



化肥与农业*

刘学军 张卫峰 张福锁

(中国农业大学资源与环境学院 北京 100193)

摘要 化肥是现代农业的物质基础、是粮食的“粮食”,但化肥施用不当会对生态环境造成负面影响。我国化肥从无到有、在过去 60 年中实现了生产和使用的双重飞跃,化肥的产量和用量从 1950 年(<5 万吨/年)至 2009 年(>5 000 万吨/年)增幅超过 1 000 倍,这极大地促进了我国农作物产量的提高,在保障粮食安全方面起到了不可替代的作用;但另一方面,由于部分地区施肥不当,化肥带来了局部生态环境污染加剧等问题,成为我国经济和农业发展的制约因素。因此,应结合国家测土配方施肥行动,采用养分资源综合管理技术,改进管理者和农户的认知水平,提高化肥、有机肥等各种养分的利用效率,以扩大经济产出、降低环境压力,支撑我国农业与环境可持续发展。

关键词 粮食安全,肥料利用率,氮素环境效应,养分资源管理

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2011.07.018



刘学军教授

1 前言

化肥在现代农业生产中起着至关重要的作用,它是保证全球粮食安全的重要物质基础。自从 1908 年德国科学家弗里茨·哈伯(Fritz Harber)和卡尔·波西(Karl

Bosch)发明合成氨并实现工业化生产以来,化肥在过去的 100 年中对世界农业增产起了巨大的推动作用,其贡献不可磨灭,全球 40%以上人口依赖于化肥提供的粮食^[1]。哈伯和波西因在合成氨工业化的开创性工作,先后获得诺贝尔化学奖,被后世铭

记。我国于 20 世纪初开始从国外引进化肥(硫酸铵),30 年代建立了第一个氮肥厂,并于 60 年代起大规模引进国外成套合成氨设备,至 90 年代中期成为国际上生产和使用化肥最多的国家。有资料显示,化肥为我国粮食增产的贡献率达到 50%^[2-3],成为我国粮食安全的重要保障。但是,随着近年来我国化肥(主要是氮肥和磷肥)产能的快速增加,过量使用化肥带来的环境污染问题也日益显现,集中体现在我国中东部地区出现的土壤、水体和大气的污染^[4-6]。因此,如何科学评价化肥与农业的关系,或者说如何辩证看待化肥特别是化学氮肥在农业中的增产作用与生态环境效应,已成为关系到我国农业与环境可持续发展的一个重大问题。

2 化肥的农业增产效应

建国以来,我国粮食生产取得了巨大成就,创造了世界的奇迹——以世界 7%的耕地养活全世界

* 收稿日期:2010 年 12 月 29 日



22%的人口,其主要贡献来自化肥。1961—2009年,我国粮食作物的总产从1.1亿吨增至5.3亿吨,同期单产从年均1.2吨/公顷增加到5.6吨/公顷,增加了3.7倍,而收获面积基本不变。从1961—2007年,蔬菜、水果的收获面积增加了3.2和16倍,单产增加了近1倍、总产增加了6.7和30倍。我国作物单产增加主要依靠农业化学投入尤其是化肥投入的增加,化肥已经普及到全国所有农业区,保障了全国农业大面积增产。假设不使用化肥(不考虑其他条件改善)全国粮食产量可能只能维持年均2.5亿吨、而施用化肥粮食产量能达5亿吨左右,那么化肥增产的粮食(2.5亿吨/年)能养活全国约一半的人口,化肥增产的贡献甚至高于世界平均水平40%^[1]。由此可见,没有化肥的投入就不可能有我国的粮食安全!

但化肥投入增加与作物增产之间是否一定呈正比呢?通过比较国家粮食产量和氮肥的有关统计资料,我们发现二者并非呈线性关系。国家统计局数据表明,2009年我国化肥用量达5 404.4万吨,单位播种面积的用量为341kg/ha,比1961年的0.5kg/ha增加670倍^[7]。可见,作物产量增幅远远小于化肥用量的增幅,化肥的农业增产效应随着化肥用量的增加呈下降趋势,例如:每千克氮肥投入生产的粮食从1961年的300kg以上降低到20世纪90年代初的30kg,近些年更下降到20kg以下。张福锁等人对我国氮肥农学效率的研究表明,目前每千克氮肥(纯养分,下同)投入当年净增产的水稻、小麦、玉米已经分别从20世纪80年代的20kg左右下降到21世纪初的10.4、8.0和9.8kg;磷、钾肥的增产效率也呈现类似下降趋势^[8]。

我国化肥的农业增产效应区域差异很大,在地形、土壤、灌溉等自然条件良好的农业主产区,化肥增产效率较高,且随着农业综合措施的进步,近两年化肥的增产效率呈现上升趋势。李红莉等人的结果表明,由于退耕还林等措施的加强,小麦生产向华北平原等主产区集中,2007年与2000年相比,主产区播种面积增加1%,而总产量增加27%;而非主

产区播种面积和产量都在下降^[9]。

从1993年实施菜篮子工程以来,我国种植业产业结构发生了翻天覆地的变化。粮食播种面积波动式下降,而蔬菜和果树种植面积不断增加,到2008年,蔬菜播种面积占全国总播种面积的12%,果园达到7%^[10]。由于水果和蔬菜的高附加值,农户往往不惜资源投入,浪费严重,例如:大棚蔬菜每年投入的化肥和有机肥纯养分,约是粮田肥料投入量的10—20倍,远远超过蔬菜自身的需要。大面积种植蔬菜是全国肥料效率不断下降的主要因素。



农户施肥

据统计,目前我国农田氮、磷、钾化肥养分利用率平均仅为27.5%、11.3%和31.3%^[8],表明我国化肥使用的优化空间很大。在如何优化氮肥管理、提高氮素利用效率方面,国内许多土壤肥料工作者进行了有益的探索。中科院南京土壤所朱兆良针对中国人多地少的国情,较早提出“平均适宜施氮量”方法,并首先在江苏太湖获得成功。太湖地区试验证明,水稻氮肥投入总量控制在180—225kg/ha,即可保证现有产量,可比农民传统用量少1/4—1/3^[11]。中国农业大学张福锁等人提出了氮肥实时监测、磷钾肥衡量监控的养分资源综合管理策略,华北平原进行的264个田间试验结果表明,利用该技术可把小麦、玉米氮肥用量控制到150—180kg/ha,比农民施肥量降低30%以上,而产量可增长5%—10%^[12]。1998—2005年中国农业大学在北京进行的121个露天蔬菜试验研究证明,在获得与农民相同产量的基础上,通过水肥一体化综合管理技术可把氮肥用

量降低到 100—260kg/ha, 比农户用量下降 151—183kg/ha, 节氮 23%。山东 12 个设施番茄的试验结果证明, 如不改变农户施肥习惯, 氮肥投入量平均可以控制在 213kg/ha, 比农户用量下降 64%, 实现产量不减、品质有所改善。在山东苹果上的试验证明, 优化管理的氮肥用量可控制在 270—350kg/ha, 比农户用量下降 30%, 产量与农户相同^[12]。



农户在专家指导下根据每块地的大小
通过称重进行施肥优化

这些结果都证明, 氮肥用量下调仍存在很大的空间。要实现化肥增产增效在战略上应从以下几个方面入手:

(1) 发展和应用总量控制、分期调控的氮肥管理技术。我国农户经营规模小、土地分散的特点决定了过于复杂和精确的施肥技术的可操作性差, 经济上也不划算。中国农业大学在氮素实时监控技术基础上发展的总量控制、分期调控的氮肥综合管理技术, 把作物全生育期氮素总量与关键生育期氮素调控结合起来, 有效地解决了科学性与实用性的矛盾。(2) 以“大配方, 小调整”策略调整肥料产品结构, 物化养分管理技术, 实现贴近农业需求的化肥技术改造与升级。利用全国测土配方施肥技术成果, 采用“大配方, 小调整”策略大幅度调整肥料产品结构, 使先进的施肥技术物化, 并通过产、学、研与推广的结合, 使技术人员、各级干部、肥料经销商和广大农民实实在在用上这些技术, 这也是推动化肥产业贴近农业需求、生产对路产品、提升产业技

术的迫切需要。(3) 加大测土配方施肥技术推广力度, 彻底改变传统施肥观念。全国测土配方施肥项目开展 5 年来, 通过大量的土壤测试, 对我国农田养分状况有了新的认识, 通过大量的田间试验和示范, 基本明确了我国土壤肥力和主要作物的肥料效应, 创新了一大批施肥技术和推广模式。从 2009 年农业部提供的 3 000 多个田间试验结果看, 小麦、玉米和水稻等粮食作物测土配方施肥比农民常规施肥增产 450kg/ha 以上, 每千克养分增产 1.5kg 以上, 比常规施肥氮量减少 30kg/ha 左右, 氮肥利用率提高 10% 以上。2009 年 3 月, 农业部测土配方施肥技术专家组对 6 个省 1 152 户农户的随机抽样调研结果表明, 项目区农户明显增产, 粮食作物平均增产 5.5%。

3 化肥的生态环境效应

化肥在现代农业生产尤其是在保证粮食安全、养活全球新增人口方面起着至关重要的作用。但是如果化肥施用不当将不可避免地带来一系列的生态环境问题^[1-5]。目前, 农业已成为温室气体重要排放源, 过量使用氮磷肥所导致的土壤剖面中硝酸盐累积、耕层土壤有效磷富集以及与此相关的土壤酸化、水体污染和富营养化等报道日益增多, 氮肥不合理使用导致氨挥发、氧化亚氮和氮氧化物等痕量气体排放引起的氮素沉降增加与酸雨危害等问题也已经成为影响我国农业和环境可持续发展的制约因素^[13-15]。据中科院南京土壤所朱兆良等人估计, 1998 年中国氮肥不合理使用引起的农田氮素损失高达 1 117 万吨, 相当于 2 400 万吨尿素产量^[16]。按尿素价格 1 800 元 / 吨计, 氮素养分损失导致的直接经济损失高达 430 多亿元。本文以氮肥为例, 分别从不合理施肥对土壤酸化、硝酸盐水体污染、 N_2O 等温室气体排放与大气污染等方面进行初步总结。

土壤是农业的基础, 不合理施用化肥可导致土壤质量下降和污染的发生, 从而直接威胁农业的可持续发展。长期大量使用氮肥特别是大量施用铵态氮肥和尿素态氮肥, 会加速土壤酸化过程, 这不仅



寿光蔬菜大棚

会改变土壤理化性质,而且还会引起土壤中重金属等元素生物有效性提高,降低土壤微生物和生物活性,甚至加速土壤中一些营养元素如盐基离子的流失。中国农业大学张福锁团队及其合作伙伴在 *Science* 杂志上报道了 20 世纪 80 年代至今我国主要农田土壤出现的大面积显著酸化现象,发现土壤 pH 值平均下降 0.5 个单位,造成酸化的主要原因是过量使用氮肥引起的土壤硝酸盐和盐基淋溶^[15]。进一步的调查表明,过量施肥导致的农田土壤酸化,已经在我国一些地区引起部分农作物减产、保护地菜园土壤线虫危害加剧和果树粗皮病发病率升高等问题。可见,土壤酸化对我国粮食安全的潜在威胁值得引起我们的高度重视。

过量施用氮肥或者偏施氮肥会导致土壤中硝酸盐大量累积和向下淋溶,成为水体尤其是浅层地下水的重要污染源。中国农科院在北方五省 20 个县集约化蔬菜种植区的调查显示,在 800 多个调查点中,50% 的地下水硝酸盐含量因过量用氮超标。巨晓棠等人通过比较山东惠民地区大田作物、果园和保护地蔬菜体系中氮肥用量和土壤硝酸盐累积之间的差异,发现 1 米土体中硝态氮的残留量为:菜地 > 果园 >> 农田,与施氮量呈显著的正相关^[17]。过量使用氮肥不仅增加 0—1 米土壤剖面中硝态氮含量,而且还导致更深层土壤中硝态氮的累积和淋溶^[18]。2010 年初,国家环保部、国家统计局和国家农业部联合发布了全国污染源普查结果,发现农业是氮、磷排放的主要污染来源,其排放量分别占全国排放总量的 57.2% 和 67.4%^[19],而氮磷化肥的流失

在农业源排放中的贡献不容忽视。

关于氮肥不合理使用导致的 NH_3 、 NO_x 和 N_2O 等农田痕量气体排放,越来越引起人们的关注^[13]。因为这些挥发损失的痕量气体会在大气层发生进一步的转化、迁移,将加剧大气污染、酸沉降、温室效应以及平流层臭氧层破坏等严重后果。其中, NH_3 主要来自农业源的排放,包括氮肥氨挥发和畜禽养殖业的挥发。据保守估计,我国农田 NH_3 的直接损失平均占氮肥用量的 11%^[20]。中国大气氮的排放已经从 1980 年约 600 万吨增至 2006 年的 1 300 万吨^[21],同期氮肥使用量从 1980 年 930 万吨增至 2006 年的 3 100 万吨^[15]。可见,氮肥用量的大幅度增加对我国氮的排放增长起到十分重要的作用。事实上,氮肥使用与畜禽养殖业的氮排放也密切相关,因为饲料生产离不开农田氮肥的施用。



水体富营养化致使南方某稻作区池塘中水葫芦大面积爆发

此外,氮肥不合理施用引起的地下水硝酸盐污染和大气氮沉降的增加会直接或间接威胁人体健康、降低陆地和海洋生态系统的生物多样性,破坏生态系统的稳定性和服务功能^[21,22]。由于该损害是长期渐进式的,其危害目前尚未引起人们足够的重视。赖力等人以化肥施用产生的污染剂量分析为基础,借助能值分析理论和伤残调整生命年评估手段,初步估算出 2005 年全国化肥施用环境成本共计 188 亿元,约占当年农业增加值的 1.5%^[23]。由于资料的不系统和方法的不确定性,正如该文献^[23]中所述,这一结果可能低估了我国化肥的生态环境代

价。马文奇等人在综合分析我国资源、环境、粮食安全的关系基础上,就化肥产业的可持续发展提出一些独特的见解,特别是从整个化肥产业链的角度来讨论化肥能源消耗、政策补贴和环境成本这一新的思路值得借鉴^[24]。

4 结论与展望

综上所述,化肥在我国农业增产中的作用很大,其功劳是第一位的,完全可以说没有化肥的投入就没有现代农业生产、也不可能解决我国目前的粮食安全问题。化肥的环境代价主要体现在不合理地过量施肥,尤其是氮肥的过量使用造成的氮素连锁效应(Nitrogen cascade),氮素连锁效应是引起水体氮素污染、大气中氮素痕量气体及颗粒物浓度升高、氮素沉降和酸雨加剧等的主要原因。对于我国一些地区存在的大量施用化肥、片面追求粮食高产以及化肥不合理使用导致生态环境代价增加等问题应引起我们的高度重视。

展望未来,我们应该在农业高产高效的目标下通过多学科合作优化肥料的管理,进一步提高化肥的增产贡献。而通过养分资源综合管理技术结合测土配方施肥的国家行动是提高我国肥料利用率、降低生态风险和环境代价的根本途径^[12]。整体而言,氮肥、磷肥用量应逐步下调、回归至理性水平,钾肥维持稳定或略有增长。国家应强化化肥生产、使用和国际市场等方面的中长期预测预报的研究工作,加强肥料立法、逐步减少化肥补贴,既避免化肥企业大起大落,也要适当前瞻性地发展一些有市场前景的新型肥料(如包膜控释肥、专用复混肥等)^[25]。

2009年5月2日,胡锦涛总书记视察中国农业大学时特别强调,做好测土配方施肥工作是关系国家粮食安全与环境保护的重大行动。我们相信,有国家的大力支持和广大土壤肥料工作者的共同努力,我们完全有可能在实现化肥增产的同时,降低其环境代价,实现粮食高产、资源高效、农民增收与环境保护四者的共赢。

主要参考文献

1 Erisman J W, Sutton M A, Galloway J et al. How a century

of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*, 2009, 1: 636-639.

- 2 陈同斌, 林忠辉, 曾希柏. 中国化肥资源区域优化配置: 农田养分平衡与管理. 南京: 河海大学出版社, 2001, 73-76.
- 3 李家康, 林葆, 梁国庆等. 对我国化肥施用前景剖析. 磷肥和复肥, 2001, 16(2): 1-5.
- 4 林葆. 当前我国化肥的若干问题和对策. 磷肥与复肥, 1997, 12(2): 1-6.
- 5 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国氮肥使用现状、问题和策略: 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998.
- 6 Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435: 1 179-1 186.
- 7 国家统计局. 中国统计年鉴 2009. 北京: 统计出版社, 2010.
- 8 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. *土壤学报*, 2008, 45: 915-924.
- 9 李红莉, 张卫峰, 张福锁等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16: 1 136-1 143.
- 10 国家统计局. 中国统计年鉴 2008. 北京: 统计出版社, 2009.
- 11 朱兆良, 张福锁等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究. 北京: 科学出版社, 2010, 1-28.
- 12 张福锁等. 协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- 13 Yan X, Akimoto H, Ohara T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1 080-1 096.
- 14 Ju X T, Xing G X, Chen X P et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *PNAS*, 2009, 106: 3 041-3 046.
- 15 Guo J H, Liu X J, Zhang Y et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1 008-1 010.
- 16 Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient*



- Cycling in Agroecosystems, 2002, 63: 117-127.
- 17 Ju X T, Kou C L, Zhang F S et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 117-125.
- 18 Liu X J, Ju X T, Zhang F S et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain. *Field Crops Research*, 2003, 83: 111-124.
- 19 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报. 2010 年 2 月 9 日.
- 20 Xing G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57: 67-73.
- 21 Liu X J, Duan L, Mo J M et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview. *Environmental Pollution*, 2010, Doi: 10.1016/j.envpol.2010.08.002.
- 22 Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320: 889-892.
- 23 赖力, 黄贤金, 王辉等. 中国化肥施用的环境成本估算. *土壤学报*, 2009, 46: 63-69.
- 24 马文奇, 张福锁, 张卫峰. 关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业. *资源科学*, 2005, 27(3): 36-40.
- 25 伍宏业, 许秀成, 林葆等. 关于发展化肥工业, 提高我国粮食增产潜力的建议. *化学工业*, 2009, 27(8): 13-18, 30.

Chemical Fertilizer and Agriculture

Liu Xuejun Zhang Weifeng Zhang Fusuo

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University 100193 Beijing)

Abstract Chemical fertilizers play key roles in food security and crop production in modern agriculture. However, misuse of chemical fertilizers can damage the ecological environment due to large amounts of nutrient loss. Both production and consumption of chemical fertilizers in China have increased greatly from 1950 (<0.05Mt/yr) to 2009 (>50Mt/yr). The rapid increase in chemical fertilizers has substantially improved crop yield and production while overuse of chemical fertilizers has also caused serious eco-environmental problems. Therefore, in order to realize the sustainable development of Chinese agriculture and its environment, we strongly recommend an integrated nutrient resource management together with the national soil testing and fertilizer recommendation action, which is crucial to improve the use efficiency of various nutrients from both chemical and organic fertilizers and other sources.

Keywords food security, recovery efficiency of fertilizers, nitrogen impact on the environment, integrated nutrient management

刘学军 中国农业大学教授。1969 年生于湖南桃江县。1997 年获中国农业大学资源与环境学院博士学位, 随后留校任教至今。主要研究方向: 农田氮循环、环境养分与大气沉降、养分资源管理。先后主持国家自然科学基金面上项目 5 项、中德国际合作项目子课题 2 项, 同时参加国家自然科学基金重大项目、基金创新群体项目、国家科技部重点基础规划项目(“973”)、北京市重大基金项目、教育部重大项目和博士点基金、农业部重大引进项目和重大行业计划等多项科研课题。共参与撰写专著 7 部, 发表论文 80 余篇, 其中 *SCI* 论文 36 篇, 2010 年以并列第一作者身份在 *Science* 发表中国农田土壤酸化的研究论文。2006 年入选教育部新世纪优秀人才支持计划, 2008 年入选中科院“百人计划”。中国植物营养与肥料学会肥料与环境专业委员会委员, 中国土壤学会、生态学会、自然资源学会会员, 国家自然科学基金项目评审专家, 并担任多个国际学术期刊的审稿人。E-mail: liu310@cau.edu.cn