

中国水稻区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究

吴良泉^{1,2} 武良¹ 崔振岭¹ 陈新平^{1*} 张福锁¹

(1. 中国农业大学 资源环境与粮食安全研究中心,北京 100193;

2. 福建农林大学 资源与环境学院,福州 350002)

摘要 在总结分析 2005—2010 年在全国水稻主产区进行的 1 190、9 608 和 9 490 组氮、磷和钾肥肥效试验并参考有关文献资料的基础上,将我国水稻主产区分为 5 个大区和 9 个施肥亚区,并对 8 个施肥亚区(除了 V 区外)的氮磷钾肥优化用量及肥料配方进行系统研究。结果表明:东北单季稻区(I)、长江流域单双季稻区(II)及江南丘陵山地单双季稻区(III)的单季稻产量水平较高(8.3~9.0 t/hm²),长江中游单双季稻区(II-2)和江南华南单双季稻区(III)的早晚稻及西南高原丘陵单季稻区(IV)的产量较低(6.8~7.5 t/hm²);我国水稻 8 个施肥亚区的氮肥推荐用量平均为 N 172 kg/hm²,其中以东北寒地单季稻区(I-1)最低(N 116 kg/hm²),长江下游单季稻区(II-3)最高(N 256 kg/hm²);磷肥推荐用量平均为 P₂O₅ 71 kg/hm²,江南华南单双季稻区(III)的早晚稻最低(P₂O₅ 59 kg/hm²),长江下游单季稻区(II-3)最高(P₂O₅ 84 kg/hm²);钾肥推荐用量平均为 K₂O 62 kg/hm²,以东北寒地单季稻区(I-1)最低(K₂O 45 kg/hm²),华南平原丘陵双季稻区(III-2)晚稻最高(K₂O 80 kg/hm²)。针对我国水稻的 8 个施肥亚区总共确定了 11 个区域肥料配方,其中包括 7 个高浓度配方和 4 个中低浓度配方。长江流域单双季稻区(II)应适当增加磷肥的投入以提高土壤磷肥力水平,同时应加强中低浓度配方肥的应用。

关键词 水稻;区域;养分推荐用量;配方

中图分类号 S 143; S 511

文章编号 1007-4333(2016)09-0001-13

文献标志码 A

Studies on recommended nitrogen, phosphorus and potassium application rates and special fertilizer formulae for different rice production regions in China

WU Liang-quan^{1,2}, WU Liang¹, CUI Zhen-ling¹, CHEN Xin-ping^{1*}, ZHANG Fu-suo¹

(1. Centre for Resources, Environment and Food Security, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract This study summarized and analyzed a total of 1 190,9 608 and 9 490 on-farm experiments with various rates of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), conducted during 2005—2010 across major agro-ecological regions of rice production in China. Based on the data obtained and literature analysis, China rice production area was divided into 5 major agro-ecological regions and 9 sub-regions. Optimal rates of N, P and K and formulated optimized compound fertilizer for 8 sub-regions (excluding region V) were estimated. The results showed that single rice yield in the Northeast China (region I), Yangtze River (region II) and the South China (region III) was 8.3–9.0 t/hm², which was higher than that of single rice in Southwest China (region IV), and as well as that of early rice and late rice in the middle reaches of Yangtze River (sub-region II-2) and the South China (region III) (6.8–7.5 t/hm²). Nationally, the optimal rates of N across all the 8 sub-regions were N 172 kg/ha and ranged from 116 kg/ha in the cold sub-region in the Northeast China (I-1) to 256 kg/hm² in the lower reaches of Yangtze River sub-region (II-3). The optimal rates of P were P₂O₅ 71 kg/hm² and ranged from 59 kg/hm² for early rice and late rice in the South China (III) to 84 kg/hm² for

收稿日期: 2015-12-09

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203013, 201103003)

第一作者: 吴良泉, 讲师, 主要从事养分资源管理研究, E-mail: liangquan01@163.com

通讯作者: 陈新平, 教授, 主要从事养分资源管理研究, E-mail: chenxp@cau.edu.cn

single rice in the lower reaches of Yangtze River sub-region (II-3). The optimal rates of K were K_2O 62 kg/hm² and ranged from 45 kg/hm² for single rice in the cold sub-region in the Northeast China (I-1) to 80 kg/hm² for late rice in the plain and hilly sub-region in the South China (III-2). A total of 11 regional special fertilizer formulae were designed for the 8 rice sub-regions, including 7 compound fertilizer formulae with high nutrient concentration and 4 with medium concentration. In general, more attention should be paid to Yangtze River region, where P fertilizer input should be increased slightly to build-up soil P, and the application of medium nutrient concentration special fertilizer should be enhanced.

Keywords rice; region; optimal nutrient rate; fertilizer formula

水稻是世界上最主要的粮食作物之一。到2025年,世界水稻总产预计需要增加60%才能满足人口增加所带来的需求^[1]。在我国,稻谷产量约占谷物总产量的39%,超过半数以上的人口以稻米为主食^[3]。因此,提高水稻产量对于保障我国乃至全球的粮食安全至关重要。科学施肥是保障水稻高产稳产及减少环境污染的重要途径。然而,当前水稻生产中的施肥问题仍比较突出。彭少兵等^[3]研究表明我国水稻生产所消耗的氮肥占世界水稻氮肥总消耗量的37%,与世界主要稻米生产国相比,中国水稻生产上氮肥施用量较高而肥料利用率较低。我国水稻的氮肥利用率由20世纪80年代的30%~35%下降到2001—2005年的28%^[4]。通过对6611个农户调查分析表明,我国水稻主产区氮盈余量为82 kg/hm²,其中农户施氮过量占调查农户的56%,施氮不足占33%,施氮合理占11%^[5]。不同区域间的施肥用量差异很大^[6]。显然,优化区域肥料用量对于保障水稻高产和保护环境具有重要意义。然而,我国水稻不同生态区域间的气候条件、稻作制度和土壤条件等差异很大,在不同区域的优化施肥量有何差异和优化施肥量的多少方面仍缺乏系统报道。

复合肥是粮食生产中的重要化肥品种。然而,通过大样本的农户调查研究表明:与施用单质肥相比,施用复合肥对水稻单产贡献很小(产量提高2.7%),而氮投入增加23%,磷投入增加9%,钾投入降低15%,肥料成本提高了20%^[7],复合肥的养分配比和用量不合理是很重要的原因。因此,通过研制区域作物专用复合肥配方以匹配作物的需求和土壤的供肥性能对于实现水稻高产和保护环境具有重要意义。虽然国内已有从大农场、县域、省域等尺度上对水稻肥料配方的一些研究^[8-11],但仍缺乏从全国范围的尺度上系统报道水稻不同生态区域的区域肥料配方的研究。

本研究以我国水稻产区作为研究对象,基于在

玉米上建立的方法^[12]确定不同区域养分优化用量和肥料配方。整理分析2005—2010年进行的1190、9608和9490组氮、磷和钾肥肥效试验,这些试验数据覆盖了全国水稻的主要产区并具有较好的代表性,涵盖了不同生态条件、多年的气候条件以及不同管理措施,拟为明确我国水稻不同生态区的氮磷钾肥推荐用量、制定不同生态区域的肥料配方与施肥提供参考。

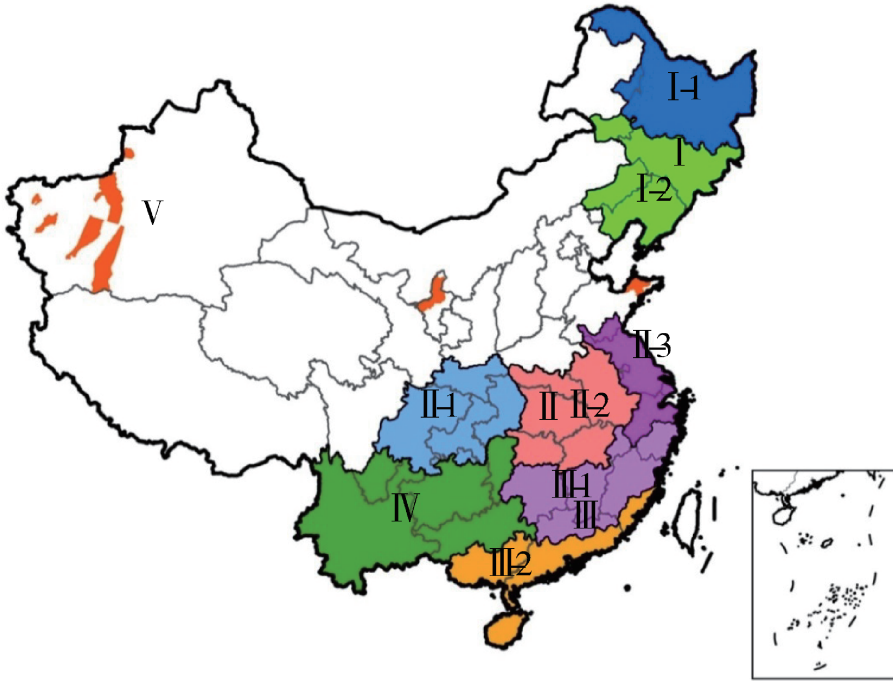
1 材料与方法

1.1 中国水稻施肥分区

基于GIS(地理信息系统)的我国县域农业统计数据,在搜集整理相关文献资料基础上^[13-20],充分考虑影响作物生产的关键因素,确定我国水稻的施肥分区。根据区域和生产布局将我国水稻主产区分为5个大区,即:I东北单季稻区、II长江流域单双季稻区、III江南华南单双季稻区、IV西南高原山地单季稻区和V其它稻区。根据大区内的气候、栽培和土壤条件进一步细分为9个亚区(图1),这9个亚区覆盖了全国水稻总面积的98%以上,根据气候条件差异将东北单季稻区分为2个亚区:I-1东北寒地单季稻区和I-2东北吉辽内单季稻区。同时,根据种植制度、地形条件和栽培管理条件差异将长江流域单双季稻区分为3个亚区:II-1长江上游单季稻区(此区主要稻作制度为单季稻,主要地形为丘陵和山地);II-2长江中游单双季稻区(此区稻作制度以单季稻和双季稻并存,主要地形为平原和丘陵);II-3长江下游单季稻区(此区主要稻作制度为单季稻,主要地形为平原,且管理水平较高,水稻产量高)。根据气候条件、地形条件和土壤条件差异将江南华南单双季稻区分为2个亚区:III-1江南丘陵山地单双季稻区(此区为中亚热带气候,主要地形为丘陵和山地,主要土壤类型为红壤和黄壤);III-2华南平原丘陵双季稻区(此区为热带和南亚热带气候,主要地形为平原和丘陵,主要土壤类型为赤红壤和砖红壤)。这9个亚区(I-1、I-2、II-1、II-2、II-3、

Ⅲ-1、Ⅲ-2、Ⅳ、Ⅴ)的水稻播种面积占全国水稻播种面积的百分比分别为 9.9%、4.5%、9.0%、27.4%、11.6%、17.8%、8.6%、8.2%和 1.5%；总产所占百分比分别为 10.0%、5.3%、10.3%、27.4%、14.1%、16.2%、7.0%、7.4%和 1.9%。Ⅴ区主要

包括新疆维吾尔自治区有灌溉条件的冲积平原和河谷平原、宁夏回族自治区引黄灌区和渤海湾沿岸，由于该区域的播种面积和总产占我国水稻的比重很小，且零星分布，覆盖范围较广，情况较复杂，因此没有纳入本研究中。



- I 东北单季稻区 The region of the Northeast China with single rice cropping production
- I-1 东北寒地单季稻区 Cold sub-region in the Northeast China
- I-2 东北吉辽内蒙单季稻区 Jilin-Liaoning-Inner Mongolia sub-region in the Northeast China
- II 长江流域单双季稻区 The region of the Yangtze River with both single and double rice cropping production
- II-1 长江上游单季稻区 Upper reaches of the Yangtze River sub-region with single rice cropping
- II-2 长江中游单双季稻区 Middle reaches of the Yangtze River sub-region with both single and double rice cropping
- II-3 长江下游单季稻区 Lower reaches of the Yangtze River sub-region with single rice cropping
- III 江南华南单双季稻区 The region of the South China with both single and double rice cropping production
- III-1 江南丘陵山地单双季稻区 Hilly and mountainous sub-region in the south of Yangtze River with both single and double rice cropping
- III-2 华南平原丘陵双季稻区 Plain and hilly sub-region in the South China with double rice cropping
- IV 西南高原山地单季稻区 The region of the Southwest China with single rice cropping production
- V 其他 Other region

相关统计数据均未包含台湾、香港和澳门数据，下同。

Not include data from Hong Kong, Macao, and Taiwan. The same bellow.

图 1 中国水稻施肥分区图

Fig. 1 The regionalization of rice fertilization in China

1.2 试验处理

在水稻施肥分区的基础上，为分析不同区域的肥效反应和确定养分推荐用量，采用了来自于 2005—2010 年农业部测土配方施肥项目、全国养分资源管理协作网及公益性行业(农业)科研专项的 1 190、9 608 和 9 490 组氮、磷和钾肥肥效试验，各区域样本数如表 1 所示。其中：1)所有氮肥肥效试验点均包含 4 个氮水平(即 N_0 、 N_1 、 N_2 和 N_3)。 N_0

为不施肥， N_2 是根据当地专家推荐确定的优化施用量近似值， $N_1 = N_2 \times 0.5$ ， $N_3 = N_2 \times 1.5$ 。不同试验点的 N_2 水平施氮量有所差异，变幅为 91 ~ 300 kg/hm²，平均值为 173 kg/hm²。磷和钾肥的用量根据当地专家推荐确定，其供应量满足作物的正常生长需求。2)磷肥肥效试验采用了不施磷对照和施磷区处理，重点分析区域水稻对磷肥的产量反应及其与土壤有效磷含量的关系。不同试验点的施磷

区磷肥用量是根据当地专家推荐确定的优化施用量近似值,不同试验点间有所差异,变幅为 P_2O_5 21~187 kg/hm²,平均为 68 kg/hm²。氮和钾肥的用量根据当地专家推荐确定,其供应量满足作物的正常生长需求。3)钾肥肥效试验中有 2 549 组包含 4 个钾水平(即 K_0, K_1, K_2 和 K_3);6 941 组试验包含 2 个钾水平(即 K_0 和 K_2)。 K_0 为不施肥, K_2 是根据当地专家推荐确定的优化施钾量近似值, $K_1 = K_2 \times$

0.5, $K_3 = K_2 \times 1.5$ 。不同试验点的 K_2 水平施钾量平均为 K_2O 99 kg/hm²(变幅为 23~270 kg/hm²)。氮和磷肥的用量根据当地专家推荐确定,其供应量满足作物的正常生长需求。因试验主要研究氮、磷、钾 3 元素的肥料效应,试验设计主要采用“3414”方案设计,未考虑有机肥的肥料效应,故而本研究中所所有试验均不施用有机肥。试验小区面积均在 30 m² 以上,随机区组排列。

表 1 不同区域水稻氮磷钾肥效试验样本数

Table 1 The number of samples of on-farm nitrogen, phosphorus and potassium experiments in different rice sub-regions

区域 Region	稻作 Cropping system	氮肥 Nitrogen	磷肥 Phosphorus	钾肥 Potassium
I-1	单季稻	47	1 497	1 241
I-2	单季稻	89	286	286
II-1	单季稻	77	900	991
II-2	早稻	210	379	408
	中稻	51	1 680	1 623
	晚稻	180	385	444
II-3	单季稻	36	1 007	1 003
	早稻	67	425	424
III-1	中稻	47	537	535
	晚稻	83	544	543
III-2	早稻	62	423	409
	晚稻	77	407	448
IV	单季稻	164	1 138	1 135
总计 Sum	—	1 190	9 608	9 490

注: I-1、I-2、II-1、II-2、II-3、III-1、III-2 和 IV 分别代表东北寒地单季稻区、东北吉辽内单季稻区、长江上游单季稻区、长江中游单季稻区、长江下游单季稻区、江南丘陵山地单双季稻区、华南平原丘陵双季稻区、西南高原山地单季稻区,下同。

Note: I-1, I-2, II-1, II-2, II-3, III-1, III-2 and IV represent cold sub-region in the Northeast China, Jilin-Liaoning-Inner Mongolia sub-region in the Northeast China, upper reaches of the Yangtze River sub-region with single rice cropping, middle reaches of the Yangtze River sub-region with both single and double rice cropping, lower reaches of the Yangtze River sub-region with single rice cropping, hilly and mountainous sub-region in the south of Yangtze River with both single and double rice cropping, plain and hilly sub-region in the South China with double rice cropping, the region of the Southwest China with single rice cropping production. The same below.

1.3 取样、样品分析及测产

在试验开始实施之前,各试验取耕层(0~

20 cm)土壤样品,风干过筛后采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提,钼锑抗比色法测定有效磷含量^[21]。

在成熟期,每个小区划取 2.5 m×8 m 的测产样方,人工进行小区测产,水稻的产量换算成含有 13.5% 水分的标准产量。

1.4 数据处理

1.4.1 不同区域氮肥总量控制的计算方法

区域氮肥总量控制的原理与方法见参考文献[12]。本研究中氮(N)肥价格为 4.87 元/kg,水稻价格为 2.63 元/kg,氮肥价格与水稻价格比为 1.85:1(氮肥和水稻价格均来自于神农网 <http://www.sn110.com/>,为 2012 年 4 个季度价格的平均值)。

1.4.2 不同区域磷肥肥效反应及基于恒量监控的磷肥推荐方法

磷肥肥效反应及磷肥恒量监控的原理与方法见参考文献[12]。其中,不同生态区域水稻单位产量下吸磷量由 2000—2012 年本课题组研究数据和文献调研数据计算获得;长江上游单季稻区和西南高原山地单季稻区 0.85 kg($n=248$);长江中游单双季稻区 0.87 kg($n=112$);长江下游单季稻区 0.93 kg($n=115$);江南华南单双季稻区参照长江中游单双季稻区按 0.87 kg 计算。此外,东北单季稻区每生产百公斤籽粒需磷量(P_2O_5)为 0.78 kg(参考《中国主要作物施肥指南》^[22])。

当缺磷区相对产量 $<90\%$ (或土壤 Olsen-P <15 mg/kg),磷肥用量为作物带走量的 1.15 倍。其中由于长江中游单双季稻区(II-2)的早稻-晚稻轮作体系,磷肥管理应视为一个整体,将更多的磷应用到对磷更为敏感的早稻上,因此,早稻季磷肥用量调整为作物带走量的 1.3 倍,晚稻季磷肥的用量为作物带走量;当缺磷区相对产量 $>90\%$ (或土壤 Olsen-P >20 mg/kg),磷肥用量为作物带走量。

1.4.3 不同区域钾肥肥效反应

钾肥肥效反应的原理与方法见参考文献[12]。

1.4.4 区域大配方设计及其小调整方案

1)大配方设计。

大配方的设计方法见参考文献[12]。I 东北单季稻区和 II-3 长江下游单季稻区的基肥、分蘖肥和穗粒肥质量比为 4:4:2;其他稻区基肥、分蘖肥和穗粒肥质量比 5:3:2。不同区域均设计了高浓度配方(以总养分浓度($N+P_2O_5+K_2O$)45%为例);针对长江流域单双季稻区同时设计了中浓度配方(以总养分浓度($N+P_2O_5+K_2O$)30%为例),旨在提供水稻生长需要的钙、镁、硫和硅等中微量元素。

2)小调整方案。

①根据产量水平调整用量:方法见参考文献[12]。

②钾肥的调整:在较高产量水平下(>9.0 t/hm²)穗粒肥可以结合 15~45 kg/hm² 氯化钾做追肥。

2 结果与分析

2.1 不同区域氮肥推荐用量

根据 MRTN 法(区域最大收益施氮量)计算得到不同区域氮肥的推荐用量(表 2)。不同施肥区及不同稻作的氮肥推荐用量(以纯 N 计)变幅为 116~256 kg/hm²,加权平均为 172 kg/hm²。区域间的推荐用量存在较大差异,长江下游单季稻区(II-3)最高(256 kg/hm²),东北寒地单季稻区(I-1)最低为 116 kg/hm²,其他区域介于 156~172 kg/hm²。

表 2 不同区域氮肥推荐用量

Table 2 The optimal regional N rates for different cropping system in different rice sub-regions in China kg/hm²

区域 Region	稻作 Cropping system	氮肥推荐用量 The optimal regional N rates
I-1	单季稻	116
I-2	单季稻	156
II-1	单季稻	159
II-2	早稻	163
	中稻	166
II-3	晚稻	172
	单季稻	256
III-1	早稻	160
	中稻	166
III-2	晚稻	161
	早稻	165
IV	晚稻	168
	单季稻	166
平均 Average	—	172

2.2 不同区域磷肥推荐用量

不同施肥区及稻作上土壤速效磷(Olsen-P)加权平均为 19.8 mg/kg(变幅 13.2~29.5 mg/kg),

相对产量 86.7%~93.2%，总体上已经处于较高水平，然而长江流域的土壤速效磷 (Olsen-P) 在 13.2~17.1 mg/kg，仍处于较低水平 (表 3)。不同区域的目标产量也存在一定的差异 (表 3)。东北单季稻区 (I)、长江流域单双季稻区 (II) 及江南

丘陵山地单双季稻区 (III-1) 的单季稻产量水平较高 (8.3~9.0 t/hm²)，长江中游单双季稻区 (II-2) 和江南华南单双季稻区 (III) 的早晚稻及西南高原丘陵单季稻区 (IV) 的产量较低 (6.8~7.5 t/hm²)。

表 3 不同区域磷肥推荐用量

Table 3 The optimal regional phosphorus rates for different rice cropping system in different rice sub-regions in China

区域 Region	稻作 Cropping system	速效磷/ (mg/kg) Olsen-P	相对产量/ % Relative yield	目标产量/ (t/hm ²) Target yield	施肥策略 Strategy of P recommendation	磷肥推荐用量/ (kg/hm ²) Optimal P rate
I-1	单季稻	27.7±18.8	91.1	8.3	等于作物吸收量	64
I-2	单季稻	21.1±14.2	89.5	9.0	等于作物吸收量	70
II-1	单季稻	13.3±12.2	88.5	8.3	等于作物吸收量×1.15	81
	早稻	14.7±11.8	87.9	6.8	等于作物吸收量×1.3#	77
II-2	中稻	14.4±8.9	86.7	8.3	等于作物吸收量×1.15	83
	晚稻	13.2±8.2	89.3	7.5	等于作物吸收量#	65
II-3	单季稻	17.1±11.6	91.2	9.0	等于作物吸收量	84
	早稻	21.3±16.8	91.1	6.8	等于作物吸收量	59
III-1	中稻	22.1±18.3	91.2	8.3	等于作物吸收量	72
	晚稻	25.3±19.4	92.1	6.8	等于作物吸收量	59
	早稻	29.5±20.7	93.2	6.8	等于作物吸收量	59
III-2	晚稻	28.8±22.9	92.8	6.8	等于作物吸收量	59
IV	单季稻	21.6±17.1	90.7	7.5	等于作物吸收量	64

注：“#”，II-2 长江中游单双季稻区的早稻—晚稻轮作体系，磷肥推荐上应视为一个整体，将更多的磷应用到早稻上，因此，早稻季磷肥用量为作物带走量的 1.3 倍，晚稻季磷肥的用量为作物带走量。

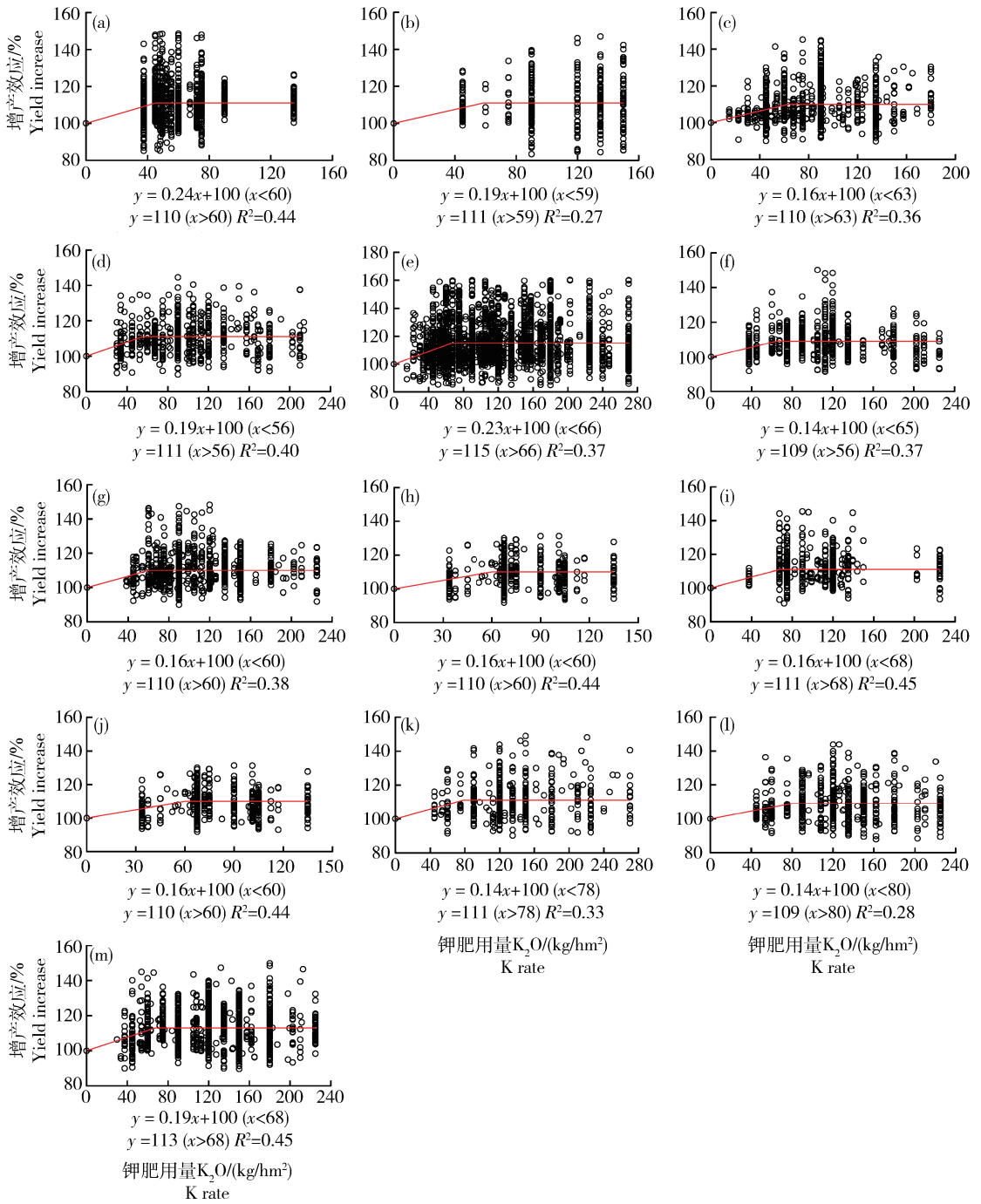
Note: #, P is recommended for double-season rice (early and late rice) as a whole in the sub-region of double and single rice cropping on the middle reaches of the Yangtze River (II-2 sub-region); More P was applied to early rice due to early rice was more sensitive to P than late rice; P recommendation rate of early rice equals to 130% crop removal while the P recommendation of late rice equals to crop removal.

根据恒量监控的原则，对于缺磷区相对产量 < 90% (或土壤 Olsen-P < 20 mg/kg) 的区域，如 II-1、和 II-2 区，采取适当提高土壤肥力的策略，这些区域的磷肥用量为作物吸收量的 1.15 倍 (II-2 长江中游单双季稻区的早稻—晚稻轮作体系，磷肥推荐上应视为一个整体，将更多的磷应用到早稻上，因此，早稻季磷肥用量为作物吸收量的 1.3 倍，晚稻季磷肥的用量为作物吸收量)；对于缺磷区相对产量 > 90% (或土壤 Olsen-P > 20 mg/kg) 的区域，如 I、III 和 IV 区，采取维持的策略，磷肥用量为作物吸收量。相应地，不同区域磷肥推荐用量 (以 P₂O₅ 计) 的范

围为 59~83 kg/hm²，加权平均为 71 kg/hm²。长江流域单双季稻区 (II) 的磷肥推荐用量最高 (65~84 kg/hm²)，东北单季稻区 (I) 次之 (64~70 kg/hm²)，其他区域较低 (59~72 kg/hm²)。

2.3 不同区域钾肥推荐用量

在不同施肥区及稻作上，“线性+平台”模型均能够很好的拟合增产效应与钾肥用量之间的关系 (图 2)，总体而言，我国水稻施用钾肥的增产幅度为 9%~15%。根据“线性+平台”模型计算而得不同区域及稻作上的最佳钾肥用量 (以 K₂O 计)，其变化范围在 45~80 kg/hm²，加权平均为 62 kg/hm²。



(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)、(i)、(j)、(k)、(l)和(m)分别代表 I-1 亚区单季稻、I-2 亚区单季稻、II-1 亚区单季稻、II-2 亚区早稻、II-2 亚区中稻、II-2 亚区晚稻、II-3 亚区单季稻、III-1 亚区早稻、III-1 亚区中稻、III-1 亚区晚稻、III-2 亚区早稻、III-2 亚区晚稻、IV 区单季稻

(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)、(i)、(j)、(k)、(l) and (m) represent single rice in sub-region I-1, single rice in sub-region I-2, single rice in sub-region II-1, early rice in sub-region II-2, middle rice in sub-region II-2, late rice in sub-region II-2, single rice in sub-region II-3, early rice in sub-region III-1, middle rice in sub-region III-1, late rice in sub-region III-1, early rice in sub-region III-2, late rice in sub-region III-2, single rice in region IV, respectively.

图 2 不同区域钾肥用量与增产效应之间的关系

Fig. 2 Correlation between yield increase and K application rates of different cropping system in different rice sub-regions in China

华南平原丘陵双季稻区(Ⅲ-2)的钾肥最佳用量最高(78~80 kg/hm²);长江流域单双季稻区(Ⅱ)、江南丘陵山地单双季稻区(Ⅲ-1)和西南高原山地单季稻区(Ⅳ)次之(56~68 kg/hm²);东北单季稻区域(Ⅰ)较低(Ⅰ-1东北寒地单季稻区和Ⅰ-2东北吉辽内单季稻区的钾肥最佳用量分别为45和59 kg/hm²)。

2.4 不同区域的大配方

针对全国水稻8个施肥亚区及不同稻作方式总共设计了11个肥料配方(表4),其中包括高浓度配方7个:东北寒地单季稻区(Ⅰ-1)、长江中游单双季稻区(Ⅱ-2)晚稻和江南丘陵山地单双季稻区(Ⅲ-1)的早晚稻的配方(以N-P₂O₅-K₂O计)为19-13-13;东北吉辽内单季稻区(Ⅰ-1)的配方为15-16-14;长江上游单季稻区(Ⅱ-1)和长江中游单双季稻区

(Ⅱ-2)中稻的配方为16-16-13;长江中游单双季稻区(Ⅱ-2)早稻分别为18-15-10;长江下游单季稻区(Ⅱ-3)为19-15-11;江南丘陵山地单双季稻区(Ⅲ-1)的中稻配方为17-14-14;华南平原丘陵双季稻区(Ⅲ-2)的早晚稻配方为18-12-16;西南高原山地单季稻区(Ⅳ)的配方为17-13-15。包括低浓度配方4个:长江上游单季稻区(Ⅱ-1)为11-11-8;长江中游单双季稻区(Ⅱ-2)的早稻和长江下游单季稻区(Ⅱ-3)的配方为12-10-7;长江中游单双季稻区(Ⅱ-2)的中、晚分别为11-11-9和12-9-9。这些配方适宜作基肥施用,在关键生育时期追施氮肥,并根据产量水平相应调整肥料用量(如表4所示)。针对高产水稻(>9.0 t/hm²)穗粒肥还可以结合15~45 kg/hm²氯化钾做追肥。

表4 中国水稻不同区域肥料配方与施肥建议

Table 4 Regional fertilizer formulae and fertilizer recommendations of different cropping system in different rice sub-regions in China

区域 Region	稻作 Cropping system	推荐配方 Fertilizer formula N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	产量水平/ (t/hm ²) Yield level	基肥用量 (配方肥)/ (kg/hm ²) Special fertilizer	分蘖肥用量 (尿素)/ (kg/hm ²) Tiller fertilizer (Urea)	穗粒肥用量/(kg/hm ²) Panicle-spikelet fertilizer	
						尿素 Urea	氯化钾 Potassium chloride
Ⅰ-1	单季稻	13-19-13#	6.8~8.3	277~339	82~100	41~50	0
			>8.3~10.5	399~431	100~127	50~64	15~45
			>10.5	431~493	127~145	64~73	15~45
			<6.8	216~277	64~82	32~41	0
Ⅰ-2	单季稻	15-16-14#	7.5~9.0	354~425	114~137	57~68	0
			>9.0~10.5	425~496	137~159	68~80	15~45
			>10.5	496~567	159~182	80~91	15~45
			<7.5	283~354	91~114	46~57	0
Ⅱ-1	单季稻	11-11-8*	6.8~8.3	600~733	83~101	55~67	0
			>8.3~9.8	733~866	101~119	67~79	0
			>9.8	866~1 000	119~138	79~92	15~45
			<6.8	467~600	64~83	43~55	0
		16-16-13#	6.8~8.3	412~504	83~101	55~67	0
			>8.3~9.8	504~596	101~119	67~79	0
			>9.8	596~687	119~138	79~92	15~45
			<6.8	321~412	64~83	43~55	0

表 4(续)

区域 Region	稻作 Cropping system	推荐配方 Fertilizer formula N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	产量水平/ (t/hm ²) Yield level	基肥用量 (配方肥)/ (kg/hm ²) Special fertilizer	分蘖肥用量 (尿素)/ (kg/hm ²) Tiller fertilizer (Urea)	穗粒肥用量/(kg/hm ²) Panicle-spikelet fertilizer		
						尿素 Urea	氯化钾 Potassium chloride	
II-2	早稻	12-10-7 *	5.3~6.8	583~750	76~98	51~65	0	
			>6.8~8.3	750~917	98~120	65~80	0	
			>8.3	917~1083	120~141	80~94	0	
			<5.3	417~583	54~76	36~51	0	
			18-15-10 #	5.3~6.8	389~500	76~98	51~65	0
				>6.8~8.3	500~611	98~120	65~80	0
	>8.3	611~722		120~141	80~94	0		
	<5.3	278~389		54~76	36~51	0		
	中稻	11-11-9 *	6.8~8.3	614~750	97~118	64~79	0	
			>8.3~9.8	750~887	118~139	79~93	0	
			>9.8	887~1023	139~161	93~107	15~45	
			<6.8	478~614	75~97	50~64	0	
		16-16-13 #	6.8~8.3	422~516	97~118	64~79	0	
			>8.3~9.8	516~610	118~139	79~93	0	
	晚稻	12-9-9 *	>9.8	610~703	139~161	93~107	15~45	
			<6.8	328~422	75~97	50~64	0	
			6.0~7.5	604~756	86~107	57~72	0	
			>7.5~9.0	756~907	107~129	72~86	0	
		19-13-13 #	>9.0	907~1058	129~150	86~100	15~45	
			<6.0	453~604	64~86	43~57	0	
	II-3	单季稻	12-10-7 *	6.0~7.5	418~523	77~96	51~64	0
				7.5~9.0	523~628	96~115	64~77	0
				>9.0	628~732	115~134	77~90	15~45
				<6.0	314~418	58~77	38~51	0
19-15-11 #				7.5~9.0	692~830	188~225	94~113	0
				>9.0~10.5	830~968	225~263	113~131	15~45
单季稻		12-10-7 *	>10.5	968~1107	263~300	131~150	15~45	
			<7.5	553~692	150~188	75~94	0	
			7.5~9.0	461~553	181~217	90~109	0	
			>9.0~10.5	553~646	217~253	109~127	15~45	
		19-15-11 #	>10.5	646~738	253~290	127~145	15~45	
			<7.5	369~461	145~181	72~90	0	

表4(续)

区域 Region	稻作 Cropping system	推荐配方 Fertilizer formula N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	产量水平/ (t/hm ²) Yield level	基肥用量 (配方肥)/ (kg/hm ²) Special fertilizer	分蘖肥用量 (尿素)/ (kg/hm ²) Tiller fertilizer (Urea)	穗粒肥用量/(kg/hm ²) Panicle-spikelet fertilizer		
						尿素 Urea	氯化钾 Potassium chloride	
Ⅲ-1	早稻	19-13-13 #	5.3~6.8	359~462	78~101	52~67	0	
			>6.8~8.3	462~564	101~123	67~82	0	
			>8.3	564~667	123~146	82~97	0	
				<5.3	256~359	56~78	37~52	0
				6.8~8.3	419~513	92~112	61~75	0
				>8.3~9.8	513~606	112~132	75~88	0
	中稻	17-14-14 #	>9.8	606~699	132~153	88~102	15~45	
			<6.8	326~419	71~92	48~61	0	
			5.3~6.8	359~462	78~101	52~67	0	
	晚稻	19-13-13 #	>6.8~8.3	462~564	101~123	67~82	0	
			>8.3	564~667	123~146	82~97	0	
			<5.3	256~359	56~78	37~52	0	
Ⅲ-2	早稻	18-12-16 #	5.3~6.8	389~500	76~98	51~65	0	
			>6.8~8.3	500~611	98~120	65~80	0	
			>8.3	611~722	120~141	80~94	0	
				<5.3	278~389	54~76	36~51	0
				5.3~6.8	389~500	76~98	51~65	0
				6.8~8.3	500~611	98~120	65~80	0
	晚稻	18-12-16 #	>8.3	611~722	120~141	80~94	0	
			<5.3	278~389	54~76	36~51	0	
			6.0~7.5	394~492	85~106	57~71	0	
	Ⅳ	单季稻	17-13-15 #	>7.5~9.0	492~591	106~127	71~85	0
				>9.0	591~689	127~148	85~99	0
				<6.0	295~394	64~85	42~57	0

注：“#”高浓度配方；“*”中浓度配方。

Note: # high nutrient concentration compound fertilizer formulae; * medium nutrient concentration compound fertilizer formulae.

3 讨论与结论

3.1 我国水稻氮磷肥的合理施用

从本研究结果来看,不同区域间的氮肥推荐用量存在较大的差异(变幅为 N 116~256 kg/hm²,加权平均为 172 kg/hm²),这反映了不同区域的土壤供肥能力和产量水平的明显差异。东北寒地水稻单

季稻区(Ⅰ-1)的最佳氮肥用量(N 116 kg/hm²)显著低于其他区域,这既可能与该区域的土壤供氮能力较强有关,又可能与其一年一作的种植制度有关。赵晓宇等^[23]研究表明黑龙江稻田土壤有机质平均为 41.8 g/kg($n=346$);彭显龙等^[24]根据寒地水稻实地氮肥管理技术研究表明,一般 8~9 t/hm² 的目标产量水平下,氮肥推荐用量应控制在在 90~

120 N kg/hm², 与本研究结果一致; 此外, 养分平衡的分析显示, 黑龙江省寒地水稻百公斤籽粒吸氮(N)量仅为 1.6 kg, 远低于其他水稻产区, 再考虑其它氮素来源(如秸秆还田、生物固氮及降雨等), 该区域施氮量为 N 115 kg/hm² 就能保持稻田氮素的平衡^[25]。另外, 长江下游单季稻区(Ⅱ-3)的最佳施氮用量为(N 256 kg/hm²), 显著高于其他区域, 这可能与该区域的产量水平(9.0 t/hm²)和养分需求量较高有关, 又与该区域氮通过各种途径的损失较高有关^[26]。马立珩等^[27]通过文献调研获得的江苏水稻试验中专家推荐的平均施氮量, 苏中、苏中和苏南地区分别为 N 266、272 和 230 kg/hm², 与本文结果非常接近。

本研究发现, 我国水稻主产区土壤速效磷(Olsen-P)加权平均为 19.8 mg/kg, 除了长江流域的土壤速效磷(Olsen-P)较低以外(13.2~17.1 mg/kg), 其他区域的土壤磷均已处于较高的水平(21.1~29.5 mg/kg)。相对其他区域而言, 长江流域水稻施磷有较好的增产效应, 尤其是长江中上游地区(相对产量介于 86.7%~89.3%)。我们对长江上游的重庆江津区稻田土壤养分状况研究表明, 稻田土壤速效磷有 88% 处于低水平(小于 10 mg/kg), 通过增加磷肥投入促进了水稻低位分蘖及有效穗的形成并显著提高了水稻产量^[8]。范珊珊^[9]对安徽省农田土壤养分变化研究表明, 土壤速效磷从第 2 次普查的 7.0 mg/kg 提升到当前的 16.5 mg/kg, 然而安徽东南部和中部的长江流域地区的土壤磷仍处于较低水平(主要是分布在 10~15 mg/kg)。张毅^[10]研究表明, 长江流域稻田土壤速效磷(Olsen-P)平均为 14.6 mg/kg。因此, 虽然从 80 年代以来, 长江流域的土壤速效磷的使用已有了明显的提高^[9-10], 但仍处于相对较低水平。因此, 本研究中对长江中上游单双季稻区的磷肥推荐应使磷平衡有适度的盈余(15%的盈余), 提高该区域的土壤磷肥力; 而其他区域则可通过养分平衡(磷肥投入等于吸收带走量), 保证高产需求的同时维持土壤肥力。

3.2 中低浓度水稻配方肥的设计与高产条件下钾肥用量的调整

当前复合(混)肥以高浓度为主要发展趋势, 2004—2009 年新增的复合肥产品中高浓度复合(混)肥料占 2/3 以上^[28]。高浓度磷复肥的迅速发展影响了中低浓度磷肥的发展, 与农业生产对中量

和微量元素的需求增加的实际不相符^[29], 此外, 高浓度磷复肥的生产中导致了磷石膏等废弃物的产生, 对环境产生不利影响。经过多年集约化生产, 氮、磷、钾肥的大量投入, 使得长江流域土壤中养分限制因子逐渐转变为钙、镁、硫、硅等中量元素^[30-31]。以熔融磷钾肥为基础原料(含钙、镁和硅等微量元素)设计的水稻专用肥在江苏省一季中稻上试验表明, 提高了水稻的产量和氮肥的利用率并提高了水稻的抗倒伏能力^[32]。在长江流域 7 个省 20 个田间试验点的总结表明, 富含钙、镁、硫和硅的配方肥在水稻生长发育与产量形成中发挥了积极的作用, 提高了产量、肥料的利用率以及稻株的养分吸收能力^[10]。本研究中针对长江流域单双季稻区(Ⅱ)设计中浓度的配方, 旨在提供水稻生长需要的钙、镁、硫和硅等微量元素, 保证长江流域水稻高产需求。

Zhang 等^[33]通过大样本的数据研究表明, 随着产量的增加, 水稻钾需求也逐渐增加, <7.5、7.5~9.0、9.0~10.5 和 >10.5 t/hm² 4 个产量水平下对应的单位产量需钾(K)量分别为 18.7、19.4、20.5、21.7 kg/t, 这主要由于随着产量水平增加秸秆和籽粒钾浓度上升以及收获指数的下降所致。高产条件下钾营养需求的增加对于提高稻株对抗各种生物与非生物胁迫(如倒伏和病虫害等)的能力有积极的作用。考虑到水稻不同产量水平下对钾需求的差异, 本研究中建议在穗粒肥中追施 15~45 kg/hm² 的氯化钾来补充水稻高产条件下(>9.0 t/hm²)的更高钾需求。

综上所述, 我国水稻不同生态区域的氮磷钾肥推荐用量存在明显的差异, 这主要由于受到区域间不同的生产体系、土壤供肥能力、产量水平及养分需求规律等因素的影响。本研究对不同区域优化氮磷钾用量和肥料配方的确定将有助于优化区域肥料用量并促进肥料产业合理发展。在实际应用当中, 还可以根据品种的差异(如超级稻与常规稻, 粳稻与籼稻)、土壤植株的测试和营养诊断等进一步调整, 将肥料用量控制到最佳, 以达到最大的经济效益和环境效益。

参 考 文 献

- [1] Zhang Q F. Strategies for developing green super rice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(42):16402-16409
- [2] 陈温福, 徐正进, 张文忠, 马殿荣, 张树林. 中国超级稻育种研究

- 进展与前景[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(5): 662-666
- Chen W F, Xu Z J, Zhang W Z, Ma D R, Zhang S L. Advances and prospects in research of rice breeding for super high yield in China[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(5): 662-666 (in Chinese)
- [3] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Buresh R, Witt C. 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
- Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zhou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Buresh R, Witt C. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103 (in Chinese)
- [4] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 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, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924 (in Chinese)
- [5] 武良. 基于总量控制的中国农业氮肥需求及温室气体减排潜力研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
- Wu L. Nitrogen fertilizer demand and greenhouse gas mitigation potential under nitrogen limiting conditions for Chinese agriculture production [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [6] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 杜芬, 李亮科. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1136-1143
- Li H L, Zhang W F, Zhang F S, Du F, Li L K. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1136-1143 (in Chinese)
- [7] 李亮科, 张卫峰, 王雁峰, 陈新平, 马骥, 高利伟, 张福锁. 中国农户复合(混)肥施用效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 623-629
- Li L K, Zhang W F, Wang Y F, Chen X P, Ma J, Gao L W, Zhang F S. Effectiveness of compound fertilizer on grain yields in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 623-629 (in Chinese)
- [8] 吴良泉, 陈新平, 石孝均, 江荣风, 崔振岭, 蔡国学, 张福锁. “大配方、小调整”区域配肥技术的应用[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(3): 68-82
- Wu L Q, Chen X P, Shi X J, Jiang R F, Cui Z L, Cai G X, Zhang F S. Application of region formulation fertilizer technology based on “Regional fertilizer formula and site specific adjustment”[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2013, 28(3): 68-82 (in Chinese)
- [9] 范珊珊. 安徽省一季稻区域大配方的制定及验证[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
- Fan S S. Formulating and evaluating of fertilizer recommendations for rice of Anhui Province [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [10] 张毅. 长江流域水稻资源型功能肥料的设计与验证[D]. 北京: 中国农业大学, 2013
- Zhang Y. Design and field evaluation of high-efficiency and multi-function formula fertilizer for irrigated lowland rice (*Oryza sativa* L) in Yangtze River Reaches [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [11] 张杰. “大配方、小调整”区域配肥技术应用效果评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
- Zhang J. Application appraisalment of fertilizer recommendations based on “Regional fertilizer formula and site specific adjustment” [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [12] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 陈新平, 张福锁. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 102-117
- Wu L Q, Wu L, Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 102-117 (in Chinese)
- [13] 梅芳权, 吴宪章, 姚长溪, 李路平, 王磊, 陈秋云. 中国水稻种植区划[J]. 中国水稻科学, 1988, 2(3): 97-110
- Mei F Q, Wu X Z, Yao C X, Li L P, Wang L, Chen Q Y. The rice cropping regionalization of China [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1988, 2(3): 97-110 (in Chinese)
- [14] 段居琦, 周广胜. 我国单季稻种植区的气候适宜性[J]. 应用生态学报, 2012, 23(2): 426-432
- Duan J Q, Zhou G S. Climatic suitability of single cropping rice planting region in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 426-432 (in Chinese)
- [15] 段居琦, 周广胜. 我国双季稻种植区的气候适宜性研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 218-227
- Duan J Q, Zhou G S. Climatic suitability of double rice planting regions in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(2): 218-227 (in Chinese)
- [16] 李明霞, 千怀遂. 中国水稻遥感估产区划研究[J]. 地域研究与开发, 1996, 15(4): 73-86
- Li M X, Qian H S. Study on the regionalization for estimation of rice yield using remote sensing data in China [J]. *Areal Research and Development*, 1996, 15(4): 73-86 (in Chinese)
- [17] 农业部. 水稻优势区域布局规划(2008—2015)[J]. 农业工程技术, 2010(2): 6-7
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The programme of superior regional distribution of rice in China (2008 - 2015) [J]. *Applied Engineering Technology*, 2010(2): 6-7 (in Chinese)
- [18] 周立三. 中国综合农业区划[M]. 北京: 农业出版社, 1981
- Zhou L S. *China Comprehensive Agricultural Regionalization* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1981 (in Chinese)
- [19] 吴永常. 中国耕作制度 15 年演变规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002

- Wu Y C. Study on the evolving regularities of farming system in the recent 15 years, China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2002 (in Chinese)
- [20] 孙颖, 石玉林. 中国农业土地利用 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2003
- Sun H, Shi Y L. *Chinese Agricultural Land Use* [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 2003 (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [22] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009
- Zhang F S, Chen X P, Chen Q. *Fertilizer Recommendations for Agricultural Crops in China* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009 (in Chinese)
- [23] 赵晓宇. 寒地稻田土壤养分状况及供氮指标初探 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008
- Zhao X Y. Nutrient situation and N supply index of paddy soils in cold area of Northeast China [D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [24] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 范立春, 盛大海. 寒地稻田施氮状况与氮素调控对水稻投入和产出的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(4): 467-472
- Peng X L, Liu Y Y, Luo S G, Fan L C, Sheng D H. Nitrogen application situation and effects of nitrogen management on cost and output of paddy field in cold area of northeast China [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(4): 467-472 (in Chinese)
- [25] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 范立春, 宋添星, 郭艳文. 实地氮肥管理对寒地水稻干物质累积和产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2286-2293
- Peng X L, Liu Y Y, Luo S G, Fan L C, Song T X, Guo Y W. Effects of the site-specific nitrogen management on yield and dry matter accumulation of rice in cold areas of Northeastern China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(11): 2286-2293 (in Chinese)
- [26] 朱兆良. 农田生态系统中化肥的去向和氮素管理 [M] // 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992
- Zhu Z L. Fertilizer fate and N management in agroecosystem. In: Zhu Z L, Wen Q X. *Nitrogen in Soil of China* [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992 (in Chinese)
- [27] 马立珩, 张莹, 隋标, 刘彩玲, 王萍, 顾琐娣, 沈其荣, 徐茂, 郭世伟. 江苏省水稻过量施肥的影响因素分析 [J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2011, 32(2): 48-80
- Ma L H, Zhang Y, Sui B, Liu C L, Wang P, Gu S D, Shen Q R, Xu M, Guo S W. The impact factors of excessive fertilization in Jiangsu Province [J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2011, 32(2): 48-80 (in Chinese)
- [28] 李亮科, 张卫峰, 马骥, 张福锁. 我国复合(混)肥产品发展状况 [J]. 磷肥与复肥, 2011, 26(3): 1-3
- Li L K, Zhang W F, Ma J, Zhang F S. Review on development of compound fertilizer product in China [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2011, 26(3): 1-3 (in Chinese)
- [29] 王利, 高祥照, 马文奇, 张卫峰. 中国低浓度磷肥的使用现状与发展展望 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 732-737
- Wang L, Gao X Z, Ma W Q, Zhang W F. The using conditions and developing directions of Chinese phosphorous fertilizer [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 732-737 (in Chinese)
- [30] 王利, 高祥照, 马文奇, 刘艳华. 中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1219-1226
- Wang L, Gao X Z, Ma W Q, Liu Y H. Sulphur consumption in Chinese agriculture; Situation and outlook [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(6): 1219-1226 (in Chinese)
- [31] 邹春琴, 张福锁. 中国土壤-作物中微量元素研究现状和展望 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009
- Zou C Q, Zhang F S. *Progress and Perspective of Micronutrients in Soil-Crop Systems* [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009 (in Chinese)
- [32] 陈娟, 赵光明, 郭世伟, 许秀成, 崔振岭, 陈新平. 以熔融磷钾肥为基础的水稻专用肥应用效果 [J]. 磷肥与复肥, 2011, 26(5): 74-75
- Chen J, Zhao G M, Guo S W, Xu X C, Cui Z L, Chen X P. Application effect of rice specialty fertilizer based on fused phosphate potassium fertilizer [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2011, 26(5): 74-75 (in Chinese)
- [33] Zhang Y, Zhang C C, Yan P, Chen X P, Yang J C, Zhang F S, Cui Z L. Potassium requirement in relation to grain yield and genotypic improvement of irrigated lowland rice in China [J]. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 2013, 176(3): 400-406

责任编辑: 杨爱东