

磷肥后移与减量对水稻磷素利用效率的影响

龚海青¹ 张敬智¹ 陈晨¹ 郜红建^{1*} 常江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)

摘要 为研究磷肥后移及磷肥减量对水稻产量和磷肥利用率的影响,采用田间试验,通过对比分析配方施肥与磷肥后移及减量条件下水稻磷素吸收累积量、利用效率及产量的差异。结果表明:在相同的施磷水平下,与磷肥全部基施处理相比,磷肥后移30%处理($m_{\text{基肥}}:m_{\text{穗肥}}=7:3$)使水稻成熟期磷素含量提高了4.3%,磷素总累积量和净累积量分别提高了12%和25.6%,磷肥贡献率、农学利用率、偏生产力和吸收利用率提高了27.7%、33.6%、8.2%和27.3%,水稻产量提高了8.2%;而磷肥减量30%后移30%处理和磷肥减量50%后移30%处理的水稻产量则分别减少了1.8%和6.5%,但皆差异性不显著($P>0.05$)。配方施肥条件下,磷肥适当后移可增加水稻生育后期磷素含量、净吸收量和磷素累积量,提高水稻产量和磷肥利用效率;磷肥适当减量可维持水稻正常产量。

关键词 水稻;磷肥;产量

中图分类号 S511

文章编号 1007-4333(2017)05-0144-09

文献标志码 A

Effect of phosphorus fertilizer postpone and reduction on phosphorus utilization efficiency of rice

GONG Haiqing¹, ZHANG Jingzhi¹, CHEN Chen¹, GAO Hongjian^{1*},

CHANG Jiang¹, ZHANG Ligan¹, DING Yuyu²

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. Soil and Fertilizer Station of Huaining, Huaining 246100, China)

Abstract To study the effect of phosphorus fertilizer postpone and reduction on phosphorus utilization efficiency of rice during the growth period, field experiments related to soil testing and phosphorus recommendation as well as phosphorus fertilizer postpone and reduction during rice growth period were carried out to analyze the rice yield, phosphorus accumulation and phosphorus use efficiency. Results showed that under the same phosphorus level, compared with the soil testing and P fertilizer recommendation treatments (P used as basal fertilizer), the P concentration as well as the amounts of total and net phosphorus accumulation in rice during the later growth period in T3 (basal P : top dressed P = 7 : 3) were 4.3%、12% and 25.6% higher than those in T2 (P used as basal fertilizer). Meanwhile, the contribution rate, agronomic use efficiency, partial fertilizer productivity and absorption efficiency of phosphorus in treatments of phosphorus fertilizer postpone 30% were increased by 27.7%、33.6%、8.2% and 27.3%, and the rice yield increased by 8.2% than that in T2 (P used as basal fertilizer), respectively. The rice yields in P fertilizer recommendation treatments (T2, P used as basal fertilizer), were 1.8% and 6.5% higher than that in reduction 30% plus postpone 30% of phosphorus fertilizer and the treatments of reduction 50% plus postpone 30% of phosphorus fertilizer, but the difference was not significant ($P>0.05$). Results from this study indicated that reasonable amount of phosphorus fertilizer postpone increased phosphorus uptake and accumulation, P utilization efficiency and rice yield

收稿日期: 2016-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(31328020); 国家科技支撑计划项目资助(2013BAD07B08, 2012BAD04B09)

第一作者: 龚海青, 硕士研究生, E-mail: Gonghq0805@126.com

通讯作者: 郜红建, 教授, 主要从事养分资源高效利用研究, E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

during the growth period; and reasonable amount of phosphorus fertilizer reduction maintained normal production of rice.

Keywords rice; phosphorus; grain yield

水稻是我国主要粮食作物^[1], 种植面积约占全国耕地面积的 27%, 产量约占全国粮食总产量的 42%^[2]。磷素是作物生长发育必需的大量营养元素, 是作物体内核酸、蛋白质、磷脂和 ATP 等生命大分子的重要组分, 参与各种代谢过程, 对作物生长发育及产量形成起着重要的作用^[3-5]。研究表明, 施用磷肥能改善水稻生长发育状况, 有利稻株正常分蘖, 促进水稻对氮、钾等营养元素的吸收, 提高水稻的产量和品质^[6]。目前, 我国农业生产中, 磷肥主要作为基肥, 在耕田时施用。磷素在土壤中易被固定、不易移动等特点使其被作物吸收利用的效率降低^[7-9], 随水流失造成磷肥资源浪费和面源污染等问题^[10-12]。张志剑等^[13]研究显示, 高水平磷肥的投入促进了土壤富磷化, 并提高了土壤磷素流失的潜能。刘兆德等^[14]研究表明, 太湖流域地表水中的总磷中来自于农业面源的占 39%。另有研究表明, 农田排水中的磷是引起农业非点源污染的主要原因之一^[15]。改变传统的施肥方式, 由单一地追求高产向实现水稻高产、肥料高效、环境友好方向转变, 并根据土壤养分含量和水稻对养分的实际需求, 科学制定水稻磷肥运筹方式是提高作物磷肥利用效率, 减少磷素损失的重要途径。前人^[16]研究认为, 磷肥主要在水稻生育前期吸收, 生育后期水稻体内的磷素主要来源于体内磷的转移和再分配。我们的试验结果显示, 水稻分蘖期吸收的磷仅占整个生育期吸收磷的 2.6% 左右, 而在灌浆抽穗期吸收最多, 约占 44.3%。减少基肥磷素施用量, 增加穗肥施用量, 对于满足水稻生长后期对磷素、提高水稻产量和磷肥利用效率有重要意义。长期以来, 磷肥施用量高, 造成土壤磷的积累, 降低了养分利用效率和施肥效益^[17]。而基于优化环境的减量化施肥备受关注^[18]。龚蓉等^[19]研究显示, 减量施用磷肥可以降低旱地总磷和可溶性磷的渗漏损失。段然等^[20]研究表明, 减量施用磷肥降低了径流中的磷素流失量。从源头上减少磷排放, 阻止其进入水体, 是控制农业面源污染的关键。因此, 研究配方施肥条件下的磷肥合理施用对提高磷肥利用率和环境保护均具有重要意义。当前研究多关注水稻磷肥施用量和不同施用措施对水稻产量和磷肥利用率的影响^[21-22], 然而有关磷肥后移与减量对水稻磷素利用效率的影响缺乏深入研

究。本研究采用田间试验法, 探讨配方施肥条件下磷肥后移和减量对水稻植株磷素含量、磷素累积量、磷肥利用率及水稻产量的影响, 以为水稻磷肥科学施用提供理论依据。

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, 地处长江中下游北岸, 大别山南麓前沿, 介于东经 116°28′~117°03′, 北纬 30°20′~30°50′。试验点地势平坦, 排灌方便, 适宜水稻种植。

1.2 试验材料

1) 供试作物: 水稻丰两优 688。

2) 供试土壤: 水稻土, 养分为: 全氮 1.49 g/kg、碱解氮 144.50 mg/kg、速效磷 10.02 mg/kg、速效钾 62.00 mg/kg; 有机质 24.56 g/kg。

3) 供试肥料: 农家福 BB 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

根据怀宁县 2006 年以来的土壤养测定数据和“3414”田间氮磷钾肥效试验, 按照目标产量法 (9 000 kg/hm²) 制定了全县大配方 1 (简称配方施肥, T₂); 在全县大配方 1 基础上, 把 30% 和 50% 的基施磷肥后移到穗肥, 形成配方 2 (简称磷肥后移 30%, T₃) 和配方 3 (简称磷肥后移 50%, T₄); 在配方 2 的基础上, 将磷肥施用量分别减量 30% 和 50%, 形成配方 4 (简称磷肥减量 30% 后移 30%, T₅) 和配方 5 (简称磷肥减量 50% 后移 30%, T₆); 并设置全县大配方无磷肥对照处理 (简称无磷对照 T₇); 把当地农民的习惯施肥设为常规施肥 (简称常规施肥, T₁)。具体施肥量和肥料运筹见表 1。试验共设置 7 个处理, 每个处理 3 次重复, 随机区组排列, 各试验小区面积为 40 m²。小区四周均作为田埂, 田埂用塑料薄膜覆盖, 单独排灌。水稻于 2015 年 5 月 19 日播种, 6 月中旬移栽秧苗, 10 月中旬收获。在试验田周围作 2 m 宽的保护行。插植规格 (行株距) 为 30 cm × 15 cm, 栽插密度 227 610 棵/hm², 910 棵/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。

表1 水稻田间试验设计方案

Table 1 Scheme design field experiment of rice

处理 Treatment	肥料施用量/(kg/hm ²) Amounts of fertilizer Application			氮肥施用质量比 (基肥:分蘖肥:穗肥)/% N fertilizer application proportion (Basic:Tillering:Panicle)	磷肥施用质量比 (基肥:穗肥)/% P fertilizer application proportion (Basic:Panicle)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O*		
T1-常规施肥	199	123	72	75:25:0	100:0
T2-配方1	180	90	105	40:30:30	100:0
T3-配方2	180	90	105	40:30:30	70:30
T4-配方3	180	90	105	40:30:30	50:50
T5-配方4	180	60	105	40:30:30	70:30
T6-配方5	180	45	105	40:30:30	70:30
T7-无磷对照	180	0	105	40:30:30	

注: * 钾肥全部基施。

Note: * Potassium fertilizer was all applied as the basic fertilizer.

1.4 测定项目与方法

在水稻生长的(分蘖期,拔节期,抽穗期和成熟期)分别从每个小区随机取2株水稻,经自来水和蒸馏水冲洗干净后,茎、叶、穗分别装入样品袋,先于105℃杀青30min,75℃下烘干至恒重,测定其干物质质量。植株样品粉碎后,用H₂SO₄(浓)-H₂O₂消煮,钼锑钒比色法测全磷含量。

1.5 数据分析

1)各生育期(茎、叶、穗)磷素累积量/(g/株)=干重×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)磷肥贡献率/%=(施磷肥区所获的作物产量-不施磷肥区所获的作物产量)/施磷肥区所获的作物产量×100%;

5)磷肥吸收利用率/%=(施磷肥区磷素总累积量-不施磷肥区磷素总累积量)/施磷量×100%;

6)磷肥农学利用率/(kg/kg)=(施磷肥区所获的作物产量-不施磷肥区所获的作物产量)/施磷量;

7)磷肥偏生产力/(kg/kg)=施磷肥后所获的作物产量/施磷量;

数据处理及作图使用EXCEL 2007,数据统计

分析采用SPSS 20.0,数据差异显著性分析采用Duncan's法。

2 结果与分析

2.1 磷肥后移及减量对水稻体内磷素含量的影响

从表2可以看出,在不同生育期,施磷处理(T1、T2、T3、T4、T5和T6)水稻磷素含量均高于不施磷处理(T7)。在分蘖期,常规施肥(T1)处理的水稻植株磷素含量最高为3.49g/kg,分别比其他施磷(T2、T3、T4、T5和T6)处理的水稻植株磷素含量高6.6%、8.3%、13.2%、16.9%和18.1%,且均达到差异显著水平($P<0.05$)。在拔节期,常规施肥(T1)处理的水稻植株茎和叶磷素含量仍最高,分别为2.74和2.68g/kg。在抽穗期,水稻植株体内磷素逐渐向穗部转移,但磷素含量主要集中在水稻植株茎部(2.25~3.10g/kg),以配方施肥(T2)处理的水稻植株茎部磷素含量最高为3.10g/kg,分别比其他施磷(T1、T3、T4、T5、T6)处理的水稻植株茎部磷素含量高24.2%、1.3%、3.9%、8.4%和15.5%,且配方施肥(T2)处理的水稻植株茎部磷素含量与施肥处理(T1、T5和T6)相比均达到差异显著水平($P<0.05$)。在成熟期,水稻植株体内磷素以穗部含量最高(2.25~3.28g/kg),而茎和叶磷素含量显著降低。磷肥后移30%(T3)处理的水稻穗部磷素含量在成熟期显著增加,水稻穗部磷素

表 2 不同生育期水稻体内全磷的含量

Table 2 Contents of total P accumulated in rice at different growth stages g/kg

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage			抽穗期 Heading stage			成熟期 Mature stage		
	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike
T1	3.49±0.09 a	2.74±0.03 a	2.68±0.02 a	2.35±0.01 d	2.15±0.06 b	2.20±0.13 b	1.10±0.07 c	0.78±0.05 d	2.99±0.03 c
T2	3.26±0.08 b	2.59±0.14 ab	2.56±0.13 ab	3.10±0.02 a	2.77±0.14 a	2.37±0.02 a	1.38±0.08 a	1.12±0.08 ab	3.14±0.10 b
T3	3.20±0.04 bc	2.51±0.06 abc	2.41±0.16 bc	3.06±0.06 a	2.67±0.14 a	2.42±0.02 a	1.41±0.11 a	1.17±0.02 a	3.28±0.02 a
T4	3.03±0.10 cd	2.32±0.07 c	2.46±0.11 b	2.98±0.06 a	2.59±0.02 a	2.37±0.10 a	1.35±0.08 ab	1.13±0.02 a	3.03±0.10 c
T5	2.90±0.08 de	2.41±0.13 bc	2.23±0.18 cd	2.84±0.17 b	2.58±0.11 a	2.29±0.07 ab	1.27±0.11 ab	1.04±0.04 ab	2.95±0.03 c
T6	2.86±0.21 de	2.32±0.08 c	2.19±0.04 d	2.62±0.07 c	2.57±0.11 a	2.22±0.03 b	1.20±0.08 bc	1.01±0.07 c	2.79±0.03 d
T7	2.68±0.15 e	2.30±0.03 c	2.20±0.05 cd	2.25±0.11 d	1.99±0.13 b	2.02±0.02 c	0.91±0.04 d	0.69±0.03 d	2.250.02 e

注：同列中 a~e 不同字母表示 0.05 水平差异显著。下同。

Note: The letter from a to e within column indicate significant difference at 0.05 level. The same as below.

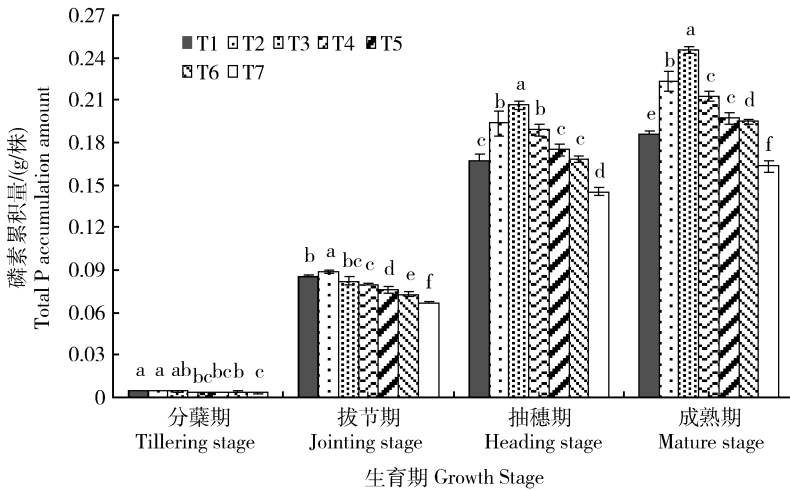
含量比配方施肥(T2)和磷肥后移50%(T4)处理分别高4.3%和7.6%,均达到显著差异水平($P < 0.05$)。说明适当比例追施穗肥有利于水稻成熟期对磷素的吸收。

2.2 磷肥后移及减量对水稻体内磷素累积量的影响

水稻磷素总累积量随水稻生育期的推移而呈现逐渐增加的趋势,不同施肥处理水稻体内的磷素累积量呈上升趋势,分蘖期至拔节期和拔节期至抽穗期增加迅速,而抽穗期至成熟期增加相对缓慢,不同施肥处理的水稻磷素总累积量在成熟期均达到最大值(0.16~0.25 g/株)(图1)。在分蘖期,常规施肥(T1)处理的水稻磷素总累积量略高于其他施肥处理,但差异不显著。在拔节期,配方施肥(T2)处理的水稻植株磷素总累积量最高。在抽穗期,相同的施磷水平下,磷肥后移30%(T3)处理的水稻植株磷素总累积量分别比配方施肥(T2)处理和磷肥后移

50%(T4)处理高6.4%和8.7%。在成熟期,配方施肥(T2)、磷肥后移(T3和T4)、磷肥减量后移(T5和T6)处理的水稻磷素总累积量均高于常规施肥(T1),以磷肥后移30%(T3)处理最高,与其他施肥处理均有显著差异($P < 0.05$),表现为:磷肥后移30%(T3) > 配方施肥(T2) > 磷肥后移50%(T4) > 磷肥减量30%,后移30%(T5) > 磷肥减量50%,后移30%(T6) > 常规施肥(T1) > 全县大配方无P对照(T7),磷肥后移30%(T3)处理的水稻磷素总累积量分别比配方施肥(T2)处理和磷肥后移50%(T4)处理高9.1%和13.3%,这可能与磷肥后移30%处理穗肥分配比例合理,利于水稻生育后期磷素累积有关。

相关性分析表明,水稻产量与成熟期穗部全磷含量和磷素总累积量存在极显著正相关,相关系数(R)分别达0.755**和0.771**。



注:图中 a~d 不同字母表示 0.05 水平差异显著

图 1 不同生育期水稻的磷素总累积量

Fig. 1 The total P accumulated of rice in different growth periods

水稻各生育期磷素净吸收量有较大差异(图2)。在分蘖期和成熟期,水稻磷素净吸收量相对较少,而在拔节期和抽穗期,水稻磷素净吸收量达到2个峰值。在分蘖期,常规施肥(T1)处理水稻磷的净吸收量最高,为4.8 mg/株,分别比其他施磷肥处理(T2、T3、T4、T5、T6)高4.4%、1.5%、29.0%、26.1%、21.8%。在拔节期,施磷处理(T1、T2、T3、T4、T5)水稻磷素净吸收量均显著高于不施磷处理(T7)($P < 0.05$)。在抽穗期,以磷肥后移30%处理(T3)的水稻磷素净吸收量最高,占整个生育期的

38.4%。在成熟期,施磷处理(T2、T3、T4、T5、T6)的水稻磷素净吸收量均高于常规施肥(T1),其大小顺序为:磷肥后移30%(T3) > 配方施肥(T2) > 磷肥减量30%,后移30%(T5) > 磷肥减量50%,后移30%(T6) > 磷肥后移50%(T4) > 常规施肥(T1);在相同的施磷水平下,磷肥后移30%(T3)处理的水稻磷素净吸收量分别比配方施肥(T2)和磷肥后移50%(T4)高23.7%和38.0%,均达到差异显著性水平($P < 0.05$)。由此可见,磷肥适量后移可促进水稻生育后期对磷素的吸收。

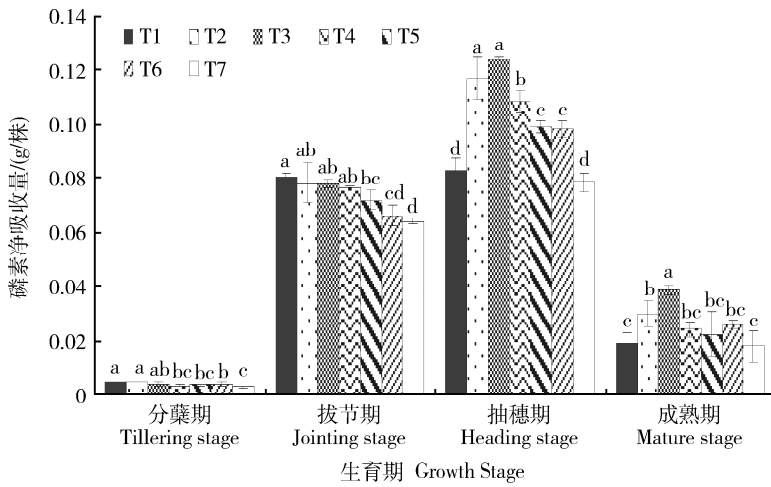


图 2 不同生育期水稻的磷素净吸收量

Fig. 2 The Net P absorption of rice in different growth periods

2.3 磷肥后移及减量对水稻产量及其构成因子的影响

由表 3 可知,水稻产量以磷肥后移 30% (T3) 处理最高(12 883.5 kg/hm²),以无磷对照 (T7) 处理最低(9 747.0 kg/hm²),其产量大小顺序为:磷肥后移 30% (T3) > 配方施肥 (T2) > 磷肥减量 30%, 后移 30% (T5) > 磷肥减量 50%, 后移 30% (T6) > 常规施肥 (T1) > 磷肥后移 50% (T4) > 无磷对照 (T7)。施磷处理 (T2、T3、T5 和 T6) 的水稻产量分别是 11 826.0、12 883.5、11 614.5 和 11 061.0 kg/hm², 均显著高于无磷对照 (T7) ($P < 0.05$) 和常规施肥 (T1), 增产幅度依次是 8.9%、16.4%、7.3% 和 2.7%。相同施磷水平 (T2、T3、T4) 下,磷肥后移 30% 处理 (T3) 水稻产量比配方施肥 3 比磷肥后移 50% (T4) 分别增加了 8.2% 和 17.9%, 说明磷肥适

量后移能有效提高水稻的产量。磷肥后移 50% 处理 (T4) 水稻减产可能是由于水稻生育前期磷素供应不足,影响生育后期生育器官的发育,单位面积有效穗数减少,导致减产。与配方施肥处理 (T2) 相比,磷肥减量 30%, 后移 30% (T5) 和磷肥减量 50%, 后移 30% (T6) 处理的水稻产量分别减少了 1.8% 和 6.5%, 差异性不显著 ($P > 0.05$)。

从产量构成要素来看,不同施肥处理间水稻结实率差异不显著,单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重分别以磷肥后移 30% (T3)、磷肥减量 30%, 后移 30% (T5) 和配方施肥 (T2) 处理最高,水稻产量在磷肥后移 30% (T3) 与施肥处理 (T2、T5) 之间差异显著 ($P < 0.05$),表明磷肥后移 30% (T3) 处理促进了水稻有效分蘖的发生,显著增加了单位面积有效穗数,提高水稻产量。

表 3 不同施肥处理对水稻产量构成的影响

Table 3 Influence of different fertilization practices on yield components of rice

处理 Treatment	有效穗数/($\times 10^4$ /hm ²) Valid panicle	每穗粒数 Filled grain	结实率/% Filled grain rate	千粒重/g 1 000-grain weight	产量/(kg/hm ²) Seed yield
T1	242.9 ± 12.8 ab	193.0 ± 4.00 abc	97.2 ± 0.50 a	27.3 ± 0.40 c	10 765.5 ± 37.56 cd
T2	264.5 ± 28.3 ab	198.3 ± 12.50 ab	96.4 ± 1.05 a	29.0 ± 0.36 a	11 826.0 ± 429.43 b
T3	282.3 ± 24.5 a	191.7 ± 16.62 abc	96.9 ± 0.35 a	28.2 ± 0.45 b	12 883.5 ± 444.82 a
T4	238.7 ± 14.7 ab	180.5 ± 3.50 bc	97.4 ± 1.19 a	28.3 ± 0.32 b	10 581.0 ± 181.41 de
T5	263.1 ± 10.5 ab	199.0 ± 3.00 a	95.2 ± 2.71 a	28.1 ± 0.38 b	11 614.5 ± 436.19 bc
T6	267.9 ± 16.7 ab	176.0 ± 11.53 c	96.8 ± 0.61 a	28.1 ± 0.21 b	11 061.0 ± 445.90 bcd
T7	236.9 ± 7.8 b	185.5 ± 2.50 abc	95.9 ± 1.05 a	27.3 ± 0.35 c	9 747.0 ± 179.87 e

2.4 磷肥后移及减量对水稻磷肥利用效率的影响

不同施肥处理对磷肥利用率有显著的影响(表4),同一施磷水平(T2、T3和T4),磷肥贡献率、磷肥农学利用率、磷肥偏生产力和磷肥吸收利用率均呈:磷肥后移30%(T3) > 配方施肥(T2) > 磷肥

后移50%(T4)的规律,其中磷肥后移30%(T3)的磷肥贡献率、磷肥农学利用率、磷肥偏生产力和磷肥吸收利用率分别比配方施肥(T2)高27.6%、33.6%、8.2%和27.3%,且均达到差异显著($P < 0.05$),这说明磷肥后移可以显著提高磷肥利用效率。

表4 不同施肥处理对水稻磷肥利用效率的影响

Table 4 Influence of different fertilization practices on fertilizer-P utilization efficiency of rice

处理 Treatment	磷肥贡献率/% Contribution rate of P	磷肥农学利用率/(kg/kg) Agronomic use efficiency of P	磷肥偏生产力/(kg/kg) Partial factor productivity of P	磷肥吸收利用率/% Absorption efficiency of P
T1	9.5±1.51 d	8.3±1.31 b	87.2±0.31 e	4.2±1.10 c
T2	17.5±3.50 b	23.1±5.81 a	131.4±6.75 c	15.2±2.65 b
T3	24.2±4.00 a	34.8±6.93 a	143.1±4.94 c	20.9±1.44 a
T4	6.4±0.47 d	7.5±0.47 b	115.8±1.72 d	12.6±0.56 b
T5	15.3±3.90 bc	29.8±9.30 a	192.3±12.30 b	13.0±0.86 b
T6	11.8±2.87 cd	29.2±8.24 a	245.8±9.91 a	14.3±0.85 b

3 讨论

3.1 磷肥后移及减量对水稻磷素吸收的效应

磷肥的投入对水稻的生长发育和生理过程都有促进作用。在分蘖期和拔节期,常规施肥(T1)的水稻植株各部位磷素含量和累积量均高于其他施肥处理,而在抽穗期和成熟期,除了无磷对照(T7)外,常规施肥(T1)的水稻植株各部位磷素含量均低于其他施肥处理。可能的原因是:常规施肥时,磷肥集中施用 in 基肥和分蘖肥上,水稻前期生长有丰富的磷素供给,但磷素在土壤中易被固定,不利于水稻后期对磷素的吸收^[23]。在成熟期,磷肥后移30%到穗肥(T3),促进了水稻灌浆成熟期对磷素的吸收,其穗部磷素含量比配方施肥(T2)和磷肥后移50%(T4)处理分别高4.3%和7.6%,总累积量分别高9.1%和13.3%,这主要是因为水稻抽穗后籽粒灌浆所需要的营养物质大部分来自于光合作用,磷肥后移30%到孕穗期,有利于后期磷的供应,促进水稻根系对磷的吸收和体内磷向穗部的转移,增加磷素累积,促进籽粒灌浆。相对于磷肥后移50%(T4)的处理而言,磷肥后移30%(T3)的处理则更有利于水稻在生长过程中对磷素的吸收,这可能是因为磷肥后移30%到穗肥处理使磷肥分配比例更加合理,既能满足水稻生长前期对磷的需求,又能对水稻后期提供

充足磷素供应。磷肥减量30%,后移30%(T5)和磷肥减量50%,后移30%(T6)处理的水稻植株穗部磷含量均低于磷肥后移30%(T3)处理,这可能与磷肥减量后,磷素供应不足,不利于水稻生育后期生长发育和籽粒形成有关,这与刘运武等^[24]研究相符合。

3.2 磷肥后移及减量对水稻增产作用

常规施肥处理(T1),水稻产量较低,可能由于常规施肥磷肥主要集中在生育前期,分配比例不合适,导致水稻前期生长旺盛,无效分蘖数增多,而后期磷肥供应不足,影响生殖器官的发育,造成水稻减产,这与李挺亮等^[25]的研究结果一致。本研究表明,在同一施磷水平(T2、T3、T4)下,磷肥后移30%(T3)处理的水稻产量最高,比配方施肥处理(T2)增产8.4%。而磷肥后移50%(T4)处理的水稻产量则低于配方施肥(T2)。这可能是因为:磷肥后移50%,水稻在生育前期磷素供应不足,影响水稻生长发育和对磷的吸收。磷肥减量30%,后移30%(T5)和磷肥减量50%,后移30%(T6)处理的水稻产量分别比配方施肥(T2)处理减少了1.8%和6.5%,但差异不显著。这表明,适当减少磷肥使用量并且孕穗期适当追施穗肥可维持水稻正常产量。这与段然等^[21]研究结果一致。

3.3 磷肥后移及减量对水稻磷肥利用效率的影响

研究结果还表明,磷肥后移30%(T3)处理的水

稻磷肥贡献率、磷肥农学利用率、磷肥偏生产力以及磷肥吸收利用率均高于配方施肥(T2)。这可能因为孕穗追施磷肥后,磷肥分配比例趋于合理,提高了分蘖成穗率,增加了水稻植株有效穗数和水稻产量,提高了磷肥贡献率、磷肥农学利用率、磷肥偏生产力。磷肥减量30%,后移30%(T5)和磷肥减量50%后移30%(T6)处理的水稻磷肥偏生产力显著高于磷肥后移30%(T3)($P < 0.05$),但磷肥贡献率、磷肥农学利用率、磷肥吸收利用率均低于磷肥后移30%(T3)。在成熟期,水稻的产量与穗部全磷含量和磷素总累积量均存在极显著正相关,这可能与水稻后期磷素累积量累积较多,有利于提高产量和磷肥利用率有关。

综上所述,在水稻磷肥施用过程中,减少基肥磷素施用量,增加穗肥施用量,可提高水稻抽穗后干物质积累量和吸磷量,进而提高磷肥利用效率,达到增产增效目的。

4 结 论

1)磷肥后移30%(T3)施肥处理显著增加了水稻成熟期磷素累积量和净累积量($P < 0.05$),提高磷肥利用率,其水稻产量显著高于配方施肥(T2)($P < 0.05$);磷肥后移50%增加了水稻成熟期磷素累积量和净累积量,提高了水稻磷肥利用率,但没有达到增产的效果。

2)磷肥减量30%,后移30%(T5)与磷肥减量50%,后移30%(T6)施肥处理不仅能降低磷肥投入量,还有助于提高磷肥的利用率,减量施肥对水稻产量无显著影响,适当减少磷肥使用量并且孕穗期适当追施磷肥可维持水稻正常产量。

3)从增产效应,提高磷肥利用率的作用的角度来看,综合比较几种施肥处理,磷肥合理后移与减量施用是该区域最佳施肥方式。

参考文献 References

[1] 段居琦,周广胜. 中国水稻潜在分布及其气候特征[J]. 生态学报,2011,31(22):6659-6668
Duan J Q, Zhou G S. Potential distribution of rice in china and its climate characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22):6659-6668 (in Chinese)

[2] 程勇翔,王秀珍,郭建平,赵艳霞,黄敬峰. 中国水稻生产的时空动态分析[J]. 中国农业科学,2012,45(17):3473-3485
Cheng Y X, Wang X Z, Guo J P, Zhao Y X, Huang J F. The

temporal-spatial dynamic analysis of China rice production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(17): 3473-3485 (in Chinese)

[3] Vance C P, Uhde S C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 423-447 (in Chinese)

[4] 张森,赵书岗,耿丽平,霍红,刘文菊. 缺磷对不同作物根系形态及体内养分浓度的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(3):577-585
Zhang M, Zhao S G, Geng L P, Huo H, Liu W J. Effects of phosphorus deficiency on root morphology and nutrients concentrations of different crops [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 577-585 (in Chinese)

[5] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,李小坤,李云春,李慧. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究 [J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(4):795-802
Wang W N, Lu J W, Lu M X, Li X K, Li Y C, Li H. Effect of phosphorus fertilizer application and phosphorus use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4): 795-802 (in Chinese)

[6] 陈敏,马婷婷,丁艳萍,常江,郜红建,章力干,丁玉宇. 配方施肥对水稻养分吸收动态及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(1):237-246
Cheng M, Ma T T, Ding Y P, Chang J, Gao H J, Zhang L G, Ding Y Y. Effects of formula fertilizer application on nutrient uptake and grain yield of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1): 237-246 (in Chinese)

[7] 陈建国,张杨珠,曾希柏,谭周进,周清. 平衡施肥对缺磷红壤性水稻土的生态效应[J]. 生态学报,2011,31(7):1877-1887
Cheng J G, Zhang Y Z, Zeng X B, Tan Z J, Zhou Q. Ecological effects of balanced fertilization on red earth paddy soil with P-deficiency[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7): 1877-1887 (in Chinese)

[8] 林德喜,胡锋,范晓晖,杨林章. 长期施肥对太湖地区水稻土磷素转化的影响[J]. 应用与环境生物学报,2006,12(4):453-456.
Lin D X, Hu F, Fan X H, Yang L Z. Effect of long-term fertilization on phosphorus transformation in paddy soil in the Taihu Lake Region [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2006, 12(4): 453-456 (in Chinese)

[9] Buckingham S E, Neff J, Titiz-Maybach B, Reynolds R L. Chemical and textural controls on phosphorus mobility in dry lands of southeastern Utah [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 100(1/3):105-120

[10] Sharpley A N, McDowell R W, Weld J L, Kleinman P J. Assessing site vulnerability to phosphorus loss in an agricultural watershed[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6):2026-2036

[11] Zhou Q X, Zhu Y M. Potential pollution and recommended

- critical levels of phosphorus in paddy soils of the southern Lake Tai area, China[J]. *Geoderma*, 2003, 115(1/2): 45-54
- [12] Liu Y, Chen J N, Mol A, Ayres R U. Comparative analysis of phosphorus use within national and local economics in China [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2007, 51(2): 454-474
- [13] 张志剑, 王珂, 朱荫涓, 郭敏红, 周顺根. 浙江水稻主产区田间土-水磷素流失潜能[J]. *环境科学*, 2001, 22(1): 98-101
Zhang Z J, Wang K, Zhu Y M, Guo M H, Zhou S G. Phosphorus loss potential of soil-water in sites of the main rice-yield area in the northern Zhejiang [J]. *Environmental Science*, 2001, 22(1): 98-101 (in Chinese)
- [14] 刘兆德, 虞孝感, 王志宪. 太湖流域水环境污染现状与治理的新建议[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(4): 467-474
Liu Z D, Yu X G, Wang Z X. The current water pollution of Taihu drainage basin and the new management proposals[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(4): 467-474 (in Chinese)
- [15] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. *环境科学*, 2001, 22(4): 67-71
Gao C, Zhang T L, Wu W D. Phosphorus sorption and desorption of agricultural soils under different land uses[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(4): 67-71 (in Chinese)
- [16] 邹长明, 秦道珠, 徐明岗, 申华平, 王伯仁. 水稻的氮磷钾养分吸收特性及其与产量的关系[J]. *南京农业大学学报*, 2002, 25(4): 6-10
Zou C M, Qin D Z, Xu M G, Shen H P, Wang B R. Nitrogen, phosphorous and potassium uptake characteristics of rice and its relationship with grain yield [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(4): 6-10 (in Chinese)
- [17] Drewry J J, Newham L T H, Croke B F W. Suspended sediment, nitrogen and phosphorus, concentration and exports during storm-events to the Tuross estuary, Australia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 879-887
- [18] 徐明岗, 李菊梅, 李东初, 丛日环, 秦道珠, 申华平. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1010-1015
Xu M G, Li J M, Li D C, Cong R H, Qin D Z, Shen H P. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on growth and fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in southern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(5): 1010-1015 (in Chinese)
- [19] 龚蓉, 刘强, 荣湘民, 张玉平. 中南丘陵旱地磷肥减量对不同形态磷素养分淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 106-110
Gong R, Liu Q, Rong X M, Zhang Y P. Effects of phosphorus fertilizer reduction on the leaching of different forms of phosphorus nutrients in the hilly upland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 106-110 (in Chinese)
- [20] 段然, 汤月丰, 文炯, 吴翠霞, 彭长城, 白玲玉, 曾希柏. 减量施肥对湖垌旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 536-543
Duan R, Tang Y F, Wen J, Wu C P, Peng C C, Bai L Y, Zeng X B. Effect of reducing fertilizer application on crop yield and nitrogen and phosphorus loss in runoff from embankment upland in Dongting Lake Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 536-543 (in Chinese)
- [21] Holloway R E, Bertrand I, Frischke A J, Brace D M, McLaughlin M J, Shepperd W. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn[J]. *Plant and Soil*, 2001, 236(2): 209-219
- [22] 张亚洁, 华晶晶, 李亚超, 陈莹莹, 杨建昌. 种植方式和磷素水平互作对陆稻和水稻产量及磷素利用的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(8): 1423-1431
Zhang Y J, Hua J J, Li Y C, Chen Y Y, Yang J C. Effects of interaction between phosphorus nutrition and cultivation methods on grain yield and phosphorus utilization of upland rice and paddy rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1423-1431 (in Chinese)
- [23] 王海龙, 孙羲. 磷对水稻生长发育的影响及其生理效应[J]. *浙江农业大学学报*, 1988, 14(1): 9-15
Wang H L, Sun X. Effects of phosphorus on the growth and physiological metabolisms in rice plant[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Zhejiangensis*, 1988, 14(1): 9-15 (in Chinese)
- [24] 刘运武. 磷对杂交水稻生长发育及其生理效应影响的研究[J]. *土壤学报*, 1996, 33(3): 308-316
Liu Y W. Effect of phosphorus on growth and physiological effect of hybrid rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(3): 308-316 (in Chinese)
- [25] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 冯倩, 孙丞鸿, 王志伟. 施磷水平对晋南旱地冬小麦产量及磷素利用的影响[J]. *中国生态农业报*, 2011, 31(7): 1877-1887
Li T L, Xie Y H, Hong J P, Feng Q, Sun Z H, Wang Z W. Effects of phosphorus application rates on winter wheat yield and phosphorus use efficiency in dry lands of South Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 31(7): 1877-1887 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华