

陶昱明,王亦铭,丁露,等. 微纳米曝气技术在黑臭水体治理中的研究及应用[J]. 净水技术, 2021, 40(2):93-99.

TAO Y M, WANG Y M, DING L, et al. Research and application of micro-nano aeration technology for black-odorous waterbodies treatment[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(2):93-99.



扫我试试?

微纳米曝气技术在黑臭水体治理中的研究及应用

陶昱明¹, 王亦铭², 丁露², 杨小丽²

(1. 南京市给排水工程设计院有限公司, 江苏南京 210002; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 211189)

摘要 水体黑臭是水环境污染的极端现象, 严重制约社会、经济与环境的可持续发展。微纳米曝气技术具有气泡粒径小、水中停留时间长、传质效果好、界面 ζ 电位高等优点, 有望应用于黑臭水体水质净化的应急处理和底泥微生物系统修复。文中从微纳米气泡的特性出发, 考察了微纳米曝气技术对黑臭水体上覆水体和底泥中污染物的去除效果; 在此基础上, 探讨了微纳米曝气对水体复氧、自由基产生、微生物群落结构与水生动植物改善的作用, 以期揭示微纳米曝气对黑臭水体的修复机理; 最后, 对微纳米曝气技术在黑臭水体治理中的研究与应用前景进行了展望。

关键词 微纳米曝气 黑臭水体 污染物去除 修复机理 微生物群落结构

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2021)02-0093-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2021.02.010

Research and Application of Micro-Nano Aeration Technology for Black-Odorou Waterbodies Treatment

TAO Yuming¹, WANG Yiming², DING Lu², YANG Xiaoli²

(1. Nanjing Water Supply and Drainage Engineering Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210002, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract Black-odorous waterbodies is an extreme phenomenon of water pollution, which seriously restricts sustainable development of society, economy and environment. Micro-nano aeration technology has many advantages, such as small bubble size, long residence time in water, good mass transfer effect and high interface zeta potential. It is expected to be applied to the emergency treatment of black-odorous water purification and the remediation of sediment micro environment system. Based on the characteristics of micro-nano bubbles, removal effect of micro-nano aeration technology on pollutants in overlying water and sediment of black-odorous waterbodies are investigated in this paper. On this basis, the effects of micro-nano aeration technology on water reoxygenation, free radical generation, microbial community structure and aquatic plants improvement are discussed, so as to reveal the remediation mechanism of micro-nano aeration on black-odorous waterbodies. The research and application of micro-nano aeration technology in the treatment of black-odorous waterbodies are also prospected.

Keywords micro-nano aeration black-odorous waterbodies pollutant removal remediation mechanism microbial community structure

随着生活水平和工业水平的不断提高, 部分生

活污水、工业废水和生活垃圾未得到有效控制排放进入水体, 产生大量污染物质, 超出了水体的自净能力和环境容量。有机物在被氧化的过程中消耗了大量溶解氧, 导致水体缺氧或厌氧。厌氧微生物在降解有机物的过程中产生氨气、硫化氢、甲烷等气体, 并散发出气味。厌氧状态改变了底泥的氧化还原电

[收稿日期] 2021-01-15

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2019YFD1100205)

[作者简介] 陶昱明(1969—), 男, 硕士, 研究方向为给排水工程规划与设计、水处理技术研究, E-mail: 1985053209@qq.com。

位,底泥中的铁、锰被还原,并向上覆水体释放导致水体发黑^[1-2]。

黑臭水体治理应优先采用控源截污措施,控制入河污染,再采取生态修复措施改善与提升水质,促进河道生态健康。控源截污是黑臭水体治理的前提和基础,但考虑到城市管理的多样性及地下管网的复杂性,无法短时间内实现彻底截污。人工曝气技术通过提高水体中溶解氧(DO)含量,增强好氧微生物代谢活性,加快了水体中污染物的氧化过程,具有见效快、对环境的影响小等优点,已成为黑臭水体最常用的治理手段^[3-4]。因此,曝气技术作为黑臭水体阶段性治理措施,以及后期生态修复措施,极具研究意义与应用前景。但是,传统曝气技术存在能耗大、氧利用效率低等缺陷,且曝气过程中若使用不当会引起底泥悬浮,导致水体二次污染。微纳米曝气技术是近年来取得突破性进展的新技术,产生的微纳米气泡具有粒径小、水中停留时间长、传质效果好等优点,引起了人们的广泛关注^[5-6]。

目前,微纳米曝气技术在气浮、黑臭水体治理、地下水修复等领域有较多的应用,并取得了良好的效果,但尚未有研究系统性地阐述微纳米曝气技术对黑臭水体的治理效果和修复机理。本文调研了微纳米曝气技术在黑臭水体治理中的研究与应用,介绍了微纳米气泡的特性,阐述了微纳米曝气技术对水体污染物的去除效果,分析了该技术对黑臭水体的修复机理,并对微纳米曝气技术今后的研究重点予以展望。

1 微纳米气泡的特性

微纳米气泡指直径为 200 nm~50 μm 的气泡,与传统大气泡相比,微纳米气泡在水处理中的应用主要基于以下特性。首先,微纳米气泡的比表面积较大。Yoshida 等^[7]证实了比表面积是决定气泡吸附性能最重要的因素,微纳米气泡巨大的表面积赋予了其更强的吸附能力。其次,微纳米气泡在水中的停留时间比普通气泡长,这是因为微纳米气泡粒径较小,上升速度慢,可以在水中长时间停留。Turner^[8]首次证明了半径为 30 μm 的微米气泡能在低黏度液体中稳定存在 100 h,浓度高时可停留 30 d。而且,微纳米气泡在上升过程中,半径不断减小,气泡内部压力不断增大。气泡周围溶解气体的量随气泡内部压力的增大而增大^[9]。微纳米气泡不断收

缩,最终溶解在水中,使气体在水中的溶解度呈超饱和状态。由于微纳米气泡比普通气泡具有更大的比表面积和更长的停留时间,这些特性显著提高了其传质效率。再次,微纳米气泡界面 ζ 电位高, ζ 电位在很大程度上决定了微纳米气泡界面的吸附性能^[10]。同时,Li 等^[11]还发现, ζ 电位值越高,气泡在水中的停留时间越长,这可能是由于微纳米气泡的双电层结构对气体扩散产生了阻力,降低了气泡的溶解速率。最后,微纳米气泡收缩和破裂时,气-液界面消失引起的剧烈变化会释放界面上高浓度的正负离子所积累的能量,从而产生大量的羟基自由基,羟基自由基的强氧化性可以降解水中的难降解污染物。Takahashi 等^[12]通过电子自旋共振谱证实了直径 < 50 μm 的微纳米气泡破裂会生成羟基自由基。如图 1 所示,传统大气泡快速上升到水面并破裂,而微纳米气泡在缓慢上升的过程中不断收缩,最终溶解在水中。表 1 对比了微纳米气泡与普通气泡的特性。

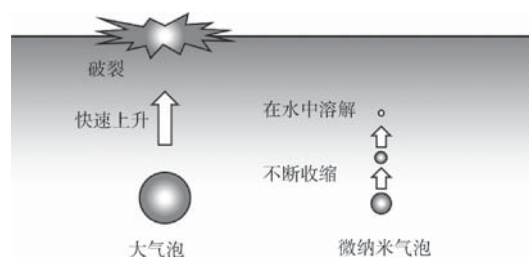


图 1 微纳米气泡与大气泡示意图^[12]

Fig. 1 Schematic Diagram of Micro-Nano Bubbles and Macro Bubbles^[12]

2 微纳米曝气对黑臭水体污染物的去除效果

2.1 微纳米曝气对上覆水体污染物的去除效果

黑臭水体的显著特征是水中 DO 浓度低,水体处于缺氧或厌氧状态。曝气技术通过提高水体 DO 浓度改变水体的黑臭现象。微纳米曝气技术具有充氧效果好、能耗较低等优点,已广泛应用于黑臭水体水质净化的应急处置。微纳米曝气技术与普通曝气技术相比,不仅能显著提高增氧效率,还能提升污染物去除率。田东伟^[18]使用自主研发的新型微气泡发生装置对黑臭水体进行处理,曝气 50 h 后,微纳

表 1 微纳米气泡与普通气泡的比较
Tab. 1 Comparison between Micro-Nano Bubbles and Common Bubbles

特性	微纳米气泡	普通气泡	参考文献
气泡粒径	200 nm~50 μm	>50 μm	Xiao 等 ^[13]
比表面积比	1 000:1	—	
传质效率/ min^{-1}	0.256	0.143	Chu 等 ^[14]
	0.13	0.07	Tatek ^[15]
界面 ζ 电位/ mV	-45~-34 (空气微纳米气泡)	—	Takahashi ^[16]
	-20~-17 (氧气微纳米气泡)	—	
停留时间	超过两周	—	Ohgaki 等 ^[17]
	10 h(空气微纳米气泡)	—	Li 等 ^[11]
	7 d(氧气微纳米气泡)	—	

米气泡曝气组的 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 去除率比普通曝气组分别提高了 10%、14%、15%。洪涛等^[19]的研究发现,相同曝气强度下,微纳米曝气对黑臭河道水体中 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率比普通曝气分别高 12%和 10%。王美丽等^[20]利用微纳米曝气装置处理黑臭水体,并对比不同曝气量的处理效果,发现在 0.3 L/ min 气量下的去除效率最高,处理 90 min 时, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 去除率分别达到 51.4%、55.8%、31.0%。Wu 等^[21]对东莞市茅洲河支流采用单独微纳米曝气技术,修复后水体 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度显著下降,去除率分别为 65.4%、64.3%。

然而,单独曝气存在污染物去除率不高、生物降解能力较低等缺点。将微纳米曝气技术与其他技术相结合,能有效改善微生物群落结构、提高污染物去

除率。齐钰鹏等^[22]研究了碳纤维湿地式人工浮床在微纳米曝气与微孔曝气下净化水质的效果,发现在相同水力停留时间和气水比条件下,微纳米碳纤维浮床对水体中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的去除率分别达到 72.6%、71.9%、65.4%,均高于微孔曝气组,且能够在更短的时间内完成碳纤维填料的挂膜过程。表 2 为不同微纳米曝气技术对黑臭水体污染物的去除效果。由表 2 可知,组合修复技术对污染物的去除率整体高于单独曝气。这是因为,组合修复技术在使用过程中,各种单项技术在发挥各自功效的同时还具有协同作用,如微纳米曝气可快速提高水体的 DO 浓度,促进微生物活性,提高污染物降解效率;种植的水生植物通过光合作用泌氧,发达的根系可为微生物提供附着载体。

表 2 不同微纳米曝气技术对黑臭水体污染物的去除效果
Tab. 2 Removal Effect of Different Micro-Nano Aeration Technologies on Pollutants in Black-Odorless Waterbodies

修复技术	去除率				参考文献
	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP	
微纳米曝气	77.1%	72.0%	9.8%	75.0%	田东伟 ^[18]
微纳米曝气	39.1%	40.3%	—	21.4%	洪涛等 ^[19]
微纳米曝气	65.4%	64.3%	—	—	Wu 等 ^[21]
微纳米曝气	68.2%	82.4%	—	64.4%	王骁等 ^[23]
微纳米曝气+碳纤维人工浮床	72.6%	71.9%	—	65.4%	齐钰鹏等 ^[22]
微纳米曝气+本土微生物活化	76.4%	92.2%	89.8%	86.7%	易境等 ^[24]
微纳米曝气+生态浮岛	—	99.8%	—	93.0%	潘俊等 ^[25]
生物膜+微纳米曝气+水生植物+水生动物	—	89.15%	78.36%	71.47%	徐玉良等 ^[26]
微纳米曝气+活性生态自由基+复合菌酶+生态浮床	52.89%	77.84%	—	65.88%	余恒等 ^[27]
微纳米气泡+生物活化+生态修复	45%	98%	—	85%	张玲玲等 ^[28]

将微纳米曝气技术与生物-生态修复技术联合使用,不仅能提高污染物去除率,还能恢复河道生态系统,提高水体自净能力。余恒等^[27]采用“微纳气泡复氧系统+活性生态自由基+复合菌酶修复剂+景观生态浮床”生物-生态综合治理技术修复宁波市府溪河,运行 1 年后,主要水质指标 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的平均去除率分别达到 52.89%、77.84%、65.88%,并恢复了河道中由挺水、沉水等多种水生植物和动物组成的水体和水陆交错带的生态系统。张玲玲等^[28]采用“超微气泡富氧+生物活化+生态修复”组合技术对某重度黑臭河道实施原位生态修复,经过近 4 个月的治理后,水体 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的平均含量分别为 28.79、0.36 mg/L 和 0.19 mg/L,去除率分别达到 45%、98%和 85%以上,水质稳定在地表水环境 V 类标准,同时水生动物和沉水植物种类增加。

2.2 微纳米曝气对底泥污染物的去除效果

从黑臭水体的成因来看,水体受污染底泥的内源释放是引起水体黑臭的重要原因之一。黑臭水体的缺氧环境极大地改变了泥水界面的化学及生物过程,同时加快了底泥向上覆水体释放氮、磷等营养盐的速率。微纳米气泡可扩散和渗透至底泥内部,有效提高了泥水界面溶解氧及底泥氧化还原电位,改善了微生物及底栖生物生境,因而对底泥污染物具有很好的去除效果。刘建林^[29]将微纳米曝气与生物膜技术结合原位消减黑臭底泥,在无截污自然状态下,底泥厚度减少 44%~58%,底泥含水率、有机质及有机碳均有一定程度的下降。Batagoda 等^[30]将臭氧纳米气泡与超声波技术相结合,对底泥中多环芳烃的去除率可达 48.16%~91.83%。Wang 等^[31]

利用氧纳米气泡改性矿物在水土界面进行新型曝气,底泥 TP 释放速率比对照组下降 5.15 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, TN 释放速率比对照组下降 44.99 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,显著抑制了底泥中营养盐的释放。

3 微纳米曝气对黑臭水体的修复机理

微纳米曝气对黑臭水体的修复机理包括提高水体 DO 浓度、生成自由基促进污染物降解、增强好氧微生物活性和促进水生动植物生长等方面,如图 2 所示。

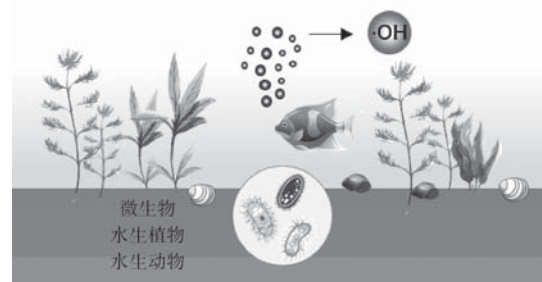


图 2 微纳米曝气修复机理示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Micro-Nano Aeration Remediation Mechanism

3.1 微纳米曝气对黑臭水体的复氧效果

DO 浓度是影响水体受污染程度的关键因素之一。本文选取了 4 组典型案例,对比了普通曝气与微纳米曝气在对黑臭水体复氧效果上的差异。由表 3 可知,当水体 DO 浓度相近时,微纳米曝气的曝气量仅为微孔曝气的 1/10;当曝气量相同时,微纳米曝气装置 DO 浓度比普通曝气装置的 DO 浓度高出 13.6%~50.9%。这主要是因为,普通曝气技术产生的气泡粒径较大,气泡快速上升至水面破裂消失,氧

表 3 微纳米曝气与普通曝气对黑臭水体的复氧效果

Tab. 3 Effect of Micro-Nano Aeration and Common Aeration on Reoxygenation of Black-Odor Waterbodies

序号	曝气类型	DO 浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	曝气量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	处理水量/L	曝气方式	曝气时间	参考文献
1	微孔曝气	6.5~9.1	1.3	60	间歇曝气	15 min/h	王越等 ^[32]
	微气泡曝气	7.2~8.9	0.12				
2	微孔曝气	4.4	6.7	200	间歇曝气	3 h/d	熊永磊 ^[33]
	微纳米曝气	5					
3	鼓风曝气	6.54	0.2	40	连续曝气	100 min	洪涛等 ^[19]
	微米气泡曝气	9.87					
4	普通曝气	7.8	1.5	200	连续曝气	50 h	田东伟 ^[18]
	微气泡曝气	11					

传质效率较低,溶氧效果差;微纳米曝气技术产生的气泡粒径小、停留时间长,能够和水体充分接触,溶氧效果好。

3.2 微纳米曝气产生自由基对污染物去除的影响

微纳米曝气技术主要通过提高黑臭水体 DO 浓度、刺激好氧微生物的活性实现水体污染物降解。微纳米气泡发生收缩和破裂的过程中,会产生大量羟基自由基^[12,34]。羟基自由基能够将难降解有机物转化为更易降解的生物中间体,从而提高有机污染物的可生化性,并进一步加快污染物的降解效率^[35]。Tasaki 等^[36]的研究表明,185 nm 的紫外线照射可加快微气泡生成羟基自由基的速率,且可提高甲基橙的脱色率。Wang 等^[37]的研究发现,微纳米气泡破裂产生的羟基自由基可有效去除水中的亚甲基蓝,且 O₂ 含量与 pH 是影响自由基生成数量的关键因素。Li 等^[38]的研究发现,使用空气微纳米气泡产生的羟基自由基有效降解了废水中的苯酚,处理 2 h 后去除率达到 60%。

3.3 微纳米曝气对微生物群落结构的影响

DO 浓度是影响微生物群落结构的关键因素之一。微生物代谢过程会消耗水体中的 DO,造成水生环境缺氧,导致厌氧微生物活性增强。作为水生生态系统中的重要组成部分,微生物群落结构对水体的自净能力起到关键作用。微纳米曝气能显著提高水体的 DO 浓度,这有利于提高好氧微生物的生物量和活性。Sun 等^[39]发现,经过微纳米曝气-浸没式树脂浮床技术处理后,河流的微生物群落丰度减少了约 50%,好氧微生物的丰度显著提升,这可能是由于微纳米曝气技术刺激了对污染物有降解作用的好氧微生物。Wu 等^[21]的研究发现,微纳米曝气技术改变微生物群落结构的方式是提高 DO 浓度和降解水体污染物,修复后,微生物丰度下降且好氧菌成为优势菌种。王硕等^[40]对比了普通曝气和微纳米曝气 2 种曝气体系下水体和底泥内微生物群落结构的差异,发现微纳米气泡曝气组的微生物几乎全部为好氧微生物,而普通气泡曝气组的微生物群落内好氧微生物和厌氧微生物占比无明显差异。

3.4 微纳米曝气对水生动植物的影响

黑臭水体水动力条件差、营养盐含量高,会引起藻类迅速繁殖,导致水中 DO 浓度降低,水生生物大

量死亡,进一步加剧水体黑臭现象。研究发现,微纳米曝气对藻类生长有抑制作用。黄磊等^[41]探究了微纳米曝气技术的控藻效果,发现单独曝气组的 TP、叶绿素 a、藻总密度的削减率分别为 49.6%、33.2%、35.3%。Li 等^[42]发现,微纳米气泡对铜绿微囊藻的生长有显著的抑制作用,用微气泡曝气处理 10 min 后,藻细胞密度和叶绿素 a 含量在 72 h 后分别降低了 88%和 94%;同时,电镜观察发现,藻细胞的结构均发生破损。王越等^[32]对比了微气泡曝气与普通曝气对黑臭水体的修复效果,发现微气泡曝气装置中 OD₆₈₀ 在一周内迅速下降,并维持在较低水平。OD₆₈₀ 为含藻液在 680 nm 波长处的吸光值,可以间接反映藻细胞的数量,这说明微纳米曝气可有效去除藻类并抑制藻类繁殖。

活性氧(ROS)过去一直被视为有害的代谢产物,但近年来研究人员发现了 ROS 作为细胞信号通路重要生理调节剂的新作用。作为植物的代谢副产物,适当水平的 ROS 对植物生长起到积极作用。微纳米气泡可在存在动态刺激的情况下生成外源性 ROS,适量浓度的 ROS 能够促进植物的生长。Liu 等^[43]研究了纳米气泡水在种子萌发过程中外源性 ROS 的作用,发现大麦种子浸入纳米气泡水中 17 h 后,种子的平均发芽率为 58%,是蒸馏水的 2 倍。Liu 等^[44]发现,菠菜种子在蒸馏水、20%纳米气泡水和 100%纳米气泡水中的最终发芽率分别为 54%、65%和 69%,说明纳米气泡水可提升菠菜种子的发芽率。Park 等^[45]在水培培养系统中注入微米气泡培养生菜,发现微米气泡系统中生菜的鲜重和干重分别是经普通气泡处理的 2.1 倍和 1.7 倍。

微纳米气泡对水生动物的生长也有一定的促进作用。Ebina 等^[46]的研究发现,使用纳米气泡水养殖香鱼,能够显著提高香鱼的生长速度,正常养殖的香鱼体重从 3.0 kg 增加至 6.4 kg,而纳米气泡水养殖的香鱼体重从 3.0 kg 增加至 10.2 kg。李娟^[47]发现,经过微纳米气泡养殖 5 个月后的牡蛎,体积明显大于正常养殖 2 年的牡蛎。因此,微纳米曝气技术通过抑制藻类繁殖、促进水生动植物的生长,重构水生生态,可恢复水体的自净能力。

4 结论与展望

微纳米气泡具有比表面积大、停留时间长、氧传质效率高等众多优点,能够实现水体高效、持久复

氧,提高水体中好氧微生物的活性,加快水体污染物降解。同时,微纳米曝气还可抑制黑臭水体底泥内源污染的释放,改善微生物及底栖生物生境,促进底泥生态系统的恢复。因此,微纳米曝气技术具有较好的研究意义和应用前景。针对微纳米曝气在黑臭水体治理研究现状,提出以下展望。

(1)开发微纳米曝气耦合生物-生态集成技术。单独微纳米曝气存在能耗与去除效率不匹配的问题,生物-生态技术在黑臭水体原位修复过程中具有环境友好、生态节能的特点,耦合微纳米曝气在降低能耗、提升去除效率的同时,保证了黑臭水体持续性生态化治理效果。

(2)加强微纳米气泡产生自由基对黑臭水体污染物的降解效果及机理研究。微纳米气泡破裂时会产生自由基,自由基能够促进水体中的污染物降解,并提高其可生化性,但现有研究对自由基在水体污染物去除中的贡献尚未定论。

(3)开展示范工程,考察微纳米曝气在实际黑臭水体中的长期运行效果及改善底泥微生境的作用机理。目前,已有研究证实微纳米曝气技术对微生物及水生动植物的生长有促进作用,但大部分停留在实验室阶段,且将水生系统各部分割裂研究,缺乏在实际水生生态系统中微生物与水生动植物的协同作用效果及机理研究。

参考文献

- [1] 左思敏,荆肇乾,陶梦妮,等. 城市黑臭水体成因及整治技术分析[J]. 应用化工, 2020, 49(4): 969-973.
- [2] CAO J, SUN Q, ZHAO D, 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. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121511.
- [3] 刘晓玲,徐瑶瑶,宋晨,等. 城市黑臭水体治理技术及措施分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3): 519-529.
- [4] GU D G, XU H, HE Y, et al. Remediation of urban river water by pontederia cordata combined with artificial aeration: Organic matter and nutrients removal and root-adhered bacterial communities[J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17(11): 1105-1114.
- [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, 271: 101992. DOI: 10.1016/j.cis.2019.101992.
- [6] HU L, XIA Z. Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation [J]. Journal of Hazardous Materials,

2017(2): 446-453.

- [7] YOSHIDA A, TAKAHASHI O, ISHII Y, et al. Water purification using the adsorption characteristics of microbubbles [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(8): 6574-6577.
- [8] TURNER W R. Microbubble persistence in fresh water [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1961, 33(9): 1223. DOI: 10.1121/1.1908960.
- [9] TAKAHASHI M, KAWAMURA T, YAMAMOTO Y, et al. Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2003(10): 2171-2173.
- [10] 熊永磊,杨小丽,宋海亮. 微纳米气泡在水处理中的应用及其发生装置研究[J]. 环境工程, 2016(6): 23-27.
- [11] LI H, HU L, SONG D, et al. Characteristics of micro-nano bubbles and potential application in groundwater bioremediation [J]. Water Environment Research, 2014, 86(9): 844-851.
- [12] 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(6): 1343-1347.
- [13] XIAO Z, BIN AFTAB T, LI D. Applications of micro-nano bubble technology in environmental pollution control [J]. Micro & Nano Letters, 2019, 14(7): 782-787.
- [14] CHU L B, XING X H, YU A F, et al. Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles [J]. Chemosphere, 2007, 68(10): 1854-1860.
- [15] TATEK. Enhancing gas-liquid mass transfer and (bio) chemical reactivity using ultrafine/nanobubble in water and wastewater treatments [D]. Korea: Seoul National University, 2017.
- [16] TAKAHASHI M. Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions; Electrical properties of the gas-water interface [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2005(46): 21858-21864.
- [17] OHGAKI K, KHANH N Q, JODEN Y, et al. Physicochemical approach to nanobubble solutions [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(3): 1296-1300.
- [18] 田东伟. 新型微气泡发生装置在处理污染水体中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [19] 洪涛,叶春,李春华,等. 微米气泡曝气技术处理黑臭河水的效果研究[J]. 环境工程技术学报, 2011(1): 20-25.
- [20] 王美丽,袁震,何连生,等. 微纳米曝气技术处理黑臭河道废水的研究[C]. 成都: 中国环境科学学会 2014 学术年会, 2014: 4642-4648.
- [21] WU Y, LIN H, YIN W, et al. Water quality and microbial community changes in an urban river after micro-nano bubble technology in situ treatment [J]. Water, 2019, 11(1): 66. DOI: 10.3390/w11010066.
- [22] 齐钰鹏,许菲,杨兴桐,等. 微纳米曝气强化碳纤维生态浮床水处理效果研究[J]. 水处理技术, 2016, 42(8): 104-108.

- [23] 王骁, 吉贵祥, 周林军, 等. 微纳米气泡特性及黑臭河道环境修复工程应用 [C]. 北京:《环境工程》2019 年全国学术年会, 2019.
- [24] 易境, 吴晓刚, 柴晓利, 等. IMA 处理系统-微纳米曝气联用技术在黑臭水体治理中的应用研究 [C]. 北京:《环境工程》2018 年全国学术年会, 2018.
- [25] 潘俊, 孙舶洋, 魏伟, 等. 微纳米曝气-生态浮岛联合技术处理氮磷污染水体 [J]. 环境工程, 2020, 38(5): 49-53, 209.
- [26] 徐玉良, 张剑刚, 蔡聪, 等. 昆山市凌家浜黑臭水体生物治理与生态修复 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(12): 76-81.
- [27] 余恒, 孙安民. 黑臭河道生态治理综合技术研究与应用实例 [J]. 水处理技术, 2019, 45(7): 128-132.
- [28] 张玲玲, 特日格乐, 李婧男, 等. 超微气泡富氧+生物活化技术在黑臭水体治理中的工程应用 [J]. 环境工程, 2020(11): 66-71, 156.
- [29] 刘建林. 微纳米曝气结合生物膜技术在黑臭河涌底泥原位消减中的应用 [J]. 河南科技, 2020(5): 149-154.
- [30] BATAGODA J H, MEEGODA J N, HEWAGE S A. In situ remediation of Passaic River sediments using ultrasound and ozone nanobubbles [C]. Minneapolis: World Environmental and Water Resources Congress, 2018.
- [31] WANG J, CHEN J, YU P, et al. Oxygenation and synchronous control of nitrogen and phosphorus release at the sediment-water interface using oxygen nano-bubble modified material [J]. Science of the Total Environment, 2020(14). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138258.
- [32] 王越, 程婧雯, 汪伯宁, 等. 微气泡曝气对模拟黑臭水体的治理效果 [J]. 净水技术, 2018, 37(6): 108-112.
- [33] 熊永磊. 新型溶氧装置研制及其应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [34] ZIMMERMAN W B, TESAR V, BANDULASENA H C H. Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2011, 16(4): 350-356.
- [35] MANTZAVINOS D, PSILLAKIS E. Enhancement of biodegradability of industrial wastewaters by chemical oxidation pre-treatment [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2004, 79(5): 431-454.
- [36] TASAKI T, WADA T, FUJIMOTO K, et al. Degradation of methyl orange using short-wavelength UV irradiation with oxygen microbubbles [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009(2): 1103-1110.
- [37] WANG W, FAN W, HUO M, 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(3): 86. DOI: 10.1007/s11270-018-3745-x.
- [38] LI P, TAKAHASHI M, CHIBA K. Degradation of phenol by the collapse of microbubbles [J]. Chemosphere, 2009, 75(10): 1371-1375.
- [39] SUN Y, WANG S, NIU J. Microbial community evolution of black and stinking rivers during in situ remediation through micro-nano bubble and submerged resin floating bed technology [J]. Bioresource Technology, 2018, 258: 187-194. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.03.008.
- [40] 王硕, 刘蕴思, 李攀. 微纳米气泡对小微水体中好氧微生物群落的影响 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(15): 29-34.
- [41] 黄磊, 林佳, 苏玉萍, 等. 微纳米曝气组合技术控藻围隔试验研究 [J]. 福建师大福清分校学报, 2019(5): 88-95, 116.
- [42] LI P, SONG Y, YU S. Removal of *Microcystis aeruginosa* using hydrodynamic cavitation: Performance and mechanisms [J]. Water Research, 2014, 62(19): 241-248.
- [43] LIU S, OSHITA S, MAKINO Y, et al. Oxidative capacity of nanobubbles and its effect on seed germination [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(3): 1347-1353.
- [44] LIU S, OSHITA S, KAWABATA S, et al. Identification of ROS produced by nanobubbles and their positive and negative effects on vegetable seed germination [J]. Langmuir, 2016, 32(43): 11295-11302.
- [45] PARK J S, KURATA K. Application of microbubbles to hydroponics solution promotes lettuce growth [J]. Horttechnology, 2009, 19(1): 212-215.
- [46] EBINA K, SHI K, HIRAO M, et al. Oxygen and air nanobubble water solution promote the growth of plants, fishes, and mice [J]. PLoS One, 2013, 8(6). DOI: 10.1371/journal.pone.0065339.
- [47] 李娟. 透明颤菌血红蛋白及纳米气泡对细菌生长及相关产物产量的影响 [D]. 上海: 华东师范大学, 2012.