

基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法

何萍¹, 金继运¹, Mirasol F. Pampolino², Adrian M. Johnston³

(1 农业部植物营养与肥料重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 国际植物营养研究所中国项目部, 北京 100081; 2 国际植物营养研究所东南亚项目部, 马来西亚槟城 11960; 3 国际植物营养研究所, 加拿大萨斯卡通 S7N 4L8)

摘要: 当前农民过量和不平衡施用化肥现象严重, 导致肥料利用率降低, 影响到农田的可持续利用。因此, 发展适合我国农业生产特点的养分管理和施肥方法尤为重要。本文介绍了基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥新方法, 该方法是以改进的 SSNM (Site-specific Nutrient Management) 和改进的 QUEFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) 模型参数为指导的养分管理和推荐施肥为原则, 同时考虑大、中微量元素的全面平衡, 并应用计算机软件技术把复杂和综合的养分管理原则智能化形成可为当地技术推广人员掌握的 Nutrient Expert 推荐施肥专家系统。Nutrient Expert 推荐施肥专家系统在用户回答一些简单问题后就能给出基于作物栽培管理措施的推荐施肥套餐, 包括作物种植密度、目标产量、推荐的养分用量及其可选用的物化的肥料用量, 同时根据预知的作物生长季节推荐施肥的最佳时间和次数。通过跨区域田间多点验证试验证明, 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法是一种简单的易于掌握的作物增产增收、提高肥料利用率和保护环境的新方法。

关键词: 产量反应; 农学效率; Nutrient Expert; 推荐施肥

中图分类号: S147.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2012)02-0499-07

Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency

HE Ping¹, JIN Ji-yun¹, Mirasol F. Pampolino², Adrian M. Johnston³

(1 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizers/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/International Plant Nutrition Institute China Program, Beijing 100081; 2 International Plant Nutrition Institute Southeast Asia Program, Penang 11960, Malaysia; 3 International Plant Nutrition Institute, Saskatoon S7N 4L8, Canada)

Abstract: Over and imbalanced fertilization by farmers driven by pursuing high yield results in low fertilizer use efficiency, and therefore influences sustainable utilization of farmland. Thus, develop a new tool to better nutrient management and fertilization which is best suitable for China's agriculture is quite urgent. A new approach based on crop yield responses and agronomic efficiency addresses all such concerns. The principles of nutrient management and fertilizer recommendation was based on improved SSNM and QUEFTS model guided nutrient management, and integrated consideration of balanced fertilization of all plant nutrients. The nutrient management principles were developed to consolidate the complex and knowledge intensive information into simple deliverable computer software named "Nutrient Expert" enabling local advisors rapidly implements this technology to ensure cost-effectively field specific guidelines for fertilizer recommendations. The software only requires information that can be easily provided by farmers or local expert. The user will get a package guideline on fertilizer management (and more, such as recommended plant density, attainable yield, the right application time suitable for his local condition) that are tailored to his location and locally-available fertilizer sources after answering a set of simple questions. Multiple-site field validation across larger area demonstrated that the easily grasped new approach based on crop yield responses

收稿日期: 2011-07-15 接受日期: 2011-12-15

基金项目: 国家重点基础研究计划课题(2007CB109306); 国际植物营养研究所(IPNI)资助。

作者简介: 何萍(1970—), 女, 吉林榆树人, 研究员, 主要从事植物营养与施肥方面的研究。Tel: 010-82105638, E-mail: phe@caas.ac.cn

and agronomic efficiency helps in strategizing appropriate management of nutrients leading to better yield and profits, nutrient use efficiency improvement and environmental protection.

Key words: crop yield responses; agronomic efficiency; Nutrient Expert; fertilizer recommendation

为满足日益增加的人口对粮食增长的需求,农民通过增加肥料投入来提高粮食产量,形成了我国特有的靠化肥的大量投入来增加单产的农田高强度利用生产体系^[1-4]。研究表明,在华北平原许多地区,农民在冬小麦和夏玉米作物每季的氮肥用量超过 300 kg/hm²,远远超过达最高产量时的优化施肥量^[2,5]。连续过量施氮使华北地区土壤矿质氮高量积累,氮肥利用率显著降低^[6]。赵士诚等^[3]研究发现河北冬小麦收获后 0—100 cm 土层矿质氮积累达 180 ~ 303 kg/hm²,且矿质氮积累量随施氮量的增加而增加。冬小麦的氮肥利用率也由上世纪 80 年代的 30% ~ 35% 下降为现在的 10% ~ 20%^[7-8]。大量研究证明,高量化肥投入不仅不能带来进一步的产量增加,而且还威胁到生态环境安全,造成地表水或地下水硝酸盐含量超标,并影响到农田的可持续利用^[9]。因此,如何合理养分管理和优化施肥对于保障国家粮食安全、生态环境安全具有重要意义。

国内外在土壤养分管理和推荐施肥方面开展了大量研究,发展了一些推荐施肥的方法,有些方法仍然沿用至今,如地力分级法、目标产量法、肥料效应函数法等等。这些研究方法都可以归结为两大类,一类是以土壤测试为基础的测土推荐施肥方法,另一类是以作物反应为基础的推荐施肥方法,如肥料效应函数法和地上部冠层营养诊断等^[10-11]。目前我国指导施肥指标体系仍然沿用上世纪八十年代第二次土壤普查结果^[12],但是我国目前土壤养分状况已今非昔比,在一些土壤测试值很高的土壤上有时仍表现出缺素症状,过去指导施肥的指标体系难以适应当前高投入高产这种高强度利用农业生产体系的需求。为此,国家农业部 2005 年起启动了“测土配方施肥行动工程”,推动了各地测土推荐施肥工作的开展。然而,对于土壤氮素而言,国内外土壤氮素测试和推荐施氮技术仍然是悬而未决的一个难题,主要是因为它在土壤中的转化过程十分复杂,损失的途径也很多,如氨挥发、反硝化以及过量灌溉和遇到大量降雨而造成的硝酸盐向地下淋洗等,对环境的影响也很大(如对地下水、土壤和水等)。目前,国际上对于土壤氮的测试和氮肥推荐也没有令人满意的适合各种土壤类型的测试方法、指标和

参数。即使对土壤各种营养元素的土壤测试方法都比较满意,在我国主要以小农户为主要经营单元的农业生产体系,也很难做到一家一户依据土壤测试结果推荐施肥。此外,传统施肥较多地基于经验性施肥参数,如养分当季回收利用率,而该参数的获取需要测定植株养分,而我国作物种植区域辽阔,获取不同区域上的参数需要大量的人力、物力和财力,且很难给出基于不同区域上的参数,造成目前多以经验指导施肥,科学的区域性参数较少。因此,寻求一种能适合我国农业生产体系的养分管理和推荐施肥方法尤为迫切。

1 基于作物产量反应和农学效率的养分管理和施肥推荐原则

作物施肥后主要通过作物产量高低来表征土壤养分供应能力和作物生产能力,因此依据作物产量反应来表征作物的营养状况是更为直接的评价施肥效应的有效手段。该方法把土壤养分供应看作一个“黑箱”,用不施该养分地上部的产量或养分吸收来表征,因此解决了困扰广大科学工作者的土壤氮素供应问题。国际植物营养研究所(IPNI)目前在中国、印度、菲律宾等亚洲一些主要以小农户为主要经营单元的国家 and 地区开展了基于作物产量反应和农学效率的小麦、玉米和水稻养分管理和推荐施肥研究。该养分管理和推荐施肥原则主要是在 Witt 等^[13]水稻养分管理的 SSNM (Site-specific Nutrient Management) 原则基础上改进,并利用 QUEFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) 模型在分析大量的来源于不同试验地点作物养分吸收和产量关系的基础上进行参数调整而成^[2,14-15],在此基础上结合不同作物种植体系和管理方式发展而成适合当地生产条件的养分管理和推荐施肥系统。该系统在中国的形成主要以 IPNI 在中国的多年多点田间试验为基础,根据不同地区作物反应和农学效率进行调整,从而根据不同试验地点的不同生态条件进行有针对性的推荐施肥。该养分管理方法的主要创新之处在于应用 QUEFTS 模型对来自我国 2001 ~ 2010 年期间多点的田间试验产量和养分吸收数据进行了模拟和矫正,得出我国玉米和小麦种植区一定目标产量下的养分最佳吸收曲

线,避免了较少数据点带来的因养分缺乏、过量或信息量少情况下的偏差,而且该养分最佳吸收曲线包含了我国主要玉米或小麦种植区生产中应用的品种和环境条件信息,具有一定的普遍性(图 1)。其特点和目标是有效利用了来自于土壤、作物残体、有机肥以及灌溉水等土壤基础养分供应(土壤基础养分供应主要由不施某种养分小区的养分吸收或产量来衡量),保证氮、磷、钾和其他中、微量元素的充足供应,同时避免作物对某种养分的奢侈吸收,减少土壤肥力耗竭,保证农民增产增收,有效防止因过量施肥导致的潜在环境危险。对于氮素养分推荐施

肥,主要依据作物产量反应和农学效率(施氮量 = 施氮的产量反应/氮素农学效率,施氮的产量反应由施氮和不施氮小区的产量差求得),而对于磷、钾养分推荐,主要基于产量反应和一定目标产量下作物的移走量给出施肥量(施磷或施钾量 = 作物产量反应施磷或施钾量 + 作物收获物移走量),作物养分移走量主要依据 QUEFTS 模型求算的养分最佳吸收量来求算。如果作物施肥无反应,则给出根据 QUEFTS 模型求算的基本养分移走量。氮、磷、钾养分推荐主要考虑作物种植体系,并考虑上季作物残效。中、微量元素则以土壤养分测试数据为依据进行适当补充。

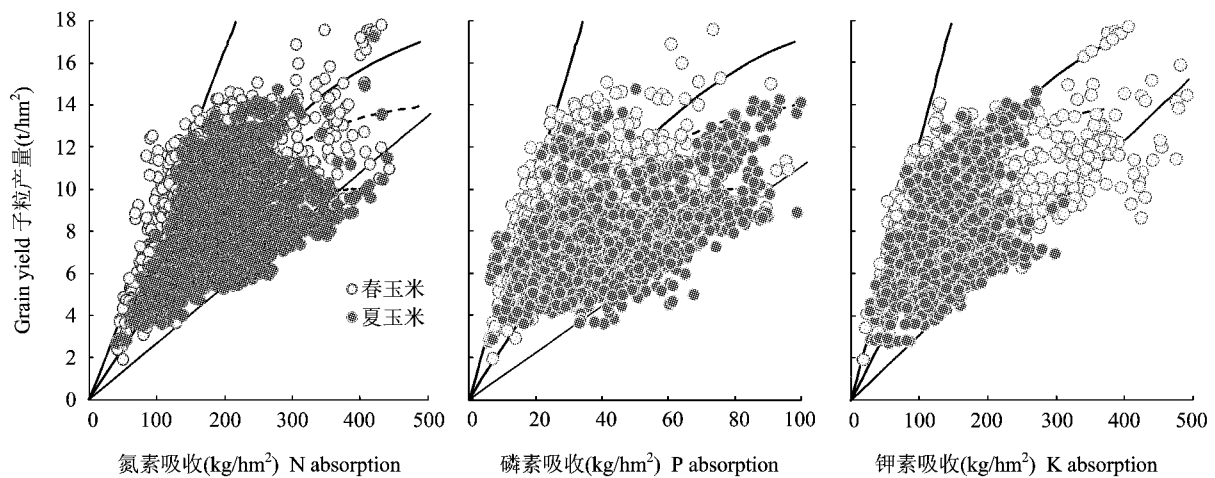


图 1 应用 QUEFTS 模型模拟的玉米氮磷钾养分吸收

Fig.1 Nitrogen, phosphorous and potassium uptake by maize plant simulated by QUEFTS model

2 专家系统用户界面介绍

基于以上养分管理原则,应用计算机软件技术发展成为作物养分管理专家系统(Nutrient Expert)(图 2,以玉米为例)。Nutrient Expert 专家系统主要通过农民或当地农技推广专家提供一些简单的作物栽培管理历史信息,系统利用后台已有的数据库就能生成基于农户不同个性信息的包括栽培管理措施的施肥营养套餐,如推荐的种植密度(玉米)、可获得的目标产量和肥料最佳施用时间和次数等,帮助农民实现增产增收的目标。需要农民或当地农技推广人员提供的栽培管理信息包括:

当前农民的产量和养分管理措施包括农民目前的种植密度,用于优化栽培措施和进行经济效益比较分析;

用于评估目标产量的作物生长环境,在有灌溉条件和雨养条件下由于作物可预知达到的目标产量是不一样的,因此给出的施肥总量和生育期运筹方

案有所不同;

土壤肥力指标(如土壤质地和颜色,肥料投入历史)或作物对化肥氮、磷、钾施用的产量反应,土壤肥力指标调查主要用于在没有氮、磷、钾施肥反应信息的条件下,可以根据后台数据库评估作物施肥后的产量反应,后台数据库主要依据过去十年在中国开展的田间试验为依据;

当季或上季作物施肥包括有机肥和化肥、秸秆或残留物处理方式,用于从作物轮作周期角度考虑养分带入和移走量,用于调整当季作物养分推荐量。

在回答了以上一些简单问题后,用户将得到适合该特定地块和特殊生长环境的肥料养分管理套餐,推荐的肥料用量可以依据用户已有的肥料产品来进行用量折算,不受肥料产品限制,如农户只有尿素和复合肥,那么系统就根据农户已有的肥料储备进行推荐。该系统还提供了一个简单的与农民习惯施肥对比的优化施肥等管理措施的经济效益分析。Nutrient Expert 专家系统营养套餐基本内容包括:

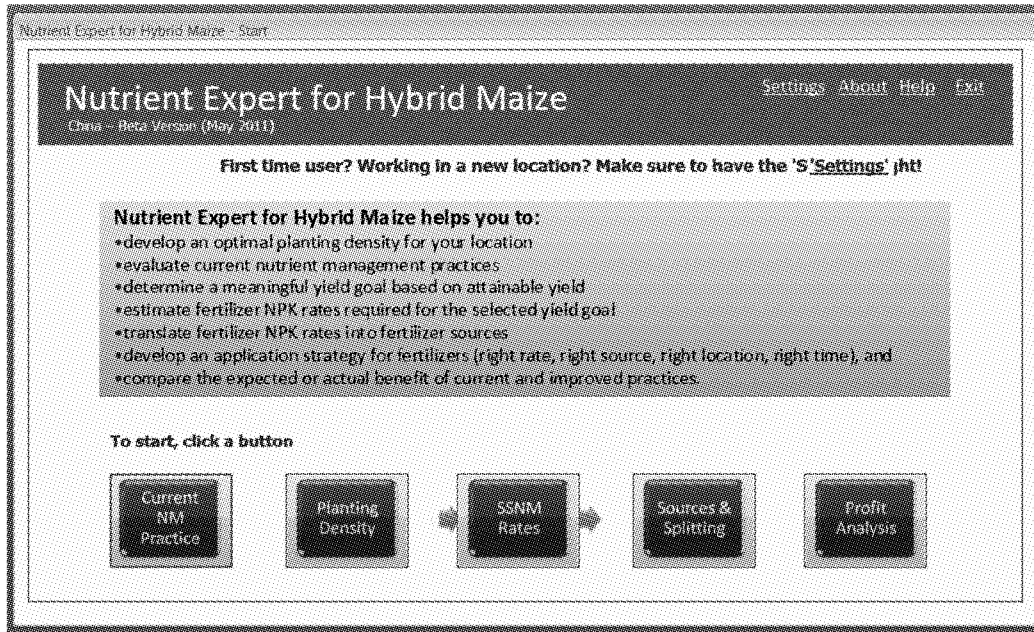


图 2 Nutrient Expert 玉米专家系统用户界面

Fig. 2 User interface of Nutrient Expert Decision Support System for maize

制定特定地块的最佳种植密度(仅对于玉米而言);

评价农户当前的养管理措施,用于优化养管理措施和经济效益分析;

确定当地气候条件下能够达到的目标产量;

给定基于一定目标产量的氮、磷、钾等大、中微

量元素养分用量及其基于农户可用的肥料实物量;

依据作物养分吸收规律确定 4R 养分管理策略(如最佳肥料用量、最佳施用位置和最佳施用时间等)(图 3,以玉米为例);

与农民习惯施肥对比的预期推荐施肥效益(图 4,以玉米为例)。

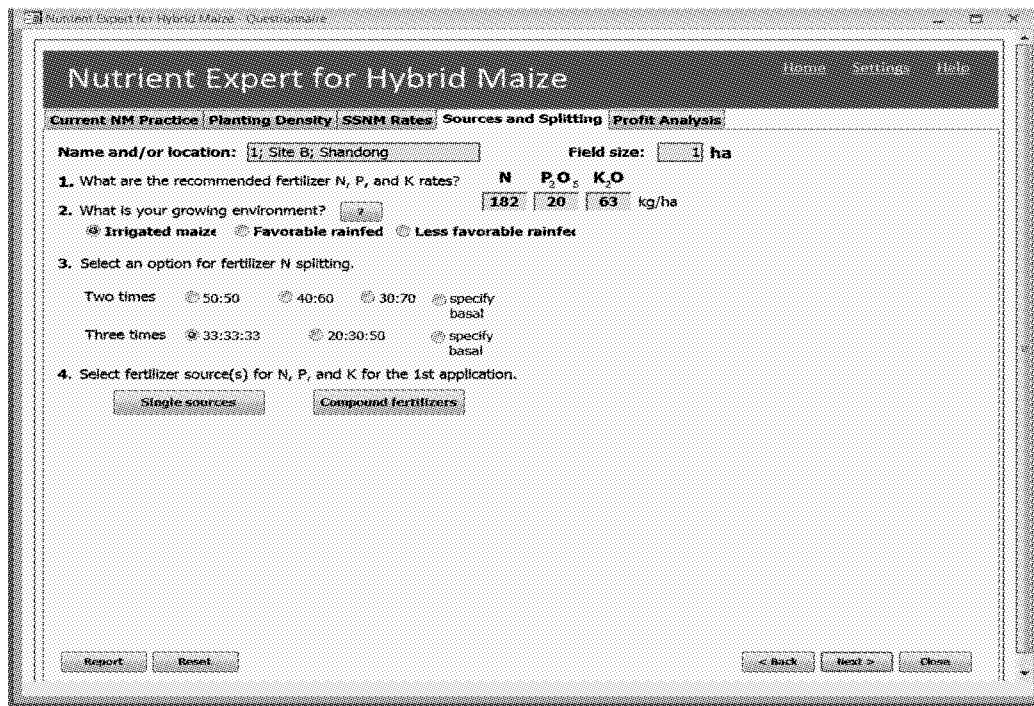


图 3 Nutrient Expert 玉米专家系统用户界面的肥料种类和分次施肥推荐

Fig. 3 Fertilizer sources and recommended splitting guided through Nutrient Expert software for maize

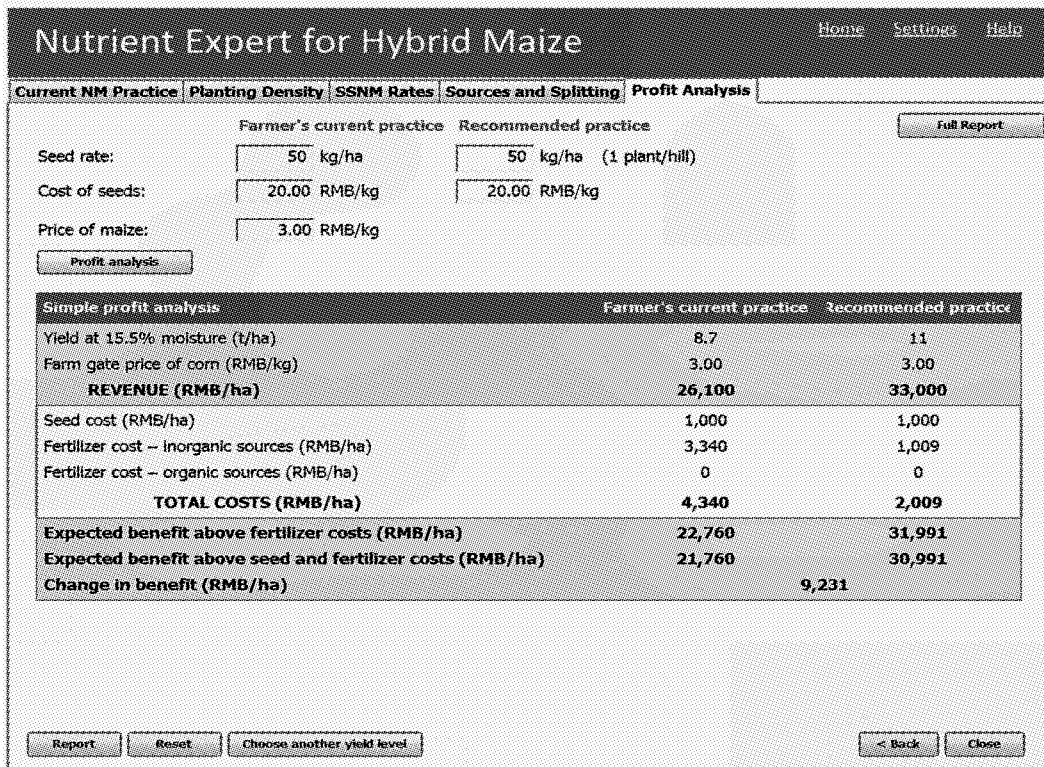


图4 Nutrient Expert 玉米专家系统经济效益分析界面

Fig. 4 Interface of profit analysis of Nutrient Expert software for maize

3 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥实践

应用 Nutrient Expert 专家系统于 2010 年在河北 (33 户)、山东 (25 户)、山西 (11 户)、河南 (60 户) 四个省市 129 个农户上进行玉米推荐施肥 (OPT-NE), 同时以农民习惯施肥 (FP) 和当地推荐施肥 (主要以测土施肥为依据, OPT-local) 为对照。田间验证结果表明, 与农民习惯施肥和当地推荐施肥比较, 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥虽然在产量和经济效益上没有显著差别, 但是具有一定增产和提高经济效益趋势 (图 5)。更为重要的是, 基于 Nutrient Expert 专家系统比当地推荐施肥节约氮肥 26 ~ 31 kg/hm² (或 11.4% ~ 11.5%), 比农民习惯施肥节约氮肥 82 ~ 106 kg/hm² (或 42.0% ~ 55.6%), 同时平衡了磷、钾养分, 因此虽然降低了氮肥用量, 但是并没有降低产量 (表 1)。养分表观平衡结果表明, 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥氮磷钾养分基本保持平衡或略有盈余, 氮磷钾平衡分别为 N 40 ~ 67 kg/hm²、P₂O₅ 4 ~ 19 kg/hm² 和 K₂O 21 ~ 42 kg/hm², 而当地推荐施肥盈余较多,

氮磷钾平衡分别为 N 99 ~ 171 kg/hm²、P₂O₅ 15 kg/hm² 和 K₂O 43 ~ 47 kg/hm², 农民习惯施肥表现为氮素盈余较多, 磷、钾亏缺, 氮磷钾平衡分别为 N 123 ~ 200 kg/hm², P₂O₅ - 43 ~ 17 kg/hm² 和 K₂O - 26 ~ 23 kg/hm²。虽然农民习惯施肥或当地推荐施肥氮素用量过高, 但是由于养分施用不平衡并没有进一步提高产量, 反而增加了因氮素过量施用而带来的环境风险^[2,5]。值得提出的是, 该方法在优化用量的同时, 还优化了其他养分管理措施, 如肥料的施用次数和施肥方法等。在我们试验的大部分地区农民在玉米上只一次施撒施肥料, 我们的优化施肥是 1 ~ 2 次施肥并有些地区能够施肥后覆土以减少氮肥的挥发损失, 提高氮肥利用率。

以上实践证明, Nutrient Expert 推荐施肥专家系统是一种简便易行的增产增收、提高肥料利用率和保护环境的养分管理和推荐施肥方法。

基于 Nutrient Expert 推荐施肥系统已经成为菲律宾和印度尼西亚农业部推荐施肥的官方推荐方法, 在印度的水稻、小麦和玉米种植区已经开展相应的田间验证工作, 并已被一些种子公司和肥料企业推荐施肥所采纳^[16]。相信该方法不仅适合于以

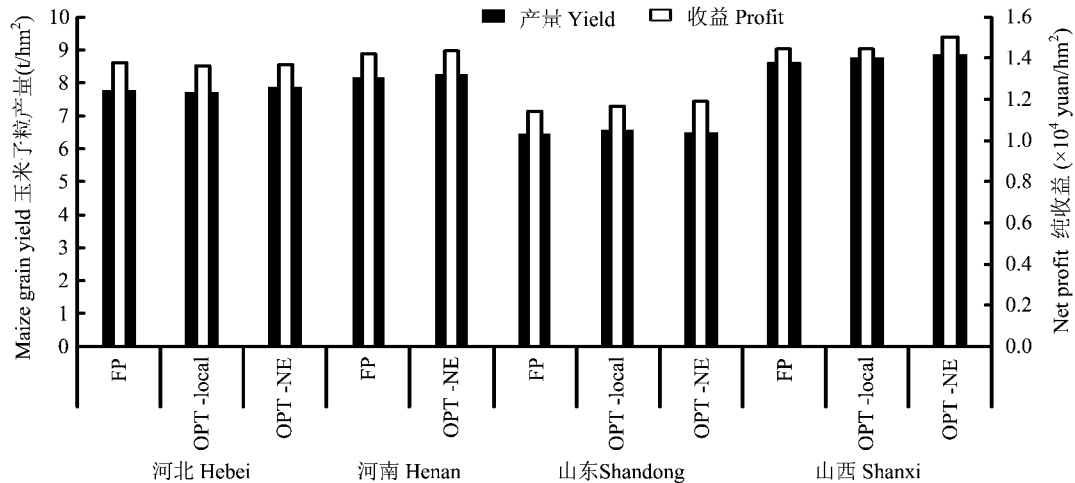


图5 基于 Nutrient Expert 推荐施肥的玉米子粒产量和经济效益

Fig. 5 Grain yield and net profit with Nutrient Expert based fertilizer recommendation

[注 (Note): FP—农民习惯施肥 Farmer's practice; OPT-local—当地推荐施肥 Local fertilizer recommendation; OPT-NE—基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥 Nutrient Expert based fertilizer recommendation. 图中不同处理之间差异不显著 ($P > 0.05$) There is no significant differences among treatments.]

表1 不同养分管理方式对养分表现平衡的影响

Table 1 Apparent nutrient balance as influenced by different nutrient management practices

试验地点 Experimental site	农户数 Observation No.	处理 Treatment	平均施肥量 Mean fertilizer appl. rate (kg/hm ²)			作物养分移走量 Crop nutrient removal (kg/hm ²)			养分平衡 Nutrient balance (kg/hm ²)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
河北 Hebei	33	OPT-NE	135	52	60	84	33	18	51	19	42
		FP	235	6	0	83	31	17	152	-25	-17
河南 Henan	60	OPT-NE	145	51	61	105	47	42	40	4	19
		FP	251	4	5	100	47	31	151	-43	-26
山东 Shandong	25	OPT-NE	140	51	61	73	36	21	67	15	40
		OPT-local	240	51	61	69	36	18	171	15	43
		FP	271	52	42	71	35	19	200	17	23
山西 Shanxi	11	OPT-NE	144	53	51	102	45	30	42	8	21
		OPT-local	200	60	75	101	45	28	99	15	47
		FP	226	61	25	103	44	29	123	17	-4

注 (Note): 养分表现平衡 = 施肥量 - 子粒养分移走量 Apparent nutrient removal = Fertilizer application rate - Nutrient removal by grain. FP—农民习惯施肥 Farmers' practice; OPT-local—当地推荐施肥 Local fertilizer recommendation; OPT-NE—基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥 Nutrient Expert based fertilizer recommendation.

家庭为主要经营单元的小农户生产体系,而且适合区域和大规模经营农业生产体系。

参考文献:

[1] Liu X Y, He P, Jin J Y *et al.* Yield gaps, soil indigenous nutrient

supply, and nutrient use efficiency of wheat in China[J]. *Agron. J.* 2011, 103: 1452-1463.

[2] He P, Li S T, Jin J Y *et al.* Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China[J]. *Agron. J.*, 2009, 101: 1489-1496.

[3] 赵士诚, 沙之敏, 何萍. 不同氮素管理措施在华北平原冬小

- 麦上的应用效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 517-524.
- Zhao S C, Sha Z M, He P. Response of winter wheat on different nitrogen managements in North Central China [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2011, 17(2): 517-524.
- [4] 易琼, 张秀芝, 何萍, 等. 氮肥减施对稻麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1069-1077.
- Yi Q, Zhang X Z, He P *et al.* Effect of reducing N application on crop N uptake, utilization, and soil N balance in rice-wheat rotation system[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(5): 1069-1077.
- [5] Ju X T, Kou C L, Zhang F S *et al.* Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. *Environ. Poll.* 2006, 143: 117-125.
- [6] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 492-497.
- Zhao S J, Pei X X, He P *et al.* Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(2): 492-497.
- [7] 朱兆良. 农田生态系统中化肥的去向和氮素管理[A]. 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[C]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 228-245.
- Zhu Z L. Fertilizer fate and N management in agroecosystem [A]. Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soil of China [C]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 228-245.
- [8] 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, 4(2): 450-459.
- Yan X, Jin J Y, He P *et al.* Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2008, 4(2): 450-459.
- [9] 刘宏斌, 雷宝坤, 张云贵, 等. 北京市顺义区地下水硝酸盐污染的现状与评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 385-390.
- Liu H B, Lei B K, Zhang Y G *et al.* Investigation and evaluation on nitrate pollution in groundwater of Shunyi District, Beijing[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2001, 7(4): 385-390.
- [10] Sonawane S S, Sonar K R. Application of mitscherlic-bray equation for fertilizer use in pearly millet on vertisol[J]. *J. Ind. Soc. Soil Sci.*, 1995, 43(2): 276-277.
- [11] Wolf D W, Henderson D W, Hsiao T C *et al.* Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves[J]. *Agron. J.*, 1988, 80: 865-870.
- [12] 中国标准出版社第一编辑室. 中国农业标准汇编(土壤肥料卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- The First Editing Room of China Standard Press. China agricultural standards (soil and fertilizer volume)[M]. Beijing: China Standard Press, 1998.
- [13] Witt C, Pasuquin J M, Pampolino M F *et al.* A manual for the development and participatory evaluation of site-specific nutrient management for maize in tropical, favorable environments [J]. *Int. Plant Nutr. Inst.*, 2009.
- [14] Janssen B H, Guiking F C T, Vander E D *et al.* A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS) [J]. *Geoderma*, 1990, 46, 299-318.
- [15] 沙之敏, 边秀举, 郑伟, 等. 最佳养分管理对华北冬小麦养分吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1049-1055.
- Sha Z M, Bian X J, Zheng W *et al.* Effects of optimum nutrient management on nutrient uptake and utilization of winter wheat in North China Plain[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(5): 1049-1055.
- [16] Satyanarayana T, Majumdar M, Birdar D P. New approaches and tools for site-specific nutrient management with reference to potassium[J]. *Karnataka J. Agric. Sci.*, 2011, 24(1): 86-90.