

小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响

张雅洁, 陈 晨, 陈 曦, 常 江, 章力干, 郅红建*

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘 要:通过 4 年田间定位试验, 研究小麦-水稻轮作方式下秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响。试验设置不施秸秆还田对照(CK)、秸秆还田不施肥(S)、秸秆还田+基肥增施 N 肥 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (SF1, C/N=12:1)、秸秆还田+基肥正常 N 肥施用量(SF2, C/N=18:1)、秸秆还田+基肥减施 N 肥 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (SF3, C/N=24:1) 共 5 个处理。结果表明: 与对照处理(CK)相比, 秸秆还田不施肥处理(S)使土壤有机质、全氮和有机氮的含量分别增加 7.8%、10.6% 和 10.9%, 而使土壤中无机氮的含量减少 17.1%; 秸秆还田配施不同化肥处理中, 当碳氮比为 18:1 时, 土壤全氮、有机氮和无机氮含量最高, 分别比对照处理增加 27.2%、27.2% 和 25.7%。元素分析结果显示, 秸秆还田 S、SF1、SF2、SF3 处理土壤全量有机质(SOM)中的碳、氮元素含量均有所增加, 同时 SOM 中的 C/N、H/C 和 O/C 比值都下降。红外光谱结果表明, 秸秆还田 S、SF1、SF2、SF3 处理, 在 $1650 \sim 1640 \text{ cm}^{-1}$ 和 3400 cm^{-1} 处的峰强度增加, 表明土壤有机质中含氮基团、酚羟基、羟基或羧基含量增加; 2920 cm^{-1} 处的吸收峰增强, 表明 SOM 中脂肪族结构增加, 芳香性增强。与对照处理(CK)相比, 秸秆还田不施肥(S)处理的当年水稻产量下降 8.8%; 配施化肥后, SF1、SF2、SF3 处理水稻实际产量分别比对照(CK)处理增加 12.6%、22.7%、19.1%, 且当碳氮比为 18:1 时, 增产效果最为明显; 单独秸秆还田提高了土壤有机质含量, 降低了其碳氮和氢碳比例, 使 SOM 中脂肪族化合物增加, 酰胺结构和芳香性增强, 同时提高了土壤全氮和有机氮的含量, 减少了土壤无机氮含量。

关键词: 秸秆还田; 氮素形态; 土壤有机质; 元素分析; 红外光谱

中图分类号: S158 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)11-2155-07 doi:10.11654/jaes.2015.11.017

Effects of Wheat and Rice Straw Returning on Soil Organic Matter Composition and Content of Different Nitrogen Forms in Soil

ZHANG Ya-jie, CHEN Chen, CHEN Xi, CHANG Jiang, ZHANG Li-gan, GAO Hong-jian*

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Effects of continuous wheat and rice straw returning on the content of different soil nitrogen forms and the composition of soil organic matter(SOM) were investigated in a 4-year field experiment. Five treatments included no straw returning and no fertilizer application (CK), straw returning without fertilizer application(S), straw returning with fertilization 1(SF1, C/N: 12:1), straw returning with fertilization 2(SF2, C/N: 18:1), and straw returning with fertilization 3(SF3, C/N: 24:1). Compared with CK, content of SOM, soil total nitrogen and soil organic nitrogen increased by 7.8%, 10.6% and 10.9%, respectively, whereas soil inorganic nitrogen content decreased by 17.1% in treatment S. The content of soil total nitrogen, organic nitrogen and inorganic nitrogen in the SF2 treatment was 27.2%, 27.2% and 25.7% higher than those in CK, respectively. Straw returning increased C% and N% of SOM and soil organic matter content, but decreased the ratios of C/N, H/C and O/C in SOM. FTIR analysis revealed that the signal intensities of $1650 \sim 1640 \text{ cm}^{-1}$ and 3400 cm^{-1} of straw returning treatments were strengthened, demonstrating that the amounts of nitrogen compounds, alcohols, phenols and carboxylic acids in SOM increased. The strengthened signal intensity at 2920 cm^{-1} indicated an increase in the content of aliphatic compounds in SOM. Compared with CK, rice yields decreased by 8.8% in straw returning treatment with no fertilizer applied(S), but increased by 12.6%, 22.7%, and 19.1% in SF1, SF2, and SF3 treatments, respectively. These findings indicate that wheat and rice straw returning increased the amounts of soil organic mat-

收稿日期: 2015-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(31328020); 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B08, 2012BAD04B09)

作者简介: 张雅洁(1990—), 女, 安徽固镇人, 硕士研究生, 从事养分高效利用研究。E-mail: z1990yj@163.com

* 通信作者: 郅红建 E-mail: gaohongjian2@163.com

ter, soil total nitrogen and soil organic nitrogen, but decreased soil inorganic nitrogen and the ratios of C/N and C/H of SOM. Furthermore, straw returning elevated the content of soil organic nitrogen, such as amides and aromatic nitrogen in SOM, which are ready for crop utilization, while it lowered the amount of soil inorganic nitrogen including NH_4^+ and NO_3^- .

Keywords: straw returning; nitrogen forms; soil organic matter; element analysis; FTIR spectra

我国秸秆资源丰富^[1]。作物秸秆含有纤维素、半纤维素、木质素等含碳化合物,在降解过程中,能显著增加土壤有机质含量,增加土壤肥力^[2]。土壤有机质的主要成分是碳和氮的有机化合物^[3],而且是土壤氮素的主要存在形式,约占全氮 90%以上^[4]。土壤无机态氮,包括速效氮和矿物固定态氮,其中水溶性铵、交换性铵和硝态氮是作物可直接吸收利用的速效氮,而矿物晶格固定态铵则很难被植物直接利用^[5]。土壤有机质和氮素形态及有效性是影响土壤肥力及作物产量的主要因素。

秸秆还田可以增加土壤有机质含量,增大土壤碳库。Potthoff 等^[6]研究认为,秸秆施入土壤可以增加土壤微生物碳,进而增加土壤碳库存;Henriksen 等^[6]报道,小麦秸秆施入土壤中发生激发效应,使土壤中矿物氮的含量显著增加,进而促进秸秆碳的矿化,提高土壤有机碳的含量;陈金等^[7]的研究表明,秸秆还田配施氮肥显著提高氮素利用率和作物产量。然而,也有研究显示,秸秆单独还田使当年作物减产。这可能是由于秸秆本身碳氮比高,导致秸秆降解过程中,微生物需吸收土壤中的无机氮以维持其代谢活动^[8]。汪军等^[9]研究证实,秸秆还田显著降低了土壤铵态氮和硝态氮的含量;赵鹏等^[10]研究表明,秸秆还田处理使土壤 10~30 cm 土层中硝态氮含量下降,降低了耕层土壤氮的有效性;Schmidt-Rohr 等^[11]研究表明,水稻秸秆含有的木质素在厌氧条件下被微生物降解后,木质素芳环上的酚羟基可与土壤中的无机氮(铵态氮)结合,形成苯胺,固定土壤中的无机氮,降低土壤氮的有效性和作物产量。已有的研究多关注秸秆还田对土壤物理性状^[12]、土壤肥力和作物产量^[1]、土壤微生物和酶活性^[13]等方面的影响,但对有关小麦-水稻轮作制度下,秸秆连续还田对土壤有机质组成与不同形态氮素含量和有效性的影响及其机理缺乏深入研究。

红外光谱分析是研究物质组成结构、鉴别有机物的常用方法之一,可以对主要官能团如羧酸、酚、酰胺类物质、酯和饱和及不饱和的碳氢化合物进行定量和定性分析,为研究有机化学物质提供一个灵敏、快捷且低成本的方法。利用红外波谱手段对土壤有机质结

构的分析,从物质结构角度了解土壤碳循环具有十分重要的意义。本试验研究安徽淮河流域小麦-水稻轮作体系中多年田间定位试验中秸秆还田对土壤全氮、有机氮和无机氮含量的影响,利用元素分析和红外光谱方法分析土壤有机碳、元素组成及其官能团的变化规律,旨在阐明秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮素含量的影响及其机理,为沿淮地区秸秆还田后氮肥合理运筹提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验设计

试验在安徽省霍邱县宋店镇(116°3'E, 32°36'N)进行,属亚热带过渡性气候,四季分明,雨水充沛,年降水量在 610~1500 mm 之间,多年平均降雨量 954 mm。无霜期 220 d 左右,平均积温 5623 °C。日照时数全年平均为 2 251.2 h,种植制度为小麦-水稻轮作。供试小麦品种为周麦 23,水稻品种为新两优 6 号。供试土壤为 4 年小麦-水稻秸秆连续还田的水稻土。土壤砂粒(2~0.02 mm)占 28%,粉粒(0.02~0.000 2 mm)占 37%,黏粒(<0.002 mm)占 35%。耕层土壤(0~15 cm)有机质 19.1 g·kg⁻¹,全氮 0.72 g·kg⁻¹,碱解氮 92.6 mg·kg⁻¹,速效磷 22.8 mg·kg⁻¹,速效钾 81.8 mg·kg⁻¹,pH5.6(土水比 1:2.5),CEC 为 13.6 cmol·kg⁻¹。

试验开始于 2009 年 10 月,采用随机区组设计,设置五个处理:不施秸秆不施肥(CK);秸秆还田不施肥(S);秸秆还田+基肥增施 N 肥 45 kg·hm⁻²(SF1, C/N:12:1);秸秆还田+基肥正常 N 肥施用量(SF2, C/N:18:1);秸秆还田+基肥减施 N 肥 45 kg·hm⁻²(SF3, C/N:24:1)。每个处理 3 次重复,小区面积为 30 m²。试验处理各施肥量如表 1。

秸秆还田方式为粉碎(长度为 10 cm 左右)翻耕还田。小麦还田秸秆量为 6600 kg·hm⁻²,水稻还田秸秆量为 3300 kg·hm⁻²。小麦秸秆 C/N 比为 53:1,水稻秸秆 C/N 比为 105:1。秸秆、磷肥、钾肥作为基肥一次性施入,氮肥使用尿素,小麦基肥:拔节肥比例为 7:3,水稻基肥:返青:拔节肥比例为 4:3:3。磷肥选用过磷酸钙(P₂O₅ 12%),钾肥选用氯化钾(KCl 60%)。

表 1 田间小区试验施肥量

Table 1 Fertilizer application rates in experiment

处理 Treatment	小麦施肥量 Fertilizer amounts for wheat/kg·hm ⁻²			水稻施肥量 Fertilizer amounts for rice/kg·hm ⁻²		
	N	P ₂ O ₅	KCl	N	P ₂ O ₅	KCl
CK	—	—	—	—	—	—
S	—	—	—	—	—	—
SF1	240	45	52.5	230	37.5	67.5
SF2	195	45	52.5	185	37.5	67.5
SF3	150	45	52.5	140	37.5	67.5

1.2 样品采集与实验方法

1.2.1 样品采集

在 2013 年 10 月水稻收获后,用土钻在各小区内按“S”法采集耕层土壤(0~15 cm)5 个点混合,风干过筛后待测。

1.2.2 实验方法

土壤有机质采用重铬酸钾氧化-浓硫酸外加热法测定^[14]。土壤全氮测定采用半微量凯氏法^[14]。无机氮含量为铵态氮、硝态氮与亚硝态氮含量之和,有机氮数值采用全氮与无机氮之差法确定。铵态氮采用 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提,靛酚蓝比色法测定^[14],土壤硝态氮和亚硝态氮参考李立平等^[15]的方法浸提,离子色谱法测定(DIONEX ICS-1100)。浸提方法:称取通过 20 目筛的风干土样 5.0 g(精确到 0.001 g)于 100 mL 离心管中,加入 50 mL 超纯水,塞紧瓶塞,在 25 ℃恒温振荡器上振荡 24 h。振荡后在 4000 r·min⁻¹ 下离心 15 min,取上清液。用 0.45 μm 的滤膜过滤上清液,经此处理后的样品等待上机测定。

1.2.3 土壤全量有机质的提取方法

土壤全量有机质(SOM)参照 Skjemstad 等^[16]方法提取。准确称取过 0.2 mm 筛的土壤 5 g 放在 100 mL 离心瓶中,加入 50 mL 浓度为 2%的 HF 溶液,以 120~150 r·min⁻¹ 频率往复或者颠倒式振荡(1 h 5 次;16 h 3 次和 64 h 1 次);每次振荡结束后,在 2000 r·min⁻¹

下离心 10 min,上清液通过 Millipor Durapore(5 μm)滤膜过滤,弃过滤后的上清液;离心瓶内土壤继续重复上述振荡、离心和过滤步骤。提取结束后,离心瓶内土壤用 0.5 mmol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 冲洗 2 至 3 次,把滤膜上的土壤与离心瓶中的土壤合并到锡箔或者铝箔容器中,冷冻干燥后在-40 ℃下保存,备用。

1.2.4 全量有机质的元素组成与红外光谱分析

土壤有机质的元素组成采用德国 Elementar Vario ELcube 型元素分析仪测定,红外光谱特征采用 KBr 压片后用 Nicolet8700 傅立叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer,FTIR,美国热电公司)进行分析,分辨率 4 cm⁻¹,透射模式扫描 32 次。

1.3 数据分析

试验数据统计分析采用 Origin 8.0 和 Excel 2003 软件进行处理和作图。差异显著性检验(ANOVA)采用 SPSS19.0 软件($P<0.05$),多重比较采用 Duncan 法进行分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤不同形态氮含量的影响

与对照处理(CK)相比,单独秸秆还田不施肥(S)处理的土壤全氮和有机氮含量显著增加 10.6%和 10.9%(表 2)。土壤铵态氮含量有所降低,但差异不显著($P<0.05$),土壤硝态氮和无机氮含量分别降低 32.2%和 17.1%,均达显著差异水平($P<0.05$)。

与单独秸秆还田不施肥(S)处理相比,配施不同化肥后,SF1、SF2、SF3 处理的土壤全氮含量分别增加 7.2%、15.0%、9.8%,土壤有机氮含量分别增加 7.1%、14.7%、9.6%(其中以 C/N 比值达到 18:1 时,土壤全氮和有机氮含量最高);土壤铵态氮含量分别增加 9.8%、20.2%、10.1%,土壤硝态氮含量分别增加 28.7%、125.6%、112.8%,土壤无机氮含量分别增加 19.2%、51.7%、38.1%(其中当 C/N 比值达到 18:1 时,

表 2 土壤不同形态氮含量的变化(mg·kg⁻¹)

Table 2 Content of different nitrogen forms under various treatments

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen	有机氮 Organic nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	无机氮 Inorganic nitrogen
CK	720.1±24.58d	713.4±13.04d	3.97±0.06a	2.42±0.06c	6.65±0.02bc
S	796.7±14.10c	791.2±12.11c	3.87±0.21a	1.64±0.01d	5.51±0.28d
SF1	854.3±13.79b	847.7±11.56b	4.25±0.17a	2.11±0.02c	6.57±0.02cd
SF2	915.9±13.45a	907.5±21.60a	4.65±0.07a	3.70±0.22a	8.36±0.22a
SF3	874.7±5.77b	867.1±13.16b	4.26±0.14a	3.49±0.10b	7.61±0.23b

注:铵态氮不包括固定态铵;硝态氮含量中包含亚硝态氮含量;不同字母表示同一采样期处理间差异达到 5%显著水平。下同。

Note: Ammonium nitrogen did not include fixed ammonium; Nitrate nitrogen included nitrite nitrogen; Different letters within a column mean significant difference at 5% level. The same as below.

土壤硝态氮和无机氮含量最高), 均达显著差异水平 ($P<0.05$)。

2.2 秸秆还田对土壤有机质含量及元素组成的影响

2.2.1 土壤有机质含量

图1显示, 与对照处理(CK)相比, S、SF1、SF2、SF3处理的土壤有机质分别增加7.8%、13.2%、16.6%、13.5%。秸秆还田配施化肥后, 当C/N比值达到18:1时, SF2处理的土壤有机质含量增加最为显著, 达到 $22.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较对照处理增加16.6%, 达到显著水平 ($P<0.05$)。这表明秸秆还田或秸秆还田配施化肥都可以提高土壤有机质的含量。

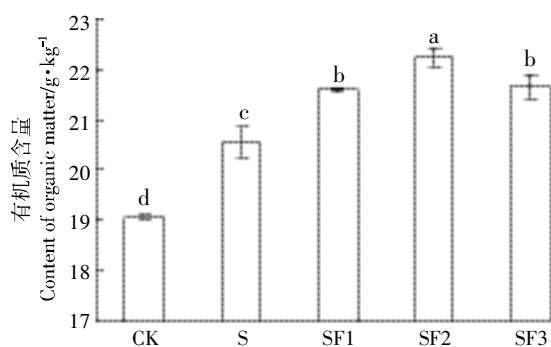


图1 不同处理对土壤有机质含量的影响

Figure 1 Soil organic matter content under different treatments

2.2.2 土壤有机质(SOM)的元素组成

元素组成分析是判断有机质结构和性质最简单、最重要的方法之一, 通过对元素的分析可以判断有机质可能的组成与结构^[17]。秸秆还田各处理土壤SOM的元素组成以碳、氧所占比例相对较大(表3)。与对照处理相比, S、SF1、SF2、SF3处理土壤SOM中C, 分别增加8.1%、6.2%、35.1%、7.0%, H分别增加4.0%、0.6%、17.1%、1.7%; N分别增加14.7%、15.7%、48.0%、16.7%。而SOM中O比对照处理有所降低, 分别降低1.3%、3.0%、7.7%、7.9%。

与对照处理相比, S、SF1、SF2、SF3处理SOM的

表3 不同处理对土壤有机质元素组成的影响
Table 3 Effects of different treatments on elemental composition of SOM

Treatment	元素含量/%				比值		
	C	H	N	O	C/N	O/C	H/C
CK	12.79	1.75	1.02	12.08	12.59	0.94	0.14
S	13.83	1.82	1.17	11.92	11.86	0.86	0.13
SF1	13.58	1.76	1.18	11.72	11.56	0.86	0.13
SF2	17.28	2.05	1.51	11.15	11.41	0.65	0.12
SF3	13.68	1.78	1.19	11.12	11.68	0.81	0.13

C/N比值分别降低5.8%、8.2%、9.4%、7.2%, 其中以SF2(C/N为18:1)处理的最低, 且N与C均增加, 说明有机质中含有较多的含氮官能团。S、SF1、SF2、SF3处理土壤SOM的O/C分别降低8.5%、8.5%、30.9%、13.8%, 其中以SF2处理最低, 且O下降, C上升, 表明土壤SOM氧化度最低, 土壤有机质含有较多的烷氧基和羧基, 有助于腐殖质的稳定^[18]。S、SF1、SF2和SF3处理土壤SOM的H/C比值分别比CK处理降低了7.1%、7.1%、14.3%、7.1%, 其中以SF2处理最低。H/C比值降低, 说明土壤SOM的脂肪族成分在不断增加, 由于脂肪族化合物是较稳定难分解的组分, 意味着土壤有机质的变化朝着更加稳定性的基团转化^[19]。

2.3 土壤有机质(SOM)的红外光谱特性

利用土壤有机质的红外光谱, 可以判断土壤有机质的演变程度^[20-21]。不同试验处理土壤SOM的红外光谱谱形相似, 表明不同秸秆还田处理条件下形成的SOM具有基本一致的结构(图2)。根据红外光谱吸收峰的归属特征^[22-23], 1080 cm^{-1} 处为多糖或类多糖物质的C-O振动, 1540 cm^{-1} 处为氨基化合物N-H的变形振动或C=N的伸缩振动, $1650\sim 1640\text{ cm}^{-1}$ 处为芳香族C=C的骨架振动或醌和氨基化合物的C=O振动, 亦或氢键结合共轭酮的C=O振动, 2920 cm^{-1} 处为 CH_2 的反对称伸缩振动或C-H的对称伸缩振动, 3400 cm^{-1} 为O-H的伸缩振动或氨化物和胺类N-H的伸缩振动。

由表4可知, 与对照处理相比, 秸秆还田不施肥(S)处理与配施不同氮肥的SF1、SF2、SF3处理在 1080 cm^{-1} 处的吸收峰有减弱的趋势, 表明多糖类等小分子物质的减少。 1540 cm^{-1} 吸收峰的存在, 表明有碳水化合物及蛋白质的存在^[20]。此处吸收峰相对强度的增加, 表明氨基化合物的增加^[20], 与对照处理相比, S、SF1、SF2、SF3处理在 $1650\sim 1640\text{ cm}^{-1}$ 的峰相对强度有增加趋势, 表明含氮基团酰胺物质有所增加^[22]。 2920 cm^{-1} 处相对吸光度增加, 表明脂肪族结构中C-H的伸缩振动增强, 说明在秸秆还田作用下, 土壤有机质中脂肪族化合物增加及芳香结构成分增加。 3400 cm^{-1} 吸收峰是由于酚羟基、羟基或羧基的O-H振动引起的, 该吸收峰强度的增加表明有机质中酚羟基、羟基或羧基含量增加。同时, 与对照处理相比, S、SF1、SF2、SF3处理的 $2920\text{ cm}^{-1}/1620\text{ cm}^{-1}$ 比值和 $1650\text{ cm}^{-1}/1080\text{ cm}^{-1}$ 比值的增加, 也表明在秸秆还田条件下, 土壤中多糖类成分的减少, 芳香性成分的

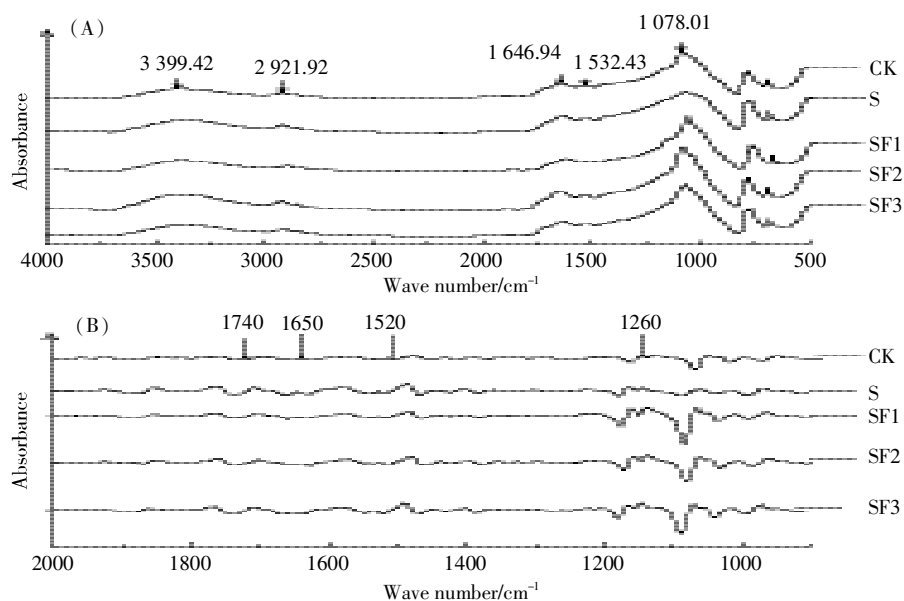
图 2 不同处理对土壤全量有机质红外光谱(A)及二阶导数图谱(2000~900 cm⁻¹)(B)的影响Figure 2 Effects of different treatments on IR of soil organic matter (A), and their second-derivative spectra (2000~900 cm⁻¹)(B)

表 4 SOM 的 IR 光谱主要吸收峰的相对强度

Table 4 Relative intensity of main absorption peaks in IR spectrum of SOM

处理 Treatment	不同光谱吸收峰(cm ⁻¹)的相对强度(%)Relative intensities of different spectrum(cm ⁻¹) absorption peaks(%)						
	3400	2920	1650	1620	1540	1080	2920/1620 1540/1080
CK	51.40	2.20	4.68	1.62	0.05	40.05	1.77 0.18
S	51.77	2.85	8.41	0.74	2.60	33.63	3.93 7.75
SF1	59.76	2.16	5.14	0.89	1.36	30.69	3.23 4.58
SF2	60.87	2.65	5.64	0.90	1.82	28.12	4.24 6.48
SF3	59.91	2.56	5.52	0.86	1.80	29.35	3.60 6.44

注:表内数值为不同光谱吸收峰的面积占总光谱吸收峰总面积的比例(%);1650 cm⁻¹光谱吸收峰相对强度为 1650 cm⁻¹和 1640 cm⁻¹光谱吸收峰相对强度之和;2920/1620 和 1540/1080 比值分别为 2920 和 1540 cm⁻¹光谱峰吸收面积与 1620 和 1080 cm⁻¹光谱峰吸收面积的比值。

Note: Values are percentages of different spectrum absorption peak area to the total peak area; The relative intensity of spectrum absorption peak at 1650 cm⁻¹ is the sum of the relative intensity of spectrum absorption peaks at 1650 cm⁻¹ and 1640 cm⁻¹; The ratios of 2920/1620 and 1540/1080 are the relative intensity of spectrum absorption peaks at 2920 cm⁻¹ and 1540 cm⁻¹ to that of 1620 cm⁻¹ and 1080 cm⁻¹, respectively.

增加。

2.4 秸秆还田对当季作物产量的影响

由表 5 可以看出,与对照处理相比,秸秆还田不施肥(S)处理籽粒和秸秆氮素含量分别降低 4.2%和

5.7%,氮素吸收量和水稻实际产量分别降低 6.0%和 8.8%。与秸秆还田不施肥(S)处理相比,配施化肥后, SF1、SF2、SF3 处理籽粒氮素含量分别增加 28.6%、37.7%、23.6%,秸秆氮素含量分别增加 34.3%、42.3%、31.4%,氮素吸收量分别增加 64.3%、85.8%、72.1%。水稻实收产量分别增加 23.5%、34.6%、30.6%。其中,当 C/N 比值达到 18:1 时,籽粒和秸秆氮素含量最高,且水稻产量也最高,均达显著差异水平($P<0.05$)。

3 讨论

土壤氮素主要以有机态氮的形式存在,须经分解和矿化,形成矿质态氮才能够被作物吸收利用^[24]。本文的结果表明,秸秆还田提高了土壤有机质,全氮和

表 5 秸秆还田对水稻产量的影响

Table 5 Effects of crop straw returning on nitrogen and yield of rice

处理 Treatment	氮素含量 Nitrogen content/mg·kg ⁻¹		氮素吸收量 Nitrogen uptake/ kg·hm ⁻²	水稻实际产量 Rice yield/ kg·hm ⁻²
	籽粒 Seeds	秸秆 Straw		
CK	12.39e	7.05c	1 605.75e	6 775.50d
S	11.87d	6.65b	1 509.45d	6 180.00e
SF1	15.26c	8.93b	2 480.10b	7 632.00c
SF2	16.34b	9.46a	2 804.10a	8 316.00a
SF3	14.67a	8.74b	2 598.15c	8 071.50b

有机氮含量,增加了 SOM 中 C 和 N 的含量,与肖伟等^[25]的研究结果一致。与对照处理相比,秸秆还田降低了土壤铵态氮和硝态氮的含量,与李宗新等^[26]、唐玉霞等^[27]的研究结果相一致。一方面可能因为秸秆还田降低了土壤容重,提高了土壤的通透性,有助于氮的硝化,使 NH_4^+ 转化为 NO_3^- ,同时秸秆还田增加了土壤孔隙度,土壤水流沿土壤大孔隙下渗,致使硝态氮淋失加剧^[28];另一方面可能是因为微生物利用土壤原有有机碳促进秸秆分解,但分解速度太快,导致部分氮素以气体 N_2O 损失。此外,秸秆腐解形成的木质素残余物中含有大量的芳香环,而芳香环上的酚羟基能够固定土壤中的无机氮,使之转化为植物较难利用的有机氮如苯胺。秸秆还田(S)处理 SOM 的红外光谱在 $1650\sim 1640\text{ cm}^{-1}$ 处的峰强度增加,证明了酰胺类物质的形成,在 2920 cm^{-1} 和 3400 cm^{-1} 处吸收峰强度的增加,表明脂肪族及芳香族结构成分的增加。这也验证了 SOM 元素分析结果中 C/N 和 H/C 比值下降的变化规律。

秸秆还田与化肥配施,能更好地提升土壤有机质和氮素含量。本实验结果表明,在不同碳氮比条件下,有机质、全氮、无机氮和有机氮含量以 C/N 比为 18:1(SF2)处理时最高。SOM 的元素分析结果以 C/N 比为 18:1(SF2)处理时,C 和 N 增加最为显著。同时,秸秆还田与化肥的配合施用降低了 SOM 的 C/N 和 H/C,表明 SOM 中含氮组分增加,芳香碳所占比例提高。FTIR 谱图显示,C/N 比为 18:1(SF2)处理在 1540 cm^{-1} 和 3400 cm^{-1} 处吸收峰强度变化最为显著,说明苯酰胺类化合物所占比重增加,芳香碳比例上升,芳香性增强。这表明秸秆还田配施化肥后,增加无机氮含量的同时,更多的无机氮被固定成土壤有机态氮。

秸秆还田不施肥处理降低了当年水稻的产量,可能和秸秆腐解与水稻互相竞争氮素,造成作物可吸收氮素减少有关^[10]。这也验证了秸秆还田后无机氮下降,土壤 SOM 中 C/N 下降的变化规律。配施化肥后,SF1、SF2、SF3 处理的水稻产量都有所增加,可能是因为秸秆还田配施一定量氮肥,可以调节土壤微生物碳氮比,促进秸秆的分解,同时补充了作物生长需要的氮素^[24],缓解了土壤微生物与作物争氮源的矛盾。这与赵鹏等^[10]的研究结果一致。同时,在不同碳氮比条件下,当 C/N 比值为 18:1 时,水稻产量最高。这与唐玉霞等^[27]研究表明不同碳氮比秸秆还田与化肥配施,应调整 C/N ≤ 20 为宜的结果一致。

4 结论

(1)单独秸秆还田增加土壤有机质和有机氮含量,但降低土壤无机氮含量。秸秆还田与化肥配施能显著提高土壤有机质和氮素含量,当 C/N 比为 18:1 时,土壤有机质和氮素含量增加最为显著。

(2)同时秸秆还田使土壤 SOM 的 C、O 和 N 上升,H 下降,C/N 和 H/C 比值均降低,含氮组分增加,酰胺类物质增多,多糖等小分子化合物减少,脂肪族化合物增加及芳香结构成分增加,土壤有机质结构趋于稳定。

(3)单独秸秆还田会降低水稻产量,秸秆还田与化肥配施后能显著提高水稻产量,当碳氮比为 18:1 时,产量最高,增产幅度最大。综合考虑,在秸秆还田条件下,建议调整 C/N 比为 18:1,作为沿淮地区化肥施用的参照指标。

参考文献:

- [1] 南雄雄,田霄鸿,张琳,等.小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):626-633.
NAN Xiong-xiong, TIAN Xiao-hong, ZHANG Ling, et al. Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 626-633.
- [2] 赵士诚,曹彩云,李科江,等.长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1441-1449.
ZHAO Shi-cheng, CAO Cai-yun, LI Ke-jiang, et al. Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(6): 1441-1449.
- [3] 武天云, Schoenau J J, 李凤民,等.土壤有机质概念和分组技术研究进展[J].应用生态学报,2004,15(4):717-722.
WU Tian-yun, Schoenau J J, LI Feng-min, et al. Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4): 717-722.
- [4] 朱兆良,文启孝.中国土壤中的氮[M].南京:江苏科技出版社,1992:3-26.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen in soils of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 3-26.
- [5] Potthoff M, Dyckmans J, Flessa H, et al. Dynamics of maize (*Zea mays* L.) leaf straw mineralization as affected by the presence of soil and the availability of nitrogen[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(7): 1259-1266.
- [6] Henriksen T M, Breland T A. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(8): 1121-1134.

- [7] 陈金,唐玉海,尹燕桦,等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 160-167.
CHEN Jin, TANG Yu-hai, YI Yan-ping, et al. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and grain yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 160-167.
- [8] Kumar K, Goh K M. Nitrogen release from crop residues and organic amendments as affected by biochemical composition[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2003, 34: 2441-2460.
- [9] 汪军,王德建,张刚,等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 40-44.
WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5): 40-44.
- [10] 赵鹏,陈阜. 秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1014-1018.
ZHAO Peng, CHEN Fu. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(6): 1014-1018.
- [11] Schmidt-Rohr K, Mao J D, Olk D C. Nitrogen-bonded aromatics in soil organic matter and their implications for a yield decline in intensive rice cropping[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(17): 6351-6354.
- [12] 慕平,张恩和,王汉宁,等. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 291-296.
MU Ping, ZHANG En-he, WANG Han-ning, et al. Effects of continuous straw return to soil on maize growth and soil chemical and physical characteristics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3): 291-296.
- [13] Madejon E, Moreno F, Murillo J M. Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94: 346-352.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2010: 25-114.
BAO Shi-dan. Analysis of agrochemical soil[M]. Third Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2010: 25-114.
- [15] 李立平,张佳宝,朱安宁,等. 土壤无机阴离子的毛细管电泳分析[J]. 土壤学报, 2005, 41(6): 881-888.
LI Li-ping, ZHANG Jia-bao, ZHU An-ning, et al. Quantification of inorganic anions in soil by capillary electrophoresis[J]. *Acta Pedologic Sinica*, 2005, 41(6): 881-888.
- [16] Skjemstad J O, Clarke P, Taylor J A, et al. The removal of magnetic materials from surface soils—a solid state ^{13}C CP/MAS NMR study[J]. *Soil Research*, 1994, 32(6): 1215-1229.
- [17] Mirasol F P, Eufrocino V L, Hermenegildo C G. Soil carbon and nitrogen changes in long-term continuous low land rice cropping[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72: 798-807.
- [18] 刘文利,吴景贵,赵新宇,等. 不同园龄果园土壤腐殖质组分数量及其元素组成特征[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(6): 68-72.
LIU Wen-li, WU Jing-gui, ZHAO Xin-yu, et al. Combined humus and elemental composition in orchards soils of different cultivation years[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(6): 68-72.
- [19] 崔婷婷, 窦森, 杨轶因, 等. 秸秆深还田对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 718-725.
CUI Ting-ting, DOU Sen, YANG Yi-nan, et al. Effect of deep applied corn stalks on composition of soil humus and structure of humic acid[J]. *Acta Pedologic Sinica*, 2014, 51(4): 718-725.
- [20] 张奇春,王光火. 施用化肥对土壤腐殖质结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 617-623.
ZHANG Qi-chuan, WANG Guang-huo. Effect of chemical fertilizer on structure of soil humus[J]. *Acta Pedologic Sinica*, 2006, 43(4): 617-623.
- [21] Zhang Y L, Du J Z, Peng B, et al. Chemical and spectroscopic characterization of dissolved humic substances in a mangrove-fringed estuary in the eastern coast of Hainan Island, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology & Limnology*, 2013, 31(2): 454-463.
- [22] Stevenson F J. Humus chemistry//genesis, composition, reactions[M]. John Wiley and Sons. New York, 1994: 443.
- [23] 孙向平,李国学,肖爱平,等. 添加不同比例玉米秸秆对猪粪高温堆肥过程中胡敏酸的结构组成及红外光谱特性影响分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 9: 24.
SUN Xiang-ping, LI Guo-xue, XIAO Ai-ping, et al. Analysis on the impact of composting with different proportions of corn stalks and pig manure on humic acid fractions and IR spectral feature[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 9: 24.
- [24] 李玮,乔玉强,陈欢,等. 砂姜黑土秸秆还田配施氮肥的固碳效应分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 756-761.
LI Wei, QIAO Yu-qiang, CHEN Huan, et al. Carbon storages lime concretion black soils as affected by straw incorporation and fertilization[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(5): 756-761.
- [25] 肖伟伟,范晓晖,杨林章,等. 长期定位施肥对潮土有机氮组分和有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 274-280.
XIAO Wei-wei, FAN Xiao-hui, YANG Lin-zhang, et al. Effects of long-term fertilization on organic nitrogen fractions and organic carbon in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologic Sinica*, 2009, 46(2): 274-280.
- [26] 李宗新,董树亨,王空军,等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. 应用生态学报, 2008(1): 65-70.
LI Zong-xin, DONG Shu-ting, WANG Kong-jun, et al. Oil nutrient leaching patterns in maize field under different fertilizations: An in situ study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008(1): 65-70.
- [27] 唐玉霞,孟春香,贾树龙,等. 不同碳氮比肥料组合对肥料氮生物固定、释放及小麦生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 37-40.
TANG Yu-xia, MENG Chun-xiang, JIA Shu-long, et al. Effects of different C/N combinations of fertilizers on nitrogen biological fixation and release of fertilizer and wheat growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2): 37-40.