

农田面源水土污染耦合机理与生态修复技术研究

赵军伟

亳州市谯城区魏岗镇人民政府

DOI:10.32629/eep.v9i6.3249

[摘要] 农田面源污染是造成我国水土环境质量变差的主要原因。本文对农田面源污染中水污染和土壤污染的耦合作用机理进行了系统的梳理,主要从氮磷营养盐迁移、重金属赋存形态转化、农药残留协同迁移三个方面来分析其作用路径,在此基础上提出了一个包含源头减量、过程阻断、末端净化的生态修复技术体系,用典型案例进行验证,为农业面源污染综合防控提供理论依据和技术参考。

[关键词] 农田面源污染; 水土耦合; 氮磷迁移; 生态修复; 人工湿地

中图分类号: S27 文献标识码: A

Research on the Coupled Mechanisms of Non-point Source Soil and Water Pollution in Agricultural Land and Ecological Restoration Technologies

Junwei Zhao

People's Government of Weigang Town, Qiaocheng District, Bozhou City

[Abstract] Non-point source pollution from agricultural lands is the primary cause of deteriorating water and soil quality in China. This paper systematically examines the coupled mechanisms of water and soil pollution within this context, analyzing their pathways through three key aspects: migration of nitrogen and phosphorus nutrients, transformation of heavy metal forms, and co-migration of pesticide residues. Based on these findings, a comprehensive ecological restoration technology framework is proposed, encompassing source reduction, process interception, and end-stage purification. Supported by case studies, this framework provides theoretical foundations and technical references for integrated management of agricultural non-point source pollution.

[Key words] Non-point source pollution in farmland; Soil-water coupling; Nitrogen and phosphorus migration; Ecological restoration; Constructed wetlands

1 绪论

农业面源污染(NPS)是指农业生产过程中污染物经由径流、侵蚀和排水等途径进入到水体当中,进而导致水土环境质量出现降低的情况。与点源污染相比而言,它具有来源分散、随机性强、治理难度大的特点。20世纪80年代以后,我国化肥、农药用量一直保持在高位,面源污染已经成为农业可持续发展、水土环境质量的主要问题之一。

农田水污染和土壤污染不是孤立存在的,它们通过水文循环和土壤-水界面相互影响。长久以来,两类污染的研究大多采用分治的视角,不能体现二者之间的协同作用规律,从而影响到综合治理的效果^[1]。因此,对水土耦合机理进行深入分析,对制定系统的防治策略具有重要的科学意义。本文结合国内外的研究成果,从耦合机理、修复技术两个方面进行整理,希望给面源污染的防治提供一定的理论依据^[2]。

2 农田面源污染的水土耦合机理

2.1 氮磷营养盐的迁移转化机制

氮磷属于农田面源污染的主要物质。氮素在水土系统中以无机态(铵态氮、硝态氮)和有机态(溶解有机氮、颗粒有机氮)形式存在,各种形态之间通过矿化、硝化、反硝化和氨挥发不断转化。地表径流主要带走了颗粒态氮和铵态氮,壤中流以溶解态硝态氮为主。硝态氮由于带有负电荷,不能被土壤胶体吸附,雨水淋溶后容易向下层土壤迁移进入地下水,是北方旱作区地下水硝酸盐超标的主要原因。暴雨径流事件中单次氮素输出通量可以占到全年总量的30%到60%,有初始冲刷效应。

磷素以吸附态、矿物结合态为主,水溶性低,径流中磷迁移以颗粒态为主(占60%-80%)。磷流失强度与磷饱和度、土壤质地、地形、降雨有关。当磷饱和度达到临界点之后,即达到25%的时候,吸附作用就急剧下降,径流磷浓度随施磷量的增大而升高。进入水体的磷会沉积在底泥中,在碱性、高温或者厌氧条件下又会释放出来,形成内源负荷,加重了湖库富营养化的程度,体现出水土界面双向交换的特点。

2.2 重金属的水土界面迁移与形态转化

农田土壤重金属(镉Cd、砷As、铅Pb、汞Hg等)主要是由磷肥施用(含镉)、污水灌溉、大气沉降和含重金属农药使用造成的。重金属在水土系统中迁移分配受pH、氧化还原电位(Eh)、有机质、共存阴离子等多种因素共同影响。土壤pH降低的时候,重金属从固相解吸到液相的比例变大,水溶态重金属浓度升高,径流携带的风险也随之增大。稻田淹水还原时,铁锰氧化物还原性溶解会释放出其表面共沉淀、吸附的砷,使土壤孔隙水及渗漏水中砷含量上升,危及下游地表水和地下水。镉在还原条件下可以和硫化物结合成难溶的沉淀,暂时降低其移动性,但是土壤重新氧化时砷和镉又会再次活化释放出来,体现水土界面物质动态可逆迁移的特点,加大了长期管控的难度。

2.3 农药污染的水土协同迁移

农药迁移行为是由理化性质(辛醇-水分配系数Kow、水溶性、蒸气压、半衰期DT50)和土壤环境参数共同决定的。疏水性强的有机氯类农药(DDT、HCH)容易吸附在土壤有机质和黏土矿物上,随侵蚀颗粒物进入水体,经过食物链生物放大,给生态系统造成长时间的累积性危害。水溶性高、极性的农药(部分除草剂、杀菌剂)多以溶解态存在,大雨时通过地表径流、淋溶迅速进入地表水、地下水,危害饮用水安全。农药降解中间体毒性比母体高,而且更容易在水中迁移,加大了复合污染的评价和修复难度。

农药复合污染在农田中普遍存在,不同的农药组合的协同毒性还没有得到充分的评价。农药微生物降解产生的代谢产物,其持久性、水溶性一般比母体高,容易进入地表水体。从水土耦合的角度来看,农药“土壤蓄积-径流输出-水体归宿”全过程的通量核算是确定管控阈值的基础,也是目前风险评价体系的不足。建立以实际暴露浓度为基础的复合农药水生生态风险评价模型,对保证农田排水汇入水体的生态安全、制定有针对性的管控措施有重要的意义^[3]。

3 生态修复技术体系

根据农田面源污染水土耦合的特点,生态修复技术体系的建立要遵循“源头减量、过程阻断、末端净化”的全链条防控思想,把工程措施和生物措施结合起来,实现水土复合污染的协同系统治理。该技术体系按照阶梯式的防控思路来执行,源头减量技术对农业投入品的施用环节加以调控,改良肥料和农药的种类和用量,从而削减进入农田水土系统里的污染初始通量,过程阻断技术布置在农田和受纳水体之间,依靠工程性和自然性手段逐层拦截并降解迁移过程中的污染负荷,末端净化技术在流域汇水末端担当最后的水质改善使命。三种技术层次在空间上互相结合,在功能上互相补充,形成完整的面源污染防治技术链(见表1)。

3.1 源头减量技术

源头减量以科学管理农业投入品为根本。测土配方施肥依据土壤供肥和作物需肥规律来确定氮、磷、钾的用量及时期,在保证产量的前提下减少化肥用量15%到30%,降低土壤氮磷盈余。缓控释肥料利用包膜或者抑制剂来控制养分的释放速度,

使供肥的节律和作物的需肥同步,从而降低雨季径流中活性氮磷的流失。有机肥代替化肥可以提高土壤有机质、改善土壤结构保水性、增强对重金属的吸附固定,从而减少重金属进入水体的风险。精准施药、生物农药替代从源头减少农药输入,是面源防控的基础环节。

表1 主要生态修复技术对比

技术类型	主要机制	TN去除率参考区间	TP去除率参考区间	适用场景	运维复杂度
测土配方施肥	精准供肥,压缩土壤氮磷盈余	源头削减 15%—30%	源头削减 15%—30%	集约化旱作 农田	低
	调控养分释放节律,减少雨季径流损失	径流氮明显降低	径流磷明显降低	旱作规模 农田	低
植被缓冲带	物理过滤+植物摄取+微生物降解	40%—70%	50%—80%	坡耕地边缘/ 沟渠坡面	低
生态沟渠	沿程生化净化+延长水力停留时间	50%—60%	55%—70%	农田线性排水系统	中
表面流人工湿地	沉降+根际微生物降解+植物摄取	55%—75%	60%—80%	汇水末端大面积布设	中
垂直潜流人工湿地	填料吸附+硝化/反硝化耦合脱氮	60%—80%	55%—75%	高氨氮农业尾水处理	中—高

3.2 过程阻断技术

过程阻断技术是阻止污染物向受纳水体迁移的技术。植被缓冲带是应用最广的一种面源污染控制措施,它利用物理过滤(减缓径流、促进泥沙沉降)、植物摄取(根系吸收溶解态氮磷)、微生物降解(反硝化脱氮、有机物矿化)三重作用来拦截径流污染物。宽度为10~30m的草本缓冲带对总氮、总磷的削减效率分别可以达到40%到70%、50%到80%,随着宽度的增大,其效能也会提高^[4]。生态沟渠在传统排水功能的基础上,通过沟壁种植挺水植物(菖蒲、芦苇等)、沟底铺设生物填料,把排水路径变成生态净化廊道,延长水力停留时间,加强生化降解和沉积去除,氨氮和总磷的去除率分别为50%—60%和55%—70%。

3.3 末端净化技术

末端净化技术主要是人工湿地、强化稳定塘系统。表面流人工湿地依靠挺水植物根际微生物群落、水体悬浮物沉降、底泥吸附共同完成氮磷以及有机污染物的高效去除,垂直潜流人工湿地依靠填料床层分区设计,创建起厌氧、缺氧、好氧微环境梯度,加强硝化和反硝化耦合脱氮的过程,特别适合于氨氮负荷较高的农业尾水处理^[5]。多级串联湿地系统(表面流和潜流复合配置)可以使农业排水中总氮、总磷浓度分别降低到2mg/L以下和0.3mg/L以下,出水接近或者达到地表水Ⅲ类标准^[6]。重金属

污染农田的植物提取技术主要有种植超积累植物如东南景天、蜈蚣草等方式,原位固定技术主要有施用石灰、生物炭、磷酸盐等改良剂降低重金属活性的方式,根据污染程度和土地利用目标可以灵活组合使用。

4 典型案例与综合效果分析

以太湖流域典型稻作区为例,该区域化肥施用量一直偏高,面源污染给太湖氮磷输入的贡献率超过50%,是富营养化治理的主要难题。近几年来当地采取了投入品减量、生态沟渠改造和入湖湿地净化相结合的模式,源头上推广测土配方施肥和有机肥替代,化肥用量年均减少约15%,输移面上推进沟渠生态化改造,种植挺水植物并设置砾石床过滤,末端建设多级人工湿地,承接农业排水终端净化。经约5年治理,示范区主要入湖河道总氮由3.8 mg/L降至约2.1 mg/L,总磷由0.32 mg/L降至约0.18 mg/L,水质改善显著^[7]。

但是农田面源污染生态修复还存在着一些主要问题,第一,水土耦合过程时空异质性强,降雨、季节以及土地利用格局的变化会使得污染物迁移通量出现较大的差别,很难实现精准配置;第二,人工湿地、生态沟渠长期运行过程中会出现植物季节性衰退、基质磷饱和、生物膜老化等现象,需要进一步研究长效运维机制;第三,目前的技术大多只针对单一污染物进行优化设计,对于氮磷-重金属-农药复合污染的协同修复效果较差,需要开展系统的研究并进行集成示范^[8]。

5 结论与展望

本文系统梳理了农田面源污染水土耦合机理,涵盖氮磷迁移转化、重金属界面形态分配及农药协同迁移等过程,构建了“源头减量—过程阻断—末端净化”多层次生态修复技术框架。研究表明,基于水土耦合的综合治理策略在系统效能上优于单介质分治模式,能更有效削减流域面源污染负荷、改善水土环境质量。

未来研究与治理应重点聚焦:一是加强多介质耦合迁移模型精细化构建,提升流域尺度污染模拟与预测精度;二是探索融合遥感、物联网与AI的污染智慧监控技术,实现风险实时预警与精准管控;三是深化修复技术长效维持机制研究,着力攻克湿地基质再生、复合污染协同去除等关键科学与工程问题^{[9][10]};四

是在政策制度层面健全全面源污染防治的经济激励与生态补偿机制,推动科研成果向绿色农业实践转化,助力农业可持续发展与水环境持续改善。

[参考文献]

[1]朱兆良,孙波,杨林章.我国农业面源污染的控制政策和措施[J].科技导报,2005,23(4):47-51.

[2]陈利顶,傅伯杰,徐建英,巩杰.基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J].生态学报,2003,23(11):2406-2413.

[3]安志装,索琳娜,刘宝存.我国农业面源污染研究与展望[J].植物营养与肥料学报,2024,30(7):1422-1436.

[4]黄迪,黄志红,孔辉.重金属污染农田土壤的稳定化修复技术及其修复实践研究[J].中国农学通报,2021,37(8):72-78.

[5]段桂兰,崔慧灵,杨雨萍.重金属污染土壤中生物间相互作用及其协同修复应用[J].生物工程学报,2020,36(3):455-470.

[6]李英,商建英,黄益宗.镉砷复合污染土壤钝化材料研究进展[J].土壤学报,2021,58(5).

[7]Wang S H, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Assessment of influencing factors on non-point source pollution critical source areas in an agricultural watershed[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109084.

[8]段亮,段增强,夏四清.太湖旱地非点源污染定量化研究[J].水土保持通报,2006,26(6):40-43.

[9]Dong J, et al. Transport and fate of antibiotics in a typical aqua-agricultural catchment explained by rainfall events: Implications for catchment management[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 112: 953.

[10]Zhou X, Jomaa S, Yang X, Merz R, Wang Y, Rode M. Stream restoration can reduce nitrate levels in agricultural landscapes[J]. Science of the Total Environment, 2023, 164911.

作者简介:

赵军伟(1996--),男,汉族,安徽人,助理工程师,学士学位,研究方向:环境保护。