

鄱阳湖地区长期施肥双季稻稻田 生态系统净碳汇效应变化特征

余喜初, 黄庆海, 李大明*, 徐小林, 叶会财, 陈 明

(江西省红壤研究所 农业部鄱阳湖区红壤耕地质量与环境重点野外科学观测站, 江西 进贤 331717)

摘 要:以江西省红壤所长期施肥红壤水稻土双季稻农田生态系统为研究对象,利用不同施肥年限作物的产量及土壤有机质含量等测定数据,结合调查获得的生态系统物质和管理投入资料,估算了不同施肥处理双季稻生态系统的碳汇效应和经济效益,并比较了不同施肥年限农田生态系统碳汇效应的变化特征。结果表明:有机肥与无机肥配施处理的净碳汇效应最强为 $-8.78 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,不施肥处理的净碳汇效应最弱为 $-4.86 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,加倍施加化肥虽提高了系统的净碳汇效应,但是作用不显著;不同施肥年限,相同施肥条件农田的作物固碳量和净碳汇效应没有显著性差异,但是土壤固碳量变化显著,施加有机肥可以维持和提高土壤的固碳能力平均达到 $0.41 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,在追求更高作物固碳量同时,提高和维持土壤的固碳能力也是提高农田碳汇效应的有效途径。有机肥与无机肥配施处理的平均经济效益为 $17\,568 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,也高于其他施肥处理。因此,适当施加有机肥不仅可以大幅提高农田生态系统的碳汇效应,还可以显著提高农业生产经济效益,是实现低碳、高值农业的最有效措施之一。

关键词:长期施肥;双季稻农田生态系统;净碳汇效应;土壤固碳能力;年际变化特征

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)05-1031-06

Dynamic of Net Carbon Sink Effects and Economic Benefits in Double Rice Ecosystem Under Long-term Fertilization in Poyang Lake Region

YU Xi-chu, HUANG Qing-hai, LI Da-ming*, XU Xiao-lin, YE Hui-cai, CHEN Ming

(Poyang Lake Field Reddish Paddy Soil Pivotal Observational and Experimental Station of Agricultural Ministry, Research Institute of Red Soil of Jiangxi Province, Jinxian 331717, China)

Abstract: The net carbon sink effects and economic benefits of double rice cropping system under long-term fertilization experiment were evaluated based on the determination of rice yield and soil organic matter content, as well as the investigation of material and management inputs in the Red Paddy Soil Observational and Experimental Station of Poyang Lake region. Results showed the carbon sink derived from crop and soil increased under inorganic/organic combined fertilization compared to that under unique inorganic fertilization. And the increasing input of inorganic fertilization did not significantly improve ecosystem net carbon sink. The net carbon sinks of unique inorganic fertilization, double unique inorganic fertilization and inorganic/organic combined fertilization were $7.03 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $8.11 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $8.78 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. Ecosystem carbon sink reduced significantly under no fertilization ecosystem with the net carbon sink was $4.86 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and it is also the lowest among all the fertilization treatments. Carbon sink from crop and the net ecosystem carbon sink was almost constant at different fertilization time if under the same fertilization condition, however, soil carbon sink changed greatly with fertilization time. It is urgent to discover proper fertilization practice to maintain and improve soil carbon sink besides purely pursuing higher crop yield. In conclusion, combined using organic fertilizer with inorganic fertilizer could not only increase ecosystem net carbon sink but also the economic benefits. Thus, organic fertilization is an effective way to achieve the target of the lower carbon and high quality agriculture.

Keywords: long-term fertilization; double rice cropping ecosystem; net carbon sink; soil carbon sink; annual dynamic

收稿日期:2010-11-18

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费资助(项目编号:201003016)

作者简介:余喜初(1973—),男,江西都昌人,推广硕士,副研究员,主要从事植物营养方面的研究。E-mail:yxchu@163.com

* 通讯作者:李大明 E-mail:lid_2005@126.com

在全球自然灾害日益频繁和严重的今天,人类已经逐渐意识到大气温室气体浓度升高导致的温室效应的巨大危害。因此,控制和减轻温室效应成为当前研究者必须关注的重要问题,而减少人类活动过程中能源的消耗和温室气体的排放则是要解决的首要问题。农田生态系统作为受人类影响最大的自然生态系统,其固碳能力历来受到关注^[1-4]。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 CO₂ 净排放,保持甚至增加土壤有机碳贮量^[3]。Pan 等^[5]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。目前,研究者已从单纯研究农田土壤的碳汇效应向研究整个农田生态系统的净碳汇效应转移。李洁静等^[6-7]对太湖地区水稻-油菜轮作模式和江西双季稻连作模式农田生态系统碳汇效应的研究结果显示:水田较早作有较高的碳汇效应,有机肥和无机肥配施也可以提高系统的碳汇效应和经济效益,不施肥显著降低农田生态系统的碳汇效应和经济效益。相同的结果也出现在彭华等^[8]对洞庭湖地区不同施肥条件的双季稻农田生态系统的研究中。施肥是重要的农事措施,长期施肥不仅影响作物的生长,也会对土壤的有机碳含量产生明显的影响^[9]。但遗憾的是,目前尚没有不同施肥年限农田生态系统碳汇效应变化特征及过量施用化肥对农田生态系统碳汇效应影响的报道。因此,本文利用江西省红壤研究所稻田长期化肥定位试验积累的数据,在比较不同施肥处理双季稻农田生态系统的碳排放、作物和土壤的固碳量以及系统净碳汇效应差异的同时,对不同施肥年限双季稻田生态系统碳汇效应的变化特征进行比较,旨在为制定合理的节能减排施肥方式提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

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。该地年均降雨量为 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)平均气温为 4.6 ℃,极端低温在 -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 ℃,极端高温在 40 ℃以上;日照时数 1 600~1 900 h。1981 年试验开始时耕层土壤 pH6.9,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%。

该长期定位试验从 1981 年开始实施。选取的试验处理为:CK(不施肥)、NPK(无机肥)、2NPK(2 倍无机肥)、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;2NPK 处理每季作物施 N 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 150 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。

1.2 研究方法

本研究对象是稻田生态系统,其边界是不同试验田块。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。研究所涉及的只是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。农产品及投入的各种生产资料价格均以 2010 年的市场价格进行估算。农田物质投入数量与价格列于表 1。

本研究主要采用此长期定位试验 1981—2005 年水稻的产出、物质投入以及土壤有机碳含量的试验数据,以 5 a 为一个时间段,比较不同施肥年限农田生态系统的碳排放量、作物和土壤固碳量及净碳汇效应的变化特征,并采用 25 a 的平均值对不同施肥处理的平均净碳汇效应及经济效益进行比较。水稻的产量为每年各个小区单打单收的实际产量;土壤有机质含量为耕层(0~17 cm)土壤的有机质含量;土壤容重采用环刀法测定。作物固碳量为每 5 a 的作物平均固碳量,土壤固碳量由每 5 a 起始时刻和结束时刻有机质差值乘以土壤重量而获得,系统净碳汇效应由系统碳排放减去作物固碳量和土壤固碳量而获得。

所有数据的平均值及标准差采用 Excel 2003 计算,不同处理及不同年限之间的差异采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析。

本试验所涉及的系统碳平衡、碳吸收量和碳排放量及相关单项参数的计算方法均参照文献[6-7]。系

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

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	N 180 kg·hm ⁻² , P 90 kg·hm ⁻² , K 150 kg·hm ⁻²	N 2.4 kg ⁻¹ , P 2.3 kg ⁻¹ , K 1.8 kg ⁻¹
农药 Pesticides	7.5 kg·hm ⁻²	5.5 kg ⁻¹
灌溉 Irrigation	7 000 t·hm ⁻²	450 hm ⁻² ·a ⁻¹
机电 Diesel and power	耗油 Diesel consumption 37.5 L·hm ⁻² 耗电 Electricity consumption 70 kW·h·hm ⁻²	柴油 Diesel 8.0 L ⁻¹ 电 Electricity 0.80 kW ⁻¹ ·h ⁻¹
人工 Labors	28~36 人·d	30 人 ⁻¹ ·d ⁻¹

注:各项投入和价格为 2010 年当地调查获得。
Note: Each inputs and price was from the investigation at the local place in 2010.

统经济流的估算方法也采用文献[6-7]的方法。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理的碳排放

本试验自实施以来,田间管理水平及施肥农药用量基本保持一致,因此相同处理生产活动造成的农田生态系统的年碳排放量基本一致(表 2)。其中以 2NPK 处理的碳排放量最大为 1.42 tC·hm⁻²·a⁻¹,以不施肥的 CK 处理的碳排放最小为 1.06 tC·hm⁻²·a⁻¹,不同处理碳排放量的差异主要是由施用化肥量及管理过程中所需人力不同造成的。

表 2 不同施肥处理农田生态系统生产活动中
碳排放量估算(tC·hm⁻²·a⁻¹)
Table 2 Estimation of carbon emission in agricultural ecosystem
production under different fertilizer treatments(tC·hm⁻²·a⁻¹)

碳排放 Carbon emission	CK	NPK	2NPK	NPKM
灌溉 Irrigation	0.54	0.54	0.54	0.54
机耕 Tillage	0.06	0.06	0.06	0.06
生产活动 Labor	0.40	0.40	0.40	0.48
农药 Pesticides	0.06	0.06	0.06	0.06
化肥 Chemical fertilizer	0.00	0.18	0.36	0.18
总排放量 Total emission	1.06	1.24	1.42	1.32

2.2 不同施肥处理的碳固定

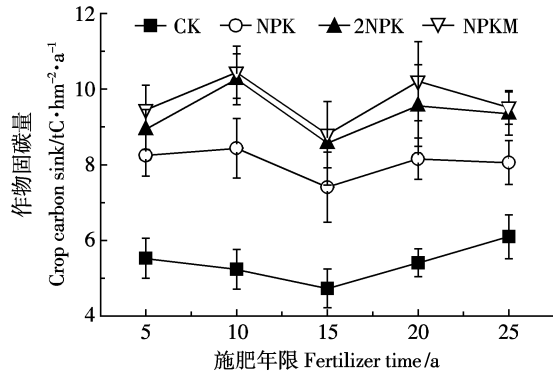
不同施肥处理双季稻生态系统的作物固碳量存在明显的差异(图 1),其中以不施肥的 CK 处理固碳量最低,平均为 5.40 tC·hm⁻²·a⁻¹;有机肥和化肥配施的 NPKM 处理固碳量最大,平均为 9.68 tC·hm⁻²·a⁻¹。不施肥的 CK 处理的作物固碳量在不同的施肥年限均显著低于其他 3 个施肥处理($P<0.05$)。有机肥和化肥配施的 NPKM 处理固碳量除了在连续施肥 10 a 和 25 a 显著高于 NPK 处理外,其他年限与 NPK 及 2NPK 处理之间没有显著的差异。2NPK 处理的作物

固碳量高于 NPK 处理,其中在连续施肥 10 a 和 25 a 时达到显著性差异($P<0.05$)。相同处理的作物固碳量随着施肥时间的延长存在一定的波动性,但是差异均不显著。这也表明:在施肥水平一致的条件下,作物的生长状况基本维持一致,因作物生长造成的对碳的固定量在不同年限之间没有明显的变化。

土壤有机质含量是衡量土壤质量最重要的指标之一,其变化在一定程度上反映土壤是碳的源还是汇。不同施肥年限土壤的固碳效应如图 2 所示。在相同的施肥年限,不同施肥处理双季稻农田生态系统土壤的固碳量都存在明显的差异。相同施肥处理的农田生态系统土壤固碳量在不同的施肥年限也有较大的波动。这表明:土壤的固碳量受施肥种类和年限的影响都很大,是容易受到影响的固碳途径。就不同施肥处理而言,以有机肥无机肥配施的 NPKM 处理的土壤固碳量最高,除了在连续施肥 5 a 时呈现碳源效应外,其他时间都是明显的碳汇效应;在连续施肥 25 a 时达到最大为 1.26 tC·hm⁻²·a⁻¹,多年平均为 0.41 tC·hm⁻²·a⁻¹。其他 3 个处理在不同的施肥年限之间也存在较大的波动,其中 NPK 处理在连续施肥 20 a 时达到了最明显的碳源效应,造成土壤损失 0.77 tC·hm⁻²·a⁻¹。CK、NPK 和 2NPK 处理的多年平均固碳量分别为 0.18、0.21 tC·hm⁻²·a⁻¹ 和 0.19 tC·hm⁻²·a⁻¹,整体上也都表现为碳汇效应,长期不施化肥和增施化肥对土壤的碳汇作用影响不大。这一结果表明:施用有机肥可以明显增加土壤的碳汇效应,是实现土壤增汇的有效施肥方式。

2.3 不同施肥年限的净碳汇变化特征

不同施肥处理双季稻生态系统的净碳汇结果如图 3 所示。相同处理双季稻生态系统的年净碳汇效应不同施肥年限存在一定的波动;其中 NPKM 处理在连续施肥 10 a 时,CK 处理在连续施肥 25 a 时显著



注: 值=平均值±标准差, 下同。Note: Value = Mean ± S.D., the same below.

图 1 不同施肥处理农田生态系统作物固碳量年际变化图

Figure 1 The dynamic of crop carbon sink in agricultural ecosystem production under different fertilizer treatments

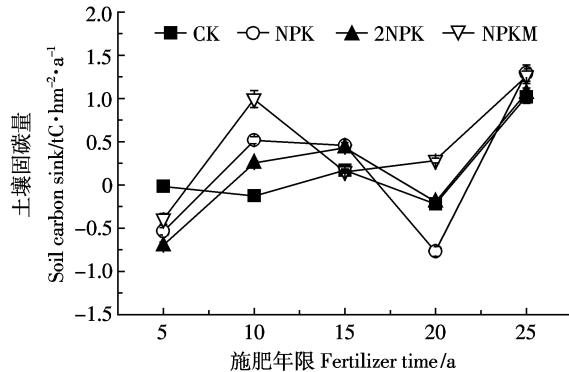


图 2 不同施肥处理农田生态系统土壤固碳量年际变化图

Figure 2 The dynamic of soil carbon sink in agricultural ecosystem production under different fertilizer treatments

高于相同处理的其他施肥年限 ($P < 0.05$), 这两个处理在其他施肥年限上没有显著的差异。NPK 和 2NPK 处理的净碳汇效应在所有的施肥年限上均没有显著的差异。就不同处理而言, 施肥处理的净碳汇在所有施肥年限上均显著高于不施肥的 CK 处理 ($P < 0.05$)。而有机肥无机肥配施的 NPKM 处理的净碳汇效应又是施肥处理中最高的; 其中在连续施肥 10 a 时其净碳汇效应显著高于 2NPK 处理, 在连续施肥 10、20 a 和 25 a 时其净碳汇效应显著高于 NPK 处理 ($P < 0.05$)。2NPK 处理的净碳汇效应除了在连续施肥 20 a 时显著高于 NPK 处理外, 其他时间没有显著差异。CK、NPK、2NPK 和 NPKM 处理的多年平均净碳汇效应分别为 -4.52 、 -7.03 、 -8.11 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 -8.78 $\text{tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这一结果表明: 不施肥会严重影响农田生态系统的净碳汇效应, 无机肥配施有机肥可以明显提高农田生态系统的净碳汇效应, 过量增施化肥对增加农田生态系统的净碳汇没有明显的作用。

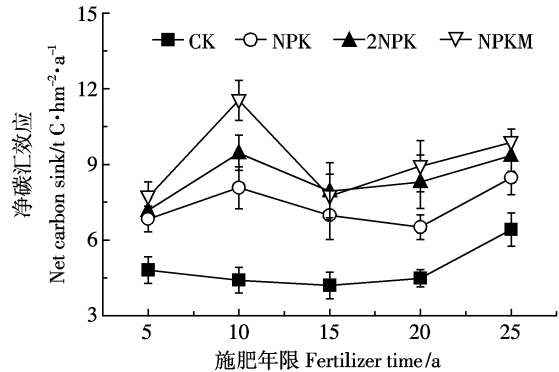


图 3 不同施肥处理农田生态系统净碳汇量年际变化图

Figure 3 The dynamic of net carbon sink in agricultural ecosystem production under different fertilizer treatments

2.4 系统的经济流

较高的农作物产量和经济效益仍然是农业生产中追求的首要目标。本试验不同施肥处理在不同施肥年限的产量变化如图 4 所示, 不同施肥方式的平均经济效益如图 5 所示 (由于生产资料和水稻的价格年际间变化很大, 本文只对不同施肥处理的多年平均经济效益进行比较)。虽然相同处理的产量在不同施肥年限上存在一定的差异, 但这种差异均不显著。就不同处理而言, 不施肥的 CK 处理水稻年产量显著低于施肥处理 ($P < 0.05$)。有机肥和无机肥配施以及增施化肥都增加了水稻的产量; 其中增施有机肥的 NPKM 处理的产量在连续施肥 10、20 a 和 25 a 时显著高于只施化肥的 NPK 处理, 增施化肥的 2NPK 处理的水稻年产量在连续施肥 10 a 和 25 a 时也显著高于只施化肥的 NPK 处理 ($P < 0.05$)。增施有机肥和增施化肥处理的水稻年产量在不同施肥年限上均无显著差异。这也表明: 施用一定量的肥料仍是提高作物产量的有效措施, 在施肥水平一致的情况下作物的产量相对稳定。

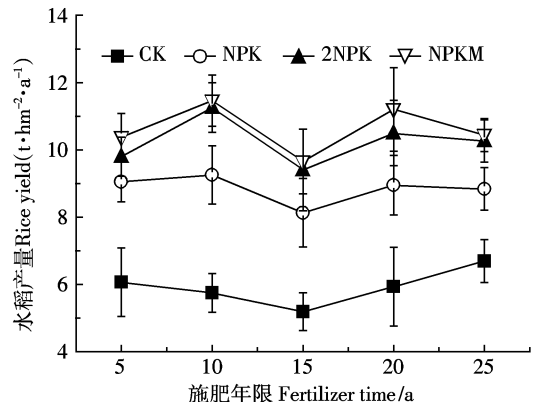
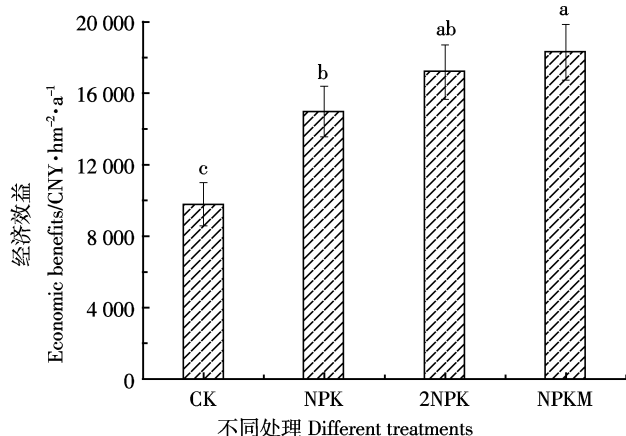


图 4 不同施肥处理双季稻系统水稻产量年际变化图

Figure 4 The dynamic of rice yield in double rice cropping system under different fertilizer treatments



注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$, 邓肯氏法)。Different letters represent significantly different ($P<0.05$, Duncan's method)

图5 不同施肥处理平均年经济效益对比图

Figure 5 The economic benefits in double rice cropping system under different fertilizer treatments

由图5可以看出:有机肥和无机肥配施的NPKM处理的经济效益最高,为 $17\,568\text{ CNY}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,不施肥的CK处理经济效益显著低于施肥处理,为 $9\,594\text{ CNY}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$)。NPKM处理的年经济效益显著高于单施化肥的NPK处理,同时也高于2NPK处理,但是差异不显著。加倍施用化肥并没有显著提高系统的年经济效益。这一结果表明:过度施用化肥并不是提高农业经济效益的最佳手段,适当施加有机肥可以有效提高农业生产的经济效益。

3 讨论

3.1 不同施肥处理双季稻生态系统碳汇效应差异

本研究中,有机肥和无机肥配施的双季稻田生态系统碳汇效应最高,而不施肥的系统碳汇效应最低,这一结果与此前报道的结果一致^[6-8]。从系统碳汇的来源看,作物固碳是农田生态系统碳汇的主要来源,施肥作为改善作物生长的有效措施,对提高作物的固碳量有明显的作用,这是导致施肥处理农田生态系统的碳汇效应显著高于不施肥处理的主要原因。众多的研究都指出:有机肥和无机肥配施不仅可以促进作物的生长,提高作物的产量^[10-11],还可以显著提高土壤的有机质含量^[9]。而作物的生长和土壤有机质的累积是农田生态系统固碳的主要途径,因此有机肥的投入必将明显增加整个系统的碳汇效应,在农业生产过程中施加有机肥是提高农田生态系统碳汇效应的有效方法。

本研究的结果显示:加倍施加无机肥提高了农田

生态系统的净碳汇效应,但是这种作用在大部分的施肥年限上作用不显著。在一定限度内,增加化肥的投入量可以促进作物的生长,进而增加作物的固碳量,增加整个系统的碳汇效应。但是当化肥使用过多时会减弱对作物的生长促进作用,同时也会使土壤的有机质含量下降,造成土壤的固碳量下降,甚至使土壤变成了碳源,最终减弱了系统的净碳汇效应。本研究结果也显示:2NPK处理的双季稻田生态系统的水稻年产量和作物固碳量与NPK处理相比都有所提高,但是土壤的固碳量二者之间在不同施肥年限作用有很大差异,这最终导致2NPK处理的净碳汇效应与NPK处理相比没有显著提高。需要指出的是:本试验2NPK处理的作物固碳量与NPK处理相比还是有较大的提高,这主要是与本试验长期的施肥量有关,本长期试验的施肥量是根据试验开始时的土壤及当地施肥习惯确定的,为了保持试验过程的一致性,在试验的进行过程中并没有对施肥的量进行相应的调整,这使得长期耕作带来的土壤肥力下降的影响加大,使得2NPK处理的作用效果相对较好,但是从整体来看,加倍施加无机肥没有适当施加有机肥的作用效果明显。因此,合理施用无机肥也是提高农田生态系统碳汇效应的有效措施。

3.2 不同施肥年限双季稻生态系统碳汇效应变化特征

本研究中,NPK处理和2NPK处理的年净碳汇效应在不同施肥年限虽然有一定的波动,但是在统计上都没有显著性差异($P<0.05$),而不施肥的CK处理(连续施肥10a)和有机无机配施的NPKM处理(连续施肥25a)的年净碳汇效应只在个别施肥年限表现出显著偏高的现象,总体上基本维持稳定。这主要是由不同施肥年限农业生产过程中生产活动造成的碳排放和占系统固碳量主体的作物固碳量没有明显变化而造成的。在本研究中,不同施肥年限土壤的固碳量有显著的变化。土壤有机质含量很容易受到耕作、气候等因素的影响而产生较大的变化^[12],造成土壤的固碳量产生明显的变化。虽然土壤的固碳量只占整个农田生态系统固碳量的很小一部分,但是其在增加整个生态系统的碳汇效应上的作用不容忽视,同时土壤有机质含量也是土壤质量的重要指标,因此无论从增加土壤的碳汇效应,还是改善土壤质量的角度来看,提高土壤有机质含量都是农业生产中应该追求的目标。在积极探索提高农田生态系统作物产量和作物固碳量方法和途径的同时,探索维持和提高土壤的有机质含量,进而增加土壤碳汇作用的方法和途径,也将

是提高农田生态系统碳汇效应、改善土壤质量必须考虑的问题。

3.3 低碳、高值农业施肥模式

如何应对日益严重的全球气候异常状况及减弱农业生产带来的温室气体排放是当前农业生产面临的首要问题。施肥作为农业生产过程中重要的农事管理措施,研究不同施肥方式对农田生态系统碳汇效应及经济效益的影响将是系统解决农业生产面临问题首先要研究的热点。本文的结果显示:无机肥和有机肥配施可以明显提高农田的碳汇效应和经济效益,而过多的施用有机肥并没有使经济效益有显著提高。这一结果再次表明:在农业生产中施用一定量的有机肥,无论对环境还是对提高农业生产的经济效益都有重要意义。同时,有机肥可以通过对作物秸秆、生活垃圾及畜禽粪便的简单处理而获得,这不仅可以将农业生产过程中所产生的废弃物进行有效利用,减少农业生产带来的面源污染问题,还可以减少相应无机肥的施用量,与当前提倡的农业生产过程节能减排的宗旨一致。因此,在农业生产过程中合理施肥,适当追施有机肥,并对农业生产中带来的农业废弃物进行资源化利用,有助于实现农业生产的低碳和高值。

4 结论

施用有机肥可以提高双季稻农田生态系统的净碳汇效应,过量施用化肥对提高农业生态系统的净碳汇效应没有明显作用。农业生产过程中,在施肥条件一致的条件下,作物的固碳量及系统的净碳汇效应在不同施肥年限间没有明显的差异。不同施肥处理及施肥年限间,土壤的固碳量变化显著,在提高农田生态系统作物固碳量的同时,增加和维持土壤的固碳量也将是实现整个农田生态系统增汇重要途径。合理施肥及适当施加以农业废弃物为主的有机肥有利于增加农田生态系统的碳汇效应,提高农业生产的经济效益,是实现低碳、高值农业的有效措施。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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): 612-619.
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): 612-619.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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-rape rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1670-1676.
- [7] 李洁静, 潘根兴, 李恋卿, 等. 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 Jie-jing, PAN Gen-xing, LI Lian-qing, et al. 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[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2520-2525.
- [8] 彭华, 纪雄辉, 刘昭兵, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2526-2532.
PENG Hua, JI Xiong-hui, LIU Zhao-bing, et al. Evaluation of net carbon sink effect and economic benefit in double rice field ecosystem under long-term fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2526-2532.
- [9] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳动态变化的影响[J]. *土壤*, 2008, 40(2): 237-242.
YUAN Ying-hong, LI Hui-xin, HUANG Qian-ru, et al. Effects of long-term fertilization on dynamic of soil organic carbon in red paddy soil[J]. *Soil*, 2008, 40(2): 237-242.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 许兴旺, 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, 19(6): 193-196, 200.
XU Xing-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): 193-196, 200.