

长期秸秆还田下有机无机配施及微量元素和缓释肥的施用 对双季稻产量和肥料利用率的影响

李桂花, 张雪凌, 周吉祥, 张建峰*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 长期秸秆还田背景下, 集成几种养分高效利用施肥模式, 研究其对红壤水稻产量、吸氮量和土壤地力的影响, 为红壤区养分持续高效利用和水稻增产提供依据。2013 ~ 2016 年在江西省宜春市高安县渡埠农场布置田间定位试验, 集成有机替代无机, 添加微量元素 Si、Zn、S, 缓释肥替代化肥, 减氮 20% 等养分高效利用施肥模式。研究不同施肥模式对产量与肥料利用率的影响。结果表明, 与常规只施尿素相比, 8 季有机替代, 添加微量元素 Si、Zn、S, 缓释肥替代, 都没有显著增加产量; 有机肥处理地上部吸氮量相对更高 ($P<0.05$); 减氮 20% 降低产量, 但没有达到显著水平, 地上部吸氮量下降显著 ($P<0.05$)。不同年份早、晚稻产量波动较大; 早稻与晚稻相比, 产量有高低。早、晚稻的农学效率分别为 20.6 ~ 24.8 kg/kg 及 14.5 ~ 18.4 kg/kg; 早、晚稻的氮肥表观利用率分别为 31.6% ~ 40.0% 及 26.0% ~ 35.4%。缓释肥表观利用率最高, 但与化肥相比没有达到显著差异 ($P=0.07$)。4 年结束后, 不同施肥处理耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤有效磷和速效钾含量差异显著 ($P<0.05$), 土壤有机质、全氮、pH 及微生物量碳氮都没有显著差异。长期秸秆还田红壤稻田, 通过 8 季 20% 有机替代, 添加 Si、Zn、S 微量元素及缓释肥施用等增产增效模式都没有显著增加双季稻产量、土壤有机质和全氮, 说明长期秸秆还田对产量和地力影响很大, 在此基础上增加有机肥具有增产趋势, 但需更长时间达到显著水平; 同时, 秸秆加有机肥可以满足水稻对微量元素的需求。

关键词: 双季稻; 产量; 肥料利用率; 微量元素 Si、Zn、S; 有机无机配施; 缓释肥

红壤性水稻土是种植双季稻的主要土壤, 集中分布在热带-亚热带地区。这些区域有充足的降雨和热量, 利于作物的生长, 但同时土壤矿化淋溶强烈, 使土壤呈现酸、粘、瘦的特征, 因此, 合理施肥是保证红壤持续高产、稳产的重要措施。

大量试验表明, 很多施肥模式可以提高红壤区双季稻产量, 并培肥地力。比如, 适量氮肥条件下, 长期有机无机配施是提高红壤地力、保证产量的有效措施^[1-2]。缓控释氮肥的应用也比普通氮肥有效提高水稻产量 6.1% ~ 8.2%, 氮肥利用率提高 15.4% ~ 38.4%^[3]。施用植物生长第四大必需元素硫, 也增加水稻产量 0% ~ 10%^[4]。另外, 微量元素的应用, 也显著增加水稻产量。比

如, 在土壤中施用锌肥水稻产量平均增加 15%, 且土壤施用优于叶面喷施和种子处理^[5]; 另外, 硅肥促进水稻生长及其对矿物养分的吸收, 对早稻的增产量达到 2.2% ~ 30.0%, 对晚稻的增产量达到 3.9% ~ 9.2%^[6], 硅锌配施也增加双季稻产量 10% 左右^[7]。

江西红壤地区多年实施秸秆还田以培养土壤地力, 在这种背景下, 本文进一步研究了集成上述高效施肥模式对水稻产量、氮肥利用率和土壤肥力的影响, 为这一地区养分持续高效利用和水稻增产提供科学依据。

1 材料与方法

试验于江西省宜春市高安县渡埠农场 (28°15'26.0" N, 115°07'32.7" E) 进行。该区属于亚热带季风性湿润气候, 年均降水量 1680 mm, 集中在 4 ~ 6 月, 平均气温 17.2℃。供试土壤为红壤性水稻土, 耕层主要性状为 pH 5.28, 全氮 1.69 g/kg, 有机质 23.62 g/kg, 碱解氮 184.0 mg/kg, 有效磷 44.5 mg/kg, 速效钾 178.3 mg/kg, 有效硅 54.1

收稿日期: 2020-08-07; 录用日期: 2020-10-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800402); 基本科研业务费专项所级统筹项目 (1610132019039)。

作者简介: 李桂花 (1968-), 女, 吉林龙井人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤培肥与改良方面的研究。E-mail: liguihua@caas.cn。

通讯作者: 张建峰, E-mail: zhangjianfeng@caas.cn。

mg/kg, 有效锌 1.72 mg/kg。

田间试验始于2013年4月, 2016年11月结束。试验地长期秸秆还田并加腐熟剂。早稻4月25日~5月1日插秧, 晚稻7月31日~8月2日插秧。试验共设8个处理, 除不施氮、磷及减氮处理外, 氮磷钾总量保持一致: (1) 不施氮, 施磷(化肥N+有机 NP_2O_5 : 0+0/90); (2) 不施化肥氮, 施有机氮, 施磷, 施微肥(Si、Zn、S)(0+30/90/微); (3) 减化肥N 20%, 不施磷(135+0/0); (4) 有机N替代20%化肥N, 不施磷, 施微肥(Si、Zn、S)(135+30/0/微); (5) 常规施氮磷(165+0/90); (6) 有机N代替20%化肥N, 施磷(135+30/90); (7) 在处理(6)基础上增施微肥(135+30/90/微);

(8) 在(7)基础上用20%缓释N代替化肥N[135(35缓+100)+30/90/微]。早稻常规施N量为165 kg/hm², 晚稻195 kg/hm², 磷钾肥用量早晚稻一致。微肥SiO₂、Zn、S施用量分别为30、3.45和30 kg/hm²。化肥用尿素、过磷酸钙、氯化钾, 缓释肥N含量41.8%, 有机肥(江苏田娘农业科技有限公司)含水量30.1%, 有机质47.8%, N 1.86%, P₂O₅ 3.11%, K₂O 0.85%; 微肥用Na₂SiO₃·5H₂O(SiO₂ 24%)、ZnSO₄·H₂O(Zn 36.3%, S 17.9%)、硫磺粉(S 99.9%)。除尿素外其余肥料均基施。采用随机区组设计, 4次重复, 小区面积42 m², 用塑料薄膜覆泥作埂隔开, 每个小区独立排灌。各处理具体施肥量见表1。

表1 不同施肥处理早稻施肥量

(kg/hm²)

处理	化肥N+有机肥 NP_2O_5 /微肥	施肥模式
T1	0+0/90/0	不施化肥N和有机N, 磷、钾基施
T2	0+30/90/微	不施化肥N, 施20%有机N, 磷、钾基施, 施微肥(Si、Zn、S)
T3	135+0/0/0(减)	80%化肥N, 不施磷肥, 钾基施
T4	135+30/0/微	80%化肥N+20%有机N, 不施磷肥, 钾基施, 施微肥(Si、Zn、S)
T5	165+0/90/0(常)	当地常规施肥, 100%化肥N, 不施有机肥, 磷、钾基施
T6	135+30/90/0	80%化肥N+20%有机N, 磷、钾基施
T7	135+30/90/微	80%化肥N+20%有机N, 磷、钾基施, 施微肥(Si、Zn、S)
T8	135(35缓+100)+30/90/微	80%化肥N(3/8缓释肥, 5/8尿素)+20%有机N, 磷、钾基施, 施微肥(Si、Zn、S)

早稻和晚稻品种分别为当地主栽品种中嘉早17号和五丰优T025。早稻5月初移栽, 7月下旬收获; 晚稻8月初移栽, 11月初收获。取1 m²进行考种。产量按全小区测定, 土壤样品在晚稻收获后采集。测定籽粒和秸秆中的氮磷含量, 分析土壤化学性状^[8]的变化。

利用公式(1)和(2)计算水稻氮肥效率。用SigmaPlot 12.5进行相关统计分析。

氮肥农学效率(kg/kg)=(施氮处理产量-无氮处理产量)/施氮量 (1)

氮肥表观利用率(%)=(施氮处理氮素吸收量-无氮处理氮素吸收量)/施氮量 (2)

2 结果与分析

2.1 年度间及同一年度不同施肥处理间早晚稻的产量变化

4年间早稻平均产量分别为7869、7067、7109

和9316 kg/hm², 年度间差异显著($P<0.05$)。比较同一年份, 与不施肥相比, 施肥处理早稻产量达到显著水平(表2, $P<0.05$), 施肥处理间没有差异。用有机替代部分无机肥、外加微量元素和缓释肥料等处理与常规施肥相比, 产量差异最高, 可达7.6%, 但没有达到显著水平。减氮处理在所有施氮处理中产量最低, 但与常规施肥相比, 也没有达到显著水平。

晚稻产量结果与早稻相似, 同一年度只有施肥处理与不施肥间差异显著(表3, $P<0.05$)。与常规施肥相比, 有机替代、添加微量元素和缓释肥料、减氮20%处理, 晚稻产量没有显著差异。年度间的产量差异大于肥料处理间差异。与早稻相比, 不同年度间有高有低。

2.2 不同年份水稻考种数据及气象因子分析

不同年份考种数据有差异。早稻季有效穗数、实粒数及实粒重都是产量最高的2016年显著高于其它年份(表4, $P<0.05$)。日照长度也是2016年

和 2013 年高于其它年份。晚稻季有效穗数、实粒数及实粒重也是产量最高的 2014 年显著高于其它年份 (表 4, $P<0.05$)。平均温度和日照长度没有差异。但 4 年产量与有效穗数、实粒数及实粒重相关性不显著, 也与平均温度和日照长度相关性不显著 (数据略)。

表 2 不同施肥处理早稻产量 (kg/hm²)

处理	化肥 N+ 有机肥 N/P ₂ O ₅ / 微肥	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
T1	0+0/90/0	4823 ± 550b	5624 ± 289b	4563 ± 457b	5677 ± 403b
T2	0+30/90/ 微	5071 ± 397b	5554 ± 427b	4891 ± 263b	5939 ± 677b
T3	135+0/0/0 (减)	7654 ± 338a	7030 ± 307a	6833 ± 417a	8776 ± 672a
T4	135+30/0/ 微	7857 ± 397a	6825 ± 231a	7245 ± 646a	9369 ± 670a
T5	165+0/90/0 (常)	7859 ± 401a	7035 ± 265a	7102 ± 574a	9076 ± 610a
T6	135+30/90/0	8019 ± 152a	7012 ± 358a	7053 ± 683a	9763 ± 273a
T7	135+30/90/ 微	7971 ± 468a	7171 ± 478a	7251 ± 255a	9334 ± 569a
T8	135 (35 缓 +100) +30/90/ 微	7983 ± 297a	7331 ± 249a	7173 ± 781a	9577 ± 840a
年平均	施氮处理年均产量	7869 ± 373B	7067 ± 364C	7109 ± 552C	9316 ± 646A

注: 小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 大写字母不同表示 6 个施氮处理不同年份间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

表 3 不同施肥处理晚稻产量 (kg/hm²)

处理	化肥 N+ 有机肥 N/P ₂ O ₅ / 微肥	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
T1	0+0/90/0	5244 ± 123b	5490 ± 459b	4525 ± 169b	4928 ± 393b
T2	0+30/90/ 微	5432 ± 494b	5623 ± 475b	4765 ± 327b	4471 ± 348b
T3	135+0/0/0 (减)	7185 ± 451a	8521 ± 282a	6595 ± 453a	6308 ± 736a
T4	135+30/0/ 微	7129 ± 577a	8316 ± 535a	7158 ± 483a	6468 ± 852a
T5	165+0/90/0 (常)	7213 ± 373a	8778 ± 293a	6825 ± 345a	6311 ± 368a
T6	135+30/90/0	7235 ± 220a	8679 ± 111a	7255 ± 485a	6764 ± 803a
T7	135+30/90/ 微	7103 ± 325a	8646 ± 471a	7033 ± 240a	6633 ± 943a
T8	135 (35 缓 +100) +30/90/ 微	7240 ± 390a	8738 ± 113a	6880 ± 132a	6889 ± 552a
年平均	施氮处理年均产量	7184 ± 362B	8613 ± 341A	6927 ± 271C	6562 ± 688D

表 4 不同年份 6 个施氮处理水稻考种数据及气象因子分析

	年份	有效穗数	实粒数	空粒数	实粒重 (g)	日平均温度 (°C)	日照长度 (h)
早稻	2013	34.2 ± 2.8b	3933 ± 377c	1281 ± 173a	102.2 ± 9.5c	21.9 ± 3.9a	6.8 ± 4.8a
	2014	33.7 ± 1.6b	4701 ± 277b	1046 ± 52b	128.5 ± 7.3b	20.8 ± 3.3a	4.5 ± 4.5bc
	2015	35.7 ± 4.9b	4505 ± 749b	646 ± 64c	129.8 ± 15.0b	20.7 ± 3.3a	4.4 ± 4.4c
	2016	39.5 ± 1.7a	5733 ± 229a	1195 ± 172ab	151.9 ± 10.5a	20.9 ± 3.9a	5.8 ± 4.8ab
晚稻	2013	37.6 ± 4.2b	6037 ± 781b	1199 ± 376b	133.9 ± 17.0bc	25.4 ± 5.4a	7.1 ± 4.1a
	2014	48.3 ± 7.3a	7442 ± 966a	1813 ± 601a	166.5 ± 21.3a	24.7 ± 3.9a	6.6 ± 3.7a
	2015	31.6 ± 7.1c	5032 ± 989c	1234 ± 471b	121.3 ± 23.0c	24.1 ± 4.1a	6.1 ± 4.2a
	2016	39.2 ± 6.3b	6199 ± 1045b	1570 ± 547a	135.2 ± 24.3b	25.0 ± 5.3a	5.7 ± 4.6a

注: 小写字母不同表示年份间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同施肥处理早晚稻氮磷吸收和氮肥利用率

不同施肥处理影响籽粒吸氮量。以 2016 年早稻为例, 氮磷配施且有机替代 (含缓释肥) 处理 (T6、T7、T8) 籽粒吸氮量 (除 T6 与 T4、T5 差异不显著外) 显著高于其它处理 (表 5)。秸秆吸氮量与籽粒略有差异, 除不施氮处理外, 不施微量元素的 3 个处理 (T3、T5、T6) 与其它处理 (T4、T7、T8) 相比较低。不同施肥处理间氮肥表观利用率差异不显著 ($P=0.07$)。籽粒吸磷量没有差异。秸秆吸磷量只有 T1 和 T3 显著低于其它处理, 施用有机磷 (T2) 有效提高秸秆吸磷量。氮肥农学效率主要受

产量和施氮量影响, 所以早稻产量 $T6>T3$ 、 $T8>T4$ 、 $T7>T5$, 常规施肥方式最低, 但处理间差异不显著。

晚稻籽粒的吸氮量只有不施肥处理显著低于其它处理 (表 6, $P<0.05$)。减氮处理 (T3) 秸秆吸氮量低于其它施肥处理。晚稻籽粒吸磷量除不施肥处理外, 只有常规施肥 (T5) 最低。秸秆吸磷量只有不施磷肥的 T3 处理最低。2016 年晚稻产量低, 所以施氮最少的 T3 处理氮肥农学效率高于其它处理, 但差异不显著。氮肥表观利用率与早稻一样, 施用缓释肥的 T8 (高 9%) 和施用有机肥的 T6、T7 优于其它处理, 但差异不显著。

表 5 不同施肥处理对氮肥农学效率和表观利用率的影响 (2016 年早稻)

处 理	化肥 N+ 有机肥 N/P ₂ O ₅ / 微肥	籽粒吸氮量 (kg/hm ²)	秸秆吸氮量 (kg/hm ²)	籽粒吸磷量 (kg/hm ²)	秸秆吸磷量 (kg/hm ²)	氮肥投入量 (kg/hm ²)	氮肥农学 效率 (kg/kg)	氮肥表观 利用率 (%)
T1	0+0/90/0	62.8 ± 4.6d	28.8 ± 2.9e	22.1 ± 2.4a	3.3 ± 0.8b	0	—	—
T2	0+30/90/ 微	58.8 ± 4.8d	35.4 ± 1.9d	20.4 ± 4.8a	5.1 ± 0.9a	30	—	—
T3	135+0/0/0 (减)	91.2 ± 3.2c	47.2 ± 2.9bc	29.3 ± 1.3a	3.8 ± 0.3b	135	22.9 ± 4.7a	36.3 ± 5.1a
T4	135+30/0/ 微	94.9 ± 3.2bc	52.0 ± 4.8ab	24.1 ± 2.1a	5.0 ± 0.8a	165	22.4 ± 4.0a	33.4 ± 4.9a
T5	165+0/90/0 (常)	94.4 ± 3.9bc	48.7 ± 4.1bc	25.8 ± 2.4a	5.7 ± 1.4a	165	20.6 ± 3.7a	31.6 ± 4.8a
T6	135+30/90/0	99.1 ± 5.4ab	46.4 ± 2.4c	26.4 ± 3.9a	4.9 ± 0.5a	165	24.8 ± 1.6a	33.1 ± 4.8a
T7	135+30/90/ 微	102.1 ± 8.2a	50.9 ± 1.3ab	25.4 ± 4.8a	5.5 ± 0.8a	165	22.1 ± 3.4a	37.6 ± 5.7a
T8	135 (35 缓 +100) +30/90/ 微	103.4 ± 3.6a	53.8 ± 3.5a	27.1 ± 4.9a	5.5 ± 0.6a	165	23.6 ± 5.1a	40.0 ± 4.2a

表 6 不同施肥处理对氮肥农学效率和表观利用率影响 (2016 年晚稻)

处 理	化肥 N+ 有机肥 N/P ₂ O ₅ / 微肥	籽粒吸氮量 (kg/hm ²)	秸秆吸氮量 (kg/hm ²)	籽粒吸磷量 (kg/hm ²)	秸秆吸磷量 (kg/hm ²)	氮肥投入量 (kg/hm ²)	氮肥农学 效率 (kg/kg)	氮肥表观 利用率 (%)
T1	0+0/90/0	41.3 ± 4.5b	28.7 ± 2.9d	16.4 ± 2.6b	6.0 ± 1.2ab	0	—	—
T2	0+30/90/ 微	38.9 ± 3.2b	24.5 ± 1.1d	11.0 ± 0.5c	3.8 ± 0.2c	30	<0	<0
T3	135+0/0/0 (减)	63.4 ± 5.3a	49.5 ± 6.2c	16.8 ± 2.0ab	5.5 ± 0.7b	165	18.4 ± 1.7a	26.0 ± 6.9a
T4	135+30/0/ 微	70.3 ± 8.5a	57.9 ± 3.4bc	17.0 ± 2.4ab	7.0 ± 1.3ab	195	14.5 ± 2.7a	29.8 ± 6.1a
T5	165+0/90/0 (常)	62.2 ± 2.0a	59.7 ± 4.6abc	15.9 ± 0.8b	6.9 ± 1.1ab	195	16.9 ± 1.5a	26.6 ± 3.3a
T6	135+30/90/0	66.6 ± 10.0a	66.7 ± 7.1ab	19.1 ± 1.7a	7.2 ± 1.1a	195	16.3 ± 0.6a	32.4 ± 8.7a
T7	135+30/90/ 微	64.8 ± 11.8a	66.6 ± 5.4ab	18.8 ± 4.2ab	7.0 ± 1.0ab	195	16.2 ± 2.4a	31.5 ± 8.8a
T8	135 (35 缓 +100) +30/90/ 微	70.8 ± 11.2a	68.2 ± 6.2a	18.5 ± 1.6ab	6.3 ± 0.8ab	195	16.7 ± 0.6a	35.4 ± 8.9a

2.4 不同施肥处理土壤化学性质和微生物生物量的变化

4 年不同施肥处理后, 只有有效磷和速效钾发

生了变化, pH、有机质、全氮和微生物量碳和氮都没有显著差异 (表 7)。与常规施肥相比, 有机无机配施有机质和全氮增加 1.5%。

表 7 不同施肥处理对土壤化学性质和微生物生物量的影响 (2016 年)

处理	化肥 N+ 有机肥 N/P ₂ O ₅ / 微肥	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	微生物量碳 (mg/kg)	微生物量氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
T1	0+0/90/0	5.2	36.1 ± 0.6a	2.12 ± 0.05a	611 ± 95a	55 ± 13a	72.5 ± 8.6a	137 ± 7ab
T2	0+30/90/ 微	5.2	37.8 ± 4.3a	2.13 ± 0.06a	689 ± 97a	60 ± 8a	45.7 ± 6.8b	144 ± 14a
T3	135+0/0/0 (减)	5.3	37.2 ± 1.9a	2.13 ± 0.06a	718 ± 144a	66 ± 15a	26.0 ± 5.3c	102 ± 10c
T4	135+30/0/ 微	5.2	39.5 ± 2.2a	2.26 ± 0.05a	720 ± 44a	65 ± 13a	38.5 ± 9.1b	103 ± 16c
T5	165+0/90/0 (常)	5.1	39.1 ± 2.4a	2.28 ± 0.06a	651 ± 79a	57 ± 4a	55.6 ± 8.9ab	115 ± 19c
T6	135+30/90/0	5.2	39.4 ± 2.6a	2.31 ± 0.06a	697 ± 62a	73 ± 12a	42.2 ± 10.5b	118 ± 16bc
T7	135+30/90/ 微	5.1	39.8 ± 1.5a	2.31 ± 0.08a	692 ± 67a	58 ± 9a	47.5 ± 8.5b	121 ± 9bc
T8	135 (35 缓+100) +30/90/ 微	5.1	41.0 ± 2.1a	2.31 ± 0.05a	732 ± 119a	67 ± 13a	51.7 ± 5.0b	121 ± 11bc

3 讨论

3.1 不同年份早稻产量差异的主要原因

水稻产量的形成主要受温度、光照 (辐射强度) 和叶面积指数的影响^[9]。叶面积指数在不受水、氮胁迫的情况下, 主要由不同生长阶段来决定。生长阶段主要由日平均温度和光周期决定^[9]。因此, 我们分析了不同年份考种数据, 以及产量与早晚稻生育期温度和日照长度的相关性。虽然产量最高年份的有效穗数、实粒数及实粒重都显著高于其它年份, 但这些因子以及温度、日照长度与产量间的相关性都没有达到显著水平。说明产量的形成需要过程的模拟, 如 Oryza 2000^[9]、APSIM-Oryza^[10], 而不能简单应用平均值。即温度和日照在整个生育过程的分布会影响作物生长量和产量的形成。

3.2 同一年份不同施肥处理对产量的影响

施肥目的是增加作物产量, 同时维持或增加土壤肥力。与常规单施化肥相比, 4 年有机无机配施、外加微量元素等措施没有显著增加双季稻产量。张成兰等^[11]在赤红壤得到相同结果。他们发现, 在多年冬季绿肥还田条件下, 连续 5 年有机无机配施 (1:1, 鸡粪) 和秸秆还田不能显著增加双季稻产量。其它红壤长期定位试验也发现, 有机替代或有机无机配施需要较长时间才能增加产量。如江西进贤, 30% 有机替代 (NPKM) 与 NPK 相比, 经过 30 年水稻增产量由 0.6% 提升到 6.9%^[12]。湖南望城经过 32 年秸秆还田和猪粪配施, 早稻平均增产 7.2%, 晚稻平均增产 6.7%^[13]。江西南昌 29 年 30% 有机替代, 早稻产量增加 6.3%, 晚稻增产 7.8%^[14]。而在地力中等的湖南祁阳, 施氮量加倍 [有机无机比 1:1, 无机氮 72.3 kg/(hm²·季)],

有机氮为腐熟牛粪] 情况下, 前 5 年双季稻产量差异不明显, 后期 NPK 产量逐步降低, 而 NPKM 产量基本维持, 经过 30 年双季稻平均增产 19%^[15]。说明在红壤通过添加有机物料增加产量需要较长时间。相反, 在肥力较低的祁阳红壤, Li 等^[16]发现与农民单施化肥相比, 秸秆还田 (单季或双季) 或冬季紫云英还田 (N 投入增加 50% ~ 78%), 4 年双季稻显著增产 8.5% ~ 24.1%。说明基础地力影响作物对不同肥料的响应。另外, 他们发现有机物料的质量影响土壤养分的供应, 有机物料的数量影响土壤有机质的提升。本试验地经过长期秸秆还田, 土壤肥力有了一定的提高, 在此基础上, 用 20% 有机氮替换无机氮, 可能在有机物料的质量和数量上都无法满足快速增产的目的。另外为了便于推广, 我们选用商品有机肥, 其中易分解碳氮含量较高, 这些成分在厌氧条件下促进铁、硫还原物质的产生^[17], 不利于水稻生长, 这可能也是影响产量的一个原因。

相反, 在红壤中施硅显著降低有害性还原性物质 (Fe²⁺ 和 Mn²⁺)^[18], 同时增加地上部氮磷养分的吸收^[6], 增加机械抗性和生理抗性^[19], 从而增加双季稻产量^[6, 18, 20]。但本研究在施硅情况下, 地上部氮磷吸收量与不施硅相比没有差异, 水稻产量没有增加。陈琨等^[18]在四川紫色土得到相同结果。他们发现只有硅与钙配施才能增加水稻产量 10.6%, 而单独施锌肥、硅肥对水稻增产效果不显著。但在辽宁盐碱地, 不论是土施硅与钙, 还是叶面喷施硅肥, 单季稻产量分别增加 4.8% 和 14.3%, 达到显著水平^[20]。他们认为硅肥主要通过增加分蘖和抗病性增加产量, 我们测定的分蘖数没有变化 (数据略)。而刘红芳等^[21]在单季稻中发现, 硅肥对产量的贡献与施氮量有关。在常规施氮量下, 不

论是硅肥,还是硅钙肥,对水稻产量无影响,对秸秆抗性也无影响;而施氮量为 2.5 倍时,两种硅肥都促进维管束发育,抗倒伏,实现增产 12.5%^[21]。我们的施氮量属常规水平,因此,硅肥对产量没有效果。

另外,硫和锌是参与作物酶活性和生理代谢的重要元素,增加水稻产量^[5]。在本试验条件下,与常规施肥相比,这两个元素没有增加双季稻产量。孙玉桃等^[4]得到相同结果。他们发现在田间施硫条件下,早稻增产 3%,晚稻没有效果,都没有达到显著水平。

总之,在不同施肥模式下,双季稻产量与常规施肥相比没有增加,主要原因还是试验区长期秸秆还田。虽然每年有籽粒部分移出,但通过有机肥替代可以满足微量元素的少量移出;同时因为有机肥替代率较低,所以 4 年替代后,增产效果不明显。

3.3 氮肥农学利用效率和氮肥表观利用率

相对而言,减氮条件下,氮肥农学效率因为施氮量低而增高。但本文因减氮条件下产量也下降,所以氮肥利用率没有提高。不同施肥下氮肥农学利用效率范围在 15 ~ 25 kg/kg,与其它红壤在相似施氮量下的利用效率相似^[12, 14]。不同施肥模式下,早稻氮肥农学效率高于晚稻,与刘益仁等^[14]得到的结果相同,主要原因是早稻施氮量低于晚稻。

不同处理间氮肥表观利用率没有显著差异,但相对而言缓释肥效果最佳(T8)。Geng 等^[3]得到相同结果,表明缓释肥利于作物吸氮。氮肥表观利用率范围在 26% ~ 41%,早稻高于晚稻。与湖南望城、江西进贤、江西南昌的红壤长期定位试验结果相同,利用率范围(平均 31% ~ 44%)也接近^[12-14]。相反,根据文献和田间两年试验,叶廷红等^[22]发现晚稻氮肥表观利用率略高于早稻。结果有差异的主要原因是施肥量和产量。本试验地区常年晚稻产量略高于早稻,所以晚稻施氮量高于早稻,但本试验的这 4 年,产量相似或低于早稻,所以氮肥利用率也低。

3.4 土壤肥力

长期秸秆还田条件下,用 20% 有机肥 N 替代化肥 N,4 年后稻田土壤有机质和全氮没有显著增加。主要原因是有机肥投入量(771 kg/hm²)与秸秆(5500 ~ 8000 kg/hm²)相比数量少。张成兰等^[11]在广州赤红壤得到相同结果。他们发现冬季绿肥还田条件下,长期有机无机配施(1:1,鸡粪)

和秸秆还田,与 NPK 相比,土壤养分、酶活性和微生物多样性都没有显著差异。湖南桃源红壤试验也发现,与 NPK 相比,添加秸秆与绿肥等有机物料需要 9 年以上才能使土壤有机碳显著增加,同时增加微生物量碳氮^[23]。湖南望城红壤上秸秆与猪粪还田,与 NPK 相比,经过 32 年有机碳增加 6%,而微生物量碳氮没有差异^[13]。而祁阳红壤,5 年时间秸秆与绿肥还田显著增加了土壤有机质含量 11% ~ 23%^[16]。说明有机肥料对土壤地力的影响和物料投入的数量、质量与土壤原有地力有关。

4 结论

集成红壤增产增效的施肥模式,并应用于长期秸秆还田的江西红壤。结果发现,不论是有机替代、添加微量元素、减氮、缓释肥替代,都不能显著增加双季稻产量,也不能增加氮肥农学效率及表观利用率。说明长期秸秆还田对水稻产量和地力起到很重要作用,在此基础上,添加有机肥可以满足双季稻对微量元素的需求;缓释肥的应用增加氮肥表观利用率 9%。

参考文献:

- [1] 王姗姗,黄庆海,徐明岗,等.长期不同施肥条件下红壤性水稻土双季稻氮肥回收率的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):297-303.
- [2] 徐明岗,张文菊,黄绍敏,等.中国土壤肥力演变(第2版)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2015.
- [3] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 65-73.
- [4] 孙玉桃,董春华,聂军,等.湖南中低产双季稻田硫肥施用效应[J].西北农业学报,2019,28(10):1681-1688.
- [5] 王孝忠,田娣,邹春琴.锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):998-1004.
- [6] 熊丽萍,蔡佳佩,朱坚,等.硅肥对水稻-田面水-土壤氮磷含量的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1127-1134.
- [7] 杨秀霞,燕辉,陈仁辉,等.硅锌硼配施对红壤区双季稻产量和群体发育特征的影响[J].中国土壤与肥料,2016(6):121-128.
- [8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,1999.
- [9] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, et al. ORYZA2000: modeling lowland rice[M]. Los Banos, Philippines: International Rice Research Institute, Wageningen University and Research Centre. 2001.

- [10] Radanielson A M, Gayson D S, Li T, et al. Modeling salinity effect on rice growth and grain yield with Oryza v3 and APSIM-Oryza [J]. European Journal of Agronomy, 2018, 100: 44–55.
- [11] 张成兰, 艾绍英, 杨少海, 等. 双季稻-绿肥种植系统下长期施肥对赤红壤性状的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 184–189.
- [12] 黄庆海, 柳开楼, 李大明, 等. 红壤性水稻土肥力演变与培肥技术[M] // 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变(第2版). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.
- [13] 聂军, 廖育林, 鲁艳红, 等. 长期施肥冲垅田水稻土肥力演变和培肥技术[M] // 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变(第2版). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.
- [14] 刘益仁, 李祖章, 刘光荣, 等. 长期施肥丘岗地红壤性水稻土肥力演变与培肥技术[M] // 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变(第2版). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.
- [15] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 314–324.
- [16] Li T, Gao J S, Bai L Y, et al. Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil [J]. Soil & Tillage Research, 2019, 195: 104428.
- [17] 王旭刚, 徐虹峰, 孙丽蓉, 等. 厌氧条件下水稻土中铁硫循环与光照的关系[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 76–83.
- [18] 陈琨, 秦鱼生, 喻华, 等. 不同肥料/改良剂对冷泥田水稻生长、养分吸收及土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 773–781.
- [19] 方至萍. 硅对长江中下游双季稻区化肥农药协同增效减施技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [20] 任海, 付立东, 王宇, 等. 不同硅肥施入模式对水稻产量及品质的影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(4): 13–18.
- [21] 刘红芳, 宋阿琳, 范分良, 等. 高供氮水平下不同硅肥对水稻茎秆特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 758–768.
- [22] 叶廷红, 李鹏飞, 侯文峰, 等. 早稻、晚稻和中稻干物质积累及氮素吸收利用的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 212–222.
- [23] 陈安磊, 陈春兰. 养分循环利用模式下红壤稻田的肥力演变[M] // 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变(第2版). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.

Impact of manure incorporation, microelements and slow release fertilizer application on double rice yield and fertilizer use efficiency under long-term straw return condition

LI Gui-hua, ZHANG Xue-ling, ZHOU Ji-xiang, ZHANG Jian-feng^{*} (Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Under long-term rice straw return condition, fertilizer management methods which can increase rice yield and fertilizer use efficiency have been integrated to see if they can increase rice yield and rice nitrogen (N) uptake in red paddy soil. Four-year (2013 ~ 2016) experiment was carried out in Dufu farm in Gaoan county, Yichun city, Jiangxi province. Six fertilizer management methods were chosen, including partial substitution of fertilizer with manure and/or slow release fertilizer, incorporation of microelement (Si, Zn, and S), and nitrogen input decreased by 20%. Rice yield and straw weight were measured at each season. Nitrogen and phosphate uptake in rice and straw were measured. Both nitrogen use efficiency and agronomic efficiency of fertilizer N were calculated. Soil properties and microbial biomass were analyzed after the late rice was harvested in 2016. The results showed that there were no significant differences in rice yields under different fertilizer treatments. Above ground N uptakes were significantly higher under manure application ($P<0.05$). Rice yield decreased when fertilizer N was cut by 20%; however, the decrease was not significant. Above ground N uptake decreased significantly under 20% N cutoff. Early rice yield and late rice yield varied in different years. Late rice yield was not always larger than early rice yield. Nitrogen agronomic efficiency for early and late rice was 20.6 ~ 24.8 kg/kg and 14.5 ~ 18.4 kg/kg, respectively. Nitrogen recovery fraction for early and late rice was 31.6% ~ 40.0% and 26.0% ~ 35.4%, respectively. Nitrogen recovery fraction for slow release fertilizer was larger than other fertilizer treatments, but the difference was not significant ($P=0.07$). There were no significant differences in soil organic matter, total N, pH, and microbial biomass C, microbial biomass N in arable layer under all treatments except available potassium and phosphate. Double rice yield, soil organic matter and total N did not increase under manure incorporation, micronutrient input and slow release fertilizer application over four-year field experiment. This implied that long-term straw return had great effects on rice yield, therefore, it takes longer time to increase rice yield to a significant level under manure incorporation. Furthermore, soil provided enough micronutrients for double rice growth under straw and manure application because extra application of micronutrients did not result in an increase of rice yield and N uptake over eight seasons.

Key words: double rice; yield; fertilizer use efficiency; microelements Si, Zn, S; complexed organic-inorganic fertilizers; slow release fertilizer