

# 高效施肥

BETTER CROPS CHINA

2013年5月总第30期

本期文章……

养分专家系统推荐施肥对河南小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响



养分专家系统推荐施肥对山东小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响



养分专家系统推荐施肥对黑龙江玉米产量、养分吸收和利用的影响



更多文章 敬请关注

养分专家系统 (Nutrient Expert<sup>®</sup>)  
推荐施肥专辑

# 高效施肥

国际植物营养研究所系列期刊  
《BETTER CROPS》中文版专刊

2013年5月总第30期

主编 何萍  
编辑 陈防 涂仕华 李书田  
孙桂芳

## 国际项目总部

Saskatoon, Saskatchewan, Canada

A.M. Johnston, Vice President, IPNI Asia and Africa Group

## 理事会

S.R. Wilson, Chairman (CF Industries Holdings, Inc.)

M. Ibnabdeljalil, Vice Chairman (OCP S.A.)

J.T. Prokopanko, Finance Committee Chair  
(The Mosaic Company)

## 行政办公室

Norcross, Georgia, USA

T.L. Roberts,  
President, IPNI

## 美洲和大洋洲总部

Brookings, South Dakota, USA

P.E. Fixen, Senior Vice President, IPNI Americas and Oceania Group and Director of Research

## 东欧 / 中亚和中东项目部

Moscow, Russia

Svetlana Ivanova, Vice President, IPNI Eastern Europe / Central Asia and Middle East Group

## 中国项目部

何萍 主任 北京办事处 phe@ipni.net

李书田 副主任 北京办事处 sli@ipni.net

孙桂芳 女士 北京办事处 gfsun@ipni.net

陈防 副主任 武汉办事处 fchen@ipni.net

涂仕华 副主任 成都办事处 stu@ipni.net

## 会员公司:

Agrium Inc. • Arab Potash Company • Belarusian Potash Company • CF Industries Holdings, Inc. • Compass Minerals Specialty Fertilizers • OCP S.A. • Incitec Pivot • International Raw Materials LTD • Intrepid Potash, Inc. • K+S KALI GmbH • Potash Corp • Qafco • Simplot • Sinofert Holdings Limited • SQM • The Mosaic Company • Uralkali.

## CONTENTS

## 目录

IPNI 中国项目 2012-2013 年工作会议在厦门召开	3
养分专家 (Nutrient Expert) 系统在粮食作物养分管理上的发展与评价 Mirasol F. Pampolino, Christian Witt, Julie Mae Pasuquin, Adrian M. Johnston, Myles J. Fisher 串丽敏译 何萍校	4
预估中国小麦养分需求研究 串丽敏 何萍 金继运 李书田 Cynthia Grant 周卫	12
基于产量反应和农学效率的小麦推荐施肥理论研究 串丽敏 何萍 Mirasol F. Pampolino, Adrian M. Johnston 金继运 徐新朋 赵士诚 仇少君 周卫	17
养分专家系统推荐施肥对河北省小麦玉米产量及养分利用率的影响 贾良良 刘孟朝 赵姗姗 李春杰	21
养分专家系统推荐施肥对河南小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响 王宜伦 苏瑞光 刘举 韩燕来 谭金芳	25
养分专家系统推荐施肥对山东小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响 魏建林 崔荣宗 肖建军 杨果	31
养分专家系统推荐施肥对山西小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响 于志勇 赵萍萍 王宏庭 朱向东	37
养分专家系统推荐施肥对黑龙江玉米产量、养分吸收和利用的影响 刘双全 李玉影 姬景红 佟玉欣 刘颖 张明怡 韩光 王伟 郑雨	41
养分专家系统推荐施肥对吉林玉米产量、养分吸收和利用的影响 候云鹏 谢佳贵 孔丽丽 尹彩侠 秦裕波	44
养分专家系统推荐施肥对辽宁玉米产量、养分吸收和利用的影响 邢月华 汪仁 包红静 刘艳 蔡广兴	48
一种养分管理的新方法 Adrian M. Johnston	52

网页: <http://www.ipni.net>  
<http://ipni.caas.ac.cn>

The Government of Saskatchewan helps make this publication possible through its resource tax funding. We thank them for their support of this important educational project.

此刊物由加拿大萨斯喀彻温省政府资助。  
特此致谢!

《高效施肥》为 IPNI 中国项目部的出版物, 每年五月及十月各一期。  
本刊物以推动科学化的合理施肥为目标。  
可免费向北京、武汉、成都办事处索取。

## IPNI 中国项目 2012-2013 年工作会议在厦门召开



Adrian M. Johnston 等为 2012 年 IPNI 研究生奖学金获得者王伟妮、李光杰、刘占军、彭云峰颁发证书

2013 年 1 月 8 日 -11 日，IPNI 中国项目 2012 年工作会议在福建省厦门市召开，来自全国 31 个省（直辖市）的 150 余名专家、学者和学生参加了本次会议。IPNI 中国项目部主任何萍博士主持会议。章明清、张炎、李玉影、姚丽贤分别作了“菜稻轮作氮磷钾高效利用机理及其配套施肥技术”、“新疆棉花全程养分调控与管理”、“黑龙江省主要作物高效施肥技术研究”、“荔枝营养特性及养分管理技术研究”大会报告。Adrian M. Johnston 博士给获得 2012 年度 IPNI 优秀研究生奖学金获奖学生颁发证书。各片区进行 2012 年的工作进展总结和汇报，同时各合作单

位与 IPNI 各片区或项目负责人确定了 2013 年度新的工作计划和工作目标。

自 2008 年，IPNI 设立了研究生奖学金，凡有 IPNI 项目的任何国家，在具有学位授予资格的单位从事土壤和植物营养学相关学科的在读研究生都有资格申请。截止到 2012 年，全世界共有 93 位出色的研究生获此殊荣，其中有 15 人来自中国。符合条件的研究生请于每年 6 月 30 日前提交申请，详情请见 [www.ipni.net/awards](http://www.ipni.net/awards)。

# 养分专家 (Nutrient Expert) 系统在粮食作物 养分管理上的发展与评价

Mirasol F. Pampolino, Christian Witt, Julie Mae Pasuquin,

Adrian M. Johnston, Myles J. Fisher

(串丽敏译 何萍校)

(原文来自: Computers and Electronics in Agriculture 88 (2012) 103-110)

**摘要:** 为了满足未来 20-30 年人们对粮食的更大需求, 需要使粮食生产体系集约化, 进而使当前粮食产量提高到其产量潜力的 70%-80%。精准养分管理技术 (Site-Specific Nutrient Management, SSNM) 是一种可以提高作物产量, 实现经济效益最大化, 又能够保持集约作物体系可持续生产的动态的、健全的养分管理方法。目前, SSNM 在亚洲地区已经应用到水稻、玉米和小麦等主要作物上, 能够提高产量和增加经济效益。然而, 作物生产指导者发现该方法技术复杂, 田间实施困难。因此, 养分专家系统 (Nutrient Expert, NE) 可以为作物生产指导者提供一种较为简单且快捷的方法来实现精准养分管理。NE 能够使作物生产指导者利用当地已有的信息进行 SSNM 施肥推荐。在印度尼西亚和菲律宾, 玉米养分专家 (Nutrient Expert for Hybrid Maize, NEHM) 提高了作物产量和经济效益。在印度尼西亚, NEHM 与农民习惯施肥措施 (Farmer's Fertilizer Practice, FFP) 相比, 玉米产量提高了 0.9t/ha, 经济效益增加了 270US\$/ha。与 FFP 相比, NEHM 措施减少了 4kg P/ha 的磷肥用量, 增加了 11kg K/ha 的钾肥用量, N 肥用量没有显著差异。在菲律宾, NEHM 与 FFP 相比, 玉米产量提高了 1.6 t/ha, 经济效益增加了 379US\$/ha, 该措施氮、磷和钾肥的施用量分别增加了 25kg N/ha, 4kg P/ha 和 11kg K/ha。虽然使肥料消费增加了 64US\$/ha, 但是由此增加的效益仍是肥料额外增加投入的 6 倍。由于 NE 考虑了影响精准养分管理的重要因素, 因此作为发展养分管理系统的起点, 将会拥有更多的使用者。

## 1 前言

到 2050 年, 每年粮食生产总量必须提高 30 亿吨才能满足世界 91 亿人口的需求 (FAO, 2009)。由于种植面积的扩张已经非常有限, 因此对粮食生产增长的需求只能通过小麦、水稻和玉米集约化生产以实现达到其产量潜力的 70%-80% (Cassman, 1999; Dyson, 1999; Dobermann and Cassman, 2002)。在美国的大规模机械化农场以及亚洲的小规模水稻灌溉农田, 产量仅达到其潜力的 40%-65%, 主要原因是由于养分管理并没有考虑作物对环境的动态响应 (Dobermann and Cassman, 2002)。因此, 集约化生产需要养分管理, 以提高产量并保障土壤质量和保护环境。要达到这个目标, 需要根据与每个作物生长体系相关的技术、动力学和空间尺度, 建立更加精准的养分管理新策略。这些策略一定是建立于养分吸收与产量之间关系的定量评价以及养分供应和作物需求同步的基础之上。

精准养分管理 (Site-Specific Nutrient Management, SSNM) 技术结合了来自不同规模农田的信息以做出针对特定田块的 N、P 和 K 施肥决策。SSNM 是一系列养分管理原则的集成, 目的是为特定田块或特定生长环境的作物提供养分需求指导。SSNM 可以 (a) 考虑基

础养分来源, 包括上季作物残留和有机肥的带入; (b) 在作物生长关键期施入合适的肥料用量以弥补高产作物所需的养分与土壤基础养分供应之间的不足 (IRRI, 2011)。SSNM 在亚洲已经应用在水稻上 (Dobermann et al., 2002; Dobermann and Witt, 2004), 1997-1999 年的试验结果表明, SSNM 与农民习惯施肥 (Farmer's Fertilizer Practice, FFP) 相比, 水稻产量提高了 0.36 t/ha。

SSNM 最初是建立在植物养分吸收的实验室分析基础之上, 并结合了 NPK 处理与减素处理之间的产量反应。2002-2003 年在印度、菲律宾和越南的试验证明, 与 FFP 措施相比, SSNM 措施增加了产量和经济收入, 并提高了肥料利用效率 (Pampolino et al., 2007)。

SSNM 已适用于亚洲和其它地区的玉米和小麦上。与 FFP 处理相比, 该方法在印度西北部地区使小麦产量提高了 0.6 t/ha (Khurana et al., 2008)。在印度尼西亚、菲律宾和越南, SSNM 使玉米产量提高了 1.2 t/ha, 经济效益增加了 184 US\$/ha (Pasuquin et al., 2010)。

然而, 除了田间试验外, 农民还没有完全认可 SSNM。除了推广 SSNM 措施存在缺陷以及农民无力购买肥料外, 推广人员对使用该方法也缺乏信心 (Gabinete

and Buresh, 2009)。他们仍然觉得 SSNM 技术比较复杂,除了凭经验性,还需要对理念和方法的深度理解。

农民通常依靠推广人员或作物生产指导者提供信息以做出合理的施肥决策,并预估采取一定技术措施后由额外投入所可能带来的经济效益 (Adams et al., 2000)。养分专家 (Nutrient Expert, NE) 作为一种简单的基于 SSNM 原则和指导方针的养分决策系统,可以帮助作物生产指导者针对特定农户或特定生长环境进行施肥决策。由于 NE 考虑了影响养分管理推荐的最重要因素,因此可以帮助作物生产指导者为农户提供针对他们各自田间条件的施肥决策,同时减少了高度不确定因素的影响,如地点特征、气候、肥料投入和粮食价格 (Adams et al., 2000)。此外,NE 可以增强作物生产指导者和农户间的相互交流,以利于建立相互信任与信心,这也将增加推荐施肥的可靠性。NE 采取了获取信息的系统方法,这对于针对特定农田进行施肥推荐非常重要。然而,NE 并不像许多复杂的养分决策系统那样,需要提供很多数据,或需要很详细的信息,因为繁复复杂的数据和信息足以让使用者不知所措。NE 可以允许使用者凭借他们已有的经验、对当地区域的了解以及农民习惯措施获得所需要的信息。NE 可以使用已有的试验数据,但是也可通过已有的地点信息对所需要的 SSNM 参数进行预估。

该文章的研究目的是 (1) 介绍 NE 施肥决策系统的框架,以用于亚洲和非洲的粮食作物上; (2) 通过印度尼西亚和菲律宾的田间试验,论证 NE 的应用效果。

## 2 NE 系统框架

NE 利用 SSNM 技术建立了管理 N、P 和 K 肥料的技术措施。作为基于电脑程序的施肥决策系统,它将 SSNM 技术中所有的步骤和指导原则融合成一套简单的系统,以供作物生产指导者尤其是非专业技术人员 (如发展中国家推广人员) 使用。在这些国家,来自公有或私有组织的作物生产指导者并不具备所需的数据和条件来使用复杂的模型。SSNM 中的参数通常是由农民地里布置的减素试验获得。利用 NE 系统,可以通过有代表性的信息对所需参数进行预估 (见 2.2 部分),这就可以使作物生产指导者在没有田间试验数据的条件下对某一田块进行施肥指导。该部分描述了可适用于任何粮食作物和地区的 NE 系统的框架。

### 2.1 基于 SSNM 的 NE 施肥推荐

NE 提供的 N、P 和 K 肥料的施肥推荐与 SSNM 措施相一致 (Dobermann and Witt, 2004; Witt et al., 2007; 2009; IRRI, 2011)。NE 系统计算所需肥料用量的运算方法是通过一系列 SSNM 指导下的田间试验数据获得。SSNM 中 N、P 和 K 肥料需求是建立在收获时作物养分平衡吸收和籽粒产量之间的相互关系上,称之为内在养分效率 (Witt et al., 1999; Buresh et al., 2010; Setiyono et al., 2010),是由热带地区土壤肥力定量评价模型 (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils, QUEFTS) 预估得出 (Janssen et al., 1990; Smaling and Janssen, 1993)。对于某个地块或地区的肥料需求量则是结合每种肥料养分所对应的产量反应预估得出。所谓的产量反应即是可获得的产量与缺素产量之差。这些参数可由农户田块的减素试验得到,可获得产量是某个地点在没有养分限制条件下采取最佳管理措施所达到的产量,缺素产量是缺乏某种养分而其它养分供应充足时所达到的产量。作物所吸收的养分与产量直接相关,因此可获得产量表征着作物总养分的需求,而缺素产量表征着土壤基础养分供应的能力 (Dobermann et al., 2003)。产量反应表示土壤基础养分供应的缺乏,而这些缺乏的养分必须由肥料提供。NE 的肥料施用量与施肥次数遵循着 SSNM 的指导原则,考虑了作物生长关键期的养分需求 (Witt et al., 2009; IRRI, 2011)。

### 2.2 利用代表性信息预估 SSNM 参数的决策原则

NE 利用来自田间试验决策的相关信息来预估可获得的产量及产量反应。NE 利用:

- (a) 生长环境特征: 水源 (灌溉, 全部雨养, 雨养加充足的灌溉) 以及涝害和旱害发生的频率。
- (b) 土壤肥力指标: 土壤质地, 土壤颜色以及有机质含量, 土壤 P 和 K 含量的高低 (如果已知), 有机肥的历史施用情况 (如果施用) 以及是否为障碍土壤。
- (c) 农民种植模式下作物轮作体系。
- (d) 作物秸秆处理和肥料施用情况。
- (e) 农民当前产量。

NE 衡量某个区域或生长环境下的最大可获得产量 ( $Y_{max}$ ) 是根据当地的特点以及农民实际的产量 ( $Y$ ) 来预估可获得的产量 ( $Y_a$ )。  $Y_{max}$  是没有其它管理条件限制时所达到的最大产量,是由作物模型或最佳管理措施的田间试验得出,而  $Y_a$  是凭田间试验或当地专家经验确定。NE 通过  $Y_{max}$  和生长环境中涝害或旱害发生的风险水平

(低、中、高) 以及是否具有土壤障碍因子(如盐害、土壤侵蚀)等因素对  $Y_a$  进行预估。NE 假定在低风险环境下,  $Y_a = Y_{max}$ , 而在高的限制或风险条件下如在干旱地区,  $Y_a \ll Y_{max}$ 。为了建议具有实际意义的目标产量, 避免不切实际,  $Y_a$  通常参考  $Y$  进行预估。

(a) 低风险环境:  $Y_a = Y + 3 \text{ t/ha}$ ,  $Y_a \leq Y_{max}$  (1)

(b) 中等风险环境:  $Y_a = Y + 2 \text{ t/ha}$ ,  $Y_a \leq Y_{max}$  (2)

(c) 高风险环境:  $Y_a = Y + 1 \text{ t/ha}$ ,  $Y_a \leq Y_{max}$  (3)

产量 ( $Y$ ,  $Y_a$  和  $Y_{max}$ ) 单位为  $\text{t/ha}$ , 以上 (1) - (3) 等式用于不同风险条件下玉米和小麦产量分别增加 3、2 和 1  $\text{t/ha}$ 。但是这些数值并不是绝对的, 如果数据量更大时可能会发生变化。增加的 3、2 和 1  $\text{t/ha}$  的产量是基于农田当前的产量差以及由生长环境风险水平主导的经济损失决定的。当前亚洲农民习惯施肥玉米平均产量为 4-5  $\text{t/ha}$  (FAO, 2012), 养分供应充足且给予最佳农艺管理措施的田间试验平均产量能达到 8-9  $\text{t/ha}$  (IPNI 未发表数据), 表明平均产量差有 3-5  $\text{t/ha}$ , 这与能否提高养分管理和农艺措施紧密相关。要达到高于农民当前产量的目标产量需要更多的养分投入, 这将增加投入的费用。因此, 推荐的产量增加量是基于生长环境风险水平进行衡量, 以备当作物外界生长环境不好时使经济损失降到最低。亚洲小麦养分供应充足的处理与 FFP 处理之间的产量差处于 1-3  $\text{t/ha}$  的范围 (IPNI 未发表数据)。

在 NE 系统中, 产量反应的估算是建立在缺素区的产量与  $Y_a$  之间的正相关关系基础之上 (Buresh et al., 2010, 图 1a)。对于特定的地块或区域, 缺素区的产量与  $Y_a$  变化趋势一致, 即随着  $Y_a$  的增加而增加, 这也是由气候决定。NE 假定在相同的气候条件下, 基础养分供应 (或土壤基础肥力) 将决定缺素区产量的高低。土壤基础 N 养分供应 (Indigenous N Supply, INS) 决定着减 N 小区的产量与  $Y_a$  比值的大小。同样, 土壤基础 P 养分供应 (Indigenous P Supply, IPS) 或土壤基础 K 养分供应 (Indigenous K Supply, IKS) 将决定减 P 或减 K 小区的产量与  $Y_a$  的比值。所有缺素区产量与  $Y_a$  的比值中第 25 百分位数、中位数和第 75 百分位数所对应的数值可以作为参数, 用于预估一定可获得产量条件下的缺素产量以及土壤肥力分级。中位数所对应的数值表示土壤为中等肥力的临界值, 第 25 百分位数和第 75 百分位数分别表示低土壤肥力和高土壤肥力临界值 (图 1b)。例如, 当  $Y_a = 10 \text{ t/ha}$  时, 所有缺 P 区的产量与  $Y_a$  的比值中位数为 0.85 (即 Fig.1b 中间线的斜率), 那么在中等的土壤基础 P 养分供应条件下缺素区的产量为 8.5  $\text{t/ha}$ 。因此, 当  $Y_a = 10 \text{ t/ha}$  时, 预估的磷肥

产量反应为 1.5  $\text{t/ha}$ 。

INS、IPS 和 IKS 分级是由土壤特性 (如质地、颜色和有机质含量)、有机肥施用历史情况 (如果施用) 以及来自上季的养分表现平衡 (主要是 P 和 K) 决定。土壤 P 和 K 的养分测试值 (如果已知) 可与养分平衡相结合来确定 IPS 和 IKS 的级别。如果缺乏土壤测试值, NE 可以利用 INS 的级别来确定土壤 P 和 K 的养分水平。P 和 K 养分平衡是投入的养分 (包括无机和有机肥料来源) 与带出的养分 (收获时养分净移走量) 之差。养分平衡分级如下:  $< -9 \text{ kg P/ha}$  为低 P 平衡,  $-9-0 \text{ kg P/ha}$  为中等 P 平衡,  $> 0 \text{ kg P/ha}$  为高 P 平衡;  $< -25 \text{ kg K/ha}$  为低 K 平衡,  $-25-0 \text{ kg K/ha}$  为中等 K 平衡,  $> 0 \text{ kg K/ha}$  为高 K 平衡。P 和 K 的平衡级别临界值可能会因作物养分移走量而发生变化。NE 参考以下原则来确定 INS、IPS 和 IKS 的级别。

(a) INS 级别

低: 砂土 (不考虑土壤颜色如何); 微红的 / 微黄的粘土或壤土。

中: 灰色的 / 褐色的粘土或壤土。

高: 含量高有机质和高肥力的颜色很黑的粘土或壤土。

如果施用过大量的有机肥 (如每季施 2  $\text{t/ha}$  或更多的家禽粪便达到 3 年以上), 将提高 INS 一个级别。

(b) IPS 级别

低: 低的土壤 P 含量以及低到中等的 P 平衡;

中: 中等的土壤 P 含量以及低到中等的 P 平衡; 或低的土壤 P 含量以及高的 P 平衡; 或高的土壤 P 含量以及低的 P 平衡;

高: 高的土壤 P 含量以及中到高等的 P 平衡; 或中等的土壤 P 含量以及高的 P 平衡。

(c) IKS 级别

(同 IPS)

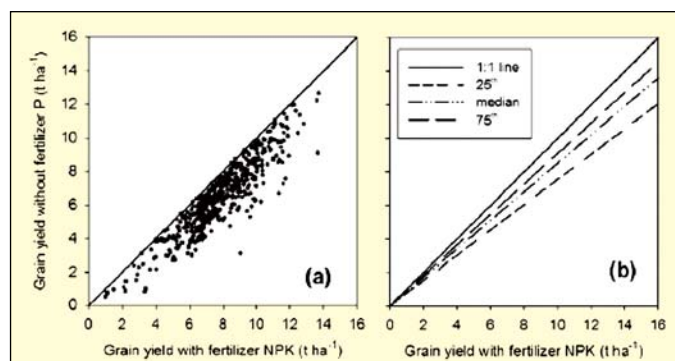


图 1 东南亚地区玉米缺素区产量 (如未施磷肥的产量, y 轴) 与可获得产量 (如施 NPK 肥的产量, x 轴) 之间的关系 (a)

注: 斜率中第 25、50 和 75 百分位数所对应的斜率数值对应着土壤基础 P 养分的低、中和高水平 (b)

## 2.3 开发过程

NE 开发者必须与系统使用者和当地的利益相关者多进行交流与合作，以保证 NE 满足使用者的需求与喜好，这将有助于提高系统被采纳的可能性 (Fujisaka, 1994)。来自公有部门的作物生产指导者 (如农业部) 以及私营部门 (如肥料和种子子公司)、科学家以及技术推广人员均是 NE 的主要使用者。

相关人员通过一系列的对话、磋商以及一些伙伴关系来开展合作，如 (a) 收集当地有效的农学数据和信息；(b) 结合当地使用者的喜好，如使用当地语种、管理单元和当地较为普遍的肥料资源；(c) NE 系统田间试验验证与改良。会议磋商，意味着促进产品所有权，包括科学性的讨论，NE 初始版本的示范，所需数据和信息的评估，以及田间验证与计划方案评价等。

科学家和作物生产指导者，作为技术专家，为当地的作物生长提供信息和参数，并分享当地的农学数据。系统使用者 (作物生产指导者和推广人员) 对语言、管理单元、肥料资源和其它当地的特征提出建议。系统拥有者对 NE 系统输出给农民的用户界面所包含的内容以及格式提出建议。

田间评价用于检验该模型的稳定性，也是将 NE 系统推荐给农民的一种方式。与 FFP 相比，NE 能够提高产量和效益的论证对于获得利益相关者的支持非常重要，这将有助于私营 (种植和肥料公司) 和公有部门贯彻执行。利益相关者联合考察田间试验验证，收集系统使用者的反馈信息，并对该模型进行必要的微调以提高其可接受性，促进利益相关者的身份意识。

## 3 例证 - 玉米养分专家系统

该部分介绍了充足的热带雨养和灌溉条件下，玉米养分专家 (Nutrient Expert for Hybrid Maize, NEHM) 开发的界面和数据库 (Pampolino et al., 2011; seap.ipni.net)，同时展示了 2010-2011 年在印度尼西亚和菲律宾布置的 NEHM 的田间试验结果。

### 3.1 软件描述

NEHM 设计了一些简单问题，这些问题可以通过该农田或区域已有的信息进行回答。问题主要分为 5 个模块：(1) 当前农民养分管理措施及产量；(2) 种植密度；(3) 养分优化管理施肥量 (SSNM)；(4) 肥料种类及分次施用，(5) 经济效益分析。前三个模块的问题包括了可获得的产量以及产量反应的确定。SSNM 施肥推荐模块提供了可

获得产量下的 N、P 和 K 养分需求量。

SSNM 促进了“4Rs” (合适的肥料种类，合适的施肥水平，合适的施肥时间和合适的施肥位置) 养分管理工作，与其一致，NEHM 详述了肥料用量及其施用时间，包括分次的施用量和分次施用时间。在肥料种类和分次施用模块，NEHM 推荐氮肥施用 2 次或 3 次，所有磷肥在播种时或播种后不久施用，钾肥根据肥料用量确定施用 1 次或 2 次。NEHM 可以选择农户指定的肥料，选择肥料养分含量能够满足最佳分次追肥需求的肥料品种。该系统还指定了行距和株距，建议了最佳的种植密度。肥料种类和分次施用指导原则仅适于当地使用。

东南亚玉米上的 SSNM 措施 (Witt et al., 2009) 组成了 NEHM 中计算 N、P 和 K 肥用量的运算法则。SSNM 措施是基于可获得产量和产量反应，并利用了 2004-2008 年来自印度尼西亚、菲律宾和越南 19 个地点的 120 个田间试验数据。这些数据为预估 SSNM 参数的决定标准奠定基础。另外，这些数据也提供了不同环境条件下 (降雨量及其时间分布，不同品种和作物生育期，土壤以及作物生长体系) 可获得产量的范围以及施用 N、P 和 K 肥料的产量反应范围。

### 3.2 田间验证

研究和推广人员在印度尼西亚和菲律宾未布置过减素试验的地区，利用 NEHM 分析当地已有的信息来预估可获得的产量以及施肥的产量反应，以制定出施肥推荐方案。一些使用者通过个别农户的信息对特定地块做出施肥指导，而还有一些使用者利用不同的有代表性的农户信息对大范围区域如壤土上的雨养玉米做出施肥推荐。区域水平上的推荐可以在自治区或行政区等大的地理区域上用于发展玉米快捷向导 (Quick Guide) 系统 (见 seap.ipni.net)。

2010-2011 年在印尼 5 个地点 (每个地点 3-5 个农户) 和菲律宾 7 个地点 (每个地点 2-7 个农户) 布置田间试验 (每个小区面积  $\geq 0.1\text{ha}$ ) 进行农民参与式评估 (Farmer Participatory Evaluation, FPE) 来评价 NEHM 的施肥推荐效果 (表 1)。该地区覆盖了两个国家充足的雨养条件和灌溉条件下玉米 - 玉米或水稻 - 玉米轮作模式下的主要玉米生长区。数据是采用 JMP 软件 (SAS 研究所, 2009) 中的 Mixed 过程进行分析。

由于现有推广体系的不同，导致不同地点农民参与式评估的实施也存在不同。在印度尼西亚，省评估农业技术研究所的研究人员与当地推广人员合作。在菲律宾，区域综合农业研究中心的研究人员与地方政府 (市政和省级层

表 1 2010-2011 年玉米养分专家在印尼和菲律宾的田间验证试验信息

国家和试验点	省份	地区 / 自治区	生态系统 a	作物体系	农户数
印尼					
1	East Java	Kediri	IR	水稻 - 水稻 - 玉米	5
2	Lampung	Punggur	RF	玉米 - 玉米	5
3	North Sumatra	Langkat	RF	玉米 - 玉米	5
4	North Sumatra	Langkat	IR	水稻 - 水稻 - 玉米	4
5	South Sulawesi	Bone	RF	玉米 - 玉米	3
菲律宾					
1	Pangasinan	Bayambang	RFSI	水稻 - 玉米	5
2	Laguna	Calamba	RF	玉米 - 玉米	3
3	Occidental Mindoro	Abra de Ilog	RFSI	水稻 - 玉米	4
4	Iloilo	Cabatuan	RF	玉米 - 玉米	6
5	Negros Occidental	Murcia	RF	玉米 - 玉米	7
6	Davao	Tugbok	RF	玉米 - 玉米	2
7	Maguindanao	Datu Odin Sinsuat, Sultan Mastura, Ampatuan, Sultan Kudarat	RF	玉米 - 玉米	4

a IR=irrigated, 灌溉, RF=fully rainfed, 全部雨养, RFSI=rainfed with supplemental irrigation, 雨养加灌溉。

表 2 玉米养分专家在印尼 5 个试验点 (每试验点 3-5 户) 和菲律宾 7 个试验点 (每个试验点 2-7 户) 农学和经济效益分析 (2010-2011)

参数	单位	印尼 (n=22)				菲律宾 (n=31)			
		FFP	NE	(NE-FFP) <sup>a</sup>		FFP	NE	(NE-FFP)	
籽粒产量	t/ha	7.5	8.4	+0.9	***	7.5	9.1	+1.6	***
肥料 N	kg N/ha	173	160	-12	ns	107	132	+25	**
肥料 P	kg P/ha	19	14	-4	*	12	15	+3	**
肥料 K	kg K/ha	23	34	+11	**	18	29	+11	**
肥料消费	US\$/ha	126	126	0	ns	176	240	+64	***
GRF <sup>b</sup>	US\$/ha	1761	2032	+271	***	1738	2117	+379	***

ns=not significant, 不显著。\*0.05 水平显著, \*\*0.01 水平显著, \*\*\*0.001 水平显著。  
<sup>a</sup> 利用 JMP 第 8 版本 (SAS 研究所, 2009) 运用 Mixed 过程进行分析。  
<sup>b</sup> GRF 是指减去种子和肥料消费后的毛收入; 利用当地实际的种子、肥料和玉米价格进行计算。US\$1=8850 印尼盾 (印尼)=43 菲律宾比索 (菲律宾)。

面) 单位合作。选择农户的标准包括: (a) 农田至少有 0.1 ha 的面积乐于接受 NEHM 推荐; (b) 农田大小要在 0.5 ha 以上。为所有农户提供种子, 如有需要, 还提供补贴用于购买必要的肥料。

### 3.3 结果

在印度尼西亚和菲律宾, NEHM 提高了产量和效益 (表 2, 图 2 和图 3)。印尼 5 个试验点的 22 个田间试验结果显示, NEHM 与 FFP 相比, 玉米产量提高了 0.9 t/ha, 减去种子和肥料消费后的毛收入 (gross return above seed and fertilizer costs, GRF) 增加了 270 US\$/ha (表 2)。NEHM 施肥推荐降低了 4 kg P/ha 的磷肥投入, 增加了 11 kg K/ha 的钾肥投入, 并没有显著改变氮肥的投入量 (表 2)。印度尼西亚 FFP 的平均产量范围为 5.7 (地点 5)-8.2 t/ha (地点 3), NEHM 的产量范围在 7.4 t/ha (地点 5)-9.0 t/ha (地点 2, 3 和 4)。5 个试验点中有 4 个点的 NEHM 处理提高了 0.8-1.8 t/ha 的产量, 增加了 212-506 US\$/ha 的 GRF, 只有地点 1 产量比 FFP 有些许降低, 但是 GRF 相当 (图 2)。在菲律宾 (7 个试验点的 31 个农户), 与 FFP 相比, NEHM 提高了 1.6 t/ha 的玉米产量, GRF 增加了 379 US\$/ha (表 2)。NEHM 的 N、P 和 K 肥料施入量比 FFP 处理分别高 25 kg N/ha, 4 kg P/ha 和 11 kg K/ha, 这将增加 64 US\$/ha 的肥料消费, 但是由此增加的收益仍然

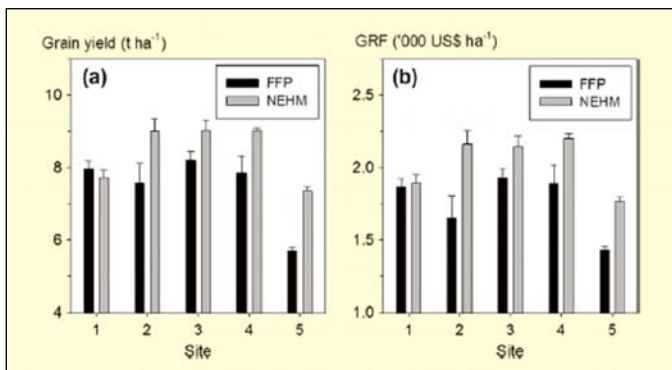


图 2 2010-2011 年印尼 5 个试验点的农民习惯施肥措施 (FFP) 和玉米养分专家管理措施 (NEHM) 下玉米籽粒产量 (a) 和减去种子和肥料消费后的毛收入 (GRF, b) 比较  
 注: 误差线表示均值标准误差

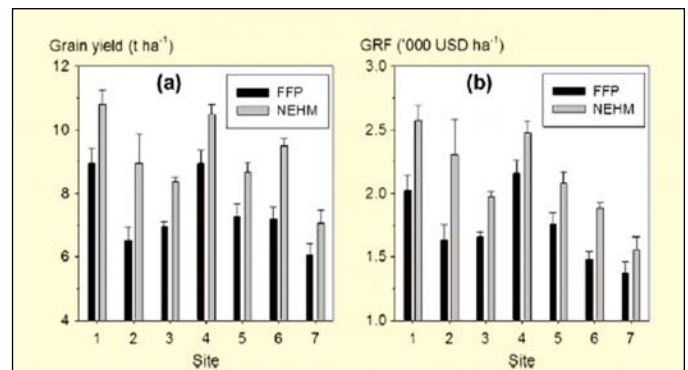


图 3 2010-2011 年菲律宾旱季 7 个试验点的农民施肥措施 (FFP) 和玉米养分专家管理措施 (NEHM) 下玉米籽粒产量 (a) 和减去种子和肥料消费后的毛收入 (GRF, b) 比较  
 注: 误差线表示均值标准误差



是额外增加肥料成本的6倍(表2)。在这些试验点中, FFP的平均产量在6.1-8.9 t/ha, NEHM的平均产量范围为7.1-10.8 t/ha, FFP和NEHM均是试验点7的产量最低, 试验点1的产量最高(图3)。遍布该国家的7个试验点, 每个试验点NEHM的产量提高了1-2.4 t/ha, GRF提高了183-669 US\$/ha(图3)。

## 4 讨论

在印度尼西亚和菲律宾, 针对特定田块或特定区域的NEHM养分管理措施可以提高产量和经济效益。NEHM的肥料施用水平是在特定地块或特定区域可获得的产量和产量反应基础上确定的, 并考虑了气候、土壤类型以及农民习惯施肥管理措施的影响。为达到目标产量, NEHM施肥推荐在玉米生长关键期保证了充足的养分供应(N、P、K以及中微量元素)。NEHM建议氮肥分为2-3次等量施用, 2次分别是在V0和V8施用, 3次分别是在V0、V6和V10施用。当氮肥用量 $\geq 160$  kg/ha时, NEHM建议分3次施用, 当氮肥用量在120-160 kg/ha时, 分为2次或3次, 由农户自己选择决定(Pampolino et al., 2011)。另一方面, 农民的习惯施肥管理通常在施用水平和施用时间上不是最佳。例如, 在North Sumatra(印尼)两季雨养玉米种植体系(地点A, 表3), NEHM通过利用该点已有的信息进行施肥推荐, 5个试验点NEHM的平均氮肥用量为172 kg N/ha, 与FFP的平均氮肥用量176 kg N/ha相当, 但是FFP的变异较大, 标准误为16 kg N/ha, 而NEHM标准误为7 kg N/ha。FFP的磷肥施用量(26 kg P/ha)要高于NEHM(12 kg P/ha), 然而钾肥施用量NEHM(47 kg K/ha)却高于FFP(35 kg K/ha)(表3)。在印度尼西亚, 农民的肥料投入水平并不总低于NEHM(表2和表3), 说明NEHM产量的提高归功于养分的平衡供应, 如增加K肥投入并调整分次施用比例和施用时间, 从而提高肥料利用效率。在菲律宾的Iloilo省(表3地点B), 在相似的土壤和作物轮作体系上, 6个农户的NEHM推荐量相同(每公顷施166 kg N, 12 kg P和23 kg K), FFP的肥料用量水平却变异较大。在该地区, FFP的平均施肥量分别为85 kg N/ha, 10 kg P/ha和10 kg K/ha, 标准误分别为25 kg N/ha, 3 kg P/ha和8 K kg/ha(表3地点B)。FFP的N肥投入范围在16-190 kg N/ha, P肥投入水平在0-24 kg P/ha, 钾肥投入水平在0-46 kg K/ha, 6个农户中有5户N肥用量大大低于NEHM推荐的160 kg N/ha。6个农户中只有

2户施用了N、P和K三种肥料, 其余农户只施了N和P或仅施了N肥。农民第一次肥料施用是在播种后11-30天, 而NEHM第一次施用是在V0或播种后0-7天。菲律宾的农民习惯施肥措施(施肥水平和施肥时间)(表2和表3)表明NEHM产量的增加主要是由于在最佳时间(作物生长关键期)增加了养分投入。在这两个国家, 尽管NEHM施肥推荐是通过该点已有的信息建立, 但是观测到的产量增加量与基于试验点数据根据SSNM推荐施肥的结果相当(Pasquin et al., 2010)。该结果表明NEHM足够可以用于预估特定地区的玉米养分需求参数。迄今为止, NE是根据当地已有的信息作出施肥推荐的唯一有效模型, 可以很容易被农民和作物生产指导者使用。本文中的田间试验评价仅限于比较FFP与NEHM, 但是在未来的评价中可能还会包括其他有效模型(如作物生长模型)或管理措施(政府层面上的推荐)。

表3 两个地点玉米养分专家(NEHM)推荐的N、P和K施肥量以及农民习惯施肥量(FFP)

养分	地点A <sup>a</sup>		地点B <sup>b</sup>	
	NEHM(kg/ha)	FFP(kg/ha)	NEHM(kg/ha)	FFP(kg/ha)
N	172(7)	175(16)	166(0)	85(25)
P	26(2)	26(2)	12(0)	10(3)
K	35(3)	35(3)	23(0)	10(8)

<sup>a</sup> 地点A=North Sumatra, 印尼, 雨养玉米-玉米; NEHM是基于田块进行施肥推荐。  
<sup>b</sup> 地点B=Iloilo, 菲律宾, 雨养玉米-玉米, 壤土; NEHM是基于区域进行统一推荐。  
 括号里的数值表示平均数的标准误

### 4.1 机遇

在印度尼西亚和菲律宾不同气候、土壤类型和作物体系上的田间试验评价证明了NEHM能够提高产量和收益。NE为作物生产指导者提供了更简单更快捷的方法来应用SSNM, 也可为玉米和其它作物的养分管理指南提供策略规划。NE通过确定当地有意义的目标产量及提供为达到该目标产量所需的最佳养分管理措施, 综合了农艺措施使产量和效益实现最大化。NE综合考虑了当地的产量潜力, 最佳养分管理措施下可获得的产量以及农民的目的(粮食安全或收入)。NE使当前的盲目施肥转向为满足农民需求及适应当地条件的养分管理施肥推荐上, 具有增值效应。

NEHM作为一种模型, 其理念可以很容易的适用于其它作物和地区的国家。2011年玉米的NE系统测试版本已经在印度、中国、肯尼亚和津巴布韦得到发展。

同样, 小麦的 NE 测试版本也将在南亚和中国地区得到开发。

NE 模型做出的 SSNM 施肥推荐在田间尺度上的成功应用是向肥料养分科学管理迈出的重大一步, 该模型作为一种简单易用的工具供农民(终端使用者)使用。为了证实 NE 工具的有效性和实用性, 可以为做施肥推荐的用户建立一个网络, 用户可以对其成功、失败或任意需要修改的地方进行反馈。通过这个网络, 对这些潜在的大范围田间试验数据库的编辑可以进一步对施肥推荐进行改进。

NE 工具应用时最大的一个挑战是能够让使用者长期接受。考虑到亚洲和非洲的小农户几乎得不到土壤测试, 相信 NE 可以为大量的农户做出施肥推荐。此外, 当地科学的养分管理可以很容易的被纳入该推荐方法。最终, NE 决策支持系统将作物管理决策系统相关联, 可以帮助农民在提高作物产量、质量和收益等不同方面做出多重决策。

现有两种可能途径来推广 NE, 包括战术上的和策略上的方式。NE 可以被肥料公司、种子生产者以及农民田间学校使用以提供给农户技术信息(施肥推荐)。同时, NE 可以用于生成可信的作物表现性能指标, 使高层次的决策者(如政策制定者、肥料公司)对典型区域实施战略分析, 或在当前措施对环境具有风险或农民得不到效益的封闭地区, 得到强化和发展的空间和机遇。

快捷向导(Quick Guide)仅是一页纸, 上面包括了针对大区域进行作物养分和管理的指导原则, 目的是获得影响施肥推荐的最重要因素(seap.ipni.net)。有了 NE, 当地专家可以利用已有的信息针对不同地块或产量来发展快捷向导。除了对每一个农户进行施肥推荐外, 作物生产指导者也提出了 2-6 条共同的指导原则, 使近几年在该地区的所有农户都可以选择和使用。这也可以帮助作物生产指导者更快的拥有更多的农户, 使 SSNM 更易被

接受和传播。

NE 考虑了影响实地精准肥料推荐的重要因素, 因此可以适用于不同的环境条件。这就使 NE 在更多类似的或更小的区域为手机上的应用提供了良好开端, 这些小区域仅需要回答少量的问题即可。NE 目前的格式和用户界面也可改变成网页形式在线使用。

## 4.2 挑战

NEHM 使用者需要具备电脑操作的基本知识, 并能够理解农学和土壤科学的常见术语。目前, NEHM 需要在 Microsoft Access 2003 及以上的版本运行, 并且需要 Acrobat reader 来进行保存和输出。

由于 NE 是基于电脑程序的决策支持系统, 这就限制了只有会用电电脑的人才能使用, 而使发展中国家许多作物生产指导者使用受限。当前的格式是在没有网络需求条件下以 MS Access 运行, 这对于模型矫正有利, 但是不能使更多的人使用。人们认为在线版本的发展或在手机上的应用必将为 NE 的传播与采用增加很大的机遇。

使用者仍然需要一些培训以供有效地使用 NE。一些简单的培训材料和指导方法能够足以帮助当地的专家达到需具备的水平。

## 5 结论

田间验证结果显示 NE 在提供施肥推荐上非常有效, 与农民当前措施相比, 能够提高产量和效益。NE 考虑了影响实地精准施肥推荐的重要因素, 为作物生产指导者和农民提供技术措施, 为高层次的决策制定者提供了一个良好工具。NE 也是发展养分管理系统的起点, 将会拥有更多的使用者。

## 参考文献

- [1] Adams, M.I., Cook, S., Corner, R. Managing uncertainty in site-specific management: what is the best model? [J]. *Prec. Agri.* 2000, 2, 39-54.
- [2] Buresh, R.J., Pampolino, M.F., Witt, C.. Field-specific potassium and phosphorus balances and fertilizer requirements for irrigated rice-based cropping systems[J]. *Plant Soil*, 2010, 335, 35-64.
- [3] Cassman, K.. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci United States America*, 1999, 96, 5952-5959.
- [4] Dobermann, A., Cassman, K.. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia[J]. *Plant Soil*, 2002, 247, 153-175.
- [5] Dobermann, A., Witt, C., Abdulrachman, S., Gines, H.C.,

- Nagarajan, R., Son, T.T., et al. Estimating indigenous nutrient supplies for site-specific nutrient management in irrigated rice[J]. *Agron.J.*, 2003, 95, 924-935.
- [6] Dobermann, A., Witt, C., Dawe, D., Gines, G.C., Nagarajan, R., Satawathananont, S., Son, T.T., Tan, P.S., et al. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia[J]. *Field Crops Res.*, 2002, 74, 37-66.
- [7] Dobermann, A., Witt, C. The evolution of site-specific nutrient management in irrigated rice systems of Asia[M]. In: A. Dobermann, C. Witt, D. Dawe (Eds.), *Increasing Productivity of Intensive Rice Systems Through Site-Specific Nutrient Management*. Enfield, NH (USA) and Los Baños (Philippines): Science Publishers, Inc., and International Rice Research Institute (IRRI), 2004, 75-100.
- [8] Douthwaite, B., Keatinge, J.D.H., Park, J.R. Why promising technologies fail: the neglected role of user innovation during adoption[M]. *Res. Policy*, 2001, 30, 819-836.
- [9] Dyson, T. World food trends and prospects to 2025[M]. *Proc. Natl. Acad. Sci. United States America*, 1999, 96, 5929-5936.
- [10] FAO. How to feed the world in 2050. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert\\_paper/How to Feed the World in 2050. pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf). 2009.
- [11] FAO. FAOSTAT updated February 2012.(accessed 21.05.12).2012.
- [12] Fujisaka, S. Learning from six reasons why farmers do not adopt innovations intended to improve sustainability of upland agriculture[J]. *Agric. Syst.*, 1994, 46, 409-425.
- [13] Gabinete, G., Buresh, R.J.. Site-specific nutrient management (SSNM): profitability to farmers, current level of adoption, and constraints to wider adoption in Iloilo province[M]. In: *The Philippines. Paper presented at IFA Crossroads Asia-Pacific Conference, Kota Kinabalu, Malaysia (8-10 December 2009)*. 2009.
- [14] International Rice Research Institute (IRRI). Site-specific nutrient management. Available from: <http://irri.org/our-science/crop-environment/site-specific-nutrient-management> (accessed 27.10.11).2011.
- [15] 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) [J]. *Geoderma*, 1990, 46, 299-318.
- [16] Khurana, H.S., Philips, S.B., Singh, B. et al. Agronomic and economic evaluation of site-specific nutrient management for irrigated wheat in northwest India[J]. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2008, 88, 15-31.
- [17] Pampolino, M., Witt, C., Pasuquin, J.M., Sinohin, P.J. Nutrient expert for hybrid maize (version 1.11). A software for formulating fertilizer guidelines for tropical hybrid maize[M]. International Plant Nutrition Institute, Penang, Malaysia. <http://seap.ipni.net/articles/SEAP0059-EN>, 2011.
- [18] Pampolino, M.F., Manguiat, I.J., Ramanathan, S., Gines, H.C., et al. Environmental impact and economic benefits of site-specific nutrient management (SSNM) in irrigated rice systems[J]. *Agric.Syst.*, 2007, 93, 1-24.
- [19] Pasuquin, J.M., Witt, C., Pampolino M. A new site-specific nutrient management approach for maize in the favorable tropical environments of Southeast Asia[M]. In: *Paper Presented at the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia (1-6 August 2010)*.2010.
- [20] SAS Institute. JMP 8.0.2.SAS Inst., Cary, NC.Setiyono, T.D., Walters, D.T., Cassman, K.G., Witt, C., Dobermann, A., 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Res.* 118, 158-168, 2009.
- [21] Smaling, E.M.A., Janssen, B.H. Calibration of QUEFTS: a model predicting nutrient uptake and yields from chemical soil fertility indices[J]. *Geoderma*, 1993, 59, 21-44.
- [22] Witt, C., Buresh, R.J., Peng, S., et al. Nutrient management [M]. In: T.H. Fairhurst, C. Witt, R. Buresh, A. Dobermann (Eds.), *Rice. A practical guide to nutrient management (second ed.)*. Los Baños (Philippines) and Singapore: International Rice Research Institute (IRRI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI), pp.1-45, 2007.
- [23] Witt, C., Dobermann, A., Abdulrachman, S., Gines, H.C., et al. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia[J]. *Field Crops Res.*, 1999, 63, 113-138.
- [24] 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. International Plant Nutrition Institute, Penang, Malaysia. <http://seap.ipni.net>, 2009.

# 预估中国小麦养分需求研究

串丽敏<sup>1</sup> 何萍<sup>1,2,\*</sup> 金继运<sup>1,2</sup> 李书田<sup>1,2</sup> Cynthia Grant<sup>3</sup> 周卫<sup>1</sup>

(1. 农业部作物营养与施肥重点实验室, 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中国项目部, 北京 100081; 3. 加拿大农业与农业食品研究中心, 加拿大 MB R7A 5Y3)

**摘要:** 本文收集了 2000-2011 年与小麦 N、P 和 K 养分吸收相关的试验数据, 评估小麦产量与养分吸收关系, 并运用 QUEFTS 模型估算一定目标产量下 N、P 和 K 最佳养分需求。随着目标产量的增加, QUEFTS 模型预估的作物养分平衡需求为线性 - 抛物线 - 平台曲线。在产量潜力的 60%-70% 范围内呈线性关系, 生产 1000 kg 籽粒需要的 N、P 和 K 养分最佳需求量分别为 22.8、4.4 和 19.0 kg。QUEFTS 模型模拟的移走 1000 kg 籽粒 N、P 和 K 养分最佳移走量分别为 18.3、3.6 和 3.5 kg, 地上部吸收的 N、P 和 K 养分分别约有 80%、82% 和 18% 的比例累积在籽粒中并被移出土壤。籽粒产量与养分吸收之间的关系可以用于评价和指导施肥, 避免养分过量或不足供应。田间试验证明, QUEFTS 模型可以为小麦养分专家决策系统的施肥推荐奠定理论基础。

**关键词:** QUEFTS 模型; 小麦; 内在效率; 最佳养分需求

## 1 前言

小麦是中国重要的粮食作物之一, 通常在华北地区与玉米轮作种植, 在长江中下游地区与水稻轮作种植, 而在西北地区, 春小麦和冬小麦均有种植。在过去几年, 小麦单产有所增加, 但是由于种植面积的逐渐减少, 总产量一直呈现停滞不前甚至有降低趋势。化肥在提高作物产量中起着不可磨灭的作用。由于肥料的施用与作物的需求并不平衡, 从而导致低的养分利用效率<sup>[1]</sup>。为了提高肥料利用率, 基于计算机软件技术的小麦养分专家系统 (Nutrient Expert, NE) 是新近发展起来的推荐施肥决策系统。该系统通过改良的精准养分管理技术 (Site-Specific Nutrient Management, SSNM) 和热带土壤肥力定量评价 (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils, QUEFTS) 模型相结合指导科学施肥, 综合考虑了所有养分的平衡供应。目前该方法已经在南亚、东南亚一些国家应用到水稻和玉米上, 中国小麦和玉米上也逐渐得到应用<sup>[2-4]</sup>。

精准养分管理技术是根据作物养分需求, 土壤基础养分供应和目标产量等因素确定施肥量, 关键生育期时在特定田块利用叶绿素仪或叶色卡指导科学施肥, 精确满足作物养分需求<sup>[5]</sup>。该技术已经成功应用于水稻<sup>[6-7]</sup>、小麦<sup>[8]</sup>和玉米<sup>[9]</sup>作物上。

养分内在效率 (Internal Efficiency, IE, 地上部吸收单位养分所能生产的籽粒产量) 易受土壤类型、养分供应、作物管理和气候条件的影响, 因此也会导致作物氮磷钾需求量的不确定性, 难以在农田推广<sup>[10]</sup>。因此, 实地养

分管理技术的施肥推荐需要基于更广泛更综合的量化指标进行, 例如通过模型预估籽粒产量和养分吸收之间的关系指导施肥<sup>[11-12]</sup>。

QUEFTS 模型可以解决这个问题, 其重要特点是考虑了 N、P 和 K 养分间的相互作用, 预估籽粒产量和地上部养分吸收之间呈线性 - 抛物线 - 平台曲线<sup>[13]</sup>。该模型还可以拟合出养分最大积累 (即最小养分内在效率, a) 和养分最大稀释状态 (即最大养分内在效率, d) 边界线<sup>[11, 13-14]</sup>。QUEFTS 模型已经在亚洲、印度和非洲西部应用到水稻上<sup>[11, 15-17]</sup>, 在印度和中国应用到小麦上<sup>[18-19]</sup>, 在中国、非洲、尼日利亚、肯尼亚、内布拉斯加州和东南亚地区也已应用到了玉米上<sup>[13, 19-23]</sup>。该模型为主要作物的实地养分管理提供了一种实用工具<sup>[8, 23-25]</sup>。

本文收集了 2000-2011 年近 12 年的小麦产量和养分吸收数据, 其土壤类型和气候条件遍及华北、长江中下游和西北地区, 包括了不同的小麦品种, 在此基础上利用 QUEFTS 模型预估小麦产量和养分吸收关系, 并将此作为小麦养分专家推荐施肥系统的背后数据支撑。因此, 本研究的主要目的是预估中国小麦一定目标产量下最佳的 N、P 和 K 养分需求。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

小麦产量、地上部 N、P、K 养分吸收、收获指数、肥料施用量等数据均来自 2000-2011 年已公开发表的文献以及国际植物营养研究所中国项目部数据库。具体的试验

处理包括在不同的土壤类型和气候条件下的农民习惯施肥处理、减素试验、长期定位试验以及肥料量级试验等。主要包括华北、长江中下游和西北地区，基本覆盖全国的小麦（冬小麦和春小麦）种植区域（图1）。试验所种植的小麦品种均为当地高产栽培下比较常见的品种，在小麦生产区域具有很强的代表性。

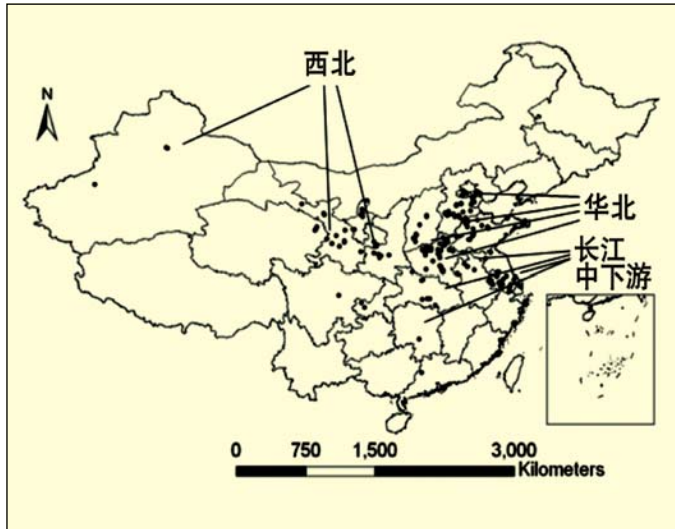


图1 中国华北地区、长江中下游地区和西北地区数据点的分布

## 2.2 模型介绍

QUEFTS 模型最初是由 Janssen et al.<sup>[13]</sup> 提出的土壤地力评价模型，通过预估热带地区不施肥土壤的玉米产量来评价地力，考虑了氮、磷和钾养分之间的相互作用。模型在土壤属性基础上计算了土壤氮、磷和钾三种大量元素的基础供肥量，以及结合作物产量与养分吸收量之间的关系模拟作物最佳 N、P 和 K 养分需求量和养分限制下的生产力，向机理模型又前进了一步<sup>[14]</sup>。QUEFTS 模型主要包括以下四个步骤，即：第一步：建立土壤属性和氮、磷、钾基础供肥量的关系式；第二步：建立土壤潜在供肥量和作物氮、磷、钾实际吸收量的关系，该步骤考虑了两两养分之间的相互作用，即在计算 N 素养分吸收时，考虑了 P 和 K 养分限制下的 N 素吸收；在计算 P 素养分吸收时，考虑了 N 和 K 养分限制下的 P 素吸收；同理，在计算 K 养分吸收时，考虑了 N 和 P 养分限制下的 K 养分吸收；第三步：建立作物氮、磷、钾实际吸收量和产量范围之间的关系式；第四步：建立两两养分对应的产量范围和最终的预估产量之间的关系式。以上每一步结果输出将是下一步的参数输入。之后该模型又进行修正，修正后的 QUEFTS 模型可以通过运行 Microsoft Excel 中的 Solver（规划求解）过程，预估一定目标产量下 N、P 和 K 养分的最佳需求量。

关于 QUEFTS 模型更详尽的介绍请参考文献 Janssen et al.<sup>[13]</sup> 和 Liu et al.<sup>[19]</sup>。

## 2.3 模型评价

均方根误差 (RMSE) 和标准化均方根误差 (normalized RMSE, n-RMSE) 两个参数可以用来评价 QUEFTS 模型以及实测值和模拟值之间的偏离程度。这两个参数计算公式如下：

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

$$n-RMSE = \frac{RMSE}{\bar{m}} \quad (2)$$

$s_i$  和  $m_i$  分别代表模拟值和实测值， $n$  为样本个数，表示实测值的平均值。均方根误差是模拟值和实测值之间的平均差异，用相同的单位来表示。标准化的均方根误差是去掉单位，可以比较不同单位时的模拟值和实测值的差异程度<sup>[26]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 预估一定目标产量下的最佳养分吸收

对于每一种养分， $a$  和  $d$  值表示该种养分最大累积（即 IE 最小）和最大稀释（即 IE 最大）状态时的参数。小麦地上部氮磷钾养分吸收的最大累积和最大稀释状态参数见图 2。为了表示  $a$  和  $d$  值对 QUEFTS 模型敏感度的影响，选取了收获指数  $HI \geq 0.40$  的数据且去掉其中 IE 数值上下限 2.5th、5th 和 7.5th 的三个系列，将产量潜力设为可获得最高产量<sup>[27-28]</sup>，以华北地区设为 12000kg/ha 为例来进行分析比较（图 2）。低的收获指数表明作物产量受到病虫害或涝旱害等生物或非生物因素的影响。就像 Witt et al.<sup>[11]</sup> 和 Haefele et al.<sup>[15]</sup> 提到的那样，当运用 QUEFTS 模型预估小麦产量和养分吸收关系以及评估养分内在效率时，去除了  $HI < 0.40$  的数据。

当  $a$ 、 $d$  参数和产量潜力设定后，利用 QUEFTS 模型可以模拟一定目标产量下小麦 N、P 和 K 养分的最佳需求量（线性-抛物线-平台曲线），即没有养分限制且给予作物最佳管理条件时的理想养分吸收。结果显示，去除养分内在效率值上下限 2.5th、5th 和 7.5th 的三系列，QUEFTS 模型模拟的最佳养分吸收只有在接近产量潜力时才发生较大差异。由于去除养分内在效率上下限 2.5th 时养分最大稀释和最大累积状态边界线包络更大的范围，

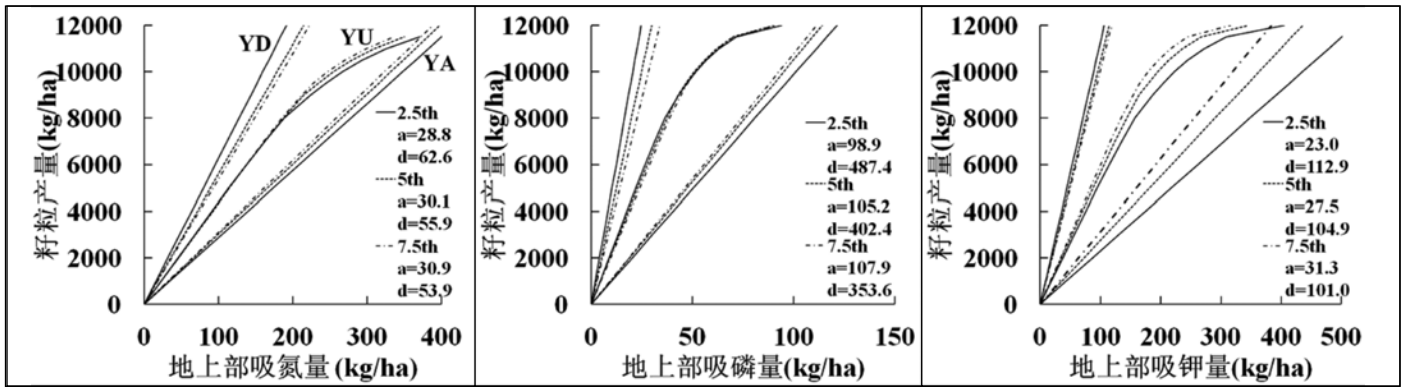


图2 HI ≥ 0.40 数据点去掉其养分内在效率上下限 2.5th、5th 和 7.5th 得出不同 a、d 值及小麦产量和养分吸收关系

注：YD 和 YA 分别表示养分最大稀释和最大累积状态边界线，YU 表示 QUEFTS 模型拟合的最佳养分吸收曲线。2.5th、5th 和 7.5th 分别是利用 Percentile 函数计算的养分内在效率数值，如 2.5th=Percentile (所有 HI ≥ 0.40 样本中养分内在效率数值区域, 0.025)，下同。

因此选用去除养分内在效率上下限 2.5th 对应的 a 和 d 值来预估最佳养分需求以及籽粒产量和地上部养分吸收之间的关系。此时得出的 a 和 d 值分别为 28.8 和 62.6 kg 籽粒/kg N, 98.9 和 487.4 kg 籽粒/kg P 以及 23.0 和 112.9 kg 籽粒/kg K。利用 QUEFTS 模型拟合的直线部分，即当目标产量在产量潜力 60%-70% 范围以内时，生产 1000 kg

12000 kg/ha 之间，但是无论产量潜力设定多少，QUEFTS 模型拟合出来的生产 1000 kg 籽粒产量的氮磷钾最佳养分吸收比例在直线部分是一定的（图 3）。

### 3.2 预估一定目标产量下的最佳籽粒养分移走量

QUEFTS 模型可以模拟最佳籽粒养分移走量<sup>[23]</sup>，有

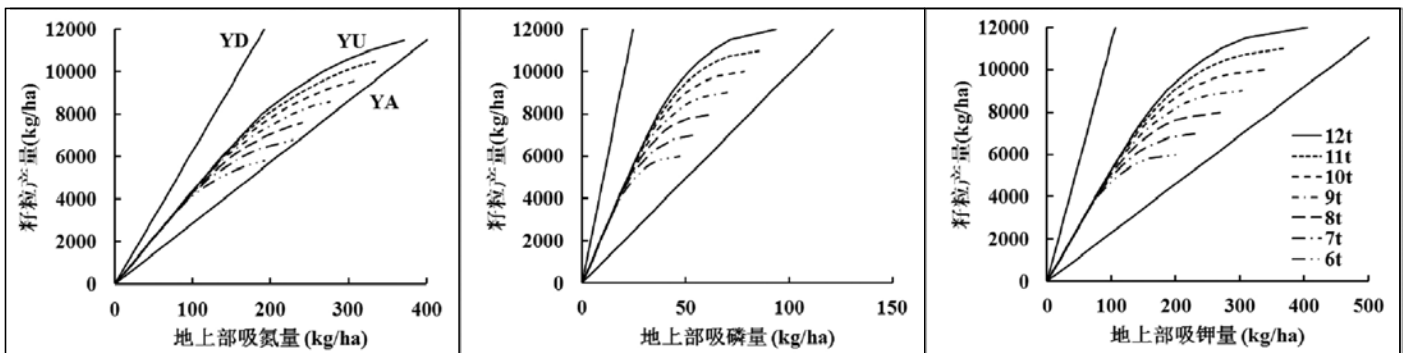


图3 QUEFTS 模型模拟的不同产量潜力下小麦地上部最佳养分需求量

小麦籽粒产量所需要的 N 为 22.8 kg, P 为 4.4 kg, K 为 19.0 kg。氮磷钾吸收比例为 5.18:1:4.32。对应的最佳养分内在效率分别为 43.9 kg 籽粒/kg N, 227.0 kg 籽粒/kg P 以及 52.7 kg 籽粒/kg K。

助于指导科学施肥，使籽粒收获所带走的养分以肥料形式重新归还土壤，避免土壤养分的耗竭。QUEFTS 模型拟合籽粒养分移走量的 a 和 d 值仍然是去除籽粒养分内在效率（籽粒吸收单位养分所对应的籽粒产量）上下限的 2.5th (HI ≥ 0.40) 得出。结果显示，最佳籽粒养分移走曲线

毛振强<sup>[29]</sup>曾有研究表明小麦产量潜力处于 6000-

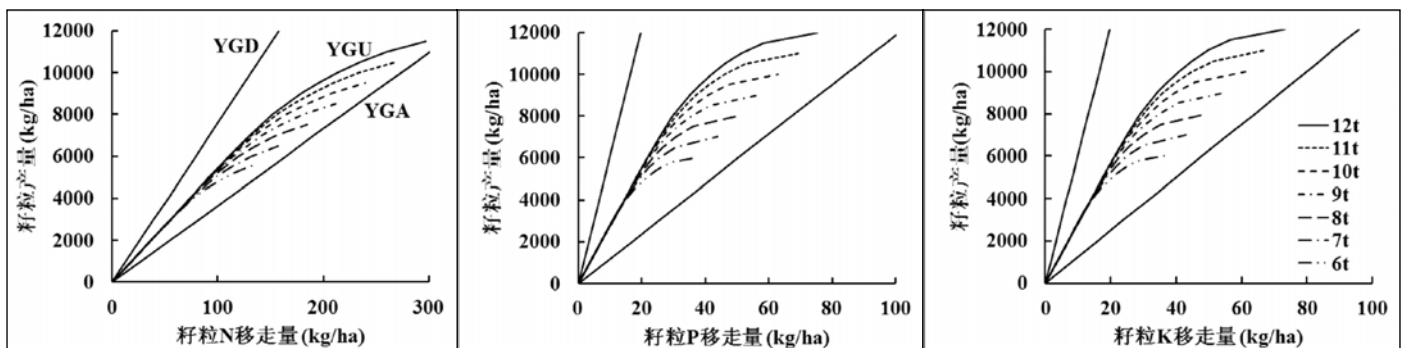


图4 QUEFTS 模型模拟的不同产量潜力下小麦籽粒最佳养分移走量

注：YGD、YGA 分别表示籽粒中养分最大稀释和最大累积状态边界线，YGU 表示 QUEFTS 模型拟合的籽粒最佳养分吸收曲线

与不同目标产量时 (6000-12000 kg/ha) 地上部最佳养分吸收曲线变化趋势非常相似 (图 4)。QUEFTS 模型结果显示, 无论产量潜力设为多少, 在拟合曲线的直线部分, 移走 1000 kg 籽粒所带走的 N、P 和 K 养分分别为 18.3、3.6 和 3.5 kg, 籽粒吸收的氮磷钾比例为 5.08:1:0.97。与模拟的地上部最佳养分吸收相比, 约有 80%、82% 和 18% 的氮磷钾储存在籽粒中并被移出土壤。这些数据可以为保持土壤肥力的推荐施肥方法提供理论依据。

### 3.3 籽粒产量和养分吸收关系评价

图 5 中的数据点均是来自国际植物营养研究所中国项目部的田间试验以及收集的 2000-2011 年以来已发表文献的数据。华北地区、长江中下游地区和西北地区产量潜力 (设为最大可获得产量) [27-28] 分别为 12000、10000 和 11000 kg/ha。结果显示, 在华北地区, 多数的氮吸收表现过量, 长江中下游地区氮吸收过量与不足共存, 在西北地区, 春小麦和冬小麦的氮多处于奢侈吸收, 表明施肥量仍然存在过量现象, 为了经济和环境效益应适当降低氮肥施用 (图 5a)。

华北地区冬小麦磷素吸收过量与不足现象同在, 表明磷肥施用并不平衡, 磷肥施用可能没有根据土壤的基础养分供应量以及作物需求来确定。长江中下游地区磷素吸收表现出一定的奢侈吸收趋势, 在西北地区磷素吸收表现为不足。磷肥的施用多以过磷酸钙、钙镁磷肥或复合肥形式施入土壤, 与作物所需求的氮磷钾比例相比, 导致了过多的磷肥投入。因此磷肥的施用更需谨慎, 在确定施肥量时应考虑土壤的基础养分供应和作物需求 (图 5b)。

华北地区部分冬小麦钾吸收表现出不足现象, 只有一小部分显示为奢侈吸收。然而春小麦钾吸收与冬小麦明显不同, 多数表现为过量状态 (图 5c)。这主要是由于春小麦的生长环境所致。春小麦主要在中国西北地区种植, 该地区土壤富含钾, 导致过量的钾在作物体中富集。

未施肥小区和减素小区的数据点分布见图 5d-f。接近于最大稀释状态边界线的数据点具有较高的养分内在效率, 但说明存在严重的养分亏缺。仍然有一部分氮素和磷素养分吸收接近于养分最大累积状态边界线, 表明由于不平衡施肥带来的大量有效态氮和磷残留在土壤中导致了养分的奢侈吸收。

### 3.4 QUEFTS 模型验证

2010-2011 年在河北 (32 户)、河南 (50 户)、山东 (30 户) 和山西 (10 户) 布置小麦田间 OPT 试验, 以验证 QUEFTS 模型的适用性。试验基于小麦养分专家系统推荐最佳的肥料施用量, 并在作物生长过程中给予良好的管理措施。结果显示, 小麦地上部氮磷钾养分实测值与模拟值之间的均方根误差 (RMSE) 分别为 22.7、22.4 和 93.0 kg/ha, 标准化均方根误差 (n-RMSE) 分别为 10.9%、56.9% 和 47.9%, 表明 P 和 K 有较大的变异性。然而, 从所有布置的试验来看, 小麦地上部氮磷钾养分吸收实测值与模拟值非常接近, 两者之间没有显著性差异 (图 6)。该结果也与 Liu et al. [19] 和 Das et al. [16] 研究结果相似, 表明 QUEFTS 模型可以用来预估一定目标产量下的养分吸收并用于推荐施肥。

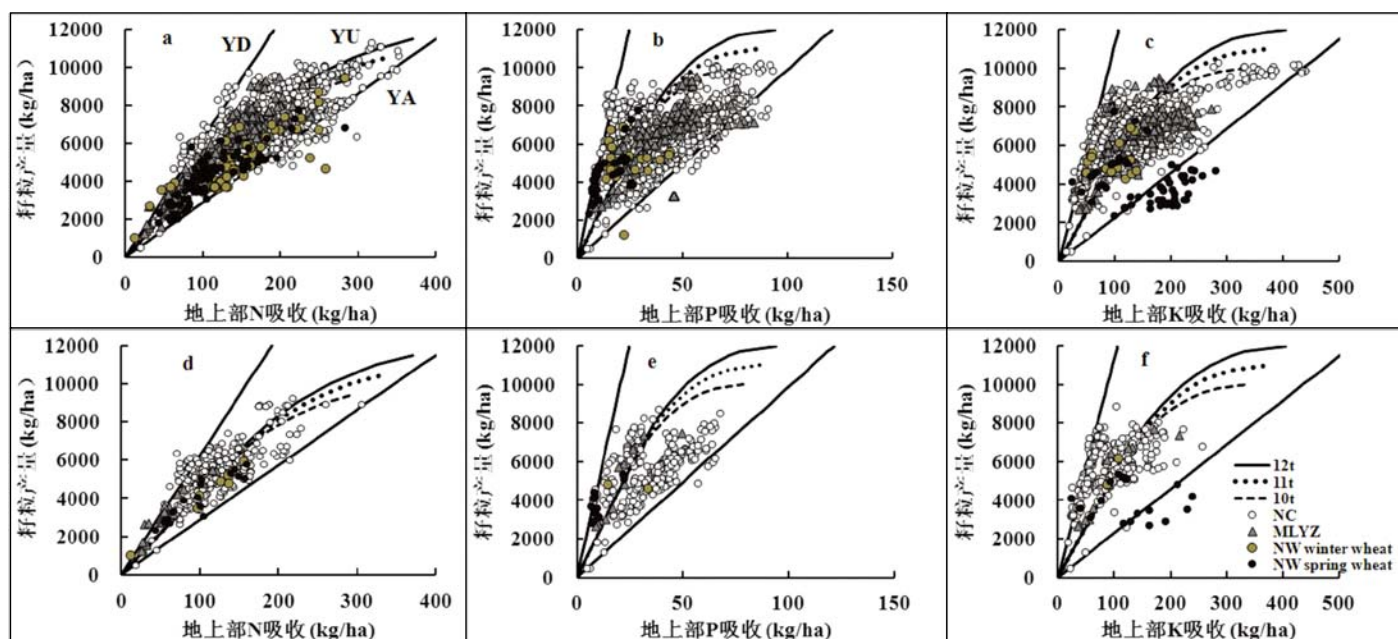


图 5 中国不同区域籽粒产量和氮磷钾养分吸收量之间的关系

注: 图 a-c 是所有试验点, 图 d-f 是只 CK 处理 (不施肥) 或减素试验的数据点。

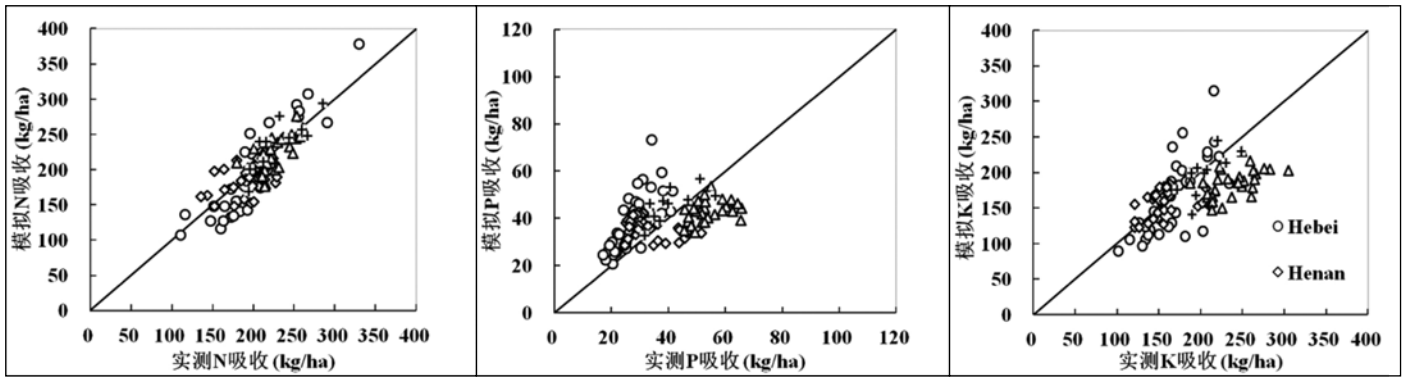


图6 小麦地上部养分吸收实测值和模拟值之间的关系

注：河北省 OPT 处理平均施肥量分别为 135 kg N/ha、23 kg P/ha 和 50 kg K/ha，河南省 OPT 处理平均施肥量为 150 kg N/ha、32 kg P/ha 和 62 kg K/ha，山东省为 140 kg N/ha、34 kg P/ha 和 58 kg K/ha，山西省为 137 kg N/ha、29 kg P/ha 和 65 kg K/ha。

## 4 结论

收集的 2000-2011 年小麦产量和养分吸收数据显示，小麦养分内在效率具有很大的变异空间。在本研究中，以去除氮磷钾养分内在效率上下限 2.5th 得到的 a 和 d 值作为运行 QUEFTS 模型的参数 ( $HI \geq 0.40$ )，计算得出 N 养分最小和最大内在效率分别为 28.8 和 62.6kg 籽粒 / kg N，P 最小和最大养分内在效率分别为 98.9 和 487.4kg 籽粒 / kg P，K 最小和最大养分内在效率分别为 23.0 和 112.9kg 籽粒 / kg K。当目标产量低于 60%-70% 的产量潜力时，生产 1000kg 籽粒产量所需的氮磷钾养分分别为 22.8、4.4 和 19.0 kg，氮磷钾养分吸收比例为 5.18:1:4.32，对应的养分内在效率为 43.9、227.0 和 52.7 kg/kg。地

上部移走 1000 kg 籽粒所带走的最佳氮磷钾养分分别为 18.3、3.6 和 3.5 kg，籽粒部分的氮磷钾比例为 5.08:1:0.97，约有 80%、82% 和 18% 的地上部氮磷钾养分转移到籽粒中并被带出农田系统。

当前中国小麦产量和养分吸收之间的关系表现为多数的氮素吸收为过量，P 素吸收过量与不足并存，一些 K 素吸收表现为不足。不同地区具有不同的特征，同时也反映了中国小麦的肥料施用状况，并可以合理指导施肥。

来自河北、河南、山东和山西的试验表明，QUEFTS 模型可以为小麦养分专家推荐施肥系统提供支撑并用于推荐施肥，从而帮助农民获得较高的产量，避免养分的过度吸收和土壤的耗竭，提高养分利用效率和经济效益，保障农田的可持续利用。

## 参考文献 (略)

参见英文版：Field Crops Research, 2013, 146: 96-104



# 基于产量反应和农学效率的小麦推荐施肥理论研究

串丽敏<sup>1</sup> 何萍<sup>1,2,\*</sup> Mirasol F. Pampolino<sup>3</sup> Adrian M. Johnston<sup>4</sup> 金继运<sup>1,2</sup>

徐新朋<sup>1</sup> 赵士诚<sup>1</sup> 仇少君<sup>1</sup> 周卫<sup>1</sup>

(1. 农业部作物营养与施肥重点实验室, 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中国项目部, 北京 100081; 3. International Plant Nutrition Institute Southeast Asia Program, PO Box 500 GPO, Penang 10670, Malaysia; 4. International Plant Nutrition Institute, 102-411 Downey Road, Saskatoon, SK, S7N 4L8, Canada.)

**摘要:** 施肥不合理是中国小麦生产中存在的普遍现象, 其后果是导致养分失衡、肥料效率低下, 大量养分流失到环境中。确定合理的施肥量是科学养分管理的基础。本文利用 2000-2011 年小麦养分相关数据介绍了基于产量反应和农学效率推荐施肥新方法的理论基础。结果显示, 产量反应和土壤基础养分供应之间存在着显著的负指数关系, 和相对产量之间存在着显著的负线性关系, 并且产量反应 ( $x$ ) 和农学效率 ( $y$ ) 之间存在着显著的一元二次函数关系。N 产量反应 ( $x_N$ ) 与 N 农学效率 ( $y_N$ ) 之间的函数关系为:  $y_N = -0.3729x_N^2 + 6.1333x_N + 0.1438$ , P 产量反应 ( $x_P$ ) 与 P 农学效率 ( $y_P$ ) 之间的关系为:  $y_P = -0.5013x_P^2 + 8.3209x_P + 2.3907$ , K 产量反应 ( $x_K$ ) 与 K 农学效率 ( $y_K$ ) 之间的关系为:  $y_K = -1.6581x_K^2 + 9.099x_K + 0.7668$ 。上述相关性是基于产量反应和农学效率进行推荐施肥的重要理论基础, 当产量反应确定, 其对应的养分农学效率也就确定, 进而可以完成施肥推荐。

**关键词:** 施肥推荐; 产量反应; 农学效率; 土壤基础养分供应

## 1 前言

小麦是中国重要粮食作物之一, 播种面积达 2350 万公顷, 占世界小麦生产面积的 10.6%<sup>[1]</sup>。施肥在小麦增产中占有举足轻重的地位。然而, 人们为了满足对粮食高产的追求, 过量施氮现象在小麦生产中较为常见, 进而导致养分施用不平衡、肥料利用效率低下, 使大量氮素损失到环境中。在高产栽培体系, 科学施肥是人们追求高的肥料利用效率时采取的重要方法。但是, 对于中国的小农户经营规模来说, 如何做到推荐施肥仍然是一个挑战。

基于电脑软件的小麦养分专家决策系统是国际植物营养研究所开发的推荐施肥系统, 可以为当地农民、农业技术和推广人员做出施肥推荐。该系统是在热带土壤肥力定量评价 (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils, QUEFTS) 模型和改良的实地养分管理技术 (Site-Specific Nutrient Management, SSNM) 基础上合并研发。SSNM 在 20 世纪九十年代中期作为可选择的养分管理方法逐渐发展起来, 使特定田块的特定作物养分供应与需求同步<sup>[2]</sup>。QUEFTS 模型最初是由 Janssen et al.<sup>[3]</sup> 提出的通过预估热带地区不施肥土壤的玉米产量进行地力评价的模型, 经过进一步转化和校正, 可以预估一定目标产量时的最佳养分吸收<sup>[4-10]</sup>。施肥后作物达到的产量主要有两部分组成, 一是由土壤基础养分供应所能产生的产量, 另一部分是施肥所能增加的产量 (产

量反应)。将 QUEFTS 模型和 SSNM 相结合的小麦养分专家推荐施肥方法的主线是在多年多点数据库基础上, 基于产量反应和农学效率进行施肥推荐, 在测土或植株诊断分析条件不充分时该方法显得尤为重要。既满足不同大小田块推荐施肥的适用性, 又考虑 N、P、K 养分间的相互作用, 也是与其它施肥方法最重要的区别。所谓产量反应是指施用氮磷钾肥料的小区与不施某种养分的缺素小区的产量差。农学效率是指施入 1kg 该纯养分 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 或 K<sub>2</sub>O) 所能增加的籽粒产量。小麦养分专家系统的氮肥推荐是基于 N 的产量反应和 N 的农学效率, 而磷钾肥的推荐则综合考虑了养分内在效率, 可获得的产量、施入某种养分的产量反应以及养分平衡等因素<sup>[11,12]</sup>。根据产量反应做出的推荐施肥量能够充分利用土壤的基础养分供应, 避免过量养分在土壤的累积。该方法已经在亚洲一些国家得到应用<sup>[11-14]</sup>。

目前, 关于多年多点小麦施肥产量反应和农学效率以及两者之间的关系还没有系统研究。本文主要研究以下几点: 1) 确定中国小麦施肥的产量反应、农学效率和土壤基础养分供应; 2) 分析产量反应、农学效率和土壤基础养分供应之间的关系; 3) 为中国基于产量反应和农学效率的小麦养分专家推荐施肥提供理论原则和科学基础。

## 2 数据来源

小麦养分专家系统背后强大的数据库支撑是收集了从2000-2011年已发表的关于小麦养分管理的文献以及国际植物营养研究所已发表或未发表的数据库数据。涉及的试验包括不施肥的对照处理、农民习惯施肥处理、最佳养分管理处理、对应的减氮、减磷和减钾处理，以及肥料的量级试验、长期定位试验等。记录的参数有小麦产量，氮磷钾施肥情况，籽粒和秸秆部位的氮磷钾养分含量、籽粒和秸秆干重及各部位养分累积量和植株地上部的养分总吸收量，土壤pH、全氮、有机质、有效氮、有效磷、有效钾含量等指标。

所收集的数据点遍及中国小麦所有种植区，主要分为华北地区、长江中下游地区和西北种植区(图1)。其中在西北种植区，冬小麦和春小麦均有分布。

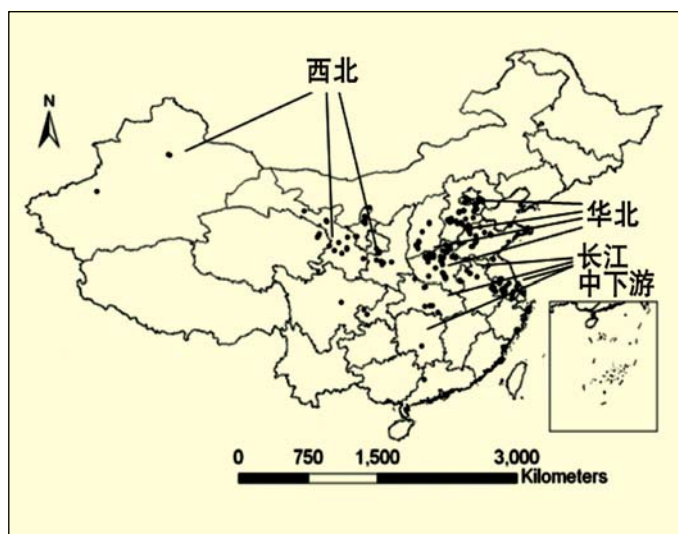


图1 华北地区、长江中下游地区和西北地区试验样点分布

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤基础养分供应

土壤基础养分供应量是不施某种养分而其它养分供应充足的处理植株地上部该种养分的吸收量<sup>[3]</sup>。土壤基础养分来自土壤本身以及外界环境养分的带入，包括上

茬作物有机无机残留，生物非生物固氮，土壤矿化，灌溉水的带入以及大气沉降等<sup>[15]</sup>。当相对产量较高时，意味着该种养分土壤基础供应量较高，施入该肥料的产量反应就低。土壤N、P和K养分的基础供应量分布如图2所示，其中土壤基础N、P和K养分平均供应量分别为122.6、38.0和120.2 kg/ha。小麦季约有40.9%的土壤基础N养分供应量分布在100-150 kg/ha之间，约有68.9%的土壤基础P养分供应以及67.1%的土壤基础K养分供应分布在20-60 kg P/ha和50-150 kg K/ha之间。可见，来自土壤和外界环境的基础养分供应量很高，对于作物生长起到重要作用。同时也表明，当做施肥推荐时，土壤基础养分供应不能忽略，相反，可以将其用于确定最佳的养分需求<sup>[16]</sup>。

### 3.2 产量反应相关分析

产量反应是指施用氮磷钾肥料的处理与不施某种养分处理的产量差。将全部收集的数据做出的各养分产量反应如图3所示。结果显示，氮肥的产量反应平均为1.67 t/ha，约有88%的样本施用氮肥后，产量反应在3 t/ha以下(图3)。施用磷肥和钾肥的产量反应平均分别为1.00和0.80 t/ha，约有62.8%的磷肥产量反应以及72.7%的钾肥产量反应均在1 t/ha以下。

缺素区的产量与施NPK养分区产量的比值称为相对产量，一定程度上表征着土壤基础养分供应能力的高低。相对产量越大，说明土壤该种养分基础供应能力越高。相反，如果相对产量越低，说明土壤该种养分基础供应能力偏低。土壤养分供应量、产量反应以及相对产量均是表征土壤肥力的重要因子，可以用于为实地养分管理技术做施肥推荐<sup>[2, 17-18]</sup>。结果显示(图4)，磷和钾的相对产量较高，达0.85和0.90，而氮的相对产量为0.76。因此，结合N、P、K的产量反应可以看出，氮是能否获得高产的第一限制因子，磷次之，钾最小。

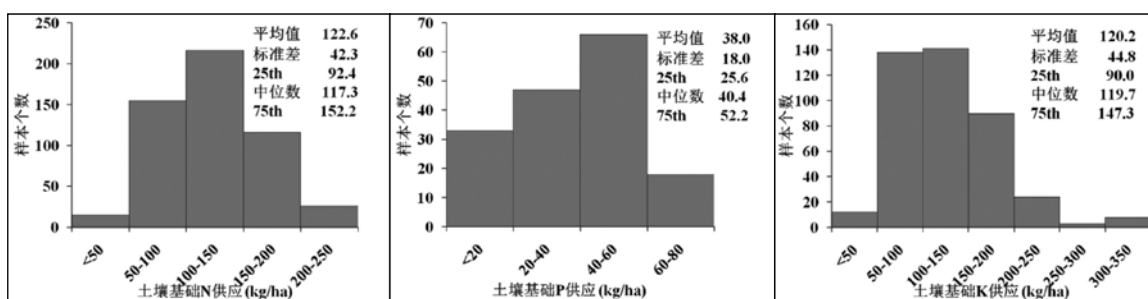


图2 土壤基础N、P和K养分供应量分布

注：25th、中位数和75th分别表示第25百分位、第50百分位和第75百分位所对应的数值。下同。

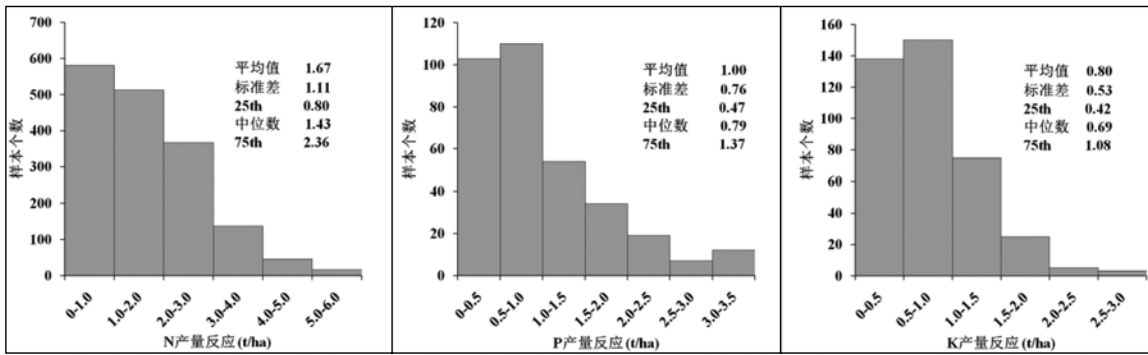


图3 小麦 N、P 和 K 产量反应分布

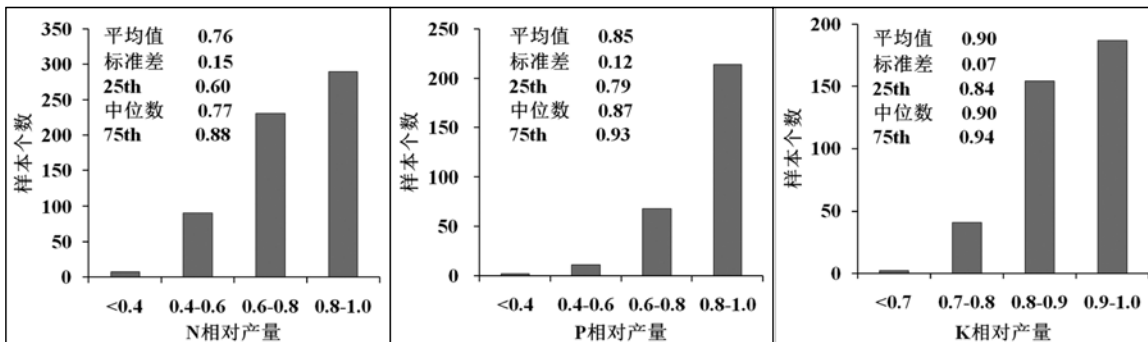


图4 小麦 N、P 和 K 相对产量分布

### 3.3 农学效率分析

农学效率是指施入单位纯养分 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 或 K<sub>2</sub>O) 所能增加的籽粒产量, 是养分利用效率的一个指标。统计结果表明(图5), 氮、磷和钾肥的农学效率平均分别为9.4、10.2和6.5 kg/kg, 约有61.6%、55.2%和83.9%的氮、磷和钾农学效率分布在10 kg/kg以下。Dobermann<sup>[19]</sup>曾提出, 发达国家氮的农学效率在10-30 kg/kg之间, 如果给予作物较好的管理措施, 或是适当合理的降低施肥量, 氮的农学效率平均应达到25 kg/kg以上。与这一目标相比, 中国还有很大差距。

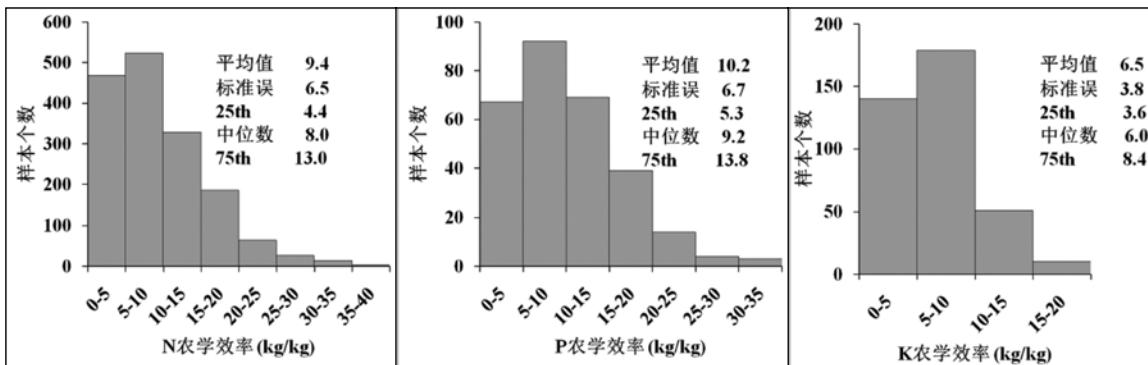


图5 小麦氮、磷和钾农学效率分布

### 3.4 产量反应、相对产量、土壤基础养分供应量以及农学效率相关性分析

氮、磷和钾肥的产量反应与相对产量之间存在着显著

的负相关关系, 相关系数 r 分别为0.93、0.90和0.94(图6)。随着产量反应的增加, 相对产量逐渐减小。

N、P 和 K 产量反应与土壤基础供 N、供 P 和供 K 量的关系如图7所示。随着土壤基础养分供应量的增加, 相对应的产量反应逐渐减小, 两者之间存在着显著的负指数相关关系, 相关系数 r 分别为0.60、0.53、0.65。

产量反应越大, 说明土壤的基础养分(本底养分)供应越小, 即作物在不施该养分而其它养分供应充足时能从土壤中和外界环境中获取的养分就越少, 基础产量偏低, 与该养分供应充足的处理相比, 产量差偏大。相反, 如果产量反应越小, 说明土壤的基础养分供应强度高, 再施入该种肥料时, 产量增加的幅度偏小。

在不施肥条件下所达到的产量主要有土壤基础养分提供, 该产量与目标产量的差异(产量反应)主要来自肥料。产量反应随着土壤基础养分供应量的改变而变化。土壤基础养分不仅包括土壤本身的养分, 还包括来自大气沉降以及灌溉水中外界代

入的养分, 总体养分数值不易直接测得, 因此需要通过其它途径进一步来确定施肥量, 这也推动了基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法的发展。

N、P 和 K 产量反应 (x) 与对应的农学效率 (y) 之间存在着显著的一元二次曲线关系 (P<0.05)(图8), 即

氮产量反应 (x<sub>N</sub>) 和 N 农学效率 (y<sub>N</sub>) 对应关系为:

$$y_N = -0.3729x_N^2 + 6.1333x_N + 0.1438;$$

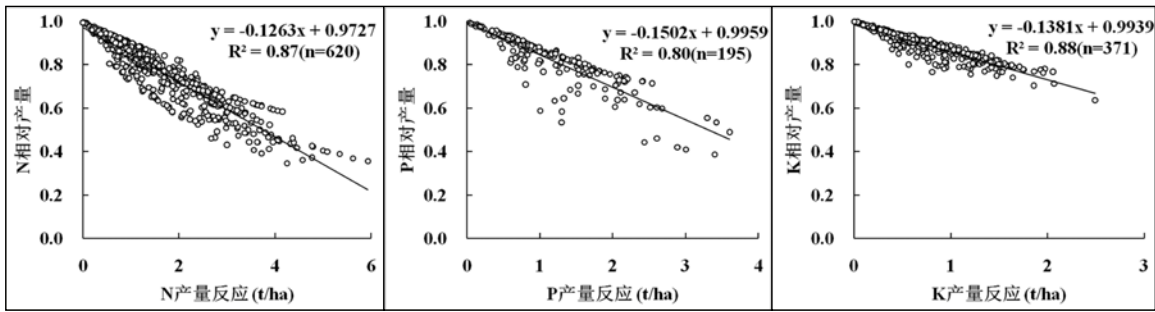


图6 小麦 N、P 和 K 产量反应与相对产量之间的关系

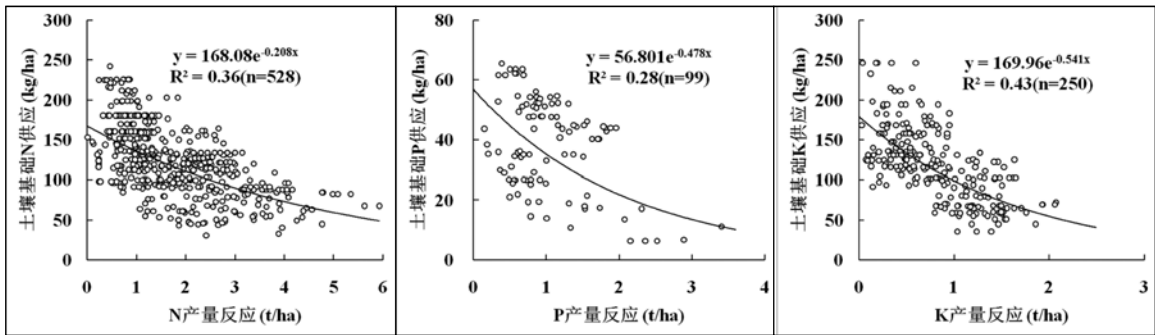


图7 产量反应与土壤基础养分供应之间的关系

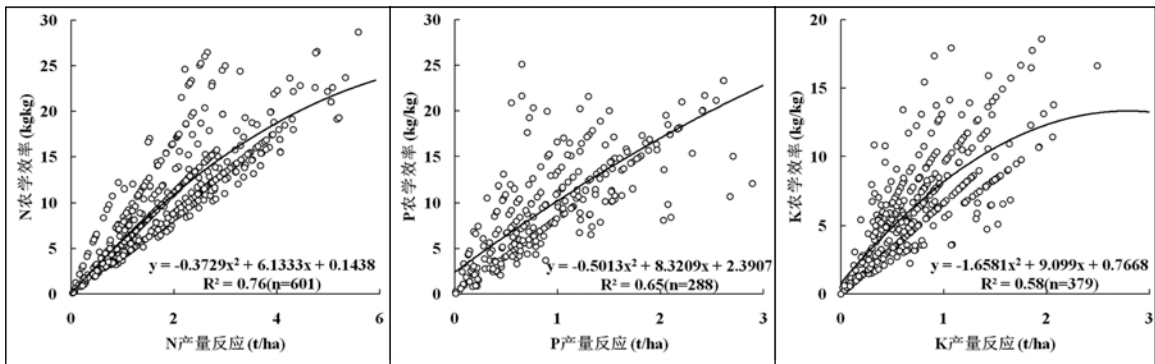


图8 产量反应和农学效率的关系

磷产量反应 ( $x_P$ ) 和 P 农学效率 ( $y_P$ ) 对应关系为:

$$y_P = -0.5013x_P^2 + 8.3209x_P + 2.3907;$$

钾产量反应 ( $x_K$ ) 和 K 农学效率 ( $y_K$ ) 对应关系为:

$$y_K = -1.6581x_K^2 + 9.099x_K + 0.7668.$$

养分农学效率随着产量反应的增加而增加, 只是增加幅度逐渐减小。产量反应越小, 说明土壤基础养分供应量越大, 施用该种肥料的农学效率偏低。相反, 产量反应越大, 说明土壤该种基础养分供应能力越低, 施用该肥料的农学效率相对偏高。基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法

就是以该理论为前提, 在大量数据基础上找出产量反应和农学效率的关系, 依据小麦养分专家推荐施肥决策原理, 进行施肥推荐。

## 4 结论

2000-2011 年小麦施用氮、磷、钾肥的产量反应平均分别为 1.67、1.00、0.80 t/ha, 氮是限制产量的第一因子, 磷次之, 钾最小。

小麦产量反应和相对产量以及土壤基础养分供应量之间均存在显著的负相关关系。

2000-2011 年氮、磷和钾肥的农学效率平均分别为 9.4、10.2 和 6.5 kg/kg。

产量反应 ( $x$ ) 和农学

效率 ( $y$ ) 之间存在着显

著的一元二次曲线关系。N 产量反应 ( $x_N$ ) 和 N 农学效率 ( $y_N$ )

对应关系为:  $y_N = -0.3729x_N^2 + 6.1333x_N + 0.1438$ ; P 产量

反应 ( $x_P$ ) 和 P 农学效率 ( $y_P$ ) 对应关系为:

$y_P = -0.5013x_P^2 + 8.3209x_P + 2.3907$ ; K 产量反应 ( $x_K$ ) 和 K 农学

效率 ( $y_K$ ) 对应关系为:  $y_K = -1.6581x_K^2 + 9.099x_K + 0.7668$ 。一旦

产量反应确定, 所对应的农学效率也确定, 根据小麦养分专家系统氮磷钾肥的推荐施肥原则可以做出施肥推荐。

## 参考文献 (略)

参见英文版: Field Crops Research, 2013, 140: 1-8.

# 养分专家系统推荐施肥对河北省小麦玉米产量及养分利用率的影响

贾良良<sup>1</sup> 刘孟朝<sup>1</sup> 赵姗姗<sup>2</sup> 李春杰<sup>3</sup>

(1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 石家庄 050051; 2. 正定县农业局, 正定 050800; 3. 河北省农业厅种子站, 石家庄 050021)

**摘要:** 利用养分专家系统 Nutrient Expert (NE) 对河北省小麦、玉米的产量、经济效益和养分利用率的影响进行了探讨, 结果发现基于养分专家系统的推荐施肥能够在减少氮肥投入量的情况下获得比农民习惯施肥更高的作物产量, 增产幅度在 1.1%-5.2% 之间; 基于 NE 养分专家系统的推荐施肥体系显著提高了农田养分利用率, NE 推荐施肥的氮肥偏生产力在 35.3-57.5 公斤/公斤, 显著高于农民习惯施肥处理的 20.6-33.5 公斤/公斤; 此外, 基于 NE 养分专家系统的推荐施肥技术体系能够提高农田经济效益, 提高的幅度在 31-58 元/亩。

**关键词:** 小麦; 玉米; Nutrient Expert; 作物产量; 养分利用率

河北省平原区是我国重要的冬小麦产区, 常年播种面积 3750 万亩左右, 小麦总产量 1220 万吨左右, 播种面积和总产量在全国仅次于河南和山东两省。河北省小麦生产中普遍存在过量施肥的问题<sup>[1-2]</sup>, 其中氮肥的过量施用最普遍, 过量施氮导致肥料利用率明显降低, 经济效益下降<sup>[3]</sup>。目前在生产实践中逐渐应用优化施肥措施进行肥料推荐, 但大多数推荐施肥手段都需要土壤取样和实验室分析后再根据目标产量等进行推荐<sup>[4-5]</sup>, 需要大量的人力物力投入耗时费力。养分专家系统软件 Nutrient Expert (以下简称 NE, 由国际植物营养研究所北京办事处引进并完善) 能够根据常年作物产量、常年养分管理资料数据, 快速推荐氮、磷、钾优化施用量。这种方法比较适应我国目前的小农户、小田块的分散经营模式, 可以在生产中做到逐田块的推荐。目前基于 NE 养分专家系统的推荐施肥技术的报道还不多, 本研究拟通过多年多点的小麦玉米试验, 基于 NE 系统的养分管理模式对小麦玉米产量、经济效益和养分效率的影响, 以期为 NE 系统进行小麦、玉米推荐施肥提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

自 2010 年夏玉米季节开始, 分别在河北辛集马庄农场、正定新城铺村、正定北贾村等地安排养分专家系统 Nutrient Expert 推荐施肥试验 118 个, 2010 年-2012 年小麦、玉米试验田块数量及分布情况如表 1 所示。所选试验地均为当地典型农田, 常年种植模式为小麦-玉米轮作, 其中小麦于每年 10 月 10 日左右播种, 于第二年 6 月 10

表 1 2010-2012 年养分专家系统推荐施肥试验分布情况

年份	作物	试验点名称	试验数量
2010	夏玉米	辛集	32
2012	夏玉米	辛集	11
2011	夏玉米	正定	17
2012	夏玉米	正定	9
2010-2011	冬小麦	辛集	32
2011-2012	冬小麦	辛集	12
2011-2012	冬小麦	正定	5

表 2 2010-2012 年各试验土壤基础理化性状

年份	作物	地点	pH	OM (%)	NH <sub>4</sub> -N (毫克/升)	NO <sub>3</sub> -N (毫克/升)	P (毫克/升)	K (毫克/升)
2010	玉米	辛集	8.22	0.63	6.93	9.30	56.4	79.8
2011	玉米	正定	7.87	0.76	7.75	19.5	63.0	52.8
2010-2011	小麦	辛集	8.22	0.61	9.23	11.2	61.2	81.2
2011-2012*	小麦	辛集	7.92	14.4	--	--	16.3	113
2011-2012*	小麦	正定	7.71	18.4	--	--	21.5	96
2012*	玉米	辛集	8.06	13.1	--	--	16.3	107
2012*	玉米	正定	7.70	14.3	--	--	17.2	64

\*注: 2011-2012 小麦和 2012 年夏玉米的基础土壤样品测试采用的是常规测试方法, 其中 OM% 为土壤有机质含量(克/千克)、P 为 Olsen-P 含量(毫克/千克)、K 为 NH<sub>4</sub>OA<sub>c</sub>-K (毫克/千克)。其余年份土壤理化性状测试采用 ASI 法。

左右收获，玉米在小麦收获后播种，于10月初收获。各试验田土壤基础理化性状如表2所示。

## 1.2 试验设计

试验统一设6个处理，分别是：CK（不施任何肥料）、OPT（氮磷钾肥及微量元素推荐给予NE推荐）、OPT-N（在OPT基础上不施氮肥）、OPT-P（在OPT基础上不施磷肥）、OPT-K（在OPT基础上不施钾肥）和FP（农民习惯施肥处理）等6个处理。其中农民习惯施肥处理按照农户调查数据进行推荐，OPT处理的氮磷钾肥施用量根据前茬作物施肥情况、秸秆还田与否、土壤肥力状况等以及其他年份试验数据的总结，通过养分专家系统Nutrient Expert计算得出。其中OPT处理的小麦施肥模式为基肥+拔节期追肥，其中磷钾肥和1/3氮肥作为基肥在整地时施入，在小麦拔节期另追施2/3氮肥。OPT玉米施肥分为基肥+6叶期追肥，磷钾肥和氮肥的1/3作为基肥在播种时开沟施入，在夏玉米6叶期开沟施入剩余的2/3氮肥作为追肥，并根据土壤墒情决定是否灌溉，本试验2010-2012年的夏玉米生育期间降雨量与常年类似，所有处理均没有灌溉。FP处理则根据农民习惯进行施肥，其中小麦磷钾肥全做基肥，氮肥分基肥+追肥，比例为1:1，夏玉米按照农民习惯氮磷钾肥全部做基肥一次性施入，生育期不追肥。为使FP处理能够切实反映当地农民习惯施肥的效果，采用当地农民习惯的施肥品种，如复合肥、二铵等。OPT处理采用的氮、磷、钾肥品种分别为尿素（含N46%）、过磷酸钙（含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>，12%）和氯化钾（含K<sub>2</sub>O，60%）。

所有处理的中耕、除草、病虫害防治等均按照常规管理方式进行。

## 1.3 样品采集与处理

在小麦、玉米收获期分小区测试各小区的籽粒产量和生物量。实验室分别测定各处理的秸秆与籽粒的氮、磷、钾养分含量，其中全氮采用半微量凯氏法、全磷采用钒钼黄比色法、全钾采用火焰光度法。

## 1.4 数据分析

采用Microsoft Excel软件对数据进行统计分析。试验养分效率分析用养分回收率RE、农学效率AE和偏生产力PPF<sup>[4-6]</sup>等进行了比较。相关参数计算方法如下：

养分利用率RE(%) = (施肥区植物吸收养分量 - 无肥区植物吸收养分量) / 养分施入量 × 100

农学效率AE(公斤/公斤) = (施肥区作物产量 - 无肥区作物产量) / 养分施入量

偏生产力PPF(公斤/公斤) = 施肥区作物产量 / 养分施入量。

## 2 结果分析

### 2.1 养分专家系统NE推荐施肥量与农民习惯施肥量对比

基于养分专家系统NE的夏玉米推荐施肥量在不同地区、年度间有明显差异，3季玉米在4个试验区的平均推荐施氮量在9-12.1公斤/亩之间，而相应调查的农户平均施氮量则在15.7-23.1公斤/亩之间，农民习惯施氮量显著高于当年当季作物的NE推荐施氮量，约为NE推荐施氮量的135%-195%，说明存在严重的过量施氮问题。在磷钾肥施用量上，农民习惯施肥量差异较大，甚至有部分农户从不施用磷钾肥，也有的农户施用量明显偏高，如2010年辛集夏玉米农民习惯施磷量平均为0.4公斤/亩，所有32个参试农户中只有2个农户施用了磷肥9.2公斤/亩和

表3 2010-2012年养分专家系统推荐优化施肥量与农户习惯施肥量（公斤/亩）

年份	作物	试验地点	养分专家系统NE 养分推荐量			农民习惯施肥量		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2010	玉米	辛集	9(8.7-10)	3.5(3.3-3.7)	4(3.2-4.7)	9(8.7-10)	3.5(3.3-3.7)	4(3.2-4.7)
2011	玉米	正定	10(9.8-10)	2.7(2.7-3.3)	3.3(3.2-4.2)	10(9.8-10)	2.7(2.7-3.3)	3.3(3.2-4.2)
2012	玉米	辛集	12.1(12-12.1)	5.1(4.5-5.3)	5.1(5.3-7)	12.1(12-12.1)	5.1(4.5-5.3)	5.1(5.3-7)
2012	玉米	正定	12.1(12-12.1)	5.1(4.5-5.3)	5.7(4.3-7)	12.1(12-12.1)	5.1(4.5-5.3)	5.7(4.3-7)
2010-2011	小麦	辛集	9(8.7-10)	3.5(3.3-3.7)	4(3.2-4.7)	9(8.7-10)	3.5(3.3-3.7)	4(3.2-4.7)
2011-2012	小麦	正定	12.1(12.1-12.1)	5.1(4.5-5.3)	5.1(4.3-7)	12.1(12.1-12.1)	5.1(4.5-5.3)	5.1(4.3-7)
2011-2012	小麦	辛集	12.1(12.1-12.1)	5.1(4.5-5.3)	5.7(5.3-7)	12.1(12.1-12.1)	5.1(4.5-5.3)	5.7(5.3-7)

\* 注：农户平均施肥量及农户施肥量分布范围。

表 4 2010-2012 年不同养分管理下作物产量 (公斤/亩)

年份	作物	地点	作物产量					
			CK	OPT	FP	OPT-N	OPT-P	OPT-K
2010	玉米	辛集	436b	526a	520a	451b	510ab	508ab
2012	玉米	辛集	387b	448a	439a	402b	417ab	425ab
2011	玉米	正定	492b	541a	533a	492b	518ab	492b
2012	玉米	正定	523c	661a	645a	583ab	594ab	576b
2010-2011	小麦	辛集	398b	509a	491a	430b	434b	465ab
2011-2012	小麦	辛集	376c	474a	456ab	406bc	427b	430b
2011-2012	小麦	正定	359c	451a	429ab	399bc	408b	424ab

\*LSD=0.05

3.6 公斤/亩, 其余农户均未施磷肥, 钾肥方面也有类似的情况。

在小麦推荐施肥量上, 养分专家系统 NE 的推荐施氮量在 3 年的试验中均显著低于农民习惯施氮量, NE 系统推荐的 3 季小麦施氮量在 9-12.1 公斤/亩, 而农民习惯施氮量则在 16.5-23.1 公斤/亩, 农民习惯施氮量约为 NE 推荐量的 135%-200%。农民习惯施磷钾肥量明显低于 NE 系统推荐的小麦磷钾肥用量, 且非常不均衡, 也存在部分农民不施磷钾肥的现象。

## 2.2 养分专家系统推荐施肥对小麦、玉米产量的影响

夏玉米产量明显受区域土壤基础肥力和气候年型影响, 辛集的夏玉米空白 CK 产量显著低于正定 (表 4)。不同年份和试验区夏玉米产量均以基于 NE 推荐施肥的 OPT 处理为最高, 其次是农民习惯施肥处理 FP, OPT 处理较农民习惯处理增产 1.1%-2.5%。基于 NE 推荐施肥的 OPT 减素处理 OPT-N、OPT-P 和 OPT-K 的作物产量均低于 OPT 处理和 FP 处理, 但受到各试验区土壤基础肥力的影响, 减产规律不完全一致。如辛集在 2010 和 2012 年两年试验中均以 OPT-N 处理的减产幅度最大, 说明氮肥在辛集夏玉米增产中作用最大。而正定在 2012 年中则以 OPT-K 处理的减产幅度最大, 说明在高产条件下除了重视氮肥的投入, 更需要重视钾肥的平衡施用。

小麦产量变化与玉米相类似, 各处理中均以基于 NE 推荐施肥的 OPT 处理为最高, 其次为农民习惯施肥处理 FP, OPT 处理较农民习惯处理 FP 增产 3.7%-5.2%。在基于 NE 推荐施肥的 OPT 减素处理中 OPT-N 处理在 2 个试验年度的 3 个试验区中的减产幅度最大, 其次为 OPT-P 处理, OPT-K 处理的减产最少, 这充分说明重视养分的均衡供

应是保证作物高产的重要前提。

## 2.3 养分专家系统推荐施肥对小麦、玉米养分利用率的影响

农民习惯施肥处理的夏玉米氮肥偏生产力 PFP-N 为 27.2-33.5 公斤/公斤, 显著低于基于 NE 推荐施肥处理的 PFP-N 36.2-57.5 公斤/公斤。农民习惯施肥处理的冬小麦氮肥偏生产力 PFP-N 为 20.6-27.5 公斤/公斤, 显著低于 NE 推荐施肥处理的 35.3-54.5 公斤/公斤 (表 5)。

从 NE 养分专家系统推荐 OPT 处理的农学效率来看, 不同作物和不同试验地区和年型之间差异明显。夏玉米的氮肥的农学效率在 3.69-7.66 公斤/公斤之间, 冬小麦则在 2.47-6.76 公斤/公斤之间; 夏玉米磷肥的农学效率在 2.7-10.2 公斤/公斤之间, 明显受到土壤基础肥力的影响, 即辛集地区的土壤磷含量相对较高, 2010 和 2012 两年的农学效率分别为 2.7 公斤/公斤和 5.3 公斤/公斤, 而正定的土壤磷含量相对较低, 2011 和 2012 两年的农学效率为 8.9 公斤/公斤和 10.2 公斤/公斤; 夏玉米钾肥的农学效率在 2.9-13.6 公斤/公斤之间, 而小麦则在 0.9-6.4 公斤/公斤之间。钾肥的农学效率较高说明在华北平原小麦玉米轮作体系中适当增加钾肥的投入对提高和稳定作物产量有重要的意义。

表 5 2010-2012 年不同养分管理模式下作物养分利用率 (公斤/公斤)

年份	作物	地点	农民习惯处理 FP	基于 NE 推荐处理 OPT				
			PFP-N	PFP-N	AE-N	AE-P	AE-K	
2010	玉米	辛集	33.5	57.5	7.66	2.7	2.9	
2012	玉米	辛集	27.2	36.2	4.03	5.3	12.3	
2011	玉米	正定	27.3	53.3	3.69	8.9	5.0	
2012	玉米	正定	28.7	53.2	5.13	10.2	13.6	
2010-2011	小麦	辛集	27.5	54.5	6.76	16.5	6.4	
2011-2012	小麦	辛集	20.6	37.6	2.47	4.1	0.9	
2011-2012	小麦	正定	27.4	35.3	4.14	6.1	4.7	

表 6 2010-2012 年不同养分管理模式下的经济效益分析 (元/亩)

年份	作物	地点	经济效益	
			FP	OPT
2010	玉米	辛集	862	863
2011	玉米	正定	897	950
2012	玉米	辛集	766	784
2012	玉米	正定	1156	1209
2010-2011	小麦	辛集	921	986
2011-2012	小麦	正定	831	879
2011-2012	小麦	辛集	870	929

## 2.4 养分专家系统 NE 推荐施肥对小麦、玉米经济效益的影响

根据调查得到的 2010-2012 年氮磷钾肥和小麦、玉米价格, 对不同养分管理措施的经济效益进行了分析, 其中小麦价格 2.1 元/公斤, 玉米价格 2.0 元/公斤, 氮磷钾肥价格分别按照纯养分氮 (N) 4.5 元/公斤、磷 ( $P_2O_5$ ) 6.5 元/公斤和钾肥 ( $K_2O$ ) 5 元/公斤 (表 6)。结果发现, 虽然不同年份不同作物下的经济效益略有不同, 但基于 NE 推荐的 OPT 处理的经济效益均高于农民习惯施肥处理, 玉米平均高 31 元/亩, 而小麦平均高 58 元/亩。这一方面归功于优化施肥提高了作物产量, 另一方面也与优化施肥大幅度减少氮肥投入有关。

## 3 结论

根据以上研究结果, 得出以下结论:

### 参考文献

- [1] 张福锁, 崔振岭, 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): 68-69.
- [2] Ju X T, Kou C L, Christie P, et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2007, 145: 497-506.
- [3] 同延安, 赵营, 赵护兵, 等. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 64-69.
- [4] 张树兰, 同延安, 赵护兵, 等. 冬小麦-夏玉米轮作氮肥施用量与氮营养诊断 [J]. 西北农业学报, 2000, 9 (2): 104-197.
- [5] 李俊华, 董志新, 朱继正. 氮素营养诊断方法的应用现状及展望 [J]. 石河子大学学报, 2003, 7 (1): 80-83.
- [6] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production [J]. Plant and Soil, 1981, 58: 177-204.
- [7] Cassman K G, Peng S, Olk D C, et al. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems [J]. Field Crop s Research, 1998, (56): 7-38.
- [8] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency [J]. Journal of Plant Nutrition, 2003, (26): 1315-1333.

(1) NE 养分专家系统较农民习惯施肥大幅度降低了氮肥投入量, 并相应增加了磷钾肥的施用量, 使农田养分供应更加均衡, 从而促进了作物产量的提高。从 3 年共 118 个试验的小麦玉米产量结果统计来看, NE 养分专家系统都提高了作物产量, 与农民习惯施肥相比增产幅度在 1.1%-5.2% 之间。说明在大幅度降低了氮肥投入的情况下, 基于 NE 养分专家系统的推荐施肥体系不会造成减产。

(2) 基于 NE 养分专家系统的推荐施肥体系显著提高了农田养分利用率。NE 推荐体系的氮肥偏生产力在 35.3-57.5 公斤/公斤, 显著高于农民习惯施肥处理的 20.6-33.5 公斤/公斤。表明 NE 专家系统能够有效减少养分损失, 提高农田资源利用效率。

(3) 基于 NE 养分专家系统的推荐施肥技术体系能够提高农田经济效益。在本试验条件下, NE 养分专家系统推荐施肥在玉米上能够增加 31 元/亩收入, 在小麦上则能够增收 58 元/亩。这一方面是由于肥料施用量的减少, 另一方面也归功于作物产量的稳定提高。

(4) 基于 NE 养分专家系统的推荐施肥技术能够综合考虑农田各种养分资源投入, 通过农户施肥情况调查和常年产量数据总结, 在不进行农田土壤测试的情况下进行农田养分推荐, 大幅度减少了田间取样和实验室分析所需要的时间, 在实践中也证明了其简便实用性, 作为新型的农田养分管理方法, 有很好的应用前景。



# 养分专家系统推荐施肥对河南小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响

王宜伦 苏瑞光 刘举 韩燕来 谭金芳

(河南农业大学资源环境学院 / 中原经济区小麦玉米两熟高产高效协同创新中心, 郑州 450002)

**摘要:** 为推动冬小麦、夏玉米科学施肥, 在河南冬小麦、夏玉米主产区通过 2 年的田间试验研究了冬小麦、夏玉米养分专家系统推荐施肥的产量和经济效益及基于养分专家系统推荐施肥的氮、磷、钾肥利用效率。结果表明, 养分专家系统推荐施肥对冬小麦、夏玉米有明显的增产效应, 冬小麦平均增产 3.65%, 增收 5.35%; 夏玉米平均增产 4.53%, 增收 4.00%。冬小麦养分专家系统推荐施氮平均增产 22.31%, 施磷平均增产 8.30%, 施钾平均增产 7.71%; N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 农学效率分别为 7.99、7.05 和 6.72 公斤/公斤; N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 当季回收率分别为 31.77%、14.44% 和 40.91%。夏玉米养分专家系统推荐施氮平均增产 15.75%, 施磷平均增产 8.12%, 施钾平均增产 8.86%; N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 平均农学效率分别为 9.09、14.06 和 12.31 公斤/公斤; N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 当季回收率分别为 29.39%、19.87% 和 40.31%。养分专家系统推荐施肥较好地实现养分平衡, 比习惯施肥有增产增收效果, 与 ASI 推荐施肥效果基本一致, 可作为简便科学的推荐施肥方法推广应用。

**关键词:** 冬小麦; 夏玉米; 养分专家系统; 推荐施肥; 产量; 肥料效率

小麦、玉米是中国重要的粮食作物, 提高小麦、玉米产量对保障国家粮食安全具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。河南省地处华北平原, 温度适宜、日照充足, 降雨量中等, 能满足冬小麦、夏玉米一年两熟制的生产需要, 是我国冬小麦、夏玉米的主产区。2011 年河南省冬小麦播种面积 7985.0 万亩, 总产量 3123.0 万吨, 分别占全国小麦播种总面积和总产量的 21.9% 和 26.6%; 夏玉米播种面积 4537.5 万亩, 总产量 1696.5 万吨, 分别占全国玉米播种总面积和总产量的 9.0% 和 8.8%<sup>[4-5]</sup>。河南省冬小麦、夏玉米生产在保障国家粮食安全和河南经济发展中占有重要地位。

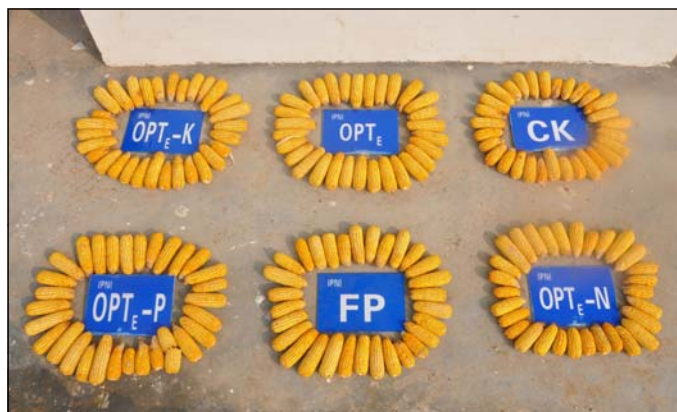
当前, 冬小麦、夏玉米生产中普遍存在过量施肥、氮磷钾肥不平衡等施肥问题, 造成肥料利用率低、施肥成本高、经济效益下降, 科学平衡施肥是增加冬小麦、夏玉米产量和提高肥料利用率的重要措施。近年来, 针对不同土壤进行测土配方施肥可促进冬小麦、夏玉米对养分的吸收利用, 提高了冬小麦、夏玉米的产量和经济效益<sup>[6-8]</sup>, ASI 法推荐施肥(通过土壤养分测试, 基于土壤养分状况、作物养分吸收量和产量目标等推荐氮磷钾肥用量)已在全国 20 多个省市广泛应用, 可以提高小麦、玉米产量、增加农民收入, 取得了显著的经济效益和社会效益<sup>[9-10]</sup>。

传统的测土配方施肥及 ASI 法推荐施肥均需采集土壤样品, 实验室分析测试后再根据目标产量等因素进行施肥推荐, 投入较大且费时费力, 养分专家系统(由国际植

本研究由中国 - 国际植物营养研究所 (IPNI) 北京办事处资助。

作者简介: 王宜伦 (1976-), 男, 博士, 副教授, 硕导, 从事植物营养与施肥研究, E-mail: wangyilunrl@163.com

通讯作者: 谭金芳 (1958-), 男, 博士, 教授, 博导, 从事植物营养与施肥及新型肥料研制, tanjf@henau.edu.cn



物营养研究所北京办事处引进并完善, 根据土壤质地性状、作物产量水平、养分管理措施及气候条件等参数通过专家系统对玉米推荐氮磷钾施用量)可以快速制定推荐施肥方案。本研究在河南省冬小麦和夏玉米主产区进行施肥调查, 由养分专家系统对冬小麦、夏玉米进行推荐施肥, 研究了养分专家系统推荐施肥对冬小麦、夏玉米产量、经济效益和肥料利用率的影响, 明确养分专家系统推荐施肥的产量效应、氮磷钾肥增产效应及肥料利用率, 以期对冬小麦、夏玉米科学施肥提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验安排

冬小麦试验于 2010 年 10 月 -2011 年 6 月在河南省新



郑、兰考、项城、宁陵、鹤壁等冬小麦主产区布置 20 个试验点；2011 年 10 月 -2012 年 6 月在河南省冬小麦主产区项城和郑州市航空港区布置 20 个试验点。供试土壤性状见表 1。

夏玉米试验于 2011 年 6 月 -2011 年 10 月，在河南省夏玉米主产区鹤壁和郑州航空港区布置 20 个试验点；2012 年 6 月 -2012 年 10 月，在夏玉米主产区鹤壁市钜桥镇、郑州市航空港区和郟城县唐庙乡，共 17 个农户试验点。

供试土壤性状见表 2。

## 1.2 试验设计

冬小麦和夏玉米四季试验均设 7 个处理，1) OPT：基于 Nutrient Expert 推荐量；2) OPT-N：不施氮肥；3) OPT-P：不施磷肥；4) OPT-K：不施钾肥；5) CK：不施任何肥料；6) OPTs：优化施肥；7) FP：农民习惯施肥。

试验前采集基础土样和进行农户施肥情况调查，土壤

表 1 冬小麦试验土壤养分状况

年份	特征值	pH	OM (%)	(毫克 / 升)											
				NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B
2010-2011	最大值	8.4	1.2	42.4	25.0	80.6	201.4	4068.8	695.0	18.6	131.8	4.9	69.3	5.2	1.2
	最小值	5.6	0.4	0.0	7.1	10.1	50.0	1495.6	123.2	15.1	10.2	1.1	3.7	0.5	0.4
	平均值	7.4	0.7	10.8	15.1	32.0	103.5	2444.9	276.1	16.1	38.5	2.4	14.2	1.7	0.8
2011-2012	最大值	8.5	1.2	8.3	106.3	94.5	146.0	231.1	21.6	22.1	4.1	7.1	4.2	2.2	2.2
	最小值	7.7	0.5	0.0	4.4	12.3	36.7	94.6	9.1	9.3	1.2	1.7	1.3	0.1	0.1
	平均值	8.3	0.7	2.4	20.1	46.0	67.3	149.3	15.0	14.9	2.4	4.0	2.6	0.6	0.6

注：本表数据为 ASI 法测定。

表 2 夏玉米试验土壤养分状况 (毫克 / 升)

年份	特征值	pH	OM (%)	(毫克 / 升)											
				NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B
2011	最大值	8.4	1.3	11.5	62.8	170.0	114.5	2861.6	353.1	15.4	4.9	33.6	31.2	3.3	12.3
	最小值	8.0	0.5	4.0	3.6	26.8	34.9	1263.1	92.5	7.8	1.4	9.5	6.7	1.5	5.4
	平均值	8.3	0.8	7.1	9.8	65.9	75.1	2060.8	215.3	10.6	2.8	19.7	13.7	2.4	9.2
2012	最大值	8.4	1.2	10.8	53.8	75.5	126.4	2922.1	322.0	56.3	16.9	2.6	8.1	3.0	1.8
	最小值	7.7	0.3	0.0	1.6	20.7	35.2	1244.8	98.3	7.2	9.0	1.0	3.0	1.0	0.3
	平均值	8.1	0.6	3.0	14.4	52.3	68.2	1960.6	211.4	22.2	12.7	1.7	6.0	2.0	0.9

注：本表数据为 ASI 法测定。

表 3 冬小麦不同处理施肥量 (公斤 / 亩)

处理号	特征值	2010.10-2011.6			2011.10-2012.6		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
OPT	最大值	10.3	4.5	5.3	13.9	7.1	6.9
	最小值	9.3	4.5	4.0	11.1	4.8	5.0
	平均值	9.6	4.5	4.7	12.2	6.5	6.0
OPTs	平均值	14.0	4.0	6.0	14.2	4.1	6.0
FP	最大值	19.3	15.0	15.0	23.0	15.7	9.0
	最小值	7.5	4.8	0.0	7.5	0.0	0.0
	平均值	12.5	8.3	8.0	13.2	7.9	5.9

表 4 夏玉米不同处理施肥量 (公斤 / 亩)

处理号	特征值	2011			2012		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
OPT	最大值	12.1	3.7	5.1	13.9	5.3	6.0
	最小值	10.0	3.5	4.1	10.0	4.1	4.0
	平均值	10.9	3.7	4.8	11.9	4.7	5.3
OPTs	最大值	18.0	4.0	8.0	18.0	5.0	8.0
	最小值	13.0	2.0	4.0	13.0	3.0	4.0
	平均值	17.1	3.0	6.1	16.7	3.3	6.1
FP	最大值	23.0	16.8	8.0	12.7	6.9	6.9
	最小值	7.5	0.0	0.0	10.7	6.0	6.0
	平均值	14.9	6.9	2.3	11.7	6.3	6.3

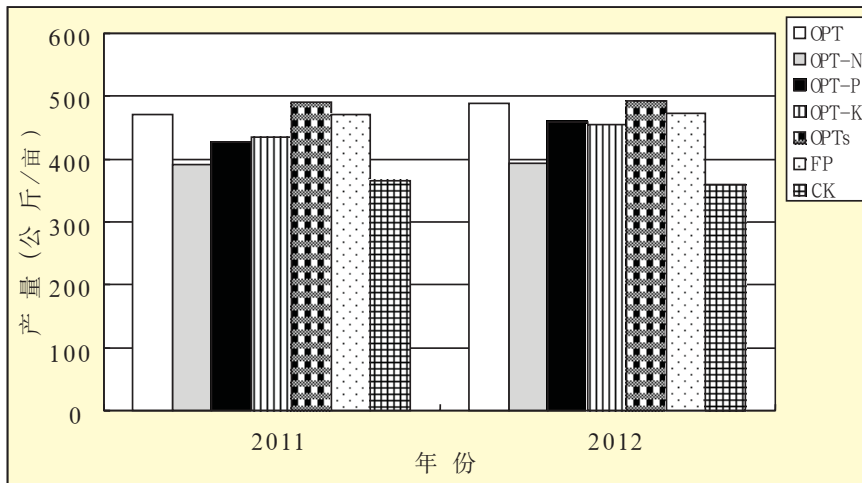


图 1 不同处理对冬小麦产量的影响

表 5 推荐施肥及氮磷钾肥增产效应 (%)

年份	特征值	OPT 比 FP	OPTs 比 FP	施氮增产率	施磷增产率	施钾增产率
2011	最大值	11.41	30.00	39.16	21.72	19.25
	最小值	-7.46	-3.10	9.45	2.90	2.43
	平均值	0.31	5.05	20.69	9.94	8.52
2012	最大值	10.86	9.18	40.18	13.44	14.89
	最小值	-3.06	-3.20	10.66	2.07	3.34
	平均值	3.65	4.23	24.72	7.00	7.42

送北京 IPNI 中加合作土壤测试实验室测定并推荐施肥 (OPTs), 根据农户调查结果, 依据养分专家系统进行施肥推荐 (OPT)。试验用氮肥为尿素 (N46.1%), 磷肥为过磷酸钙 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>16%), 钾肥为氯化钾 (K<sub>2</sub>O 60%)。磷、钾肥全部在播前施用, 氮肥 50% 基肥, 50% 做拔节期追肥。小区面积为 60 平方米。施肥量见表 3 和表 4。

### 1.3 样品采集与分析

冬小麦、夏玉米播种前采集 0-20 厘米混合土壤样品, 送中国农业科学院中国 - 加拿大合作实验室, 用 ASI 法测定土壤养分。

在冬小麦、夏玉米成熟期采集各小区代表性的小麦植株样品, 分为籽粒和秸秆两部分, 在 105℃ 下杀青 15 分钟, 再于 65℃ 下烘干至恒定质量, 称重、粉碎后分析植株氮磷钾含量。采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮制备待测液, 并采用蒸馏定氮法、钒钼黄比色法和火焰光度计法分别测定植株全氮、全磷和全钾<sup>[11]</sup>。

### 1.4 计产方法

冬小麦成熟期收获每小区 3 平方米样段计算小区产量。玉米收获时, 任取 2 处测量 3 行玉米株距长度和 3 米行长的玉米株数, 取平均值计算种植密度, 随机收获 30 穗夏玉米晒干称质量, 含水量以 14% 计算。

### 1.5 有关指标计算与统计方法

肥料养分回收率 (%) = (施肥区养分积累量 - 无肥区养分积累量) / 施肥量 × 100%

肥料农学效率 (公斤 / 公斤) = (施肥区籽粒产量 - 无肥区籽粒产量) / 施肥量

试验数据采用 DPS7.55 和 Excel 2003 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 冬小麦养分专家系统推荐施肥效应

#### 2.1.1 不同处理对冬小麦产量的影响

将不同农户各处理产量平均值列为图

1, 2011年各施肥处理较CK增产6.88%-34.40%, OPT与FP产量基本相同;基于养分专家系统推荐施氮平均增产20.29%,施磷平均增产9.87%,施钾平均增产8.12%。2012年各施肥处理较CK增产9.26%-36.69%,OPT较FP增产3.60%;基于养分专家系统推荐施氮平均增产24.33%,施磷平均增产6.73%,施钾平均增产7.29%。氮磷钾化肥平衡施用对冬小麦均有明显的增产效应。

表5表明,2011年OPT较FP最大增产11.41%,最大减产7.46%,增产率平均为0.31%。增产的占35%,其中增产>5%的占10%,增产<5%的占25%;减产的占65%,其中减产>5%的占10%,减产<5%的占55%。基于养分专家系统推荐施氮最大增产39.16%,最小增产9.45%,平均为20.69%;施磷最大增产21.72%,最小增产2.90%,平均为9.94%;施钾最大增产19.25%,最小增产2.43%,平均为8.52%。

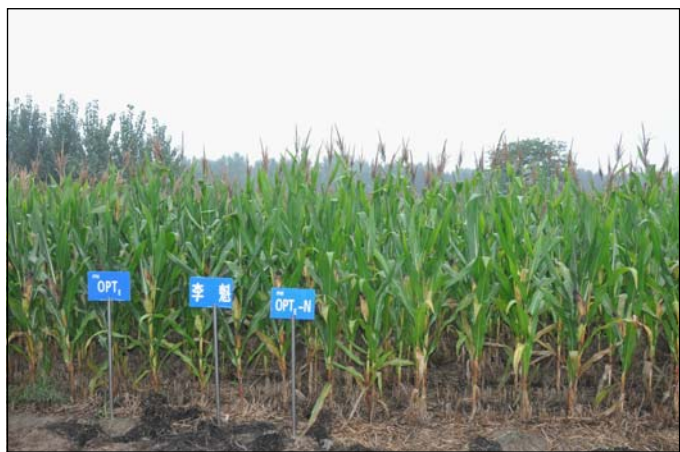
2012年OPT较FP最大增产10.86%,最大减产3.06%,增产率平均为3.65%。增产的占90%,其中增产>5%的占30%,增产<5%的占60%;减产的占15%,减产<5%的占10%。基于养分专家系统推荐施氮最大增产40.18%,最小增产10.66%,平均为24.72%;施磷最大增产13.44%,最小增产2.07%,平均为7.00%;施钾最大增产14.89%,最小增产3.34%,平均为7.42%。

### 2.1.2 推荐施肥对冬小麦经济效益的影响

从表6可以看出,2011年OPT收益最大,其次是OPTs,OPT平均收益较FP增收43元/亩;统计表明,

年份	试验点	OPT 效益	OPTs 效益	FP 效益	OPT 比 FP 增收	OPTs 比 FP 增收
2011	最大值	1004	974	953	51	21
	最小值	677	696	625	52	71
	平均值	855	854	812	43	42
2012	最大值	1050	1129	1136	77	62
	最小值	633	646	596	-86	-40
	平均值	895	906	888	6	18

处理号	特征值	农学效率(公斤/公斤)			肥料利用率(%)		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2010-2011	最大值	12.90	18.46	13.13	49.00	25.44	67.49
	最小值	3.64	3.18	1.75	15.05	6.42	10.22
	平均值	8.14	9.20	7.78	32.62	13.19	44.27
2011-2012	最大值	12.47	13.01	12.80	38.65	21.75	58.92
	最小值	3.55	1.28	1.73	23.70	10.23	22.32
	平均值	7.83	4.89	5.66	30.92	15.68	37.54



OPT较FP增收的有15户,占75%,OPT比FP平均增收5.35%。2012年OPTs收益最大,其次是OPT,OPT平均收益较FP增收6元/亩;统计表明,OPT较FP增收的有12户,占60%,OPT比FP平均增收1.11%。养分专家系统推荐施肥较农户习惯施肥实现了增收。

### 2.1.3 基于NE推荐施肥的肥料利用效率

表7表明,2011年基于养分专家系统推荐施肥的冬小麦氮、磷和钾肥农学效率平均为8.14、9.20和7.78公斤/公斤,氮、磷和钾肥回收率平均分别为32.62%、13.19%和44.27%。2012年冬小麦氮、磷和钾肥农学效率平均为7.83、4.89和5.66公斤/公斤,氮、磷和钾肥回收率平均分别为30.92%、15.68%和37.54%。

## 2.2 夏玉米养分专家系统推荐施肥效应

### 2.2.1 不同处理对夏玉米产量的影响

将不同农户的各处理产量取其平均值(见图2),2011年各施肥处理较CK平均增产6.76%-25.11%,OPT产量最高,较FP增产2.02%;基于养分专家系统推荐施氮平均增产17.18%,施磷平均增产8.87%,施钾平均增产9.72%。2012年各施肥处理较CK平均增产2.00%-18.32%,OPTs平均产量最高,其次是OPT,OPT较FP增产4.53%。基于养分专家系统推荐施氮平均增产14.32%,施磷平均增产7.37%,施钾平均增产7.99%。养分专家系统推荐施肥对夏玉米有明显的增产作用。

表8表明,2011年OPT较FP最大增产20.16%,最大减产10.92%,增产率平均为2.61%。增产的占63%,其中增产>5%

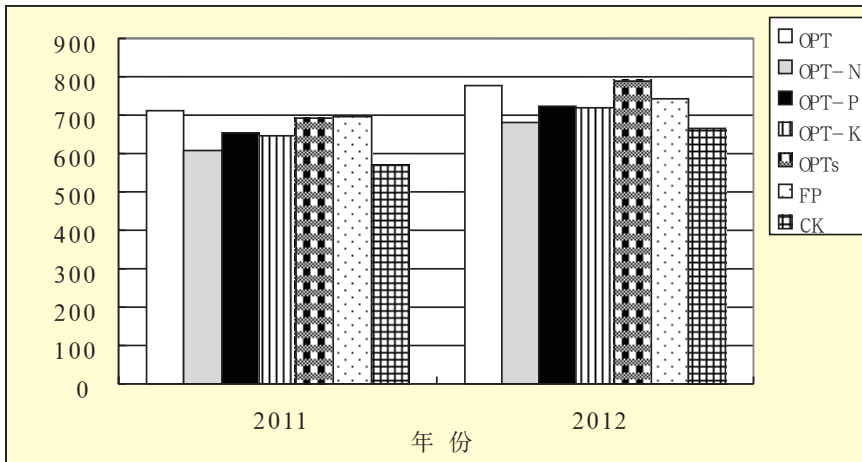


图2 不同处理对夏玉米产量的影响

表8 推荐施肥及氮磷钾肥增产效应 (%)

年份	统计值	OPT 比 FP	OPTs 比 FP	施氮增产率	施磷增产率	施钾增产率
2011	最大值	20.16	26.74	33.22	14.07	15.44
	最小值	-10.92	-9.85	10.87	3.12	3.14
	平均值	2.61	0.26	17.54	8.95	9.92
2012	最大值	23.80	25.79	26.01	15.57	19.17
	最小值	-1.01	-5.19	7.17	2.61	2.02
	平均值	5.75	7.16	15.34	8.04	8.83

表9 推荐施肥对夏玉米经济效益的影响

年份	统计值	OPT 收益 (元/亩)	OPTs 收益 (元/亩)	FP 收益 (元/亩)	OPT 比 FP 增收 (%)	OPTs 比 FP 增收 (%)
2011	最大值	1569	1515	1531	14.82	3.77
	最小值	1151	1118	1154	-11.89	-3.43
	平均值	1391	1323	1334	4.42	-0.86
2012	最大值	1812	1788	1761	10.39	1.66
	最小值	1226	1227	1249	-11.19	-2.86
	平均值	1504	1505	1509	-0.29	-0.31

表10 基于养分专家系统推荐施肥的肥料利用效率

年份	统计值	农学效率 (公斤/公斤)			肥料利用率 (%)		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2011	最大值	14.04	27.46	19.74	41.36	39.26	61.76
	最小值	6.34	5.63	4.54	19.36	20.52	22.47
	平均值	9.61	16.02	13.13	32.64	26.38	40.90
2012	最大值	12.84	25.08	25.41	31.53	17.59	56.69
	最小值	4.56	4.10	2.80	20.50	8.11	24.18
	平均值	8.57	12.09	11.49	26.14	13.36	39.71

的占31%，增产 < 5% 的占32%；减产的占37%，其中减产 > 5% 的占11%，减产 < 5% 的占26%；基于养分专家系统推荐施氮平均增产17.54%，施磷平均增产8.95%，施钾平均增产9.92%。2012年OPT较FP最大增产23.80%，最大减产1.01%，增产率平均为5.75%；增产的占88.2%，其中增产 > 5% 的占41.2%；基于养分

专家系统推荐施氮平均增产15.34%；施磷平均增产8.04%；施钾平均增产8.83%。氮磷钾化肥平衡施用对夏玉米均有较好的增产效果。

### 2.2.2 推荐施肥对夏玉米经济效益的影响

从表9可以看出，2011年OPT收益最大，较FP平均增收57元/亩。统计表明，OPT较FP增收的有14户，占70%，平均增收4.42%，养分专家系统推荐施肥较农户习惯施肥实现了增收。2012年OPT、OPTs和FP的收益基本一致，OPT较FP增收的占35.3%，由于养分专家系统推荐施肥量与农户习惯施肥量基本一致，没有表现出明显的增收效果。

### 2.2.3 基于NE推荐施肥的夏玉米肥料利用效率

表10表明，2011年基于养分专家系统推荐施肥的氮、磷、钾肥农学效率平均值分别为9.61、16.02和13.13公斤/公斤；氮、磷和钾肥回收率平均值分别为32.64%、26.38%和40.90%。2012年基于养分专家系统推荐施肥的氮、磷、钾肥农学效率平均值分别为8.57、12.09和11.49公斤/公斤；氮、磷和钾肥回收率平均值分别为26.14%、13.36%和39.71%。

## 3 结论

本试验条件下，冬小麦养分专家系统推荐施肥量少而平衡，与农民习惯施肥的产量基本相当，平均增产3.65%，增收5.35%。冬小麦养分专家系统推荐施氮平均增产22.31%，施磷平均增产8.30%，施钾平均增产7.71%，氮磷钾化肥平衡施用对冬小麦均有明显的增产效应。基于养分专家系统推荐施肥的N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O平均农学效率分别为7.99、7.05和6.72公斤/公斤；N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O当季回收率分别为31.77%、14.44%和40.91%。

夏玉米冬小麦养分专家系统推荐施肥较农户习惯施肥平均增产4.53%，增收4.00%。养分专家系统推荐施氮平



均增产 15.75%，施磷平均增产 8.12%，施钾平均增产 8.86%，氮磷钾化肥平衡施用对夏玉米亦有较好的增产效果。基于养分专家系统推荐施肥的 N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  平均农学效率分别为 9.09、14.06 和 12.31 公斤/公斤；N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$  当季回收率分别为 29.39%、19.87% 和 40.31%。

张福锁<sup>[12]</sup>等报道了我国玉米氮、磷、钾肥利用率分

别为 26.1%、11.0%、31.9%，农学效率分别为 9.8、7.5 和 5.7 公斤/公斤。本研究表明，养分专家系统推荐施肥的氮、磷、钾肥利用率及农学效率均高于全国平均水平，养分专家系统推荐施肥能够有效提高肥料利用效率。养分专家系统推荐施肥简便、快速、科学，其推广应用对于提高肥料利用效率、节约资源和保护环境具有积极意义。

## 参考文献

- [1] 钟永玲, 曹慧. 中国小麦产业发展现状、调控政策及建议 [J]. 农学学报, 2011, 1(12): 49-54.
- [2] 王旭, 李贞宇, 马文奇, 等. 中国主要生态区小麦施肥增产效应分析 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(12): 2469-2476.
- [3] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响 [J]. 作物学报, 2011, 37(2): 339-347.
- [4] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 河南统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.9.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.9.
- [6] 李丹, 孙志梅, 王艳群, 等. 氮磷钾和微肥对高肥区夏玉米养分积累, 分配及产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 32-36.
- [7] 黄国斌, 李家贵. 测土配方施肥对玉米养分吸收、产量及效益的影响 [J]. 贵州农业科学, 2010, 38(1): 23-25.
- [8] 赖丽芳, 吕军峰, 郭天文, 等. 平衡施肥对春玉米产量和养分利用率的影响 [J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 130-132.
- [9] 王贺, 自由路, 杨俐苹, 等. 基于 ASI 方法的推荐施肥在东北玉米上的应用 [J]. 中国土壤与肥料, 2010, (5): 31-37.
- [10] 金继运, 自由路, 杨俐苹, 等. 高效土壤养分测试技术与设备 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 74.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 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.

# 养分专家系统推荐施肥对山东小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响

魏建林<sup>1</sup> 崔荣宗<sup>1\*</sup> 肖建军<sup>2</sup> 杨果<sup>1</sup>

(1. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 山东 济南 250100; 2. 平原县农业局土壤肥料工作站, 山东 平原 253100)

**摘要:** 在山东省平原县小麦、玉米生产上以农户地块为重复, 对 Nutrient Expert 专家推荐系统施肥方法 (OPT-NE) 进行田间试验验证, 同时以农民习惯施肥 (FP) 和当地推荐施肥 (OPT-Local) 为对照。结果表明, 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理在当地小麦、玉米生产上与农民习惯施肥及当地推荐施肥处理产量无明显差异。扣除肥料投入成本分析生产收益显示, 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理在当地小麦、玉米生产上与农民习惯施肥相比增收效果明显, 并优于当地推荐施肥处理。基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理减少了氮养分投入, 平衡了磷钾养分投入, 实现了与农民习惯施肥及当地推荐施肥相持平的产量, 提高了生产收益, 降低了过量投入化肥带来的环境风险。

## 前言

建国以来尤其是改革开放以来, 我国在各个领域都取得了举世瞩目的成就。在农业上我们创造了用世界 9% 的耕地养活全球五分之一人口的奇迹, 粮食产量大幅增加, 肥料的贡献功不可没。据估计, 1978-2006 年间化肥投入对中国粮食产量的贡献率达 56.81%<sup>[1]</sup>。但相关资料和大量的研究表明, 我国农户在农业生产中的许多施肥行为是不合理的, 比较突出的有: 施肥强度大, 化肥利用率不高; 化肥投入的养分比例不平衡, 氮素过量施用, 磷、钾素及中、微量元素肥料施用比例偏低等<sup>[2-5]</sup>。人多地少的基本国情和人们对于粮食需求日益增长, 形成了我国特有的依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<sup>[6-7]</sup>。由此带来的土壤板结、地力下降、面源污染、环境恶化和食品安全问题日趋凸显<sup>[8-13]</sup>, 因而在党的十八大报告上把生态文明建设摆在总体布局的高度来论述。坚持以生态文明引领农业农村可持续发展, 建设生态化现代农业农村, 是我国农业走出困境、步入可持续发展良性循环的根本出路。

土壤肥料研究工作者一直为合理利用肥料、培肥土壤地力、提高粮食产量而努力, 在土壤养分管理和推荐施肥方面做了大量研究<sup>[14-19]</sup>。传统施肥推荐方法大多以土壤测试为基础, 根据土壤的物理性状、养分含量和作物的目标产量来确定施肥, 这种方法能够做到肥料施用较为科学、合理。但土壤测试的成本较高, 需要的时间也长, 同时我国幅员辽阔, 目前还是主要以分散的小农户为经营单位, 地块间地力存在一定差异, 要实现一家一户依据土壤测试结果推荐施肥是相当困难的。国际植物营养研究所 (IPNI)

开展了基于作物产量反应和农学效率的作物养分管理和推荐施肥方法 (Nutrient Expert) 研究<sup>[20-22]</sup>, 该推荐方法的原理是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, 利用大量已有的作物养分吸收和产量的关系数据, 结合当地的气候、环境及种植习惯等, 确定施肥推荐相关参数, 根据目标产量给出施肥数量和施肥方法。山东省自 2010 年开始已经开展了 3 年多的 Nutrient Expert 专家推荐系统在小麦、玉米上田间验证试验研究 (小麦 2 季, 玉米 3 季), 以下是验证试验情况的简要总结。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区域概况

试验地点位于山东省德州市平原县境内, 该区域属于鲁西北黄河冲积平原, 土壤类型为潮土, 质地为轻壤土。处于暖温带半湿润季风气候区, 年平均气温 13.1℃, 年平均降水量 641.5 毫米, 当地农田水浇条件良好。小麦玉米轮作是当地的主要种植模式, 小麦产量一般在 550 公斤/亩左右, 玉米产量一般在 650 公斤/亩左右。

### 1.2 试验地块土壤基本理化性状

试验前取试验地块耕层土壤分别用 ASI 法和常规法进行理化性状分析。ASI 法土壤测试结果显示, 当地土壤有机质含量在 0.38-0.64%, 平均为 0.49%, 变异系数 14.1%, 铵态氮含量在 1-14.1 毫克/升, 平均 5.29 毫克/升, 变异系数为 63.1%。硝态氮含量在 14.8-71.5 毫克/升,

平均 39.26 毫克 / 升, 变异系数为 37.9%。速效磷含量在 15.9-73.4 毫克 / 升, 平均 39.73 毫克 / 升, 变异系数为 33.1%。速效钾含量在 36.8-148 毫克 / 升, 平均 83.12 毫克 / 升, 变异系数为 24.3%。常规法土壤测试结果显示, 当地土壤有机质含量在 1.14-1.53%, 平均 1.35%, 变异系数 6.9%。碱解氮含量在 66.4-112.7 毫克 / 公斤, 平均 86.27 毫克 / 公斤, 变异系数为 12.2%。速效磷含量在 19.7-57.3 毫克 / 公斤, 平均 40.48 毫克 / 公斤, 变异系数为 22.2%。速效钾含量在 82.2-236.3 毫克 / 升, 平均为 138.69 毫克 / 公斤, 变异系数为 28.1%。

### 1.3 试验设计

以农户为重复, 每户设 7 个处理, 每户试验前进行农户施肥情况调查, 根据调查结果, 由 Nutrient Expert 施肥推荐系统进行分析, 提出当季作物生产上的推荐施肥处理 (OPT-NE), 据 Nutrient Expert 进行施肥推荐。各处理如下:

OPT-NE: 基于 Nutrient Expert 推荐量

OPT-Local: 由当地农技推广部门提供优化施肥方案

OPT-N: 基于 Nutrient Expert 推荐量, 不施氮肥

OPT-/+P: 基于 Nutrient Expert 推荐量, 不 / 增施磷肥

OPT-/+K: 基于 Nutrient Expert 推荐量, 不 / 增施钾肥

CK: 不施任何肥料

FP: 农民习惯施肥, 在农民地里进行, 不单独划小区做试验。

每个种植季节根据研究需要, 小区设计和布置上不尽一致。本文中主要分析 Nutrient Expert 推荐施肥方式与农民习惯施肥方式及当地推荐方式间的差异, 因此只对 OPT-NE、FP、OPT-Local 三个处理的结果进行对比分析。2010 年、2011 年夏玉米季及 2011 年小麦季 (2010 年 10 月播种, 2011 年 6 月收获) 小区面积为 40 平方米, 2012 年夏玉米季和 2012 年小麦季 (2011 年 10 月播种, 2012 年 6 月收获) 小区面积为 60 平方米。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米试验结果

2010 年 25 户试验结果显示, 农民习惯施肥 (FP) 处理玉米产量 376.7-538.3 公斤 / 亩,

平均 431.2 公斤 / 亩, OPT-NE 处理产量 393.3-580.0 公斤 / 亩, 平均 433.4 公斤 / 亩, 比 FP 平均增产 0.6%。OPT-Local 处理产量 393.3-545.0 公斤 / 亩, 平均 438.5 公斤 / 亩, 比 FP 平均增产 1.9%。从产量增减分布情况看, 相对于 FP 处理, 有 58% 的农户的 OPT-NE 处理表现为增产, 增产幅度在 5% 以上占总农户的 24%。而 OPT-Local 处理表现为增产的比例为 60%, 其中有 32% 的农户增产幅度超过 5%。

2011 年 20 户试验结果显示, 农民习惯施肥处理 (FP) 玉米产量 453.3-618.3 公斤 / 亩, 平均 545.5 公斤 / 亩, OPT-NE 处理产量 457.8-606.5 公斤 / 亩, 平均 540.1 公斤 / 亩, 比 FP 平均减产 0.9%。OPT-Local 处理产量 440.0-630.0 公斤 / 亩, 平均 544.8 公斤 / 亩, 比 FP 平均减产 0.1%。从产量增减分布情况看, OPT-Local 增产效果优于 OPT-NE 处理, 相对于 FP 处理, 有 60% 的农户的 OPT-NE 处理表现为减产, 其中有 1 户减产幅度在 5% 以上。而 OPT-Local 处理表现为增产的比例为 60%, 其中有 1 户增产幅度在 5% 以上。

2012 年 18 户试验结果显示, 农民习惯施肥处理 (FP) 玉米产量 540.0-727.2 公斤 / 亩, 平均 637.0 公斤 / 亩, OPT-NE 处理产量 552.6-676.0 公斤 / 亩, 平均 614.8 公斤 / 亩, OPT-NE 处理相对 FP 平均减产 3.3%。OPT-Local 处理产量 572.4-711.0 公斤 / 亩, 平均 623.3 公斤 / 亩, 相对于 FP 处理 OPT-Local 平均减产 2.0%, 从产量增减分布情况看, OPT-NE 处理与 OPT-Local 处理相对于 FP 处理表现一致, 均是有 66.7% 的农户表现为减产。

从三个年度试验结果看, 同一年度不同处理间产量统计分析均未达到显著性水平 (图 1)。

2010 年玉米生产中农民习惯施肥处理 (FP) 纯收入 649.5-979.5 元 / 亩, 平均 760.4 元 / 亩, OPT-NE 处理纯

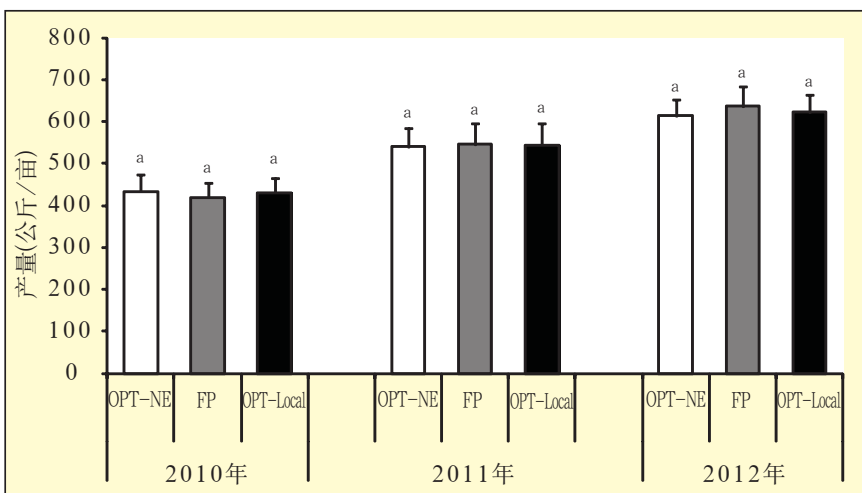


图 1 历年玉米产量比较





收入 714.1-1086.8 元/亩，平均 794.0 元/亩，比 FP 平均增收 4.6%。OPT-Local 处理纯收入 687.8-990.1 元/亩，平均 777.6 元/亩，比 FP 平均增收 2.6%。2011 年农民习惯施肥处理 (FP) 纯收入 946.1 -1287.9 元/亩，平均 1146.1 元/亩，OPT-NE 处理纯收入 983.2-1348.7 元/亩，平均 1188.1 元/亩，比 FP 平均增收 3.76%。OPT-Local 处理纯收入 881.4-1306.6 元/亩，平均 1116.4 元/亩，比 FP 平均减收 2.56%。2012 年农民习惯施肥处理 (FP) 纯收入 1091.5-1499.5 元/亩，平均 1290.0 元/亩，OPT-NE 处理纯收入 1138.1-1395.5 元/亩，平均 1271.9 元/亩，比 FP 平均减收 1.4%。OPT-Local 处理纯收入 1169.5-1472.4 元/亩，平均 1278.2 元/亩，比 FP 平均增收 0.9%。

从三个年度试验结果看，2010 年度、2011 年度种植玉米收益 OPT-NE 处理均高于其他两个处理，与 FP 处理相比差异均达到显著性水平。2012 年度不同处理间种植玉米收益差异未达到显著性水平 (图 2)。

养分表观平衡计算结果 (表 1) 显示，除 2011 年度 OPT-NE 处理磷钾略有亏缺外，各年份其它处理氮磷钾养分均表现为盈余，其中氮盈余量最大，磷钾养分盈余相对较小。OPT-NE 处理氮盈余 3.6-4.7 公斤/亩，平均 4.1 公斤/亩；磷盈余 -1.4-1.9 公斤/亩，平均 0.5 公斤/亩；钾盈余 -0.1-2.8 公斤/亩，平均 1.3 公斤/亩。FP 处理氮盈余 8.2-13.4 公斤/亩，平均 10.1 公斤/亩；磷盈余 1.2-2.3 公斤/亩，平均 1.9 公斤/亩；钾盈余 1.6-2.2 公斤/亩，

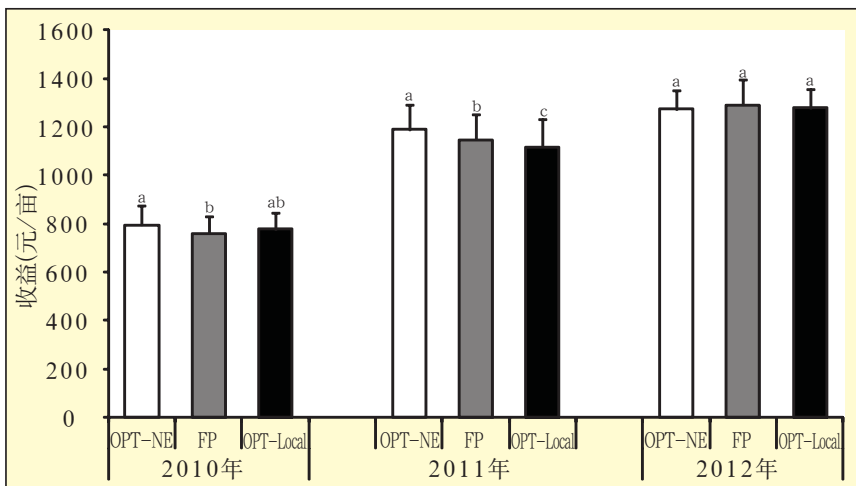


图 2 历年玉米生产效益比较

平均 1.8 公斤/亩。OPT-Local 处理氮盈余 5.3-11.2 公斤/亩，平均 8.3 公斤/亩；磷盈余 1.0-3.5 公斤/亩，平均 2.0 公斤/亩；钾盈余 2.4-5.6 公斤/亩，平均 3.5 公斤/亩。从不同处理来看，各年度中均以 OPT-NE 处理氮盈余量最小，习惯施肥处理的氮盈余量最大。

## 2.2 小麦试验结果

2011 年 30 户试验结果显示，农民习惯施肥处理 (FP) 小麦产量 503.1-623.1 公斤/亩，平均 551.0 公斤/亩，OPT-NE 处理产量

表 1 各年份玉米生产上 OPT-NE、FP、OPT-Local 处理养分表观平衡情况

年份	农户数	处理	施肥量 (公斤/亩)			养分移走量 (公斤/亩)			养分平衡 (公斤/亩)		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2010	25	OPT-NE	9.3	3.4	4.0	4.6	2.4	1.2	4.7	1.0	2.8
		FP	18.1	3.5	2.8	4.7	2.3	1.2	13.4	1.2	1.6
		OPT-Local	16.0	3.4	4.0	4.8	2.4	1.4	11.2	1.0	2.7
2011	20	OPT-NE	10.1	0.1	1.3	6.5	1.5	1.4	3.6	-1.4	-0.1
		FP	15.3	3.8	3.1	6.5	1.5	1.4	8.8	2.2	1.7
		OPT-Local	15.0	5.0	7.0	6.6	1.5	1.4	8.4	3.5	5.6
2012	18	OPT-NE	10.6	3.0	2.3	6.5	1.2	1.2	4.1	1.9	1.1
		FP	14.9	3.6	3.4	6.7	1.2	1.3	8.2	2.3	2.2
		OPT-Local	12.0	2.6	3.6	6.8	1.2	1.2	5.3	1.4	2.4

483.2-650.3 公斤/亩, 平均 556.9 公斤/亩, 比 FP 平均增产 1.14%。OPT-Local 处理产量 509.9-652.3 公斤/亩, 平均 572.3 公斤/亩, 比 FP 平均增产 3.96%。从产量增减分布情况看, 相对于 FP 处理, 有 53.3% 农户的 OPT-NE 处理表现为增产, 增产幅度在 5% 以上占总农户的 23.3%。而 OPT-Local 处理表现为增产的比例为 76.7%, 其中有 43.3% 的农户增产幅度超过 5%。

2012 年 29 户试验结果显示, 农民习惯施肥处理小麦产量 443.6-574.9 公斤/亩, 平均 500.7 公斤/亩, OPT-NE 处理产量 452.6-596.6 公斤/亩, 平均 504.8 公斤/亩,

相对 FP 平均增产 0.9%。OPT-Local 处理产量 448.3-581.3 公斤/亩, 平均 506.9 公斤/亩, 相对 FP 平均增产 1.4%。从产量增减分布情况看, OPT-NE 处理与 OPT-Local 处理相对于 FP 处理表现一致, 均有 65.5% 的农户表现为增产。

从两个年度试验结果看, 2011 年度 OPT-Local 处理相对于 FP 处理增产达到显著性水平, 而 OPT-NE 处理与 FP 处理之间产量无显著性差异, OPT-NE 处理与 OPT-Local 处理之间产量也无显著性差异。2012 年度三个处理间产量未达显著差异 (图 3)。



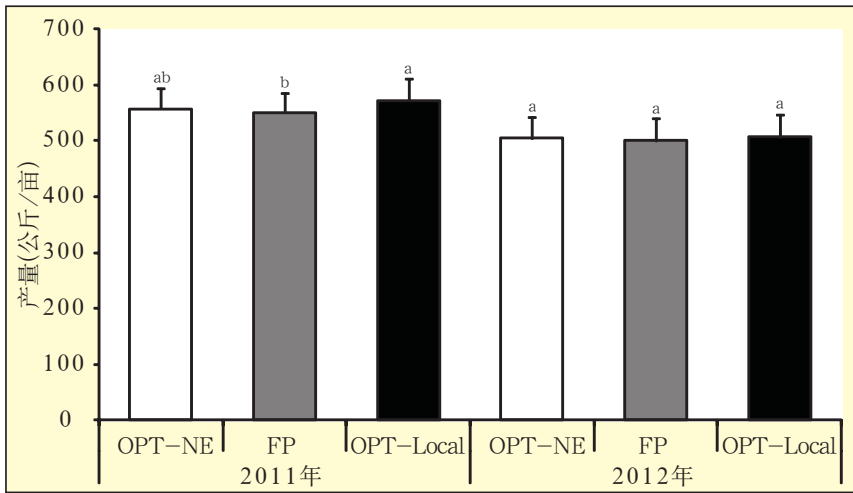


图3 历年小麦产量结果

从小麦种植经济效益结果分析看，2011年农民习惯施肥处理（FP）纯收入 907.4-1190.6 元/亩，平均 1019.6 元/亩，OPT-NE 处理纯收入 930.2-1291.7 元/亩，平均 1090.0 元/亩，比 FP 平均增收 7.1%。OPT-Local 处理纯收入 941.4-1243.2 元/亩，平均 1073.6 元/亩，比 FP 平均增收 5.4%。从增收幅度分布看，OPT-NE 增收效果优于 OPT-Local 处理，相对于 FP 处理，有 93.3% 的农户的 OPT-NE 处理表现为增收，而 OPT-Local 处理表现为增

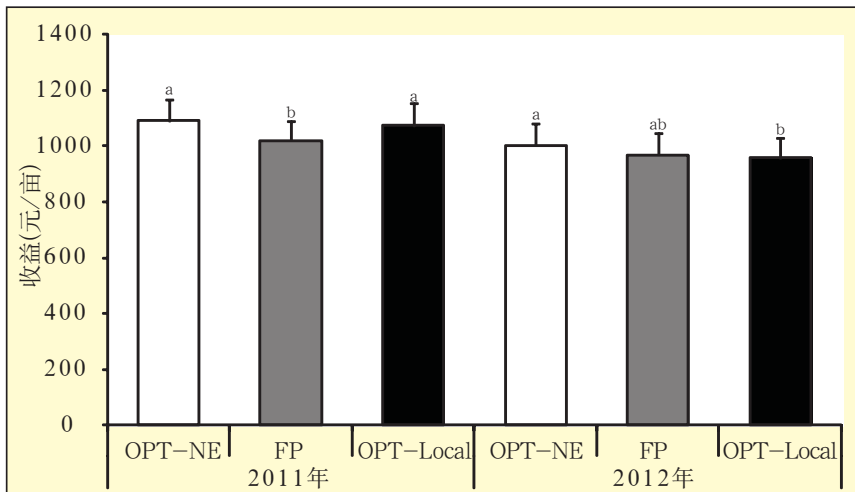


图4 历年小麦生产效益比较

收的比例为 83.3%。

2012年农民习惯施肥处理（FP）纯收入 851.1-1147.4 元/亩，平均 968.0 元/亩，OPT-NE 处理纯收入 896.2-1201.8 元/亩，平均 1003.6 元/亩，比 FP 平均增收 4.9%。OPT-Local 处理纯收入 847.8-1095.4 元/亩，平均 957.5 元/亩，比 FP 平均减收 1.1%。从增收幅度的分布看，OPT-NE 增收效果优于 OPT-Local 处理，相对于 FP 处理，有 90% 的农户的 OPT-NE 处理表现为增收。

从两个年度试验结果看，在小麦生产上 OPT-NE 处理收益高于其他两个处理，2011

年度相对于 FP 处理增收达到显著性差异水平，与 OPT-Local 相比无明显差异。2012 年度 OPT-NE 处理收益与 FP 处理差异不显著，与 OPT-Local 相比差异显著（图 4）。

养分表观平衡计算结果（表 2）显示，2011 年度 OPT-NE 处理氮磷养分亏缺，钾养分盈余，FP 和 OPT-Local 氮磷钾养分均表现为盈余，其中 FP 处理氮盈余最多，盈余量为 13.7 公斤/亩，OPT-Local 磷盈余量最大，盈余量为 3.7 公斤/亩。2012 年除 FP 处理钾养分略有亏缺外，其他养分均表现为盈余。FP 处理、OPT-Local 处理氮盈余量较大，盈余量分别为 9.6、9.0 公斤/亩。OPT-NE 处理氮盈余相对较小，仅为 1.3 公斤/亩。从不同处理养分盈余量两年试验结果看，OPT-NE 处理平均氮亏缺 1 公斤/亩，磷盈余 1 公斤/亩，钾盈余 2.6 公斤/亩。FP 处理平均氮盈余 11.6 公斤/亩，磷盈余 3.3 公斤/亩，钾收支平衡。OPT-Local 处理平均氮盈余 6.9 公斤/亩，磷盈余 5.7 公斤/亩，钾盈余 1.7 公斤/亩。FP 处理相比 OPT-NE 处理氮平均盈余 10 公斤/亩以上。

表2 各年份小麦生产上 OPT-NE、FP、OPT-Local 处理养分表观平衡情况

年份	农户数	处理	施肥量 (公斤/亩)			养分移走量 (公斤/亩)			养分平衡 (公斤/亩)		
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2011	30	OPT-NE	9.3	5.2	4.0	12.5	6.8	2.1	-3.2	-1.6	1.9
		FP	24.8	8.0	2.4	11.1	5.8	2.0	13.7	2.2	0.4
		OPT-Local	16.1	10.0	4.0	11.3	6.3	2.2	4.8	3.7	1.8
2012	29	OPT-NE	11.4	5.1	4.5	10.1	1.6	1.3	1.3	3.5	3.2
		FP	19.6	6.1	0.9	10.1	1.5	1.2	9.6	4.5	-0.3
		OPT-Local	19.1	9.3	2.9	10.1	1.6	1.2	9.0	7.7	1.6

### 3 结论

基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥方法在山东省小麦、玉米生产上 2-3 年的田间验证试验可得出如下结论:

1) 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理在当地小麦、玉米生产上与农民习惯施肥及当地推荐施肥处理产量无明显差异。从增产幅度的分布看当地推荐施肥方案增产效果略优于专家系统推荐施肥方案。

2) 从粮食生产效益分析结果看, 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理在小麦、玉米生产上与农

民习惯施肥相比增收效果明显, 且优于当地推荐处理。

3) 基于 Nutrient Expert 专家系统推荐施肥处理减少了氮养分投入, 平衡了磷钾养分投入, 实现了与农民习惯施肥及当地推荐施肥相持平的产量, 提高了生产收益, 并且减小了农业生产中氮素养分在土壤中的盈余, 降低了过量投入化肥带来的环境风险, 因此具有较高的生态效益和社会效益。

实践证明基于 Nutrient Expert 专家系统推荐是一种可以实现稳产增收、保护生态环境的推荐施肥方法, 而且成本低廉、简便易行, 值得推广。

### 参考文献

- [1] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析 [J]. 农业经济问题, 2008, (8): 65-68.
- [2] 高祥照, 马文奇, 杜森, 等. 我国施肥中存在问题的分析 [J]. 土壤通报, 2001, (6): 258-261.
- [3] 曾希柏, 李菊梅. 中国不同地区化肥施用及其对粮食生产的影响 [J]. 中国农业科学, 2004, (3): 387-392, 469-470.
- [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 [J]. 土壤学报, 2008, (5): 915-924.
- [5] 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, (2): 450-459.
- [6] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285-293.
- [7] 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.
- [8] 曹志洪. 施肥与水体环境质量 - 论施肥对环境的影响 (2) [J]. 土壤, 2003, (5): 353-363.
- [9] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策 [J]. 生态环境, 2004, (4): 656-660.
- [10] 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 世纪初中国面源污染的形势估计 [J]. 中国农业科学, 2004, (7): 1008-1017.
- [11] 段永惠, 张乃明, 张玉娟. 施肥对农田氮磷污染物径流输出的影响研究 [J]. 土壤, 2005, (1): 48-51.
- [12] 叶欣, 李俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征 [J]. 农业环境科学学报, 2005, (6): 1186-1191.
- [13] 赵同科, 张成军, 杜连凤, 等. 环渤海七省(市)地下水硝酸盐含量调查 [J]. 农业环境科学学报, 2007, (2): 779-783.
- [14] 杨守春. 推荐施肥研究方法的几个问题 [J]. 土壤通报, 1986, (3): 103-106.
- [15] 黄德明. 土壤测试推荐施肥技术中几个问题的探讨 [J]. 土壤肥料, 1990, (2): 11-13.
- [16] 黄德明. 十年来我国测土施肥的进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 495-499.
- [17] 侯彦林, 陈守伦. 施肥模型研究综述 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (4): 493-501.
- [18] 白由路, 杨俐苹, 金继运. 测土配方施肥原理与实践 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [19] 张福锁. 测土配方施肥技术要览 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [20] 王宜伦, 李慧, 张晓佳, 等. 不同质地潮土夏玉米推荐施肥方法研究 [J]. 中国生态农业学报, 2012, (4): 402-407.
- [21] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的玉米推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [22] 何萍, 金继运, Mirasol F. PAMPOLINO, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, (2): 499-505.

# 养分专家系统推荐施肥对山西小麦玉米产量、养分吸收和利用的影响

于志勇 赵萍萍 王宏庭\* 朱向东

(山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 山西 太原 030006)

**摘要:** 科学合理的养分管理对于保障国家粮食安全、生态环境安全具有重要意义。2010-2012年应用 Nutrient Expert 推荐施肥专家系统对山西主要作物玉米小麦进行了验证研究, 结果显示: 基于养分专家系统推荐和基于测土推荐的效果相当, 与农民习惯比较, 小麦平均节氮 4-6.5 公斤/亩, 氮肥回收率提高 7.1-8.9 个百分点, 玉米节氮 4.5-4.8 公斤/亩, 氮肥回收率提高 4.4-10.1 个百分点。在不能进行测土施肥或条件有限的情况下, 养分专家系统有其独特的优势: 简单、实用、便于操作, 可实现稳产、节氮、高效、环境安全的目的, 是一种适合我省现有农业生产体制、易于掌握推广的新方法。

**关键词:** 养分专家系统; 玉米; 小麦; 产量; 肥料效率

玉米、小麦是山西省最重要的两大粮食作物, 也是山西粮食安全的重要保障。2011年玉米、小麦的播种面积分别为 1648.7 千公顷和 710.1 千公顷, 分别占全省总播种面积的 43.4% 和 18.7%, 玉米总产达 854.6 万吨, 小麦总产达 240.3 万吨, 分别占全省粮食总产的 71.6% 和 20.1%<sup>[1]</sup>。肥料是作物的“粮食”, 科学施肥是农业可持续发展的重要技术保障<sup>[2]</sup>, 施用化肥在过去、现在和将来都是我国最有效的农产品增产措施之一<sup>[3]</sup>。近年来, 我国化肥的年使用总量一直居世界首位, 2011年全国的化肥施用量(折纯)达 5704.2 万吨<sup>[1]</sup>, 约占世界化肥施用量的三分之一, 但使用不合理, 肥料回收率低, 较发达国家低 10-20 个百分点<sup>[4]</sup>。一些学者<sup>[3]</sup>的研究也表明, 粮田生产施肥是高投入、中产出、低资源效率。这样, 一方面表现为投入增加、生产效益低下, 造成资源浪费, 另一方面对环境产生负面效应, 影响农业的可持续发展。因此, 如何进行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。按应用方法分为肥料效应函数法、测土施肥法和营养诊断法等三大方法系统<sup>[5]</sup>。三大类方法各有优点和技术特点, 也存在不足, 所以在实际应用中常是以一种方法为主, 配合其它方法使用。目前发达国家已发展到借助地理信息系统 GIS, 卫星定位系统 GPS, 遥感系统和计算机软件, 构成特定点养分管理系统 SSNMS, 对具体田块施肥进行精确调控<sup>[6-7]</sup>。由于受技术、资金、人力、时效性等因素的影响, 上述方法均不能满足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, 而生产实践中迫切需要简单、实用、便于操作的施肥推荐系统。国际植物营养研究所 (IPNI) 开发的专家系统 (Nutrient Expert) 的推荐施肥方法是以改进的 SSNM 和改进的 QUEFTS 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<sup>[8]</sup>。针对山西施肥现状和开展的测土施肥工作现状, 该系统在主要作物玉米、小麦应用效果如何? 能否指导农业生产实践? 本研究于 2010-2012 年应用该系统进行了相关参数的验证和校正, 以便更好地为山西农业发展提供理论依据和实践指导。

## 1 材料与方 法

临汾市是晋南地区重要的冬小麦/夏玉米轮作主产区, 属半干旱温带大陆性气候, 多年平均气温在 12.6℃ 左右, 年均降水量 498 毫米, 无霜期 195 天左右。2010、2011、2012 三年试验期间平均气温分别为 13.8℃、13.3℃、13.7℃, 年降雨量分别为 454.5 毫米、630.8 毫米、497.5 毫米。试验选在临汾市襄汾县西贾乡义顺村和尧都区乔李镇南

表 1 供试土壤理化特性

年份及试验数	OM %	毫克/升			
		NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P	K
2010 (n=11)	0.98	28.9	21.2	29.5	111.0
2011 (n=36)	0.76	11.4	25.2	28.2	92.8
2012 (n=34)	0.64	7.8	29.0	36.1	87.2

表2 试验方案设计 (单位: 公斤/亩)

作物	年份及 试验数	OPTe	OPTe-N	OPTe-P	OPTe-K	CK	OPTs	FP
		N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O						
小麦	2011 (n=11)	9.2-4.5-5.3	0-4.5-5.3	9.2-0-5.3	9.2-4.5-0	0-0-0	12-4.5-5.3	17.5-7.3-2.1
	2012 (n=18)	11.6-5.8-4.5	0-5.8-4.5	11.6-0-4.5	11.6-5.8-0	0-0-0	14-6-5	17.1-6.9-2.3
夏玉米	2010 (n=11)	9.6-3.5-3.4	0-3.5-3.4	9.6-0-3.4	9.6-3.5-0	0-0-0	13.3-4-5	17-4.5-2.1
	2011 (n=25)	11.5-3.2-3.7	0-3.2-3.7	11.5-0-3.7	11.5-3.2-0	0-0-0	-	12.7-3.2-2.3
	2012 (n=16)	9.9-4-4.1	0-4-4.1	9.9-0-4.1	9.9-4-0	0-0-0	13.3-5-5	18.5-1.9-1.3

麻村进行, 试验设7个处理, 包括OPTe、OPTe-N、OPTe-P、OPTe-K、CK、OPTs和FP, 随机排列, 试验以农户为重复, 每个处理不再单独设置重复。其中, OTe为基于养分专家模型的肥料推荐, OTe-N、OPTe-P、OPTe-K是指在OPTe基础上不施氮肥、不施磷肥和不施钾肥, CK为不施任何肥料, OPTs为基于土壤测试(ASI法<sup>[9]</sup>)的肥料推荐, FP为农民习惯施肥。供试土壤类型为石灰性褐土, 质地为中壤。试验从2010年6月-2012年10月共开展5季作物81个试验, 其中, 2010年度完成夏玉米试验11个, 试验2011年度完成了冬小麦试验11个, 夏玉米试验25个; 2012年度完成冬小麦试验18个, 夏玉米试验16个。

冬小麦试验于每年10月20日左右播种, 翌年6月中旬收获。供试品种选用当地适播高产品种(如济麦22号、舜麦1718和临麦8050), 磷钾肥和45%的氮肥于播前撒施作基肥施用, 55%的氮肥于翌年三月下旬结合中耕以条施方式施用或撒施结合灌溉施用。冬小麦生长期, 浇入冬水、返青水和抽穗水各一次, 锄草、治虫按当地习惯。夏玉米试验于小麦收获后马上播种, 也选用当地适播高产品种(如先玉335)。磷钾肥和1/2氮肥于夏玉米5-6叶期以条施方式施用, 1/2氮肥则在玉米拔节期按处理以穴施方式施用, 玉米生长期, 浇水、治虫各1-2次, 于十月中旬收获。试验所用肥料为尿素(46%N)、过磷酸钙(12%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和氯化钾(60%K<sub>2</sub>O)。每季试验收获时各处理分别取植株样品和土壤样品, 用常规方法<sup>[10]</sup>分析, 植株样品分析项目为植株全氮、全磷和全钾。土壤样品分析项目为土壤硝态氮、速效磷及速效钾。供试土壤理化性状的平均结果和试验方案设计分别见表1和表2。采用Excel和SPSS 10.0软件对试验数据进行了统计分析。纯收益、氮肥农学效率、氮肥回收率计算公式分别为:

$$\text{纯收益 (元/亩)} = \text{产量} \times \text{产品价格} -$$

肥料施用量 × 肥料价格;

$$\text{氮农学效率 (公斤/公斤)} = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮区产量}) / \text{施氮量};$$

$$\text{氮肥回收率} = (\text{施氮区吸氮量} - \text{不施氮区吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

## 2 结果分析

### 2.1 不同处理对作物产量的影响

作物产量是评价肥料施用效果和土地生产能力的重要参数<sup>[11]</sup>, 由表3结果显示: 每季作物不同施肥处理均影响作物的产量, 不同农户、不同年份的产量反应也均存在一定差异。从每季作物产量的平均效果看, OTe、OPTs与FP处理比较, 产量差异不大, 均未达显著水平, 这表明基于养分专家系统的推荐施肥和基于土壤测试的推荐施肥在明显低于农民习惯施肥量的情况下同样可以实现作物高产, 养分专家系统和土壤测试的推荐效果也基本相当。同一作物、同一处理不同年份比较, 产量反应也存在一定的差异, 就夏玉米而言, 三季作物不同处理的平均产量表现为2010年产量最低, 2012年产量最高, 2011年产量居中, 这主要受不同年份的降雨量影响, 三季作物的CK处理产量存在差异。三季夏玉米的平均产量为: OPTs > OTe

表3 不同处理对作物产量的影响 (单位: 公斤/亩)

处理	2010年	2011年		2012年		夏玉米 (n=52) 平均	冬小麦 (n=29) 平均
	夏玉米 (n=11)	冬小麦 (n=11)	夏玉米 (n=25)	冬小麦 (n=18)	夏玉米 (n=16)		
OPTe	511.3a	550.7a	557.5a	577.8a	624.7a	568.3ab	567.5ab
OPTe-N	463.1a	460.1b	486.6b	490.3c	549.9c	501.1c	478.9c
OPTe-P	488.1a	520.5ab	523.9ab	541.6b	589.2b	536.4b	533.6b
OPTe-K	481.5a	513.2ab	525.5ab	548.2ab	611.7ab	542.7b	534.9b
CK	455.5a	441.6b	485.9b	498.8c	553.5c	500.3c	477.1c
OPTs	506.2a	574.7a	--	584.4a	627.7a	578.2a*	580.7a
FP	498.5a	566.5a	549.3a	587.5a	626.6a	562.3ab	579.5a

注: n为试验数, 同一列数值后不同小写字母表示差异达5%显著水平, \*标注n=27。

> FP。两季小麦的平均产量表现为 2011 年的小麦产量低于 2012 年，处理产量表现为：OPTs > FP > OPTe。

与 OPTe 处理比较，无论是小麦还是玉米，OPTe-N、OPTe-P、OPTe-K 均有不同程度的减产，OPTe-N 处理减产幅度最大，其次为 OPTe-P 处理和 OPTe-K。玉米 OPTe-N 处理三季平均产量较 OPTe 处理减产 67.2 公斤/亩，只相当于 OPTe 产量的 88.2%，统计检验达显著水平；OPTe-P、OPTe-K 的平均产量分别相当于 OPTe 产量的 94.4% 和 95.5%，统计检验未达显著水平；CK 处理的产量较 OPTe 处理减产 68.1 公斤/亩，与 OPTe-N 处理产量相当，统计检验也达显著水平。小麦 OPTe-N 处理两季平均产量较 OPTe 处理减产 88.7 公斤/亩，相当于 OPTe 产量的 84.4%，统计检验达显著水平，OPTe-P、OPTe-K 的平均产量分别相当于 OPTe 产量的 94.0% 和 94.3%，统计检验未达显著水平，CK 处理的产量较 OPTe 处理减产 90.5 公斤/亩，也与 OPTe-N 处理产量相当。这表明氮仍是限制小麦、玉米产量的第一因子，其次为磷和钾。

## 2.2 不同处理对氮肥施用效率的影响

氮是影响环境质量的重要因子，氮肥的农学效率和回收率是评价氮肥施用有效性的重要指标，氮肥效率高，对环境的影响相对较小，反之，则影响较大。本研究计算了 OPTe 处理的农学效率和回收率，由于试验设计中没有设置基于测土推荐的减氮处理和农民习惯施肥的减氮处理，致使不能准确评价 OPTs 和 FP 处理的氮肥施用效率。由表 4 结果显示：不同年份、不同作物氮肥的施用效率存在差异，这既与试验农户的土壤养分状况和作物对氮肥施用的敏感性有关，也与不同年份气温和降雨量有关。从小麦氮肥施用的效率看，2011 年小麦的氮肥施用的农学效率和氮肥回收率均高于 2012 年，两季小麦的平均结果显示 OPTe、OPTs 的氮肥农学效率和回收率基本相当，均高于 FP 处理，OPTe 和 OPTs 氮肥农学效率较 FP 多生产 2.4 公斤/公斤小麦，回收率提高 7.1-8.9 个百分点；就玉米而言，三季氮肥施用的效率也存在差异，2012 > 2011 > 2010。三季玉米氮肥施用的平均效率显示 OPTe > OPTs > FP，OPTe 较 FP 多生产 1.9 公斤/公斤玉米，氮肥回收率提高 10.1 个百分点；OPTs 较 FP 多生产 0.7

表 4 不同处理对氮肥效率的影响

年份	小麦季			玉米季								
	氮肥农学效率 (公斤/公斤)			氮肥回收率 (%)								
	OPTe	OPTs*	FP*	OPTe	OPTs*	FP*						
2010	--	--	--	--	--	--	5.1	4.3	3.5	14.1	15.3	13.7
2011	10.1	11.1	7.7	35.2	38.0	25.2	6.2	--	4.5	25.7	--	14.7
2012	7.4	6.8	5.1	21.5	22.3	16.0	7.7	5.6	4.7	30.9	21.3	15.4
平均	8.5	8.5	6.1	26.7	28.5	19.6	6.3	5.1	4.4	24.8	19.1	14.7

注：\* 表示各处理与 CK 处理比较，OPTe 处理的回收率计算以 OPTe-N 为比较

表 5 不同处理对纯收益的影响(单位:元/亩)

处理	2010 年	2011 年		2012 年		夏玉米	冬小麦
	夏玉米 (n=11)	冬小麦 (n=11)	夏玉米 (n=25)	冬小麦 (n=18)	夏玉米 (n=16)	(n=52) 平均	(n=29) 平均
OPTe	1012.3a	1155a	1379.1a	1195.9a	1446.2a	1322.1a	1180.3a
OPTs	957.7a	1193.3a	--	1198.3a	1422.7a	1233.2a*	1196.4a
FP	952.9a	1156.3a	1358.9a	1195.7a	1442.5a	1298.8a	1181.5a

注：\* 表示 n=27，净收益计算按当年的肥料价格和农产品价格折算

公斤/公斤玉米，氮肥回收率提高 4.4 个百分点。由表 2 的施肥方案也可以看出，OPTe 和 OPTs 均能节省氮肥，小麦季 OPTe 和 OPTs 分别平均节省氮肥 6.5 公斤/亩和 4 公斤/亩，玉米季分别节省 4.8 公斤/亩和 4.5 公斤/亩，可见，基于养分专家系统的推荐和基于测土的推荐均较农民习惯节约氮肥和提高氮肥的施用效率，两种推荐均能达到科学施肥的目的。

## 2.3 不同处理对纯收益的影响

由表 5 结果显示，不同年份的小麦和玉米的 OPTe、OPTs 处理的净收益与 FP 处理的净收益相差不大，统计检验未达显著，似乎没有显示出基于养分专家系统推荐和基于测土推荐的优越性，但 OPTe 和 OPTs 较 FP 处理节省了氮肥，相应增加磷钾肥施用，更有利于养分的平衡供应和可持续发展。纯收益的增加不仅受养分投入的影响，更多地受肥料价格波动的影响。可见，无论哪种肥料的推荐也应该适当考虑肥料品种及价格波动的因素，有待进一步研究。

## 3 讨论与结论

在农田生产条件下，作物生长发育往往受水、肥、气、热及栽培管理措施等因素的影响，在栽培管理措施相对一致的情况下，肥料投入的多少一定程度上影响作物的产量

和收益,但肥料的投入和产量的关系不是简单的正相关关系。当前农民过量和不平衡施用化肥现象严重,导致肥料回收率降低,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<sup>[8]</sup>。国际植物营养研究所开发的 **Nutrient Expert** 推荐施肥专家系统是一种适合分散经营生产体制、易于掌握应用的新方法,具有简单、实用、便于操作的特点,经过近三年在山西晋南地区的应用,证明是一种易于推广人员掌握的新方法,可以实现稳产、节氮、高效的目的。本研究结果表明:基于养分专家系统推荐和基于测土推荐的效果相当,能够达到作物高产、稳产的目标,与农民习惯施肥比较,小麦季平均节氮 4-6.5 公斤/亩,氮肥农学效率平均 8.5 公斤/公斤,与近年来国内有关专家<sup>[12]</sup>的研究效果相当;氮肥回收率为 26.7%,较农民习惯施肥提高 7.1-8.9 个百分点;玉米季节氮 4.5-4.8 公斤/亩,氮肥农学效率平均为 6.3 公斤/公斤,氮肥回收率平均为 24.8%,与张福锁等<sup>[11]</sup>报道我国玉米氮肥回收率分别为 26.1% 相近,较农民习惯施肥提

高 10.1 个百分点。2011 年和 2012 年冬小麦-夏玉米轮作农田化肥氮平均用量分别为 20.7 公斤/亩和 21.5 公斤/亩,远远低于华北地区平均用量已高达 36.3 公斤/亩,也低于目前全国氮肥平均用量 25.2 公斤/亩,与华北地区目前平均产量水平下作物对氮素的需求量 20.7 公斤/亩相当<sup>[13]</sup>,降低了因氮素过量施用而带来的环境风险,对促进农业的可持续发展具有重要意义。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<sup>[8]</sup>。

利用养分专家系统推荐施肥能够提高农民科学种田的水平,改变生产中普遍存在因重氮肥,轻磷、钾肥等不平衡施肥现象造成肥料回收率低、施肥成本高、经济效益下降、生态环境恶化,改变通过增加肥料投入来提高粮食产量的生产方式,优化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<sup>[12]</sup>,能够有效地指导农业生产实践。

## 参考文献

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [2] 金继运. 我国养分资源高效利用的战略和目标 [J], 高效施肥, 2011, (27): 1.
- [3] 张福锁, 马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系 [J], 土壤与环境, 2000, 9(2): 154-157.
- [4] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6
- [5] 金耀青. 配方施肥的方法及其功能 - 对我国配方施肥工作的述评 [J]. 土壤通报, 1989, (1): 46-48.
- [6] Reetz HF. Site-specific nutrient management systems for the 1990s [J]. Better crops with plant food, 1994, 78(4): 14-19.  
Reetz HF. Maintenance + buildup nutrient management for [J]. Better crops with plant food, 1996, 80(3): 9-11.
- [7] 何萍, 金继运, Mirasol F. Pampolino, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499-505.
- [8] 金继运, 张宁, 梁鸣早, 等. 土壤养分状况系统研究法在土壤肥力研究及测土施肥中的应用 [J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(1): 8-15.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [10] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料回收率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [11] 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.
- [12] 赵荣芳, 等. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡 [J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-697.



# 养分专家系统推荐施肥对黑龙江玉米产量、养分吸收和利用的影响

刘双全<sup>1</sup> 李玉影<sup>1</sup> 姬景红<sup>1</sup> 佟玉欣<sup>1</sup> 刘颖<sup>1</sup> 张明怡<sup>1</sup> 韩光<sup>1</sup> 王伟<sup>1</sup> 郑雨<sup>2</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江省土壤环境与植物营养重点实验室, 哈尔滨 150086;

2. 海南大学农学院, 海口 5702281)

**摘要:** 在黑龙江省设立 43 个 Nutrient Expert (NE) 玉米推荐施肥田间验证试验, 以验证 NE 推荐施肥效果, 结果表明, 专家推荐施肥 (OPT<sub>E</sub>) 比农民习惯施肥 (FP) 和当地推荐施肥 (OPT<sub>S</sub>) 能显著提高玉米产量、增加效益, 提高了氮肥农学效率和氮肥回收率。

**关键词:** 玉米; 产量; 效益; 养分吸收

黑龙江省是我国粮食主产区, 更是我国最大的商品粮生产基地, 现有耕地 2.14 亿亩, 占全国耕地总量的九分之一。主要粮食作物有玉米、水稻和大豆。其中玉米面积增长迅速, 2004 年为 4310 万亩, 2011 年为 8724 万亩, 增长了 1 倍多, 面积占全国的 16.9%。2011 年黑龙江省玉米总产达 2675.8 万吨, 平均单产为 306.7 公斤/亩, 低于全国平均水平。盲目施肥是导致玉米单产不高的原因之一, 我省农民施肥中普遍存在重氮肥, 轻磷、钾肥及中微量元素的现象, 导致玉米产量不高、品质下降。因此, 开展平衡施肥研究可以消除土壤养分限制因子, 为科学施肥提供理论依据, 对加快我省由农业大省向农业强省转变具有重要意义。

## 1 材料与方 法

2011-2012 年在黑龙江省设立 Nutrient Expert (NE) 玉米推荐施肥田间验证试验, 在不同生态类型的玉米主产区共设立了 43 个田间验证试验。每个试验设 7 个处理, 小区面积 90 平方米。氮肥 40% 作种肥, 60% 作追肥, 磷钾肥全部作种肥一次施入。氮肥用尿素、磷肥用重过磷酸

钙、钾肥用氯化钾。土壤基础肥力分析见表 1。

试验处理如下:

1. OPT<sub>E</sub>: 基于 NE 推荐量
2. OPT<sub>E</sub>-N: NE 推荐量基础上, 不施氮肥
3. OPT<sub>E</sub>-P: NE 推荐量基础上, 不施磷肥
4. OPT<sub>E</sub>-K: NE 推荐量基础上, 不施钾肥
5. CK: 不施任何肥料
6. FP: 农民习惯施肥
7. OPT<sub>S</sub>: 基于土壤测试优化的施肥处理

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对玉米产量、效益的影响

黑龙江省 43 个农户试验结果表明, 推荐施肥对玉米产量和经济效益有明显的促进作用 (表 2)。与专家推荐施肥 (OPT<sub>E</sub>) 相比, 不施氮肥平均减产 27.4%, 不施磷肥平均减产 13.5%, 不施钾肥减产 13.2%, CK 减产 31.9%, 农民习惯施肥减产 5.6%, OPT<sub>S</sub> 减产 2.1%。不施肥玉米减产严重, 不施氮肥对产量影响最大, 其次是磷肥、钾肥。

与 OPT<sub>E</sub> 处理相比, 不施氮肥平均少收入 261 元/亩; 不施磷肥平均少收入 130 元/亩; 不施钾肥少收入 115 元/亩; 不施肥少收入 252 元/亩; 农民习惯施肥比 OPT<sub>E</sub> 处理少收入 61 元/亩; 当地推荐施肥 OPT<sub>S</sub> 处理平均少收入 27 元/亩。专家推荐施肥比农民习惯施肥和当地推荐施肥能提高玉米产量、增加效益。

表 1 黑龙江 43 个农户土壤基本理化性状

农户	有机质 %	pH 值	碱解氮 N (毫克/公斤)	速效磷 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (毫克/公斤)	速效钾 K <sub>2</sub> O (毫克/公斤)
最大值	5.29	8.86	203.0	126.1	243.0
最小值	1.75	5.21	59.5	14.7	82.0
平均值	3.38	6.20	144.1	50.4	168.0
标准差	0.86	0.75	34.24	23.53	41.84
变异系数 (%)	25.51	12.12	23.76	46.65	24.91

IPNI 资助项目 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目, 哈市黑土养分数字化管理与玉米精准施肥专家系统的建立 (2012RFLYN010)。

作者简介: 刘双全 (1973-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副研究员, 主要从事土壤肥料和植物营养及精准农业养分管理方向的研究工作。

表 2 黑龙江 43 个农户不同处理对玉米产量、效益及氮肥回收率的影响

处理	施肥量 (公斤 / 亩)			平均产量 (公斤 / 亩)	氮农学效率 (公斤 / 公斤)	氮肥回收率 (%)	效益 (元 / 亩)
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O				
OPTE	10.8	3.9	5.3	644.5	16.5	32.7	--
OPTE-N	0.0	3.9	5.3	467.7	--	--	-261.0
OPTE-P	10.8	0.0	5.3	557.6	--	--	-130.0
OPTE-K	10.8	3.9	0.0	559.5	--	--	-115.0
CK	0.0	0.0	0.0	438.7	--	--	-252.0
FP	11.8	4.0	3.3	608.3	12.5	27.2	-61.0
OPTS	10.9	4.1	4.5	630.9	14.9	30.3	-27.0

## 2.2 氮肥农学效率及氮肥回收率分析

黑龙江省 43 点次试验结果表明 (图 1), OPT<sub>E</sub>、FP、OPT<sub>S</sub> 处理氮肥农学效率范围为 15.9-21.4 公斤 / 公斤、9.0-19.9 公斤 / 公斤、9.3-21.3 公斤 / 公斤, 平均分别为 16.5 公斤 / 公斤、12.5 公斤 / 公斤、14.9 公斤 / 公斤。氮肥回收率范围为 25.9-37.1%、16.9-32.3%、21.7-38.4%, 平均分别为 32.7%、27.2% 和 30.3%。与 FP 相比, OPT<sub>E</sub> 和 OPT<sub>S</sub> 分别平均增加氮肥农学效率 4.0 公斤 / 公斤和 2.4 公斤 / 公斤; 增加氮肥回收率 5.5 和 3.1 个百分点。说明, 无论是专家推荐施肥还是当地推荐施肥均提高了氮肥农学效率和氮肥回收率, 以 OPT<sub>E</sub> 处理效果最佳。

## 2.3 玉米平衡施肥与养分循环

我们用平衡系数表示养分投入和养分产出的比值。黑龙江省 43 个农户试验结果表明, OPT<sub>E</sub>、FP 和 OPT<sub>S</sub> 氮的平衡系数平均分别为 0.88、0.99 和 0.91; 磷的平衡系数平均分别为 0.91、0.99 和 0.95; 钾的平衡系数平均分别为 0.47、0.33 和 0.41。专家推荐施肥较当地推荐施肥和农民习惯施肥在维持土壤氮磷钾平衡方面具有一定的优势, 但也尚需改进。总体来看黑龙江省农民习惯施肥中氮磷肥用量不同地区有高有低, 钾肥用量严重不足。专家推荐施肥中钾肥用量较农民习惯施肥钾肥用量有所提高。

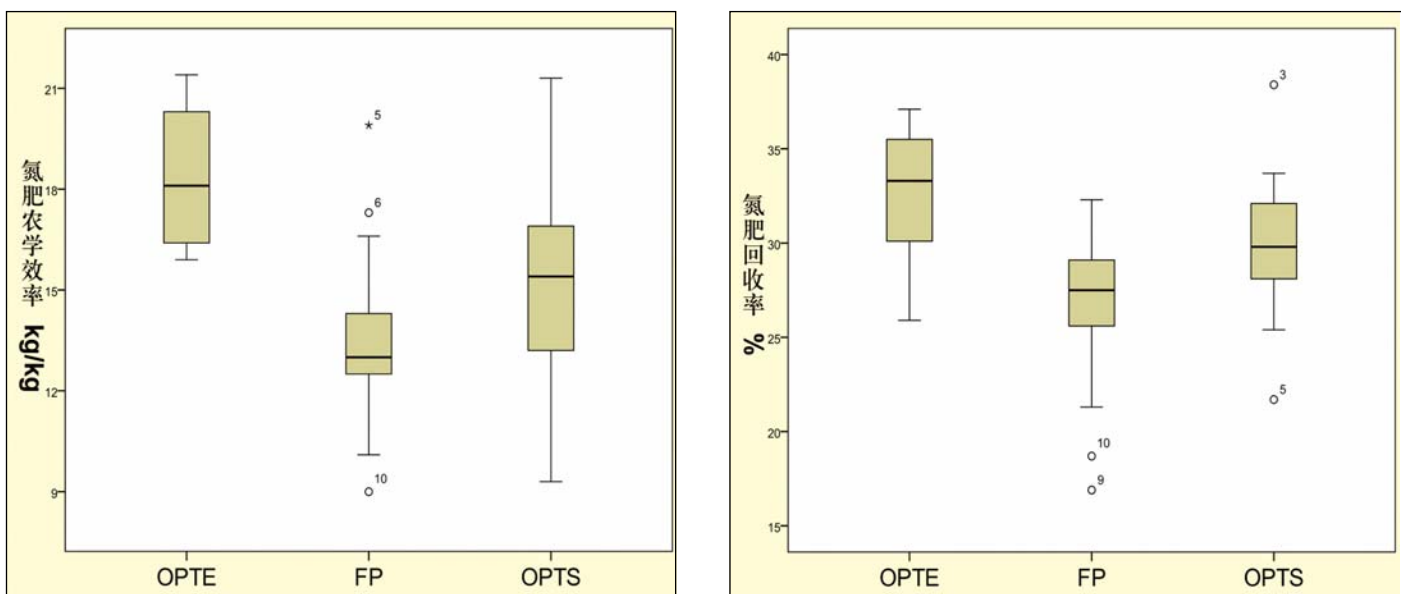


图 1 三个处理的氮肥农学效率和氮肥回收率

表 3 黑龙江 43 户玉米养分平衡概算表

处理	养分投入 (公斤 / 亩)			养分支出 (公斤 / 亩)			平衡系数		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
OPTE	10.8	3.9	5.3	12.3	4.5	11.4	0.88	0.91	0.47
FP	11.8	4.0	3.3	11.8	4.3	10.5	0.99	0.99	0.33
OPTS	10.9	4.1	4.5	12.1	4.5	11.0	0.91	0.95	0.41



黑龙江 Nutrient Expert 玉米推荐施肥田间验证试验

### 3 结论

黑龙江省 43 个农户试验结果表明, 专家推荐施肥 ( $OPT_E$ ) 比农民习惯施肥 (FP) 和当地推荐施肥 ( $OPT_S$ ) 能显著提高玉米产量、增加效益。无论是专家推荐施肥还是当地推荐施肥均提高了氮肥农学效率和氮肥利用率, 以  $OPT_E$  处理效果最佳。与 FP 相比,  $OPT_E$  和  $OPT_S$  平均分别增加氮肥农学效率 4.0 公斤 / 公斤和 2.4 公斤 / 公斤; 增加氮肥回收率 5.5 和 3.1 个百分点。

专家推荐施肥较当地推荐施肥和农民习惯施肥在维持土壤氮磷钾平衡方面具有一定的优势, 但也尚需改进。总

体来看, 黑龙江省农民习惯施肥中氮磷肥用量不同地区有高有低, 钾肥用量严重不足, 对玉米高产稳产带来了不利影响。专家推荐施肥中钾肥用量比农民习惯施肥钾肥用量有所提高。

总之, 农民习惯施肥氮磷钾比例不合理, 尤其钾肥用量极低, 如生产上不给予重视, 将影响土壤中养分平衡和农业的可持续发展。采取专家推荐施肥措施平衡氮磷钾施用比例, 不但可以显著增加作物产量、提高经济效益, 还可以提高氮肥农学效率和氮肥当季回收率。因此, 应该加强研究, 加大宣传力度, 推广平衡施肥, 达到粮食增产、农业增效、农民增收的目标。

### 参考文献

- [1] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴 [M]. 中国统计出版社, 2012.
- [2] 姬景红, 李玉影, 刘双全, 等. 平衡施肥对玉米产量、效益及土壤 - 作物系统养分收支的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010, (4): 37-41.
- [3] 邢月华, 韩晓日, 汪仁, 等. 平衡施肥对玉米养分吸收、产量及效益的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2009, (2): 27-29.
- [4] 佟玉欣, 李玉影, 刘双全, 等. 钾肥不同施用量对玉米产量和效益及钾素平衡的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2010, (11): 45-48.

# 养分专家系统推荐施肥对吉林玉米产量、养分吸收和利用的影响

候云鹏 谢佳贵 孔丽丽 尹彩侠 秦裕波

(吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林长春 130033)

**摘要:** 针对吉林地区玉米施肥存在过量、不平衡和肥料利用率较低的现象, 采用田间试验研究验证了养分专家系统 Nutrient Expert(NE) 推荐施肥对春玉米产量、经济效益和肥料利用率的影响。试验结果表明, 养分专家系统 NE 推荐施肥对吉林省春玉米有增产趋势和显著的增收效果。养分专家系统 NE 推荐施肥处理 (OPT) 与农民习惯施肥 (FP) 处理相比在减少氮肥施用 3.47 公斤/亩-5.68 公斤/亩 (25.8%-35.9%)、磷肥 3.34 公斤/亩-4.09 公斤/亩 (46.9%-52.7%)、钾肥 1.51 公斤/亩-1.91 公斤/亩 (24.9%-30.2%) 的情况下, 增产玉米 11.1 公斤/亩-36.7 公斤/亩, 增收 64.2 元/亩-134.8 元/亩, 分别提高氮肥利用效率 13.4-16.3 个百分点、磷肥利用效率 11.5-15.6 个百分点、钾肥利用效率 18.0-21.8 个百分点, 由此得出, 养分专家系统 NE 适宜在吉林省春玉米区推行。

**关键词:** 养分专家系统; 春玉米; 养分吸收和利用

东北地区是中国玉米的最大产区, 玉米种植面积占全国玉米种植面积的 25.8%, 其中仅吉林省的玉米产量就占全国的 13%, 达 1800 万吨<sup>[1]</sup>。吉林省玉米产量对我国粮食安全至关重要。该种植区主要土壤类型为黑土, 具有有机质含量高、腐殖质层深厚、养分丰富、团粒发达、保水保肥能力及抗逆性强等优越的肥力特点<sup>[2-3]</sup>。

为了获得玉米高产, 出现了大量使用化肥、重施氮肥、盲目施肥、施肥方法不当等现象, 造成肥料利用率低下、土壤肥力下降、环境污染等问题。如何根据土壤类型、土壤肥力水平和玉米对养分的需求量进行科学合理施肥显得尤为重要。目前的推荐施肥方法主要是通过土壤养分测试, 基于土壤养分状况和产量目标等指标进行推荐施肥<sup>[4-8]</sup>。在一定程度上提高了玉米产量和经济效益, 但吉林省玉米生产大多数以小农户为主的经营单元, 很难做到每户都依据

土壤测试结果推荐施肥, 而且土壤测试过程中存在不可避免的误差, 影响了施肥推荐的准确性。

养分专家系统 Nutrient Expert 由国际植物营养研究所 (IPNI) 引进并完善, 该系统基于作物产量反应和农学效率的养管理施肥推荐原则, 只需农民或当地农技推广人员回答一些简单的玉米产量和栽培管理措施等问题, 系统就会利用后台的数据库给出当前农户的养管理措施和施肥套餐。该推荐施肥系统不仅优化了化肥用量、施肥时间、种植密度, 还结合生育期降雨、气候等优化了施肥次数, 并进行了效益分析。本研究基于养分专家系统对吉林省黑土区春玉米进行推荐施肥, 研究养分专家系统推荐施肥对春玉米产量、养分吸收、经济效益的影响, 以期在黑土区春玉米科学施肥提供依据。

表 1 供试土壤基本理化性状

试验年份	试验点	全氮 (%)	有效磷 (毫克/千克)	速效钾 (毫克/千克)	碱解氮 (毫克/千克)	有机质 (克/千克)	pH
2011	刘房子	1.14±0.11	39.23±16.18	85.36±10.76	107.54±18.6	21.44±3.27	5.80±0.33
	陶家	1.18±0.07	45.54±22.38	91.71±10.96	119.10±37.74	23.93±2.89	6.06±0.95
	黑林子	1.11±0.10	45.29±29.52	82.33±12.58	109.44±14.06	22.34±2.22	6.40±0.36
	朝阳坡	1.11±0.10	39.96±18.73	82.55±9.55	116.12±13.07	22.69±3.39	6.22±0.53
	苇子沟	1.32±0.09	44.58±14.43	86.34±6.42	126.78±7.45	28.37±1.83	6.12±0.91
2012	刘房子	1.05±0.09	31.63±16.32	89.68±11.25	108.92±10.63	20.35±3.28	5.91±0.52
	陶家	1.13±0.03	45.32±15.21	92.65±10.05	112.68±12.18	22.74±2.98	6.71±0.39
	黑林子	1.02±0.12	45.28±10.98	84.51±13.25	120.77±10.91	21.58±3.17	6.21±0.88
	朝阳坡	1.03±0.13	40.68±13.62	82.64±12.17	115.61±13.05	23.18±5.21	6.18±0.41

# 1 材料与方 法

## 1.1 试验设计

试验设在 2011 年 -2012 年吉林省中部地区公主岭市周边乡镇, 2011 年在刘房子 (7 户)、陶家 (6 户)、黑林子 (6 户)、朝阳坡 (6 户) 和苇子沟 (5 户) 五处共计 30 个农户上进行。2012 年在刘房子 (9 户)、陶家 (4 户)、黑林子 (5 户) 和朝阳坡 (8 户) 四处共计 26 个农户上进行。土壤的基本理化性状见表 1。

养分	2011 年		2012 年	
	OPT	FP	OPT	FP
N	10.01 ± 0.94	13.48 ± 2.78	10.52 ± 1.21	15.81 ± 1.33
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.78 ± 0.32	7.12 ± 2.14	3.68 ± 0.34	7.77 ± 1.41
K <sub>2</sub> O	4.55 ± 0.45	6.07 ± 1.69	4.41 ± 0.49	6.33 ± 0.90

注: OPT-N: 在 OPT 基础上不施氮肥; OPT-P: 在 OPT 基础上不施磷肥; OPT-K: 在 OPT 基础上不施钾肥 (下同)

每个试验点设置的处理为: 养分专家系统推荐施肥 (OPT)、减氮 (OPT-N)、减磷 (OPT-P)、减钾 (OPT-K)、农民习惯施肥 (FP) 和空白处理 (CK)。具体试验处理见表 2。养分专家系统推荐施肥和各减素处理的肥料施用方法为: 1/3 的氮肥和全部磷钾肥以基肥形式于播种前施入, 剩余 2/3 氮肥在拔节期施入。FP 处理的肥料施用方法为全部氮磷钾肥以基肥形式于播种前施入, 施肥方式为条施。小区面积 60 平方米, 品种选择当地主栽品种 (先玉 335), 与农户的相同, 种植密度为 0.4 万株 / 亩。5 月 1 日前后播种, 9 月 25 日左右收获。

## 1.2 样品采集与测定

采集玉米成熟期秸秆和籽粒样品, 分为秸秆和籽粒两部分。样品于 105℃ 杀青 30min 后, 于 80℃ 烘干至恒重, 计算其地上部干物重。样品粉碎后, 分析均采取 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消煮, 全氮采用凯氏法进行测定, 全磷采用钒钼黄比色法测定, 全钾采用原子吸收法进行测定; 收获时取中间四垄玉米计产。

## 1.3 计算方法

氮 (磷, 钾) 素利用率 (%) = [ 施氮 (磷, 钾) 区地上部吸氮 (磷, 钾) 量 - 无氮 (磷, 钾) 区地上部吸氮 (磷, 钾) 量 ] / 施氮 (磷, 钾) 量 × 100%;

净收益 (元 / 亩) = 春玉米产量 (公斤 / 亩) × 当年春玉米价格 - 氮肥施用量 × 氮肥价格 - 磷肥施用量 × 磷肥价格 - 钾肥施用量 × 钾肥价格;

养分吸收量 (公斤 / 亩) = 植株干重 (公斤 / 亩) × 植株养分含量 (%)

试验数据用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS11.5 统计软件处理。

# 2 结果与分析

## 2.1 推荐施肥对吉林省春玉米产量及经济效益的影响

作物产量是评价肥料施用效果和土地生产能力的重要标准<sup>[9]</sup>。由表 3 产量结果可知, 在 2011 年的 30 户试验和 2012 年的 26 户试验中, 与 FP 处理相比, OPT 处理的春玉米产量较 FP 处理增产了 11.1 公斤 / 亩 -36.7 公斤 / 亩, 但二者之间差异不显著。

由表 3 经济效益结果可知, OPT 虽然在产量上与 FP

处理	2011 年			2012 年		
	产量 (公斤 / 亩)	增产率 (%)	净收入 (元 / 亩)	产量 (公斤 / 亩)	增产率 (%)	净收入 (元 / 亩)
OPT	812 a	28.6	1452 a	777 a	30.2	1554 a
OPT-N	656 c	3.8	1199 c	625 cd	4.7	1284 c
OPT-P	754 b	19.3	1363 b	652 bc	9.2	1307 c
OPT-K	758 b	19.9	1373 b	673 b	12.8	1355 bc
FP	801 a	26.8	1388 b	740 a	24.0	1420 b
CK	632 c	--	1201 c	597 d	--	1265 c

注: 2011 年化肥价格: N 4.50 元 / 公斤、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.70 元 / 公斤、K<sub>2</sub>O 5.50 元 / 公斤 玉米价格: 1.90 元 / 公斤  
2012 年化肥价格: N 5.00 元 / 公斤、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 5.22 元 / 公斤、K<sub>2</sub>O 4.80 元 / 公斤 玉米价格: 2.12 元 / 公斤

没有显著差异,但在经济效益上显著高于当地农民习惯施肥,增收幅度为 64.2 元/亩-134.8 元/亩。

OPT 处理比 FP 处理降低氮、磷、钾肥用量。其中节约氮肥 3.47 公斤/亩-5.68 公斤/亩 (25.8%-35.9%)、磷肥 3.34 公斤/亩-4.09 公斤/亩 (46.9%-52.7%)、钾肥 1.51 公斤/亩-1.91 公斤/亩 (24.9%-30.2%),使施肥成本降了下来,可见,养分专家系统推荐施肥在保证产量、控制肥料合理施用的同时,平衡了氮、磷、钾养分,也增加了农民的收入。

其他减素处理的产量在各试验点基本表现为 OPT-K>OPT-P>OPT-N,说明氮素是产量的第一限制因子,其次为磷和钾。

### 2.2 推荐施肥对春玉米养分积累量的影响

从 2011-2012 年试验的养分吸收结果(图 1)可知,OPT 处理养分吸收量均有高于 FP 处理的趋势。在 OPT 处理的氮、磷、钾肥投入量低于 FP 处理的情况下,氮吸收量提高了 0.17 公斤/亩-0.29 公斤/亩,磷吸收量提高了 0.11 公斤/亩-0.16 公斤/亩,钾吸收量提高了 0.22 公斤/亩-0.35 公斤/亩,其主要原因是养分专家系统在优化施肥量的同时,还优化了肥料的施用次数和施肥方法等养分管理措施,这样的优化措施可以减少氮肥的损失,从而更好的促进春玉米对氮、磷、钾等养分的吸收积累。

### 2.3 推荐施肥对春玉米养分利用率的影响

玉米养分利用率是评价施肥有效性和环境影响的重要指标。从养分利用率可见,由于 OPT 处理的施肥量低于

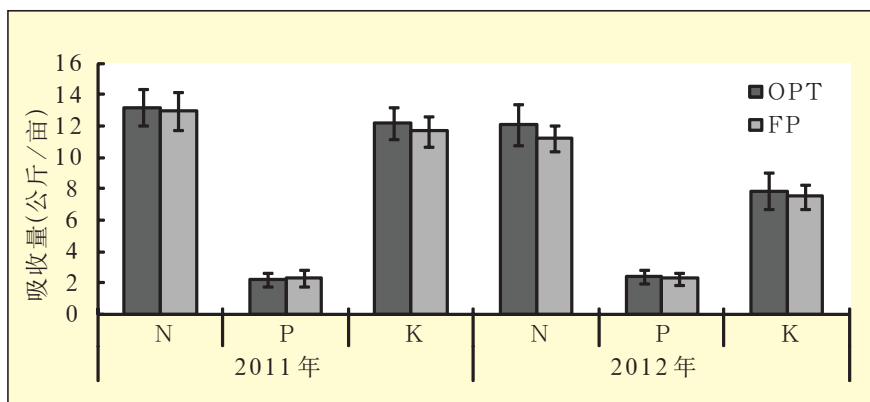


图 1 收获期春玉米养分吸收量

FP 处理,所以 OPT 处理的氮、磷、钾等养分利用率显著的高于 FP 处理,分别高出 13.4-16.3、11.5-15.6、18.0-21.8 个百分点,可见,高量化肥投入并没有提高作物对氮、磷、钾的养分吸收,反而降低了养分利用效率,进一步说明可以养分专家系统推荐施肥可以减少肥料的损失,从而更好的提高化肥利用效率。

## 3 结论

过量和不平衡施肥是吉林肥料利用率低的主要原因,过量和不平衡施肥不仅没有使玉米产量提高,反而导致肥料的浪费和经济损失,严重影响农田的可持续利用。

基于作物产量反应和农学效率的养分专家系统(Nutrient Expert)优化施肥是春玉米高产高效的基础,专家系统推荐施肥(OPT)处理在比农民习惯施肥(FP)处理增产 11 公斤/亩-37 公斤/亩的情况下,分别比 FP 节约氮肥 3.47 公斤/亩-5.68 公斤/亩 (25.8%-35.9%)、磷肥 3.34 公斤/亩-4.09 公斤/亩 (46.9%-52.7%)、钾肥 1.51 公斤/亩-1.91 公斤/亩 (24.9%-30.2%),由此可见,过量和不足的养分不平衡施肥是吉林地区春玉米生产中存在的主要问题,而养分专家系统能够保证养分的均衡供应,有利于作物的生长发育和产量形成。各减素处理春玉米产量变化表明为减氮处理 < 减磷处理 < 减钾处理,说明氮是吉林春玉米高产的最主要限制因子,其次为磷、钾。

过量和不平衡施肥不仅不能使春玉米产量提高,还导致肥料的浪费和经济损失。在 2011 年-2012 年 56 个试验点上,由于 OPT 处理降低了肥料的施用量,因此春玉米净收入较 FP 处理增加了 64.2 元/亩-134.8 元/亩,说明养分专家系统(Nutrient Expert)是科学的肥料管理方法。

养分吸收量是春玉米产量形成的基础。本试验结果表明,在 2011 年-2012 年 56 个试验点上,OPT 处理的养分吸收量均高于 FP 处理,进一步说明养分专家系统推荐施肥有利于玉米对养分的均衡吸收,使养分获

表 4 不同施肥处理春玉米肥料利用率

试验年份	试验数	氮利用率 REN(%)		磷利用率 REP(%)		钾利用率 REK(%)	
		OPT	FP	OPT	FP	OPT	FP
2011	30	31.6±4.1a	18.2±2.8b	28.2±3.2a	16.73±2.1b	48.5±3.7a	26.7±1.8b
2012	25	32.6±3.9a	16.3±2.9b	27.2±3.8a	11.6±1.6b	45.2±2.9a	24.2±3.2b

得平衡。肥料利用效率是表征合理施肥的重要指标,张福锁等<sup>[10]</sup>报道了中国玉米氮肥、磷肥、钾肥利用率平均分别为26.1%、11.0%、31.9%,本试验中基于NE推荐施肥的氮、磷、钾利用率高于全国平均水平<sup>[11]</sup>。也显著的高于农民习惯(FP)处理。可见,基于NE的养分专家系统施肥不仅提高了玉米产量和农民收入,而且增加了肥料利用效

率,对农田可持续利用具有重要意义。

综上所述,基于作物产量反应和农学效率的养分专家系统(Nutrient Expert)推荐施肥能够提高春玉米子粒产量,增加养分吸收和提高养分利用率,同时能够增加农民收入,是能够兼顾产量、养分高效利用和环境保护的一项重要重要的施肥措施。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [2] 赵兰坡, 张志丹, 王鸿斌, 等. 松辽平原玉米带黑土肥力演化特点及培育技术 [J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 511-516.
- [3] 王蒙, 赵兰坡, 王立春, 等. 不同气肥运筹对东北春玉米氮素吸收和土壤氮素平衡的影响 [J]. 玉米科学, 2012, 20(6): 128-131.
- [4] 黄国斌, 李家贵. 测土配方施肥对玉米养分吸收、产量及效益的影响 [J]. 贵州农业科学, 2010, 38(1): 23-25.
- [5] 赖丽芳, 吕军峰, 郭天文, 等. 平衡施肥对春玉米产量和养分利用率的影响 [J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 130-132.
- [6] 侯云鹏, 谢佳贵, 尹彩侠, 等. 测土配方施肥对玉米产量及肥料利用率的影响 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(18): 9452-9454.
- [7] 王贺, 白由路, 杨俐苹, 等. 基于ASI方法的推荐施肥在东北玉米上的应用 [J]. 中国土壤与肥料, 2010, (5): 31-37.
- [8] 杨青华, 高尔明, 马新明, 等. 不同土壤类型对玉米干物质积累动态及其分布的影响 [J]. 玉米科学, 2000, 8(1): 55-57.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王宜伦, 李慧, 张晓佳, 等. 不同质地潮土夏玉米推荐施肥方法研究 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 402-407.



# 养分专家系统推荐施肥对辽宁玉米产量、养分吸收和利用的影响

邢月华 汪仁 包红静 刘艳 蔡广兴

(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁沈阳 110161)

**摘要:** 通过两年 44 个农户的田间试验对养分专家系统推荐施肥进行了效果验证。结果表明, 养分专家系统推荐施肥具有较好的增产增收效果, 较农民习惯施肥平均增产 6.4%, 平均增收 105.9 元/亩; 养分专家系统推荐施肥可促进玉米对氮磷钾养分的吸收利用, 氮磷钾的利用率较 FP 平均分别提高 13.7、6.9 和 9.0 个百分点。

**关键词:** 产量; 养分吸收

玉米是辽宁省第一大作物, 占农作物播种面积的 55% 左右, 在辽宁省农业生产中占有极其重要的地位。合理施肥是玉米高产栽培的重要措施之一, 有关玉米施肥试验的研究较多, 但不同生态条件、不同土壤肥力条件下玉米施肥技术存在较大差异。近年来, 辽宁省玉米施肥中存在化肥施用量过大、氮磷钾比例不合理、施肥方法不当等现象, 造成肥料利用率低、环境污染等问题, 因此如何进行科学合理施肥显得尤为重要。本文通过两年 44 个农户的田间试验对养分专家系统推荐施肥进行了效果验证, 旨在为玉米合理施肥提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地基本情况

2011 年在辽宁省玉米主产区进行了 24 户养分专家系统推荐施肥试验, 2012 年进行了 20 户试验, 供试土壤养分状况见表 1。

### 1.2 试验设计

试验共设 7 个处理, 分别为:  $OPT_E$  (养分专家系统推荐施肥量);  $OPT-N$  (不施氮肥);  $OPT-P$  (不施磷肥);  $OPT-K$  (不施钾肥);  $CK$  (不施任何肥料);  $FP$  (农民习惯施肥);  $OPT_S$  (基于土壤测试的优化施肥处理)。小区面积  $40-50m^2$ , 以农户为重复。肥料选用尿素 ( $N46\%$ )、磷酸二铵 ( $N18\%$ ,  $P_2O_546\%$ )、过磷酸钙 ( $P_2O_518\%$ ) 和氯化钾 ( $K_2O60\%$ )。1/3 氮肥与全部 P、K 肥于播种时作底肥施入, 其余氮肥在玉米拔节期追施。

### 1.3 调查分析项目

1.3.1 试验前调查农户玉米产量、种植方式、秸秆还田情况、施肥情况 (肥料品种、肥料用量、肥料施用方法等) 等, 根据调查结果, 进行养分专家系统推荐施肥 ( $OPT_E$ )。

1.3.2 在春季播种前采集 0-20cm 土壤样品, 用 GPS 定位, 测定有机质、pH、大中微量元素含量。

1.3.3 在秋季测产时, 小区单打单收, 同时采集玉米

表 1 土壤养分分析结果 (ASI 法)

年份	项目	pH	OM(%)	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	P	K
				(毫克/升)			
2011	最大值	8.3	1.4	15.0	94.5	65.5	114.1
	最小值	4.9	0.5	0.0	2.3	3.5	59.4
	平均值	6.3	0.9	6.8	18.3	21.5	82.3
	变异系数	21.6	27.5	79.0	97.1	73.7	19.2
2012	最大值	8.2	1.2	35.4	31.2	26.0	89.2
	最小值	5.0	0.1	0.3	7.1	5.6	62.4
	平均值	6.7	0.9	8.1	16.4	13.8	76.5
	变异系数	21.4	27.8	111.1	39.4	48.9	8.4



表 2 不同处理施肥方案 (公斤 / 亩)

年份	处理	N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
2011 (24 户)	OPT <sub>E</sub>	11.7-14.1	13.0	3.7-4.0	3.9	4.2-4.9	4.6
	OPT <sub>E-N</sub>	0.0	0.0	3.7-4.0	3.9	4.2-4.9	4.6
	OPT <sub>E-P</sub>	11.7-14.1	13.0	0.0	0.0	4.2-4.9	4.6
	OPT <sub>E-K</sub>	11.7-14.1	13.0	3.7-4.0	3.9	0.0	0.0
	CK <sub>0</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	OPT <sub>S</sub>	13.0-16.0	14.7	2.0-7.0	5.0	4.0-7.0	5.8
	FP	12.2-16.0	14.8	3.7-6.0	5.0	0.0-6.5	3.2
2012 (20 户)	OPT <sub>E</sub>	11.1-12.9	10.7	3.5-5.2	4.6	4.8-7.2	5.9
	OPT <sub>E-N</sub>	0.0	0.0	3.5-5.2	4.6	4.8-7.2	5.9
	OPT <sub>E-P</sub>	11.1-12.9	10.7	0.0	0.0	4.8-7.2	5.9
	OPT <sub>E-K</sub>	11.1-12.9	10.7	3.5-5.2	4.6	0.0	0.0
	CK <sub>0</sub>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	OPT <sub>S</sub>	12.0-17.0	15.6	4.0-7.0	5.5	5.0-6.0	5.9
	FP	13.8-17.3	15.8	3.7-6.6	5.1	0.0-6.6	2.9

秸秆和籽粒样品,晒干折成干物重,计算秸秆和籽粒产量,并分析秸秆和籽粒中全 N、P、K 含量,计算 NPK 吸收量和肥料利用率。

农民习惯施肥和基于土壤测试的优化施肥处理更科学合理。从表 3 还可以看出,除不施肥的处理外,OPT<sub>E-N</sub> 处理的产量最低,其次是 OPT<sub>E-P</sub> 和 OPT<sub>E-K</sub> 处理,说明 N 是限制产量的最大因素,其次是 P 和 K。

## 2 结果与讨论

### 2.1 养分专家系统推荐施肥对玉米产量的影响

由两年的产量结果可知(表 3),养分专家系统推荐施肥 OPT<sub>E</sub> 具有明显的增产效果,OPT<sub>E</sub> 较 FP 分别增产 7.0% 和 5.8%,两年平均增产 6.4%,较 OPT<sub>S</sub> 增产 5.5% 和 0.9%,平均增产 3.2%,说明养分专家系统推荐施肥比

### 2.2 养分专家系统推荐施肥对经济效益的影响

从经济效益分析来看(表 4),OPT<sub>E</sub> 处理的效益最高。OPT<sub>E</sub> 较 OPT<sub>E-N</sub>、OPT<sub>E-P</sub>、OPT<sub>E-K</sub> 分别增收 209.4-259.1 元/亩、118.1-191.7 元/亩和 118.4-217.5 元/亩,平均增收 234.3 元/亩、154.9 元/亩和 168.0 元/亩。OPT<sub>E</sub> 较 OPT<sub>S</sub> 和 FP 分别增收 46.4-101.4 元/亩和 105.2-

表 3 养分专家系统推荐施肥对玉米产量的影响

年份	处理	平均产量 (公斤 / 亩)	OPT <sub>E</sub> 处理较其它处理	
			增产 (公斤 / 亩)	增产率 (%)
2011 (24 户)	OPT <sub>E</sub>	718.4	--	--
	OPT <sub>E-N</sub>	591.8	126.6	21.4
	OPT <sub>E-P</sub>	613.7	104.6	17.1
	OPT <sub>E-K</sub>	649.3	69.1	10.6
	CK <sub>0</sub>	564.5	153.9	27.3
	OPT <sub>S</sub>	680.9	37.5	5.5
	FP	671.3	47.0	7.0
2012 (20 户)	OPT <sub>E</sub>	764.9	--	--
	OPT <sub>E-N</sub>	622.8	142.1	22.8
	OPT <sub>E-P</sub>	694.5	70.4	10.1
	OPT <sub>E-K</sub>	651.3	113.6	17.4
	CK <sub>0</sub>	583.4	181.4	31.1
	OPT <sub>S</sub>	758.1	6.8	0.9
	FP	723.0	41.8	5.8



表 4 养分专家系统推荐施肥对经济效益的影响

年份	处理	产值 (元/亩)	肥料成本 (元/亩)	纯收入 (元/亩)	OPT <sub>E</sub> 处理较其它处理增收 (元/亩)
2011 (24 户)	OPT <sub>E</sub>	1508.6	111.1	1397.5	--
	OPT <sub>E</sub> -N	1242.8	54.7	1188.0	209.4
	OPT <sub>E</sub> -P	1288.8	83.1	1205.8	191.7
	OPT <sub>E</sub> -K	1363.5	84.4	1279.1	118.4
	CK0	1185.4	0.0	1185.4	212.1
	OPT <sub>S</sub>	1429.8	133.7	1296.1	101.4
	FP	1409.8	118.8	1291.0	106.5
2012 (20 户)	OPT <sub>E</sub>	1682.7	122.6	1560.1	--
	OPT <sub>E</sub> -N	1370.2	69.2	1301.0	259.1
	OPT <sub>E</sub> -P	1527.9	85.9	1441.9	118.1
	OPT <sub>E</sub> -K	1432.8	90.2	1342.6	217.5
	CK0	1283.6	0.0	1283.6	276.5
	OPT <sub>S</sub>	1667.8	154.1	1513.7	46.4
	FP	1590.7	135.8	1454.9	105.2

注: 2011 年玉米价格 =2.1 元/公斤, N= 4.35 元/公斤, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> =7.17 元/公斤, K<sub>2</sub>O =5.83 元/公斤; 2012 年玉米价格 =2.2 元/公斤, N= 5.0 元/公斤, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=8.04 元/公斤, K<sub>2</sub>O =5.83 元/公斤。

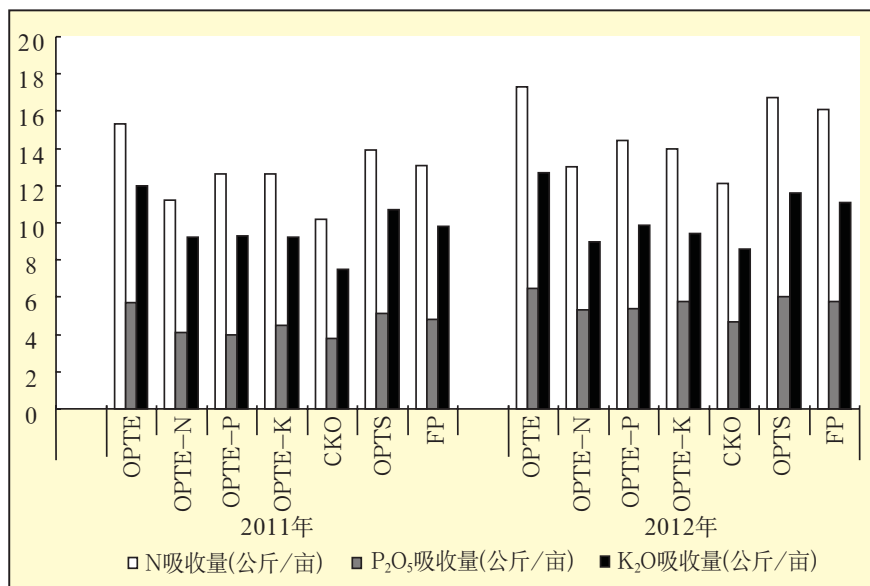


图 1 养分专家系统推荐施肥对玉米养分吸收的影响

106.5 元/亩, 平均增收 73.9 元/亩和 105.9 元/亩。

### 2.3 养分专家系统推荐施肥对玉米养分吸收和利用的影响

图 1 为 2011 年和 2012 年不同施肥处理的玉米养分吸收量。从图 1 可以看出, OPT<sub>E</sub> 处理的氮磷钾吸收量最高, 其次是 OPT<sub>S</sub> 和 FP 处理, 不施肥处理的氮磷钾吸收量最低, 这表明 OPT<sub>E</sub> 处理可以提高玉米对氮磷钾养分的吸收。从农学效率和养分利用利用率来看 (表 5), OPT<sub>E</sub> 处理的增产率和氮磷钾利用率都明显高于 FP 处理, 氮、磷、钾的利用率较 FP 平均分别提高

表 5 养分专家系统推荐施肥对农学效率和养分利用率的影响

年份	处理	增产效应 (公斤/公斤)			形成 100 公斤籽粒吸收养分量 (公斤/100 公斤)			养分利用率 (%)		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2011	OPT <sub>E</sub>	9.9	17.5	15.0	2.13	0.79	1.68	31.5	31.8	57.3
	OPT <sub>S</sub>	7.5	21.6	19.2	2.05	0.75	1.59	23.8	26.7	52.3
	FP	7.0	21.5	16.2	1.96	0.72	1.48	18.7	20.0	48.9
2012	OPT <sub>E</sub>	13.2	15.7	19.9	2.25	0.85	1.66	39.9	25.3	55.5
	OPT <sub>S</sub>	11.3	32.7	29.7	2.20	0.79	1.53	29.8	24.7	51.5
	FP	8.9	28.4	12.9	2.23	0.81	1.53	25.4	23.4	46.0



13.7、6.9和9.0个百分点，较OPT<sub>s</sub>分别提高8.9、2.9和4.5个百分点。由此表明，养分专家推荐施肥能促进玉米对养分的吸收和利用。

### 3 小结

(1)养分专家系统推荐施肥具有较好的增产增收效果，较农民习惯施肥平均增产6.4%，平均增收105.9元/亩。

(2)辽宁省玉米主产区养分限制因子主要是氮，其次是磷和钾。

(3)养分专家系统推荐施肥可以促进玉米对氮磷钾养分的吸收，提高氮磷钾的利用率，氮磷钾的利用率较FP平均分别提高13.7、6.9和9.0个百分点。

# 一种养分管理的新方法

国际植物营养研究所 (IPNI) 30 年来在中国植物营养研究中发挥了重要作用, 原因之一就是不断引进提高作物产量的养分管理新方法。本期《高效施肥》中的论文专门报导用这种新方法进行推荐施肥在小麦 / 玉米上的效果。

本专刊的养分专家系统 (简称 **NE**, 下同) 是 IPNI 东南亚项目在热带杂交玉米研究的基础上研发而成。在过去 5 年内, 我们见证了该系统在多种气候条件下在小麦和玉米上的推广应用。**NE** 专家系统的重要特征在于使农技推广人员可以为农户有效制定一家一户的推荐施肥方案, 是一种真正意义的养分精准管理。

尽管土壤测试方法已成为各种作物推荐施肥的传统手段, 但 **NE** 系统能为农户提供更加详尽的推荐施肥方案。如果农户已有自家地块的土壤测试数据, 则专家系统可以考虑土壤测试结果进行推荐, 但是土壤测试数据并非必需。IPNI 的研究经验表明, 尽管多年来一直利用土壤测试数据作为推荐施肥的基础, 但实际上许多

农户不能及时获得推荐结果, 这一点是推荐施肥面临的巨大挑战。

在中国用 **NE** 进行推荐施肥的结果表明, 农户过量施用氮肥和磷肥的现象很普遍, 钾仍然是中国大多数地区粮食产量提高的限制因子。这些结果也印证了 IPNI 在中国多年的研究目标。多数农户通过减少 **N**、**P** 用量, 增加 **K** 肥用量不仅提高作物产量和养分的利用效率, 而且增加农民收入, 减少养分损失。

若关注最近几年 IPNI 出版的系列刊物就会发现, 近年来 IPNI 一直致力于推广已被全球化肥工业采用的 **4R** 养分管理 (简称 **4R**, 下同) 策略。**4R** 养分管理就是在作物种植体系中将合适的肥料品种和适宜的用量, 在合适的施肥时间施在恰当的位置。在亚洲和非洲的工作清楚表明, **NE** 专家系统可以帮助农户在肥料管理中做出最佳选择, 这与 **4R** 养分管理策略相吻合。利用 **NE** 进行推荐施肥的目标就是发展经济、社会和环境效益相协调的养分管理措施。



Adrian M. Johnston  
国际植物营养研究所 副所长