

入河排污口污染影响及多技术协同溯源体系研究

陈敏杰*

上海市浦东新区环境管理事务中心，上海，中国

*通讯作者

【摘要】入河排污口是陆域污染入汇地表水体的关键节点，其排放的常规污染物与新兴污染物对水生态环境形成系统性复合危害，不仅引发生物毒性、水体富营养化、水生境退化、水体理化指标恶化、病原体传播等系列生态与公共卫生问题，经济发达区域排污口密集分布形成的结构性治理短板，更进一步增大了排污口监管与治理的实施难度。为破解入河排污口溯源工作中的技术与实践难题，本文系统研究了多款精准溯源技术的应用机制与实践价值，其中水质指纹技术依托三维荧光光谱技术实现污染源快速锁定，无人船暗管探测技术通过声呐厘米级定位突破水下排口排查的盲区限制，水下检测机器人融合多传感技术完成管涵结构与水质指标的同步监测，无人机遥感技术实现大尺度区域内污染源的精准识别。基于上述技术构建的“空-水-底”全空间多技术协同溯源体系，推动入河排污口溯源工作从传统经验推断模式向可视化实证监管模式转型，为入河排污口精准治污、分类管控工作开展及智慧化管理体系建设，提供了核心技术支撑与科学决策依据。

【关键词】入河排污口；水生态环境；污染溯源；技术协同；三维荧光光谱

1. 引言

入河排污口作为陆域污染源与水域生态环境连接的最后枢纽，是陆域污染负荷进入地表水体的直接载体，对其开展规范化排查、精准溯源与科学管控，直接决定流域水生态环境质量的改善成效，更是关乎流域水生态安全与生态系统稳定发展的关键环节。当前我国入河排污口管理工作面临类型复杂、污染多源、监管滞后三大核心挑战：排污口涵盖工业、农业、生活、企事业单位等多种类型，不同类型排污口的排放规律与污染物组成存在显著差异；污染来源呈现典型多源复合特征，除有机污染物、氮磷营养盐、重金属等常规污染物外，微塑料、抗生素等新兴污染物持续涌现且防控难度大；在经济发达区域，排污口分布密集、类型混杂，配套污染治理与监测设施的投入相对滞后，传统人工排查手段存在效率低、精准度差的固有问题，难以有效识别水下隐藏排口与暗管偷排等违法行为。

排污口的无序排放引发的水生态环境问题日趋严峻，工业排污口排放的重金属与有毒有机物易造成水体生物链崩溃，农业排污口的氮磷营养盐负荷是水体富营养化的首要诱因，生活污水排污口携带的病原微生物则严重威胁沿岸公共卫生安全，多重污染效应叠加形成“污染排放-生态退化-功能丧失”的

恶性循环。同时，传统溯源技术存在明显的应用瓶颈，化学检测方法操作繁琐、时效性差，人工排查受地形、水位等自然条件限制存在大量排查盲区，难以满足入河排污口精细化管理与环境现场执法的实际需求。在此背景下，生态环境部发布《入河入海排污口监督管理技术指南 入河排污口规范化建设》（HJ 1309—2023），明确提出提升入河排污口信息化、科学化管理水平的核心要求，为融合智能探测、遥感监测等先进技术提升排污口溯源效能，建立“污染源-排污口-水环境”全链条联动响应机制提供了重要的技术指导与政策依据。

基于此，本文系统解析入河排污口对水环境产生的系统性影响特征，明确各类排放污染物的来源、赋存特征与环境危害，重点论述无人机遥感技术、管道机器人技术、水质指纹技术、无人船暗管探测技术等溯源技术的工作原理、技术优势与适用应用场景，深入探究多技术协同的溯源模式，旨在为构建入河排污口“分类排查-精准溯源-智慧管控-长效治理”的全流程管理体系提供科学依据与技术支撑，助力流域水生态环境质量持续改善与美丽河湖建设工作的稳步推进。

2. 入河排污口的概念、影响和主要污染物

2.1 概念和影响

入河排污口是直接或者通过管道、沟、

渠等排污通道向江河、湖泊、运河、渠道、水库等地表水体排放污水的门口，是衔接陆域污染源与水域生态环境的关键节点，其对环境的影响呈现系统性、复杂性与长期性的显著特征，具体体现在六大方面[1,2]:

第一，在生物毒性效应方面，工业排污口排放的污水中常含有重金属、苯系物、酚类等有毒有害有机物，此类物质可直接毒害水生生物，导致藻类、鱼类等水生生物种群数量锐减甚至局部灭绝，严重破坏水体食物链的完整性，引发生态系统结构失衡与功能衰退。

第二，在水体富营养化方面，农业排污口与企事业单位生活污水排污口排放的污水中富集氮、磷等营养物质，大量营养盐进入水体后打破水体原有营养平衡，成为藻类爆发式繁殖的核心诱因，进而持续消耗水体溶解氧，造成鱼类等水生生物窒息死亡，最终在水体局部区域形成无生态功能的“死水区”。

第三，在生境退化方面，污水排放携带的大量悬浮杂质会导致水体浑浊度升高、透光性大幅下降，直接抑制沉水植物的光合作用，进而破坏底栖生物的栖息环境，造成水体生物群落结构单一化，大幅削弱河流的自然自净能力，形成污染加剧与生态退化的恶性循环。

第四，在理化指标恶化方面，排污口的污水排放会直接造成河水浑浊、异味散发，使得水体中悬浮物（SS）、化学需氧量（COD）、生化需氧量（BOD）等核心水质指标超标，既直接降低水体的饮用、灌溉及工业使用价值，也进一步破坏水生生物的生存环境。

第五，在病原体传播风险方面，生活污水排污口携带大肠杆菌、沙门氏菌等病原微生物，此类微生物可在水体中长期存活并随水流传播，大幅增加霍乱、伤寒等水体介导传染病的发生风险，形成公共卫生安全隐患，严重威胁沿岸居民的身体健康。

第六，在结构性治理短板方面，经济发达区域的排污口分布密集、类型繁杂，工业、企事业单位、农业等各类排污口交织分布，而配套的污染整治设施投入相对滞后，现有监管人员与技术手段难以实现排污口全覆盖监管，进一步加剧了排污口的管控难度与治理成本。

2.2 主要污染物

入河排污口排放的污染物种类多样、成分复杂，多源复合的特征显著提升了水环境治理的难度，此类污染物对水环境质量构成严重威胁，主要包括有机污染物、营养盐类、重金属、悬浮颗粒物、微塑料及抗生素类物质等。

有机污染物主要来源于工业废水、生活污水及农业面源排放，以化学需氧量（COD）、生化需氧量（BOD）为核心表征指标，此类物质进入水体后易引发强耗氧反应，快速降低水体溶解氧浓度，造成水体厌氧发黑、水质恶化。营养盐类以氮、磷化合物为主，主要来自农业化肥流失与生活污水排放，是诱发水体富营养化、藻华爆发的直接原因，也是水体生态退化的核心诱因之一。

重金属源于工业生产过程中的废水排放，具有高毒性、难降解、生物累积性的显著特征，可通过食物链富集放大，不仅直接危害水生生物的生存与繁殖，还会通过饮用水、水产品食用等途径对人类健康造成潜在且长期的威胁。悬浮颗粒物主要由泥沙、固态废弃物组成，既会增加水体浑浊度、降低透光性，还会吸附重金属、有机污染物等有害物质并沉积于水体底泥，形成持久性的底泥污染隐患，在水流扰动时易再次释放造成二次污染。

微塑料及抗生素类物质作为水环境中的新兴污染物，因难降解性、广泛存在性及潜在生态风险，成为当前水环境治理的关注焦点。上述不同类型污染物的赋存特征与环境危害存在显著差异，对入河排污口的溯源技术与治理方案提出了多样化、精准化的实践要求[3]。

3. 溯源的关键技术

3.1 无人机航拍与遥感技术

无人机航拍与遥感技术深度融合无人飞行器平台、遥感传感器、高速通信与智能数据处理等先进技术，凭借高效、灵活、精准的技术优势，成为入河排污口排查溯源工作中不可或缺的关键手段。该技术通过在无人机平台搭载高清摄像机、激光扫描仪、多光谱感知镜头等设备，可实现低空或高空的快速、大范围数据采集，获取高分辨率的水体、岸线及周边环境影像资料。

该技术手段有效克服了传统人工徒步排查面临的地形复杂、效率低下、易遗漏等难题，能够精准捕捉河面漂浮污染物、岸边疑

似排污口，甚至识别隐藏在草丛、石缝中的暗管排污口。其核心价值在于显著提升了数据采集的精度与维度，通过“卫星遥感初筛+无人机精细探测”的协同模式，先结合卫星遥感影像完成排污口的初步筛查与区域定位，再利用无人机获取的多光谱数据进行自动拼接与光谱分析，可有效识别水体富营养化区域、污染团分布范围以及潜在的异常排放源。

这种“空中遥感筛查”模式，构成了“空（无人机/卫星）-地（人工核查）-水（水下机器人/无人船）”三位一体排查体系的关键一环，为后续的精准确源与靶向治理提供了全面、坚实的基础数据支撑[4]。

3.2 管道机器人技术

管道机器人[5-7]通过搭载高清摄像头、声呐探测设备、多参数传感器等组件，结合智能控制系统，可实现对地下管网及水下排污通道的全面、精细化探查。根据驱动方式、适用场景与功能特性，管道机器人主要分为以下五类技术设备：

管道潜望镜（Quick View, QV）：作为基于远程视频采集与分析的传统管道检测设备，其核心工作原理为通过伸缩杆将高清摄像头垂向深入检查井或管道入口，实时采集管道内部影像并回传至地面主控系统，专业人员可结合视频变焦、激光测距等功能，对管道内的基础缺陷进行快速分析与判断。该设备操作便捷、检测成本较低，适用于管道的初步筛查与快速诊断。

CCTV 检测系统：即管道闭路电视检测系统，是目前管网检测中应用最广泛且直观高效的非开挖检测方法。该系统由轮式/履带式爬行机器人、高分辨率摄像单元、线缆盘和智能控制终端组成，其中摄像单元配备可360°旋转的镜头及专业照明装置；检测时，爬行器牵引摄像单元在管道内平稳行进，通过实时拍摄与精准定位捕捉管道内壁的裂缝、堵塞、腐蚀等缺陷，影像经通信电缆同步回传至控制端，供操作人员实时进行影像分析、缺陷标注及检测报告生成。该技术成像清晰、定位精准，可识别 $\geq 0.1\text{mm}$ 级的微小缺陷，不足在于检测前需对管道进行封堵、清淤及导流等预处理，耗时占检测总流程的大部分时间，难以满足排污溯源等高时效性场景的需求。

螺旋驱动式管道检测机器人：配备多轴云台摄像系统，可按需搭载声呐探测模块、

红外热成像仪及多参数水质传感器组。区别于传统轮式或履带式驱动方式，该机器人依靠双螺旋滚筒的旋转产生推进力，能在高淤积的泥水混合物环境或管径 $\geq 400\text{mm}$ 的管道中稳定行进，可同步获取水面/水下高清视频影像、水体与沉积物的声呐剖面、管道内壁红外热力图，实现管道结构状况与水体水质参数的同步检测。

履带式管道检测机器人：依托履带驱动系统行进，具备卓越的复杂环境适应性，可在半泥半水河道、雨污水管道、箱涵及暗渠等高淤积、复杂地形环境中稳定爬行。设备采用模块化设计，支持灵活搭载高清云台摄像系统、激光雷达、红外热成像仪、声呐探测模块、便携式水质传感器及机械波装置等多元传感设备，可实时获取水面高清视频影像、水体与沉积物的声呐剖面、管道内壁红外热力图，进而实现厘米级的管道空间定位、水质参数动态分析及管道结构缺陷精准识别。

水下检测机器人（管道潜航器）：具备150米深潜能力，搭载的三维声呐系统可实时精准测量前向距离与下向高度，结合距离/高度传感器、高功率照明系统及4K超高清摄像模块，能在黑暗、浑浊的水域中获取高质量影像，精准识别水下隐藏排污口。该设备适用于河湖、城市排水管网、工业废水排放口等多种场景的污染源定位，可在满水管涵、箱涵及暗渠中有效检测管道错接、支管暗接等结构病害，同时实现淤泥淤积量的量化分析。

通过集成机械声波发射器与手持接收设备，基于峰值信号分析与图像圆解析法，可实现管道走向与埋深的厘米级测绘；其搭载的水质传感器能动态监测COD、氨氮、pH等核心水质参数，结合视觉识别技术完成污染溯源；发射的声波可穿透铸铁、PE/PVC非金属管、砼管等多种管道材质，与地面接收器协同配合，可精准确认管涵的空间位置[8,9]。

3.3 水质指纹溯源技术

水质指纹指水体中溶解性有机物（Dissolved Organic Matter, DOM）在特定激发波长照射下发射的特征荧光信号，通过将荧光强度以等高线形式投影于激发-发射波长坐标系，可形成三维荧光光谱（Excitation-Emission Matrix, EEM），这一独特的光谱特征即为水体的专属光学“指纹”。

由于工业生产、居民生活的污水排放来源不同,生产工艺、原料成分、使用品类存在显著差异,其排放污水中荧光溶解性有机物的组分与浓度也呈现出独特的特征,使得不同污染源的水样形成专属、可区分的三维荧光光谱。通过将排污口水样的三维荧光光谱与污染源数据库中的光谱特征进行比对匹配,可精准识别疑似污染来源。

该技术具备高选择性、操作简捷、检测快速的显著优势,无需复杂的样品前处理,可快速突破传统溯源技术的盲区,实现入河排污口污染来源的快速锁定,是适配现场执法、应急溯源等时效性要求较高场景的核心溯源技术之一。

3.4 无人船暗管探测技术

无人船暗管探测技术以小型智能船体为平台,集成三维声呐成像系统、激光扫描仪及高清摄像模块,构建起针对复杂水域的自动化、一体化探测体系,可实现水下排污口的精准定位与可视化分析。其核心技术原理为通过声呐发射声波并接收分析反射信号,实现对水下障碍物的厘米级精准定位,暗管坐标定位误差 <0.5 米;同时结合激光扫描与光学成像技术,实时生成河床三维模型与水下管状结构的高清影像,直观、清晰呈现暗管的形态、空间位置及结构缺陷细节。

该技术的核心应用价值在于破解了水位遮蔽型排污口的排查难题,针对传统人工手段难以发现的水下隐藏排污口,可对疑似河段实施重点、反复扫描,快速标记水下排污口的精准位置并逆向追溯污染源头,将传统依赖人工经验推断的“盲猜”式溯源模式,升级为基于可视化数据的实证监管模式,显著提升入河排污口的排查效率与环境执法的精准性[10,11]。

4. 结论

第一,入河排污口的污染效应需实施系统性、差异化防控。入河排污口带来的工业排污口重金属毒性危害、农业排污口氮磷引发的富营养化、生活污水排污口的病原体传播风险等六大方面环境影响,凸显出排污口作为水生态环境治理瓶颈的脆弱性特征。尤其在经济密集区域,各类排污口交织分布、类型混杂,需通过分类整治手段对排污口实施依法取缔、清理合并、规范整治等差异化处理,并配套建设水质流量实时监控的在线监测体系,从源头降低排污口带来的结构性环境风险。

第二,多维度精准溯源技术有效突破传统溯源工作的技术盲区与实践瓶颈。水质荧光指纹技术通过三维荧光光谱匹配溶解性有机物的特征信号,实现污染源的快速锁定,该技术选择性高,有效规避了传统化学溯源技术时效性滞后的问题;智能探测装备协同形成全空间探测能力,无人船暗管探测技术的声呐定位(坐标定位误差 <0.5 米)与三维建模功能可精准绘制水下暗管网络,水下检测机器人凭借4K超高清影像实现满水管涵结构病害的精准识别,无人机遥感技术依托多光谱感知完成水质参数的动态分析,三类装备协同形成“空-水-底”全空间覆盖的探测体系;多技术集成实现溯源效能质的提升,融合声呐、激光扫描、荧光指纹等技术获取的多源数据,推动入河排污口溯源工作从经验推断向实证监管转型,显著提升环境执法的精准性,可有效完成暗管偷排等违法行为的证据固定。

第三,入河排污口的智慧化、精细化管理是未来水生态环境治理工作的核心方向。需进一步整合立体排查技术(无人机遥感、无人船探测、红外遥感)、多维溯源技术(同位素解析、荧光指纹)及动态监管技术(在线管理平台、人工智能预警)形成完整技术链,构建针对入河排污口的“一口一策”闭环治理体系。同时,需持续拓展微塑料、抗生素等新兴污染物的指纹数据库,不断强化溯源技术的普适性与适用性,完善技术标准与应用规范,为实现“精准治污、科学治污、依法治污,建设美丽河湖”的生态环境治理目标提供长效、稳定的技术支撑。

参考文献

- [1]倪金萍.简述基于遥感技术监测入河排污口污染物对水质的影响及其生态效应[J].皮革制作与环保科技, 2025, 6(23): 170-172.
- [2]赵洪满,颜秉超,刘克文,等.饮马河入河排污口对接纳水体水质的影响研究[J].吉林地质, 2023, 42(04): 62-66.
- [3]杨光.入河排污口水环境污染治理技术探究[J].黑龙江环境通报, 2025, 38(10): 89-91.
- [4]马艳冰,王琳琳,姚瑞.无人机遥感技术在入河排污口核查中的应用解析[C]//河海大学,福建省幸福河湖促进会,福建省水利学会.2022(第十届)中国水利信息化技

- 术论坛论文集.淮委通信总站;淮委水文局(信息中心), 2022: 467-479.
- [5]李响, 庞禹, 郭翔, 等.城市排水管道检测与修复机器人研究[J].建筑机械化, 2025, 46(12): 193-197.
- [6]洪都, 郭贤, 毛国华, 等.管道检测机器人关键技术现状及展望[J/OL].机床与液压, 1-13[2026-02-15].
- [7]田爱雨, 吴旭东.机器人技术在流域入河(湖)排污口排查溯源中的应用研究[J].生态与资源, 2025, (04): 139-141.
- [8]王万斌, 韩人杰, 刘明涛.非开挖检测技术在入河排污口排查溯源工程中的应用[J].地质装备, 2024, 25(S1): 115-120.
- [9]覃新元, 雷宗辉, 陈俊, 等.排水管道不停运的数字化服务成套技术实现和示范[J].中国给水排水, 2023, 39(02): 94-99.
- [10]江雨蒙, 逢勇, 马秋霞, 等.基于 EFDC 的排污口设置对淮河入海水道水环境影响研究[J].环境科技, 2023, 36(05): 7-12+45.
- [11]高超, 张吉臣, 贾晓君, 等.美丽中国建设背景下的入河(海)排污口监管机制探究[J].中国环保产业, 2023, (09): 35-37+40.