

磷肥运筹对机插双季稻产量构成与养分吸收利用的影响

肖敏 郭浪 崔璨 程周琦 刘玉午 卓乐 吴思 易镇邪

(湖南农业大学农学院, 410128, 湖南长沙)

摘要 为探究磷肥运筹对双季稻产量与氮、磷、钾素吸收利用的影响,以湘早籼 45 号(早稻)和泰优 553(晚稻)为材料,在 3 个施磷(P_2O_5)水平(P_{45} : 45 kg/hm²; P_{75} : 75 kg/hm²; P_{105} : 105 kg/hm²)与 2 个施用时期(全基肥, S1; 基肥:穗肥=2:1, S2)下开展机插试验。结果表明,施磷量增大可提高水稻干物质积累量,并且对产量及其构成因素影响显著,但施用时期无显著影响。施磷量与施用时期对产量具有一定的互作效应,早、晚稻产量均以 P_{75} 处理显著较高,早稻以 $P_{75}S1$ 处理最高,而晚稻以 $P_{75}S2$ 处理最高。随施磷量增大,早、晚稻磷素吸收效率与磷肥利用率显著降低,氮、钾素吸收量与吸收效率显著增大,但氮、钾素利用效率显著降低,而氮、钾肥偏生产力表现先增大后减小趋势,以 P_{75} 处理最高。早稻氮、磷、钾吸收与利用效率一般以 S1 处理较大,而晚稻表现相反。可见合理施用磷肥可显著提高水稻产量和养分吸收利用效率,以施磷 75 kg/hm² 表现最好,由于早季磷肥施用会明显增加晚季土壤有效磷含量,早稻以一次性基肥为宜,而晚稻以基肥:穗肥=2:1 为宜。

关键词 双季稻; 磷肥运筹; 产量构成; 养分吸收利用

磷是水稻生长发育所必需的三大营养元素之一,水稻吸收利用的磷主要来源于土壤有效磷和磷肥的施用^[1]。磷元素在土壤中多以难以利用的形式存在^[2],目前我国部分稻田土壤处于中度缺磷和严重缺磷状态^[3]。土壤缺磷已经成为限制水稻增产的瓶颈,增施磷肥可以在物理、化学等方面改善土壤性质,促进水稻生长发育,保证高产^[4-5]。我国农业生产中磷肥当季利用效率不高,一般只有 5%~20%,土壤中的磷素大量积累并通过地表及灌溉而流失,造成面源污染^[6]。同时,生产磷肥的磷矿石是不可再生资源^[7-8],且我国的耕地面积不断减少,而粮食需求在不断增长,稳定并增加双季稻的种植面积、提高单产是提高粮食总产的重要途径^[9]。因此,掌控合理磷肥用量对提高水稻磷肥吸收与利用以及降低环境风险至关重要^[10-11]。有研究认为,将部分磷肥作追肥施用可以最大限度地提高磷肥的利用效率^[12-13],达到增产目的^[13]。王丽萍等^[14]认为,不同水稻品种适宜的磷肥运筹方式不同。整体来看,有关磷肥施用时期对水稻养分吸收利用的研究较少。湖南省水稻种植面积曾常年居全国首位,湘南地区(主要包括衡阳、郴州)是湖南省最重要的双季稻产区^[15-16],是湖南省双季稻种植面积的

“压舱石”,但该地区水稻生产多凭经验,已有的水稻磷肥研究也多限于一季水稻,从周年(双季稻)角度开展的磷肥合理施用研究鲜见报道。为此,本研究以衡阳地区主栽水稻品种湘早籼 45 号(早稻)和泰优 553(晚稻)为供试材料,设置 3 个磷肥用量和 2 个施用时期处理,在湖南省衡阳县西渡镇开展 2 年大田试验,研究磷肥运筹对机插水稻产量构成因素与养分吸收利用的影响,旨在为湘南双季稻肥料高效施用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤取自湖南省衡阳县西渡镇梅花村(111°47' E, 28°9' N)。早稻品种为常规稻湘早籼 45 号,全生育期 110 d 左右;晚稻品种为杂交稻泰优 553,全生育期 120 d 左右。采集耕层 0~20 cm 土层,基础理化性质见表 1。根据全国第 2 次土壤普查养分分级标准^[17],2021 年试验地含磷水平属中下水平,含氮水平属中等水平,含钾水平属中下水平,2022 年试验地氮、磷、钾含量均为偏低水平。

1.2 试验设计

于 2021 年 3 月 20 日-2022 年 10 月 30 日在湖

作者简介:肖敏,主要从事作物高产高效栽培理论与技术研究, E-mail: 1784553482@qq.com

易镇邪为通信作者,主要从事作物高产生理与资源高效利用研究, E-mail: yizhenxie@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1401105, 2018YFD0301005)

收稿日期:2023-01-30; 修回日期:2023-03-20; 网络出版日期:2023-04-04

表 1 供试土壤基础肥力
Table 1 Basic fertility of soil tested

年份 Year	季别 Season	全氮 Total nitrogen (g/kg)	全磷 Total phosphorus (g/kg)	全钾 Total potassium (g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen (mg/kg)	有效磷 Available phosphorus (mg/kg)	速效钾 Available potassium (mg/kg)	pH
2021	早稻	1.14	0.54	12.66	219.80	13.47	240.00	7.15
	晚稻	1.28	0.60	12.34	189.00	18.91	260.00	7.17
2022	早稻	0.79	0.37	11.98	141.58	7.79	170.00	7.19
	晚稻	0.81	0.39	12.01	161.00	8.02	180.00	7.21

南省衡阳县西渡镇梅花村富农合作社开展早、晚稻大田定位试验,生理生化试验在湖南农业大学作物生理与分子生物学教育部重点实验室进行。本试验为磷肥用量和施用时期双因素试验,磷肥用量设 45 (P45)、75 (P75) 和 105 kg/hm² (P105) 3 个水平,另设不施磷肥 (P0) 处理以计算磷肥利用率,施用时期设全基肥 (S1) 和基肥:穗肥=2:1 (S2) 2 个水平,共计 7 个处理 (表 2),随机区组设计,3 次重复,小区面积为 5 m×10 m,小区间设田埂 (宽 25 cm,高 30 cm) 隔开以防水肥串流,机插密度为 13.33 cm×23.33 cm。各处理氮 (N)、钾 (K₂O) 施用量一致,均为 150 kg/hm²,均以基肥:穗肥=2:1 的方式施入。氮肥为尿素,钾肥为氯化钾,磷肥为过磷酸钙。

表 2 试验处理及代号

Table 2 Test treatments and codes		kg/hm ²		
处理序号 Treatment number	处理 Treatment	磷肥施用量 Amount of phosphate fertilizer	分时期施用量 Application dosage in different periods	
			基肥 Base fertilizer	穗肥 Ear fertilizer
1	P0	0	0	0
2	P45S1	45	45	0
3	P45S2	45	30	15
4	P75S1	75	75	0
5	P75S2	75	50	25
6	P105S1	105	105	0
7	P105S2	105	70	35

2021 年早稻于 3 月 21 日播种,4 月 17 日施基肥,4 月 22 日移栽,5 月 28 日达分蘖盛期,6 月 10 日施追肥,6 月 25 日达齐穗期,7 月 16 日成熟收割,全生育期 117 d; 2022 年早稻于 3 月 19 日播种,4 月 13 日施基肥,4 月 18 日移栽,5 月 23 日达分蘖盛期,6 月 5 日施追肥,6 月 22 日达齐穗期,7 月 16 日成熟收割,全生育期 118 d。

2021 年晚稻于 6 月 26 日播种,7 月 20 日施基肥,7 月 25 日移栽,8 月 25 日达分蘖盛期,9 月 8

日施追肥,9 月 21 日达齐穗期,10 月 24 日成熟收割,全生育期 120 d; 2022 年晚稻于 6 月 26 日播种,7 月 18 日施基肥,7 月 23 日移栽,8 月 20 日达分蘖盛期,9 月 11 日施追肥,9 月 26 日达齐穗期,10 月 26 日成熟收割,全生育期 122 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及其构成因素 于水稻成熟期调查有效穗数 (80 穴/小区),根据单穴平均有效穗数每小区取样 5 穴,考察穗粒数、千粒重和结实率,计算理论产量;每小区割 80 穴测实际产量,最终产量按 13.5%含水量计算。

1.3.2 干物质积累量 在水稻分蘖盛期、齐穗期、成熟期每小区根据单穴平均茎蘖数 (穗数) 取样株 3 株,分茎、叶、穗等装袋,105 °C 下杀青 30 min,80 °C 下烘至恒重后称重。

1.3.3 养分积累量 将成熟期烘干样品粉碎过 100 目筛,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法消解后测定各器官的氮、磷、钾含量;根据成熟期各器官干物重和氮、磷、钾素含量计算各器官养分吸收量,再计算养分吸收效率与利用效率。

氮 (磷、钾) 素吸收量 (kg/hm²) = 植株干重 × 氮 (磷、钾) 含量;

氮 (磷、钾) 素吸收效率 (kg/kg) = 氮 (磷、钾) 素吸收量 / 施氮 (磷、钾) 量;

氮 (磷、钾) 素利用效率 (kg/kg) = 籽粒产量 / 氮 (磷、钾) 素总吸收量;

氮 (磷、钾) 肥偏生产力 (kg/kg) = 产量 / 施氮 (磷、钾) 量;

磷肥利用率 (%) = [(施磷区地上部总吸磷量 - 不施磷区地上部总吸磷量) / 施磷量] × 100。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 整理试验数据,采用 SPSS 22.0 软件进行单变量方差分析,采用最小显著差异法 (least significant difference method, LSD) 进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 磷肥运筹对双季稻干物质积累的影响

由表 3 和表 4 可知，早稻各时期干物质积累量随施磷量的增加而增大；晚稻在齐穗期至成熟期也表现出干物质积累量随施磷量的增加而增大的趋势，但处理间差异显著性略有不同。从施用时期来看，早稻 2021 与 2022 年分蘖盛期与成熟期干物质积累量均以 S1 处理较高，且 2022 年 3 个时期均表

现显著差异；晚稻各时期干物质积累量均以 S2 处理较高，并在 2022 年分蘖盛期差异显著。从施磷量与施用时期的互作效应来看，早稻各时期均以 P105S1 处理干物质积累量最大，P75S1 次之，P45S2 和 P45S1 处理较低；晚稻各时期以 P105S2 和 P75S2 处理干物质积累量较大，两者之间无显著差异，同样以 P45S2 和 P45S1 处理较低。可见，施磷量增大可提高水稻干物质积累量，施用时期对水稻影响存在季节差异。两者具有一定互作效应，且早稻和晚

表 3 2021 年各磷肥处理双季稻干物质积累量
Table 3 Dry matter accumulation of double-cropping rice under different phosphate fertilizer treatments in 2021 t/hm²

处理 Treatment	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
	分蘖盛期 Peak tillering stage	齐穗期 Full head stage	成熟期 Maturity stage	分蘖盛期 Peak tillering stage	齐穗期 Full head stage	成熟期 Maturity stage
P45S1	1.46b	7.43c	9.62c	1.78c	7.93c	13.86c
P45S2	1.43b	7.22c	9.90c	1.71c	7.86c	14.03c
P75S1	1.59a	8.78a	11.70a	1.94b	8.86b	14.29bc
P75S2	1.54a	8.21b	10.95b	1.91b	9.63a	14.81ab
P105S1	1.60a	8.85a	11.80a	1.94b	9.68a	14.22c
P105S2	1.53ab	8.64a	11.52a	2.23a	9.92a	14.96a
P0	1.40b	6.71c	8.95c	1.65d	7.43d	12.30b
P45	1.45b	7.33b	9.76b	1.75c	7.90c	13.95a
P75	1.57a	8.50a	11.33a	1.93b	9.25b	14.55a
P105	1.57a	8.75a	11.66a	2.09a	9.80a	14.59a
S1	1.55a	8.02a	11.04a	1.89a	8.82a	14.12a
S2	1.50a	8.35a	10.79a	1.95a	9.14a	14.60a

P45 代表 P45S1 和 P45S2 的平均值，P75 代表 P75S1 和 P75S2 的平均值，P105 代表 P105S1 和 P105S2 的平均值，S1 代表 P45S1、P75S1 和 P105S1 的平均值，S2 代表 P45S2、P75S2 和 P105S2 的平均值。不同小写字母表示同列数据差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。
P45 indicates the average of P45S1 and P45S2, P75 indicates the average of P75S1 and P75S2, P105 indicates the average of P105S1 and P105S2, S1 indicates the average of P45S1, P75S1 and P105S1, S2 indicates the average of P45S2, P75S2 and P105S2. Different lowercase letters indicate significant difference in data in the same column ($P < 0.05$). The same below.

表 4 2022 年各磷肥处理双季稻干物质积累量
Table 4 Dry matter accumulation of double-cropping rice under different phosphorus fertilizer treatments in 2022 t/hm²

处理 Treatment	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
	分蘖盛期 Peak tillering stage	齐穗期 Full head stage	成熟期 Maturity stage	分蘖盛期 Peak tillering stage	齐穗期 Full head stage	成熟期 Maturity stage
P45S1	1.14c	7.80b	10.53b	1.58e	9.03c	14.26b
P45S2	1.16bc	7.20c	9.14c	1.69d	8.73c	14.50b
P75S1	1.19bc	8.05ab	11.74a	2.14b	9.30b	14.86ab
P75S2	1.15c	7.26c	10.85b	2.38a	9.94a	15.26a
P105S1	1.43a	8.30a	11.79a	1.90c	9.63ab	14.54ab
P105S2	1.22b	7.91ab	10.96b	2.06b	9.91a	14.94a
P0	0.85c	6.41c	8.63c	1.4d	7.91c	12.93b
P45	1.15b	7.50b	9.84b	1.64c	8.88b	14.38a
P75	1.17b	7.66b	11.30a	2.26a	9.62a	15.06a
P105	1.33a	8.11a	11.38a	1.98b	9.77a	14.74a
S1	1.25a	8.05a	11.35a	1.87b	9.32a	14.55a
S2	1.18b	7.46b	10.32b	2.04a	9.53a	14.90a

稻表现有差异。

2.2 磷肥运筹对双季稻产量及其构成因素的影响

由表 5 和表 6 可见，施磷量对早稻产量及除千粒重外的各产量构成因素影响显著，产量以 P75 处理最高，显著高于其他处理；有效穗数以 P75 和 P45 处理较高，穗粒数以 P105 处理最高；施磷处理中 P75 结实率处于较高水平。施用时期对产量与

其构成因素影响不显著，S1 处理有效穗数、结实率和产量均略高于 S2 处理。就互作处理来看，实际产量以 P75S1 处理最高，显著高于其他处理；有效穗数和结实率亦以 P75S1 处理最高；穗粒数以 P105S2 最高；各互作处理间千粒重无显著差异。可见，施磷对早稻具有显著增产作用，以 P75 效果最好，施用时期虽无显著影响，但总体上早稻 S1

表 5 2021 年各磷肥处理早稻产量及其构成因素
Table 5 Yield and its components of early rice under different phosphate fertilizer treatments in 2021

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	穗粒数 Number of grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (t/hm^2)	实际产量 Actual yield (t/hm^2)
P45S1	4.55ab	87.91c	77.73a	26.71a	8.30bc	7.83bc
P45S2	4.34bc	91.26bc	76.91a	26.67a	8.12c	7.76c
P75S1	4.59a	93.47ab	78.76a	26.41a	8.92a	8.73a
P75S2	4.49ab	95.36ab	76.43a	26.20a	8.57ab	8.13b
P105S1	4.35bc	94.87ab	77.82a	26.08a	8.38bc	7.99bc
P105S2	4.24c	97.53a	76.86a	26.10a	8.30bc	7.89bc
P0	3.94c	85.69b	81.55a	26.51a	7.30c	6.98c
P45	4.45a	89.59b	77.32b	26.69a	8.23b	7.80b
P75	4.54a	94.42a	77.60b	26.31a	8.75a	8.43a
P105	4.30b	96.20a	77.34b	26.09a	8.35b	7.94b
S1	4.50a	92.08a	78.10a	26.40a	8.54a	8.18a
S2	4.36a	94.72a	76.73a	26.32a	8.34a	7.93a

表 6 2022 年各磷肥处理早稻产量及其构成因素
Table 6 Yield and its components of early rice under different phosphorus fertilizer treatments in 2022

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	穗粒数 Number of grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (t/hm^2)	实际产量 Actual yield (t/hm^2)
P45S1	4.75bc	79.86b	74.02bc	26.16a	7.35cd	7.09bc
P45S2	4.94ab	78.53b	70.97c	26.17a	7.20d	6.99c
P75S1	5.05a	79.34b	78.29a	26.03a	8.16a	7.98a
P75S2	4.86abc	78.95b	76.78ab	26.27a	7.74bc	7.27bc
P105S1	4.75bc	84.41a	76.32ab	26.22a	8.03ab	7.41b
P105S2	4.68c	86.10a	73.82bc	26.09a	7.75bc	7.28bc
P0	4.35c	78.79b	77.28a	25.91a	6.86c	6.47c
P45	4.85a	79.20b	72.50b	26.17a	7.28b	7.04b
P75	4.96a	79.15b	77.54a	26.15a	7.95a	7.63a
P105	4.56b	84.51a	75.08ab	26.16a	7.56b	7.35b
S1	4.85a	81.20a	76.21a	26.14a	7.85a	7.49a
S2	4.83a	81.19a	73.85a	26.18a	7.58a	7.18a

处理表现好于 S2。

由表 7 和表 8 可见，施磷量对晚稻产量及除千粒重外的各产量构成因素影响显著，2 年产量以 P75 处理最高，显著高于 P45 与 P0 处理；有效穗数在施磷处理间无显著差异，但均显著高于 P0 处理，穗粒数在 P105 处理处于较高水平，结实率在施磷处理间以 P75 处理为最大。施用时期对产量及

其构成因素影响不显著，S2 处理穗粒数、千粒重和产量均略高于 S1 处理。就互作处理来看，产量以 P75S2 处理最高，其次为 P105S2 和 P75S1 处理，P45S1 处理最低；有效穗数以 P45S1 和 P45S2 处理较高；穗粒数以 P105S1 和 P105S2 处理较高，P45S2 处理最低；结实率以 P75S1 和 P75S2 处理较高；千粒重无显著差异。可见，施磷对晚稻具有显

表 7 2021 年各磷肥处理晚稻产量及其构成因素
Table 7 Yield and its components of late rice under different phosphate fertilizer treatments in 2021

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	穗粒数 Number of grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (t/hm^2)	实际产量 Actual yield (t/hm^2)
P45S1	4.64a	138.18b	64.52bc	23.99a	9.92c	9.67c
P45S2	4.57a	137.46b	66.99ab	24.20a	10.18bc	9.96bc
P75S1	4.54a	137.70b	68.00a	24.24a	10.30b	10.08b
P75S2	4.59a	141.90ab	67.50a	24.32a	10.70a	10.51a
P105S1	4.53a	146.92a	63.52c	23.88a	10.10bc	9.92bc
P105S2	4.54a	145.82a	64.62bc	23.76a	10.16bc	9.98bc
P0	4.27b	133.11c	68.24a	24.40a	9.46c	9.22c
P45	4.61a	137.82bc	65.76ab	24.10a	10.05b	9.82b
P75	4.57a	139.80b	67.75a	24.28a	10.50a	10.30a
P105	4.54a	146.37a	64.07b	23.82a	10.13b	9.95b
S1	4.57a	140.93a	65.35a	24.04a	10.11a	9.89a
S2	4.57a	141.73a	66.37a	24.09a	10.35a	10.15a

表 8 2022 年各磷肥处理晚稻产量及其构成因素
Table 8 Yield and its components of late rice under different phosphorus fertilizer treatments in 2022

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^6/\text{hm}^2$)	穗粒数 Number of grains per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (t/hm^2)	实际产量 Actual yield (t/hm^2)
P45S1	4.76ab	163.57a	54.32b	23.62a	9.99c	9.52c
P45S2	4.95a	157.65b	55.64ab	23.70a	10.29bc	9.67c
P75S1	4.75ab	160.14ab	57.00ab	23.98a	10.40ab	10.01bc
P75S2	4.70b	165.33a	57.93a	23.87a	10.74a	10.54a
P105S1	4.81ab	161.62ab	54.29b	23.83a	10.06bc	9.97bc
P105S2	4.69b	163.82a	57.73a	23.72a	10.52ab	10.18ab
P0	4.43b	156.06a	57.69a	23.94a	9.54c	9.24c
P45	4.86a	160.61a	54.98a	23.66a	10.14b	9.60b
P75	4.73a	162.74a	57.47a	23.93a	10.57a	10.28a
P105	4.75a	162.72a	56.01a	23.78a	10.29ab	10.08ab
S1	4.77a	161.78a	55.20a	23.81a	10.15a	9.83a
S2	4.78a	162.27a	57.10a	23.76a	10.52a	10.13a

著增产作用，以 P75 处理效果最好，施用时期无显著影响，其中 S2 处理表现较好。

综合早、晚稻结果，施磷对双季稻具有显著增产作用，施磷量对产量及其构成因素影响显著，而施用时期无显著影响，且施磷量与施用时期具有一定的互作效应；产量以 P75 处理最高，但早稻和晚稻间存在差异，早稻以 P75S1 处理最高，而晚稻以 P75S2 处理最高。

2.3 磷肥运筹对双季稻氮、磷、钾素吸收效率的影响

由表 9 和表 10 可知，早、晚稻氮素吸收总量与氮素吸收效率在施磷量处理间规律基本一致，均表现为 P105>P75>P45>P0，其中早稻各处理间均有显著差异，晚稻略有差异，其 P105 与 P75 处理间差异不显著；施用时期处理间，早稻表现

出 S1 显著大于 S2 处理趋势，而晚稻 S1 略小于 S2 处理；施磷量和施用时期的互作处理间，早稻以 P105S1 处理最大，与 P75S1 处理无显著差异，但显著大于 P45S1 和 P45S2 处理，晚稻 P1052 处理最大，与 P105S1、P75S2 处理无显著差异，但显著大于 P45S1 和 P45S2 处理。

早、晚稻磷素吸收总量均随施磷量增大而显著提高，施用时期处理间早稻 S1 略大于 S2 处理，而晚稻在 2021 年 S2 显著大于 S1 处理；施磷量和施用时期的互作处理间，早稻以 P105S2 和 P105S1 处理较大，显著大于 P45S1、P45S2 处理，晚稻以 P105S2 处理最大，P105S1 处理次之，显著高于除 P105S1 以外的其他处理。磷素吸收效率，早、晚稻均随施磷量增大而显著下降，早稻表现为 S1>S2 处理，且在 2022 年表现显著，而晚稻为 S2>S1

表 9 2021 年各磷肥处理双季稻氮、磷、钾素积累量与吸收效率
Table 9 Accumulation and absorption efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium
in double-cropping rice under different phosphorus fertilizer treatments in 2021

季别 Season	处理 Treatment	氮素吸收总量 Total nitrogen absorption (kg/hm ²)	氮素吸收效率 Nitrogen absorption efficiency (kg/kg)	磷素吸收总量 Total phosphorus absorption (kg/hm ²)	磷素吸收效率 Phosphorus absorption efficiency (kg/kg)	钾素吸收总量 Total potassium absorption (kg/hm ²)	钾素吸收效率 Potassium absorption efficiency (kg/kg)
早稻 Early rice	P45S1	65.92b	0.44b	14.72c	0.33a	76.96c	0.51c
	P45S2	61.38c	0.41b	15.84b	0.35a	70.34c	0.47d
	P75S1	77.06a	0.51a	19.86a	0.26b	85.99a	0.55b
	P75S2	66.19b	0.44b	16.86b	0.22bc	81.85b	0.55b
	P105S1	78.92a	0.53a	20.06a	0.19c	87.24a	0.58a
	P105S2	76.19a	0.51a	19.49a	0.19c	85.62ab	0.57ab
	P0	56.90d	0.38d	9.26d	—	73.19c	0.49b
	$\overline{P45}$	63.65c	0.42c	15.28c	0.34a	73.65c	0.49b
	$\overline{P75}$	71.63b	0.48b	18.36b	0.24b	83.92b	0.56a
	$\overline{P105}$	77.56a	0.52a	19.78a	0.19c	86.43a	0.58a
	$\overline{S1}$	73.97a	0.49a	18.21a	0.26a	83.40a	0.56a
	$\overline{S2}$	67.92b	0.45b	17.40a	0.25a	79.27b	0.53b
晚稻 Late rice	P45S1	120.14c	0.80b	27.39cd	0.61a	89.34c	0.60b
	P45S2	121.25c	0.81b	28.49c	0.63a	90.66c	0.60b
	P75S1	135.24b	0.90a	27.08d	0.36c	85.15d	0.57c
	P75S2	136.34ab	0.91a	32.76b	0.44b	97.65b	0.65a
	P105S1	138.40ab	0.92a	33.42b	0.32e	98.20b	0.65a
	P105S2	139.80a	0.93a	35.33a	0.34d	102.17a	0.68a
	P0	109.75c	0.73c	21.43d	—	78.30c	0.52c
	$\overline{P45}$	120.70b	0.80b	27.94c	0.62a	90.00b	0.60b
	$\overline{P75}$	135.79a	0.91a	29.92b	0.40b	91.40b	0.61b
	$\overline{P105}$	139.10a	0.93a	34.38a	0.33c	100.19a	0.67a
	$\overline{S1}$	131.26a	0.88a	29.30b	0.43b	90.90b	0.61b
	$\overline{S2}$	132.46a	0.89a	32.19a	0.47a	96.83a	0.65a

表 10 2022 年各磷肥处理双季稻氮、磷、钾素积累量与吸收效率
Table 10 Accumulation and absorption efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium
in double-cropping rice under different phosphorus fertilizer treatments in 2022

季别 Season	处理 Treatment	氮素吸收总量 Total nitrogen absorption (kg/hm ²)	氮素吸收效率 Nitrogen absorption efficiency (kg/kg)	磷素吸收总量 Total phosphorus absorption (kg/hm ²)	磷素吸收效率 Phosphorus absorption efficiency (kg/kg)	钾素吸收总量 Total potassium absorption (kg/hm ²)	钾素吸收效率 Potassium absorption efficiency (kg/kg)
早稻 Early rice	P45S1	77.90c	0.52c	21.39d	0.48a	75.01bc	0.50d
	P452	78.35c	0.52c	19.34c	0.43b	78.46b	0.52c
	P75S1	96.06a	0.64a	23.75c	0.32c	86.99a	0.58a
	P75S2	81.90b	0.55b	22.82c	0.30d	72.73c	0.48d
	P105S1	100.86a	0.67a	25.19a	0.24f	87.25a	0.58a
	P105S2	84.55b	0.56b	25.81a	0.26e	82.91a	0.55b
	P0	73.64d	0.49d	14.97d	—	70.03c	0.47c
	$\overline{P45}$	78.13c	0.52c	20.37c	0.45a	76.74b	0.51b
	$\overline{P75}$	88.98b	0.59b	23.29b	0.31b	79.86b	0.53b
	$\overline{P105}$	92.71a	0.62a	25.50a	0.24c	85.08a	0.57a
	$\overline{S1}$	91.61a	0.61a	23.44a	0.35a	83.08a	0.55a
	$\overline{S2}$	81.60b	0.54b	22.66a	0.33b	78.03b	0.52b
晚稻 Late rice	P45S1	119.64d	0.80c	30.08c	0.67a	101.20d	0.67c
	P45S2	123.11cd	0.82bc	29.36c	0.65a	103.75d	0.69c
	P75S1	127.91bc	0.85b	34.09b	0.45b	105.58d	0.70c
	P75S2	134.46ab	0.90a	33.87b	0.45b	111.14c	0.74b

续表 10 Table 10 (continued)

季别 Season	处理 Treatment	氮素吸收总量 Total nitrogen absorption (kg/hm ²)	氮素吸收效率 Nitrogen absorption efficiency (kg/kg)	磷素吸收总量 Total phosphorus absorption (kg/hm ²)	磷素吸收效率 Phosphorus absorption efficiency (kg/kg)	钾素吸收总量 Total potassium absorption (kg/hm ²)	钾素吸收效率 Potassium absorption efficiency (kg/kg)
晚稻 Late rice	P105S1	135.25a	0.90a	34.88ab	0.33c	118.31b	0.79a
	P105S2	139.99a	0.93a	35.92a	0.34c	124.71a	0.83a
	P0	116.55c	0.78c	23.60c	—	95.18d	0.63d
	P45	121.38b	0.81c	29.72b	0.66a	102.48c	0.68c
	P75	131.19a	0.87b	33.98a	0.45b	108.36b	0.72b
	P105	137.62a	0.92a	34.90a	0.33c	121.51a	0.81a
	S1	127.60a	0.85a	33.02a	0.48a	108.36b	0.72a
	S2	132.52a	0.88a	33.05a	0.48a	113.20a	0.75a

的趋势，并在 2021 年表现显著；施磷量和施用时期的互作处理间，早稻和晚稻均以 P45S2 和 P45S1 处理较大。

早、晚稻钾素吸收总量与钾素吸收效率，施磷量处理间表现为 P105>P75>P45>P0，早、晚稻 P105 处理均显著高于其他 3 个处理；施用时期处理间，早稻 S1 显著大于 S2 处理，晚稻表现相反，但钾素吸收总量差异显著而吸收效率差异不显著；施磷量和施用时期的互作处理间，早稻以 P105S1 处理最大，P75S1 和 P105S2 处理次之，显著高于除这两者之外的其他处理，晚稻以 P105S2 处理最大，显著高于其他处理。

综上所述，增大施磷量使磷素吸收总量增加，但磷素吸收效率显著下降，而磷肥施用时期对早、晚稻影响不同，磷肥一次性基施可提高早稻磷素吸收效率，分次施用可提高晚稻磷素吸收效率；增大施磷量有促进水稻氮、钾素吸收的效果，而磷肥施

用时期对早、晚稻影响不同，磷肥一次性基施可显著促进早稻氮、钾素吸收，而晚稻以分次施用效果更好。

2.4 磷肥运筹对双季稻氮、磷、钾素利用效率的影响

由表 11 和表 12 可知，氮素利用效率随施磷量的增加而逐渐减小，且与 P0 处理相比，早稻 P45 处理下降不显著，而 P105 处理显著下降；早稻 S1 处理显著低于 S2 处理，晚稻差异不显著；施磷量和施用时期的互作处理间，早稻以 P45S2 和 P75S2 处理较大，显著高于 P105S1 处理，晚稻以 P45S2 和 P45S1 处理较大，显著高于 P105S1 和 P105S2 处理。氮肥偏生产力，早、晚稻施磷量处理均显著高于 P0 处理，均以 P75 处理最大；早稻 S1 处理略高于 S2 处理，而晚稻表现相反，但差异均不显著；施磷量和施用时期的互作处理间，早稻以 P75S1 处理最大，且显著高于其他处理，而晚稻以 P75S2 处

表 11 2021 年各磷肥处理双季稻氮、磷、钾素利用效率
Table 11 Utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium of double-cropping rice under different phosphorus fertilizer treatments in 2021

季别 Season	处理 Treatment	氮素利用效率 Nitrogen utilization efficiency (kg/kg)	氮肥偏生产力 Partial productivity of nitrogen fertilizer (kg/kg)	磷素利用效率 Phosphorus utilization efficiency (kg/kg)	磷肥偏生产力 Partial productivity of phosphorus fertilizer (kg/kg)	磷肥利用率 Utilization rate of phosphorus fertilizer (%)	钾素利用效率 Potassium utilization efficiency (kg/kg)	钾肥偏生产力 Partial productivity of potassium fertilizer (kg/kg)
早稻 Early rice	P45S1	118.78b	52.20c	531.93a	174.00a	12.13b	101.74b	52.20bc
	P45S2	126.43a	51.73c	489.90b	172.44a	14.62a	110.32a	51.73c
	P75S1	113.29c	58.20a	439.58c	116.40b	14.13a	101.52b	58.20a
	P75S2	122.83a	54.20b	482.21b	108.40b	10.13c	99.33b	54.20b
	P105S1	101.24d	53.27bc	398.31d	76.10c	10.29c	91.59c	53.27bc
	P105S2	103.56d	52.60bc	404.82e	75.14c	9.74d	92.10c	52.60bc
	P0	124.32a	46.51c	753.78a	—	—	105.68a	46.51c
	P45	122.61a	51.97b	510.92b	173.22a	13.38a	106.03a	51.97b
	P75	118.06b	56.20a	460.90c	112.40b	12.13a	100.43b	56.20a
	P105	102.40c	52.94b	401.57d	75.62c	10.02b	91.85c	52.94b
	S1	111.10b	54.56a	456.61a	122.17a	12.18a	98.28b	54.56a
	S2	117.61a	52.84a	458.98a	118.66a	11.50b	100.58a	52.84a

续表 11 Table 11 (continued)

季别 Season	处理 Treatment	氮素利用效率 Nitrogen utilization efficiency (kg/kg)	氮肥偏生产力 Partial productivity of nitrogen fertilizer (kg/kg)	磷素利用效率 Phosphorus utilization efficiency (kg/kg)	磷肥偏生产力 Partial productivity of phosphorus fertilizer (kg/kg)	磷肥利用率 Utilization rate of phosphorus fertilizer (%)	钾素利用效率 Potassium utilization efficiency (kg/kg)	钾肥偏生产力 Partial productivity of potassium fertilizer (kg/kg)
晚稻 Late rice	P45S1	80.49a	64.47c	353.05b	214.89a	13.24b	108.24b	64.47c
	P45S2	82.14a	66.40bc	349.60b	221.33a	15.69a	109.86b	66.40bc
	P75S1	74.53c	67.20b	372.23a	134.40b	7.53d	118.38a	67.20b
	P75S2	77.09b	70.07a	320.82c	140.13b	15.11a	107.63b	70.07a
	P105S1	71.68d	66.13bc	296.83d	94.48c	11.42c	101.02c	66.13bc
	P105S2	71.39d	66.53bc	282.48d	95.05c	13.24b	97.68c	66.53b
	P0	89.71a	61.43c	430.24a	—	—	122.97a	61.43c
	P45	81.32b	65.44b	351.33b	218.11a	14.47a	109.05c	65.44b
	P75	75.81c	68.64a	346.53c	137.27b	11.32b	113.01b	68.64a
	P105	71.54d	66.33ab	289.66d	94.77c	12.33b	99.35d	66.33b
	S1	75.57a	65.93a	340.70a	147.92a	10.73b	109.21a	65.93a
	S2	76.87a	67.67a	317.63b	152.17a	14.68a	105.06b	67.67a

表 12 2022 年各磷肥处理双季稻氮、磷、钾素利用效率
Table 12 Utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium of double
cropping rice under different phosphorus fertilizer treatments in 2022

季别 Season	处理 Treatment	氮素利用效率 Nitrogen utilization efficiency (kg/kg)	氮肥偏生产力 Partial productivity of nitrogen fertilizer (kg/kg)	磷素利用效率 Phosphorus utilization efficiency (kg/kg)	磷肥偏生产力 Partial productivity of phosphorus fertilizer (kg/kg)	磷肥利用率 Utilization rate of phosphorus fertilizer (%)	钾素利用效率 Potassium utilization efficiency (kg/kg)	钾肥偏生产力 Partial productivity of potassium fertilizer (kg/kg)
早稻 Early rice	P45S1	91.02a	47.27bc	331.54bc	157.56a	14.27a	94.52b	47.27bc
	P45S2	89.22ab	46.60c	361.43a	155.33a	9.72d	89.08cd	46.60c
	P75S1	83.07c	53.20a	336.00b	106.40b	11.71b	91.73bc	53.20a
	P75S2	88.77ab	48.47bc	318.58c	96.93c	10.47c	99.96a	48.47bc
	P105S1	73.47d	49.40b	294.16d	70.57d	9.73d	84.93d	49.40b
	P105S2	86.10bc	48.53bc	282.06d	69.33d	10.32c	87.80cd	48.53b
	P0	87.86a	43.13c	432.34a	—	—	92.39a	43.13c
	P45	90.12a	46.93b	346.48b	156.44a	11.99a	91.80a	46.93b
	P75	85.92a	50.84a	327.29c	101.67b	11.09b	95.85a	50.84a
	P105	79.79b	48.97ab	288.11d	69.95c	10.03c	86.37b	48.97ab
	S1	82.52b	49.96a	320.57a	111.51a	11.90a	90.39a	49.96a
	S2	88.00a	47.87a	320.69a	107.20a	10.17b	92.28a	47.87a
晚稻 Late rice	P45S1	79.57a	63.47c	316.54ab	211.56a	14.39a	94.07a	63.47c
	P45S2	78.55a	64.47c	329.42a	214.89a	12.79b	93.21a	64.47c
	P75S1	78.26a	66.73bc	293.63c	133.47b	13.99a	94.81a	66.73bc
	P75S2	78.39a	70.27a	311.19b	140.53b	13.70a	94.84a	70.27a
	P105S1	73.72b	66.47bc	285.84c	94.95c	10.74d	84.27b	66.47bc
	P105S2	72.72b	67.87ab	283.43c	96.95c	11.73c	81.63b	67.87ab
	P0	79.28a	61.60c	391.57a	—	—	97.08a	61.60c
	P45	79.06a	63.97bc	322.98b	213.22a	13.59a	93.64a	63.97b
	P75	78.33a	68.50a	302.41c	137.00b	13.84a	94.83a	68.50a
	P105	73.22b	67.17ab	285.64d	95.95c	11.24b	82.95b	67.17ab
	S1	77.18a	65.56a	301.23a	146.66a	13.04a	91.05a	65.56a
	S2	76.55a	67.54a	306.34a	150.79a	12.74a	89.89a	67.54a

理最大，显著大于除 P105S2 外的其他处理。可见，随施磷量增加早、晚稻氮素利用效率显著下降，但氮肥偏生产力先显著增大后下降，以 P75 处理最大；早稻氮素利用效率以分作 2 次施用较高，而晚稻表现相反。

磷素利用效率随施磷量的增加而显著下降；早稻 S1 与 S2 处理差异不显著，晚稻 2021 年 S1 处理显著大于 S2 处理，而 2022 年 S2 处理大于 S1 处理但无显著差异。施磷量和施用时期的互作处理间，P105S1 和 P105S2 处理处于最低水平，显著低于其

他处理。磷肥偏生产力,早、晚稻均表现随施磷量增大而显著下降的趋势;早稻 S1 处理略高于 S2 处理,而晚稻表现相反,差异均不显著;施磷量和施用时期的互作处理间,早稻以 P45S1 处理最大, P45S2 处理次之,晚稻以 P45S2 处理最大, P45S1 处理次之,但 P45S1 和 P45S2 处理差异均不显著,且两者均显著高于其他处理。整体上,早、晚稻磷肥利用率随施磷量增大而下降,其中 P105 显著低于 P45 处理;施用时期早稻 S1 显著大于 S2,晚稻在 2021 年 S2 处理显著高于 S1 处理,而 2022 年表现 S1 大于 S2 处理但不显著;施磷量和施用时期的互作处理间, P105S1 和 P105S2 处理处于较低水平,在早稻显著小于 P45S1 处理,在晚稻显著小于 P45S2 处理。可见,随施磷量增加早、晚稻磷素利用效率和磷肥偏生产力显著下降,早稻磷肥偏生产力和磷肥利用率以一次性基施较高,而晚稻表现相反。

钾素利用效率,施磷处理整体上小于 P0 处理, P105 处理差异尤其显著;早稻 S1 处理低于 S2 处理,晚稻表现相反,且在 2021 年表现显著;施磷量和施用时期的互作处理间,早、晚稻均以 P105S1、P105S2 处理处于最低水平,显著小于最高处理。钾肥偏生产力,早、晚稻施磷量处理均显著高于 P0 处理,均以 P75 处理最大;早稻 S1 处理略高于 S2 处理,而晚稻表现相反,差异均不显著;施磷量和施用时期的互作处理间,早稻以 P75S1 处理最大,且显著高于其他处理,而晚稻以 P75S2 处理最大,显著高于除 P105S2 外的其他处理。可见,随施磷量增加,早、晚稻钾素利用效率显著下降,但钾肥偏生产力先显著增大后减小, P75 处理最大;早稻钾肥偏生产力以一次性基施较高,而晚稻表现相反。

综上所述,整体上,随施磷量增大,早、晚稻磷肥利用率与氮、钾素利用效率显著降低,而氮、钾肥偏生产力表现先增大后减小趋势,以 P75 处理最高;早稻氮、磷、钾利用效率一般以 S1 处理较大,而晚稻表现相反。

3 讨论

3.1 磷肥运筹对双季稻干物质积累、产量及其构成因素的影响

我国地域辽阔,环境气候类型多样,且小农户经营管理模式下土壤养分变异较大,因此基于

单独或少数试验点的作物推荐施肥无法作为指导不同区域推荐施肥的有效参数^[18]。一般土壤有效磷含量 $>20 \text{ mg/kg}$ 时可视为有效磷较丰富,而低于 10 mg/kg 时被认为是缺磷土壤^[19]。当前,水稻磷肥研究主要是针对磷肥用量对水稻产量的影响,且认为将部分磷肥作追肥施用可以提高磷肥利用效率和产量^[12-13],也有研究^[14]认为,不同品种适宜的磷肥运筹方式不同。本研究针对湖南衡阳地区有效磷含量中下水平的稻田(早稻土壤有效磷含量为 13.47 mg/kg)开展了机插双季稻试验,发现施磷量增大可提高水稻干物质积累量,施用时期亦有显著影响,两者具有一定互作效应,且早晚稻表现有差异:早稻以一次性基施较好,而晚稻以 2 次施用(基肥:穗肥=2:1)较好。

本研究发现,施磷对双季稻具有显著增产作用,且施磷量处理间差异显著,产量以 P75 处理最高,而施用时期无显著影响,但早、晚稻遵循一定的差异规律,早稻总是以 S1 优于 S2,而晚稻则相反,具体分析产量构成因素,发现磷肥运筹对早、晚稻千粒重影响均不显著,对早稻有效穗数、穗粒数和结实率有显著影响;晚稻磷肥处理间有效穗数无显著差异,但对晚稻穗粒数与结实率有显著影响。可见,一定程度上可说明磷肥使早稻增产主要是提高了有效穗数和穗粒数,而使晚稻增产主要是提高了穗粒数与结实率。

本研究同时发现,施磷量与施用时期具有一定的互作效应,早、晚稻产量以 P75 处理最高,但早稻产量最高的是 P75S1 处理,而晚稻以 P75S2 处理产量最高,造成差异的原因可能是本试验为早、晚稻定位试验,早稻季相对较缺磷,因而一次性施磷效果较好,但到了晚稻季土壤磷素已经得到了一定的补充(土壤有效磷含量 2021 年从 13.47 mg/kg 增加到 18.91 mg/kg , 2022 年从 7.79 mg/kg 增加到 8.02 mg/kg),对磷的需求随之改变,进而表现出了差异。

综上所述,本试验条件下, 75 kg/hm^2 的施磷量对机插双季稻是较为适宜的,有利于获得较高的干物质积累量和籽粒产量,但早稻以一次性基施较好,晚稻以 2 次施用(基肥:穗肥=2:1)较好。

3.2 磷肥运筹对磷素吸收与利用的影响

施磷量、施用时期、两者互作对各养分指标有显著影响,但施用时期对水稻各养分指标普遍存在季别间差异,造成这种现象的原因可能是早

稻施肥引起的土壤养分变化,而导致的施用时期对晚稻影响不同于早稻。其次也有可能由于早、晚稻品种吸磷能力的不同(泰优 553 吸收能力优于湘早粳 45 号)以及早、晚稻气候差异等原因而导致施用时期对水稻各指标的影响存在季别间差异。

关于磷肥运筹对双季稻磷素吸收的研究鲜见报道,本试验研究了磷肥用量与施用时期对双季稻磷素吸收的影响,发现增大施磷量使磷素吸收总量增加,但磷素吸收效率显著下降。磷肥施用时期对早、晚稻影响显著,一次性基施显著提高早稻磷素吸收效率,而分次施用(基肥:穗肥=2:1)可显著提高晚稻磷素吸收效率。

磷肥利用率是衡量施肥效益和施肥科学合理性的重要指标^[19]。合理的磷肥施用量能够提高水稻磷肥利用率^[20]。张锦滨等^[21]研究显示,水稻磷肥农学利用效率、磷肥生理利用率、磷肥偏生产力和磷肥利用率均呈现随施磷量的增加而下降的趋势,施磷量 37.5 kg/hm² 的磷肥效率最高。本试验在有效磷处于中下水平条件下开展试验,发现磷肥利用率在施磷量为 45 kg/hm² 时最高。侯云鹏等^[22]通过 2 年的水稻田间定位试验表明,水稻磷肥农学利用效率、磷肥偏生产力和磷肥利用率均呈现随施磷量的增加而下降的趋势,当施磷量从 40 kg/hm² 增加到 160 kg/hm² 时,磷肥偏生产力、磷肥利用率和磷肥农学利用效率分别由 214.1 kg/kg、31.8% 和 15.9 kg/kg 下降至 65.8 kg/kg、19.2% 和 9.5 kg/kg,这与本研究结果规律基本一致。

3.3 磷肥运筹对氮、钾素吸收与利用的影响

研究^[23]表明,氮、磷、钾养分积累量受环境与处理互作效应影响大,同时,氮、磷、钾养分之间是相互影响的。有研究^[24-25]认为,增施磷肥可提高作物产量和氮肥利用率,但也有研究^[26]认为,施氮量相同时,高磷处理均未增加太湖地区水稻生物量、籽粒产量和吸氮量,郭智等^[27]也发现,磷肥减施对水稻产量和氮肥利用率的影响不显著。磷素可能通过影响氮素供应而对作物产量和吸氮量产生影响^[28]。本研究的试验地有效磷含量(13.47 mg/kg)处于中下水平,结果发现随磷肥量的增加,双季稻氮、钾素吸收总量与氮素吸收效率显著增加,氮、钾素利用效率显著降低,氮、钾肥偏生产力表现先增大后减小趋势,P75 处理最高。本研究同时发现,磷肥施用时期对早、晚稻影响不同,磷肥一次性基施可显著提高早稻氮、钾素吸收

效率和利用效率,而晚稻以分次施用效果略好。本研究结果与田玉华等^[26]和郭智等^[27]研究有差异,可能原因是土壤肥力较好条件下,少量施磷即可满足水稻生长,因此磷肥的增产效果不明显。因此,有关双季稻的适宜施磷量与施肥时期的研究还要因地制宜开展。

4 结论

磷肥增大可提高水稻干物质积累量和产量,施用时期无显著影响,施磷量与施用时期具有一定的互作效应,早、晚稻产量均以 P75 处理显著较高,早稻 P75S1 显著高于 P75S2 处理,而晚稻 P75S2 显著高于 P75S1 处理;随施磷量增大,双季稻磷素吸收效率与磷肥利用率显著降低,氮、钾素吸收量与吸收效率显著增大,氮、钾素利用效率显著降低,氮、钾肥偏生产力表现先增大后减小趋势,以 P75 处理最高;早稻氮、磷、钾吸收与利用效率一般以 S1 处理较大,而晚稻表现相反。可见,合理施用磷肥可显著提高水稻产量和养分吸收利用效率,本试验区域以施磷 75 kg/hm² 表现最好,施用时期的影响在早、晚稻间具有差异,早稻以一次性基施为好,而晚稻以基肥:穗肥=2:1 为宜。

参考文献

- [1] 闫金焱,鲁君明,侯文峰,等. 磷肥用量对不同水稻品种产量和磷肥利用率的影响. 中国农业科技导报, 2018, 20(8): 74-81.
- [2] 马畅,付雪蛟,吕小红,等. 施磷量对水稻盐丰 47 产量、需磷量及磷肥利用率的影响. 东北农业科学, 2022, 47(6): 20-24.
- [3] 谢坚,郑圣先,廖育林,等. 缺磷型稻田土壤施磷增产效应及土壤磷素肥力状况的研究. 中国农学通报, 2009, 25(3): 147-154.
- [4] 李文西,张月平,毛伟,等. 水稻磷肥施用效果、经济效益及推荐用量. 江苏农业科学, 2013, 41(10): 61-63.
- [5] Lee C H, Park C Y, Park K D, et al. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. Chemosphere, 2004, 56(3): 299-304.
- [6] 戴佩彬. 模拟条件下磷肥配施有机肥对土壤磷素转化迁移及水稻吸收利用的影响. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [7] 李瑞鸿,洪林,罗文兵. 漳河灌区农田地表排水中磷素流失特征分析. 农业工程学报, 2010, 26(12): 102-106.
- [8] 司友斌,王慎强,陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化. 土壤, 2000, 32(4): 188-193.
- [9] 江尚焱,王火焰,周健民,等. 磷肥施用对水稻生长和磷素吸收的影响. 土壤, 2016, 48(6): 1085-1091.
- [10] 朱德峰,陈惠哲,徐一成,等. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策. 中国稻米, 2013, 19(4): 1-4.
- [11] 薄树升. 水稻田养分含量现状及改良措施. 农民致富之友, 2011(14): 28.
- [12] 王朋,刘洪伏. 不同磷肥运筹对水稻产量形成的影响. 安徽农学通报, 2018, 24(24): 30-31.
- [13] 刘洪伏,王朋,孙杰. 磷肥运筹对华粳 5 号产量及其构成因素

- 的影响. 农业科技通讯, 2018(12): 97, 253.
- [14] 王丽萍, 解保胜, 顾春梅, 等. 磷肥运筹和试验品种对寒地粳稻干物质积累与转运的影响. 中国土壤与肥料, 2017(2): 76-81.
- [15] 钟雪梅, 黄铁平, 彭建伟, 等. 机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响. 中国水稻科学, 2019, 33(5): 436-446.
- [16] 王建新. 湖南省衡阳县提速水稻育插秧机械化. 农机科技推广, 2013, 126(4): 36.
- [17] 曾成城, 苏天明, 苏利荣, 等. 广西典型喀斯特地区不同土地利用方式土壤养分特征. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 199-203.
- [18] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 795-802.
- [19] 张锴, 马富富. 永善县玉米土壤养分丰缺及推荐施肥指标体系的建立. 现代农业科技, 2014(1): 14-15, 17.
- [20] 李前, 侯云鹏, 高军, 等. 不同供磷水平对水稻干物质累积、磷素吸收分配及产量的影响. 吉林农业科学, 2015, 40(3): 37-41.
- [21] 张锦滨, 王晓云, 孟圆, 等. 不同磷肥用量对水稻产量效益、磷肥利用率及土壤养分的影响. 中国农学通报, 2021, 37(32): 96-101.
- [22] 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. 东北农业科学, 2016, 41(6): 61-66.
- [23] 吴可, 谢慧敏, 刘文奇, 等. 氮、磷、钾肥对水稻养分积累与利用的影响. 分子植物育种, 2024, 22(6): 1960-1967.
- [24] Gor F A, Kuhne R F, Tanner D G, et al. Recovery of ^{15}N -label urea applied to wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Ethiopian high-lands as affected by P fertilization. Journal of Agronomy and Crop Science, 2003, 189: 30-38.
- [25] 张希忠, 温贤芳, 陈一珠, 等. 利用同位素 ^{15}N 和 ^{32}P 研究掺合肥料的肥效. 核农学通报, 1989, 10(1): 24-28.
- [26] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区水稻季氮肥的作物回收和损失研究. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 55-61.
- [27] 郭智, 刘红江, 张岳芳, 等. 氮磷减施对水稻剑叶光合特性、产量及氮素利用率的影响. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2263-2269.
- [28] Kuiper D, Schuit J, Kuiper P. Effects of internal and external cytokinin concentrations on root growth and shoot to root ratio of *Plantago major*ssp. *pleiosperma* at different nutrient conditions. Plant and Soil, 1988, 111: 231-236.

Effects of Phosphate Fertilizer Management on Yield Components and Nutrient Uptake and Utilization in Mechanical Transplanting Double-Cropping Rice

Xiao Min, Guo Lang, Cui Can, Cheng Zhouqi, Liu Yuwu, Zhuo Le, Wu Si, Yi Zhenxie

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China)

Abstract In order to investigate the effects of P fertilizer management on the yield and nitrogen, phosphorus and potassium uptake and utilization of double-cropping rice, Xiangzaoxian 45 (early rice) and Taiyou 553 (late rice) were used as materials to carry out the machine planting test under three phosphorus application levels (45 kg/ha, P45; 75 kg/ha P75; 105 kg/ha, P105) and two application periods (S1: full base fertilizer; S2: basal fertilizer:ear fertilizer = 2:1). The results showed that the increase of P application rate could increase the dry matter accumulation of rice and significantly affect the yield and its components, but the application period had no significant effect. There was a certain interaction effect between P application rate and application period, and the yield of early and late rice were significantly higher under P75 treatment, the highest in early rice was P75S1 treatment, and the highest in late rice was P75S2 treatment. With the increase of phosphorus application rate, phosphorus absorption efficiency and utilization rate of phosphorus fertilizer decreased significantly, nitrogen and potassium absorption and absorption efficiency increased significantly in early and late rice, but nitrogen and potassium utilization efficiency decreased significantly, while partial productivity of nitrogen and potassium fertilizer increased first and then decreased, and P75 treatment was the highest. Nitrogen, phosphorus and potassium absorption efficiency of S1 treatment were significantly higher in early rice, while it was opposite in late rice. It can be seen that rational application of P fertilizer can significantly improve rice yield and nutrient absorption and utilization efficiency, and the effect of 75 kg/ha P fertilizer application was the best. Application of phosphorus fertilizer in early season will significantly increase the available phosphorus content in late season soil, so it is better to apply single base fertilizer in early rice, while it is better to apply base fertilizer:ear fertilizer = 2:1 in late rice.

Key words Double-cropping rice; Phosphate fertilizer management; Yield components; Nutrient uptake and utilization