

文章编号: 1003-8701(2015)03-0037-05

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

李 前¹, 侯云鹏¹, 高 军², 楚振全²,
孔丽丽¹, 徐新朋³, 王洪君¹, 谢佳贵^{1*}

(1. 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;
2. 吉林省前郭县红光农场, 吉林 松原 138000; 3. 中国农业科学院农业资源与区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 本文通过田间试验研究了不同供磷水平对吉林省水稻干物质积累、养分吸收分配及产量的影响。结果表明, 施磷可显著提高水稻产量, 依据产量(y , kg/hm²)与施磷量(x , kg/hm²)关系建立线性加平台方程得出最高产量的施磷量为 106.7 kg/hm², 产量为 10 687 kg/hm²。水稻不同生育阶段干物质和磷素的积累和分配趋势一致, P₁₂₀ 处理的干物质积累量和磷素于抽穗期后均为最大。施磷可显著提高茎鞘中磷素的转运量, P₁₂₀ 处理茎鞘和叶片磷转运量、转运率、籽粒贡献率均为最大。水稻的磷肥偏生产力、磷肥农学利用效率、磷肥当季回收率均随着施磷量的增加呈显著下降的趋势。综合产量与效益、养分吸收及磷肥利用效率等因素, 采用最佳经济磷肥用量 134.0 kg/hm² 较为适宜。

关键词: 水稻; 磷水平; 产量; 吸收分配

中图分类号: S511.062

文献标识码: A

DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2015.03.010

Effect of Different Phosphorus Application on Dry Matter Accumulation, Phosphorus Uptake and Distribution and Yield of Rice

LI Qian¹, HOU Yun-peng¹, GAO Jun², CHU Zhen-quan², KONG Li-li¹,
XU Xin-peng³, WANG Hong-jun¹, XIE Jia-gui^{1*}

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northeast Region, Ministry of Agriculture/
Agricultural Resources and Environment Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033;
2. Hongguang Farm of Qianguo County, Jilin Province, Songyuan 138000; 3. Institute of Agricultural Resources and
Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Effect of phosphate fertilizer application levels on the dry matter accumulation and the nutrient distribute of rice was studied by field experiments in Jilin Province. The results showed that application of phosphorus fertilizer increased grain yield significantly. According to linear and platform equation of yield and P application, maximum yield was 10 687kg/hm² when phosphorus fertilizer were 106.7 kg/hm². The trend of shoot dry matter and phosphorus accumulation of rice was the same at different growth stage. The shoot dry matter and phosphorus accumulation of P₁₂₀ treatment was the maximum after heading. The P translocation amount of stem sheath increased significantly by application of phosphorus fertilizer. The P translocation amount, translocation rate and rate of grain contribution of P₁₂₀ treatment was the maximum. The P partial fertilizer productivity, P agricultural efficiency and P recovery efficiency of rice decreased significantly with the increase of phosphorus application. Combined the yield and benefit, nutrition absorption and P fertilizer use efficiency, the optimal economic phosphate application was 134.0 kg/hm².

Key words: Rice; Phosphorus application; Yield; Nutrient uptake and distribution

收稿日期: 2014-12-20

基金项目: 十二五国家科技支撑计划(2011BAD16B10、2012BAD04B02、2013BAD07B02); 吉林省科技支撑计划项目(20130206006NY)

作者简介: 李 前(1988-), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事植物营养研究。

通讯作者: 谢佳贵, 男, 研究员, 博士, E-mail: xiejiaGui@163.com

磷是水稻正常生长发育必不可少的营养元素之一,是植物体内许多重要有机化合物的组成成分^[1],磷参与水稻植株体内养分的转化、分解和合成,可使作物早熟、籽粒饱满,提高产量。在当前水稻生产中,磷肥的施用存在很大程度的盲目性和不合理性,过量施用时有发生,导致植株呼吸作用过于旺盛,消耗的干物质大于积累的干物质,营养生长和生殖生长失调,使植株早衰,从而使作物产量和品质下降,而且导致土壤磷素累积,引发水体营养化等严重的环境问题^[2-3],严重影响了农业的可持续发展^[4-6];近年来,有关施用磷肥对水稻产量和品质的影响研究较多,并获得一些重要结论^[3-8]。但这些研究大多针对于磷肥施用产量效应进行分析,而关于施磷对水稻生育期干物质的积累和磷的吸收、转运与分配等方面的研究甚少。为此,本文通过田间试验研究了不同供磷水平条件下,水稻干物质积累、磷素的吸收转运及产量的变化,从而探明水稻不同磷肥用量调控机理,为东北高产水稻合理施肥,提高产量提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于2013年在吉林省水稻主产区前郭县红光农场进行。该地区位于吉林省中西部,2013年前郭县水稻生长季内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 $2981^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,降雨量为438 mm。供试土壤为草甸土,质地为中壤,0~20 cm层土壤基本肥力为:有机质32.4 g/kg,全氮0.94 g/kg,全磷0.79 g/kg,全钾18.82 g/kg,碱解氮103.24 mg/kg,有效磷31.05 mg/kg,速效磷119.58 mg/kg,pH为7.56。

1.2 试验设计

试验共设6个处理,施磷量分别设为0 kg/hm²、40 kg/hm²、80 kg/hm²、120 kg/hm²、160 kg/hm²、200 kg/hm²(分别以P₀、P₄₀、P₈₀、P₁₂₀、P₁₆₀、P₂₀₀表示)。各处理氮、钾肥用量相同,均为N 180 kg/hm²和K₂O 120 kg/hm²,施肥方法为30%氮肥与全部磷、钾肥作为基肥于移栽前3天施入,40%氮肥于分蘖期施入,30%氮肥于孕穗期施入,试验用氮、磷和钾肥分别采用尿素(含N 46%),重过磷酸钙(含P₂O₅ 46%)和氯化钾(含K₂O 60%)。小区面积40 m²,3次重复,随机排列,供试水稻品种为当地主推品种吉粳88,种植密度为20万穴/hm²。5月21日移栽,大田栽插密度为20万穴/hm²,9月30日收获。

1.3 样品采集与测定

在水稻不同生育期,即移栽期、返青期、分蘖期、抽穗期、灌浆期和成熟期各小区取具有代表性水稻5株穴(返青期30穴),剪去根部,分为茎鞘、叶片和穗部三部分,于105℃杀青30 min后,75℃烘干至恒重,称重并计算地上部干物重,样品粉碎过0.05 mm筛,测定全磷含量。分析采用H₂SO₄-H₂O₂法消煮,钒钼黄比色法测定全磷含量。

1.4 计算方法和数据分析^[9-11]

磷肥偏生产力(PEPP, kg/kg)=施磷区籽粒产量/施磷量

磷肥农学利用率(AEP, kg/kg)=(施磷区籽粒产量-无磷区籽粒产量)/施磷量

磷肥回收利用率(RE)(%)=(施磷区植株吸磷量-无磷区植株吸磷量)×100/施磷肥量

磷转运量(PT)=抽穗期各器官磷积累量-成熟期相应器官磷积累量

磷转运率(PTR)=(器官磷转运量/抽穗期相应器官磷积累量)×100%

籽粒贡献率(GCR)=(器官磷转运量/成熟期籽粒中磷积累量)×100%

试验数据采用Microsoft Excel 2007 进行统计分析,用SAS软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平对水稻的产量及构成因子的影响

由表1可知,施用磷肥对水稻产量和构成因子有重要影响,与不施磷肥处理(P₀)相比,施磷处理水稻产量均达到显著水平,增产幅度为6.4%~13.5%。在不同磷水平中,在施磷量40~120 kg/hm²范围内水稻产量随着磷水平的提高而增加,当施磷量超过120 kg/hm²后,水稻产量开始下降。从产量构成因子结果看出,施用磷肥可以提高水稻的有效穗数、穗粒数,提高幅度分别为2.14%~6.14%、5.0%~19.1%,在不同施磷处理中,以P₁₂₀处理的产量构成因子各项指标最高,施磷量超过120 kg/hm²后,各项指标开始下降。由此可见,适宜的磷肥用量可以提高水稻有效穗数、穗粒数等产量构成因素,从而提高产量。

依据产量(y, kg/hm²)与施磷量(x, kg/hm²)的关系可建立线性加平台方程(图1),方程式为 $y=13.91x+9202$ ($x<106.7$, $R^2=0.950^*$)和 $y=10\ 687$ ($x>106.7$)。可见磷肥的最佳施用量为106.7 kg/hm²时,产量达到10 687 kg/hm²最高。

表1 不同磷水平处理下水稻的产量及构成因子

处理	有效穗数(穗/m ²)	千粒重(g)	穗粒数(实粒/穗)	结实率(%)	产量(kg/hm ²)
P ₀	345.2 ± 8.1 c	26.24 ± 0.44 a	115.3 ± 6.5 c	92.0 ± 1.9 a	9193 ± 233 c
P ₄₀	352.6 ± 3.6 bc	26.52 ± 0.53 a	120.2 ± 9.3 bc	92.4 ± 1.2 a	9779 ± 170 b
P ₈₀	361.4 ± 3.8 ab	26.78 ± 0.40 a	129.2 ± 6.1 ab	93.1 ± 1.8 a	10306 ± 77ab
P ₁₂₀	366.4 ± 9.1 a	26.74 ± 0.67 a	134.8 ± 5.4 a	93.6 ± 1.8 a	10870 ± 132 a
P ₁₆₀	365.6 ± 6.6 ab	26.72 ± 0.46 a	134.1 ± 3.4 a	92.5 ± 1.1 a	10755 ± 234ab
P ₂₀₀	363.8 ± 10.0 ab	26.73 ± 0.70 a	134.7 ± 5.6 a	92.9 ± 0.3 a	10437 ± 115ab

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异达5%显著水平

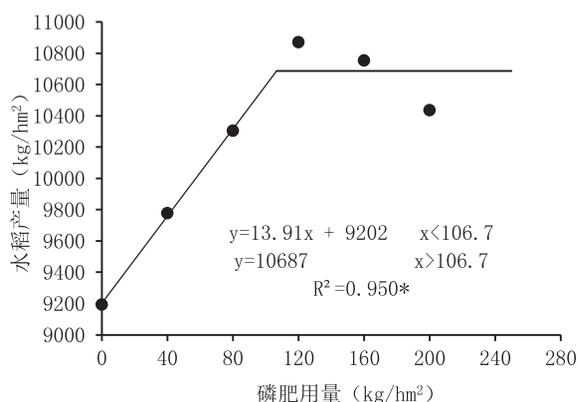


图1 不同磷肥用量对水稻产量的影响

2.2 不同供磷水平对水稻干物质及磷素积累的影响

由图2可知,在整个生育期内,水稻整个生育期干物质积累量的增长趋势呈“S”型,分蘖期(移栽后35 d)前,水稻生长缓慢,干物质积累量较少,从分蘖期开始,干物质积累量快速增加。在不同

施磷处理中,干物质积累量随着施磷水平的提高而增加,但整个生育期表现并不一致,在抽穗期(移栽后73 d)前各施磷处理间无显著性差异,抽穗期至成熟期发生变化,均以P₁₂₀处理干物质积累量最高,与P₄₀处理存在显著性差异。

水稻磷素积累的趋势与干物质基本相同,返青期至分蘖期磷素吸收量较少,分蘖期(移栽后35 d)至灌浆期(移栽后98 d),磷素吸收量迅速增加,灌浆期至成熟期,作物体内的磷素主要是进行转运分配,养分的累积量趋于平缓。在不同施磷处理中,随着施磷水平的提高磷素吸收量增加,抽穗期前,P₂₀₀处理的磷吸收总量最高,灌浆期至成熟期以P₁₂₀处理磷吸收总量最高。

由此可见,磷肥供应过量或不足均不利于水稻植株干物质积累和磷素的吸收,而且阻碍水稻生育后期籽粒干物质的生成和磷素的积累,从而使灌浆期至成熟期干物质和磷素积累总量降低。

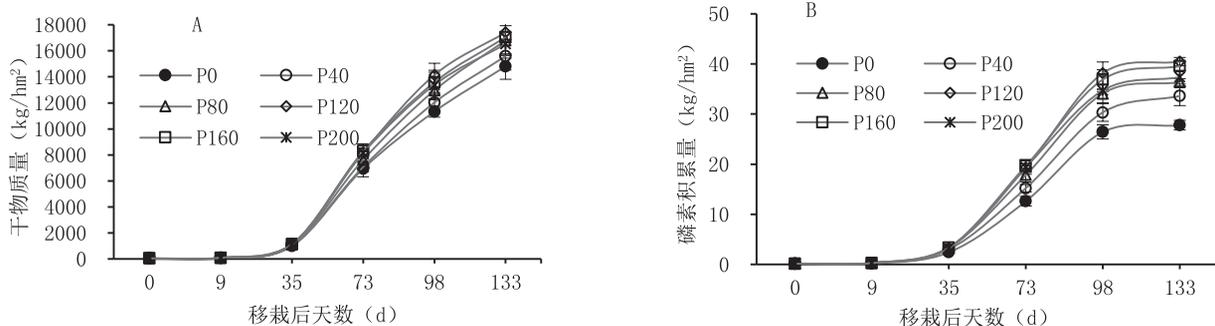


图2 水稻生育期植株地上部生物量和磷素积累量动态变化

A. 干物质质量 B. 磷素积累量

2.3 不同供磷水平对水稻磷素转运及分配的影响

2.3.1 不同器官磷素的转运

水稻籽粒中的一部分养分来源于根系吸收养分的直接供应,另一部分是营养器官中的养分转移。磷素的转运量可用抽穗期和成熟期营养体中磷素积累量之差来表示,磷素的转运量和转运效

率,是营养体磷向籽粒转移量的重要指标。

从各营养器官磷素转运量和转运效率结果(表2)可知茎鞘中磷的转运量、转运率和籽粒贡献率随着施磷量的增加而增加,当施磷量为120 kg/hm²时,达到峰值,随后下降,P₁₂₀处理与不施磷处理的转运量有显著性提高。与不施磷处理相比,施磷处理的转运量、转运率、籽粒贡献率的增

加范围分别在 65.3% ~ 180.9%、15.0% ~ 62.1%、35.0% ~ 93.8%。叶片的磷素转运量、转运率和籽粒贡献率与茎鞘呈现相同趋势,但是各处理间的

叶片磷转运量无明显差异。可见各器官在磷素的转运方面,水稻茎鞘中磷素的转运占主导地位。

表2 不同磷水平对水稻磷素转运的影响

处理	茎鞘			叶片		
	转运量(kg/hm ²)	转运率(%)	贡献率(%)	转运量(kg/hm ²)	转运率(%)	贡献率(%)
P ₀	1.47b	19.89	8.0	1.30a	27.7	7.0
P ₄₀	2.43ab	25.49	10.8	1.59a	27.9	7.1
P ₈₀	2.75ab	25.69	11.5	1.88a	28.8	7.9
P ₁₂₀	4.13a	32.25	15.5	1.98a	29.5	7.5
P ₁₆₀	3.82a	31.28	14.4	1.98a	28.9	7.4
P ₂₀₀	2.81ab	22.88	11.7	1.61a	25.3	6.7

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异达5%显著水平,下同

2.3.2 不同器官磷素的分配

由图3可知,成熟期水稻不同处理各器官磷素分配表现均为籽粒>茎鞘>叶片,其中籽粒占到64.9%~71.9%,茎鞘占到21.0%~22.4%,叶片仅占到11.7%~13.2%,可见水稻整个生育期所吸收的磷素绝大部分最终都积累到籽粒中。与不施磷处理相比,各施磷处理叶片、茎鞘、籽粒的磷积累量均有显著性提高。叶片、茎鞘和籽粒磷积累量均随施磷量的增加而增加,施磷量为120 kg/hm²时最高,超过120 kg/hm²后,各器官的干物质积累量和磷积累量开始下降。各处理叶片和茎鞘的干物质积累量之间没有显著性差异,而处理P₁₂₀叶片和茎鞘的磷积累量均与P₀和P₄₀存在显著性差异。

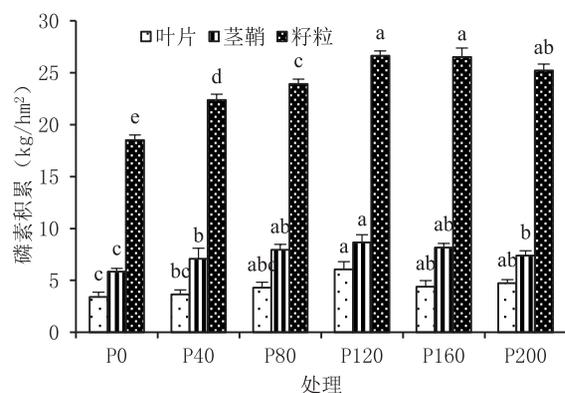


图3 成熟期水稻各器官磷素分配

注:不同小写字母表示不同处理间差异达5%显著水平

2.4 不同磷水平对水稻磷肥利用率的影响

磷肥农学效率、磷肥回收利用率和偏生产力是衡量磷肥增产效应的适宜评价指标^[11]。由表3可知,从整个试验结果来看,随着磷量增加,磷肥偏生产力、磷肥农学利用效率和磷肥表观利用率显著降低,受磷水平影响显著。当施磷量从40 kg/hm²增

加到200 kg/hm²,水稻磷肥偏生产力、农学利用率和磷肥当季回收率分别从244.5 kg/kg、14.7 kg/kg和33.3%下降至52.2 kg/kg、6.2 kg/kg和11.0%。

表3 不同磷水平对水稻磷肥利用效率的影响

处理	磷肥偏生产力(kg/kg)	磷肥农学利用率(kg/kg)	磷肥回收利用率(%)
P ₀			
P ₄₀	244.5 a	14.7 a	33.3a
P ₈₀	128.8 b	13.9 a	24.5b
P ₁₂₀	90.6 c	14.0 a	24.3c
P ₁₆₀	67.2 d	9.8 b	16.9d
P ₂₀₀	52.2 e	6.2 c	11.0e

3 结论与讨论

养分的吸收、同化与转运直接影响着作物的生长和发育,从而影响着产量^[10]。前人的研究认为产量的提高是生物量和收获指数协同提高的结果^[12],进一步提高产量需依赖光合产物的更多积累,即干物质积累越多,籽粒产量越高。本研究结果表明施磷量在120 kg/hm²时,水稻植株的干物质和磷积累量在整个生育期表现均为最好,而且于抽穗期后显著高于低磷处理。适宜的磷肥施用量能有效促进水稻干物质和磷素的积累,而过量施磷反而抑制了水稻的生长发育,降低水稻产量。这与何萍等人对玉米吸磷特性的研究结果相同,继续增加磷肥用量会导致最大吸收速率和吸收总量的降低^[13]。

一般认为水稻产量的80%以上来自抽穗到成熟期的光合生产能力,来自茎鞘早期贮藏积累的物质较少^[14-15]。本研究结果表明,籽粒中17.9%~

26.7%的磷素是靠叶片和茎鞘转运而来的(表1和图2),茎鞘和叶片中磷的转运量、转运率和籽粒贡献率的趋势相同,均随着施磷量的增加而降低,说明施用过量不利于磷素向籽粒转运。茎鞘对籽粒贡献率大于叶片,茎鞘向籽粒的转运占主导地位。当施磷量为120 kg/hm²时,茎鞘转运量、转运率均最大,与不施磷处理相比,施磷处理茎鞘的转运量、转运率、籽粒贡献率的增加范围分别在65.3%~180.9%、15.0%~62.1%、35.0%~93.8%。

磷肥施入土壤后,作物的当季表现利用率并不高,仅为10%~25%^[9],其余的磷大多被土壤固定,这样造成土壤一方面表现为缺磷,另一方面却使土壤中磷素大量累积,尤其在北方石灰性土壤上,土壤中的速效磷含量已经很高,但如不继续施用磷肥,作物产量仍然不能提高^[18]。施磷是水稻生产中的重要措施,王伟妮等人通过四年多点田间试验结果表明,在当前生产条件下施用磷肥对水稻产量有显著的增产效果,磷肥在水稻增产中所发挥的作用仍然不可忽视^[7]。本研究结果表明,本试验条件下的土壤有效磷为31.05 mg/kg,土壤有效磷含量较高,施用磷肥仍具有显著的增产作用,与不施磷处理相比,增产率在6.4%~18.2%,并且水稻的磷肥偏生产力、磷肥农学利用效率、磷肥当季回收率均随着磷肥用量的增加呈显著下降的趋势。这与范秀艳^[17]在玉米上、包光明^[18]在水稻上研究得到的结论一致。磷肥施用过量导致土壤残存大量的磷,磷肥利用率下降。只有合理适量的施用磷肥,才可保证农业可持续发展,节约资源,提高磷肥利用率。

目前在我国推荐磷肥用量方面开展了大量研究,如通过土壤基础供磷量,目标产量需磷量、作物养分吸磷量和磷素的利用率确定最佳施磷量^[15,18-19],这些方法为我国农业可持续发展提供了重要的科学依据。然而这些方法受土壤类型、农业生产水平和环境等因素的影响,很难准确地确定适宜的磷肥用量。本研究利用肥料效应函数法对水稻产量和施磷量进行拟合,确定当地水稻适宜施磷量,具有一定的准确性。本文依据产量(y, kg/hm²)与施磷量(x, kg/hm²)的关系可建立线性加平台方程,得出磷肥的最佳施用量为106.7 kg/hm²时,最高产量为10 687 kg/hm²。

综上所述,适宜的磷肥用量可以提高水稻植株干物质积累总量和磷素吸收总量,并能提高抽穗期

至成熟期植株磷素的转运量,最终影响产量。因此,综合产量与效益、养分吸收及磷肥利用效率等因素,磷肥适宜用量应维持在106.7 kg/hm²较为适宜。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘海涛, 童良军, 赵立琴, 等. 寒地水稻磷素适宜施用量的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2011, 23(4): 15-19.
- [3] 彭韶兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [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[J]. 中国水稻科学, 2002, 16(2): 151-156.
- [5] 邓九胜, 张 玮, 朱荣松, 等. 基于土壤有效磷水稻磷肥施用推荐体系的探讨[J]. 西北农业学报, 2011, 20(2): 81-84.
- [6] 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.
- [7] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 795-802.
- [8] 陈 山, 李维秀, 董文胜. 阶段性低温冷害对水稻生长的影响[J]. 垦殖与稻作, 2004(增刊): 18-19.
- [9] 闫 湘, 金继运, 何 萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.
- [10] 谢亚萍, 李爱荣, 闫志利, 等. 不同供磷水平对胡麻磷素养分转运分配及其磷肥效率的影响[J]. 草业科学, 2014, 23(1): 158-166.
- [11] 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.
- [12] 齐文增, 陈小璐, 刘 鹏, 等. 超高产夏玉米干物质与氮、磷、钾养分积累与分配特点[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 26-36.
- [13] 何 萍, 金继运, 李文娟, 等. 施磷对高油玉米和普通玉米吸磷特性及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 538-543.
- [14] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 等. 水稻高产群体质量及其优化控制探讨[J]. 中国农业科学, 1993, 26(6): 1-11.
- [15] 戚昌瀚. 水稻品种的库源关系与调节对策简论[J]. 江西农业大学学报, 1993, 15(3): 1-5.
- [16] 何松多. 水稻土的磷库分级以及对P的吸附-解析特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [17] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 等. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 312-320.
- [18] 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.
- [19] 单德鑫, 王春宏, 姜佰文, 等. 黑土中玉米平衡施肥法的相关参数测定[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(4): 464-466.