

秸秆还田结合氮肥运筹管理对白土稻田土壤理化性状的影响

李录久¹, 吴萍萍¹, 耿言安², 姚文麒², 王家嘉^{1*}

(1 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 安徽合肥 230031; 2 长丰县农业技术推广中心, 安徽长丰 231100)

摘要:【目的】研究不同氮肥基追比例运筹方式下小麦秸秆直接还田对白土稻田理化性状和水稻产量的影响, 为江淮低产白土改良培肥提供科学依据。【方法】采用两因素裂区试验, 因素一为小麦秸秆(S)直接还田(3000 kg/hm²)和小麦秸秆不还田; 因素二为氮肥基肥—分蘖肥—穗肥施用比例。设3种基施: 分蘖肥: 穗肥比例(80-0-20、60-20-20和40-30-30), 共6个处理, 分别为N₈₀₋₀₋₂₀、N₈₀₋₀₋₂₀+S、N₆₀₋₂₀₋₂₀、N₆₀₋₂₀₋₂₀+S、N₄₀₋₃₀₋₃₀和N₄₀₋₃₀₋₃₀+S。水稻收获期采集0—20 cm代表性土壤样品分析理化性状, 包括pH、有机质、氮磷钾养分含量、阳离子交换量(CEC)、团聚体结构和容重, 测定水稻籽粒产量。【结果】与不还田相比, 3种氮肥运筹方式下, 小麦秸秆还田土壤pH均明显升高, 以40-30-30方式升高幅度最大, 增加达到显著水平; 无论是否实施麦秸还田, 不同氮肥运筹方式间土壤pH差异不显著。土壤有机质、有效磷、速效钾含量明显提高, CEC增大。土壤中>5 mm和1~0.25 mm两个粒径机械稳定性及水稳定性大团聚体数量增多, <0.25 mm小团聚体数量减少, 团聚体质量提高; 土壤容重下降, 总孔隙度增加, 白土淀浆板结的不良物理性状改善, 氮肥60-20-20运筹方式下秸秆直接还田改良培肥白土效果最好。4年4地试验, 与无秸秆的对照相比, 3种氮肥运筹方式下, 水稻籽粒产量分别提高10.2%~23.4%、0.8%~5.5%、4.9%~6.4%和6.4%~9.6%, 平均增产16.2%、3.6%、5.5%和8.1%, N₆₀₋₂₀₋₂₀+S处理水稻籽粒产量最高。【结论】综合水稻产量、秸秆还田后土壤养分状况、团聚体稳定性和容重、孔隙度等物理性状, 安徽省江淮丘陵白土单季稻区, 水稻基肥—分蘖肥—穗肥施用比例60-20-20运筹方式下, 配合实施小麦秸秆直接还田, 能有效改良培肥低产白土稻田, 提高水稻产量。

关键词: 白土; 秸秆还田; 氮肥运筹; 团聚体组成; 产量

中图分类号: S153

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)05-1259-08

Effect of wheat straw addition with nitrogen application on physical-chemical properties of white paddy soil

LI Lu-jiu¹, WU Ping-ping¹, GENG Yan-an², YAO Wen-qi², WANG Jia-jia^{1*}

(1 Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2 The Extension Center of Agricultural Technology at Changfeng County, Changfeng, Anhui 231100, China)

Abstract: 【Objectives】The effects of wheat straw directly returning to paddy soil under different ratios of basal-topdressing of nitrogen (N) applications on soil physical-chemical properties and rice yield were studied to provide a scientific base for fertility improvement of low-yield white paddy soil in Jianghuai hilly lands.

【Methods】Two factor split field experiments were conducted concussively for four years. Wheat straw returning (3000 kg/hm²) or not was the main factor; N fertilizer was divided into three parts and applied in basal, tillering stage and heading stage 80-0-20, 60-20-20, and 40-30-30. The treatments were coded as N₈₀₋₀₋₂₀, N₈₀₋₀₋₂₀+S, N₆₀₋₂₀₋₂₀, N₆₀₋₂₀₋₂₀+S, N₄₀₋₃₀₋₃₀ and N₄₀₋₃₀₋₃₀+S. Samples of 0-20 cm topsoil were collected to

收稿日期: 2015-08-10 接受日期: 2016-01-25 网络出版日期: 2016-05-26

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项“南方低产水稻土改良技术与示范”(201003016); “水田合理耕层构建技术指标研究与集成示范”(2015031118); 国家科技支撑计划“淮北平原中低产砂姜黑土改良关键技术研究示范”(2012BAD05B0206)资助。

作者简介: 李录久(1962—), 男, 安徽长丰人, 博士, 研究员, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: ljli68@yaliyun.com

* 通信作者 E-mail: wangjiajiahaha@sina.com

analyze soil physical-chemical properties, aggregates composition and bulk density. Rice yields were investigated. 【 **Results** 】 Compared with no wheat straw returning, wheat straw returning improved soil pH effectively under the three N ratios. Under the N ratio of 40–30–30, the soil pH was significantly increased, from acidic and slightly acidic to slightly acidic and neutral, respectively. The soil organic matter, available P, K contents and CEC were also increased significantly with the returning of wheat straw. The contents of >5 mm and 1–0.25 mm mechanical-stable and water stable aggregates were increased, and micro aggregates (< 0.25 mm) were reduced, which indicated the improvement of soil aggregate quality. Soil bulk density was decreased, and total porosity was increased which showed the adverse physical properties of white soil were improved. Straw addition under the N application ratio of 60–20–20 showed the best effect on the improvement of white soil. Rice grain yields in four experimental sites under three N application ratios were increased by 10.2%–23.4%, 0.8%–5.5%, 4.9%–6.4% and 6.4%–9.6%, with the mean of 16.2%, 3.6%, 5.5% and 8.1%, respectively, the $N_{60-20-20} + S$ treatment obtained the highest grain yield. 【 **Conclusions** 】 Considering the rice grain yield, soil nutrient contents, aggregate stability, bulk density and porosity, N application ratio of 60–20–20 combined with wheat straw directly returning to field can effectively improve the fertility of low-yield white paddy soil, and increase rice yield in Jianghuai hilly lands under single-rice cropping system in Anhui Province.

Key words: white paddy soil; straw addition; nitrogen management; aggregates composition; grain yield

白土是我国南方 5 大低产水稻土类之一, 包括灰白土、黄白土、白土和澄白土等类型^[1], 第二次全国土壤普查, 黄白土归入潜育水稻土亚类, 澄白土归为漂洗水稻土亚类。全国白土总面积 7.123×10^5 公顷, 集中分布于安徽、江苏、浙江与湖北等省的淮河以南, 长江中下游及稍南的广大地区^[2]。安徽省白土分布较广, 北部以淮河为界, 南到歙县, 其中江淮丘陵地区和皖南的广德、宁国、南陵一带是两个白土分布比较集中的区域^[1]。江淮丘陵白土成土母质主要是疏松的下蜀黄土及其沉积物, 地形起伏较大、地势高低不平, 沟壑纵横, 径流发达, 成土过程中天然降水和灌溉排水对土壤长期冲刷淋溶漂洗, 加之侧渗作用, 造成上部粘粒流失, 耕层土壤粘粒含量下降, 粉砂粒含量不断增高^[1-2]。据报道, 白土耕层粉砂含量一般都在 60%~70%, 而且从下到上逐渐增多^[2]。因此, 粉砂量过高造成的淀浆与板结是白土最主要特征^[1]。白土物理性状不良, 粘粒少粉砂多、容重大土体紧实、蓄水保肥能力差, 耕层浅薄、有机质含量低、有效养分缺乏, 水稻等农作物产量常比同类地区高产作物产量降低 25%~50%, 是典型的低产类型水稻土^[1-3]。

白土分布区是我国水稻重要产区。对低产白土的改良, 前人作了很多研究, 提出了深翻土壤、增施有机肥、种植绿肥和稻草还田等技术措施, 取得了明显的培肥效果^[1-4]。近年有机肥用量急剧下降,

绿肥种植面积迅速萎缩, 耕作方式大多是 10 cm 左右深度的旋耕, 传统改良措施很难应用。然而本区域秸秆资源丰富, 秸秆还田能培肥土壤, 促进作物生长发育^[5-15], 研究白土秸秆还田与氮肥运筹组合改良白土理化性状、提高水稻产量的效果, 以期为改良培肥华中低产白土稻田, 提高水稻产量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2011~2014 年在安徽省长丰县和肥西县进行, 选择长丰徐庙、肥西严店、长丰罗塘和肥西丰乐 4 个试验地, 供试土壤为下蜀黄土发育而成的低产白土型水稻土。试验前 4 个试验地 0—20 cm 耕作层土壤养分状况: pH 5.48、5.28、6.35 和 5.89, 有机质 20.9、19.6、18.72 和 19.5 g/kg, 全氮 1.49、1.07、1.09 和 1.05 g/kg, 有效磷 5.0、8.0、33.7 和 7.9 mg/kg, 速效钾 42.2、62.3、133.1 和 59.1 mg/kg。第三年试验地位于村庄附近, 因农民长期施用有机肥培肥改良成为鳊血白土, 肥力较高^[2], 土壤有效磷含量较离村庄较远的其他三地也高得多。

2011~2014 年长丰徐庙、肥西严店、长丰罗塘和肥西丰乐 4 地试验方案完全一致, 在施氮 (N) 180 kg/hm²、磷 (P₂O₅) 90 kg/hm² 和钾 (K₂O) 120 kg/hm² 基础上, 采用裂区试验设计, 主处理是小麦干秸秆

3000 kg/hm² 直接还田 (简称 S), 以不施秸秆为对照; 副处理为水稻氮肥基追比例运筹方式, 设置基肥—分蘖肥—穗肥施用百分比分别为 80-0-20、60-20-20 和 40-30-30 共 3 种方式, 表示为 N₈₀₋₀₋₂₀、N₆₀₋₂₀₋₂₀ 和 N₄₀₋₃₀₋₃₀, 共构成 6 个处理。小区面积 4 m × 5 m 计 20.0 m², 四次重复, 区组裂区内随机排列。小区间以田埂和薄膜分隔, 单灌单排。供试水稻品种为当地主栽品种, 栽插密度 25 × 15 cm 约 2.7 × 10⁵ plant/hm²。供试氮肥为尿素 (含 N 46%), 磷肥为磷酸二铵 (含 N 18%、P₂O₅ 46%), 钾肥为氯化钾 (含 K₂O 60%)。所有磷、钾肥作基肥, 与小麦秸秆一起均在水稻移栽前一次性施入。每年 4 月下旬水稻育秧, 6 月初移栽, 9 月底按小区单独收获计实产。其他栽培管理措施如水分和病虫草害防治同当地一般大田水稻。

1.2 样品采集、测定项目和分析方法

水稻收获后采集各小区 0—20 cm 耕作层土壤样品, 选取代表性 5 点采样, 组成混合原状土壤样品, 用硬质塑料盒装好, 保证不受挤压, 带回实验室后室内自然风干。当土壤含水量达塑限时, 用手将大土块沿自然断裂面轻轻掰成 1 cm 左右的土块, 剔除植物残体和石块等, 过 8 mm 筛后继续风干保存备用。土壤容重采用环刀法测定; 土壤团聚体组成参照姜灿灿等^[16]的方法, 采用干/湿筛法对土壤团聚体进行分组。部分土壤样品继续研磨, 分别过 2 mm 和 0.15 mm 筛, 土壤 pH 用玻璃电极法, 有机质采用 H₂SO₄-K₂CrO₇ 氧化法, 全氮用开氏半微量定氮法, 碱解氮用扩散法, 有效磷采用氟化铵—稀盐酸浸提(酸

性土)—钼蓝比色法, 速效钾用乙酸铵浸提—火焰光度计法, CEC 用 1 mol/L 乙酸铵交换法测定^[17]。

数据采用 Excel 和 DPS 进行统计分析, LSD 法进行样本平均数的差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥运筹方式下小麦秸秆直接还田对白土化学性状的影响

2.1.1 土壤 pH 和有机质 从表 1 看出, 江淮丘陵低产白土地区, 小麦收获后实施秸秆直接还田对土壤化学性状有明显影响。适宜氮肥基追比运筹下, 实施小麦秸秆直接还田能明显提高土壤有效态氮磷钾养分含量和阳离子交换量, 土壤 pH 升高, 酸化程度减轻, 有机质含量明显提高。2012 年肥西试验, 3 种氮肥运筹方式下, 秸秆还田处理较无秸秆对照, 土壤 pH 升高 0.02~0.30 个单位, N₆₀₋₂₀₋₂₀ 处理提高最多为 5.9%; 2013 年长丰试验与此相似, 秸秆还田后土壤 pH 升高 0.15~0.77 个单位, 由微酸性变为中性, 后期追肥比例较大的 40-30-30 方式升高的幅度最大, N₄₀₋₃₀₋₃₀ + S 与 N₄₀₋₃₀₋₃₀ 间差异达 5% 显著水平, 并且超过基础土 pH。这一结果说明, 小麦秸秆直接还田能有效减轻单施化肥导致的土壤酸化。从表 1 还看出, 无论是否实施麦秸还田, 不同氮肥运筹方式间土壤 pH 差异不显著。

实施麦秸还田后, 土壤有机质含量明显提高。2013 年长丰试验, 与不施秸秆的对照相比, 3 种氮肥运筹方式下, 秸秆还田处理土壤有机质含量相对提高 3.7%、6.8% 和 6.5%, 平均升高 5.7%, 氮肥后

表 1 不同氮肥运筹方式下秸秆还田对白土化学性状的影响

Table 1 Effect of straw addition on chemical properties in white soil at different nitrogen applications

处理 Treatment	pH		有机质 (g/kg) Organic matter		有效磷 (mg/kg) Available P		速效钾 (mg/kg) Available K		阳离子交换量 CEC (cmol/kg)	
	肥西 FX	长丰 CF	肥西 FX	长丰 CF	肥西 FX	长丰 CF	肥西 FX	长丰 CF	肥西 FX	长丰 CF
N ₈₀₋₀₋₂₀	5.09 a	6.10 ab	20.25 a	18.83 a	7.49 b	36.3 b	63.9 b	130.6 ab	21.51 a	13.28 a
N ₈₀₋₀₋₂₀ + S	5.16 a	6.33 ab	21.18 a	19.52 a	8.07 ab	42.8 a	65.9 ab	134.8 a	22.03 a	13.29 a
N ₆₀₋₂₀₋₂₀	5.06 a	6.37 ab	19.85 a	18.79 a	7.80 b	35.3 b	58.0 c	126.5 ab	21.08 a	12.77 a
N ₆₀₋₂₀₋₂₀ + S	5.36 a	6.52 ab	20.81 a	20.06 a	8.61 a	41.7 a	64.1 ab	130.6 ab	23.10 a	13.52 a
N ₄₀₋₃₀₋₃₀	4.97 a	5.92 b	19.75 a	19.11 a	7.94 ab	33.8 b	62.0 bc	122.3 b	21.14 a	13.02 a
N ₄₀₋₃₀₋₃₀ + S	4.99 a	6.69 a	20.45 a	20.35 a	8.74 a	36.7 b	69.8 a	128.2 ab	22.71 a	13.40 a
基础土 Former	5.28 a	6.35 ab	19.57 a	18.72 a	8.04 ab	33.7 b	62.3 bc	133.1 ab	21.39 a	13.10 a

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in same column mean significant difference at 5% level.

移的 2 个处理提高幅度较大, $N_{80-0-20}$ 处理升高的幅度较小, 表明前期基肥比例较大有利于小麦秸秆腐烂降解, 有机物分解较快, 阻碍了土壤有机质的积累提高。2012 年肥西试验, 土壤有机质升高幅度与 2013 年长丰试验相似。与 pH 变化一样, 无论是否实施小麦秸秆直接还田, 水稻氮肥 3 种不同运筹方式间土壤有机质含量差异不显著(表 1)。

2.1.2 土壤有效态氮磷钾 小麦秸秆直接还田后白土稻田土壤有效态氮磷钾含量的变化趋势各不相同(表 1), 土壤有效磷含量明显升高, 速效钾含量增加较多, 碱解氮含量变化不明显。2012 年肥西试验, 3 种氮肥运筹方式下, 秸秆还田较非还田对照土壤碱解氮含量分别增长 -1.3%、4.5% 和 -14.8%, 基肥少的 $N_{40-30-30}$ 处理显著降低, 表明秸秆还田时前期氮肥用量不足会导致微生物吸收土壤氮素而使土壤有效氮含量下降, 而适宜的氮肥运筹可略微提高土壤有效氮含量。实施小麦秸秆还田后, 土壤有效磷含量均明显提高, 3 种氮肥基追比例分别增长 7.7%、10.4% 和 10.1%, 平均提高 9.4%, 其中 $N_{60-20-20}$ 处理达显著水平。土壤速效钾变化各不相同, 3 种氮肥运筹方式下, 秸秆还田处理土壤速效钾含量分别升降变化为 3.2%、3.2% 和 -3.4%, $N_{40-30-30}$ 降低而另 2 种方式下升高, 只是升高和降低的幅度均不显著。2013 年长丰试验表现出相似的变化规律(表 1)。这一结果表明, 小麦秸秆直接还田时结合适宜的氮肥基追比例运筹, 可以有效提高白土稻田土壤有效态磷、钾、氮含量。

2.1.3 土壤阳离子交换量 实施小麦秸秆直接还田后, 土壤阳离子交换量(CEC)明显升高。2012 年肥西试验, 与不施秸秆的对照相比, 3 种氮肥运筹方式下秸秆还田的 3 个处理土壤 CEC 分别提高 2.4%、

9.6% 和 7.4%, 氮肥后移的 2 个处理提高幅度较大, 但差异不显著。2013 年长丰试验, 秸秆还田的 3 个处理土壤 CEC 也较对照相应增大, 只是增加幅度较小, 差异不显著。土壤阳离子交换量增加趋势与有机质升高趋势相似(表 1)。

2.2 不同氮肥运筹方式下小麦秸秆直接还田对白土物理性状的影响

2.2.1 土壤团聚体 从表 2 可以看出, 实施小麦秸秆直接还田对白土团聚体结构及其稳定性有明显影响。机械稳定性团聚体百分率, 秸秆还田处理较不施秸秆对照, 6 个级别的粒径有增有减, 其中 > 5 mm 的大团聚体数量明显增多, 3 种氮肥基追比运筹方式下分别增加 -0.03、1.09 和 1.03 个百分点, 氮肥后移的 2 个处理增加较多, 但不同处理间差异很小; $1\sim 0.25$ mm 中等粒径团聚体也有所增加, 而 $0.25\sim 0.053$ mm 和 < 0.053 mm 两个小粒径团聚体数量则明显减少, 虽然绝对数量减少不多但幅度较大, 差异达 5% 显著水平。秸秆还田对白土水稳定性团聚体结构及其稳定性也有明显影响, 实施秸秆还田后, > 5 mm、 $1\sim 0.25$ mm 和 > 0.25 mm 3 个粒径团聚体数量均明显增多, 特别是 $1\sim 0.25$ mm 的中等粒径团聚体数量增加较多, 3 种氮肥运筹方式下分别提高 1.10、2.16 和 1.73 个百分点, 而 $0.25\sim 0.053$ mm 和 < 0.053 mm 两个小粒径团聚体数量则明显减少, 其中 $N_{40-30-30}$ 处理下降幅度较大, 但差异不显著。这一结果说明适宜氮肥运筹下秸秆还田能有效增加稳定的大团聚体数量, 减少可迁移的小团聚体百分含量, 提高团聚体质量, 改善白土物理性状。表 2 还可看出, 无论是否实施麦秸还田, 氮肥基追比运筹方式对白土机械稳定性团聚体和水稳定性团聚体结构及其稳定性的影响均较小。

表 2 不同氮肥运筹方式下秸秆还田白土稻田的不同粒径团聚体组成(%)

Table 2 Composition of different size aggregates in white soil with straw addition under different N applications

处理 Treatment	机械稳定性团聚体 Mechanical-stable aggregate					水稳定性团聚体 Water-stable aggregate				
	>5	$5\sim 1$	$1\sim 0.25$	$0.25\sim 0.053$	<0.053	>5	$5\sim 1$	$1\sim 0.25$	$0.25\sim 0.053$	<0.053
$N_{80-0-20}$	87.30 a	10.82 a	1.21 ab	0.46 a	0.21 c	8.32 a	5.83 a	31.39 a	38.59 a	15.87 ab
$N_{80-0-20} + S$	87.27 a	10.96 a	1.35 a	0.27 c	0.15 d	8.76 a	6.07 a	32.49 a	37.86 a	14.82 b
$N_{60-20-20}$	88.43 a	9.61 ab	1.02 b	0.51 a	0.43 a	8.81 a	4.97 ab	29.40 a	41.03 a	15.79 ab
$N_{60-20-20} + S$	89.52 a	8.71 b	1.11 ab	0.38 b	0.28 b	9.30 a	4.78 b	31.56 a	39.67 a	14.69 b
$N_{40-30-30}$	87.20 a	10.91 a	1.29 a	0.42 ab	0.18 cd	8.48 a	4.87 ab	29.47 a	40.32 a	16.86 a
$N_{40-30-30} + S$	88.23 a	10.04 ab	1.37 a	0.28 c	0.08 e	8.95 a	5.29 a	31.20 a	39.17 a	15.39 ab

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different small letters in same column mean significant difference at 5% level.

2.2.2 土壤容重与总孔隙度 不同氮肥基追比运筹方式下, 小麦秸秆直接还田对白土稻田土壤物理性状也有明显影响。3 年试验, 与无秸秆对照相比, 3 种氮肥运筹方式下, 实施麦秸还田后, 土壤容重平均由 1.455、1.427 和 1.453 g/cm³ 分别降至 1.395、1.346 和 1.373 g/cm³, 降低了 4.1%、5.7% 和 5.5%, 氮肥基追比例适宜的运筹方式 N₆₀₋₂₀₋₂₀ 处理降幅较大, 但差异均不显著。与此同时, 土壤总孔隙度相应提高, 由不施秸秆的对照的 45.1%、46.1% 和 45.2% 分别升高至 47.4%、49.2% 和 48.2%, 提高 2.3、3.1 和 3.0 个百分点。这一结果表明, 实施小麦秸秆直接还田能有效降低白土耕作层过高的容重, 提高土壤的孔隙度和通透性, 改善白土板结的不良物理性状。试验结果还表明, 小麦收获后秸秆直接还田及未还田 2 种方式下, 3 种氮肥基追比运筹方式间土壤容重和总孔隙度极为接近, 差异很小, 说明氮肥基追比例运筹方式对白土稻田土壤容重和总孔隙度没有明显影响。

2.3 不同氮肥运筹方式下小麦秸秆直接还田对水稻产量的影响

前述表明, 适宜氮肥基追比运筹方式下实施小麦秸秆直接还田, 土壤有机质和有效态氮磷钾等速效养分含量明显提高、物理性状改善, 有效提高了低产白土稻田的肥力, 从而促进了水稻生长发育, 为籽粒产量的提高打下了基础。表 3 表明, 4 年 4 地试验, 与不施秸秆的对照相比, 实施麦秸还田的 3 个处理, 3 种氮肥运筹方式下, 水稻籽粒产量分别提高 10.2%~23.4%、0.8%~5.5%、4.9%~6.4% 和 6.4%~9.6%, 平均增产 16.2%、3.6%、5.5% 和 8.1%, 2011 年长丰试验 N₈₀₋₀₋₂₀ + S 和 N₆₀₋₂₀₋₂₀ + S 处理较对照的增产效应达 1% 极显著水平、N₄₀₋₃₀₋₃₀ + S 增产效应达 5% 显著水平, 2014 年肥西试验 N₈₀₋₀₋₂₀ + S 和 N₆₀₋₂₀₋₂₀ + S 增产效应达 5% 显著水平, 并且 4 年试验均是 N₆₀₋₂₀₋₂₀ 方式下水稻产量最高。4 年试验平均, 秸秆还田较不还田的对照, 水稻籽粒产量平均提高 5.4%~10.3%, 平均增产 7.8%。

表 3 不同氮肥运筹方式下秸秆还田水稻籽粒产量 (kg/hm²)
Table 3 Effect of straw addition on rice grain yield at different N applications

处理 Treatment	2011 长丰 CF 2011	2012 肥西 FX 2012	2013 长丰 CF 2013	2014 肥西 FX 2014	2011~2014 年平均产量 Average yield	
N ₈₀₋₀₋₂₀	6822 dC	8370 bA	6738 abB	7524 cB	7364 cB	100.0
N ₈₀₋₀₋₂₀ + S	8419 abAB	8831 abA	7098 abAB	8148 bAB	8124 abAB	110.3
N ₆₀₋₂₀₋₂₀	7704 bcB	9114 aA	7324 aAB	8169 bAB	8078 bAB	109.7
N ₆₀₋₂₀₋₂₀ + S	8858 aA	9241 aA	7790 aA	8954 aA	8711 aA	118.3
N ₄₀₋₃₀₋₃₀	7460 cBC	8985 abA	6569 bB	7823 bcAB	7709 bcB	104.7
N ₄₀₋₃₀₋₃₀ + S	8222 bAB	9054 aA	6890 abB	8327 bA	8123 abAB	110.3

注 (Note): 同列数值后不同小、大写字母分别表示差异达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant difference at 5% 和 1% levels, respectively.

表 3 还表明, 氮肥运筹方式对秸秆还田下水稻籽粒产量也有明显影响, 3 种氮肥基追比例中, 基肥比例较高的 N₈₀₋₀₋₂₀ 处理, 实施秸秆还田后, 水稻籽粒产量增加的幅度较大, 4 年试验增产 5.3%~23.4%, 平均增产 10.3%, 其中 2011 年长丰试验增产效应极显著, 2014 年肥西试验增产效应达 5% 的显著水平, 并且 4 年试验中有 3 年的增产幅度最大; 其次为基追比例适中的 N₆₀₋₂₀₋₂₀ 处理, 增产 1.4%~15.0%, 平均增产 7.8%, 2011 年长丰试验增产效应达 1% 的极显著水平, 2014 年肥西试验增产幅度最大且增产效应达 5% 显著水平, 与 N₈₀₋₀₋₂₀ 趋势基本一致且差异不显著; 效果最差的是氮肥基肥比

例较低的 N₄₀₋₃₀₋₃₀ 处理, 增产 0.8%~10.2%, 平均增产 5.4%, 仅 2011 年长丰试验增产效应达 5% 显著水平。这一结果说明, 实施小麦秸秆直接还田时, 必须保证充足的氮肥基施比例, 才能保证秸秆有效腐烂降解释放养分供后季水稻生长发育, 使其获得较高的籽粒产量。

3 讨论

秸秆还田对土壤理化性状和水稻生长的影响已有一些报道^[8-15]。大量研究表明, 适量的秸秆还田能明显提高土壤有机质及氮磷钾等有效养分含量, 改善土壤理化性状, 培肥土壤^[18-22]。杨志臣等^[18]研究表

明,直接施用作物秸秆与施用腐熟有机肥对土壤的培肥效果基本相同,均对土壤理化性质有很大的改善作用。朱利群等^[19]研究认为,深耕+秸秆还田对土壤容重的降低最有效,一年免耕一年浅翻耕+秸秆还田最能增加土壤有机质含量,秸秆还田处理全土层速效磷含量增加较明显。劳秀荣等^[20]指出,长期秸秆还田并配施适量的化肥是培肥地力、提高产量的有效措施之一,土壤有机质积累量、速效氮磷钾的生物有效性等指标与秸秆还田量呈极显著正相关。徐国伟等^[21]研究发现,秸秆还田后土壤 pH 值明显降低,土壤全磷、可溶性钾含量明显上升,水稻成熟时土壤有机质含量增加。本研究表明,不同氮肥运筹方式下实施小麦秸秆直接还田,土壤 pH 明显升高,由酸性、微酸性向微酸性中性方向发展;土壤有机质含量明显提高。土壤碱解氮含量变化较小,速效钾含量增加较多,有效磷含量显著提高,与朱利群等^[19]、李凤博等^[8]的研究结果相似。土壤磷钾含量大幅度提高除与秸秆还田带入的养分有关外,实施秸秆还田还有其他重要作用。江淮丘陵低产白土,由于雨水和灌溉水长期的冲刷、侧渗、淋溶、下渗和漂洗,导致耕作层粘粒和养分大量流失^[1-2],耕层浅薄,有机质及有效磷钾含量低于下层^[3]。秸秆还田处理,采用人工方法将秸秆尽量踩压到耕层下部土体以免影响秧苗移栽,此过程会将部分犁底层粘重土壤翻搅上来与耕层土壤混和,从而增加了耕层土壤养分含量。

稳定的团聚体可组成良好的土壤结构,顺畅地传输土壤养分、水分和空气,给作物提供良好的运输通道,但是不稳定的团聚体产生更小可迁移的颗粒,不仅阻碍土壤养分的运移,也加剧地表径流和土壤侵蚀^[17,23]。姜灿烂等^[16]的研究发现,长期稻草还田能明显增加旱地红壤机械稳定性大团聚体数量和水稳定性团聚体比率,减少 0.25 mm 以下小团聚体数量,改善团聚体结构,降低土壤容重,提高孔隙度。刘禹池等^[23]得出了类似的研究结果,长期秸秆覆盖还田+免耕能显著降低 0—5 cm 土层土壤容重,增加孔隙度、非水稳性和水稳性团聚体的数量,改善土壤物理性状。本研究表明,适宜氮肥运筹下秸秆还田能有效增加 > 5 mm、1~0.25 mm 2 个粒径的机械稳定性大团聚体数量和水稳定性大团聚体数量,减少 0.25 mm 以下可迁移的小团聚体百分含量,增加团聚体结构稳定性,提高团聚体质量,改善白土物理性状,与姜灿烂等^[16]的结果基本一致。土壤机械稳定性、水稳定性大团聚体含量上升是由土壤中有

机质含量的增加与胶结物质的改变所致。与此同时,土壤容重降低,总孔隙度增加,白土容重过高和淀浆板结的不良物理性状得以初步改善。前人研究表明,白土耕作层粉砂粒含量高、粘粒少、容重高、孔隙度小,而下层则相反,土壤粘重、粘粒多、有机质高^[1-2]。实施秸秆还田的处理,将部分犁底层粘重土壤翻搅上来与耕层土壤混和,从而增加了耕层土壤粘粒含量,降低了粉砂粒含量^[3-4],使白土有机质含量提高,增加了土壤胶结物质,结果土壤机械稳定性、水稳定性大团聚体数量均增多。与此同时,白土容重降低,孔隙度增加,淀浆板结的性状得以改善。

秸秆还田对水稻产量的影响已有很多报道,但各地研究结果差异较大。袁玲等^[7]在浙江的研究表明,秸秆还田较不还田处理,常规水作、裸地旱作和覆膜旱作 3 种栽培方式下水稻产量平均增加 3.3%。李凤博等^[8]在江苏研究发现,秸秆还田量对水稻产量影响差异不显著。单提波等^[9]在黑龙江研究表明,不同还田量处理的水稻穗粒数和结实率与对照相比差异均达显著水平,产量随还田量增加有提高趋势。葛立立等^[15]总结了有关秸秆还田文献后指出,秸秆还田量处理使早稻产量增加 10.0%~12.9%,晚稻增产 1.3%~2.6%,一般增产 5%~8%,但也有减产的报道。本研究表明,江淮丘陵低产白土区,小麦收获后实施秸秆直接还田对后季水稻产量有明显影响。与不施秸秆的对照相比,4 年 4 地试验,3 种氮肥运筹方式下,水稻籽粒产量分别提高 10.2%~23.4%、0.8%~5.5%、4.9%~6.4% 和 6.4%~9.6%,平均增产 16.2%、3.6%、5.5% 和 8.1%,2011 和 2014 年试验增产效应达显著或极显著水平,基-蘖-穗肥比例 60-20-20 的运筹方式增产作用显著, $N_{60-20-20} + S$ 处理水稻籽粒产量最高,表明江淮丘陵低产白土区,小麦收获后实施秸秆直接还田,在适宜的氮肥基追比运筹方式下,土壤有效氮磷钾养分含量提高,物理性状改善,从而促进了水稻生长发育,籽粒产量增加,研究结果与袁玲等^[7]以及四川的刘禹池等^[23]的相似。秸秆还田处理不同年份间增产幅度差异较大,其原因与当年的气象条件有关。2011 年 8 月份江淮地区出现长时间低温阴雨寡照,无秸秆还田处理前期由于缺少秸秆腐解争夺氮肥使得氮素供应充足,水稻分蘖多造成田间郁闭,后期病虫害较重,水稻籽粒产量较秸秆还田处理低很多,增产幅度较大。2012 及 2013 年秸秆还田增产幅度较小,其原因是两年夏季均遭遇长期连续干

旱, 秸秆腐烂降解受到不利影响, 加之水稻穗肥追施较迟效果差, 2012 年肥西试验基础产量较高, 土壤有效钾也较高, 故实施小麦秸秆还田的处理增产幅度较小。当前有专家提出水稻氮肥后移或加大后期追氮量^[12-13], 但在江淮低产白土地区需具体分析。当前保护环境、禁止焚烧秸秆、实施秸秆还田是政府重要的工作, 秸秆直接还田已得到全面推广应用。小麦秸秆由于较高的碳氮比, 需要补施氮肥调节才能快速腐烂降解。如果一味强调氮肥后移, 不能保证水稻基肥用量, 势必造成前期秸秆分解时, 土壤微生物与秧苗争夺土壤氮素, 氮供应不足, 影响水稻生长发育, 前期有效分蘖少, 后期成穗率低, 导致减产。

总之, 不同氮肥基追比例下小麦秸秆直接还田对土壤理化性状和水稻产量有多方面影响。总体上, 小麦秸秆直接还田, 配合适宜的氮肥基追比例不仅能明显增加土壤有效养分供给, 改善白土不良物理性状, 还可提高水稻籽粒产量。综合考虑小麦秸秆还田后土壤养分状况、团聚体结构稳定性等理化指标和水稻籽粒产量, 当前生产水平条件下, 安徽省江淮丘陵低产白土单季稻区, 水稻基肥-分蘖肥-穗肥施用比例 60-20-20 运筹方式下配合实施小麦秸秆直接还田, 土壤有机质和阳离子交换量升高、有效磷钾氮含量提高、机械和水稳定性团聚体数量增多, 容重降低, 孔隙度增加, 水稻籽粒产量提高, 白土淀浆板结的不良性状改善, 培肥改土效果好。

4 结论

1) 水稻氮肥基肥-分蘖肥-穗肥施用百分比 60-20-20 运筹方式下实施小麦秸秆直接还田, 白土稻田土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量明显高于对照, CEC 增大, 土壤 pH 升高, 酸化程度减轻; 耕作层土壤 > 5 mm 和 1~0.25 mm 两个粒径机械稳定性及水稳定性大团聚体数量均增多, 而可迁移的 < 0.25 mm 粒径小团聚体百分含量则减少, 团聚体稳定性增加, 质量提高; 土壤容重降低、总孔隙度增加, 白土容重过高和淀浆板结的不良物理性状改善, 表明适宜水稻氮肥基追比运筹结合小麦秸秆直接还田提高了白土的肥力水平, 中低产田改良效果明显。

2) 适宜氮肥运筹方式下实施小麦秸秆直接还田能有效提高水稻籽粒产量, 氮肥基肥-分蘖肥-穗肥 3 种运筹方式中 60-20-20 比例效果好, $N_{60-20-20} + S$ 处理产量最高。

参 考 文 献:

- [1] 陈清硕. 安徽省的白土水稻土类型[J]. 土壤学报, 1960, 8(1): 63-73.
Chen Q S. The paddy type of "White Soil" in Anhui Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1960, 8(1): 63-73.
- [2] 徐琪. 长江中下游白土的地理分布规律及其形成过程的特点[J]. 土壤学报, 1962, 10(1): 44-54.
Xu Q. The geographical distribution law and characteristic of formation progress for White Soil in the Yangtze River valley[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1962, 10(1): 44-54.
- [3] 周傅槐. 江苏省的"白土"水稻田[J]. 土壤学报, 1958, 6(4): 217-227.
Zhou C H. The so-called "Bai" paddy soils in Jiangsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1958, 6(4): 217-227.
- [4] 于天仁, 谢建昌, 杨国治, 等. 太湖流域低产"白土"的成因及其改良[J]. 土壤学报, 1959, 7(1-2): 42-58.
Yu T R, Xie J C, Yang G Z, *et al.* Study on the infertile "White Soil" in Tai Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1959, 7(1-2): 42-58.
- [5] 朱青藤, 申连玉, 钱黎慧, 等. 有机物料对白土土壤胡敏酸结构特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 396-403.
Zhu Q T, Shen L Y, Qian L H, *et al.* Effects of organic material application on the structures of humic acids in low yield paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 396-403.
- [6] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 898-905.
Ma L, Yang L Z, Xiao H A, *et al.* Effects of long-term fertilization and straw returning on distribution and mineralization of nitrogen in paddy soils in subtropical China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 898-905.
- [7] 袁玲, 张宣, 杨静, 等. 不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 350-359.
Yuan L, Zhang X, Yang J, *et al.* Effects of different cultivation methods and straw incorporation on grain yield and nutrition quality of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 350-359.
- [8] 李凤博, 牛永志, 高文玲, 等. 耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤理化性质及其产量的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 549-552.
Li F B, Niu Y Z, Gao W L, *et al.* Effects of tillage styles and straw return on soil properties and crop yields in direct seeding rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 549-552.
- [9] 单提波, 魏宏国, 王安东, 等. 稻草还田配施化学氮肥对水稻生长发育、产量和品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(2): 265-270.
Shan T B, Wei H G, Wang A D, *et al.* Effect of rice straw return plus nitrogen fertilizer on growth and development, yield and quality in rice[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(2): 265-270.
- [10] 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影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1441-1449.
Zhao S C, Cao C Y, Li K J, *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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6): 1441-1449.

- [11] 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.
Zhang Y L, Lü J L, Jin J Y, *et al.* Effects of chemical fertilizer and straw return on soil fertility and spring wheat quality[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 307–314.
- [12] 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.
Yan F J, Sun Y J, Ma J, *et al.* Effects of wheat straw mulching and nitrogen management on grain yield, rice quality and nitrogen utilization in hybrid rice under different soil fertility conditions[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(1): 56–64.
- [13] 汪军, 王德建, 张刚. 太湖地区稻麦轮作下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 265–270.
Wang J, Wang D J, Zhang G. Effects of different N-fertilizer rates with straw incorporation on rice yield and economic benefit of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 265–270.
- [14] 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 J, Tang Y H, Yin Y P, *et al.* Effects of wheat straw returning plus nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 160–167.
- [15] 葛立立, 王康君, 范苗苗, 等. 秸秆还田对土壤培肥与水稻产量和米质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(12): 1–6.
Ge L L, Wang K J, Fan M M, *et al.* Effect of straw returning on soil fertilizing, grain yield and quality of rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(12): 1–6.
- [16] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 715–722.
Jiang C L, He Y Q, Liu X L, *et al.* Effect of long-time application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 715–722.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 257–270.
Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 257–270.
- [18] 杨志臣, 吕贻忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 214–218.
Yang Z C, Lü Y Z, Zhang F R, *et al.* Comparative analysis of the effects of straw-returning and decomposed manure on paddy soil fertility betterment[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 214–218.
- [19] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作轮换对稻麦轮作田土壤理化性状及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 81–85.
Zhu L Q, Zhang D W, Bian X M. Effects of continuous returning straws to field and shifting different tillage methods on changes of physical-chemical properties of soil and yield components of rice[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 81–85.
- [20] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618–623.
Lao X R, Sun W H, Wang Z, *et al.* Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 618–623.
- [21] 徐国伟, 段骅, 王志琴, 等. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3): 934–942.
Xu G W, Duan H, Wang Z Q, *et al.* Effects of wheat-residue application on physical and chemical characters and enzymatic activities in soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(3): 934–942.
- [22] 庞成庆, 秦江涛, 李辉信. 水稻秸秆冬季还田对早稻产量和土壤钾素含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(3): 83–88.
Pang C Q, Qin J T, Li H X. The effects of rice straw incorporation in winter on yield and soil potassium content[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(3): 83–88.
- [23] 刘禹池, 曾祥忠, 冯文强, 等. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1450–1459.
Liu Y C, Zeng X Z, Feng W Q, *et al.* Effects of long-term straw mulch and fertilization on crop yields and soil physical and chemical properties under rice-rapeseed rotation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1450–1459.