

农业面源污染对流域地表水水质的影响及源头防控技术优化

赵鹏飞

新疆维吾尔自治区水利水电科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830002

摘要: 本文系统梳理了农业面源污染的来源、迁移转化机制及其对流域地表水水质（特别是氮、磷营养盐、有机污染物及病原微生物）的影响路径与程度。在此基础上，深入剖析了当前我国农业面源污染防控体系中存在的技术碎片化、管理机制不健全、政策激励不足等关键瓶颈。针对上述问题，本文提出以“源头减量—过程阻断—末端治理—系统调控”为核心的全链条防控理念，并从精准施肥、生态沟渠、缓冲带建设、种养结合、智慧监测等维度，系统优化了农业面源污染源头防控技术体系。最后，从政策协同、标准制定、公众参与和科技创新等方面提出了综合性治理建议，旨在为我国流域水环境质量改善和农业绿色可持续发展提供理论支撑与实践路径。

关键词: 农业面源污染；流域水质；氮磷流失；源头防控；技术优化；生态治理

引言

水是生命之源、生态之基、生产之要。地表水水质直接关乎国家水安全、生态安全与粮食安全。近年来，随着工业点源污染有效控制，农业面源污染（ANSP）因其来源分散、过程复杂、时空变异性大，已成为流域水污染的主导因素。生态环境部《2023年中国生态环境状况公报》指出，在长江中下游、太湖、巢湖等农业密集区，水体富营养化问题突出，农业面源贡献率超40%。ANSP主要源于农田径流、畜禽养殖和农村生活污水，在降水或灌溉作用下，将氮、磷、农药等污染物带入水体，具有隐蔽性强、监测难、治理成本高、责任主体不清等特点，给水环境管理带来严峻挑战。在“双碳”目标与生态文明建设背景下，科学解析ANSP对流域水质的影响机制，构建高效、经济、可持续的源头防控技术体系，已成为环境科学、农业生态学与水文学交叉研究的关键课题。本文旨在厘清污染影响路径，识别技术瓶颈，提出优化防控路径，为流域综合治理提供支撑。

1 农业面源污染的来源与迁移机制

1.1 主要污染来源

农业面源污染主要来源于以下三个方面：（1）农田施肥流失：过量施用化肥（尤其是氮肥和磷肥）是农业面源污染的核心来源^[1]。据农业农村部统计，我国单位耕地面积化肥施用量远超国际安全阈值（225kg/ha），部分地区氮肥利用率不足30%，大量未被作物吸收的氮磷通过地表径流和淋溶进入水体。（2）畜禽养殖废弃物：规模化养殖业快速发展，但粪污处理设施配套不足，导致大量未经处理的畜禽粪便随雨水冲刷进入河流湖泊，带来

高浓度有机物、氮磷及抗生素残留。（3）农村生活污染与农业废弃物：农村生活污水直排、生活垃圾随意堆放，以及农药包装物、农膜残留等，亦构成面源污染的重要组成部分。

1.2 污染物迁移转化机制

农业面源污染物的迁移受气候、地形、土壤、土地利用和管理措施等多重因素影响，主要通过以下路径进入水体：（1）地表径流：降雨或灌溉后，水流携带土壤颗粒、溶解态养分及吸附态污染物沿坡面汇入沟渠、河流，是氮磷流失的主要途径，尤其在暴雨期间贡献显著。（2）土壤渗漏与地下水补给：硝态氮等可溶性污染物易随水分下渗进入地下水，并通过地下水与地表水的交换间接影响河流水质。（3）大气沉降：农田氨挥发后经大气传输沉降到水体，亦构成氮输入的一部分。污染物在迁移过程中还可能发生吸附、解吸、硝化、反硝化、降解等物理化学与生物转化过程，进一步影响其环境行为与生态风险。

2 农业面源污染对流域地表水水质的影响

2.1 氮磷营养盐富集与水体富营养化

氮、磷是农业面源污染中最关键的两类污染物。过量氮磷输入导致水体营养盐浓度升高，打破水生态系统平衡，引发藻类（尤其是蓝藻）爆发性增殖，形成水华或赤潮。例如，太湖蓝藻水华频发，研究表明其总氮（TN）和总磷（TP）负荷中，农业面源贡献分别达45%和52%。富营养化不仅降低水体透明度、消耗溶解氧，还可能产生微囊藻毒素等有害物质，威胁饮用水安全与水生生物多样性。

2.2 有机污染与水体缺氧

畜禽粪便和作物秸秆等有机废弃物进入水体后,在微生物作用下分解消耗大量溶解氧,导致水体黑臭、鱼类死亡。高浓度有机物还可能促进病原微生物繁殖,增加公共卫生风险。

2.3 农药与新兴污染物的生态风险

农药残留通过径流进入水体,对水生生物产生急性或慢性毒性。近年来,抗生素、激素、微塑料等新兴污染物在农业面源中的检出率上升,其长期低剂量暴露对水生态系统和人类健康的潜在风险亟待关注。

2.4 时空异质性特征

农业面源污染具有显著的季节性和事件驱动性。春耕施肥期和夏季暴雨期是污染输出的高峰期;空间上,坡耕地、河岸带、养殖密集区等为高风险区域。这种异质性增加了水质监测与污染溯源的难度。

3 当前农业面源污染防控体系的瓶颈分析

尽管我国已实施多项农业面源污染防治工程(如“化肥农药零增长行动”、“畜禽粪污资源化利用整县推进”等),但仍面临以下挑战:

3.1 技术层面:碎片化与适应性不足

现有防控技术多聚焦单一环节(如测土配方施肥、人工湿地),缺乏流域尺度的系统集成。部分技术(如生态沟渠)在南方水网地区效果显著,但在北方干旱区适用性有限。同时,技术推广中存在“重建设、轻运维”问题,长期效能难以保障。

3.2 管理层面:责任主体模糊与监管困难

面源污染无明确排污口,难以界定污染责任主体,导致“谁污染、谁治理”原则难以落实。跨行政区流域协同治理机制不健全,上下游利益协调机制缺失。

3.3 政策与经济激励不足

现有生态补偿机制覆盖面窄、标准偏低,农户参与污染防治的积极性不高。绿色农业补贴政策与面源污染削减目标衔接不紧密,缺乏有效的市场激励工具(如排污权交易)。

3.4 监测与评估体系薄弱

面源污染监测网络覆盖不足,缺乏高频、动态、高分辨率的监测数据。污染负荷核算模型(如SWAT、AnnAGNPS)本地化参数率定不足,预测精度有限,难以支撑精准治理。

4 源头防控技术体系的优化路径

针对上述瓶颈,本文提出构建“源头减量—过程阻断—末端治理—系统调控”四位一体的全链条防控技术体系,并重点优化源头环节。

4.1 源头减量:精准农业与绿色投入品替代

源头减量是防控体系的基础,关键在于减少化肥、农药等农业投入品的无效施用。首先,应大力推广测土配方施肥与变量施肥技术。依托高分辨率土壤养分空间变异图,结合作物不同生育期的需肥规律,实现氮、磷等养分的按需供给。在此基础上,融合无人机遥感、卫星影像与地面传感设备,构建“天空地”一体化的智能施肥系统,实现施肥作业的实时监测、动态调整与精准执行,有效降低养分流失风险^[2]。其次,加快缓/控释肥、稳定性肥料等新型绿色投入品应用。例如,包膜尿素可显著延缓氮素释放速率,提高氮肥利用率15%~30%;同时,通过秸秆还田、绿肥种植(如紫云英、苕子)及商品有机肥施用,逐步替代30%以上的化学肥料,不仅减少面源污染负荷,还能改善土壤结构、提升地力。此外,在病虫害防控方面,应推广高效低毒低残留农药,并大力发展生物防治技术,如释放赤眼蜂防治玉米螟、利用性诱剂干扰害虫交配、种植诱集植物吸引天敌等,从源头上降低农药流失对水体和生态系统的威胁。

4.2 过程阻断:生态拦截与水土保持

在农业面源污染物迁移过程中,需通过生态工程手段进行有效拦截。一是构建农田生态沟渠与植被缓冲带系统。在农田与河流、湖泊等水体之间设置10~30米宽的植被缓冲带,优选芦苇、香根草、藜草等根系发达、吸附能力强的本土植物,可拦截60%以上的径流泥沙和40%~70%的氮磷负荷。生态沟渠内可设置透水坝、生物填料(如沸石、生物炭)及人工湿地模块,延长水流停留时间,促进污染物沉降、吸附与植物吸收。二是推广保护性耕作与等高种植。在坡耕地实施免耕、少耕、秸秆覆盖等措施,可减少土壤侵蚀量达50%以上;沿等高线种植作物或设置等高草带,能有效降低地表径流速度,增强水分入渗,减少养分随径流流失。三是优化田间水管理。推广滴灌、微喷灌等节水灌溉技术,精准控制田间水层深度,避免大水漫灌造成的养分淋失;同时建设田间蓄水塘、生态塘坝等小型水利设施,实现雨水资源化利用与初期高浓度排水的滞留净化。

4.3 末端治理:种养结合与资源化利用

末端治理强调将污染物转化为资源,实现生态与经济双赢。一方面,全面推进畜禽粪污全量收集与资源化利用。构建“养殖场—沼气工程—有机肥厂—农田”闭环循环模式,推动大型养殖场配套沼气发电或提纯生物天然气,沼渣沼液经无害化处理后还田;对中小散户,则推广堆肥发酵、异位发酵床、蚯蚓处理等低成本、易操作的技术路径,实现粪污就地就近消纳。另一方面,

大力发展稻渔共生、鱼菜共生、鸭稻共作等生态种养模式^[3]。例如,在稻田中养殖鲫鱼、泥鳅或小龙虾,可有效吸收利用排水中的氮磷,削减面源污染负荷20%~40%,同时提升亩均收益。此类模式不仅实现污染治理,还推动农业多功能化与绿色转型。

4.4 系统调控:智慧监测与流域协同治理

面源污染具有分散性、滞后性与不确定性,必须依靠系统性调控。首先,构建覆盖重点区域的面源污染智慧监测网络,在沟渠出口、小流域断面等关键节点布设水质自动监测站、流量计、雨量计及视频监控设备,结合物联网与云计算平台,实现污染负荷的实时感知、动态评估与风险预警。其次,开发高精度流域模拟模型。融合遥感反演、GIS空间分析与机器学习算法,对SWAT、HSPF等传统模型进行本地化改进,提升其在复杂农业景观(如丘陵、水网地区)下的模拟能力,精准识别污染热点区域,为治理措施布设提供科学依据。最后,推行“流域单元+行政单元”双轨管理机制。以小流域为基本治理单元,打破行政区划壁垒,统筹上下游、左右岸、干支流的治理责任与资源投入,建立跨部门(农业、水利、生态环境)、跨区域的协同治理平台,实现规划统一、标准一致、数据共享、责任共担。

5 综合治理对策建议

5.1 完善法规标准与责任机制

当前农业面源污染治理仍面临法律依据不足、责任边界模糊等问题。应加快《农业面源污染防治条例》的立法进程,从国家层面明确地方政府属地管理责任、农业经营主体(包括种植户、养殖场等)的污染防治义务,建立“谁污染、谁治理,谁受益、谁补偿”的责任体系。同时,制定与水环境质量目标挂钩的农业面源污染排放限值和治理成效考核标准,将氮磷流失强度、化肥农药减量率、粪污资源化利用率等纳入生态文明建设考核和河湖长制评估体系,强化刚性约束。

5.2 强化政策激励与市场机制

充分发挥财政与市场双重驱动作用。一方面,扩大耕地地力保护补贴、绿色生态导向型农业补贴的覆盖范围,对采用测土配方施肥、有机肥替代、生态沟渠建设等防控技术的农户和新型经营主体给予直接奖励或成本补贴;另一方面,探索农业面源排污权交易试点,在重点流域试行基于水质改善效果的横向生态补偿机制,如上游地区通过减排获得下游地区补偿,激发地方治理内生动力^[4]。同时,鼓励绿色金融产品创新,支持农业绿色

转型项目融资。

5.3 推动科技支撑与人才培养

设立国家农业面源污染防治重点研发专项,聚焦智能监测、绿色投入品、生态拦截工程等关键技术瓶颈,推动“政产学研用”协同攻关与区域集成示范。加强基层农技推广体系建设,通过田间学校、数字农技APP、专家驻村等方式,提升农户对绿色生产技术的认知与应用能力。同时,将面源污染防治纳入农业职业教育和高素质农民培训内容,培育一批懂技术、会管理、有环保意识新型农业主体。

5.4 加强公众参与与社会监督

依托“河长制”“田长制”等制度载体,引导农民专业合作社、家庭农场、农业企业等多元主体参与流域协同治理。鼓励成立村级环保监督员队伍,推动治理过程公开透明。利用短视频、微信公众号、乡村广播等新媒体平台,普及面源污染成因、危害及防控知识,增强公众环保意识。通过设立举报奖励机制、开展“绿色农田”评选等活动,营造政府主导、农民主体、社会参与的全民治污良好氛围。

6 结论

农业面源污染已成为制约我国流域地表水水质持续改善的关键瓶颈。其影响具有长期性、累积性和系统性,必须摒弃“头痛医头、脚痛医脚”的碎片化治理思维,转向全链条、系统化、精准化的防控路径。本文提出的“源头减量—过程阻断—末端治理—系统调控”技术优化框架,强调以精准农业为基础、生态工程为支撑、智慧管理为手段、制度创新为保障,构建农业绿色发展与水环境保护协同共赢的新格局。未来,应进一步加强多学科交叉融合,推动防控技术从“有效”向“高效、低碳、智能”升级,为实现“美丽中国”和“农业强国”战略目标提供坚实支撑。

参考文献

- [1]蒙小俊,葛光环.农业面源污染与控制措施研究[J/OL].环境保护科学,1-10[2025-10-14].
- [2]简倩韵.水库周边农业面源污染对水质的影响及治理措施研究[J/OL].清洗世界,1-6[2025-10-14].
- [3]杨明慧.农业面源污染的危害与治理措施研究[J].江西农业,2025,(13):34-36.
- [4]张紫伊,虎陈霞,连纲,等.我国农业面源污染治理政策协同网络演化[J/OL].农业资源与环境学报,1-12[2025-10-14].