

秸秆全量还田下磷钾配施对晚粳稻产量及品质的影响

成 臣^{1,2}, 吕伟生³, 朱 博², 卢占军², 王盛亮⁴,
程慧煌⁵, 胡启星⁵, 黎 星¹, 石庆华¹, 曾勇军¹

(1.作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室,
江西农业大学双季稻现代化生产协同创新中心,南昌 330045; 2.赣南师范大学生命科学学院,
国家脐橙工程技术研究中心,江西 赣州 341000; 3.江西省红壤研究所,南昌 331717;
4.江西省高安市农业农村局,江西 宜春 330800; 5.江西省棉花研究所,江西 九江 332105)

摘要:作物秸秆含有丰富的磷、钾等营养元素,但秸秆还田下晚粳稻最佳磷钾配施目前尚不明确。采用磷钾两因素完全随机试验设计,设磷(P_2O_5) 0, 63.75, 127.50, 191.25 kg/hm² (记 P0、P1、P2、P3) 和钾(K_2O) 0, 102, 204, 306 kg/hm² (记 K0、K1、K2、K3) 各 4 个水平。在水稻成熟期取样测定产量、品质及精米氮素累积量。结果表明:磷肥和钾肥均显著提高了晚粳稻产量、干物质量和收获指数,且二者具有显著互作效应;磷钾合理配施可协同促进晚粳稻产量,当磷、钾肥用量分别 62.45 kg/hm² 和 206.08 kg/hm² 时实现较高产。同时,适宜磷钾配施也显著协同提高精米氮素累积量。磷钾合理配施能够提高稻米出糙率、精米率、整精米率及胶稠度,但增加了垩白粒率、垩白度、直链淀粉及粗蛋白含量。除峰值黏度、热浆黏度及冷胶黏度在钾肥用量上存在显著性差异外,各 RVA 谱特征值在钾肥、磷肥及二者互作上均无显著性差异;其中增施钾肥峰值黏度、热浆黏度及冷胶黏度均先增后降。南方晚粳稻实际生产中应重视优化磷钾配施比例,在土壤地力中上等及秸秆全量还田条件下,采用 P1K2 的施肥方案可充分发挥磷钾的协同促进效应,同步实现晚粳稻高产、高效并兼顾优质生产。

关键词: 磷钾配施; 秸秆还田; 晚粳稻; 产量; 品质

中图分类号:S511 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)06-0244-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.06.034

Effects of Combined Application of Phosphorus and Potassium on Japonica Rice Yield and Quality Under Total Crop Residue Incorporated During the Late-rice Cropping Seasons

CHENG Chen^{1,2}, LÜ Weisheng³, ZHU Bo², LU Zhanjun², WANG Shengliang⁴,
CHENG Huihuang⁵, HU Qixing⁵, LI Xin¹, SHI Qinghua¹, ZENG Yongjun¹

(1.Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045; 2.Life Sciences College, Gannan Normal University, National Navel Orange Engineering Research Center, Ganzhou, Jiangxi 341000;
3.Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331717; 4 Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Gaoan City of Jiangxi Province, Yichun, Jiangxi 330800; 5.Cotton Research Institute of Jiangxi Province, Jiujiang, Jiangxi 332105)

Abstract: Crop straw is rich in phosphorus (P), potassium (K) and other nutrient elements, but the optimal combined application of phosphorus and potassium on late japonica rice under crop residue incorporation is still unclear. A two-factor (P and K) experimental design was adopted in the field experiments, four levels of P and K fertilizer application rates were set up, which P_2O_5 were 0, 63.75, 127.50, 191.25 kg/hm² (denoted by P0, P1, P2, P3) and K_2O were 0, 102, 204, 306 kg/hm² (denoted by K0, K1, K2, K3), respectively. The yield, quality, and milled rice nitrogen accumulation of japonica rice were investigated and analyzed at

收稿日期:2020-05-09

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301605, 2018YFD0301102);江西省水稻产业技术体系专项(JXARS-02-03);江西现代农业科研协同创新专项“优质晚粳稻新品种(系)品质变异特征及机械化轻简化栽培技术研究”(JXXTCX2015001-011);中青年科技创新领军人才专项(赣科计字[2018]175号);国家“万人计划”特殊支持项目(国科发资[2019]252号)

第一作者:成臣(1990—),男,讲师,主要从事水稻栽培理论与技术研究。E-mail:chengchenzxm@163.com

通信作者:曾勇军(1978—),男,教授,主要从事水稻栽培理论与技术研究。E-mail:zengyj2002@163.com

rice harvest stage. Both P and K fertilizer could significantly enhance the yield, dry matter weight and harvest index of late japonica rice, and the significant interaction effect between them was found in our study. The reasonable combined application of P and K fertilizers had synergetic effect on the yield of late japonica rice, the high yield was achieved when the application rates of P and K fertilizer were 62.45 kg/hm^2 and 206.08 kg/hm^2 , respectively. At the same time, the milled rice nitrogen accumulation was significantly increased by the reasonable combined application of P and K fertilizers. The brown rice rate, milled rice rate, head milled rice and gel consistency were improved by the reasonable combined application of P and K fertilizers, but the chalkiness rate, chalkiness degree, amylose content and protein content were also increased. Except that the peak viscosity, hot viscosity and cool viscosity had significant differences among the amount of K fertilizer, there were no significant differences in the rice RVA profile characteristics in P, K fertilizer and interaction of both. And the peak viscosity, hot viscosity and cool viscosity were first increased and then decreased with the increased amount of K fertilizer applied. In practices, optimizing the combined application of P and K fertilizers on japonica rice should be concerned during the late-rice cropping seasons in Southern China. The synergy effect of K and P was best under P1K2, which simultaneously achieved the high yield, high efficiency and high quality production of late japonica rice under upper-middle soil fertility and total rice straw incorporation.

Keywords: combined application of phosphorus and potassium; crop residue incorporated; late japonica rice; yield; quality

水稻是中国最重要的粮食作物之一, 全国约 60% 以上人口以稻米为主食^[1-2]。南方双季稻区作为我国水稻生产的主产区, 在保障我国粮食安全中起着举足轻重的作用^[3]。近年来, “早粳晚粳”模式取得突破性进展, 已成为南方稻区开拓稳粮增收、提质增效的新途径, 其显著提高晚稻季产量及品质的优势受到广泛关注, 尤其是粳粳杂交稻^[4-5]。因此, 进一步加强晚粳稻优质高效栽培技术体系研究, 对深入挖掘提升晚粳稻产量和品质的潜力、推进粳稻产业快速发展具有重要意义。

肥料三要素(氮磷钾)作为作物生长发育所必需的营养元素, 合理施用可协调作物与土壤间养分供需矛盾, 从而直接或间接影响着作物产量与品质的形成^[6]。笔者^[7-8]前期对氮肥研究表明, 南方双季晚粳稻在中上等地力条件下, 施纯氮为 255 kg/hm^2 、基蘖穗肥比为 4 : 2 : 4 时可同步实现晚粳稻高产、优质和高效等目标。继而开展晚粳稻磷钾肥需求关系的研究, 这将对完善和优化晚粳稻施肥技术体系尤为重要。

关于磷、钾肥对水稻产量及品质的影响, 前人也开展了较多研究。王强盛等^[9]认为, 钾肥一次性基施以 N : K_2O 为 1 : 0.8 时优质粳稻产量及品质性状表现最佳; 而与钾肥一次性基施相比, 采用基穗肥 7 : 3 的施用比例同步提高水稻产量及稻米品质的效果更佳; 侯云鹏等^[10]研究表明, 适宜的磷肥用量能提高粳稻氮、磷、钾养分的积累, 并能在维持土壤磷素养分平衡下实现水稻增产及施肥高效益; 胡雅杰等^[11]研究表明, 不同磷、钾肥用量下粳稻产量均先增后降, 增施磷肥稻米加工品质变优, 对蒸煮食味品质和营养品质影响不大, 而适当增施钾肥同步改善稻米蒸煮食味品

质和加工品质。综上可知, 以往的研究报道主要侧重对磷肥或钾肥效应的单独分析, 对磷钾配施的互作效应关注较少。南方双季稻区秸秆资源丰富, 秸秆富含磷、钾等养分元素, 并且随着水稻机械化收获的普及和秸秆禁烧政策的实行, 秸秆原位还田已成为目前南方稻区土壤培肥地力最直接、最有效的方式之一^[3,12]。由此可见, 基于秸秆全量还田条件下开展晚粳稻磷钾肥配施的研究具有实际应用价值, 并且是进一步促进南方粳稻高产优质高效栽培的重要发展方向。因此, 本研究在秸秆全量还田条件下, 以南方晚粳稻为研究对象, 研究磷、钾肥不同用量对水稻产量、品质及精米氮素累吸收利用的影响, 旨在为南方晚粳稻合理施用磷、钾肥提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

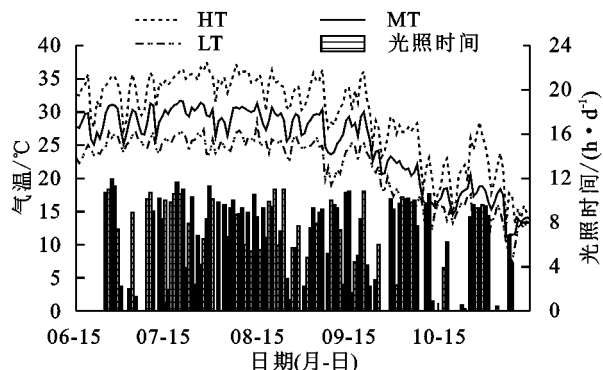
试验于 2018 年晚稻季在江西农业大学产学研合作与人才培养上高创新基地($115^{\circ}06'52''\text{E}$, $28^{\circ}16'42''\text{N}$)开展。试验前茬为双季早粳稻(产量为 7.6 t/hm^2), 土壤地力中上等, 试验前耕层土壤(0—20 cm)有机碳 22.5 g/kg , 全氮 2.5 g/kg , 全钾 22.7 g/kg , 缓效钾 426.1 mg/kg , 碱解氮 183.1 mg/kg , 速效钾 78.4 mg/kg , 速效磷 23.8 mg/kg , 土壤 pH 5.4。供试品种为粳粳杂交稻“甬优 1538”(米质达国标 3 级)。

1.2 试验设计

采用磷钾两因素完全随机试验设计, 磷肥、钾肥分别以 P_2O_5 和 K_2O 计, 分别设置 0, 63.75, 127.50, 191.25 kg/hm^2 (记 P0、P1、P2、P3) 和 0, 102, 204, 306 kg/hm^2 (记 K0、K1、K2、K3) 各 4 个水平, 共 16 个处

理。各处理氮肥用量相同,纯 N 施用总量均为 255 kg/hm²,即磷肥(钾肥)用量与纯 N 用量比值分别为 0,0.25,0.50,0.75(0,0.4,0.8,1.2)。每个处理设 3 次重复,共 48 个小区,完全随机区组排列,小区面积均为 20.0 m²。各小区之间构筑土埂,保证单独排灌,并用塑料薄膜包埂以防止串水串肥。

于 6 月 20 日采用湿润育秧方式播种,7 月 15 日人工移栽,10 月 28 日收获。栽插行株距为 26.7 cm×13.3 cm,每穴栽插 3 粒谷苗,9 月 2 日抽穗。早籼稻收获时秸秆采用全量还田方式,还田量(干草)为 6.0 t/hm²;还田稻草养分含量为 N 0.734%,P₂O₅ 0.435%,K₂O 1.367%,由久保田全喂入式联合收割机收割水稻并同步进行秸秆切碎还田,其粉碎长度约为 10 cm。供试肥料氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素(含 N 46%)、钙镁磷肥(含 P₂O₅ 12%)和氯化钾(含 K₂O 60%),其中氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥为 4:2:4 施用,磷肥一次性施用作基肥,钾肥按基肥:穗肥为 5:5 施用。水分管理技术以及其他农事操作均按水稻高产优质栽培技术进行。2018 年晚稻季晴多雨少,温光资源比较充足,气候正常,无重大气象灾害发生,温度和光照变化见图 1。



注:HT 为日最高气温(°C);MT 为日平均气温(°C);LT 为日最低气温(°C)。下同。

图 1 2018 年晚稻季气温和光照时间

1.3 测定内容与方法

1.3.1 干物质及产量 于水稻成熟期,各小区按平均有效穗进行干物质取样,分别取 6 蔸,剪根洗净后分别将茎、叶及穗装入袋中,放入烘箱调温 105 °C 杀青时长 30 min,后将烘箱温度调至 80 °C,直至样品恒重后取出称重。并在各小区中心区域实收 8 m² 左右,脱粒、晒干及风选后称重,测定其含水率,计算其标准含水率下的产量。

1.3.2 稻米品质及精米氮素累积量 稻谷收获 3 个月,送至农业农村部食品质量监督检验测试中心(武汉)进行加工品质、外观品质、蒸煮与食味品质及营养品质等主要品质指标测定。精米氮素累积量(N kg/hm²)=精米产量×精米含氮量。

1.3.3 稻米淀粉黏滞性 采用快速黏度分析仪(Rapid Viscosity-Analyzer Super 3,澳大利亚 Newport Scientific 公司生产)按照美国谷物化学学会操作规程(当米粉含水量为 12%时,添加 3.00 g 样品和 25.00 mL 蒸馏水进行 RVA 测定^[13])对稻米淀粉黏滞性进行测定,并用 TCW (Thermal Cycle for Windows)配套软件进行数据分析。

1.4 数据分析

试验数据均采用 Microsoft excel 2010 和 DPS 7.05 软件分析和处理数据;Origin 9.0 软件制图;LSD 法进行差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 产量与干物质

由表 1 的方差分析表明,产量、干物质质量和收获指数在不同钾肥、磷肥及钾肥与磷肥互作上差异均呈显著或极显著水平。磷肥施用对晚粳稻产量的贡献大于钾肥(磷肥处理有较高的 F 值),而钾肥施用对于干物质质量和收获指数的影响大于磷肥。

在钾肥用量为 K0、K1 时,增施磷肥晚粳稻产量增加,但调节磷肥用量均难以实现晚粳稻高产(均 ≤ 11.45 t/hm²);钾肥用量 K2、K3 时,增施磷肥晚粳稻产量先增后降,较少的磷肥用量(P0、P1)即可实现较高产(表 1)。类似的,当磷肥用量为 P0、P1 时增施钾肥产量先增后降,若进一步增加磷肥用量时降低钾肥用量可增加产量,说明在晚粳稻生长中磷钾互作的影响较为明显,在磷钾肥投入不均衡时,尤其是钾肥供应不足或磷肥供应过多等条件下,晚粳稻产量潜力均会受到较大限制。而适宜磷钾配比可实现水稻高产、高效生产,并表现出协同促进作用,通过对磷肥、钾肥与产量的关系建立二元二次方程(有互作效应)为 $z = 10461.535 + 6.345x + 12.057y - 0.006x^2 - 0.038y^2 - 0.0376xy$ ($R^2 = 0.668$)。式中: x 、 y 分别为 K₂O 及 P₂O₅ 施用量(kg/hm²); z 为产量(kg/hm²),得出在磷(P₂O₅)和钾(K₂O)施用量分别 62.45 kg/hm²及 206.08 kg/hm²实现较高产量。

晚粳稻干物质质量对磷肥和钾肥施用的响应趋势相似,且与产量较为一致(表 1)。同一磷肥用量下增施钾肥收获指数均逐渐增加,说明钾肥可有效提高收获指数;当钾肥用量 K0、K1(K2、K3)时增施磷肥收获指数先增后降(降低)。因此,适宜磷钾配施显著协同提高晚粳稻产量,主要是二者协同促进了干物质积累并具有较高的收获指数。

2.2 精米氮素累积量

从图 2 可以看出,精米氮素累积量在不同钾肥、磷肥及二者互作上差异均呈极显著水平,其中钾肥施用对

精米氮素累积量的影响大于磷肥。同一磷肥用量下增施钾肥稻米精米氮素累积量均先增后降; 当钾肥用量为 K0、K1(K2、K3) 时增施磷肥稻米精米氮素累积量均逐渐增加(先增后降)。磷钾肥二者具有显著互作效应, 磷钾肥施用不足或过量均不利于精米氮素吸收利用, 适宜磷钾配施显著协同提高了精米氮素累积量。

表 1 秸秆还田条件下不同磷肥和钾肥用量对晚粳稻产量及干物质量的影响

处理		产量/ (t · hm ⁻²)	干物质量/ (t · hm ⁻²)	收获 指数/%
K0	P0	10.59±0.26b	18.1±0.7b	49.8±0.5c
	P1	11.10±0.13a	18.4±0.6ab	50.9±0.3b
	P2	11.36±0.25a	18.8±0.5ab	51.6±0.2a
	P3	11.45±0.28a	19.2±0.5a	51.1±0.3ab
	平均	11.12	18.6	50.8
K1	P0	10.75±0.25b	18.3±0.5a	50.2±0.3b
	P1	11.19±0.22ab	18.5±0.4a	51.8±0.5a
	P2	11.22±0.26ab	18.6±0.2a	51.7±0.6a
	P3	11.39±0.20a	19.0±0.6a	51.3±0.6ab
	平均	11.14	18.6	51.2
K2	P0	11.82±0.49ab	18.7±0.8b	54.2±0.5a
	P1	12.32±0.49a	19.9±0.3a	53.7±0.7ab
	P2	11.19±0.38bc	18.1±0.5b	52.8±0.9ab
	P3	10.84±0.05c	17.7±0.3b	52.3±0.8b
	平均	11.54	18.6	53.2
K3	P0	11.50±0.65ab	17.4±1.0ab	56.6±0.9a
	P1	11.94±0.21a	19.1±0.8a	54.4±0.8b
	P2	11.16±0.67ab	17.7±0.9ab	53.8±0.4b
	P3	10.66±0.17b	17.1±0.3b	53.2±0.3b
	平均	11.31	17.8	54.5
F 值	钾肥(K)	3.8 [*]	5.0 ^{**}	106.5 ^{***}
	磷肥(P)	5.9 ^{**}	4.5 [*]	4.2 [*]
	K×P	5.8 ^{**}	3.5 ^{**}	11.1 ^{**}

注: 表中 P0、P1、P2、P3 分别表示 P₂O₅ 施用量为 0, 63.75, 127.50, 191.25 kg/hm²; K0、K1、K2、K3 分别表示 K₂O 施用量为 0, 102, 204, 306 kg/hm²; 数据为平均值±标准差; 不同小写字母表示在同一施钾量下不同磷处理间差异达 5% 显著水平; * 表示 P<0.05; ** 表示 P<0.01。下同。

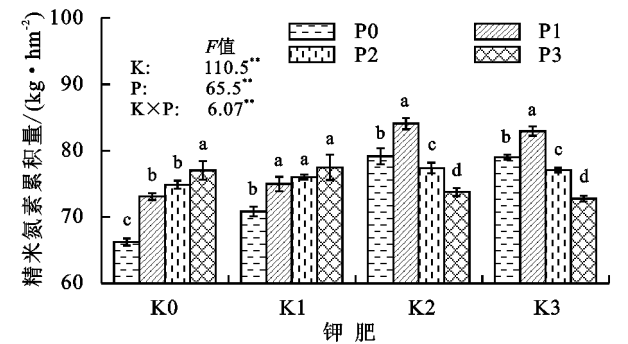


图 2 秸秆还田条件下晚粳稻精米氮素累积量对不同磷肥和钾肥用量的响应

2.3 稻米品质

2.3.1 加工品质 从表 2 可以看出, 加工品质在钾肥及磷肥间差异均达极显著水平, 而在二者互作上仅出糙率存在显著差异, 其中钾肥施用对稻米加工品质的影响大于磷肥。同一磷肥用量下增施钾肥稻米出糙率、精米率及整精米率均逐渐增加, 钾肥可提高晚粳稻加工品质; 在钾肥施用量为 K0 时增施磷肥可提高稻米加工品质, 若增施钾肥时较高磷肥用量会降低加工品质。因此, 适宜磷钾配施提高稻米出糙率、精米率及整精米率, 稻米加工品质变优。

2.3.2 外观品质 由表 2 可知, 外观品质在钾肥、磷肥及二者互作上均存在显著或极显著差异, 其中钾肥施用对稻米外观品质的影响大于磷肥。同一磷肥用量下增施钾肥稻米垩白粒率和垩白度均先增后降; 当钾肥用量为 K0、K1 时增施磷肥稻米垩白粒率和垩白度均逐渐增加, 若进一步提高钾肥施水平适当降低磷肥用量垩白粒率和垩白度增加。因此, 磷钾配施显著协同提高了稻米垩白粒率及垩白度, 稻米外观品质变劣。

2.3.3 蒸煮与食味品质 方差分析(表 2)表明, 胶稠度和直链淀粉含量在钾肥上存在极显著差异, 在磷肥上均无显著性差异, 而在磷钾肥互作上仅胶稠度存在极显著差异。同一磷肥用量下增施钾肥稻米胶稠度和直链淀粉含量均先增后降; 当钾肥用量为 K0、K1(K2、K3) 时增施磷肥稻米胶稠度和直链淀粉含量均先增后降(逐渐降低)。因此, 磷钾配施能够提高稻米胶稠度, 同时直链淀粉含量有所升高。

2.3.4 营养品质 从表 2 还可看出, 粗蛋白含量在钾肥和磷肥上均存在显著性差异, 而在二者互作上无显著性差异, 其中磷肥施用对稻米营养品质的影响大于钾肥。当钾(磷)肥用量 K0、K1(P0、P1) 时, 增施磷(钾)肥稻米粗蛋白含量增加; 而进一步提高钾(磷)肥用量水平时增施磷(钾)肥稻米粗蛋白含量先增后降, 降低磷(钾)肥提高稻米粗蛋白含量。因此, 磷钾配施提高稻米粗蛋白含量。

2.4 稻米淀粉黏滞性

方差分析(表 3)表明, 除峰值黏度、热浆黏度及冷胶黏度在钾肥用量上存在显著性差异外, 各 RVA 谱特征值在钾肥、磷肥及二者互作上均无显著性差异。峰值时间在钾肥及磷肥用量上均存在显著性差异, 糊化温度仅在钾肥用量上表现差异显著, 而在磷钾肥互作上峰值时间及糊化温度均表现差异不显著。

同一磷肥用量下, 增施钾肥峰值黏度、热浆黏度及冷胶黏度均先增后降; 当钾肥用量为 K0 时增施磷肥峰值黏度、热浆黏度及冷胶黏度均增加, 若进一步提高钾肥施水平适当降低磷肥用量可增加峰值黏度、热浆黏度及冷胶黏度。同一钾肥用量下, 增施磷

肥崩解值、消减值及回复值均降低;同一磷肥用量下,一磷(钾)肥用量下,增施钾(磷)肥峰值时间和糊化温度均先增后降。

增施钾肥崩解值降低,而消减值及回复值均增加。同度均先增后降。

表 2 秸秆还田条件下不同磷肥和钾肥用量对晚粳稻品质的影响

处理		出糙率/	精米率/	整精	垩白	垩白度/	胶稠度/	直链淀粉	粗蛋
		%	%	米率/%	粒率/%	%	mm	含量/%	白含量/%
K0	P0	79.4±0.3b	67.3±0.2b	55.9±0.5b	29.7±2.5c	7.5±0.3c	63.0±3.6a	14.7±0.4a	6.96±0.06b
	P1	80.5±0.6a	68.5±0.3a	57.3±0.3a	36.3±2.9b	8.0±1.1c	66.3±3.2a	14.9±0.1a	7.11±0.03a
	P2	81.1±0.6a	68.6±0.3a	57.6±0.8a	40.3±2.5a	10.0±0.6b	69.7±1.5a	15.0±0.1a	7.14±0.08a
	P3	81.3±0.3a	68.8±1.0a	57.9±0.7a	42.7±0.6a	12.3±0.2a	68.3±2.9a	14.6±0.2a	7.16±0.07a
	平均	80.6	68.3	57.2	37.3	9.5	66.8	14.8	7.09
K1	P0	81.2±0.5a	68.3±0.8a	57.2±0.9a	32.7±1.2b	9.8±0.8b	68.3±2.9b	15.4±0.3a	7.07±0.04b
	P1	81.4±0.9a	68.7±0.3a	57.8±0.3a	40.3±2.3a	10.2±1.1b	76.7±2.9a	15.7±0.2a	7.13±0.10ab
	P2	81.6±0.2a	69.0±0.4a	58.3±0.6a	41.0±1.0a	10.5±0.2b	73.0±1.7ab	15.6±0.3a	7.16±0.03ab
	P3	81.5±0.3a	68.9±1.2a	58.1±1.0a	43.7±2.5a	13.3±1.5a	72.3±2.1ab	15.5±0.3a	7.21±0.01a
	平均	81.4	68.7	57.8	39.4	11.0	72.6	15.5	7.14
K2	P0	81.6±0.6a	68.4±0.3a	57.7±0.8a	42.7±2.1ab	13.8±1.3b	74.0±4.0a	15.9±0.3a	7.14±0.06a
	P1	82.1±0.2a	69.1±1.0a	58.1±1.0a	43.3±2.5ab	14.4±0.8ab	68.3±3.5ab	15.5±0.4ab	7.16±0.07a
	P2	82.2±0.2a	69.2±0.4a	58.7±0.7a	46.0±2.6a	15.2±1.6a	68.0±3.5b	15.3±0.4ab	7.19±0.08a
	P3	81.7±0.2a	69.0±0.4a	58.3±0.9a	41.3±0.6b	12.5±1.1c	67.7±2.5b	15.1±0.3b	7.18±0.09a
	平均	81.9	68.9	58.2	43.3	14.0	69.5	15.4	7.17
K3	P0	82.2±0.2a	69.4±0.3a	58.5±0.1a	42.0±1.7a	13.0±0.8a	66.7±2.9a	15.4±0.2a	7.17±0.08a
	P1	82.2±0.6a	69.8±0.1a	59.7±0.9a	38.7±2.5ab	12.2±1.6a	64.7±4.5a	15.2±0.2ab	7.20±0.06a
	P2	82.2±0.3a	69.6±0.4a	59.6±1.0a	36.0±2.0b	11.5±0.5a	63.7±4.0a	15.1±0.3ab	7.18±0.07a
	P3	82.2±0.4a	69.5±0.1a	59.4±0.5a	35.7±2.5b	11.0±1.4a	63.0±2.6a	14.9±0.4b	7.11±0.08a
	平均	82.2	69.6	59.3	38.1	11.9	64.5	15.1	7.16
F 值	钾肥(K)	29.5**	10.1**	18.9**	18.0**	39.9**	14.9**	15.1**	2.9*
	磷肥(P)	5.1**	4.8**	7.7**	9.2**	3.8*	0.4	2.5	3.6*
	K×P	2.2*	0.6	0.6	10.8**	7.6**	3.1**	1.3	1.5

表 3 秸秆还田条件下不同磷肥和钾肥用量对晚粳稻 RVA 谱特征值的影响

处理		峰值	热浆	冷胶	崩解值	消减值	回复值	峰值	糊化
		黏度(cp)	黏度(cp)	黏度(cp)	(cp)	(cp)	(cp)	时间/min	温度/℃
K0	P0	3027.0b	1743.0c	3029.7a	1284.0a	2.7a	1286.7a	6.08c	75.63a
	P1	3060.3ab	1789.7bc	3059.0a	1270.7a	—1.3a	1269.3ab	6.13b	75.75a
	P2	3082.3ab	1829.7ab	3069.0a	1252.7a	—13.3a	1239.3b	6.20a	76.03a
	P3	3103.7a	1852.7a	3087.7a	1251.0a	—16.0a	1235.0b	6.11b	75.83a
	平均	3068.3	1803.8	3061.3	1264.6	—7.0	1257.6	6.13	75.81
K1	P0	3098.7a	1841.7a	3131.7a	1257.0a	33.0a	1290.0a	6.18a	76.07a
	P1	3130.7a	1889.7a	3161.7a	1241.0a	31.0a	1272.0ab	6.22a	76.17a
	P2	3111.7a	1874.3a	3117.3a	1237.3a	5.7a	1243.0b	6.25a	76.42a
	P3	3106.0a	1870.7a	3109.3a	1235.3a	3.3a	1238.7b	6.18a	76.02a
	平均	3111.8	1869.1	3130.0	1242.7	18.3	1260.9	6.21	76.17
K2	P0	3116.7a	1864.7a	3156.7a	1252.0a	40.0a	1292.0a	6.16b	75.75a
	P1	3081.3a	1843.3a	3120.7a	1238.0a	39.3a	1277.3a	6.20ab	75.98a
	P2	3060.7a	1826.3a	3097.7a	1234.3a	37.0a	1271.3a	6.31a	76.48a
	P3	3054.3a	1822.3a	3073.3a	1232.0a	19.0a	1251.0a	6.20ab	76.28a
	平均	3078.3	1839.2	3112.1	1239.1	33.8	1272.9	6.22	76.13
K3	P0	3073.3a	1838.3a	3150.0a	1235.0a	76.7a	1311.7a	6.09a	75.43a
	P1	3051.7a	1819.0a	3118.7ab	1232.7a	67.0a	1299.7a	6.18a	75.77a
	P2	3034.0a	1803.7a	3092.7ab	1230.3a	58.7a	1289.0a	6.15a	75.65a
	P3	3025.7a	1801.0a	3068.0b	1224.7a	42.3a	1267.0a	6.13a	75.63a
	平均	3046.2	1815.5	3107.3	1230.7	61.2	1291.8	6.14	75.62
F 值	钾肥(K)	7.8**	3.1*	3.6*	0.7	2.6	2.0	6.7**	4.2*
	磷肥(P)	0.2	0.2	1.0	0.3	0.4	1.3	6.4**	1.9
	K×P	2.1	1.0	0.9	0.1	0.1	0.1	0.6	0.3

注:表中标以不同小写字母的值在同一施钾量下不同磷处理间差异达 5%显著水平;* 表示 $P<0.05$,** 表示 $P<0.01$ 。处理同表 1。

3 讨论

3.1 磷钾配施对晚粳稻产量的影响

合理施肥策略可通过调控土壤养分有效性、优化农作物生长发育时矿物质营养状况,改善及保持土壤的生物学特性,从而有力保障农作物获得高产并保持较高的土壤肥力^[14]。适宜磷钾肥配比可提高农作物的光合性能并具有良好的源库关系,可有效促进光合产物及茎叶中储存的碳水化合物向籽粒转运,提高作物产量^[15-16]。王乐政等^[17]研究表明,随磷、钾肥施用量增加,红小豆干物质积累量及产量均先增后降,并且对产量的影响程度表现为 $K > P$; 胡雅杰等^[11] 研究认为,增施磷、钾肥粳稻产量均先增后减,但各处理之间产量差异不显著,其中产量对磷、钾肥施用量的响应表现为钾肥大于磷肥;董作珍等^[15] 研究认为,增施磷、钾单一养分,水稻产量均先增后降,施肥效果表现为钾肥 $>$ 磷肥。与前人研究结果存在一定差异,本研究表明,当钾肥或磷肥供应不足 (K_0 、 K_1 或 P_0 、 P_1) 时,增施另一种肥料晚粳稻产量逐渐增加(表现为协同促进作用);而当供应充足时,增施另一种肥料产量呈现先增后降的变化趋势(表现出一定的拮抗作用),其中磷肥施用对晚粳稻产量的贡献大于钾肥。此外,本研究还发现,磷钾配施对晚粳稻产量存在显著的互作效应,适宜磷钾用量能够协同提高晚粳稻产量;这主要是二者显著协同促进了干物质积累并具有较高的收获指数。上述与杜加银等^[16] 及王伟妮等^[18] 的研究结果较为一致。但李成亮等^[19] 却研究认为,钾肥对双季稻的增产作用不大,并且抗干扰能力较差、产量变幅波动较大;王峰等^[20] 研究发现,磷、钾肥间的交互作用较小,钾肥对磷肥无显著的促进作用,这可能与试验品种的磷钾需肥特性、土壤磷钾含量及设置磷钾水平范围等差异有关。

近年来,江西等南方双季稻区连续开展“粳改粳”高产、超高产示范攻关,并取得重大突破。2019 年 11 月江西省农业农村厅组织全国农技中心、中国水稻研究所等单位专家对江西省 3 个百亩示范方种植的粳粳杂交稻进行测产,经过现场机收实割称重,去杂及进行标准含水量换算,各示范点晚粳稻平均亩产均高于 800 kg,最高亩产达到 843.1 kg (12.65 t/hm^2)。本研究也表明,相比晚籼稻(产量水平 7.5 t/hm^2 左右),晚粳稻产量优势较为明显,平均产量为 11.28 t/hm^2 (变幅 $10.59 \sim 12.32 \text{ t/hm}^2$)。究其原因:一是取决于粳粳杂交稻的品种优势及其较完善的配套栽培技术^[21-22];二是该晚稻季充足的温光资源进一步挖掘了粳粳杂交稻的高产潜力(图 1)。

3.2 磷钾配施对晚粳稻精米氮素累积量的影响

农作物在吸收营养元素或矿物质时,往往存在较为明显的养分协同效应,即农作物对特定营养吸收时其他部分营养元素也会具有明显的增益现象^[23-24]。史桂清等^[25] 研究表明,在等氮处理条件下,增施磷、钾肥不仅提高了植株磷、钾含量和累积量,而且各时期植株含氮量和氮累积量均明显提高;徐富贤等^[26] 研究认为,施用钾肥主要通过增加水稻各时期的吸氮量及抽穗后的氮素转运率及转运总量,并维持土壤钾肥充足供应,从而提高水稻产量;彭建伟等^[27] 认为,磷具有促进水稻碳水化合物形成与转运及氮代谢等作用,从而影响水稻生长发育。本研究也表明,在同一施氮量下,磷、钾肥显著调控精米的氮素累积量,并且还认为,磷、钾肥施用不足或过量均不利于精米氮素吸收利用,适宜磷钾配施显著协同提高精米氮素累积量,并且磷钾肥二者还具有显著互作效应。这可能与适宜磷钾肥配施促进水稻对氮素吸收增加,诱使水稻根系对土壤中氮素吸收利用能力加强、籽粒(精米)氮素吸收累积量增加有关。由此推测,施用的磷、钾肥通过养分交互作用来改变土壤和植物对氮素的吸收利用状况,促使土壤及植物的功能发生变化,进而影响水稻产量及品质形成,是不同磷钾肥施用量调控水稻生长发育、产量及品质的一种有效途径,说明氮磷钾元素可通过直接作用及肥料因子间的交互作用显著影响作物的生长发育。此外,关于磷钾配施下晚粳稻成熟期氮磷钾养分吸收与利用规律目前尚未研究,有待于进一步明确。

3.3 磷钾配施对晚粳稻品质的影响

施用肥料可改善水稻养分吸收利用状况,促进植株对 C、N 的同化及调节水稻生长发育等作用,其中磷、钾肥不同施用量对稻米品质具有显著的调控作用^[28]。孙永健等^[29] 研究认为,磷钾肥配施对稻米品质存在显著调控作用,特别是对整精米率、垩白度、垩白粒率及胶稠度,并能改善稻米淀粉黏滞性;王强盛等^[9] 研究认为,适量增施钾肥可改善稻米品质,若增施不足将难以发挥品质潜力,而施用过量将增加稻米直链淀粉和蛋白质含量,稻米食味品质降低,建议在实际生产中因地制宜控制好钾肥施用量;王伟妮等^[18] 研究表明,适宜增施磷、钾肥均可提高稻米整精米率,降低垩白度、稻谷长宽比及精米直链淀粉含量;若磷、钾肥施用量过高或不足均会抑制稻米品质的改善;程旺大等^[30] 研究认为,磷钾合理配比可不同程度提高晚粳稻加工品质和外观品质,而对直链淀粉含量等影响不大,其中直播条件下晚粳稻 $N : P_2O_5 : K_2O$

的最佳配比为 1 : 0.1 ~ 0.2 : 0.9 可充分发挥肥效和改善稻米品质;胡雅杰等^[11]研究表明,秸秆还田下增施磷、钾肥稻米加工品质变优,而稳磷增钾则利于提高稻米蒸煮食味品质,降磷稳钾则稻米淀粉黏滞性变优。而本研究与上述研究报道存在一些异同,表明适宜磷钾配施能显著提高稻米加工品质、胶稠度,但同时降低了外观品质,直链淀粉及粗蛋白含量也有所增加,总体对 RVA 谱值无显著性差异;并且还发现,磷钾在稻米出糙率、垩白粒率、垩白度和胶稠度存在显著互作效应,即磷或钾养分元素对水稻品质作用的效果还受另一养分施用量的调节;适宜的磷钾配施时二者对上述品质表现出协同促进作用,而当二者施用不协调时则表现为拮抗作用。因此,良好的磷钾施用量配比,有利于晚粳稻品质的改善。

3.4 秸秆还田条件下晚粳稻适宜磷钾配比

通过施肥的方式可有效补充土壤自身养分供应不足,从而直接或者间接影响作物的产量和品质。何虎等^[31-32]对秸秆全量还田下晚粳稻研究表明,配施 N 180 kg/hm²、P₂O₅ 72 kg/hm²、K₂O 180 kg/hm² (氮磷钾肥用量比为 1 : 0.4 : 1) 在提高水稻产量的同时还能改善稻米品质,此施肥比例可推荐为南方双季晚粳稻草全量还田的施肥方案。本研究表明,在南方晚粳稻实际生产中应重视优化磷钾配施比例,秸秆全量还田条件下采用 N 255 kg/hm²、P₂O₅ 63.75 kg/hm²、K₂O 204 kg/hm² (氮磷钾肥用量比为 1 : 0.25 : 0.8) 的施肥方案可充分发挥磷钾的协同促进作用,可同步实现晚粳稻高产高效并兼顾优质生产。与晚粳稻相比,晚粳稻氮、钾肥施用量有所增加,而磷肥施用量变化不大,这可能由于水稻对氮、钾肥反应较为敏感,通过合理增氮补钾控磷是晚粳稻实现增产与优质的关键。

南方双季稻区稻草资源非常丰富,秸秆中富含氮、磷、钾等矿质营养元素,秸秆还田具有提高土壤有机碳、改良土壤及培肥地力等作用,而秸秆腐解受还田方式、土壤温湿度、土壤微生物、C/N 及土壤养分等多因素共同调控^[33]。于寒等^[34]研究表明,秸秆腐解速率前期腐解较快,后期腐解速率逐渐缓慢;据戴志刚等^[35]研究报道,经过 124 天水稻秸秆累积腐解率达 49.2%,其中氮、磷养分释放率分别为 42.1% 及 68.3%,而钾素释放率在还田 12 天后即高达 98%,因此,建议在水稻种植中可适当降低钾肥的基肥施用比例。此外,秸秆中养分释放特征还可能与氮磷钾肥的供应存在一定关系,今后有待进一步研究。Huang 等^[36]研究认为,作物秸秆还田显著提高水稻产量,并在秸秆还田下分别平均减少无机氮、磷和钾肥 29.4%、8.3% 和

21.9% 的用量时,对水稻产量没有不利影响;曾研华等^[37]研究表明,稻草还田可替代双季晚粳稻化肥氮肥 (N) 26.7%、磷肥 (P₂O₅) 10.3% 和钾肥 (K₂O) 64.1%,可作为南方双季稻区土壤养分高效管理的有效途径之一。因此,秸秆还田可额外提供较多的氮、钾等养分,含磷量稍低。综上可知,晚粳稻生产配合秸秆还田的管理技术可充分实现水稻节肥高效优质生产。若在秸秆不还田条件下,可能需要施用更多的化肥来补充土壤中养分的不足,特别是氮钾肥。王秀斌等^[38]研究表明,秸秆不还田条件下机插晚粳稻氮磷钾用量分别为 195, 60, 165 kg/hm² 时有利于水稻高产、优质及肥料高效。而对于秸秆不还田下晚粳稻氮磷钾施用量如何,还有待于进一步研究。

4 结论

(1) 适宜磷钾配施能够协同提高晚粳稻产量,主要是二者协同促进了干物质积累并具有较高的收获指数。同时,磷钾配施也显著协同提高了精米氮素累积量。

(2) 适宜磷钾配施还能提高稻米加工品质及胶稠度,但外观品质降低,直链淀粉及粗蛋白含量增加;而磷钾配施总体对 RVA 谱值无显著性差异。

因此,在南方双季稻区,秸秆还田条件下适宜磷钾配施能够协同实现晚粳稻增产、增加精米氮素累积量并同步兼顾优质,其中磷钾配施量以 P1K2 (即氮磷钾配施比例为 1 : 0.25 : 0.8) 为宜。但是秸秆不还田条件下磷钾配施对晚粳稻生产的协同促进效应,以及其适宜的磷钾配施比例均需进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈丽虹, 燕金香, 褚光, 等. 长江中下游稻区双季晚粳稻产量生理与资源利用效率研究进展[J]. 中国稻米, 2017, 23(5): 1-4.
- [2] Lou Y G, Zhang G R, Zhang W Q, et al. Biological control of rice insect pests in China[J]. Biological Control, 2013, 67(1): 8-20.
- [3] 廖萍, 刘磊, 何宇轩, 等. 施石灰和秸秆还田对双季稻产量和氮素吸收的互作效应[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 84-92.
- [4] 陈波, 李军, 花劲, 等. 双季晚稻不同类型品种产量与主要品质性状的差异[J]. 作物学报, 2017, 43(8): 1216-1225.
- [5] 胡蕾, 朱盈, 徐栋, 等. 南方稻区优良食味与高产协同的单季晚粳稻品种特点研究[J]. 中国农业科学, 2019, 52(2): 215-227.
- [6] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(3):

- 341-349.
- [7] 成臣,曾勇军,王祺,等.施氮量对晚粳稻甬优 1538 产量、品质及氮素吸收利用的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):222-228.
- [8] 成臣,曾勇军,王祺,等.氮肥运筹对南方双季晚粳稻产量及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1386-1395.
- [9] 王强盛,甄若宏,丁艳锋,等.钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J].中国农业科学,2004,37(10):1444-1450.
- [10] 侯云鹏,孔丽丽,李前,等.不同施磷水平下水稻产量、养分吸收及土壤磷素平衡研究[J].东北农业科学,2016,41(6):61-66.
- [11] 胡雅杰,钱海军,吴培,等.秸秆还田条件下氮磷钾用量对软米粳稻产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(3):817-824.
- [12] 成臣,杨秀霞,汪建军,等.秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(1):186-195.
- [13] 贾良,丁雪云,王平荣,等.稻米淀粉 RVA 谱特征及其与理化品质性状相关性的研究[J].作物学报,2008,34(5):790-794.
- [14] Zhang J, Hu K L, Li K J, et al. Simulating the effects of long-term discontinuous and continuous fertilization with straw return on crop yields and soil organic carbon dynamics using the DNDC model[J].Soil and Tillage Research,2017,165:302-314.
- [15] 董作珍,吴良欢,柴婕,等.不同氮磷钾处理对中浙优 1 号水稻产量、品质、养分吸收利用及经济效益的影响[J].中国水稻科学,2015,29(4):399-407.
- [16] 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.
- [17] 王乐政,华方静,曹鹏鹏,等.氮磷钾配施对红小豆干物质积累、产量和效益的影响[J].核农学报,2019,33(10):2058-2067.
- [18] 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.
- [19] 李成亮,何园球,王艳玲,等.氮磷钾肥对红壤区水稻增产效应的影响[J].中国水稻科学,2007,21(2):179-184.
- [20] 王峰,王顺霞,王占军,等.不同施肥水平与组合对玉米生产性能的影响研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(4):167-171.
- [21] 陈波,周年兵,郭保卫,等.江西双季晚稻不同纬度产量、生育期及温光资源利用的差异[J].中国农业科学,2017,50(8):1403-1415.
- [22] 徐栋,朱盈,周磊,等.不同类型粳粳杂交稻产量和品质性状差异及其与灌浆结实期气候因素间的相关性[J].作物学报,2018,44(10):1548-1559.
- [23] 黄安,杨联安,杜挺,等.基于主成分分析的土壤养分综合评价[J].干旱区研究,2014,31(5):819-825.
- [24] Dash A K, Singh H K, Mahakud T, et al. Interaction effect of nitrogen, phosphorus, potassium with sulphur, boron and zinc on yield and nutrient uptake by rice under rice-rice cropping system in inceptisol of coastal Odisha[J]. International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science,2015,5(1):14-21.
- [25] 史桂清,石书亚,赵颖佳,等.氮磷钾施用方式对夏玉米植株、产量和土壤养分的影响[J].中国农学通报,2019,35(13):23-30.
- [26] 徐富贤,熊洪,张林,等.杂交中稻在不同地域和施氮水平下氮、磷、钾稻谷生产效率的差异性研究[J].作物研究,2017,31(3):211-217.
- [27] 彭建伟,刘强,荣湘民,等.氮磷钾配比及氮用量对水稻光合特性及产量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2004,30(2):123-127.
- [28] 田发祥,坚朱,谢运河,等.湖南双季稻氮磷钾配方优化及追肥运筹增产效果分析[J].中国农学通报,2014,30(36):16-21.
- [29] 孙永健,杨志远,孙园园,等.成都平原两熟区水氮管理模式与磷钾肥配施对杂交稻冈优 725 产量及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):17-28.
- [30] 程旺大,程方民,吴伟,等.合理配施氮磷钾对直播晚粳稻产量与品质的效应[J].江西农业大学学报,2000,22(2):174-177.
- [31] 何虎,吴建富,曾研华,等.稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量及其氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):811-820.
- [32] 何虎,黄山,才硕,等.稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量和稻米品质的影响[J].江西农业大学学报,2015,37(3):385-391.
- [33] 张经廷,张丽华,吕丽华,等.还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述[J].核农学报,2018,32(11):2274-2280.
- [34] 于寒,谷岩,梁烜赫,等.玉米秸秆腐解规律及土壤微生物功能多样性研究[J].水土保持学报,2015,29(2):305-309.
- [35] 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,等.不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J].农业工程学报,2010,26(6):272-276.
- [36] Huang S, Zeng Y J, Wu J F, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis[J].Field Crops Research,2013,154:188-194.
- [37] 曾研华,吴建富,曾勇军,等.机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响[J].作物学报,2018,44(3):454-462.
- [38] 王秀斌,徐新朋,孙静文,等.氮肥运筹对机插双季稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1167-1176.