

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 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 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 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 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 t/ha (IPNI 未发表数据), 表明平均产量差有 3-5 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 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 t/ha 。因此, 当 $Y_a = 10 \text{ t/ha}$ 时, 预估的磷肥

产量反应为 1.5 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 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)

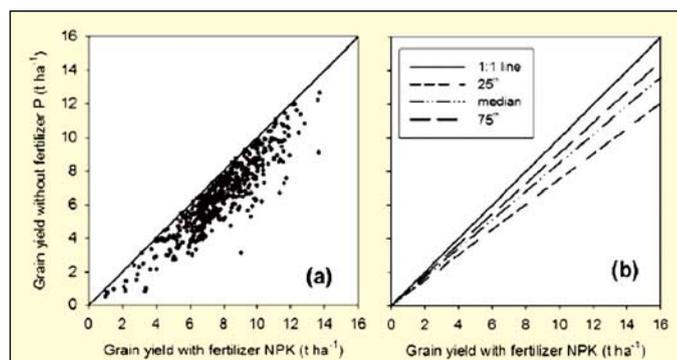


图 1 东南亚地区玉米缺素区产量(如未施磷肥的产量, y 轴)与可获得产量(如施 NPK 肥的产量, x 轴)之间的关系 (a)
注: 斜率中第 25、50 和 75 百分位数所对应的斜率数值对应着土壤基础 P 养分的低、中和高水平 (b)

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) ^a		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 ^b	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。
^a 利用 JMP 第 8 版本 (SAS 研究所, 2009) 运用 Mixed 过程进行分析。
^b 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

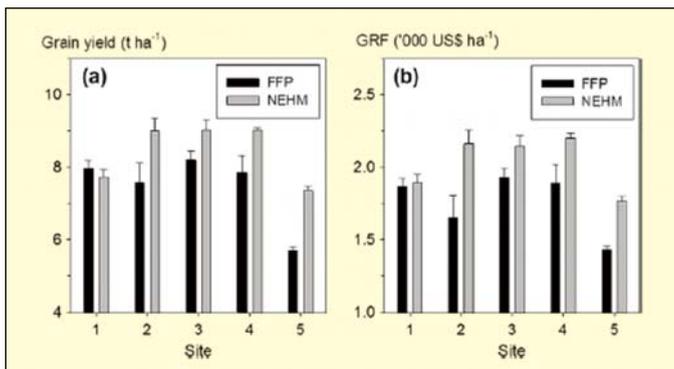


图 2 2010-2011 年印尼 5 个试验点的农民习惯施肥措施 (FFP) 和玉米养分专家管理措施 (NEHM) 下玉米籽粒产量 (a) 和减去种子和肥料消费后的毛收入 (GRF, b) 比较
 注: 误差线表示均值标准误差

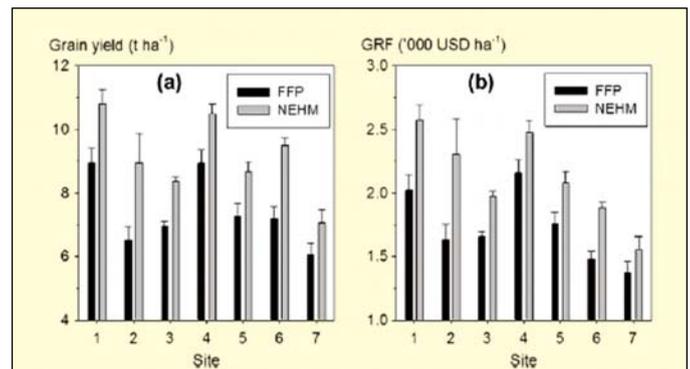


图 3 2010-2011 年菲律宾旱季 7 个试验点的农民施肥措施 (FFP) 和玉米养分专家管理措施 (NEHM) 下玉米籽粒产量 (a) 和减去种子和肥料消费后的毛收入 (GRF, b) 比较
 注: 误差线表示均值标准误差

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 ≥ 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 ^a		地点B ^b	
	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)

^a 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。
^b 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.