

农业面源和重金属专项实施进展与主要成效

熊炜, 社会英, 徐长春, 郑戈

引用本文:

熊炜, 社会英, 徐长春, 等. 农业面源和重金属专项实施进展与主要成效[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2105–2113.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1098>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

"农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发"专项组织实施进展分析

徐长春, 熊炜, 郑戈, 林友华

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1242–1246 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0337>

"十三五"国家重点研发计划农田镉砷污染防治领域资助情况概述

徐长春, 郑戈, 林友华

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1321–1325 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0298>

《农业环境科学学报》2019年刊出论文简评

蔡祖聪

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 1–4 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0049>

我国复合污染土壤修复研究进展

吴志能, 谢苗苗, 王莹莹

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2250–2259 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0863>

稻田重金属污染修复治理技术及效果文献计量分析

杜志鹏, 苏德纯

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2409–2417 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1128>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

熊炜, 杜会英, 徐长春, 等. 农业面源和重金属专项实施进展与主要成效[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2105–2113.

XIONG Wei, DU Hui-ying, XU Chang-chun, et al. Progress in the implementation of Research and Development of Comprehensive Prevention and Remediation Technology for Farmland Contaminated by Agricultural Non-point Source Pollutants and Heavy Metals: A summary of the main achievements[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2105–2113.



开放科学 OSID

农业面源和重金属专项实施进展与主要成效

熊炜¹, 杜会英², 徐长春¹, 郑戈^{1*}

(1. 农业农村部科技发展中心, 北京 100122; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:为有效解决农业面源和重金属污染农田治理修复、安全利用等问题,“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”重点专项围绕主要任务目标,初步实现两个大理论突破,建立了五大示范区,有效提升了科技创新度、产业关联度和贡献度,在基础研究、关键共性技术、推广示范领域取得了突出的成效。文章全面总结了专项实施以来取得的进展及主要成效,以期为未来发展提供支撑和参考。

关键词:农业面源; 重金属; 防治; 修复; 重点专项; 进展; 成效

中图分类号: X71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2020)10-2105-09 **doi:** 10.11654/jaes.2020-1098

Progress in the implementation of Research and Development of Comprehensive Prevention and Remediation Technology for Farmland Contaminated by Agricultural Non-point Source Pollutants and Heavy Metals: A summary of the main achievements

XIONG Wei¹, DU Hui-ying², XU Chang-chun¹, ZHENG Ge^{1*}

(1. Development Center for Science and Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100122, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: To effectively solve the agricultural non-point source and heavy metal pollution of farmland repair, safe use, and other issues, two major theories have been developed and five demonstration zones have been established. With a focus on the main tasks and objectives, these theories have effectively enhanced the scientific and technological innovation, industrial connection, and contribution. In basic research, key generic technology has achieved outstanding results and promoted the demonstration areas. This paper comprehensively summarizes the main achievements since the implementation of the special project, objectively analyzes the main problems, and proposes some suggestions and improvement measures to provide support and reference for future development.

Keywords: agricultural non-point source; heavy metal; prevention; remediation; key program; progress; main achievement

“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”重点专项在科技部统一领导下,在农业农村部、生态环境部、教育部、自然资源部、中国科学院等相关部委的大力支持下,以问题和任务目标为导向,紧密围绕国家和产业发展的重大需求,以我国农业面源污染高发区和重金属污染典型区为重点,以农田面

源污染物和重金属溯源、迁移和转化机制、污染负荷及其与区域环境质量及农产品质量关系等理论创新为驱动力,经过5年的努力,基本突破氮磷、有毒有害化学/生物、重金属、农业有机废弃物等农田污染物全方位防治与修复关键技术瓶颈,提升了我国面源和重金属领域装备和产品的标准化、产业化水平。

收稿日期: 2020-09-21 录用日期: 2020-10-08

作者简介: 熊炜(1969—),男,北京人,主要从事科技项目管理与研究。E-mail: xiongwei@agri.gov.cn

*通信作者: 郑戈 E-mail: zhengge@agri.gov.cn

基金项目: 国家重点研发计划专项

Project supported: National Key R&D Program of China

1 总体情况

专项按照基础研究、共性关键技术和技术集成示范的全产业链3个层次,设置了35个项目,其中基础研究设置7个项目,共性关键技术研发设置15个项目,技术集成应用示范设置13个项目。专项总体实施周期为2016年1月1日至2020年12月31日,预算总额6.23亿元。从年度立项情况来看(表1、图1),2016年立项11项,涉及基础研究4项,共性关键技术研究类5项,集成示范类2项;2017年立项15项,涉及

基础研究3项,共性关键技术研究类9项,集成示范类3项;2018年立项9项,涉及共性关键技术研究类1项,集成示范类8项。专项经费情况见表1、图2和图3。目前各项工作正在顺利实施中。

专项共由26个单位牵头承担,全部为大专院校和科研院所,其中:大专院校8个,占单位总数的30.8%,承担了10个项目,占项目总数的28.6%;科研院所18个,占单位总数的69.2%,承担了25个项目,占项目总数的71.4%。

从地域分布看,35个项目分布在12个省份,其

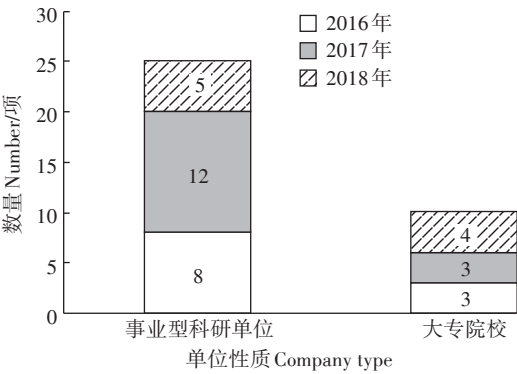


图1 2016—2018年立项项目数

Figure 1 The number of projects approved from 2016 to 2018

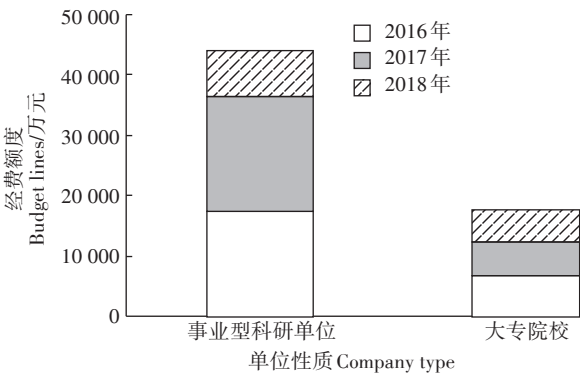


图2 2016—2018年立项项目经费数

Figure 2 Project funding from 2016 to 2018

表1 立项数量和经费数量统计

Table 1 Statistics on the number of projects approved and the amount of funds

立项年度 Year	立项数量 Number of projects approved/个				国拨经费 Amount of funds/万元			
	基础研究	共性关键技术	集成示范	合计	基础研究	共性关键技术	集成示范	合计
2016	4	5	2	11	10 654	9 592	3 836	24 082
2017	3	9	3	15	6 476	14 186	4 002	24 664
2018	0	1	8	9	0	1 783	10 937	12 720

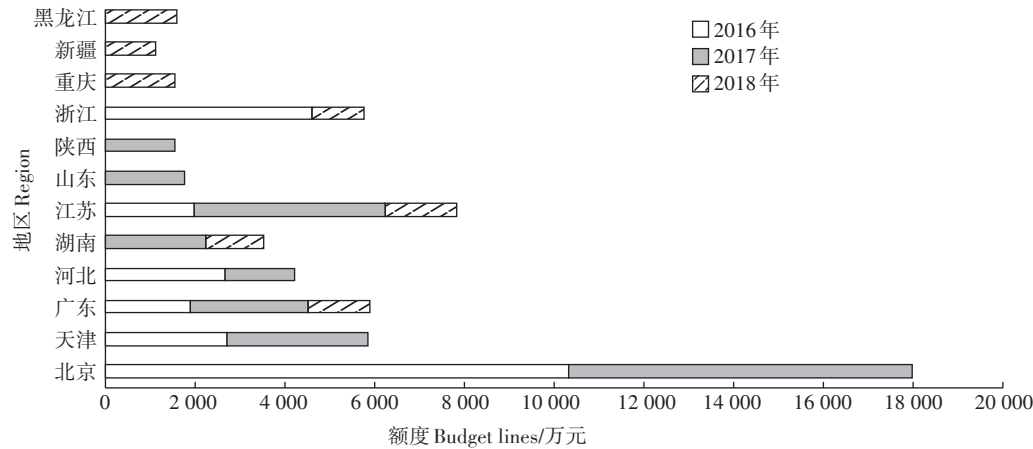


图3 2016—2018年不同地区项目经费数

Figure 3 The amount of project funds in different regions from 2016 to 2018

中:北京10个,天津5个,江苏和广东各4个,浙江3个,河北和湖南各2个,黑龙江、新疆、重庆、陕西、山东各为1个。从项目数量和获批经费金额来看,北京获得的经费也最多,其次是天津、江苏和浙江。

专项有2150人参加(图4),其中正高级职称493人,副高级职称610人;博士1162人。

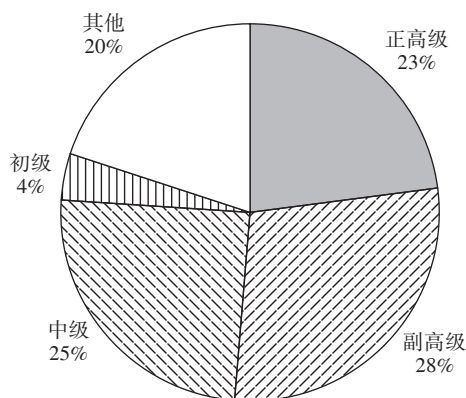


图4 2016—2018年项目人员职称情况

Figure 4 Title status of project personnel from 2016 to 2018

2 进展和主要成效

与“十二五”末期国内本领域研发水平相比,专项在基础研究、关键共性技术研发和集成示范等方面取得了显著成效,部分领域有突破性进展,已经形成近50项标志性成果,获得省(部)及国家奖励近30项。

2.1 基础理论研究领域

基础理论研究领域产生了一批重要理论创新,有效支撑了共性技术研发和集成示范建设。专项共产生重要理论创新超过20项。首次识别了我国稻田氮磷流失空间格局和稻田氮磷“源汇”功能,构建出不同水稻主产区流域尺度氮磷流失污染风险评估体系。明确了氮、磷在土壤中的运移淋失控制机制,提出了基于全国尺度的硝酸盐脆弱区农牧业硝酸盐淋失消减措施;构建区域尺度农田与农产品重金属污染源解析方法,阐明了复合污染重金属在土壤界面的分子作用,以及农田重金属迁转与农产品质量关系的机理机制。自主建立了有毒有害化学污染物同位素标记合成方法,以及去除和调控农田典型有机污染物的方法原理^[1]。

2.1.1 农田氮磷污染负荷与区域环境质量关系的机理机制

初步明确了氮、磷在土壤中的运移淋失控制机制,构建了包含大孔隙优先流和磷素迁移化过程的土

壤水热碳氮磷动态模拟软件(WHCNSP)V1.0,建立了基于物联网的地表水和地下水水量水质自动监测平台,提出了基于我国硝酸盐脆弱区农业和畜牧业硝酸盐淋失的消减措施;评估了稻田控水减排措施对水稻生长及稻田氮磷流失的影响,系统分析了典型种植模式下稻田氮磷流失特征,识别了氮磷流失关键风险期,构建了不同水稻主产区流域尺度氮磷流失污染风险评估体系,多时空尺度阐明了径流氮磷流失的变化规律、驱动因素及主控因子;初步明确了农业废弃物好氧转化碳氮磷硫转化、损失规律及损失驱动因子,初步阐明了农业废弃物好氧生物转化过程中腐殖质的化学组成与动态变化规律等。

2.1.2 农田重金属污染迁转与农产品质量关系的机理机制

构建区域尺度农田与农产品重金属污染源解析方法,初步建立了土壤作物系统重金属源汇耦合机理与多尺度模型,不同镉、铅、汞作物吸收预测模型,土壤镉、铅、汞生物有效性预测模型,土壤砷、铬生物有效性预测模型,流域尺度重金属通量估算模型;初步阐明了重金属吸附的微界面模型与机制,明确了土壤-水微界面体系下砷的吸附机制以及pH、磷酸根和有机质等的影响以及共存离子和有机质的影响;阐明复合污染重金属在土壤界面的分子作用机制、农田土壤-植物体系中形态分配与竞争机制,探索不同重金属污染程度的农田土壤微生物群落结构变化与农田土壤质量和健康的内在关系,揭示不同类型地质高背景地区农田土壤重金属生物有效性规律等。

2.1.3 化学污染物的同位素标记合成方法及监测标准研制

该成果攻克了高比活度同位素标记农药合成中的技术瓶颈,于国际上首次建立安全高效的放射性标记毒死蜱非氯气取代微量合成方法,在国内首次自主合成了高比活度¹⁴C-毒死蜱;同时优化了¹⁴C-磺胺嘧啶和¹⁴C-磺胺甲恶唑的微量合成方法,开创了苯环标记的¹⁴C-乙酰化磺胺嘧啶全新微量合成方法,有效地提高了合成产率,获得了高比活度的¹⁴C-磺胺嘧啶标记化合物,并摸索出全新的¹⁴C-乙酰化磺胺嘧啶(VI)的合成方法,使我国在该领域达到了国际先进水平,有效解决了该领域关键技术和卡脖子的难题,也有效促进了化学与生物合成技术、化学检测、同位素示踪等技术以及环境化学、环境科学、农药学等相关领域科学、技术进步和科技创新整体水平提升。

该成果从质量平衡角度溯源追踪有毒有害化学

污染物在环境介质中的迁移转化、残留代谢,尤其是为结合残留定量表征等相关研究奠定了基础,明确了典型酞酸酯类物质在东北和黄淮海地区的污染特性和分布规律,建立了所有类固醇激素的高效定量检测方法,构建了典型种植制度下农田污染因子监测与评估指标体系,为我国污染土壤的风险识别与预测、污染物的临界负荷探究等提供有效的标准和依据。

2.1.4 基于生源要素氧化还原耦合的污染消减调控原理与方法创新

该成果基于微生物代谢过程干预的调控思路,在强化稻田有机氯农药污染消减方面初步阐明了可通过外源添加电子供体促进有机氯农药的还原脱氯降解,且可同时非选择性促进温室气体甲烷的产生,证明乙酸钠是调控有机氯污染消减与稻田土壤自然氧化还原过程间相互作用的最佳电子供体。初步阐明了稻田中存在的选择性电子受体会显著影响残留有机氯农药的还原脱氯消减过程。通过外源调控手段干预土壤中选择性电子受体的还原过程可有效促进有机氯农药的污染消减,阐明了生物质炭作为一种电子穿梭体通过对电子分配和电子传递流向的影响,调控土壤中有机氯农药脱氯降解与土壤本底还原过程间的耦合关系。

2.1.5 包气带生物反硝化脱氮阻控机制

该成果明确了反硝化功能微生物的优势菌群,揭示了厚包气带土壤全剖面生物反硝化脱氮的修复阻控机制,以及添加碳源对土壤反硝化脱氮的影响机制,构建了基于大孔隙优先流和磷素迁移转化过程的土壤水热碳氮磷动态模拟软件(WHCNSP)V1.0,确定了环境因素中对厚包气带氮磷淋失的关键限制因素,为“根层截氮包气带脱氮”的阻控机理找到了突破口,有效解决了该领域关键技术和卡脖子的问题。初步划分了我国氮磷生态脆弱区和潜在脆弱区。促进了土壤淋溶、地下水质量与安全、农业面源污染综合防治等相关领域科学、技术进步和科技创新整体水平提升,对推动土壤环境科学、农产品质量安全、全球碳氮循环等学科领域发展起到了积极作用,提升了整体创新水平和能力,具有广阔的应用前景。

2.1.6 我国氮磷生态脆弱区和潜在脆弱区划分机制与应用

该成果针对我国农田系统区域尺度氮磷淋溶损失时空变化规律和防控机制研究的不足,项目研究团队应用NUFER模型,并与建立的地下水硝酸盐监测网监测数据、环境公报发布的水质数据、分县农业统

计资料和土壤地质信息等数据结合,定量了我国县域尺度农牧系统氮磷养分环境排放的历史变化和热点区域,初步划分了我国氮磷生态脆弱区和潜在脆弱区。首次划定了我国氮磷生态脆弱区,并拟建立针对氮磷脆弱区的养分优化管理和面源污染防控方案,有望形成基于“国家脆弱区划定-流域阈值卡口-县域总量控制-农户精准实施”的氮磷面源污染多尺度管控机制。该研究初步划定了我国农业源氮磷生态脆弱区并构建了评估体系,为进一步提出面源污染区域阻控和流域治理策略提供了科学依据,更为推进化肥减施、有机肥替代、畜禽粪尿资源化、面源污染阻控和农业绿色发展等国家重大行动提供了抓手。

2.1.7 农田氮磷流失预测模型构建

该成果在WNMM(Water and Nutrients Management Model)模型模拟农田氮磷纵向淋溶流失的基础上,开发了农田氮磷的径流流失估算和融入生源要素生态化学计量学影响的土壤有机质分解的新计算方法,即WNMM_CNPloss模型。采用WNMM_CNPloss模型模拟了长沙县金井镇低岗梯田和冲底不同农艺措施下双季稻田农田氮磷流失过程,研究结果表明WNMM_CNPloss能较好地模拟稻田氮磷流失事件和强度。

2.1.8 生理生态过程的稻田氮磷流失机理模型与应用

该成果以陆面模式ORCHIDEE-CROP为平台,利用基于水肥运移过程梯级观测网络数据,提出了基于三基点的光合作用温度响应方程和氮磷限制下光合产物分配模式,实现了中国稻田作物生长模块的改良和优化。提出基于多叉树递归遍历搜索算法的田-沟-塘汇流演算算法,解决了从稻田到沟渠和周边水体的氮磷水污染风险分析。改进了基于物理的溶质运移,体现“水-土”界面氮磷释放作用的径流方程。改进了淋溶方程、Jayaweera-Mikkelsen氨挥发、反硝化的地带性响应模式的稻田氮循环模块。构建了基于粒子滤波的ORCHIDEE-CROP参数最优系统,提高了3种植植制度稻田水量平衡、作物生长与光合产物分配、氮磷流失与淋溶的模拟精度,明确了3种植植制度的主要模型参数。

2.1.9 好氧堆肥腐殖化过程的微生物学驱动机制

该成果发现好氧堆肥过程中强化纤维素和木质素的降解可以促进腐殖质形成,并证实堆肥二次发酵过程中腐植酸合成因子是堆肥腐殖化进程的重要作用因子。发现在堆肥降温期接种*P. chrysosporium*提高木质素过氧化物酶(Lip)、锰过氧化物酶(Mnp)活

性,进一步强化堆肥二次发酵过程中纤维素和木质素的降解,可以促进堆肥腐殖化过程,而漆酶(Lac)活性可能主导了堆肥二次发酵过程中腐植酸的合成过程。项目首次将堆肥腐殖化过程与微生物群落偶联,发现平革菌属(*Phanerochaete*)、鬼伞属(*Coprinopsis*)和踝节菌属(*Talaromyces*)可能是堆肥后期腐殖质合成的重要驱动微生物。

2.1.10 土壤镉、铅、汞生物有效性回归模型

该成果基于全国21种不同类型土壤开展作物盆栽试验,建立Pearson相关性分析-多元逐步回归分析(共线性诊断)-模型标准化-计算模型因子贡献率的处理流程,明确了控制土壤重金属生物有效性的主控因子,在此基础上构建了基于辣椒和小麦可食部位重金属累积的土壤镉、铅、汞生物有效性回归模型,可用于解释和预测植物果实部累积情况以及与土壤理化性质之间的关系。田间验证结果显示模型对拟合数据范围内的样本预测效果良好。

2.1.11 土壤重金属农产品质量和生态安全阈值预测模型

该成果构建了土壤中外源锌的老化半机理模型(Sqrt-模型和Erfc-模型)。建立外源全量锌的生态阈值预测模型;利用余差互补函数,建立通过土壤性质(土壤pH、老化时间、土壤有机质)和温度同时预测铜的短期和长期老化过程的新老化模型,并建立基于土壤浸提态铜的生态阈值预测模型。

2.1.12 农用地重金属安全阈值研究方法与应用

该成果对农田系统重金属迁移转化和安全阈值研究中系统性、定量化,以及与技术和管理有效融合不足等问题,以“含量/形态、过程、效应、风险、模型、阈值”为主线,系统地开展了重金属在典型农田土壤固相-溶液-生物-评估终点(农产品和生态安全)全过程的迁移转化、量化模型和评估方法研究,确定基于农产品安全和生态安全的土壤重金属安全阈值。建立了土壤重金属农产品和生态风险的安全阈值模型和方法,提高其确定性和适用性,在保障农产品质量安全、指导农田重金属污染预测防治等方面具有广阔的应用前景。

2.2 共性关键技术领域

关键共性技术研发呈体系化、深度化发展,形成了技术-产品(材料、设备)的创新链和产业链。专项共研发出农业面源与重金属污染综合防控与修复新工艺、新技术、新方法近180套,新产品、新装置超过130个。形成的中国稻田氮磷流失综合防控技术体

系等覆盖大范围的技术体系和关键技术装备,核心示范区负荷消减30%以上。高效镉砷同步钝化技术体系及新型材料,已成为我国农田重金属污染治理的主推技术之一。农业废弃物和养殖粪污系列自动化处理装备,达到了德国巴库斯等国际先进设备水平,显著推进了国内相关领域的大规模工程应用。研发的秸秆处理与施肥或地膜收获等多种农艺措施结合的多功能农业机械和配套技术,有力配合了各地秸秆、地膜等废弃物处理工作。农田污染天地一体化动态监测网络构建技术,突破了快速检测、遥感识别和地面监测网络优化等关键难题,为建立我国农田污染自动化检测监测体系打下了基础。

2.2.1 长江上游坡地氮磷径流迁移的生态沟渠拦截技术

该成果针对不同区域的生态沟渠消减技术集成不同的技术模式。其生态渠系主要技术模式为“农渠为主,斗渠汇合”。技术模式主要是指农渠作为生态渠系截污净化的核心,辅以斗渠生态恢复,支渠或干渠作为生态渠系截污净化的补充,构建此区域农田生态渠系的主要模式。

2.2.2 基于低积累作物的污染耕地安全利用技术

该成果首次发现了参与镉转运的超家族转运蛋白OsCd1基因,创新性提出了基于表型筛选和分子标记相结合的低积累作物品种筛选技术体系,以及镉、砷超富集植物优良生态型评价指标体系,建立了低积累作物和超富集植物间套作模式,并开展多地多点田间应用示范。初步建立低累积水稻品种评比方法体系,形成基于低积累作物的污染耕地安全利用技术模式,为我国中低污染耕地的安全利用提供了实用性解决方案。该成果促进了农产品质量检测与监测、作物育种与环境效应等相关领域科学、技术进步和科技创新整体水平提升。

2.2.3 低积累作物-超富集作物间套作高产高效修复模式集成

该成果以筛选出适合南方和北方地区镉、砷污染的水稻、玉米等低积累作物品种和适合于间套作的优良生态型超富集植物为研究目的,通过对低积累作物和超富集植物间套作复合体系的时空配置优化与调控技术优化,构建形成适用于我国南北方多类型镉砷污染旱地、稻田的低积累作物-超富集作物间套作等高产高效的间套作修复技术模式。各项技术模式统筹作物稳产-粮食安全-修复效率,效果明显突出,实现了重金属污染农田的安全利用和高效修复。

2.2.4 堆肥智能测控系统

该成果研发的堆体温度、含水量、氧气传感器通过课题内外实地应用,进一步熟化相关传感器,在氧气气路结构优化、含水量动态校对方面形成突破,提高了传感器的准确性与可靠性,具有成本低、可靠性高的特点,且与当前物联网与信息技术契合,具有较好的市场前景。确立堆肥专用多点温度、温度含水量一体、氧气、臭气方面感知方案,能够灵活根据需求搭建一体化好氧发酵测控系统,实现环境数据自动采集存储、鼓风机曝气的定时定量控制。

2.2.5 农业有机废弃物一体化好氧发酵原料配方及关键工艺技术优化

该成果从农业有机固体废弃物资源化利用角度出发,设计了以牛粪、玉米秸秆、沸石、腐植酸为原料和填充料的高温堆肥体系,研究了沸石、腐植酸及不同施用量的菌剂在堆肥进程中对温度、水分、氧气浓度等堆体物理性状变化特征的影响,掌握了堆肥体系中堆体物理变化规律、氨排放规律、氮素保留规律,为牛粪堆肥研究的进程推进和广泛推广提供了理论基础。

2.2.6 沼渣一体化制肥与污染物去除技术

该成果针对沼渣制肥周期长、高值化利用过程中重金属去除困难、沼渣产品附加值低等问题,研发了沼渣一体化制肥与污染物去除新工艺。该工艺通过自主研制沼渣一体化设备,集成自动在线监测技术智能软件包和智能生物除臭技术装备,能够实现沼渣快速制肥,高温期持续7 d,连续发酵15 d后即可达到无害化和腐熟要求。本技术在有机肥制造等方面有广阔的应用前景。

2.2.7 有效降低稻米镉含量的“VFR”模式

该成果针对稻米镉污染问题,提出了一种“低积累品种+施用碱性肥料+喷施叶面调理剂”的技术模式,简称“VFR”模式。该技术能通过提高根系和茎叶的两段阻控能力,有效降低稻米中的镉含量。研发的叶面调理剂适合无人机喷施,成本低、效率高、可重复、易推广。

2.2.8 黄淮海小麦玉米主产区氮磷淋失阻控技术与产品研制

该成果针对黄淮海小麦/玉米农区长期采用秸秆浅旋耕还田、浅层少免耕,以及过量施肥等管理方式造成的耕层土壤变浅、固碳保肥能力差等问题,形成“碳归还调蓄扩容、均衡分层施肥、优先流氮磷淋失阻断”关键技术,并研制开发了配套的农机装备、创新材

料、优化工艺,形成了增效复混肥、生物炭基肥、秸秆高效腐解菌剂、高碳有机肥、稳定性肥料以及反硝化菌剂等系列产品,构建了以分层施肥氮磷高效利用技术模式、秸秆深还增碳固氮技术模式为核心的冬小麦氮磷增效阻控技术模式,形成的技术模式具有明显的先进性和很好的经济实用性,为黄淮海地区小麦玉米农田面源污染防治提供了有力的技术支撑。

2.2.9 系列厌氧发酵核心装备

该成果针对4种厌氧发酵工艺缺乏国产核心装备的问题,自主研发反应器、进出料、搅拌等技术装备,设计开发了干法连续厌氧发酵装备,可实现进出料过程中的动态密封,与螺旋输送机结合,较柱塞泵节能30%。针对高负荷湿法厌氧发酵,设计开发了两种组合式机械搅拌设备,已应用于5 000 m³厌氧反应器内,且可在不清罐条件下进行在线维护及维修。

2.2.10 高负荷稳定厌氧发酵配套保障技术

该成果以畜禽粪便、秸秆、尾菜等农业废弃物为原料,以干法连续、干法批式、湿法单相、湿法两相4种厌氧技术为重点,针对运行效率与稳定性相矛盾的核心问题,研发了“原料数据库+预处理+多元混配+过程调控+生物强化”组合技术,获得了解除酸抑制的生物强化菌剂,对丙酸耐受能力>11 g·L⁻¹。

2.2.11 设施农业氮磷淋溶阻控技术

该成果结合前期项目产品,从投入品与土壤环境调控角度出发,集成投入品氮磷形态调控、高碳低氮磷物料替代(土壤C/N>9)、微生物调控、根系布局微生态调控、物理阻隔、填闲消减、肥料产品结合最小淋失智能控制等关键技术,形成北方典型设施农业氮磷淋溶阻控技术。从田块和区域尺度入手,采用种植制度优化与生态拦截相结合的方法,集成固氮作物轮作制度调整技术、深浅根系作物间套作技术、分段式生态沟渠净化等关键技术,形成南方典型设施农业氮磷径流排放阻控技术。项目技术兼顾地表水安全和蔬菜优质生产,为区域设施蔬菜结构布局和氮磷循环利用提供了技术支撑。

2.2.12 农田典型农药微生物降解技术与产品

该成果针对农田典型农药污染,首次筛选获得了多种除草剂(乙草胺、丁草胺、异丙隆、苯磺隆、甲磺隆、莠去津)、啶氧菌酯杀菌剂和菊酯类杀虫剂的高效降解菌及菌系,构建了高效降解菌剂的高密度中试发酵工艺;开发出适合污染农田使用的菌体固定化技术和菌剂产品,建立了除草剂污染农田土壤微生物修复技术。首次发现除草剂降解新菌种,且创制出菌剂应

用于生产,在除草剂污染农田土壤微生物修复方面取得新突破,填补了国内外空白。除草剂去除率达到90%以上,农产品农药残留达到国家标准,社会和经济效益显著。

2.2.13 粪污收储运智能化控制系统创制

该成果研发了生猪养殖场粪污粪尿实时分离与智能型负压收运技术、设备,以及奶牛养殖场粪污智能型贮存/好氧发酵新技术、新设备,开发了集成红外感应、生命活动感应、自清洁等功能的移动地板式粪尿分离实时收运技术。该研究增强了粪污收储运环节的系统性,促进了养殖污染过程减量。

2.2.14 基于物联网的养殖场多组分气体原位实时监测技术和设备

该成果研发了粪水氮磷现场快速检测技术和装备,建立了粪水重金属现场消解关键技术,创制了基于酶底物法的粪水样品指示微生物现场检测装备。研制了畜禽养殖场多组分气体原位监测设备与配套校准装置和基于酶底物法的粪水样品微生物现场检测可视化判读仪和智能折叠式培养箱等。

2.2.15 氨吹脱闭式循环耦合钙沉淀技术

该成果开发了养殖污水定向转化有机酸关键技术,有机酸产物中丁酸可达90%,成功合成了PHBV(聚羟基丁酸戊酸共聚酯),在负荷为 $100\text{ kg VS}\cdot\text{m}^{-3}$ 下,中温酸化有机酸浓度达4.7%,高温酸化有机酸浓度达5.1%。该研究提高了养殖粪污碳氮磷转化效率,拓展了高值转化途径。

2.2.16 “螯合捕获-磁选移除”修复技术

该成果研发了“螯合捕获-磁选移除”技术,并在湖北大冶水稻田进行示范。研究发现,MSC材料固载重金属镉后,磁选机首次回收率为57%(50%~60%),总镉去除率为14.99%(变幅12.5%~17.5%),并显著降低了水稻根系中镉的累积量。该技术主要降低水稻根系和秸秆对土壤中镉的吸收,并且未对当季水稻结实率、千粒质量和产量等造成不良影响。

2.2.17 设施氮磷智能淋溶阻控与精细化滴灌系统

该成果以阻控氮、磷淋溶损失以及水肥精准管理为目标,集成智能灌溉云平台、精细化滴灌、在线监测与信息反馈、智能决策等技术,实现了土壤墒情在线诊断与氮磷淋溶污染阻断。与传统灌溉系统相比,该系统成本降低10%,使用寿命延长20%以上;在保障根区养分浓度的情况下,40~100 cm非根区土壤氮磷含量平均降低65%和40%,氮磷淋失率小于0.5%和1.6%。该套技术在节水节肥、阻控氮磷流失、提质增

效等方面效果尤为显著,有效支撑了设施农业绿色发展,具有广阔的产业化和应用前景。

2.3 集成示范推广领域

规模化应用示范取得跨越式进步,有力促进了我国社会、生态健康发展。专项已基本建成“京津冀城乡一体化”“长江中下游”等5大示范区,在国内首次实现农业废弃物处理技术装备大规模工程化应用,并开创了我国重金属污染农田治理由田块尺度向区域尺度过渡的先河。截至目前,已经在全国27个省(市、区)建立了107个(次)示范点,近180项技术、50个产品落地示范9个国家级和9个省级示范区,涉及农业面源污染防治、农业废弃物发酵技术、重金属阻控及重金属中轻度污染农田修复与安全利用等4大领域,累计示范与辐射面积超过 10万 hm^2 ,培训技术人员和农民超过8万人次,核心示范区内基本实现污染物消减目标。

长江中下游区:开展了长江下游平原区农田氮磷流失防控技术集成示范,构建了适应于长江下游平原农田径流损失防控的“秸秆机械还田+化肥减量+优化施肥+生态沟渠拦截”模式。结果表明:在水稻产量略有增加的前提下,采用模式推荐施肥,稻田径流流失总氮、总磷比常规施肥分别减少15.9%~41.6%和48.1%~55.6%。开发了长江中游丘陵区农田原位消减+沟渠过程拦截+湿地末端净化的氮磷径流流失综合防控技术体系,综合农田原位消减、沟渠过程拦截和湿地末端处理3种技术,整体对径流氮、磷的消减率分别达71.3%和76.9%。

城乡一体化区:在京津冀城乡一体化示范区,实现磷污染负荷减少25%以上,土壤磷素淋失降低53%,土壤农药残留降低30%以上,重金属分离效果30%~50%以上,农产品质量符合国家食品卫生标准。在长三角城乡一体化区,开展了露天蔬菜和设施蔬菜的氮磷面源污染物截留减排综合防治技术模式以及菜田农药残留污染防控技术集成与示范,示范区氮磷和农药污染负荷消减30%以上,农药残留率下降30%以上,重金属有效性降低50%以上,农产品质量达到国家食品卫生标准,农业废弃物无害化消纳利用率提高到95%。

中南西南区:构建了“冬油菜-夏象草\巨菌草\甜高粱\麻类”的富集移除种植技术模式,该模式能使地上部位镉移除量达到 $150\sim600\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。研发降镉叶面肥技术,在水稻开花期喷施1次叶面肥可有效降低水稻籽粒中镉30%~50%,该农艺调控技术成本较低,

可大面积推广应用。构建了针对雨热同期水稻区的“源头阻控(S)-过程拦截(P)-末端消纳(R)”(S-P-R)面源污染全过程控制技术模式、“土-水-生”面源污染监测系统等,实现稻米镉含量降低60%以上,均达到粮食中污染物限量标准;成都平原集约化农区面源污染控制技术可降低氮肥投入17%、磷肥投入33%,氮、磷流失分别减少53%和30%;重庆丘陵区示范流域氮磷污染负荷消减40%以上。

东北西北区:集成了地膜污染防治、玉米秸秆饲用化利用、氮磷淋溶污染综合防控等技术,优化构建了黄土高原面源污染防治模式,示范区污染负荷降低了25%。建立了东北粮食主产区农业面源污染综合防治集成技术示范区和微生物强化原位消减控制技术,使旱田土壤阿特拉津去除效果提升20%以上。

黄淮海农区:核心试验区内作物秸秆还田率达95%,筛选出目前适应于沿淮区域农田土壤弱碱性特性的重金属改良剂配方A2和A4组,添加0.9%~1.0%的修复剂配方,可分别降低土壤中重金属镉有效态含量58%和40%。研发的节水控淋技术可减少土壤硝态氮淋失45.8%以上,降低速效磷淋失22.2%以上,淋溶水中磷污染负荷平均下降60.5%。废弃物回收利用率达95%以上。

2.3.1 基于“减-阻-控”的石灰岩黄壤镉汞污染农田综合防治技术示范模式

该成果针对西南石灰岩区镉汞高地质背景农田土壤,在精准识别土壤重金属污染特征基础上,从土壤-作物系统重金属迁移累积全过程出发,根据不同污染特征和制约作物重金属累积的关键过程,适配相应技术组合,是该区域首次建立的诊断式优化技术,核心区和辐射区水稻稻米镉、汞和汞降低30%以上,在中轻度污染区稻米重金属含量达标率在95%以上。

2.3.2 丘陵小流域氮磷污染减排和截留降解综合集成技术与示范

该成果针对丘陵小流域多源复合面源污染特点,应用AMD(干湿灌溉)+SSNM(适地养分管理),缓释肥、有机肥替代化肥技术,坡地水土流失控制、旱地植被缓冲带构建,汇流河道水生态修复等技术,建立“控源+截留+消纳”于一体的丘陵小流域面源污染综合防控技术。水旱轮作示范区水肥管理技术比农民施肥处理减少了49%的总氮流失量、68%的总磷流失量;茶园示范区肥土防控技术比农民施肥处理消减27%的总氮流失量、38%的总磷流失量。

2.3.3 农机农艺一体化地膜高效回收技术应用与示范

该成果针对绿洲灌区膜下滴灌棉花边膜覆土后难捡拾的问题,改进起边膜装置和挑膜部件的仿形设计,完善耕前地表残膜回收机。除土地膜和专用地膜的回收率最高,分别为80.5%和78.5%。

2.3.4 北方弱碱性农田土壤重金属污染治理技术与示范

该成果成功筛选出近10个地方主推的小麦和玉米重金属低吸收品种,以及能有效降低土壤重金属有效性的改性海泡石材料和大幅减少小麦重金属吸收的复合叶面阻控剂,与对照相比降低籽粒镉达47%~64%,适合大面积推广;同时集成了“春小麦+叶面调理剂+万寿菊”种植模式,达到“边生产、边修复”的目的。该技术在国内外处于领跑地位。

2.3.5 稻田面源与重金属综合防控技术及模式

该成果基于面源与重金属复合污染防治的单项技术或组合技术。秸秆全量还田能够分别降低总氮、总磷流失负荷的2.4%和33.0%,土壤有效态铜和铅含量也显著降低了51%和53%;沼液还田可达到降低30%以上氮磷流失及12.5%土壤有效态镉的效果;构建了城市周边农田面源与重金属复合污染综合防控与修复技术模式,水稻季氮流失负荷和土壤有效态铜显著降低13%和57%,稻田冬季土壤有效态镉降低79.59%。

2.3.6 乡村旅游助推增效的成都平原“S-P-R”面源污染全程防控技术模式

该成果针对成都平原粮油轮作集约化农区面源污染发生的关键时空节点,通过氮磷养分高效品种筛选、包膜控释肥和尿素配施技术的源头阻控技术(Source control),利用磷高吸附新型材料和氮磷高吸收植物生态沟的过程拦截技术(Process blocking),生物炭-氮磷高富集观赏植物沉塘的末端消纳技术(Terminal retention)的优化组配,构建了针对雨热同期稻油轮作区的“源头阻控(S)-过程拦截(P)-末端消纳(R)”(S-P-R)面源污染全过程控制技术模式。结合城郊、都市、乡村农业休闲旅游的需求,将乡村旅游与模式推广有机融合,提升模式显示度和面源污染防控综合效益。所构建的模式是对已有面源污染防控技术的拓展和深化,突破了成都平原区面源污染防治技术单一、针对性不强、效益不高、难以推广等关键瓶颈。将农业观光旅游有机融入面源污染防控,建立了集“面源污染防控-农业观光休闲旅游”为一体的示范工程,水稻季可降低氮肥投入17%、磷肥投入

33%,优化施肥在增加水稻产量($151\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的基础上,氮、磷流失分别减少53%和30%,控制效果十分显著,沟渠改造投入的成本可控。

3 结语

五年来,面源专项研发出一批农田氮磷流失综合防控技术,有效改善了区域水环境质量;创新了一批镉、砷等重金属污染耕地的安全利用技术,有效保障了农产品质量安全;研发了一批农业废弃物资源化利用技术装备,有效支撑了区域种养结合循环发展;建立了一批农业产地环境污染治理新模式,培育带动了农业环保新产业发展。更重要的是,形成了一支由300多个国家级科研院所、地方技术研究单位以及企业、农业生产单位所组成的,可以整体组织调动、进行全国协作的研究队伍和科研平台,并且摸索出了一整套行之有效的创新工作方法,为提升我国农业产地环境污染防治能力、保障农业绿色发展作出了显著的贡献。

同时也应该看到,在经济持续高速发展、各类污

染物排放不断增长的大环境下,我国农业面源和重金属污染治理还将持续面临较高压力。在一些技术领域中仍然存在明显的障碍,如重金属污染农田治理在世界范围内都是难题,需要从理论、材料等多方面取得突破。下一步,为了保障粮食安全和环境安全等重大战略需求,国家对本领域的技术研发,如:化学投入品减量增效、重金属污染区域治理以及有机废弃物资源化利用等方面将继续保持较高强度的投入。面源专项各参加单位,也将在新的形势下继续加大中青年人才培养力度,完善监测网络,持续跟踪治理效果,强化科研平台建设,为持续提升我国农业产地环境污染科技治理能力,不断作出新的贡献。

参考文献:

- [1] 郑戈,熊炜.科技发力打赢农业面源污染防治攻坚战[J].中国农村科技,2019(9):38-41.
- ZHENG Ge, XIONG Wei. Strengthening science and technology to win the battle against agricultural non-point source pollution[J]. *China Rural Science & Technology*, 2019(9):38-41.