

湿地生态系统修复过程中水体内源污染治理技术探究

张翰

安徽之信环境工程科技有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i7.3268

[摘要] 湿地生态系统是全球三大生态系统之一,在水质净化、生物多样性保护、气候调节等各方面都起着不可替代的作用。但是长期的外源污染物输入造成湿地水体底泥中氮、磷、有机质大量积累,形成严重的内源污染问题,变成制约湿地生态修复的瓶颈。本文对湿地水体内源污染的形成机制以及释放规律实行了整合,说明了内源污染治理正从单一的污染去除向“污染控制-生境修复-生态重建”协同治理方向发展,以底泥洗脱及底质改良为代表的原位修复技术因为有着污染削减和生境改良双重功能,有着广阔的应用前景。

[关键词] 湿地修复; 内源污染; 底泥治理; 底泥洗脱; 原位修复

中图分类号: X171.4 文献标识码: A

An exploration of waterborne endogenous pollution control technologies in wetland ecosystem restoration processes

Han Zhang

Anhui Zhixin Environmental Engineering Technology Co., Ltd.

[Abstract] As one of the three major ecosystems globally, wetland ecosystems play an irreplaceable ecological role in water purification, biodiversity maintenance, and climate regulation. However, long-term exogenous pollutant inputs have led to the accumulation of large amounts of nitrogen, phosphorus, and organic matter in the sediments of wetland water bodies, giving rise to severe endogenous pollution problems that have become a critical bottleneck constraining wetland ecological restoration. This paper systematically reviews the formation mechanisms and release patterns of endogenous pollution in wetland water bodies, and elaborates that the governance of endogenous pollution is evolving from a singular focus on pollutant removal toward a synergistic approach integrating "pollution control-habitat restoration-ecological reconstruction." In situ remediation technologies, represented by sediment washing and sediment quality improvement, demonstrate broad application prospects due to their dual functions of pollution reduction and habitat enhancement.

[Key words] wetland restoration; endogenous pollution; sediment treatment; sediment washing; in situ remediation

1 引言

湿地是陆地及水体的过渡地带,它有着独有的生态结构和功能,被誉为地球之肾。根据第三次全国国土调查数据可知,我国湿地面积一直保持在5635万公顷以上,囊括河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地、人工湿地、近海与海岸湿地等类型,形成了比较完善的湿地生态系统格局。但是,在经济社会快速发展及气候变化双重压力之下,湿地生态系统存在着面积缩减、水质变差、生物多样性减少等主要问题。湿地的水体污染一般分为外源污染以及内源污染两类。外源污染指借助地表径流、排污口等途径从外部输入的污染物,其治理思路比较明确,主要凭借截污、控源等手段来实现。内源污染指的是湿地水体底部沉积物中累积的污染物,在物理、化学或者生物作用下重新释放到水体中,造

成水质二次污染。由于内源污染有着隐蔽性强、释放持续性高、治理难度大等特点,已经变成目前湿地水体修复中亟待解决的重点难题。

2 湿地水体内源污染的形成机制

2.1 内源污染的物质构成与来源

湿地水体内源污染的物质基础主要是历史时期外源输入的累积。在自然状态下,湿地沉积物是由矿物颗粒、有机碎屑和生物残体组成的,有一定的自净能力。但是,在流域农业面源污染、城镇生活污水排放、水产养殖投饵等人类活动的影响下,大量的氮、磷营养盐以及有机物质伴随水流进入湿地水体,在水动力条件较差的区域沉降富集于底泥之中^[1]。从物质形态上讲,底泥中的内源污染物主要有以下几类,一是营养盐类,以总氮、总磷为

主,磷常与铁、铝、钙等金属元素融合形成不同的磷酸盐;二是有机质,主要是外源输入的有机物和水体初级生产力产生的有机碎屑;三是重金属及持久性有机污染物,在部分工业活动影响较大的湿地中比较明显。研究说明,底泥中氮磷的释放通量以及沉积物的粒径组成、有机质含量、氧化还原条件有关,细颗粒组分(粉砂、黏土)比表面积大、吸附能力强,是内源污染物的主要载体。

2. 2内源污染的释放机制与生态效应

底泥中积累的污染物不是静止不变的,而是在环境条件变化时,凭借各种途径重新进入水体,形成二次污染。释放过程主要是由物理扰动、化学转化、生物活动这三个因素所驱动的。物理释放机制上,风浪、水流冲刷、底栖生物的扰动活动可以将表层底泥再悬浮,携带污染物的细颗粒进入上覆水体,造成水体浊度上升、透明度下降。化学释放机制主要是浓度梯度驱动的分扩散,当底泥间隙水中溶解态营养盐浓度大于上覆水体时,氨氮、磷酸盐等物质就会沿着浓度梯度向上覆水迁移。溶解氧水平的变化对释放过程有重要的调控作用,在厌氧条件下,底泥中铁结合态磷被还原溶出,磷的释放量大大增加。内源污染的不持续释放会产生很大的生态效应。第一,释放的氮磷营养盐激化水体富营养化,造成藻类大量繁殖,使水体溶解氧消耗增加。第二,悬浮物浓度的增大会减少水下光照条件,抑制沉水植物的光合作用以及正常生长,沉水植物的衰退又会削弱水体的自净能力,形成污染加重、植被退化、自净能力下降的正反馈循环。所以内源污染的治理不能只考虑污染物的去除,还要考虑生境条件的改良和生态系统的恢复。

3 内源污染治理技术体系

3. 1物理修复技术

物理修复技术利用机械或者物理手段直接去除或者隔离底泥中的污染物,是应用最早、技术最成熟的一种内源治理方法。代表性技术有环保疏浚、底泥洗脱、包含掩蔽等。

环保疏浚是传统清淤技术的升级形态,其主要目的就是准确去除高污染表层底泥,最大限度地减少对下层底质的扰动和破坏。与工程清淤不同,环保疏浚对疏浚深度、范围、施工精度有严格要求,防止过度开挖破坏底栖生境或者造成污染物扩散。但是环保疏浚在实际应用中存在一些限制,其一,疏浚作业很难彻底清除胶体级细颗粒,而此类细颗粒是污染物富集的主要载体;其二,疏浚减少了湖床高程,增大了透深比(透明度以及水体深度之比),增大了沉水植物恢复的难度;其三,疏浚底泥的外运处置成本高,存在二次污染风险。

底泥洗脱是近几年来发展迅速的原位物理治理技术,是由中国专业研究院合肥物质专业研究院余增亮团队原创研发的,其基本原理是利用水力淘洗的方式将底泥中的胶体级细颗粒(有机质、氮磷等污染物)及无机大颗粒分开,准确去除悬浮物,增加水体透明度,同样建立稳定的泥水界面,为沉水植物的自然萌发创造适宜的生境条件。该技术的明显优点就是“洗留结合”,即在去除污染细颗粒的时候保留健康的原生底质以及底泥种子

库,为植被的自然恢复留有种源基础^[2]。

洪湖湿地生态修复试验是底泥洗脱技术在大中型浅水湖泊的首次工程化应用。洪湖是长江中游重要的调蓄湖泊以及生态屏障,由于过度养殖及水体污染,水质恶化到V类,沉水植被几乎灭绝。2024年11月中建三局和雷克环境在洪湖国家级自然保护区实行底泥洗脱及生态修复协同治理试验。经过一个季度的治理,试验区的菹草、野莲等原生沉水植物自然萌发,人工补种的苦草、眼子菜等先锋物种相继分蘖,植物覆盖率达到了80%以上。试验区湿生植被盖度由2023年的13.6%增加到32.5%,水质稳定保持在IV类,总磷浓度明显降低。该实例说明,底泥洗脱技术可以做到内源污染削减以及水体生境修复的协同耦合。

3. 2化学修复技术

化学修复技术是向底泥或者水体中投加化学药剂,改变污染物的赋存形态或者减少其生物效益,继而抑制内源污染的释放。代表性方法有原位钝化和化学氧化。原位钝化技术利用铝盐、铁盐、钙盐等钝化剂与底泥中活性磷融合,生成难溶性磷酸盐沉淀,将磷固定在底泥中,抑制磷向水体的释放。该技术在富营养化湖泊治理中应用较多,操作简单,见效快。但是钝化效果受底泥氧化还原条件、pH值等因素的影响,在厌氧环境下钝化产物会重新溶解,造成磷的二次释放。化学药剂的投加会对底栖生物群落造成不良影响,需要对生态风险实行慎重考虑。化学氧化技术主要针对底泥中的有机污染物,投加过氧化氢、高锰酸盐等氧化剂助推有机物的氧化降解。该技术适合于有机污染严重的局部区域,但是氧化过程会改变底泥的理化性质,成本较高,在湿地大范围应用受到限制^[3]。

3. 3生物修复技术

生物修复技术是利用植物、微生物或者底栖生物对污染物的吸收、转化、降解作用来到了内源污染削减的目的,是生态理念在污染治理中的集中体现。植物修复的核心就是利用水生植物(沉水植物)根系对底泥营养盐的吸收以及固定。恢复后的沉水植物群落一方面借助根系从底泥中吸收氮磷营养盐,另一方面凭借光合作用释放氧气,改良根际氧化还原条件,助推好氧微生物对有机质的分解,同样抑制底泥磷的厌氧释放。研究说明稳定的沉水植物群落可以明显降低底泥表层氮磷含量,借助根系固着作用减少底泥再悬浮。但是沉水植物的恢复受水体透明度、底质条件、营养盐负荷等众多因素的影响,在污染严重的湿地中很难自然定植,需要辅以生境改良措施。微生物修复就是投加特定功能菌株或者激活土著微生物群落,增加底泥中有机质及营养盐的分解转化。微生物制剂投入小、生态友好,但是修复效果受温度、溶解氧、pH等环境因子影响较大,在开放水体中长期性、稳定性还有待验证。

3. 4复合修复技术

由于单一的修复技术不能同时达到污染控制和生态恢复的双重目的,复合修复技术已经变成内源污染治理的主要方向。复合修复就是把物理、化学、生物技术有机地融合起来,形成污染削减、生境改良、生态恢复的协同治理链条。底泥洗脱和生态

修复相结合的形式是复合修复的代表。前文已经说明,底泥洗脱先去除污染细颗粒,增加水体透明度,为沉水植物恢复给出光照条件,沉水植物恢复以及群落建立后,利用植物的吸收固定及根系稳定作用,更深一步巩固底泥治理效果,形成“物理洗脱开路、生态修复固本”的技术路线。洪湖试验区的成功实践证明了该形式的可行性^[4]。底质改良+沉水植物恢复联合技术是从底泥生境条件改良入手。中国专业研究院水生生物研究所研发的底质改良和沉水植物恢复内源污染控制技术,借助在湖底铺撒天然粘土矿物底质改良材料(厚度1-10cm),减少底泥表层有机质及营养盐含量,在此基础上引种适宜的沉水植物物种,实现污染控制和生态恢复的协同。工程应用数据说明,湖泊修复区底泥表层(0-10cm)有机物、总氮、总磷去除率分别达到了55%、50%、50%以上,沉水植物成活率大于80%。中交集团自主研发的“基于底质改良和沉水植物恢复的湖泊污染底泥原位修复技术”同样使用“材料筛选-基底改良-湿地建立”的技术途径,在江夏七湖两港、宜昌沙河、雄安孝义河等工程中取得良好效果。

4 治理技术比较与适用性分析

四类内源污染治理技术在作用机理、治理效果、生态影响、适用条件等各方面各有侧重。物理修复技术见效快、污染物去除彻底,以底泥洗脱为代表的新型原位物理技术在污染削减以及生境改良方面有着独有优势;化学修复技术适合于某些污染类型的快速控制,但是生态安全性需要谨慎考虑;生物修复技术生态效益明显,但是修复周期较长,受环境条件的影响较大;复合修复技术融合效益最好,是将来的发展方向,但是对技术集成能力要求较高。

从适用条件上看,治理技术的选择要融合考虑以下因素,第一,湿地类型以及规模,大型浅水湖泊及小型封闭水体的治理方案不同;第二,污染特征,污染物种类、浓度、空间分布和释放通量;第三,生态敏感性,治理措施不能对珍稀物种和核心生境造成不可逆的影响;第四,修复目标,短期水质改良和长期生态恢复对技术路线的要求不同。

根据上述分析,本文提出内源污染治理的“三级递进”方针框架,第一层为应急控制,适用于污染突发或者生态风险较高的情况,可以采取物理疏浚、化学钝化等快速见效的措施;第二层

为生境改良,在污染负荷削减的基础上,凭借底泥洗脱、底质改良等技术改良水体透明度及底质条件;第三层为生态重建,在生境条件具备之后,借助沉水植物恢复、生物群落调控等手段建立自维持的生态系统。三个阶段可以按照实际情况实行压缩或者并行,但是不能跨越式推进,否则会造成生境条件不匹配而造成修复失败^[5]。

5 结论

经过对湿地水体内源污染治理技术的归纳以及分析可知,内源污染治理不是单纯的污染物清除,而是湿地生态系统结构以及功能的重建过程。物理、化学、生物及复合修复四类技术各有其适用边界,但是单一技术都很难同时到了污染削减和生态恢复的双重目的。以底泥洗脱以及底质改良为主的原位物理修复技术,由于有着污染物准确去除及生境条件改良的双重作用,已经变成连接短期治理和长期生态恢复的重要技术环节。复合修复形式靠着多种技术的时序耦合及功能协同,是内源污染治理由末端清理向生态调控转变的必然趋势。将来治理实践要遵循“准确诊断—分级治理—生态导向”的基本逻辑,根据湿地退化程度和污染特征制定不同的技术方案,助推内源污染治理由工程措施为主转向生态工程协同的融合途径。

【参考文献】

- [1]李希来,李志威,林春英.黄河源区高寒湿地水文过程与修复保护技术[M].化学工业出版社,2025.02.
- [2]王学雷,蔡晓斌,杨超,等.长江中游河湖湿地系统演变与生态修复[J].中国科学基金,2022,36(3):398-405.
- [3]吴桂玲,肖锋,邓艳芳,等.青海大学,不同退化高寒沼泽湿地碳氮磷组分特征与修复过程响应机理研究[Z].项目立项编号:2019-ZJ-7035.鉴定单位:青海大学.鉴定日期,2022-03-11.
- [4]李相逸,崔冬瑾,马超,等.基于鸟类生境修复与营造的湿地生态设计策略[J].中国园林,2020,36(5):133-138.
- [5]吴建强,黄沈发,王敏,等.水体污染生态工程控制修复技术与实践[M].中国环境出版集团,2019.12.

作者简介:

张翰(1988—),女,汉族,安徽合肥人,本科,中级工程师,研究方向:环境科学。