

不同施磷水平下水稻产量、养分吸收及土壤磷素平衡研究

侯云鹏, 孔丽丽, 李 前, 杨 建, 尹彩侠, 秦裕波, 张 磊, 于 雷, 王立春*, 谢佳贵*

(农业部东北植物营养与农业环境重点实验室/吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033)

摘 要:通过2年(2014~2015)田间定位试验,研究不同磷肥用量对水稻产量、养分积累、磷素利用效率、土壤有效磷含量变化及磷素收支平衡的影响。试验施磷量(P_2O_5)从低到高设P0(不施磷)、P1(40 kg/hm²)、P2(80 kg/hm²)、P3(120 kg/hm²)和P4(160 kg/hm²)5个处理。2年的试验结果表明,施磷可增加水稻产量,且在施磷量40~120 kg/hm²范围内,水稻产量随着施磷量的增加而增加,磷肥用量增加至160 kg/hm²,水稻产量下降。施磷可显著提高水稻成熟期子粒氮、磷、钾积累量。磷肥利用率、农学利用率和偏生产力均随施磷量的增加而下降,分别由31.8%、15.9 kg/kg和241.0 kg/kg下降至19.2%、9.5 kg/kg和65.8 kg/kg。磷收获指数表现为随施磷量的增加先增后降,以施磷量120 kg/hm²处理最高,为68.9%。与不施磷肥处理相比,施磷可增加0~40 cm土壤有效磷含量,并随施磷量的增加而增加。连续种植2季水稻后,P0、P1和P2处理的土壤磷素平衡值均表现为亏缺,亏缺量随施磷量的增加而下降。P3和P4处理的土壤磷素表现为盈余,并随施磷量的增加而增加。对磷肥用量(x , kg/hm²)与土壤磷素表现盈亏量(y , kg/hm²)进行拟合,得出与土壤磷素盈亏持平的水稻施磷量为98.2 kg/hm²。综合考虑施磷水稻产量、养分积累、磷肥利用效率、土壤有效磷变化和表现平衡等方面的因素,在本试验条件下,适宜磷肥用量应控制在98.2~120 kg/hm²范围内较为适宜。

关键词:施磷量;水稻产量;土壤有效磷;磷素利用率;磷素平衡

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1003-8701(2016)06-0061-06

Studies on Effect of Different Phosphorus Levels on Yield, Nutrient Absorption of Rice and Soil Phosphorus Balance

HOU Yunpeng, KONG Lili, LI Qian, YANG Jian, YIN Caixia, QIN Yubo, ZHANG Lei, YU Lei, WANG Lichun*, XIE Jiagui*

(Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northeast Region, Ministry of Agriculture /Agricultural Resources and Environment Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Effects of different phosphorus rates on rice yield, nutrition absorption, phosphorus use efficiency, the change of available phosphorus in soil and its balance of payments were studied by field experiments from 2014 to 2015. The experiment included five treatments (P0, P1, P2, P3 and P4) with different phosphorus levels (0, 40, 80, 120 and 160 kg/ha). The results showed that phosphorus application improved rice yield, and rice yield increased with the increment of phosphorus application rates at the range of 40 -120 kg/ha, but decreased at 160 kg/ha of phosphorus application for two years. Phosphorus application significantly improved the accumulation of N, P and K in grain at the mature period of rice. Phosphorus use efficiency, agronomic efficiency and partial productivity declined with increasing phosphorus application rates from 31.8%, 15.9 kg/kg, 241.0 kg/kg to 19.2%, 9.5 kg/kg, 65.8 kg/kg, respectively. Phosphorus harvest index increased at first and decreased later with increasing of phosphorus application rate, and the highest value was 68.9% at 120 kg/ha of phosphorus fertilizer application. Available phos-

收稿日期:2016-08-24

基金项目:科技基础条件与平台建设计划(20160623030TC);国家科技支撑计划(2011BAD16B10、2012BAD04B02、2013BAD07B02、20130206006NY);国际植物营养研究所(IPNI)项目(BFDP-Jilin-2016)

作者简介:侯云鹏(1982-),男,助理研究员,主要从事肥料资源高效利用研究。

通讯作者:王立春,男,博士,研究员,E-mail:wanglichun1960@163.com

谢佳贵,男,博士,研究员,E-mail:xiejiaGui@163.com

phorus content in soil layer (0–40 cm) increased with the increment of phosphorus application rate compared with P0 treatment. The value of phosphorus balance in soil of P0, P1 and P2 treatments were deficient after growing rice continuously, and the amount of deficiency declined with increasing of phosphorus application rate. Phosphorus amounts in soil of P3 and P4 treatments occurred in surplus, and increased with the increment of phosphorus application rate. Phosphorus application rate at the balance of P budget in soil was 98.2 kg/ha by simulating between apparent P budget in soil (y) and phosphorus application rate (x), respectively. Comprehensive consider factors such as rice yield, nutrient accumulation, phosphorus use efficiency, the change of available phosphorus and apparent balance in soil, the optimum phosphorus application rate was at the range of 98.2–120 kg/ha.

Key words: Phosphorus application rate; Rice yield; Available phosphorus in soil; Phosphorus use efficiency; Phosphorus balance

磷是作物生长发育所必需的大量营养元素之一,它既是植株体内许多重要有机化合物的组成部分,同时又以多种形式参与植株体内各种代谢过程^[1],对提高作物产量十分重要。然而人们为了追求高产,过量施用磷肥现象普遍存在。据统计,20世纪80年代以来,我国磷肥的消费量持续快速增加,从1980年的273.3万t增加至2014年的845.3万t^[2],在30年间,我国磷肥消费量已经跃居世界首位^[3];相对应的导致土壤有效磷含量快速增加,从20世纪80年代第二次土壤普查的6.84 mg/kg,增加至27.4 mg/kg^[4–5]。而我国主要粮食作物的磷肥利用率较低,仅为11.6%^[6]。长期大量不合理地施用磷肥,一方面浪费磷矿资源,另一方面使土壤磷素富集,在雨水和灌溉的作用下向水体迁移,增加了地表水富营养化的风险,因此,如何维持作物高产稳产的同时,降低农田磷素带来的环境污染已是迫切需要解决的问题。

水稻是吉林省主要粮食作物之一,而磷素是实现水稻高产的重要营养元素,对水稻产量形成和稻米品质提升等方面十分重要。但在过量施磷条件下,不仅影响水稻增产效果,同时土壤有效磷含量显著增加。因此土壤—作物体系的磷素平衡是磷肥施用是否合理的评价标准之一。目前,有关适宜施磷量的研究大多针对产量效应、品质及磷肥利用效率等方面^[7–11],但这些研究很少考虑土壤磷素平衡的维持。鉴于此,本研究通过田间定位试验,研究不同磷肥用量对水稻产量、磷肥利用效率及磷素平衡的影响,为吉林省水稻高产高效和降低磷素污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2014~2015年在吉林省松原市前郭县红光农场进行,该地区位于吉林省中西部,属

中温带大陆性季风气候区。年平均气温4.5℃,年平均日照2900h左右,无霜期135~140d。年降水量在400~500mm之间。供试土壤为草甸土,试验开始前0~20cm耕层土壤基本性状为:有机质31.46 g/kg、碱解氮128.92 mg/kg、有效磷21.6 mg/kg、速效钾82.6 mg/kg、pH6.83。

1.2 试验设计

研究采用田间定位小区试验,试验共设5个处理,磷肥(P_2O_5)用量分别设为0、40 kg/hm²、80 kg/hm²、120 kg/hm²和160 kg/hm²(分别以P0、P1、P2、P3和P4表示)。试验各处理氮(N)、钾(K_2O)肥用量相同,分别为180 kg/hm²和90 kg/hm²。施肥方法为30%氮肥与全部磷钾肥作基肥于插秧前一天施入,40%氮肥于分蘖期追施。30%氮肥于孕穗期施入。试验用氮肥为尿素(N46%),磷肥为重过磷酸钙(P_2O_5 46%),钾肥为氯化钾(K_2O 60%)。供试水稻品种为吉粳511。5月21日移栽,大田栽插密度为20万穴/hm²,9月28日收获。小区面积为30 m²,随机区组排列,3次重复,两边设有保护行。每小区间筑埂并用塑料薄膜包裹,以避免小区间水肥串灌或漫灌;试验田管理措施按生产田进行。

1.3 样品采集与测定

每年水稻收获时采集植株样本,各小区采取有代表性水稻5穴,剪去根部,分为秸秆和穗部二部分,于105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重,称重并计算地上部干物重。样品粉碎过0.5 mm筛,测定氮、磷、钾养分含量。测定方法为采取 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮,采用凯氏定氮法测定氮素含量,钒钼黄比色法测定磷素含量,火焰光度法测定钾素含量;成熟期各小区单收,按实收株数计产。

小区收获时按“S”法采集0~40 cm土壤样本,每20 cm为一层(共2层)。混匀、风干后过1 mm筛,测定土壤有效磷含量,土壤有效磷采用碳

酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定。

1.4 计算公式及统计方法^[12-13]

磷肥利用率($RE_p, \%$)=(施磷区地上部吸磷量—不施磷区地上部吸磷量)/磷肥施用量

磷肥农学效率($AE_p, \text{kg/kg}$)=(施磷区水稻产量—不施磷区水稻产量)/磷肥施用量

磷肥偏生产力($PPF_p, \text{kg/kg}$)=施磷区产量/磷肥施用量

磷素表观平衡(kg/hm^2)=施磷量—作物地上部吸磷量

磷素实际平衡率($\text{Surplus of P, \%}$)=[(输入—支出)/支出] $\times 100$

试验数据用 Microsoft Excel 2013 和 SAS 9.0 统计软件处理。

2 结果与分析

2.1 施磷对水稻产量的影响

表 1 结果表明,不同施磷处理水稻产量间存在差异。施磷处理水稻产量均高于不施磷肥(P0)处理,增产幅度为 7.1%~17.4%。除 P1 处理外,其他施磷处理水稻产量与不施磷肥处理(P0)

水稻产量差异均达显著水平($P<0.05$)。在不同施磷处理中,连续 2 年施用磷肥的水稻产量随施磷量的增加呈先增后降的趋势,其中施磷量在 40~120 kg/hm^2 范围内,水稻产量随施磷量的增加而增加,当施磷量增加至 160 kg/hm^2 ,水稻产量下降。施肥效益结果表明,与不施磷肥处理相比,施磷显著增加了水稻净收益($P<0.05$),增加幅度为 6.7%~16.0%,并随着施磷量增加先增后降,其中施磷量 120 kg/hm^2 (P3)处理施肥效益最高,较 P1、P2 和 P4 处理分别高出 8.7%、4.7% 和 1.0%。

表 1 还表明,施用磷肥可提高水稻磷收获指数,幅度为 2.5~3.6 个百分点。且随施磷量的增加先增后降,其中以施磷量 120 kg/hm^2 (P3)处理最高,较 P1、P2 和 P4 处理分别高出 1.1、0.6 和 0.8 个百分点。水稻磷肥利用率(RE_p)、磷肥农学利用效率(AE_p)和磷肥偏生产力(PPF_p)均呈随施磷量的增加而下降的趋势,磷肥用量从 40 kg/hm^2 增加到 160 kg/hm^2 , RE_p 、 AE_p 和 PPF_p 分别由 31.8%、15.9 kg/kg 和 214.1 kg/kg 下降至 19.2%、9.5 kg/kg 和 65.8 kg/kg 。

表 1 不同磷水平下水稻产量、效益及磷肥利用率分析(2014~2015)

处理	产量 (kg/hm^2)	施肥效益 (元/hm^2)	磷收获指数 PHI(%)	磷肥利用率 $RE_p(\%)$	磷肥农学利用率 $AE_p(\text{kg/kg})$	磷肥偏生产力 $PPF_p(\text{kg/kg})$
P0	9 003±457 c	27 783±1429 d	65.3±1.3 a	—	—	—
P1	9 640±425 bc	29 636±1369 c	67.8±1.8 a	31.8±2.5 a	15.9±2.9 a	241.1±10.6 a
P2	10 053±412 b	30 768±1325 b	68.3±2.0 a	30.1±2.0 a	13.1±2.5 a	125.7±5.1 b
P3	10 568±379 a	32 228±1219 a	68.9±2.5 a	28.3±4.4 a	13.0±2.6 a	88.1±3.2 c
P4	10 529±461 a	31 905±1485 a	68.1±2.4 a	19.2±3.7 b	9.5±2.6 b	65.8±2.9 d

注:2014 和 2015 年稻谷平均价格为 3.22 元/kg,氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥平均价格分别为 4.43 kg/元 、4.95 kg/元 、4.56 kg/元 ;同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同

2.2 不同施磷处理水稻氮、磷、钾养分积累

图 1 结果表明,施用磷肥可以提高水稻秸秆和子粒氮、磷、钾积累总量。与不施磷肥处理(P0)相比,秸秆氮、磷、钾积累量提高幅度分别为 4.1%~21.6%、12.2%~40.1% 和 3.4%~16.4%,子粒氮、磷、钾积累量提高幅度分别为 9.1%~32.3%、21.6%~58.5% 和 8.34%~20.6%,其中子粒氮、磷、钾积累量与 P0 处理差异达到显著水平($P<0.05$)。在不同施磷处理中,秸秆氮、磷、钾积累量随施磷量的增加而增加,以施磷量 160 kg/hm^2 处理最高。子粒氮、磷、钾积累量与秸秆表现不同,子粒氮、磷、钾积累量随施磷量的增加呈先增后降的趋势,其中以施磷量 120 kg/hm^2 处理最高,

当施磷量增加至 160 kg/hm^2 ,子粒氮、磷、钾积累量开始下降。表明施磷对氮、磷、钾养分向营养器官和生殖器官的分配量具有调控作用,适宜的磷肥用量有利于子粒中养分的积累,使子粒养分提高,而磷肥供应过量会使水稻秸秆中的养分过多地滞留于营养器官中,造成养分的奢侈吸收。

2.3 不同施磷处理土壤有效磷含量变化

图 2 结果表明,不同施磷量条件下,0~20 cm 和 20~40 cm 层土壤有效磷含量存在差异,施磷处理 0~20 cm 和 20~40 cm 层土壤有效磷含量均高于不施磷肥(P0)处理,且随施磷量的增加而增加,其中 P1、P2、P3 和 P4 处理 0~20 cm 土壤有效磷含量较 P0 处理分别增加 5.2%、6.3%、10.1% 和

16.1%, 20~40 cm层土壤有效磷含量分别增加1.7%、6.7%、9.9%和10.8%。

图2还表明,经过2年的定位试验,试验各处理0~20 cm和20~40 cm层土壤有效磷含量与试验起始时有较大的差异,与试验起始时相比,P0处理、P1处理和P2处理0~20 cm和20~40 cm层土壤有效磷含量均呈下降趋势,下降幅度随施磷

量的增加而降低。P0处理、P1处理和P2处理0~20 cm和20~40 cm土壤有效磷含量较试验起始时分别下降8.6%、3.9%、2.9%和8.9%、7.3%、2.2%;P3处理和P4处理土壤有效磷含量较试验起始时有所提高,P3处理和P4处理0~20 cm、20~40 cm土壤有效磷含量分别提高0.6%、6.1%和1.0%、1.9%。

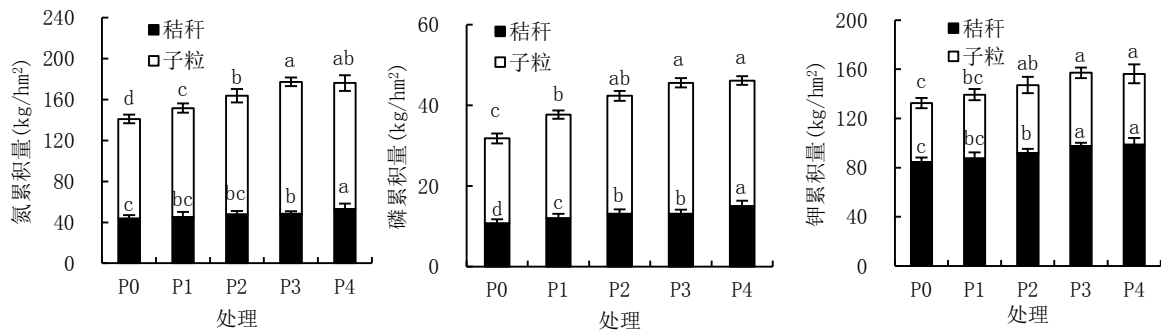


图1 水稻成熟期氮、磷、钾养分分配(2014~2015)

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

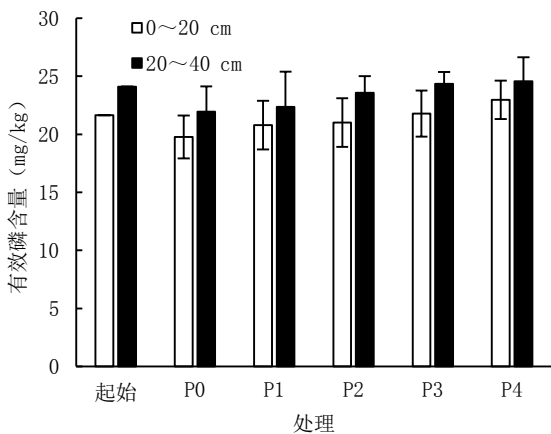


图2 水稻收获后土壤有效磷含量变化(2015年)

2.4 不同施磷处理磷素表观收支平衡

水稻成熟期土壤磷素收支平衡结果表明(表2),施磷处理磷携出量显著高于不施磷肥处理($P<0.05$)。提高幅度为17.2%~45.9%。且在施磷量

40~120 kg/hm²范围内显著增加($P<0.05$),当施氮量增加至160 kg/hm²,作物携出量呈下降趋势。在土壤磷素盈亏量中,P0、P1和P2处理磷素为亏缺状态,磷素亏缺量随施磷量的增加而下降,其中P0处理亏缺量为148.3 kg/hm²,P1处理亏缺量为93.8 kg/hm²,P2处理亏缺量为36.5 kg/hm²,P3和P4处理处于磷素盈余状态,磷素盈余量随施磷量的增加快速增加,其中P3处理磷盈余量为10.9 kg/hm²,P4处理磷盈余量为52.6 kg/hm²。利用磷肥用量(x , kg/hm²)与土壤表观盈亏量(y , kg/hm²)建立线性回归方程 $y=bx+a$ 进行分析,方程式为 $y=-0.7933x+77.94$ ($R^2=0.9831^{**}$),对该方程拟合计算,得出2年平均与土壤磷素持平的水稻施磷量为98.2 kg/hm²。此外,磷素实际平衡率随施磷量的增加而增加。

表2 不同施磷处理磷素表观平衡(2014~2015)

处理	施磷量(P ₂ O ₅ kg/hm ²)	作物磷携出量(P ₂ O ₅ kg/hm ²)	磷素表观盈亏量(P ₂ O ₅ kg/hm ²)	磷素实际平衡率(%)
P0	0	148.3 d	-148.3 e	-100.0
P1	80	173.8 c	-93.8 d	-54.0
P2	160	196.5 b	-36.5 c	-18.6
P3	240	216.3 a	23.7 b	10.9
P4	320	215.9 a	104.1 a	52.6

3 讨论与结论

施用磷肥是水稻增产和稳产的重要农业措施之一,磷素养分对于提高水稻产量、改善水稻品

质具有重要作用。大量研究表明,在一定施磷范围内,水稻产量随施磷量的增加而增加,但超过一定用量,水稻产量呈下降趋势^[13-15]。本研究连续2年定位试验的结果表明,2年水稻平均产量随

施磷量的增加呈先增后降的趋势,当施磷量增加至 160 kg/hm^2 ,产量开始下降。由此可见,水稻产量并不会随施磷量的无限度的增加而增加,适宜的磷肥用量才是水稻产量高产稳产的关键。

水稻养分积累、转运和分配是水稻产量形成的基础,受施磷量的影响显著。相关研究表明^[16-18],植物体内氮、磷、钾养分通过有机物的形成转化相互联系,因此磷肥施用是否合理将直接影响水稻对氮、钾的吸收与转运。本研究结果表明,氮、磷、钾累积不论是增加还是降低,其变化均存在明显的一致性。在不同施磷处理中,子粒氮、磷、钾积累量随施磷量的增加呈先增后降的趋势。秸秆与子粒趋势不同,秸秆氮、磷、钾积累量均随施磷量的增加而增加。由此可见,磷肥供应不足或过量均影响水稻的养分吸收和分配,只有当磷肥用量适宜时才能促进结实期氮、磷、钾各养分向子粒转运,提高子粒氮、磷、钾养分积累量,使收获期子粒中氮、磷、钾养分所占整个植株比例得到提高,进而影响作物产量。

肥料利用率、农学效率和偏生产力作为肥料增产效应的适宜评价指标,受施肥量、养分积累和产量水平的影响较大。有研究表明^[19-20],随着磷肥用量的提高,作物产量和磷吸收量增加,而磷肥利用效率降低。本研究结果表明,磷肥利用率、农学利用率及偏生产力均表现为随施磷量的增加而显著下降。进一步分析发现,虽然减量施用磷肥处理(P1、P2)的磷肥利用率、农学利用率和偏生产力较高,但相对应的水稻产量较低,且磷吸收量大于施磷量,使土壤磷库存受到消耗。而施磷量 120 kg/hm^2 (P3)处理虽然磷素利用率、农学利用率和偏生产力等指标低于前者,但相对应水稻产量较高,磷吸收量与施磷量相近。因此,协调产量和磷肥利用率之间的矛盾,应需维持磷肥投入与作物吸收相对平衡的前提下,减少肥料的损失。

大量研究表明,磷肥施用不当在影响作物产量的同时,还是影响土壤肥力的主要原因^[21-23],当磷肥投入过量,会使土壤中磷含量大幅提高^[24],投入不足使土壤有效磷元素得不到及时补充,使其养分耗竭,并会严重影响作物对其他营养元素如氮、钾吸收的效应^[25]。因此,判定施磷量是否合理,除考虑磷肥对作物产量和利用率影响外,关注磷肥在土壤中损失的高低十分重要。本研究结果表明,P1、P2和P4处理土壤有效磷含量与试验起始时变幅较大,而P3处理土壤有效磷含量与之

相近。说明控制施磷量是维持土壤磷肥力的主要措施。土壤养分平衡结果也表明,施磷量 40 kg/hm^2 (P1)和 80 kg/hm^2 (P2)处理由于水稻磷素携出量高于磷素投入量,使土壤磷素为亏缺状态,当施磷量增加至 120 kg/hm^2 ,水稻磷素携出量占磷素投入量的91.1%,与磷素投入基本保持平衡。而施磷量 160 kg/hm^2 处理磷素携出量只占磷素投入量的67.5%,磷投入量远超过了水稻对磷素的需求。

综上所述,适宜的磷肥用量可增加水稻氮、磷、钾养分的积累,显著提高水稻穗部养分积累量,最终提高水稻产量和获得较高的施肥效益,并能维持土壤磷素养分平衡。因此,综合水稻产量与施肥收益,水稻氮、磷、钾养分积累、磷肥利用效率及土壤磷素平衡等因素,在本试验条件下,磷肥适宜用量在 $98.2 \sim 120.0 \text{ kg/hm}^2$ 范围内较为适宜。

参考文献:

- [1] 范秀艳. 磷肥运筹对超高产春玉米生理特性、物质生产及磷效率的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013[K]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [3] 曹 宁, 陈新平, 张福锁, 等. 从土壤肥力变化预测中国未来磷肥需求[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 536-543.
- [4] 辛景树, 徐明岗, 田有国, 等. 耕地质量演变趋势研究—国家级耕地土壤监测数据整编[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 163.
- [5] 张立花, 张 辉, 黄玉芳, 等. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 801-809.
- [6] 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[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [7] 侯立刚, 马 巍, 齐春艳, 等. 磷对移栽期低温影响水稻生长发育及产量的调节效应[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(6): 731-735.
- [8] 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[J]. 中国土壤与肥料, 2011(2): 39-43.
- [9] 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[J]. 中国水稻科学, 2002, 16(2): 151-156.
- [10] 包光明, 刘洪福, 包加站. 水稻不同磷肥用量及运筹的验证与肥料利用率研究[J]. 北方水稻, 2008(1): 30-33, 39.
- [11] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 等. 施磷水平对晋南旱地冬小麦产量及磷素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 658-665.
- [12] 李 武, 杨晓娟, 唐湘如, 等. 减磷对华南早晚兼用型水稻产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 606-610.
- [13] 龚金龙, 张洪程, 李 杰, 等. 施磷量对超级稻南粳44产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 447-451.
- [14] 易 均, 谢桂先, 刘 强, 等. 磷肥减施对双季稻生长和产

- 量及磷肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(2): 197 - 201.
- [15] 卜容燕, 任 涛, 鲁剑巍, 等. 水稻-油菜轮作条件下磷肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2011(2): 39-43.
- [16] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 等. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836-845.
- [17] 潘圣刚, 翟 晶, 曹凑贵, 等. 氮肥运筹对水稻养分吸收特性及稻米品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 522-527.
- [18] 郭再华, 贺立源, 徐才国. 磷水平对不同耐低磷水稻苗根系生长及氮、磷、钾吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(4): 449-452.
- [19] 张亚洁, 华晶晶, 李亚超, 等. 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.
- [20] 李 前, 侯云鹏, 高 军, 等. 不同供磷水平对水稻干物质积累、磷素吸收分配及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(3): 37-41.
- [21] 马保国, 杨太新, 郭凤台, 等. 麦稻轮作体系中磷素平衡的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 371-374.
- [22] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1845-1848.
- [23] 李成亮, 刘晓利, 吴大付, 等. 水分和施磷量对简育水耕人为土中磷素形态的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1081-1086.
- [24] 区惠平, 周柳强, 黄美福, 等. 不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 40-47.
- [25] 黄 莹, 赵牧秋, 王永壮, 等. 长期不同施磷条件下玉米产量、养分吸收及土壤养分平衡状况[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 694-701.

(责任编辑: 范杰英)