

配方施肥及磷肥后移对单季稻磷素利用效率、产量和经济效益的影响

李鹏¹ 张敬智¹ 魏亚¹ 常江^{1,*} 郜红建¹ 章力干¹ 丁玉宇²

(¹安徽农业大学 资源与环境学院,合肥 230036; ²安徽省怀宁县土肥站,安徽 怀宁 246100; * 通讯联系人, E-mail: thbg@ahau.edu.cn)

Effect of Formulated Fertilization and Postponed Application of Phosphorus Fertilizer on Phosphorus Utilization Efficiency, Grain Yield and Economic Benefit of Single-cropping Rice

LI Peng¹, ZHANG Jing-zhi¹, WEI Ya¹, CHANG Jiang^{1,*}, GAO Hong-jian¹, ZHANG Li-gan¹, DING Yu-yu²

(¹School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, 230036, China; ²Soil and Fertilizer Station of Huaining, Huaining 246100, China; * Corresponding author, E-mail: thbg@ahau.edu.cn)

LI Peng, ZHANG Jingzhi, WEI Ya, et al. Effect of formulated fertilization and postponed application of phosphorus fertilizer on phosphorus utilization efficiency, grain yield and economic benefit of single cropping rice. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(1): 85-92.

Abstract: A field experiment was carried out to reveal the effects of conventional fertilization (CF), formulated fertilization (FF) and postponed application of phosphorus fertilizer (DAP) on phosphorus accumulation and its utilization efficiency, as well as grain yield and economic benefit in rice. The results showed that the phosphorus absorption and accumulation in rice of phosphorus in FF and DAP were higher than those in CF. And the contribution rate, absorption efficiency, agronomic use efficiency and partial fertilizer productivity of phosphorus in FF and DAP increased significantly ($P < 0.05$) compared with CF. Moreover, under the same phosphorus level, the phosphorus accumulation amount and net absorption amount of rice during the later growth period in T_3 (basal P : topdressed P = 7 : 3) were 6.86% and 20.07% higher than those in T_2 (P used as basal fertilizer). Meanwhile, the contribution rate, absorption efficiency, agronomic use efficiency, partial fertilizer productivity and physiological efficiency of phosphorus in T_3 increased by 36.56%, 23.10%, 46.16%, 7.09% and 18.25%, respectively. Compared with T_2 , the grain yield and output-input ratio also increased by 7.09% and 7.04%. The results indicated that FF, especially DAP increased phosphorus absorption and accumulation in rice during the growth duration, as well as the P utilization efficiency, grain yield and output-input ratio, which had a positive effect on increasing production and efficiency.

Key words: formulated fertilization; postponed application of phosphorus fertilizer; rice; phosphorus utilization efficiency; yield

李鹏,张敬智,魏亚,等. 配方施肥及磷肥后移对单季稻磷素利用效率、产量和经济效益的影响. *中国水稻科学*, 2016, 30(1): 85-92.

摘要: 采用田间试验,研究了常规施肥、配方施肥以及磷肥后移对水稻磷素吸收积累量、利用效率、产量和经济效益的影响。结果表明,与常规施肥相比,配方施肥和磷肥后移使水稻植株内磷素吸收积累量增加,磷肥贡献率、吸收利用率、农学利用率和偏生产力等均显著提高;在相同施磷水平下,与磷肥全部基施处理相比,磷肥后移处理($m_{\text{基肥}} : m_{\text{追肥}} = 7 : 3$)使水稻生育后期磷素总积累量和净吸收量提高了 6.86% 和 20.07%,磷肥贡献率、吸收利用率、农学利用率、偏生产力和生理利用率提高了 36.56%、23.10%、46.16%、7.09% 和 18.25%,水稻产量和产投比提高了 7.09% 和 7.04%。综合分析,配方施肥尤其是磷肥后移可显著增加水稻生育期磷素吸收积累量,提高水稻磷肥利用效率、产量和产投比,达到增产增效的目的。

关键词: 配方施肥; 磷肥后移; 水稻; 磷肥利用效率; 产量

中图分类号: S143.2; S511.062

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2016)01-0085-08

水稻是我国主要的粮食作物,占全国粮食种植面积的 28.7%^[1]。磷是水稻生长发育所必需的大量

营养元素之一,是构成水稻核酸和磷脂等生物大分子物质及多种化合物的重要组分^[2-3]。研究表明,缺

收稿日期: 2015-06-08; 修改稿收到日期: 2015-09-07。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAD20B05)。

磷条件下水稻植株矮小,光合作用受阻,植株不能正常生长发育;而适量供磷水稻则分蘖正常,生育良好,早熟高产^[4-6]。因此,合理的磷肥投入是保证水稻正常生长发育以及水稻高产稳产的重要措施^[7]。然而,当前我国农业生产面临着增肥不增产,化肥盲目过量施用导致环境污染且养分利用效率下降等重大问题^[8-9]。根据土壤养分含量和水稻生长发育对养分的需求,科学制定水稻配方施肥是解决这一问题的的重要途径^[10-11]。科学界普遍认为,植物磷素70%~80%是在植物生长前期吸收;因此,农业生产上习惯将磷肥作基肥一次性施入^[12]。但磷肥施入土壤后,由于土壤对磷的固定作用和磷在土壤中的移动性差等原因,大部分不易被植物吸收利用^[13-15]。近期研究表明水稻对磷的吸收呈现两个净吸收高峰期,一是拔节期,一是成熟期,且后期累积吸磷量占较大的比例^[16]。磷肥全部作基肥很难满足水稻生长后期对磷素的需求而阻碍水稻穗部发育,使产量和磷肥当季利用率降低^[12]。合理施用磷肥,提高水稻产量和磷肥利用率一直是诸多学者研究的重点。付立东等^[17]研究表明在施氮钾的基础上适量增施磷肥可提高水稻产量、磷肥利用率和生产力等。王苏影等^[18]、刘海涛等^[19]研究表明在一定的施磷量范围内施用磷肥能使水稻增产增效。当前研究大多关注磷肥施用量以及氮磷钾等营养元素配施^[20]对水稻产量和肥料利用率等的影响,很少关注科学配方施肥下磷肥分施对提高水稻产量和磷肥利用率的影响。本研究通过田间试验研究配方施肥及磷肥后移条件下水稻植株对磷素的吸收累积量、磷肥利用率及产量构成的变化,分析不同施肥处理的产

投比及经济效益,旨在为进一步优化水稻科学配方施肥尤其是磷肥的合理运筹提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验选择在安徽省怀宁县高河镇进行,该地位于长江中下游北岸,大别山南麓前沿,介于东经116°28′~117°03′,北纬30°20′~30°50′之间。试验点地势平坦,排灌方便,适宜水稻种植。

1.2 试验材料

供试水稻品种为丰两优香一号。供试土壤为水稻土,养分含量如下:全氮1.99 g/kg、碱解氮146.07 mg/kg、速效磷18.72 mg/kg、速效钾145.97 mg/kg、pH值5.66、有机质37.57 g/kg;土壤有效磷含量处于中等偏上水平。肥料采用司尔特配方肥(N 18%、P₂O₅ 12%、K₂O 15%)、尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和KCl(K₂O 60%)。

1.3 试验设计

根据安徽省怀宁县2006—2013年全县土壤养分测定值的平均含量和“3414”田间肥料效应试验,按照目标产量法(9000 kg/hm²)制定了磷肥全部基施(T₂);在此基础上,把30%的基施磷后移作为穗肥,形成磷肥后移处理(T₃);根据试验田块实测的土壤养分含量和目标产量法设置T₄;并设置无磷肥对照处理(T₅);把当地农民的习惯施肥设为常规施肥(T₁)。具体施肥量和肥料运筹见表1。

1.4 试验操作

试验共设置5个处理,每个处理3次重复,共15个小区,每个小区面积40 m²,随机区组设计。各

表1 田间试验设计方案

Table 1. Scheme design of the field experiment.

处理 Treatment	肥料施用量 Fertilizer application level (kg·hm ⁻²)			氮肥施用比例 (基肥:分蘖肥:穗肥) N fertilizer application proportion (Basal: For tillering: For panicle initiation) / %	磷肥施用比例 (基肥:穗肥) P fertilizer application proportion (Basal: For panicle initiation) / %
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O*		
T ₁	199.5	123.0	72.0	75:25:0	100:0
T ₂	180.0	105.0	105.0	40:30:30	100:0
T ₃	180.0	105.0	105.0	40:30:30	70:30
T ₄	127.5	90.0	45.0	40:30:30	100:0
T ₅	180.0	0	105.0	40:30:30	—

* 钾肥全部基施。

*, Potassium fertilizer is applied as the basal fertilizer.

小区之间筑 0.5 m 宽田埂用薄膜包埂,单独排灌。肥料均采用撒施方式施入田中,追施磷肥和氮肥穗肥时混合均匀后一起撒施。水稻于 2014 年 5 月 19 日播种,6 月 20 日移栽,10 月 15 日收获。在试验田周围筑 2 m 宽的保护行。插植规格(行株距)为 30 cm×15 cm,栽插密度 2.28×10^5 株/hm² 即 910 株/小区。成熟期取样考种,各试验小区的病虫害管理与大田相同。

1.5 测定项目与方法

在不同生育期(分蘖期、拔节期、抽穗期、成熟期)每个小区随机取植株 2~4 株,经自来水洗净和蒸馏水冲洗后,分不同部位(茎、叶、穗)分别装入样品袋,105℃下杀青 30 min,80℃下烘干至恒重,称重后粉碎,用作分析样品。植物样品经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,用钼锑钒比色法测磷含量。采用以下方法计算各指标:

1)各生育期(茎、叶、穗)磷素累积量(g/株)=干质量×磷含量;

2)各生育期磷素总累积量(g/株)=茎磷素累积量+叶磷素累积量+穗磷素累积量;

3)各生育期磷素净吸收量(g/株)=后一生育期磷素总累积量-前一生育期磷素总累积量;

4)不同生育期磷素吸收利用率(%)=(施肥区磷素总累积量-对照区磷素总累积量)×100%/施肥量;

5)磷肥贡献率(%)=(施肥区产量-对照区产量)×100%/施肥区产量;

6)磷肥吸收利用率(%)=(施肥区磷素总累积量-对照区磷素总累积量)×100%/施肥量;

7)磷肥农学利用率(kg/kg)=(施肥区产量-对照区产量)/施肥量;

8)磷肥偏生产力(kg/kg)=施肥区产量/施肥量;

9)磷肥生理利用率(kg/kg)=(施肥区产量-对照区产量)/(施肥区磷素总累积量-对照区磷素总累积量)。

1.6 统计分析

数据处理及作图使用 EXCEL 2007,数据分析采用 SPSS 20.0 统计软件中单因素方差分析(ANOVA),组间差异用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 配方施肥及磷肥后移对水稻植株内磷素含量的影响

从表 2 可以看出,各施肥处理的各部位磷含量均高于无磷对照处理,营养生长期(拔节期)磷素主要集中在茎部,生殖生长期(抽穗期至成熟期)逐渐向穗部转移。分蘖期,T₄处理的水稻植株内全磷含量最高(3.30 g/kg),与 T₁、T₂ 和 T₃ 相比分别高 11.11%、13.40% 和 15.79%,差异均达显著水平(P<0.05);T₃处理磷含量较低,可能与磷肥后移以及前期施用量相对较少有关。到了拔节期,由于常规施肥处理(T₁)磷的施用量较大,磷在茎叶中的含量也较高。抽穗期,磷素逐渐向穗部转移,茎叶中磷含量降低,但仍以茎中含量最高。配方施肥(T₂、T₃)的茎叶穗含量比常规施肥(T₁)增加 21.40%、8.49%、12.50% 和 9.34%、7.55%、10.10%。成熟期,水稻各部位的磷含量以穗部最高,可见水稻对磷的吸收最终主要集中在籽粒中。配方施肥(T₂、T₃)及 T₄ 处理的穗部磷含量比常规施肥(T₁)处理分别高 5.67%、10.67% 和 2.67%,茎叶磷含量与 T₁ 相比差异显著(P<0.05)。配方施肥中磷肥后移(T₃)

表 2 不同生育期水稻植株内全磷的含量

Table 2. Contents of total P accumulated in rice at different growth stages.

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage			成熟期 Maturity stage		
		茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle
T ₁	2.97±0.07 b	3.10±0.17 a	2.44±0.08 a	2.57±0.29 bc	2.12±0.17 ab	2.08±0.10 b	1.09±0.25 cd	1.00±0.03 c	3.00±0.38 ab
T ₂	2.91±0.10 b	2.90±0.07 ab	2.24±0.10 b	3.12±0.06 a	2.30±0.11 a	2.34±0.13 a	1.40±0.03 ab	1.46±0.06 ab	3.17±0.26 a
T ₃	2.85±0.09 b	2.89±0.25 ab	2.25±0.12 b	2.81±0.02 ab	2.28±0.03 ab	2.29±0.11 ab	1.57±0.14 a	1.51±0.03 a	3.32±0.02 a
T ₄	3.30±0.02 a	2.82±0.04 b	2.29±0.03 b	3.01±0.12 a	2.29±0.08 a	2.40±0.05 a	1.29±0.09 bc	1.43±0.07 b	3.08±0.02 ab
T ₅	2.18±0.04 c	2.79±0.02 b	2.20±0.05 b	2.31±0.25 c	2.06±0.10 b	2.07±0.17 b	0.86±0.06 d	0.96±0.02 c	2.67±0.15 b

同列中不同字母表示 0.05 水平上差异显著(n=3)。下同。

Different lowercase letters within a column indicate significant difference at 0.05 level (n=3). The same as below.

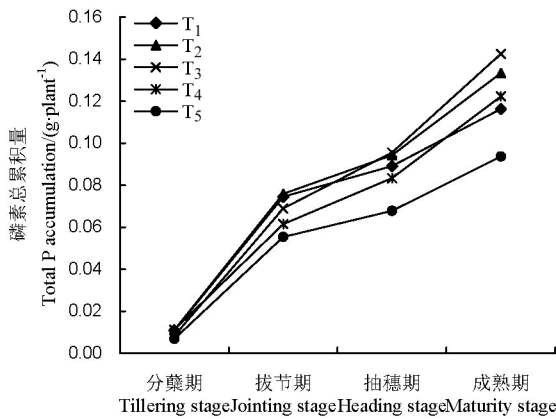


图1 不同生育期水稻磷素总累积量

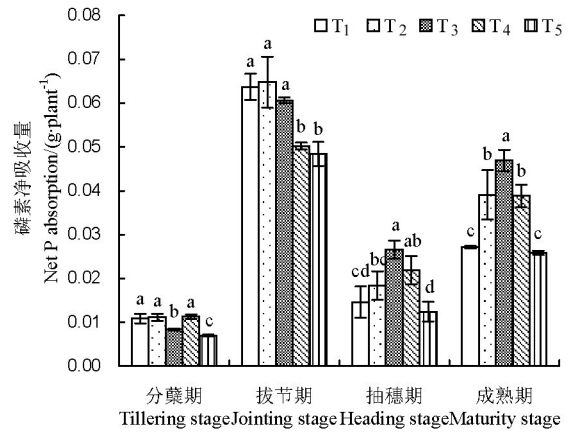
Fig. 1. Total P accumulation of rice in different growth stages.

处理水稻生长后期磷素含量明显提高,到成熟期达到最高,分别比 T₂ 和 T₄ 穗部含量增加了 4.73% 和 7.79%。说明追施穗肥有助于成熟期磷的吸收,改善稻米品质。

2.2 配方施肥及磷肥后移对水稻体内磷素累积量的影响

水稻植株内磷素总累积量随水稻生长发育呈现逐渐增加的趋势,分蘖至拔节期和抽穗至成熟期迅速增加,而拔节至抽穗期增速相对缓慢,各处理均在成熟期达到最大值(图1)。这个时期除无磷对照外的其他处理磷素累积总量都显著高于常规施肥处理, T₂、T₃ 及 T₄ 分别比 T₁ 提高 14.68%、22.56% 和 5.15%, 且以磷肥后移(T₃)的累积总量最高,与其他处理均有显著差异($P < 0.05$)。由此可见,孕穗期追施磷肥可以增加水稻磷的吸收量。

从水稻各生育期磷素净吸收量来看(图2),各施肥处理不同生育期磷素净吸收量均高于无磷对照。各处理对磷的吸收均有两个净吸收高峰期,一个是拔节期,净吸收量占了整个生育期吸收总量的 41.05%~54.75%;另一个是成熟期,占吸收总量的 23.34%~32.93%。与磷素含量的趋势相似,分蘖期以 T₄ 处理的水稻磷素净吸收量最大,磷肥后移(T₃)处理较小;拔节期, T₂ 净吸收量最高,比常规施肥(T₁)高 1.70%。抽穗期和成熟期,配方施肥(T₂、T₃)及 T₄ 处理的水稻磷素净吸收量分别比常规施肥(T₁)提高 25.98%、82.27%、50.03% 和 44.01%、72.91%、43.25%,且在成熟期差异达显著水平($P < 0.05$);配方施肥中以 T₃ 处理净吸收量最大,成熟期比 T₂ 和 T₄ 提高 20.07% 和 20.71%,差异显著



柱上不同字母表示 0.05 水平上差异显著。

Different letters above the bars indicate significant difference at 0.05 level.

图2 不同生育期水稻的磷素净吸收量

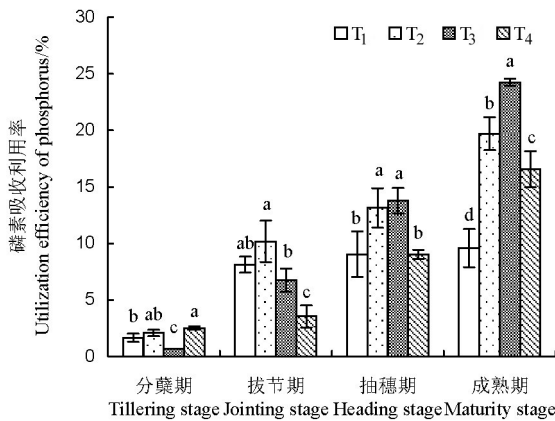
Fig. 2. Net P absorption of rice in different growth stages.

($P < 0.05$)。这说明配方施肥更有利于水稻对磷的吸收累积,而磷肥适当后移可以满足水稻生育后期对磷的需求。

相关分析表明,水稻的产量与成熟期穗部全磷含量和磷素总累积量显著正相关(0.9896*, 0.9898*)。

2.3 配方施肥及磷肥后移对水稻磷肥利用效率的影响

各施肥处理的磷素吸收利用率均随水稻生长发育进程呈现逐渐增加的趋势(图3),成熟期达到最高值(9.58%~24.25%)。由图3可以明显看出,常规施肥在拔节期以后,磷肥的吸收利用率增加很少,而配方施肥则持续增加。这可能是因为常规施肥氮磷钾比例不合理,造成养分吸收不平衡,不利于磷素后期的吸收与运转^[16,22]。分蘖期, T₄ 的磷素吸收利用率最高,与 T₁ 相比差异达显著水平($P < 0.05$)。拔节期, T₂ 处理的磷素吸收利用率逐渐上升并高于其他处理。抽穗期,配方施肥(T₂、T₃)处理均显著高于 T₁ 处理($P < 0.05$)。成熟期,各施肥处理磷素吸收利用率表现为 T₃ > T₂ > T₄ > T₁, T₂、T₃ 及 T₄ 处理磷素吸收利用效率与 T₁ 相比差异显著($P < 0.05$)。抽穗期和成熟期均以磷肥后移(T₃)处理磷素吸收利用率最高;成熟期比 T₂ 和 T₄ 分别提高了 23.07% 和 46.38%,差异显著($P < 0.05$)。30% 穗肥磷的吸收利用率高达 34.85%,由此可见,孕穗期追施磷肥对磷的吸收利用的重要意义。



柱上不同字母表示 0.05 水平上差异显著。

Different letters above the bars indicate significant difference at 0.05 level.

图3 不同生育期水稻磷素吸收利用率

Fig. 3. Utilization efficiency of P of rice in different growth periods.

由表 3 可以看出,各试验处理磷肥贡献率、吸收利用率、农学利用率和生理利用率均表现为 $T_3 > T_2 > T_4 > T_1$; T_2 、 T_3 处理的磷肥贡献率、吸收利用率和农学利用率与 T_1 相比均差异显著 ($P < 0.05$)。磷肥偏生产力以 T_4 最高 (99.58 kg/kg), T_2 、 T_3 和 T_4 处理的磷肥偏生产力分别比常规施肥 (T_1) 高 34.86%、44.42% 和 48.05%, 差异显著 ($P < 0.05$)。各施肥处理中, T_3 处理的磷肥贡献率、吸收利用率、农学利用率和生理利用率均为最高, 仅偏生产力略低于 T_4 。这说明磷肥后移能显著提高磷肥利用效率。

2.4 配方施肥及磷肥后移对水稻产量及经济效益的影响

从产量构成来看(表 4), 水稻有效穗数以 T_3 最高, T_5 最低; T_2 、 T_3 和 T_4 处理的有效穗数比常规施肥 (T_1) 高 2.55%、11.22% 和 8.84%。每穗总粒数

以 T_2 最多, 表现为 $T_2 > T_3 > T_1 > T_4 > T_5$ 。结实率和千粒重均以 T_4 最高 (93.33% 和 30.29g); 配方施肥 (T_2 、 T_3) 和 T_4 处理的结实率比 T_1 高 5.37%、12.72% 和 19.35%; 千粒重分别比 T_1 增加 2.99%、3.12% 和 3.95%, 且达差异显著水平 ($P < 0.05$)。从水稻产量方面看, 以 T_3 最高, 其次为 T_2 , 分别比常规施肥增产 23.30% 和 15.14%, 差异显著 ($P < 0.05$)。可见配方施肥和磷肥后移主要是通过影响有效穗数、结实率和千粒重等来提高水稻产量。

由表 5 可以看出, 常规施肥的成本最高, T_2 、 T_3 次之, T_4 的肥料投入量最少, 成本也最低; T_3 的收益最高, 常规施肥 T_1 最低。在相同施磷水平下, 磷肥后移 (T_3) 处理的成本投入与 T_2 相同, 而收益比 T_2 高 1903.50 元/hm²。从产投比来看, T_4 最大, 配方施肥 (T_2 、 T_3) 和 T_4 处理的水稻产投比分别比 T_1 提高 21.20%、29.74% 和 65.01%; 在相同施磷水平下, T_3 处理水稻产投比比 T_2 增加 7.04%。可见, 通过配方施肥, 尤其是磷肥后移达到了增产增效的目的。

3 讨论

3.1 磷肥后移对水稻磷素吸收的效应

本研究表明, 磷对水稻的生长发育和各种生理过程都有促进作用^[23]。水稻磷素在营养生长期主要集中在茎叶部, 到生殖生长期逐步向穗部转移, 促进水稻穗部的生长发育^[4,16]。磷肥后移处理在水稻营养生长期对磷素的吸收量略低于 T_2 , 可能是 T_2 将磷肥全部作基肥施入, 水稻前期生长与丰富的磷素供给有关。生殖生长期, 幼穗开始分化, 节间继续伸长, 茎叶及根继续生长, 需肥量增加, 此时也是决定每穗粒数的关键时期^[20]。磷肥后移处理在追施穗肥后对磷的吸收量迅速增加, 到成熟期茎叶穗磷含量比 T_2 高 12.14%、3.42% 和 4.73%, 总累积量

表 3 不同施肥处理对水稻磷肥利用效率的影响

Table 3. Influence of different fertilization practices on fertilizer-P utilization efficiency in rice.

处理 Treatment	磷肥贡献率 Contribution rate of P /%	磷肥吸收利用率 Absorption efficiency of P /%	磷肥农学利用率 Agronomic use efficiency of P /(kg · kg ⁻¹)	磷肥偏生产力 Partial factor productivity of P /(kg · kg ⁻¹)	磷肥生理利用率 Physiological efficiency of P /(kg · kg ⁻¹)
T ₁	4.90 ± 1.36 c	9.58 ± 1.69 d	3.17 ± 1.46 c	67.26 ± 3.36 c	73.15 ± 12.49 b
T ₂	15.40 ± 0.79 ab	19.70 ± 1.46 b	13.93 ± 0.50 ab	90.71 ± 5.86 b	162.22 ± 6.38 ab
T ₃	21.03 ± 3.60 a	24.25 ± 0.33 a	20.36 ± 4.89 a	97.14 ± 1.72 ab	191.81 ± 27.26 a
T ₄	10.12 ± 3.60 bc	16.56 ± 1.60 c	10.33 ± 3.51 bc	99.58 ± 1.59 a	132.82 ± 33.93 ab

表4 不同施肥处理对水稻产量构成的影响

Table 4. Influence of different fertilization practices on yield components of rice.

处理 Treatment	有效穗数 Productive panicle number /(10 ⁴ · hm ⁻²)	每穗总粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate /%	千粒重 1000-grain weight /g	产量 Yield /(kg · hm ⁻²)
T ₁	223.06 ± 10.96 ab	188.10 ± 19.58 b	78.57 ± 4.05 c	29.14 ± 0.30 b	8 272.5 ± 107.2 c
T ₂	228.75 ± 15.23 ab	248.45 ± 10.09 a	82.40 ± 4.33 bc	30.01 ± 0.21 a	9 525.0 ± 384.1 ab
T ₃	248.09 ± 6.13 a	203.50 ± 19.69 b	87.86 ± 3.62 ab	30.05 ± 0.05 a	10 200.0 ± 244.2 a
T ₄	242.78 ± 17.77 ab	173.40 ± 6.50 b	93.33 ± 4.04 a	30.29 ± 0.23 a	8 962.5 ± 137.1 bc
T ₅	210.54 ± 13.55 b	183.00 ± 10.59 b	80.65 ± 6.08 bc	29.23 ± 0.31 b	8 062.5 ± 266.9 c

表5 不同施肥处理对水稻产量及经济效益的影响

Table 5. Influence of different fertilization practices on yield and economic effects of rice.

处理 Treatment	产量 Yield /(kg · hm ⁻²)	增产 Yield increase /%	成本 Cost /(Yuan · hm ⁻²)	收益 Profit /(Yuan · hm ⁻²)	产投比 Output-input ratio
T ₁	8 272.5 c	—	218 8.83	233 28.4 5	10.66
T ₂	9 525.0 ab	15.14	207 9.42	268 60.5 0	12.92
T ₃	10 200.0 a	23.30	207 9.42	287 64.0 0	13.83
T ₄	8 962.5 bc	8.34	143 7.08	252 74.2 5	17.59

尿素、氯化钾、过磷酸钙和司尔特复合肥成本分别按 2.08 元/kg、2.38 元/kg、0.70 元/kg 和 2.70 元/kg 计算,稻谷按照 2.82 元/kg 计算,人工等未计入成本。

The prices of urea, KCl, calcium superphosphate, Sierite compound fertilizer and rice are 2.08, 2.38, 0.70, 2.70 and 2.82 Yuan/kg, respectively. The cost of labor is not included in the total cost.

提高 6.86%。水稻整个生育期对磷素的吸收呈现出两个高峰,一是拔节期,其吸磷量占整个生育期吸磷总量的 41.05%~54.75%;另一个是成熟期,占吸磷总量的 23.34%~32.93%。可见,水稻对磷的吸收主要集中在生育中期,但生长后期对磷仍具有较大吸收量,这与前人研究结果基本相符^[6,24]。磷肥后移处理提高了水稻生育后期对磷的吸收比例,满足水稻生长后期对磷的需求,从而促进养分合成与运转,加强光合作用,延长叶的功能期,使谷粒充实饱满,提高水稻产量^[20]。

3.2 磷肥后移对水稻磷肥利用效率的作用

磷肥农学利用率、偏生产力和生理利用率等作为磷肥增产效应的适宜评价指标^[25],受施肥因素和产量水平的影响较大。本研究表明,磷肥后移处理磷肥吸收利用率、农学利用率和偏生产力等均高于 T₂。磷肥后移处理磷肥吸收利用率随着水稻的生长发育一直呈现迅速增加的趋势,而 T₂处理下在水稻生长后期增加相对缓慢。这可能是后期养分供应不足,不利于水稻的生长发育和籽粒灌浆造成的。磷肥后移有利于后期磷的供应,满足水稻植株生育后期对磷的需求,促进水稻根系良好生长,代谢作用

旺盛抗逆性增强,改善水稻体内物质转运分配,促进磷向穗部的转移^[26],增加水稻有效穗数和结实率等,从而提高水稻产量^[27],同时也提高了磷肥的利用效率。

因此,在水稻磷肥施用过程中,分基、追两次施用,合理优化施用比例,不仅能减少土壤对磷的固定,而且能满足水稻生育期的两个吸磷高峰的磷素吸收,进而提高抽穗后干物质积累量和吸磷量,提高产投比和磷肥利用效率,达到增产增效的目的^[28]。

谢辞:感谢安徽农业大学资源与环境学院硕士研究生陈曦、何昌芳、于子旋、王景、马婷婷、张咪咪等在样品及数据分析过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2010.
Editorial Board of China Agriculture Yearbook. China Agriculture Yearbook: 2010. Beijing: China Agriculture Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 陆景陵. 植物营养学. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.
Lu J L. Plant nutrition science. Beijing: Beijing Agricultural U-

- niversity Press, 1994. (in Chinese)
- [3] Ma W Q, Ma L, Li J H, et al. Phosphorus flows and use efficiencies in production and consumption of wheat, rice, and maize in China. *Chemosphere*, 2011, 84 (6): 814-821.
- [4] 郭朝晖, 李合松, 张杨珠, 等. 磷素水平对杂交水稻生长发育和磷素运移的影响. 中国水稻科学, 2002, 16: 54-59.
Guo Z H, Li H S, Zhang Y Z, et al. Effect of phosphorus levels on hybrid rice growth and characteristics of phosphorus transportation. *Chin J Rice Sci*, 2002, 2: 54-59. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王海龙, 孙羲. 磷对水稻生长发育的影响及其生理效应. 浙江农业大学学报, 1988, 1: 11-17.
Wang H L, Sun X. Effect of phosphorus on the growth physiological metabolisms in rice plant. *Acta Agric Univ Zhejiang*, 1988, 1: 11-17. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘运武. 磷对杂交水稻生长发育及其生理效应影响的研究. 土壤学报, 1996, 3: 308-316.
Liu Y W. Effect of phosphorus on growth and physiological effect of hybrid rice. *Acta Ped Sin*, 1996, 3: 308-316. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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. 中国水稻科学, 2007, 21: 179-184.
Li C L, He Y Q, Wang Y L, et al. Effect of N, P and K fertilizer application on rice grain yield in red paddy soil. *Chin J Rice Sci*, 2007, 2: 179-184. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略. 植物学通报, 2007, 6: 687-694.
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, et al. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies. *Chin Bull Bot*, 2007, 6: 687-694. (in Chinese with English abstract)
- [9] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, 418 (6898): 671-677.
- [10] 戢林, 张锡洲, 李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建. 中国农业科学, 2011, 1: 84-92.
Ji L, Zhang X Z, Li Y X. Establishing fertilization recommendation index of paddy soil based on the ‘3414’ field experiments in the middle of Sichuan hilly regions. *Sci Agric Sin*, 2011, 1: 84-92. (in Chinese with English abstract)
- [11] 何昌芳, 李鹏, 郜建红, 等. 配方施肥及氮肥后移对单季稻氮素累积和利用率的影响. 中国农业大学学报, 2015, 20(1): 144-149.
He C F, Li P, Gao H J, et al. Nitrogen accumulation and use efficiency of single rice under soil testing and nitrogen distribution. *J China Agric Univ*, 2015, 20(1): 144-149. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭文, 郭华春, 卢义宣, 等. 不同氮肥施用量与磷肥运筹对云光 109 叶长及产量的影响. 西南农业学报, 2012, 3: 935-939.
Guo W, Guo H C, Lu Y X, et al. Effect of different nitrogen levels and phosphorous fertilizer managements on leaf length and grain yield of Yunguang 109. *Southwest China J Agric Sci*, 2012, 3: 935-939. (in Chinese with English abstract)
- [13] 田忠孝, 曹季江. 磷肥残效研究. 土壤, 1997, 5: 251-253, 280.
Tian Z X, Cao J J. Residual effect of phosphate research. *Soil*, 1997, 5: 251-253/280. (in Chinese)
- [14] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. P 肥施入土壤后的变化进程及对 P 淋失的影响. 生态与农村环境学报, 2006, 3: 80-83.
Zhou Q L, Zhao M Q, Lu C Y, et al. Change of P fertilizer after application into soil and its influence on P leaching loss. *J Ecol Rural Environ*, 2006, 3: 80-83. (in Chinese with English abstract)
- [15] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展. 作物杂志, 2010, 1: 12-14.
Cheng M F, He P, Jin J Y. Advance of phosphate recovery rate in Chinese main crops. *Crops*, 2010, 1: 12-14. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈敏, 马婷婷, 丁艳萍, 等. 配方施肥对水稻养分吸收动态及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 1: 237-246.
Chen M, Ma T T, Ding Y P, et al. Effects of formula fertilizer application on nutrient uptake and grain yield of rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 1: 237-246. (in Chinese with English abstract)
- [17] 付立东, 王宇, 李旭, 等. 磷肥不同施用量对水稻产量及磷肥利用率的影响. 北方水稻, 2011, 4: 20-24.
Fu L D, Wang Y, Li X, et al. Effect of phosphorus fertilizer amounts on yield of rice. *Northrice*, 2011, 4: 20-24. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王苏影, 潘晓华, 吴建富, 等. 施磷量对双季早、晚稻产量及稻米品质的影响. 中国土壤与肥料, 2011, 2: 39-43.
Wang S Y, Pan X H, Wu J F, Effect of amount P-applied on yield and rice quality of double-cropping rice. *Soil Fert Sci China*, 2011, 2: 39-43. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘海涛, 童良军, 赵立琴, 等. 寒地水稻磷素适宜施用量的研究. 黑龙江八一农垦大学学报, 2011, 4: 15-19.
Liu H T, Tong L J, Zhao L Q, et al. The study on reasonable dosage of phosphate fertilization in paddy in cold areas. *J Heilongjiang Bayi Agric Univ*, 2011, 4: 15-19. (in Chinese with English abstract)
- [20] 廖佳丽. 测土配方施肥水稻 3414 肥料效应的研究. 中国农学通报, 2010, 13: 213-218.
Liao J L. Effects of formula fertilization on rice. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 13: 213-218. (in Chinese with English abstract)
- [21] 宇万太, 马强, 周桦, 等. 不同施肥模式对下辽河平原水稻生态系统生产力及养分收支的影响. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1350-1354.
Yu W T, Ma Q, Zhou H, et al. Productivity and nutrient budget of rice ecosystem in lower reaches of Liaohe River plain under effects of different fertilization patterns. *Chin J Ecol*, 2007, 26(9): 1350-1354. (in Chinese with English abstract)
- [22] Li M, Zhang H C, Yang X, et al. Accumulation and utilization

- of nitrogen, phosphorus and potassium of irrigated rice cultivars with high productivities and high N use efficiencies. *Field Crops Res*, 2014, 161: 55-63.
- [23] 韦正宝, 曾维宾, 刘永贤, 等. 桂中双季稻区磷肥用量对水稻生长与产量的影响. *磷肥与复肥*, 2011, 6: 74-75.
Wei Z B, Zeng W B, Liu Y X, et al. Effects of phosphate fertilizer dosages on growth and yield of rice in double cropping rice region of Guangxi. *Phosp Comp Fert*, 2011, 6:74-75. (in Chinese with English abstract)
- [24] 罗莲香, 林书蓉, 胡梓汲, 等. 杂交稻的吸磷特性分析. *广东农业科学*, 1989, 5: 16-19.
Luo L X, Lin S R, Hu Z J, et al. Analysis on the phosphorus absorption properties of hybrid rice plants. *Guangdong Agric Sci*, 1989, 5:16-19. (in Chinese)
- [25] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 5: 915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Ped Sin*, 2008, 5:915-924. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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. *中国水稻科学*, 2011, 25(6): 645-653.
Wang W N, Lu J W, He Y Q, et al. Effects of N, P, K Fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(6): 645-653. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王苏影, 潘晓华, 吴建富, 等. 磷肥运筹对双季早、晚稻产量与品质的影响. *作物杂志*, 2011(4): 63-66.
Wang S Y, Pan X H, Wu J F, et al. Effects of phosphate application on yield and quality of double-cropping rice. *Crops*, 2011(4): 63-66. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李晓蓉, 顾书忠, 王春姐. 磷肥不同施用量和施用时期对水稻产量性状的影响初探. *上海农业科技*, 2013(5): 101-102, 117.
Li X R, Gu S Z, Wang C J. Effect of phosphate application amount and period on yield of rice. *Shanghai Agric Sci Technol*, 2013(5):101-102/117. (in Chinese)