

## 中日高效施肥与环境评估合作 20 年回顾与展望

徐明岗<sup>1, 2</sup>, 李玲<sup>1</sup>, 段英华<sup>1</sup>, 钱小平<sup>3</sup>, 三島慎一郎<sup>4</sup>

1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、耕地质量培育技术国家工程实验室,  
2 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 3 国际农林水产业研究中心 4 日本农业环境技术研究所

化肥作为粮食的“粮食”，在促进农业生产和粮食安全中发挥了重要的支撑作用（张福锁等，2008），特别是中国创造了用占世界 7% 的耕地养活了占世界 22% 人口的奇迹，化肥在粮食高产稳产中发挥了极其重要的作用，对粮食增产的贡献达 40% 以上（朱兆良等，2013）。目前，中国农田化肥施用量为世界平均用量的三倍多，而化肥利用率低，氮肥利用率不足 35%，比世界平均水平低 15-20 个百分点。由于肥料利用率不高，导致大量养分特别是氮素养分流失于空气与水体之中，成为了重要的污染源。为了协调农业发展和环境保护的关系，中日双方自 1997-2016 年合作进行了“环境保护型农业生产技术的开发与评价”及“中国典型农田化肥的环境风险评价与施肥技术”等研究，以期探明中国主要农作制度下化肥的损失状况，同时进行土壤养分资源的环境风险分析，提出减少化肥损失的技术措施，指导科学施肥及养分资源管理，提高化肥利用率，保护农田生态环境。

### 1. 中日高效施肥与环境评价研究成果回顾

#### 1) 环境保护型农业生产技术的开发与评价研究（1997 年-2003 年）

施肥的目的是为了提高作物产量，保证人类发展对粮食的需求。但近 30 多年来，中国化肥用量持续高速增长，而粮食产量却增加缓慢（张福锁等，2008）。同时由于不合理使用化肥，而带来的环境污染问题日益凸出（陆文聪等，2017；刘钦普，2017）。为了协调化肥施用与环境的关系，自 1997 年-2003 年，中日双方开展了 7 年的中日政府间合作项目“中国主要粮食资源持续生产和高度利用”研究，其内容之一是“环境保护型农业生产技术的开发与评价”。这部分内容是由中国农业科学院土壤肥料研究所、中国科学院南京土壤研究所与日本国际农业研究中心、日本农业环境技术研究所等单位合作完成的。本项目开创了中-日合作的新纪元，是中日农业科技合作的标志性项目。本项目的合作研究，取得了如下的主要研究成果。

#### (1) 阐明了我国主要农作制度下化肥氮素的损失途径

化肥施入土壤以后，一部分被作物吸收，一部分保存于土壤之中，其余部分是化肥的损失部分，损失部分挥发进入大气、淋溶进入地下水 and 径流带入地表水（朱兆良，2000；Guo et al., 2004；周建斌，2017；巨晓棠等，2014；徐明岗等，2015）。

中国北方的小麦-玉米轮作制中，氮挥发损失主要发生于气温较高的玉米生育期，氮素损

---

收稿日期：2018-08-31

作者简介：徐明岗（1961—），男，陕西武功人，研究员。研究方向：土壤肥力演变与退化土壤修复。Email: [xuminggang@caas.cn](mailto:xuminggang@caas.cn)

资助项目：国家重点研发计划项目（2016YFE0112700）和中-日国际合作项目“华北农田环境负荷评价”等。

失率在 19.4–71.3% 之间,而在小麦生育期,氮素损失率只有 1.4–2.1%。中国南方的双季稻轮作制中,早稻和晚稻生育期的氨挥发损失率相近,约为 25–41% (平均为 35%)。

氮素的淋溶损失不论在北方或者在南方都很低,损失率仅为 2% 左右。中国北方的小麦-玉米轮作制中,尿素施入土壤以后迅速转化为铵态氮,随着氨的挥发和继续转化为硝态氮,铵态氮含量迅速降低,两个星期后稳定于低水平,而硝态氮含量逐渐增高,此后与铵态氮含量相比,始终保持相对较高的水平,说明在华北的水浇地上,土壤中的速效氮以硝态氮为主。由于铵态氮含量不高,而且能被土壤所吸附,所以水浇地上的氮素淋溶主要是硝态氮的淋溶。南方的双季稻轮作制中,由于在水稻生育期,水田在较长时间内保持有一定的水层,同时也有一定的下渗量,所以也存在着氮素的淋溶现象,但氮素的淋溶损失量仅占施肥量的 1.4%。

中国南方以水稻的种植为主,稻田在一年之中要进行多次进水与排水,有的丘陵山区还往往实行串灌,加之南方的降雨量较大,形成地表径流的次数多、径流量大,所以在南方,溶解于稻田表面水中的氮素随径流而流失,因此径流损失在南方丘陵区也是氮素的重要损失途径,其氮素损失率为 8.4%–11.2%。

## (2) 探明控释肥和有机肥施用下的氮素利用率,提出了环保型施肥新技术

施用缓释肥可以大幅度降低肥料的损失,提高肥料利用率(卢艳丽等, 2011; 侯红乾等, 2018; 徐明岗等, 2015),但对不同作物的增产效果差别较大,在不同作物上有着不同的应用前景。中国北方的小麦-玉米轮作制中,采用 Meister 缓释肥料的小麦产量较尿素略低,表明缓释肥对小麦的增产作用不如尿素大,而各处理间玉米产量的差异不明显。说明缓释肥在保持与尿素相同产量的条件下,由于极大降低了氮素的挥发损失,特别是 Meister 150 kg N/hm<sup>2</sup> 的处理,常规用量下可提高肥料利用率 6.9–13.3%,产量与等量尿素的处理持平或略高。中国南方的双季稻轮作制中,施用缓释肥 75kg N/ha 用量下,产量可达到 150 Kg N/ha 尿素的产量水平,肥料利用率提高约一倍(尿素氮的利用率为 25–35%,平均为 30%;而控释肥氮的利用率为 65–75%,平均约为 70%),具有十分良好应用前景。

有机肥与无机肥配合施用对减少氮素损失、提高化肥利用率的作用亦发挥重要作用(徐明岗等, 2015; 张淑香等, 2015)。通过对中国南方的双季稻轮作制的研究,水稻生育期间氨挥发损失量,等氮量下,早稻单施化肥(NPK)和化肥配施有机肥(NPKM),氨挥发氮素损失量分别占施入量的 37.7%和 18.2%,而施用有机肥(M)的氨挥发仅为氮肥施入量的 0.7%。晚稻 NPK 处理,氨挥发氮素损失量占施入量的 37.9%,而 NPKM 和 M 处理氨挥发损失较小,分别为施入量 7.2%和 1.0%。不同施肥处理的氮肥利用率明显不同,试验 5 年平均,单施化肥的氮利用率仅为 26.2%,有机肥和有机无机肥配合施用的氮素利用率较高,分别为 35.4%和 37.8%。总产量以有机无机肥配合最高,比化肥增产 8.3%,表明有机无机配合不仅可有效的增加水稻产量,而且还可显著提高氮肥利用率,是农业生产可持续发展的重要施肥模式。

## 2) 中国典型农田化肥的环境风险评价与施肥技术研究 (2004 年–2016 年)

随着化肥施用量的迅猛增长,环境污染日益加剧,特别是中国化肥使用量过高,导致中国农田化肥污染问题较发达国家更为突出,农业氮磷素的输入成为水体富营养化的主要原因(刘钦普, 2014),农业源排放的氨会在大气中形成硫酸铵和硝酸铵,它们是大气雾霾中的组

成部分，也是影响大气透明度的关键物质（自由路，2018）。为了农田生态系统健康及农业可持续发展，中日双方开展了第二期合作项目“中国典型农田化肥的环境风险评价与施肥技术”，执行期为2004年-2016年。本期研究主要以数据收集、调查研究为主，开展典型区农田土壤养分的环境风险分析研究，探明农田土壤养分平衡状况，进而明确其环境风险特征。本期项目合作研究，取得了如下的主要研究成果。

#### (1) 探明了河北省不同利用方式下土壤氮磷养分输入及盈余状况

河北省菜地和粮田的氮磷输入主要以化肥为主，化肥占总施肥量的比例为70%以上。粮田、果园和菜地的氮磷均呈盈余状态，氮的盈余率以果园最高（532.6%），菜地和粮田次之（61.5%和31.6%）；磷肥盈余率以菜地和果园最高（700.4%和615.7%），粮田最低（66.6%）且总体上磷肥的盈余率高于氮肥（李玲等，2016）。

#### (2) 明确了氮磷养分的环境风险指数

基于氮素盈余率大于20%即可对环境产生潜在威胁，和磷素盈余率的最大允许量为150%（Zhao et al., 2009）。河北省菜地和果园的氮磷肥盈余率已经严重超标，对环境的潜在威胁相对较大。同时把环境风险指数0.5作为安全界线，低于0.5对环境没有风险（刘钦普，2014）。河北省菜地、果园和粮田3种不同利用方式氮肥和磷肥的环境风险指数均大于0.5（李玲等，2016）。其中粮田氮磷的环境风险类型均为低度风险，果园氮磷的环境风险类型为中度风险，而菜地氮磷的环境风险类型均达到严重风险。因此河北省的氮磷肥的投入应相应降低，且为了更好地培肥地力，应加大有机肥的投入比例（李玲等，2016；徐明岗等，2015）。

### 2. 中日高效施肥与环境评价合作20年主要收获和启示

中日高效施肥与环境保护合作20年来，显著提升了中方的研究能力和研究水平：特别是控释肥的研究，对控释肥氮素调控机理和不同区域、不同种植系统下的高效施肥技术，达到国际先进水平；黄淮海平原旱地和华中水田氮肥环境保护型施肥技术，获得农业部科技进步二等奖。合作培养了一批杰出人才：20年来，双方交流80多次，举办国际研讨会9次，显著提升了中-日土壤环境评价和保护的国际影响力，增进了双方的文化交流和友谊。合作20年来，中日双方实现资源共享，优势互补，建立了长期友好的合作伙伴关系。随着未来合作科研项目和参与人数越来越多，双方将为中日友好和中日科技创新合作进步做出更大贡献。

### 3. 今后中日科技合作的思考与建议

随着现代农业的发展，对优质高效、轻简省力、环境保护的要求越来越高，中日双方在农业资源环境领域特别是高效施肥与环境保护方面的合作也将更加广泛和多元化。综合考虑中日双方的优势和农业生产的新需求，未来合作重点可以集中在如下几个方面。

#### 1) 高效施肥技术的研究与应用

高效施肥即在作物营养供应的各个环节上，采用现代技术手段，最大限度地提高肥料利用效率，一方面充分保证作物产量和品质的提高，另一方面减少资源浪费，保护生态环境（自由路，2018）。目前在农业生产中发挥作用的高效施肥技术主要包括测土施肥技术、精准施肥技术、灌溉施肥技术、轻简施肥技术、叶面施肥技术等。特别是随着科学技术的发展，高

效营养诊断技术、数字化养分管理系统、养分高效利用基因筛选、营养链一体化管理、作物营养调控技术和生态环境保护的施肥技术等将是未来高效施肥技术研究与应用的主要方向（自由路，2018）。因此中日双方可针对不同农业区域、特定作物系统，集成环境友好的高效施肥技术新技术，特别是轻简化、自动化、机械化的配套技术，并进行大区域示范应用，突出强化科技支撑，集成推广绿色优质高效的新技术。

## 2) 新型肥料的研发与应用

新型肥料开发的重点领域包括：新型缓/控释肥料、微生物肥料等。缓/控释肥料指肥料养分释放速率缓慢，释放期较长，依据不同作物的需肥特性及生长规律，采用物理、化学和生物学等技术调节和控制养分的释放，满足整个生长期作物生长所需的肥料，因此缓控释肥料被称为“21世纪新型环保肥料”（李玲等，2016）。缓/控释肥料具有提高化肥利用率、减少使用量与施肥次数、降低生产成本、减少环境污染、提高农作物产品品质等优点（卢艳丽等，2011；侯红乾等，2018；张德奇等，2010）。微生物肥料是指一类含有活微生物的特定制品，应用于农业生产中，作物能够获得特定的肥料效应，在这种效应的产生中，制品中活微生物起关键作用。微生物肥料作为一种新型肥料，施入土壤后，通过其特定菌株的快速繁殖，能固定大气中的氮素、释放土壤中固定态的磷、钾元素，使得环境的养分潜力得以充分发挥，并为作物生长营造一个良好的土壤微生物环境，在减少化肥用量、降低环境污染、提高农作物品质等方面具有重要意义（王素英等，2003；张瑞福等，2013）。推动新型肥料研究和产业化发展，是一项系统工程，需要科学家和肥料行业的共同努力，中日双方联合相关科研单位应加快提升科技创新能力，加大新型肥料研发的科研投入，建立新型肥料研发平台，成立联合新型肥料研发工程技术中心等，创建产学研相结合的科研创新模式，共同推进新型肥料的研发与应用，显著提升肥料利用率，降低施肥的环境负效应（赵秉强等，2004）。

## 3) 组织国际会议与人才培养

基于双方20年的合作基础，持续推进双方合作与交流，特别是继续加强资源高效利用和环境保护方面的技术交流与合作，重点是人才、新技术、信息交流与合作。本着“走出去，引进来”的发展思路，中日双方不间断开展调查研究，双方每年相互交流5-8人次，每2-3年组织相关国际会议1次。同时双方在研究生培养方面可以进行联合培养研究生，提升联合培养研究生的水平和质量，实现长期合作共赢的良好局面；为中日农业科技发展和中日友谊做出积极的贡献。

## 主要参考文献

- 1 Guo H Y, Zhu J G, Wang X R, et al, 2004, Case study on nitrogen and phosphorus emissions from paddy field in Taihu region, *Environmental Geochemistry and Health*, 26(2):209-219.
- 2 Zhao L, Ma Y, Liang G, et al, 2009, Phosphorus efficacy in four Chinese long-term experiments with different soil properties and climate

- characteristics, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40: 3121-3138
- 3 自由路, 2018: 高效施肥技术研究的现状与展望, *中国农业科学*, 51(11):2116-2125
  - 4 侯红乾, 冀建华, 刘益仁, 等, 2018: 缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响, *土壤*, 50(1): 43-50
  - 5 巨晓棠, 谷保静, 2014: 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势, *植物营养与肥料学报*, 20(4): 783-795
  - 6 李玲, 段英华, 徐明岗, 等, 2016: 河北省不同利用方式农田土壤氮磷环境风险分析, *中国农业资源与区划*, 37(7):96-100, 149.
  - 7 刘钦普, 2014: 中国化肥投入区域差异及环境风险分析, *中国农业科学*, 47(18):3596-3605
  - 8 刘钦普, 2017: 中国化肥面源污染环境风险时空变化, *农业环境科学学报*, 36(7):1247-1253
  - 9 卢艳丽, 自由路, 王磊, 等, 2011: 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析, *植物营养与肥料学报*, 17(1):209 -215
  - 10 陆文聪, 刘聪, 2017: 化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应, *中国环境科学*, 37(5): 1988-1994
  - 11 王素英, 陶光灿, 谢光辉, 等, 2003: 我国微生物肥料的应用研究进展, *中国农业大学学报*, 8(1):14-18
  - 12 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等, 2015:中国土壤肥力演变(第二版), 北京: 中国农业科学技术出版社
  - 13 张德奇, 季书勤, 王汉芳, 等, 2010: 缓/控释肥的研究应用现状及展望, *耕作与栽培*, 3:46-49
  - 14 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等, 2008: 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径, *土壤学报*, 45 (5) : 915-924
  - 15 张瑞福, 颜春荣, 张楠, 等, 2013: 微生物肥料研究及其在耕地质量提升中的应用前景, *中国农业科技导报*, 15(5):8-16
  - 16 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等, 2015: 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望, *植物营养与肥料学报*, 21( 6) : 1389 -1393
  - 17 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等, 2004: 我国新型肥料发展战略研究, *植物营养与肥料学报*, 10 (5 ) : 536-545.
  - 18 周建斌, 2017: 作物营养从有机肥到化肥的变化与反思, *植物营养与肥料学报*, 23(6) : 1686-1693
  - 19 朱兆良, 2000: 农田中氮肥的损失与对策, *土壤与环境*. 9(1): 1-6
  - 20 朱兆良, 金继运, 2013: 保障我国粮食安全的肥料问题, *植物营养与肥料学报*, 19(2):259-273