

作物推荐施肥方法研究进展¹

串丽敏¹ 何萍^{2*} 赵同科^{3*}

(1 北京市农林科学院农业科技信息研究所, 北京, 100097; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京, 100081; 3 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京, 100097)

摘要: 针对当前农业生产存在施肥不科学, 肥料效率低下, 单产水平低等问题, 综述了当前作物推荐施肥方法研究进展, 为保障粮食安全、提高肥料利用率和保护生态环境安全提供理论与方法支撑。采取文献调研方法, 在当前作物施肥以及肥料利用率现状基础上, 分析不科学施肥对土壤、水体、大气、农产品品质和人体健康的影响, 进而综述了基于土壤养分测试和地上部作物反应的两类推荐施肥策略。测土施肥法、肥料效应函数法、叶绿素仪、叶色卡、硝酸盐反射仪、冠层反射仪、植株症状诊断、实时实地养分精准管理技术以及基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法, 均是指导作物进行合理施肥推荐的科学方法, 每种方法各有独自的特点。在实践中应因地制宜, 选择适用的推荐施肥方法, 以达到协调作物产量、环境保护和农田可持续利用的共赢。在国家政策扶持下, 今后应在基础养分供应、作物长势与养分之间的关系、适应不同大小区域的施肥推荐、养分循环与平衡等方面开展深入研究。

关键词: 施肥; 环境; 推荐施肥; 土壤测试; 产量反应

我国用占世界不到 10% 的耕地, 养活了全球 22% 的人口, 其中化肥在提高粮食产量, 改善民生中发挥了不可替代的重要作用, 是作物增产不可或缺的因子^[1]。资料显示, 从 1980 年到 2013 年间, 我国化肥用量由 1269 万吨增长到 5912 万吨, 翻了近五番, 粮食总产由 1980 年的 32055.5 万吨上升到 2013 年的 60193.8 万吨, 已连续十年增产^[2]。人们为了多产粮食, 逐渐形成了依靠增加化肥投入来提高单产和总产的农田高强度生产体系。然而, 目前在农业生产上仍然存在着施肥不科学, 肥料效率低下, 单产水平低等问题, 导致肥料资源浪费、环境风险增大以及农产品品质下降等一系列后果, 并进一步危害人体健康。随着我国城镇化进程的推进可能带来的粮食种植面积的减少, 以及人口的较快增长, 粮食总需求量持续增长的压力逐渐增加。尤其是 2015 年中国提出实施“化肥零增长”行动, 力争到 2020 年主要农作物化肥使用量实现零增长。如何在化肥用量稳定的前提下, 科学合理使用化肥, 如何在有限的土地上生产出更多的

粮食, 进一步提高作物产量和肥料利用率, 实现粮食生产高产高效, 确保国家粮食安全, 进而减少化肥带来的负面环境影响是当今关注的热点问题, 也是摆在我们面前的现实问题。

国内外在科学合理推荐施肥方面开展了大量研究, 并已在科学确定作物施肥量、提高作物产量、肥料利用效率、增加农民收入和改善土壤肥力上取得了良好成效^[3-6]。本文将在当前农业生产施肥现状与肥料利用效率基础上, 分析不科学施肥对土壤、水体、大气、农产品品质和人体健康的影响, 综述国际上基于土壤养分测试和地上部作物反应的两类推荐施肥策略, 着重介绍测土施肥法、肥料效应函数法、叶绿素仪、叶色卡、硝酸盐反射仪、冠层反射仪、植株症状诊断、实时实地养分精准管理技术以及基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法, 并建议在实践中因地制宜, 选择适用的推荐施肥方法, 从而达到协调作物产量、环境保护和农田可持续利用的共赢。

¹ 资助项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项 (KJ CX20140207); 国家 973 项目 (2013CB127405); 国际植物营养研究所平衡施肥项目; 国家科技支撑计划项目 (2012BAD15B01) 资助。

作者简介: 串丽敏 (1984—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事农业环境与学科发展态势研究。E-mail: xiaochuan200506@126.com

* 通讯作者: heping02@caas.cn; tkzhao@126.com

1 当前施肥现状与肥料利用效率

传统观念认为,肥料投入越多,产量就越高。为了追求高产和效益,农民大量施用化学肥料,一些地区施肥过量及不平衡现象极为突出。研究表明,华北平原许多地区,农民在冬小麦和夏玉米每季作物上的氮肥用量普遍超过 20 公斤/亩,远远超过达到最高产量时的优化施肥量^[7, 8]。高强等^[9]对东北地区 443 个农户春玉米施肥现状调查发现,东北地区 N、P₂O₅ 和 K₂O 的平均施用量为 13.8、6.7 和 4.3 公斤/亩,氮磷钾施用量适宜的农户比例分别为 38.9%、22.3% 和 38.5%,农户施磷量偏高、施钾量偏低以及施用有机肥农户很少是主要问题。常艳丽等^[10]对陕西关中平原冬小麦-夏玉米轮作施肥情况调查发现,冬小麦季 N、P₂O₅ 和 K₂O 平均用量为 21、12.2 和 1.7 公斤/亩,夏玉米季 N、P₂O₅ 和 K₂O 平均用量为 19.2、3 和 0.8 公斤/亩,整个轮作体系中,氮肥施用过量严重,且前期投入偏多,后期投入偏少,磷肥投入偏高。另有调查表明,太湖流域水稻氮肥施用量普遍偏高,平均施氮量为 20 公斤/亩,若以 14 公斤/亩的专家推荐施肥量为基准,则有 74.4% 的农户施氮量超过这一数值^[11]。

虽然我国在施用有机肥肥料方面有着悠久的历史,农民对施用有机肥的好处也有一定的认识,然而,由于种粮效益低,长期以来农民培肥地力的积极性不高,加上农家肥传统生产方法费工、费力,在同等投入条件下,商品有机肥当年所产生的增产效益不明显,鼓励农民施用有机肥的政策力度较弱等原因,导致农民施用有机肥的积极性不高,更愿意施用化肥,目前农田中投入的有机肥资源多是来自秸秆还田。

大量研究证明,高量化肥投入将会造成严重的资源浪费,降低肥料回收率。1998 年朱兆良^[12]就曾指出当时主要粮食作物的氮肥、磷肥和钾肥回收率范围分别为 30% - 35%、15% - 20% 和 35% - 50%。张福锁等^[13]对 2000 - 2005 年不同地区、不同粮食作物施肥研究也表明,不同地区间主要粮食作物(包括水稻、玉米和小麦)的氮、磷和钾肥回收率变异较大,其变化幅度主要分布在 10.8% - 40.5%、7.3% - 20.1% 以及 21.2% - 35.9%,平均分别为 27.5%、11.6% 和 31.3%。同时,中国农业科学院对全国 165 个监测点的田间试验统计得出,小麦和玉米的氮、磷和钾肥当季回收率平均分别为 28.7%、13.1% 和 27.3%^[14]。王伟妮等^[15]对湖北省水稻、小麦、油菜和棉

花的田间肥效试验进行汇总发现,农作物平衡施用氮、磷、钾肥的增产效果显著,但不同作物的施肥效应差异较大。水稻、小麦、油菜和棉花施肥后对产量的贡献率分别为 29.6%、48.6%、56.2% 和 38.0%,肥料农学利用率分别为 7.2、7.7、4.0 和 3.0 公斤/公斤。本课题组汇总了 2000 - 2011 年中国粮食作物的氮磷钾养分效率,结果显示,小麦氮、磷和钾肥的农学效率分别为 9.4、10.2 和 6.5 公斤/公斤,玉米氮、磷和钾肥农学效率分别为 11.4、6.9 和 9.7 公斤/公斤,水稻氮、磷和钾肥的农学效率分别为 13.0、12.7 和 8.4 公斤/公斤^[16-18]。上述研究结果显示,我国化肥利用效率偏低,与发达国家相比还有较大差距,尤其在华北平原粮食作物集约化种植区,氮肥回收率低的现象更为严重。同时发现,无论是氮、磷,还是钾肥,我国主要粮食作物的肥料回收率均呈现逐渐下降趋势。

2 不科学施肥的影响

2.1 不科学施肥对土壤的影响

目前肥料的不科学施用,使过多的养分(尤其是氮素)残留在土壤中,更可能威胁到生态环境安全,并影响到农田的可持续利用。研究发现^[19],华北地区小麦-玉米轮作体系多年多点(n>500)农田土壤硝态氮累积量在 0 - 90 厘米土层中最高达到 40 - 60 公斤/亩,平均约 13.3 公斤/亩。赵士诚等^[4]研究也表明,河北省冬小麦收获后 0 - 100 厘米土层矿质氮积累量达 20 - 20.2 公斤/亩,远远高于欧盟国家规定的大田作物收获后硝态氮最高残留量(0 - 90 厘米土层)6 - 6.7 公斤 N/亩的标准^[20]。这种因过量施肥导致的土壤硝态氮残留现象极为普遍。土壤中的硝酸盐长期累积,就会造成硝酸盐含量超标,进而土壤发生酸化、盐渍化和土壤板结,土壤肥力质量降低。同时,肥料生产过程中混入的重金属也会在土壤中逐渐富集,最终造成土壤重金属污染。

2.2 不科学施肥对水体的影响

土壤中的硝态氮随着地表径流或淋溶下渗到水体,加剧了江、河、湖、库等地表水的富营养化以及地下水硝酸盐含量超标。众所周知,水体中硝酸盐含量超标,直接危害人畜健康,对人类以及环境带来一定的潜在风险。

磷肥虽然在土体中不易移动,但是磷素也是造成水体富营养化的重要元素之一。磷通过径流冲刷进入地表水体,作为营养物质被藻类吸收,藻类的快速生长使水道阻塞,

鱼类生长空间缩小, 氧气浓度下降, 水体透明度降低, 有害物质繁殖积蓄, 最终污染水体。

2.3 不科学施肥对大气环境的影响

氮肥施入土壤后, 经过氨挥发、反硝化等过程生成 NH_3 、 NO 、 N_2O 等气体进入大气, 可导致气候变暖, 臭氧层破坏, 甚至形成酸雨。大气中的氨含量增加, 经降雨途径进入陆地水体, 也会成为地表水富营养化的因素之一。 N_2O 是一种重要的温室气体, 其增温潜势是 CO_2 的 190 - 270 倍, 并且还可与臭氧作用进而破坏臭氧层对地球的保护作用, 增加地面紫外线强度, 破坏生物循环, 危害人类健康。

2.4 不科学施肥对农产品品质和人体健康的影响

过量的氮肥施用会导致硝酸盐在土壤中的累积。 NO_3^- 本身没有毒害, 但是土壤中的硝酸盐被作物吸收以后, 通过食物链进入人体, 在人体被还原为亚硝酸盐后, 可与食品中的二级胺合成亚硝酸胺。亚硝酸胺具有致癌作用, 如果含量过高, 会给人体健康带来严重威胁。另外, 不科学的施肥还会导致农产品的营养物质失衡, 口感变差, 可食部分营养价值降低。

3 科学施肥方法研究进展

肥料过量与不合理施用不仅不能进一步提高产量, 还造成肥料资源浪费, 并影响到人体健康和生态环境安全。因此, 研究作物种植体系高效施肥理论与方法对于保障粮食安全、提高肥料利用率和保护生态环境安全具有重要意义。

平衡施肥是促进粮食高产、肥料高效的有效途径, 也是一项科学而有意义的农业推广技术, 其重要目标是实现施肥效益的最大化, 而如何合理确定施肥量一直是施肥技术的核心和难点。因此, 科学合理推荐施肥方法的建立是平衡施肥技术的核心内容之一。在农作物推荐施肥实践和研究中, 推荐施肥方法主要分为基于土壤养分的推荐施肥方法以及基于作物的推荐施肥方法等两大类。

3.1 基于土壤养分的推荐施肥方法

基于土壤养分的推荐施肥方法是根据土壤中不同养分含量以及作物生长的养分需求量进行施肥推荐, 而能否快速、准确地进行土壤养分测试是测土施肥技术的基础和前提。目前, 在全国范围内已经广泛开展了测土配方施肥工

作, 用于推动粮食增产、农民增收和保护生态环境。测土施肥方法普遍是通过设计“3414”田间试验来建立推荐施肥指标体系, 进而指导合理施肥^[21]。

“3414”试验方案属二次回归 D - 最优设计的一种, “3”是指氮、磷和钾 3 种元素; “4”是指试验设计 4 个肥料用量水平, “14”是指共设计 14 个处理, 分别为 (1) N0P0K0 , (2) N0P2K2 , (3) N1P2K2 , (4) N2P0K2 , (5) N2P1K2 , (6) N2P2K2 , (7) N2P3K2 , (8) N2P2K0 , (9) N2P2K1 , (10) N2P2K3 , (11) N3P2K2 , (12) N1P1K2 , (13) N1P2K1 , (14) N2P1K1 。该方案设计吸收了回归最优设计处理少、效率高的优点。其中, 0 水平表示不施肥, 2 水平视为当地最佳施肥量的近似值, 1 水平为 2 水平的一半, 3 水平为 2 水平的 1.5 倍, 视为过量施肥水平。

该方案中的 14 个处理可以进行氮、磷、钾三元二次肥料效应函数的拟合。除此之外, 还可分别对氮、磷或钾三种元素中的任意二元或一元肥料进行效应函数的拟合。例如: 选用 2 - 7、11 和 12 处理, 可以进行氮、磷二元肥料效应函数拟合, 求得以 K2 施用水平上的氮、磷二元二次肥料效应函数; 选用 2、3、6 和 11 处理, 可求得在 P2K2 施用水平上的氮肥效应函数; 选用 4、5、6 和 7 处理, 可求得在 N2K2 施用水平上的磷肥效应函数; 选用 6、8、9 和 10 处理可求得在 N2P2 施用水平上的钾肥效应函数。有了相应的肥料效应函数, 就可获得具体的最佳肥料用量, 为肥料配方和施肥推荐提供依据。

另外, 还可通过土壤测试结果和田间肥效试验结果, 建立不同作物、不同区域的土壤养分丰缺指标, 提供肥料配方。或者, 根据作物目标产量需肥量与土壤供肥量之差估算肥料施用量。其表达式如下:

$$W_{\text{input}} = (W_{\text{output}} - 0.15 * k_{\text{soil}} * T_n) / k_{\text{fer}}$$

其中, W_{input} 为当季肥料施用量 (公斤 / 亩); W_{output} 为作物形成一定产量所需要的总养分吸收量 (公斤 / 亩); k_{soil} 为土壤该种有效养分的表观利用率 (%); T_n 为土壤有效养分的室内分析测试值 (毫克 / 公斤); k_{fer} 为来自肥料养分的当季回收率 (%); 0.15 是将土壤测试值转换为公斤 / 亩的系数, 是将 20 厘米耕层土壤按每亩 15 万公斤来计算。 k_{soil} 和 k_{fer} 两个参数需要由相应的田间试验计算得出。其中, k_{soil} 可以通过缺素区或空白区作物吸收某种养分的总量与季前耕层土壤该种有效养分总量的比值获得, 用百分数表示; k_{fer} 为施肥区作物吸收某种养分的总量与缺素区或空白区作物吸收该种养分吸收量之间的差值

再与施肥区该养分施入总量的比值,也用百分数表示。

目前的测土分析技术多是通过联合提取剂进行浸提,一次性可以提取多种元素,然后借助原子吸收或 ICP 等先进仪器对多个元素同时进行测定,大幅度提高了测试效率。中国国家测土施肥中心实验室普遍采用土壤养分系统研究法(ASI法)进行土壤养分测试。ASI法是用于测土配方施肥土壤养分测试的主要方法,是由美国佛罗里达的国际农化服务中心(Agro Services International Inc.)在总结前人土壤测试工作基础上,结合美国北卡罗莱那州立大学的相关研究结果,于1980年提出的一套用于土壤养分状况评价的实验室分析和盆栽实验方法。1989年该方法引入我国,称为“土壤养分状况系统研究法”^[22]。ASI法不仅可以提高土壤养分分析的效率,而且还实现了土壤养分测定的工厂化、系列化操作。它可测定土壤中的15个肥力指标(包括11种营养元素),即土壤活性有机质、pH、交换性酸、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、速效P、K、Ca、Mg、S、B、Cu、Fe、Mn、Zn等元素,并成功用于指导作物专用肥生产,取得了显著的经济效益和社会效益。

在测土配方施肥工作中,主要采取综合兼优选用的原则,可选择使用传统方法,也可同时采用创新方法。目前,在田间实践中,逐渐形成了一套针对我国主要土壤类型和作物种类的测土推荐施肥方法与技术体系,可对我国不同土壤类型和130多种作物进行测土并做出施肥推荐^[22]。测土施肥技术与农民习惯施肥相比,一定程度的降低了氮肥用量,调整了磷钾肥用量,提高了作物产量和肥料回收率,也增加了农民收入^[17, 23],成效明显。

3.2 基于作物的推荐施肥方法

土壤养分供应能力以及作物对养分的吸收能力决定着作物整体的营养状况,可以通过对作物的营养状况诊断,确定植株体内养分含量的丰缺动态,并以此作为作物追肥决策的依据,实现精准变量施肥。基于作物的推荐施肥方法通常将作物地上部的产量及营养状况作为诊断作物生长正常与否的依据,主要从作物的生长表现与产量的建成等方面进行考虑,如作物籽粒产量的高低、作物地上部的长势与颜色外观表现等。

基于作物产量的推荐施肥方法目前主要提出了肥料效应函数法、叶绿素仪、叶色卡、硝酸盐反射仪、冠层反射仪、植株症状诊断以及实时实地养分精准管理技术等方法。传统的地上部营养诊断方法通常是采集植株样品进行实验

室分析,该方法是进行破坏性取样,操作复杂、测试分析周期长,难以在较短时间内实现对作物生长期间的实时监测。随着速测技术的推广,基于作物地上部长势与颜色外观的无损诊断技术,如叶绿素仪、叶色卡以及基于光谱反射进行诊断的技术逐渐发展起来,可以在较短时间内实现作物养分的实时科学管理^[24]。

肥料效应函数方法认为作物地上部的产量是肥料综合作用的效果,通过建立作物产量与肥料施用量之间的统计关系,可以进行施肥推荐。具体步骤是通过不同的试验设计,包括简单的对比、回归和正交设计等方法布置多点田间试验,将来自不同处理的地上部作物产量与施肥量进行数理统计,得到肥料效应函数,由此可计算出代表性地块的最高施肥量、最佳施肥量以及获得最大经济效益时的施肥量,并将其作为推荐施肥的依据。

叶绿素仪方法是一种迅速而准确地监测田间作物氮素营养状况的有效手段,是一种无损速测技术,可以为氮素的追肥施用提供实时指导,其测定方法是將作物叶片插入叶绿素仪的测定部位,通过感光后读出叶绿素值(表示为SPAD),从而建立叶绿素值与植株含氮量的相关关系。研究已表明,叶片SPAD值与作物的氮素含量具有显著正相关关系^[25]。在此基础上确定氮素营养诊断的叶色值,其原理主要是基于叶绿素对红光的强吸收与对远红外光的低吸收。近年来,手持叶绿素仪由于其操作简单、及时、对作物无损伤而被广泛应用于不同粮食作物和经济作物上的氮肥推荐^[26-28]。

叶色卡片法(Leaf colour chart, LCC)是依据作物叶色深浅与叶片全氮含量之间具有良好的线性关系原理研制出标准叶色卡,根据实际作物叶色深浅诊断养分的丰缺,进而指导施肥。然而,该方法对叶色的判读存在一定的人为因素,并且品种或基因型的不同,也会不可避免地存在一些误差;另外,叶色卡片法还不能辨别作物失绿是由缺氮引起还是由其它因素所为,但是与其它推荐施肥方法相比,该方法较为简单、方便、并使营养诊断呈现半量化、易于看到实效等特点,逐渐得到农民的广泛认可^[29-30]。

硝酸盐反射仪方法是利用 NO_3^- 具有偶氮反应,能够生成红色染料%的原理,可以利用通过比色法直接读出 NO_3^- 浓度,然后找到氮素营养诊断值指导氮肥施用的方法。目前,在植株营养诊断中,小麦一般以茎基部作为诊断部位,玉米一般采用新成熟叶的叶脉作为诊断部位。随着硝酸盐反射仪等便捷仪器的出现,加快了硝态氮测试技术在推荐施肥中的应用。

作物的冠层颜色直接反映了作物的营养状况，例如缺氮植物叶片颜色较浅，冠层颜色呈现偏黄绿色。因此在传统农业生产中，农民可以直接通过肉眼观察判断作物绿色深浅来断定作物营养状况，决策是否需要施肥。在光谱研究基础上，一些简化的便携式光谱测试仪逐渐发展起来，这些仪器可以在田间直接获取植物冠层的多光谱反射信息，将光谱数字化，建立与植株氮素营养之间的关系，进而获得相应的推荐施肥量。如美国开发的基于冠层多光谱分析的仪器 Green Seeker，属多光谱主动探测，通过光源主动发射红外光和近红外光，被作物冠层反射后由其传感器接收并进行数模转换，从而可以计算出标准化的植被指数（即 NDVI 指数），该指数是植物生长状态以及作物空间分布密度的最佳指示因子。在此基础上建立相应的诊断推荐模型，用于小麦、玉米和水稻作物的追肥推荐^[31-33]。

根据作物生长所表现出的某种特定症状，推断其可能缺乏某种营养元素并进行指导施肥的方法称之为植株症状诊断技术。作物缺乏的元素不同所表现的症状也不同。如冬小麦缺氮症状表现为茎秆矮小，植株生长不良，叶片狭小而稍硬，单株分蘖少，穗数少，粒穗小，叶色淡，早熟且产量低；冬小麦氮素供应过量的症状表现为易倒伏，易受病虫害侵入，同时分蘖增多，贪青晚熟。然而，症状诊断技术通常在植株仅缺一种营养元素情况下有效，当植株同时缺乏两种或两种以上营养元素或由非营养因素，如受到病虫害、药害、生理病害等因素引起时，原因容易混淆且难以分辨，可能会造成误诊。从另一角度考虑，当植株已经表现出某种特定的缺素症状时，说明植物缺素程度已经相当严重，如果此时再采取补救措施可能为时已晚。因此，症状诊断在实际应用上存在时效上的局限性。

精准变量施肥作为新近发展起来的施肥技术，具有广阔的应用前景。实时实地氮肥管理技术最初是国际水稻研究所研发的一种新型水稻养分管理方法，属精准变量施肥技术方法之一，在生产上应用面积逐步扩大。与传统的氮肥管理方法相比，实时实地氮肥管理技术其重要特点是较大幅度降低基肥和作物生长前期的氮肥用量，而增加中后期的氮肥用量。在实时实地氮肥管理研究方面，多与便携仪器无损速测技术相结合，如与叶绿素仪或叶色卡等技术的结合。Peng 等^[34]在 SPAD 测定值与单位面积叶片含氮量的极显著正相关关系基础上，将 SPAD 测定值作为水稻氮素营养状况快速诊断的特征指标，提出了实时氮肥管理模式 (Real-time Nitrogen Management, RTNM)，其技术特征是利用叶绿素仪或叶色卡从施肥有效期开始，

每周测定叶片的 SPAD 值，来表征氮素营养状况，将每周 1 次的实时测定结果与设定的 SPAD 或 LCC 阈值相比较，来确定是否需要追施氮肥，并且根据土壤肥力、目标产量和作物养分吸收特征决定追肥用量，一般用量在 2.0 - 3.3 公斤 N/亩，并可根据生长期适当调整。为减少田间测定工作量，Dobermann 等^[35]将该方法进行简化，只在水稻生长关键时期利用 SPAD 或 LCC 测定水稻氮素营养状况的动态调节氮肥追肥用量的方法，提出了实地养分管理技术 (Site-specific Nutrient Management, SSNM)。目前该方法已在国内外广泛应用^[36-37]。

基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法是国际植物营养研究所提出来的平衡施肥方法，并将其开发集成形成以电脑软件形式面向科研人员和农业科技推广人员的养分专家系统 (Nutrient Expert, NE)^[6, 38, 39]。其中，产量反应是指施用氮磷钾肥料的处理与不施某种养分的缺素处理之间的产量差，即为该养分的产量反应。农学效率是指施入 1 公斤 N、P₂O₅ 或 K₂O 养分所能增加的籽粒产量。基于产量反应和农学效率的施肥方法认为，作物施肥后所达到的产量主要有两部分组成，一部分是由土壤基础养分供应所能生产的产量，可用不施某种养分的缺素处理其作物产量来表征^[23, 40]；另一部分是由施肥作用所能增加的产量^[40]。基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法能够充分利用来自土壤本身、秸秆还田、灌溉水、大气沉降、生物固氮、种子带入等多种途径来源的土壤基础养分。由于作物主要通过地上部产量的高低来表征土壤基础养分供应能力以及作物生产能力，因此依据施肥后作物地上部的生长反应，如产量反应，来表征作物营养状况是更为直接评价施肥效应的有效手段^[6]，从而避免过量养分在土壤的累积，并且考虑了 N、P 和 K 养分之间的相互作用。

在养分专家系统中，预估产量反应的方法主要有两种：一种是在附近区域具有相似养分管理措施的土壤上做过减素试验，产量反应直接由具体的养分供应充足的产量与缺素产量之间的产量差获得；如果在附近区域没有做过减素试验，养分专家系统可以根据作物的生长环境特征（灌溉情况、旱涝情况）、土壤肥力指标、有机肥施用情况、上季作物秸秆处理和施肥情况以及当前作物实际产量等信息调用背后数据库对产量反应进行估算。一旦产量反应数值确定，根据产量反应和农学效率之间的关系，可以确定在该产量反应时对应的农学效率，进而计算得出氮、磷和钾的推荐施肥量。由于 N 素比较活跃，且容易损失到水体或大气环境中进而带来环境风险，因此，氮肥推荐仅考

考虑了产量反应和农学效率两个参数，而磷钾肥的推荐量则还考虑了土壤磷钾素的养分平衡以及土壤可持续性，以保证充足供应和维持地力，即磷钾肥的推荐用量为产量反应所需要的养分加上籽粒或（和）秸秆带走的养分。具体如下公式所示^[41]：

氮肥推荐量 = N 产量反应 / N 肥农学效率

磷（钾）肥推荐量 = 磷（钾）产量反应部分所需养分 + 当季作物收获带走的养分

基于产量反应和农学效率的养分专家系统是在多年多点数据库基础上，通过向农户询问问题的形式可以在几分钟内做出施肥推荐，弥补了测土施肥耗时耗力、测试时间长以及推荐不及时和不足，是测土条件不充分时可供选择的一种推荐施肥技术。该种推荐施肥方法能够综合作物养分管理的“4R”原则，即在合适的施肥时间（right time），选择合适的肥料种类（right source），在合适的施肥位置（right place），放合适的肥料用量（right rate），能够在保障产量的条件下提高肥料利用率和农民收入，也满足了对不同大小田块推荐施肥的适应性，既可适于田间尺度，又可针对区域尺度，并且对于养分的平衡供应、降低因施肥过量而带来的环境风险具有重要意义。该方法已经在印度、菲律宾等东南亚国家和非洲等一些国家的水稻和玉米作物上逐渐得到应用^[38, 39, 42]，我国在玉米、小麦和水稻作物上的多年研究也证明，基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥，在保持或提高作物产量的同时，不仅考虑了土壤-作物系统的养分平衡，而且能够最大限度提高作物养分利用率并减少养分的环境损失，最大限度高效施用肥料和提高农民经济效益，协调了作物的农学效应、环境效应和经济效应^[6, 16-18]。与传统的测土施肥、植株营养诊断施肥等一系列测试技术和方法相比，该理论与技术具有时效性强、简便经济、易于掌握、适用广泛等优点，特别是在测土和植株诊断等条件不充分时采用显得尤为重要。随着科学施肥技术的发展，基于作物产量反应和农学

效率的养分专家推荐施肥系统会逐渐成为一种重要的、有效的生态集约化养分管理方法。

4 结论与展望

肥料过量与不合理施用不仅不能进一步提高产量，还造成肥料资源浪费，并影响到生态环境安全。基于土壤测试和基于作物地上部反应进行推荐施肥是两类不同的方法，每种方法各有独自的特点。因此，在实际应用中应因地制宜，选择适用的推荐施肥方法，以达到协调作物产量、环境保护和农田可持续利用的共赢。

同时，今后在实践中，应从以下几方面着重开展研究与应用：（1）对来自土壤本身、大气沉降、灌溉水、作物秸秆还田、生物固氮等途径的养分供应开展定性和定量分析，为基于土壤养分测试的推荐施肥方法提供理论和数据支撑，进而合理调节施肥推荐量；（2）基于作物地上部反应的各种推荐施肥方法，应进一步研究作物外观长势与养分之间的相关关系，并根据实地特征对其进行调节，增强基于作物推荐施肥方法的本地适用性；（3）区域尺度对肥料进行宏观调控的施肥方法可以和针对小农户的测土施肥方法相互补充，尤其在当前作物种植体系复杂，茬口紧，测试工作量繁重、推荐施肥不及时以及相关不同推荐方法存在某些不足等条件下，仍然需要建立和推广更为方便、快捷、更适合于大小不同农户田块应用的科学养分管理方法，协调作物产量、环境保护和农田可持续利用共赢。（4）开展土壤-作物-环境生态系统的养分循环与平衡研究，保证不同的科学施肥方法能够保持土壤的可持续利用与环境友好；（5）在政策上，建议国家给予支持和引导，科研人员也应积极开展推荐施肥方法培训，使各种方法不要仅仅停留于理论研究，更要扩大实践与应用范围，发挥最大的效益。

参考文献

- [1] 田素妍. 中国化学肥料制造业生产率研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 博士学位论文, 2008.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [3] 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.
- [4] 赵士诚, 沙之敏, 何萍. 不同氮素管理措施在华北平原冬小麦上的应用效果 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2):517-524.
- [5] 韩晓君, 张先政. 安徽省芜湖县实施测土配方施肥后耕地土壤养分状况及变化特征 [J]. 土壤通报, 2014, 45(4):892-896.
- [6] 何萍, 金继运, Pampolino MF, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥新方法 [J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2):499-505.
- [7] He P, Li S T, Jin J Y, et al. Performance of an optimized nutrient management system for double-cropped wheat-maize rotations in North-Central China[J]. Agron. J., 2009, 101:1489-1496.
- [8] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwaternitrate contamination: Comparison among three intensivecropping systems on the North China Plain[J]. Environ. Poll., 2006, 143:117-125.
- [9] 高强, 冯国忠, 王志刚. 东北地区春玉米施肥现状调查 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(14):229-231.
- [10] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会, 等. 陕西关中平原小麦 / 玉米轮作体系施肥现状调查与评价 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2014, 42(8):51-61.
- [11] 蒋孝松, 刘彩玲, 隋标, 等. 太湖流域稻麦轮作体系施肥现状分析与对策 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(15):15-18.
- [12] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策 [C] // 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998, 38-51.
- [13] 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.
- [14] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. 中国农业科学, 2008, 4(2):450-459.
- [15] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究 [J]. 中国农业科学, 2010, 43(19):3997-4007.
- [16] 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 Crop Res., 2013, 140:1-8.
- [17] Xu X P, He P, Pampolino MF, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency[J]. Field Crop Res., 2014, 157:27-34.
- [18] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 博士学位论文, 2015.
- [19] 朱兆良. 中国土壤氮素研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5):780-790.
- [20] Isfan D, Zizka J, Avignon AD, et al. Relationships between nitrogen rate, plant nitrogen concentration, yield and residual soil nitrate nitrogen in silage corn[J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1995, 26:2531-2557.
- [21] 杨俐苹, 白由路, 王贺, 等. 测土配方施肥指标体系建立中“3414”试验方案应用探讨—以内蒙古海拉尔地区油菜“3414”试验为例 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):1018-1023.
- [22] 白由路, 杨俐苹. 我国农业中的测土配方施肥 [J]. 土壤肥料, 2006, (2):3-7.
- [23] 沙之敏. 冬小麦、夏玉米氮素优化管理研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 硕士学位论文, 2010.
- [24] 郭建华, 赵春江, 王秀, 等. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2008, (4):10-14.
- [25] 鱼欢, 邬华松, 王之杰. 利用 SPAD 和 Dualex 快速、无损诊断玉米氮素营养状况 [J]. 作物学报, 2010, 36(5):840-847.
- [26] 易琼. 麦-稻作物系统氮素优化管理技术研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 硕士学位论文, 2011.
- [27] 赵士诚, 何萍, 仇少君, 等. 相对 SPAD 值用于不同品种夏玉米氮肥管理的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5):1091-1098.
- [28] Varinderpal S, Bijay S, Yadvinder S, et al. Need based nitrogen management using the chlorophyll meter and leaf colour chart in rice and wheat in South Asia: a review[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2010, 88(3):361-380.
- [29] Ali A M, Thind H S, Sharma S, et al. Prediction of dry direct-seeded rice yields using chlorophyll meter, leaf color chart and Green Seeker optical sensor in northwestern India[J]. Field Crops Res., 2014, 161:11-15.
- [30] Varinderpal S, Yadvinder S, Bijay S, et al. Calibrating the leaf colour chart for need based fertilizer nitrogen management in different maize (*Zea mays* L.) genotypes[J]. Field Crops Res., 2011, 120:276-282.
- [31] Ali A M, Thind H S, Varinderpal S, et al. A framework for refining nitrogen management in dry direct-seeded

- rice using Greenseeker (TM) optical sensor[J]. *Comput. Electron. Agr.*, 2015, 110:114–120.
- [32] Bajay S, Sharma R K, Jaspreet K, et al. Assessment of the nitrogen management strategy using an optical sensor for irrigated wheat[J]. *Agron. Sustain. Dev.*, 2011, 31(3):589–603.
- [33] Schmidt J, Beegle D, Zhu Q, et al. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor[J]. *Field Crops Res.*, 2011, 120(1):94–101.
- [34] Peng SB, Laza RC, Garcia FV, et al. Chlorophyll meter estimates leaf area-based nitrogen concentration of rice[J]. *Commun. Soil Sci. Plant*, 1995, 26:927–935.
- [35] Dobermann A, Witt C, Dawe D, et al. Site-specific nutrient management for intensive ricecropping systems in Asia[J]. *Field Crops Res.*, 2002, 74:37–66.
- [36] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review[J]. *Agron. Sustain. Dev.*, 2010, 30(3):649–656.
- [37] Singh V K, Shukla A K, Singh M P, et al. Effect of site-specific nutrient management on yield, profit and apparent nutrient balance under pre-dominant cropping systems of Upper Gangetic Plains[J]. *Indian J.Agr. Sci.*, 2015, 85(3):43–51.
- [38] Pampolino MF, Witt C, Pasuquin JM, et al. Nutrient Expert for Hybrid Maize (version 1.11). A software for formulating fertilizer guidelines for tropical hybrid maize[J]. *Int. Plant Nutr. Inst.*, Penang, Malaysia, 2011.
- [39] Pampolino M F, Witt C, Pasuquin J M. et al. Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops[J]. *Comput. Electron. Agr.*, 2012, 88:103–110.
- [40] Janssen B H, Guiking F C T, Vander E D, et al. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS)[J]. *Geoderma*, 1990, 46, 299–318.
- [41] 串丽敏. 基于产量反应和农学效率的小麦推荐施肥方法研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 博士学位论文, 2013.
- [42] Sapkota T B, Majumdar K, Jat M L, et al. Precision nutrient management in conservation agriculture based wheat production of Northwest India: Profitability, nutrient use efficiency and environmental footprint[J]. *Field Crops Res.*, 2014, 155:233–244.