

保障我国粮食安全的肥料问题

朱兆良¹, 金继运²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 肥料在保障我国粮食安全中起着不可替代的支撑作用, 同时化肥养分利用率低又产生了对环境的不良影响。因此用好肥料资源、提高肥料利用效率是关系到国家粮食安全和环境质量的重大科技问题。本文实事求是地分析了我国人多、地少、耕地质量差、农田生态环境脆弱的基本国情和肥料领域面临的严重挑战; 对国家种植业发展对肥料的需求, 有机养分和化肥利用现状和问题、农田中化学氮肥的损失及其对环境的影响等问题进行了较为全面地综述; 提出了“区域用量控制与田块微调相结合”的推荐施肥的理念和技术路线; 形成和发展了适合分散经营和规模经营的分区养分管理和精准施肥技术体系; 同时对新型肥料和有机养分资源在我国研究应用的现状和存在的问题进行了分析评述。在此基础上, 提出了提高耕地综合生产能力、依靠科技进步高效利用肥料资源、按照增产潜力做好施肥区域布局等技术政策, 建议针对肥料科学技术的发展形成稳定的政策支持和保障。

关键词: 粮食安全; 肥料资源; 肥料利用率; 氮肥损失; 环境质量; 区域推荐施肥; 精准施肥; 缓控释肥; 有机肥料

中图分类号: S14-13

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2013)02-0259-15

Fertilizer use and food security in China

ZHU Zhao-liang¹, JIN Ji-yun²

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Fertilizer use plays an important role in crop production to ensure food security in China. At the same time, the relatively low nutrient use efficiency resulted in negative impact on environment quality. Therefore, scientific use of nutrient resources and improvement in fertilizer use efficiency is an important scientific issue rated to national food security and environment quality. This review paper discussed China's basic situation with large population, limited arable land, relatively low land productivity and fragile ecosystem, analyzed fertilizer demand to meet the rapid increase in crop production, overviewed current use of organic and inorganic nutrient resources, and revealed N loss from chemical fertilizer application and its impact on environment. Based on deep understanding of the existing problems and great challenge China is facing, the authors proposed a new fertilizer recommendation strategy—"regional fertilizer rate control with adjustment at field level", developed regionalized nutrient management for small size farm operation system and precision fertilization for large scale farm operation. The current situation and existing problems in slow/controlled release fertilizers and in organic nutrient resources were also discussed. For sustained increase in crop production to support food security and to protect the environment, the technic strategy was proposed, including increase of land productivity, improvement of all nutrient resources using advanced science and technology, realization of regionalized fertilizer recommendation based on land productivity. Favorable policies and continuous financial support to fertilizer related science and technology development was also suggested.

Key words: food security; fertilizer resources; fertilizer use efficiency; nitrogen losses; environment quality; regionalized fertilization; precision fertilization; slow/controlled release fertilizer; organic fertilizer

收稿日期: 2013-01-30

接受日期: 2013-02-05

作者简介: 朱兆良(1932—), 男, 浙江省奉化市人, 中国科学院院士, 主要从事土壤及植物营养方面的研究工作。E-mail: zlzhu@issas.ac.cn

保障粮食安全是关系到我国经济和社会可持续发展的重要基础。我国人多地少,到2006年10月,耕地减少到 $1.22 \times 10^8 \text{ hm}^2$,已经接近 $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的警戒红线,人均耕地 0.093 hm^2 ,仅为世界平均水平的42%,印度的62%,美国的15.7%。我国必须通过提高单产以保证粮食和农产品的供应,而提高单产的重要措施是通过施肥为作物提供足够的养分供应。我们既不能像地多人少的国家那样通过牺牲作物产量来保证生态环境,又不能不顾环境质量片面追求高产。我国必须走出一条既能保证作物持续增产、农田生产力不断提高,又能保持良好生态环境的可持续发展之路。而实现这一目标的关键是充分科学地利用有机和无机养分资源,提高肥料的利用效率。

肥料是作物的“粮食”,在作物生产中发挥着不可替代的支撑作用。著名育种学家,在第一次“绿色革命”中做出卓越贡献并获得诺贝尔奖的Norman E. Borlaug 1994年在全面分析了20世纪农业生产发展的各相关因素之后指出:“20世纪全世界所增加的作物产量中的一半是来自化肥的施用”。联合国粮农组织在上世纪八十年代在亚太地区31个国家通过大量田间试验得出结论:施肥可以提高粮食单位面积产量55%,总产30%。我国全国化肥试验网在二十世纪八十年代进行的5000多个肥效试验结果也证明,在水稻、小麦和玉米上合理施用化肥比对照不施肥处理平均增产48%^[1]。近年来,随着化肥用量的增加和耕地肥力的逐渐提高,施肥的增产作用有所降低,但是,依然是作物增产增收最基本的物质保障。

正是由于化肥在作物增产中的重要作用,自建国以来,我国化肥用量不断增加。自1993年以后,我国一直是世界第一化肥消费大国。2005年,我国化肥消费量达 $4766 \times 10^4 \text{ t}$ (养分量,下同),占世界化肥消费总量的32%。2010年,我国化肥消费量达到 $5561.7 \times 10^4 \text{ t}$,为世界化肥总消费量的34%(世界化肥消费量按照IFA公布2009/2010年度 $1.629 \times 10^8 \text{ t}$ 计算),其中氮肥约为 $3200 \times 10^4 \text{ t}$,磷肥约为 $1400 \times 10^4 \text{ t}$,钾肥约为 $950 \times 10^4 \text{ t}$ 。

然而,我国人口增长的压力以及生活改善和经济发展对粮食和农产品的需求持续增加。2008年国务院通过的《国家粮食安全中长期规划纲要》提出,至2020年粮食综合生产能力将达到 $5.4 \times 10^8 \text{ t}$ 以上,并使粮食自给率稳定在95%以上。与此同时,我国为了实现高产目标,已经在很大程度上依赖

化肥的施用,化肥用量已经较高,加上使用不合理等问题,肥料的不科学管理已经对环境产生了不良影响。2010年2月6日,由中华人民共和国环境保护部、国家统计局和农业部联合发布的“第一次全国污染源普查公报”指出,农业源污染物排放对水环境的影响较大,其化学需氧量的排放量为1324.09万吨,占化学需氧量排放总量的43.7%;农业源(包括种植业、畜禽养殖业和水产养殖业)也是总氮、总磷排放的主要来源,其排放量分别为 $270.46 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $28.47 \times 10^4 \text{ t}$,占排放总量(包括工业源、农业源和生活源)的57.2%和67.4%。要从根本上解决我国的水污染问题,必须把包括种植业、畜禽养殖业和水产养殖业的农业源污染防治纳入环境保护的重要议程。所以,最大限度地提高肥料氮素和磷素的作物利用效率,最大限度地减少氮、磷从农田向环境的排放,是我们当前肥料工作的重要目标。

问题的严重性和紧迫性还在于,在可以预见的未来,我国的人口将继续增多而耕地将进一步减少,在这种情况下,为了保证国家的粮食和农产品安全,仍然必须继续依靠化肥的使用以进一步提高单位面积产量和总产,这必然增大了农业生产对环境的压力。因此,为了协调农业发展与环境保护的关系,迫切需要建立起可持续发展的集约化农业养分管理体系和科学施肥技术体系,这是摆在我们面前的一项具有挑战性的紧迫任务。对我国来说,要完成这一任务,其难度显然要大于某些人少地多的发达国家,但却是影响我国农业发展、农村繁荣和农民致富的重大技术关键。

1 充分发挥化肥的增产效用,努力降低其对环境的负面影响

1.1 化肥在保障我国粮食安全中起着不可替代的支撑作用

我国建国以来肥料用量与粮食生产的关系见图1。自建国以后到2000年,化肥用量与粮食总产和单产同步增长,化肥的消费量和粮食作物单产和总产都有很显著地正相关关系,在种植面积持续下降的情况下保证了粮食总产的稳定增长,对保障我国粮食安全起到了不可替代的支撑作用。但是,2000年以后,肥料用量虽然继续增加,但由于粮食生产效益差、播种面积下降和施肥不合理等因素,粮食产量一度显著下降。2004年以后,国家制定和实施了支持粮食生产的一系列政策,粮食产量逐年回升,至2010年达到 $54648 \times 10^4 \text{ t}$,人均407 kg,到2011年,

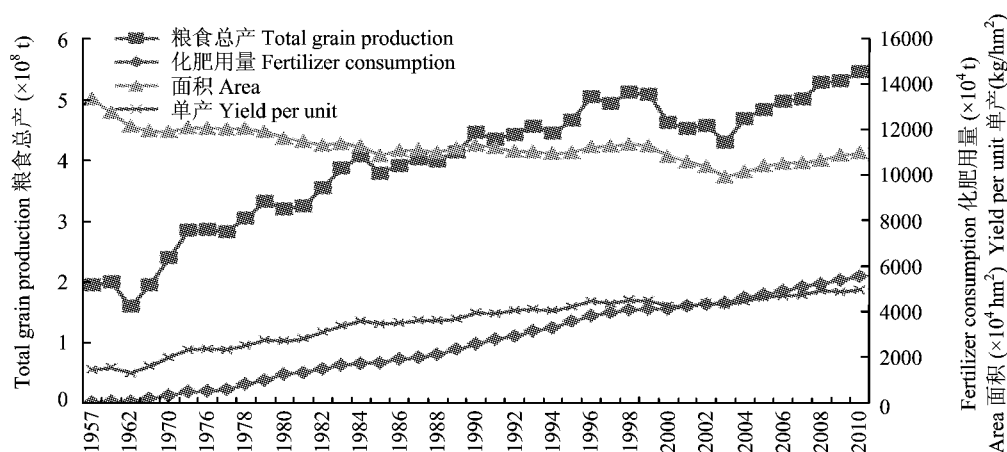


图1 我国化肥用量与粮食作物产量的关系

Fig. 1 Fertilizer consumption and grain production in China

实现了连续八年持续增产,粮食产量达到 57121×10^4 t,人均 426 kg,保证了国家粮食安全,也为世界粮食供应和价格稳定做出了贡献。

但是,随着人口的增加和生活水平的提高,粮食的需求持续增加。国务院办公厅发布的《中国食物与营养发展纲要(2001—2010年)》指出,未来人口的人均粮食需求 2020 年在 420 ~ 435 kg、2030 ~ 2040 年的人口高峰时期应在 450 ~ 470 kg 水平。另据预测,到 2030 ~ 2040 年我国人口可达到 16×10^8 的高峰期。如按人均 470 kg 标准计算,全国粮食消费需求要达到 7.5×10^8 t,是现在我国粮食生产能力的近 1.5 倍,即存在近 2×10^8 t 的缺口,这就是未来 10 ~ 30 年我国粮食安全的隐患。消除这一隐患的根本途径是千方百计地提高粮食综合生产能力,而其中化肥起着举足轻重的作用^[2]。

2003 年是我国实现粮食生产“八连增”的起始年,国产粮食 4.3×10^8 t,粮食进出口基本持平,人均粮食消费量为 334 kg,超过了国际平均水平。到了 2011 年,国产粮食达到历史最高峰的 5.7×10^8 t,人均粮食占有量为 426 kg,但是当年却净进口粮食 6390.3×10^4 t。同时,我国肉类总产量由 2003 年的 6932.9×10^4 t 增长到 2011 年的 8100×10^4 t 左右,据报道,每公斤猪肉约需消耗 2.4 kg 粮食,每公斤禽肉或禽蛋约需消耗 1.3 kg 粮食。畜牧业的快速发展把大约 40% 的粮食用于饲料,这个趋势随着人民生活水平的提高还将继续,因此粮食安全的压力一直伴随着我们。

我国肥料利用效率较低。全国化肥试验网在八十年代的肥效试验结果和近年来在粮食主产区开展的大量研究工作表明,我国平均每公斤氮素增产的

水稻、小麦和玉米三大粮食作物的产量都在 10 kg 左右,大田生产中则可能更低^[1,3]。与文献中国际上每公斤化肥氮素(N)平均增产水稻 22 kg、小麦 18 kg、玉米 24 kg 相比较^[4-6],当前我国每公斤氮素平均增产粮食的量大约是国际上增产量的一半,氮素的当季作物回收率也显著低于国际上的平均水平。但是,需要注意的是,我国粮食主产区在水稻、小麦和玉米上的氮素用量均远远高于国际上相应的平均用量,这一方面客观地反映了在我国低肥力土壤上获得高产必须加大养分投入。按照施肥报酬递减的规律,相应的每公斤肥料养分增加的产量(农学效率)必然有所下降,同时也表明我国养分管理和施肥的科学技术需要进一步提高。

1.2 农田中化学氮肥的损失对环境的影响

肥料养分利用率低的连带效应是对环境的不良影响。综合国内在我国部分地区主要作物上进行的田间原位观测结果,已对我国农田中化肥氮的去向进行了初步估计^[7](图 2)。这一估计虽然非常粗略,但却可以给我们一些启示。如图 2 所示,当季作物的吸收利用率约为 35%,氨挥发损失 11%,硝化-反硝化损失 34%,后者中具有温室效应和破坏臭氧层作用的 N_2O-N 约为 1.1%^[8](其余的主要是不影响环境质量的 N_2),淋洗损失 2%,径流损失 5%,尚有 13% 未能明确(其中包括在农田土壤中的净残留部分)。因此除 N_2 外,化肥氮的损失中对环境质量有影响的各形态的氮素总量约为其施用量的 19.1%。这些氮成为地表水的富营养化、地下水的硝酸盐富集,以及大气 N_2O 的重要来源之一。

这里需要强调的是,目前我国农田中化学氮肥的当季作物回收率相当低,在图 2 中虽然估计为

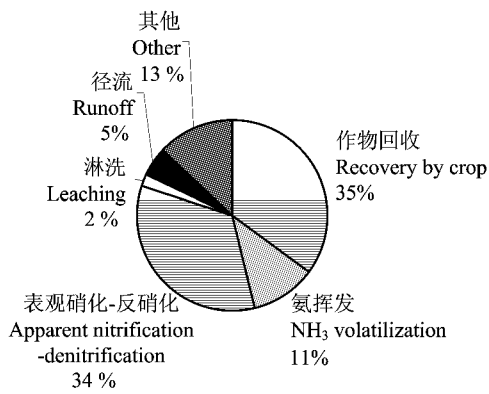


图2 我国农田中化肥氮的去向^[7]

Fig. 2 Fate of fertilizer N applied to farm land

35%，实际上在高产高肥地区可能低于25%，土壤中残留率约为13%，如果将残留率也计为农业可利用部分，则当季作物回收率与土壤中残留率两项合计为48%，而通过各种途径所损失的总氮量约占52%。因此，改进施用技术，通过降低施入农田的氮肥损失率以提高当季作物的吸收利用率具有相当大的潜力^[9]。这是协调农业发展与环境保护工作的着力点，因而成为国内外有关学者长期研究的热点。

1.3 为保障粮食安全，我国必需进一步增加化肥的使用量以提高单产，协调高产与环保的难度将越来越大

我国在耕地不断减少的情况下，为了保障粮食安全，唯一的选择是继续提高单位面积产量，在施肥技术和肥料利用效率没有突破性进展的情况下，肥料的需求量会相应增长。在本世纪初，李家康等人^[10]根据我国人口增加和经济发展的趋势，综合农林牧渔各业对化肥的需求，对我国2010~2030年化肥的需求进行了估算，预测到2010年、2015年和2030年全国化肥消费需求可能分别达到 $5092 \sim 5222 \times 10^4$ t、 $5571 \sim 5761 \times 10^4$ t和 $6515 \sim 6865 \times 10^4$ t。事实证明，他们的预测比较符合需求的发展。2010年和2011年的化肥实际消费量分别为 5561.7×10^4 t和 6027×10^4 t，考虑到近几年过量施肥的现象严重，预测值基本反映了化肥的实际需求。目前，我国化肥消费量还在逐年增加，如果在植物营养和肥料领域科学技术上没有突破性的进步，或肥料利用率还停留在当前的水平，化肥需要量将进一步增加，这势必增大对环境的压力。在这种情况下，如何高效使用肥料以保障粮食安全，协调肥料的农学效应、社会效益和环境效益是一项紧迫而艰巨的任务。

2 我国粮食生产中化肥的农学效应分析

从养分循环的角度来看，化肥对农业生产的贡献不仅反映在当季作物上，而且还因其其在土壤中的部分残留和因增产而增加的有机肥料数量，而提高了在后续农业生产中养分循环再利用的总量和农田土壤的养分供应能力。例如，总体来看，近年来我国农田的基础产量比上世纪80年代有所提高。因此，在评价化肥对农业生产的贡献时不能忽视其后续效用，这是一个需要深入探讨的问题。下面主要讨论当季粮食作物上化肥的农学效应问题。

当季作物对化肥的利用效率有几种不同的表达方式，其中最为常用的有：1)“农学效率”，指施用的单位(kg)化肥养分增产的农产品的量(kg)；2)“养分回收率”，也称利用率，指施用的化肥养分被当季作物吸收的百分比。

国际上对一些国家和地区的化肥利用效率很少有系统的研究，只能根据现有的综述资料归纳整理。Dobermann 等人^[6]2002、2005和2007年对欧洲、美洲、亚洲(不含中国)和非洲850个田间试验结果进行了较全面的分析，结果表明，在田间试验条件下，施用的每公斤化肥氮素(N)在三大作物(水稻、小麦和玉米)上平均增产的粮食(农学效率)在欧洲为21kg，美洲20kg，亚洲22kg，非洲14kg。三大粮食作物分别统计，当水稻、小麦和玉米的平均施氮量分别为113、117和102 kg/hm²的情况下，每公斤化肥氮素(N)平均增产水稻22kg，小麦18kg，玉米24kg。水稻、小麦和玉米的化肥氮素(N)当季作物回收率分别为44%、54%和63%，平均为51%。同时，研究表明化肥氮素的后效不大，施肥后第2年到第6年5年氮素作物回收率仅有6.5%，算上后效，总的肥料氮素的作物回收率为50%~57%，残留在土壤中的占15%，以气态损失和流失的肥料氮素占施肥总量的30%~35%^[4-6]。

肥料中的磷素和钾素在土壤中的行为与氮素有很大的差异。磷素在土壤中移动性很小，而且后效显著，当季回收率没有太大的实际意义，长期累计回收率应该受到更多的关注。同时，磷素在土壤中可以固定而无效化，明确其无效化过程，减少土壤固定应受到重视。此外，由于地表水体磷素含量是水体蓝绿藻爆发的控制因素，对磷素流失过程和控制应给予高度关注。据Smil在2000^[11]年进行的调查研究，世界磷素当季作物回收率仅为15%~25%，

但是多年累积作物回收率可以达到 50%~90%。我国林葆先生等人^[12]在 1980~1991 年间,在河北辛集开展的 12 年 24 季的冬小麦-夏玉米肥料定位试验其结果表明,在不同磷肥用量和不同施用方法情况下,施用的磷肥的累计作物回收率在 8%~64.4% 之间。表明磷肥有比较长时期的后效,但是也有相当部分在此过程中被无效化。

对肥料钾素回收率的关注较少,主要是由于钾素对环境基本无不良影响,而且作物对钾素有明显的奢侈吸收。所以研究其作物回收率意义不大,应该更多关注其农学效率。国际上大部分研究结果表明,作物对化肥钾素的当季回收率一般在 20%~60% 之间。我国大部分研究结果也大致在此范围之内。

1981~1983 年,在农业部的统一部署下,全国化肥试验网进行了全国性的肥料试验(表 1)^[1],在 29 个省(市、自治区)18 种(类)作物上完成了 5334 个田间试验。结果发现,每公斤氮素增产水稻 9.1 kg(平均施 N 126 kg/hm²),小麦 10 kg(平均施 N 117 kg/hm²),玉米 13.4 kg(平均施 N 124 kg/hm²);每公斤 P₂O₅ 平均增产水稻 4.7 kg(平均施 P₂O₅ 58 kg/hm²),小麦 8.1 kg(平均施 P₂O₅ 81 kg/hm²),玉米 9.7 kg(平均施 P₂O₅ 84 kg/hm²);钾肥效果在南方已趋于明显,在北方局部地区开始显效,每公斤 K₂O 平均增产水稻 4.9 kg(平均施 K₂O 87 kg/hm²),小麦 2.1 kg(平均施 K₂O 86 kg/hm²),玉米 1.6 kg(平均施 K₂O 98 kg/hm²)。

表 1 1981~1983 年全国化肥网田间试验施肥增产效果^[1]
Table 1 Yield responses of grain crops to fertilizers (1981-1983)

作物 Crops	平均施氮量 Average N rate (kg/hm ²)	每公斤 N 增产 Increased yield (kg/kg N)	平均施磷量 Average P ₂ O ₅ rate (kg/hm ²)	每公斤 P ₂ O ₅ 增产 Increased yield (kg/kg P ₂ O ₅)	平均施钾量 Average K ₂ O rate (kg/hm ²)	每公斤 K ₂ O 增产 Increased yield (kg/kg K ₂ O)
水稻 Rice	126	9.1	58	4.7	87	4.9
小麦 Wheat	117	10.0	81	8.1	86	2.1
玉米 Maize	124	13.4	84	9.7	98	1.6

自上世纪 80 年代初开始,在农业部的统一协调和组织下,国际植物营养研究所(IPNI)与中国农业科学院和全国有关科研教育单位合作,在全国范围内开展了大量的平衡施肥研究和示范工作。结果显示,在水稻、小麦和玉米三大粮食作物上,每公斤 N 平均增产 10.8~12.2 kg,每公斤 P₂O₅ 平均增产 9.2~11.5 kg,每公斤 K₂O 平均增产 6.8~10.4 kg(表 2)^[13]。

将 IPNI 合作项目 2002~2006 年的试验结果与全国化肥试验网在 1981~1983 年所做的肥效试验结果进行比较,氮肥的农学效益差异不大,每公斤 N 素增产粮食 10 kg 左右。但是由于单位面积施肥量逐渐增加,通过施用氮肥每公顷增加的粮食产量一直是呈上升的趋势。当前磷肥的农学效率在水稻上比 1981~1983 年有所上升,可能与杂交稻的普及和产量的提高有关,在小麦和玉米上没有太大的变化。但是同样由于单位面积施肥量的增加,通过施用磷肥每公顷增加的粮食产量也有明显的上升趋势。

钾肥的农学效益和单位面积增产量随时间推移一直呈明显的上升趋势,这与产量的提高和土壤中钾素的不断耗竭有关。农业科学技术的发展使作物产量逐年提高,新品种的推广和田间灌溉等生产条件的改善把作物产量不断推上新的台阶,对养分的需求相应增加,平衡施肥作为作物优质高产的重要措施对作物产量的持续增加发挥了不可替代的支撑作用^[14]。

应用 2002~2005 年在全国范围内进行的水稻、小麦和玉米的氮肥试验,计算了氮素当季作物回收率(表 3)。化肥氮素的当季作物回收率在水稻、小麦和玉米上分别为 27.2%、43.8% 和 32.4%,与前面总结的国内氮肥当季作物回收率基本一致,与国际上平均 51% 的氮素当季回收率比较大致差了 10~20 个百分点。磷肥的当季回收率为 11.5%~14.9%,钾肥的当季回收率为 28.4%~31.6%^[15-16]。

表 2 2002 ~ 2006 年不同作物氮、磷、钾肥的增产效果^[13]
Table 2 Crop yield responses to N, P and K application (2002-2006)

作物 Crop	氮 N				磷 P ₂ O ₅				钾 K ₂ O			
	试验数 No. of trials (No.)	平均用量 Average N rate (kg/hm ²)	单位养分 增产率 Yield increase (kg/kg)	增产率 Increase (%)	试验数 No. of trials (No.)	平均用量 Average P ₂ O ₅ rate (kg/hm ²)	单位养分 增产率 Yield increase (kg/kg)	增产率 Increase (%)	试验数 No. of trials (No.)	平均用量 Average K ₂ O rate (kg/hm ²)	单位养分 增产率 Yield increase (kg/kg)	增产率 Increase (%)
玉米 Maize	70	218.8	12.17	38.3	71	113.4	11.51	15.3	84	141.8	10.4	17.1
水稻 Rice	51	186.9	11.72	40.2	62	93.9	11.37	13.2	67	146.8	8.91	20.6
小麦 Wheat	30	181.4	10.85	43.3	39	120.3	9.18	23.9	51	119.7	6.85	17.9
马铃薯 Potato	13	116.9	33.96	26.9	17	84.1	35.29	19.9	35	102.0	45.26	19.7
大豆 Soybean	12	61.7	4.04	11.0	11	84.3	3.02	12.8	14	79.1	4.68	20.1
籽棉 Cotton	13	226.9	4.76	26.9	10	138.4	5.36	20.7	13	68.1	9.2	16.8
油菜 Rapeseed	13	130.0	4.76	34.8	13	67.7	7.12	24.5	13	89.2	2.54	11.8

表 3 2002 ~ 2005 IPNI 协作网部分试验
肥料养分利用率(%,当季回收率)

Table 3 Recovery efficiency of applied N, P and K of part
experiment in IPNI Cooperative Network from
2002 to 2005 years

作物 Crops	养分 Nutrition		
	N	P	K
水稻 Rice	27.2	12.4	31.6
小麦 Wheat	43.8	11.5	28.4
玉米 Maize	32.4	14.9	30.5

上面的比较分析表明,当前我国化肥氮素在粮食作物上的农学效率和当季回收率都显著低于国际水平。但是,需要注意的是,我们在水稻、小麦和玉米上的氮素用量分别为 187、181 和 219 kg/hm²,而收集的资料中国际上相应的平均用量仅为 113、117 和 102 kg/hm²。按照施肥报酬递减的客观规律,当肥料用量增加时,相应的每公斤肥料养分增加的产量(农学效率)必然有所下降。此外,农学效率还与土壤本底肥力和生产力有关,土壤肥力越低,施肥量越少,农学效应相应就越高,但是单位面积产量则较低。而在高肥力土壤上,施肥量低时相应的农学效率也较高,但单位面积产量则可能较高^[14]。尽管缺少国外相关的土壤肥力的资料,但是欧美的土壤肥力一般较高,在施肥量比我们低的情况下也可能获得较高的产量,同时有较高的农学效率。这进一步说明,在我国目前大部分农业产区已经处于高投入高产出高度集约化的条件下,进一步提高肥料利用效率对于我国种植业可持续发展非常重要,同时也有相当的难度。

3 立足国情,创新理念,研究符合我国国情的推荐施肥技术体系

多年来,我国土壤肥料科技工作者在为提高肥料利用效率做了大量工作,取得了很多研究成果,形成了诸如测土推荐施肥、氮肥深施、灌溉施肥、以水带氮、前氮后移、缓控释肥等成熟的施肥技术,推动了施肥技术的进步。但是由于我国人多地少、土地基础肥力差、经营分散、地块面积小、复种指数大、倒茬时间紧等因素,决定了在我国实现科学施肥有其特殊的难度,生产上施肥依然有很大的盲目性。因此,需要在国内外已有的技术基础上,探索建立符合国情的易于推广应用的推荐施肥的理念,研发相应

的技术体系。

根据我国国情,在养分的管理和施肥的指导思想方面相应需要从田块尺度提升和扩展到区域尺度,提出了“区域用量控制与田块微调相结合”的推荐施肥的理念^[17]。

农田土壤普遍缺氮,发展农业生产必须施用氮肥,问题的关键是如何确定氮肥的适宜施用量,以达到高产与环境保护相协调的目的。20 世纪 80 年代在太湖地区进行了双季早稻、双季晚稻、单季晚稻和小麦的氮肥施用量的田间试验共 62 个,根据所得结果提出了在当时的生产条件下氮肥的区域平均适宜施用量。并指出即使是每种作物的各田块都采用区域平均适宜施氮量,各作物的全部田块(每块以 1 hm² 计)所得产量之和仅比各块田都按各自的适宜施氮量施用时的产量之和低 0.2% ~ 1.4%。以单季晚稻为例,27 块田如果都按区域平均适宜施氮量施用,各田块所得产量之和为 178.2 t。即使是各个田块都按各自适宜施氮量施用氮肥,各田块所得产量之和也仅为 178.6 t,只比前者高 0.4 t,仅差 0.2%^[9,18]。

2003 ~ 2004 年,在苏南太湖地区的常熟市进行了 2 年 12 个单季晚稻田田间试验。在这次研究中,将产量、氮肥净收入和氮肥损失三者同时作为确定适宜施氮量的依据,以达到社会效益、经济效益和环境效益的统一。两年的试验结果显示,随着氮肥使用量的增加,水稻产量渐增,但增势减缓,至最高产量后继续增加氮肥施用量,则产量反而下降而肥料成本却增加、净收入减少,而且通过各种损失途径自农田进入环境的氮量则迅速增加,对环境的压力增大。依此计得的 12 块试验田各自的适宜施氮量变动于 N 182 ~ 273 kg/hm² 之间,平均为 N 218 kg/hm²,此平均值即作为本区单季晚稻的区域平均适宜施氮量。

试验结果表明,如果各块田都采用各自的田块适宜施氮量,则 12 块试验田的总施氮量为 2617 kg,水稻的产量总和为 96504 kg。而各田块统一按区域平均适宜施氮量施用氮肥(N 218 kg/hm²),则 12 块试验田的施氮总量为 2616 kg,而水稻产量总和为 96233 kg,仅比各田块按各自的适宜施氮量施用时的总产低 271 kg,减产 0.3%。这清楚地证明,在本区内即使各田块统一采用区域平均适宜施氮量,对水稻的总产也几乎没有影响。当然,对不同田块来说情况会有所不同。当统一采用区域平均适宜施氮量时,有的田块的水稻产量略高于采用田块适宜施

氮量时的产量,而有的田块则相反,但是差异都很小,在 -2.3% 到 $+1.2\%$ 之间^[17]。

上述研究例证表明,由于产量-施氮量曲线在适宜施氮量附近已相当平缓,少量增加或减少氮肥的施用量对产量的影响很小。这就是区域平均适宜施氮量可以广泛应用的理论基础。

区域平均适宜施氮量法可以作为推荐氮肥适宜施用量的基础。为了使推荐的施用量更准确一些,在此法的基础上,再根据田块的具体情况(如肥瘦、前茬、品种和种植迟早等)和/或必要的测试(如早作土壤中的硝态氮)进行适度的调整,以尽量避免个别田块上产量和经济效益的损失。这就是宏观控制与微观调整相结合的推荐路线。这一技术路线符合当前农村田块小而多、茬口紧、缺乏测试设备和测试人员等实际情况,省工省钱、不误农时,农技人员也易于掌握,因而便于推广。在其它类似地区,也值得对此进行进一步的研究,以期在更大的范围内降低氮肥的面源污染。

在上世纪九十年代引进精准农业和3S技术的同时,结合我国国情,研究提出了土壤养分分区管理和分区平衡施肥技术的理念。研究发现,成土母质、地形、人类活动等对土壤养分空间变异均有较大影响,在特定区域内,由于成土条件相对比较一致,经过长期比较一致的种植和管理后,土壤属性的空间变异呈明显的地带性(区域性)分布规律,土壤肥力和生产力特征以及对肥料的需求也存在大致一致的区域。从基础上支持了在我国目前高度分散经营的状况下,在一定范围内对土壤养分进行分区管理和分区平衡施肥是可行的。在此基础上,可以根据具体田块的土壤肥力和生产力情况进行更为精准的土壤养分管理和精准施肥,发展形成了适合我国分散经营和规模经营的分区养分管理和精准施肥技术体系^[19]。这将有利于在一定区域内的特定作物上确定适用性较广的区域化的肥料配方,以利于配方肥料的规模化生产,从而保证其质量并降低其生产成本。

在河北省玉田县,应用GPS和GIS技术,对全县 470 hm^2 的粮田进行GPS指导下的网格取样,对耕层土壤养分进行了空间变异特征研究。结果表明,土壤氮、磷、钾、锰和锌普遍缺乏,不同土壤养分的变异情况各不相同,但是基本趋于以大块状变异为主,土壤速效养分含量呈现较明显的空间分布格局。根据土壤养分分布规律,研究形成了县级和乡镇级的土壤养分分区管理和分区平衡施肥技术体

系。与常规施肥技术比较,分区平衡施肥技术在小麦和玉米上分别增产 $10.9\%\sim 13.1\%$ 和 $14.3\%\sim 21.7\%$,氮肥当季回收率分别平均提高 12.7 和 14.2 个百分点^[20-21]。

应用同样的方法,对规模经营的黑龙江江川农场 76.5 hm^2 水稻田土壤养分空间变异特征与高效平衡施肥效应进行了研究。在经过土壤测试明确主要养分限制因子及其分布规律的基础上,形成了按田块(每个田块 $6\sim 13\text{ hm}^2$)为管理单元进行土壤养分分区管理的精准施肥技术。与常规的平均施肥量比较,增产 $4.3\%\sim 11.2\%$,氮肥当季回收率提高了 $12.6\sim 14.0$ 个百分点^[22]。

在上述通过区域用量控制或分区平衡施肥的基础上,在有条件的地区,通过土壤测试,生长期间的植株测试,低空遥感和光谱技术等,可以实现更为精准的养分管理,实现养分供应和作物需求在时间和空间上的同步,最大限度地发挥肥料的增产增收效益,最大限度地提高肥料的利用效率,最大限度地减少肥料的损失和对环境的不良影响。

4 新型肥料

新型肥料泛指应用常规肥料再加工使之具有某些新的特性和功能,或者利用新材料生产出新的肥料品种。目前国内外发展较快的有缓/控释肥料、功能性肥料、全水溶性肥料、有机无机复合肥料、微生物肥料(菌剂)等。

新型肥料的研制和开发有其特有的目标,如缓/控释肥的目标是减缓或控制养分的释放,使其养分供应与作物需求同步,提高肥料养分的吸收利用,提高利用效率,而水溶性肥料则主要用于水肥一体化相关技术的应用,通过水肥正的交互作用,提高水肥利用效率。

我国新型肥料的研究主要围绕提高肥料利用效率这个核心目标进行,近年来进展较大应用较广的是缓/控释肥料。缓/控释肥料最大的特点是可根据作物吸收养分的规律调整养分供应,做到养分供应与作物吸收同步,同时基本实现一次性施肥满足作物整个生长期的需要,节时省工,损失少,作物回收率高,环境友好。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》将研发新型环保型肥料、缓/控释肥料等列为优先发展主题。研发出当季作物的回收率高、损失少、环境友好的缓/控释肥料,无论在节约资源、实现农业生产与生态协调发展、节本增效和节能减排等方面,均具有十分重要的意义。

国外缓/控释肥料主要产品类型包括树脂包衣控释肥料、硫包衣控释肥料、合成型微溶态脲醛类缓释肥料和添加生化抑制剂的稳定性肥料等。影响缓/控释肥料发展的最主要问题是价格问题,由于售价高,除日本外,美国、西欧的缓/控释肥料主要用于草坪、苗圃等特种作物。

我国缓/控释肥的研制虽然起步较晚,但是针对我国人多地少种植强度大的特点和对粮食作物持续高产的需求,缓/控释肥的研究较早的定位在应用于大田作物的目标,相关科研单位和企业致力于开发新的缓/控释材料和技术,降低缓/控释肥成本,以合理的价格推动缓/控释肥在粮食等大田作物上的应用,取得了显著地进步。

研究表明,缓/控释肥料的氮素当季回收率和残留率高、损失少,具有节氮、环保和保产/增产的潜力。林葆和李家康^[23]在黑龙江省庆安县水稻上施用控释肥,每公顷施纯氮 N 150 kg,控释尿素处理的稻谷产量为 7960 kg/hm²,同样施氮量的普通尿素处理的稻谷产量为 7320 kg/hm²,增产 8.8%。每公顷施用 105 kg 纯氮的控释肥处理的产量为 7178 kg/hm²,与普通尿素施氮量 150 kg/hm² 的产量无显著差异。表明在当地水稻上施用控释尿素,可比施用普通尿素省肥 20%~30%。在黑龙江和湖北水稻上的研究还表明,控释尿素的平均回收率比普通尿素分别平均高出 16.1 和 17.5 个百分点。卢艳丽等人^[24]在玉米上使用控释肥,在施氮量比常规施肥减少 20% 情况下,控释肥处理产量比常规施肥处理增产 18.3%,显著提高了肥料氮素的利用效率。

在减少肥料氮素的损失方面,李燕婷等^[25]研究了 4 种缓释复混肥料对玉米产量和土壤中硝态氮累积的影响。结果表明,缓释复混肥料较普通化肥的常规施肥方式增产 10% 左右,土壤剖面硝态氮累积量降低 20%~70%,从而降低了地下水硝态氮污染的生态风险。

我国在控释肥料薄膜材料研究方面也有新的进步。据最近的报道,已研究合成出不同结构的非树脂有机膜材料,应用该有机包膜材料生产控释肥的能耗低、成本低、所需设备简单,膜材料在土壤中能够降解,不会造成对土壤环境结构的破坏和污染。在等氮量下,该有机质包膜尿素可显著提高冬小麦产量和氮肥回收率^[26]。

今后我国缓/控释肥料发展仍应继续以面向大田作物为重点,并根据经济效益、农学效应和环境效益相统一的原则,研发出符合下列要求的缓/控释肥

料:1) 成本低;2) 肥料养分的作物回收率高,养分释放特性基本符合作物的需肥特点;3) 包膜材料或添加物无污染。为此,必须在材料、工艺、设备等方面自主创新。树脂包衣控释肥料通过材料和技术创新,解决能耗大和成本高的问题;加强有机质包膜、肥料包裹肥料等非树脂包膜肥料新技术的研究,发展有中国特色的控释肥料技术体系;开展缓/控释肥料施用技术与评价体系研究,完善不同类型缓/控释肥料标准体系建设;研究缓/控释肥料补贴政策,加强缓/控释肥料产业化技术集成与示范;逐步建成有中国特色的缓/控释肥料研究、生产、使用、评价和监管的产业体系。

与任何新技术新产品一样,新型肥料的研制和科学应用都需要坚实的科学研究的基础,一定要扎扎实实根据生产需要有针对性的开展研究,研制出符合生产要求的高效、环保、低成本的新型肥料。同时,任何新技术和新产品的应用都是有条件的,都是在一定的条件下才能发挥作用。新型肥料也必须因地制宜、因时而用,科学施用。所以在研究中一定要明确其高效利用的土壤和环境条件,并将这些新型肥料的特性和高效施用条件清楚地传授给农民,以达到增产增收和环境友好的目标。

5 有机肥料的农业利用具有重大的社会效益和环境效益

我国有长期施用有机肥的传统和习惯。国内外大量的研究表明,有机肥料中养分相对齐全,肥效稳而长。同时有机肥为土壤微生物提供碳源,有利于土壤中养分转化,改善土壤结构,提高土壤综合生产力。国内外大量研究表明,尽管有机肥中养分的当季回收率低于化肥,但长期的累积效用与化肥相当,有机无机肥料配合施用是获得持续高产和稳产的重要技术措施^[27-28]。但是,我国在有机养分资源利用方面也存在很多问题,大量有机养分资源没能充分利用,而变成环境污染物的来源,有机肥中重金属含量超标的现象也越来越严重,威胁到土壤质量和农产品安全。

按照 2008 年畜牧业生产和作物生产状况估算,全国有机肥料资源量约为 49.5×10^8 t(表 4),其中人畜禽粪尿(含禽粪,下同) 40.2×10^8 t,占 81.2%;秸秆 8.1×10^8 t,占 16.4%;饼肥 2628×10^4 t,占 0.5%;绿肥 9339×10^4 t,占 1.9%^[29]。全国有机肥料资源每年可提供氮、磷、钾(N + P₂O₅ + K₂O,下同)养分 7405.7×10^4 t,其中 N 3050.8×10^4 t、P₂O₅

1403.5×10^4 t、 K_2O 2951.1×10^4 t (表4)。人畜粪尿可提供氮、磷、钾养分共 4898.7×10^4 t, 占 66.1%; 农作物秸秆可提供 2164×10^4 t, 占 29.2%; 饼肥提供 238×10^4 t, 占 3.2%; 绿肥提供 105.6×10^4 t, 占 1.4%。有机资源养分约为当年化肥消费量的 1.4 倍。因此, 有机肥资源的充分利用, 尤其是

人畜粪尿与农作物秸秆的利用对节约化肥和能源, 实现养分循环和环境保护具有十分重要的意义。

按照不同区域不同种类的有机肥有效返还农田的比例计算氮、磷、钾养分的输入量(表5)表明, 2008 年通过有机肥返还农田的氮、磷、钾养分分别达到 1195×10^4 t、 607×10^4 t 和 1235×10^4 t, 共 3037

表 4 2008 年我国不同区域有机废弃物资源和有机养分资源估计 ($\times 10^4$ t) ^[29]

Table 4 Estimation of organic waste and organic nutrient resources in different regions of China (2008)

来源 Source	项目 Item	区域 Region						全国 Nation
		东北 North east	华北 North central	长江中下游 Mid-low reaches of the Yangtse rive	西南 South west	西北 North west	东南 South east	
人畜粪尿 Human and animal excretions	资源量 Resource	36425	83066	80461	99418	47046	55866	402272
	N	184.3	457.8	423.3	474.3	244.4	317.2	2101.4
	P_2O_5	102.3	257.2	242.2	235.2	142.5	141.3	1120.7
	K_2O	152.2	337.6	283.3	443.7	181.2	278.4	1676.3
	$N + P_2O_5 + K_2O$	438.8	1052.6	948.8	1153.3	568.2	737.0	4898.7
作物秸秆 Crop straw	资源量 Resource	11283	22595	18894	11144	11527	5647	81090
	N	113.6	221.0	179.0	94.9	90.8	47.4	746.7
	P_2O_5	35.3	65.2	54.7	28.6	29.3	14.4	227.5
	K_2O	169.8	305.1	324.4	158.0	145.4	87.1	1189.8
	$N + P_2O_5 + K_2O$	318.7	591.3	558.0	281.5	265.5	148.9	2163.9
饼肥 Cake fertilizer	资源量 Resource	389	631	737	265	544	62	2628
	N	25.6	39.1	41.9	15.1	30.1	4.2	156.0
	P_2O_5	4.6	10.4	13.4	4.6	9.9	0.7	43.6
	K_2O	6.3	8.6	10.4	3.7	8.2	0.8	38.0
	$N + P_2O_5 + K_2O$	36.4	58.1	65.7	23.4	48.2	5.7	237.5
绿肥 Green manure	资源量 Resource	500	920	2414	2166	2332	1007	9339
	N	2.5	4.6	12.1	10.8	11.7	5.0	46.7
	P_2O_5	0.6	1.2	3.0	2.7	2.9	1.3	11.7
	K_2O	2.5	4.6	12.2	10.9	11.7	5.1	47.0
	$N + P_2O_5 + K_2O$	5.7	10.4	27.3	24.5	26.3	11.4	105.6
总计 Total	资源量 Resource	48597	107212	102506	112993	61449	62582	495329
	N	326.0	722.5	656.3	595.1	377.0	373.8	3050.8
	P_2O_5	142.8	334.0	313.3	271.1	184.6	157.7	1403.5
	K_2O	330.8	655.9	630.3	616.3	346.5	371.4	2951.1
	$N + P_2O_5 + K_2O$	799.6	1712.4	1599.8	1482.7	908.2	903.0	7405.7

表 5 不同区域养分的输入、输出及平衡状况 ($\times 10^4$ t) (2008 年)^[29]

Table 5 Total amount of nutrients input, output and balance in different regions (2008)

项目 Item	来源 Source	养分 Nutrient	区域 Region						全国 Nation
			东北	华北	长江中下游	西南	西北	东南	
			North east	North central	Mid-low reaches of the Yangtse rive	South west	North west	South east	
投入 Input	化肥	N	249.7	806.4	807.2	360.9	341.6	295.7	2861.4
	Chemical	P ₂ O ₅	165.8	513.3	364.1	146.3	187.2	136.4	1513.1
	fertilizer	K ₂ O	58.7	213.8	268.1	76.7	64.6	181.3	863.2
	人畜粪尿	N	77.4	180.8	150.5	216.0	155.9	85.7	866.3
	Human and	P ₂ O ₅	47.2	115.4	103.2	112.1	73.4	58.8	510.1
	animal excretions	K ₂ O	73.8	155.6	120.5	225.1	146.3	79.4	800.7
	秸秆	N	17.0	132.6	53.7	28.5	13.6	14.2	259.6
	Straw	P ₂ O ₅	5.3	39.1	16.4	8.6	4.4	4.3	78.1
		K ₂ O	25.5	183.1	97.3	47.4	21.8	26.1	401.2
	饼肥	N	7.7	11.7	12.6	4.5	9.0	1.3	46.8
	Cake manure	P ₂ O ₅	1.4	3.1	4.0	1.4	3.0	0.2	13.1
		K ₂ O	1.9	2.6	3.1	1.1	2.5	0.2	11.4
	绿肥	N	0.25	1.2	9.1	5.4	2.3	3.5	21.75
	Green manure	P ₂ O ₅	0.06	0.3	2.3	1.4	0.6	0.9	5.56
		K ₂ O	0.25	1.2	9.1	5.5	2.4	3.6	22.05
	降雨	N	43.3	53.5	48.4	43.7	38.6	18.4	245.9
	Rainfall	P ₂ O ₅	2.6	3.2	2.9	2.6	2.3	1.1	14.7
		K ₂ O	17.8	22.0	19.9	18.0	15.9	7.6	101.2
	灌溉	N	7.6	19.7	19.1	7.1	11.7	5.55	70.8
	Irrigation	P ₂ O ₅	0.94	2.44	2.37	0.88	1.46	0.69	8.8
		K ₂ O	9.28	24.1	23.4	8.64	14.4	6.79	86.6
	生物固氮	N	104.0	96.9	136.3	69.0	59.5	48.9	514.6
	Bio N fixation								
	作物种子 Seed	N	4.5	8.9	6.0	3.3	5.1	0.98	28.8
		P ₂ O ₅	1.3	3.1	2.2	1.1	1.8	0.33	9.8
		K ₂ O	1.7	2.5	1.9	1.8	2.4	0.34	10.7
	总计 Total	N	511.5	1311.7	1242.9	738.4	637.3	474.2	4916.0
		P ₂ O ₅	224.6	679.9	497.5	274.4	274.2	202.7	2153.3
		K ₂ O	188.9	604.9	543.3	384.2	270.3	305.3	2297.1
输出 Output	作物吸收	N	288.2	541.3	432.1	253.3	241.3	148.8	1905.0
	Crop uptake	P ₂ O ₅	103.1	191.4	167.2	90.7	86.7	49.7	688.8
		K ₂ O	283.7	624.5	534.0	307.8	270.1	202.2	2222.3
	损失 Loss	N	181.0	537.7	505.1	282.2	250.2	191.2	1947.4
		P ₂ O ₅	44.7	135.4	99.1	54.7	54.5	40.5	428.7
		K ₂ O	2.2	0.5	17.7	5.3	0.23	6.3	32.3
	总计 Total	N	469.2	1079.0	937.2	535.5	491.5	340.0	3852.4
		P ₂ O ₅	147.8	326.8	266.3	145.4	141.2	90.2	1117.5
		K ₂ O	285.9	625.0	551.7	313.1	270.3	208.5	2254.6
平衡 Balance		N	42.3	232.7	305.7	202.9	145.8	134.2	1063.6
		P ₂ O ₅	76.8	353.1	231.2	129.0	133.0	112.5	1035.8
		K ₂ O	-97.0	-20.1	-8.4	71.1	0	96.8	42.5

$\times 10^4$ t, 仅占有机肥养分资源总量的 41%, 以人畜粪尿和秸秆为主, 分别占有机肥养分总输入的 71.7% 和 24.3%, 占农田养分总输入的 23.6% 和 8.0%。2008 年全年通过化肥和有机肥输入到农田的氮、磷、钾养分总量达 8274×10^4 t, 其中 N 4056×10^4 t, P_2O_5 2120×10^4 t, K_2O 2099×10^4 t。通过有机肥投入的氮、磷、钾分别占化肥和有机肥投入总量的 29.5%、28.6% 和 58.9%, 氮、磷、钾养分总量占化肥和有机肥投入总量的 36.7%^[29]。这一结果与 2000 年有机肥的所占比例相比有所增加, 2000 年施用的化肥与有机肥养分中有机肥氮、磷、钾的比例分别为 20.9%、23.7%、57.4%^[30]。这个变化估计与 2000 年到 2008 年期间规模化畜禽养殖的发展、重视有机肥的施用和作物秸秆还田比例的增加有关。

虽然有机肥提供氮、磷、钾养分并具有培肥地力、增加土壤有机质等作用, 但有机肥的质量问题也令人担忧。我国目前的畜禽饲料添加剂质量标准不够严格, 质量管理更是松懈, 造成许多地方在饲料添加剂中大量使用铜 (Cu)、铁 (Fe)、锌 (Zn)、锰 (Mn)、铅 (Pb)、硒 (Se)、碘 (I)、砷 (As) 等中微量元素。如有的在仔猪和生猪饲料中添加硫酸铜达 100 ~ 250 mg/kg, 添加锌达 2000 ~ 3000 mg/kg。据测算, 仅从养殖场的猪粪中每年带人土壤的就有 As 230 t、Cu 2400 t、Zn 90000 t、Fe 40000 t^[31]。刘荣乐等^[32] 对全国 14 个省 (市) 取样并调查测定了 184 个有机肥样品, 其中污泥的 Cr、Pb、Ni、Hg 和猪粪的 Zn、Cu、Cd、As 的平均含量最高, 污泥的 Zn、Cu、As, 鸡粪 Cr、Ni, 堆肥与厩肥的 Hg、Pb 平均含量也高于其他有机废弃物。表明污泥、猪粪、鸡粪、堆肥与厩肥的受污染程度最重。鸡粪中 Zn、Cu、Cr、Cd、Ni 的超标率分别为 31.9%、23.4%、21.3%、66.0%、57.4%; 猪粪中 Zn、Cu、Cr、Cd、Ni、Hg 超标率分别为 58.6%、69.0%、10.3%、51.7%、24.1% 和 3.4%; 牛粪中 Zn、Cu、Cr、Cd、Ni 超标率分别为 4.8%、9.5%、2.4%、38.1% 和 21.4%; 羊粪中 Zn、Cd、Ni 和 Hg 的超标率分别为 6.7%、20.0%、20.0% 和 6.7%。当前有机肥的质量与上个世纪 90 年代初相比, 部分重金属的含量有所增加。其中鸡粪和猪粪中 Zn、Cu、Cr、Cd、As、Hg 增加较多, 牛粪中 Zn、Cu、As、Hg 含量增加, 羊粪则变化不大。施用含有重金属的有机肥将引起土壤污染, 危害农产品安全。已有报道指出, 在红壤和黑土上的长期定位实验研究表明, 长期施用有机肥引起了土壤中重金属的显著富集^[33]。因此, 有机肥的质量, 尤其是畜禽粪便中

重金属的含量应引起高度关注, 有关部门应该在深入调查研究的基础上, 制定严格的管理制度和法规, 控制饲料中重金属的添加量, 从源头上治理畜禽粪便中重金属的污染问题。

6 与保障粮食安全相关的肥料问题的思考

6.1 提高耕地综合生产能力是保障国家粮食安全的基础

万物土中生, 有土斯有粮。土壤是一切作物生产的基础。但是与世界上许多国家比较, 我国的土壤这个基础十分脆弱。我国几千年的农耕历史创造了举世瞩目的中华文明, 但是几千年掠夺式的耕作也严重消耗了土地资源。我国耕地土壤有机质含量, 棕壤多为 1% ~ 1.5%, 欧洲棕壤多在 3% 以上; 我国的褐土多在 1% 左右, 欧洲的褐土多在 2% 以上; 我国的黑钙土多在 3% 左右, 欧洲的黑钙土多在 8% 左右。我国耕地土壤的有机质含量总体上不及欧洲同类土壤的一半。根据第二次土壤普查结果综合评判, 我国三分之二的耕地属于中低产田。

在这样相对生产性能低下的耕地上创造高产, 只能依靠科技进步, 并加大物资投入。改革开放以来, 由于政策的正确引导和科技的进步, 肥料尤其是化肥的投入在增加作物产量的同时, 也起到了提高地力的作用。根据《粮食丰产工程》“粮食主产区农田肥水资源可持续高效利用技术研究”课题组在“十一·五”期间的研究结果, 和中国农业科学院国家测土施肥中心实验室对 50000 多个随机采取的土壤样品的分析结果表明, 当前我国土壤有机质含量在除东北以外的主要农区均有不同程度的增加, 但是, 仍然有 62% 的土壤样品有机质含量属于极低水平; 土壤样品的速效磷含量为极低、低和中等水平的分别占 20%、28% 和 22%; 土壤样品的速效钾含量为极低、低和中等水平的分别占 9%、23% 和 23%。此外, 土壤中量和微量元素的缺乏依然十分普遍。因此, 尽管由于近年来我国不同地区出现了肥料投入过量或不均衡投入的现象, 造成了部分农田氮、磷等养分富集和非均匀化, 但是总体上我国耕地中低产田依然占较大比例。

在“十一·五”期间, 各省《粮食丰产工程》执行单位创造出许多高产典型, 所有高产典型均是在肥沃、健康、耕层深厚的农田上实现的。高产高肥力土壤在作物高产稳产中的作用绝不是通过当季多施肥就可以替代的。中国农业科学院农业资源与农业区

划研究所 2009 年在吉林省玉米主产区开展的雨养春玉米肥料试验结果表明,高肥力地块无肥区的产量较低肥力地块的高 31%;高肥力地块平衡施肥区的产量和经济效益分别较低肥力地块的高 8.8% 和 367 元/hm²。同时,高肥力农田作物产量稳定,抵抗干旱、低温等逆境条件的能力明显增强,从生产层面上证实了培育肥沃健康的土壤是实现作物稳定增产的重要基础。

6.2 依靠科技进步高效利用肥料资源

我国科学利用肥料资源的战略思考应该是充分利用一切可以利用的有机养分资源,包括畜禽粪便和作物秸秆,在此基础上,补充施用各种缺乏的大、中、微量元素化肥,形成科学的有机-无机结合的施肥体系,最大限度提高化肥利用率、降低损失率。

实现这一目标,要加强土壤养分循环规律和肥料高效利用的基础和应用基础研究,明确各种不同的养分或同一养分的不同形态在不同的土壤环境中的转化循环规律;加强土壤肥力和肥料效益监测等基础性工作,在主要农区和主要土壤上加强国家土壤肥力监测基地建设和建立国家肥料效益试验网,以实时掌握全国和各地区土壤养分和生产力状况,实时掌握全国和各主要农区主要作物对氮、磷、钾和中微量元素肥料的反应和施肥的增产效益,形成全国性的土壤肥料信息交流和管理系统;建立测土配方施肥的长效机制,实现平衡施肥,培育养分供应均衡、肥沃、健康的农田;研究形成出简便易行的技术,鼓励和支持农民充分利用一切可以利用的有机肥料资源,建立科学的有机-无机结合的施肥体系。同时加强大型畜禽养殖场的管理,减少畜禽粪便中重金属、抗生素和其他有毒有害物质的含量,保证有机肥的无害化,保护农田质量;建立土壤肥料研究和技术推广工作的长效机制,加大土壤肥料研究和技术推广的投入,疏通投资渠道,稳定研究和技术推广队伍,建立有效的技术推广体系和与农民交流的网络信息平台,建立土壤肥料研究和技术推广工作的长效机制。

同时,化工系统的研究部门要结合我国化肥需求和化肥资源状况,进一步调整化肥结构和布局,如在北方旱地土壤或蔬菜作物上适当增加硝态氮肥供应,磷肥工业发展要考虑我国中低品位磷矿的科学高效利用问题,随着水肥一体化工作的发展,适时提供高质量的水溶性肥料等。实现肥料产业节能减排、资源节约、环境友好、养分高效的目标,为我国种植业可持续发展提供物质基础。

6.3 保障粮食安全的施肥区域布局问题

如上所述,我国农田目前中低产田依然占有较大比例,在有限的高产田上再进一步提高产量有相当的难度,经济效益和环境效益都较差。所以,提高中产地区的粮食单产水平是保障粮食安全的重要方面。中产地区的基础条件相对好于低产地区,目前约占耕地面积的 1/2,增施化肥提高单产的潜力大。加强农田基本建设,改善灌排条件,消除存在的障碍因素,是中产地区充分发挥施肥效果的关键。同时,在低产地区也必须有针对性地加强土壤改良和农田基本建设,消除限制因素,提高农田土壤肥力,以发挥肥料的增产作用。

6.4 保障粮食安全的施肥体系需要多学科联合攻关

我国可以开垦利用的土地已经基本上开垦为农田,新增农田面积的潜力不大,保证粮食安全的关键还是在现有耕地面积上提高单位面积的产量。这要求农学相关学科共同努力,联合攻关。我们既需要培育出高产和养分吸收利用能力强的品种,提高作物增产潜力,同时也必须研究并形成充分发挥高产作物品种增产潜力的高产高效栽培技术,包括高效施肥技术。施肥是作物栽培的一个关键环节,因此,研究土壤养分管理和施肥技术,一定要与作物栽培、耕作、灌溉、植保等环节紧密结合,把施肥技术放在整个栽培体系中开展研究。同样,栽培学家和育种学家也应将节约水肥投入纳入高产作物的育种和栽培技术体系之中,这样,多学科联合攻关,才能达到预期的效果。

6.5 保障粮食安全的施肥体系需要政策的保障

肥料在保障国家粮食安全中发挥着不可替代的支撑作用,但是用好和管好肥料,都需要有相应的政策的支持和保障。肥料有关科学技术的发展需要稳定的政策支持 and 经济上的投入,畜禽粪便的管理使用和作物秸秆的有效还田需要有相应的激励政策和经济上的补贴,国家有关部门要制定一系列法律和法规,规范有机和无机肥料的生产、标准化管理和科学应用。

节肥、高产和环保是农业可持续发展和保障粮食安全的必然要求,是国家的重大需求,也是植物营养与肥料学科领域需要解决的重大科学技术。有相应的政策的引导和保障,有相关领域科技工作者的共同努力,我们一定可以依靠科技进步实现肥料资源高效利用,保证粮食安全和种植业可持续发展,实现农田可持续利用和环境质量的改善。

参考文献:

- [1] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1986.
Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Regionalization of fertilizer use in China[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1986.
- [2] 曾靖, 常春华, 王雅鹏. 基于粮食安全的我国化肥投入研究[J]. 农业经济问题, 2010, (5): 66-70.
Zeng J, Chang C H, Wang Y P. Study on the fertilizer inputs based on China's food security[J]. Issues Agric. Econ., 2010, (5): 66-70.
- [3] 金继运. 我国化肥利用效率问题分析[A]. 李华栋. 农业持续发展中的植物养分管理[C]. 南昌: 江西人民出版社, 2008.
Jin J Y. Fertilizer use efficiency in China[A]. Li H D. Plant nutrient management in sustainable agriculture[C]. Nanchang, China: Jiangxi People's Press, 2008.
- [4] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. Ambio, 2002, 31(2): 132-140.
- [5] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J *et al.* Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects[J]. Adv. Agron., 2005, 87: 86-156.
- [6] Dobermann A. Nutrient use efficiency-measurement and management[R]. Brussels, Belgium: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, 2007.
- [7] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China — Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2002, 63: 117-127.
- [8] Xing G X, Zhu Z L. Regional nitrogen budgets for China and its major Watersheds[J]. Biogeochemistry, 2002, 57/58: 405-427.
- [9] 朱兆良. 关于稻田土壤供氮量的预测和平均适宜施氮量的应用[J]. 土壤, 1988, (2): 57-61.
Zhu Z L. Prediction of nitrogen supply in paddy soil and use of regional appropriate rate for nitrogen fertilization[J]. Soils, 1988, (2): 57-61.
- [10] 李家康, 林葆, 梁国庆. 化肥需求预测[A]. 中国磷肥应用研究现状与展望学术讨论会论文集[C]. 北京: 中国农业出版社, 2005, 45-59.
Li J K, Lin B, Liang G Q. The prediction of chemical fertilizer demand[A]. Proceedings of the international symposium on phosphorus fertilizer use in China[C]. Beijing: China Agriculture Press. 2005. 66-77.
- [11] Smil V. Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences[J]. Annu. Rev. Energy Environ., 2000, 25: 53-88.
- [12] 林继雄, 林葆, 艾卫. 磷肥后效与利用率的定位试验[J]. 土壤肥料, 1995, (6): 1-5.
Lin J X, Lin B, Ai W. Accumulated phosphorus use efficiency in fixed site field experiment[J]. Soils Fer., 1995, (6): 1-5.
- [13] 刘晓燕. 我国农田土壤肥力和养分平衡状况研究[R]. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2008.
- [14] Liu X Y. The research of soil fertility and nutrient balance in China[R]. Beijing: Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, CAAS, 2008.
- [15] Jin J Y. Changes in the efficiency of fertiliser use in China[J]. J. Sci. Food Agric., 2012, 92: 1006-1009.
- [16] 闫湘. 我国化肥利用现状与养分资源高效利用研究[J]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2008.
Yan X. Study on present status of chemical fertilizer application and high efficient utilization of nutrition in China[J]. Beijing: PhD dissertation, Chinese Academy Agricultural Sciences, 2008.
- [17] Jin J Y, Yan X. Changes of fertilizer use efficiency in China [A]. Li C J. Plant nutrition for food security, human health and environmental protection [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 892-893.
- [18] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1-4.
Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(1): 1-4.
- [19] 张绍林, 朱兆良, 徐银华, 等. 关于太湖地区稻麦上氮肥的适宜用量[J]. 土壤, 1988, (1): 5-9.
Zhang S L, Zhu Z L, Xu Y H *et al.* Optimum nitrogen rate for rice - wheat system in the Taihu Lake area[J]. Soils, 1988, (1): 5-9.
- [20] 金继运. “精准农业”及其在我国的应用前景[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 1-7.
Jin J Y. Precision agriculture and its perspective in China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 1998, 4(1): 1-7.
- [21] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 等. 分区平衡施肥技术对氮肥利用率与土壤养分平衡的影响[J]. 土壤肥料, 2002, (1): 3-7.
Huang S W, Jin J Y, Yang L P *et al.* Effect of the regionalized balanced fertilization technique on nitrogen fertilizer utilization efficiency and soil nutrient balance[J]. Soils Fert., 2002, (1): 3-7.
- [22] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 程明芳. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 79-88.
Huang S W, Jin J Y, Yang L P, Chen M F. Spatial variability and regionalized management of soil nutrients in the grain crop region in yutian county[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(1): 79-88.
- [23] 黄立梅, 黄绍文, 刘双全, 周卫. 规模经营稻田土壤养分空间变异特征与高效平衡施肥效应[J]. 华北农学报, 2010, 25(S1): 205-211.
Huang L M, Huang S W, Liu S Q, Zhou W. Spatial variability of soil nutrients and crop response to balanced fertilization in a rice production area under the collective contract system[J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2010, 25(S1): 205-211.
- [24] 林葆, 李家康. 控释尿素彰显优越性—金正大控释肥试验示范效果大盘点[J]. 中国农资, 2007, (6): 58-60.
Lin B, Li J K. Advantage using controlled release urea—Results

- of field trials using Jinzhengda controlled release fertilizer[J]. *China Agric. Means Prod.*, 2007, (6): 58-60.
- [24] 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. *植物营养与肥科学报*, 2011, 17(1): 209-215.
- Lu Y L, Bai Y L, Wang L *et al.* Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat - maize in North China[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2011, 17(1): 209-215.
- [25] 李燕婷, 李秀英, 赵秉强, 等. 缓释复混肥料对玉米产量和土壤硝态氮淋失累积效应的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2008, (5): 45-48.
- Li Y T, Li X Y, Zhao B Q *et al.* Effect of controlled-release compounded fertilizers on maize yields and leaching loss of nitrate in soil profile[J]. *China Soil Fert.*, 2008, (5): 45-48.
- [26] 殷文鹏, 袁亮, 李絮花, 等. 有机质包膜尿素对冬小麦产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(5): 105-108.
- Duan W P, Yuan L, Li X H *et al.* Effect of organic coated urea on the winter wheat yield and nitrogen utilization[J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2011, 27(5): 105-108.
- [27] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543-551.
- Zhang G R, Li J M, Xu M G *et al.* Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2009, 42(2): 543-551.
- [28] 段英华, 徐明岗, 王伯仁, 黄晶. 红壤长期不同施肥对玉米氮肥回收率的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2010, 16(5): 1108-1113.
- Duan Y H, Xu M G, Wang B R, Huang J. Effects of long-term different fertilization on nitrogen recovery efficiency of maize in red soil[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2010, 16(5): 1108-1113.
- [29] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207-4229.
- Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2011, 44(20): 4207-4229.
- [30] 鲁如坤. 我国的磷矿资源和磷肥生产消费 II. 磷肥消费和需求[J]. *土壤*, 2004, 36(2): 113-116.
- Lu R K. Phosphorus resources and phosphate fertilizer production and consumption of china II. Phosphate fertilizer consumption and predicted demand[J]. *Soils*, 2004, 36(2): 113-116.
- [31] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 等. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. *土壤肥料*, 2006, (1): 3-8.
- Huang H X, Li S T, Li X L *et al.* Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. *China Soil Fert.*, 2006, (1): 3-8.
- [32] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 王敏. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 392-397.
- Liu R L, Li S T, Wang X B, Wang M. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *J. Agro-environ. Sci.*, 2005, 24(2): 392-397.
- [33] 徐明岗, 武海雯, 刘景. 长期不同施肥下我国 3 种典型土壤重金属的累积特征[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(12): 2319-2324.
- Xu M G, Wu H X, Liu J. Evolution of heavy metal contents of three soils under long-term fertilizations[J]. *J. Agro-environ. Sci.*, 2010, 29(12): 2319-2324.