

不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响

王飞, 李清华, 林诚, 钟少杰, 何春梅, 刘玉洁

(福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建福州 350013)

摘要:【目的】探讨南方丘陵黄泥田不同施肥对耕层土壤有机碳固存及生产力的影响, 促进区域农田固碳减排和作物高产。【方法】基于 32 年的长期定位试验, 研究不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、化肥+牛粪(NPKM)、化肥+全部稻草还田(NPKS)处理下, 历年水稻产量、代表性年份耕层土壤有机碳含量及固碳速率的变化。【结果】NPK、NPKM、NPKS 处理下水稻历年平均产量分别较 CK 高 67.1%、88.1% 和 84.2%, 差异显著, 且 NPKM、NPKS 处理与 NPK 处理间亦具有显著差异。NPK、NPKM 与 NPKS 处理耕层土壤有机碳历年平均含量比 CK 高 8.9%~36.8%, 其中 NPKM 最高且亦显著高于 NPKS 与 NPK 处理。与初始土壤相比, 各处理有机碳含量增加 1.84~5.26 g/kg。以每 10 年为评价周期, NPKM、NPKS 处理的固碳速率与 CK 及 NPK 差异均显著, 其中双季稻年份 NPKM 与 NPKS 处理固碳速率分别是 CK 的 2.38 倍和 1.98 倍, 是 NPK 处理的 1.59 倍与 1.32 倍, 但 NPK 处理与 CK 间差异不显著。稻田系统年均有有机碳输入与有机碳固存间存在极显著幂函数关系, 施肥土壤有机碳含量变化与籽粒产量变化间亦呈极显著正相关。【结论】南方黄泥田化肥配施有机肥或配合秸秆还田较单施化肥稳步提升水稻产量。长期不施肥土壤有机碳仍可维持低幅度增长, 随着土壤有机碳含量升高, 固碳效率逐步降低。化肥配施有机肥或配合秸秆还田较单施化肥明显提高了土壤的固碳速率, 二者均是提高黄泥田生产力与固碳能力的双赢措施。

关键词: 黄泥田; 土壤有机碳; 固碳速率; 施肥; 产量

中图分类号: S158.3; S156.6

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)06-1447-08

Effect of different fertilization modes on topsoil organic carbon sequestration and productivity in yellow paddy field of southern China

WANG Fei, LI Qing-hua, LIN Cheng, ZHONG Shao-jie, HE Chun-mei, LIU Yu-jie

(Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: 【Objectives】The objective of this study was to explore effects of different fertilization on topsoil organic carbon sequestration and productivity in a yellow paddy field of southern China, fix carbon and reduce carbon emission, and improve the rice yield as well. 【Methods】Data were collected from the thirty second year of a long-term experiment in the yellow paddy field in Fujian Province. There were four fertilization treatments in the long-term field experiment: no fertilizer (CK), chemical fertilizer (NPK), chemical fertilizer plus cattle manure (NPKM) and chemical fertilizer plus straw (NPKS). We investigated influences of different fertilization regimes on topsoil organic carbon sequestration and productivity. 【Results】Compared with the CK, the average yields of rice grain in the treatments of NPK, NPKM and NPKS were significantly increased by 67.1%, 88.1% and 84.2%, respectively, and the average yields in NPKM and NPKS were significantly higher than that in NPK. Among the fertilization treatments, the contents of top soil organic carbon were improved by 8.9%–36.8% and the content of the NPKM treatment was significantly higher than those of the NPKS and NPK treatments. Compared to the initial soil condition, the organic carbon contents in all treatments were improved by 1.84–5.26 g/kg. Taking every 10 years as the assessing period, there were significant differences of the carbon sequestration rates between the NPKM

交稿日期: 2015-06-09

接受日期: 2015-09-01

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203030); 省属公益类科研院所基本科研专项(2015121022-5)资助。

作者简介: 王飞(1976—), 男, 福建福州人, 副研究员, 主要从事土壤资源评价与持续利用研究。E-mail: fjwangfei@163.com

and NPKS treatments and the CK and NPK treatments, and the rates in the NPKM and NPKS treatments were 2.38 and 1.98 times of that of the CK treatment and 1.59 and 1.32 times of that of the NPK treatment during the double cropping rice years, respectively, while there was no significant difference between the NPK treatment and the CK treatment. There was a very significant power function relationship between the annual organic carbon input and carbon sequestration in the paddy field ecosystem. The contents of fertilizing soil organic carbon were also very significantly correlated to the yields of rice grain. **【Conclusions】** Compared with the single chemical fertilizer, the chemical fertilizer plus cattle manure or straw can steadily increase rice yield. The soil organic carbon will be maintained a slightly increase under the long-term no fertilizer. The soil organic carbon sequestration efficiency is gradually reduced with the increase of soil organic carbon content. Compared with the single chemical fertilizer, the chemical fertilizer plus cattle manure or straw has obvious priority in increasing the organic carbon sequestration rate, which is a win-win measure of improving the yellow paddy field productivity and fixing carbon.

Key words: yellow paddy field; organic carbon; carbon sequestration rate; fertilization; yield

土壤有机碳不仅是农田生产力的基础,也是全球气候变化的主要影响因子。全球土壤有机碳每年释放到大气中的 CO_2 达到 $0.1 \sim 5.4 \text{ Pg}$, 土壤有机碳库 0.1% 的变化将导致大气圈 CO_2 浓度 1 mg/L 的变化^[1]。因此,研究土壤有机碳的储存与动态变化对正确评价农业产业对全球气候变化影响具有重要的理论意义^[2-3]。农田土壤碳库尤其是表层碳库受人类活动影响最为强烈,同时又可在较短的时间尺度上进行人为调节^[4-5]。水稻土作为一种特殊利用方式下形成的人为耕作土壤,具有较高碳密度和较大的固碳潜力,水稻土耕作层平均比旱地土壤多保持了 9 t/hm^2 的有机碳^[3,6-8]。研究表明,我国水稻土固碳速率介于 $C \ 0.1 \sim 2 \text{ t/(hm}^2 \cdot \text{a)}$, 超过北美森林土壤的固碳速率^[9-10]。红壤丘陵双季稻田研究表明,有机无机肥配施比纯化肥产量提高 30% , 而碳汇量提高了 50% 左右^[11]。说明有机无机肥配施是一种可以增产增汇的关键农业生产管理途径。也有研究认为,施肥处理下,较高的根系生物量导致较高的碳输入水平,另外相对充足的养分供应有利于提高固碳效率,这是施肥处理下土壤具有较高有机碳含量的两个原因^[12]。

据我国 1993 年以来关于区域耕地土壤有机碳变化的 200 余篇文献中近 60000 个土壤样品分析表明, $53\% \sim 60\%$ 的耕地面积土壤有机碳含量呈增长趋势, $30\% \sim 35\%$ 呈下降趋势, $4\% \sim 6\%$ 基本持平, 取决于不同的地理气候区^[13]。华北耕地长期施肥试验表明有机碳转化率与年降雨量及有效积温呈显著正相关^[14]。因此根据区域光温水热条件与土壤条件,提出适宜的培肥技术以保证持续作物增产与稳步提高土壤有机碳水平值得研究。黄泥田是福建等南方省份广泛分布的一种渗育性水稻土。主要分

布于低山丘陵缓坡地,以低磷、低钾及水分供应不足为主要特征,属中低产田^[15]。施肥对该类稻田土壤有机碳储量、变化速率影响以及与生产力关系如何尚鲜见报道。为此,本研究基于福建黄泥田 32 年的长期定位试验,从黄泥田土壤有机碳含量演变及产量变化角度,研究长期施肥对南方黄泥田有机碳固存的影响及与产量变化的关系,旨在为南方黄泥田土壤肥力定向培育及碳库管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设在农业部福建耕地保育科学观测实验站肥力长期监测试验田(闽侯县白沙镇,东经 $119^\circ 04' 10''$, 北纬 $26^\circ 13' 31''$)。成土母质为坡积物,海拔高度 15.4 m 。土壤类型为黄泥田。试验区年平均温度 19.5°C , 年均降水量 1350.9 mm , 年日照时数 1812.5 h , 无霜期 311 d , $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温 6422°C 。试验前(1983 年)耕层土壤 pH 4.90 , 有机碳含量 12.5 g/kg , 碱解氮 141 mg/kg , 速效磷 12 mg/kg , 速效钾 41 mg/kg 。试验设 4 个处理: 1) 不施肥(CK); 2) 单施化肥(NPK); 3) 化肥 + 牛粪(NPKM); 4) 化肥 + 全部稻草还田(NPKS)。每处理设 3 次重复,小区面积 $12 \text{ m}^2 (4 \text{ m} \times 3 \text{ m})$ 。每季施用化肥为 $\text{N } 103.5 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \ 27 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O } 135 \text{ kg/hm}^2$ 。干牛粪每茬施用量 3750 kg/hm^2 , 稻草施用量为上茬稻草全部还田。牛粪多年平均养分含量为有机碳 267.5 g/kg 、 $\text{N } 15.0 \text{ g/kg}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \ 6.5 \text{ g/kg}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 9.0 \text{ g/kg}$; 稻草多年养分含量为有机碳 377.3 g/kg 、 $\text{N } 8.3 \text{ g/kg}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \ 2.5 \text{ g/kg}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 29.1 \text{ g/kg}$, 氮、钾肥的 50% 作基肥, 50% 作分蘖追肥, 磷肥全部作基肥施用。氮肥用尿素、磷肥为过磷酸钙、钾肥为氯化

钾。试验地 1983 ~ 2004 年种植双季稻(早稻、晚稻),2005 ~ 2014 年种植单季稻。各处理除施肥外,其它管理措施一致。

1.2 土壤采样与样品分析

从 1983 年始,于每年 10 月份晚稻或单季稻收获后,按“S”形布点,取各处理每小区耕层土壤(0—20 cm)各五点,混合均匀,留 1 kg 样品,风干,研磨过 0.15 mm 筛,保存于广口瓶中,待测。另每隔 3 ~ 5 年用容重圈法测定各处理耕层容重。根据历史样品保存实际,取 1983、1984、1985、1986、1987、1988、1991、1996、2000、2001、2004、2005、2006、2007、2008、2009、2010、2011、2013、2014 年度土壤样品分析土壤有机碳。土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化-容量法^[16]。

1.3 计算方法

1.3.1 单季稻年份与双季稻年份土壤有机碳含量变化分别统计,双季稻按 1983—2004 年份、单季稻按 2005—2014 年份统计。

1.3.2 有机碳投入计算

水稻根系与稻茬碳投入:

$$C_{\text{input}} (\text{t}/\text{hm}^2) = [(Y_{\text{grain}} + Y_{\text{straw}}) \times 30\% + Y_{\text{straw}} \times 16.7\%] \times (1 - 14\%) \times C_{\text{straw}} / 1000$$

式中, Y_{grain} 为水稻籽粒产量(kg/hm^2), Y_{straw} 是水稻秸秆产量(kg/hm^2)。本定位试验测定得出水稻留茬平均所占其秸秆生物量的 16.7%;《中国有机肥料养分志》中,水稻地上部分生物量风干基平均含水量为 14%,其烘干基的平均有机碳含量为 41.7%^[17]。30% 为水稻根系及分泌物所占地地上生物量(秸秆和产量)的比例^[18],除以 1000 是单位的换算。

水稻秸秆碳投入:

$$C_{\text{input}} (\text{t}/\text{hm}^2) = Y_{\text{straw}} \times (1 - 14\%) \times 0.417 / 1000$$

式中, Y_{straw} 为还田水稻秸秆产量(kg/hm^2),水稻地上部分风干样平均含水量为 14%,平均烘干基有机碳含量为 41.7%。除以 1000 是单位的换算。

有机肥碳投入:

$$C_{\text{input}} (\text{t}/\text{hm}^2) = C_m \times (1 - W\%) \times \text{Weight} / 1000$$

式中, C_m 是指实测有机肥的有机碳含量(g/kg); $W\%$ 为有机肥含水量; Weight 为施用有机肥的鲜重(kg/hm^2)。除以 1000 是单位的换算。

1.3.3 有机碳固存速率 土壤固碳速率反映了某一时间段内土壤有机碳密度相对于时间的变化率,可表示为某一时间段内土壤有机碳密度变化量与时间的比值^[19]:

$$V = (\text{SOCD}_a - \text{SOCD}_b) / t$$

式中, V 为耕层土壤固碳速率 $[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; t 为施肥试验年限,本研究以每 10 a 为评价周期;为减少年际间的有机碳含量波动影响, SOCD_a 取年际内土壤有机碳平均密度; SOCD_b 为初始土壤有机碳密度; V 为正值,表明该系统有机碳密度是增加的,是碳汇,若 V 为负值,表明该系统有机碳密度是减少的,为碳源。耕层土壤有机碳密度计算公式如下:

$$\text{SOCD} = (1 - \theta\%) \times \rho \times C \times T / 10$$

式中, SOCD 为土壤耕层有机碳密度($\text{t C}/\text{hm}^2$); θ 、 ρ 、 C 与 T 分别为粒径 $> 2 \text{ mm}$ 的砾石质量分数($\%$)、土壤容重(g/cm^3)、土壤有机碳含量(g/kg)及耕层厚度(cm)。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥对水稻籽粒产量的影响

表 1 显示,经过 32 年的连续施肥,不同处理的籽粒产量发生了明显的变化。从双季稻年份(1983 ~ 2004)来看,NPK、NPKM 与 NPKS 处理分别较 CK 提高 83.7%、106.8% 与 100.9%,NPKM 与 NPKS 分别比 NPK 提高 12.6% 与 9.3%,均达到显著差异水平,但 NPKM 与 NPKS 处理二者无显著差异;对单季稻年份(2005 ~ 2014)而言,NPK、NPKM 与 NPKS 处理分别较 CK 提高 46.2%、64.7% 与 63.2%,NPKM 与 NPKS 分别比 NPK 提高 12.6% 与 11.6%,差异均显著,但 NPKM 与 NPKS 处理间同样无显著差异。综合历年平均来看,NPK 处理平均产量为 $6014.6 \text{ kg}/\text{hm}^2$,较 CK 提高 67.1%,差异显著;NPKM 与 NPKS 则分别为 6772.7 与 $6630.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$,分别比 CK 提高 88.1% 与 84.2%,分别比 NPK 提高 12.6% 与 10.2%,差异均显著,但 NPKM 与 NPKS 处理二者间无显著差异。从中也可看出,在双季稻年份,施肥增产率随着试验年际的延长呈稳步上升趋势,而到单季稻年份,施肥增产率明显降低。说明双季稻年份施肥增产率要明显高于单季稻年份。这可能与单季稻年份,随着年际稻作次数的减少,不施肥处理地力消耗得到一定缓解有关。各处理籽粒产量随着施肥年限的增加呈先下降后增加的抛物线趋势,进一步分析显示,各处理的产量与试验年份均可用一元二次方程进行拟合,各拟合方程均达到显著水平(表 2)。

2.2 长期不同施肥对耕层土壤有机碳含量的影响

图 1 显示,长期施肥均不同程度提高了耕层土壤有机碳含量。从双季稻年份来看(1983 ~ 2004),NPKM 与 NPKS 处理均显著高于 NPK 与 CK,NPKM

表 1 长期施肥水稻籽粒产量
Table 1 Yields of rice grain after long-term fertilization

处理 Treatment	1983 ~ 1987		1988 ~ 1992		1993 ~ 1997		1998 ~ 2004		2005 ~ 2014	
	产量	增加	产量	增加	产量	增加	产量	增加	产量	增加
	Yield (kg/hm ²)	Increase (%)	Yield (kg/hm ²)	Increase (%)	Yield (kg/hm ²)	Increase (%)	Yield (kg/hm ²)	Increase (%)	Yield (kg/hm ²)	Increase (%)
CK	3856 c		3153 c		2851 c		2123 c		5112 c	
NPK	5837 b	51.4	5913 b	87.6	5642 b	97.9	4391 b	106.7	7475 b	46.2
NPKM	6297 a	63.3	6451 a	104.6	6257 a	119.5	5345 a	151.7	8419 a	64.7
NPKS	5937 ab	54.0	6555 a	107.9	6107 a	114.2	5107 a	140.5	8345 a	63.2

注 (Note): 双季稻年份 (1983 ~ 2004) 为早稻与晚稻两季平均产量 The yields of double cropping rice (1983 ~ 2004) are the averages of two planting in those years; 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in same column mean significant at the 5% level.

表 2 不同处理籽粒产量 (y) 与施肥年限 (x) 的关系 (n = 32)
Table 2 Relationship between the yield and fertilization years

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R ²
CK	$y = 11.098x^2 - 44301x + 4E + 07$	0.65 **
NPK	$y = 8.0092x^2 - 31958x + 3E + 07$	0.36 *
NPKM	$y = 7.2087x^2 - 28737x + 3E + 07$	0.38 **
NPKS	$y = 7.4298x^2 - 29615x + 3E + 07$	0.43 **

注 (Note): “**” 与 “*” 分别代表拟合方程达到极显著与显著水平 Represent the 1% and 5% levels, respectively.

处理的也显著高于 NPKS 的,但 NPK 与 CK 处理无显著差异。单季稻年份来看 (2005 ~ 2014), 同样表现为 NPKM > NPKS > NPK > CK 处理, 不同处理间均呈显著差异。从双、单季稻历年平均来看 (1983 ~ 2014), NPK、NPKM 与 NPKS 土壤有机碳平均含量分别比 CK 提高 1.28 ~ 5.30 g/kg, 增幅 8.9% ~ 36.8%, 差异均显著, NPKM 与 NPKS 处理也分别较 NPK 提高 25.7% 与 13.6%, 差异均显著。NPKM 处理也显著高于 NPKS 的。另与试验前土壤相比, 经过 32 年的连续施肥, CK、NPK、NPKM 与 NPKS 历年土

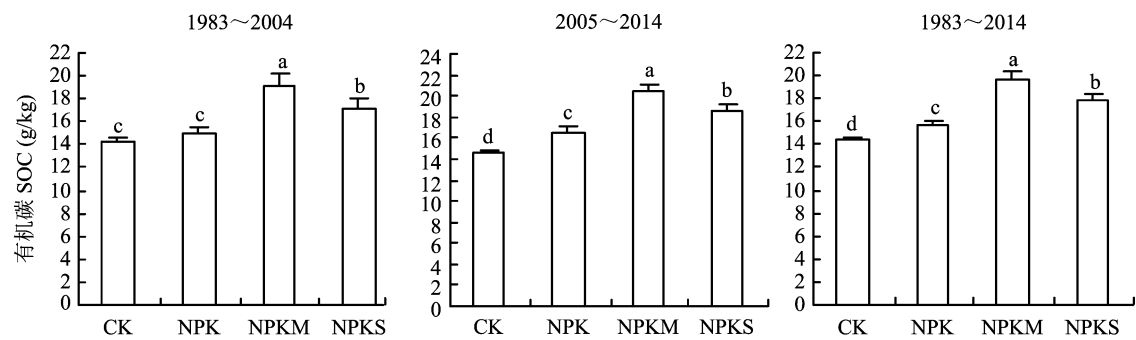


图 1 长期施肥对土壤有机碳含量的影响

Fig. 1 Effects of long-term fertilization on the contents of soil organic carbon (SOC)

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate significantly different among treatments at 5% level.]

壤有机碳平均含量分别提高 1.84、3.12、7.14 和 5.26 g/kg。上述说明, 该区域耕作水平下稻田长期不施肥仅稻茬与根系还田, 仍可维持低量的有机碳增长, 而有机无机肥配施尤其是 NPKM 对提高黄泥田有机碳含量最为明显。

2.3 长期不同施肥对耕层土壤有机碳库固存的影响

为使双季稻年份与单季稻年份固碳速率有可比性, 以每 10 年作为固碳速率的评价周期。表 3 显示, 有机无机肥配施的固碳速率显著高于 NPK 与 CK 的, 其中双季稻年份 NPKM 与 NPKS 处理固碳速率分别是 CK 的 2.38 倍与 1.98 倍, 是 NPK 处理的 1.59 倍与 1.32 倍。但各稻作年份 NPK 与 CK 间均无显著差异。

表 3 不同处理对土壤固碳速率的影响[C t/(hm² · a)]

Table 3 Effects of different treatments on the soil carbon sequestration rate

处理 Treatment	双季稻年份 (1983 ~ 2004) Double rice years	单季稻年份 (2005 ~ 2014) Single rice years
CK	0.42 b	0.44 d
NPK	0.62 b	0.59 cd
NPKM	0.99 a	1.09 a
NPKS	0.83 a	0.77 b

注(Note): 同列数后不同字母表示处理间差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

将双季稻与单季稻年份稻田生态系统年均有机碳输入与对应的年均有机碳固存量进行回归分析表明,二者呈现显著的幂函数关系(图2)。从中可知,随着外源有机碳的增加(包括根系、根茬及外源有机物料),土壤有机碳固存呈增加趋势,但有机碳固存效率(Δ SOC 固存/ Δ SOC 输入)则逐渐降低,表明随着黄泥田土壤有机碳含量的逐步提高,土壤有机碳固存能力逐渐减弱,要维持有机碳持续提高,需增加外源年均有机碳投入量。进一步分析表明,每年输入 5.29 t/hm² 外源有机碳,每年约可增加 1 t/hm² 的农田土壤有机碳。

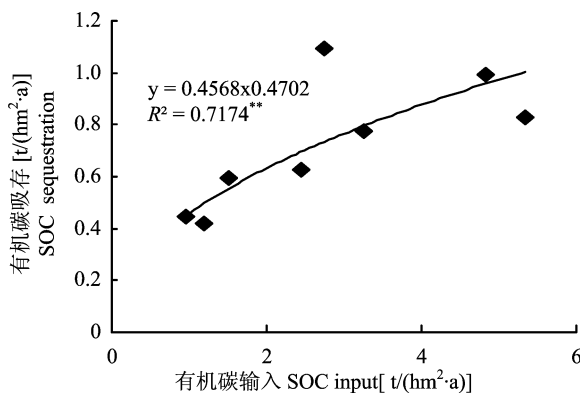


图 2 有机碳输入与土壤有机碳固存的关系

Fig. 2 The relationships between the SOC input and SOC sequestration in soils

2.4 水稻产量对土壤有机碳库的响应

为消除气候条件、灌溉、土壤性质及栽培措施对有机碳及产量的影响,将各年份施肥处理的产量与有机碳含量分别减去对应年份的 CK,得到施肥变化产量(净产量)与变化有机碳(净有机碳)。回归分析显示,施肥土壤有机碳含量变化(x)与产量变化(y)可

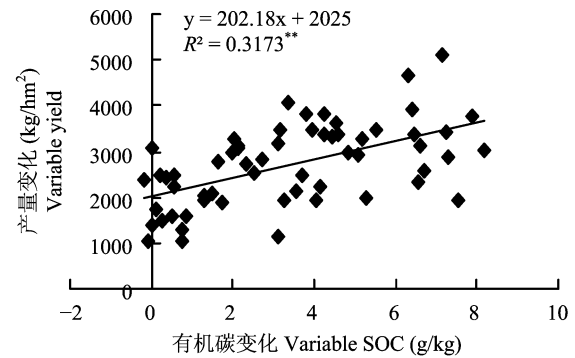


图 3 施肥土壤有机碳与产量的关系

Fig. 3 Relationship between organic carbon and yield after long-term fertilization

用线性方程拟合(图3, $n = 60$, $R^2 = 0.3173^{**}$),由该模型进一步推断出,该区域耕作水平下施肥土壤有机碳增加 1 g/kg,产量可增加 202.18 kg/hm²。

3 讨论

3.1 土壤有机碳库对农田生产力的影响及原因分析

大量研究表明,土壤有机碳含量与农田作物产量存在一定的相关性,通过提升有机碳含量来提高粮食生产能力潜力较大。在南方稻区,0.1%的有机质相当于 0.6 t/hm² 的粮食生产能力^[3]。在西南黄壤上的研究表明,施有机肥处理中,玉米产量与有机碳含量表现出较好的正相关关系,而不施肥或施用化肥处理中,二者的相关性较差^[20]。在华东地区,据 DNDC 模型模拟得出,本地区土壤 SOC 含量对产量的影响较大,SOC 含量增加 25%,水稻产量可增加 328 kg/hm²;当 SOC 下降到本底的 25%时,水稻产量减少 243 kg/hm²。在该地区,SOC 含量每增加 1 g/kg,可以相应地增加水稻产量约 266 kg/hm²^[21]。究其增产原因,有机质不仅是一种稳定而长效的碳源物质,而且它几乎含有作物所需要的各种物质。有机碳增加,一方面直接补充了土壤营养物质,有效且全面供给了作物生长;另一方面,改善了土壤理化、生化性状,改善了作物生长的微生态条件,包括化肥和稻草长期配合施用能显著提高大团聚体内有机碳、氮的含量和储量,有利于改善土壤团粒结构^[22],施用有机肥能促进土壤大团聚体内微团聚体形成,从而使更多新添加的颗粒有机物被新形成的微团聚体固定,而施用化肥对土壤大团聚体内微团聚体形成促进作用较弱,且易致使土壤板结^[23],以及施有机

肥增加了土壤微生物生物量,使其在生育前期固定了较多的矿质氮,以供给水稻生育后期生长,从而能较好地满足水稻各阶段生长对氮素养分的需求^[24-25]。本研究条件下,各处理有机碳水平与产量无直接关系,但施肥净有机碳水平与水稻净产量呈极显著正相关,而 SOC 含量每增加 1 g/kg,净产量增幅要低于以往研究结果。这可能是由于福建地处东南沿海,高温高湿,雨热同季,作物生长快,生物量大,残茬、根系与凋落物多,稻田能较快补充外来有机碳源,故通过施肥增加的土壤有机碳的单位增产效应有所减弱。

至于施肥处理产量变化与试验年份的关系,有研究表明,长期化肥单施(N)、偏施(NP、NK)下江西红壤性水稻土水稻的增产率呈直线下降,其水稻产量年下降速率呈现出 $NP > N > NK$ 的趋势,而化肥配施(NPK)和化肥有机肥配施(NPKM)区水稻增产曲线均呈先增加后降低的抛物线^[26]。而本研究结果不尽相同,各处理籽粒产量随着施肥年限的增加呈先下降后增加的抛物线趋势,这可能是双季稻年份,随着试验年份的延长,各处理磷素及部分微量元素减少或供给不足,尤其是 CK 与 NPK 处理^[27-28],故产量显著下降,而单季稻年份,水稻生育期长,其产量普遍要高于早稻与晚稻,另外,单季稻冬闲期较长(11 月至翌年 5 月),也有利于各种施肥模式下的地力恢复,包括土壤养分的活化与释放等,故产量稳步提升。

3.2 施肥对土壤有机碳库演变与固存速率的影响

对红壤性稻田 31 年水稻定位试验研究表明,长期不施肥处理土壤有机碳含量缓慢下降,年均下降 0.8%,而施肥均能提高土壤有机碳含量^[29]。长江中下游黄棕壤稻麦轮作区 31 年长期定位试验也表明,长期施肥提高了有机碳的输入速率,尽管矿化量也有所提高,但总体仍然提高了土壤固碳速率,进而提高了土壤固碳能力^[30]。本研究条件下,即使 32 年不施肥的处理,黄泥田土壤有机碳仍可维持低量的增长,这主要与福建冬闲田杂草生物量大以及每年的根茬、稻桩还田有关^[31]。

本研究条件下,不论双季稻年份还是单季稻年份,NPKM 与 NPKS 处理的固碳速率均显著高于 NPK 与 CK 的,其原因除了施用有机肥直接补充土壤有机碳库外,还可能与形成的土壤有机碳库组分及功能有关。研究表明,施用有机肥可显著增加腐殖质含量,且腐殖质的氧化稳定性(K)降低,而化肥和无肥处理基本一致。有机肥可增加土壤中游离

态和钙结合态腐殖质含量,使松结态和紧结态腐殖质的含量增加^[32]。长期单施有机肥或者有机无机配施提高了潴育型水稻土有机碳的芳香化,芳香族碳较 CK 提高 29.9%~45.2%,较 NPK 处理提高 22.3%~36.6%,从而提高抗降解能力^[33]。也有研究表明,有机无机肥配施下颗粒有机碳(POM)的芳香性增加,稳定性增强;而单施化肥下 POM 的芳香性降低,不利于 POM 的积累^[34]。由于不同施肥处理下形成的土壤有机碳库形态不同,尤其是施用有机肥芳香族碳的增加,直接影响到其矿化与腐殖化功能,进而影响其周转速率与固存速率。另外,外源有机物料本身不同碳分子结构也可能影响土壤有机碳的固存能力与固碳速率。本研究条件下,牛粪每年输入的有机碳量仅相当于稻草还田有机碳的 74.9%,而在产量基本相当前提下,NPKM 处理的平均有机碳含量较 NPKS 提高 10.6%(图 1),其中单季稻年份的 NPKM 处理固碳速率也显著高于 NPKS,这可能是牛粪中的有机碳输入土壤后抗分解的能力要高于稻草,从而使得有机碳更多地被土壤吸存。

值得一提的是,试验年限也是影响 SOC 变化速率的一个因素。随着时间的延长,土壤有机碳的累积速率逐渐降低,短期试验(≤ 5 a)SOC 增加速率是长期试验(> 5 a)的 1.75 倍,如果仅采用短期试验结果可能高估保护性耕作的固碳潜力^[6,21]。基于长期定位试验计算不同年份的有机碳固存速率可能与客观事实差别较大,考虑到双季稻与单季稻在相同的时限内有可比性,同时也考虑到生产实际培肥时限,本研究以 10 年为评价固碳速率周期,其介于长期与短期之间,是否客观反映区域长期施肥下的固碳速率有待进一步探讨。

4 结论

1)南方黄泥田上连续 32 年的不同施肥,NPK、NPKM、NPKS 处理较 CK 历年平均产量增幅 67.1%~88.1%,NPKM 与 NPKS 分别比 NPK 提高 12.6%与 10.2%,差异均显著,但 NPKM 与 NPKS 处理二者间无显著差异。

2)NPK、NPKM 与 NPKS 处理土壤有机碳历年平均含量比 CK 显著增加 8.9%~36.8%;NPKM 与 NPKS 处理也分别较 NPK 显著提高 25.7%与 13.6%;NPKM 处理也显著高于 NPKS 处理。无论是双季稻还是单季稻,NPKM 与 NPKS 处理的固碳速率均显著高于 NPK 与 CK 的,但 NPK 处理与 CK

间无显著差异。

3)稻田年均有机碳输入与年均有机碳固存间存在极显著幂函数关系,施肥土壤有机碳含量变化与籽粒产量变化间亦呈极显著正相关。综合以上,化肥有机肥配施或化肥配合秸秆还田均是提高黄泥田生产力与固碳能力的双赢措施。

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[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(3): 100-109.
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[J]. 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[J]. Critical Review in Plant Sciences, 2003, 22(2): 151-184.
- [3] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384-393.
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[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 384-393.
- [4] Huang Y, Sun W J, Zhang W *et al.* Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review[J]. Science China Life Sciences, 2010, 53(7): 766-775.
- [5] 张旭辉,李恋卿,潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(2): 16-19.
Zhang X H, Li L Q, Pan G X. Effect of different crop rotation systems on the aggregates and their SOC accumulation in paludals in North Huai Region, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20(2): 16-19.
- [6] 田康,赵永存,邢喆,等. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究—基于长期试验点的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 9-16.
Tian K, Zhao Y C, Xing Z *et al.* A meta-analysis of long-term experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different conservation tillage in cropland of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 9-16.
- [7] 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[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 609-618.
Pan G X, Li L Q, Zhang X H *et al.* Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(4): 609-618.
- [8] Pan G X, Li L Q, Wu L S, Zhang X H. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. Global Change Biology, 2004, 10(1): 79-92.
- [9] 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[J]. 第四纪研究, 2004, 24(2): 236-242.

Zhang Q, Li L Q, Pan G X *et al.* Dynamics of top soil organic carbon of paddy soils from Yixing Municipality, Jiangsu, China over the last 20 years and the driving forces[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(2): 236-242.

- [10] Pan G X, Li L Q, Zhang Q *et al.* Organic carbon stock in topsoil of Jiangsu province, China, and the recent trend of carbon sequestration[J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(1): 1-7.
- [11] 李洁静,潘根兴,李恋卿,张旭辉. 红壤丘陵双季稻田农田生态系统不同施肥下碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2520-2525.
Li J J, Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Estimation of net carbon balance and benefits of rice-cropping farm of a red earth paddy under long term fertilization experiment from Jiangxi, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2520-2525.
- [12] 谭炳昌,樊剑波,何园球. 长期施用化肥对我国南方水田表土有机碳含量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 96-103.
Tan B C, Fan J B, He Y Q. Effect of long-term application of chemical fertilizers on soil organic carbon content in top layer of paddy fields in South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 96-103.
- [13] 黄耀,孙文娟. 近 20 年来我国耕地土壤有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 753-763.
Huang Y, Sun W J. Change trend of soil organic carbon content in Chinese cultivated land during the past 20 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(7): 753-763.
- [14] Zhang W J, Wang X J, Xu M G. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. Biogeosciences, 2010, 7: 409-425.
- [15] 林诚,王飞,李清华,等. 不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 24-27.
Lin C, Wang F, Li Q H *et al.* Effects of different fertilizer application strategies on nutrients and enzymatic activities in yellow clayey soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(6): 24-27.
- [16] 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, 2000, 107-108.
Lu R K. The analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000, 107-108.
- [17] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994, 53-55.
National Agricultural Technology Extension Service Center. Organic fertilizer nutrient in China [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1994, 53-55.
- [18] Li C S, Frolking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(3): 237-254.
- [19] 董林林,杨浩,于东升,等. 引黄灌区土壤有机碳密度剖面特

- 征及固碳速率[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 690–700.
- Dong L L, Yang H, Yu D S *et al.* Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia irrigation zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 690–700.
- [20] 蒋太明, 罗龙皂, 李渝, 等. 长期施肥对西南黄壤有机碳平衡的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 666–671.
- Jiang T M, Luo L Z, Li Y *et al.* Effects of long-term fertilization on soil organic carbon balance in a yellow soil of southwestern China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3): 666–671.
- [21] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154–161.
- Qiu J J, Wang L G, Li H *et al.* Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1): 154–161.
- [22] 向艳文, 郑圣先, 廖育林, 等. 长期施肥对红壤水稻土水稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2415–2424.
- Xiang Y W, Zheng S X, Liao Y L *et al.* Effects of long-term fertilization on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregates of red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(7): 2415–2424.
- [23] 朱利群, 杨敏芳, 徐敏轮, 等. 不同施肥措施对我国南方稻田表土有机碳含量及固碳持续时间的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 87–95.
- Zhu L Q, Yang M F, Xu M L *et al.* Effects of different fertilization modes on paddy field topsoil organic carbon content and carbon sequestration duration in South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 87–95.
- [24] Chakraborty A, Chakrabarti K, Chakraborty A, Ghos S. Effect of long-term fertilizers and manure application on microbial biomass and microbial activity of a tropical agricultural soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(2): 227–233.
- [25] 刘益仁, 李想, 郁洁, 等. 有机无机肥配施提高麦-稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 81–86.
- Liu Y R, Li X, Yu J *et al.* Mechanisms for the increased fertilizer nitrogen use efficiency of rice in wheat-rice rotation system under combined application of inorganic and organic fertilizers[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 81–86.
- [26] 黄欠如, 胡锋, 李辉信, 等. 红壤性水稻土施肥的产量效应及与气候、地力的关系[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 926–933.
- Huang Q R, Hu F, Li H X *et al.* Crop yield response to fertilization and its relations with climate and soil fertility in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 926–933.
- [27] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒与土壤锌、硼、铜、铁、锰含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1056–1063.
- Wang F, Lin C, Li Q H *et al.* Effects of long-term fertilization on contents of Zn, B, Cu, Fe and Mn in rice grain and soil in yellow paddy fields of southern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1056–1063.
- [28] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥条件下我国南方双季稻产量的变化趋势[J]. 作物学报, 2013, 39(5): 943–949.
- Li Z F, Xu M G, Zhang H M *et al.* Yield trends of double-cropping rice under long-term fertilization in southern China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(5): 943–949.
- [29] 董春华, 曾闹华, 高菊生, 等. 长期不同施肥模式下红壤性稻田水稻产量及有机碳含量变化特征[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(2): 193–198.
- Dong C H, Zeng N H, Gao J S *et al.* Effects of different fertilization models on rice yield and soil organic carbon content in a long period in red soil paddy field[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(2): 193–198.
- [30] 陈云峰, 韩雪梅, 胡诚, 等. 长期施肥对黄棕壤固碳速率及有机碳组分影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 269–275.
- Chen Y F, Han X M, Hu C *et al.* Impact of long-term different fertilization on yellow brownish paddy soil carbon sequestration rate and organic carbon fractions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(2): 269–275.
- [31] 林新坚, 王飞, 王长方, 等. 长期施肥对南方黄泥田冬春季杂草群落及其 C、N、P 化学计量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 573–577.
- Lin X J, Wang F, Wang C F *et al.* Effects of long-term fertilization on weed community characteristics and carbon, nitrogen and phosphorous stoichiometry during winter-spring season in yellow paddy fields of South China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5): 573–577.
- [32] 关文玲, 王旭东, 李利敏, 魏德苓. 长期不同施肥条件下土壤腐殖质动态变化及存在状况研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 32–35.
- Guan W L, Wang X D, Li L M, Wei D L. Study on the properties and existing state of the soil humus under different long-term fertilizations[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(2): 32–35.
- [33] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 828–838.
- Mao X L, Lu K P, He L Z *et al.* Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 828–838.
- [34] 周萍, Piccolo A, 潘根兴, Smejkalova D. 三种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): 398–405.
- Zhou P, Piccolo A, Pan G X, Smejkalova D. SOC enhancement in three major types of paddy soils in long-term agro-ecosystem experiment in South China. III. Structural variation of particulate organic matter of two paddy soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 398–405.