

赵颖, 周枫, 罗佳琳, 等. 稻秸还田下不同施肥管理措施对土壤养分、冬小麦产量和氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(5): 1167-1174.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.05.011

稻秸还田下不同施肥管理措施对土壤养分、冬小麦产量和氮肥利用率的影响

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,江苏南京 210014; 2.南京农业大学资源与环境科学学院,江苏南京 210095; 3.农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室,江苏南京 210014)

摘要: 为了解江苏金坛地区稻秸还田条件下如何合理使用肥料,通过设置田间定位试验,研究稻秸还田条件下不施肥(S)、常规施肥(FS)、有机肥氮替代75%化肥氮(MS)和化肥减量20%(RS)4种处理对冬小麦产量、氮素利用的影响。结果表明,FS、MS、RS处理相对于S处理均可显著提高冬小麦产量,其中3种施肥处理的理论产量分别增加了192%、232%、260%,实际产量则分别增加了321%、278%、333%;RS处理的氮肥表观利用率、农学利用率和偏生产力相比于FS处理分别提高了14个百分点、4.59 kg/kg和5.80 kg/kg,而MS处理的氮肥表观利用率与FS处理相当,但氮肥农学利用率、偏生产力均下降了2.06 kg/kg;在1个作物生长季,稻秸还田配施肥料后的作物产量与肥料类型和施肥量无关。综合分析可知,该地区可考虑化肥减量配施或初期进行低量有机肥替代化肥,以保证作物产量并降低不合理施肥导致的潜在环境风险。

关键词: 稻秸还田; 有机肥替代; 减量施肥; 作物产量; 氮肥利用率

中图分类号: S154.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2021)05-1167-08

Effects of different fertilization management measures on soil nutrient, winter wheat yield and nitrogen use efficiency under rice straw returning

ZHAO Ying¹, ZHOU Feng¹, LUO Jia-lin^{1,2}, ZHAO Ya-hui¹, WANG Ning¹, YU Jian-guang^{1,2,3}, XUE Li-hong^{1,3}, YANG Lin-zhang^{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 and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to investigate how to apply fertilizer reasonably under the condition of rice straw returning to the field in Jintan, a field experiment was conducted to study the effects of different fertilization management measures under rice straw returning on winter wheat yield and nitrogen use efficiency. Four different treatments were designed under rice straw returning: no fertilization(S), application of chemical fertilizer(FS), substitution of organic fertilizer nitrogen for 75% of chemical fertilizer nitrogen(MS) and reduction of chemical fertilizer by 20%(RS). The results showed that FS, MS

and RS treatments could significantly increase the yield of winter wheat compared with S treatment. The theoretical yield improved by 192%, 232% and 260%, respectively, while the actual yield improved by 321%, 278% and 333%, respectively. Compared with FS, the apparent nitrogen use efficiency, nitrogen agronomic efficiency and partial factor productivity of RS treatment increased by 14

收稿日期: 2021-02-05

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

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

通讯作者: 于建光, (E-mail) yujg@jaas.ac.cn

percentage points, 4.59 kg/kg and 5.80 kg/kg, respectively. The apparent nitrogen use efficiency in MS was equivalent to that in FS, but the nitrogen agronomic efficiency and partial factor productivity in MS decreased by 2.06 kg/kg. In one growing season, the wheat yield after rice straw returning combined with fertilization was unrelated to the types and rates of fertilizer. Overall, the reduction of chemical fertilizer or substitution of chemical fertilizer with low amount of organic fertilizer in the early stage can be considered in this region to ensure crop yield and reduce environmental risks.

Key words: rice straw returning; organic fertilizer substitution; reduced fertilization; crop yield; nitrogen use efficiency

秸秆是农作物种植生产过程中的副产物,长期的秸秆还田不仅能够改良土壤的理化性质、提高土壤肥力、增强土壤有机碳和养分循环以及改善微生物性质^[1-3],还可以减轻秸秆自身对环境造成的风险^[4]。然而,谷类作物秸秆的碳氮比(C/N)通常能够达到60~80,高于土壤的C/N,在秸秆直接还田的初期分解阶段,可能导致土壤氮素含量发生相应变化^[5-6]。还田秸秆的分解消耗了土壤中的有效态氮,极易对谷类作物幼苗的生长产生不良影响,进而造成减产^[7]。因此,在谷类作物秸秆还田的同时应当制定合理的施肥管理措施。

化肥的大规模使用对中国粮食作物增产的贡献是不可磨灭的。有研究发现,麦秸全量还田且施氮量为240 kg/hm²时能够增加水稻的产量并提高氮肥利用率^[8]。秸秆还田配施化肥能够保障小麦产量并提升(或维持)土壤肥力^[9]。然而,长期不合理的化肥施用也造成了巨大的环境风险,如地表水体富营养化、地下水中的硝酸盐积累、温室气体排放增加、土壤退化等^[10-11]。农业生产中化肥施用量的与日俱增危害着农田土壤质量和生态环境,因此化肥减量与有机肥替代化肥成为发展可持续农业的有效措施。有研究者认为,在长江中下游地区稻麦轮作体系下,在化肥减量30%的基础上配施有机肥,同时进行秸秆全量还田能够获得更高的产量,并实现氮肥利用率的提高^[12]。在长江中下游地区稻麦种植和秸秆还田规模逐年扩大的背景下,秸秆还田后如何合理使用肥料成为人们普遍关注的问题。本试验拟通过江苏金坛地区的田间定位试验,研究冬小麦产量及氮素利用对稻秸还田条件下不同施肥管理措施的响应,以期在该地区稻麦轮作体系背景下,为秸秆还田条件下科学、高效地施肥提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验点概况

试验于2018年5月至2019年6月在江苏省常

州市金坛区薛埠镇罗村(31°39'45.85"N,119°24'15.06"E)进行。该地区年平均降水量为1063.5 mm,年平均气温为15.3℃,属北亚热带季风气候。耕作层土壤理化性质如下:pH值为5.37,碱解氮含量为132.97 mg/kg,有效磷含量为15.83 mg/kg,速效钾含量为48.63 mg/kg,全氮含量为1.28 g/kg,有机碳含量为14.04 g/kg。

1.2 试验设计

本试验共设置4种处理,分别为稻秸还田条件下不施肥(S)、稻秸还田条件下常规施肥(FS)、稻秸还田条件下有机肥氮替代75%化学氮肥氮(MS)和稻秸还田条件下化肥减量20%(RS),每个处理设3次重复,具体处理设置见表1。试验共设4个大区,大区间用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,每个小区的面积为300~500 m²。小麦的种植方式为机条播,水稻秸秆通过旋耕机作业全量还田,小麦品种为扬辐麦4号。试验前先将上季水稻收获,留茬10 cm左右,通过收割机将秸秆切割为5~10 cm长度后均匀抛撒,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。各处理的施肥量见表1,其中FS处理的基肥用量为:375.00 kg/hm²配方肥(氮:磷:钾为16:18:8)、146.55 kg/hm²尿素;拔节孕穗肥的用量为:225.00 kg/hm²配方肥(氮:磷:钾为18:7:10)、120.00 kg/hm²尿素。MS处理的基肥用量为:93.75 kg/hm²配方肥(氮:磷:钾为16:18:8)、146.55 kg/hm²尿素、225.00 kg/hm²有机肥(含氮量为2%),拔节孕穗肥同FS处理。RS处理的基肥用量为:300.00 kg/hm²配方肥(氮:磷:钾为16:18:8)、117.30 kg/hm²尿素,拔节孕穗肥为180.00 kg/hm²配方肥(氮:磷:钾为18:7:10)、96.00 kg/hm²尿素。基肥在小麦播种时施用,拔节孕穗肥在倒三叶期(3月中旬)基部第2节间伸长1~2 cm、叶色开始褪淡时施用。除草、防治病虫害等按照当地常规管理方法。

1.3 样品的采集与测定

在小麦拔节期(2019年3月25日)、抽穗期

(2019年4月25日)和收获期(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耕层的土壤样品和植株样品。所有土壤样品采集后,挑根、过2 mm筛并混匀,测定前储存于4℃冰箱内。土壤微生物生物量碳、氮采用三氯甲烷熏蒸-硫酸钾浸提,然后采用 $K_2Cr_2O_7$ 氧化法和消煮后碱化蒸馏法分别测定生物量碳和氮含量^[13];土壤有机碳(SOC)含量采用 $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 湿烧法^[14]测定;土壤全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法^[14]测定;土壤碱解氮(AN)含量采用碱解扩散法^[14]测定;土壤有效磷(AP)含量采用钼锑抗比色法^[14]测定;土壤速效钾(AK)含量采用火焰光度计比色法^[14]测定。将采集的植株样品在105℃杀青1 h,然后于75℃烘干至恒质量,磨碎后采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮样品,再用凯氏定氮法测定植株含氮量^[14]。

小麦收获后,各小区取样考种,统计有效穗数、每穗粒数和千粒质量等产量构成因素,计算获得理论产量。每个试验区作物的实际产量按大区测定。

表1 试验处理设置

Table 1 Treatments of experiment

处理	施用量(kg/hm ²)			氮肥的 基肥、 追肥比例
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
不施肥、稻秸还田(S)	-	-	-	-
常规施化肥、稻秸还田(FS)	225.00	83.25	52.50	0.57 : 0.43
有机肥氮替代75%化学氮肥氮、 稻秸还田(MS)	225.00	83.25	52.50	0.57 : 0.43
减量(20%)施化肥、稻秸还田(RS)	180.00	66.60	42.00	0.57 : 0.43

1.4 数据处理

氮肥表观利用率(%)、氮肥农学利用率(kg/kg)和氮肥偏生产力(kg/kg)的计算公式分别如下:

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 = (施氮区产量 - 无氮区产量) / 施氮量;

氮肥偏生产力 = 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,显著性检验采用 Duncan's 检验。

2 结果与分析

2.1 不同施肥管理措施对麦季土壤化学性质的影响

如表2所示,小麦拔节期S、FS、MS和RS处理

间在土壤有机碳、有效磷和速效钾含量上没有显著差异;在FS、MS处理下,小麦拔节期土壤的全氮含量分别达最低、最高值,二者间差异显著($P < 0.05$),但均与S、RS处理间无显著差异;FS、MS和RS处理的碱解氮含量均高于S处理,但RS与其他处理之间差异不显著,FS、MS处理则显著高于S处理($P < 0.05$)。在小麦抽穗期,4个处理在土壤有机碳、速效钾含量上表现出差异,但在全氮、碱解氮和有效磷含量上的差异不显著。其中,FS、RS处理的有机碳含量显著高于S、MS处理($P < 0.05$);RS处理的速效钾含量显著低于其他3个处理($P < 0.05$)。在小麦成熟期,4个处理在土壤有机碳、碱解氮和速效钾含量上均发生了变化,其中土壤有机碳含量的排序为FS处理(16.45 g/kg) ≈ MS处理(16.72 g/kg) > RS处理(15.28 g/kg) ≈ S处理(15.34 g/kg),碱解氮、速效钾含量均表现为FS、MS和RS处理显著高于S处理($P < 0.05$),其中FS处理的碱解氮含量最高(70.15 mg/kg),而MS处理的速效钾含量最高(82.89 mg/kg)。

2.2 不同施肥管理措施对小麦土壤微生物生物量碳、氮含量的影响

由图1可以看出,土壤微生物生物量碳、氮含量表现出随着生育时期的延长而增大的趋势。在拔节期、抽穗期,4种处理间土壤微生物生物量碳(SMBC)含量无显著差异,而在成熟期,RS处理的SMBC含量显著低于S、MS处理($P < 0.05$);在拔节期、抽穗期,FS、MS和RS处理的土壤微生物生物量氮(SMBN)含量均显著高于S处理($P < 0.05$),但FS、MS、R处理间无显著差异,在成熟期不同处理间的SMBN含量无显著差异。综合分析可知,不同处理对SMBC含量的影响主要体现在生育后期,而对SMBN含量的影响则体现在生育前中期。

2.3 不同施肥管理措施对小麦产量及其构成因素的影响

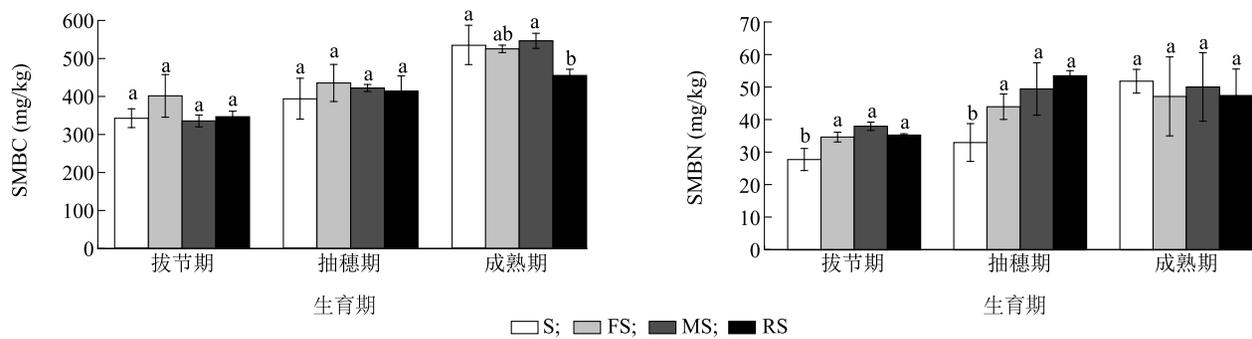
由图2可以看出,在稻秸还田条件下,施肥能够显著提高小麦的理论产量($P < 0.05$),且实际产量也有所增加,但小麦的理论产量在FS、MS、RS3种施肥管理措施之间并无显著差异。与S处理相比,FS、MS和RS处理的理论产量分别增加了192%、232%和260% ($P < 0.05$),实际产量则分别增加了321%、278%和333%。

表2 稻秸还田下不同施肥管理措施对土壤化学性质的影响

Table 2 Effects of different fertilization management measures on soil chemical properties under rice straw returning

生育期	处理	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
拔节期	S	14.55±0.61a	1.74±0.05ab	53.53±2.12b	12.07±2.66a	60.50±3.90a
	FS	15.61±0.90a	1.63±0.08b	67.38±8.11a	14.60±0.36a	62.17±1.04a
	MS	15.64±0.16a	1.81±0.09a	68.30±3.66a	13.93±0.68a	61.94±1.33a
	RS	14.84±0.69a	1.73±0.05ab	62.07±6.85ab	14.41±0.51a	60.84±8.97a
抽穗期	S	14.64±0.36b	1.73±0.20a	55.38±8.11a	11.84±1.96a	48.14±3.19a
	FS	16.05±0.30a	1.82±0.01a	59.99±4.15a	14.64±1.35a	45.12±6.57a
	MS	15.05±0.43b	1.75±0.06a	59.99±0.00a	13.80±2.26a	44.56±6.58a
	RS	15.77±0.43a	1.65±0.17a	52.61±0.80a	14.18±1.29a	31.87±0.13b
成熟期	S	15.34±0.48b	1.62±0.09a	55.38±6.24c	12.66±2.25a	51.63±6.28c
	FS	16.45±0.41a	1.76±0.03a	70.15±0.80a	13.74±3.45a	70.29±4.80b
	MS	16.72±0.48a	1.80±0.11a	63.69±2.12b	15.36±2.89a	82.89±8.98a
	RS	15.28±0.44b	1.70±0.07a	62.30±0.80b	15.60±1.45a	70.57±2.89b

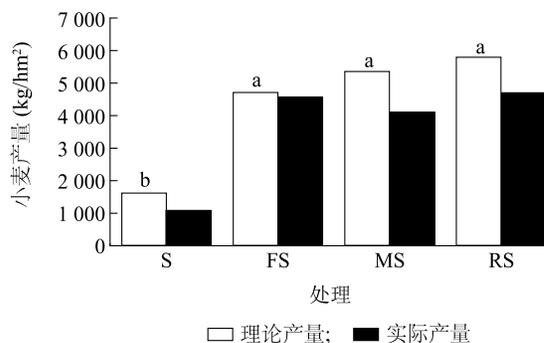
同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。S、FS、MS、RS 见表1。



同一生育期的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。SMBC:土壤微生物生物量碳;SMBN:土壤微生物生物量氮。S、FS、MS、RS 见表1。

图1 稻秸还田下不同施肥管理措施对土壤微生物生物量碳、氮的影响

Fig.1 Effects of different fertilization management measures on soil microbial biomass carbon (SMBC) and soil microbial biomass nitrogen (SMBN) under rice straw returning



理论产量不同处理间标有不同小写字母的表示差异显著($P<0.05$)。S、FS、MS、RS 见表1。

图2 稻秸还田下不同施肥管理措施对小麦产量的影响

Fig.2 Effects of different fertilization management measures on wheat yield under rice straw returning

由表3可以看出,4种处理在有效穗数上的差异并无统计学意义,而施肥处理均能够显著提高小麦的每穗粒数和千粒质量($P<0.05$)。在3种施肥处理下,MS处理的每穗粒数显著高于FS处理($P<0.05$),但与RS处理间差异不显著;3种施肥处理间的千粒质量无显著差异。

2.4 不同施肥管理措施对小麦氮素吸收与利用的影响

由图3可以看出,在稻秸还田条件下,施肥能够显著提高成熟期秸秆、籽粒的氮素积累量($P<0.05$)。与S处理相比,FS、MS和RS处理的秸秆氮素积累量分别增加了10.96 kg/hm²、12.30 kg/hm²和15.63 kg/hm²,而籽粒氮素积累量则分别增加了57.80 kg/hm²、73.30 kg/hm²和60.82 kg/hm²,但是

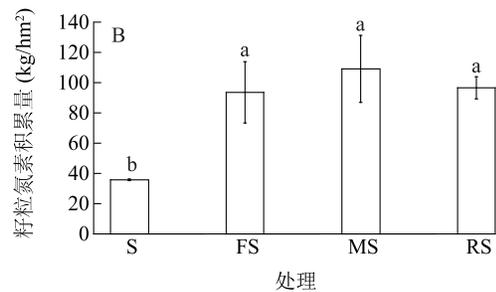
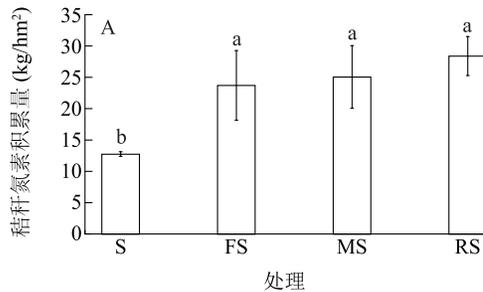
这3种施肥处理之间在秸秆氮素积累量、籽粒氮素积累量上均没有显著差异。

表3 稻秸还田下不同施肥管理措施对产量构成因素的影响

Table 3 Effects of different fertilization management measures on yield components under rice straw returning

处理	有效穗数 ($\times 10^4$, 1 hm^2)	每穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)
S	452.23 \pm 62.26a	10.11 \pm 0.75c	36.92 \pm 2.53b
FS	490.91 \pm 49.39a	22.93 \pm 4.17b	41.64 \pm 1.67a
MS	406.87 \pm 12.86a	31.99 \pm 4.67a	41.09 \pm 0.38a
RS	482.91 \pm 64.82a	28.93 \pm 2.11ab	41.56 \pm 0.98a

同一列数据后不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。S、FS、MS、RS 见表1。



A: 秸秆; B: 籽粒。同一指标的不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。S、FS、MS、RS 见表1。

图3 稻秸还田下不同施肥管理措施对成熟期小麦氮素积累量的影响

Fig.3 Effects of different fertilization management measures on nitrogen accumulation of wheat in the maturity stage under rice straw returning

表4 稻秸还田下不同施肥管理措施对小麦氮肥利用率的影响

Table 4 Effects of different fertilization management measures on nitrogen use efficiency of wheat under rice straw returning

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)
FS	31	15.50	20.33
MS	32	13.44	18.27
RS	45	20.09	26.13

FS、MS、RS 见表1。

3 讨论

中国小麦主产区之一的长江中下游地区,麦季施氮量通常为220~250 kg/hm^2 ,而作物的氮肥当季利用率仅为30%~40%^[15-16]。作为一种促进农业可持续发展的有效管理措施,秸秆还田规模日益扩大。然而稻秸的C/N通常大于25,施入土壤后在分解初期会导致土壤无机氮被微生物同化,使得土壤有效态氮含量降低,造成作物幼苗因缺氮而生长不良,从而影响作物产量^[17]。因此,在秸秆还田的初期阶

由表4可以看出,RS处理的氮肥表观利用率分别比FS、MS处理高14个、13个百分点。RS处理的氮肥农学利用率分别比FS、MS处理高4.59 kg/kg 、6.65 kg/kg ,表明在稻秸还田条件下,减量施用化肥具有更高的经济效益。在RS处理下,氮肥偏生产力分别比FS、MS处理高5.80 kg/kg 、7.86 kg/kg ,表明在稻秸还田条件下减量施肥时1 kg 肥料氮能够产生更多的籽粒产量。此外,FS、MS处理间的氮肥表观利用率差异不明显,FS处理的氮肥农学利用率、氮肥偏生产力均略高于MS处理。

段,合理的肥料配施才能提高小麦的氮肥利用率,并且合理的肥料配施具有增产效应^[18-19]。本研究结果表明,在稻秸还田条件下,与不施肥处理(S)相比,FS、MS、RS处理均能够显著提高小麦理论产量和实际产量。吴立鹏等^[20]研究发现,相对于秸秆不还田,秸秆还田并配施氮肥增加了土壤无机氮含量,因此提高了水稻产量。陆强等^[12]认为,在化肥配施有机肥的基础上进行秸秆全量还田,在作物生育中后期的土壤供氮能力得到提高,从而为增产和氮肥利用率的提高奠定了基础。本研究中,在小麦生育前中期,稻秸还田且配施肥料后的SMBN含量相对于不施肥处理有了明显提高,表明在秸秆还田初期,土壤有效态氮会被微生物暂时同化,而与此同时,施肥后土壤碱解氮含量相对于不施肥处理具有升高的趋势,表明稻秸还田配施肥料能够保证土壤有效氮的供应,缓解秸秆分解初期土壤微生物的氮素需求对作物生长发育氮需求的影响,进而提高小麦每穗粒数、千粒质量,这可能是秸秆还田配施肥料后小麦增产的原因之一。

然而,在本研究中,稻秸还田条件下常规施肥、有机肥氮替代75%化学氮肥氮和化肥减量20%3种处理对小麦产量的提高效果无明显差异。有机肥的供氮方式具有渐进性、持久性的特点^[21-22],因而往往在施用的初期阶段无法快速见效。Shah等^[23-24]通过2年定位试验发现,有机肥氮占比为25%时,作物可获得最高产量。侯红乾等^[25]通过30年长期有机、无机肥配施试验发现,在试验初期阶段,低量有机肥配施处理(70%化肥氮+30%有机肥氮)的水稻具有明显的增产优势,而在初期阶段,随着有机肥施用比例的增加,产量却呈降低的趋势。本研究中的有机肥替代处理(25%化肥氮+75%有机肥氮)属于高量替代,与其他施肥处理相比增产优势并不显著,原因可能是在试验仅进行1季试验周期的短期条件下,相对于需要一定时间分解才能供氮的有机肥而言,化肥能够提供更为丰富的速效养分,能够及时补充因稻秸分解而被微生物同化的土壤有效态氮,保证作物生长所需;而有机肥替代比例高则表明化肥减量多,有机肥需要经过较长时间的自身养分释放和土壤养分活化等^[26]才能对作物养分吸收产生积极影响,因此高比例有机肥替代氮肥时的养分供应及其对产量造成的影响并不比常规施肥显著。但是如果持续投入有机肥并进行稻秸连续还田,随着有机物料的分解,土壤肥力得到进一步提升,有机肥配施比例也可进一步提高,从而达到增产目的^[25]。此外,本研究还发现,在稻秸还田的同时削减化肥使用量,相对于常规施肥和有机肥氮替代75%化肥氮这2种施肥管理措施而言并未造成小麦减产,这可能一方面是由于稻秸分解所释放的养分能够代替减施的化肥为小麦的生长提供养分^[27],另一方面是常规施化肥等施肥管理措施中所施化肥(养分)量已过量。此外,作物产量取决于穗数、穗粒数和千粒质量之间的协调。有研究发现,适宜的施氮量能够有效增强小麦的抗衰老能力,从而保证小麦具有较高的穗粒数和千粒质量,提高小麦产量^[28],而过量施肥却不利于小麦茎鞘中可溶性糖向籽粒转运^[29]。所以在本研究条件下,小麦减量施肥后的有效穗数、每穗粒数和千粒质量与常规施肥处理相比相差无几,没有引起小麦产量显著变化,说明减量后的施肥量与稻秸配比是适当的。因此可见,在金坛地区稻秸还田的条件下,化肥减量20%能够保证小麦产量,同时减少成本投入。

关于稻秸还田配施肥料对作物氮素吸收利用的影响,张媛媛等^[30]认为,在稻秸还田的同时施氮肥的条件下,土壤含氮量的增加提高了氮素有效性,因而水稻对氮素的吸收利用得以增强。徐国伟等^[31]认为,水稻叶片的硝酸还原酶活性在稻秸还田后提高,从而促进了植株对氮素的吸收。赵鹏等^[18]则认为,除了提高土壤供氮能力和潜力外,稻秸还田配施氮肥还减少了氮素损失,保氮效应的提高有利于冬小麦对氮素的吸收。在本研究中,与常规施肥量相比,化肥减量处理的氮肥表观利用率、农学利用率和偏生产力分别提高了14个百分点、4.59 kg/kg和5.80 kg/kg,这与易琼等^[32]的研究结果一致,其研究发现,在长江中下游稻麦轮作体系过量施氮的情况下,第1个轮作周期在当地习惯施肥(小麦氮肥用量为225 kg/hm²)的基础上减施20%~30%氮可不影响产量,而且能够提高氮肥当季利用率、农学利用率及偏生产力。在本研究中,减量施肥仍然能够保证土壤速效养分的供应,且未影响作物地上部的氮素积累,故在施肥量减少的情况下氮肥利用效率升高。这可能是因为长期过量施肥的土壤对肥料减施造成的土壤养分含量降低具有较强的缓冲能力,因此削减化肥用量对作物产量、氮素吸收的影响较小^[33]。此外,本研究在短期试验且进行高量(75%)有机肥氮替代化肥氮条件下的氮肥表观利用率与常规施肥处理相当,但氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均降低了2.06 kg/kg。强久次仁^[34]指出,75%的高量有机肥氮配施能够显著提高小麦产量和氮效率,但氮回收率和农学利用率却低于单施化肥处理。Shah等^[23-24]通过定位试验还得出,有机肥氮占比为50%和75%时,氮肥利用率无明显变化,但占比为25%时具有最高的作物氮肥吸收利用率及农学利用率。这也体现了有机肥供氮方式的渐进性特点,并且对于不同肥力水平及不同作物,有机肥所能替代的合适比例也不同,应当根据土壤基础肥力和作物生长发育规律选择合适的肥料类型和替代比例。

本研究仅为1个作物生长季的试验结果,在短期稻秸还田条件下不同施肥管理措施对土壤养分、作物生长的影响差异并不十分明显。因此,为了得到更加明确的结论,进一步了解金坛地区稻秸还田条件下如何配施肥料才能保证小麦产量并减轻环境污染风险,开展更长期的定位试验以研究稻秸还田条件下化肥施用量和有机肥无机肥配施比例对土壤

养分和作物产量的影响机制是有必要的。

4 结论

在稻秸还田条件下,与不施肥处理相比,配施化肥、有机肥替代氮肥和减量配施化肥的冬小麦理论产量分别增加了192%、232%和260%,而实际产量则分别增加了321%、278%和333%。

在稻秸还田条件下,与配施化肥相比,化肥减量20%处理的氮肥表观利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力分别提高了14个百分点、4.59 kg/kg和5.80 kg/kg,而在高量(75%)有机肥氮替代化肥氮条件下,氮肥表观利用率与配施化肥相当,但氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均降低了2.06 kg/kg。

在1个作物生长季的短期试验条件下,稻秸还田并配施肥料后的作物产量与肥料类型和施肥量均无关。为了农田土壤可持续发展,该地区可考虑化肥减量20%或初期进行低量有机肥替代化肥,以保证作物产量并降低不合理施肥导致的潜在环境风险。

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] BLANCO-CANQUI H. Crop residue removal for bioenergy reduces soil carbon pools; how can we offset carbon losses? [J]. *BioEnergy Research*, 2013(6): 358-371.
- [3] ZHAO S C, QIU S J, XU X P, et al. Change in straw decomposition rate and soil microbial community composition after straw addition in different long-term fertilization soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 138: 123-133.
- [4] REN J Q, YU P X, XU X H. Straw utilization in China—status and recommendations [J]. *Sustainability*, 2019, 11(6): 1-17.
- [5] MARY B, RECOUS S, DARWIS D, et al. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil [J]. *Plant and Soil*, 1996, 181: 71-82.
- [6] 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(2): 659-669.
- [7] ZHANG L Y, WANG J, PANG H C, et al. Effects of pelletized straw on soil nutrient properties in relation to crop yield[J]. *Soil Use and Management*, 2018, 34(4): 479-489.
- [8] 张刚,王德建,俞元春,等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 877-885.
- [9] 房静静,丁维婷,武雪萍,等. 长期秸秆配施化肥对土壤养分及小麦产量、品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(5): 141-146.
- [10] TIAN Y H, YIN B, YANG L Z, et al. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu Lake region, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(4): 445-456.
- [11] POSTMA-BLAAUW M B, DE GEODE R G M, BLOEM J, et al. Soil biota community structure and abundance under agricultural intensification and extensification [J]. *Ecology*, 2010, 91(2): 460-473.
- [12] 陆强,王继琛,李静,等. 秸秆还田与有机无机肥配施在稻麦轮作体系下对籽粒产量及氮素利用的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2014, 37(6): 66-74.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 串丽敏,何萍,赵同科,等. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 76-86.
- [16] 张磊,邵宇航,谷世禄,等. 减量施氮下基肥后移对南方冬小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3953-3960.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 张娜,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.
- [20] 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.
- [21] 毛伟,曾洪玉,李文西,等. 不同土壤肥力下有机氮部分替代化学氮对小麦产量构成及土壤养分的影响[J]. *江苏农业学报*, 2020, 36(5): 1189-1196.
- [22] 王雯清,黄丽娜,程世敏,等. 有机氮替代部分无机氮下减氮对宝岛蕉苗期生长及肥料氮素去向的影响[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(8): 1917-1924.
- [23] SHAH S A, SHAH S M, MOHAMMAD W, et al. N uptake and yield of wheat as influenced by integrated use of organic and mineral nitrogen[J]. *International Journal of Plant Production*, 2009, 3(3): 45-56.
- [24] SHAH A, SHAFI M, BAKHT J, et al. Effect of integrated use of nitrogen on yield and N uptake of maize crop[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2010, 42(5): 3633-3638.
- [25] 侯红乾,冀建华,刘秀梅,等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 758-765.

- [26] 孟超然,白如霄,候建伟,等. 有机肥替代部分化肥对干旱区滴灌玉米养分吸收及产量影响[J].土壤,2020,52(4):750-757.
- [27] 张亚丽,吕家珑,金继运,等. 施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):307-314.
- [28] 王贺正,张 钧,吴金芝,等. 不同氮素水平对小麦旗叶生理特征和产量的影响[J].草业学报,2013,22(4):69-75.
- [29] 樊高琼,吴中伟,郑 亭,等. 氮肥运筹对四川丘陵旱地带状种植小麦碳素同化、转运和产量的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):238-243.
- [30] 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.
- [31] 徐国伟,吴长付,刘 辉,等. 麦秸还田及氮肥管理技术对水稻产量的影响[J].作物学报,2007,33(2):284-291.
- [32] 易 琼,张秀芝,何 萍,等. 氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1069-1077.
- [33] 刘学军,巨晓棠,张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J].应用生态学报,2004,15(3):458-462.
- [34] 强久次仁. 不同比例有机无机肥配施对冬小麦产量及氮效率的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.

(责任编辑:徐 艳)