

国际农业环境研究进展与中日合作

—农业生态系统中氮循环及其环境影响—

八木一行^{*1}·宝川靖和^{*2}

^{*1} 农研机构农业环境变动研究中心（现：泰国先皇技术学院能源与环境联合研究生院）

^{*2} 国际农林水产业研究中心（现：农研机构农业环境变动研究中心）

1. 前言

中国是世界上最大的粮食生产与消费大国。市场经济下居民收入与人口总额的持续增长都让中国的粮食需求不断扩大，也给农业质量与规模带来了巨大变革。除了 2000 年左右几年时间，由大米、小麦、玉米等“谷”类作物，以及豆类与薯类三大作物所组成的中国“食粮（中文叫做粮食）”年总产量从 20 世纪 80 年代初的 3.2 亿吨不断攀升，于 1996 年达到 5 亿吨，更是于 2011 年增长至 6 亿吨。

飞速增长的粮食产量背后最大的功臣是各种农业技术方面革新，特别是要归功于化肥使用量的增长。正如图 1 所示，中国粮食产量与氮肥消费量几乎呈同步增长。而中国单位面积土地平均氮肥消耗量在 2000 年左右赶超日本与欧美发达国家，已成为世界上最大的氮肥消费国家。此外，中国各地区化学肥料的使用量如中国的收入差距一般存在明显差异。沿海与长江流域这些较为富裕地区的化肥使用量其实早已在 20 世纪 90 年代时就远远超过了 400kg N/ha 这一平均值（Zhu & Chen 2002; Zhang F et al. 2013）。

滥用化学肥料导致了各种环境问题：如地下水和江河水的水体污染问题、湖沼与海湾富营养化问题、肥料产生温室气体从而导致的全球变暖问题、平流层臭氧空洞问题、光化学空气污染问题、酸雨与可吸入颗粒物（PM_{2.5} 等）增加问题（Mosier 2002）。这些问题在发达国家已成为一大社会问题，其化肥使用量均呈现下降趋势。然而中国化肥使用量却始终居高不下，不仅给作为人类重要饮用水源之一的地下水水质以及淡水渔业（鱼类及贝类）造成了恶劣的影响，导致了大气污染状况进一步恶化，而且化肥费对于农民收入来说也绝不是一个小数目。因此适量施肥从农民家计这一角度来说也是十分有意义的。

2. 中日环保农业方面合作研究

1) 合作研究项目概要

日本国际农林水产业研究中心（JIRCAS）于 1997 至 2003 年在中国举办了第一期中日农业科技综合项目，主题为“研究中国主要粮食资源的持续生产及高效利用技术”。此次项目主题为：（1）设计粮食需求构造变化背景下的高效生产流通系统。（2）研究使主要粮食资源实现可持续高稳定生产的技术。（3）研发流通加工技术，从多角度解决中国粮食问题，提供科学技术智慧来实现更为“稳定富饶的生活”。然而，以粮食增产为目的的农业技术往往给环境带来了更加沉重的负担，反而可能成为阻碍实现“稳定富饶生活”的“负反馈”（图 2）。

因此针对上文中所介绍的研究主题（2），项目开设了“环保型农业生产技术的评价与开发”这一专题来解决“可持续生产”这一问题，专题围绕适量施肥这一中心思路合作研究相关技术，旨在实现保持粮食作物高产，并且在与自然和谐共存的状态下达到稳定持续生产这一目标。专

题试图对项目启动时中国农业所面临的以下关键问题做出回答：

- ①中国集约型农业给环境带来了什么样的影响？
- ②现在这个影响有什么样的变化？
- ③未来又会产生什么样的影响？
- ④该如何减少这种影响？

但是面对复杂多样的环境影响，我们无法在有限的项目范围内网罗所有问题，并针对上述问题逐一作出解答。因此本合作研究选取“农业生态系统中的氮循环及其环境影响”这一题目作为上述关键问题的一个视角。氮不仅是粮食作物最为重要的营养成分之一，它给环境带来的影响也极为明显且严重。因此本研究旨在通过研究氮，来寻找在回答上述关键问题时最为不可或缺的“指南针”。

2) 研究体制与研究课题

本合作研究是在 JIRCAS 与中方的两家研究所——中国农业科学院土壤肥料研究所（所在地：北京，现：农业资源与农业区划研究所）及中国科学院南京土壤研究所（所在地：南京）的合作下合作完成的。中国这两家研究所均代表着中国土壤学方面研究的最高水平，不仅拥有众多优秀的研究人才，同时也在全国各地都拥有下属试验田，一直积极开展着各项研究活动。

而此次研究选取了中国典型且重要的三个农业地区作为实验地区，以这三个地区所采用的耕作体系为对象，进行了田间试验和大范围的农业环境调查（表 1）。三个地区分别为：1. 小麦-玉米种植区——位于华北平原的山东省陵县与北京市昌平区。2. 小麦-水稻种植区——位于长江下游太湖集水区的江苏省锡山区及常熟市等。3. 两季水稻地区——位于中国南部红壤地带的湖南省祁阳县。

3) 合作研究项目成果概要

在各农业生态系统中围绕氮的动向展开调查后，研究发现对于周围环境来说，所有对象地区内的耕地都是一个巨大的氮污染源，而耕地内大量的速效肥料就是罪魁祸首（图 3）。其中氮挥发给环境带来的污染尤为明显。所有对象农田内无论是旱田还是水田，在按照当地惯例对其进行施肥后，肥料中 1/3 以上的氮素都经由氨挥发逸散出土地。水田内的氨挥发主要原因是日间田面水 pH 值升高。而旱田中碱性土壤，尤其是华北平原大片碱性土壤也导致了大量的氨挥发。

调查证实，使用肥效调节型肥料、厩肥和深层施肥法等做法都有望缓解耕地给环境带来的负担。特别是合理施用肥料调节型肥料能够大幅减少氨挥发量（图 4）。不仅如此，研究表明这一做法对减少水田内田面水造成的氨水面流失也能达到同样的效果。根据以上研究成果，我们基于缓解环境负担与保持耕地产量两个思路，将各研究对象地区内推荐施肥法做了归纳整理（表 2）。

上述结果汇编并发布在 JIRCAS 第 65 号工作报告（Hosen 2010）中，以下则是每个领域的成果概要。

(1) 华北平原农业生态系统中氮素流向及其调控

①分析该地区内有机物及氮循环

山东省陵县是华北平原典型农业区。我们用氮循环模型对其 1979 年-1997 年间氮循环进行了分析，并且调查了当地地下水水质（Yagi et al. 2010）。调查发现虽然农田土壤及周边

环境中含有大量的氮，且还在不断增加中（图 5）（1997 年时平均一年内氮含量攀升至 $288 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ），但在当地地下水中并未检测出大范围的硝酸盐污染。结合下方田间试验结果分析，这或许是因为大部分的氮都经由氨挥发而逸散至空气中，从而扩散到了环境中（Yagi & Hosen 2003）。

②集约型农业给环境带来的负担及其应对措施

在山东省陵县，就施肥深度以及使用肥效调节型肥料对氨挥发与粮食产量的影响进行的试验（Zhang R et al. 2002; 2010a; b）表明，同样按照惯用肥量（ $450 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）进行施肥的试验田中，将当地习惯肥料尿素施肥于土地表面的情况下， $165 \pm 10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ （相当于肥料中氮总含量的 37%）的氮都经由氨挥发流失了。而将等量尿素沟施肥于深度 5cm 处的条件下，氮流失量被降低至 $97 \pm 2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ （相当于肥料中氮总含量的 22%）。也就是说，按照沟施肥方法将肥料施肥于深度 5cm 处时氨挥发量仅为表面施肥时的 59%（图 6）。而在同样深度采用沟施肥法施用肥料调节型包衣尿素的情况下，氮素经由氨挥发流失量仅为 $-0.5 \pm 7.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ （约为肥料中氮总含量的 0%），降至未施氮肥区域同一水平（图 4）。在玉米种植期（暖季）施肥一周后明显观测到大量的氨挥发。而玉米和小麦产量分别在包衣尿素试验田（比惯用肥量减少 33%）与尿素深层施肥田（惯用肥量）达到最大。因此若要同时实现减少环境负担与保持、提高产量两个目的，建议对玉米采取施惯用肥量 67% 的包衣尿素，或尿素深层施肥（惯用肥量）方法，而对小麦则采取尿素深层施肥法（惯用肥量）。

③不同施肥量与不同肥料种类下氮损失量

在北京市昌平区的渗漏计田间试验区对惯用灌溉条件下地下渗水造成的肥料成分溶解流失量进行了三年定量调查后（Zhang S et al. 2010），调查发现在所有种类的肥料（尿素及包衣尿素）与施肥量（ $0 \sim 450 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）条件下，地下渗水量及无机氮溶解流失量均分别落在 $6 \sim 73 \text{ mm y}^{-1}$ 与 $0.3 \sim 2.1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 区间内，均为未使用氮肥区域最大，而惯例施肥区（尿素 $450 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ）最小。这就意味着，当地农田生态系统中肥料因地下渗透而导致地下水污染的危险性较低。

（2）太湖水质污染导致的面源污染之影响

①村落规模内影响

在太湖西北岸地区的典型村落常州市武进区雪堰桥镇（33 平方公里，3 万人）以田间试验形式进行了地表径流对氮磷影响的调查后，我们明确了这些水田内年间氮磷流失的模式。并且由村落单位调查数据推测出了农田、家禽、村与镇各自的面源污染程度。美国宾夕法尼亚州利用地理信息系统技术来计算农业面源污染可能性指数（APPI），我们对这一指数的权重进行了改良，使之适用于太湖地区，又基于以上数据推测出了雪堰桥镇镇内各村庄的地表径流流失指数、堆积物生产指数、化肥使用指数以及人、家畜的污染指数（Guo et al. 2010）。

②集水区（水库或集水盆地）规模内影响

江苏省宜兴市梅林地块（1.22 平方公里）是太湖西岸地区一个典型的农业集水区。估算梅林地块地表径流所导致的氮磷流失量分别为区域内各自施肥量的 8.5% 与 3.2%，即 $20.3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 与 $1.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 。这一数字虽然会在主要农作物施肥期有所增长，但在水稻生长旺盛期 7 月-9 月有所下降。从氨态氮浓度仅在水稻基肥施肥期呈现出明显上升这一点来看（图 7），这一时期对水的管理是十分重要的（宝川ら 2004; Gao et al. 2010）。

③渗漏计试验

在江苏省常熟市渗漏计田间试验区，通过监测水稻-小麦轮耕体系中氮收支来试验包衣尿素对氨挥发、一氧化二氮逸散、地表径流、地下渗透及作物产量带来的影响时，发现氨挥发是最大的环境污染源 (Li H et al. 2010)。当地习惯使用尿素，若以惯用肥量施加尿素，氨挥发量为 $109 \pm 13 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (肥料中氮总含量的 37%)，而以惯用肥量的 50% 施加尿素时氨挥发量降低至 $42 \pm 7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (肥料中氮总含量的 28%)。施加惯用肥量 50% 及 33% 的包衣尿素时，氨挥发量更是分别降低到 $2 \pm 1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (肥料中氮总含量的 1%) 与 $2 \pm 2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (肥料中氮总含量的 2%) (图 4)。而且包衣尿素可以有效地提高水稻稻谷产量，特别使用惯用肥量 50% 的包衣尿素时，水稻产量提高至最多，但同时小麦产量却有所下降。包衣尿素也能确实地减少地表径流导致的环境污染。基于以上研究结果，建议当地种植水稻时可以使用适当的肥效调节型肥料，并且将施肥量减少至惯用肥量的 50% (Wang et al. 2010)。

(3) 适用于红土地的环保型水田农业技术体系研究

① 基于物质循环的环保型水稻栽培技术的研究

在湖南省祁县开展试验，研究包衣尿素对氨挥发与作物产量的影响时，发现同样施加惯用肥量 ($300 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) 时，使用当地惯用肥料尿素的情况下，氨挥发量为 $102 \pm 16 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (肥料中氮总含量的 34%)，而使用包衣尿素时的氨挥发量被有效降低至 $32 \pm 8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (肥料中氮总含量的 11%) (Li J et al. 2010)。施加惯用肥量 50% 的包衣尿素 ($150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) 时，氨挥发量为 $15 \pm 18 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ (肥料中氮总含量的 11%)，同时作物产量也与习惯尿素施肥区无显著差异 (图 4)。因此基于以上调查结果，建议当地可以使用适当的肥效调节型肥料，并且将施肥量减少至惯用肥量的 50%。同时，研究表明厩肥也可能实现在减少氨挥发量的同时维持作物产量这一目标 (图 8) (Xu et al. 2002a; 2010a)。

② 有效利用水田的环保作用

湖南省祁阳县官山坪集水区 (254 公顷) 是红土地上一个典型的两季水稻种植区。通过监测地表径流时氮等营养成分的变化、寻访农户以及收集田间试验数据，估算出了当地水田农业生态系统中的氮收支 (Xu et al. 2002b; 2010b)。研究结果表明氮的输入量为 $467 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ，而施肥、降雨与灌溉分别约占 95%、3.1% 与 1.6%。氮的总释放量则为 $464 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 其中农作物吸收量、氨挥发量、地表流失量与地下渗透量分别约占 52%、38%、8.3% 与 1.5%。地表径流监测结果显示，水稻施肥期与降雨重合时存在明显的氨态氮素流失，因此必须认识到这一时期管理水的重要性。

3. 展望中国与东亚地区未来

自进入 21 世纪以来，中国氮肥消费量虽然不再像过去一样飞速增长，仍呈现持续增长态势。但从 2000 年以来每 5 年时间内氮肥年均增长率分别为 2.8% (2000 年-2004 年)，2.0% (2005 年-2009 年) 与 1.3% (2010 年-2014 年) 这几组数据中可以看出，中国氮肥消费量增速在稳步下降 (图 1、图 9 左)。

但是考虑中国单位面积上氮肥使用量时，不能忽视社会构造与粮食进出口剧变下中国国土全体耕地面积的变化。中国政府公布的统计数据虽然有部分数据失实，但国家统计局统计表明 1997 年至 2008 年的 11 年间中国土地耕地面积约减少了约 6% (严，2014)。因此即使中国整体氮肥用量有所下降，也可以推断中国单位面积上氮肥消耗量在 2002 年-2014 年间一直持续增长 (图 9 右)

环保在中国近年来的经济发展中一直是一个被搁置的问题，但值得关注的是近来中国开始探讨重新制定方针。2016年3月第十二次全国人民代表大会第四次会议上通过了《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》，纲要中“绿色”这一环保要求作为“五大发展理念”关键词之一与创新、协调、开放、共享一同被提出。随后2016年11月国务院公布了《十三五生态环境保护规划》，将生态文明建设提高到国家战略层面，同时在该战略提出的全面要求与具体计划中写入了完善环境法制体系与环境质量监测监控体系要求。接着于2018年1月，中国首部《环境保护税法》正式实施。同时，美国消极对待旨在防止全球变暖的国际协定“巴黎协定”，中国却表现出积极带路态度，种种行为都表现出中国如今正在努力积极发挥国际环保事业中自身的作用。

就氮肥消费这一问题，当我们把目光投向与中国拥有相近的耕作体系，且同样是东亚一份子的日韩，会发现日本与韩国氮肥消费量分别于20世纪70年代与90年代达到顶峰后呈现飞速下降趋势（图9）。究其原因，虽然日韩两国耕地面积减少是原因之一，但社会对环境负担问题日益高涨的关心其实起到了更大作用。例如日本引进环保型农业等举措就在政策面上起到了不可忽视的作用（Yagi & Minami 2005）。相信如今益发重视环保措施的中国未来也会选择走上日韩两国曾经走过的道路。

在研究组结束上述项目后，中日间为了进一步深入研究成果一直在持续合作中。而2017年2月启动的国际合作研究项目“国际氮素管理系统（Towards INMS）”中，继以往中日间国际合作，项目设立了“东亚地区示范会”，来自韩国与菲律宾的学者们也合作加入队伍中，分享东亚各国氮收支与循环的特点及现状信息，并围绕这些问题展开讨论。由农研机构与季风亚洲农业环境研究国际财团（MARCO）携手举办的第二届国际研讨会“东亚氮循环及其环境影响”也将于2018年11月启动。期待未来这种国际合作能够进一步壮大，在造福中国的同时造福全东亚地区，实现农业生态系统中的氮管理，实现在最大限度利用氮的同时将其对环境的负面影响降低到最小的这一夙愿。

参考文献：

- 1 Gao, C. (2010) Nutrient exports from agricultural land in a rural watershed in the Taihu Lake area, China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 35 - 40.
- 2 Guo, H. et al. (2010) Study on agricultural non-point source pollution potential index (APPI) in Taihu Lake region with GIS. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 27 - 34.
- 3 宝川靖和ら (2003) 中国紅壤丘陵地帯水田二期作地域におけるアンモニア揮散とその制御. 国際農林水産業研究成果情報, 10, 17 - 18.
- 4 宝川靖和ら (2004) 中国太湖地域の農業集水域からの地表水による窒素の流出. 国際農林水産業研究成果情報, 11, 19 - 20.
- 5 Hosen, Y. (2010) Evaluation and Development of Methods for Sustainable Agriculture and Environmental Conservation in China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, pp. 81.
- 6 Li, J. et al. (2010) Effect of polyolefin-coated urea on rice yield and ammonia volatilization in red soil region of southern China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 65 - 72.

- 7 Li, H. et al. (2010) Model estimation of ammonia volatilization in paddy soils by monolithic lysimeter experiments in Changsu Agroecological Experiment Station. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 53 - 56.
- 8 Mosier, A.R. (2002) Environmental challenges associated with needed increases in global nitrogen fixation. *Nutr. Cycling. Agroecosys.*, 63, 101 - 116.
- 9 Wang, X. et al. (2010) Effect of coated urea under rice-wheat rotation on environment and economical benefit in Taihu Region. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 41 - 51.
- 10 Xu, M. et al. (2002a) Transformation and utilization of nitrogen in paddy soil under combining chemical and organic fertilizers application. *Acta Pedol. Sin.*, 39, 421-426 [in Chinese].
- 11 Xu, M. et al. (2002b) Characteristics of nitrogen supply from paddy soil in red soil hilly regions of southern Hunan. *Soil Environ.*, 11, 50 - 52 [in Chinese].
- 12 Xu, M. et al. (2010a) Transformation and utilization of nitrogen in paddy soil applied with chemical fertilizers combined with manure in double-rice region of southern China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 57 - 63.
- 13 Xu, M. et al. (2010b) Evaluation of nitrogen losses from double-rice cropping agro-ecosystems based on a typical watershed in the hilly red soil region of southern China. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 73 - 81.
- 14 Yagi, K. et al. (2010) Flow-model analysis of nitrogen cycling in agro-ecosystems of Lingxian County, Shandong Province. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 1 - 7.
- 15 Yagi, K. & Hosen, Y. (2003) Nitrogen cycling in agro-ecosystems of Huang-Huai-Hai Plain, China. *Farming Japan*, 37, 43 - 45.
- 16 Yagi, K. & Minami, K. (2005) Challenges of reducing excess nitrogen in Japanese agroecosystems, *Sci. China Ser. C*, 46, 928 - 936.
- 17 嚴善平 (2014) 中国の食糧安全保障と戦略的農業への展望. 日中経協ジャーナル, 2014年10月号.
- 18 Zhang, F.S. et al. (2013) Chinese agriculture: An experiment for the world. *Nature*, 497, 33 - 35.
- 19 Zhang, R. et al. (2002) Measurement of ammonia volatilization in a closed chamber system. *Acta Pedol. Sin.*, 39, 313 - 320 [in Chinese].
- 20 Zhang, R. et al. (2010a) The effect of soil moisture and N application practice on nitrification and ammonia volatilization. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 9 - 12.
- 21 Zhang, R. et al. (2010b) The effect of coated urea on N use efficiency and ammonia volatilization. JIRCAS Working Report No. 65, JIRCAS, 13 - 17.
- 22 Zhang, S. et al. (2010) N balance affected by different release rates and application rates of N fertilizer in a lysimeter system. JIRCAS Working Report

- No. 65, JIRCAS, 19 - 26.
- 23 Zhu, Z.L. &Chen,D.L. (2002)Nitrogen fertilizer use in China - Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutr. Cycling. Agroecosys.*, 63, 117 - 127.