

农业绿色高质量发展期面源污染治理的思考与实践

展晓莹, 张爱平, 张晴雯^{*}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业清洁流域团队, 北京 100081; 2. 农业农村部农业环境重点实验室, 北京 100081)

摘要: 农业是中国经济平稳发展的基石, 在保障了粮食安全的同时也造成了严重的面源污染。过去 10 a, 中国面源污染治理虽取得一定成效, 但农业源的贡献仍居高不下。该研究阐述了新时期农业面源污染治理面临的挑战, 结合国家农业绿色发展的重大需求, 提出了以“生态循环、流域统筹”为核心的农业面源污染治理新思路; 分析了农业面源污染治理的卡脖子技术, 提出了以“种养结合、产业链循环”为核心的污染治理实现路径; 深入探讨了农业面源污染治理运维机制不畅通的原因, 提出以“农民和农业企业为主力军”的多元主体治理及运维机制; 结合典型案例, 阐述了农业面源污染治理的实现路径和应用效果, 以期为推动中国农业农村生态环境治理体系的现代化建设提供支撑。

关键词: 农业; 机制; 面源污染; 流域统筹; 种养结合; 生态循环; 多元治理; 长效运维

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.001

中图分类号: S19

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-20-0001-07

展晓莹, 张爱平, 张晴雯. 农业绿色高质量发展期面源污染治理的思考与实践[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 1-7.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.001 <http://www.tcsae.org>

Zhan Xiaoying, Zhang Aiping, Zhang Qingwen. Controlling agricultural non-point source pollution: Thinking and practice in the era of agricultural green high-quality development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 1-7. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.001 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农业是中国经济平稳健康发展的压舱石, 保障粮食安全供应是中国经济社会平稳健康发展的重要基础^[1]。在粮食刚性需求压力下, 过去相当长的一段时间农产品生产力的提高是农业追求的核心。土地集约化程度的提高与农业生产资料的不断投入解决了过去 30 多年来的国家粮食安全问题^[2]。然而, 在获得高产出的同时, 也付出了巨大的资源环境代价, 化肥农药过度投入、畜禽与农村生活粪污大量排放等, 对农业生态系统和农村环境造成破坏^[3], 农业面源污染问题尤为突出。农业面源污染综合治理与中国农业发展和社会经济发展水平紧密关联, 进入“十一五”, 中国政府加大了对农业面源污染治理的决心, 过去 10 多年间, 生态环境领域的科技投入不断增加, 生态环境质量明显改善。2018 年以来, 以生态文明建设引领乡村振兴标志着农业面源污染治理迈入新时期, 对农业面源污染治理提出了更高的要求, 农业农村环境污染的治理势必倒逼农业转型升级, 调整以达标排放为核心的传统治理思路, 建立起粮食增产稳产和水体

环境安全的农业面源污染管理体系和科学控污减排技术体系。本研究旨在综述农业面源污染治理在新时期面临的“卡脖子”技术及运维障碍, 结合实践经验, 提出更为优化的技术途径与良性运维机制。

1 新时期农业面源污染治理中存在的问题与挑战

1.1 农业面源污染源解析及问题剖析

集约化农业的发展打破了生态系统物质和能量循环, 导致过量投入的养分和废弃物进入土壤和水体等环境介质, 造成水体富营养化、土壤退化和大气污染等环境问题。自 20 世纪 70 年代以来, 中国的重点湖泊与河流水域, 如五大湖泊、三峡库区、滇池、白洋淀、南四湖等水体富营养化问题逐渐凸显^[4]。水体中过量的氮磷等营养物质主要来自于农业源、工业源与生活源。2007 年第一次全国污染源普查^[5]的结果表明, 来自农业源的化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)、总氮以及总磷的贡献占到总污染物的一半左右 (分别为 44%、57% 和 67%), 与工业源相当。时隔 10 a, 2020 年 6 月发布的《第二次全国污染源普查公报》^[6]的数据显示, 中国农业领域中的污染排放量与第一次污染普查相比呈明显下降趋势 (图 1)。COD、总氮、总磷排放量分别下降了 19%、48%、26%。但农业源污染物的占比仍然很高, 农业面源 COD、总氮和总磷排放量分别约占到全国排放量的 50%、47% 和 67%。种植业与畜禽养殖的贡献占到农业源的 90% 以上, 从总氮的排放来看, 种植业与养殖业各半; 总磷与氨氮的排放量种植业与养殖业比值为 1:1.3 与 1:1.6。也就是说, 与工业和城镇生活污染治理相比,

收稿日期: 2020-07-08 修订日期: 2020-10-10

基金项目: 国家自然科学基金 (41977072、41907087); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07203-007); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (BSRF201905)

作者简介: 展晓莹, 博士, 副研究员, 主要从事农田氮磷损失与模拟研究。

Email: zhanxiaoying@caas.cn

*通信作者: 张晴雯, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业流域源汇功能、清洁机制与关键技术研究。Email: zhangqingwen@caas.cn

农业面源污染负荷的削减幅度和速度较为缓慢,与第一次污染普查相比对水体的污染贡献率不降反升。农业源占比如此之高,与中国传统种养殖业、农村生活“高投入、高消耗、高排放、低效益”的粗放型发展模式紧密相关。

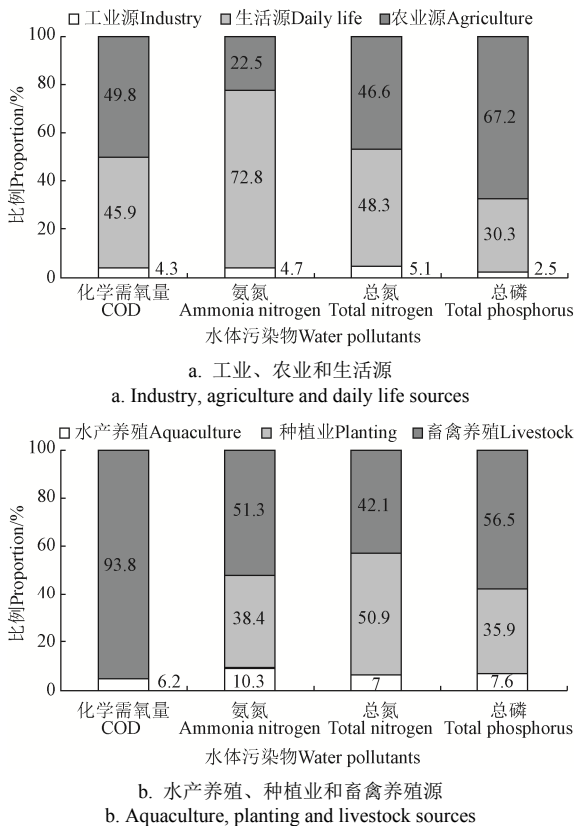


图1 第二次全国污染源普查水体污染物排放占比^[6]

Fig.1 Proportion of water pollutants discharge based on the second national census of pollution sources^[6]

1980—2018年间,中国化肥消费量增长了345%,约占世界化肥总消费量的1/3^[7-8]。化肥的投入带来了粮食产量的大幅提高,人民生活得到改善。然而粮食总产量并未随着化肥消费量的增加而持续上升,过去30a间仅增长了105%^[8]。氮磷肥的利用率不足40%,比发达国家低10%~20%^[1,9]。通过径流与淋溶,多余的氮磷营养(<10%)从农田流失,通过沟渠进入水体^[10-12]。10%~20%的氮素还会通过氨挥发的方式进入大气^[13-14],经大气环流或降雨作用沉降进入陆地与水体,同样对水体中的藻类增殖起着关键作用^[15-16]。近些年来中国规模化畜禽养殖业也得以快速发展,成为农业农村经济最具活力的增长点。以生猪养殖为例,2017年中国畜禽养殖量为12亿头(猪当量),是美国(5.4亿头)的2倍,畜禽污染物产生量也为美国的2倍左右^[17]。中国每年产生畜禽粪污38亿t,综合利用率低于60%^[18]。此外,中国乡村地区仅有9%的行政村能实现生活污水处理,一半左右的乡村水源被污染^[19]。以太湖流域为例,农村生活污染源排放的COD占所有排放源排放量的23%,总氮占40%,总磷占38%^[20]。第三次农业普查结果表明,仅有48.6%的农户使用卫生厕所,仍有2%的农户没有厕所^[21]。农村人居环境整治三年行动方案实施以来,卫生厕所的普及率有所上升达

60%^[22]。

为有效防控农业面源污染,自“十一五”以来生态环境部、农业农村部相继出台系列文件,并在国家科技重大专项和国家重点研发计划中,将“一控两减三基本”作为治理农业面源污染的重要策略。比如,在“国家水体污染控制与治理科技重大专项”“农业面源和重金属污染综合防控与修复技术”国家重点研发计划重点专项等的支持下,明确了典型农业系统污染物迁移转化规律与源-汇效应,并针对污染物环境行为过程中关键节点构建了一系列的阻控技术。在种植业方面,主要包括新型肥料或修复剂产品、水-碳-氮/磷综合调控技术、农机农艺结合技术、田沟塘或隔离带的阻断拦截与生态技术、养分循环与高效利用技术等。此外,以微生物为核心的生态养殖技术,农村生活污水生物及生态处理技术等^[19,23-28]也有深入探索。其中的部分技术和产品已达到国际先进水平,并在中国重点流域与农业面源污染高发区已得到广泛应用,为有效推进乡村振兴和农业绿色发展提供了技术支撑^[1]。

但从污染普查的数据来看,过去10a间农业环境污染的发展态势依然没有有效地遏制,这说明中国农业面源污染治理还存在“卡脖子”的技术,治理思路亟待转变。中国的农林生态环境领域在理论体系构建、技术产品和装备研发、技术规模化应用等方面与发达国家仍存在15~20a的差距^[1]。因此,在国家发展新的时期,中国农业面源污染治理需要及时转变思路,分析新的问题,探索新的路子。

1.2 新时期农业面源污染的机遇与挑战

从基础理论层面来讲,农业面源污染物的源解析、发生关键时期与关键过程、沿程消纳机制,以及高分辨率精细化的过程模拟很大程度上决定了污染治理成效。通过原位观测与模型模拟的手段,目前中国的农业面源污染物产生排放的时空格局已初步建立^[10-11]。然而,研究手段的局限也限制了对农业面源污染物排放特征的深入了解。在污染物的发生阶段,还欠缺在界面、微生物、分子尺度上对环境污染物的产生机制进行系统的观测、分析与理解;在污染物迁移转化、沿程消纳阶段,则欠缺较为精准的溯源技术。而在模型模拟方面,对于面源污染发生机制的参数化、模型参数的合理化与管理措施的模块化方面还有很多工作要做。

从技术层面来讲,过去十几年间,种植业、养殖业、农村生活源污染治理方面新技术的研发层出不穷。这些技术在源头减量、过程拦截、末端治理等各个环节均取得了较好的效果。然而,目前最好的技术还是不能达到农业绿色发展的指标^[29]。在实际生产实践中,这些产品技术零散,集成整装度不足,导致全过程污染联控乏力。发展生态农业的关键是注重技术之间的优化配置,大幅推进集成技术。废弃物资源化利用技术是搭建种养桥梁,也是符合国家绿色发展背景的接口技术。但张福锁团队的研究结果表明,尽管现在畜禽粪便利用率已经达到70%,氮在全产业链循环率仍不足20%^[29]。因此,对于技术研发人员而言,设计因地制宜的技术组合或体

系,形成长效的农业清洁生产机制是一个亟需解决的问题;对于农业企业来说,则应当思考如何打通产业链的上下游,加快推进以用地养地结合、种植养殖结合为核心产业链建设。

中国农业面源污染治理在管理层面上的问题更为突出。1)中国耕地与畜牧业分布范围广,农村生活源分散,污染治理技术是否实用与可操作,其可推广性是推广人员面临的难题。2)技术的广泛应用需要被农民真正地认可,对经营体制、生态补偿等相关政策的研究,是从事技术研究、管理研究者必须要关注的^[30]。3)中国的水污染重点流域往往存在点源与面源污染交叠,来源复杂且分布范围广的特点。以往的农业面源污染防治方案多针对农田或养殖场单方面为对象提出,二者的区域界限不易打通。这是因为政策管理是从行政区域角度出发的,大多数情况下农田与养殖场是不同责任主体,两者关联性较差。但依靠单一源头治理、“治点、治线、不治面”的模式,达不到整体优化的效果,亟需以生态循环为基本思路,设计可落地的、基于政策支撑的清洁化全域式综合统筹规划和整体实施方案。

从运维机制上来讲,当前废弃物的资源化利用缺乏经济可行的产业化发展模式与内在推手。虽然早已认识到养殖业、农村生活源废弃物的资源化利用是农业面源污染治理的关键接口技术。然而,废弃物的资源化利用在客观上不容易实现。国内众多小型养殖场缺乏高效的污水处理设备或没有足够规模的农田进行污水消纳;农村厕所位置非常分散,粪污废弃物收集与清运难,无害化资源化处理措施短缺。在这种条件下,废弃物的良性循环想要长效运维需要经济可行的“内动力”,而农民显然无法担当这一角色。废弃物资源化到底应该走怎样的路子,由谁来主导,谁来推动,怎么执行无明确方向。

2 新时期农业面源污染治理的技术路径和运维机制

2.1 “全域式”流域管理和治理模式应是农业面源污染治理的核心

以流域水质提升管理技术体系及评价指标系统为导向,按照清洁生产、种养平衡、生态联控、区域统筹有机结合的技术思路,从农田-养殖-农村污染控制-退水沟渠与河岸带结构与功能优化等层面进行系统控制,通过农业面源污染控制关键技术集成和示范应用,构建主要污染源空间全覆盖、“源头消减、过程控制、末端处理”等关键节点全过程的流域农业面源污染控制技术模式。实现传统集约化粮食主产区“资源-产品-废物排放”的线性生产模式向流域化、循环化、效益化和多维度、多梯级的点、线、面、体相结合的方向转变(图2)。

2.2 构建生态循环产业链是农业面源污染治理的基本技术路径

农业集约化发展的30多年已经将中国几千年来建立的种养循环模式打破,重建种养循环关系是解决农业面源污染问题的关键^[31-36]。通过模型预测,从饲料到动物养殖、废弃物循环,再到环境排放,如果能够实现全过

程的种养结合,就可减少64%的氮投入,也能够让氮的利用率提高将近2倍^[29]。这种模式需要以企业为主体,需要重建产业上下游关系,强力整合“种植-饲料-养殖-食品加工-种植”的循环产业链,将养殖废弃物无害化、资源化以后回用于农田。在物质、能量和产业链的层面建立起3个闭环,实现流域生态系统中物质多次、多级、多梯度的生态化循环利用,使农业生产系统对环境的废物释放最少化,从而解决集约化种植、规模化养殖、村镇粪污对环境造成的压力,为长期有效控制农业面源污染提供保障^[37-38]。

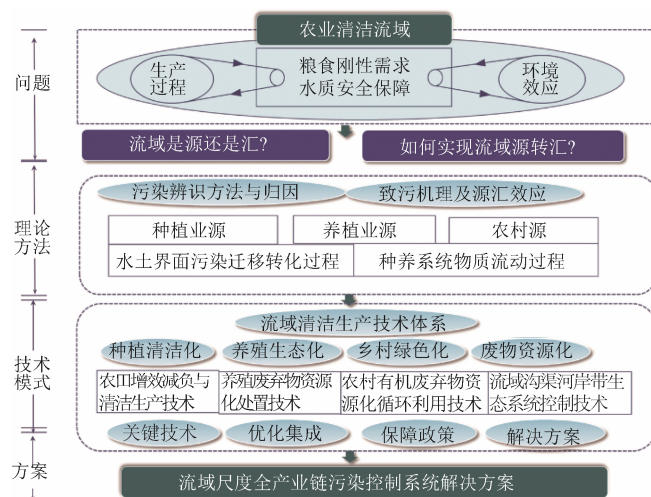


图2 农业清洁流域构建思路

Fig.2 Thought to construct agricultural clean watershed

2.3 发挥农民与农业企业主力军作用是打赢农业面源污染攻坚战的关键环节

如何发挥长效机制是农业面源污染治理的突出难题。农业面源污染治理如果不与市场接轨,不靠市场的力量来推动,难以长期持续发挥效益。从历史和当下中国流域面源污染的需求来看,在未来一个较长的时期内,农民与农业企业是解决农业面源污染治理的主力军。区域农业面源污染治理应与地方产业发展紧密结合,鼓励企业与科研院所联合开展技术攻关,发挥龙头企业在面源污染治理中的产业化工程化优势和主力军作用。对于农民来讲,应更好地发挥他们的“主体”作用,通过不定期对其提供适当的理论技术培训,改变其落后的环保观念、提高技术含金量^[30]。

2.4 现代化农业农村面源污染治理体系是污染治理的重要保障

目前,中国农业农村面源污染治理取得了积极成效和进展。但是现阶段,中国相当一部分地区面源污染依然严峻、农村环境依然较差,这与全面建成小康社会的目标要求差距较大。时隔15a,习总书记2020年到浙江安吉县余村考察,指出“全面建设社会主义现代化国家,既包括城市现代化,也包括农业农村现代化。”大力研发可工程化的技术,激励群众广泛参与政策制定,从治理多元主体结构、法律法规与政策体系、监管体系、技术体系、绩效评价体系等多维度加快农业农村面源污染治理体系现代化建设是未来农业面源污染治理的方向。

3 农业面源污染治理的实践

山东省滨州市是全国的商品粮生产基地和重要优质生猪供应基地之一,2018 年农作物总产量达到 71.83 万吨,畜禽养殖量为 449 万头(猪当量)。起源于滨州市南海水利风景区的秦台河,是海河流域南部水系潮河的主要支流之一,自南向北流经滨州市滨城区汇入潮河,最终注入渤海,流域面积 87 km²,流域内水系主要为秦台河主干道、秦台水库、引黄灌渠和排水沟渠。秦台河流域存在种植、养殖和农村生活叠加污染的问题,加之种植业与畜牧业发展规模在空间上存在一定的错位,部分地区畜禽粪污量超过了农田承载力,外排的畜禽粪污对环境污染的风险较大,2006—2013 水质持续为劣 V 类。近年来,以达标排放为目标的单一源头面源污染治理,达不到根治粮食主产区农业面源污染的效果。针对以上问题,在国家水体污染控制与治理重大专项支持下,中国农业科学院农业清洁流域创新团队在区域统筹管理、多元主体共治、长效运维机制层面进行了探索,摸索建立了以政府企业“双轮驱动”、科研机构“保驾护航”的废弃物资源化良性循环路径,形成了以污染治理与产业发展紧密结合的农业面源污染控制模式,为同类河流治理提供了“滨州模式”(图 3)。

在政策方面,地方政府加强对农业农村环境污染治理的指导以及政策扶持力度。2018 年,滨州市人民政府下发了《滨州市打好农业农村污染治理攻坚战 2018—2020 年作战方案(试行)》,实施化肥减量增效工程、有机肥增施替代工程、农业生产废弃物资源化提升工程、规模化畜禽养殖污染防治工程、农村生活污水治理工程,完善城乡环卫一体化工程,实施小流域生态清洁工程等。在保障措施上,落实整县(区)推进农业有机废弃物资源化利用“以奖代补”政策、规模化有机肥生产企业按规定享受税收减免优惠政策等。同时,推动基层政府通过承包、采购等方式向社会购买垃圾收运处理、污水处理、河道管护等公共服务。

在技术支撑与成果转化方面,解决小麦加工、畜禽养殖等过程中产生的废料是农牧企业推动农业面源污染治理的初动力。科研院所作为主体,结合地方需求和农业产业转型升级需求进行技术难点的攻关,协同推进农业科技创新和成果转化应用。在揭示典型农田氮磷流失特征和作物需肥规律的基础上,研究突破了基于耕层土壤水库及养分库扩蓄增容基础上的农田增效减负技术、多水源灌溉条件下的农田节水控肥抑盐增效减负一体的调控技术,并以关键技术为核心构建了“全链条”农田增效减负与清洁生产技术体系,围绕“全周期”、“全要素”和“全过程”就整个农业生产进行调控。针对滨州当地猪场粪污处理利用中存在的沼气发酵冬季产气效率低、沼液完全利用难、达标处理费用高等问题,通过结合产业链上下游,引入酒糟废液与猪粪共发酵,形成了养殖废弃物“沼气-生物肥-青饲料”混合多级综合利用技术体系。针对农村厕所位置分散,缺少收集设施,已收集粪污缺乏配套的资源化处理技术等面源污染问题,研

发了以负压收集技术、污水源分离技术为支撑的农村节水无味生态公厕所源分离机资源化关键技术^[39]。

在长效运维机制方面,探索了农民与农牧企业为“内动力”的模式,推动废弃物资源化的良性循环路径,形成了污染治理与产业发展紧密结合的长效保障机制。以区域有机废弃物资源化利用为纽带,一方面,突破了种养一体化增效减负技术难关与产业链上下游,将小麦深加工产生的酒糟作为饲料主体,再配入麸皮、玉米面形成特有的液态蛋白饲料用于生猪养殖,引入酒糟废液与猪粪共发酵,养殖产生的粪便资源化和能源化利用,转化成沼气和生物质天然气,沼液作为有机肥回到种植基地。该模式构建的高效种植-生态养殖-废弃物资源化能源化利用生态循环产业链模式,实现了资源与能源在种植、养殖、农村生活 3 个部分的高效流动,完成了三者的零距离对接。另一方面,地方龙头企业发挥了在面源污染治理中产业化工程化的优势,通过政府购买服务,承担了农村厕所的粪便专业化收运,连同散养户的粪污资源,与企业已有的养殖废弃物和作物秸秆协同处理,将农业有机废弃物资源化融入到强筋优质小麦清洁种植、无抗生态养殖两大主导产业,推动农业农村环境污染治理和农业现代化转型升级的紧密结合。

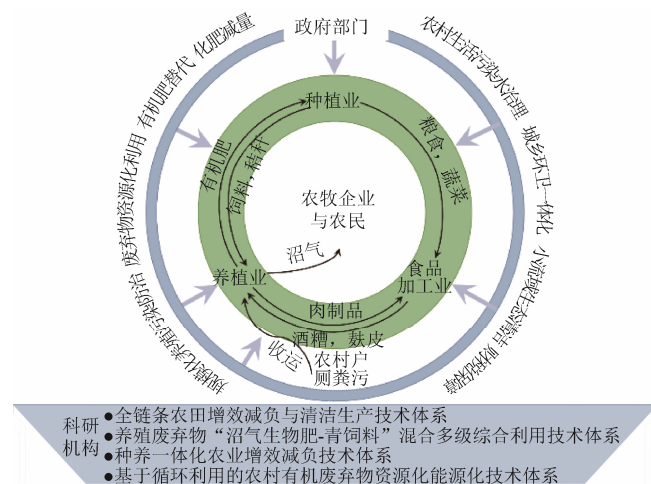


图3 “滨州模式”总体思路

Fig.3 Thinking of “Binzhou pattern”

通过建设山东省滨州市滨城区年产 720 万 m³ 生物天然气工程建设项目,项目形成年处理秸秆 2.38 万 t、畜禽粪污 30.6 万 t,年产沼气 720 万 m³、沼渣液 48 万 t 的产业化生产能力,同时滨州市滨城区 9 个乡镇 418 个行政村的厕所粪尿也得到了资源化利用。有机肥替代节省了种植环节的肥料投入,实现了地力的提升与粮食增产,综合计算可实现增收 2 400 元/hm²。与 2014 年相比,示范区入河水质 COD、氨氮、总磷污染物的削减率分别为 35.9%、33.3%和 31.2%。良好的经济与环境效应使得政府、企业、农民和科研单位均成为了受益主体,确保整个面源污染治理模式高效、协同、通畅地运行。

4 结论与建议

中国的水体富营养化自 20 世纪 70 年代开始加剧。

过去 10 a 间, 中国农业面源污染治理虽取得一定成效, 但总体上看, 农业主要依靠资源消耗的粗放经营方式没有根本改变, 农业面源污染和生态退化的趋势尚未得到有效遏制, 绿色优质农产品和生态产品供给还不能满足人民群众日益增长的需求, 农业面源污染治理亟待转变治理思路, 剖析新的问题, 探索新的路子。结合国家农业绿色发展的重大需求, 本研究提出以“生态循环、流域统筹”为核心的农业面源污染治理思路, 以“种养结合、产业链循环”为核心的污染治理实现路径, 和以“农民和农业企业为主力军”的多元主体治理及运维机制。通过实例, 初步验证了该模式的可行性。

十四五期间, 农业面源污染应合政产学研企之力联合攻关。1) 深入理解界面尺度污染物迁移转化机制, 创新流域尺度污染物溯源与模拟方法, 研究基于不同流域分区分类的特点, 阐明种植业、养殖业和农村生活污水污染产生、排放系数及源强, 探明农业源污染物在土-水介质中的迁移转化规律和驱动机制。2) 加强农田“水土”和“根土”界面环境污染物迁移、转化分子机制及其微生物学过程的基础研究, 从环境功能微生物应用及作物吸收污染物分子调控角度开展绿色修复技术的研发与理论创新; 并针对典型区域污染特点与农业生产特色, 研发集成性和成熟度高的组合技术, 同时配合生态补偿手段。3) 从流域尺度进行全面统筹, 确定种植、养殖、水体等子系统的污染排放定额及在区域空间中的最佳配置, 形成种养结合型区域氮磷养分优化管理与控制模式。4) 发挥农民和农业企业主力军的作用, 靠市场力量推动区域农业面源污染治理, 集成兼顾流域生态和粮食安全的长效运维模式。

[参 考 文 献]

- [1] 王农, 刘宝存, 孙约兵. 我国农业生态环境领域突出问题与未来科技创新的思考[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 1-5.
Wang Nong, Liu Baocun, Sun Yuebing. Problems in the agricultural environment of China and innovation of future science and technology[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [2] Wang Xiaolong, Wu Xia, Yan Peng, et al. Integrated analysis on economic and environmental consequences of livestock husbandry on different scale in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 119: 1-12.
- [3] Zheng Li, Zhang Qingwen, Zhang Aiping, et al. Spatiotemporal characteristics of the bearing capacity of cropland based on manure nitrogen and phosphorus load in mainland China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233(10): 601-610.
- [4] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
Zhang Weili, Wu Shuxia, Ji Hongjie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1008-1017. (in Chinese with English abstract)
- [5] 国家统计局. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. 2010-02-11 [2020-07-08]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/201002/t20100211_30641.html
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. 2020-06-09 [2020-07-08]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html?from=timeline&isappinstalled=0
- [7] Bai Zhaohai, Ma Lin, Ma Wenqi, et al. Changes in phosphorus use and losses in the food chain of China during 1950-2010 and forecasts for 2030[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 104: 361-372.
- [8] 张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 783-796.
Zhang Junling, Zhang Jiangzhou, Shen Jianbo, et al. Soil Health and agriculture green development: Opportunities and challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 783-796. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhang Xin, Davidson A Eric, Mauzerall L Denise, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. Nature, 2015, 528(7580): 51-59.
- [10] Gao Shuoshuo, Xu Peng, Zhou Feng, et al. Quantifying nitrogen leaching response to fertilizer additions in China's cropland[J]. Environmental Pollution, 2016, 211: 241-251.
- [11] Hou Xikang, Zhan Xiaoying, Zhou Feng, et al. Detection and attribution of nitrogen runoff trend for China's croplands[J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 270-278.
- [12] Hua Lingling, Liu Jian, Zhai Limei, et al. Risks of phosphorus runoff losses from five Chinese paddy soils under conventional management practices[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 245: 112-123.
- [13] Vira Julius, Hess Peter, Melkonian Jeff, et al. An improved mechanistic model for ammonia volatilization in earth system models: flow of agricultural nitrogen, version 2 (FANv2)[J]. Geoscientific Model Development Discussions, 2019, 8: 1-49.
- [14] Xu Rongting, Tian Hanqing, Pan Shufen, et al. Global ammonia emissions from synthetic nitrogen fertilizer applications in agricultural systems: Empirical and process-based estimates and uncertainty[J]. Global Change Biology, 2019, 25(1): 314-326.
- [15] 郝晓地, 罗玉琪, 曹达殷, 等. 雾霾亦可诱发水体富营养化[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 12-21.
Hao Xiaodi, Luo Yuqi, Cao Dayin, et al. Induction of haze to eutrophication of surface water[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 12-21. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhan Xiaoying, Bo Yan, Zhou Feng, et al. Evidence for the importance of atmospheric nitrogen deposition to eutrophic Lake Dianchi, China[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51: 6699-6708.
- [17] FAOSTAT[EB/OL]. 2018-12-20 [2020-07-08]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/AG>

- fao.org/faostat/en/#data/QC
- [18] 中华人民共和国农业农村部. 关于推进农业废弃物资源化利用试点的方案[EB/OL]. 2016-08-11 [2020-07-08]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwl/m/zcfg/nybgz/201609/t20160919_5277846.htm
- [19] 王永生, 刘彦随, 龙花楼. 我国农村厕所改造的区域特征及路径探析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 553-560.
- Wang Yongsheng, Liu Yansui, Long Hualou. Regional characteristics and pathway optimization of China's rural toilet improvement[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(5): 553-560. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吕锡武. 可持续发展的分散式农村生活污水治理技术[J]. 民主与科学, 2018(5): 18-20.
- [21] 国家统计局. 第三次全国农业普查主要数据公报(第一号)[EB/OL]. 2017-12-14 [2020-07-08]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/nypcgb/qgnypcgb/201712/t20171214_1562740.html
- [22] 新华网: 农村卫生厕所普及率超过 60%[EB/OL]. 2019-12-26 [2020-07-08]. http://www.xinhuanet.com/2019-12/26/c_1210412030.htm
- [23] 吴永红, 胡正义, 杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R)理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 1-6.
- Wu Yonghong, Hu Zhengyi, Yang Linzhang et al. Strategies for controlling agricultural non-point source pollution: Reduce-retain-restoration (3R) theory and its practice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [24] 汤秋香, 刘宏斌, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区环境友好型种植模式筛选[J]. 中国农业科学, 2012, 45(12): 2375-2383.
- Tang Qiuxiang, Liu Hongbin, Lei Baokun, et al. Screening of environment-friendly cropping mode in the northern region of Erhai Lake[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2012, 45(12): 2375-2383. (in Chinese with English abstract)
- [25] 耿润哲, 王晓燕, 庞树江, 等. 潮河流域非点源污染控制关键因子识别及分区[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1258-1267.
- Geng Runzhe, Wang Xiaoyan, Pang Shujiang, et al. Identification of key factors and zonation for nonpoint source pollution control in Chaohe river watershed[J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1258-1267. (in Chinese with English abstract)
- [26] Wang Jinliang, Ni Jiupai, Chen Chenglong, et al. Source-sink landscape spatial characteristics and effect on non-point source pollution in a small catchment of the Three Gorge Reservoir Region[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(2): 327-339.
- [27] Chen Linlin, Shao Junjie, Chen Hui, et al. Cathode potential regulation in a coupled bioelectrode-anaerobic sludge system for effective dechlorination of 2, 4-dichloronitrobenzene[J]. Bioresource Technology, 2018, 254: 180-186.
- [28] 欧阳威, 鞠欣妍, 高翔, 等. 考虑面源污染的农业开发流域生态安全评价研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1194-1200.
- Ouyang Wei, Ju Xinyan, Gao Xiang, et al. Ecological security assessment of agricultural development watershed considering non-point source pollution[J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1194-1200. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张福锁. 农业越“绿”, 小康越近[N]. 中国科学报, 2020-06-22.
- [30] 杨林章. 我国农田面源污染治理的思路与技术[J]. 民主与科学, 2018(5): 16-18.
- [31] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 281-296.
- Ju Xiaotang, Gu Baojing. Indexes of nitrogen management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 281-296. (in Chinese with English abstract)
- [32] Zhang Chuazhen, Liu Shen, Wu Shuxia, et al. Rebuilding the linkage between livestock and cropland to mitigate agricultural pollution in China[J]. Resources Conservation and Recycling, 2019, 144: 65-73.
- [33] Carrer Marcelo Jose, Maia Alexander Gori, de Mello Brandão Vinholi M, et al. Assessing the effectiveness of rural credit policy on the adoption of integrated crop-livestock systems in Brazil[J]. Land Use Policy, 2020, 92: 104468.
- [34] Moraes Anibal, Carvalho Paulo C Faccio, Anghinoni Ibanor, et al. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 57: 4-9.
- [35] Pérez-Gutiérrez Juan D, Kumar Sandeep. Simulating the influence of integrated crop-livestock systems on water yield at watershed scale[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239: 385-394.
- [36] Garrett R D, Niles M T, Gil J D B, et al. Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems: Current knowledge and remaining uncertainty[J]. Agricultural Systems, 2017, 155: 136-146.
- [37] Oenema Oene. Toward agriculture green development[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2020, 7(1): 110-111.
- [38] 隋斌, 董姗姗, 孟海波, 等. 农业工程科技创新推进农业绿色发展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 1-6.
- Sui Bin, Dong Shanshan, Meng Haibo, et al. Innovation in agricultural engineering and technology to accelerate green development of agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(2): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王远华. 中裕公司玩转全产业链[J]. 农经, 2016, 296(1): 79-82.

Controlling agricultural non-point source pollution: Thinking and practice in the era of agricultural green high-quality development

Zhan Xiaoying, Zhang Aiping, Zhang Qingwen^{*}

(1. *Agricultural Clean Watershed Research Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *Key Laboratory of Agricultural Environment of Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*)

Abstract: Agriculture is the cornerstone of economic development in China to serve a solid foundation for food security over the last three decades. However, the rapid increases in crop and animal production have caused serious non-point pollution, while farmers have received limited benefits, where the countryside and natural habitats have been insufficiently protected. Since great contributions have been made to mitigate the pollution over past decades, the pollution induced by agriculture are still great challenge. Since 2018, the rural revitalization led by the construction of ecological civilization marks the beginning of a new era in the treatment of agricultural non-point source pollution with higher requirements. In this study, an attempt was made on the shortage, and challenges of agricultural non-point source pollution control in modern agriculture. Currently, a systematical investigation is still lacking, particularly on the occurrence mechanism of environmental pollutants at the interface, microorganism and molecular scale. In the phase of pollutant migration, transformation and absorption, there is a lack of accurate traceability technology. In the aspect of model simulation, the parametrization of non-point source pollution mechanism, rationalization of model parameters and modularization of management measures need to be strengthened. In terms of technology, the traditional mode of relying on single source governance that "fixes the point and the line but not the watershed" cannot achieve the effect of overall optimization. This study focused on the major existing challenges of agro-ecological environment in China, further to propose that ecological cycle of agricultural industries practicing with a watershed orientation. The watershed management can be the core of agricultural non-point source pollution control. The traditional linear production mode of "resources-product-waste discharge" in the main grain production areas can be transformed into the combination of multi-dimensional and multi-levels of watershed, recycling, and benefit-oriented. Excessive nitrogen and phosphorus from manure can contribute to substantial damage and costs to the environment and human health. Meanwhile, animal manure is the major source of additional nutrients and crucial for maintaining soil organic matter and crop yield in traditional farming systems. The integration of cropping and livestock with cycling industrial chain can be considered as a key technology to control agricultural non-point source pollution. A better understanding the non-point pollution is necessary to take the lead in modern agricultural operations. Substantial promotion of agricultural non-point source pollution control depends mainly on a multi-dimensional governance participation, a sound system of laws, regulations and policies, strong regulatory system, scientific and technological system, and effective performance evaluation system. The involvement of farmers and agricultural entrepreneurs in pollution control action is a systematic maintenance to ensure the full control of agricultural non-point source pollution. Two ways can be: 1) Working directly with transferring knowledge to farmers through organized farmer cooperatives; and 2) enterprise-based approaches embodying relevant scientific results into commercial products. The theory has been testified with the typical example of agricultural non-point source pollution control in Qintaihe watershed of Binzhou, Shandong Province. An ecological recycling industrial chain of cropping and breeding has been built in Binzhou. A recycling path of waste recycling was explored with "double wheel drive" of government enterprises and "escort" of scientific research institutions. Local leading enterprises have played an important role with the advantages of industrial techniques for non-point source pollution control, integrating the recycling of agricultural organic waste into the clean planting of high-quality wheat planting and ecological pig breeding, and further to bridge the gap of agricultural pollution control and development of agricultural modernization industry. The finding can provide a valuable guidance for the construction of ecological and environmental system for the agricultural practices in the new era of China.

Keywords: agriculture; mechanisms; non-point source pollution; watershed-oriented planning; integration of cropping and livestock; ecological cycle; pluralist governance; long-acting operation and maintenance