

Progress in Research on the Effect of Aeration Technology on Urban Black and Odorous Water Body

Wangting Hu^{1,2}, Yurui Li^{1,2}

¹School of Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

²State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Email: 1457776104@qq.com, 120341930@qq.com

Received: Aug. 28th, 2018; accepted: Sep. 10th, 2018; published: Sep. 17th, 2018

Abstract

The main sources of pollution for black and odor bodies are organic pollutants, thermal pollution, sediment re-suspension, etc. The lack of urban water circulation conditions is the hydrodynamic factor that causes black odor bodies in the city. From the formation mechanism of black and odor bodies of water, the blackening substances are mainly suspended particles, organic compounds with colored humus, and the odorants are mainly small molecular gases such as NH₃, H₂S, thioether compounds, and josso and 2-Dimethyl isodecyl alcohol and the like. Aeration technology has the advantages of less investment, quick effect and simple operation. Aeration can increase dissolved oxygen content in water, and can reduce COD, N, P and other indicators in water. This article focuses on reviewing and summarizing the characteristics and classification of aeration technology, the formation mechanism of black and odor water bodies, the effect of aeration and reoxygenation on the nutrients of overlying water bodies and sediments, and prospects for the future treatment of urban black and odor bodies.

Keywords

Aeration, Re-Oxygenation, Urban Black-and-Odor Water Body, Formation Mechanism, Influence Effect

曝气技术对城市黑臭水体的影响研究进展

胡汪婷^{1,2}, 李雨芮^{1,2}

¹成都理工大学环境学院, 四川 成都

²地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都

摘要

造成黑臭水体的主要污染源是有机污染物、热污染、底泥再悬浮等, 城市水循环条件不足是引起城市黑臭水体的水动力学因素。从黑臭水体的形成机理来看, 致黑物质主要是悬浮颗粒物、带色腐质类有机化合物, 致臭物质主要是 NH_3 、 H_2S 等小分子气体、硫醚类化合物和乔司脒和2-二甲基异茨醇等。曝气技术具有投资少、见效快、操作简单等优点, 曝气可增加水体中的溶解氧含量, 可降低水中的COD、N、P等指标。本文重点回顾和总结了曝气技术的特点和分类、黑臭水体的形成机理, 曝气复氧对上覆水体和底泥营养盐的影响, 并对未来治理城市黑臭水体作了展望。

关键词

曝气, 复氧, 城市黑臭水体, 形成机理, 影响效应

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 随着社会发展, 水体的污染问题越来越受到人们的关注。污染水体中化学需氧量 COD、N、P 等污染物浓度严重超标, 造成城市河道水体的富营养化, 直接造成季节性甚至终年的水体黑臭状况[1]。截止 2016 年, 全国 295 个地级以上城市黑臭水体总数为 2014 个, 城市水体普遍受到污染, 黑臭水体逐渐增多, 已严重影响了居民的生活质量[2], 有资料显示我国近 90% 的河流受到不同程度污染, 主要表现为水流停滞、水体缺氧、透明度较低, 甚至黑臭频发[3], 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; 到 2030 年, 城市建成区黑臭水体总体得到消除[4]。城市黑臭水体不仅给我国发展带来瓶颈, 还严重影响着生态系统结构失衡和人民群众的感官体验, 因此, 城市黑臭水体已成为目前突出的水环境问题。

当前, 国内外利用曝气复氧技术治理城市黑臭水体已取得一定成效。本文基于众多学者的研究, 通过大量文献调研和分析, 较系统地回顾和总结了城市黑臭水体形成原因及曝气技术对城市黑臭水体的影响相关研究, 并对未来研究方向和重点做了展望, 曝气与城市黑臭水体净化的关系可支撑未来相关水环境治理的研究。

2. 曝气技术概述

(一) 曝气复氧技术简介及基本原理

曝气复氧技术的研究在国外已经开展 40 余年, 在城市黑臭河道中的修复研究占有重要地位, 河道曝气技术治理污染河流在很多国家已优先被采用。河道曝气技术[5]是采用人工曝气弥补天然曝气的不足, 利用人工向水体中充入空气或氧气, 加速水体复氧过程, 以提高水体的溶解氧水平, 恢复和增强水体中

好氧微生物的活力, 减缓底泥释放磷的速度, 使水体中的污染物得以净化, 从而改善河流的水质。河水中溶解氧的含量是反映水体污染状态的一个重要指标, 受污染水体溶解氧浓度变化的过程反映了河流的自净过程, 溶解氧在河水自净过程中起着非常重要的作用, 水体的自净能力直接与曝气能力有关[6]。曝气充氧可以减缓底泥中磷的释放, 并氧化或降解表层底泥中的还原类物质; 从而使表层沉积物表层形成一个以兼性菌为主的环境, 促进好氧微生物的繁殖, 抑制厌氧微生物, 并对水体中有机物进行好氧降解, 并且逐渐提升水体的溶解氧水平, 增强水体的自净能力, 改善水体环境[7]。曝气复氧还可以通过进入河流水体中的溶解氧与产生黑臭的还原物质(H_2S 、 FeS 等)之间发生氧化还原反应, 从而有效地缓解或改善黑臭现象, 而且同时可以保证水体的好氧环境, 抑制厌氧微生物, 提高水体中好氧微生物的活性, 达到降解污染负荷的目的[8]。河道曝气复氧一般应用在以下两种情况: 第一种是在污水截流管道和污水处理厂建成之前, 为解决河道水体的有机污染问题而进行人工充氧, 如德国莱茵河支流河的情况; 第二种是在已经过治理的河道中设立人工曝气装置作为对付突发性河道污染的应急措施。突发性河道污染是指连续降雨时, 城市雨—污混合排水系统溢流, 或企业因发生突发性事故排放废水造成的污染。另外, 在夏季, 因水温较高, 有机物降解速率和耗氧速率加快, 也可能造成水体的溶解氧降低。以上两种情况发生后, 进行河道曝气复氧是恢复河道的生态环境和自净能力的有效措施[6] [9]。河道曝气复氧具有见效快、效果好、占地面积比较小、很低的设备投资、操作比较简单、能够处理的水量很大等优点, 且不存在二次污染, 其费用还不及能够达到相同处理效果的污水处理厂投资的 25%, 是一种投资少、见效快的治理污染河道技术[10] [11]。

(二) 曝气复氧技术分类

根据治理黑臭河道条件包括水深、流速、河道断面形状、周边环境条件等、污染源特征如长期污染负荷、冲击污染负荷等的不同, 河道曝气复氧的主要方式有鼓风—扩散曝气、水面转刷曝气、射流曝气和船载移动曝气等, 其目的在于提高污水的浓度, 加快水中污染物的分解、净化[12]。从工作原理上分为: 纯氧—微孔管曝气系统(BIOX 工艺)、鼓风机—微孔布气管曝气系统、叶轮吸气推流式曝气器、曝气复氧船、太阳能曝气机(Solar Bee)、水下射流曝气设备、叶轮式增氧机、长期低强度曝气方式以及其他各类结合微生物技术、植物净化技术、复加酶技术的组合生态修复技术[13]。表 1 显示了各种主要曝气充氧设备的主要特性比较[6] [14] [15]。

3. 城市黑臭水体成因分析

(一) 黑臭水体污染源

1) 外源污染

由于地区现状条件和污水管网截污不彻底等原因, 河道沿岸不断会有各种工业废水、生活污水、地表径流、垃圾等外源污染排入的现象, 使得河道污染负荷增加[16], 造成含有大量有机污染物废水直接排入水体。有机污染物主要包括有机碳污染源(化学需氧量 COD、生化需氧量 BOD)、有机氮污染物(氨氮)以及含磷化合物, 这些污染物主要来自废水、污水中的糖类、蛋白质、氨基酸、油脂等有机物的分解, 在分解过程中消耗大量的溶解氧, 加上大量动植物的呼吸作用, 使耗氧量进一步加大, 造成水体缺氧, 厌氧微生物大量繁殖并分解有机物产生大量致黑致臭物质, 从而引起水体发黑发臭。加上大多数有机物富集在水体表面形成有机物膜会破坏正常水气界面交换, 从而加剧水体发黑发臭[16] [17] [18] [19]。热污染也是造成城市河道黑臭的外源污染之一。城市热污染主要是大量较高温度的工业冷却水、污水处理厂退水以及居民生活污水等排入引起的, 导致局部甚至整个水体水温升高。水体中微生物在适宜水温下发生强烈的活动, 致使水体中的大量有机物分解, 降低溶解氧, 释放各种发臭物质。水体一般在夏季出现黑臭现象比在冬季显著增多, 主要原因是一方面微生物的活动频率与温度呈显著正相关性, 另一方

Table 1. Comparison of characteristics of aeration and oxygenation equipment
表 1. 曝气充氧设备的特性比较

曝气设备类型	组成	优点	缺点	适用范围
鼓风机-微孔布气管曝气系统	鼓风机 微孔布气管	氧转移速率较高	① 布气管安装工程量大, 维修困难, 对航运有一定的影响; ② 鼓风机占地面积大, 投资大, 运行噪声较大, 影响周围居民的生活	郊区不通航河道
纯氧-微孔布气管曝气系统	氧源 微孔布气管	① 不需建造专门的构筑物, 占地面积小; ② 系统无动力装置, 运行费用小, 运行可靠, 无噪声; ③ 安装方便, 不易堵塞; ④ 氧转移率高	对航运有一定的影响	不通航河道
纯氧-混流增氧系统	氧源水泵 混流器喷射器	① 氧转移率高; ② 可安置在河床近岸处, 对航运的影响较小	-	既可用于固定式充氧站, 也可用于移动式水上充氧平台
叶轮吸气推流式曝气器	电动机传动轴 进气通道叶轮	① 安装方便、调整灵活; ② 漂浮在水面, 受水位影响小; ③ 基本不占地; ④ 维修简单方便	① 叶轮易被堵塞缠绕; ② 影响航运; ③ 会在水面形成泡沫, 影响水体美观	不通航河道
水下射流曝气设备	潜水 水泵射器	① 安装方便; ② 基本不占地	维修较麻烦	不通航河道
叶轮式增氧机	叶轮浮筒 电机	① 安装方便; ② 基本不占地	① 产生噪音; ② 外表不美观	多用于渔业水体, 尤适用于较浅的水体

面水体中的溶解氧含量随着温度的升高而降低[20] [21]。有研究[22]表明, 水体温度低于 8℃和高于 35℃时, 放线菌分解有机物产生致黑致臭物质的活动受到影响, 一般不会产生黑臭, 而在 25℃时放线菌的繁殖达到最高, 水体的黑臭也达到最大。

2) 内源污染

底泥是城市水体的重要内源污染物, 在水力冲刷、人为扰动以及生物活动影响下, 引起沉积底泥再悬浮, 在一系列物理-化学-生物综合作用下, 吸附在底泥颗粒上的污染物与孔隙水发生交换, 从而向水体中释放污染物, 大量悬浮颗粒漂浮在水中, 导致水体发黑发臭, 另外大量底泥为微生物提供良好的生存空间, 其中放线菌和蓝藻通过代谢作用使得底泥甲烷化、反硝化, 导致底泥上浮及水体黑臭[23]。相关研究[24]表明, 太湖地区发生局部黑臭水体现象, 实地监测与资料分析表明局部黑臭水体形成区域分布与太湖底部淤泥集中区域位置基本一致, 并进一步指出, 湖泊中藻类大量繁殖后发生死亡沉降, 藻类有机质的大量堆积是底泥的主要成分, 也是形成局部黑臭水体的发生基础。

(二) 水动力条件

水动力学条件不足、水循环不畅是引起河道水体黑臭的原因之一, 如河道水量不足、流速低缓以及河道渠道化、硬质化等都有可能引起河道黑臭[25]。水循环与水污染过程紧密相连。城市水循环是水污染形成、迁移、转化等一系列过程的载体, 又是影响其动力学过程的因素之一[26]。水循环对水污染过程的作用主要从两方面体现: 一是人类活动改变了河流特征, 影响到污染物的迁移转化过程, 进而影响流域水环境状况。人工取用水量在一定程度上改变原有的水量分布, 减少区域中自然水循环通量, 同时耗水量的不断增加导致水体水量不足, 没有足够的水体水量稀释污染物, 黑臭现象易发; 二是污染物伴随水循环过程也发生着迁移转换, 水污染物在各水循环要素过程中会与环境中的其他物质及其自身相互反应, 在水循环较为缓慢时, 部分生成物又会对环境造成二次污染, 进一步降低水资源与水环境质量[27]。

(三) 黑臭水体形成的化学机理

1) 致黑机理

水体致黑原理主要有 2 种, 一种是以固态或吸附于悬浮颗粒上的形式存在于水体中的不溶性物质; 另一种是溶于水的带色腐殖质类有机化合物[28]。罗纪旦等[29]通过试验发现, 水体发黑与悬浮颗粒有直接联系, 悬浮颗粒中的致黑物质主要是腐殖酸和富里酸。近年来在太湖水域频发的“黑水团”是污染河道上覆水体和底泥中的带色有机化合物在厌氧条件下形成的黑褐色水团, 主要包含腐殖质和富里酸等物质[30]。应太林等[31]对苏州河水体黑臭进行研究, 通过沉淀分离、充氧及氧化还原点位测定等试验, 发现悬浮颗粒对水体致黑起到主导作用, 并指出悬浮颗粒中的腐殖酸和富里酸因吸附络合了 Fe、Mn 和 S 的化合物成为主要致黑化学物, 并证明了 Fe^{2+} 在致黑方面的主导作用。微生物作用下导致还原态铁由底泥向上覆水体扩散, 在硫酸盐还原菌等还原作用下, Fe^{2+} 和 H_2S 反应可生成 FeS 。 FeS 是黑色沉积物, 同时水体中微小的悬浮物质会吸附一部分, 而部分沉积于泥水界面的还会在厌氧分解产生的气体或气泡托浮作用下重新进入上覆水体, 再加上其他因素的协同作用, 使水体呈现黑色[32]。

2) 致臭机理

根据不同产臭途径和致臭物质, 城市河道致臭机理大致分为以下 3 种: a) H_2S 和 NH_3 等小分子气体。当水体遭受严重有机物质污染时, 有机物分解消耗水体中的溶解氧, 造成水体缺氧。在缺氧水体中, 产臭过程会与致黑同步, 有机物厌氧分解产生甲烷(CH_4)、硫化氢(H_2S)、氨(NH_3)等具有异味易挥发的小分子化合物, 溢出水面进入大气, 因而散发出臭味[27]。丁琦等[33]通过试验研究发现, 水体发臭主要为含硫、氮等有机物分解时逸出的 H_2S 和 NH_3 等所致。此外, 有机物在分解过程中还产生低碳脂肪酸及胺类等。b) 硫醚类化合物。通过对腐殖物质的分析, 从腐殖酸、富里酸的酸水解产物中得到的近 20 种氨基酸和大量游离氨, 这些氨基酸在水体中以脱氨基作用、脱羧酸作用以及某些细菌如变形杆菌分解含硫氨基酸, 在产生大量的游离氨臭气的同时, 也产生大量具有相当臭味的硫醚类化合物等导致水体发臭[34]。挥发性有机硫化物(volatile organic sulfur compounds, VOSCs)被证实为主要的致臭物质[35] [36]。试验研究[37] [38]发现, 甲硫醇(MeSH)、二甲基硫醚(DMS)、二甲基二硫醚(DMDS)、二甲基三硫醚(DMTS)以及二甲基四硫醚(DMTeS)是黑臭水体的主要致臭物质。c) 乔司脒和 2-二甲基异茨醇。当水体处于厌氧状态或营养盐相对较高时, 水体中存在大量放线菌、藻类和真菌, 其新陈代谢过程中会分泌多种醇类致臭物质[39]。土臭素是国内外研究中普遍认为导致水体发臭的主要物质之一, 包括乔司脒(Geosmin, $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}$) 和 2-二甲基异茨醇(2-MBI, $\text{C}_{11}\text{H}_{20}\text{O}$) [40]。Gerber [41] [42]于 20 世纪 40 年代先后从放线菌的发酵液中提取到乔司脒和 2-二甲基异茨醇, 因此, 放线菌最初被认为是臭味化合物的主要来源。随后, 人们的注意力转向藻类, 主要是蓝藻, 如颤藻(*Oscillatoria*)、旋藻(*Lyngbya*)、席藻(*Phormidium*)和鱼腥藻(*Anabaena*), 随后不断有学者证实一些真核藻类, 如硅藻也是乔司脒和 2-二甲基异茨醇的重要来源[43]-[48]。乔司脒和 2-MBI 在较低浓度情况下就能导致天然水体发臭, 其发臭阈值分别是 4 和 $9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [49]。

4. 曝气技术对城市黑臭水体的影响及应用实例

(一) 曝气复氧对黑臭河道上覆水体的影响

河水中溶解氧的含量是反映水体污染状态的一个重要指标, 受污染水体溶解氧浓度变化的过程反映了河流的自净过程, 对处于黑臭状态的河道进行人工曝气时, 充入的溶解氧可以迅速地氧化有机物厌氧降解时产生的 H_2S 、甲硫醇及 FeS 等致黑致臭物质, 有效地改善、缓解水体的黑臭程度[6]。肖羽堂[50]等利用曝气复氧技术对黑臭河涌进行原位修复时, 水体中溶解氧由 0 mg/L 变为 3.4 mg/L 左右, 水体透明度达到 35 cm 左右, 河涌水质明显得到改善, 水体的 pH 值由初始的酸性 5.0 提高到中性左右, 间接地说明了河涌水体逐步好转。王美丽[8]通过曝气对黑臭河道水体污染修复的影响研究, 人工曝气上覆水体

COD_{cr} 浓度变化趋势是先上升后下降, 人工曝气使底泥向上覆水体释放有机物速率加快, 好氧菌的活性快速增强, 数量快速增加, 随着曝气的进行, 上覆水体中 DO 浓度升高, 好氧菌活性增强, 加速了上覆水体 COD_{cr} 的降解, COD_{cr} 浓度由最大值 67.72 mg/L 降到 49.03 mg/L, COD_{cr} 浓度表现为下降趋势。上覆水体中氮的行为特征主要是通过 DO 的分布梯度决定的, 水体中的氨氮发生硝化作用生成亚硝氮和硝氮。陈玉霞[12]利用曝气复氧条件研究黑臭河道底泥内源氮的迁移转化, 当 DO 水平很高时, 硝化作用明显, 氨氮急剧下降, 后由于水体流速大, 扰动相应变大, 其底泥好氧速率(SOD)大, 氮的释放潜力大, 底泥向上覆水体中释放了大量的氨氮, 氨氮有所增加, 由于硝化作用使氨氮又逐渐下降, 并趋于稳定; 当 DO 水平较低时, 硝化作用不明显, 一开始上覆水体中氨氮有所上升, 随着曝气的进行, DO 逐步升高, 上覆水中氨氮下降, 并保持稳定, 其氨氮的变化率很小。

(二) 曝气复氧对黑臭河道底泥营养盐的影响效应

曝气复氧作为常用的黑臭河道治理方法, 对底泥内源营养盐迁移转化的影响具有双面性, 曝气扰动使得底泥大量悬浮于上覆水体中, 加速了底泥内源氮污染物的释放且有利于内源氮污染物的转化[51]。朱广伟等通过模拟水槽实验研究了波浪对太湖底泥再悬浮及氨氮释放的影响, 发现当模拟水槽波高达到和时, 浓度最高达到, 浓度最大增幅达到[52]。刘波等[53]采用水曝气和底泥曝气方式对黑臭河道水体氮素的迁移转化进行研究, 研究表明, 相比于静置组, 水曝气和底泥曝气均能有效削减上覆水、间隙水和底泥中的氮素, 其中底泥曝气削减效果最好, 其上覆水、间隙水中 NH₄⁺-N 浓度和底泥中 NH₄⁺-N 含量分别削减 72.74%、64.36%、58.73%; 水曝气和底泥曝气分别于第 9 d、16 d 启动硝化, 硝化启动较慢。He [54]研究了不同曝气扰动强度对黑臭河道底泥内源氮行为的影响, 发现雷诺数(Re)能较好地表征曝气扰动强度, 而曝气扰动与底泥内源氮的行为密切相关, 其中 Re 为 1810 时上覆水 TN 浓度最低(2.95 mg/L); 灰色关联度分析结果显示, Re 对 NH₄⁺-N 和 TN 的影响远高于 DO 和底泥耗氧速率(SOD)。与内源氮相似, 底泥内源磷的释放问题日益显著, 国内外利用人工曝气技术在河道治理工程上取得成功应用, 使得众多学者开始研究其对底泥内源磷行为的影响[55] [56] [57]。林建伟等[58]研究了曝气条件下底泥内源磷的释放规律, DO 浓度是底泥内源磷释放的重要影响因素, 厌氧不利于抑制底泥内源磷的释放, 若在曝气条件下 PH 值较高, 亦无法较好地抑制底泥内源磷的释放; 扰动造成的底泥再悬浮加速了底泥间隙水中磷的释放, 而上覆水中较高的 TP 浓度会促使上覆水 TP 向底泥中转移。冯海艳等[59]研究了上覆水 DO 水平对苏州竹辉河底泥内源磷的影响, 当上覆水处于厌氧状态时(DO < 0.50 mg/L), 内源磷加速释放; 而当上覆水处于好氧状态时(DO > 5.00 mg/L), 内源磷释放得到有效抑制, 因此, 提高 DO 水平是有效抑制底泥内源磷释放的措施。

5. 结语与展望

目前对黑臭河道的治理研究是一个十分活跃的研究领域, 曝气复氧技术对黑臭河道的影响研究也在不断发展, 研究表明, 曝气复氧技术对黑臭水体中的 N、P、DO 等指标都有影响, 但只利用曝气技术治理黑臭水体是远远不够的, 曝气技术与其他合理技术综合治理黑臭水体具有广阔的应用前景。曝气复氧技术可作为城市黑臭水体的前期处理, 在黑臭水体水质变化的不同时期应用曝气复氧技术处理后, 再与其他治理技术综合运用, 比如种植水生植物或生态浮床以达到消除黑臭、降低有机污染负荷的目的, 促进水生生态系统的恢复。

针对现阶段黑臭水体治理, 提出以下几点思路: 1) 强化责任落实; 要切实加强对流域水污染防治工作的领导, 将流域污染源治理任务纳入党政目标责任制管理和领导干部政绩考核指标体系。2) 强化联动机制; 坚持生产、生活、生态用水“三水共治”, 推进污水处理技术供给侧改革, 防止各类水体复黑返臭。3) 控制新污染源; 严格环境准入, 全面实行“河长制”管理制度, 探索技术服务承包责任制。4) 建

设具有环保功能的生态河滨带; 建设河道岸边步行道、绿化带和污水截污管网, 有效拦截初期雨水、生活垃圾对水体的污染和破坏。5) 黑臭水体生态修复; 建设集景观和去污功能的生态坡岸、多功能生态湿地系统、具环保功能的溢流坝系统, 提升生态水位, 去除污染物, 提高水体透明度, 营造水生植物光合作用环境。

参考文献

- [1] 赵颖, 陈珂, 张兰真, 邢昱, 孔海燕, 孙燕. 我国黑臭水体治理技术的研究进展[J]. 资源节约与环保, 2017(3): 25.
- [2] 张列宇, 王浩, 李国文, 熊瑛. 城市黑臭水体治理技术及其发展趋势[J]. 环境保护, 2017, 45(5): 62-65.
- [3] 张一璠. 曝气造流对城市黑臭河道内源营养盐行为的影响效应及其机制研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [4] The State Council (2015) Action Plan of Water Pollution Prevention, Beijing. (In Chinese)
- [5] 邹丛阳. 人工水力循环与曝气复氧技术改善苏州城市河道水质研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技学院, 2007.
- [6] 孙从军, 张明旭. 河道曝气技术在河流污染治理中的应用[J]. 环境保护, 2001(4): 12-14.
- [7] 徐续. 曝气复氧技术在苏州水环境质量改善中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2005(4).
- [8] 王美丽. 曝气对黑臭河道水体污染修复的影响研究[J]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2015(3).
- [9] 孙厚钧. 水体增氧技术是改城市河流湖泊水质的有效措施[J]. 北京水利, 2002(4): 35-36.
- [10] Mukhtar, S., Borhan, M.S., Rahman, S., *et al.* (2010) Evaluation of a Field-Scale Surface Aeration System in an Anaerobic Poultry Lagoon. *Applied Engineering in Agriculture*, **26**, 307-318. <https://doi.org/10.13031/2013.29546>
- [11] 湛伟, 李小平, 孙从军, 赵振. 低强度曝气技术修复河道黑臭水体的可行性研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 57-59.
- [12] 陈玉霞. 曝气复氧条件下黑臭河道底泥内源氮的迁移转化行为研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [13] 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]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2010.
- [14] 王瑟澜, 孙从军, 张明旭. 水体曝气复氧工程充氧量计算与设备选型[J]. 中国给水排水, 2004, 20(3): 63-66.
- [15] 徐续, 操家顺. 河道曝气技术在苏州地区河流污染治理中的应用[J]. 水资源保护, 2006, 22(1): 30-33.
- [16] 哈欢, 金鹏飞. 河道生态修复技术及其在上海市的实践[J]. 节水灌溉, 2009(7): 46-49.
- [17] Xu, M., Yao, R.-H., Song, L.-L., *et al.* (2015) Primary Exploration of General Plan of the Urban Black-Odor River Treatment in Chain. *Chinese Journal of Environmental Management*, **7**, 74-78. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.040>
- [18] Luo, M.-W. (1986) The Origin of the Black-Odor Water in Huangpu River. *Shanghai Environmental Sciences*, **5**, 37-38.
- [19] Zhao, Y., Yao, R.-H., Xu, M., *et al.* (2015) Study on the Practice and Route of Combating Urban Black and Malodorous Water Body. *Environment Protection*, **43**, 27-29.
- [20] Gao, J.H., Jia, J.J., Kettner, A.J., *et al.* (2014) Chinese in Water and Sediment Exchange between the Changjiang River and Poyang Lake under Natural and Anthropogenic Conditions, China. *Science of the Total Environment*, **481**, 542-553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.087>
- [21] Xiao, L., Zhao, W.-T., Luan, J.-S., *et al.* (2014) River on Black-Odor Prediction Models and Pollution Control Technology for Urban River. *Journal of Anhui Agricultural Science*, **42**, 9116-9120.
- [22] Wood, S., Williams, S.T., White, W.R., *et al.* (1983) Factors Influencing Geosmin Production by a Streptomycete and Their Relevance to the Occurrence of Earthy Taints in Reservoirs.
- [23] Chen, J., Xie, P., Ma, Z.M., *et al.* (2010) A Systematic Study on Spatial and Seasonal Patterns of Eight Taste and Odor Compounds with Relation to Various Biotic and Abiotic Parameters in Gonghu Bay of Lake Taibu. *Science of the Total Environment*, **409**, 314-325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.010>
- [24] Lu, G.-H. and Ma, Q. (2009) Analysis on the Cause of Forming Black Water Cluster in Taihu Lake. *Advance in Water Science*, **20**, 438-442.
- [25] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 潘涛. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4):

1331-1340.

- [26] Wang, H., Yan, D.-H., Xiao, W.-H., *et al.* (2012) Total Quantity Control of Water Pollutions Based on Watershed Hydrological Cycle: Theory, Method and Application. China Water and Power Press, Beijing.
- [27] 芮正琴. 充气复氧条件下微生物与植物残体添加对黑臭水体净化效果的比较分析[J]. 南京大学, 2017(9).
- [28] Yu, Y.-B. and Huang, Y. (2010) Review of Reason and Mechanism of Black and Stink in Urban Rivers. *Environmental Science and Technology*, **23**, 113-114.
- [29] Luo, J.-D. and Fang, B.-R. (1983) Research on Black-Odor Issue of Huangpu River. *Shanghai Environmental Sciences*, **2**, 6-8.
- [30] 刘国锋, 何俊, 范成新, 张雷, 申秋实, 钟继承, 严少华. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面处 Fe、Mn、S 循环影响[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2652-2660.
- [31] Ying, T.-L., Zhang, G.-Y. and Wu, R.-R. (1997) The Mechanism of Blackening and Stink and Effects of Resuspended Sediments on Suzhou Creek Water Body. *Shanghai Environmental Sciences*, **16**, 23-26.
- [32] 陈玲, 张晟, 顾礼明, 金玉, 翟康, 张健, 夏世斌. 城市滞流河道黑臭发生及控制研究[J]. 环境科学与技术, 2012(8): 181-186+194.
- [33] Ding, Q., Tang, L.-H. and Xie, D. (2012) Forming Mechanism of Black-Odor of a Campus Lake. *Industrial Water and Wastewater*, **43**, 28-30.
- [34] Li, X.-L., Zhang, P.-C. and Yu, H.-C. (2003) Analysis on Black Color and Odor of Weigong River in Shenyang. *Environmental Protection Science*, **29**, 27-28.
- [35] Kiene, R.P. and Hines, M.E. (1995) Microbial Formation of Dimethyl Sulfide in Anoxic Sphagnum Peat. *Applied and Environmental Microbiology*, **61**, 2720-2726.
- [36] Kiene, R.P. and Linn, L.J. (2000f) The Fate of Dissolved Dimethylsulfio-Nioproponate (DMSP) in Seawater: Tracer Studies Using ³⁵S-DMSP. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 2797-2810. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00399-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00399-9)
- [37] Bentley, R. and Chasteen, T.G. (2004) Environment VOSCs: Formation and Degradation of Dimethyl Sulfide, Methanethiol and Related Materials. *Chemosphere*, **55**, 291-317. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.12.017>
- [38] Lu, X., Fan, C.X., He, W., *et al.* (2013) Sulfur-Containing Amino Acid Methionine as the Precursor of Volatile Organic Sulfur Compounds in Algae-Induced Black Bloom. *Journal of Environmental Science*, **25**, 33-43. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60019-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60019-9)
- [39] Parinet, J., Rodriguez, M.J. and Serodes, J. (2010) Influence of Water Quality on the Presence of Off-Flavour Compounds (Geosmin and 2-Methylisoborneol). *Water Research*, **44**, 5847-5856. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.070>
- [40] Dionigi, C.P., Lawlor, T.E., McFarland, J.E., *et al.* (1993) Evaluation of Geosmin and 2-Methylisoborneol on the Histidine Dependence of TA98 and TA100 Salmonella Typhimurium Tester Strains. *Water Research*, **27**, 1615-1618. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(93\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0043-1354(93)90125-2)
- [41] Gerber, N.N. (1969) A Volatile Metabolite of Actinomycetes, 2-Methylisoborneol. *Journal of Antibiotics*, **22**, 508-509. <https://doi.org/10.7164/antibiotics.22.508>
- [42] Gerber, N.N. (1968) Geosmin from Microorganisms, Istrans-1,10-dimethyl-Trans-9-decalol. *Tetrahedron Letters*, **25**, 2971-2974. [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(00\)89625-2](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(00)89625-2)
- [43] Gerber, N.N. and Lechevalier, H.A. (1965) Geosmin, an Earthy-Smelling Substance Isolated from Actinomycetes. *Applied Microbiology*, **13**, 935-937.
- [44] Gerber, N.N. (1967) Geosimin, an Earthy-Smelling Substance Isolated from Actinomycetes. *Biotechnology and Bioengineering*, **9**, 321-327. <https://doi.org/10.1002/bit.260090305>
- [45] Tabachck, J.L. and Yurkowski, M. (1976) Isolation and Identification of Blue Green Algae Producing Musty Odor Metabolites, Geosmin and 2-Methylisoborneol in Saline Lakes in Manitoba. *Journal of Fisheries Research Board of Canada*, **33**, 25-35. <https://doi.org/10.1139/f76-004>
- [46] Tsuchiya, Y., Matsumoto, A. and Okamoto, T. (1978) Volatile Metabolites Produced by Actinomycetes, Isolated from Lake Tairo at Miyakejima. *Yakugaku Zasshi*, **98**, 454-550. https://doi.org/10.1248/yakushi1947.98.4_545
- [47] Sugiura, N., Yagi, O. and Sudo, R. (1983) Effect of Various Environmental Factors in Musty Odor Production by Actinomycetes (Streptomyces). *Japanese Journal of Water Pollution Research*, **6**, 77-86. <https://doi.org/10.2965/jswe1978.6.77>
- [48] Sugiura, N., Yagi, O. and Sudo, R. (1986) Musty Odor Blue Green Algae, *Phormidium tenue*, in Lake Kasumigaura. *Environmental Science and Technology Letters*, **7**, 77-86. <https://doi.org/10.1080/09593338609384393>

- [49] Pirbazari, M., Ravindran, V., Badriyha, B.N., *et al.* (1993) GAC Absorber Design Protocol for the Removal of Off-Flavors. *Water Research*, **27**, 1153-1166. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(93\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(93)90007-5)
- [50] 肖羽堂, 王艳杰, 吴玉丽, 曾楚雯, 郑伟明. 好氧-富氧曝气生物处理在黑臭河涌原位修复中的应用[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2780-2784.
- [51] 何岩, 沈叔云, 黄民生, 张博, 姚丽平, 刘雨芳. 城市黑臭河道底泥内源氮硝化-反硝化作用研究[J]. 生态环境学报, 2012(6): 1166-1170.
- [52] 朱广伟, 秦伯强, 张路, 罗淑葱, 孙小静, 洪大林, 高亚军, 谢瑞. 太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 61-68.
- [53] 刘波, 王国祥, 王凤贺, 杜旭, 凌芬, 夏劲. 不同曝气方式对城市重污染河道水体氮素迁移与转化的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 2971-2978.
- [54] He, Y., Chen, Y., Zhang, Y., *et al.* (2013) Role of Aerated Turbulence in the Fate of Endogenous Nitrogen from Malodorous River Sediments. *Environmental Engineering Science*, **30**, 11-16. <https://doi.org/10.1089/ees.2011.0538>
- [55] 李勇, 李大鹏, 黄勇, 李新. 曝气对重污染河道底泥吸收和滞留磷的影响[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, 28(3): 388-392.
- [56] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 曝气预处理强化底泥对磷的吸附效果研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(19): 23-26.
- [57] 徐礼强, 杨芳, 罗欢, 张苑龙, 李召旭. 曝气复氧对华南农村重污染河道底泥氮磷的作用机制研究[J]. 人民珠江, 2014(6): 116-118.
- [58] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 曝气复氧对富营养化水体底泥氮磷释放的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 812-815.
- [59] 冯海艳, 李文霞, 杨忠芳, 阮晓红. 上覆水溶解氧水平对苏州城市河道底泥吸附/释放磷影响的研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 227-234.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-8010, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: wpt@hanspub.org