

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.11.004

# 微纳米曝气对黑臭水体底泥减量及气溶胶产生的影响

张 锐<sup>1,2</sup>, 王 怡<sup>1,2</sup>, 张 倩<sup>1,2</sup>, 赵慧莹<sup>1,2</sup>, 赵子异<sup>1,2</sup>, 崔海航<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学  
西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学  
建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 微纳米曝气是治理黑臭水体的主要方法之一,但目前关于其对底泥减量和气溶胶产生的影响研究有限。为此,以普通曝气与微纳米曝气作为对比,研究了微纳米曝气对黑臭水体底泥减量及气溶胶产生的影响。结果表明,微纳米曝气处理后,有机酸基团和可溶性微生物代谢产物基团成为间隙水中荧光性有机物的主要成分,同时底泥中值粒径减小,有利于后续的减量处理。与普通曝气相比,微纳米曝气对底泥中挥发性固体(VS)和总固体(TS)的去除效果较好,去除率分别为38.88%和27.72%,可实现底泥的原位减量。此外,微纳米曝气组的PM<sub>2.5</sub>质量浓度和碳质气溶胶浓度均低于普通曝气组。因此,微纳米曝气用于黑臭水体治理时具有提高底泥减量效率和有效控制气溶胶产生的潜力。

**关键词:** 微纳米曝气; 黑臭水体; 底泥减量; 气溶胶

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0019-05

## Effect of Micro-nano Aeration on Reduction and Aerosol Generation of Sediment in the Black-odorous Water

ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, WANG Yi<sup>1,2</sup>, ZHANG Qian<sup>1,2</sup>, ZHAO Hui-ying<sup>1,2</sup>, ZHAO Zi-yi<sup>1,2</sup>,  
CUI Hai-hang<sup>3</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Northwest China Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
3. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Micro-nano aeration is one of the main methods to control black-odorous water bodies, but there are limited studies on the effects of aeration on sediment reduction and aerosol generation. In this study, the effects of micro-nano aeration on sediment reduction and aerosol generation in black-odorous water were investigated by comparing ordinary aeration and micro-nano aeration. The results showed that the organic acid groups and soluble metabolite groups in the sediment became the main components of fluorescent organic matter in the pore water after micro-nano aeration treatment, and the median particle size of the sediment was reduced, which was conducive to the subsequent reduction

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52170172); 陕西省重点产业创新链(群)项目(2021ZDLSF05-04)

通信作者: 王怡 E-mail: wangyi1003@sina.com

treatment. Micro-nano aeration had the best effect on the removal of volatile solids (VS) and total solids (TS) in the sediment. The removal rate of VS and TS was 38.88% and 27.72% respectively, which could realize the in-situ reduction of sediment. In addition, the  $PM_{2.5}$  mass concentration and carbon aerosol concentration of micro-nano aeration group were lower than those of ordinary aeration group. Therefore, micro-nano aeration has the potential to improve the sediment reduction efficiency and effectively control the aerosol generation in the treatment of black-odorous water.

**Key words:** micro-nano aeration; black-odorous water; sediment reduction; aerosol

国内外河道湖泊均存在黑臭化的问题或风险,黑臭水体的控制主要通过底泥处理来实现,目前最有效的措施是异位法和原位法处理。异位法主要是疏浚法,但疏浚后的底泥仍含有大量有机污染物,易对环境造成污染<sup>[1]</sup>。因此,疏浚前将底泥进行原位减量处理对延长疏浚周期和减少有机污染物显得十分重要。原位法处理底泥主要有化学法、生物法和物理法,其中化学法大多采用化学试剂,有给水体带来二次污染的风险;生物法由于生化环境的变化使投加菌种适应性变差,因而效果往往有限;物理法中最常见的是曝气法,由于可直接为厌氧环境提供氧气而应用较多<sup>[2]</sup>。但是,传统曝气法存在以下局限性:低的氧传递效率,需要大气量长时间曝气供氧,因此能耗高<sup>[3]</sup>;气泡大导致氧保留能力低,对底泥中有机物的氧化减量有限,不利于后续的底泥疏浚;曝气过程产生的气泡极易快速上升至液面而破裂射流并发生喷溅<sup>[4]</sup>,易形成危害环境的气溶胶。

微纳米曝气是新型的水体充氧技术,其产生的气泡直径小、在水中停留时间长,因而充氧效率高<sup>[5]</sup>。Choi等<sup>[6]</sup>和Wang等<sup>[7]</sup>发现微纳米气泡由于其巨大的内部压力可以扩散并渗透至底泥内部以氧化污染物质,且气泡在缓慢的上升过程中,半径会不断缩小最终溶解在水中,造成的喷溅作用较小。但目前有关微纳米曝气对底泥减量及产生的气溶胶问题研究较少。

鉴于此,以西安市郊区某村落黑臭水体为处理对象,通过对比普通曝气与微纳米曝气,研究微纳米曝气对黑臭水体底泥减量及可生化性的影响,分析了治理过程中微纳米曝气对气溶胶产生的控制效果,以期采用微纳米曝气治理黑臭水体提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 上覆水和底泥的来源及性质

实验室模拟试验的底泥和上覆水均取自西安市郊区某村落黑臭水体。上覆水采集自水体表层下30 cm处,使用彼得森采泥器取表层15 cm的底泥用于模拟试验,所取新鲜底泥经孔径为0.5 mm的粗筛过滤后进行均质化处理。经检测,底泥间隙水初始 $NH_4^+-N$ 、TN和COD浓度分别为31.64、35.45和93.47 mg/L;上覆水ORP为-25.1 mV, pH为7.74, DO、 $NH_4^+-N$ 、TN、COD分别为0.53、9.42、9.60、30.55 mg/L;底泥的TN、VS、TS分别为6.51、33.23、588.62 g/kg, VS/TS为5.65%,中值粒径为42.09  $\mu m$ 。

### 1.2 试验设计

试验在3个体积为8 L圆柱反应器中进行,其中一个反应器为对照,不进行曝气;另两个反应器分别为普通曝气和微纳米曝气,前者采用电磁式空气压缩机(AC0-318)通过管道连接普通刚玉曝气头向水体里充氧,后者采用微纳米发生器(ZJC-NM-300 L)向水体里充氧。先向3个反应器中分别加入1 L均质处理后的新鲜底泥,然后用虹吸法分别加入5 L上覆水,使泥水体积比为1:5。普通曝气和微纳米曝气均采用间歇曝气方式,每次曝气20 min,曝气间隔2 h,曝气流量均为160 mL/min,曝气头均置于泥水界面上方2 cm处。试验期间,使用空气采样器(MiniVol TAC,美国)采集气溶胶,空气采样器与反应器均放在密闭纸箱中。

### 1.3 样品采集

试验持续20 d,每4 d在水面下2 cm处取100 mL水样用于水质检测,采样时间为上午8:20(停止曝气1 h之后)。试验过程中采用原黑臭水补充取样及蒸发损失。试验结束时,使用虹吸法去除上覆水,采集底泥和间隙水进行测定。气溶胶采用空气

采样器以 5 L/min 的流速,在预烧制直径为 47 mm 的石英过滤膜(Whatman QMA)上采集,采集时间与曝气时间一致。

#### 1.4 样品测定

上覆水测定指标包括 DO、ORP、pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、COD 和有机物质的三维荧光光谱,间隙水测定指标包括  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、COD 和有机物质的三维荧光光谱,底泥测定指标包括 TN、VS、TS 和中值粒径,气溶胶测定指标包括细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )质量和碳质气溶胶(TC)组分。

在进行水质测定时,采用哈希多功能水质测定仪(HQ-30d)测定 DO 和 ORP;采用雷磁 pH 计(pHS-3C)测定 pH;参考《水和废水监测分析方法》,采用紫外-可见分光光度计(XINMAO752N)测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 浓度,采用重铬酸钾氧化法测定 COD 浓度,采用荧光分光光度计(F7000)测定有机物质的三维荧光光谱。采用激光粒度分布仪(SYNC)测定底泥中值粒径,采用过氧化氢-浓硫酸消解法测定底泥总氮含量。

在进行气溶胶测定时,将采集气溶胶的石英过滤膜在 20~23 °C 和相对湿度为 35%~45% 的稳定储存条件下,经过 24 h 的平衡期后,每个石英过滤膜在取样前和取样后使用灵敏度为  $\pm 1 \mu\text{g}$  的微型天平(Model MC5-Sartorius AG, 德国)称质量至少三次。然后使用热/光碳分析仪(DRI Model 2001, 美国)分析气溶胶的碳质组分,并计算细颗粒物质量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 上覆水和间隙水水质变化

#### 2.1.1 上覆水水质历时变化

试验过程中不同反应器上覆水水质指标历时变化如图 1 所示。与对照组相比,普通曝气和微纳米曝气均明显提高了上覆水 DO 浓度、ORP 和 pH,降低了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 COD 浓度。与普通曝气相比,微纳米曝气组的 DO 浓度、ORP 和 pH 增加显著,试验结束时,分别增加至 5.26 mg/L、169.70 mV 和 8.45,为普通曝气的 1.2、1.3 和 1.03 倍。与此同时,微纳米曝气对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 的去除效果更加明显, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在第 4 天快速达到稳定,降至 0.20 mg/L, TN 浓度在第 12 天降至 2.81 mg/L,去除率为 70.73%。此外,微纳米曝气还能显著降低 COD 浓度,去除率为 55.23%。以上效果主要是因为微纳米气泡直径小、

在水中停留时间长和充氧效率高。

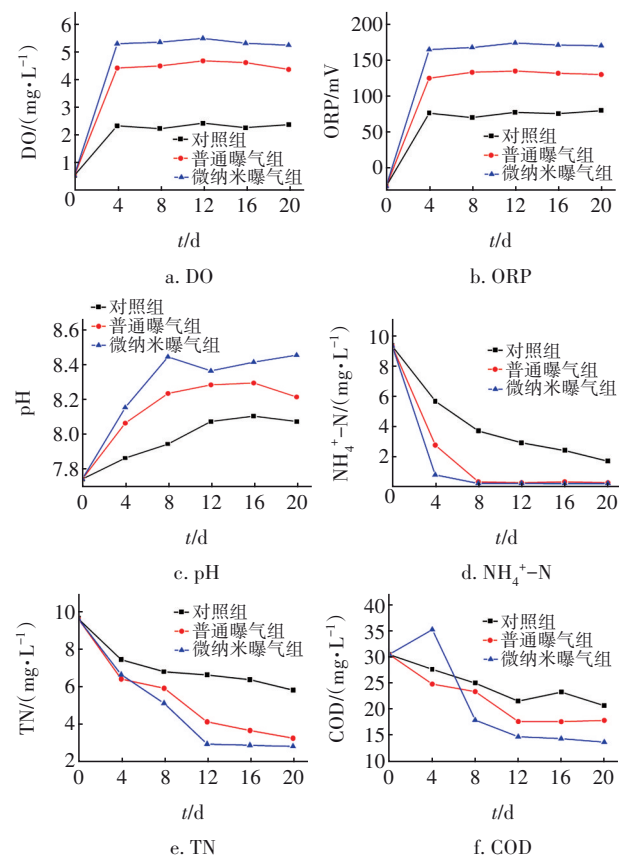


图1 上覆水水质历时变化

Fig.1 Diachronic change of overlying water quality

#### 2.1.2 间隙水中氮及COD浓度变化

试验结束时,对照组间隙水的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 COD 浓度分别为 20.28、21.19 和 50.61 mg/L,曝气组明显降低了间隙水中三者的浓度。与普通曝气相比,微纳米曝气组的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 COD 浓度降低显著,分别由普通曝气的 13.74、15.25、39.81 mg/L 降至 9.20、11.10、33.31 mg/L,分别低了 33.04%、27.21% 和 16.33%。这是由于微纳米气泡的扩散和渗透提高了泥水界面的 DO 浓度和 ORP,改善了微生物生存环境,加速了好氧微生物对污染物的降解,进而导致其浓度大幅度下降。

#### 2.1.3 荧光性有机物质成分

采用三维荧光光谱分析黑臭水体中荧光性有机物质组成的变化,结果见图 2。由图 2(a)~(c)可知,试验结束时,微纳米曝气组上覆水的类蛋白质基团( $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=250 \text{ nm}/275 \text{ nm}$ )荧光强度明显降低且降低程度最大,表明微纳米曝气对类蛋白物质的去除效果优于普通曝气。初始间隙水中荧光性有



机物质主要存在两个基团:可溶性微生物代谢产物基团( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=280\text{ nm}/330\text{ nm}$ )和类蛋白质基团。由图2(d)~(f)可知,微纳米曝气处理后的间隙水中类蛋白质基团明显减少,可溶性微生物代谢产物

基团增加,并且新出现了易生物降解的有机酸基团( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=225\text{ nm}/330\text{ nm}$ )。这表明,经微纳米曝气处理后的间隙水中溶解性碳源具有较好的生物降解性。

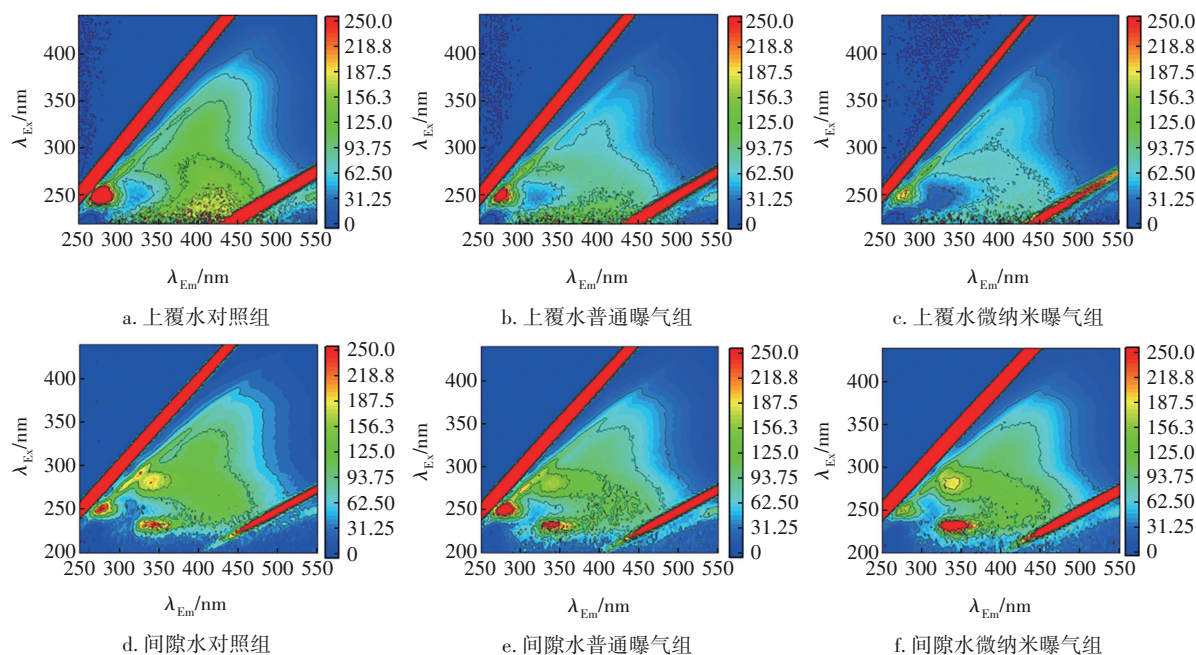


图2 上覆水和间隙水中荧光性有机物质成分

Fig.2 Composition of fluorescent organic matter in overlying water and pore water

## 2.2 底泥性质变化

### 2.2.1 TN、VS、TS变化

试验结束时不同反应器底泥VS、TS含量如图3所示。与对照组和普通曝气组相比,微纳米曝气组底泥的VS和TS含量降低显著,VS由初始值33.23 g/kg降至20.31 g/kg,去除率为38.88%;TS由初始值588.62 g/kg降至425.62 g/kg,去除率为27.72%,分别比普通曝气提高了22.36%和17.01%。

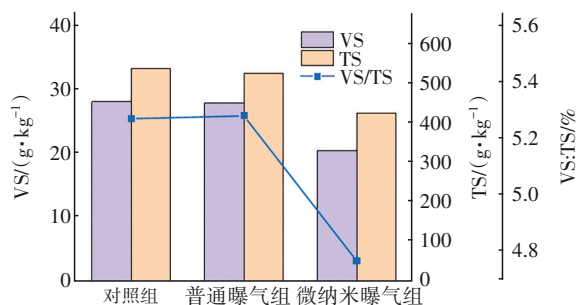


图3 试验结束时底泥VS、TS含量变化

Fig.3 VS and TS contents in sediment at the end of the experiment

此外,微纳米曝气组的VS和TS含量分别比对照组低7.66 g/kg和112.74 g/kg,而普通曝气组仅比

对照组减少0.23 g/kg和12.77 g/kg。与此同时,微纳米曝气组底泥的VS/TS值也最低。经核算,每吨底泥减量10%(即100 kg),微纳米曝气所消耗的电费是普通曝气的89.68%,可有效降低成本。

试验结束时,对照组、普通曝气组和微纳米曝气组底泥的TN含量分别为6.44、5.61和4.44 g/kg。可见,微纳米曝气组底泥的TN含量降低显著,去除率为31.80%,比普通曝气提高了17.98%。这主要归因于微纳米气泡扩散和渗透至底泥内部,提高了底泥的生物转化。

### 2.2.2 底泥中值粒径变化

试验结束时,对照组、普通曝气组和微纳米曝气组底泥中值粒径分别为40.61、40.19、39.41  $\mu\text{m}$ ,即普通曝气和微纳米曝气组的底泥中值粒径均有减小,而后的降幅更大。这是因为微纳米气泡可以扩散和渗透至底泥内部,当气泡破裂时会释放化学能,产生大量羟基自由基<sup>[8]</sup>,其可以氧化附着在底泥表面的有机质,促使底泥裂解。此外,底泥微生物活性的提高也会增大对有机质的消耗。当底泥裂解成细颗粒时,比表面积增大,有利于微生物与

其接触,提高了非溶解性有机物质被利用的概率。

### 2.3 气溶胶组分变化

不同反应器  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度和碳质气溶胶浓度的历时变化如图 4 所示。在试验过程中,3 组试验产生的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度保持相对稳定,其中普通曝气组 ( $0.101 \text{ mg/m}^3$ ) > 微纳米曝气组 ( $0.086 \text{ mg/m}^3$ ) > 对照组 ( $0.082 \text{ mg/m}^3$ )。微纳米曝气产生的  $\text{PM}_{2.5}$  是普通曝气的 85.15%。同时,普通曝气组的 TC 浓度均值为  $36.24 \mu\text{g/m}^3$ ;微纳米曝气组的 TC 浓度从  $32.70 \mu\text{g/m}^3$  降至  $27.51 \mu\text{g/m}^3$ ,均值为  $29.64 \mu\text{g/m}^3$ ,是普通曝气的 81.79%。这是因为普通曝气产生的大气泡上升速度快,且破裂产生的喷溅作用更明显,而微纳米气泡粒径小、上升速度慢,可在水中停留较长时间并溶解,喷溅作用较小。因此,微纳米曝气可以更好地控制气溶胶的产生,减少大气中  $\text{PM}_{2.5}$  和 TC 浓度,降低对大气环境和公众健康的危害。

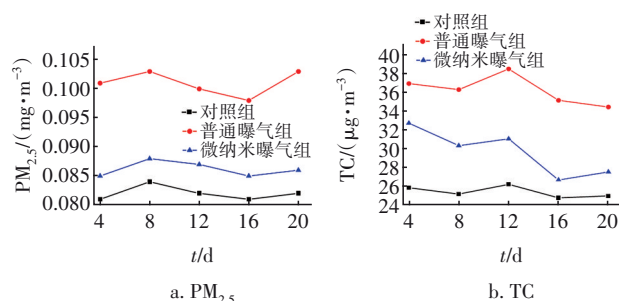


图 4 气溶胶组分变化

Fig.4 Changes in aerosol components

### 3 结论

① 微纳米曝气能够快速提高黑臭水体上覆水的 DO 浓度、ORP 和 pH,并且对上覆水中氨氮、总氮和 COD 的去除效果更好。

② 底泥经微纳米曝气处理后,间隙水中荧光性有机物主要由易生物降解的有机酸基团和可溶性微生物代谢产物基团组成,且中值粒径减小、比表面积增大,有利于微生物与其接触,使得底泥具有良好的生物降解性能,便于后续的底泥减量处理。

③ 相较于普通曝气,微纳米曝气组对底泥中 VS 和 TS 的去除率分别提高了 22.36% 和 17.01%,可有效实现底泥的原位减量。

④ 微纳米曝气产生的  $\text{PM}_{2.5}$  和碳质气溶胶分别是普通曝气的 85.15% 和 81.79%,可更好地控制气溶胶产生,减少对大气环境和公众健康的危害。

### 参考文献:

- [1] 孙朝阳. 河道底泥修复与处理技术[J]. 珠江水运, 2021 (23): 65-66.  
SUN Chaoyang. River sediment restoration and treatment technology [J]. Pearl River Water Transport, 2021 (23): 65-66 (in Chinese).
- [2] 周国林,李坤,卞志强. 城市河道底泥污染物处理技术研究[J]. 资源节约与环保, 2023(3): 102-105.  
ZHOU Guolin, LI Kun, BIAN Zhiqiang. Research on the treatment technology of urban river sediment pollutants [J]. Resources Conservation and Environmental Protection, 2023(3): 102-105 (in Chinese).
- [3] CAO J X, SUN Q, ZHAO D H, *et al.* A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 385: 121511.
- [4] JIANG X H, LUCAS R, EMMANUEL V, *et al.* Submicron drops from flapping bursting bubbles [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119 (1): e2112924119.
- [5] AZEVEDO A, OLIVEIRA H, RUBIO J. Bulk nanobubbles in the mineral and environmental areas: updating research and applications [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 271: 101992.
- [6] CHOI J Y, PARK Y J, KIM Y, *et al.* Flow characteristics of microbubble suspensions in porous media as an oxygen carrier [J]. Clean Soil Air Water, 2008, 36: 59-65.
- [7] WANG W T, FAN W, HUO M X, *et al.* Hydroxyl radical generation and contaminant removal from water by the collapse of microbubbles under different hydrochemical conditions [J]. Water Air Soil Pollution, 2018, 229: 1-11.
- [8] TAKAHASHI M, CHIBA K, LI P. Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2007, 111(6): 1343-1347.

作者简介:张锐(1999-),男,山西大同人,硕士研究生,研究方向为景观水体修复技术。

E-mail:982766742@qq.com

收稿日期:2023-10-30

修回日期:2024-01-02

(编辑:李德强)