

智慧农业

## 基于产量反应的粮食作物养分专家系统微信版应用\*

徐新朋, 张佳佳, 丁文成, 仇少君, 赵士诚, 周卫, 何萍<sup>※</sup>

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:**【目的】针对我国小农户生产中肥料施用不合理导致肥料利用率低等现状, 建立基于产量反应和农学效率的养分专家系统微信版, 研究其在三大粮食作物上的应用效果。【方法】2017—2018年在水稻、玉米和小麦主产区10个省份(吉林省、黑龙江省、湖北省、安徽省、江西省、湖南省、内蒙古自治区、山西省、山东省和河北省)开展了225个田间试验, 从施肥量、产量、净效益和肥料利用率方面对养分专家系统微信版进行矫正和改进, 每个试验包括6个处理:(1) NE处理, 基于养分专家系统推荐施肥处理;(2) FP处理, 基于农民习惯施肥措施处理;(3) ST处理, 基于测土施肥或当地农技部门推荐施肥处理;(4) 基于NE处理的不施氮处理;(5) 基于NE处理的不施磷处理;(6) 基于NE处理的不施钾处理。【结果】总体而言, 与FP和ST处理相比, NE处理降低了氮肥和磷肥用量, 平衡了钾肥用量, 而水稻、玉米和小麦产量增加了0.1~0.6 t/hm<sup>2</sup>。NE处理降低了肥料花费, 但水稻、玉米和小麦均增加了净效益, 与FP相比, 分别增加了1 798、895和528元/hm<sup>2</sup>; 与ST相比, 分别增加了894、360和365元/hm<sup>2</sup>。【结论】应用大量的田间试验数据, 采用计算机软件技术, 形成了养分专家系统微信版, 并通过田间验证进行了校正和改进。其在土壤测试条件不具备或测试结果不及时的情况下, 养分专家系统是一种简便、易操作的指导施肥新方法。

**关键词:** 养分专家系统; 粮食作物; 产量反应; 肥料利用率

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20190608

## 0 引言

肥料在保障我国粮食安全中起着不可替代的支撑作用。虽然我国粮食产量实现了连续增长, 但农民盲目追求产量的同时也产生了一些问题, 尤其是肥料的过量施用, 其中以氮肥和磷肥尤为严重, 不仅产量没有进一步增加, 相反降低了肥料利用效率, 威胁到生态环境安全。过量的养分在土壤中累积, 或流失到环境中造成温室气体排放、水体富

收稿日期: 2019-11-08

第一作者简介: 徐新朋(1984—), 博士、副研究员。研究方向: 作物养分管理。Email: xuxinpeng@caas.cn

※ 通信作者简介: 何萍(1970—), 博士、研究员。研究方向: 作物养分管理。Email: heping02@caas.cn

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目“粮食作物养分推荐方法与限量标准”(2016YFD0200101); 国家自然科学基金项目“基于作物产量反应的水稻养分限量标准研究”(31801938); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132019022)

2019年12月

营养化以及土壤盐渍化等，直接影响到农田的可持续利用<sup>[1-3]</sup>。研究表明，我国粮食作物的平均氮肥和磷肥利用率普遍低于30%<sup>[4-6]</sup>。农业生产带来的环境污染问题日益受到关注，如何进行精准施肥，优化作物养分管理措施，提高肥料利用率，在保障产量的同时保护农业生态环境，实现农业的可持续发展，是我国发展绿色生态农业面临的严峻挑战之一<sup>[2-3, 7]</sup>。

国内外已有诸多方法通过优化作物养分管理，用于农业生产实践，提高了作物产量和肥料利用效率，如地力分级法、目标产量法、肥料效应函数法等基于土壤测试的推荐施肥方法<sup>[8-12]</sup>，养分动态模型模拟法、作物生长模型、快速叶绿素测定法等<sup>[13-16]</sup>基于作物反应的养分管理方法。然而，我国作物种植区域辽阔、同一作物处于不同生态区，其气候和土壤特征差异导致使用单一的施肥参数（包括养分吸收、土壤养分供应和养分利用效率等）不能有针对性地对我国不同地区或作物进行个性化养分管理，并限制作物产量潜力发挥和肥料利用率的提高<sup>[17]</sup>，而我国小农户经营的农田管理模式对科学指导施肥并进一步增加集约化作物生产力是一个主要挑战。以往田间试验可为建立养分模型和施肥原则提供数据支撑，但如何简化推荐施肥程序是当前农业发展亟需解决的问题之一。

合理施肥不仅要保障粮食产量，还要提高养分利用效率。施肥量、作物养分吸收以及施肥后的产量效应存在着密切关系。因此应用作物施肥后的产量反应（施肥与不施某种肥料的产量差）或不施某种养分地上部的养分吸收可以用来表征土壤中某种养分供应状况。在前期大量的田间试验数据（包括测土配方施肥试验、不同肥料用量试验以及减素试验等）的基础上建立的基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法，通过分析各农学特征参数，包括土壤基础养分供应、产量反应和农学效率等，应用计算机软件技术开发了一种简便易行，易于被广大科学工作者和农民接受的推荐施肥系统，即养分专家系统（Nutrient Expert, NE）。NE系统只需要使用者通过点菜单的形式回答一些简单的问题，就可以得出合理的施肥量，其最大的优点是在有无土壤测试情况下都可使用。基于此，文章在已有电脑版和网络版养分专家系统基础上，把复杂的养分管理问题简化成用户方便使用的基于微信公众号的操作界面，并进行了多点田间试验对该版本水稻、玉米和小麦养分专家系统进行验证，以期建立科学、合理、易于操作的施肥方法。

## 1 材料与amp;方法

水稻、玉米和小麦养分专家系统的原理是基于产量反应和农学效率进行推荐施肥，是为了适应我国当前小农户经营管理方式而建立的一种易于操作的推荐施肥和养分管理方法。

### 1.1 养分专家系统推荐施肥原则

养分专家系统是在实地养分管理（Site-Specific Nutrient Management, SSNM）方法基础上，结合4R原则（应用合适的肥料品种、给予合适施用量、在合适的时间、施在合适的位置），针对特定农田和作物生长环境制定肥料施用决策而制作的一个施肥决策软件。NE系统的指导原则是：（1）应用产量反应或不施某种养分地上部的养分吸收表征土壤基础养分供应状况，充分利用土壤基础养分供应；（2）为防止作物对养分的奢侈吸收或不

足，平衡施用肥料（包括大量及中微量元素）；（3）增加短期和中期的效益；（4）维持土壤肥力。NE 软件只需要农民或当地农技专家回答一些简单的问题，就可以向无法进行土壤检测或土壤测试不及时、复种指数高的地区的小农户提供特定施肥建议；此外，用户还可以选择当地可利用的肥料资源，并能够快速得出施肥量并规划出肥料施用的指导方针。

NE 系统以产量反应和农学效率为基础，考虑了产量反应、农学效率、相对产量和土壤基础养分供应间的内在联系<sup>[18-20]</sup>。其氮肥推荐主要是依据氮素产量反应和氮素农学效率关系确定（施氮量 = 产量反应 / 农学效率），其产量反应定义为：不施某种养分处理的产量与氮磷钾全施处理的产量差，农学效率定义为：单位施用某种养分的产量增量<sup>[21]</sup>。如果在试验田块做过相关减素试验，获得有产量反应数据时，将产量反应数据直接填入系统，系统会根据已有的产量反应和农学效率关系给出氮肥推荐用量。在没有氮素产量反应数据时，系统会依据填入的土壤质地、土壤颜色（有机质含量）和土壤障碍因子等信息确定土壤基础养分供应低、中、高等级，进而获得产量反应系数，再依据目标产量和产量反应系数就可以得到产量反应，进而得出氮肥施用量。对于磷钾养分推荐，除了考虑产量反应外，还需考虑维持土壤养分平衡部分，即需要归还一定目标产量下作物移走的部分养分才能保证土壤肥力（施磷或施钾量 = 作物产量反应施磷或施钾量 + 维持土壤平衡部分）<sup>[21]</sup>，维持土壤平衡部分主要依据 QUEFTS 模型得出的最佳养分吸收量来求算<sup>[22-25]</sup>。如果作物施肥没有增产即产量反应为零时，则只考虑作物收获部分养分移走量。对磷钾肥料的推荐还考虑了上季作物养分残效，主要考虑包括作物秸秆处理方式、有机肥施入及上季作物养分带入量等信息。

## 1.2 养分专家系统数据来源

养分专家系统以大量的田间试验数据为基础，当前微信版本系统数据来源于 2000—2015 年中国粮食作物主产区的田间和试验站试验，共计 1.693 2 万个试验，水稻、玉米和小麦三大作物的试验量分别为 5 556、5 893 和 5 483 个。田间试验来自于国际植物营养研究所（IPNI）中国项目部、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所植物营养课题组研究成果以及在公开发表的期刊上通过搜索“小麦”、“玉米”、“水稻”、“产量”、“产量 + 养分吸收”和“产量 + 养分利用率”等关键词获得。试验点涵盖了我国三大粮食作物（水稻、玉米和小麦）主要种植区域，包含了不同种植类型、气候特征、土壤类型以及主栽品种；含有不同试验处理：包括不同肥料用量处理、农民习惯施肥措施处理、优化施肥处理以及不施某种养分处理等；包括生物量、籽粒和秸秆 N、P 和 K 养分吸收等指标。

## 1.3 养分专家系统微信版

基于作物产量反应和农学效率的养分专家系统微信版，是继电脑版、网络版和手机版后又一操作更加简便、适应范围更广的推荐施肥系统。用户只需扫描“二维码”（图 1），关注“养分专家”微信公众号，注册后即可免费使用微信版养分专家系统。手机微信版养分专家系统面对的是我国小农户经营主体，适应当前科技发展形势和传播技术需求，是直接面向用户的作物养分管理工具，也是一款基于计算机软件的施肥决策系统，能够针对某一具体地块或操作单元给出个性化的施肥方案，其最大的优点是用户不需下

2019年12月

载安装,界面更加简洁,操作更加简单,并可随时向后台提出问题,后台操作者会及时反馈信息,为用户提供服务,互动性更强。

养分专家系统微信版,增加了后台数据库的数据量,仍然延续电脑版的施肥原理。系统包含4个界面:上季信息、本季信息、推荐施肥和效益分析。用户通过点菜单形式即可完成,最大化地简化了操作步骤,并可以向用户即时推送最新养分管理信息及相应技术,实现农业技术指导人员与农户之间文字、图片、语言的全方位沟通与互动。



图1 养分专家系统作物选择界面及微信二维码

Fig.1 Crop selection interface in Nutrient Expert system and WeChat two-dimensional code

#### 1.4 养分专家系统微信版田间验证

2017—2018年在三大作物主产区开展了225个田间试验对养分专家系统微信版从产量、经济和农学效益进行田间验证。水稻试验位于一季稻种植区吉林省和黑龙江省,中稻种植区湖北省和安徽省,早晚稻种植区湖南省和江西省,共计106个田间试验;玉米试验位于春玉米种植区吉林省、黑龙江省和内蒙古自治区,夏玉米种植区山东省、山西省和河北省,共计93个田间试验;小麦试验位于华北平原冬小麦种植区山东省、山西省和河北省,共计26个田间试验。具体土壤理化性状见表1。

每个试验包含6个处理:(1)NE处理,即基于养分专家系统微信版得出的推荐施肥处理,在布置试验前依据养分专家系统要求填入试验地块的质地和颜色、过去3~5年该作物的平均产量、施肥量、施肥措施、秸秆处理方式、是否施用有机肥以及是否进行过土壤测试等一些简单问题,形成施肥套餐,并按照NE系统推荐方案实施;(2)FP处理,即基于农民习惯施肥措施进行管理,记录农民所使用的肥料品种、施肥量、施肥次数等信息;(3)ST处理,即基于测土配方施肥处理,如测土不及时或条件不具备,采用当地农技推广部门的推荐量;(4)基于NE处理的不施氮处理;(5)基于NE处理的不施磷处理;(6)基于NE处理的不施钾处理。其中(4)~(6)处理用于计算肥料利用率。肥料使用尿素、过磷酸钙、磷酸氢二铵、氯化钾和硫酸钾等,同一试验中各处理设置的密度相同,且病虫害防治进行统一管理。

表 1 田间试验点信息

Table 1 Soil characteristics of the experimental sites

作物	类型	省份	试验数	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (%)	速效磷 (mg/kg)	有效钾 (mg/kg)
水稻	一季稻	吉林省	26	5.2~7.6	18.6~49.4	0.8~2.3	12.2~50.9	69.7~223.3
		黑龙江省	11					
	中稻	湖北省	10	4.9~7.6	9.1~41.2	0.7~2.8	4.6~34.6	57.6~249.3
		安徽省	11					
	早晚稻	湖南省	20	4.5~6.1	11.2~41.8	0.9~2.9	5.9~49.0	49.0~200.8
江西省		28						
玉米	春玉米	吉林省	33	4.8~8.7	9.9~35.7	0.7~2.6	13.2~47.5	100.0~191.2
		黑龙江省	7					
		内蒙古自治区	20					
	夏玉米	山东省	9	7.4~8.9	3.4~19.3	1.0~2.3	10.5~43.7	77.0~159.0
		山西省	18					
		河北省	6					
小麦	冬小麦	山东省	9	6.8~8.7	7.9~20.0	0.6~1.8	10.3~42.5	62.1~176.0
		山西省	11					
		河北省	6					

### 1.5 测试与分析方法

每个试验点的样品采集采用相同标准，在作物成熟后测定籽粒和秸秆产量，并采集部分样品于 60℃ 下烘干 72 h 至恒重，粉碎后测定籽粒和秸秆 N、P 和 K 的养分含量。采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 方法消煮，全 N 采用凯氏法，全 P 采用钒钼黄比色法，全 K 采用原子吸收法测定。数据采用 Excel 2010 进行分析处理，使用 SPSS 软件在 0.05 概率水平上对不同处理间的产量、肥料花费、净效益和养分利用率差异进行 ANOVA 分析。

氮素回收利用率 (Recovery Efficiency to N fertilizer application, REN) 的计算公式为：  

$$REN = (\text{施氮区植株地上部氮累积量} - \text{不施氮区地上部植株氮累积量}) / \text{施氮量} \times 100\% \quad (1)$$

磷和钾回收利用率分别用 REP 和 REK 表示，其计算公式与式 (1) 类似，将氮素分别改成磷和钾即可。

氮素农学利用率 (Agronomic Efficiency to N fertilizer application, AEN) 的计算公式为：  

$$AEN = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮区产量}) / \text{施氮量} \quad (2)$$

磷和钾农学效率分别用 AEP 和 AEK 表示，其计算公式与式 (2) 类似。

氮素偏生产力 (Partial Factor Productivity to N fertilizer application, PFPN) 的计算公式为：

$$PFPN = \text{施氮区产量} / \text{施氮量} \quad (3)$$

磷和钾偏生产力分别用 PFPP 和 PFPK 表示，其计算公式与式 (3) 类似。

2019年12月

肥料花费 (Total Fertilizer Cost, TFC) 为氮磷钾肥料花费总和。

净效益 (Gross Return above Fertilizer cost, GRF) 为收获后的产量利润减去肥料成本和额外追肥成本。

## 2 结果与分析

### 2.1 节肥效益

2017—2018年水稻2年试验施肥量结果显示(图2a), NE处理的氮、磷和钾肥(分别为N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O,下同)用量分别为156、63和85 kg/hm<sup>2</sup>, FP处理的分别为175、78和116 kg/hm<sup>2</sup>, ST处理的分别为170、63和97 kg/hm<sup>2</sup>。与FP相比, NE处理的氮、磷和钾肥用量分别降低了10.9%、19.2%和26.7%;与ST相比, NE处理的氮和钾肥用量分别降低了8.2%和12.4%,但磷肥用量相同。虽然3个处理的氮、磷和钾肥用量的平均值差异不大,但FP处理的施肥量具有较大的变异范围,氮肥和钾肥的最大和最小用量相差都在100 kg/hm<sup>2</sup>以上。

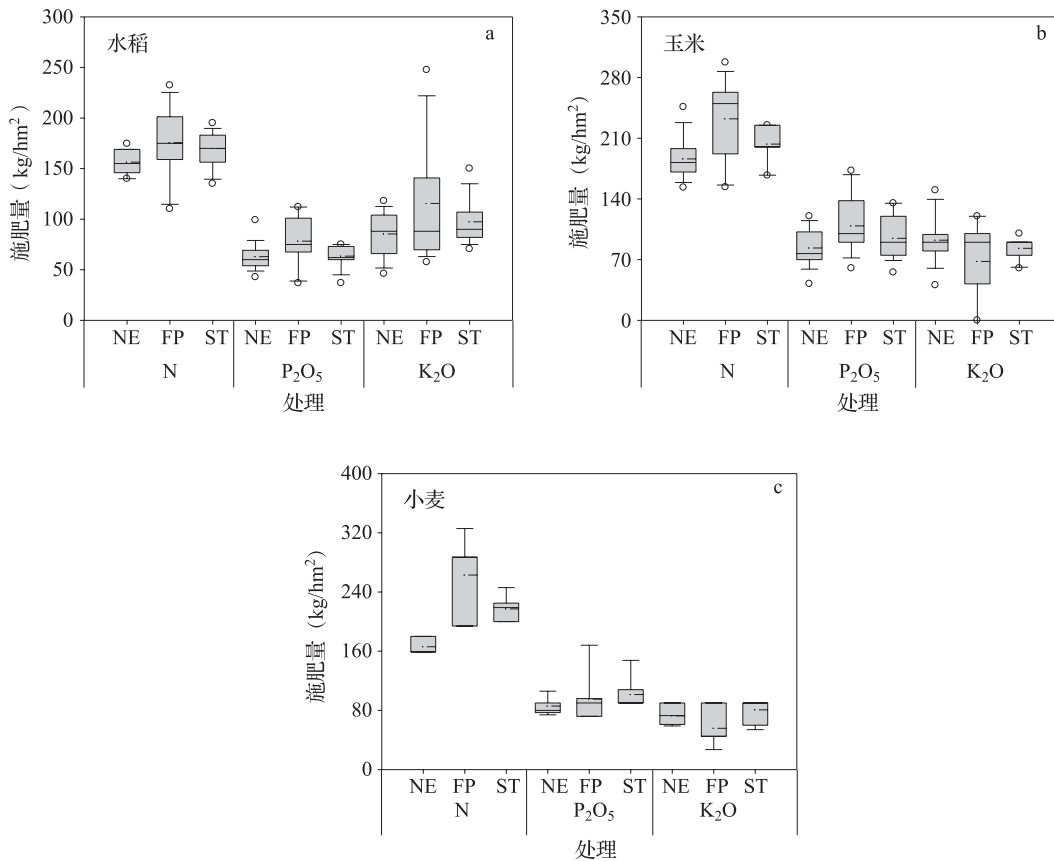


图2 水稻、玉米和小麦不同处理施肥量比较

Fig.2 Comparison of fertilizer application rate in different treatments for rice, maize and wheat

注: 中间实线和虚线分别代表中值和均值, 方框上下边缘、帽子和圆圈分别代表上下25%、10%和5%的数

玉米 2 年试验施肥量结果显示（图 2b），NE 处理的氮、磷和钾肥用量分别为 186、83 和 92 kg/hm<sup>2</sup>，FP 处理的分别为 232、109 和 68 kg/hm<sup>2</sup>，ST 处理的分别为 203、95 和 83 kg/hm<sup>2</sup>。与 FP 和 ST 处理相比，NE 处理显著降低了氮肥和磷肥用量，提高了钾肥用量，氮肥用量分别降低了 19.8% 和 8.4%，磷肥用量分别降低了 23.9% 和 12.6%，但钾肥用量分别提高了 35.3% 和 10.8%。

小麦 2 年试验施肥量结果显示（图 2c），NE 处理的氮、磷和钾肥用量分别为 166、86 和 73 kg/hm<sup>2</sup>，FP 处理的分别为 263、95 和 56 kg/hm<sup>2</sup>，ST 处理的分别为 217、101 和 81 kg/hm<sup>2</sup>。与 FP 相比，NE 处理显著降低了氮肥用量，降低幅度达到了 36.9%；磷肥用量无显著差异，但降低了 9.5%；显著增加了钾肥用量，增幅 30.4%。与 ST 相比，NE 处理显著降低了氮肥用量，降低了 23.5%，磷肥和钾肥用量无显著差异，但分别降低了 14.9% 和 9.9%。

## 2.2 产量和经济效益

产量结果显示（表 2），水稻 NE 处理的产量显著高于 FP 处理，高 0.6 t/hm<sup>2</sup>，增幅 8.0%；虽然 NE 与 ST 处理产量统计上无显著差异，但前者比后者高 0.3 t/hm<sup>2</sup>，增幅 3.8%。玉米和小麦 3 个处理的产量均无显著差异，但都以 NE 处理的产量最高，分别为 11.1 和 8.2 t/hm<sup>2</sup>。玉米 NE 处理的产量比 FP 处理和 ST 处理的分别高 0.6 和 0.2 t/hm<sup>2</sup>，但小麦的产量均只高出 0.1 t/hm<sup>2</sup>。

表 2 水稻、玉米和小麦不同处理产量和经济效益比较

Table 2 Comparison of grain yield and economic benefit in different treatments for rice, maize and wheat

作物	处理	产量 (t/hm <sup>2</sup> )	肥料花费 TFC (元/hm <sup>2</sup> )	净效益 GRF (元/hm <sup>2</sup> )
水稻	NE	8.1a	1 495c	21 352a
	FP	7.5b	1 721a	19 554b
	ST	7.8ab	1 576b	20 458ab
玉米	NE	11.1a	1 791b	14 473a
	FP	10.5a	2 036a	13 578a
	ST	10.9a	1 896b	14 113a
小麦	NE	8.2a	1 687b	18 463a
	FP	8.1a	2 151a	17 935a
	ST	8.1a	2 083ab	18 098a

注：数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

水稻、小麦和玉米三大作物均以 NE 处理的 TFC 最低，其次为 ST 处理，最高的为 FP 处理（表 2）。水稻 NE 处理的 TFC 比 FP 和 ST 处理分别降低了 226 和 81 元/hm<sup>2</sup>，玉米分别降低了 245 和 105 元/hm<sup>2</sup>，小麦分别降低了 464 和 396 元/hm<sup>2</sup>。NE 处理保障产量的同时降低了肥料用量和肥料花费，增加了净效益。与 FP 和 ST 处理相比，NE 处理的净

2019年12月

效益水稻分别增加了 1798 和 894 元 /hm<sup>2</sup>，玉米分别增加了 895 和 360 元 /hm<sup>2</sup>，小麦分别增加了 528 和 365 元 /hm<sup>2</sup>。与 FP 处理相比，由水稻、玉米和小麦增产带来的净效益分别占总净效益的 87.4%、72.6% 和 11.9%。

### 2.3 肥料利用率

水稻肥料利用率结果显示（表 3），NE 处理的 REN、REP 和 REK 均显著高于 FP 和 ST 处理，其中 REN 分别增加了 11.8 和 9.0 个百分点，REP 分别增加了 10.8 和 7.4 个百分点，REK 分别增加了 22.3 和 16.1 个百分点。NE 处理的 AEN、AEP 和 AEK 也均显著高于 FP 和 ST 处理，其中 AEN 分别提高了 4.2 和 2.8 kg/kg，AEP 分别提高了 9.5 和 5.1 kg/kg，AEK 分别提高了 5.4 和 3.5 kg/kg。NE 处理的 PFPN 和 PFPK 均显著高于 FP 和 ST 处理，但 NE 与 ST 的 PFPP 无显著差异，但均显著高于 FP 处理；与 FP 和 ST 处理，NE 处理的 PFPN 分别提高了 7.2 和 5.8 kg/kg，PFPP 分别提高了 29.3 和 8.9 kg/kg，PFPK 分别提高了 19.5 和 17.2 kg/kg。

表 3 水稻、玉米和小麦不同处理肥料利用率比较

Table 3 Comparison of nutrient use efficiency in different treatments for rice, maize and wheat

作物	处理	回收利用率 RE (%)			农学效率 AE (kg/kg)			偏生产力 PFP (kg/kg)		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
水稻	NE	33.5a	20.5a	48.2a	15.6a	15.4a	9.5a	52.0a	136.1a	101.5a
	FP	21.7b	9.7b	25.9b	11.4b	5.9c	4.1b	44.8b	106.8b	82.0b
	ST	24.5b	13.1b	32.1b	12.8b	10.3b	6.0b	46.2b	127.2a	84.3b
玉米	NE	38.5a	19.6a	47.9a	15.6a	12.4a	8.7a	59.7a	141.1a	129.5a
	FP	28.9b	10.1b	26.5b	11.5b	5.8b	5.3b	47.4c	102.1c	122.2a
	ST	34.0ab	14.5b	42.3ab	13.7ab	9.8ab	8.0ab	53.9b	122.3b	136.5a
小麦	NE	38.7a	11.7a	17.4a	11.9a	6.1a	5.7a	48.9a	95.9a	115.0b
	FP	25.6b	6.5b	13.7b	7.1a	5.0a	5.3a	31.8c	93.9ab	145.3a
	ST	30.6ab	5.0b	16.3a	8.6a	5.1a	3.3b	37.5b	83.2b	105.7b

注：数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平

玉米肥料利用率结果显示（表 3），NE 处理的 REN、REP 和 REK 均显著高于 FP 处理，虽然 NE 和 ST 处理的 REN 和 REK 无显著差异，但前者要高于后者。与 FP 和 ST 处理相比，NE 处理的 REN、REP 和 REK 分别提高了 9.6 和 4.5 个百分点、9.5 和 5.1 个百分点、21.4 和 5.6 个百分点。NE 处理的 AEN、AEP 和 AEK 均显著高于 FP 处理，与 ST 均无显著差异，但都以 NE 处理最高。NE 处理的 AEN、AEP 和 AEK 比 FP 和 ST 处理分别提高了 4.1 和 1.9 kg/kg、6.6 和 2.6 kg/kg、3.4 和 0.7 kg/kg。NE 处理的 PFPN 和 PFPK 显著高于 FP 和 ST，分别高 12.3 和 5.8 kg/kg、38.9 和 18.8 kg/kg；3 个处理的 PFPK 无显著差异，这主要是因为 NE 处理的钾肥施用量要高于 FP 和 ST。

小麦肥料利用率结果显示（表 3），NE 处理 REN、REP 和 REK 均显著高于 FP 处理，但 REN 和 REK 与 ST 处理无显著差异，NE 处理 REN、REP 和 REK 比 FP 和 ST 处



理分别高 13.1 和 8.1 个百分点、5.2 和 6.7 个百分点、3.7 和 1.1 个百分点。3 个处理的 AEN 和 AEP 无显著差异, 但 NE 和 FP 处理的 AEK 高于 ST 处理, 主要是因为 ST 处理的施钾量要高于前两者。PFP 也均以 NE 处理的最高, 其中 PFPN 显著高于 FP 和 ST 处理, 分别高 17.1 和 11.4 kg/kg; NE 处理 PFP 显著高于 ST 处理, 但与 FP 处理无显著差异; FP 处理的 PFPK 显著高于 NE 和 ST 处理, 是因为 FP 处理施钾量显著低于 NE 和 ST 处理。

### 3 结论

为方便用户使用, 建立了基于作物产量反应和农学效率的养分专家系统微信版, 并在水稻、玉米和小麦主产区开展了 2 年共计 225 个田间试验, 对粮食作物养分专家系统进行验证。结果表明, 粮食作物养分专家系统微信版显著降低了肥料用量, 尤其是氮肥和磷肥用量, 与农民习惯施肥措施相比, 养分专家系统的氮肥和磷肥降低幅度到达了 9.5%~36.9%, 但产量却增加了 0.1~0.6 t/hm<sup>2</sup>。养分专家系统降低了肥料花费, 增加了净效益, 其中由水稻、玉米和小麦产量增加带来的净效益分别占总净效益的 87.4%、72.6% 和 11.9%。养分专家系统显著提高了肥料利用率, 除玉米氮肥回收利用率外, 其余氮、磷和钾回收利用率的增幅都在 50% 以上。目前, 该系统中已经上线的作物有水稻、玉米、小麦、大豆、马铃薯、油菜、棉花、白菜、萝卜、大葱等 24 种作物, 正式发布的作物有 4 种, 其余为试用版, 后续会继续开展田间试验不断扩充各作物数据库, 并不断完善各作物系统。

### 参考文献

- [ 1 ] Zhang Y.M., Hu C.S., Zhang J.B., et al.Nitrate leaching in an irrigated wheat-maize rotation field in the North China Plain. *Pedosphere*, 2005(15): 196~203.
- [ 2 ] Ju X.T., Xing G.X., Chen X.P., et al.Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems.*Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009(106): 3041~3046.
- [ 3 ] Zhang F.S., Chen X.P., Vitousek P..Chinese agriculture: An experiment for the world.*Nature*, 2013(497): 33~35.
- [ 4 ] 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(5): 915~924.
- [ 5 ] Xu X.P., He P., Qiu S.J., et al.Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China. *Field Crops Research*, 2014(163): 10~17.
- [ 6 ] Zhang J.J., He P., Xu X.P., et al.Nutrient expert improves nitrogen efficiency and environmental benefits for winter wheat in China.*Agronomy Journal*, 2018(110): 696~706.
- [ 7 ] Chen X.P., Cui Z.L., Fan M.S., et al.Producing more grain with lower environmental costs.*Nature*, 2014(514): 486~489.
- [ 8 ] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 1~4.
- [ 9 ] 魏义长, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于 ASI 法的滨海滩涂地水稻土壤有效氮、磷、钾丰缺指标. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 138~143.
- [ 10 ] 戢林, 张锡洲, 李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 84~92.
- [ 11 ] Greenwood D.J., Karpinets T.V., Stone D.A..Dynamic model for the effects of soil P and fertilizer P on crop growth, P uptake and soil P in arable cropping: model description.*Annals of Botany*, 2001(88): 279~291.
- [ 12 ] Sonar K.R., Babhulkar V.P..Application of Mitscherlich-Bray equation for fertilizer use in wheat.*Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2002(33): 3241~3249.
- [ 13 ] Alam M.M., Karim M.R., Ladha J.K..Integrating best management practices for rice with farmers' crop management techniques: A potential option for minimizing rice yield gap.*Field Crops Research*, 2013(144): 62~68.
- [ 14 ] Das D.K., Maiti D., Pathak H..Site-specific nutrient management in rice in Eastern India using a modeling approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009(83): 85~94.

2019年12月

- [ 15 ] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1456~1461.
- [ 16 ] 姜海燕, 朱艳, 汤亮, 等. 基于本体的作物系统模拟框架构建研究. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1207~1214.
- [ 17 ] 何萍, 金继运, Pampolino M.F., 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499~505.
- [ 18 ] Xu X.P., He P., Pampolino M.F., et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, 2014(157): 27~34.
- [ 19 ] Xu X.P., He P., Yang F.Q., et al. Methodology of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for rice in China. *Field Crops Research*, 2017(206): 33~42.
- [ 20 ] Chuan L.M., He P., Pampolino M.F., et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, 2013(140): 1~8.
- [ 21 ] 徐新朋, 魏丹, 李玉影, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1458~1467.
- [ 22 ] Janssen B.H., Guiking F.C.T., van der Eijk D., et al. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 1990(46): 299~318.
- [ 23 ] Chuan L.M., He P., Jin J.Y., et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China. *Field Crops Research*, 2013(146): 96~104.
- [ 24 ] Xu X.P., He P., Pampolino M.F., et al. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis. *Field Crops Research*, 2013(150): 115~125.
- [ 25 ] Xu X.P., Xie J.G., Hou Y.P., et al. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China. *Field Crops Research*, 2015(180): 37~45.

## Availability of Nutrient Expert WeChat version based on crop yield response for food crops

Xu Xinpeng, Zhang Jiajia, Ding Wencheng, Qiu Shaojun,  
Zhao Shicheng, Zhou Wei, He Ping<sup>\*</sup>

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

**Abstract:** [ **Purpose** ] A WeChat version Nutrient Expert (NE) is developed based on yield response and agronomic efficiency to solve low nutrient use efficiency caused by irrational fertilization from small-holder farms, and to study its application effect on three major food crops. [ **Method** ] In the current study, 225 on-farm experiments were conducted in ten provinces (Jilin, Heilongjiang, Hubei, An'hui, Jiangxi, Hunan, Inner Mongolia, Shanxi, Shandong and Hebei) from 2017 to 2018, to optimize the effects of NE WeChat version from fertilizer application rate, grain yield, economic benefit and nutrient use efficiency aspects in rice, maize and wheat major production regions. Six treatments were designed in each experiment, including (1) fertilizer recommendation based on NE WeChat version, (2) farmers' practices (FP), (3) soil testing or fertilizer recommendation based on local agricultural technology department (ST), and (4) ~ (6) nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) omission plots based on NE treatment, which were used for the calculation of nutrient use efficiencies. [ **Result** ] As compared to FP and ST treatments, NE reduced the amount of nitrogen and phosphorus

fertilizers application rate, and balanced the potassium fertilizer application rate across all sites, while the grain yield increased by 0.1~0.6 t/hm<sup>2</sup> with NE treatment. The NE treatment reduced total fertilizer cost (TFC) and improved gross return above fertilizer cost (GRF), the GRF increased by 1 798, 895 and 528 yuan/hm<sup>2</sup> than that of FP treatment, and increased by 894, 360 and 365 yuan/hm<sup>2</sup> than that of ST treatment on rice, maize and wheat, respectively. [ **Conclusion** ] A comprehensive fertilizer recommendation method was simplified into NE WeChat version by using computer software technology, and the field validation was conducted to further improve this fertilizer recommendation. NE WeChat version is an easy-to-use method to attain fertilizer recommendation rate aiming to specific field when soil testing is not timely or available.

**Key words:** Nutrient Expert system; food crop; yield response; nutrient use efficiency

## 欢迎订阅《中国农业信息》

《中国农业信息》(双月刊)由农业农村部主管,中国农学会农业信息分会、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所共同主办,是我国目前全方位传播和刊载国内外农业遥感/农业信息科学领域的信息获取、处理、分析和应用服务的理论、技术、系统集成、标准规范等方面最新进展和成果,促进学术交流以及农业信息学科关键技术与产品的创新研发、集成推广和应用示范的综合性科学技术期刊。

主要刊登农业遥感、农业传感器、农业信息智能处理、精准农业/智慧农业、农业监测预警与信息服务系统、农业物联网、智能装备与控制、虚拟农业、人工智能、信息技术标准等方向学科热点领域的最新、最重要的理论研究和应用成果。主要栏目有:农业遥感、智慧农业、综合研究、农业信息技术、农业物联网、专题报道等。目前被中国知网(CNKI)、万方数据、中文科技期刊数据库、中国核心期刊(遴选)数据库等多家数据库收录。

《中国农业信息》为国内外公开发行的刊物,开本为16开,彩色四封,读者范围广,影响面大,全国各地邮局均有订阅。每双月25号出版,定价为25.00元/册,150元/年。

### 邮局汇款

收 款 人:《中国农业信息》编辑部

地 址:北京市海淀区中关村南大街12号中国农科院资源所区划楼319

邮 编:100081

### 银行汇款

开 户 行:农行北京北下关支行

行 号:103100005063

账 号:11050601040011896

单位名称:中国农业科学院农业资源与农业区划研究所

电 话:(010)82109632

传 真:(010)82109632

E m a i l : nyxxbjb@caas.cn

邮发代号:2-733

投稿网址:www.cjarrp.com