

# 中国水稻养分专家系统的田间适用性验证

杨富强<sup>1</sup> 徐新朋<sup>1</sup> 马进川<sup>1</sup> 何萍<sup>1</sup> Pampolino F. Mirasol<sup>2</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. 国际植物营养研究所东南亚项目部, 马来西亚槟州 10670)

**摘要:** 本研究目的是通过多年多点的田间试验评价养分专家系统 (Nutrient Expert (NE)) 在中国水稻上的适用性。田间试验于 2013–2015 年在我国水稻主产区的 211 个试验点进行, 结果显示: 与农民习惯施肥 (FP) 和测土配方施肥处理 (ST) 相比, NE 处理提高了水稻的籽粒产量, 降低了氮肥和钾肥的推荐用量, 适当提高了磷肥的推荐用量, 整体上平衡了肥料养分的施用比例。NE 处理水稻籽粒产量较 FP 和 ST 提高 3.5%、6.3%。除磷肥偏生产力之外, N、P 和 K 的农学效率、表观回收率以及偏生产力均得到了提高。与 FP 和 ST 相比, NE 处理 N 肥养分回收率分别提高 12.2 和 8.4 个百分点, P 肥养分回收率分别提高 3.7 和 2.9 个百分点, K 肥养分回收率分别提高 16.3 和 6.4 个百分点。田间试验结果表明, NE 水稻养分专家系统可以有效预估地块产量、水稻地上部 N、P 和 K 养分吸收, 能够有效指导我国水稻的田间推荐施肥。

**关键词:** 水稻, 养分专家系统, 产量, 养分利用率

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是我国重要的粮食作物之一, 种植面积占全国粮食作物总面积的 30% (Liu et al., 2013)。我国水稻产量自 2003 年以来呈逐年提高趋势

(FAO, 2013), 期间肥料消费量从 2003 年的 1100 万吨/年增加到 2015 年的 1500 万吨/年。然而, 我国稻田肥料利用率氮肥仅为 28.3%, 磷肥仅为 13.1%, 钾肥

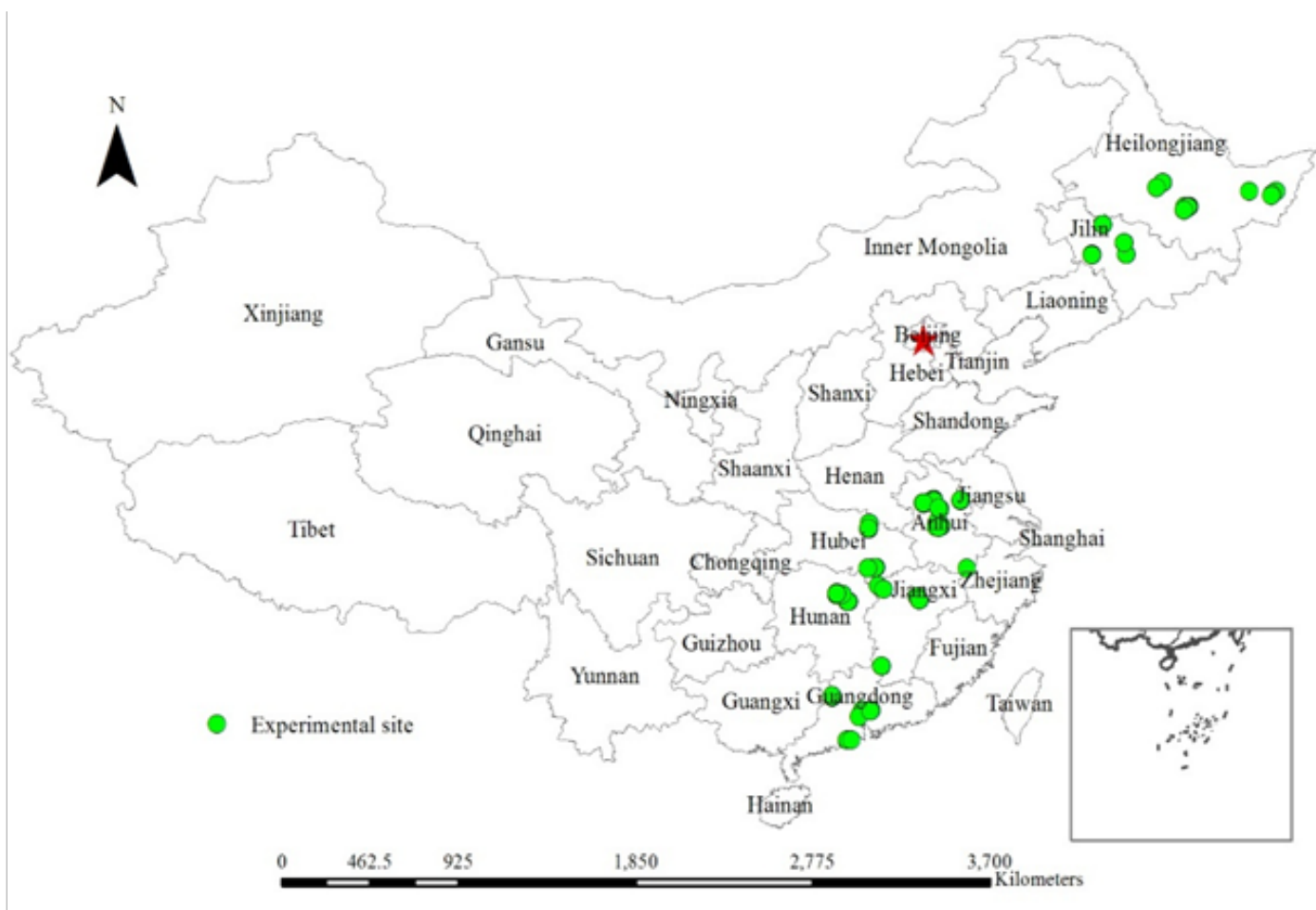


图 1 水稻田间试验分布图

仅为 32.4% (张福锁等, 2008)。稻田的过量施肥问题在我国已经非常普遍, 尤其是氮肥 (李红莉等, 2010), 我国稻田氮肥用量比世界平均水平高 90% (Sui et al., 2013)。过量和不合理施肥, 不仅不能增加产量, 而且会造成浪费威胁生态环境安全 (Guo et al., 2007; Ju et al., 2009)。目前, 生产中出现了很多优化养分管理策略, 与农民习惯相比都有提高产量和养分利用率的作用 (Peng et al., 2006; Yao et al., 2012)。但由于我国一家一户小农经营模式, 以及农民的知识水平有限使得许多管理策略难以实现。本研究通过田间试验对水稻养分专家系统 (Nutrient Expert (NE) for Rice) 的田间实用性进行评价, 旨在为我国稻田科学合理施肥提供有效的方法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

试验于 2013–2015 年在我国水稻主产区进行: 早稻试验在广东、江西和湖南三省, 中稻试验在湖北和安徽两省, 一季稻试验在黑龙江和吉林两省, 七个省三年共计 211 个田间试验。试验点分布见图 1。

每个试验均包括 6 个处理: 1) 养分专家系统推荐施肥 (NE), 2) 农民习惯施肥 (FP), 3) 当地农技部门测土配方施肥 (ST), 4) 基于 NE 推荐不施氮, 5) 基于 NE 推荐不施磷和 6) 基于 NE 推荐不施钾。NE 的施肥量、施肥比例和施肥时间均按照 NE 水稻养分专家系统推荐; FP 的施肥量和施肥次数等完全按照农民习惯; ST 是依据当地农技部门测土配方确定施肥量和管理措施, 施肥措施按照农技部门的推荐。同一地各处理品种、密度均相同, 且病虫害防治均统一操作。

### 1.2 分析方法

水稻成熟后进行小区实收计产, 同时对水稻秸秆产量进行取样称重。取部分籽粒和秸秆样品在 80℃ 下烘干至恒重, 粉碎后测定 N、P 和 K 的养分含量, 计算养分利用率。秸秆和籽粒中的氮、磷和钾含量采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  方法消煮, 并分别采用凯氏法、钒钼黄比色法和原子吸收法测定 (鲍士旦, 2007)。养分利用率计算及表示如下:

(1) 农学效率 (Agronomic efficiency): 施用单位养分的作物籽粒增产量;

(2) 偏生产力 (Partial factor productivity): 施用单位养分的作物籽粒产量;

(3) 养分回收率 (Recovery efficiency): 施用单位养分的作物吸收量增量。

用均方根误差 (RMSE) 和标准化均方根误差 ( $n-RMSE$ ) 评价水稻养分专家系统的预估值与实测值吻合度。不同处理间的产量和养分利用率差异使用 SAS 软件在 0.05 概率水平进行 ANOVA 分析。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - m_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

$$\text{Normalized RMSE} = \frac{RMSE}{\bar{m}}, \quad (2)$$

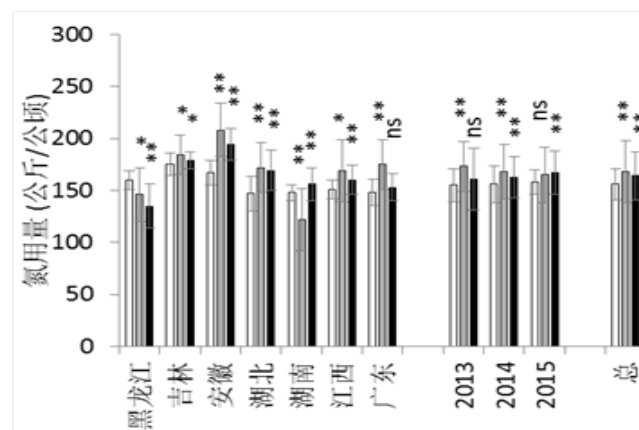
$s_i$  和  $m_i$  分别为预估值和实测值,  $n$  是样本量,  $m$  是实测值的平均值<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥量

NE 处理平衡了肥料养分的施用。与 FP 和 ST 相比较, NE 处理降低了 N 和  $K_2O$  的用量, 提高了  $P_2O_5$  的用量。FP 的 N 肥用量为 122–208 公斤/公顷, 平均值为 168 公斤/公顷。211 个试验点中有 88 点 N 肥用量超过 180 公斤/公顷, 占总数的 41.7%。NE 处理 N 肥推荐用量为 147–175 公斤/公顷, 平均值为 156 公斤/公顷。ST 的 N 肥用量为 135–194 公斤/公顷, 平均值为 164 公斤/公顷。NE 处理 N 肥用量明显低于 FP, 降幅为 7.1%, 并且较 ST 低 4.9%。

FP 和 ST 的  $P_2O_5$  肥用量很接近, 为 42–76 公斤/公顷, 平均值分别为 61 和 62 公斤/公顷。NE 处理  $P_2O_5$  用量稍高于二者, 为 54–80 公斤/公顷, 平均值为 69 公斤/公顷。NE 处理推荐  $K_2O$  用量为 52–106 公斤/公顷, 平均值为 79 公斤/公顷。而 FP 和 ST 用量为 63–115 和 76–113 公斤/公顷, 平均值分别为 86 和 95 公斤/公顷。NE 处理与 FP 和 ST 比较, 显著降低  $K_2O$  用量 8.1% 和 16.8% (2013 年 K 肥用量除外) (图 2)。



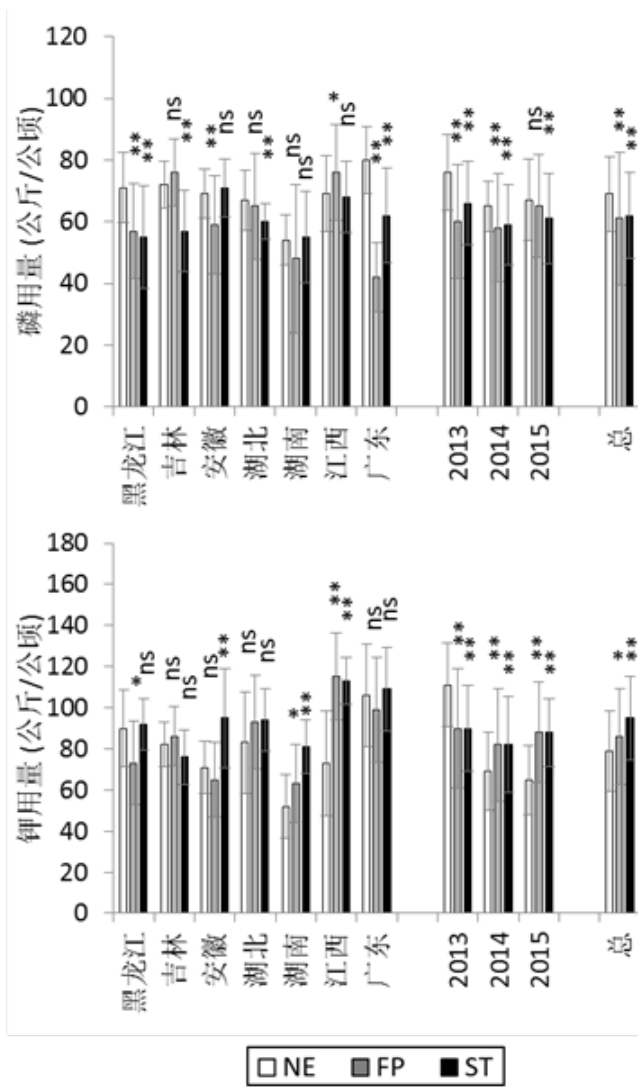


图2 不同处理施肥量比较

注：\* 0.05 水平差异显著；\*\* 0.01 水平差异显著；

ns 差异不显著。下同。

## 2.2 产量

NE 处理可显著提高水稻产量，但对收获指数没有明显影响。NE 处理籽粒产量为 6.7–9.6 吨 / 公顷，平均值为 8.4 吨 / 公顷。而 FP 和 ST 处理籽粒产量为 6.7–9.6 和 6.7–9.7 吨 / 公顷，平均值分别为 7.9 和 8.1 吨 / 公顷。整体而言，NE 处理与 FP 和 ST 相比较，产量分别显著提高 6.3% 和 3.5%。产量结果因地点不同而稍有差异，比如在吉林、湖北和广东，NE 与 FP 处理三年平均值没有差异；在吉林、安徽、湖南和广东，NE 与 ST 处理三年平均值没有差异。但年份间结果趋势一致，NE 较 FP 和 ST 产量均得到了显著提高，2013 年 NE 和 ST 产量间差异不显著（表 1）。

## 2.3 养分利用率

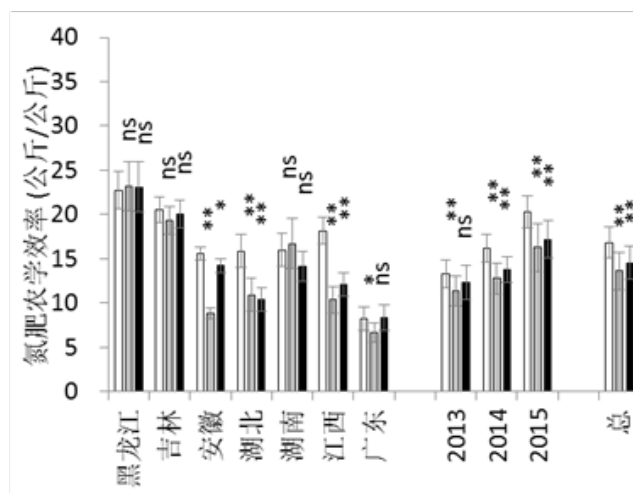


表 1 不同处理水稻产量和收获指数比较

地点 / 年份	籽粒产量 (吨 / 公顷)					收获指数 HI				
	NE	FP	ST	△ 1	△ 2	NE	FP	ST	△ 1	△ 2
黑龙江	8.6	8.2	8.2	0.4**	0.4**	0.50	0.50	0.51	0 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>
吉林	9.6	9.6	9.7	0 <sup>ns</sup>	-0.1 <sup>ns</sup>	0.54	0.54	0.55	0 <sup>ns</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>
安徽	8.6	7.8	8.7	0.8**	-0.1 <sup>ns</sup>	0.49	0.48	0.48	0.01 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>
湖北	9.4	9.0	8.9	0.4 <sup>ns</sup>	0.5*	0.50	0.50	0.49	0 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>
湖南	7.6	7.0	7.4	0.6*	0.2 <sup>ns</sup>	0.56	0.57	0.56	-0.01 <sup>ns</sup>	0 <sup>ns</sup>
江西	8.5	7.4	7.6	1.1**	0.9**	0.56	0.55	0.54	0.01 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>ns</sup>
广东	6.7	6.7	6.8	0 <sup>ns</sup>	-0.1 <sup>ns</sup>	0.50	0.50	0.49	0 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>
2013	8.2	8.0	8.1	0.2*	0.1 <sup>ns</sup>	0.52	0.51	0.51	0.01 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>
2014	8.1	7.7	7.8	0.4**	0.3**	0.51	0.50	0.51	0.01 <sup>ns</sup>	0 <sup>ns</sup>
2015	9.0	8.2	8.6	0.8**	0.4**	0.54	0.54	0.54	0 <sup>ns</sup>	0 <sup>ns</sup>
总	8.4	8.0	8.1	0.4**	0.3**	0.53	0.52	0.52	0.01 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>

注：△ 1NE 减去 FP；△ 2：NE 减去 ST。\*，\*\* 分别表示 5% 和 1% 显著水平，ns 为差异不显著。

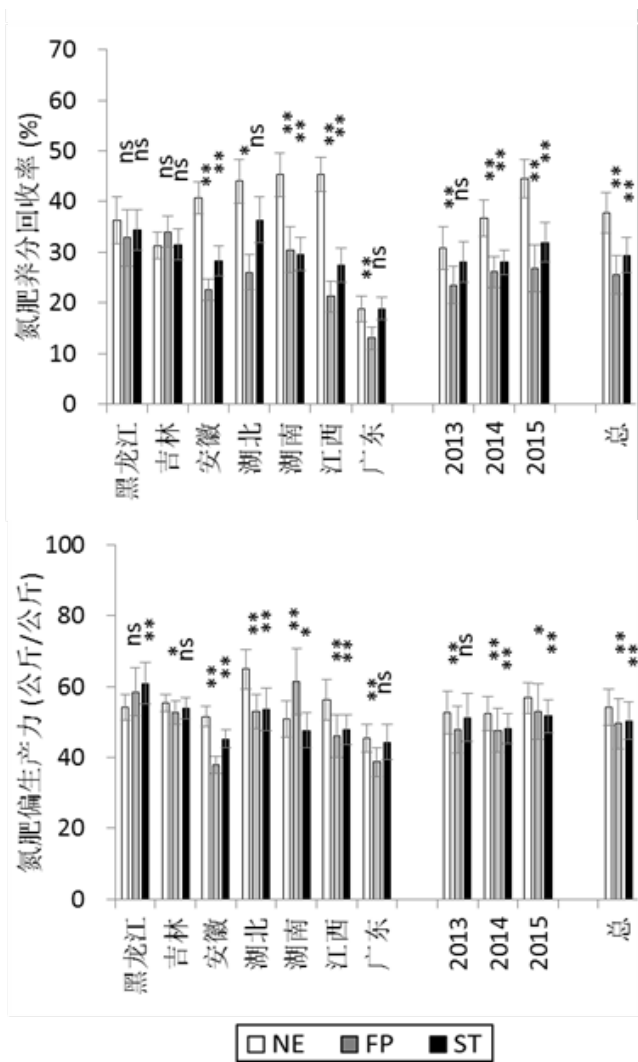


图3 不同处理水稻氮素利用率

与FP和ST相比较,NE显著提高了N肥的利用效率,三年试验结果一致。NE处理氮肥农学效率为8.3–22.8(平均值为16.8)公斤/公斤,养分回收率为18.9%–45.4%(平均值为37.8%),偏生产力为45.4–65.0(平均值为54.1)公斤/公斤。FP和ST处理氮肥农学效率为6.7–23.2(平均值为13.6和14.6)公斤/公斤,养分回收率为13.1%–36.4%(平均值为25.6%和29.4%),偏生产力为37.9–61.3(平均值为49.5和50.3)公斤/公斤。与FP和ST相比较,NE处理氮肥农学效率、养分回收率和偏生产力分别平均显著提高23.6%和15.6%,12.2和8.4个百分点,以及9.1%和7.5%(图3)。

#### 2.4 产量和养分吸收预测

为了计算肥料推荐用量,NE系统需要对地块的可获得产量和地上部养分需求量进行预估。我们利用三年的田间验证试验,对系统预估值和田间实测值进行比对,

分析系统预估值的准确性。2015年结果显示:产量预估值与实测值均匀分布于1:1线两侧,相对应的RMSE和n-RMSE值分别为0.947吨/公顷和10.7%,误差均在可接受范围内,说明系统预估值非常接近田间实测值(图4)。2013–2015年N、P和K养分吸收对应的RMSE值分别为29.4、10.9和60.5公斤/公顷,相应的n-RMSE值分别为21.3%、31.5%和32.3%。N素预估值误差在可接受范围内,说明预估值比较接近真实值。而P和K素误差稍大,说明预估值与真实值有偏差。但P低于50公斤/公顷和K低于250公斤/公顷时预估值与实测值也都均匀分布于1:1线两侧(图5)。

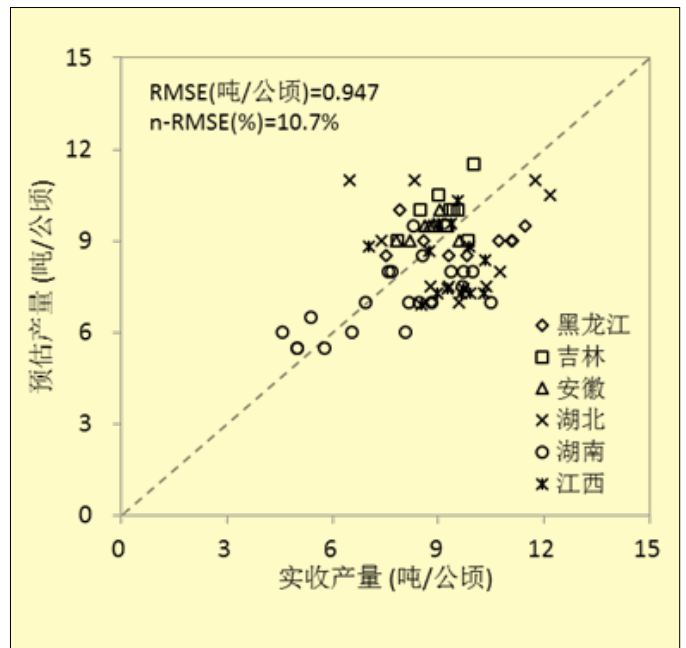
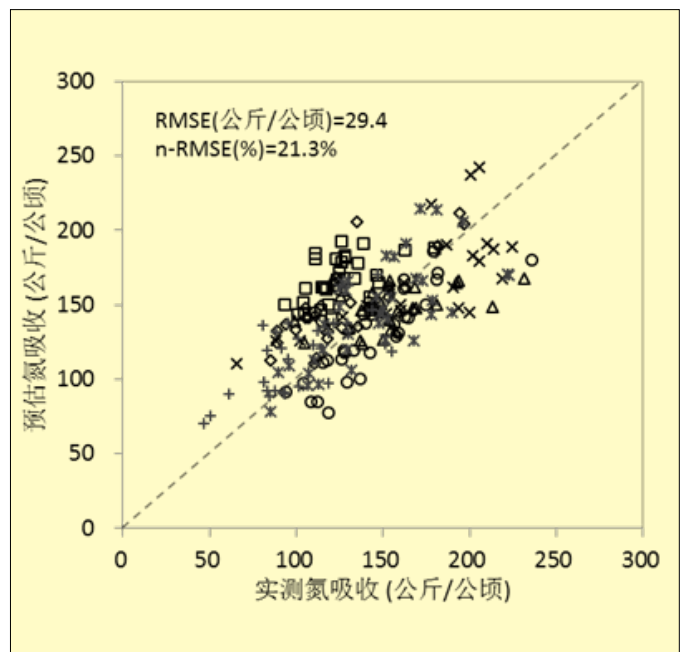


图4 NE系统预估产量与实测产量的比较



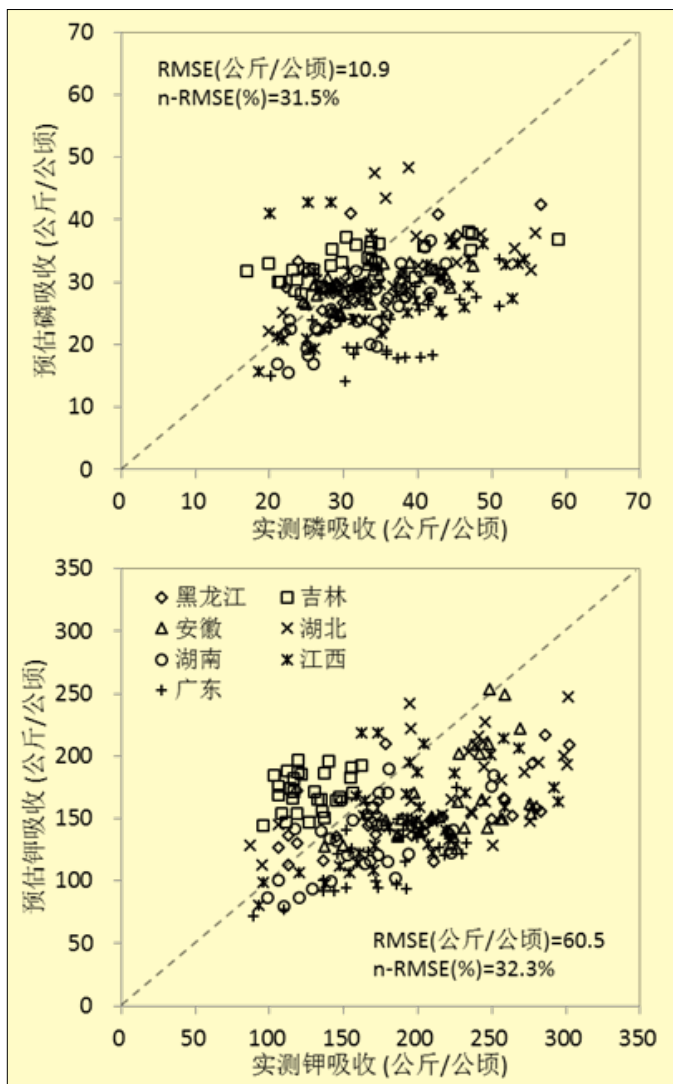


图5 NE系统预估养分吸收与实测养分吸收的比较

### 3 讨论

NE系统推荐施肥量整体降低了N肥和K肥的用量,适当提高了P肥的用量。但在一些试验点和个别年份,结果可能会出现差异。比如黑龙江NE处理平均推荐施N量高于FP和ST,而推荐施K肥量低于FP和ST。这主要是因为NE系统充分考虑了生长季内当地环境因素,包括土壤性质、轮作制度和气候等因素(Xu et al., 2014)。相反,农民习惯和当地推荐一般多年采用一个配方,而不能根据作物生长情况变化而调整。Buresh等(2010)也认为推荐施肥方案应该充分考虑作物生长环境、耕作方式、上季作物残留、有机质、温度和水分管理等因素。NE系统正是充分考虑了这些因素,可以满足中国以小农户为经营主体地块条件各不相同的种植模式。

中国消耗世界三分之一的化肥,但NPK肥料利用率远低于发达国家。过量的肥料导致环境风险增强,

如水体富营养化、土壤酸化和养分失衡等(Guo et al., 2010)。本研究结果显示,NE处理N素养分回收率达到37.8%,较农民习惯和测土配方施肥均有不同程度的提高(图3)。因为NE系统充分考虑了影响肥料利用率的多个因素,并结合4R养分管理策略,提高了我国水稻田间的养分利用效率。

### 4 结论

多年多点田间验证试验结果表明:整体而言,与FP和ST处理相比,NE养分专家系统推荐N肥用量分别降低7.1%和4.9%,K肥用量分别降低8.1%和16.8%,P肥用量稍有提高。NE处理与FP和ST处理相比,产量平均分别提高6.3%和3.5%,氮肥农学效率分别提高23.6%和15.6%,回收率提高12.2和8.4个百分点,偏生产力提高9.1%和7.5%。田间实测产量和养分吸收量与NE系统预估值比较吻合。说明NE养分专家系统可以指导田间水稻精确化平衡施肥,进一步提高水稻产量和效益,同时降低水田环境风险。

### 参考文献

- Liu MJ, Lin S, Dannenmann M, et al. Do water-saving ground cover rice production systems increase grain yields at regional scales. *Field Crops Research*, 2013, 150: 19–28.
- FAO (2013) FAOSTAT. <http://faostat.fao.org>.
- 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. *土壤学报*, 2008, 45: 915–924.
- 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16: 1136–1143.
- Sui B, Feng XM, Tian GL, et al. Optimizing nitrogen supply increases rice yield and nitrogen use efficiency by regulating yield formation factors. *Field Crops Research*, 2013, 150: 99–107.
- Guo JP, and Zhou CD. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142: 270–277.
- Ju XT, Xing GX, Chen XP, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *PNAS*, 2009, 106: 3041–3046.
- Peng SB, Buresh RJ, Huang JL, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated

rice systems in China. *Field Crops Research*, 2006, 96: 37–47.

Yao FX, Huang JL, Cui KH, et al. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*, 2012, 126: 16–22.

鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版). 北京: 中国农业出版社, 2007.

Liu HL, Yang JY, Drury CF, et al. Using the DSSAT±CERES–Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize

production. *NutrCyclAgroecosyst*, 2011, 89: 313–328.

Xu XP, He P, Pampolino MF, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, 2014, 157: 27–34.

Buresh RJ, Pampolino MF, and Witt C. Field-specific potassium and phosphorus balances and fertilizer requirements for irrigated rice-based cropping systems. *Plant and Soil*, 2010, 335: 35–64.

Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1008–1010.

