

作物养分专家系统 (Nutrient Expert[®]) 与 4R 养分管理

何萍^{1,2} 徐新朋¹ 串丽敏³ 赵蓉蓉²

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 国际植物营养研究所中国项目, 北京 100081; 3. 北京市农林科学院农业科技信息研究所, 北京 100097)

摘要: 当前农民过量和不平衡施用化肥现象严重, 导致肥料利用率降低, 影响到农田的可持续利用。因此, 发展适合我国农业生产特点的养分管理和施肥方法尤为重要。本文介绍了基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥新方法, 该方法是以改进的 SSNM (Site - specific Nutrient Management) 和改进的 QUEFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) 模型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[®] 推荐施肥专家系统软件。NE 系统在推荐施肥中采用作物的 4R 养分管理原则, 即把合适的肥料品种和肥料用量, 在合适的施肥时间施在合适的施肥位置。跨区域田间多点验证试验证明, 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法是一种简单的易于掌握的作物增产增收、提高肥料利用率和保护环境的新方法。

关键词: 产量反应; 农学效率; Nutrient Expert; 4R 养分管理; 推荐施肥

我国人多地少的国情决定要在单位面积土地上生产更多的粮食, 才能满足日益增加的人口对粮食增长的需求。为此, 农民通过增加肥料投入来提高粮食产量, 形成了我国特有的靠化肥的大量投入来增加单产的农田高强度利用生产体系。研究表明, 在华北平原许多地区, 农民在冬小麦和夏玉米作物每季的氮肥用量超过每亩 20 公斤, 远远超过达最高产量时的优化施肥量。连续过量施氮使华北地区土壤矿质氮高量积累, 氮肥利用率显著降低。赵士诚等研究发现河北冬小麦收获后 0 - 100 厘米土层矿质氮积累达每亩 12 - 20 公斤, 且矿质氮积累量随施氮量的增加而增加。冬小麦的氮肥利用率也由上世纪 80 年代的 30% - 35% 下降为现在的 10% - 20%。大量研究证明, 高量化肥投入不仅不能带来产量进一步的增加, 而且还威胁到生态环境安全, 造成地表水或地下水硝酸盐含量超标, 并影响到农田的可持续利用。因此, 如何合理养分管理和优化施肥对于保障国家粮食安全、生态环境安全具有重要意义。

国内外在土壤养分管理和推荐施肥方面开展了大量研究, 发展了一些推荐施肥的方法, 有些方法仍然延用至今, 如地力分级法、目标产量、肥料效应函数法等等。这些研究方法都可以归结为两大类, 一类是以土壤测试为基础的测土推荐施肥方法, 另一类是以作物反应为基础的推荐施肥方法, 如肥料效应函数法和地上部冠层营养诊断等。目前我国指导施肥指标体系仍然延用上世纪八十年代

第二次土壤普查结果, 但是我国目前土壤养分状况已今非昔比, 在一些土壤测试值很高的土壤上有时仍表现出缺素症状, 过去指导施肥的指标体系难以适应当前高投入高产这种高强度利用农业生产体系的需求。为此, 国家农业部 2005 年起启动了“测土配方施肥行动工程”, 推动了各地测土推荐施肥工作的开展。然而, 对于土壤氮素而言, 由于其在土壤 - 作物体系比较活跃, 导致土壤氮素测定与作物地上部反应相关性差。目前国际上对于土壤氮的测试和氮肥推荐也没有令人满意的适合各种土壤类型的测试方法、指标和参数。在当前测土施肥的“大配方、小调整”的指导原则下, 对于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。因此, 寻求一种适合我国国情的养分管理和推荐施肥方法尤为迫切。

1 基于作物产量反应和农学效率的养分管理和施肥推荐原则

作物施肥后主要通过作物产量高低来表征土壤养分供应能力和作物生产能力, 因此依据作物产量反应来表征土壤养分状况是更为直接的评价施肥效应的有效手段。该方法把土壤养分供应看作一个“黑箱”, 用不施该养分地上部的产量或养分吸收来表征, 因此解决了困扰广大科学工作者的土壤氮素供应问题。国际植物营养研究

所 (IPNI) 目前在中国、印度、菲律宾等亚洲一些主要以小农户为主要经营单元的国家和地区开展了基于作物产量反应和农学效率的小麦、玉米和水稻养分管理和推荐施肥研究。该养分管理和推荐施肥原则主要是在 Witt 等水稻养分管理的 SSNM (Site-specific Nutrient Management) 原则基础上改进, 并利用 QUEFTS (Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils) 模型在分析大量的来源于不同试验地点作物养分吸收和产量关系的基础上进行参数调整而成, 在此基础上结合不同作物种植体系和管理方式发展而成适合当地生产条件的养分管理和推荐施肥系统 (Nutrient Expert[®], 简称 NE) (图 1)。该系统在中国的形成主要以 IPNI 在中国开展的多年多点田间试验为基础, 根据不同地区作物产量反应和农学效率进行调整, 从而根据不同试验地点的不同生态条件进行有针对性地推荐施肥。该养分管理方法的主要创新之处在于应用 QUEFTS 模型对来自我国多年多点 (2000 年以后) 田间试验的产量和养分吸收数据进行

了模拟和矫正, 得出一定目标产量下的养分最佳吸收曲线, 避免了较少数据点带来的因养分缺乏、过量或信息量少带来的数值偏差, 而且该养分最佳吸收曲线包含了我国作物主产区中的作物品种和环境条件等信息, 具有一定的普遍指导意义。该方法的创新点之处还体现在有效利用了来自于土壤、作物残体、前茬作物、有机肥以及灌溉水等土壤基础养分供应 (土壤基础养分供应主要由不施某种养分小区的养分吸收或产量来衡量), 并考虑作物的轮作体系。如果有土壤测试结果, 则该系统根据输入的土壤测试结果给出推荐施肥方案 (图 2)。该系统也考虑了对已知的中、微量元素缺乏的土壤进行推荐施肥。该推荐施肥方法同时避免作物对某种养分的奢侈吸收, 减少土壤肥力耗竭, 保证农民增产增收, 有效防止因过量施肥导致的潜在环境危险。

2 作物专家系统采用 4R 养分管理原则

基于以上养分管理原则, 应用计算机软件技术研制了可为农机推广人员方便使用的作物养分管理专家系统 (Nutrient Expert[®]) (图 3)。NE 系统主要通过获取用户所在地块过去 3-5 年的产量、施肥和栽培条件等基本信息 (这些信息可由农户和当地农技人员提供), 利用后台已有的包含多年多点的农学数据库就能给出基于农户个性

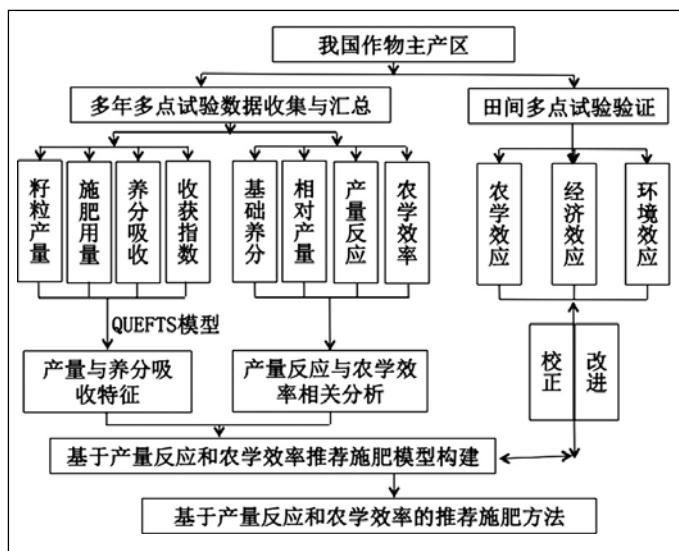


图 1. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法

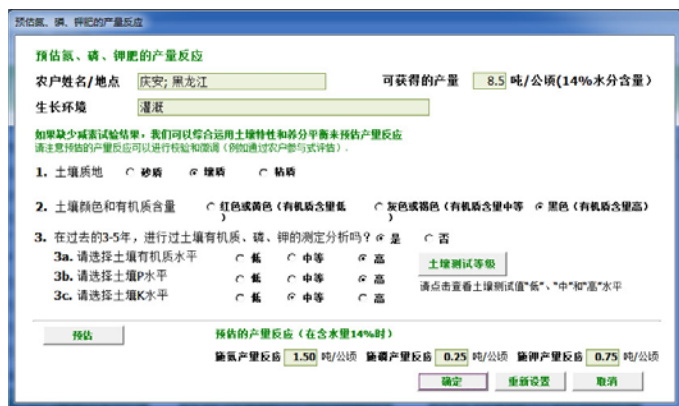


图 2 NE 系统考虑土壤测试的界面

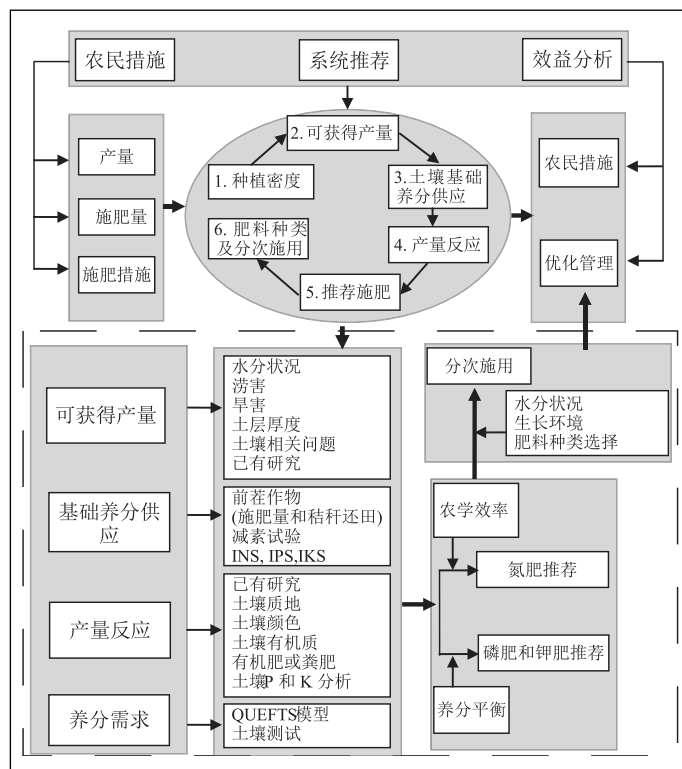


图 3 作物养分专家系统模块和流程图

化的包括栽培管理措施的推荐施肥套餐，如推荐采用合适的肥料品种、合适的肥料施用量、合适的施肥时间和次数等。对于玉米还推荐了适宜的种植密度，帮助农民实现增产增收的目标。NE 系统推荐施肥套餐中还给出了基于 NE 系统推荐和农户习惯施肥的经济效益对比分析，帮助农户进行经济效益比较和分析。

2.1 合适的肥料用量

估算肥料用量是 NE 专家系统最重要的内容。NE 系统中对肥料用量的估算主要依据土壤基础养分供应 (Indigenous Nutrient Supply, 简称为 INS), INS 可由不施肥小区或减素小区的产量高低来表征。确定施肥量首先需要确定目标产量 (可获得产量) (图 4)。目标产量是特定生长季节采用最佳养管理措施能够获得的产量, NE 系统中对目标产量的估算就是特定生长季节的可获得产量, 也即田间最佳管理措施且没有任何养分限制条件下的平均产量。可获得产量与减素小区的产量差即为产量反应, 产量反应越低, 表明土壤养分供应越高, 反之亦然。NE 系统根据 IPNI 研究网络在中国开展的以及公开发表的上万个田间试验数据进行收集、分析和整理, 建成了包含主要作物养分吸收、农学效率以及产量反应等信息的农学数据库。如果缺素小区试验资料缺乏时, NE 系统可根据作物生长条件 (如气候) 和土壤肥力状况等对可获得产量和氮、磷、钾施用的产量反应高低进行估算。当确定目标产量和产量反应后, NE 系统会给出基于目标产量和产量反应的 N、P 和 K 肥推荐用量。

对于氮素养分推荐施肥, 主要依据作物产量反应和农学效率 (施氮量 = 施氮的产量反应 / 氮素农学效率, 施



图 4 NE 系统中的养分优化管理施肥量

氮的产量反应由施氮和不施氮小区的产量差求得), 而对于磷钾养分推荐, 主要基于产量反应和一定目标产量下作物的移走量给出施肥量 (施磷或施钾量 = 作物产量反应施磷或施钾量 + 作物收获物移走量), 作物养分移走量主要依据 QUEFTS 模型求算的养分最佳吸收量来求算。如果作物施肥不增产, 则只考虑作物收获部分养分移走量。对磷钾肥料的推荐还考虑了养分盈亏平衡, 主要考虑包括作物秸秆处理方式、有机肥施入以及上季作物养分带入量等信息。

2.2 合适的肥料品种

NE 系统专门设置了无机肥料和有机肥料信息库 (图 5), 该肥料信息库包含了当前生产上常用的有机和无机肥料品种及其养分含量和肥料价格, 养分含量用于肥料推荐时根据养分含量折算成肥料实物量, 而价格信息主要用于 NE 系统的经济效益分析模块。如果用户发现某一新型肥料品种不在肥料信息库中, 则可以添加新的肥料品种, 也可以对库中已有信息进行编辑修改。这样, 农户就可以根据当地市场或者自己的喜好选择合适的肥料品种。

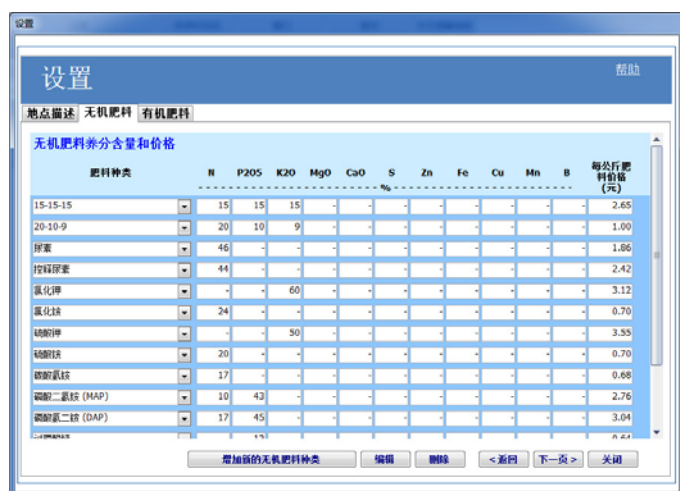


图 5 NE 系统设置界面中的肥料信息库

2.3 合适的施肥时间

NE 系统不仅采用合适的肥料用量和合适的肥料品种, 还建议在合适的时间进行施肥, 以与作物的养分吸收相同步。NE 系统建议在作物生长的关键时期进行分次施肥以及采用合适的施肥比例, 同时也考虑了不同地区的实际情况, 如有些农户愿意一次施肥, NE 系统也增加了一次施肥的选项, 但是建议一次施肥要采用控释肥料, 这样才能与作物养分吸收相同步 (图 6)。



图 6 NE 系统中的肥料种类和分次施肥推荐



图 7 水稻推荐施肥报告单

此模块的输出结果是一个针对作物特定生长环境确定合适肥料种类、合理肥料用量和合适施肥时间的施肥指南(图 7)，包括关键生育期分次施用肥料的汇总表，肥料种类和肥料用量和施肥时期。肥料施用量可以根据地块大小自动调整肥料用量。

2.4 合适的施肥位置

NE 系统设定所有施肥推荐都是按照合适的施肥位置进行施肥。随着现代化农业和农机具的推广应用，合理的

施肥位置需要与农机相结合。如东北玉米推荐施肥是随着耕作起垄带入基肥然后覆土，而华北小麦基肥是与土壤的机械翻耕一起进行的。

3 Nutrient Expert[®] 专家系统推荐施肥实践

自 2010 年开始，应用 Nutrient Expert[®] 专家系统在玉米、小麦和水稻上开展 1025 个田间验证试验进行推荐施肥，同时以农民习惯施肥和测土施肥为对照。田间验证结果表明，与农民习惯施肥比较，基于 Nutrient Expert[®] 系统推荐施肥具有降低成本、提高收益和一定的增产优势(表 1)。更为重要的是，基于 Nutrient Expert[®] 专家系统在小麦、玉米和水稻上分别比农民习惯施肥平均节约 7.7 公斤/亩(41.6%)、4.7 公斤/亩(30.9%)和 0.93 公斤/亩(8.3%)，同时平衡了磷、钾养分；小麦、玉米和水稻氮肥养分回收率分别 13、11 和 9 个百分点，氮肥农学效率分别提高 4、4 和 3 公斤/公斤。与测土施肥比较，虽然产量上没有显著差异，但是也一定程度上减少了肥料氮用量，平衡了磷钾养分，同时提高了氮肥的养分利用率。更为重要的是，本研究证明，在没有土壤测试的条件下，NE 养分专家系统是一种非常方面使用的推荐施肥方法。

应用 NE 专家系统推荐施肥能够增产增收提高肥料利用率的重要原因，在于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，也即采用的作物的 4R 养分管理措施，即采用合适的肥料品种和肥料用量，在合适的施肥时间施在了合适位置。而很多农民习惯施肥不仅肥料用量不合理，还大多采用一次性撒施肥料，过量的肥料尤其是氮肥则损失到土壤—作物系统外，造成氮肥利用率低和并加大了环境风险。

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

表 1 Nutrient Expert 推荐施肥对作物产量、经济效益和氮肥利用率的影响

作物	处理	产量 (公斤/亩)	施肥量 (公斤/亩)			成本 (元/亩)	收益 (元/亩)	VCR	氮素回收率 (%)	氮素农学效率 (公斤/公斤)
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O					
小麦 (N=315)	农民习惯施肥	527 a	18.6	7.9	3.3	149	983	6.6	17.3	5.0
	NE 推荐施肥	540 a	11.0	5.6	4.9	113	1066	9.4	29.9	8.5
	测土施肥	553 a	15.9	7.1	4.7	142	1054	7.4	22.3	6.2
玉米 (N=573)	农民习惯施肥	660 a	15.3	4.1	3.3	114	1229	10.8	18.3	7.9
	NE 推荐施肥	680 a	10.5	3.5	4.5	97	1287	13.1	29.1	12.1
	测土施肥	686 a	13.3	3.7	4.9	113	1265	11.2	23.0	10.4
水稻 (n=137)	农民习惯施肥	520 a	11.3	3.9	5.7	110	1330	12.1	25.0	12.2
	NE 推荐施肥	540 a	10.4	4.7	5.8	110	1387	12.6	34.2	15.0
	测土施肥	527 a	10.8	4.1	6.4	112	1348	12.0	28.0	13.2

注：小麦、玉米和水稻数据分别为 2011–2014 年、2010–2014 年和 2013–2014 年数据。

参考文献

- [1] He P*, Yang LP, Xu XP, et al. Temporal and spatial variation of soil available potassium in China (1990–2012) [J]. *Field Crops Research*, 2015, 173:49–56.
- [2] Qiu SJ, He P*, Zhao SC, et al. Nitrogen rate influences on nitrogen partitioning and efficiency parameters in Northeast China rain-fed maize production systems [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107:1–9.
- [3] Zhao SC, He P*, Qiu SJ, et al. Long-term effects of potassium fertilization and straw return on soil potassium levels and crop yields in north-central China [J]. *Field Crops Research*, 2014, 169:116–122.
- [4] Zhao SC, Qiu SJ, Cao CY, et al. Responses of soil properties, microbial community and crop yields to various rates of nitrogen fertilization in a wheat-maize cropping system in north-central China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 194:29–37.
- [5] Xu XP, He P*, Qiu SJ, et al. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across small-holder farms in China [J]. *Field Crops Research*, 2014, 163:10–17, 10.1016/j.fcr.2014.04.014.
- [6] Qiu SJ, Xie JG, Zhao SC, et al. Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China [J]. *Field Crops Research*, 2014, 163:1–9.
- [7] Xu XP, He P*, Pampolino MF, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency [J]. *Field Crops Research*, 2014, 157:27–34.
- [8] Xu XP, He P*, Pampolino MF, et al. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150:115–125.
- [9] Chuan LM, He P*, Jin JY, et al. Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China [J]. *Field Crops Research*, 2013, 146:96–104.
- [10] Chuan LM, He P*, Pampolino MF, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency [J]. *Field Crops Research*. 2013, 140:1–8.
- [11] 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.
- [12] 何萍, 金继运, Pampolino MF, 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.