



长期秸秆还田替代部分化肥提高双季稻田土壤有机碳、氮组分及微生物群落的活性

杨世奇¹, 陈丽明², 黄万³, 易艳红⁴, 杨陶陶⁵, 谭雪明¹, 曾勇军¹, 潘晓华¹, 黄山¹, 曾研华^{1*}

1. 江西农业大学农学院, 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 江西省作物生物育种与高效生产重点实验室, 南昌 330045

2. 景德镇学院生物与环境工程学院, 景德镇 333400

3. 吉安农业科学研究所, 吉安 343229

4. 江西省气象服务中心, 南昌 330096

5. 广东省农业科学院水稻研究所, 广州 510225

* 联系人, E-mail: zyh74049501@163.com

收稿日期: 2025-07-01; 接受日期: 2025-09-26; 网络版发表日期: 2025-10-22

国家自然科学基金(批准号: 32160503)、江西省水稻产业技术体系(批准号: JXARS-01)和国家重点研发计划(批准号: 2023YFD2301303)资助

摘要 长期秸秆还田通过提升土壤有机碳(SOC)和有机氮(SON)库持续改善土壤肥力。然而, 土壤有机碳、氮组分的变化特征及其与微生物群落的关系尚不明确。依托一项为期8年的长期定位试验, 本研究探究了等量氮磷钾养分投入下秸秆移除(NPK)、秸秆焚烧还田(SBR+NPK)和秸秆全量切碎直接还田(SR+NPK)对双季稻种植体系中土壤有机碳、氮组分及其微生物群落的影响。结果表明, 与NPK和SBR+NPK相比, SR+NPK处理下土壤总有机碳(TOC)、微生物生物量碳(MBC)以及活性有机碳(AOC)含量在早、晚稻季均显著提高($P < 0.05$)。值得注意的是, 相比不施肥处理, SR+NPK处理下TOC, MBC和AOC含量增幅显著, 分别达14.5%~15.9%, 34.3%~40.9%和29.8%~39.8%。同时, 早稻季SR+NPK处理较之NPK和SBR+NPK处理亦显著增加土壤全氮(TN)、微生物生物量氮(MBN)、酸解性氮(AHN)、酸解铵态氮(AN)和酸解氨基酸态氮(AAN)含量, 增幅分别为4.0%~9.1%, 36.6%~37.3%, 7.4%~10.8%, 17.3%~21.0%和12.0%~17.5%。SR+NPK处理还显著增加早稻季土壤MBC/TOC和MBN/TN比值。进一步分析发现, SR+NPK处理下TOC的提升主要归因于土壤颗粒有机碳的增加, 而TN的增加则主要与AHN, AN和AAN含量提升有关。此外, SR+NPK提高早稻季AOC/TOC比值、晚稻季土壤易氧化有机碳含量及TOC/TN比值; 而SBR+NPK处理仅提高早稻季溶解性有机碳(DOC)/TOC比值, 但显著降低土壤微生物丰富度和多样性, 尤其在早稻季较为明显。变形菌门、绿弯菌门和酸杆菌门是双季稻土壤微生物群落的优势菌门, 主要受轻组有机碳、酸解氨基糖态氮(ASN)和MBN的影响。本研究结果表明, 长期秸秆还田可通过驱动土壤微生物群落组分的变化, 有效改善土壤的有机碳、氮组分。

关键词 长期秸秆还田, 双季稻种植, 化肥减量, 土壤有机碳组分, 土壤有机氮组分, 微生物群落结构

引用格式: 杨世奇, 陈丽明, 黄万, 等. 长期秸秆还田替代部分化肥提高双季稻田土壤有机碳、氮组分及微生物群落的活性. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 2325–2338

Yang S Q, Chen L M, Huang W, et al. Long-term straw retention with reducing chemical fertilizers application improves soil carbon and nitrogen fractions and microbial community composition in a double rice-cropping system (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2025, 55: 2325–2338, doi: [10.1360/SSV-2025-0210](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0210)

土壤碳库和氮库是评价土壤质量和土地可持续利用管理的重要指标^[1,2]。水稻土中的有机碳(SOC)和有机氮(SON)是提升土壤肥力、维持水稻产量的关键因素,对农业生态系统的长期可持续发展具有重要作用^[3]。多项研究表明,农田长期大规模施用有机物料对SOC和SON具有明显的促进效应^[4-6],其主要表现为土壤活性有机碳、氮组分的增加。土壤活性有机碳、氮组分主要包括颗粒态有机质碳(POC)、氮(PON)、微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN),以及溶解性有机碳(DOC)、氮(DON)等。对于碳氮组分而言,农业生产措施最初引起的土壤有机质变化主要体现在土壤活性有机碳和活性有机氮上^[7]。因此,研究SOC和SON组分的变化对于揭示稻田管理措施对土壤环境与质量的影响具有重要意义^[8]。

适宜的养分管理措施(如作物秸秆还田、施用有机肥、有机无机肥配施等)能直接引起土壤SOC和SON组分的变化^[9]。研究表明,在旱作农业中,秸秆还田显著提高SOC、易氧化有机碳(EOC)和MBC的含量^[10]。有机和无机肥配施主要增加稻田土壤POC、酸解氨基酸态氮、酸解未知态氮及非酸解态氮的含量,促进土壤SOC和SON的积累^[11]。而长期施用有机肥或厩肥复合肥显著提高小麦-玉米轮作体系中SOC组分。利用作物秸秆替代部分化肥被视为资源节约和环境友好型水稻生产的关键策略,能够同时改善土壤质量和水稻产量^[12]。然而,在双季稻系统中,SOC和SON组分对长期秸秆还田配施减量化肥的响应尚不明确。

双季稻种植是中国南方重要的水稻种植制度,其种植面积和产量分别占全国水稻的34.9%和29.7% (<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>)。一般来说,双季稻系统早稻和晚稻所处的气候条件与茬口时间差异较大,晚稻收获后有一个长达数月的冬闲期,而早稻收获前后茬口紧、温度高。这种差异很可能导致还田秸秆下土壤微生物响应存在显著的季节性差异,而这正是本研究关注的重点。大量研究表明,农田长期秸秆还田在增强土壤固碳能力、提升土壤肥力和耕地质量方面发挥着关键作用^[13-15]。本课题组^[16]之前的研究也发现,长期秸秆还田能提高双季早稻的产量和土壤碳组分含量。此外,秸秆露天焚烧虽被认为对温室气体增加和环境污染均有巨大危害,但是其对土壤SOC和SON组分的研究较少。在双季稻系统中,秸秆还田还可能对晚稻的生长发育产生短期负面影响,

这主要由于早稻和晚稻之间的茬口较短^[17,18]。且长期原位还田高碳氮比的作物秸秆可能导致微生物固氮作用增强,进而引起土壤氮素的暂时性缺乏,特别是在温度较高的晚稻种植条件下^[19]。早稻和晚稻季光温资源的差异以及稻田养分管理的不同,影响还田秸秆的分解进程,从而导致土壤碳和氮含量的季节性差异。

土壤微生物在调控SOC和SON组分的变化中发挥着关键作用,而作物秸秆还田会影响土壤微生物群落组成^[20]。土壤微生物对土地利用和管理措施的变化极为敏感,这些措施通过改变土壤微环境和基质活性,进一步影响土壤微生物的群落与结构,从而影响SOC和SON组分的固存^[21]。不同形式的秸秆输入会改变土壤微生物碳氮源的可用性,进而影响土壤微生物的活性、群落结构和多样性。此外,土壤微生物的活性、组成及其与环境因子的相互作用,共同调节着土壤SOC和SON的动态变化。因此,有必要深入研究外源C输入对SOC和SON组分以及微生物群落的具体影响。

目前,大量研究集中于秸秆施用对作物产量^[22,23]、土壤质量及养分利用效率的影响^[12]。然而,关于长期秸秆还田替代部分化肥条件下SOC和SON组分周转及其与微生物群落关系的研究相对较少。SOC和SON组分及土壤微生物的稳定性通常在长时间尺度上显现。因此,本研究依托2010年始于中国南方双季稻区(江西省进贤县温圳镇赣抚平原稻区)的一项长期秸秆原位还田定位试验,在连续实施8年后进行采样,旨在:(i)评估双季稻稻田不同秸秆还田模式下SOC和SON组分及微生物群落的变化;(ii)分析早稻与晚稻之间的季节性差异;(iii)阐明土壤微生物群落与SOC和SON组分之间的关系,为双季稻区秸秆长期还田下土壤碳氮转化的微生物学机制及秸秆资源高效利用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

长期秸秆还田定位试验始于2010年,位于中国江西省进贤县杨溪村国家土壤肥力监测基地(28°20' 7.14" N, 116°5'29.73" E)。双季稻种植是该地区主要的水稻种植制度,包括早稻(3月至7月)和晚稻(6月至10月)两个种植季节。该地区属于亚热带季风气候,年均降水量1600~1800 mm,年均无霜期291天,年均日照时

数1900.5 h, 年均气温17.5℃. 试验田土壤为第四纪红黏土发育的水稻土. 2010年试验开始前, 耕层(0~20 cm)土壤基本理化性质为: pH 5.48, 有机碳19.8 g/kg, 全氮2.27 g/kg, 碱解氮126.0 mg/kg, 有效磷31.4 mg/kg, 速效钾97.9 mg/kg.

1.2 试验设计

田间试验共设置4个处理: (i) CK, 不施化肥+秸秆移除; (ii) NPK, 施化肥+秸秆移除; (iii) SBR+NPK, 秸秆全量焚烧还田+减量化肥; (iv) SR+NPK, 秸秆全量切碎后原位直接还田+减量化肥. 试验采用大区设计, 每个处理面积为300 m², 无重复, 取样3次. 所有处理保证纯N、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)的养分总投入量相等. 有机物料(秸秆和草木灰)中N、P和K含量测定参照Bao^[24]的方法, 不足部分用化肥补充. 各处理有机物料替代化肥的具体比例详见网络版附表1^[25,26]. 早稻季无机化肥(N, P₂O₅, K₂O)施用量分别为165, 75和150 kg/hm², 晚稻季分别为195, 87.75和175.75 kg/hm². 所用化肥为尿素(含N 46.4%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)和氯化钾(含K₂O 60%). 氮肥分基肥、分蘖肥和穗肥施用, 早稻施氮比例为50%, 20%, 30%, 晚稻为40%, 20%, 40%. 磷肥(100%作基肥)和钾肥(70%作基肥, 30%作穗肥)在早稻和晚稻中的施用方式一致.

2018年种植的早稻和晚稻品种分别为五丰优286和H优518. 早稻栽插密度为23.33 cm×13.33 cm, 晚稻为26.66 cm×13.33 cm. 早稻和晚稻机械收获后, 秸秆随即用收割机切碎成5~10 cm的小段或就地焚烧成灰, 随后立即还田, 整地时通过旋耕将秸秆/草木灰翻压入土. 秸秆/灰分还田量按谷草比1:1以及秸秆焚烧系数0.86分别进行折算. 杂草以及病虫害采用化学药剂严格防控以避免产量损失.

1.3 土壤样品采集

土壤样品分别于2018年7月15日(早稻收获前)和10月28日(晚稻收获前)采样. 将采集的土壤样品去除根系、石块等可见杂质后, 分为两份. 一份新鲜土样过2 mm筛, 保存于4℃冰箱; 另一份风干, 研磨后分别过0.15 mm和2 mm筛, 用于后续测定.

1.4 土壤有机碳组分

测定土壤总有机碳(TOC)以及MBC、EOC、活性

有机碳、轻组有机碳(LFOC)和颗粒态有机碳(POC)等土壤有机碳组分, 具体测定方法如下: TOC采用K₂Cr₂O₇-H₂SO₄外加热氧化法测定^[24]; MBC采用氯仿熏蒸-提取法测定^[27]; EOC采用KMnO₄氧化法测定^[28]; DOC参照Jiang等人^[29]的方法测定; 活性有机碳(AOC)为DOC与MBC之和; 轻组有机碳(LFOC)采用NaI重液(密度1.80 g/cm³)分离法测定^[30], POC参照Chen等人^[31]的方法进行测定.

1.5 土壤有机氮组分

全氮(TN)可分为酸解性氮(AHN)和非酸解性氮两大主要部分. 本文测定的酸解铵态氮(AN)、酸解氨基酸态氮(AAN)、酸解氨基糖态氮(ASN)以及酸解未知态氮(HUN)均是AHN的组成部分(AHN=AN+AAN+ASN+HUN). TN采用凯氏定氮法测定, 微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-全氮测定法. AHN及其组分参照Stevenson^[32]的方法测定: 土壤样品用6 mol/L HCl在110℃下水解12 h. 取一份水解液, 直接加入MgO进行蒸馏测定得到AN含量; 取另一份水解液, 先用NaOH处理, 再加入MgO进行蒸馏测定得到AN+ASN含量; 取第三份水解液, 经磷酸盐-硼酸盐缓冲液调节pH后, 用茚三酮氧化, 再进行蒸馏测定得到AN+AAN+ASN含量. 随后, 通过差值计算获得各组分含量: ASN=(AN+ASN)-AN; AAN=(AN+AAN+ASN)-(AN+ASN); HUN为AHN减去上述直接测定和计算所得的所有酸解组分(即AN, AAN, ASN)之和.

1.6 土壤细菌DNA提取及Illumina MiSeq测序

土壤总DNA采用TIANamp Soil DNA试剂盒(即FastDNA® Spin Kit for Soil(MP Biomedicals, Inc., USA))提取. 提取的DNA溶解于50 μL TE缓冲液中, 用分光光度计准确定量, -20℃保存备用. 用于PCR扩增细菌16S rRNA基因V4区的引物为338F(5'-ACTCC-TACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGAC-TACHVGGGTWCTAAT-3'). 所有PCR产物经2%琼脂糖凝胶电泳检测. 根据指定测序区域, 合成带Barcode的特异引物进行扩增, 构建PE文库, 最终在Illumina Miseq平台上进行双端测序(paired-end sequencing). 测序得到的PE reads首先根据overlap关系进行拼接, 同时对序列质量进行质控和过滤. 使用Usearch软件(USEARCH 11)剔除非重复序列, 对去冗余后的序列

按97%相似度进行OTU(操作分类单元)聚类和物种分类学分析。

1.7 统计分析

采用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析,并在0.05水平上检验处理间差异的显著性(Duncan法)。序列分析使用QIIME软件包进行。样本内(alpha多样性)和样本间(beta多样性)分析通过内部Perl脚本进行评估。对原始序列应用QIIME的质量过滤将OTU聚类并生成OTU列表,相似性>97%的序列归为同一个OTU。为每个OTU选取代表性序列,并使用RDP分类器对代表性序列进行物种分类注释。为评估alpha多样性,对OTU表进行抽平,计算Chao1, Observed Species和Shannon指数,并基于这三个指数绘制稀释曲线。结合环境因子数据,采用冗余分析(RDA)探究土壤TOC和N组分与微生物门(phylum)水平优势菌群相对丰度之间的关系。

2 结果分析

2.1 秸秆还田对双季稻田土壤碳组分的影响

由表1可知,所有施肥处理(NPK, SBR+NPK, SR+NPK)在早、晚稻季均显著提高土壤TOC, MBC和AOC含量($P<0.05$),表明施肥是提升土壤碳库的基础。与NPK相比,SR+NPK下TOC, MBC和AOC含量分别提高3.0%~4.3%, 14.9%~22.6%和11.6%~19.0%;相较于SBR+NPK,则分别提高1.7%~3.4%, 13.2%~20.7%和11.1%~16.3%。SBR+NPK在晚稻季显著降低EOC的含量(降幅为12.1%),但在早稻季各处理间无显著差异,

表明秸秆焚烧对土壤碳活性的负面影响在晚季更为突出。

在早稻季, SBR+NPK较NPK显著提高DOC含量(增幅11.5%) (表1)。SR+NPK显著增加双季稻田土壤轻组(LF)及LFOC含量,而SBR+NPK处理在早稻季则相反。除CK处理外,各施肥处理间颗粒组(PF)及POC含量无显著差异;但与CK相比,各施肥处理在早、晚稻季的PF和POC含量均显著降低。

2.2 秸秆还田对双季稻田土壤有机氮组分的影响

由表2可知,与CK相比,所有施肥处理(NPK, SBR+NPK和SR+NPK)均显著提高双季稻田土壤TN含量,增幅分别达14.2%~22.8%, 15.2%~17.0%和11.4%~27.7%。SR+NPK与SBR+NPK, NPK以及CK处理间的土壤TN含量差异均达显著水平($P<0.05$),尤其是早稻季土壤。各处理中SR+NPK均显著提高早稻和晚稻季土壤MBN含量。此外,在早稻季,与SBR+NPK和NPK处理相比,SR+NPK处理显著提高了土壤AHN, AN和AAN含量(表2),但降低土壤HUN含量,表明其促进土壤有机氮向有效形态的转化。而SBR+NPK与NPK差异不明显,说明秸秆焚烧还田是一种低效的养分管理策略。而在晚稻季,各施肥处理间的这些氮组分含量均无显著差异($P>0.05$)。这说明秸秆还田对土壤氮库的积极影响更易于在经历漫长冬闲期后的早稻季观察到。

2.3 土壤有机碳氮比及有机碳、氮组分的相关性分析

由表3可知,土壤有机碳和有机氮各组分占TOC和

表 1 长期秸秆还田对双季稻田土壤有机碳组分的影响^{a)}

Table 1 Effects of long-term straw return on soil organic carbon fractions in double-cropping rice fields ^{a)}

季别	处理	TOC (g/kg)	MBC (g/kg)	EOC (g/kg)	DOC (mg/kg)	AOC (g/kg)	LF g/kg soil	LFOC (g/kg)	PF g/kg soil	POC (g/kg)
早稻	CK	19.91c	1.78c	5.22a	205.9b	1.98c	5.37c	1.33b	136.7b	7.15b
	NPK	21.85b	1.95b	4.93a	204.4b	2.16b	11.14b	2.65a	148.3a	8.03a
	SBR+NPK	22.04b	1.98b	5.48a	227.4a	2.21b	6.31c	1.50b	155.3a	8.02a
	SR+NPK	22.80a	2.39a	5.25a	180.8c	2.57a	13.84a	2.88a	152.0a	8.29a
晚稻	CK	19.23c	1.64c	7.27ab	213.2b	1.86c	5.93c	1.53c	139.6b	7.94b
	NPK	21.65b	2.01b	7.42a	317.8a	2.33b	10.69b	2.49b	148.0a	9.25a
	SBR+NPK	21.92b	2.04b	6.39b	303.5a	2.34b	11.07b	2.51b	155.6a	9.88a
	SR+NPK	22.29a	2.31a	7.90a	296.2a	2.60a	12.36a	2.75a	156.0a	10.06a

a) 数值为平均值(n=3)。同列数据中,同一季节内不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著

表 2 长期秸秆还田对双季稻田土壤有机氮组分的影响^{a)}

Table 2 Effects of long-term straw return on soil organic nitrogen fractions in double-cropping rice fields ^{a)}

季别	处理	TN (g/kg)	MBN (mg/kg)	AHN (mg/kg)	AN (mg/kg)	ASN (mg/kg)	AAN (mg/kg)	HUN (mg/kg)
早稻	CK	2.06d	26.63c	1234.3c	348.0c	74.75a	592.1c	219.4a
	NPK	2.53b	43.93b	2039.9b	580.8b	75.39a	1158.5b	225.2a
	SBR+NPK	2.41c	43.72b	1978.5b	563.4b	76.73a	1104.8b	233.6a
	SR+NPK	2.63a	60.02a	2130.2a	681.3a	81.66a	1297.8a	69.4b
晚稻	CK	2.11c	26.58c	1216.3b	347.2b	70.39a	611.1b	187.6b
	NPK	2.41a	43.85b	1655.5a	437.5ab	78.36a	836.2a	303.5ab
	SBR+NPK	2.43a	45.63b	1747.4a	460.6a	88.05a	843.6a	355.2a
	SR+NPK	2.35b	54.98a	1688.6a	421.4ab	71.88a	795.5a	399.8a

a) 数值为平均值(n=3). 同列数据中, 同一季节内不同小写字母表示处理间在P<0.05水平上差异显著

表 3 不同秸秆还田模式下的相关有机碳氮比^{a)}

Table 3 Relevant SOC/SON ratios in the different straw return modes ^{a)}

季别	处理	MBC/TOC (%)	MBN/TN (%)	MBC/MBN	DOC/TOC (%)	AOC/TOC (%)	TOC/TN
早稻	CK	8.93b	1.29c	6.74a	1.03a	9.96b	9.66a
	NPK	8.93b	1.74b	4.44b	0.94b	9.87b	8.65c
	SBR+NPK	8.98b	1.81b	4.53b	1.03a	10.01b	9.15b
	SR+NPK	10.48a	2.28a	3.99b	0.79c	11.27a	8.66c
晚稻	CK	8.54c	1.26c	6.18a	1.11b	9.65b	9.10b
	NPK	9.27b	1.82b	4.59b	1.47a	10.74ab	8.98b
	SBR+NPK	9.30b	1.88b	4.47b	1.38a	10.68ab	9.01b
	SR+NPK	10.35a	2.34a	4.20b	1.33a	11.68a	9.49a

a) 数值为平均值(n=3). 同列数据中, 同一季节内不同小写字母表示处理间在P<0.05水平上差异显著

TN的比例存在季节性差异. SR+NPK显著提高早、晚稻季MBC/TOC和MBN/TN比值, 以及早稻季AOC/TOC和TOC/TN比值. 这表明秸秆直接还田显著增强土壤有机质的微生物活性. 与之相反, SBR+NPK处理与NPK处理在所有比率指标上均无显著差异. 此外, SR+NPK显著降低早稻季DOC/TOC比值, 表明其有助于增强土壤有机碳的稳定性. 各施肥处理间的土壤MBC/MBN比值无显著差异, 但均显著低于CK.

主成分分析(PCA)显示, SR+NPK与其他处理在早稻季存在显著分离(图1A); 而在晚稻季则较为接近(图1B). 土壤有机碳、氮组分的PCA得分和载荷图表明, SR+NPK提高早稻季对LF, AOC, MBC, LFOC含量以及MBC/TOC和AOC/TOC比值的贡献; 而SBR+NPK和NPK则显著提高对EOC, PF和ASN含量的贡献. 各施肥处理均显著提高土壤晚稻季有机碳、氮组分的贡献(除MBC/MBN比值外), 表明MBC/MBN比值可能是限制因子.

2.4 土壤微生物群落组成特征

由表4可知, SBR+NPK的Shannon, Ace和Chao1指数在早稻季均显著低于CK和SR+NPK, 降幅分别为5.96%, 26.42%和25.74%以及2.85%, 16.75%和15.04%; 且NPK的OTU数量显著低于其他处理.

由图2可知, 各处理下门水平上的相对丰度在早稻季变幅较大, 而晚稻季较为稳定(图2). 所有处理的主要菌门依次为: 早稻季以变形菌门(Proteobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)和酸杆菌门(Acidobacteria)为主; 晚稻季以Proteobacteria, Acidobacteria, Chloroflexi和硝化螺旋菌门(Nitrospirae)为主. 与CK处理相比, 各施肥处理中变形菌门的相对丰度在早稻季均有提升, 而酸杆菌门的相对丰度在晚稻季的NPK处理中显著增加. 而与NPK处理相比, SBR+NPK处理在早稻季显著降低了厚壁菌门(Firmicutes)和拟杆菌门(Bacteroidetes)的相对丰度; SR+NPK处理则提高了变形菌门(Proteobacteria)的丰度, SR+NPK处理在塑

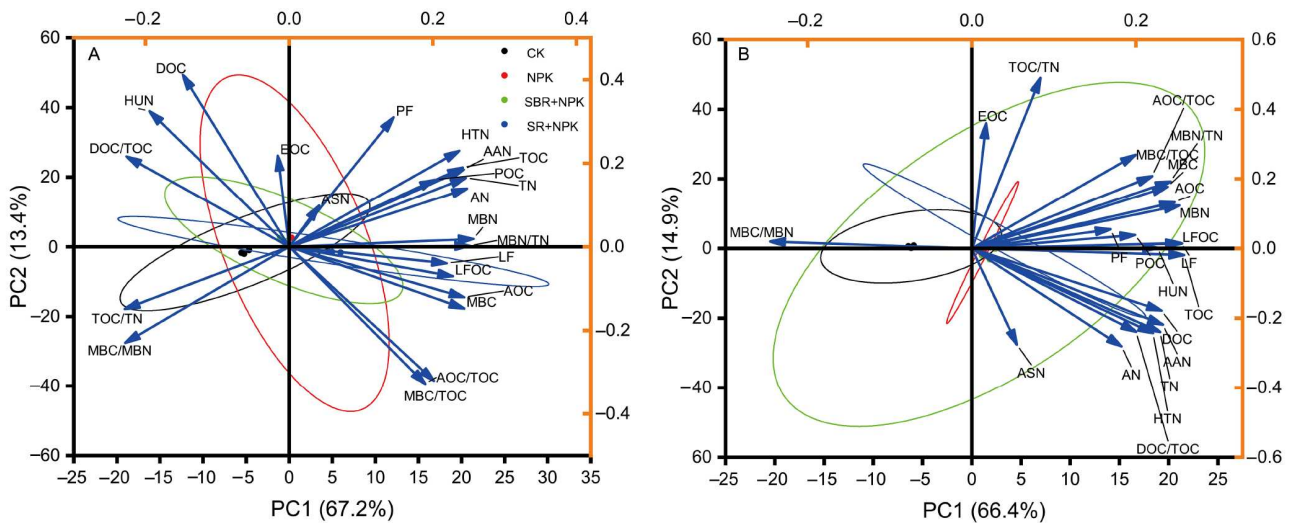


图 1 不同秸秆还田模式下土壤有机碳氮组分的主成分分析(PCA)。A: 早稻季; B: 晚稻季
Figure 1 Principal component analysis (PCA) of soil organic carbon and nitrogen fractions under the different straw return modes. A: Early rice season; B: late rice season

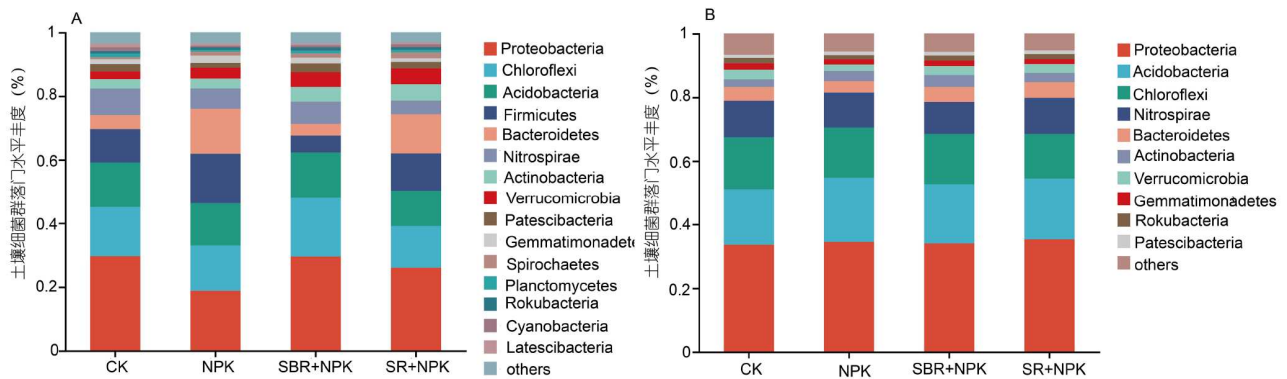


图 2 长期秸秆还田对土壤细菌群落门类丰度的影响。A: 早稻季; B: 晚稻季
Figure 2 Impact of long-term straw return on phylum abundance of soil bacterial groups. A: Early rice season; B: late rice season

表 4 长期秸秆还田对土壤细菌群落多样性及丰度的影响^{a)}
Table 4 Effects of long-term straw return on soil bacterial community diversity and abundance ^{a)}

季别	处理	OUT数量	多样性指标		丰富度指标	
			Shannon	Simpson	Ace	Chao 1
早稻	CK	4490.7a	6.88a	0.0044a	5971.3a	5949.9a
	NPK	3216.3b	6.90a	0.0036a	5728.2a	5712.5a
	SBR+NPK	4362.7a	6.47b	0.0044a	4393.8b	4418.7b
	SR+NPK	4637.3a	6.66a	0.0050a	5277.5a	5223.1a
晚稻	CK	3809.3a	6.86a	0.0034a	5160.8a	5116.2a
	NPK	3701.3a	6.70a	0.0042a	5459.7a	5118.3a
	SBR+NPK	3880.7a	6.87a	0.0032a	5376.2a	5354.0a
	SR+NPK	3700.0a	6.75a	0.0038a	5191.2a	5129.1a

a) 数值为平均值(n=3). 同列数据中, 同一季节内不同小写字母表示处理间在P<0.05水平上差异显著

造有益微生物群落方面优势明显. 相比SBR+NPK, SR+NPK处理中具有肥力指示作用的变形菌门(*Proteobacteria*)的相对丰度更高, 而SBR+NPK处理中与逆境环境相关的厚壁菌门(*Firmicutes*)和拟杆菌门(*Bacteroidetes*)的相对丰度在早稻季显著降低. 这证明秸秆直接还田为有益微生物创造了更适宜的生存环境.

2.5 微生物群落与土壤有机碳、氮组分的关系

RDA显示土壤SOC和SON组分对微生物群落总

变异的贡献(图3). 第一排序轴(RDA1)在早、晚稻季分别解释微生物群落变异的87.32%和85.08%, 以及土壤有机碳氮组分变异的41.96%和38.09%. 在早稻季, LFOC和ASN含量对微生物群落的影响最大, 其次是PF和AN含量. *Chloroflexi*和*Acidobacteria*与DOC/TOC比值呈正相关, 而*Proteobacteria*则与LFOC, MBN和AN含量呈负相关. 在晚稻季, LFOC和MBN含量对微生物群落的影响最大. *Proteobacteria*与AHN呈正相关, 与MBC/MBN比值呈负相关. *Acidobacteria*与DOC/TOC比值及DOC含量呈正相关, 而*Chloroflexi*则与TOC/TN

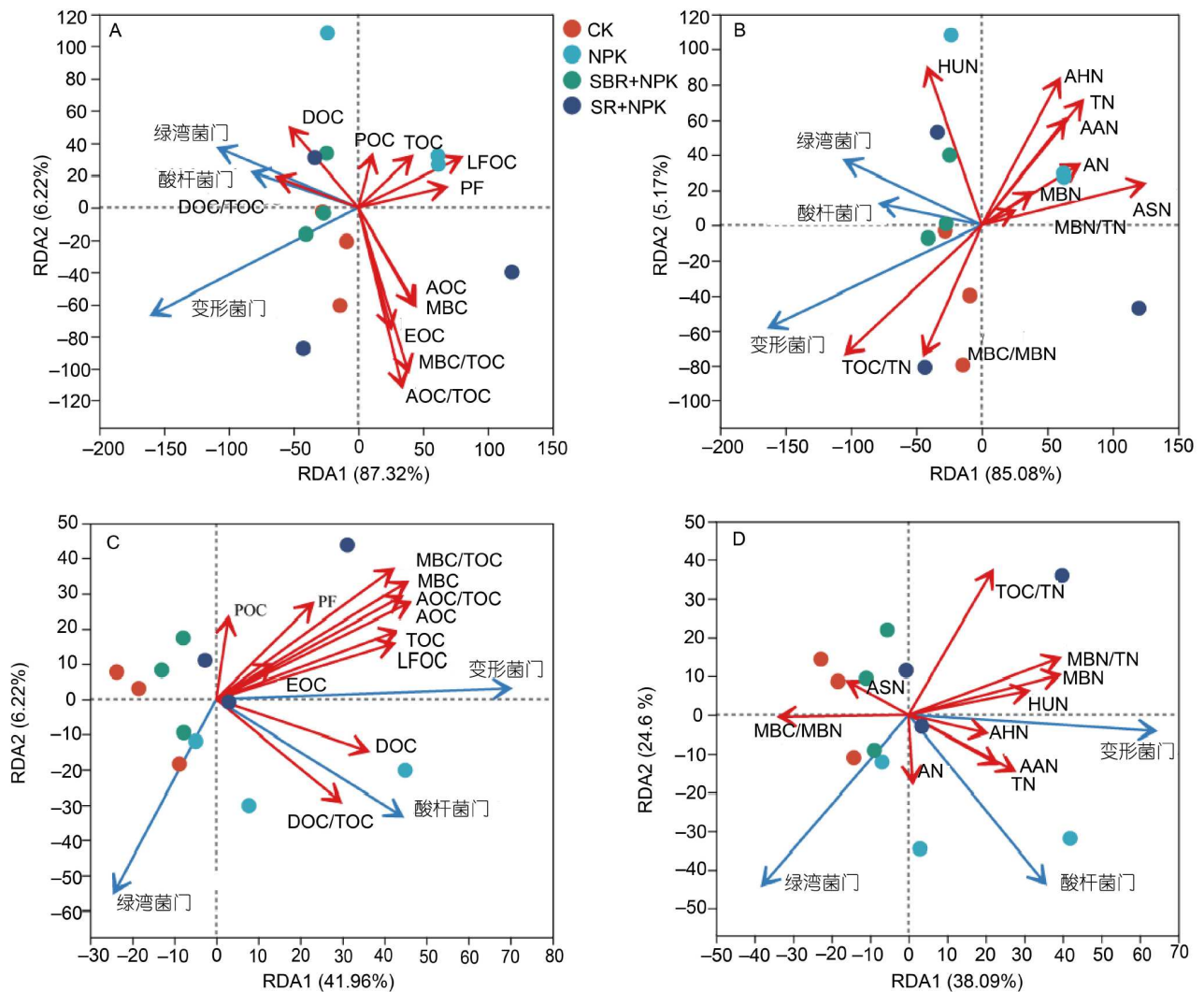


图3 土壤有机碳、氮组分与土壤微生物群落组成(门水平)的冗余分析. A和B: 早稻季; B~D: 晚稻季; A和C: 土壤有机碳组分与微生物群落的冗余分析; B和D: 土壤有机氮组分与微生物的冗余分析

Figure 3 Redundancy analysis of soil carbon fractions, soil nitrogen fractions and soil microbial community composition at the phylum level. A and B: Early rice season; C and D: late rice season; A and C: the redundancy analysis between soil carbon fractions and microbial communities; B and D: the redundancy analysis between soil nitrogen fractions and microbial communities

比值呈负相关, 说明特定的微生物种群与土壤有机碳、氮之间的关系存在季节性差异。

3 讨论

3.1 长期秸秆还田对双季稻系统土壤有机碳组分的影响

与已有研究结果一致, 秸秆还田显著提高土壤有机碳组分含量^[6,23]。秸秆的外部输入能够将更多的植物生物量碳直接归还到土壤, 从而促进土壤碳输入^[33]; 而秸秆焚烧会导致大部分生物量碳以CO₂、CO和未燃烧的形式排放至大气中^[34], 这不仅无法改善土壤肥力, 反而造成生物质资源的浪费。

SR+NPK处理显著提高双季稻系统的MBC和AOC, 但显著降低早稻季土壤的DOC含量。长期秸秆还田可能导致土壤微生物群落过度增殖, 消耗大量可溶性有机质, 进而降低DOC含量^[35]。这与本研究结果相符: 秸秆腐解释放的溶解性有机质等养分刺激微生物的生长, 同时促进了无机碳向MBC及其他有机碳形态的转化。相比之下, 秸秆焚烧显著减少了主要微生物类群的数量和活性^[36], 这可能是SBR+NPK下早稻DOC含量高于其他处理的原因。此外, PCA结果表明, 早稻季秸秆还田对土壤TOC含量的提升主要归因于POC的增加; 而在晚稻季则归因于LF, LFOC和POC的共同作用。综上所述, 秸秆焚烧不利于维持土壤SOC组分的稳定性, 对晚稻季SOC组分的固定尤为不利。

3.2 长期秸秆还田对双季稻系统土壤有机氮组分的影响

SON的组分与含量是反映土壤肥力和氮供应潜力的重要指标^[37]。与既往研究一致, 本研究同样发现SR+NPK显著增加早稻土壤TN的含量^[18,38]。尽管MBN仅占土壤氮库的1.7%~8.1%, 但其对TN变化的响应最为敏感, 同时也是土壤活性氮储存和作物生长的关键养分来源^[39]。SR+NPK在早稻和晚稻季均显著增加土壤MBN含量, 这表明水稻秸秆直接还田有助于增强土壤氮的保持能力^[40]。相较于SR+NPK, SBR+NPK和NPK的MBN/TN比值均显著降低。这主要源于施肥直接增加了土壤中的可利用能源物质, 刺激了土壤微生物活性, 从而显著增加MBN含量。然而, 化肥氮对微生物的影响明显弱于有机质, 尽管化肥施用能很快被微生物

固定, 但随后也很快被矿化^[28,41]。

在本研究中, 双季稻系统土壤TN含量的提升主要归因于AHN, AN和AAN的增加。SR+NPK在早稻季表现出更高的AHN, AN和AAN含量, 而晚稻季各处理间的有机氮组分则无显著差异。有机物料施入土壤后, 其易矿化部分可在当季分解并释放矿质氮; 难矿化部分虽持续时间较长, 但在长期连续还田下可产生累积效应^[42]。因此, 在冬闲期, 更多的HUN得以转化为易矿化的有机氮组分, 导致SR+NPK在早稻季的HUN含量下降。然而对于晚稻季, 由于分解时间较短且温度较高, 秸秆还田后仅能释放少量矿化氮^[18], 致使各施肥处理间的SON组分差异不显著。通常, AN和AAN是SON主要的存在形式, 其含量直接决定SON矿化速率及土壤供氮能力^[35,43]。由此可见, 秸秆还田能有效提升土壤氮矿化效率和氮供应潜力。

3.3 土壤碳氮比、有机碳及有机氮组分间的关系

SR+NPK显著提高晚稻季TOC/TN比值, 但在早稻季差异不显著。水稻秸秆具有较高的C/N比, 而晚稻种植前缺乏充足的时间使其完全分解。相比之下, 长达五个月的冬闲期为秸秆分解和养分矿化提供了有利的条件^[18]。MBC/TOC比(即土壤微生物熵)常被用于评估土壤碳储存能力和土壤质量的变化^[6]。本研究中, SR+NPK在早、晚稻季均显著提升了微生物熵, 表明秸秆还田有利于增加土壤微生物数量。然而, 秸秆焚烧造成大量有机质浪费, 致使SBR+NPK与NPK处理间的微生物熵差异不显著。此外, SBR+NPK显著降低早稻的Shannon, Ace和Chao1丰富度指数, 进一步佐证了长期秸秆焚烧会降低稻田土壤细菌群落的多样性和丰富度。土壤MBC/MBN比通常能有效反映土壤微生物群落结构特征。真菌是低肥力土壤中的优势群落, 而具有较低MBC/MBN比的稻田, 其土壤微生物群落则主要由细菌组成^[44]。所有施肥处理均显著降低早、晚稻季的土壤MBC/MBN比, 说明施肥处理的土壤中优势微生物群落是细菌。

土壤DOC/TOC比可在一定程度上反映SOC的稳定性。该比值越高, SOC矿化程度越强; 反之则表明SOC越稳定^[45]。在早稻季SR+NPK处理下, 较低的土壤DOC/TOC比值表明秸秆还田有助于维持SOC的稳定性。此外, SR+NPK显著提高土壤AOC/TOC比, 这可能是由于长期秸秆还田显著增加土壤团聚体含量, 从而

为AOC提供物理保护, 延缓其降解^[46]. SR+NPK处理的TOC/TN比值低于10, 进一步表明, 在该处理下, 土壤有机质主要处于分解后期, 已转化为腐殖质并储存在稻田土壤团聚体中^[6], 此过程有利于增加SOC储量. 不同土壤有机碳、氮参数间的皮尔逊相关性表明, 双季稻田中SOC和SON组分间密切相关. 土壤微生物对SON的转化过程受土壤SOC的影响, 因为土壤碳可为有机氮的形成提供能量来源^[47,48]. 此外, 秸秆还田作为外部碳源的输入, 还能提高土壤中微生物群落活性, 进而间接调控各类SON组分的含量与有效性.

PCA分析结果显示, 在早稻季, TOC/TN比值和MBC/MBN比值是驱动SOC和SON组分改善的主要因子; 而在晚稻季, MBC/MBN比值则成为唯一的因子. 这些发现证实了土壤SOC/SON比值对土壤SOC和SON各组分的形成以及土壤质量具有显著影响^[49]. 值得注意的是, SR+NPK对早稻土壤有机碳、氮组分的积极影响强于其对晚稻的影响. 早、晚稻季之间较短的茬口期和高温环境, 可能导致土壤酚类和植物毒性物质富集, 甚至加剧微生物对氮素的竞争, 从而降低土壤氮的有效性, 最终弱化秸秆还田对晚稻土壤肥力的积极影响^[17,50,51]. 相比之下, 较长的冬闲期为秸秆分解和养分矿化提供了充足时间, 有助于维持并提升土壤肥力^[52].

3.4 长期秸秆还田对双季稻系统土壤微生物群落组成的影响

与不施化肥相比, 各施肥处理均提高了土壤微生物种群的丰度和多样性^[53]. 在本研究中, 不同的秸秆还田方式显著影响了微生物群落在门水平分类组成和相对丰度. Proteobacteria在所有施肥处理中均占据最高的相对丰度最高^[54], 这与Ahn等人^[55]的研究结果一致. Proteobacteria门中包含众多能利用不稳定性碳进行生长代谢的成员, 偏好营养丰富的环境. 值得注意的是, 相较于NPK, SBR+NPK和SR+NPK均提高Proteobacteria的丰度. 一项长达45年的稻田研究也表明, 单独施用堆肥或堆肥配施化肥均显著增加Proteobacteria, Actinobacteria和Firmicutes等优势菌门的丰度^[56], 这些优势菌门的增加, 可通过固氮、磷溶解等生物过程, 提升土壤肥力和作物生产力. 此外, 作为寡营养型微生物, 放线菌门能够降解相对难分解的碳形态, 通常在营养贫瘠环境中占优势, 这也解释了其在

晚稻季NPK处理中成为最丰富菌门的原因. Bacteroidetes是表征农业土壤管理变化的敏感生物指标^[57]. 早稻季结果显示, SBR+NPK和CK的Bacteroidetes相对丰度低于NPK和SR+NPK. 这意味着微生物群落受到秸秆碳输入形式的影响: 秸秆焚烧产生的灰烬难以有效固存土壤有机碳(SOC)和有机氮(SON)组分, 可能重塑微生物群落组成与多样性, 进而改变土壤生物过程及养分有效性. 这些优势细菌丰度的波动表明, 长期秸秆还田有助于优化微生物区系, 构建更有利的土壤微环境.

RDA分析表明, LFOC, ASN和MBN含量是驱动早、晚稻季土壤细菌群落的主要因子. 既往研究同样报道了SOC, MBC和LFOC含量与变形菌门丰度呈显著正相关^[58]. 这种差异主要源于不同的秸秆类型与还田时间, 为土壤提供了各异的SOC和SON组分. Dong等人^[59]发现, 土壤可溶性有机碳(DOC)和MBN含量是土壤微生物群落组成的关键驱动因素. 本研究结果进一步显示, 土壤DOC/TOC比值与双季稻系统中的优势细菌门丰度呈正相关, 表明长期秸秆还田通过改变SOC组分构成, 成为决定土壤微生物群落演变的主导因素. 大量研究已证实, 微生物作为有机质的重要降解者, 在DOC代谢和氮矿化过程中扮演关键生态角色, 其丰度常与DOC含量呈正相关^[60,61]. 总之, 长期秸秆还田能为土壤微生物的繁殖与代谢持续提供丰富的SOC和SON组分, 并塑造更有利的土壤微环境.

需要强调的是, 本研究的结果源于一项长达8年的定位试验, 第9年试验结果表征了不同秸秆管理措施下土壤碳氮库及微生物群落达到的相对稳定状态. 相较于短期试验, 长期试验的结果更能可靠地揭示农业管理措施的最终效应和可持续性. 本研究明确显示, 经过8年的连续实践, 秸秆直接还田配施减量化肥是提升双季稻田土壤质量的最优策略.

3.5 早稻与晚稻季土壤碳氮组分差异分析

本研究结果揭示了秸秆还田效应存在明显的季节依赖性. 例如, SR+NPK对土壤TN, AHN, AN, AAN等氮组分的提升仅在早稻季达到显著水平(表2), 而对TOC/TN比值的提升也仅在晚稻季显著(表3). 这种差异主要源于秸秆还田后所处的气候环境与分解时间的不同. 晚稻收获后(10月底), 秸秆还田进入温度逐渐降低的冬闲期. 长达数月漫长的分解时间为秸秆的腐殖

化, 以及微生物固持养分的再矿化和向稳定有机库的转化提供了充足的时间^[62]。这一过程有利于秸秆充分分解, 从而在翌年早稻季表现出土壤TN和活性氮组分的显著提升。而早稻收获后(7月), 秸秆立即还田并进入晚稻高温环境的生长季。此时, 虽然高温的环境极有利于微生物活动与秸秆的快速分解, 但短暂的茬口意味着晚稻很快移栽并与微生物激烈竞争氮源。这极易引发剧烈的微生物固持作用(即“氮饥饿”效应)^[62]。其结果是: (i) 秸秆分解释放的氮素被微生物体(MBN)迅速固定(晚稻季SR+NPK的MBN含量显著最高(表2), 而非转化为稳定的土壤TN, 导致TN及酸解氮组分含量未表现出净增长; (ii) 微生物对碳的固定和利用同样旺盛(MBC含量高), 但秸秆碳的输入速率可能快于微生物呼吸消耗速率, 加之碳的损失途径(如矿化)相对氮更为复杂, 从而表现出碳的净积累效应更显著(TOC含量最高)。碳积累多而氮未见显著增加, 共同导致了晚稻季TOC/TN比值显著升高。

总体而言, 晚稻秸秆在冬闲期经历“慢分解、长周期、稳转化”, 其长期的培肥(尤其对氮库提升)效果在早稻季显现; 而早稻秸秆在晚稻季经历“快分解、强

固持、短周期”, 其碳积累效应大于氮净增效应, 导致晚稻季土壤C/N比扩大。造成土壤碳氮组分在双季稻中出现不同的响应差异。

4 结论

SR+NPK能显著提升双季稻田土壤SOC各组分含量, 包括TOC, MBC, AOC及LFOC。与此同时, SR+NPK也显著提高土壤SON各组分含量, 具体表现为TN, AHN, AN和AAN的增加。此外, SR+NPK还显著提高早、晚稻季的AOC/TOC和MBN/TN比值。然而, 与NPK相比, SBR+NPK则显著降低早稻季的LF, LFOC和TN含量, 以及晚稻季的EOC含量, 并导致TOC含量下降。同时, SBR+NPK处理还降低了土壤微生物群落的丰富度与多样性。本研究表明, 土壤微生物群落组成与SOC和SON组分含量密切相关, 其中LFOC, ASN和MBN含量是驱动微生物群落变化的主要因素。综上所述, 长期实施秸秆还田是提升双季稻田土壤有机碳、氮组分固定、实现农业可持续发展的有效途径。

参考文献

- 1 Maltas A, Kebli H, Oberholzer H R, et al. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degrad Dev*, 2018, 29: 926–938
- 2 Benbi D K, Brar K, Toor A S, et al. Sensitivity of labile soil organic carbon pools to long-term fertilizer, straw and manure management in rice-wheat system. *Pedosphere*, 2015, 25: 534–545
- 3 Chen S, Xu C, Yan J, et al. The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: an 11-year field study of rice-based cropping systems in southeast China. *Agr Ecosyst Environ*, 2016, 223: 261–269
- 4 Li L J, Han X Z. Changes of soil properties and carbon fractions after long-term application of organic amendments in Mollisols. *Catena*, 2016, 143: 140–144
- 5 Zhang J, Hu K, Li K, et al. Simulating the effects of long-term discontinuous and continuous fertilization with straw return on crop yields and soil organic carbon dynamics using the DNDC model. *Soil Tillage Res*, 2017, 165: 302–314
- 6 Yu Q, Hu X, Ma J, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields. *Soil Tillage Res*, 2020, 196: 104483
- 7 Kimura M, Murase J, Lu Y. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation of organic materials and the fates of their end products (CO₂ and CH₄). *Soil Biol Biochem*, 2004, 36: 1399–1416
- 8 Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agr EcoSyst Environ*, 2009, 129: 344–348
- 9 Wissing L, Kölbl A, Vogelsang V, et al. Organic carbon accumulation in a 2000-year chronosequence of paddy soil evolution. *Catena*, 2011, 87: 376–385
- 10 Fan W, Wu J. Short-term effects of returning granulated straw on soil microbial community and organic carbon fractions in dryland farming. *J Microbiol*, 2020, 58: 657–667

- 11 Huang Q R, Hu F, Huang S, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen in a subtropical paddy soil. *Pedosphere*, 2009, 19: 727–734
- 12 Chen A, Zhang W, Sheng R, et al. Long-term partial replacement of mineral fertilizer with in situ crop residues ensures continued rice yields and soil fertility: a case study of a 27-year field experiment in subtropical China. *Sci Total Environ*, 2021, 787: 147523
- 13 Mu X, Zhao Y, Liu K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain. *Eur J Agron*, 2016, 78: 32–43
- 14 Liang G, Wu H, Houssou A A, et al. Soil respiration, glomalin content, and enzymatic activity response to straw application in a wheat-maize rotation system. *J Soils Sediments*, 2017, 18: 697–707
- 15 Smitha G R, Basak B B, V. T, et al. Nutrient management through organics, bio-fertilizers and crop residues improves growth, yield and quality of sacred basil (*Ocimum sanctum* Linn). *Ind Crops Prod*, 2019, 128: 599–606
- 16 Huang W, Wu J, Pan X, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon fractions and enzyme activities in a double-cropped rice paddy in South China. *J Integr Agr*, 2021, 20: 236–247
- 17 Xu Y, Nie L, Buresh R J, et al. Agronomic performance of late-season rice under different tillage, straw, and nitrogen management. *Field Crops Res*, 2010, 115: 79–84
- 18 Liao P, Huang S, van Gestel N C, et al. Liming and straw retention interact to increase nitrogen uptake and grain yield in a double rice-cropping system. *Field Crops Res*, 2018, 216: 217–224
- 19 Thuy N H, Shan Y, Bijay-Singh Y, et al. Nitrogen supply in rice-based cropping systems as affected by crop residue management. *Soil Sci Soc Amer J*, 2008, 72: 514–523
- 20 Trivedi P, Delgado-Baquerizo M, Jeffries T C, et al. Soil aggregation and associated microbial communities modify the impact of agricultural management on carbon content. *Environ Microbiol*, 2017, 19: 3070–3086
- 21 Tong L, Zhu L, Lv Y, et al. Response of organic carbon fractions and microbial community composition of soil aggregates to long-term fertilizations in an intensive greenhouse system. *J Soils Sediments*, 2020, 20: 641–652
- 22 Xie Z, Tu S, Shah F, et al. Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in south China. *Field Crops Res*, 2016, 188: 142–149
- 23 Huang S, Zeng Y, Wu J, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: a meta-analysis. *Field Crops Res*, 2013, 154: 188–194
- 24 Bao S D. Soil Agrochemical Analysis (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000 [鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000]
- 25 Zeng Y H, Fan C G, Wu J F, et al. Replacement ratio of nitrogen and potassium fertilizer by straw incorporation in early rice under the same nitrogen, phosphorus and potassium input (in Chinese). *J Plant Nut Fert*, 2017, 23: 658–668 [曾研华, 范呈根, 吴建富, 等. 等养分条件下稻草还田替代双季早稻氮钾肥比例的研究. 植物营养与肥料学报, 2017, 23: 658–668]
- 26 Zeng Y H, Wu J F, Zeng Y J, et al. Effects of straw incorporation with reducing chemical fertilizers on nutrient absorption and utilization and grain yield of double-cropping late rice under mechanical harvest (in Chinese). *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 454–462 [曾研华, 吴建富, 曾勇军, 等. 机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响. 作物学报, 2018, 44: 454–462]
- 27 Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19: 703–707
- 28 Blair G J, Lefroy R D, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Aust J Agric Res*, 1995, 46: 1459
- 29 Jiang P K, Xu Q F, Xu Z H, et al. Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a *Phyllostachys praecox* stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China. *For Ecol Manage*, 2006, 236: 30–36
- 30 Campbell C A, Biederbeck V O, Selles F, et al. Effect of manure and p fertilizer on properties of a black chernozem in southern Saskatchewan. *Can J Soil Sci*, 1986, 66: 601–614
- 31 Chen Z, Wang H, Liu X, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system. *Soil Tillage Res*, 2017, 165: 121–127
- 32 Stevenson F J. Organic forms of soil nitrogen. In: *Nitrogen in Agricultural Soils*. Madison: American Society of Agronomy, 1982. 67–122
- 33 Zhang X, Sun N, Wu L, et al. Effects of enhancing soil organic carbon sequestration in the topsoil by fertilization on crop productivity and stability: evidence from long-term experiments with wheat-maize cropping systems in China. *Sci Total Environ*, 2016, 562: 247–259
- 34 Gadde B, Bonnet S, Menke C, et al. Air pollutant emissions from rice straw open field burning in India, Thailand and the Philippines. *Environ*

- [Pollut](#), 2009, 157: 1554–1558
- 35 Wang W, Lai D Y F, Wang C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field. [Soil Tillage Res](#), 2015, 152: 8–16
- 36 Kumar A, Kushwaha K K, Singh S, et al. Effect of paddy straw burning on soil microbial dynamics in sandy loam soil of Indo-Gangetic plains. [Environ Tech Innovation](#), 2019, 16: 100469
- 37 Wu H, Du S, Zhang Y, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse soil organic nitrogen fractions and soil-soluble nitrogen pools. [Agric Water Manage](#), 2019, 216: 415–424
- 38 Malhi S S, Nyborg M, Goddard T, et al. Long-term tillage, straw management and N fertilization effects on quantity and quality of organic C and N in a Black Chernozem soil. [Nutr Cycl Agroecosyst](#), 2011, 90: 227–241
- 39 Templer P, Findlay S, Lovett G. Soil microbial biomass and nitrogen transformations among five tree species of the Catskill Mountains, New York, USA. [Soil Biol Biochem](#), 2003, 35: 607–613
- 40 Sharma S, Singh P, Choudhary O P, et al. Nitrogen and rice straw incorporation impact nitrogen use efficiency, soil nitrogen pools and enzyme activity in rice-wheat system in north-western India. [Field Crops Res](#), 2021, 266: 108131
- 41 Hopkins D W, Shiel R S. Size and activity of soil microbial communities in long-term experimental grassland plots treated with manure and inorganic fertilizers. [Biol Fert Soils](#), 1996, 22: 66–70
- 42 Qiu S J, Peng P Q, Li L, et al. Effects of applied urea and straw on various nitrogen fractions in two Chinese paddy soils with differing clay mineralogy. [Biol Fert Soils](#), 2012, 48: 161–172
- 43 Li L, Li S. Nitrogen mineralization from animal manures and its relation to organic N fractions. [J Integr Agr](#), 2014, 13: 2040–2048
- 44 Allison V J, Miller R M, Jastrow J D, et al. Changes in soil microbial community structure in a tallgrass prairie chronosequence. [Soil Sci Soc Amer J](#), 2005, 69: 1412–1421
- 45 Li J, Wen Y, Li X, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain. [Soil Tillage Res](#), 2018, 175: 281–290
- 46 Zhang Q, Zhou W, Liang G, et al. Distribution of soil nutrients, extracellular enzyme activities and microbial communities across particle-size fractions in a long-term fertilizer experiment. [Appl Soil Ecol](#), 2015, 94: 59–71
- 47 Farrell M, Prendergast-Miller M, Jones D L, et al. Soil microbial organic nitrogen uptake is regulated by carbon availability. [Soil Biol Biochem](#), 2014, 77: 261–267
- 48 Schaeffer S M, Evans R D. Pulse additions of soil carbon and nitrogen affect soil nitrogen dynamics in an arid Colorado Plateau shrubland. [Oecologia](#), 2005, 145: 425–433
- 49 Xue J F, Pu C, Liu S L, et al. Effects of tillage systems on soil organic carbon and total nitrogen in a double paddy cropping system in Southern China. [Soil Tillage Res](#), 2015, 153: 161–168
- 50 Singh Y, Singh B, Timsina J. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics. [Adv Agron](#). 2005, 85: 269–407
- 51 Olk D C, Jimenez R R, Moscoso E, et al. Phenol accumulation in a young humic fraction following anaerobic decomposition of rice crop residues. [Soil Sci Soc Amer J](#), 2009, 73: 943–951
- 52 Sierra C A. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in the Arrhenius equation: some theoretical considerations. [Biogeochemistry](#), 2012, 108: 1–15
- 53 Poulsen P H B, Magid J, Luxhoi J, et al. Effects of fertilization with urban and agricultural organic wastes in a field trial—waste imprint on soil microbial activity. [Soil Biol Biochem](#), 2013, 57: 794–802
- 54 Sun J, Zhang Q, Zhou J, et al. Pyrosequencing technology reveals the impact of different manure doses on the bacterial community in apple rhizosphere soil. [Appl Soil Ecol](#), 2014, 78: 28–36
- 55 Ahn J H, Song J, Kim B Y, et al. Characterization of the bacterial and archaeal communities in rice field soils subjected to long-term fertilization practices. [J Microbiol](#), 2012, 50: 754–765
- 56 Daquiado A R, Kuppasamy S, Kim S Y, et al. Pyrosequencing analysis of bacterial community diversity in long-term fertilized paddy field soil. [Appl Soil Ecol](#), 2016, 108: 84–91
- 57 Wolińska A, Kuźniar A, Zielenkiewicz U, et al. Bacteroidetes as a sensitive biological indicator of agricultural soil usage revealed by a culture-independent approach. [Appl Soil Ecol](#), 2017, 119: 128–137

- 58 Zhang Z, Yan J, Han X, et al. Labile organic carbon fractions drive soil microbial communities after long-term fertilization. [Glob Ecol Conserv](#), 2021, 32: e01867
- 59 Dong W Y, Zhang X Y, Dai X Q, et al. Changes in soil microbial community composition in response to fertilization of paddy soils in subtropical China. [Appl Soil Ecol](#), 2014, 84: 140–147
- 60 Huang L, Bai J, Wen X, et al. Microbial resistance and resilience in response to environmental changes under the higher intensity of human activities than global average level. [Glob Change Biol](#), 2020, 26: 2377–2389
- 61 Xiao R, Guo Y, Zhang M, et al. Stronger network connectivity with lower diversity of soil fungal community was presented in coastal marshes after sixteen years of freshwater restoration. [Sci Total Environ](#), 2020, 744: 140623
- 62 Zhang M, Dang P, Haegeman B, et al. The effects of straw return on soil bacterial diversity and functional profiles: a meta-analysis. [Soil Biol Biochem](#), 2024, 195: 109484

Long-term straw retention with reducing chemical fertilizers application improves soil carbon and nitrogen fractions and microbial community composition in a double rice-cropping system

YANG ShiQi¹, CHEN LiMing², HUANG Wan³, YI YanHong⁴, YANG TaoTao⁵, TAN XueMing¹, ZENG YongJun¹, PAN XiaoHua¹, HUANG Shan¹ & ZENG YanHua^{1*}

¹ Ministry of Education and Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic, Breeding Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

² College of Biological and Environmental Engineering, Jingdezhen University, Jingdezhen 333400, China

³ Ji'an Institute of Agricultural Sciences, Ji'an 343229, China

⁴ Jiangxi Meteorological Service Centre, Nanchang 330096, China

⁵ Rice Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510225, China

* Corresponding author, E-mail: zyh74049501@163.com

Long-term straw incorporation continuously enhances soil fertility by improving the pools of soil organic carbon (SOC) and soil organic nitrogen (SON). However, the characteristics of changes in SOC and SON components, as well as their relationships with microbial communities remain unclear. Based on an 8-year long-term *in-situ* experiment, this study investigated the effects of straw removal (NPK), straw burned return (SBR+NPK), and straw return (SR+NPK) under equivalent N, phosphorus, and potassium nutrients inputs on SOC and SON components, as well as their associated microbial communities within a double-cropping rice system. The results indicated that, compared to the NPK and SBR+NPK treatments, the SR+NPK treatment significantly increased the contents of soil total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), and active organic carbon (AOC) in both the early and late rice seasons ($P<0.05$). Notably, compared to the no fertilizer treatment (CK), the SR+NPK treatment significantly enhanced the contents of TOC, MBC, and AOC, with increases of 14.5% to 15.9%, 34.3% to 40.9%, and 29.8% to 39.8%, respectively. During the early rice season, the SR+NPK treatment significantly increased the contents of soil total nitrogen (TN), microbial biomass nitrogen (MBN), acid-hydrolyzable nitrogen (AHN), ammonium nitrogen (AN), and amino acid nitrogen (AAN) compared to the NPK and SBR+NPK treatments, with increases range from 4.0% to 9.1%, 36.6% to 37.3%, 7.4% to 10.8%, 17.3% to 21.0%, and 12.0% to 17.5%, respectively. Meanwhile, the SR+NPK treatment significantly enhanced the ratios of MBC/TOC and MBN/TN during the early rice season. The improvement on TOC under SR+NPK was attributed to soil particulate organic C, whereas AHN, AN, and AAN contributed to high TN content. Furthermore, SR+NPK improved the ratio of AOC/TOC during the early rice season, and easily oxidizable organic carbon, the ratio of TOC/TN ratio in the late rice season. Conversely, SBR+NPK raised the ratio of DOC/TOC in the early rice season but resulted in a decrease in soil microbial richness and diversity, particularly during the early rice season. The dominant phyla of soil microbial communities in the double-cropping rice were *Proteobacteria*, *Chloroflexi*, and *Acidobacteria*, which were primarily influenced by light fraction organic carbon, acid-hydrolyzable amino sugar nitrogen, and MBN. The findings suggest that long-term straw return can effectively improve soil organic carbon and nitrogen fractions by driving the changes in soil microbial communities.

long-term straw residue retention, double rice-cropping system, chemical fertilizer reduction, soil organic C fraction, soil N fraction, microbial community structure

doi: [10.1360/SSV-2025-0210](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0210)