

城市黑臭水体形成机制与综合治理技术研究

杨秀娟

辽宁昌鑫环境工程咨询有限公司 辽宁 沈阳 110000

摘要: 城市黑臭水体主要由外源污染输入(如工业废水、生活污水直排及面源污染)与内源污染释放(底泥中污染物再悬浮)共同作用形成,水动力停滞、水温升高加剧厌氧环境,导致硫化氢、甲烷等致黑致臭气体及金属硫化物(FeS、MnS)生成。综合治理需控源截污、清淤疏浚、水质净化、水动力改善及生态修复多措并举,结合物联网监测与公众参与机制,实现长效管理。

关键词: 城市黑臭水体;形成机制;综合治理技术

引言:城市化高速推进下,城市水体污染问题愈发严峻,黑臭水体成为阻碍城市可持续发展的关键生态障碍。它不仅严重破坏城市景观风貌,降低居民生活幸福感,更对生态环境和人体健康构成潜在威胁。其形成是自然过程与人为活动交织的结果,涉及外源污染输入、内源污染释放、水动力条件变化等多方面。深入探究其形成机制并探索有效治理技术,对改善城市水环境意义重大。

1 城市黑臭水体形成机制

1.1 外源污染输入机制

(1) 点源污染: 工业生产过程中产生的化工废水、印染废水等未达标直接排入河道,携带高浓度有毒有害物质;生活污水管网因年久失修出现渗漏,污水渗入周边水体;合流制溢流污染(CSO)在降雨时段,大量混有雨水的污水短时间集中排放,远超水体自净能力,形成突发性污染冲击。(2) 面源污染: 初期雨水冲刷城市道路、建筑屋面,携带泥沙、油污、垃圾碎屑等污染物汇入水体;城郊畜禽养殖散户的废水未经处理随意排放,带来大量氮、磷营养盐;农田地表径流携带残留的化肥、农药,以及自然区域地表径流冲刷的腐殖质等,持续为水体输入污染负荷。(3) 非常规水源污染: 钢铁、电力等行业的高温工业冷却水直接排入河道,改变水体温度平衡;再生水补给河道时,其中含有的溶解性有机物(DOM)等难降解成分,无法被水体微生物快速分解,长期积累后破坏水质稳定性^[1]。

1.2 内源污染释放机制

(1) 底泥污染: 河道底部沉积物长期富集各类污染物,包括未分解的有机质、吸附的重金属及沉积的营养盐,在水体厌氧环境下,这些污染物通过扩散、悬浮等方式重新释放到上覆水体,形成“二次污染”,成为水体污染的持久来源。(2) 生物污染: 水体中氮磷等营养

盐过量导致藻类疯狂繁殖,形成水华,藻类死亡后分解过程中消耗大量溶解氧,同时产生异味物质;水生植物残体在厌氧条件下腐烂降解,释放出硫化氢、胺类等致黑致臭物质,加剧水体黑臭程度。

1.3 水动力与热力学条件

(1) 水流停滞: 城市河道为满足防洪、航运等需求建设的闸坝,以及河道渠化改造,导致水流速度显著减缓甚至停滞,水体复氧能力急剧下降,无法通过水体流动稀释污染物,逐步形成厌氧环境。(2) 水温升高: 工业热污染及夏季高温天气共同导致水温升高,高温环境会加速水体中微生物的代谢活动,使其大量消耗水体中的溶解氧(DO),进一步巩固厌氧环境,为黑臭物质的生成提供有利条件。

1.4 致黑致臭物质生成机理

(1) 化学过程: 在厌氧环境中,硫酸盐还原菌将硫酸盐还原生成硫化氢(H₂S),有机物厌氧发酵产生甲烷(CH₄),同时水体中的氨氮(NH₃-N)转化为氨气挥发,这些气体混合形成刺鼻恶臭。(2) 生物过程: 厌氧放线菌、蓝细菌等微生物代谢分泌土臭素(Geosmin)、2-甲基异茨醇(2-MIB)等物质,这类物质嗅觉阈值极低,即使微量存在也会产生强烈的土腥味、霉味。(3) 物理过程: 水流扰动或底泥缺氧上浮时,沉积物中的黑色悬浮物(如硫化亚铁FeS、硫化锰MnS)扩散至水体中,使水体呈现黑色,同时这些悬浮物吸附异味物质,增强黑臭的视觉与嗅觉感知。

2 城市黑臭水体综合治理技术体系

2.1 控源截污技术

(1) 工程措施: 作为污染防控的核心工程支撑,通过全域截污纳管改造,将沿线工业企业生产废水、城镇居民生活污水全面接入市政污水管网,配套建设污水提升泵站保障输送效率,从源头杜绝污水直排河道;针对

合流制管网区域,建设规模化合流制溢流调蓄池,在降雨高峰期暂存超量溢流污水,待降雨结束后再逐步输送至污水厂处理,避免短时间高负荷污染冲击水体;在城市道路、居民区、工业园区周边科学布设初期雨水截流井,精准拦截降雨初期携带泥沙、油污、重金属及有机物的污染雨水,经格栅、沉砂等预处理后接入污水系统,大幅降低面源污染输入负荷^[2]。(2)管理措施:以制度管控强化污染源头约束,全面推行排水许可制度,严格审核工业、餐饮、医疗等重点行业排水资质,对违规排水行为实施严厉惩戒;推进现有污水处理厂提标改造工程,升级处理工艺至MBR、MBBR等先进技术,将尾水排放标准提升至准Ⅳ类及以上,确保处理后污水进入水体后不引发二次污染;针对农业面源、城市地表径流等分散污染,构建植草沟、生态拦截带、前置库等生态设施,结合农田退水管控、畜禽养殖粪污资源化利用等措施,实现面源污染的分散式拦截与高效治理。

2.2 内源治理技术

(1)清淤疏浚:采用环保绞吸式清淤船搭配高精度定位系统,精准清除河道底部富集的污染底泥,作业过程中通过围隔防护减少底泥扩散造成的二次污染;对清淤产生的淤泥进行集中脱水固化处理,采用板框压滤、真空吸滤等技术降低淤泥含水率至60%以下,固化后经检测达标可资源化利用于制砖、路基回填、园林绿化基质等领域,实现底泥“减量化、无害化、资源化”处置,从根本上消除内源污染的持久隐患。(2)原位修复:针对污染程度较轻、不宜大规模清淤的河道区域,采用原位修复技术降低治理成本与环境扰动;通过定点投加特异性微生物菌剂(如反硝化菌、聚磷菌),利用微生物代谢作用分解底泥中的有机质、氮磷营养盐及难降解污染物;同步投放生物促生剂(如氨基酸、维生素、微量元素),激活底泥本土有益微生物群落活性,强化底泥自身自净能力,逐步改善底泥生态环境,实现内源污染的长效管控^[3]。

2.3 水质净化技术

(1)物理化学法:针对水体溶解氧匮乏、透明度低等问题,采用多样化人工曝气技术,如移动式曝气船、固定式曝气桩、太阳能曝气设备等,向水体高效充氧,快速改善厌氧环境,抑制黑臭物质生成;通过絮凝沉淀技术,投加聚合氯化铝、聚丙烯酰胺等环保型絮凝剂,使水体中悬浮污染物、胶体颗粒及部分溶解性污染物凝聚形成絮体沉降,显著提升水体透明度;应用磁分离技术,借助磁性载体吸附水体中的污染物,通过磁分离设备快速分离净化,处理效率可达90%以上,适用于突发性

水质污染的应急治理与常态化水质提升。(2)生态工程法:构建表面流、潜流等不同类型人工湿地,利用湿地基质(土壤、砂石、沸石)的吸附过滤作用、水生植物(芦苇、菖蒲、香蒲)的吸收转化作用及微生物的降解作用,实现水体中氮、磷、COD等污染物的深度净化;在河道表面布设生态浮岛,浮岛采用环保高分子材料搭建,种植美人蕉、鸢尾、水生鸢尾等水生植物,既通过植物根系吸收水体营养盐,又能遮挡阳光抑制藻类光合作用,同时为鸟类、昆虫提供栖息环境;构建“水下森林”生态系统,规模化种植苦草、黑藻、金鱼藻等沉水植物,通过沉水植物光合作用增氧,提升水体自净能力,重构水生生态基底。

2.4 水动力改善技术

(1)活水循环:实施跨区域引清调水工程,从水质优良的江、河、湖库引入清洁水源,通过专用输水通道置换黑臭水体,快速提升河道水质与水体流动性;建立闸坝联合调度机制,根据河道水文情势、水质状况动态调整闸坝开启幅度与时间,优化河道水流路径,打破局部水域水流停滞状态,增强水体循环交换能力;在封闭或半封闭河道、断头浜等区域,建设泵站循环系统,通过泵站抽排实现水体内部循环,提升水体复氧效率,改善局部厌氧环境^[4]。(2)生态补水:构建“再生水+雨洪水”双源生态补水体系,将城市污水处理厂达标尾水经深度处理后作为核心补水源,同时建设雨水集蓄设施收集雨洪水,经净化处理后补充河道;通过生态补水不仅有效解决河道枯水期水量不足问题,更能显著提升河道环境容量,增强水体稀释、净化污染物的能力,为水生生物生存繁衍和生态系统恢复创造有利的水量与水质条件,实现水资源的循环高效利用。

2.5 生态修复技术

(1)岸带修复:打破传统硬质护坡的生态阻隔,采用生态袋护坡、格宾网护坡、植被混凝土护坡等生态化改造技术,搭配种植垂柳、水杉、菖蒲等乡土水生、湿生植物,增强岸带结构稳定性,同时构建水陆交错的生态过渡带;在河岸周边道路、广场推广透水铺装材料,提升雨水入渗能力,减少地表径流冲刷,降低岸带侵蚀风险;沿河岸建设宽度不低于5米的植被缓冲带,种植狗牙根、结缕草等草本植物,拦截陆域面源污染,保护河岸生态系统完整性,为水生生物提供栖息、觅食、繁殖的优质环境。(2)食物链重构:基于生态平衡原理,科学投放鲢鱼、鳙鱼等滤食性食藻鱼类,通过生物捕食控制藻类过度繁殖,降低水体富营养化程度;构建“藻-虫-鱼-微生物”完整共生系统,引入浮游动物捕食藻类,

投放底栖生物改善底质环境,借助微生物分解有机污染物,通过生物之间的协同作用实现水体营养盐循环平衡;同时定期监测水体生物群落结构,动态调整生物投放种类与数量,提升生态系统稳定性与自我修复能力,促进水生生态系统向良性循环发展。

2.6 智能监测与长效管理

(1) 物联网技术:构建“空天地”一体化监测网络,在河道关键断面、排污口、水源地布设水质在线监测设备,实时采集溶解氧、COD、氨氮、总磷、浊度等核心指标数据,数据通过5G网络实时传输至管控平台;利用无人机搭载高清摄像头、水质传感器开展常态化河道巡查,快速发现偷排污水、河道垃圾、水华等问题,提升巡查效率与覆盖面;搭建大数据智能预警平台,整合监测数据、气象数据、水文数据,通过算法模型预测污染风险,提前发出预警信息,为治理决策、应急处置提供精准的数据支撑^[5]。(2) 公众参与机制:全面落实河长制,明确市、县、乡、村四级河长职责,建立“一河一策”治理与管护方案,定期开展河道巡查、问题督办与成效评估;组建专业化环保志愿者队伍,开展河道垃圾清理、生态监测、环保宣传等公益活动,搭建公众参与桥梁;建立治理效果公众满意度评价机制,通过线上问卷、现场走访等方式广泛收集公众意见,将评价结果纳入治理成效考核体系,形成“政府主导、部门协同、社会参与、公众监督”的长效管理格局,保障黑臭水体治理成果持续巩固。

3 城市黑臭水体治理的挑战与展望

3.1 现存挑战

(1) 技术层面:底泥资源化利用面临高成本瓶颈,清淤后底泥脱水固化、检测达标及资源化转化的全流程工艺复杂,设备投入与运营成本较高,制约规模化推广;面源污染控制受气象、地形等自然因素影响显著,初期雨水、农业径流等污染负荷波动大,现有生态拦截、调蓄设施难以实现稳定控污,导致治理效果易反复。(2) 管理层面:黑臭水体治理涉及环保、水利、住建等多个部门,当前缺乏高效跨部门协同机制,存在权责划分模糊、信息共享不畅等问题,影响治理效率;治理工程前期投入大且后期管护需持续资金支撑,现有资

金保障机制不完善,长效资金投入不足,难以维系治理成果的长期稳定。

3.2 未来方向

(1) 技术创新:推动纳米材料吸附技术研发与应用,利用纳米材料高比表面积特性,提升对水体中微量重金属、难降解有机物的吸附效率;研发基因工程菌,通过基因编辑技术定向强化微生物对特定污染物的降解能力,提高治理精准性与效率。(2) 模式创新:深化海绵城市与黑臭水体治理的协同设计,整合植草沟、雨水花园、下沉式绿地等海绵设施,实现雨水调蓄、面源污染拦截与水体生态修复的多元协同,提升治理系统性。(3) 政策创新:建立健全生态补偿机制,明确跨区域、跨流域治理的生态效益补偿标准,调动各方治理积极性;完善绿色金融支持政策,引导社会资本通过PPP项目参与治理,拓宽资金渠道,为治理工程的长效推进提供资金保障。

结束语

城市黑臭水体治理是系统性生态工程,需从污染溯源、技术集成到长效管理全链条发力。通过控源截污阻断外源输入、清淤修复消除内源隐患、生态修复重构水体自净能力,结合智能监测与公众参与机制,可实现黑臭水体动态清零与生态功能恢复。未来需持续突破底泥资源化利用等关键技术瓶颈,完善跨部门协同与生态补偿政策,推动治理模式向“源头防控-系统修复-智慧管护”转型,为城市水环境质量持续改善提供长效保障。

参考文献

- [1]曾林雯.城市内河流域黑臭水体治理技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(22):184-186.
- [2]宋一泉.城市黑臭水体治理的生物生态联合策略研究[J].皮革制作与环保科技,2025,6(13):126-128.
- [3]陈世勇.城市黑臭水体治理与水质长效改善措施研究[J].清洗世界,2025,41(08):73-75.
- [4]邵妍.城市黑臭水体治理中的生态工程措施及其经济性分析[J].清洗世界,2025,41(08):39-41.
- [5]刘惠珍.城市黑臭水体整治技术的核心思路分析[J].皮革制作与环保科技,2025,6(11):113-115.