肥处理下耕层(0~15cm 和 0~100cm 加权)土壤碳密度见图 2。与无肥区相比,施肥显著增加了耕层土壤碳密度。各施肥处理之间亦差异显著,依次为常规区>秸秆区>化肥区。施肥下耕层土壤碳密度介于 $30.86 \sim 34.30\text{t}/\text{hm}^2$ 之间,该值与张琪等^[18]所报道的宜兴市域水稻土表土有机碳密度($32.92\text{t}/\text{hm}^2$)相近,明显大于李忠佩^[19]所报道的低丘红壤 0~20cm 有机碳密度($20.90\text{t}/\text{hm}^2$)。这里的表土碳密度也

较高于许信旺等^[20]对安徽省水稻土耕层平均有机碳密度的估计值($27.70\text{t}/\text{hm}^2$)。根据 1m 深剖面的有机碳资料^[8],可以估算出不同处理下 1m 深土壤的总碳密度(图 2),它们介于 $88.70 \sim 97.39\text{t}/\text{hm}^2$ 之间,但不同施肥处理间并没有显著差异。这是因为与耕层土壤相比,每个处理 3 次重复的全土有机碳密度变异较大,而且不同施肥处理下耕层土壤碳密度占全土碳密度的比例均低于 40%(无肥区 27%、化肥区 33%、秸秆区 37%和常规区 35%)。因此,耕层土壤碳密度的变化不足以对全土造成显著的影响。

3 讨论

3.1 土壤有机碳积累与作物产量及有机物质输入

土壤有机碳的来源主要是施用有机肥料和作物残体自然还田。如图 3 所示,不同施肥处理下土壤有机碳含量变化与 1992 年产量平稳后水稻、油菜年平均产量分别存在显著的线性关系和指数关系。可见,作物产量

表 3 试验 17a 后各施肥小区土壤有机碳含量(g/kg)

Table 3 Soil organic carbon content under different fertilizations after 17 years of treatment

土壤深度 Depth (cm)	无肥区 NF	化肥区 CF	秸秆区 CFS	常规区 CFM
0~5	18.19 ±1.55 b *	18.32 ±1.07 b	20.04 ±0.96 a	20.52 ±0.54 a
5~15	15.18 ±1.44 c	16.99 ±0.95 b	18.84 ±0.92 a	18.81 ±0.51 a

*同行不同字母代表差异显著($p < 0.05$) Different characters in a single row indicates significant difference at $p < 0.05$

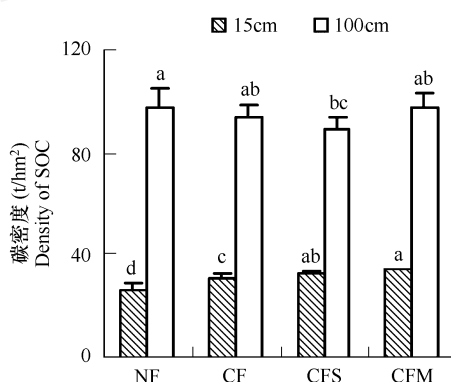


图 2 不同施肥处理下耕层和全土碳密度变化

Fig. 2 SOC storage of topsoil (0~15cm) and whole soil (0~100cm) under different fertilizations

的差异直接影响着进入土壤的有机物数量,土壤碳积累首先与作物根系输入碳有关。

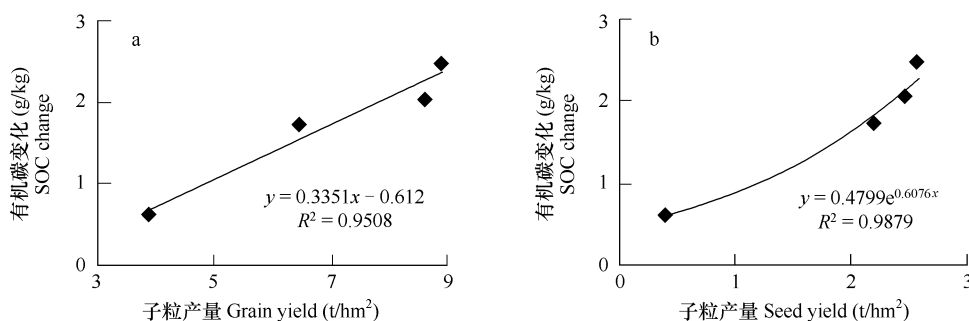


图3 有机碳积累与作物产量的关系

Fig. 3 Relationship between SOC accumulation and crops yields

a, 水稻 Rice grain; b, 油菜 Rape seed

根据 2005 年耕层土壤(0~15cm)有机碳含量和 1987 年试验初始时有机碳含量以及土壤容重计算出 17a 耕层土壤有机碳的平均固碳速率,将之进一步与作物根茬输入碳及有机肥源碳作相关性分析,表明土壤固碳速率与有机肥源碳的关系不显著,而与作物根茬+有机肥源碳的总输入呈显著的对数关系(图 4)。因此,土壤固碳速率的提高主要取决于土壤碳输入的增加,而这首先是作物产量增加下的生物量碳输入的增加。孟磊等^[21]在研究长期施肥对黄淮海平原潮土土壤碳储量和作物固定碳的影响时也得到相似的结论。唐国勇等^[22]在研究洞庭湖区不同土地利用方式对农田土壤有机碳的影响时也指出,水稻残体的还田量是影响稻田 SOC 的主要因素,而作物残体还田量主要与生产力和还田习惯有关。Graham 等^[23]在研究南非甘蔗田有机碳含量变化时,也表明表层以下 10cm 深度内土壤有机碳储量随作物残留物输入量的增加而提高。最近几年来,许多文献报道了不同尺度农田有机碳含量提高的事实^[6,7,18,24,25],看来这些报道的土壤碳增加可主要归结于我国农业发展中产量提高下有机物质的土壤输入增加。

3.2 不同施肥氮素的作物碳同化与土壤固碳效应

作为植物最大需求量的养分,氮素影响着作物光合同化潜力。因而在土壤-作物系统中,碳氮循环是紧密相关的。最近几年来,全球变化研究界对于陆地生态系统氮循环对碳循环的影响予以极大的关注。例如 Hu 等^[26]认为自然或森林生态系统中 N 素对碳固定与收集有一定的限制作用。Nadelhoffer 等^[27]利用¹⁵N 示踪法分析评价了 6 种欧洲森林和 3 种北美森林中 N 沉降水平提高下温带森林碳固定的潜力,结果认为,N 沉降促进森林碳固定,但并不是北纬度地区碳固定的最主要因素。潘根兴等^[3]通过对不同来源的统计资料的分析指出,我国农田土壤中观察到的有机碳积累往往伴随着 N 素积累现象,看来化肥(主要是氮肥)的施用是通过产量的提高而增加土壤有机质的输入量。

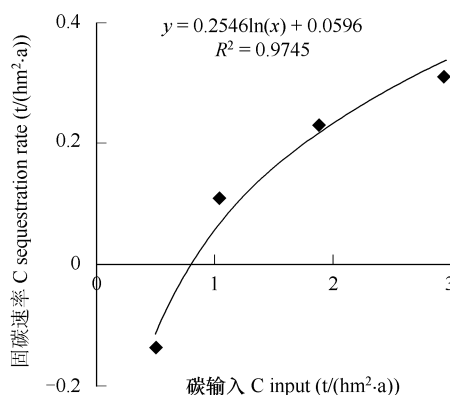


图4 土壤固碳速率与碳输入的关系

Fig. 4 Correlation of soil C sequestration with C input

对该试验田土壤基质呼吸与有机碳矿化的研究表明,单施化肥处理土壤碳矿化提高,呼吸商和代谢商显著高于有机无机肥配施处理^[9,10]。另外,对南方几种水稻土的好气矿化与 CO₂ 释放的培养研究也表明,N 含量是影响土壤碳固定与矿化的主要因素^[28]。这里,计算了不同施肥处理每年施 N 量及其对作物碳同化(平均产量)和土壤碳固定的效应,结果列于表 4。可见,施入土壤的单位质量 N 素对水稻碳同化及产量的平均效应以化肥配施秸秆(11.15kg/kgN)显著高于化肥配施猪粪下(9.02kg/kgN),而单施化肥为最低,仅达 6.2kg/kgN。其中有机无机肥配施下每年施 N 量对水稻的产量效应远远高于我国农业平均每 kg 养分增产 7.50kg 粮食的

肥效水平^[29]。太湖地区高产水稻土(乌栅土)养分平衡下 N 素的水稻产量效应为 9.33kg/kgN,而高 N 和 P 施肥水平处理的 N 素产量效应为 7.80kg/kgN^[30]。本试验中有机无机肥配施处理 N 素产量效应高于平衡施肥处理化肥 N 的效应。土壤平均固碳效应以单施化肥处理最低,化肥与猪粪配施以及化肥与秸秆配施处理土壤平均固碳效应相近,分别为 0.85 和 0.81kg/kgN。化肥配施有机肥处理单位氮素的平均水稻光合同化效应是单施化肥处理的 1.5~1.8 倍,而土壤固碳效应是 1.6 倍。因此,在不同的肥料配合施用,单位质量氮素对作物光合同化与土壤碳固定贡献出现了显著的差异。

表 4 不同处理 N 素施入量与作物产量及土壤固碳的变化

Table 4 Variation of the effect of N input on yields and soil carbon sequestration with fertilization treatments

处理 Treatment	施 N 量(kg/(hm ² a)) N input	N 产量效应(kg/kgN) N Efficiency on yield		土壤固碳效应(kgC/kgN) Efficiency on C sequestration
		水稻 Rice grain	油菜 Rape seed	
NF	0	—	—	—
CF	427.50	6.16 ±1.49c *	4.30 ±2.37ab	0.50 ±0.23b
CFS	452.25	11.15 ±2.52a	4.83 ±2.13a	0.81 ±0.28a
CFM	528.30	9.02 ±3.40b	3.92 ±1.90b	0.85 ±0.28a

每年 N 施入量:NF 0 kg/hm²;CF 427.5kg/hm²;秸秆和猪粪含 N 分别以 0.55 %和 0.60 %计算 NF 0 kg/(hm² a);CF 427.5kg/(hm² a);N content of straw and pig manure were 0.55 % and 0.60 %, respectively;同列不同字母代表差异显著 ($p < 0.05$) Different characters in a single column indicate significant difference between treatments at $p < 0.05$

上述结果实际上佐证了单施化肥处理土壤碳的矿化损失大大高于配施有机肥处理,支持了关于单施化肥水稻土矿化和温室气体产生强度显著高于配施有机肥处理的实验室模拟和野外观测结果^[9,10],而且充分显示化肥配施有机肥对于提高与稳定水稻生产力和促进固碳和温室气体减排的双赢效应^[2]。看来,不同的肥料施用实践强烈地影响着土壤-作物系统的碳循环过程,不同施肥间养分对光合同化作用和土壤固碳的影响的差异可能与土壤-作物系统碳分配和土壤生物碳利用的变化有关,这值得在农田碳循环研究中予以充分关注。

4 结论

太湖地区黄泥土水稻产量在不同施肥处理间有明显变化,尤其是有机无机肥配施处理水稻产量最高且最为稳定,但对油菜产量的影响不大。施肥明显增加耕层土壤碳密度,而对全土碳密度没有显著影响。根据得到的不同施肥处理土壤有机碳的积累与水稻和油菜产量的显著依变关系,认为土壤有机碳的固定主要来源于作物根茬碳与有机肥源碳的总输入的增加,而并不取决于有机肥源碳。因此,土壤有机碳的积累首先与作物根系输入碳有关。这种作用可能是最近 20a 我国农田中观察到的有机碳积累事实的主要原因。不同施肥处理 N 对作物光合同化和土壤碳固定有强烈的影响,看来稻田农业的不同施肥实践影响着农田生态系统碳氮循环的耦合作用,并可能对于全球变化产生深刻影响,但其机理还需进一步研究。

References:

[1] Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Perspectives on issues of soil carbon pools and global change —— with suggestions for studying organic carbon sequestration in paddy soils of China. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002, 25(3) : 100 ~ 109.

[2] Lal R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the green house effect. Critical Review in Plant Sciences, 2003, 22(2) : 151 ~ 184.

[3] Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security. Advances in Earth Science, 2005, 20(4) : 384 ~ 393.

[4] Pan G X, Li L Q, Zhang X H, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands. Advances in Earth Science, 2003, 18(4) : 609 ~ 618.

[5] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China 's paddy soils. Global Change Biology, 2003, 10: 79 ~ 92.

[6] Huang Y, Sun W J. Tendency of SOC change in cropland soils of China over the last 20 years. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(15) : 1785 ~ 1803.

[7] Li Z P, Wu D F. Organic carbon content at a steady state and the potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China. Pedologica Sinica, 43 (1) : 46 ~ 52

[8] Zhou P, Zhang X H, Pan G X. Effect of long-term different fertilization on content and depth distribution of total and particulate organic carbon of a paddy soil: An example of Huangnitu from the Tai Lake region, China. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(6) : 765 ~ 771.

[9] Zheng J F, Zhang X H, Pan G X, et al. Diurnal variation of soil basal respiration and CO₂ emission from a typical paddy soil after rice harvest under long-term different fertilization. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4) : 485 ~ 494.

- [10] Zheng J F, Li L Q, Pan G X, *et al.* Effect of long-term fertilization on SOC mineralization and production of CH₄ and CO₂ under anaerobic incubation from bulk and particle size fractions of a typical paddy soil from Tai Lake region, China. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 2006, online.
- [11] Qiu D S, Li L Q, Jiao S J, Pan G X, Zhang Y. Change of soil fertility under long-term different fertilization practices in a paddy soil from the Tai Lake region, China. *Soils and Fertilizers*, 2005, 4: 28 ~ 32.
- [12] Lu R K. *Analytical Method of Soil Agricultural Chemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 106 ~ 110.
- [13] Song G H, Li L Q, Pan G X, *et al.* Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. *Biogeochemistry*, 2005, 74: 47 ~ 62.
- [14] Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5): 330 ~ 332.
- [15] He N Z, Ni W Z. Fluctuation and balance of organic carbon in high-yielding paddy soil with wheat-rice-rice cropping system as affected by different fertilizer management. *Nutrition and Fertilizer Science*, 1996, 2(4): 315 ~ 321.
- [16] Chen Y, Wu C Y, Shui J G, *et al.* Emission and fixation of CO₂ from soil system as influenced by long-term application of organic manure in paddy soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2468 ~ 2473.
- [17] Song J B. Investigation on resource and quality of straw in Zhejiang province. *Soils and Fertilizers*, 1995: 23 ~ 26.
- [18] Zhang Q, Li L Q, Pan G X, *et al.* Dynamics of topsoil organic carbon of paddy soils at Yixing over the last 20 years and the driving factors. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 236 ~ 242.
- [19] Li Z P. Density of soil organic carbon pool and its variation in hilly red soil region. *Soils*, 2004, 36(3): 292 ~ 297.
- [20] Xu X W, Pan G X, Hu P C. Impact of different land use on topsoil organic carbon density in Anhui province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 193 ~ 200.
- [21] Meng L, Cai Z C, Ding W X. Carbon contents in soils and crops as affected by long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 769 ~ 776.
- [22] Tang G Y, Peng P Q, Su Y R, *et al.* Contents of soil organic carbon under various land-use types at farmland in Dongting Lake region. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(2): 219 ~ 222.
- [23] Graham R J, Haynes J, Meyer H. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 93 ~ 102.
- [24] Huang X X, Wei C F, Gao M, *et al.* Tillage effects on soil organic carbon distribution and storage in a purple paddy soil. *Pedosphere*, 2006, 16(5): 660 ~ 667.
- [25] Liu S L, Tong C L, Wu J S, *et al.* Simulation of organic carbon changes in paddy soils in mid-subtropical region. *Acta Pedologica Sinica*, 2006.
- [26] Hu S, Chapin F S, Firestone III M K, *et al.* Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂. *Nature*, 2001, 409: 188 ~ 191.
- [27] Nadelhoffer K J, Emmett B A, Gundersen P, *et al.* Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature*, 1998, 398(11): 145 ~ 148.
- [28] Zhang X H, Pan G X, Li L Q. Organic carbon mineralization and CO₂ evolution from paddy topsoils and the temperature dependence. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 19(4): 609 ~ 618.
- [29] Pan G X, Zhu Q H, Zhang Y, *et al.* Minimum application rates for high-yielding rice production system in the Taihu Lake region as a field measure for controlling N and P agricultural loading. *Environmental Science*, 2003, 24(3): 96 ~ 100.
- [30] Ma L S, Wang Z Q, Zhang S M, *et al.* Pollution from agricultural nonpoint sources and its control in river system of Taihu Lake, Jiangsu. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(1): 39 ~ 47.

参考文献:

- [1] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题——兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议. *南京农业大学学报*, 2002, 25(3): 100 ~ 109.
- [3] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384 ~ 393.
- [4] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 609 ~ 618.
- [7] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析. *土壤学报*, 2006, 43(1): 46 ~ 51.
- [8] 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. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 765 ~ 771.
- [9] 郑聚锋, 张旭辉, 潘根兴, 等. 水稻土基底呼吸与 CO₂ 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 485 ~ 494.
- [11] 邱多生, 李恋卿, 焦少俊, 潘根兴, 张英. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土肥力的变化. *土壤肥料*, 2005, 4: 28 ~ 32.
- [12] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业出版社, 2000. 106 ~ 110.
- [14] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库研究. *科技通报*, 1999, 15(5): 330 ~ 332.
- [15] 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. *植物营养与肥料学报*, 1996, 2(4): 315 ~ 321.
- [16] 陈义, 吴春艳, 水建国, 等. 长期施用有机肥对水稻土 CO₂ 释放与固定的影响. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2468 ~ 2473.
- [17] 宋戴苞. 浙江省秸秆资源及其品质调查研究. *土壤肥料*, 1995, No 2: 23 ~ 26.
- [18] 张琪, 李恋卿, 潘根兴, 等. 近 20 年来宜兴市域水稻土有机碳动态及其驱动因素. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 236 ~ 242.
- [19] 李忠佩. 低丘红壤有机碳库的密度及变异. *土壤*, 2004, 36(3): 292 ~ 297.
- [20] 许信旺, 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. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 193 ~ 200.
- [21] 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. *土壤学报*, 2005, 42(5): 769 ~ 776.
- [22] 唐国勇, 彭佩钦, 苏以荣, 等. 洞庭湖区不同利用方式下农田土壤有机碳含量特征. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(2): 219 ~ 222.
- [25] 刘守龙, 董成立, 吴金水, 等. 中亚热带地区稻田土壤有机碳变化的模拟. *土壤学报*, 2007.
- [29] 潘根兴, 褚清河, 张英, 等. 太湖地区高产水稻土经济极点施肥: 一种农田 N, P 养分负荷的田间控制技术. *环境科学*, 2003, 24(3): 96 ~ 100.
- [30] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究. *环境科学学报*, 1997, 17(1): 39 ~ 47.