

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.05.007

赵颖, 周枫, 罗佳琳, 等. 水稻秸秆还田配施肥料对小麦产量和氮素利用的影响. 土壤, 2021, 53(5): 937–944.

水稻秸秆还田配施肥料对小麦产量和氮素利用的影响^①

赵颖¹, 周枫¹, 罗佳琳^{1,2}, 赵亚慧¹, 王宁¹, 于建光^{1,2,3*}, 薛利红^{1,3}, 杨林章^{1,3}

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014)

摘要: 为了解高碳氮比秸秆还田与肥料施用对金坛地区小麦产量和氮素利用的影响, 通过设置大田试验, 研究了稻秸还田与肥料施用对麦季土壤养分、微生物生物量、作物产量和氮肥利用率的影响。结果表明: 稻秸还田配施肥料能够提高土壤速效养分含量。单施肥仅显著影响拔节期微生物生物量碳, 单施稻秸显著影响拔节期和抽穗期微生物生物量氮, 稻秸还田和肥料施用的交互作用在拔节期显著影响土壤微生物生物量和微生物熵。单施肥、稻秸配施肥料处理的氮肥表观利用率分别为 31% 和 37%, 稻秸配施肥料后的氮肥农学利用率和偏生产力表明每公斤纯氮增产幅度约为 6.86 kg 籽粒。单施肥和稻秸配施肥料显著增加了小麦每穗粒数及千粒重, 并且理论产量分别增加 211% 和 319%, 实际产量则分别增加 119% 和 231%, 而单施稻秸处理的实产却减产 21%。综合分析认为, 稻秸还田搭配肥料施用, 能够保证当季土壤有效氮供应, 促进土壤有机质转化为更易被微生物利用的形态, 提高养分有效性, 促进小麦对氮素的吸收利用, 有利于每穗粒数和千粒重的增加, 从而最终提高小麦的产量。

关键词: 稻秸还田; 土壤养分; 土壤微生物生物量; 小麦产量; 氮肥利用率

中图分类号: S158.3; S512.1+1 **文献标志码:** A

Effects of Rice Straw Returning Combined with Fertilizer Application on Yield and Nitrogen Utilization of Wheat

ZHAO Ying¹, ZHOU Feng¹, LUO Jialin^{1,2}, ZHAO Yahui¹, WANG Ning¹, YU Jianguang^{1,2,3*}, XUE Lihong^{1,3}, YANG Linzhang^{1,3}
(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3 Key Laboratory for Agricultural Environment at the Lower Reach of the Yangtze River Plain, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract: The rice-wheat rotation system in Jintan of Jiangsu Province was chosen to investigate the effects of rice straw returning combined with fertilizer application on soil nutrients, microbial biomass, crop yield and nitrogen use efficiency in wheat season via filed experiments. Results showed that the contents of soil available nutrients could be increased by rice straw returning combined with fertilization. The treatment of fertilization only significantly affected soil microbial biomass C at jointing stage, while rice straw incorporation notably influenced soil microbial biomass N at jointing and heading stages, and the interaction of rice straw returning and fertilization observably affected soil microbial biomass quotient at jointing stage. The nitrogen use efficiencies of fertilization and rice straw returning combined with fertilization treatments were 31% and 37%, respectively; while the nitrogen agronomic efficiency and partial factor productivity showed that the yield increase per kilogram pure nitrogen was about 6.86 kg grain. The spikelets per panicle and 1 000-grain weight of fertilization and rice straw returning combined with fertilization treatments were significantly increased. The theoretical yields of these two treatments increased by 211% and 319%, respectively, while actual yields increased by 119% and 231%, respectively. However, the actual yield of rice straw returning decreased by 21%. Overall, rice straw returning to the field combined with fertilization can ensure the supply of soil available nitrogen, facilitate the transformation of soil organic matter into microbial available form, improve the nutrient availability, promote the absorption and utilization of nitrogen by wheat, and is to the benefit of spikelets per panicle and

①基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)和江苏省博士后科研资助计划项目(2019K167)资助。

* 通讯作者(yujg@jaas.ac.cn)

作者简介: 赵颖(1988—), 女, 江苏南京人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤氮素循环及其生态环境效应研究。E-mail: kathy-137@163.com

1 000-grain weight increases, thus ultimately elevate wheat yield.

Key words: Rice straw returning; Soil nutrients; Soil microbial biomass; Wheat yield; Nitrogen use efficiency

农业生态系统中, 秸秆长期连续还田是一种具有多种生态效益的耕作管理方式, 是维持土壤有机质含量、提高生物活性、改良土壤物理性状以及增加养分可利用性的有效手段^[1]。然而也有研究表明, 秸秆的添加对作物氮素吸收和产量产生了负面的影响^[2]。作物与土壤微生物具有相似的养分需求, 与微生物的竞争是作物吸收氮素的关键过程之一^[3-4]。还田秸秆的碳氮比(C/N)对作物和土壤微生物间的氮素竞争有着至关重要的影响。作物与微生物对氮素的竞争强度可能随着秸秆的 C/N 增加而加剧^[5]。高质量秸秆通常具有较高的氮含量、较低的木质素(L)和纤维素含量, 并且 C/N 和 L/N 的比值较低, 因而降解速率更高; 高 C/N 且木质素和难降解有机物含量更高的秸秆常被称为低质量秸秆, 施入土壤后分解缓慢, 且会促进土壤无机氮的净同化作用, 影响氮素有效性, 对作物的生长产生负面影响^[6]。一般认为秸秆 C/N>25 是导致土壤氮净同化作用发生的经验值。谷类作物(如水稻、小麦和玉米)秸秆 C/N 一般可达到 50 以上, 还田前期往往会出现微生物与作物争夺氮素的现象。因此, 为保证作物生长, 高 C/N 秸秆还田通常需要配合氮肥的施用。然而, 我国农业生产面临着氮肥使用过量导致生态环境氮污染日益显现以及当季利用率低下的问题^[7]。因此, 在秸秆还田的同时如何调整氮肥运筹才能既满足作物生长需求又降低氮素流失风险是理论和实践中亟待解决的重要问题。

国内外学者针对秸秆还田与土壤微生物、土壤养分的关系等方面进行了相关的研究, 初步明确了秸秆还田对土壤肥力、作物产量和氮肥利用率的重要作用^[8-9]。江苏省是中国经济最发达、农业最集约化的区域之一^[10], 稻麦轮作是该地区最常见的种植制度^[11], 并且不同于其他小麦主产区, 该地区冬季雨水较多制约了小麦的产量。稻季产生的秸秆 C/N 较高, 大量还田后短期内可能会造成土壤氮素的固持并进而影响后续作物生长。因此, 在该地区开展秸秆还田配施肥料培肥地力的研究对于提高江苏地区小麦产量具有重要的意义。本研究拟通过江苏地区稻麦轮作系统的大田试验, 研究水稻秸秆还田配施肥料对麦季土壤养分、微生物生物量、作物产量和氮肥利用率的影响, 以期在秸秆还田条件下因地制宜地科学施肥提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验地点位于江苏省常州市金坛区薛埠镇罗村(31°39'45.85"N, 119°24'15.06"E)。该区属北亚热带季风气候, 年降水量 1 063.5 mm, 年均气温 15.3 °C。土壤基础理化性质: pH 5.58、碱解氮 133.04 mg/kg、有效磷 17.57 mg/kg、速效钾 58.88 mg/kg、全氮 1.23 g/kg、有机碳 13.78 g/kg。

1.2 试验设计

试验时间为 2018 年 11 月至 2019 年 6 月, 小麦种植方式为机条播, 水稻秸秆通过旋耕机作业还田, 小麦品种为扬辐麦 4 号。试验共设 4 个大区, 大区间以自然田埂或筑埂分隔, 大区内播种小麦后再筑埂分隔为 3 块小区, 每小区面积为 300 ~ 500 m²。试验共设置 4 个处理, 每处理 3 次重复, 具体处理设置见表 1。试验前先将上季水稻收获, 秸秆不还田处理将秸秆移除, 还田处理留茬 10 cm 左右, 通过收割机将秸秆粉碎为 5 ~ 10 cm, 均匀抛洒后采用常规旋耕还田, 深度为 10 ~ 12 cm。2018 年 11 月 2 日进行小麦播种。各处理施肥量见表 1, 其中基肥用量为配方肥(氮磷钾比例 16:18:8)375 kg/hm², 尿素 146.55 kg/hm²; 拔节孕穗肥用量为配方肥(氮磷钾比例 18:7:10)225 kg/hm², 尿素 120 kg/hm²。基肥在小麦播种时施入, 拔节孕穗肥在倒三叶期(3 月中旬)基部第二节间伸长 1 ~ 2 cm、叶色开始褪淡时施入。除草、病虫害防治等按照当地常规管理。此外, 前季稻季处理同样为相对应的 F0S0、F0S1、F1S0 和 F1S1, 施肥方案为: F0S0 和 F0S1 处理不施肥, F1S0 和 F1S1 处理的 N、P₂O₅、K₂O 用量分别为 270、37.5 和 71.25 kg/hm², 其中氮肥运筹为基肥: 分蘖肥: 穗肥=0.25: 0.31: 0.44。

表 1 试验处理
Table 1 Treatments of experiment

处理	处理描述	施肥量(kg/hm ²)			氮肥基 追比例
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
F0S0	不施肥、秸秆不还田	-	-	-	-
F0S1	不施肥、秸秆还田	-	-	-	-
F1S0	施肥、秸秆不还田	225	83.25	52.5	0.57: 0.43
F1S1	施肥、秸秆还田	225	83.25	52.5	0.57: 0.43

1.3 样品采集与测定

在小麦拔节期(2019年3月25日)、抽穗期(2019年4月25日)和收获后(2019年6月2日),分别采用五点取样法在各试验区采集0~20 cm的耕层土壤样品。所有土壤样品采集后,挑根、过2 mm筛并混匀,鲜样保存于4℃冰箱。土壤微生物生物量碳、氮(SMBC、SMBN)采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定^[12];土壤有机碳(SOC)采用H₂SO₄-K₂Cr₂O₇湿烧法测定^[13];土壤全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定^[13];碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定^[13];有效磷(AP)采用钼锑抗比色法测定^[13];速效钾(AK)采用火焰光度计比色法测定^[13]。采集的植株样品在105℃下杀青1h,然后于75℃下烘干至恒质量,经磨碎后采用H₂SO₄-H₂O₂法消煮样品,凯氏定氮法测定植株含氮量^[13]。

小麦收获后,各小区取样考种,调查有效穗数、实粒数和千粒重等产量构成指标,获得理论产量。每个试验区作物的实际产量按大区测定。

1.4 数据处理

微生物熵为土壤微生物生物量碳与土壤有机碳的比值,即SMBC/SOC。

氮肥表观利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力的计算公式分别为:

氮肥表观利用率(%)=(施氮区吸氮量-无氮区吸氮量)/施氮量×100

氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮区产量-无氮区产量)/施氮量

氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区产量/施氮量

试验数据采用Excel 2016和SPSS 19.0进行处理与统计分析,图形绘制采用Origin 2018,显著性检验为Duncan检验。

2 结果与分析

2.1 稻秸还田与肥料施用对土壤化学性质的影响

表2表明,小麦主要生育时期土壤有机碳含量变化范围在13.69~17.02 g/kg,总体变化趋势不明显。F1S0和F1S1处理之间的有机碳含量差异在整个生育期内不显著,但在抽穗和成熟期二者均显著高于F0S0和F0S1处理($P<0.05$)。主要生育时期内土壤全氮含量的变化范围为1.55~1.98 g/kg,各生育期的最高值均为F1S0处理。

对于土壤速效养分含量,3个生育时期内F1S0和F1S1处理相对于其他处理具有提高碱解氮含量的趋势,但二者之间的差异不显著。F0S0处理的有效磷含量在各生育期均最低,而F0S1、F1S0和F1S1处理在生育中后期互无显著差异。处理间拔节期和抽穗期的速效钾含量变化趋势表现为F0S1≈F1S1>F0S0≈F1S0,且抽穗期含量整体大于拔节期;在成熟期,F0S0处理的速效钾含量显著低于其他处理($P<0.05$),而F1S1处理显著高于其他处理($P<0.05$)。

表2 稻秸还田与肥料施用对土壤化学性质的影响

Table 2 Effects of rice straw returning and fertilizer application on soil chemical properties

生育期	处理	有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
拔节期	F0S0	14.65±0.91 a	1.69±0.04 b	59.53±5.24 ab	10.21±1.10 c	52.79±1.73 b
	F0S1	14.55±0.61 a	1.74±0.05 b	53.53±2.12 b	12.07±2.66 bc	60.50±3.90 a
	F1S0	15.99±0.80 a	1.98±0.07 a	61.38±9.59 ab	15.25±1.01 a	51.23±3.09 b
	F1S1	15.61±0.90 a	1.63±0.08 b	67.38±8.11 a	14.60±0.36 ab	62.17±1.04 a
抽穗期	F0S0	13.69±0.15 c	1.61±0.03 b	46.15±3.66 b	8.33±1.89 b	23.23±4.20 b
	F0S1	14.64±0.36 b	1.73±0.20 b	55.38±8.11 ab	11.84±1.96 a	48.14±3.19 a
	F1S0	16.37±0.50 a	1.97±0.11 a	60.46±4.45 a	13.45±2.07 a	22.32±4.64 b
	F1S1	16.05±0.30 a	1.82±0.01 ab	59.99±4.15 a	14.64±1.35 a	45.12±6.57 a
成熟期	F0S0	14.59±0.35 b	1.55±0.00 c	58.61±3.66 b	9.49±1.83 b	39.31±2.26 c
	F0S1	15.34±0.48 b	1.62±0.09 bc	55.38±6.24 b	12.66±2.25 ab	51.63±6.28 b
	F1S0	17.02±0.72 a	1.87±0.09 a	66.92±2.40 a	17.47±2.44 a	56.63±4.89 b
	F1S1	16.45±0.41 a	1.76±0.03 ab	70.15±0.80 a	13.74±3.45 ab	70.29±4.80 a

注:表中同列数据小写字母不同表示每个生育期内各处理间差异显著($P<0.05$),下同。

2.2 稻秸还田与肥料施用对小麦土壤微生物生物量碳氮和微生物熵的影响

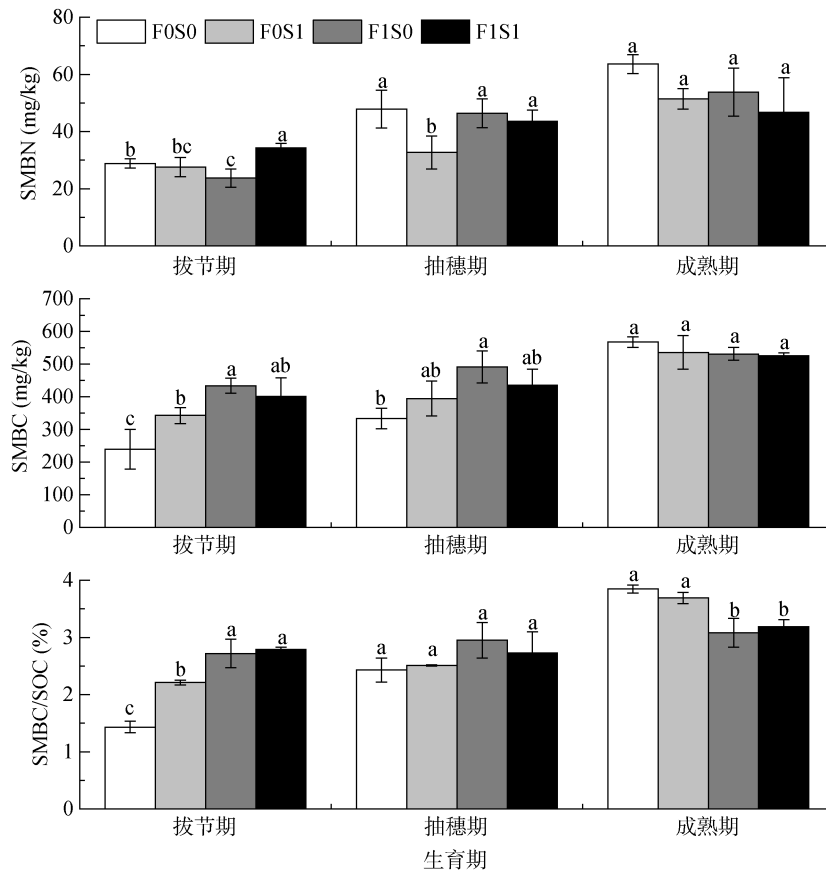
从图1可以看出,小麦拔节期的SMBN含量总

体低于抽穗期和成熟期;表3则表明,肥料施用对小麦整个生育期SMBN含量的影响不显著,但稻秸还田在拔节和抽穗期对SMBN含量造成了显著的影响

($P < 0.05$), 而稻秸还田和肥料施用的交互作用则极显著地影响拔节期 SMBN 含量($P < 0.01$)。成熟期各处理间的 SMBN 含量无显著差异, 但 F0S0 处理(63.66 mg/kg)有高于其他处理的趋势。拔节期 F1S1 处理的 SMBN 含量(34.39 mg/kg)显著高于其他处理($P < 0.05$), 而 F0S0 与 F0S1、F0S1 与 F1S0 之间差异不显著。抽穗期 SMBN 含量的变化趋势为 F0S0 \approx F1S0 \approx F1S1 $>$ F0S1。

与 SMBN 类似, 小麦拔节期的 SMBC 含量低于抽穗期和成熟期, 且成熟期各处理间的 SMBC 含量无显著差异(图 1)。拔节期 F0S0 处理的 SMBC 含量

(239.33 mg/kg)显著低于其他处理($P < 0.05$), F1S0 处理最高(434.11 mg/kg), 但与 F1S1 处理(401.67 mg/kg)间无显著差异, 且 F0S1 处理(342.77 mg/kg)与 F1S1 处理之间差异也不显著。抽穗期总体趋势与拔节期类似, F0S0 处理的 SMBC 含量(333.44 mg/kg)最小, 但仅显著小于 F1S0 处理(490.92 mg/kg)($P < 0.05$), 与 F0S1 和 F1S1 处理相比仅有下降趋势但差异不显著, 而 F0S1、F1S0 和 F1S1 三者间也无显著差异。肥料施用以及稻秸还田配施肥料对拔节期 SMBC 含量具有显著影响($P < 0.05$, 表 3)。



(图中小写字母不同表示每个生育期内各处理间差异显著($P < 0.05$), 下同)

图 1 稻秸还田与肥料施用对土壤微生物生物量碳氮和微生物熵的影响

Fig. 1 Effects of rice straw returning and fertilizer application on SMBC, SMBN and microbial quotient

表 3 稻秸还田(S)与肥料施用(F)对土壤微生物生物量碳氮和微生物熵影响的多因素方差分析结果

Table 3 Univariate variance analysis of effects of rice straw returning (S) and fertilizer application (F) on SMBC, SMBN and microbial quotient

处理	SMBN			SMBC			土壤微生物熵		
	拔节期	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期
F	NS	NS	NS	**	NS	NS	**	NS	**
S	*	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS
F×S	**	NS	NS	*	NS	NS	*	NS	NS

注: NS 表示影响不显著, *, ** 分别表示影响达到 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 显著水平。

图 1 表明, 在小麦拔节期, F0S0 处理的土壤微生物熵(1.43%)显著低于其他处理($P < 0.05$), 而 F1S0

处理(2.72%) \approx F1S1 处理(2.79%), 显著高于 F0S1 处理(2.21%)($P < 0.05$)。抽穗期各处理间的微生物熵均无

显著差异，变化范围为 2.43% ~ 2.95%。然而在小麦成熟期，处理间微生物熵的趋势表现为 F0S0 ≈ F0S1 > F1S0 ≈ F1S1。由表 3 可以看出，肥料施用对拔节和成熟期土壤微生物熵影响极显著 ($P < 0.01$)，而稻秸还田以及稻秸还田配施肥料只在拔节期具有显著影响 ($P < 0.05$)。

2.3 稻秸还田与肥料施用对小麦产量及其构成因素的影响

表 4 的小麦产量表明，F1S0 和 F1S1 处理可显著增加小麦的理论产量和实际产量 ($P < 0.05$)，理论产量相比 F0S0 处理分别增加 211% 和 319%，实际产量则分别增加 119% 和 231%；而 F0S1 处理增产不显著，理论产量虽然增加了 43%，但实际产量却减少 21%。产量构成因素方面(表 4)，各处理间的有效穗数并无显著差异。F1S0 和 F1S1 处理的每穗粒数显著高于 F0S0 和 F0S1 处理 ($P < 0.05$)，变化范围介于 7.88

~ 22.93。F0S0、F0S1、F1S0 和 F1S1 处理的千粒重分别为 35.41、36.92、39.34 和 41.64 g，有升高的趋势，但 F0S0 处理仅显著小于 F1S0 和 F1S1 处理 ($P < 0.05$)，F0S1 处理则显著小于 F1S1 处理 ($P < 0.05$)。

2.4 稻秸还田与肥料施用对小麦氮素吸收与利用的影响

F0S1 处理对小麦氮素积累无显著影响，而施肥条件下(F1S0 和 F1S1 处理)小麦秸秆和籽粒氮素积累量有明显升高的趋势(图 2)。F1S0 和 F1S1 处理的籽粒氮素积累量较 F0S0 处理分别显著提高了 63.85 和 70.43 kg/hm² ($P < 0.05$)。对于秸秆氮素积累量，F1S1 处理显著高于 F0S0 和 F0S1 处理 ($P < 0.05$)，而 F1S0 处理与 F0S0、F0S1 处理相比有升高趋势但差异不显著。施肥处理间(F1S0 和 F1S1 处理)秸秆和籽粒氮素积累量均无显著差异，未施肥处理(F0S0 和 F0S1 处理)同样如此。

表 4 稻秸还田与肥料施用对小麦产量构成因素的影响
Table 4 Effects of rice straw returning and fertilizer application on yield components of wheat

处理	理论产量(kg/hm ²)	实际产量(kg/hm ²)	有效穗数(10 ⁴ /hm ²)	每穗粒数	千粒重(g)
F0S0	1 125.79 ± 302.57 b	1 381.21	400.20 ± 26.24 a	7.88 ± 1.61 b	35.41 ± 0.93 c
F0S1	1 612.08 ± 45.17 b	1 086.34	452.23 ± 62.26 a	10.11 ± 0.75 b	36.92 ± 2.53 bc
F1S0	3 503.11 ± 657.63 a	3 029.40	466.23 ± 82.07 a	21.34 ± 2.57 a	39.34 ± 1.24 ab
F1S1	4 712.04 ± 1 192.07 a	4 573.94	490.91 ± 49.39 a	22.93 ± 4.17 a	41.64 ± 1.67 a

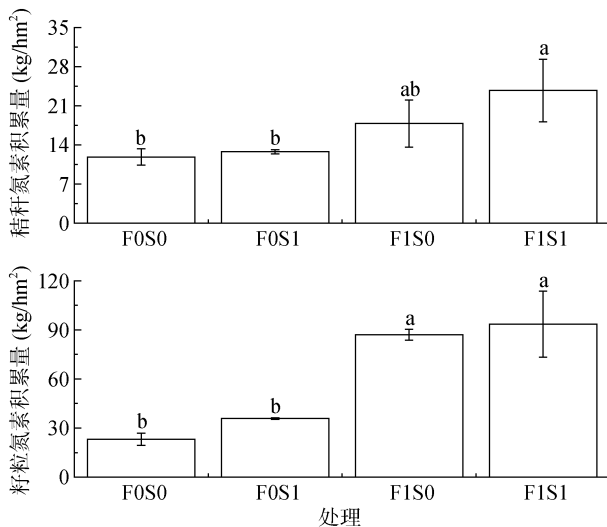


图 2 稻秸还田与肥料施用对成熟期小麦氮素积累量的影响

Fig. 2 Effects of rice straw returning and fertilizer application on nitrogen accumulation of wheat stalk in maturity stage

秸秆是否还田对氮素利用率具有一定的影响(表 5)。F1S0 处理的氮肥表观利用率为 31%，而 F1S1 处理比其提高了 6%；F1S1 处理的氮肥农学利用率和偏生产力明显高于 F1S0 处理，每公斤纯氮增产幅度约为 6.86 kg 籽粒。

表 5 稻秸还田与肥料施用对小麦氮肥利用率的影响
Table 5 Effects of rice straw returning and nitrogen fertilizer application on nitrogen use efficiency of wheat

处理	氮肥表观利用率(%)	氮肥农学利用率(kg/kg)	氮肥偏生产力(kg/kg)
F1S0	31	7.33	13.46
F1S1	37	14.19	20.33

3 讨论

秸秆还田是提升农田土壤肥力的重要措施，然而传统的秸秆全量还田通过将秸秆集中添加在耕作层的方式，会使氮素发生强烈的生物固持作用，使土壤有效氮含量降低，产生抑制作物出苗和成苗等负面影响^[5]。水稻秸秆 C/N 通常可达到 50 以上，为防止前期秸秆分解过程中微生物与作物争夺氮素，此类秸秆还田初期应当施用适量的氮肥以保证有效氮的供应。已有研究表明，秸秆还田与氮肥配合施用，能够提高还田后当季作物产量。张姍等^[14]研究表明水稻秸秆还田并配施适当的氮量有利于晚播小麦的籽粒产量。裴鹏刚等^[15]则表明，秸秆还田配施氮肥处理下水稻

增产效果显著,增幅为 9%~23%。本研究也发现,单施稻秸处理下小麦产量与不施肥不还田处理相比并无优势,从实际产量来看甚至略有减产;但稻秸还田配施肥料能够显著提升小麦产量,并且提升效果较单施肥料更为明显(表 4)。单施稻秸造成减产可能与高 C/N 秸秆单独还田导致土壤碳氮失衡有关^[16]。吴立鹏等^[17]的研究表明,秸秆还田配施氮肥后,土壤铵态氮和硝态氮含量高于未施用秸秆,进而提高了水稻产量。而在本研究中,单施稻秸时小麦 3 个主要生育期的土壤碱解氮含量相对于对照均无显著变化,而稻秸还田配施肥料则增加了土壤碱解氮含量(表 2),保证了小麦生长所需的有效氮供应,这可能是小麦增产的原因之一。前人研究表明,配施适量的氮肥能够增加土壤有效氮含量、降低土壤 C/N、促进土壤微生物的生长和活性、提高纤维素酶和其他水解酶活性、加速还田秸秆的分解和养分释放、促进作物的生长^[18-19]。因此,短期稻秸还田的同时合理搭配肥料的施用,有利于提高当季土壤有效氮含量及作物产量。

土壤微生物是生态系统多种过程的重要参与者,包括分解过程^[20]、养分获取^[21]、碳氮循环^[22]、土壤形成^[23]等。土壤微生物生物量,通常以微生物生物量碳(SMBC)和微生物生物量氮(SMBN)来衡量,是土壤生物特性的关键指标^[24]。虽然微生物生物量的绝对含量不大,但周转迅速,作为土壤养分周转的中间库对土壤养分转化和供应十分重要^[25]。因此,土壤微生物生物量可作为指征土壤肥力高低的生物学指标。不同于森林和草地土壤,农田土壤的微生物过程通常受到有效态碳的限制,因此秸秆的输入可能促进微生物的丰度、活性和生长^[26-27]。本研究中,稻秸属于 C/N 较高的秸秆,稻秸还田在小麦生长的拔节和抽穗期对土壤微生物的影响较成熟期更为显著(图 1,表 3),说明稻秸还田在小麦生长前中期显著促进了土壤微生物的生长,与前人的研究结果一致^[28]。这可能是因为秸秆在快速分解阶段,为微生物生长和繁殖提供了大量碳源,微生物种类更加丰富并表现出较高的活性。土壤微生物生长不仅受碳源的影响,氮肥的调控也会影响土壤微生物生物量^[29]。在稻秸还田的同时配施肥料,为秸秆快速分解期微生物生长繁殖提供了更多的氮源,缓解了氮素竞争,刺激了微生物的生长和繁殖;且所施用的化肥促进了植株根系的生长,根系分泌物的增加提高了微生物的活性。因此,稻秸配施肥料对于提高拔节期土壤微生物生物量具有正向作用(图 1,表 3)。SMBC/SOC 代表的微生物熵能够反映外源碳转化为微生物生物量碳,并最终成

为微生物残体的效率^[30],而微生物残体被认为是构成稳定土壤有机碳库的主要含碳成分^[31]。微生物熵从微生物学的角度揭示了土壤肥力的差异,与试验所在区域的气候条件、农作制度、土壤类型、田间管理措施等因素密切相关,变化范围一般为 0.27%~7.00%^[32]。在本研究中,各个主要生育时期的微生物熵变化范围为 1.43%~3.85%,与前人研究结果范围一致^[32]。本研究结果还表明,稻秸还田与肥料的交互作用能够提高土壤微生物熵,尤其在小麦拔节期效果显著(图 1,表 3),说明稻秸还田配施肥料对于提升小麦土壤生物肥力和碳汇具有巨大的潜力,这可能是因为拔节期稻秸处于快速分解阶段,而稻秸还田配施肥料促进了微生物的繁殖,较多的秸秆碳被微生物分解转化为有机碳,有机碳又被微生物吸收利用成为其机体的一部分,提高了土壤有机碳积累和微生物生物量^[33]。从微生物生物量和微生物熵等微生物学指标来看,稻秸还田配施肥料促进了土壤有机质转化为更容易被微生物利用的形态,提高了土壤养分供应水平。

氮素作为作物生长所必需的大量元素之一,其吸收利用影响着作物最终产量。已有研究表明,秸秆还田配施化肥后作物氮肥利用率显著提高^[16,34]。关于秸秆还田配施肥料如何增加作物的氮素利用,赵峰等^[35]认为,秸秆还田配施氮肥提高了水稻的光合作用,促进了物质合成与转化,进而提高氮肥利用率。李贵桐等^[36]研究认为,土壤中加入作物秸秆,促使了土壤微生物活性和数量的提高,从而提高了土壤的供氮潜力和能力,有利于作物对氮素的吸收。此外,王改玲等^[37]的研究则表明,秸秆还田配施肥料减少了土壤氮素损失,起到了保存和提高土壤肥效的作用。本研究中,稻秸还田配施肥料后氮肥表观利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力相较于单施肥均有所提高,分别达到 37%、14.19 kg/kg 和 20.33 kg/kg,提高了 6%、6.86 kg/kg、6.87 kg/kg。究其原因,一是稻秸还田配施肥料处理下小麦的吸氮量相对于单施肥处理有增加的趋势(图 2),表明稻秸还田配施肥料能够促进小麦对氮的吸收利用,有利于每穗粒数和千粒重的增加(表 4),进而提高氮肥利用率并获得较高的经济产量。二是因为高 C/N 稻秸的添加提高了土壤微生物生物量,对土壤氮矿化作用具有激发效应,并且配施肥料解决了土壤微生物与作物竞争土壤有效氮的问题,能够提高土壤供氮能力^[16,38],有利于小麦对氮素的吸收,这与张媛媛等^[39]的研究认为秸秆还田配施氮肥增加了土壤含氮量,提高了土壤氮

素有效性, 从而增加水稻对氮素的吸收利用, 提高了作物氮肥利用率的结果相一致。

为了进一步深入了解稻秸还田配施肥料对土壤养分和作物产量的影响及其机制, 还应当进行更为长期的秸秆还田试验, 并且从微生物学机理的角度来研究其产量增加机制也是有必要的。此外, 利用同位素示踪技术结合大田试验来研究秸秆还田与肥料配施对土壤供氮和保氮能力以及氮素分配的影响, 也有助于在深入了解其影响机制的条件下进行合理的肥料运筹。

4 结论

1) 稻麦轮作系统中, 短期稻秸还田对小麦并无增产效应, 而稻秸还田配施肥料能够显著增加小麦产量。

2) 稻秸还田配施肥料对于提高土壤微生物生物量和土壤速效养分具有正向作用, 缓解了稻秸还田条件下微生物与作物对有效态氮的争夺。

3) 稻秸还田配施肥料能够促进小麦对氮素的吸收利用, 提高氮肥利用率, 其氮肥表观利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力分别达到 37%、14.19 kg/kg 和 20.33 kg/kg。

参考文献:

- [1] Puttaso A, Vityakon P, Saenjan P, et al. Relationship between residue quality, decomposition patterns, and soil organic matter accumulation in a tropical sandy soil after 13 years[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(2): 159–174.
- [2] Yadvinder-Singh, Bijay-Singh, Ladha J K, et al. Effects of residue decomposition on productivity and soil fertility in rice-wheat rotation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 854–864.
- [3] Dunn R M, Mikola J, Bol R, et al. Influence of microbial activity on plant-microbial competition for organic and inorganic nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 2006, 289(1/2): 321–334.
- [4] Kuzyakov Y, Xu X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: Mechanisms and ecological relevance[J]. *The New Phytologist*, 2013, 198(3): 656–669.
- [5] 凌宁, 荀卫兵, 沈其荣. 根际沉积碳与秸秆碳共存下作物与微生物氮素竞争机制及其调控[J]. *南京农业大学学报*, 2018, 41(4): 589–597.
- [6] Chen B Q, Liu E K, Tian Q Z, et al. Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 429–442.
- [7] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 1–6.
- [8] Zhao X L, Yuan G Y, Wang H Y, et al. Effects of full straw incorporation on soil fertility and crop yield in rice-wheat rotation for silty clay loamy cropland[J]. *Agronomy*, 2019, 9(3): 133.
- [9] 王宁, 于建光, 常志州, 等. 稻田土壤真菌群落多样性和组成对麦秸还田的响应[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1115–1120.
- [10] Cao Y S, Tian Y H, Yin B, et al. Improving agronomic practices to reduce nitrate leaching from the rice-wheat rotation system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 195: 61–67.
- [11] Liang X Q, Xu L, Li H, et al. Influence of N fertilization rates, rainfall, and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011, 36(9/10/11): 395–400.
- [12] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703–707.
- [13] 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.
- [14] 张姗, 石祖梁, 杨四军, 等. 施氮和秸秆还田对晚播小麦养分平衡和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(9): 2714–2720.
- [15] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 等. 秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(3): 282–290.
- [16] 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.
- [17] 吴立鹏, 张士荣, 娄金华, 等. 秸秆还田与优化施氮对稻田土壤碳氮含量及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2019, 34(4): 158–166.
- [18] Arcand M M, Knight J D, Farrell R E. Differentiating between the supply of N to wheat from above and belowground residues of preceding crops of pea and canola[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(4): 563–570.
- [19] Riggs C E, Hobbie S E. Mechanisms driving the soil organic matter decomposition response to nitrogen enrichment in grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 99: 54–65.
- [20] Gessner M O, Swan C M, Dang C K, et al. Diversity meets decomposition[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(6): 372–380.
- [21] Perelo L W, Munch J C. Microbial immobilisation and turnover of ¹³C labelled substrates in two arable soils under field and laboratory conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12): 2263–2272.
- [22] Manzoni S, Porporato A. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1355–1379.
- [23] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure[J]. *The New Phytologist*, 2006, 171(1): 41–53.
- [24] Ren F L, Sun N, Xu M, et al. Changes in soil microbial biomass with manure application in cropping systems: A

- meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104291.
- [25] Anderson J P E, Domsch K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils[J]. *Soil Science*, 1980, 130(4): 211–216.
- [26] Bird J A, Horwath W R, Eagle A J, et al. Immobilization of fertilizer nitrogen in rice[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(4): 1143–1152.
- [27] St Luce M, Whalen J K, Ziadi N, et al. Labile organic nitrogen transformations in clay and sandy-loam soils amended with ¹⁵N-labelled *Faba bean* and wheat residues[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 208–218.
- [28] 马想, 黄晶, 赵惠丽, 等. 秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量碳氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1574–1580.
- [29] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1445–1451.
- [30] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. *Soil Research*, 1992, 30(2): 195.
- [31] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105.
- [32] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1335–1343.
- [33] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 144–152.
- [34] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 不同土壤肥力条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(1): 56–64.
- [35] 赵锋, 程建平, 张国忠, 等. 氮肥运筹和秸秆还田对直播稻氮素利用和产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(18): 3701–3704.
- [36] 李贵桐, 赵紫娟, 黄元仿, 等. 秸秆还田对土壤氮素转化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 162–167.
- [37] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N₂O 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 840–844.
- [38] Zhao Y, Zhang J B, Müller C, et al. Temporal variations of crop residue effects on soil N transformation depend on soil properties as well as residue qualities[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(5): 659–669.
- [39] 张媛媛, 李建林, 王春宏, 等. 氮素和生物腐解剂调控下稻草还田对水稻氮素积累及产量的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(2): 435–438.