



中国养分资源可持续利用现状与对策

张福锁¹, 王激清¹, 张卫峰¹, 马文奇²

1 中国农业大学资源与环境学院

2 河北农业大学资源与环境学院

摘要: 本文通过对三种不同的肥料利用效率评价指标的分析, 包括肥料偏生产利用率 (PFP), 肥料农学利用率 (AE) 和肥料回收利用率 (RE), 揭示了中国养分资源利用效率较低现状, 并阐明了其主要原因。以华北平原主要粮食作物冬小麦和夏玉米为例, 提出了优化养分管理的思路和技术途径, 重点指出重视环境养分供应的变化, 降低化肥投入和持续提高粮食产量是提高养分资源利用效率的关键, 而以测土施肥为重要技术的养分资源综合管理理论和技术将逐渐走向成熟, 并将成为中国养分资源利用效率和作物产量协同提高的支撑技术。几年来的大量田间试验和示范结果说明, 提高我国养分资源利用效率目标的协调潜力非常大, 通过推广养分资源综合管理技术能够实现粮食增产、资源高效和环境友好的双赢。

1. 我国肥料利用率持续降低

我国肥料消费量日益增长、而粮食产量却徘徊不前, 资料浪费和环境污染问题日益突出。全面审视肥料投入和粮食生产现状, 探讨改善和提高肥料利用率的相关措施已成为关乎资源、环境和粮食安全的重要课题。肥料利用率是反映肥料投入与作物生长关系的重要指标, 通常有几种不同的表示方法, 其中 PFP 是一个易于评价和指导农户施肥的重要指标, 表达式为 $PFP=Y/F$, Y 为某一特定作物的单产 (kg/ha), F 为施肥量 (kg/ha)。对比中国、法国和美国粮食作物上的 PFP 可以发现, 中国的肥料效率 (PFP) 远低于法国, 也低于美国, 目前中国每施入 1 公斤化肥只能平均生产 17.2 公斤的粮食, 而美国和法国可以达到 22.4 和 69.2 公斤。其原因是中国的施肥量高, 而粮食作物的产量却低于这两个国家, 其中法国的粮食单产可以达到 13881 kg/ha, 约为中国的 3 倍多。

从历史变化角度来看, 我国化肥利用率曾经相当高, 1980 年氮肥在粮食作物上的利用率达到 125 以上, 但是随着施肥量增加, 化肥的效率逐年下降。化肥对粮食增产的贡献是否在下降? 通过研究发现, 由于环境养分 (主要是来自土壤和大气沉降的养分) 向农田回流已经显著增加, 如大气的干湿沉降在华北平原带来了约 $60-80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 四川盆地为 $45-60 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 而土壤提供的养分 (主要包括 N 的矿化和土壤残余的氮) 其中华北平原达到 $83-124 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 在四川盆地为 $105-133 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 。相比而言, 过去中国土壤和环境提供的养分却不超过 $40 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 所以目前土壤和环境提供的养分是植物营养不可忽视的重要组成成分, 如果不被作物吸收利用就会对生态环境造成威胁, 应予以特别关注。

中国农业大学植物营养系从1999年至2004年在北京东北旺进行了长期定位试验, 结果显示冬小麦和夏玉米轮作体系中的施氮量从300 kg/ha下调到55-122 kg/ha时不仅产量不降, 而

且可以大幅度提高化肥利用率，2003年试验中每公斤化肥生产粮食达120多公斤。同期在山东、河北、河南等地开展了一系列类似试验，证明养分资源综合利用技术在提高粮食产量的同时大幅度提高化肥利用率。

AE为肥料的农学利用率，即每公斤化肥可增产的粮食数量。表达式为 $AE = (Y - Y_0) / F$ ，Y和 Y_0 分别为施肥和不施肥条件下的作物单产（kg/ha），F为化肥施用量（kg/ha）。对于AE的研究，我国自施用化肥以来，共进行过三次全国规模的化肥肥效试验。第一次在1936~1940年，由前中央农业实验所组织进行，第二次和第三次分别于1958~1962年和1981~1983年由全国化肥试验网组织实施，三次全国规模的化肥肥效试验每次间隔约20年。1958~1962年的肥效试验是在全国28个省市157个试验点多种作物上进行的，结果表明，氮肥在所有作物上都有显著的增产效果，其中每kg氮在三大粮食作物上增产范围为10~30 kg，磷的增产效果也较好，每kg磷可增产5~12 kg，钾肥增产效果较小，在小麦上几乎没有任何增产效果。1981~1983年的在全国29个省（市、区）6000个田间试验结果再次证实，我国三大粮食作物的施肥肥效仍然是氮肥大于磷肥，而磷肥大于钾肥，这个总的趋势没有改变，对于三大粮食作物，每kg养分增产数量，N 9~13 kg， P_2O_5 5~10 kg， K_2O 2~5 kg。进入20世纪90年代后，由于化肥平均施用量的提高和肥效报酬递减等原因，钾素养分的增产效果有所提高，氮、磷养分的增产效果有所降低，从我们总结1997-2003年施肥试验中氮磷钾肥效的情况仍可以得到这样的结果：氮肥的肥效依然是高于磷肥，磷肥肥效高于钾肥。

RE为肥料回收利用率，表示施用的肥料能够被作物利用的比例。表达式为 $RE = (U - U_0) / F$ ，U为某一特定的施肥量下作物地上部收获期总吸收养分量（kg/ha）， U_0 为没有施肥时作物收获期地上部总吸收养分量（kg/ha），F为化肥施用量（kg/ha）。朱兆良于1992年指出我国氮肥的回收利用率为28%-41%，在1998年指出我国氮肥、磷肥和钾肥的回收利用率分别为30%-35%，15%-20%，35%-50%。根据我们近期总结部分肥料试验结果可以得出，我国肥料的回收利用率仍呈下降的趋势，目前氮肥、磷肥和钾肥的回收利用率分别为25%，11%和30%。从1975年到现在，我国化肥用量快速上升，粮食作物的单产和总产也有大幅度的增加，两者十分吻合，但由于肥料利用率的下降和一半左右的化肥用于经济作物，从1984年到1994年，化肥的消费量增加了90%，而粮食产量仅增加了9%。

2. 优化作物体系中的养管理

养分资源不仅包括化肥养分资源，而且还包括环境养分和土壤养分资源，优化养分管理的目的是要充分利各种来源的养分资源，减少养分向大气和水环境中的损失，其主要技术主要包括农田养分投入总量的控制和作物生长发育不同阶段的分期调控，以实现土壤养分供应和作物需求的同步，下面以冬小麦和夏玉米为例来讲述养分优化管理的具体实施。

2.1 冬小麦体系

对于冬小麦而言，农民传统的施肥措施是：底肥施用100-150 kg/ha的氮，而追肥施用150-250 kg/ha的氮。调查数据显示，华北平原冬小麦传统施氮总量为369 kg/ha，如果以氮肥施用量250 kg/ha为适宜用量，从华北平原农户施肥调查情况也可以看出，农户施肥在合理施肥量的只有8%-10%，而施氮过量的农户可以占到90%-92%。这样实际上投入的氮肥大

大高于作物的吸收，造成了氮的大量损失，特别是在雨季来临，造成了大量的硝酸盐累积并进入地下水。而在优化施肥条件下，我们根据作物的吸收规律来分二次施用氮肥，即不施或少施基肥，重视追肥，实现作物生长氮需求和氮供给的同步，达到高产和提高肥料利用率的目的。结果显示，在优化施氮量为 70 kg/ha 就可以获得在传统施氮下获得的相应产量，而且极大的提高了化肥利用效率，其中优化施肥条件下的氮肥回收利用（RE）和氮肥农学利用率（AE）分别为 50%和 10 kg/kg，大大高于传统施肥条件下的 14%和 3 kg/kg，从表 1 华北平原冬小麦养分资源优化管理和传统施肥下各项目的比较也可以看出这种区别。

表 1 华北平原冬小麦养分资源优化管理和传统施肥措施比较

项目	优化施肥 (kg/ha)	传统施肥 (kg/ha)
施氮量	70	369
氮矿化量	26	26
环境中的氮	11	11
氮吸收	158	179
氮损失	20	124
土壤无机氮	-70	103
RE (%)	50	14
AE (kg/kg)	10	3

2.2 夏玉米体系

对于夏玉米而言，传统的施肥是苗期施用 150 kg/ha 的氮，而追肥施用 150 kg/ha 的氮，调查数据显示，华北平原夏玉米传统施氮总量为 244 kg/ha，如果以氮肥施用量 250 kg/ha 为适宜用量，从华北平原农户施肥调查情况也可以看出，农户施肥在合理施肥量的只有 41%，而施氮过量的农户可以占到 59%。而在优化施氮为 142 kg/ha 就可以获得在传统施氮下获得的相对产量，优化施肥条件下的氮肥回收利用（RE）和氮肥农学利用率（AE）分别为 34%和 13 kg/kg，大大高于传统施肥条件下的 RE 为 20%和 AE 为 5 kg/kg。从表 2 华北平原夏玉米养分资源优化管理和传统施肥下各项目的比较也可以看出这种区别，

表 2 华北平原夏玉米养分资源优化管理和传统施肥措施比较

项目	优化施肥 (kg/ha)	传统施肥 (kg/ha)
施氮量	142	244
氮矿化量	86	86
环境中的氮	14	14
氮吸收	183	188
氮损失	51	84
土壤无机氮	4	75
RE (%)	34	20
AE (kg/kg)	13	5

除了华北平原的冬小麦和夏玉米作物体系,我们在全中国其他作物体系也进行了相似的试验和推广工作,比如东北的水稻生产体系、春玉米生产体系,新疆的棉花生产体系,山东、北京和陕西等蔬菜和水果生产体系,长江流域的油菜和水旱轮作体系以及云南、福建等烟草生产体系都证明肥料养分资源综合管理理论与技术能大幅度节约化肥用量,提高化肥利用率。

3. 结论与展望

比较世界主要国家粮食作物的施肥量和产量水平,我们发现中国属于施肥量很高而粮食产量并不高的国家。中国粮食单产从 1t/ha 提高到 2 t/ha,经过了 21 年,从 2 t/ha 提高到 3 t/ha,经过了 12 年,从 3 t/ha 提高到 4 t/ha,经过了 11 年,这期间化肥投入和粮食单产同步增长,而从 90 年代到现在,经过了 15 年的时间,粮食产量仅从 4 t/ha 变化到了 4.6 吨,而肥料施用量却从 183 kg/ha 增加到现在的 288 kg/ha,出现了肥料用量大幅度增加,而作物产量却徘徊不前的局面。所以我们面临的重要挑战就是如何在进一步提高单产的同时提高肥料利用效率。

中国提高肥料利用率有很大的空间,如果全面推广养分资源综合管理,在现有水平上将肥料利用率提高 20%,则 2020 年保证小康水平粮食需求量的 6.6 吨时,我们还能节约化肥约 100 kg/ha。但是从目前中国农户的施肥情况来看,这是一项艰巨的任务,因为农户间肥料施用技术水平差异很大,用肥量也完全不同,其中约 1/3 农户过量施用氮肥,约 1/3 施用不足,而只有约 1/3 农户的施肥量落在基本合理的范围内。降低施肥过量区域的用肥量和提高施肥不足区域的用肥量同等重要。

值得指出的是,农业部从 2005 年开展全国性测土施肥计划,旨在从土壤测试和田间试验入手,通过肥料配方和专用肥、复混肥等配方肥的生产与施用,为农民提供配套的施肥技术服务。2005 年全国测土施肥的春季和秋季行动在全国 200 个县投资 2 亿元,而 2006 年计划将扩展到全国更多个县。预期该项目结束时,能提高我国肥料利用率 3~5 个百分点,提高有机肥循环利用率为 40%-50%;提高粮食产量 5%,增加粮食产量 1500 万吨;增加农户收入 180 亿元。通过测土施肥项目的开展,社会各界对养分资源综合管理的认识将加深,以科研为基础、以推广为主体、以企业为纽带、以农民为对象的新时期科学施肥体系将建立和完善起来,农民的施肥观念将发生转变,中国的化肥工业将随之找出自己的发展道路。中国的土肥科技工作者也成为农村小康社会建设的奠基者之一,并为中国实现循环经济增砖添瓦。