

# 双季稻最佳磷肥和钾肥用量与密度组合研究

徐新朋<sup>1,2</sup>, 王秀斌<sup>1</sup>, 李大明<sup>3</sup>, 柳开楼<sup>3</sup>, 余喜初<sup>3</sup>, 梁国庆<sup>1</sup>, 何萍<sup>1</sup>, 周卫<sup>1\*</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 3 江西省红壤研究所, 江西进贤 331717)

**摘要:**【目的】为明确磷肥、钾肥用量和移栽密度对双季稻的施用效果,在田间试验条件下研究了不同磷肥用量、钾肥用量和移栽密度组合对江西双季稻产量、产量构成要素及磷肥和钾肥利用率的影响。【方法】本研究采用裂区试验设计研究了不同施磷量和移栽密度、不同施钾量和移栽密度对双季稻产量、磷肥和钾肥利用率的影响。磷肥用量和移栽密度试验中,设4个施磷水平( $P_2O_5$  0、60、90、120 kg/hm<sup>2</sup>,以 P0、P60、P90 和 P120 表示)和4种移栽密度( $21 \times 10^4$ 、 $27 \times 10^4$ 、 $33 \times 10^4$ 、 $39 \times 10^4$ 穴/hm<sup>2</sup>,以 D21、D27、D33 和 D39 表示)组合。钾肥用量和移栽密度试验中,设4个施钾水平( $K_2O$  0、90、120、150 kg/hm<sup>2</sup>,以 K0、K90、K120 和 K150 表示),密度设置同磷肥试验。在水稻成熟期对产量以及产量构成要素进行测定,并分析其磷素和钾素的吸收量和利用率等指标。【结果】磷肥与密度试验中,同一施磷水平下,早稻产量和地上部磷素吸收量随着移栽密度的增加而增加,当施磷量超过 60 kg/hm<sup>2</sup> 时,产量和磷素吸收量不再随密度增加而显著增加,磷素吸收利用率(Rep)、磷素农学效率(AEP)和磷素偏生产力(PFP)逐步降低,以 P60D39 处理组合的产量和磷素吸收利用率最高,分别为 5303.9 kg/hm<sup>2</sup> 和 24.4%,AEP 为 29.4 kg/kg;晚稻则以施磷量在 60 kg/hm<sup>2</sup> 和  $33 \times 10^4$ 穴/hm<sup>2</sup> 密度组合的产量和磷素吸收利用率最高,分别为 7246.9 kg/hm<sup>2</sup> 和 42.4%,AEP 为 36.2 kg/kg。钾肥与密度试验中,早稻的钾素吸收量随着施钾量的增加而增加,施钾量在 120 kg/hm<sup>2</sup> 和  $39 \times 10^4$ 穴/hm<sup>2</sup> 密度组合的处理产量和钾素吸收利用率(REK)最高,分别为 6376.3 kg/hm<sup>2</sup> 和 67.2%,此时钾素农学效率(AEK)为 15.6 kg/kg;晚稻则以施钾量在 90 kg/hm<sup>2</sup> 和  $33 \times 10^4$ 穴/hm<sup>2</sup> 密度组合的处理产量和 REK 最佳,分别为 7025.6 kg/hm<sup>2</sup> 和 74.0%,AEK 为 21.7 kg/kg。【结论】合理的磷肥、钾肥用量和移栽密度可以显著增加水稻单位面积有效穗数和养分积累量,进而增加水稻产量和肥料利用率,但过高的磷肥和钾肥施用会抑制产量的进一步增加。建议本研究区域的早稻采用施磷量在 60 kg/hm<sup>2</sup>、施钾量 120 kg/hm<sup>2</sup> 和  $39 \times 10^4$  穴/hm<sup>2</sup> 的密度组合,而晚稻采用施磷量 60 kg/hm<sup>2</sup>、施钾量 90 kg/hm<sup>2</sup> 和  $33 \times 10^4$ 穴/hm<sup>2</sup> 的密度组合。

**关键词:** 水稻; 磷肥用量; 钾肥用量; 移栽密度; 产量; 养分利用率

中图分类号: S511.4<sup>+</sup>2; S506.2 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2016)03-0598-11

## Optimum combination of phosphorus, potassium and density for double-rice systems

XU Xin-peng<sup>1,2</sup>, WANG Xiu-bin<sup>1</sup>, LI Da-ming<sup>3</sup>, LIU Kai-lou<sup>3</sup>, YU Xi-chu<sup>3</sup>, LIANG Guo-qing<sup>1</sup>, HE Ping<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>1\*</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2 Institute of Plant Nutrient and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

3 Jiangxi Institute of Red Soil, Jiangxi, 331717, China)

**Abstract:** 【Objectives】 In order to determine effects of phosphorus (P) and potassium (K) fertilizer application and transplanting density (D) on double-rice systems, field experiments were conducted to study yield, yield components and phosphorus and potassium use efficiency of double-rice in Jiangxi province. 【Methods】 Two split-plot experimental designs were conducted with different phosphorus and potassium application amounts and transplanting density to study grain yield and phosphorus and potassium use efficiency. There were four P rates ( $P_2O_5$  0, 60, 90 and 120 kg/hm<sup>2</sup> designated P0, P60, P90 and P120) and four transplanting densities ( $21 \times 10^4$ ,  $27 \times 10^4$ ,  $33 \times 10^4$ ,  $39 \times 10^4$  hole/hm<sup>2</sup> designated D21, D27, D33 and D39) for phosphorus experiment. In

收稿日期: 2014-12-31 接受日期: 2015-08-04 网络出版日期: 2015-12-08

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-01-31); 农业部公益性行业(农业)科研专项(201003016); 国家重点基础研究发展计划(2013CB127405)资助。

作者简介: 徐新朋(1984—),男,河北承德人,博士,主要从事新型肥料研发及作物养分管理。E-mail: xinpengxu@163.com

\* 通信作者 E-mail: wzhou@caas.ac.cn

potassium experiment, there were four K rates ( $K_2O$  0, 90, 120, 150 kg/hm<sup>2</sup> designated K0, K90, K120 and K150) and four transplanting densities similar to phosphorus experiment. The grain yield and its components were measured, and P and K uptake and use efficiency were analyzed at rice maturity. **【Results】** In the P and plant density experiment for the same P level, the early rice yield and P uptake kept increased with the increasing of plant density until that the P application rate exceeded 60 kg/hm<sup>2</sup>. The P recovery efficiency (REP), P agronomic efficiency (AEP) and P partial factor productivity (PFPP) were decreased in similar trends like yield. The highest yield and REP were in combination of  $P_2O_5$  60 kg/hm<sup>2</sup> and  $39 \times 10^4$  hole/hm<sup>2</sup>, in which the yield was 5303.9 kg/hm<sup>2</sup> and REP 24.4%, and the AEP 29.4 kg/kg. The highest yield and REP were obtained in combination of  $P_2O_5$  60 kg/hm<sup>2</sup> and  $33 \times 10^4$  hole/hm<sup>2</sup> for late rice, in which the yield was 7246.9 kg/hm<sup>2</sup>, REP was 42.4% and AEP 36.2 kg/kg. In potassium experiment, transplanting density and K fertilizer application increase K uptake for early rice, the highest grain yield and K recovery efficiency (REK) were in combination of  $K_2O$  120 kg/hm<sup>2</sup> and density of  $39 \times 10^4$  hole/hm<sup>2</sup>, in which the yield was 6376.3 kg/hm<sup>2</sup>, REK was 67.2% and K agronomic efficiency (AEK) 15.6 kg/kg for early rice, the three highest indexes in late rice were obtained in combination of  $K_2O$  90 kg/hm<sup>2</sup> and density of  $33 \times 10^4$  hole/hm<sup>2</sup>, in which the yield was 7025.6 kg/hm<sup>2</sup>, REK was 74.0% and AEK 21.7 kg/kg. **【Conclusions】** Rational combination of phosphorus and potassium fertilizer and transplanting density can indeed significantly increase the effective panicle number of per unit area and total nutrient uptake, which is the main reason for yield increases and fertilizer use efficiency. High P and K fertilizer applications alone do not contribute to yield increases. The results suggested the optimum combination is  $P_2O_5$  60 kg/hm<sup>2</sup>,  $K_2O$  120 kg/hm<sup>2</sup> plus density of  $39 \times 10^4$  hole/hm<sup>2</sup> for early rice, and  $P_2O_5$  60 kg/hm<sup>2</sup>,  $K_2O$  90 kg/hm<sup>2</sup> plus density of  $33 \times 10^4$  hole/hm<sup>2</sup> for late rice under double-rice systems in the studied region.

**Key words:** rice; P fertilizer rate; K fertilizer rate; planting density; grain yield; nutrient use efficiency

我国是水稻种植大国,水稻种植面积占世界水稻总种植面积的20%,而稻谷总产量占世界稻谷总产量的29%,集约化水稻生产体系在我国粮食生产中发挥着至关重要的作用,在保障国内乃至国际粮食安全上都发挥着不可替代的作用。研究表明,改良水稻品种以及提高管理措施可以显著提高水稻产量<sup>[1-2]</sup>。然而,农民的过量及不平衡施肥等现象极其普遍,阻止了产量进一步增加,相反导致肥料利用率低下<sup>[3]</sup>。氮肥用量和移栽密度的合理搭配显著提高了水稻产量和氮肥利用率<sup>[4-6]</sup>,而磷肥和钾肥的投入对维持土壤肥力和作物高产也是必需的。然而,我国一些水稻种植区出现磷肥投入过高,而钾肥投入量不足等现象,导致施肥严重失衡,而且不同地区的肥料施用量差异较大。Dobermann<sup>[7]</sup>研究显示全球在过去20年每年的钾素表现为负平衡,约为-60 kg/hm<sup>2</sup>,而印度和印度尼西亚每年的钾素损失约为20~40 kg/hm<sup>2</sup>,我国一些水稻种植区域已出现严重的钾素负平衡<sup>[8]</sup>。合理施用磷肥和钾肥,可以提高水稻抗性,降低病虫害的发生率<sup>[9]</sup>,提高作物品质<sup>[10]</sup>。而合理密植可以增加有效穗数,提高单位面积颖花量,提高水稻产量<sup>[11]</sup>。为此,本研究在综合前人研究的基础上,系统研究了不同施磷量和

施钾量与移栽密度对双季稻产量、经济性状、磷肥和钾肥吸收转运的影响,以期为双季稻磷肥和钾肥合理施用、以及高产高效栽培技术提供科学基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2014年布置在江西省红壤性水稻田块,位于江西省红壤研究所试验基地。土壤肥力中等,磷、钾含量相对较低,土壤类型为水稻土。供试的早稻和晚稻品种分别为益禾9号和天丰优T025。磷肥密度试验中,早稻耕作层土壤的基本理化性状为有机质30.21 g/kg、全氮1.95 g/kg、全磷0.65 g/kg、全钾12.06 g/kg、速效磷8.47 mg/kg、速效钾63.41 mg/kg、pH 4.96;晚稻耕作层土壤的基本理化性状为有机质14.73 g/kg、全氮1.67 g/kg、全磷0.73 g/kg、全钾15.15 g/kg、速效磷23.38 mg/kg、速效钾73.10 mg/kg、pH 5.10。钾肥密度试验中,早稻耕作层土壤的基本理化性状为有机质22.43 g/kg、全氮1.45 g/kg、全磷0.54 g/kg、全钾12.85 g/kg、速效磷9.80 mg/kg、速效钾84.73 mg/kg、pH 5.24;晚稻耕作层土壤的基本理化性状为有机质14.69 g/kg、全氮1.67 g/kg、全磷0.68 g/kg、全钾

15.72 g/kg、速效磷 21.18 mg/kg、速效钾 60.41 mg/kg、pH 5.04。

试验采用裂区设计,施肥量为主区,面积 120 m<sup>2</sup>,密度为副区,面积为 30 m<sup>2</sup>,随机区组排列,三次重复,晚稻施肥量和密度与早稻的设置相同。磷肥试验中,施磷水平设 0、60、90 和 120 kg/hm<sup>2</sup> 4 个水平,分别记作 P0、P60、P90 和 P120;移栽密度设每公顷 21 万穴(20 cm × 23.8 cm)、27 万穴(20 cm × 18.5 cm)、33 万穴(20 cm × 15.2 cm)和 39 万穴(20 cm × 12.8 cm)4 种,分别记作 D21、D27、D33 和 D39。钾肥试验中,施钾水平设 0、90、120 和 150 kg/hm<sup>2</sup> 4 个水平,分别记作 K0、K90、K120 和 K150;移栽密度设置同磷肥试验。

早稻播种日期为 3 月 26 日,移栽日期为 4 月 22 日,收获日期为 7 月 21 日。晚稻播种日期为 6 月 21 日,移栽日期为 7 月 30 日,收获日期为 11 月 14 日。氮肥分基肥、分蘖肥、穗肥 3 次施用,基肥、分蘖肥和穗肥比例为 4:3:3;磷肥全部用作基肥;钾肥分基肥和穗肥,比例为 5:5。试验使用的肥料品种为:尿素(N 46%)、钙镁磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12.5%)和氯化钾肥(K<sub>2</sub>O 60%),磷肥试验中各处理施用尿素 326.1 kg/hm<sup>2</sup> 和氯化钾肥 200 kg/hm<sup>2</sup>,折合 N 和 K<sub>2</sub>O 分别为 150 和 120 kg/hm<sup>2</sup>。钾肥试验中各处理施用尿素 326.1 kg/hm<sup>2</sup> 和钙镁磷肥 720 kg/hm<sup>2</sup>,折合 N 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 分别为 150 和 90 kg/hm<sup>2</sup>。试验小区间作埂隔离,并用塑料膜覆盖埂体,保证各小区单独排灌并防止水肥渗出。

## 1.2 测定项目及方法

水稻成熟后,每个小区单独收割测定子粒产量,

采集有代表性的植株 5 兜,对水稻产量构成要素进行考察,包括有效穗数、穗粒数和结实率。将收获后的子粒和秸秆样品在 60℃ 下烘干(72 h),分别称量秸秆和子粒重量,取部分样品粉碎后测定磷和钾的营养含量。秸秆和子粒中磷和钾含量采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 方法消煮,并分别用钒钼黄比色法和原子吸收法测定。相关计算方法:

磷素吸收利用率(P recovery efficiency, REP) = (施磷区植株地上部磷累积量 - 空白区地上部植株磷累积量)/施磷量 × 100%;

磷素农学效率(agronomic efficiency of applied P, AEP) = (施磷区产量 - 空白区产量)/施磷量;

磷素偏生产力(partial factor productivity of applied P, PFPP) = 施磷区产量/施磷量;

钾素相关计算方法同磷。

数据采用 Excel 2007 和 SAS 软件进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥和密度对水稻产量的影响

2.1.1 磷肥和密度对水稻产量的影响 试验结果表明,磷肥用量及移栽密度对水稻产量具有显著影响(图 1)。早稻以 P60D39 的处理组合产量最高,为 5303.9 kg/hm<sup>2</sup>;晚稻以 P60D33 的处理组合产量最高,为 7246.9 kg/hm<sup>2</sup>(表 1)。水稻产量随着施磷量的增加呈先增加后降低的趋势,P60 与 P0、P90 和 P120 相比,早稻产量分别提高了 43.9%、3.7% 和 7.3%,晚稻产量分别提高了 44.0%、5.7% 和 6.2%。从密度因子看,增加水稻移栽密度可以显著增加早稻产量,以 D39 的产量最高,D39 与 D21、D27 和 D33 相比,产量分别增加了 59.3%、37.7%

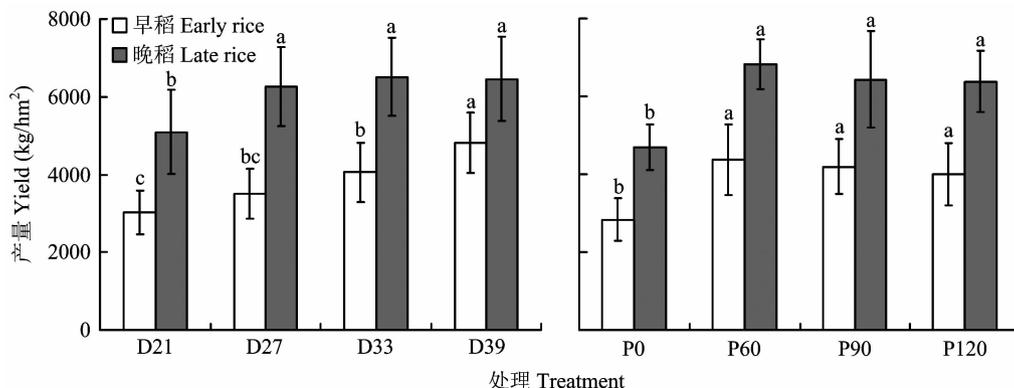


图 1 不同磷肥用量和移栽密度下水稻产量

Fig. 1 Rice yield under different phosphorus rate and transplanting density

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平

Different letters above the bars for different treatments are significantly different at 0.05 probability level.]

表 1 不同磷肥用量和移栽密度处理下水稻产量及其构成因子  
Table 1 The grain yield and its components of rice under different phosphorus fertilizer application and transplanting density treatment combinations

处理组合 Treatment	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	有效穗数 Effective panicles No. (No./m <sup>2</sup> )	穗粒数 Panicle grain No.	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	有效穗数 Effective panicles No. (No./m <sup>2</sup> )	穗粒数 Panicle grain No.	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )
P0D21	237 cd	107.5 ab	63.8 a	2213.4 h	226 c	226.5 ab	90.0 a	3872.4 e
P0D27	268 bcd	104.3 ab	71.6 a	2577.6 h	246 abc	230.0 ab	89.4 a	4938.5 d
P0D33	295 bc	97.7 abc	72.3 a	2984.7 g	279 abc	190.0 ab	93.0 a	5074.0 d
P0D39	315 ab	94.1 bc	71.9 a	3542.2 de	295 a	186.3 b	87.8 a	4853.1 d
P60D21	213 d	104.6 ab	65.6 a	3133.6 fg	238 abc	220.7 ab	89.1 a	6125.4 abc
P60D27	229 cd	108.2 ab	65.3 a	4149.8 b	255 abc	230.7 a	89.8 a	6970.3 a
P60D33	317 ab	96.7 abc	77.6 a	4949.4 a	293 ab	219.3 ab	91.1 a	7246.9 a
P60D39	367 a	101.6 abc	70.2 a	5303.9 a	290 ab	201.7 ab	91.3 a	6939.4 a
P90D21	217 d	114.0 a	72.3 a	3504.9 def	252 abc	231.0 a	87.7 a	5668.5 bcd
P90D27	257 bcd	105.8 ab	66.1 a	3719.7 cd	288 ab	229.3 ab	91.3 a	6698.7 a
P90D33	295 bc	99.6 abc	63.3 a	4343.5 b	290 ab	218.5 ab	88.6 a	7103.1 a
P90D39	316 ab	94.4 bc	72.4 a	5202.8 a	290 ab	203.3 ab	86.8 a	7060.8 a
P120D21	200 d	104.2 ab	78.1 a	3255.3 efj	233 bc	202.5 ab	84.3 a	5491.7 cd
P120D27	257 bcd	101.7 abc	69.9 a	3556.6 de	264 abc	205.5 ab	91.9 a	6427.2 abc
P120D33	264 bcd	94.4 bc	67.9 a	3968.3 bc	268 abc	212.3 ab	90.7 a	6633.1 ab
P120D39	309 ab	84.4 c	69.0 a	5235.8 a	277 abc	210.3 ab	89.3 a	6985.2 a
D	* *	* *	ns	* *	* *	ns	ns	* *
P	ns	ns	ns	* *	ns	ns	ns	* *
D × P	ns	ns	ns	* *	ns	ns	ns	ns

注( Note): P—磷肥 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> rate; D—种植密度 Planting density. 数值后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters are significantly different at 0.05 level among treatments. ns—未达显著水平 No significant; \* \* 表示达到1%显著水平 Mean significant difference at 1% level.

和 18.7%,说明增加早稻移栽密度可以显著增加早稻产量。而对于晚稻而言,移栽密度与产量呈抛物线关系,以 D33 的产量最高,与其它密度处理相比,高 0.8%~27.8%。

施磷量、移栽密度以及二者的交互作用对早稻产量的影响达到了显著水平,增加移栽密度对单位面积有效穗数和单个穗子的穗粒数的影响达到了显著水平,但对结实率无影响(表 1)。在同一施磷水平下有效穗数随着移栽密度的增加而增加,都以 D39 的有效穗数最高,而单个穗的穗粒数则相反,但有效穗数并未随着施磷量的增加而增加,相反当施磷量超过 60 kg/hm<sup>2</sup> 时,有效穗数有所降低,早稻产量不再增加。对于晚稻而言,施磷量和移栽密度对产量的影响达到了显著水平,但二者的交互作用不显著。增加移栽密度对有效穗数的影响达到了显著水平,但对单个穗的穗粒数和结实率无影响。与早稻不同的是,D33 和 D39 的有效穗数无差异,但单

个穗的穗粒数 D33 要高于 D39 处理。当施磷量超过 60 kg/hm<sup>2</sup> 时,晚稻产量不再增加,但 P60D33 处理组合的产量要高于 P60D39 处理组合。

2.1.2 钾肥和密度对水稻产量的影响 试验结果表明,钾肥用量及移栽密度对水稻产量具有显著影响(图 2)。早稻以 K120D39 的处理组合产量最高,为 6376.3 kg/hm<sup>2</sup>;晚稻以 K90D33 的处理组合产量最高,为 7025.6 kg/hm<sup>2</sup>(表 2)。早稻产量随着移栽密度的增加而增加,以 D39 的产量最高,与其它移栽密度相比,产量提高了 9.2%~61.1%。而晚稻则以 D33 的产量最高,但增产幅度要低于早稻,为 3.2%~20.4%。施用钾肥可以显著提高水稻产量,但施钾量与产量呈抛物线关系,早稻以 K120 的产量最高,与 K0、K90 和 K150 相比,产量分别高 30.9%、10.6% 和 1.0%。晚稻则是以 K90 的产量最高,与 K0、K120 和 K150 相比,产量分别高出 42.9%、5.7% 和 4.9%。

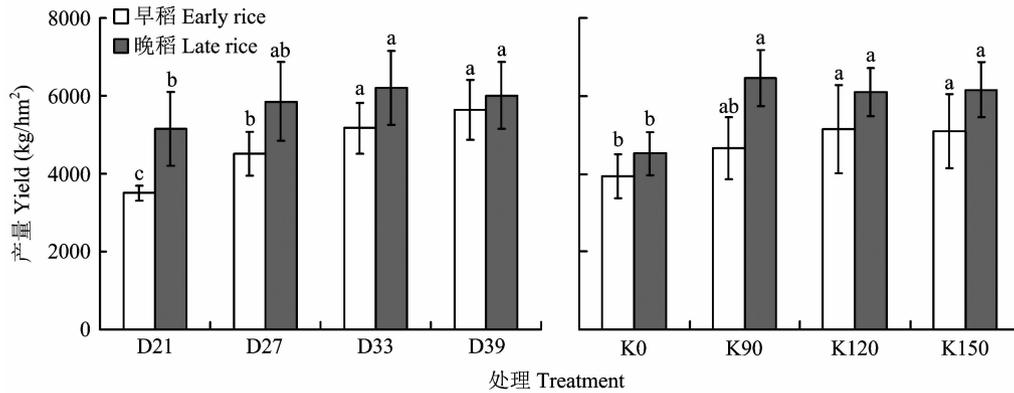


图2 不同钾肥用量和移栽密度下水稻产量

Fig. 2 Rice yield under different potassium application and transplanting density

[注( Note ): 柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平

Different letters above the bars mean significantly different at 0.05 level among treatments. ]

移栽密度对早稻和晚稻有效穗数和单个穗子的影响达到了显著水平,而对晚稻的结实率则无影响。穗粒数的影响达到了显著水平,对早稻结实率的影响(表2)。在同一施钾水平下早稻有效穗数随着移栽

表2 不同钾肥用量和移栽密度下水稻产量及其构成因子

Table 2 Grain yield and their components under different potassium rate and transplanting density

处理组合 Treatment	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	有效穗数 Effective panicles No. (No./m <sup>2</sup> )	穗粒数 panicle grain No.	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	有效穗数 Effective Panicles No. (No./m <sup>2</sup> )	穗粒数 Panicle grain No.	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )
K0D21	218 efg	98.8 ab	83.8 ab	3259.6 g	215 bc	250.0 ab	87.2 a	3796.9 de
K0D27	244 cdefg	97.6 ab	80.7 abc	3634.2 f	249 abc	212.7 ab	86.2 a	4435.6 de
K0D33	257 bcdef	94.6 ab	73.8 bc	4330.9 e	257 abc	216.0 ab	87.3 a	5074.3 cd
K0D39	286 abc	89.7 b	75.0 bc	4504.9 e	251 abc	205.0 b	85.8 a	4757.5 cde
K90D21	216 efg	104.8 ab	87.1 a	3538.4 fg	201 c	266.7 a	90.3 a	5667.8 bc
K90D27	263 bcde	100.2 ab	81.3 abc	4520.4 e	252 abc	220.7 ab	88.3 a	6517.7 ab
K90D33	284 abcd	99.6 ab	81.8 abc	4906.7 d	297 a	197.0 b	87.7 a	7025.6 a
K90D39	307 ab	94.9 ab	82.4 abc	5649.5 c	243 abc	218.7 ab	88.7 a	6603.2 ab
K120D21	193 g	107.9 a	82.3 abc	3517.9 fg	205 c	229.0 ab	91.8 a	5632.6 bc
K120D27	200 fg	99.5 ab	80.9 abc	4906.9 d	258 abc	211.0 ab	89.7 a	6246.1 ab
K120D33	257 bcdef	92.9 ab	79.5 abc	5783.9bc	279 ab	208.0 b	86.3 a	6195.8 ab
K120D39	325 a	90.8 b	82.2 abc	6376.3 a	247 abc	214.7 ab	88.6 a	6186.8 ab
K150D21	225 defg	103.5 ab	84.0 ab	3700.8 f	245 abc	217.7 ab	91.4 a	5526.9 bc
K150D27	254 bcdef	97.0 ab	80.8 abc	4974.8 d	273 ab	207.7 b	89.0 a	6200.8 ab
K150D33	295 abc	94.9 ab	71.1 c	5653.3 c	279 ab	206.3 b	87.2 a	6527.7 ab
K150D39	281 abcd	96.7 ab	78.0 abc	6044.3 b	250 abc	216.0 ab	90.9 a	6347.7 ab
D	* *	*	*	* *	* *	*	ns	* *
K	ns	ns	ns	* *	ns	ns	ns	* *
D × K	ns	ns	ns	* *	ns	ns	ns	ns

注( Note ): K—钾肥 K fertilizer; D—种植密度 Planting density; 数值后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters for different treatments are significantly different at 0.05 probability level; ns—表示未达显著水平 Indicates no significant; \* 和 \* \* 分别表示达到5%和1%显著水平 Mean significant at 5% and 1% level, respectively.

密度的增加而增加,都以 D39 的有效穗数最高,而单个穗的穗粒数却相反。高的移栽密度并没有增加晚稻有效穗数,以 D33 的有效穗数最高,说明晚稻可以适当降低移栽密度。施钾对早稻和晚稻产量的影响都达到了显著水平,都呈先增加后降低的趋势。钾肥用量和移栽密度主要通过增加有效分蘖而提高水稻有效穗数及总穗粒数,进而增加水稻产量,二者的交互作用对早稻产量的影响达到了显著水平,而对晚稻产量则不显著。

## 2.2 施肥和密度对水稻养分利用效率的影响

### 2.2.1 磷肥和密度对水稻磷素利用效率的影响

施磷对早稻和晚稻的 AEP、REP 和 PFPP 的影响都达到了显著水平(表 3),随着施磷量的增加呈递减趋势。对早稻而言,AEP 所有处理中以 P60D33 处理

组合的最高,为 32.7 kg/kg,其次为 P60D39 处理组合,二者无显著差异。而 REP 和 PFPP 则以 P60D39 处理组合的最高,分别为 24.4% 和 88.4 kg/kg。高移栽密度增加了早稻有效穗数,进而增加了生物质重,有助于磷素累积,在提高了早稻产量的同时,也提高了早稻磷素利用效率。对于晚稻而言,AEP、REP 和 PFPP 均以 P60D33 处理组合的最高,分别为 36.2 kg/kg、42.4% 和 120.8 kg/kg。同一施磷量下不同密度间的 AEP 和 REP 无显著差异,但随着施磷量的增加显著降低。相同处理下,晚稻磷肥利用率都要显著高于早稻,这是因为晚稻的穗粒数和结实率显著高于早稻,进而增加了晚稻产量和地上部磷素吸收量。

表 3 不同处理水稻磷素利用效率

Table 3 Phosphorus use efficiency for rice under different treatments

处理组合 Treatment	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	磷吸收量 P uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	AEP (kg/kg)	REP (%)	PFPP (kg/kg)	磷吸收量 P uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	AEP (kg/kg)	REP (%)	PFPP (kg/kg)
P60D21	17.3 def	15.3 c	16.0 abcd	52.2 e	22.5 b	37.6 a	34.9 abc	102.1 b
P60D27	21.3 abcd	26.2 b	23.0 abc	69.2 c	27.4 ab	33.9 ab	33.7 abc	116.2 a
P60D33	22.6 abc	32.7 a	23.3 ab	82.5 b	29.3 a	36.2 a	42.4 a	120.8 a
P60D39	25.2 a	29.4 ab	24.4 a	88.4 a	27.6 ab	34.8 ab	38.1 ab	115.7 a
P90D21	16.5 ef	14.3 cd	8.7 cd	38.9 g	22.1 b	20.0 bc	22.4 abc	63.0 d
P90D27	18.8 cdef	12.7 cde	8.8 cd	41.3 g	24.1 ab	19.6 bc	14.2 bc	63.1 d
P90D33	20.0 bedef	15.1 c	8.9 cd	48.3 ef	24.5 ab	22.5 abc	16.2 bc	78.9 c
P90D39	24.0 ab	18.5 c	13.0 abcd	57.8 d	25.7 ab	24.5 abc	20.6 abc	78.5 c
P120D21	16.0 f	8.7 de	5.6 d	27.1 i	21.8 b	13.5 c	16.2 bc	45.8 e
P120D27	19.4 bedef	8.2 e	7.9 d	29.6 hi	25.4 ab	12.4 c	13.1 bc	53.6 de
P120D33	20.8 abcde	8.2 e	8.1 d	33.1 h	24.3 ab	13.0 c	11.7 c	55.3 de
P120D39	23.9 ab	14.1 cd	9.6 bcd	43.6 fg	27.1 ab	17.8 c	18.1 abc	58.2 de
D	* *	* *	ns	* *	* *	ns	ns	* *
P	ns	* *	* *	* *	ns	* *	* *	* *
D × P	ns	* *	ns	* *	ns	ns	ns	ns

注(Note): P—磷肥 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> rate; D—种植密度 Planting density; AEP—磷素农学效率 P agronomic efficiency; REP—磷素吸收利用率 P fertilizer use efficiency; PFPP—磷肥偏生产力 P partial factor productivity. 数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significantly different among treatments at 0.05 level. ns—表示未达显著水平 Not significant; \* \* 表示达到 1% 显著水平 Mean significant difference at 1% level.

### 2.2.2 钾肥和密度对水稻钾素利用效率的影响

对于早稻而言,移栽密度对 AEK、REK 和 PFPP 的影响都达到了显著水平(表 4)。AEK 和 REK 与施钾量呈抛物线关系,均以 K120D39 处理组合最高,分别为 15.6 kg/kg 和 67.2%,其次为 K90D39 处理组

合,分别为 12.7 kg/kg 和 62.6%。随着施钾量的增加,早稻的 PFPP 显著下降,以 K90D39 处理组合的最高,为 62.8 kg/kg,其次为 K120D39,为 53.1 kg/kg。对于晚稻而言,AEK、REK 和 PFPP 都以 K90D33 处理组合的最高,分别为 21.7 kg/kg、

74.0% 和 78.1 kg/kg。随着施钾量的增加, AEK、REK 和 PFPK 呈下降趋势, K90 与 K120 和 K150 相比, AEK 分别高 8.6 和 10.6 kg/kg, 而 REK 分别高 18.8 和 34.5 个百分点。在相同处理中, 晚稻的

AEK 要高于早稻, 这是因为前者的产量较高, 而 REK 则是施钾量在 90 kg/hm<sup>2</sup> 时晚稻高于早稻, 但随着施钾量的升高, 早稻的钾素吸收量要高于晚稻, 导致早稻的 REK 高于晚稻。

表 4 不同处理钾素利用效率

Table 4 Potassium use efficiency for rice under different treatments

处理组合 Treatment	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	钾吸收量 K uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	AEK (kg/kg)	REK (%)	PFPK (kg/kg)	钾吸收量 K uptake (kg/hm <sup>2</sup> )	AEK (kg/kg)	REK (%)	PFPK (kg/kg)
K90D21	98.9 ef	3.1 d	35.4 ab	39.3 de	112.8 ab	20.8 abc	56.5 ab	63.0 b
K90D27	110.0 def	9.8 bc	40.4 ab	50.2 c	125.3 ab	23.1 a	60.5 ab	72.4 a
K90D33	123.6 bcde	6.4 cd	58.0 a	54.5 b	145.9 a	21.7 ab	74.0 a	78.1 a
K90D39	128.7 abcd	12.7 ab	62.6 a	62.8 a	123.7 ab	20.5 abc	53.8 ab	73.4 a
K120D21	96.0 f	2.2 d	23.6 b	29.3 g	126.1 ab	15.3 abcd	55.7 ab	46.9 cd
K120D27	121.6 bcdef	10.6 bc	42.0 ab	40.9 d	117.8 ab	15.1 abcd	37.8 ab	52.1 c
K120D33	139.2 abc	12.1 ab	59.2 a	48.2 c	131.7 ab	9.3 d	41.2 ab	51.6 c
K120D39	148.9 ab	15.6 a	67.2 a	53.1 b	118.4 ab	11.9 bcd	35.0 ab	51.6 c
K150D21	115.1 cdef	2.9 d	34.2 ab	24.7 h	108.2 b	11.5 bcd	30.2 ab	36.8 e
K150D27	126.7 abcd	8.9 bc	37.6 ab	33.2 f	117.9 ab	11.8 bcd	30.4 ab	41.3 de
K150D33	147.7 ab	8.8 bc	54.2 ab	37.7 e	124.0 ab	9.7 d	26.8 b	43.5 cde
K150D39	152.2 a	10.3 bc	56.4 ab	40.3 d	107.7 b	10.6 cd	19.4 b	42.3 cde
D	**	**	**	**	ns	ns	ns	*
K	*	ns	ns	**	ns	**	**	**
D × K	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns

注 (Note): K—钾肥 K fertilizer; D—种植密度 Planting density; AEK—钾素农学效率 K agronomic efficiency; REK—钾素吸收利用率 K fertilizer use efficiency; PFPK—钾肥偏生产力 K partial factor productivity. 数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significantly different among treatments at 0.05 level. ns—表示未达显著水平 Not significant; \* 和 \*\* 分别表示达到 5% 和 1% 显著水平 Mean significant difference at 5% and 1% levels, respectively.

### 3 讨论

#### 3.1 施肥和移栽密度与水稻产量的关系

3.1.1 磷肥和移栽密度与水稻产量的关系 为了满足日益增长的人口对粮食的需求, 粮食产量在未来数十年需要大幅增加<sup>[12]</sup>。随着各种信息技术不断地在农业领域得到应用, 各种有助于增产的耕作栽培管理技术以及高产品种不断涌现。截止到 2013 年, 中国水稻的种植面积为 30.3 百万公顷, 总产量达到了 203.6 百万吨, 单产水平达到了 6.7 t/hm<sup>2</sup><sup>[13]</sup>, 远高于 4.5 t/hm<sup>2</sup> 的世界平均水平<sup>[14]</sup>。然而, 肥料的不合理施用已经影响到粮食产量的进一步增加, 过高的磷肥施用量已经对环境构成了一

定威胁<sup>[15]</sup>。合理施用磷肥和适当增加移栽密度可以提高水稻有效穗数, 进而提高水稻产量。从试验结果得出, 磷肥用量和移栽密度对早稻和晚稻产量的影响都达到了显著水平, 二者合理搭配能够显著地提高水稻产量。对于早稻而言, 增加移栽密度增加了有效穗数, 进而增加了产量, 其中 D39 的产量最高, 但使用更高的移栽密度能否进一步增加本研究区域的早稻产量有待进一步研究。但对于晚稻而言, 晚稻季的温度较高有助于水稻分蘖, 使得 D33 的有效穗数和穗粒数要高于 D39 处理。说明在种植早稻时可以适当提高移栽密度以提高有效穗数, 而晚稻则需适当降低移栽密度。合理施用磷肥也要依据土壤磷含量, 如鲁如坤<sup>[16]</sup>的研究表明, 土壤

Olsen-P 含量达到 5~7 mg/kg 即可满足水稻高产需求。本研究中早稻和晚稻的 Olsen-P 含量分别为 8.47 和 23.38 mg/kg,当施磷量超过 60 kg/hm<sup>2</sup> 时早稻和晚稻产量都不再增加。施磷量和移栽密度影响着水稻有效穗数和产量,但二者的合理搭配对提高水稻产量是必不可少的。本研究中早稻产量随着移栽密度的增加而增加,说明在本研究区域可以适当增加早稻的移栽密度以提高早稻产量,而对于晚稻应适当降低移栽密度,过高的移栽密度并没有显著增加有效穗数和产量。

**3.1.2 钾肥和移栽密度与水稻产量的关系** 钾素参与了植物许多重要的生理过程,有改善农作物品质和提高抗逆性等功能<sup>[17]</sup>,合理的钾素养分管理对于钾素资源的有效利用尤为重要,长期施用钾肥能提高水稻产量和维持土壤钾素肥力<sup>[18-19]</sup>。缺钾影响水稻的净光合速率,导致光合作用的关键酶含量降低,并降低水稻叶片的光饱和点,影响水稻光合作用<sup>[20]</sup>,适量钾肥施用可以提高水稻单位面积有效穗数,群体叶面积指数和干物质累积量<sup>[21]</sup>,促进水稻植株对钾素的吸收和积累<sup>[22]</sup>,以及养分从水稻的茎叶部位向穗输送<sup>[23]</sup>,并可降低稻瘟病的病穗率,提高水稻抗病能力,增加水稻结实率等<sup>[24]</sup>,进而提高产量。本研究中,施钾量和移栽密度对早稻和晚稻产量的影响都达到了显著水平,施钾量与产量呈抛物线关系,早稻以 K120 的产量最高,而晚稻则以 K90 的产量最高,晚稻可利用早稻残留的钾素,因此早稻可适当增加施钾量,晚稻可适当降低施钾量。移栽密度对早稻和晚稻有效穗数的影响都达到了显著水平,但晚稻 D33 的有效穗数要高于 D39 处理。王强盛等<sup>[25]</sup>的研究表明过量钾肥施用会造成拔节前吸钾比例较大,从而抑制有效分蘖。本研究中,早稻以 D39 的产量最高,而晚稻则以 D33 的产量最高,说明在施用钾肥时既要考虑钾肥用量和移栽密度间的合理搭配,也要考虑种植季节。

### 3.2 施肥水平和移栽密度与肥料利用效率的关系

#### 3.2.1 施磷水平和移栽密度与磷素利用效率的关系

我国水稻磷肥利用率地区间的变异范围为 11.6%~13.7%<sup>[26]</sup>。大量磷肥投入导致磷在土壤中累积,导致我国磷素吸收/磷素投入仅有 45.7%,并且每年的磷素过量 14.7 kg/hm<sup>2</sup><sup>[27]</sup>,土壤 Olsen-P 含量从 1980 年到 2007 年增加了 17.3 mg/kg<sup>[28]</sup>。高的土壤磷含量导致了低的产量反应和磷肥利用率,增加了磷素从土壤到水体的迁移量,进而加剧了我国水体富营养化的程度<sup>[29-30]</sup>。鲁如坤等<sup>[31]</sup>研究

表明,我国一些南方省份的农田磷素盈余年增长率高达 7%,磷肥施用量是作物移走量的 3 倍。合理施用磷肥非常重要,施磷可促进水稻植株生长,同时提高杂交水稻对氮、钾的吸收利用<sup>[32]</sup>。在本研究中,早稻和晚稻的 AEP、REP 和 PFPP 随着施磷量的增加都显著降低。早稻的 AEP 最高的出现在 P60D33 组合处理,为 32.7 kg/kg,但与 P60D39 处理组合无显著性差异,但产量、REP 和 PFPP 都以 P60D39 组合处理的最高。晚稻的则都以 P60D33 处理组合的最高。早稻和晚稻的施磷水平在 60 kg/hm<sup>2</sup> 时,其各密度水平具有较高 REP,早稻的范围为 16.0%~24.4%,晚稻的范围为 33.7%~42.4%。在同一处理中,早稻和晚稻的有效穗数相差不大,但晚稻的穗粒数和结实率都显著高于早稻,而 70% 的磷都存在于子粒中<sup>[33]</sup>,使得晚稻的磷素利用率都显著高于早稻。然而,施磷量低于 60 kg/hm<sup>2</sup> 时是否能够得到更高的产量和磷肥利用率有待进一步研究,但是综合考虑产量和维持磷素表观平衡,60 kg/hm<sup>2</sup> 左右的施磷量是必需的<sup>[34]</sup>。

#### 3.2.2 施钾水平和移栽密度与钾素利用效率的关系

我国水稻钾肥利用率地区间的变异范围为 29.0%~33.8%<sup>[26]</sup>。本研究中,早稻上施钾量与 AEK 和 REK 呈抛物线关系,与 PFPK 呈线性负相关,其中 K120D39 的 AEK 和 REK 最高,与其它处理组合相比,分别高 2.9~13.4 kg/kg 和 4.6~43.6 个百分点。虽然 K120D39 的 PFPK 低于 K90D39 处理组合,但前者的产量要显著高于后者,高 726.8 kg/hm<sup>2</sup>。同一施钾水平下,早稻钾素利用率随着移栽密度的增加而增加,这是因为移栽密度增加了有效穗数,进而增加了干物质重,这有助于钾素在地上部累积。研究表明,D39 与其它密度相比,地上部钾素累积量高 5.2~32.3 kg/hm<sup>2</sup>。而对于晚稻,随着施钾量的增加,钾素利用率呈下降趋势,虽然 K90D33 的钾素农学效率略低于 K90D27 处理组合,但前者产量比后者高 507.9 kg/hm<sup>2</sup>。REK 和 PFPK 都以 K90D33 处理组合的最高。在同一处理中,当施钾量在 90 kg/hm<sup>2</sup> 时,晚稻的 REK 要高于早稻,但随着施钾量的升高,早稻的 REK 高于晚稻,这是因为晚稻的收获指数平均比早稻高 0.13,而 84% 的钾素都在秸秆中<sup>[33]</sup>,随着施钾量的升高,早稻的地上部钾素累积量高于晚稻导致 REK 前者高于后者(表 4)。与早稻相比,晚稻在产量最高时,不仅降低了施钾量,同时降低了移栽密度,晚稻种植季节的高温不仅有助于水稻分蘖,同时可以促进养分吸收,提

高养分利用率,且晚稻可以有效地利用早稻季残留养分。本研究获得了较高钾素利用率,与较低的土壤速效钾含量也存在一定关系,然而过量施钾并没有显著的增加钾素吸收量,因为过量施钾会降低水稻群体吸钾量<sup>[25]</sup>。

### 3.3 磷、钾用量和密度的协同优化

移栽密度和磷钾施用量对水稻的有效穗数、群体叶面积指数和干物质累积量具有显著影响,可提高水稻产量和品质<sup>[10]</sup>。在水氮管理基础上配施磷钾可以调节结实期稻株生理代谢活性,促进抽穗及成熟期各养分的累积,提高根系活力<sup>[35]</sup>,促进地上部干物质积累,提高子粒产量<sup>[36]</sup>。本研究磷肥试验中,早稻以 P60D39 处理组合具有较高的 REP (29.4%) 和 PFPP (88.4 kg/kg), REP 略低于 P60D33 组合(32.7%),但前者具有较高的产量,增加了 7.2%。而晚稻以 P60D33 处理组合的最高。钾肥试验中早稻在 K120D39 处理组合的产量、REK 和 PFPK 最高,而晚稻则以 K90D33 处理组合的最高。施用磷钾肥和增加移栽密度提高了水稻产量,但过高的施肥量并没有显著提高养分利用率,相反会造成资源浪费和环境污染。在考虑施肥量的同时,还要考虑种植季节,如本研究中晚稻季可以适当降低移栽密度,早稻的施钾量要高于晚稻,晚稻可以充分利用早稻季残留养分等。因此,在当前着重考虑水氮管理的同时,协调磷钾肥用量和移栽密度,并考虑不同种植季节是实现水稻高产及高磷肥和钾肥利用率的关键。本研究中,早稻和晚稻的施磷量在 60 kg/hm<sup>2</sup>,施钾量早稻在 120 kg/hm<sup>2</sup>,晚稻在 90 kg/hm<sup>2</sup>,移栽密度早稻在 39 万穴/hm<sup>2</sup>,晚稻在 33 万穴/hm<sup>2</sup> 时具有较高的产量和利用率,是适宜当地的磷钾肥用量和移栽密度。但使用更高的移栽密度(大于 39 万穴/hm<sup>2</sup>)能否进一步增加本研究区域的早稻产量还有待进一步研究。

### 参 考 文 献:

- [1] Wang Q, Huang J L, He F, *et al.* Head rice yield of "super" hybrid rice Liangyoupeijiu grown under different nitrogen rates [J]. *Field Crops Research*, 2012, 134: 71-79.
- [2] Qin J Q, Impa S M, Tan Q Y, *et al.* Integrated nutrient, water and other agronomic options to enhance rice grain yield and N use efficiency in double-season rice crop [J]. *Field Crops Research*, 2013, 148: 15-23.
- [3] 张福锁, 崔振玲, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略 [J]. *植物学通报*, 2007, 24(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 [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 687-694.
- [4] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对不同杂交水稻氮肥利用率的影响 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 470-479.  
He F, Huang J L, Cui K H, *et al.* Effect of real-time and site-specific nitrogen management on various hybrid rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 470-479.
- [5] 易琼, 赵士诚, 张秀芝, 等. 实时实地氮素管理对水稻产量和氮素吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 777-785.  
Yi Q, Zhao S C, Zhang X Z, *et al.* Yield and nitrogen use efficiency as influenced by real time and site specific nitrogen management in two rice cultivars [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 777-785.
- [6] 周江明, 赵琳, 董越勇, 等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 274-281.  
Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y, *et al.* Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 274-281.
- [7] Dobermann A. Nutrient use efficiency-measurement and management [A]. Krauss A, *et al.* Fertilizer best management practice: general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations [M]. Paris, France: International Fertilizer Industry Association, 2007. 1-28.
- [8] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207-4229.  
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20): 4207-4229.
- [9] 李熙英, 权成武, 黄世臣, 等. 施肥量与栽培密度对水稻二化螟为害程度的影响 [J]. *吉林农业大学学报*, 2013, 25(1): 31-34, 48.  
Li X Y, Quan C W, Huang S C, *et al.* Effect of application amount and planting density on damaging degree of *Chilo suppressalis* walker [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2013, 25(1): 31-34, 48.
- [10] 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 [J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(6): 646-653.  
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 [J]. *China Journal of Rice Science*, 2011, 25(6): 646-653.
- [11] 彭斌, 王国忠, 陆峥嵘, 等. 肥料密度对直播水稻“武运梗 8 号”产量及构成因素的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2003, 19(3): 157-162.  
Peng B, Wang G Z, Lu Z R, *et al.* Effects of planting density and fertilizer on yield and yield components of "Wuyunjing 8" under direct-seeding culture condition of paddy rice [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2003, 19(3): 157-162.
- [12] Van Ittersum M K, Cassman K G, Grassini P, *et al.* Yield gap

- analysis with local to global relevance- A review[J]. *Field Crops Research*, 2013, 143: 4-17.
- [13] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.  
Ministry of Agriculture. China agriculture statistical report[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- [14] FAO, FAOSTAT[DB/OL]. <http://faostat.fao.org>, 2013.
- [15] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Phosphorus loss from land to water: integrating and environmental management[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237: 287-307.
- [16] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-8.  
Lu R K. The phosphorus level of soil and environmental protection of water body[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2003, 18(1): 4-8.
- [17] Liu J P, Zhu J K. An Arabidopsis mutant that requires increased calcium for potassium nutrition and salt tolerance [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94, 14960-14964.
- [18] 廖育林, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 长期施钾对红壤水稻土水稻产量及土壤钾素状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 25(6): 1372-1379.  
Liao Y L, Zheng S X, Lu Y H, *et al.* Effects of long-term K fertilization on rice yield and soil K status in reddish paddy soil [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2009, 25(6): 1372-1379.
- [19] 王亚艺, 鲁剑巍, 肖荣英, 等. 湖北省两个生态区水稻施钾效果及农田钾素平衡研究[J]. 土壤, 2010, 42(3): 473-478.  
Wang Y Y, Lu J W, Xiao R Y, *et al.* Study on effects of potassium (K) fertilizer on rice and K balance of paddy fields in different types of eco-regions of Hubei province[J]. *Soils*, 2010, 42(3): 473-478.
- [20] 彭海欢, 翁晓燕, 徐红霞, 等. 缺钾胁迫对水稻光合特性及光合防御机制的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 621-625.  
Peng H H, Weng X Y, Xu H X, *et al.* Effects of potassium deficiency on photosynthesis and photo protection mechanisms in rice plants[J]. *China Journal of Rice Science*, 2006, 20(6): 621-625.
- [21] 付立东, 王宇, 李旭, 等. 滨海盐碱稻区钾肥施入量对水稻产量及钾肥利用率的影响[J]. 农业工程, 2012, 2(1): 80-83.  
Fu L D, Wang Y, Li X, *et al.* Effects of potash fertilizer amount on rice yield and potash use efficiency in coastal saline-alkaline rice growing area[J]. *Agricultural Engineering*, 2012, 2(1): 80-83.
- [22] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 五年定位试验钾肥用量对双季稻产量和施钾效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 598-605.  
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Effect of potassium rates on rice yields and potassium application efficiency in double-rice cropping system under a 5-year located experiment[J]. *Journal of Plant Nutrient and Fertilizer*, 2014, 20(3): 598-605.
- [23] 胡泓, 王光火. 钾肥对杂交水稻养分积累以及生理效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 184-189.  
Hu H, Wang G H. Influence of potassium fertilizer on nutrient accumulation and physiological efficiency of hybrid rice [J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2003, 9(2): 184-189.
- [24] 刘玲玲, 彭显龙, 刘元英, 等. 不同氮肥管理条件下钾对寒地水稻抗病性及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2258-2262.  
Liu L L, Peng X L, Liu Y Y, *et al.* Effects of K on rice blast and yield under different nitrogen managements in cold area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8): 2258-2262.
- [25] 王强盛, 甄若宏, 丁艳锋, 等. 钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1444-1450.  
Wang Q S, Zhen R H, Ding Y F, *et al.* Effects of potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain quality of japonica rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(10): 1444-1450.
- [26] 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.  
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiency of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [27] Chen M, Chen J, Sun F, *et al.* Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405: 140-152.
- [28] Li H, Huang Q, Meng L, *et al.* Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. *Plant and Soil*, 2011, 349: 157-167.
- [29] 湛芸, 何丙辉, 赵秀兰, 等. 小江流域农地水土流失对水体富营养化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 31-34, 43.  
Chen Y, He B H, Zhao X L, *et al.* Effect of soil erosion and water loss in farmland on water eutrophication in Xiaojiang river basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 31-34, 43.
- [30] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.  
Zhang W L, Wu S X, Ji H J, *et al.* Estimation of agricultural non-point source pollution in China and alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 Century [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [31] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63-67.  
Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in Southern China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 63-67.

- [32] 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.
- [33] Xu X P, Xie J G, Hou Y P, *et al.* Estimating nutrient uptake requirements for rice in China[J]. Field Crops Research, 2015, 180: 37-45.
- [34] 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.  
Ou H P, Zhou L Q, Huang M F, *et al.* Phosphorus balance in paddy soils and its environmental effect under different phosphorus application rates[J]. Journal of Plant Nutrient and Fertilizer, 2016, 22(1): 40-47.
- [35] 孙永健, 孙园园, 徐徽, 等. 水氮管理模式与磷钾肥配施对杂交水稻冈优 725 养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1335-1346.  
Sun Y J, Sun Y Y, Xu H, *et al.* Effects of water- nitrogen management patterns and combined application of phosphorus and potassium fertilizers on nutrient absorption of hybrid rice Gangyou 725 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46 (7): 1335-1346.
- [36] 杜加银, 茹美, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 523-533.  
Du J Y, Ru M, Ni W Z. Effects of fertilization with reducing nitrogen, controlling phosphorus and stabilizing potassium on rice yield and nutrient accumulation[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2013, 19(3): 523-533.