植物营养与肥料学报 2017, 23(1): 27–35
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.16092
http://www.plantnutrifert.org

秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响

袁嫚嫚[1,2,3]，邬 刚[1]，胡 润[4]，孙义祥[1*]
（1 安徽省养分循环与资源环境省级实验室/安徽省农业科学院土壤肥料研究所，安徽合肥 230031；
2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室/中国科学院南京土壤研究所，江苏南京 210008；
3 中国科学院大学，北京 100049；4 贵池市贵池区农业技术推广中心，安徽池州 247100）

摘要:【**目的**】水稻–油菜轮作是我国重要的农业种植模式。秸秆还田是目前我国秸秆利用最主要、最直接的途径。因此，研究水稻–油菜轮作系统下，秸秆还田配施化肥对水稻和油菜产量、土壤有机质组分及其养分含量的影响，有助于提高水稻和油菜产量，培肥土壤，推进秸秆还田技术的应用。【**方法**】通过水稻和油菜 7 年 13 季作物的田间定位小区试验，设置了不施氮肥不还田处理 (CK) 、农民习惯处理 (FPP) 和 3 个秸秆还田配施化肥处理 (SF1、SF2、SF3：每年水稻秸秆以 3000 kg/hm^2 的量还田，配施不同量氮、磷、钾肥)，分析了各处理土壤有机碳及其组分、土壤养分含量、作物产量和经济效益。【**结果**】与不施氮肥处理比较，秸秆还田配合氮、磷、钾平衡施肥能显著提高土壤总有机碳及其各组分、土壤养分含量、作物产量和经济效益。与农民习惯处理相比，秸秆还田配施化肥处理土壤总有机碳、胡敏酸和胡敏素分别显著增加了 5.62%～12.08%、9.05%～22.57% 和 7.93%～10.23%，而水溶性有机碳和富里酸含量差异则不明显；土壤全氮、有效磷和速效钾含量分别显著提高了 6.74%～14.04%、134.67%～249.46% 和 40.18%～70.54%；水稻、油菜和周年平均产量分别增加了 8.55%～19.34%、19.06%～27.27% 和 10.34%～24.08%；净利润提高了 1651～4905 yuan/hm^2，但总投入增加了 1427～2882 yuan/hm^2。秸秆还田配施化肥处理中，以氮、磷、钾肥用量与运筹次数最多的 SF3 处理土壤各项指标、作物产量和经济效益最高，与之相比，SF2 处理在水稻和油菜两季共减少肥料用量 255 kg/hm^2，而作物周年产量减少不明显。土壤有机碳组分、土壤养分含量及作物产量之间有较好的相关性，而逐步回归分析表明，土壤总氮、胡敏酸、水溶性有机碳含量是水稻和油菜产量主要决定因素。【**结论**】秸秆还田配施化肥可以提高土壤有机碳、胡敏酸、胡敏素含量及土壤养分含量，培肥土壤并提高其稳定性，促进作物增产。虽然秸秆还田配施化肥增加了人工和肥料投入，但适宜的化肥用量配合秸秆还田提高了水稻油菜轮作体系的经济效益。

关键词: 秸秆还田；有机碳组分；土壤养分；水稻油菜轮作；产量

Effects of straw returning plus fertilization on soil organic carbon components and crop yields in rice-rapeseed rotation system

YUAN Man-man[1,2,3], WU Gang[1], HU Run[4], SUN Yi-xiang[1*]
(*1 Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment of Anhui / Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture / Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 Guichi Agricultural Technology Popularization Center, Chizhou, Anhui 247100, China*)

Abstract:【**Objectives**】Rice-rapeseed rotation is one of the main rotation systems in China, in which large amounts of fertilizer are applied. Straw return is the most direct way to use straw in China. Therefore, studying the proper way of combined use of straw and chemical fertilizer will be beneficial to increase rice and rape yields,

收稿日期：2016–03–09　　**接受日期**：2016–08–31
基金项目：公益性行业（农业）科研专项（201303103）；安徽省农业科学院科技创新团队（13C1008）；安徽省科技厅项目（1406c085025）资助。
作者简介：袁嫚嫚（1983—），女，安徽宿州人，博士研究生，助理研究员，主要从事生态环境与农业资源研究。E-mail：mmyuan@issas.ac.cn。* 通信作者 E-mail：sunyixiang@126.com

improve soil fertility, and promote application of the straw return technology with fertilizers in the lower Yangtze region. 【**Methods**】A field experiment was conducted consecutively for seven-years and 13 seasons in Anhui Province. Five treatments were designed including no nitrogen fertilizer no straw returning (CK), only chemical fertilizer application without straw returning as farmer's practice pattern (FPP) and three levels of fertilizer application plus rice straw return of 3000 kg/hm^2 (SF1, SF2 and SF3). The contents of soil total organic carbon (TOC) and its components, the crop yields and net benefits in rice-rapeseed rotation fields were investigated. 【**Results**】Compared with the FPP, treatments of SF1, SF2 and SF3 increased the contents of TOC, humilic acid carbon and humin carbon by 5.6%–12.1%, 9.0%–22.6% and 7.9%–10.2%, respectively, increased the contents of total nitrogen, available phosphorus and available potassium by 6.7%–14.0%, 134.7%–249.5% and 40.2%–70.5%, not increase the contents of water-soluble organic carbon and fulvic acid carbon. The average yields of rice and rapeseed and the total yields of the two seasons were increased by 8.6%–19.3%, 19.1%–27.3% and 10.3%–24.1%, and the net profit and cost were increased by 1651–4905 and 1427–2882 yuan/hm^2. The highest contents of soil organic carbon components, nutrients and crop yields were observed in the SF3, however, there was no significant difference in the yields of rice and rapeseed between SF3 and SF2 with reducing the amount of fertilizer 255 kg/hm^2. The relationships among the soil organic carbon components, nutrient contents and crop yields were significant or extremely significant. The stepwise regression analysis showed that soil total N, humic acid and water soluble organic carbon content were the key factors determining the yields of rice and rapeseed. 【**Conclusions**】NPK fertilizers plus straw returning are effective to increase soil total carbon accumulation and soil fertility, improve the crop yields. In spite of higher inputs in labor and fertilizers, the straw returning plus proper fertilizer application rate is still profitable in rice and rapeseed rotation system.

Key words: straw return; organic carbon component; soil nutrition; rice-rapeseed rotation; yield

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标，也是影响土壤稳定性和生产力的重要因素之一[1–2]。秸秆还田是农田土壤有机碳重要的来源[3]。秸秆还田不仅可以减少因秸秆焚烧而产生的温室气体[4]，还能为土壤中的微生物提供丰富的碳源，刺激微生物活性，提高土壤肥力[5]，被认为是一种有效的农田培肥措施，也是秸秆资源利用中最经济且可持续的方式。但是，由于秸秆主要由纤维素、半纤维素和木质素组成，自然状态下难以被微生物分解[6]。研究表明，微生物分解秸秆时需要吸收一定量的氮素[7]，从而与作物争氮，影响苗期生长，进而影响后期产量。同时，单施化肥一定程度上促进作物生长，增加输入土壤的根系及根系分泌物，进而影响土壤有机质[8–10]。由于土壤有机碳处在不断的矿化与腐殖化的过程中，有时这两个过程同时存在[6]，而不同的化肥养分配比、秸秆还田的加入则使土壤有机碳组分转化及积累变得更加复杂[11–12]。

近年来许多学者从不同角度对秸秆还田条件下土壤养分、酶活性和土壤微生物数量进行了一系列的研究[6, 13–16]，但对水稻–油菜轮作系统下，秸秆还田配施化肥，土壤有机碳组分及其养分和作物产量的系统性研究较少。因此，通过田间定位试验研究水稻秸秆配合氮、磷、钾平衡施肥对水稻和油菜产量、土壤有机质组分及其养分含量的影响，从而揭示秸秆的腐解、土壤性质变化过程，为探索适宜当地生产的施肥措施，完善该地区秸秆还田技术及培肥土壤提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验于 2009 年至 2015 年在安徽省池州市贵池区万子村进行 (30°50′ N、117°33′ E)。土壤类型为棕红壤，0—20 cm 土壤基本理化性质：pH 5.55、全氮 1.69 g/kg、全磷 0.59 g/kg、全钾 20.44 g/kg、有机碳 15.42 g/kg、碱解氮 160.15 mg/kg、速效钾 83.23 mg/kg、有效磷 6.08 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置 5 个处理，分别为 CK，不施氮肥，水稻秸秆不还田；FPP，当地农民习惯处理，水稻秸秆不还田；SF1，根据测定土壤养分含量，比 FPP 减少稻季氮肥用量，增加了稻季和油菜季磷、钾肥用量，水稻秸秆还田 3000 kg/hm^2；SF2，在 SF1 的基础上，增加了稻季氮、磷、钾肥用量，油菜季肥料

用量未调整；SF3，在 SF2 的基础上，增加了稻季和油菜季氮、磷、钾肥用量。水稻季和油菜季各处理的磷肥均作为基肥一次施入，氮、钾肥进行运筹，各处理施肥详细方案见表 1。每个小区 4 次重复，小区面积 40 m^2，随机区组排列。

水稻每年 6 月 10 日左右移栽，10 月 10 日左右收获。栽插密度为 26.2 万穴/hm^2。油菜每年 10 月 20 日左右移栽，次年 5 月 20 日左右收获。自 2009 年至 2015 年水稻和油菜品种见表 2。秸秆还田方式为人工切碎，分小区撒施于田间，人工翻耕，均混。水稻秸秆每年都还田，还田量为 3000 kg/hm^2，油菜秸秆不还田。水稻秸秆的 N、P、K 和有机碳平均含量分别为 5.8、0.9、26.5 和 402.5 g/kg，每年通过水稻秸秆还田，分别向土壤增施 N、P、K 和 C 为 17.4、2.7、79.5 和 1207.5 kg/hm^2。供试肥料品种分别为普通尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P_2O_5 12%)、氯化钾 (含 K_2O 60%)、硼砂 (含 B 11%) 和水稻秸秆。除草、病虫害防治等同当地常规管理。

表 1　不同处理作物施肥时期及养分投入量 (kg/hm^2)

Table 1　Nutrient input in different growing stage of the treatment

处理 Treatment	水稻 Rice					油菜 Rapeseed			
	总施肥量 Total input ($N–P_2O_5–K_2O$)	基肥 Basal ($N–K_2O$)	分蘖肥 Tillering (N)	穗肥 Bolting ($N–K_2O$)	粒肥 Spikelet (N)	总施肥量 Total input ($N–P_2O_5–K_2O$ + B + Straw)	基肥 Basal ($N–P_2O_5–K_2O$)	越冬肥 Over winter ($N–K_2O$)	苔肥 Bolting ($N–K_2O$)
CK	0–60–90	0–90	0	0–0	0	0–120–120 + 0 + 0	0–120–60	0–30	0–30
FPP	240–45–60	150–60	90	0–0	0	180–45–45 + 0 + 0	120–45–45	60–0	0–0
SF1	195–60–90	60–90	75	60–0	0	180–120–120 + 15 + 3000	90–120–75	90–45	0–0
SF2	210–90–135	60–75	75	45–60	30	180–120–120 + 15 + 3000	90–120–60	45–30	45–30
SF3	255–105–150	120–75	90	60–60	30	240–150–120 + 15 + 3000	120–150–105	75–75	45–30

表 2　试验不同年份作物及品种

Table 2　Crop and cultivars used in the experiment in different years

作物 Crop	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
水稻 Rice	新两优 6 号 Xinliangyou 6	新两优 6 号 Xinliangyou 6	新两优 6 号 Xinliangyou 6	新两优 6 号 Xinliangyou 6	新两优 6 号 Xinliangyou 6	新两优 6 号 Xinliangyou 6	徽两优 630 Weiliangyou 630
油菜 Rapeseed		德油 5 号 Deyou 5	德油 5 号 Deyou 5	德油 5 号 Deyou 5	华协 102 Huaxie 102	凯油 4 号 Kaiyou 4	沣油 737 Bangyou 737

注（Note）：年份是指油菜收获时所处的年份 Rapeseed year refers to the harvest time of the year.

1.3　采样及测定方法

小区按面积平均分为两部分，其中一部分用于成熟期收获测实产，并风干折算含水量。2015 年 5 月 19 日油菜收获后，各小区用 5 点法取 0—20 cm 土壤样品，混合均匀，带回实验室后，剔除砂石和根系等杂物，避光风干，磨碎，用于测定土壤养分及有机碳组分。

土壤总氮、总磷、总钾、碱解氮、有效磷、速效钾和总有机碳参见《土壤农化分析》[16]：全氮用半微量开氏定氮法；总磷用 $HClO_4$ 和 H_2SO_4 的混酸消煮—钼锑抗比色；全钾用 HF 和 $HClO_4$ 消煮—火焰光度法；碱解氮用扩散法测定；有效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色；速效钾用 1 mol/L NH_4OAc 浸提—火焰光度法；总有机碳用重铬酸钾容量法。土壤有机碳组分水溶性有机碳、富里酸、胡敏酸和胡敏素提取根据 Kumada 方法[17]，但进行了修改[17]，各组分有机碳用 TOC 仪 (德国耶拿 Multi N/C 2100) 测定。

1.4　经济效益计算和数据统计分析

2015 年安徽省水稻和油菜籽市场收购价格分别为 2.8 和 4.4 yuan/kg，氮肥 (N) 3.48 yuan/kg，磷肥 (P_2O_5) 4.17 yuan/kg，钾肥 (K_2O) 3.5 yuan/kg，硼砂 16 yuan/kg，劳动力的日工资 100 yuan，人工秸秆还田费用 900 yuan/hm^2[18]。根据目前实际情况，稻草不计算成本。本研究涉及的经济效益均根据以上价格进行计算。

应用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行数据处理和统计分析。处理间比较采用 One-way ANOVA 分析，差异显著性分析用 Duncan 法，相关性分析采用 Pearson 双侧显著检验和逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥措施对土壤有机碳组分的影响

由表 3 可知，秸秆还田下，不同施肥措施显著影响土壤总有机碳及其组分含量。与 CK 比较，FPP 增加了土壤总有机碳含量，但差异不显著，而秸秆还田配施化肥处理 (SF1、SF2、SF3) 显著增加了土壤总有机碳，其中 SF3 处理增幅最大，为 13.99%。同样，秸秆还田配施化肥处理比 FPP 处理显著提高了土壤总有机碳，增幅达 5.62%～12.08%。

秸秆还田下，不同施肥措施土壤有机碳组分水溶性有机碳、富里酸、胡敏酸和胡敏素含量与土壤总有机碳含量的结果趋势相似。秸秆还田配施化肥处理土壤有机碳各组分含量显著高于 CK，且秸秆还田配施化肥处理胡敏酸和胡敏素含量显著高于 FPP，而秸秆还田配施化肥处理间各有机碳组分含量表现为 SF3 > SF2 > SF1 的趋势，仅胡敏酸含量 SF3 处理显著高于 SF2 和 SF1 处理，其他组分含量差异不显著。

胡敏酸与富里酸的比值 HA/FA 常用来表示腐殖质聚合程度，因此，HA/FA 某种程度上反映土壤有机质稳定性，一般认为 HA/FA 越大，土壤有机碳越稳定，腐殖质品质越好。秸秆还田后 HA/FA 有增加的趋势，SF3 处理的 HA/FA 最大，比 CK 和 FPP 处理的增加达到了显著水平，分别为 16.54% 和 12.92%。表明秸秆还田合理配施化肥有利于提高土壤腐殖质含量及品质。

2.2 不同施肥措施对土壤养分的影响

由表 4 可见，与 CK、FPP 处理相比，秸秆还田配施化肥处理显著提高了土壤全氮、有效磷和速效钾含量。不施氮肥处理 (CK) 土壤全氮和碱解氮含量较其他处理分别下降了 9.20%～24.54% 和 10.64%～24.05%。由于土壤本底有效磷和速效钾含量仅分别为 6.08 和 83.23 mg/kg，FPP 处理水稻季和油菜季磷、钾肥施肥量较其他处理少，又无秸秆还田补充作物吸收的磷、钾，造成该处理有效磷和速效钾含

表 3 不同施肥措施下土壤有机碳组分及其含量 (g/kg)

Table 3 Contents and components of soil organic carbon affected by straw and fertilizer application

处理 Treatment	总有机碳 TOC	水溶性有机碳 WSOC	富里酸 Fulvic acid	胡敏酸 Humic acid	胡敏素 Humin	胡敏酸/富里酸 Humic/Fulvic
CK	15.22 ± 0.21 c	0.33 ± 0.02 c	4.58 ± 0.17 b	1.98 ± 0.06 d	8.53 ± 0.27 b	0.43 ± 0.01 bc
FPP	15.48 ± 0.14 c	0.39 ± 0.02 bc	5.07 ± 0.16 a	2.26 ± 0.11 c	8.70 ± 0.15 b	0.44 ± 0.01 bc
SF1	16.52 ± 0.63 ab	0.41 ± 0.01 ab	5.18 ± 0.40 a	2.47 ± 0.12 b	9.39 ± 0.38 a	0.48 ± 0.05 ab
SF2	16.35 ± 0.66 b	0.44 ± 0.05 a	5.29 ± 0.49 a	2.54 ± 0.07 b	9.40 ± 0.31 a	0.48 ± 0.05 ab
SF3	17.35 ± 0.82 a	0.45 ± 0.03 a	5.51 ± 0.20 a	2.77 ± 0.11 a	9.59 ± 0.14 a	0.50 ± 0.01 a

注（Note）：TOC—Total organic carbon; WSOC—Water soluble organic carbon; 同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

表 4 不同施肥措施对土壤养分含量的影响

Table 4 Contents of soil nutrients affected by straw returning and nutrient input

处理 Treatment	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	全钾 (g/kg) Total K	碱解氮 (mg/kg) Hydrolyzable N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
CK	1.63 ± 0.08 d	0.69 ± 0.10 b	21.81 ± 1.05 b	156.60 ± 5.26 b	22.17 ± 2.35 b	110.80 ± 4.14 c
FPP	1.78 ± 0.04 c	0.71 ± 0.06 b	22.36 ± 0.52 ab	173.27 ± 11.86 ab	10.21 ± 2.31 c	88.60 ± 4.83 d
SF1	1.95 ± 0.05 ab	0.70 ± 0.08 b	22.99 ± 1.16 ab	186.88 ± 18.29 a	23.96 ± 0.49 b	124.20 ± 1.01 b
SF2	1.90 ± 0.06 b	0.72 ± 0.08 b	22.75 ± 0.04 ab	182.80 ± 12.08 a	24.30 ± 1.37 b	126.20 ± 8.11 b
SF3	2.03 ± 0.06 a	0.86 ± 0.07 a	23.60 ± 0.73 a	194.26 ± 11.23 a	35.68 ± 1.34 a	151.10 ± 11.66 a

注（Note）：同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

量显著低于其他处理。3 个秸秆还田配施化肥处理中，SF3 处理土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量最高，SF1 和 SF2 处理之间差异则不明显。

2.3　不同施肥措施对作物产量的影响

由表 5 可知，秸秆还田合理配施氮、磷、钾肥可以显著提高水稻、油菜及其周年产量。2009 年至 2015 年各处理水稻平均产量由低到高顺序为 CK、FPP、SF1、SF2、SF3。与 CK 和 FPP 处理相比，秸秆还田配施化肥处理水稻平均产量分别增加 45.92%～60.43% 和 8.55%～19.34%。在 7 季水稻试验，秸秆还田配施化肥处理中，SF3 处理水稻产量最高，显著高于 SF1 处理，而与 SF2 处理比较，除 2012 年和 2013 年有显著差异外，其他年份差异不明显，但水稻季比 SF2 处理增加了化肥用量 75 kg/hm^2。表明秸秆还田下，增加肥料用量，并不能达到显著增产的目的。

与水稻产量结果相似，秸秆还田、平衡施肥能显著增加油菜产量。6 季油菜各处理平均产量结果为 CK < FPP < SF1 < SF2 < SF3。与 CK 和 FPP 相比，秸秆还田配施化肥处理油菜平均产量分别增加 131.48%～186.34% 和 19.06%～27.27%，增幅高于水稻平均产量。6 季油菜试验秸秆还田配施化肥的 3 个处理中，SF3 处理产量最高，显著高于 SF1 处理，与 SF2 处理的差异仅于 2010 年和 2013 年达显著水平，其他差异不显著。但 SF1 处理和 SF2 处理油菜季施肥总量相同，均比 SF3 处理减少了 180 kg/hm^2，但因 SF2 处理对肥料的施用进行了合理的运筹，油菜产量未比 SF3 处理显著减少。

7 年试验的水稻和油菜周年产量结果，与水稻和油菜产量趋势相似，表现为 CK < FPP < SF1 < SF2 < SF3。秸秆还田配施化肥处理周年平均产量分别比 CK 和 FPP 处理增加了 55.94%～75.36% 和 10.34%～24.08%。SF3 处理比 SF2 处理周年肥料用量增加了 255 kg/hm^2，但周年产量仅增加了 3.83%。

2.4　不同施肥措施对作物经济效益的影响

与对照 CK 相比，秸秆还田各施肥处理大幅提高了水稻、油菜及其周年的经济效益 (表 6)。各处理的产值明显高于农民习惯处理，其中 SF3 处理在水稻、油菜及其周年的产值最高，SF2 处理次之。不同处理成本有较大差别，FPP 处理因施肥量小、施肥次数少、无秸秆还田用工投入少，故成本相对较

表 5　不同施肥措施对作物产量的影响 (kg/hm^2)

Table 5　Rice and rapeseed yields affected by straw returning and fertilization

作物 Crop	处理 Treatment	年份 Year							平均 Average
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
水稻 Rice	CK	5462 ± 398 d	6202 ± 316 d	6057 ± 227 d	6224 ± 456 d	6313 ± 125 d	6722 ± 161 d	6452 ± 102 e	6163
	FPP	8423 ± 123 c	6991 ± 376 c	7970 ± 158 c	8211 ± 633 c	9044 ± 109 c	9073 ± 72 c	9464 ± 76 d	8285
	SF1	8981 ± 403 b	7883 ± 320 b	9070 ± 351 b	9024 ± 131 b	9594 ± 75 b	9409 ± 68 b	10078 ± 138 c	8993
	SF2	9782 ± 153 a	8222 ± 190 ab	9944 ± 276 a	9345 ± 330 b	9725 ± 281 b	10349 ± 81 a	10913 ± 91 b	9561
	SF3	9929 ± 296 a	8630 ± 206 a	10279 ± 256 a	10223 ± 347 a	10019 ± 55 a	10242 ± 27 a	11103 ± 48 ab	9887
油菜 Rapeseed	CK		487 ± 42 e	764 ± 58 d	1306 ± 69 d	724 ± 44 e	1067 ± 33 d	1139 ± 115 d	915
	FPP		1132 ± 183 d	1919 ± 43 c	1944 ± 70 c	1779 ± 100 d	2341 ± 222 c	1557 ± 49 c	1779
	SF1		1607 ± 49 c	2154 ± 72 b	2181 ± 66 b	1981 ± 46 c	2896 ± 101 b	1890 ± 64 b	2118
	SF2		1964 ± 129 b	2773 ± 64 a	2819 ± 72 a	2314 ± 117 b	3013 ± 36 ab	2019 ± 55 a	2484
	SF3		2200 ± 90 a	2848 ± 43 a	2869 ± 43 a	2589 ± 64 a	3134 ± 143 a	2079 ± 85 a	2620
周年 Two seasons	CK		6689 ± 309 e	6821 ± 230 e	7531 ± 408 e	7036 ± 136 e	7789 ± 193 e	7591 ± 86 e	7243
	FPP		8123 ± 222 d	9888 ± 188 d	10155 ± 691 d	10823 ± 185 d	11414 ± 259 d	11021 ± 121 d	10237
	SF1		9490 ± 275 c	11224 ± 414 c	11205 ± 170 c	11575 ± 116 c	12305 ± 151 c	11968 ± 130 c	11295
	SF2		10186 ± 279 b	12717 ± 248 b	12164 ± 366 b	12039 ± 282 b	13361 ± 68 b	12931 ± 155 b	12233
	SF3		10830 ± 213 a	13127 ± 291 ab	13091 ± 307 a	12608 ± 45 a	13377 ± 146 ab	13182 ± 195 a	12702

注（Note）：同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level.

表 6 不同施肥措施下作物经济效益分析 (yuan/hm^2)

Table 6 Economy benefit of rice and rapeseed compared with CK under different straw and fertilizer treatments

作物 Crop	处理 Treatment	产值 Output	比对照增加 Increase	增加支出 Increased cost			净利润 Net profit
				肥料 Fertilizer	用工 Labor	总计 Total	
水稻 Rice	CK	17257					
	FPP	23199	5942	668	100	768	5174
	SF1	25181	7924	679	200	879	7045
	SF2	26771	9514	1014	300	1314	8201
	SF3	27683	10426	1285	300	1585	8841
油菜 Rapeseed	CK	4024					
	FPP	7826	3802	52	–100	–48	3851
	SF1	9320	5296	867	800	1667	3629
	SF2	10928	6904	867	900	1767	5137
	SF3	11527	7503	1516	900	2416	5088
周年 Two seasons	CK	21281					
	FPP	31025	9744	719	0	719	9024
	SF1	34501	13220	1546	1000	2546	10675
	SF2	37699	16418	1880	1200	3080	13338
	SF3	39211	17930	2801	1200	4001	13929

低，而秸秆还田配施化肥处理由于施肥量或追肥次数增加，及人工秸秆还田费用增加，导致总成本相应提高。扣除成本后，SF3 处理在水稻、油菜及其周年的净利润最高，但周年净利润仅比 SF2 处理增加了 591 yuan/hm^2，而 SF3 处理比 SF2 处理周年肥料投入增加了 921 yuan/hm^2，因此，SF2 处理不仅节约了肥料，而且从产投比平衡角度，获得了较好的经济效益。

2.5 不同施肥措施下土壤有机碳组分、土壤养分及产量的相关性

土壤总有机碳含量与富里酸、胡敏酸、胡敏素含量极显著相关，但与水溶性碳含量相关性不显著(表 7)。不同组分有机碳间呈显著或极显著相关，相关性系数为 0.497～0.778。表明土壤总有机碳可以较好地反映土壤有机碳组分的变化。

土壤总有机碳及其组分含量与土壤总氮、总钾、碱解氮、速效钾含量表现为显著或极显著相关。土壤有效磷含量与土壤总有机碳、胡敏酸、胡敏素含量显著相关，但与分子量相对小的水溶性有机碳和富里酸含量相关性不显著，可能与水溶性有机碳和富里酸易于被微生物分解或转化成其他有机碳组分有关。

表 7 土壤不同组分有机碳、土壤养分及产量之间的相关性

Table 7 Relationships among soil organic carbon, nutrients and the yields

项目 Item	TOC	WSS	富里酸 FA	胡敏酸 HA	胡敏素 HM	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Hydro. N	有效磷 Avail.P	有效钾 Avail.K	水稻产量 Rice yield	油菜产量 Rapeseed yield
TOC	1	0.402	0.600**	0.741**	0.713**	0.701**	0.545*	0.702**	0.829**	0.716**	0.860**	0.737**	0.750**
WSS	0.402	1	0.497*	0.778**	0.622**	0.588**	0.189	0.515*	0.494*	0.348	0.458*	0.790**	0.792**
HM	0.713**	0.622**	0.651**	0.761**	1	0.804**	0.527*	0.696**	0.787**	0.603**	0.681**	0.785**	0.808**
HA	0.741**	0.778**	0.738**	1	0.761**	0.858**	0.417	0.696**	0.766**	0.603**	0.700**	0.926**	0.924**
FA	0.600**	0.497*	1	0.738**	0.651**	0.707**	0.507	0.575**	0.598**	0.358	0.484*	0.739**	0.723**

注（Note）：TOC—总有机碳 Total organic carbon; WSS—水溶性有机碳 Water soluble carbon; * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著 Indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

土壤总有机碳及其组分含量与水稻和油菜产量均呈极显著相关，相关系数分别为 0.736～0.926 和 0.723～0.924。经逐步回归分析，土壤总有机碳含量 = 0.371 × 全氮 + 0.398 × 碱解氮 + 0.293 × 有效磷，可以认为土壤总氮、碱解氮和有效磷含量与土壤总有机碳含量关联度较大。水稻产量 = 0.446 × 胡敏酸 + 0.515 × 全氮 – 0.214 × 有效磷 + 0.214 × 水溶性有机碳，油菜产量 = 0.330 × 胡敏酸 + 0.442 × 全氮 + 0.275 × 水溶性有机碳，表明水稻和油菜产量与胡敏酸、土壤总氮、水溶性有机碳含量关联度较高。不同的是，水稻产量与土壤有效磷含量关联度较高，油菜产量则与其关联度不强。

3　讨论

3.1　秸秆还田配施化肥提高土壤有机碳含量

7 年定位试验结果表明，土壤有机碳及其组分含量因施肥措施不同而有所差异。与试验开始前相比，不施氮肥处理土壤有机碳含量略有下降，农民习惯处理土壤有机碳含量略有增加，秸秆还田配施化肥处理土壤有机碳含量增加明显。不施氮肥处理氮肥缺失，导致水稻和油菜地上和根系生物量减少，地上部凋落物、根系及其分泌物进入土壤的量大大降低，有机碳的积累慢于其分解速率[8, 10]，造成了不施氮肥处理土壤有机碳含量下降的趋势。农民习惯处理虽然仅施化肥，但仍可以促进作物生长，土壤外源输入的有机碳量，超过了微生物对有机碳分解量，因而土壤有机碳含量表现为积累[10]。秸秆还田配施化肥显著提高土壤有机碳含量，原因在于，农民习惯处理，存在重氮肥、轻磷肥、轻钾肥、重基肥轻追肥等不合理的施肥问题[19]，秸秆还田配施化肥处理不仅在秸秆还田的基础上，不同程度调整了氮肥用量及运筹方式，而且根据土壤肥力情况增加了磷肥和钾肥的施用，使氮、磷、钾肥施用更加合理、平衡，从而影响到土壤微生物群落和酶活性，进而制约着土壤矿化和腐殖化的过程[11]。研究表明，秸秆还田配施化肥在使土壤具有较高微生物数量和活性的前提下，并未使矿化作用增强而导致较多的 CO_2 释放[20]。因此，相对于农民习惯处理，秸秆还田配施化肥处理将更有利于土壤腐殖化进程，促进土壤有机碳积累。

3.2　秸秆还田配施化肥影响土壤有机碳组分含量

秸秆还田显著影响了土壤有机碳组分含量及其稳定性。一般认为有机碳组分分子量越大、分子结构越复杂有机质越稳定，胡敏素则是腐殖质中最稳定的部分[1]。与农民习惯处理比较，秸秆还田配施化肥处理显著提高了土壤胡敏酸和胡敏素含量，而土壤水溶性有机碳和富里酸差异不明显。原因可能与水溶性有机碳占土壤有机碳的很少部分，分子量小，可被土壤微生物直接利用有关[6, 21]。富里酸分子量和水溶性有机碳相似，活性大，氧化程度较高，在微生物作用下容易转化为分子量相对较大的胡敏酸[1]。因此，秸秆还田配施化肥处理的胡敏酸与富里酸比值有所增加。此外，土壤的 HA/FA 可以反映土壤的熟化程度及肥力状态，且与土壤肥力呈正相关。初度熟化的水稻土 HA/FA 为 0.2～0.3，中度熟化为 0.5 左右，高度熟化可达 1.4 左右[22–23]。本研究中 HA/FA 为 0.44～0.50，属于中度熟化，而秸秆还田配施化肥使土壤熟化度有所提高，土壤肥力增加。

3.3　秸秆还田技术的推广应用

秸秆还田结合平衡施肥改善了土壤的理化性质，从而提高了作物产量[3, 5]。本研究中经相关性分析，土壤有机碳各组分与土壤养分及作物产量呈不同程度显著或极显著正相关，逐步回归分析表明，土壤总氮、胡敏酸、水溶性有机碳含量与水稻产量和油菜产量相关度较高，土壤总氮、碱解氮和速效磷与土壤总有机碳相关度较大。因此，秸秆还田后，应合理配施氮、磷肥以调节土壤 C/N 比，加速秸秆分解、腐熟过程[6]，否则，会引起C/N比失调，起不到增产的效果。

本研究表明，在水稻–油菜轮作系统下，秸秆还田配施化肥处理水稻、油菜及周年产量最高，与杨帆等[5]和刘世平等[24]研究结果相似。结果显示，SF2 处理在当前生产条件下，可获得较高的作物产量和经济效益。但由科学理论到实践运用，秸秆还田技术的推广应用还有大量工作需要做。

秸秆还田人工投入量大，是影响作物生产成本的最大因素，目前绝大数秸秆还田技术仍是高成本的，带来的增产效益尚不足以抵消其成本支出的增加[25]。农业技术选择主体主要根据自身拥有要素的实际情况并以自身利益最大化为根本出发点决定采用劳动节约型技术还是资源节约型技术[26]。而如何降低农民秸秆还田的投入，是秸秆还田推广应用的关键。平英华等[18]研究表明，手扶式机械秸秆还田比人工秸秆还田节约成本 412 yuan/hm^2，在不同地区政府对机械还田给予 90～150 yuan/hm^2 的财政补贴，可进一步降低秸秆还田成本。本研究中，秸秆还田配施化肥处理比农民习惯处理增加了氮、钾肥施肥次

数，增加了投入成本。孙会峰等[27]利用秸秆与缓释肥配施节约了劳动成本，同时提高了水稻产量，可以认为是降低秸秆还田成本的一种方式。

为将秸秆还田技术落实，应加强的秸秆综合利用措施：通过宣传深化对秸秆资源的认识，提高秸秆利用率；研发大型秸秆还田、旋耕、播种等一体化机械，降低秸秆还田机械成本；研究秸秆还田与一次性施肥和节肥结合技术，降低秸秆还田施肥成本；推行秸秆还田产业化，增加政府补贴力度，补贴机械和农民同时进行；通过制定详尽的环境法，严惩秸秆焚烧等污染环境行为。

4 结论

秸秆还田配施化肥可以提高土壤有机碳、胡敏酸、胡敏素含量及土壤养分含量，培肥土壤。土壤有机碳及其组分与土壤养分、水稻产量和油菜产量相关性较高，而土壤总氮、胡敏酸、水溶性有机碳含量是水稻产量和油菜产量主要决定因素。

秸秆还田配施化肥比农民习惯处理显著提高水稻、油菜和周年产量。N–P_2O_5–K_2O 投入量以水稻 255–105–150、油菜 240–150–120 产量最高。N–P_2O_5–K_2O 投入量水稻 210–90–135、油菜 180–120–120 虽然产量略低，但周年减少了肥料用量 255 kg/hm^2，从经济效益和环境效益方面综合考虑，是本试验处理中较优的施肥方式。

从秸秆还田推广应用角度，N–P_2O_5–K_2O 投入量水稻 210–90–135、油菜 180–120–120 仍需进行优化。

参 考 文 献：

[1] 窦森, 李凯, 崔俊涛, 等. 土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1148–1158.
Do S, Li K, Cui J T, *et al*. Advancement in the study on formation, transformation and structural characteristics of soil humic substances[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(6): 1148–1158.

[2] De C T, Heiling M, Dercon G, *et al*. Predicting soil organic matter stability in agricultural fields through carbon and nitrogen stable isotopes[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 88: 29–38.

[3] 孙卫民, 杨斌娟, 钱海燕, 等. 秸秆还田配施不同配比化肥对晚稻产量及土壤肥力的影响[J]. 农学学报, 2012, 2(12): 16–21.
Sun W M, Yang B J, Qian H Y, *et al*. Effects of returning rice straw to fields with different ratio of fertilizer on rice yield and soil fertility[J]. Journal of Agriculturea, 2012, 2(12): 16–21.

[4] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 337–345.
Guo T F, Liang G Q, Zhou W, *et al*. Effects of fertilizer management on greenhouse gas emissions and nutrient status in paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(2): 337–345.

[5] 杨帆, 董燕, 徐明岗, 等. 南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3040–3044.
Yang F, Dong Y, Xu M G, *et al*. Effects of straw returning on the integrated soil fertility and crop yield in southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 3040–3044.

[6] 徐勇, 沈其荣, 钟增涛, 等. 化学处理和微生物混合培养对水稻秸秆腐解和组分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 59–65.
Xu Y, Shen Q R, Zhong Z T, *et al*. Effect of chemical treatment and microbial incubation on the decomposition and component changes of rice (*Oryza sativa L.*) straw[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(1): 59–65.

[7] 闫德智, 王德建. 添加秸秆对土壤矿质氮量、微生物氮量和氮总矿化速率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 631–636.
Yan D Z, Wang D J. Nitrogen mineralization of ^{15}N labeled straw added into the paddy soils in Tai-hu region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 631–636.

[8] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3496–3504.
Luo Y Q, Zhao X Y, Li M X. Ecological effect of plant root exudates and related affecting factors: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3496–3504.

[9] Murphy C J, Baggs E M, Morley N, *et al*. Rhizosphere priming can promote mobilisation of N-rich compounds from soil organic matter[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 81: 236–243.

[10] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535.
Pan J L, Dai W A, Shang Z H, *et al*. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 526–535.

[11] 夏海勇, 王凯荣, 赵庆雷, 等. 秸秆添加对土壤有机碳库分解转化和组成的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 386–393.
Xia H Y, Wang K R, Zhao Q L, *et al*. Effects of straw addition on decomposition, transformation and composition of soil organic carbon pool[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(4): 386–393.

[12] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371–377.
Hu N J, Han X Z, Yang M F, *et al*. Short -term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 371–377.

[13] 王丹丹, 周亮, 黄胜奇, 等. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 735–740.
Wang D D, Zhou L, Huang S Q, *et al*. Short-term effects of tillage practices and wheat-straw returned to the field on topsoil labile organic carbon fractions and yields in central China[J]. Journal of Agro-environment Science, 2013, 32(4): 735–740.

[14] 马俊永, 陈金瑞, 李科江, 等. 施用化肥和秸秆对土壤有机质含量及性质的影响[J]. 河北农业科学, 2006, 10(4): 44–47.

Ma J Y, Chen J R, Li K J, *et al*. The effect of chemical and organic straw fertilization on the content and properties of soil organic matter[J]. Journal of Hebei Agricultural Science, 2006,10(4): 44–47.

[15] 张四伟. 不同耕作方式与秸秆还田方式对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[D]. 南京：南京农业大学硕士学位论文, 2012.
Zhang S W. The effects of different tillage styles and straw-returning on soil nutrient and carbon pool from rice-wheat rotation fields[D]. Nanjing: MS Thesis of Nanjing Agriculture University, 2012.

[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.
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chimistry[M]. Beijing: China Agricultur Science and Technology Press, 2000.

[17] Kumada K, Sato O, Ohsumi Y, *et al*. Humus composition of maintain soil in central Japan with special reference to the distribution of type humic acid[J]. Soil Science & Plant Nutriton, 1967, 13: 151–158.

[18] 平英华, 彭卓敏, 夏春华. 江苏秸秆机械化还田经济效益分析与财政补贴政策研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 50–54.
Ping Y H, Peng Z M, Xia C H. Study on the economic benefit analysis and financial assistance policy of mechanized straw returning in Jiangsu Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 50–54.

[19] 窦森, 于水强, 张晋京. 不同CO_2浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 458–466.
Dou S, Yu S Q, Zhang J J. Effects of caron dioxide concentration on humus formation in corn stalk decomposition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 458–466.

[20] 李银水, 余常兵, 廖星, 等. 湖北省不同油菜轮作模式下作物施肥现状调查[J]. 中国农学通报, 2012, 28(36): 205–211.
Li S Y, Yu C B, Liao X, *et al*. Investigation of present fertilization on crops by different rapeseed rotation systems in Hubei province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(36): 205–211.

[21] 褚慧, 宗良纲, 汪张懿, 等. 不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 931–939.
Chu H, Zong L G, Wang Z Y, *et al*. Dynamic changes in humus composition in vegetable soils different in cultivation mode[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 931–939.

[22] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 71–75.
Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. Advances in soil water-soluble organic carbon research[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 71–75.

[23] 古小治, 章钢娅, 俞元春, 等. 滨海水稻土腐殖质的组成及随种稻时间演变的研究初报[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 635–640.
Gu X Z, Zhang G Y, Yu Y C, *et al*. Composition of humus in coastal paddy soil and its succession with cultivation age[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(4): 635–640.

[24] 刘世平, 陈庆后, 陈文林, 等. 不同耕作方式与秸秆还田周年生产力的综合评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 82–85.
Liu S P, Chen Q H, Chen W L, *et al*. Comprehensive evaluation of tillage and straw returning on yearly productivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 82–85.

[25] 潘玉才, 钱非凡, 黄卫红, 等. 麦秸还田对水稻生长的影响[J]. 上海农业学报, 2001, 17(1): 59–65.
Pan Y C, Qian F F, Huang W H, *et al*. Effect of returning of wheat stalk to field on growth of rice[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2001, 17(1): 59–65.

[26] 祝华军, 田志宏. 低碳农业技术的尴尬:以水稻生产为例[J]. 中国农业大学学报(社会科学版), 2012, 29(4): 153–160.
Zhu H J, Tian Z H. Analysis on dilemma of low carbon agriculture technology in rice production[J]. Journal of China Agricultural University (Social Sciences Edition), 2012, 29(4): 153–160.

[27] 孙会峰, 周胜, 付子轼, 等. 秸秆与缓释肥配施对水稻产量及氮素吸收利用率的影响[J]. 中国稻米, 2015, 21(4): 95–98.
Sun H F, Zhou S, Fu Z S, *et al*. Effects of application of controlled-release fertilizer combined with wheat straw on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. China Rice, 2015, 21(4): 95–98.