

# 黑臭水体治理技术研究进展

李慧颖<sup>1</sup> 晏波<sup>2</sup> 王文祥<sup>1</sup> 刘莹<sup>1</sup>

(1. 广东环境保护工程职业学院 广东佛山 528216 2. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室  
广东省环境资源利用与保护重点实验室 广东广州 510640)

**摘要** 城市河流黑臭水体已成为我国许多大、中城市共同存在的污染问题,探寻其治理技术具有非常重要的意义。对国内外河流综合整治策略进行研究分析,归纳总结了截污、底泥疏浚、引水工程、生态修复技术和化学生物技术等治理策略,为正在开展的城市黑臭河流综合整治提供参考。

**关键词** 黑臭水体;底泥疏浚;生态修复;治理技术

**Abstract** :The black odor of urban rivers has become a common pollution problem in many large and medium-sized cities in China. Seek treatment technology has a very important significance. This paper researches and analyzes domestic and international river comprehensive renovation strategies, summarizes treatment strategies such as sewage interception, sediment dredging, water diversion project, ecological restoration technology and chemical biological technology. Provide a meaningful reference for the ongoing comprehensive improvement of black and odor rivers in cities.

**Key words** :black and odor water body ;sediment dredging ;ecological restoration ;treatment technology

中图分类号 :X52 文献标识码 :A 文章编号 :1674-1021(2018)10-0030-06

## 1 引言

根据住建部“全国黑臭水体监测平台”数据显示,2016年12月,全国295座地级及以上城市中,有超过七成的城市存在黑臭水体,总认定数高达2 000多条,经济发达且水系更多的中东部地区,黑臭水体数量占比较大,中南区域和华东区域合计占比达71.9%。2015年国务院发布的《水污染防治行动计划》(以下简称“水十条”)中针对黑臭水体问题提出明确要求,到2020年,我国地级及以上城市建成区黑臭水体均控制在10%以内,直辖市、省会城市和计划单列市建成区要于2017年年底基本消除黑臭水体,到2030年,城市建成区黑臭水体总体要得

到消除<sup>[1]</sup>。

2018年5月生态环境部联合住房和城乡建设部启动2018年城市黑臭水体整治环境保护专项行动。目前大部分城市已开展黑臭水体污染监控和治理工作,但由于我国黑臭水体“存量”巨大,距“水十条”要求较远,其治理工作迫在眉睫。

本文基于国内外众多学者在黑臭水体方面的研究基础,对城市黑臭水体治理方法进行了概括,并对未来城市黑臭水体研究发展方向进行了讨论与展望。

## 2 河涌治理技术研究

### 2.1 截污

截至2017年5月,城市黑臭河涌仍有2 100条<sup>[2]</sup>。

收稿日期 2018-06-21;修订日期 2018-09-17。

作者简介 李慧颖,女,1984年生,讲师,工程师,硕士,主要从事黑臭水体治理研究。

基金项目 广州市科技局科学研究专项(20160702003);院长基金项目(KY201501003)。

以广州为例,其治水工作走过了漫长的一段时间,早期通过直接从污染的河涌拦截抽水实现截污,后期大规模建设截污管网和污水管网,实现雨污分流。2000年以来,广州建设的污水管网总计4500 km,使广州污水处理率提高到95%以上<sup>[3]</sup>,但与国内普遍情况相似的是,广州河涌水质仍没有得到显著的改善。这一现象说明污水处理率的大幅提高并没有从根本上解决黑臭河道治理工作在截污方面的短板,且并非某一城市的问题,而是普遍性问题。

杨永森<sup>[4]</sup>针对受上游村庄、城镇、农田等点源、面源污染的城市河道,采用截污与人工湿地净化协同的处理方法改善水质。设计截污能力为 $1.02 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,人工湿地处理能力为 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,人工湿地面积为45 hm<sup>2</sup>。经过截污与人工湿地净化协同作用,可基本实现水质净化目标,使其水质达到《地表水环境质量标准》(GB 383-2002)的Ⅲ类标准。

徐祖信等<sup>[5]</sup>提出了按水系截污、沿河截污与区域截污相结合、雨水泵站旱流污水截污的3项原则。对苏州河6条支流截污工程进行了优化调整,使截污效果得到大幅度的提高。实际纳管污染源数量由原计划的820个增加到2977个,实际截除污水量由原计划的6.8万 m<sup>3</sup>/d增加到26万 m<sup>3</sup>/d。6条支流区域的截污率由22%提高到85%以上。

姚学同等<sup>[6]</sup>对河南省淅川县城河道水体黑臭原因进行了分析,针对老城区现状排水体制提出了改进的污水截流系统,对沿河居民分散排污口和合流制排污口提出了不同的截污方案,该工程措施实施一年后,河道黑臭现象基本消除。

控源截污是城市黑臭水体整治的核心和前提。然而很多截污纳管设施的设置不合理、城市排水管网建设标准不一、管网错接或混接、运行维护不到位等一系列问题,使得控源截污工程难以高效发挥作用。深圳等地雨污分流工程的经验表明<sup>[7]</sup>,因排水管网管理水平不高等原因造成雨污混接现象严重。沙河涌截污工程竣工后,由于未定期进行维护与清疏,

而沿线截流式污水管的生活垃圾及合流管的泥沙甚多,使管道淤积严重,特别是部分倒虹管过河管道几乎全管淤积,导致过水断面大大减少,降低了污水输送能力<sup>[8]</sup>。

## 2.2 底泥疏浚

河涌由于长期污染且水流缓慢,导致积累大量淤泥。为防止底泥泛起,沉积的污染物质被释放出来而使水体变质、泛臭,需要进行必要的清淤工作。底泥疏浚是指用人或机械的方法把含有污染物质的表层沉积物进行适当清除,来减少底泥内源负荷和污染风险的方法。钟继承等<sup>[9]</sup>通过为期一年的疏浚模拟试验,在试验室培养疏浚与对照柱样,研究了底泥疏浚对内源磷释放的控制效果。结果发现,疏浚表层30 cm能够有效地削减沉积物中不同形态磷含量与孔隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量。

疏挖深度确定和疏挖形式的选取是底泥生态疏浚技术的核心内容。目前国外环保疏浚工程普遍采用RTK GPS定位技术,平面定位精度达到厘米级,挖深精度控制在5~10 cm<sup>[10-11]</sup>。2003年我国最大的水下清淤工程——天津海河河道综合开发河道清淤工程启动<sup>[12]</sup>。2007年底,上海市苏州河环境综合整治三期工程启动,苏州河市区段底泥疏浚工程也随之上马<sup>[13]</sup>。濮培民等<sup>[14]</sup>研究了南京玄武湖的疏浚效果,疏浚后底泥释放实验结果表明,营养盐溶液向水体的释放在疏浚后的短时段内有一定的效果,但在数月后底泥释放量就会恢复甚至超过原来的水平,或达到与新的水质相平衡的释放量。

底泥疏浚技术能否从根本上使水环境得到改善仍存在很大争议,底泥疏浚往往是耗资巨大且可以估量的工程项目,另一方面工程的环境后效却有可能存在不确定性,所以用于环境改善目标的疏浚作业是否符合投入产出的原则尚需要在疏浚工程实施前,对相关疏浚工程的后效进行认真的分析,对疏浚工程可能会带来的环境效应进行深入的研究。国内有些河道的疏浚效果不明显,除了疏浚条件不成熟

外,以工程疏浚来代替生态疏浚也是一个很重要的原因。我国底泥疏浚设备的研制落后,多采用常规疏浚设备,垂直精度只能控制在 20 cm 之内,与发达国家存在着较大的差距。

### 2.3 引水工程

引水释污法是通过稀释污染物和水的动力强化进行清污,见效快。黄永福<sup>[15]</sup>在污水量预测的基础上,进行福州市内河不同引水规模方案的冲污效果分析,当引水量达到 30~40 m<sup>3</sup>/s 时,黑臭指数为 3.01~5.09,表明可解决黑臭问题。但引水工程局限性也很大:一是要有临近的水源;二是容易引发下游的污染;三是长期使用需消耗大量的能源。如果结合海绵城市的“蓄、净、用”功能,就地引雨水池蓄水释污,提高水的含氧量,还是可以规避上述局限性的。

周广林<sup>[16]</sup>经过加压方式及线路走向的比选,从工程远近期结合、建成后运行费用、调度运行管理、工程占地、工程建设投资等方面进行综合比选,确定广州市西江引水工程线路布置方案,处理效果良好。

### 2.4 生态修复

河涌生态修复处理技术主要包括人工浮岛和水生植物处理系统等。人工浮岛是以水生植物群落为主体,利用物种间共生关系、水体空间生态位和营养生态位的原则,建立高效的人工生态系统,以削减水体中的污染负荷。该技术把水生植物或改良驯化的陆生植物移栽到水面浮岛上,植物通过根系吸收水体中的氮、磷等污染物质,从而达到净化水质的目的。人工浮岛技术能有效净化富营养化水体,改善景观,是今后污染河道修复的重点发展方向。广州均河涌生态恢复工程技术路线定位以强氧化曝气、浮岛

式复合生物滤床、岸基垂直流人工湿地等为主,结合底泥生物氧化、水体微生物修复、生态恢复等技术手段,使均河涌水体由乳白色乃至黑臭变为洁净好氧状态,透明度达到 30 cm 以上<sup>[17]</sup>。

水生植物处理系统是指利用河岸永久性植被拦截污染物或有害物质,包括缓冲湿地、草地和林带。植被缓冲带不仅可用于城镇河道,也可用于农村沟渠,是保护水质和恢复环境、改善环境的有效方法。刘钰滢<sup>[18]</sup>结合广州市河涌特性,分别提出适宜广州北部山溪性河涌、南部平原网河性河涌及城市密集区河涌的土工网垫植被复合型护坡、水生植物护岸、景观净污型混凝土组合砌块护岸等多种生态修复技术方法。实践证明,其所采用的生态修复技术是可行的,不仅能保证岸坡稳定和满足防洪排涝要求,同时对河涌景观和生态恢复也起到了良好的效果。

### 2.5 曝气充氧技术

曝气充氧技术是指在适当位置向河道水体进行人工曝气充氧,增强河道自净能力,消除黑臭现象。张绍君<sup>[19]</sup>系统地研究了快速纯氧曝气工艺用于消除东莞河道黑臭的工程效果,其在东莞市石排镇中心河涌的曝气复氧工程实验研究和连续运行结果表明,纯氧曝气能够大幅度地提高河流溶解氧至 20 mg/L 以上,水体色度可以降低至 20 倍以下,嗅阈值稳定在 5 以下,达到一般景观水体对色度和嗅味的标准。

### 2.6 化学及生物技术

化学处理方法及生物修复是一种原位治理技术,近年来已成为城市黑臭河道污染治理领域的研究焦点。国内外治理河涌所投加的化学、生物药剂情况见表 1。

表 1 国内外河涌治理药剂投加情况

序号	药剂类型	投加剂	作用	效果	文献来源
1	化学絮凝剂	含铝或含铁的无机絮凝剂、高分子絮凝剂	靠絮凝、混凝作用去除污染物,使水华生物发生混凝反应而沉淀	见效速度快,而且对水体污染物有明显的净化去除,但处理成本较大,且处理效果容易恢复原样,铁盐、铝盐的投加对水体色度及生物活性可以产生影响	[20-22]
2	化学除藻剂	CuSO <sub>4</sub> 和含铜有机螯合物	用来控制水体藻类生长,可作为应急措施应用在严重富营养化河流处理中	操作方便简单,除藻速度快,但没有将水体中含 N,P 元素的营养物质去除,同时,水生生物通过食物链对含铜物质进行富集,可能危害水生生物健康	[23]
3	化学稳定剂	石灰、硅酸钙炉渣、钢渣等	将水体 pH 值调节至 7~8,重金属与相关离子反应生成沉淀物,而不会以离子态或结合态进入水体中	消除水体黑臭速度快,但需大量化学药剂,成本高,且易引起二次污染	[24-26]
		氧化试剂(硝酸钙)	与底泥中的污染物质反应,通过抑制其污染物质向水体中释放来达到与水体营养物质保持平衡状态	有效抑制上覆水体中 TN、氨氮、TP 和磷酸盐浓度高峰期出现,但对 COD 浓度没有明显的作用	[27]
4	基质竞争抑制剂	硝酸盐、乙酸	通过加入硝酸盐等电子受体或共代谢基质,改变底泥微生物的代谢方式,提高氧化还原电位,促进好氧微生物的生长,从而使污染物通过好氧降解为水和二氧化碳等无害物质	投加硝酸盐等基质竞争抑制剂能刺激反硝化细菌(DNP)的生长,促进反硝化作用,另一方面减少硫酸盐还原菌(SRB)的生长,使 SRB 的活性降低,SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 还原成 H <sub>2</sub> S 的过程被抑制	[28-29]
5	微生物菌剂	XM 菌剂、液可清、固定化枯草芽孢杆菌、光合细菌 P9 等	依靠多种高效菌种的生长繁殖中的新陈代谢作用分解有机污染物	水体有机污染物与浊度都有较高的去除率	[30-34]
6	微生物促生剂	Bio-energizer	利用微生物促生技术、微生物解毒技术和小分子有机酸提炼技术,将矿物质、有机酸、酶、维生素和营养物质混合制成的生物制剂。通过向受污染水体中投加生物促生剂,可激活水体和底泥中原有的土著微生物,刺激其生长繁殖,使水体微生物菌落恢复正常的降解污染物能力	生物促生剂能通过激活微生物生长,从而对水体有较好的净化作用,同时增加了水体的溶解氧浓度和透明度	[35-38]
7	固定化生物催化剂	IBC 固定化生物催化剂	加速河涌底泥和上覆水体污染物的降解,丰富河涌底泥的微生物量,增强河涌自净能力	底泥有机质和硫化物的去除率分别为 77.03%和 92.58%,而对照组则为 37.90%和 75.34%	[39]

化学方法是指添加化学药剂和吸附剂改变水体的氧化还原电位、pH, 吸附沉淀水体中悬浮物质和有机质等,从而使污染物得以从底泥中分离,或降解转化成其他无毒的化学形态。混凝处理只是污染物转移,对有机物和氮的处理效果有限。化学方法的暂时效果最为明显,但是十分容易造成水体的二次污染,且使用成本较高,常作为一种协助技术或应急控

制技术。

生物技术包括原位生物修复技术和复合酶净化技术。原位生物修复技术是指向污染的水体中投加经过筛选的具有分解能力的菌种,降解过量的污染物。复合酶制剂是利用自然界存在的有机物和其他生物酶成分而制成的生物酶降解剂类产品,通过激活土著微生物,有效激发水体生态的内循环供氧机

制,促使水体中溶解氧的自然修复,进而有效去除污染物,有效控制污染物的扩散,使受损生态系统向良性生态系统演替。

### 2.7 面源污染控制技术

河涌污染很大一部分原因是面源污染,为了减少面源的排放,不管是合流制排水管还是雨水管,都需要建设初雨及溢流收集的调蓄池,对于没有空间条件建设的地方,可通过沿河道边或中间建设大排水通道调蓄池来达到调蓄池的功能。当需要对污水管道进行检查或维修时,也可借助大排水通道调蓄池来进行排水。目前广州为了解决这些初雨污染及溢流污染,分别建设了东濠涌深隧、石井河截污渠箱、马涌涌底渠箱等项目。另外一个控制面源污染的方法是采取海绵城市技术,通过提高地面的透水性能,增设雨水调蓄设施,鼓励加大雨水回用力度等,有效减少暴雨径流量并降低雨水径流中的污染物浓度,从而削弱对水体的影响<sup>[40]</sup>。

## 3 展望

### 3.1 综合整治

黑臭水体治理过程中须兼顾水质和生态环境,更重要的是改善河涌生态环境,消除底泥污染物,注重恢复其微生物生态系统,构建或恢复相对完整的生态群落。在治理黑臭水体时,利用单一技术很难将河涌水质改善,运用几种成熟技术,参考试验结果与过程,组合并完善后,形成一套行之有效的办法或手段。杨永森<sup>[4]</sup>采用截污与人工湿地净化协同的处理方法改善水质。姜万等<sup>[41]</sup>研究联合投加 CVE 和电子受体对底泥反硫化细菌的抑制和上覆水体 TP 去除的效果略优于单独投加 CVE。

### 3.2 智慧水务

智慧水务是指通过数采仪、无线网络、水质水压表等在线监测设备实时感知城市供排水系统的运行状态,并采用可视化的方式有机整合水务管理部门与供排水设施,形成“城市水务物联网”,是目前水务工作的发展方向<sup>[42]</sup>。通过对全流程供水量、排水量、

水质、水位、排水管口等的实时监控,掌握排水管网及设施的运行状态,实施有效的调度,达到控制污水溢流的目的,实现控源截污。

### 3.3 海绵城市

海绵城市和黑臭水体治理是当前我国新形势下城市建设与水环境治理的重大战略举措。径流污染控制、雨水调蓄利用系统、水生态保护是海绵城市和黑臭水体治理的共同建设需求,在项目建设中将二者有机结合,以此达到节约工程费用和充分发挥二者协同效益的目的。李骏飞等<sup>[43]</sup>结合鸭涌河综合治理工程,从雨水收集、调蓄、净化、利用,河涌清淤及水生态修复等方面,探讨了海绵城市与黑臭水体治理共同建设的途径。

## 参考文献

- [1] 国务院. 水污染防治行动计划[S]. 2015.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2016 年城乡建设统计公报[R]. 2017.
- [3] 魏忠庆. 排水系统截污纳管存在的问题及对策[J]. 中国给水排水, 2017(18): 14-16.
- [4] 杨永森. 城市河流截污与人工湿地净化实例[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(4): 341-346.
- [5] 徐祖信, 刘代玲. 苏州河 6 支流截污工程的优化调整[J]. 上海环境科学, 2003(4): 234-237, 289.
- [6] 姚学同, 孙成才, 陈利萍, 等. 南水北调源头城市黑臭水体治理截污工程案例[J]. 中国给水排水, 2017, 33(20): 96-99.
- [7] 曾思远, 龚煜翔, 刘乾. 深圳市排水管网系统管理现状、存在问题与对策研究[J]. 西南给排水, 2010, 32(3): 44-48.
- [8] 邱维, 汪传新, 阮小燕. 广州市河涌截污存在的问题及对策[J]. 中国给水排水, 2009, 25(2): 10-12.
- [9] 钟继承, 刘国锋, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应: 内源磷释放控制作用[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 84-93.
- [10] 李金贵, 李进军, 杨建华, 等. 污染底泥精确疏浚技术[J]. 中国港湾建设, 2004, 133(6): 11-14.
- [11] 李英杰, 胡小贞, 年跃刚, 等. 环保疏浚新疏挖工艺[J]. 中国农村水利水电, 2010(2): 13-16.
- [12] 张凤霞. 环保疏浚在我国的应用前景[J]. 中国水利, 2004(11): 23-25.

- [13]黄民生,徐亚同,戚仁海.苏州河污染支流——绥宁河生物修复试验研究[J].上海环境科学,2003,22(6):384-388.
- [14]濮培民,王国祥,胡春华,等.底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗[J].湖泊科学,2000,12(3):269-279.
- [15]黄永福.福州市内河引水规模及冲污效果分析[J].水利科技,1998(4):5-7.
- [16]周广林.广州市西江引水工程线路布置及比选设计[J].科技情报开发与经济,2010,20(19):186-188.
- [17]饶胜.生物及生态修复技术在河道整治工程中的应用[J].节水灌溉,2007(4):61-62.
- [18]刘钰灏.广州市河涌的生态修复技术研究[J].广东水利水电,2012(8):21-23,27.
- [19]张绍君.纯氧曝气快速消除河流黑臭工程效果及河道影响因素研究[D].北京:清华大学,2010.
- [20]连民,刘颖.氮、磷、铁、锌对铜绿微囊藻生长及产毒的影响[J].上海环境科学,2001,20(4):166-170.
- [21]崔蕴霞,肖锦.铝盐絮凝剂及其环境效应[J].环境污染与防治,1998,20(3):39-41.
- [22]陈静,郭慧光.滇池草海蓝藻清除应急药剂筛选现场试验研究[J].云南环境科学,1999,18(2):30-33.
- [23]邹琼,张筱鹏,鲜英.净水剂在滇池蓝藻清除部分应急工程中的应用[J].云南环境科学,2000,19(4):37-39.
- [24]徐颖.苏南地区航道底泥重金属污染评价和处置对策[J].环境保护科学,2001,27(5):33-34.
- [25]张嫦,吴莉莉,周小菊,等.过氧化钙的制备及其在废水处理中的应用[J].化工环保,2004,24(1):62-65.
- [26]孙颖.城市污水污泥中重金属的稳定化研究[D].南京:河海大学,2003.
- [27]赵振.氧化试剂(硝酸钙)控制黑臭底泥营养盐释放的效果研究[J].环境科技,2010,23(4):17-19,23.
- [28]Hitzman D O, Dennis M. New nitrate-based treatments control hydrogen sulfide in reservoirs: And in most cases, these microbes result in increased oil production[J]. World Oil, 2004, 225(11): 51-54.
- [29]Christof A, Friedhelm B, Ralf C. Competition for electron donors among nitrate reducers, ferric iron reducers, sulfate reducers, and methanogens in anoxic paddy soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19(1): 65-72.
- [30]马梅荣,王光玉,宣世伟,等.微生物菌剂对生活污水的除臭实验[J].环境科学与技术,2004,27(1):22-24.
- [31]邓柳,胡开林,王丽凤,等.西坝河生物修复工程试验研究[J].环境科学与技术,2006(7):100-102.
- [32]陈尚智.枯草芽孢杆菌的固定及其对微污染水体的净化研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [33]高丹英.黑臭水净化菌株的筛选及净水效果的研究[D].武汉:华中师范大学,2009.
- [34]吴光前,刘倩灵,周培国,等.固定化微生物技术净化黑臭水体和底泥技术[J].水处理技术,2008(6):26-29.
- [35]汪红军,胡菊香,吴生桂,等.生物复合酶污水净化剂处理黑臭水体的研究[J].水利渔业,2007,27(1):68-70.
- [36]王美敬.受污水体的沉水植物与生物促生剂的原位修复试验研究[D].成都:四川大学,2005.
- [37]张丽,李勇.底泥对投加生物促生剂改善河道水质效果的影响研究[J].江苏环境科技,2008,21(2):4-7.
- [38]卢丽君,孙远军,李小平,等.用生物促生剂修复受污染底泥的试验研究[J].环境科学导刊,2007(6):49-53.
- [39]何杰财.固定化生物催化剂在河涌黑臭治理中的效能研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [40]邹伟国.城市黑臭水体控源截污技术探讨[J].给水排水,2016(6):56-58.
- [41]姜万,李继洲,袁旭音,等.投加生物激活剂和电子受体修复黑臭底泥的研究[J].环境科技,2014,27(1):15-19.
- [42]杨明祥,蒋云钟,田雨,等.智慧水务建设需求探析[J].清华大学学报:自然科学版,2014,54(1):133-136,144.
- [43]李骏飞,杨磊三,周炜峙.海绵城市与黑臭水体治理共同建设途径探讨[J].中国给水排水,2016,32(24):35.