

## 秸秆还田条件下高氮低钾型复合肥配施钾肥对双季稻产量和养分积累量的影响<sup>①</sup>

张美薇<sup>1</sup>, 韩天富<sup>2</sup>, 柳开楼<sup>1\*</sup>, 胡丹丹<sup>1</sup>, 吴艳<sup>1</sup>, 宋惠洁<sup>1</sup>, 夏晶<sup>1</sup>, 胡志华<sup>1</sup>, 徐小林<sup>1</sup>, 夏立<sup>1</sup>, 樊剑波<sup>3</sup>

(1 江西省红壤及种质资源研究所, 南昌 331717; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335200)

**摘要:** 通过大田试验, 以氮磷钾养分含量为 18%、12% 和 10% 的高氮低钾型复合肥为对象, 在秸秆还田条件下分别设置了不施钾肥(CK)、高氮低钾型复合肥(F)、高氮低钾型复合肥配施钾肥(F+K)处理, 分析了不同处理下早晚稻的产量、产量构成因素和氮磷钾积累量及钾肥利用率的变化特征。结果表明: 与 CK 处理相比, F 和 F+K 处理的早稻产量分别增加了 4.36% 和 9.13%, 晚稻产量分别提高了 4.09% 和 13.89%, 两季水稻总产量增幅分别为 4.22% 和 11.65%, 同时, F+K 处理的早、晚稻产量分别比 F 处理提高了 4.57% 和 9.41%。产量构成因素的分析发现, F+K 处理主要是通过增加早稻季的每株穗数和晚稻季的每株穗数和千粒重来实现水稻增产。由于 F+K 处理增加了籽粒和秸秆的钾素含量, 早稻季 F+K 处理的氮素和钾素积累量分别比 CK 处理提高了 12.30% 和 22.40%, 晚稻季 F+K 处理的氮素、磷素和钾素积累量分别比 CK 处理提高了 11.89%、21.62% 和 26.59%; 两季的结果也显示, F+K 处理的氮素、磷素和钾素积累量分别比 CK 处理提高了 12.07%、22.45% 和 24.54%, 且分别比 F 处理提高了 9.34%、8.56% 和 11.28%。由于秸秆还田带入大量钾素, 与 F 处理相比, F+K 处理的钾肥利用率与 F 处理无显著差异, 但 F+K 处理中钾肥利用率的波动性明显降低。综上, 在秸秆还田条件下, 建议南方双季稻区将高氮低钾型复合肥与钾肥配施, 以实现水稻增产增效目标。

**关键词:** 双季稻; 复合肥; 产量; 每株穗数; 钾肥利用率

中图分类号: S143 文献标志码: A

## Effects of High-nitrogen and Low-potassium Compound Fertilizer Combined with Potassium Fertilizer on Yield and Nutrient Accumulation of Double-cropping Rice Under Straw Returning Condition

ZHANG Meiwei<sup>1</sup>, HAN Tianfu<sup>2</sup>, LIU Kailou<sup>1\*</sup>, HU Dandan<sup>1</sup>, WU Yan<sup>1</sup>, SONG Huijie<sup>1</sup>, XIA Jing<sup>1</sup>, HU Zhihua<sup>1</sup>, XU Xiaolin<sup>1</sup>, XIA Li<sup>1</sup>, FAN Jianbo<sup>3</sup>

(1 Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3 Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335200, China)

**Abstract:** In this study, a field experiment was conducted under straw returning into the field, which included no potassium fertilizer (CK), high-nitrogen/low-potassium compound fertilizers containing nitrogen, phosphorus and potassium nutrients of 18%, 12% and 10% (F), and F with potassium fertilizer (F+K) treatments. Then, the changes in yield, yield components, nitrogen, phosphorus, and potassium accumulations, and potassium fertilizer utilization rate of early and late rice under different treatments were analyzed. The results showed that compared with CK, the early rice yields under F and F+K were increased by 4.36% and 9.13%, the late rice yields were increased by 4.09% and 13.89%, and the total rice yields were increased by 4.22% and 11.65%, respectively. At the same time, the early and late rice yields under F+K were higher than those under F by 4.57% and 9.41%, respectively. The analysis of yield components showed that F+K mainly achieved rice yield improvement by increasing the

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42367051)、国家科技基础资源调查专项项目(2021FY100504)和江西省省级引导市县发展专项资金(2022-8-13137)资助。

\* 通信作者(liukailou@163.com)

作者简介: 张美薇(1997—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为红壤改良与水稻育种。E-mail: m18235413715@163.com

number of spikes per plant in the early rice season, the number of spikes per plant and thousand grain weight in the late rice season. Because F+K increased the potassium contents in grains and straws, the accumulations of nitrogen and potassium in the early rice season under F+K were higher than those under CK by 12.30% and 22.40%, respectively, while the accumulations of nitrogen, phosphorus, and potassium in the late rice season under F+K were higher than those under CK by 11.89%, 21.62%, and 26.59%, respectively. The results of both seasons also showed that the accumulations of nitrogen, phosphorus, and potassium under F+K were increased than those under CK by 12.07%, 22.45%, and 24.54%, respectively, and they were improved by 9.34%, 8.56%, and 11.28% higher than those under F. Due to the large amount of potassium brought in by straw return, there was no significant difference for potassium use efficiency between F+K and F, but the variability of potassium use efficiency under F+K was significantly reduced than that under F. Therefore, it is recommended that high-nitrogen/low-potassium type compound fertilizer should be combined with potassium fertilizer in southern double-cropping rice areas to achieve the goal of rice yield and efficiency improvement under straw return conditions.

**Key words:** Double-cropping rice; Compound fertilizer; Yield; Number of grains per plant; Potassium use efficiency

化肥能为粮食作物生长提供必要的养分。目前人们为追求粮食产量, 过量施用化肥现象普遍。化肥过量施用不但导致化肥利用率降低, 且容易导致过量的氮、磷素流失, 造成水体富营养化, 破坏生态平衡, 不利于农业的可持续发展, 从而影响粮食生产安全<sup>[1]</sup>。氮、磷、钾是植物生长所需的大量营养元素, 在水稻生产过程中, 不同氮磷钾肥用量和比例显著影响水稻产量<sup>[2]</sup>。据统计, 中国水稻氮肥、磷肥、钾肥利用率较低, 约为 27.3%、13.0% 和 28.1%<sup>[3]</sup>, 大量化肥在土壤中积累, 加剧了农业面源污染风险。此外, 化肥配置效率评价模型分析显示, 我国化肥施用呈高投入、中产出、综合效率中等的态势<sup>[4]</sup>。因此, 在我国水稻的节肥增效潜力较大。

随着化肥用量的增加和管理措施的完善, 在水稻籽粒产量提升的同时, 水稻秸秆产量也在逐年上升。基于农业农村部 1988—2018 年在全国稻作区水稻土的长期监测数据研究发现, 2009—2018 年我国水稻秸秆和氮磷钾养分资源年均量分别达到  $1.69 \times 10^8$  t 和  $452.09 \times 10^4$  t, 较 1988—1998 年增加  $0.23 \times 10^8$  t 和  $61.50 \times 10^4$  t<sup>[5]</sup>。水稻秸秆含有较为丰富的氮磷钾养分和多种有机物质等, 是一种重要的有机肥资源<sup>[6-7]</sup>。水稻秸秆还田后, 一方面可以向土壤输入较多的有机质, 从而提升土壤有机质含量<sup>[8-9]</sup>, 改善土壤质量, 进而实现作物增产, 且随着还田时间的延长, 增产效应越明显<sup>[10]</sup>; 另一方面, 水稻秸秆还田可以补充土壤氮磷钾养分, 尤其是钾素资源。柴如山等<sup>[11]</sup>采用草谷比法估算表明, 单位耕地面积水稻秸秆还田当季可提供钾 ( $K_2O$ ) 养分为  $152.6 \text{ kg/hm}^2$ 。因此, 在我国水稻主产区, 秸秆全量还田可实现化肥的部分替代, 从而达到化肥减施增效的目标。

鉴于秸秆还田可以补充大量钾素, 以及相较于磷

钾, 水稻等作物对氮肥需求量较高<sup>[12]</sup>, 在传统复合肥(氮磷钾比例为 15%、15% 和 15%)的基础上, 很多大型肥料企业开始研制和推广高氮低钾型复合肥。然而, 在我国南方双季稻区, 土壤速效钾含量较低<sup>[13]</sup>, 虽然秸秆还田可以补充一定的钾素, 但高氮低钾型复合肥是否有利于水稻稳产还有待进一步验证, 特别是在水稻生长后期, 高氮低钾型复合肥配施一定量的钾肥是否更有利于保障水稻高产所需的钾素吸收量还有待进一步研究。因此, 本研究在秸秆还田条件下, 设置高氮低钾型复合肥、高氮低钾型复合肥配施钾肥以及不施钾肥处理, 分析各处理下早晚稻产量及产量组成、氮磷钾养分积累量及钾肥利用率的变化特征, 以探索秸秆还田条件下更高效更合理的肥料配施方式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验地位于江西省南昌市进贤县张公镇马家村, 面积  $1\,334 \text{ m}^2$ 。该地区属于江西省赣抚平原的双季稻区, 土壤类型为第四纪红黏土发育的红壤性水稻土, 土壤肥力中等偏下, 在双季稻种植区域具有普遍代表性。2022 年试验前耕层土壤 pH 为 5.13, 有机质为  $26.81 \text{ g/kg}$ , 碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 118.15、19.15 和  $53.77 \text{ mg/kg}$ 。试验地前茬作物为水稻, 冬季休闲, 早晚稻的秸秆均全量粉碎还田, 早、晚稻秸秆还田量为  $5\,400$  和  $6\,000 \text{ kg/hm}^2$ , 水稻秸秆的有机碳、氮、磷、钾含量分别为 418、10.8、8.1 和  $18.6 \text{ g/kg}$ 。

试验用高氮低钾型复合肥为新洋丰复合肥, N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  配比情况为 18-12-10; 钾肥为中化枫禾洋氯化钾(高效农用钾肥),  $K_2O \geq 60.0\%$ ,  $H_2O \leq 2\%$ 。

供试水稻品种为当地大面积推广应用品种, 早稻为嘉育 66, 晚稻为盛泰优 9712, 早稻移栽和收获时间

分别为 2022 年 4 月 20 日和 7 月 24 日,晚稻移栽和收获时间分别为 2022 年 7 月 27 日和 11 月 5 日。

1.2 试验设计

试验共设 3 个处理,分别为:①不施钾肥(CK),基肥施用 N 81 kg/hm<sup>2</sup>(尿素 176 kg/hm<sup>2</sup>)、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 54 kg/hm<sup>2</sup>(钙镁磷肥 432 kg/hm<sup>2</sup>),返青期追施 N 48.3 kg/hm<sup>2</sup>(尿素 105 kg/hm<sup>2</sup>),不追钾肥;②单施高氮低钾型复合肥(F),基肥施用 450 kg/hm<sup>2</sup>复合肥,返青期追施 N 48.3 kg/hm<sup>2</sup>(尿素 105 kg/hm<sup>2</sup>),不追钾肥;③高氮低钾型复合肥配施钾肥(F+K),基肥施用 450 kg/hm<sup>2</sup>复合肥,返青期追施 N 48.3 kg/hm<sup>2</sup>(尿素 105 kg/hm<sup>2</sup>),追施 K<sub>2</sub>O 45 kg/hm<sup>2</sup>(75 kg/hm<sup>2</sup> 枫禾祥牌钾肥)。每处理 3 次重复,小区面积 60 m<sup>2</sup>。早晚稻均采用人工插秧,水稻株行距为 20 cm×20 cm,密度为 25.05 万穴/hm<sup>2</sup>。水稻生长期间参考农户管理进行病虫害防治。

1.3 测试指标

成熟期长势测定:在水稻成熟期,随机选取植株 10 莖,测定每株穗数,并采集有代表性的植株 5 莖,测定每穗粒数和千粒重。

成熟期水稻产量测定:在水稻成熟期,每个小区实打实收,将籽粒晒干后称重,并按照小区面积换算成单位面积水稻产量。

成熟期养分吸收测定:各处理采有代表性植株 10 株,将秸秆和籽粒分开烘干和称重,获得植株各部位干物质质量,之后研磨过筛测定植株各部位养分含量,其中氮、磷、钾含量分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定<sup>[14]</sup>。植株各部位氮磷钾养分累积量为各养分含量和相应干物质质量的乘积,钾肥利用率为施钾处理与不施钾处理植株钾素累积量的差值与施钾处理钾肥投入量的比值(以百分数表示)。

1.4 数据统计分析

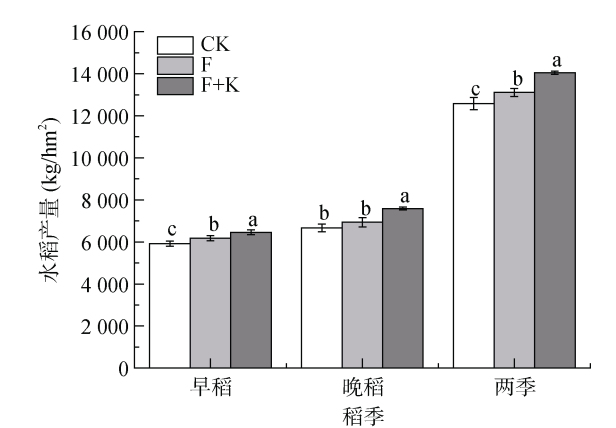
采用 Excel 2003 进行数据处理,统计分析采用 SAS 9.1 进行,并采用 LSD 法进行各处理间差异性检验( $P<0.05$ )。图件采用 Origin 8.1 进行制作。

2 结果与分析

2.1 高氮低钾型复合肥配施钾肥对早晚稻产量及其构成因素的影响

图 1 显示,高氮低钾型复合肥配施钾肥显著提升水稻产量。在早稻季,与 CK(不施钾肥)处理相比,F(高氮低钾型复合肥)和 F+K(高氮低钾型复合肥配施钾肥)处理的水稻产量分别增加了 4.36% 和 9.13%;在晚稻季,与 CK 处理相比,F 和 F+K 处理的水稻产量分别提高了 4.09% 和 13.89%,但 F 和 CK 处理间差异不

显著;两季水稻的总产量也呈现 F 和 F+K 处理显著高于 CK 处理,增幅分别为 4.22% 和 11.65%。同时,F+K 处理的早晚稻产量显著高于 F 处理,且晚稻季的增幅(9.41%)明显高于早稻季(4.57%)。



(柱图上方不同小写字母表示同一稻季不同处理间存在显著差异 ( $P<0.05$ );下同)

图 1 各处理早晚稻和两季产量变化  
Fig. 1 Changes of yields of early and late rice under different treatments

高氮低钾型复合肥配施钾肥主要影响水稻产量构成因素中的每株穗数和千粒重,而对每穗粒数则无显著影响(表 1)。与 CK 处理相比,早稻季 F+K 处理的每株穗数提高了 22.22%,晚稻季 F+K 处理的每株穗数和千粒重分别提高了 36.36% 和 10.89%。同时,与 F 处理相比,早稻季 F+K 处理的每株穗数无显著提升,但晚稻季的每株穗数则提高了 25.00%。

表 1 各处理早晚稻产量构成因素变化  
Table 1 Changes of yield components of early and late rice under different treatments

稻季	处理	穗数(穗/株)	粒数(粒/穗)	千粒重(g)
早稻	CK	9 ± 1 b	124 ± 2 a	21.49 ± 0.48 a
	F	10 ± 2 ab	124 ± 3 a	22.15 ± 0.61 a
	F+K	11 ± 2 a	127 ± 8 a	22.98 ± 0.76 a
晚稻	CK	11 ± 1 b	151 ± 9 a	22.68 ± 0.54 b
	F	12 ± 2 b	155 ± 10 a	24.34 ± 0.25 a
	F+K	15 ± 2 a	163 ± 6 a	25.14 ± 0.49 a

注:同列数据后不同小写字母表示同一稻季不同处理间存在显著差异( $P<0.05$ );下同。

2.2 高氮低钾型复合肥配施钾肥对早晚稻氮磷钾含量的影响

高氮低钾型复合肥配施钾肥显著影响籽粒和秸秆的钾素含量(表 2),而对籽粒和秸秆的氮、磷含量影响较小(除了晚稻季 F+K 处理的籽粒磷含量显著高于 CK 处理和 F+K 处理的秸秆氮显著低于 CK 处理)。与 CK 处理相比,早稻季 F 和 F+K 处理的籽粒钾含量分

别提高了 3.68% 和 7.29%，秸秆钾含量的增幅分别为 5.47% 和 4.85%；晚稻季 F 和 F+K 处理的籽粒钾含量分别提高了 2.92% 和 6.57%，秸秆钾含量的增幅分别为 6.03% 和 4.88%。同时，早、晚稻籽粒钾含量均呈现 F+K 处理显著高于 F 处理，增幅分别为 3.49% 和 3.55%，而 F+K 处理的秸秆钾含量则与 F 处理无显著差异。

表 2 各处理早晚稻籽粒和秸秆氮磷钾含量  
Table 2 Contents of nitrogen, phosphorus and potassium in grains and straws of early and late rice under different treatments

稻季	处理	籽粒氮 (g/kg)	籽粒磷 (g/kg)	籽粒钾 (g/kg)	秸秆氮 (g/kg)	秸秆磷 (g/kg)	秸秆钾 (g/kg)
早稻	CK	10.39 ± 0.29 a	2.39 ± 0.32 a	3.09 ± 0.02 c	5.68 ± 0.19 a	1.09 ± 0.07 a	28.10 ± 0.55 b
	F	10.44 ± 0.17 a	2.65 ± 0.27 a	3.21 ± 0.04 b	5.32 ± 0.40 a	1.22 ± 0.16 a	29.64 ± 0.36 a
	F+K	10.82 ± 0.15 a	2.56 ± 0.28 a	3.32 ± 0.00 a	5.30 ± 0.52 a	1.30 ± 0.14 a	29.46 ± 0.38 a
晚稻	CK	11.51 ± 0.43 a	2.46 ± 0.16 b	3.12 ± 0.08 c	6.70 ± 0.26 a	1.22 ± 0.15 a	28.64 ± 0.43 b
	F	11.22 ± 0.72 a	2.65 ± 0.22 ab	3.21 ± 0.04 b	6.56 ± 0.33 ab	1.22 ± 0.04 a	30.37 ± 0.80 a
	F+K	11.53 ± 0.46 a	2.74 ± 0.12 a	3.32 ± 0.07 a	5.99 ± 0.21 b	1.11 ± 0.08 a	30.04 ± 0.78 a

2.3 高氮低钾型复合肥配施钾肥对早晚稻氮磷钾养分积累量的影响

各处理的籽粒和秸秆干物质质量变化与产量变化趋势相似，均呈现 F+K 处理的籽粒和秸秆干物质最高的趋势(表 3)。进一步计算氮、磷、钾素的积累量发现，在早稻季，与 CK 处理相比，F+K 处理的氮素和钾素积累量分别提高了 12.30% 和 22.40%，且 F+K 处理的钾素积累量也显著高于 F 处理，增幅

为 10.31%；在晚稻季，与 CK 处理相比，F+K 处理的氮、磷和钾素积累量分别提高了 11.89%、21.62% 和 26.59%，且 F+K 处理的氮素和钾素积累量均显著高于 F 处理，增幅为 9.96% 和 12.19%。两季合计的结果也显示，F+K 处理的氮、磷和钾素积累量显著提高，分别比 CK 处理提高了 12.07%、22.45% 和 24.54%，分别比 F 处理提高了 9.34%、8.56% 和 11.28%。

表 3 各处理早晚稻氮磷钾积累量的变化  
Table 3 Accumulations of nitrogen, phosphorus and potassium in early and late rice under different treatments

稻季	处理	籽粒干物质质量(kg/hm <sup>2</sup> )	秸秆干物质质量(kg/hm <sup>2</sup> )	氮素积累量(kg/hm <sup>2</sup> )	磷素积累量(kg/hm <sup>2</sup> )	钾素积累量(kg/hm <sup>2</sup> )
早稻	CK	5 680.80 ± 118.96 c	4 982.40 ± 158.40 c	87.34 ± 2.21 b	19.03 ± 2.08 a	157.54 ± 2.21 c
	F	5 976.48 ± 38.38 b	5 251.20 ± 111.85 b	90.33 ± 3.15 ab	22.20 ± 1.00 a	174.80 ± 3.85 b
	F+K	6 199.20 ± 106.55 a	5 846.40 ± 80.18 a	98.09 ± 3.67 a	23.49 ± 2.24 a	192.82 ± 2.36 a
晚稻	CK	6 393.60 ± 175.20 b	5 049.60 ± 15.74 c	107.38 ± 2.51 b	21.90 ± 1.23 b	164.55 ± 2.60 c
	F	6 559.20 ± 182.16 b	5 423.20 ± 103.35 b	109.26 ± 3.94 b	23.97 ± 1.80 ab	185.68 ± 1.90 b
	F+K	7 233.60 ± 33.26 a	6 135.20 ± 47.66 a	120.15 ± 4.07 a	26.63 ± 1.04 a	208.31 ± 4.26 a
两季	CK	12 074.40 ± 280.90 c	10 032.00 ± 174.01 c	194.72 ± 4.56 b	40.93 ± 2.41 c	322.09 ± 1.67 c
	F	12 535.68 ± 201.74 b	10 674.40 ± 212.51 b	199.60 ± 4.85 b	46.17 ± 0.95 b	360.48 ± 1.99 b
	F+K	13 432.80 ± 91.17 a	11 981.60 ± 127.82 a	218.24 ± 7.69 a	50.12 ± 1.76 a	401.13 ± 1.99 a

2.4 高氮低钾型复合肥配施钾肥对早晚稻钾肥利用率的影响

图 2 显示，晚稻季的钾肥利用率(56.58% ~ 58.58%)明显高于早稻季(46.21% ~ 47.24%)，两季平均钾肥利用率为 51.40% ~ 52.91%。与 F 处理相比，F+K 处理的钾肥利用率略有增加，但增幅不显著。进一步分析发现，与 F 处理较大的标准差相比，F+K 处理中钾肥利用率的标准差明显较小，这表明 F+K 处理下钾肥利用率稳定性较好。

3 讨论

在秸秆全量还田的条件下，高氮低钾型复合肥配

施钾肥可以显著提高早晚稻产量，与单施高氮低钾型复合肥处理相比，高氮低钾型复合肥配施钾肥下早稻和晚稻的产量增幅分别为 4.57% 和 9.41%，且晚稻季的增幅明显高于早稻季。原因主要与水稻每株穗数的增加有关，特别是晚稻季，高氮低钾型复合肥配施钾肥还显著提升了千粒重。尽管我国南方双季稻田土壤中全钾含量较高，但大部分为矿物钾(90% ~ 98%)，无法直接供植物吸收利用，导致该地区稻田土壤速效钾含量较低<sup>[13]</sup>，且秸秆还田带入的钾素有限。有研究表明，合理配施钾肥可提高水稻吸收营养的能力，增强光合作用，提高分蘖率和结实率<sup>[15-16]</sup>；还可以提高水

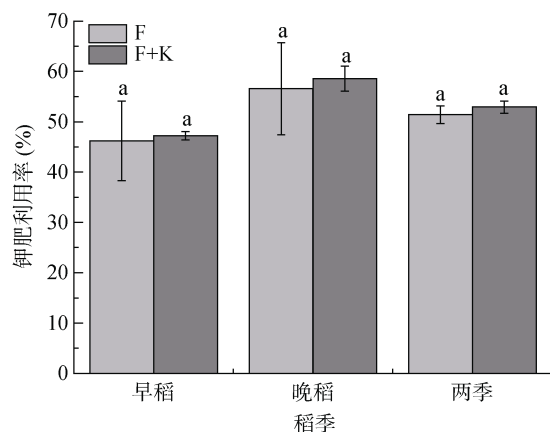


图 2 各处理早晚稻和两季钾肥利用率变化

Fig. 2 Changes of potassium use efficiencies of early and late rice under different treatments

稻抗病虫和抗倒伏能力<sup>[17-18]</sup>。可见,高氮低钾型复合肥配施适量钾肥在实现水稻高产稳产方面有不可忽视的作用。然而,由于水稻品种和复合肥类型与他人的研究不同,本研究中早晚稻的增产幅度明显不同于他人的研究结果<sup>[13,19]</sup>。因此,如何根据秸秆还田的钾素投入水平精准计算配施的钾肥用量还有待进一步研究。此外,还有研究表明,不同水稻品种对钾素的需求水平均存在较大差异<sup>[20]</sup>,这也是导致本试验中配施钾肥对早晚稻的增产幅度不一的原因之一,建议今后进一步根据早晚稻的品种特性和养分需求精准确定合理的钾肥用量。

钾素具有提高农产品品质的效果,也被称为品质元素,钾肥施用可以增加钾素吸收速率,缩短钾素快速积累持续时间,提高养分积累量<sup>[21-23]</sup>。本研究也发现,在高氮低钾型复合肥的基础上配施钾肥处理显著提升了籽粒和秸秆中钾素的含量。且由于籽粒和秸秆干物质量的增加,与不配施钾肥相比,高氮低钾型复合肥配施钾肥进一步提高了早晚稻的氮磷钾养分积累量。这充分证明钾肥不仅增加钾素积累量,还可以促进氮磷的养分积累量,这与很多人的研究结果相似<sup>[24-26]</sup>。有研究表明,磷肥和钾肥均显著提高了晚稻产量、干物质量和收获指数,且二者具有显著互作效应<sup>[24]</sup>。同时,在施用氮、磷肥的基础上,合理增施钾肥能有效改善水稻的氮钾营养状况,促进茎叶和籽粒的干物质积累,从而提高水稻籽粒的氮磷钾积累量<sup>[25]</sup>。进一步结合钾肥利用率的结果表明,虽然高氮低钾型复合肥配施钾肥处理的早晚稻和两季钾肥利用率均略高于单施高氮低钾型复合肥处理,但差异不显著。这与他人的研究结果不同<sup>[26]</sup>,原因可能与本研究是在秸秆全量还田下进行的,秸秆还田的钾素投入量可能掩盖了配施钾肥的差异。但是,需要强调的是,高氮低钾型复合肥

配施钾肥处理下钾肥利用率的标准差明显较低,说明配施钾肥有利于提升钾肥利用率的稳定性,从而实现水稻稳产。此外,本研究的钾肥均是在返青期施用,而此时上季的水稻秸秆也在快速腐解,秸秆释放的钾素与外源钾肥投入的钾素协同保障水稻的钾素需求,从而可能导致配施钾肥下水稻对钾肥的利用率提升效果不明显。也有研究表明,分蘖盛期到开花期为水稻钾素快速积累期<sup>[27]</sup>,建议将钾肥作为穗肥施用。然而,由于分蘖盛期到开花期这一阶段水稻长势旺盛,叶片较大,此时追施钾肥容易导致烧苗等情况的发生,施用不当还会造成水稻贪青晚熟<sup>[28]</sup>,因此,如何创新轻简化钾肥施用技术还有待进一步研究。

## 4 结论

秸秆还田条件下,与不配施钾肥相比,高氮低钾型复合肥配施钾肥有利于增加南方双季稻区的早晚稻每株穗数和千粒重,进而提高水稻产量;同时,高氮低钾型复合肥配施钾肥也提高了早晚稻的氮磷钾养分积累量,但早晚稻和两季的钾肥利用率则无显著提升。建议南方双季稻区在应用高氮低钾型复合肥的基础上,适当配施钾肥,从而实现水稻增产增效的目标。

## 参考文献:

- [1] 邱子健, 申卫收, 林先贵. 化肥减量增效技术及其农学、生态环境效应[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 237-248.
- [2] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645-653.
- [3] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1067-1077.
- [4] 刘钦普, 濮励杰. 中国与主要发达国家化肥施用配置及效率对比分析[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 328-335.
- [5] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 1988—2018 年中国水稻秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 151-161.
- [6] 张俊, 邓艾兴, 尚子吟, 等. 秸秆还田下水稻丰产与甲烷减排的技术模式[J]. 作物杂志, 2021(6): 230-235.
- [7] 解文孝, 李建国, 刘军, 等. 不同土壤背景下秸秆还田量对水稻产量构成及氮吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 248-255.
- [8] 常琳溪, 梁新然, 王磊, 等. 中国稻田土壤有机碳汇特征与影响因素的研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(3): 487-493.
- [9] Halder M, Ahmad S J, Rahman T, et al. Effects of straw incorporation and straw-burning on aggregate stability and soil organic carbon in a clay soil of Bangladesh[J]. Geoderma Regional, 2023, 32: e00620.

- [10] Han X, Xu C, Dungait J A J, et al. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: A system analysis[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(7): 1933–1946.
- [11] 柴如山, 安之冬, 马超, 等. 我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及还田替代钾肥潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(2): 201–211.
- [12] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. *土壤*, 1999, 31(5): 244–254.
- [13] 柳开楼, 韩天富, 黄晶, 等. 中国稻作区土壤速效钾和钾肥偏生产力时空变化[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 202–212.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Ye T H, Xue X X, Lu J W, et al. Yield and potassium uptake of rice as affected by potassium rate in the middle reaches of the Yangtze River, China[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(2): 1318–1329.
- [16] 金正勋, 王珊, 王思宇, 等. 钾肥对水稻籽粒碳氮代谢相关酶基因表达的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2020, 51(9): 9–17.
- [17] 金正勋, 郑冠龙, 朱立楠, 等. 不同氮钾肥施用方法对水稻产量及抗倒伏性的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(3): 9–14.
- [18] 陈岳, 吴希阳, 李成刚, 等. 不同钾肥施用水平和方式对稻曲病发生的影响[J]. *杂交水稻*, 2020, 35(1): 41–44.
- [19] 袁国印, 宋航, 郇威威, 等. 稻麦轮作下长期秸秆还田和钾肥施用后效对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(19): 117–122.
- [20] 张义凯, 陈惠哲, 张玉屏, 等. 不同年代育成的中籼水稻品种干物质累积和钾素吸收及分配[J]. *华北农学报*, 2016, 31(6): 227–232.
- [21] 胡泓, 王光火. 钾肥对杂交水稻养分积累以及生理效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(2): 184–189.
- [22] 王伟妮, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 氮磷钾配合施用对水稻养分吸收、积累与分配的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2010, 29(6): 710–714.
- [23] Popp M P, Slaton N A, Norsworthy J S, et al. Rice yield response to potassium: An economic analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(1): 287–297.
- [24] 成臣, 吕伟生, 朱博, 等. 秸秆全量还田下磷钾配施对晚粳稻产量及品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 244–251.
- [25] 杜加银, 茹美, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 523–533.
- [26] 袁浩亮, 张江林, 鲁艳红, 等. 紫云英和秸秆替代部分化肥对双季稻产量、养分含量及土壤综合肥力的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(6): 1216–1222.
- [27] 侯云鹏, 杨建, 孔丽丽, 等. 水稻养分吸收和转运及产量对施钾的响应[J]. *吉林农业大学学报*, 2018, 40(1): 17–24.
- [28] 吴建富, 潘晓华, 石庆华, 等. 江西双季水稻施肥中存在的问题及对策[J]. *中国稻米*, 2012, 18(5): 33–35.