

超氧纳米气泡在河道水质提升中的应用效果研究

申 晨 叶劲然

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430000

摘 要：超氧纳米气泡技术作为一种新型水环境治理手段，以其独特的物理化学特性与高效传质效率，为破解河道水体缺氧、污染物累积及生态功能退化等复合型水质问题提供了创新解决方案。本研究系统解析超氧纳米气泡在河道水质提升中的作用机制，构建“实验室模拟-现场中试-生态评估”多尺度验证体系，揭示其通过界面效应与自由基氧化协同实现污染物高效去除的内在规律，以期构建绿色可持续的河道治理技术体系提供理论支撑与实践范式。

关键词：超氧纳米气泡；河道水质；提升；应用效果

引言：当前我国河道水体面临溶解氧匮乏、氮磷富集及黑臭现象频发的严峻挑战，传统曝气与化学投加技术存在能耗高、二次污染风险大等瓶颈问题。超氧纳米气泡技术因其高气液传质效率、持久溶解氧维持能力及自由基氧化特性，逐渐成为水环境治理领域的研究热点。该技术、生成粒径小于200纳米的微米气泡，大幅增加气液接触面积，在增强水体复氧能力的同时，依托气泡溃灭产生的羟基自由基实现污染物的非选择性氧化降解，兼具物理增氧与化学氧化的双重优势。在此背景下，对超氧纳米气泡在河道水质提升中的应用效果进行研究具有极大的现实意义。

1 超氧纳米气泡的特性

1.1 物理特性

超氧纳米气泡的物理特性源于其独特的微观结构与动力学行为。作为粒径介于50-200纳米的亚微米级气液分散体系，其表面曲率半径极小，导致气液界面形成高密度电荷层与特殊流体力学效应^[1]。相较于常规毫米级气泡，纳米气泡具有超高的比表面积与界面活性，单位体积气液接触面积提升两个数量级，显著增强氧气传质效率。纳米气泡在液相中呈现反常的负浮力特性，表现为极低的上浮速度与超长驻留时间，可持续数小时悬浮于水体中，这一特性突破了传统曝气技术氧气快速逃逸的瓶颈。此外，纳米气泡的布朗运动占主导地位，使其在水体中呈现均匀弥散分布，能够深入渗透至底泥微孔结构，实现全水层立体增氧。

1.2 化学特性

超氧纳米气泡的化学特性由其表面界面化学行为与自由基生成机制共同决定。气泡表面携带的高密度电荷引发双电层效应，利用静电吸附作用富集水体中的有机污染物与重金属离子，形成局部高浓度反应微区。当气泡受外部扰动溃灭时，溃缩过程产生的局部高温高压环

境激活溶解氧分子，触发链式反应生成羟基自由基、超氧阴离子等活性氧物种。这些强氧化性物质可无选择性地攻击污染物分子结构，实现难降解有机物的高效矿化。而纳米气泡内部高压环境促使氧气以超饱和溶解态稳定存在，形成持续氧化还原电位梯度，既能抑制厌氧菌代谢产生的黑臭物质，又可激活好氧微生物的降解活性。这种物理吸附-化学氧化-生物协同的多重作用机制，使得超氧纳米气泡兼具污染物靶向富集与深度去除的双重功能，为构建绿色高效的水质净化体系提供物质基础。

2 超氧纳米气泡在河道水质提升中的应用原理

2.1 增氧作用

传统曝气技术受限于气泡快速上浮逃逸，氧气利用率不足，而纳米气泡凭借亚微米级粒径与负浮力特性，可在水体中形成稳定悬浮的气液分散体系。其超高比表面积显著提升气液接触效率，促使氧气以分子扩散与界面渗透双重路径快速溶解。气泡表面带电特性通过静电排斥作用抑制聚并，延长气泡存续时间至数小时，形成持续氧源补给^[2]。在河道水体中，纳米气泡可穿透底泥孔隙与生物膜结构，向缺氧区域定向输送溶解氧，有效打破水体垂向氧浓度分层。溶解氧浓度的梯度提升不仅抑制厌氧菌代谢产生的硫化氢、甲烷等致黑臭物质，同时激活好氧微生物的硝化作用，为后续生物修复奠定基础。

2.2 污染物去除

超氧纳米气泡的污染物去除机制融合物理吸附、化学氧化与生物降解三重协同效应。气泡表面的高密度电荷通过静电作用富集水体中带相反电荷的胶体颗粒、有机大分子及重金属离子，形成污染物富集层。当气泡受水力剪切或自发溃灭时，溃缩过程产生的局部高温高压环境激发氧气分子转化为羟基自由基、超氧阴离子等高活性氧物种，触发非均相芬顿反应^[3]。这些强氧化剂可无选择性地断裂有机污染物的共价键，将难降解的苯系

物、酚类物质矿化为二氧化碳与水。对于氨氮污染，纳米气泡界面处的氧化环境加速亚硝酸菌与硝酸菌的代谢活性，推动铵根离子向硝酸盐的高效转化。在底泥-水界面，纳米气泡的渗透作用氧化分解硫化物与腐殖酸，阻断内源污染释放通道。这种多路径协同的污染物去除机制，使得超氧纳米气泡技术对COD、TN、TP等指标的削减效率显著高于常规曝气工艺。

2.3 生态修复

超氧纳米气泡的生态修复功能体现在微生物群落重构与水生生态系统稳态恢复两个层面。溶解氧水平的持续提升重塑河道微生物的生存环境，促进硝化细菌、反硝化细菌的功能菌群比例优化，形成高效的氮循环代谢网络。气泡溃灭产生的微纳空化效应激活底泥中休眠态微生物的酶活性，加速有机质的矿化分解。对于水生植物，纳米气泡界面处的氧化环境消除根系周边的还原性毒害物质，增强沉水植物的光合作用效率与根系发育^[4]。鱼类等高等水生生物则因水体氧化还原电位的改善，降低亚硝酸盐中毒风险，提高繁殖存活率。在系统尺度上，纳米气泡技术修复“微生物-植物-动物”多营养级交互关系，重建河道生态链的能量流动与物质循环，最终实现“水质改善-生态恢复-景观重塑”的可持续治理目标。

3 超氧纳米气泡在河道水质提升中的应用实验设计

3.1 实验目的

评估超氧纳米气泡技术对河道水质的提升效果。

探究气泡尺寸、臭氧投加量等关键参数对水质提升效果的影响。

验证超氧纳米气泡技术在现场中试中的可行性和稳定性。

3.2 实验室模拟

实验室模拟实验旨在探究超氧纳米气泡的生成参数与污染物去除效能之间的关联性，为现场中试提供理论依据。实验装置采用文丘里管与微孔膜耦合的纳米气泡发生系统，通过调节气体压力与微孔膜孔径，生成50 nm和200 nm两种粒径的气泡^[5]。污染水体模拟典型黑臭河道水质特征，化学需氧量（COD）设定为80–120 mg/L，氨氮（NH₃-N）浓度控制在5–10 mg/L，添加腐殖酸、葡萄糖及硫酸铵模拟有机污染物与富营养化环境。实验设置两组变量：气泡尺寸（50 nm vs. 200 nm）和臭氧投加量（0.5–2.0 mg/L），每组实验重复3次以验证数据稳定性。

实验结果显示，50 nm气泡组在臭氧投加量为1.0 mg/L时，COD与NH₃-N去除率分别达到78%和65%，较200 nm气泡组提升35%以上（表1）。溶解氧（DO）动态监测表明，50 nm气泡的溶解氧提升速率为1.2 mg/L·h，是

传统曝气技术的3倍（如图1所示）。

表1 不同粒径气泡的污染物去除效率对比

气泡尺寸 (nm)	臭氧投加量 (mg/L)	COD去除率 (%)	NH ₃ -N去除率 (%)	DO提升速率 (mg/L·h)
50	0.5	65	52	0.8
50	1.0	78	65	1.2
50	2.0	83	69	1.3
200	1.0	58	43	0.5

3.3 现场中试

为验证实验室成果的工程适用性，在某城市内河段开展现场中试。试点河道全长500米，平均水深1.5米，底泥厚度约30厘米，常年处于黑臭状态（DO < 2 mg/L，COD > 80 mg/L）。设备采用太阳能驱动纳米气泡发生船，船体搭载高效光伏板与储能系统，日处理水量5000立方米，实现零碳排运行。气泡船沿河道巡航，通过底部扩散器释放50 nm超氧纳米气泡，臭氧投加量动态调节为1.0 mg/L。中试周期为30天，水质监测数据表明（表2）。

表2 现场中试水质指标变化

检测指标	处理前	第7天	第30天	去除率/提升率
DO (mg/L)	1.2	6.5	4.8	+300%
COD (mg/L)	98	37	42	57%
NH ₃ -N (mg/L)	8.2	3.4	3.8	54%
浊度 (NTU)	35	12	15	57%
底泥硫化物 (mg/kg)	320	26	45	86%

3.4 检测指标与方法

3.4.1 常规指标检测

溶解氧（DO）：采用碘量法（HJ 506-2009）实时监测；

COD：重铬酸钾法（HJ 828-2017）测定；

NH₃-N：纳氏试剂分光光度法（HJ 535-2009）；

总磷（TP）：钼酸铵分光光度法（HJ 670-2013）。

3.4.2 高级氧化效应分析

电子顺磁共振（EPR）检测羟基自由基（·OH）浓度，使用DMPO作为自旋捕获剂。数据显示，臭氧投加量1.0 mg/L时，·OH浓度达到4.7×10⁻⁶ mol/L，较0.5 mg/L组提升104%。

3.4.3 生态安全性评估

依据《水质 物质对淡水鱼急性毒性的测定》（GB/T 13267-91），选用本地鲫鱼进行96小时急性毒性实验。处理水体中鱼类存活率100%，且无异常行为，证实技术生态安全性。

3.5 结果与分析

3.5.1 气泡尺寸的优化机制

50 nm气泡因比表面积（120 m²/g）远超200 nm气泡（30 m²/g），其气液传质效率提升4倍。微小气泡可深入底泥孔隙（直径 > 50 μm），形成氧化屏障，抑制硫化物释放。电镜观察显示，50 nm气泡在底泥表面形成均匀覆盖层（图3），而200 nm气泡仅附着于表层。

3.5.2 臭氧投加的阈值效应

臭氧投加量与污染物去除率呈非线性关系。当投加量从0.5 mg/L增至1.0 mg/L时，COD去除率从65%升至78%；继续增至2.0 mg/L，去除率仅提高5%，但能耗增加60%。EPR数据表明，过量臭氧引发·OH自由基猝灭，导致氧化效率边际递减。

3.5.3 生态修复的长效性

微生物群落分析显示（表3），硝化螺菌属（Nitrosospira）丰度从1.2%增至4.7%，反硝化杆菌（Denitratisoma）从0.8%升至2.3%，形成完整的氮代谢通路。底泥酶活性（脱氢酶、脲酶）提升2-3倍，证实微生物代谢活性显著增强。

表3 底泥微生物群落结构变化

微生物类群	处理前丰度 (%)	处理后丰度 (%)	功能
Nitrosospira	1.2	4.7	氨氧化
Thiobacillus	0.5	2.1	硫化物氧化
Denitratisoma	0.8	2.3	硝酸盐还原
Clostridium	3.5	1.2	产甲烷（抑制）

3.5.4 技术经济性优势

与传统曝气+化学氧化技术对比（表4），超氧纳米气泡技术综合运行成本降低40%，且无化学污泥产生。以日处理5000 m³水体计算，年节约能耗约14.6万kWh，减少二氧化碳排放38吨。

表4 不同治理技术的经济性对比

技术参数	超氧纳米气泡	传统曝气	化学氧化
能耗（kWh/m ³ ）	0.4	0.8	0.2
药剂成本（元/m ³ ）	0.3	0	1.5
COD去除率（%）	78	45	70
污泥产量（kg/d）	0	0	120

3.5.5 结论

超氧纳米气泡技术通过“微界面传质-自由基氧化-生物协同”三重作用机制，实现河道水质的高效提升与生态功能恢复。实验表明，50 nm气泡结合1.0 mg/L臭氧投加量为最优工况，COD去除率78%，能耗较传统技术降低50%，且无生态毒性风险。该技术为城市黑臭水体治理提供了低碳、可持续的解决方案，具有显著的工程推广价值。

结束语

综上所述，超氧纳米气泡技术在河道水质提升中的应用研究，为破解城市黑臭水体治理难题提供了创新性解决方案。本研究进行多尺度实验验证与机理解析，证实该技术通过“微界面传质-自由基氧化-生物协同”三重作用机制，能够同步实现溶解氧高效补给、污染物深度去除及生态功能系统性恢复。实验室模拟与现场中试数据表明，50 nm气泡结合1.0 mg/L臭氧投加量的工况下，化学需氧量去除率达78%，溶解氧提升速率较传统曝气技术提高3倍，且底泥硫化物释放量减少86%，展现出显著的污染物削减与生态修复效能。技术经济性分析进一步揭示，其综合运行成本较传统工艺降低，且无化学污泥产生，契合绿色低碳治理理念。未来研究可进一步探索超氧纳米气泡与人工智能调控、微生物群落定向驯化等技术的耦合应用，开发自适应动态调控系统以应对复杂污染场景，为构建“人水和谐”的生态城市贡献了理论与实践支撑。

参考文献

[1]张骏,张晓雷,熊壮,等.超氧纳米气泡发生系统提升水质应用研究[J].环境科学与管理, 2024, 49(3):124-129.

[2]张晓雷,熊壮,甘雁飞,等.超氧纳米气泡对河道水质提升效果研究[J].环境科技, 2023, 36(6):41-46.

[3]奚斌,陈倩倩,陈伟,等.基于Mike21模型的河道水质提升工程试验研究[J].中国农村水利水电, 2023(5):5-11.

[4]刘婧,马佳,陈志远,等.海绵工程对城市河道水质提升研究——以杭州市为例[J].给水排水, 2023(S1):205-211.

[5]黄军政.某城市河道水质提升设计[J].工程建设, 2024, 56(4):56-60.