

稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响*

吴建富¹ 曾研华^{1,2,3} 潘晓华^{1**} 石庆华¹ 李 涛¹ 王苏影¹

(¹江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 南昌 330045;

²南京农业大学农学院, 南京 210095; ³中国水稻研究所水稻生物学国家重点实验室, 杭州 310006)

摘 要 采用田间定位试验, 设置不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、稻草切碎全量还田+化肥(SNPK)和稻草全部烧灰还田+化肥(SINPK)4个处理, 研究不同稻草还田方式对双季稻产量和土壤碳素形态、碳库管理指数的影响. 结果表明: 2010—2011年两年四季的水稻平均产量SNPK与SINPK处理基本持平, 但均显著高于NPK处理, 增幅为5.7%~7.3%. 与NPK和SINPK相比, SNPK能显著提高早稻产量, 增幅在3.8%~8.8%. 与单施化肥和稻草烧灰还田相比, SNPK提高了土壤不同形态碳素含量和碳库管理指数, 总有机碳、活性碳、矿化碳和碳库管理指数分别提高了1.8%~2.0%、5.9%~6.5%、16.0%~41.6%和7.3%~7.8%. 土壤碳库管理指数与早、晚稻产量呈显著抛物线关系, 相关系数分别为0.999和0.980. SNPK能显著提高翌年早稻产量及土壤不同形态碳素含量和碳库管理指数.

关键词 稻草还田方式 双季稻 产量 碳素形态 碳库管理指数

文章编号 1001-9332(2013)06-1572-07 **中图分类号** S151.9, S511.4 **文献标识码** A

Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool management index in double rice-cropping system. WU Jian-fu¹, ZENG Yan-hua^{1,2,3}, PAN Xiao-hua¹, SHI Qing-hua¹, LI Tao¹, WANG Su-ying¹ (¹Ministry of Education Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding/Jiangxi Province Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; ²College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ³State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(6): 1572–1578.

Abstract: A 2-year field experiment was conducted to study the effects of different rice straw returning modes on the rice grain yield and soil carbon pool management index (CPMI) in a double rice-cropping system. Four treatments were installed, including balanced mineral fertilization (NPK), NPK plus cut rice straw returning (SNPK), NPK plus incinerated rice straw returning (SINPK), and no fertilization (CK). In treatments SNPK and SINPK, the 2 years average grain yield of early rice and late rice was basically the same, and much higher than that in treatment NPK, with an increment of 5.7%–7.3%. As compared with treatments NPK and SINPK, treatment SNPK increased the grain yield of early rice significantly by 3.8%–8.8%, and enhanced the contents of various soil carbon forms and the soil CPMI, with the soil total organic carbon, active carbon, mineralized carbon contents, and the soil CPMI increased by 1.8%–2.0%, 5.9%–6.5%, 16.0%–41.6%, and 7.3%–7.8%, respectively. There was a significant parabolic correlation between soil CPMI and rice grain yield ($r=0.999$ and $r=0.980$ in early- and late-rice season, respectively). Treatment SNPK also increased the grain yield, the contents of various soil carbon forms, and the soil CPMI in the next early rice season.

Key words: rice straw returning mode; double cropping rice; yield; carbon form; carbon pool management index.

* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD16B04)、江西省科技支撑计划重点项目(2009BNA03800)和南昌市科技局科技支撑计划重点项目(农业支撑计划第36号)资助.

** 通讯作者. E-mail: xhuapan@163.com

2012-10-09 收稿, 2013-03-29 接受.

水稻是我国重要的粮食作物, 稻草资源十分丰富^[1]. 稻草作为一种廉价的有机肥料, 含有丰富的有机质和大量的氮、磷、钾、硅等矿质营养元素, 稻草还田在提高土壤肥力、改善土壤理化性状、提高农作物产量和品质及降低施肥成本等方面具有重要作用^[2]. 近几年, 我国水稻机械化收获的快速发展, 为稻草全量还田提供了条件. 但目前我国秸秆资源仅有 20% ~ 36% 用作肥料, 被燃烧和废弃的秸秆在 45% ~ 60%^[3]. 这不仅浪费了有机资源, 同时也污染了环境. 土壤有机质是土壤肥力的重要物质基础, 在维持土壤结构、保持土壤水分和养分供应等方面具有重要作用, 同时也与全球气候变化密切相关^[4]. 但有机质总量并不能敏感地反映土壤有机质的变化. 长期以来, 科学工作者对土壤有机质在改良土壤、培肥地力等方面做了大量的研究. 结果发现, 土壤有机质对土壤肥力及环境的作用, 不仅取决于其数量的多少, 同时受其品质的制约, 即存在有机碳的质量问题^[5]. 在土壤有机质组成中, 有一部分有机质与土壤肥力、作物生长关系密切, 在土壤肥力方面起着关键作用. Lefroy 等^[6]通过不同浓度 KMnO_4 氧化土壤有机质获得了不同活性组分的土壤活性有机质, 并据此提出了土壤碳库管理指数的概念. 土壤活性有机质不但能有效地反映土壤质量在较大时空尺度上的变化, 而且能敏感指示土壤性质的微小变化^[7], 可以较为明确地表征不同活性有机质地对土地/土壤管理措施变化的响应, 并且可以描述土壤有机质转化特征. 土壤碳库管理指数可作为土壤有机质总量及其质量变化的较为系统和敏感的监测指标, 是土壤管理措施引起土壤有机质变化的重要依据^[8]. 因此, 其在目前研究中应用较为广泛^[9-10]. 自 Lefroy 等^[6]首次提出土壤碳库管理指数的概念以来, 国外在这方面的研究较多^[5-6, 11-12], 国内也已对不同耕作与利用方式、不同施肥方式、不同地带典型土壤的有机碳活性组成和碳库管理指数进行了报道^[13]. 研究表明, 土壤矿化碳与全碳的比值可以指示土壤有机碳活性; 土壤活性碳与全碳的比值可以度量土壤有机碳氧化稳定性^[14].

目前有关不同农艺措施下水稻产量及土壤有机碳和碳库管理指数变化方面的研究较多^[8, 10, 15], 但在施肥条件下稻草全量还田对双季早、晚稻产量和土壤碳库管理指数影响的报道极少. 开展这方面的研究对于评价南方双季稻区稻田土壤优化管理措施、农作物秸秆循环利用效应及农业可持续发展具有重要的理论意义和实践价值. 为此, 本文在等养分

条件下, 通过两年田间定位试验研究了不同稻草还田方式对双季稻产量和土壤碳库管理指数的影响, 以期对南方稻区稻草资源有效利用和水稻合理施肥提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2010—2011 年在江西省进贤县温圳镇杨溪村进行, 2009 年晚稻机械收获后, 进行早、晚稻稻草全量还田的 2 年 4 季田间定位试验. 试验前土壤基本性质为: 有机碳 $19.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $2.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $126.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $97.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $31.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 5.48. 供试早、晚稻品种分别为陆两优 996 和五丰优 T025.

1.2 试验设计

试验设 4 个处理: 1) 不施肥 (CK); 2) 单施 N、P、K 肥 (NPK); 3) 稻草全部烧灰还田+化肥 (SINPK), 即联合收割机收获早、晚稻后, 人工撒匀稻草, 晒干后燃烧成灰, 灌适量水后用手扶拖拉机旋耕, 作为早、晚稻基肥; 4) 稻草切碎全量还田+化肥 (SNPK), 即联合收割机收获早、晚稻时将稻草切碎成 5 ~ 8 cm 小段, 早稻稻草人工撒匀、灌水后用拖拉机旋耕入土, 作为晚稻基肥; 晚稻稻草人工撒匀后, 第 2 年春耕时用拖拉机旋耕入土, 作为早稻基肥. 每年每季每处理小区面积均为 326.7 m^2 . 除不施肥处理外, 其他处理氮、磷、钾肥用量相等, 即早稻施纯 N $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 晚稻 $195 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 早、晚稻 N : P_2O_5 : K_2O 均为 1 : 0.45 : 0.9. 按谷草比 1 : 1 计算, 2010 年早、晚稻稻草还田量分别为 6750 和 6980 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 稻草灰还田量分别为 1079 和 1085 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2011 年早、晚稻稻草还田量分别为 8122 和 8016 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 稻草灰还田量分别为 1274 和 1099 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 稻草和稻草灰中氮、磷、钾养分含量及输入农田量见表 1, 不足部分用化肥补充. 早稻氮肥按基肥 : 分蘖肥 : 穗肥 = 5 : 2 : 3 施用, 晚稻氮肥按基肥 : 分蘖肥 : 穗肥 = 4 : 2 : 4 施用; 早、晚稻钾肥按分蘖肥 : 穗肥 = 7 : 3 施用; 磷肥一次性做基肥施用, 化肥用尿素、钙镁磷肥和氯化钾. 田间水分管理采用浅水灌溉, 其他管理措施基本一致.

1.3 测定指标及方法

在早、晚稻成熟期, 于田间每处理采集耕作层 (0 ~ 15 cm) 5 个点的混合土样 3 份, 用于土壤有机碳、活性碳和矿化碳的测定. 土壤有机碳采用 K_2CrO_7 氧化法测定^[16]. 土壤活性碳按文献[8]的方

表 1 稻草和草灰中氮、磷、钾养分含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)及还田量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
Table 1 Nitrogen, phosphorus and potassium contents ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) of returning straw and straw ash and input quantity ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) to rice farmland

季别 Season	还田方式 Returning method	氮 N				磷 P_2O_5				钾 K_2O			
		2010		2011		2010		2011		2010		2011	
		含量 Content	还田量 Input quantity	含量 Content	还田量 Input quantity	含量 Content	还田量 Input quantity	含量 Content	还田量 Input quantity	含量 Content	还田量 Input quantity	含量 Content	还田量 Input quantity
A	I	6.0	40.3	7.2	58.4	0.9	6.0	1.5	12.0	15.6	105.2	14.2	115.7
	II	2.4	2.6	1.3	1.7	3.2	3.4	5.6	7.2	83.4	90.0	83.8	106.8
B	I	5.7	39.4	6.3	50.8	0.6	4.4	1.3	10.8	14.0	97.9	13.8	110.7
	II	2.3	2.5	1.3	1.4	3.2	3.4	5.4	5.9	84.8	92.0	83.1	91.4

A:早稻 Early rice; B:晚稻 Late rice. 下同 The same below. I :还田稻草 Returning straw; II :还田草灰 Returning straw ash.

法测定:称量处理过的约含 15 mg 有机碳的土样,放入塑料瓶(100 mL)内,用 25 mL 333 mmol · L⁻¹ KMnO₄溶液震荡处理 1 h,震荡后 4000 r · min⁻¹离心 5 min,取上清液,用去离子水按 1 : 625 稀释,然后用分光光度计在 565 nm 比色测定,根据 KMnO₄浓度的变化计算活性有机碳含量($\text{mg C} \cdot \text{g}^{-1}$) (氧化过程中 1 mmol · L⁻¹ KMnO₄消耗 0.175 mmol · L⁻¹或 9 mg C). 土壤矿化碳含量采用碱吸收法^[17]测定:称取土样 5 g 风干土放入广口瓶中,将土壤样品平铺于瓶底,用蒸馏水调至最大田间持水量的 60%,在 25 ℃的培养箱内培养,每个处理 3 次重复,培养过程中所释放的 CO₂用 5 mL 1 mol · L⁻¹ NaOH 溶液吸收,在培养 3 d 后用 0.5 mol · L⁻¹ H₂SO₄溶液滴定法计算累积矿化量,所用指示剂为酚酞.

在水稻收割前 1 天,各处理在调查有效穗数的基础上,按平均数法分 3 点各取 5 蔸进行考种,各处理分 3 点各实割 100 蔸,脱粒后晒干称量测产.

1.4 计算公式

稳态碳=总碳-活性碳;碳库指数(CPI)=农田土壤有机碳/参考农田土壤有机碳;碳库活度(A)=活性碳/稳态碳;碳库活度指数(AI)=农田碳库活度/参考土壤碳库活度;碳库管理指数(CPMI)=碳库指数×碳库活度指数×100;矿化碳有效率=矿化

碳/土壤有机碳×100%;活性碳有效率=活性碳/土壤有机碳×100%.

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 软件进行统计分析,利用 Duncan 新复极差法(LSR)进行显著性检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$.

2 结果与分析

2.1 稻草还田方式对双季早、晚稻产量及其构成因素的影响

两年定位试验结果表明,稻草还田方式对早、晚稻产量的影响存在显著差异(表 2). 无论是早稻还是晚稻,各施肥处理产量均显著高于对照. 在施肥水平相同的情况下,两年四季的平均产量以 SNPK 和 SINPK 处理基本持平,但均显著高于 NPK 处理,增幅为 5.7% ~ 7.3%;两年早稻平均产量 SNPK 处理显著高于 SINPK 和 NPK 处理,增幅为 3.8% ~ 8.8%,而晚稻平均产量表现为 SINPK>SNPK>NPK,处理间差异显著. 稻草全量还田一季,早稻产量显著高于其他两处理,增幅为 3.4% ~ 4.3%,而 NPK 和 SNPK 处理间差异不显著. 稻草周年还田,晚稻产量 SINPK 处理显著高于 NPK 和 SNPK 处理,增幅为 9.5% ~ 9.8%,而后两者之间差异不显著. 稻草连续

表 2 稻草还田方式对双季早、晚稻产量的影响
Table 2 Effects of rice straw returning way on yield of early and late rice ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	2010		2011		平均产量 Average yield		
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	2 季早稻 Early rice in two seasons	2 季晚稻 Late rice in two seasons	4 季稻 Rice in four seasons
CK	4386.0c	5952.0c	3919.5c	5107.5c	4152.8d	5529.8d	4841.3c
NPK	6691.5b	8143.5b	7095.0b	8205.0b	6893.3c	8174.3c	7533.8b
SINPK	6750.0b	8919.0a	7699.5a	8971.5a	7224.8b	8945.3a	8085.0a
SNPK	6979.5a	8122.5b	8016.0a	8722.5a	7497.8a	8422.5b	7960.1a

同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3 稻草还田方式对双季早、晚稻产量构成因素的影响
Table 3 Effects of rice straw returning way on yield components of early and late rice

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle (10 ⁴ · hm ⁻²)	每穗粒数 Spikelet per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain mass (g)
2010	A	CK	168.3b	110.7a	97.2a
		NPK	286.2a	114.9a	90.4a
		SINPK	287.3a	122.7a	93.1a
		SNPK	301.5a	122.0a	93.5a
	B	CK	237.6c	148.8a	89.3a
		NPK	357.8a	147.7a	82.8a
		SINPK	315.9b	161.8a	82.5a
		SNPK	311.9b	151.3a	82.5a
2011	A	CK	214.5d	78.8b	95.0a
		NPK	335.9b	86.9b	84.9c
		SINPK	318.9c	100.8a	86.0c
		SNPK	343.1a	97.3a	88.8b
	B	CK	241.8c	143.9b	90.1a
		NPK	350.7a	140.2b	85.1c
		SINPK	342.6b	153.9ab	84.4c
		SNPK	343.5b	141.7b	89.5a

3~4 季还田,SNPK 和 SINPK 处理的早、晚稻产量基本持平,但均显著高于 NPK 处理,早稻增幅为 8.5%~13.0%,晚稻增幅为 6.3%~9.3%。表明在等养分条件下,晚稻稻草全量还田有利于提高翌年早稻产量,其原因是增加了有效穗数(表 3);而早稻稻草全量还田一季对当年晚稻产量的影响不明显,但稻草连续多季还田有利于晚稻产量的提高,同时还减少了化肥的投入,尤其是减少了化学氮、钾肥的用量。

由表 3 可知,无论是早稻还是晚稻,各施肥处理的单位面积有效穗数显著高于对照。在等养分条件下,早稻单位面积有效穗数的变化趋势与其产量基本一致;而晚稻则不同,稻草全量还田处理的单位面积有效穗数最少,可能是由于早稻稻草还田后,微生物分解稻草需要消耗土壤氮素,从而影响了晚稻的分蘖。早稻每穗粒数 SNPK 和 SINPK 处理相差较小,但均显著高于 NPK 处理;而晚稻 SINPK 处理显著高于 NPK 和 SNPK 处理,后两者之间差异不显著;结实率均以对照最高;千粒重处理间差异不显著。相关分析表明,早稻产量的主要影响因素是有效穗数和每穗粒数,与产量的相关性达到显著水平,相关系数分别为 0.990 和 0.999,而晚稻产量主要与有效穗数显著相关,相关系数为 0.912。

2.2 稻草还田方式对土壤碳素形态及其有效性的影响

由表 4 可以看出,施肥处理间耕作层土壤有机

表 4 稻草还田方式对土壤碳素形态及其有效率的影响
Table 4 Effects of rice straw returning way on contents of soil carbon with various types and their availability

处理 Treatment	有机碳 Organic carbon (g · kg ⁻¹)	活性碳 Active carbon (g · kg ⁻¹)	矿化碳 Mineralized carbon (g · kg ⁻¹)	矿化碳有效率 Availability of mineralized carbon (%)	活性碳有效率 Availability of active carbon (%)
A	CK	19.62b	4.04c	0.94c	4.77c
	NPK	19.90a	4.27b	1.96a	9.82a
	SINPK	19.92a	4.30b	1.42b	7.10a
	SNPK	20.10a	4.65a	1.36b	6.74a
B	CK	19.32b	3.97c	1.44bc	7.43c
	NPK	19.77a	4.57b	1.66b	8.37b
	SINPK	19.81a	4.59b	1.36c	6.84c
	SNPK	20.17a	4.86a	1.92a	9.51a

数据为两年的平均值 Values were the average of two years. 下同 The same below.

碳含量差异不显著,但均显著高于对照,增幅为 2.5%~4.4%。稻草连续多季还田能明显提高土壤有机碳含量,较试验前提高 1.8%;对活性碳的影响表现为 SNPK>SINPK、NPK>CK,稻草全量还田处理显著高于其他处理,增幅为 5.9%~22.7%,而 SINPK 和 NPK 处理间差异较小;对矿化碳的影响表现为 SNPK>NPK>CK、SINPK。表明稻草连续多季全量还田有利于土壤有机碳、活性碳和矿化碳含量的提高,从而有利于土壤养分的释放。

土壤中活性碳占总有机碳的百分比可以反映土壤有机碳质量,活性有机碳所占的比例越高,表示土壤质量越好。各处理活性碳有效率、矿化碳有效率与活性碳、矿化碳的变化趋势基本一致。与其他处理相比,稻草连续多季全量还田处理对提高土壤碳素有效率的效果较好。

2.3 稻草还田方式对土壤碳库管理指数的影响

由表 5 可以看出,各施肥处理土壤稳态碳含量差异不显著,而碳库活度均显著高于对照,增幅为 16.5%~23.1%。在相同施肥水平下,土壤碳库活度、碳库活度指数均表现为 SNPK>SINPK≈NPK,且前者显著高于后两者;碳库指数各施肥处理间的差异不明显;碳库管理指数表现为 SNPK>SINPK、NPK,前者显著高于后两者,而后两者之间差异不明显。表明稻草全量还田处理有利于提高耕作层土壤碳库管理指数。相关分析表明(图 1),土壤碳库管理指数与双季早、晚稻产量呈显著抛物线关系,相关系数分别为 0.999 和 0.980。

表 5 稻草还田方式对土壤碳库管理指数的影响
Table 5 Effect of rice straw returning way on soil carbon pool management index

处理 Treatment	稳态碳 Unactive carbon (g · kg ⁻¹)	活性碳 Active carbon (g · kg ⁻¹)	碳库活度 Activity of carbon pool	碳库活度指数 Carbon pool activity index	碳库指数 Carbon pool index	碳库管理指数 Carbon pool management index
A CK	15.59a	4.04c	0.259c	1.00b	1.00b	100.0b
NPK	15.64a	4.27b	0.273b	1.05b	1.01a	106.9b
SINPK	15.62a	4.30b	0.275b	1.06b	1.02a	108.0b
SNPK	15.45a	4.66a	0.301a	1.16a	1.02a	119.2a
B CK	15.36a	3.97c	0.258c	1.00c	1.00a	100.0c
NPK	15.20a	4.57b	0.301b	1.17b	1.02a	119.2b
SINPK	15.22a	4.60b	0.302b	1.17b	1.03a	119.8b
SNPK	15.31a	4.87a	0.318a	1.23a	1.04a	128.5a

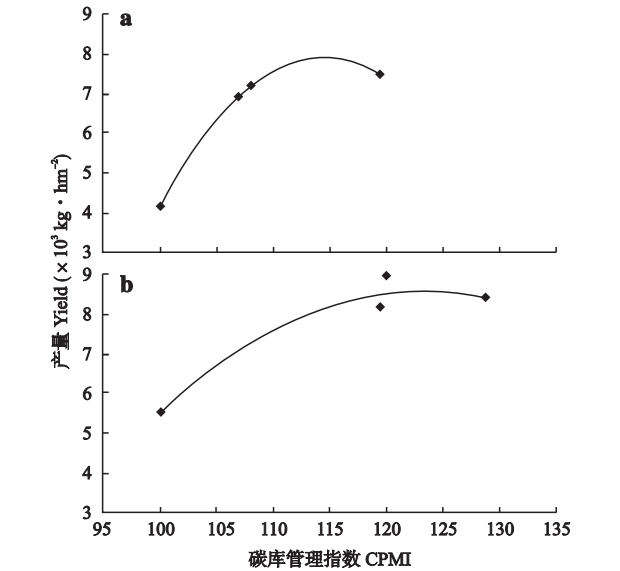


图 1 土壤碳库管理指数(CPMI)与双季早(a)、晚稻(b)产量的关系
Fig.1 Relationships between the CPMI and grain yield of early (a) and late (b) rice.

3 讨 论

3.1 稻草还田与水稻产量的关系

稻草还田的历史悠久,国内外科技人员对稻草还田方式^[18]、还田数量^[19]、还田时期^[20]、培肥土壤^[21-23]、稻草还田土壤生物学效应^[20,24]和产量效应^[19-21,23]以及稻草还田的生态效应^[23,25]等进行了大量的研究,取得了可喜的成就.稻草焚烧不仅造成资源浪费和对环境的严重污染,也大大减少了土壤有机质的投入,严重影响农业的可持续发展.随着水稻机械收割技术的发展,稻草直接全量还田已成为趋势.有研究认为,稻草还田能提高水稻产量,原因是稻草还田促进了水稻分蘖,增加了有效穗数和每穗粒数,生育中后期能维持较高的叶面积指数和干物质积累^[20,26].但其效果与耕作方式、还田数量、

土壤类型、稻田养分水平、水肥管理措施、还田方式和还田年限有关.叶文培等^[20]研究认为,稻草还田使早稻产量增加 12.9%,增产效果显著,而晚稻产量仅增加 1.3%;肖小平等^[18]认为,稻草还田以高桩翻耕模式对晚稻增产效果最好,比高桩免耕、覆盖免耕分别增产 5.8% 和 9.0%.本研究表明,在氮、磷、钾养分用量相等的情况下,两年四季的水稻平均产量是稻草全量还田处理与稻草烧灰还田处理基本持平,但显著高于单施化肥处理,增幅为 5.7% ~ 7.3%.稻草全量还田处理显著提高了翌年早稻产量,与单施化肥和稻草烧灰还田处理相比,增幅为 3.8% ~ 8.8%.其增产的主要原因是增加了单位面积的有效穗数.稻草全量还田一次,晚稻产量与单施化肥处理基本持平;但稻草连续多季全量还田,晚稻产量显著高于单施化肥处理,而与稻草烧灰还田处理基本持平.但与稻草全部烧灰还田相比,稻草全量还田明显减少了化学氮肥的投入,从而提高了水稻的生产效益.

3.2 稻草还田与土壤碳库的关系

土壤有机质的活性成分对土壤养分、植物生长乃至环境都有着直接的影响,因此,在现代土壤研究中非常重视土壤活性有机质的作用.研究土壤活性有机质和碳库管理指数能明确土壤管理和施肥的科学性^[8].近 20 年来,我国农田土壤有机碳呈增加趋势,尤其是在南方红壤丘陵地区和太湖地区更为明显^[27].已有研究认为,土壤不同形态碳素含量和碳库管理指数的变化程度与耕作方式和施肥等农业管理措施密切相关^[8,17,28-29].稻草还田能提高土壤不同形态碳素含量和碳库管理指数,但其影响程度与耕种年限^[29]、稻草还田年限^[8]和耕作方式^[28]有关,而稻草烧灰还田却显著降低了土壤有机质含量^[30].本研究结果表明,与单施化肥和稻草烧灰还田相比,稻草全量还田提高了土壤不同形态碳素含量和碳库

管理指数, 总有机碳、活性碳、矿化碳和碳库管理指数分别提高了 1.8% ~ 2.0%、5.9% ~ 6.5%、16.0% ~ 41.6% 和 7.3% ~ 7.8%, 表明无论是早稻稻草还田还是周年还田, 均有利于耕作层土壤活性碳含量和碳库管理指数的提高, 且稻草连续多季全量还田对提高土壤碳素有效率有较好的效果。相关分析表明, 土壤碳库管理指数与双季早、晚稻产量呈显著抛物线关系, 相关系数分别为 0.999 和 0.980。

参考文献

- [1] Liu X-H (刘巽浩), Gao W-S (高旺盛), Zhu W-S (朱文珊). The Mechanism and Technical Pattern of Straw Return to Field. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 55-61 (in Chinese)
- [2] Gao X-Z (高祥照), Ma W-Q (马文奇), Ma C-B (马常宝), *et al.* Analysis on the current status of utilization of crop straw in China. *Journal of Huazhong Agricultural University* (华中农业大学学报), 2002, **21** (3): 242-247 (in Chinese)
- [3] Bao X-M (包雪梅), Zhang F-S (张福锁), Ma W-Q (马文奇). The resources of crop straw and their recycling nutrients in China. *Review of China Agricultural Science and Technology* (中国农业科技导报), 2003, **5**(suppl. 1): 14-17 (in Chinese)
- [4] Xiao S-S (肖胜生), Dong Y-S (董云社), Qi Y-C (齐玉春). Advance in responses of soil organic carbon pool of grassland ecosystem to human effects and global changes. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2009, **24**(10): 1138-1148 (in Chinese)
- [5] Blair GJ, Lefroy RDB, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**: 1459-1466
- [6] Lefroy RDB, Blair C, Strong WM. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, **155/156**: 399-402
- [7] Jiang P-K (姜培坤). Soil active carbon pool under different types of vegetation. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2005, **41**(1): 10-13 (in Chinese)
- [8] Xu M-G (徐明岗), Yu R (于荣), Sun X-F (孙小凤), *et al.* Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index of the typical soils of China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(4): 459-465 (in Chinese)
- [9] Wei X-R (魏孝荣), Shao M-A (邵明安), Gao J-L (高建伦). Relationships between soil organic carbon and environmental factors in gully watershed of the Loess Plateau. *Environmental Science* (环境科学), 2008, **29** (10): 2879-2884 (in Chinese)
- [10] Xu M-G (徐明岗), Yu R (于荣), Wang B-R (王伯仁). Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(5): 723-729 (in Chinese)
- [11] Blair GJ, Lefroy RDB, Singh BP, *et al.* Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate// Cadisch G, Giller KE, eds. *Drive by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. Wallingford, CT: CAB International, 1997: 273-281
- [12] Manjaish KM, Voroney RP, Sen U. Soil organic carbon stocks, storage profile and microbial biomass under different crop management systems in a tropical agricultural ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **32**: 273-278
- [13] Huang Z-S (黄宗胜), Yu L-F (喻理飞), Fu Y-H (符裕红). Characteristics of soil mineralizable carbon pool in natural restoration process of Karst forest vegetation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(8): 2165-2170 (in Chinese)
- [14] Bradley RL, Fyles JW. A kinetic parameter describing soil available C and its relationship to rate increase in C mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27**: 167-172
- [15] Li L (李琳), Li S-J (李素娟), Zhang H-L (张海林), *et al.* Study on soil C pool management index of conservation tillage. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20**(3): 106-109 (in Chinese)
- [16] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 33 (in Chinese)
- [17] Miao S-J (苗淑杰), Zhou L-R (周连仁), Qiao Y-F (乔云发), *et al.* Organic carbon mineralization and carbon contribution in aggregates as affected by long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2009, **46**(6): 1068-1075 (in Chinese)
- [18] Xiao X-P (肖小平), Tang H-T (汤海涛), Ji X-H (纪雄辉). Effect of patterns of straw returning to field on contents of available N, K in soil and the later rice growth. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2008, **34**(8): 1464-1469 (in Chinese)
- [19] Jiang S-N (蒋邵农), Liu C-T (刘传桃), Chen Q (陈琦), *et al.* Influence of straw return to field on soil fertility and the rice production. *Hunan Agricultural Sci-*

ences (湖南农业科学), 2001 (2): 29–30 (in Chinese)

[20] Ye W-P (叶文培), Xie X-L (谢小立), Wang K-R (王凯荣), *et al.* Effects of rice straw manuring in different periods on growth and yield of rice. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2008, **22**(1): 65–70 (in Chinese)

[21] Wang X-D (王玄德), Shi X-J (石孝均), Song G-Y (宋光煜). Effects of long-term rice straw returning on the fertility and productivity of purplish paddy soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(3): 302–307 (in Chinese)

[22] Tan Z-J (谭周进), Li Q (李 倩), Chen D-L (陈冬林). On the effect of rice straw returning to the field on microbes and enzyme activity in paddy soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(10): 3385–3392 (in Chinese)

[23] Hong C-L (洪春来), Wei Y-Z (魏幼璋), Huang J-F (黄锦法). Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment. *Journal of Zhejiang University* (Agriculture and Life Sciences) (浙江大学学报·农业和生命科学版), 2003, **29**(6): 627–633 (in Chinese)

[24] Tuyen TQ, Tan PS. Effect of straw management, tillage practice on soil fertility and grain yield of rice. *Omon-rice*, 2001, **9**: 74–78

[25] Wu J-M (吴家梅), Ji X-H (纪雄辉), Peng H (彭华), *et al.* Carbon sequestration effects of rice straw return in double season paddy field in Southern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(12): 3196–3202 (in Chinese)

[26] Zeng Y-H (曾研华), Wu J-F (吴建富), He H (何虎), *et al.* Effect of mechanized total returning of straw to field on growth, yield and quality of early rice. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2011, **33**(5): 840–844 (in Chinese)

[27] Pan GX, Li LQ, Wu LS. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China’s paddy soils. *Global Change Biology*, 2003, **10**: 79–92

[28] Chen S-H (陈尚洪), Zhu Z-L (朱钟麟), Liu D-H (刘定辉), *et al.* Influence of straw mulching with no-tillage on nutrients and carbon pool management index. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(4): 806–809 (in Chinese)

[29] Shen H (沈 宏), Cao Z-H (曹志洪), Xu Z-H (徐志红). Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2000, **37**(2): 166–173 (in Chinese)

[30] Liu T-X (刘天学), Ji X-E (纪秀娥). Effects of crop straw burning on soil organic matter and soil microbes. *Soils* (土壤), 2003, **35**(4): 347–348 (in Chinese)

作者简介 吴建富,男,1967 年生,博士,副教授.主要从事水稻高产理论与土壤肥料研究,发表论文 60 多篇. E-mail: wjf6711@126.com

责任编辑 张凤丽