

大家之言

王天志, 邱顺添, 雒培媛. 一种饮用水安全保障新技术: 微纳米气泡[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 1-5, 156.

WANG T Z, QIU S T, LUO P Y. A new technology for drinking water safety: Micro-nano bubbles[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 1-5, 156.

一种饮用水安全保障新技术: 微纳米气泡

王天志, 邱顺添*, 雒培媛

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要 【目的】目前水资源的安全与质量问题日益突出, 尤其是在城市化进程加快的背景下, 保障饮用水的安全显得尤为重要。微纳米气泡(micro-nano bubbles, MNBs)技术(直径为 0.001~100.000 μm 的气泡被称为 MNBs)凭借独特的物理化学特性与多机制协同效应, 展现出显著的污染控制与系统优化的潜力, 逐渐成为饮用水安全保障的重要手段。【方法】水中 MNBs 可通过多种方法生成, 如机械剪切、超声空化等, 这些方法能够有效地产生大量的 MNBs。MNBs 的独特之处在于其在水中具有极大的比表面积(可达到 3 000 m^2/m^3)、超长的寿命(存在时间可长达数周), 以及高传质效率。此外, MNBs 在水中能够产生大量的自由基, 尤其是羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的生成量是臭氧的 5~10 倍, 这使得它们在氧化分解有机污染物方面具有显著优势。这种强大的氧化能力使得 MNBs 技术在水质提升方面展现出独特的应用价值。【结果】在水质提升的实际应用中, MNBs 技术并不是孤立存在的, 它常常与传统的氯消毒、紫外消毒、膜过滤等技术相结合, 形成协同效应。这种组合不仅能够重构水厂的处理流程, 还能有效抑制管网中的生物膜生成, 从而提高供水系统的整体效率。此外, MNBs 还具备动态水质调控的能力, 能够根据水质变化及时调整处理策略, 确保水质的安全与健康。【结论】在推动供水系统向低碳化、绿色化转型的过程中, MNBs 技术有望成为饮用水安全的核心解决方案。通过减少对传统化学药剂的依赖, 降低水处理过程中的能耗, 这项技术不仅提升了水处理的效率, 也对环境保护产生积极影响, 为实现安全、健康、可持续的饮用水供应作出重要贡献。

关键词 微纳米气泡(MNBs) 饮用水与健康 供水系统 消毒技术 高级氧化(AOP)

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)06-0001-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.001

A New Technology for Drinking Water Safety: Micro-Nano Bubbles

WANG Tianzhi, KHU Soonthiam*, LUO Peiyuan

(School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract [Objective] At present, the issues of water resource security and quality are becoming increasingly prominent. Especially against the backdrop of the accelerated urbanization process, ensuring the safety of drinking water is particularly important. The micro-nano bubbles (MNBs) technology (bubbles with diameters ranging from 0.001 μm to 100.000 μm are called MNBs), with its unique physicochemical properties and multi-mechanism synergy effects, has shown significant potential for pollution control and system optimization, and has gradually become an important means to ensure the safety of drinking water. [Methods] MNBs in water can be generated through various methods, such as mechanical shearing and ultrasonic cavitation, which can effectively produce a large amount of MNBs. The uniqueness of MNBs lies in its extremely high specific surface area in water (up to 3 000 m^2/m^3), extremely

[收稿日期] 2025-05-14

[基金项目] 天津大学科技创新领军人才“启明计划”(2024XQM-0038): 微纳米气泡水中 $\cdot\text{OH}$ 原位生成及其对生物膜控制机制

[作者简介] 王天志, 男, 副研究员, 博士生导师, 研究方向为微纳米气泡设备研发、饮用水安全保障, 以及农业高效种植与土壤修复、表面清洗等, E-mail: wangtianzhi@tju.edu.cn。

[通信作者] 邱顺添, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智慧水务、无药化饮用水技术开发、智慧供排水监测布局优化, E-mail: soon.thiam.khu@tju.edu.cn。

long lifespan (existence time can last for several weeks), and high mass transfer efficiency. In addition, MNBs can generate a large number of free radicals in water, especially the generation of hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) is from 5 times to 10 times that of ozone, which gives them a significant advantage in the oxidation and decomposition of organic pollutants. This powerful oxidation capacity enables the MNBs technology to demonstrate unique application value in water quality improvement. [Results] In practical applications of water quality improvement, MNB technology is not isolated; it is often combined with traditional chlorine disinfection, ultraviolet disinfection, membrane filtration, and other technologies to form a synergistic effect. This combination not only reconfigures the treatment process of water treatment plants but also effectively inhibits the formation of biofilms in the distribution network, thereby improving the overall efficiency of the water supply system. Moreover, MNBs have the ability to dynamically regulate water quality, adjusting treatment strategies in real time according to changes in water quality, ensuring the safety and health of water quality. [Conclusion] In the process of promoting the transformation of water supply systems towards low-carbon and green, MNB technology is expected to become the core solution for drinking water safety. By reducing reliance on traditional chemical agents and lowering energy consumption in the water treatment process, this technology not only enhances the efficiency of water treatment but also has a positive impact on environmental protection, making significant contributions to achieving safe, healthy, and sustainable drinking water supply.

Keywords micro nano bubbles (MNBs) drinking water and health water supply system disinfection technology advanced oxidation process(AOP)



王天志,天津大学环境科学与工程学院副研究员,硕士生导师/博士生导师,致力于环境工程领域的前沿研究,聚焦微纳米气泡技术的创新应用与多学科交叉融合,注重理论创新与技术转化,形成“技术突破-商业转化”特色科研体系,构建了完整的微纳米气泡技术自主知识产权体系,并获得天津海棠基金投资,成功实现微纳米气泡技术的产业化。近年来,主持科研项目15项,总经费超400万元;发表SCI论文40余篇(以第一/通信作者发表25篇);出版专著1部;申请专利22项,授权15项;获环境保护科学技术一等奖1项、中国生态环境十大科技进展1项、国家专利奖1项、水利部认定水利先进实用技术1项,入选天津大学科技创新领军人才培养“启明计划”、天津市宁河区“领衔专家”。在微纳米气泡设备研发、饮用水安全保障、农业高效种植与土壤修复、表面清洗等领域取得了一系列具有国际影响力的成果。

全球饮用水安全正经历一场静默的危机,水源污染物的复杂化(从农药残留到微塑料)、消毒副产物的长期健康风险、基础设施老化引发的二次污染以及气候变化加剧的水质波动。传统水处理技术(如氯化、絮凝、膜分离)在效率、能耗与生态友好性方面已显现瓶颈。在此背景下,微纳米气泡(micro-nano bubbles, MNBs)技术以其独特的物理化学特性和多机制协同效应,成为破解困境的关键技术之一。文章系统阐述了 MNBs 技术用于饮用水安全保障的可行性,可为 MNBs 技术的科学研究和工程应

用提供系统性参考。

1 MNBs 的物理化学本质:界面科学的范式突破

MNBs 通常指直径为 $0.001 \sim 100.000 \mu\text{m}$ 的气态分散体系^[1],其行为受纳米尺度界面效应主导,按尺寸与功能可分为微米气泡(直径为 $1 \sim 100 \mu\text{m}$)、亚微米气泡(直径为 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$)和纳米气泡(直径 $<100 \text{ nm}$)。MNBs 生成方法主要包括机械剪切、溶气释气、超声空化等,相关技术的对比与创新如表1所示。

表1 MNBs 生成技术对比与创新^[2]

Tab. 1 Comparison and Innovation of MNBs Generation Technologies^[2]

技术名称	原理	气泡尺寸	能耗/ $[(\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-3}]$	产业化成熟度
机械剪切法	湍流剪切破碎气体	$1 \sim 50 \mu\text{m}$	$0.3 \sim 0.5$	成熟(工业级)
加压溶解释压法	亨利定律驱动过饱和气体释放	$0.05 \sim 5.00 \mu\text{m}$	$0.8 \sim 1.2$	中等(水厂应用)
超声空化法	超声波诱导空穴崩溃生成气泡	$<200 \text{ nm}$	$1.5 \sim 2.0$	实验室阶段
微流控芯片法	微通道几何控制气泡单分散性	$10 \sim 100 \text{ nm}$	$0.1 \sim 0.3$	医疗/特殊领域
等离子体活化法	电离气体生成高活性气泡	$1 \sim 10 \text{ nm}$	$2.0 \sim 3.0$	试验探索

MNBs 核心特性主要有 4 点^[3]:(1)其在体系中具有较高的稳定性,本团队得到的气泡初始浓度为 $(2.09 \sim 5.82) \times 10^8$ 个/mL,在 0~180 d 内,气泡浓度虽然在 0~20 d 内迅速衰减,但 20 d 后趋于稳定,在衰减 180 d 后,水中气泡的浓度仍维持在 $(2.11 \sim 10.06) \times 10^6$ 个/mL^[4],表面 MNBs 在水中存在时间长达数周甚至数月;(2)其体积较小,具有较大的比表面积,与污染物的接触面积也较大,显著提高了污染物与气泡的黏附概率,污染物很容易被吸附到 MNBs 界面上,被氧化剂降解或随气泡上升至水面;(3)MNBs 表面呈负电性,产生静电斥力,抑制奥斯特瓦尔德熟化,当气泡在水中收缩时,电荷离子会在非常狭小的气泡界面上迅速浓缩和富集,表现为 Zeta 电位显著增加;(4)MNBs 溃灭后可以产生氧化能力极强的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)。MNBs 界面上的高负 Zeta 电势、积累的 OH^- 以及气泡最后塌陷时形成的高温高压起到了关键作用。

目前,MNBs 在农业种植、水产养殖、水处理和清洗等领域展现出巨大的应用前景。MNBs 水浇灌后,黄瓜和番茄产量显著提升,秋茬期最高提升 14.53%和 40.88%^[5];MNBs 可使石斑鱼的存活率达 100%,生物质产量提高 37.3%^[6];MNBs 处理后可提高饮用水生物稳定性,降低总菌数(下降了 45.6%),对生物可降解溶解性有机碳(BDOC)和可同化有机碳(AOC)的平均降解率分别为 42.74%和 49.49%^[7];MNBs 溃灭后形成的纳米射流使周围粒子速度增大(最大为 3 km/s),产生强烈的冲击力和剪切力,使污染物从表面脱落,MNBs 新型果蔬清洗机对韭菜、白菜和黄瓜的农残清洗率均可达 80%^[8]。

MNBs 的作用机制主要包括其超常的稳定性,高效传质能力,污染物靶向作用以及强氧化性,具体阐述如下。

(1)超常稳定性:MNBs 的表面负电荷(Zeta 电位为 $-50 \sim -30$ mV)可以产生静电斥力,抑制奥斯特瓦尔德熟化,从而保证了气泡的超常稳定性。

(2)高效传质:MNBs 的界面面积呈现指数级增长,1 mL MNBs 的比表面积达 3 000 m^2 ,是活性炭的 100 倍;此外,由于纳米气泡的高压溶解效应,其内部压力 $[\Delta P = 2\gamma/r, \Delta P$ 为弯曲液面内侧(曲率中心)一侧与外侧(远离曲率中心一侧)之间的压强差,Pa; γ 为表面张力系数,N/m; r 为弯曲液面的曲率半

径,m]可使氧气质量浓度达 40 mg/L(常规曝气仅为 9 mg/L)。

(3)污染物靶向作用:MNBs 在污染物吸附方面具有靶向作用,疏水性(接触角 $>90^\circ$)的微塑料[聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)]可自发吸附至气泡表面。此外,MNBs 表面带负电,可对金属离子发生静电捕获作用,在 pH 值=6 的情况下,气泡对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附容量为 150~250 mg/g。MNBs 还可与 TiO_2 形成“气-固-液”三相催化界面,光量子效率提升至 45%。

(4)强氧化性:MNBs 溃灭过程中产生的高温高压可使其表面聚集的 OH^- 吸收能量,产生氧化能力极强的 $\cdot\text{OH}$,氧化能力比臭氧高 5~10 倍^[7]。

2 水质提升:从分子级净化到健康效应升级

MNBs 对水质提升的作用主要有以下 4 点。

(1)多维度污染物协同去除。 $\cdot\text{OH}$ 对有机物的二级反应速率常数 $[k = 1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^{10} \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})]$ 远超传统氧化剂[臭氧 $k = 1 \sim 1 \times 10^3 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})]$ ^[9]。

(2)病原微生物的灭活。MNBs 对病原微生物的灭活机制为物理-化学协同灭活,物理作用主要是微射流机械损伤^[10];化学作用方面,MNBs 可对微生物产生氧化应激攻击^[7],活性氧会破坏病毒衣壳蛋白。

(3)生物膜生态调控。MNBs 可穿透生物膜基质,对铜绿假单胞菌生物膜清除率 $>75\%$,酶活性检测显示,MNBs 使生物膜内三磷酸腺苷(ATP)浓度降低 80%,抑制微生物代谢^[7]。(4)从达标到卓越的感官与健康效应。MNBs 处理饮用水后可使感官品质升级,在安全条件下,本团队在 2023 年 9 月—2023 年 11 月,利用某品牌矿泉水作为水源,制备出稳定的空气源 MNBs 矿泉水,随机选择 150 名年龄为 20~30 岁的年轻人进行了 MNBs 饮用水与普通饮用水口感调查,调查结果^[4]表明,与普通饮用水相比,85.7%的人认为 MNBs 水软或很软,73.3%的人认为 MNBs 水甜或很甜。

3 MNBs 对供水系统的改造与升级潜力

MNBs 技术可以与氯消毒、紫外消毒和膜过滤等技术相结合,支持供水系统在多个环节的改造和升级。

(1)水源处理阶段

MNBs 与氯消毒相结合,可以显著提高氯消毒效果,MNBs 可以增加氯的溶解度和均匀性,提升氯

在水中的分布,确保消毒效果均匀。MNBs 还可增强消毒效果,氯的投加量减少,从而降低消毒副产物生成,提高水质安全性。与紫外消毒结合时,MNBs 可以增加水中微生物对紫外光的接触面积,提升紫外消毒的效率,MNBs 还能够去除水中悬浮物和浑浊物^[11],提高水的透明度,增强紫外线的穿透率。与膜过滤处理相结合时,MNBs 可以改善膜的流体动力学条件,提升过滤性能,为饮用水安全提供保障,MNBs 还可以通过物理作用减缓膜表面的污染物沉积,降低膜污染速率,维护成本^[12]。

(2) 管网与多级过滤系统

MNBs 可有效减少管网内沉积物和生物膜的形成^[13],增强氯的消毒效果,确保水质稳定。MNBs 可减少污垢和生物膜的积累,从而降低管网的清洗频率,节省维护成本,饮用水管壁生物膜的形成过程可以分为缓慢生长阶段(slow growth phase, SP, 0~27 d)、快速生长阶段(rapid growth phase, RP, 27~42 d)、动态稳定阶段(dynamic stability phase, DP, 42~66 d)3 个阶段,水中 MNBs 能够显著抑制初期和中期生物膜的形成,氧气 MNBs 对生物膜的抑制

效果最好,能减少管壁 77.87% 的生物膜形成(以干重计)^[14]。MNBs 对生物膜的抑制机制分“SP 阶段-物理阻碍和化学氧化、RP 阶段-氧化灭活、DP 阶段-吸附冲刷”3 步进行,如图 1 所示。MNBs 首先附着在管壁表面,形成疏水层,阻碍微生物在管道壁面的附着;MNBs 溃灭作用在管壁表面产生较强的局部剪切作用,进一步增加了微生物在壁面的附着难度;水中 MNBs 在溃灭过程中生成了大量的 $\cdot\text{OH}$,其浓度可以达到 $9.07 \sim 26.67 \mu\text{mol/L}$ 。 $\cdot\text{OH}$ 会氧化降解生物膜外层大量的胞外聚合物,同时 $\cdot\text{OH}$ 会抑制非耐氧细菌的生长,增加耐氧细菌的竞争优势,缩小生物膜中优势菌群之间的差异,改变了微生物群落中的关键菌种,降低微生物群落的多样性。尤其是对调控胞外聚合物形成的关键菌种浮霉菌门(Planctomycetes)的灭活率为 54.22%~61.66%,这使得水中有机物和生物膜胞外聚合物均显著降低[水中 TOC、生物膜中胞外聚合物(EPS)的去除率分别为 87.93%]。在多级水处理系统中,将 MNBs 与膜过滤相结合,可降低二次污染风险。MNBs 可减少或替代传统化学药剂的使用,提升水

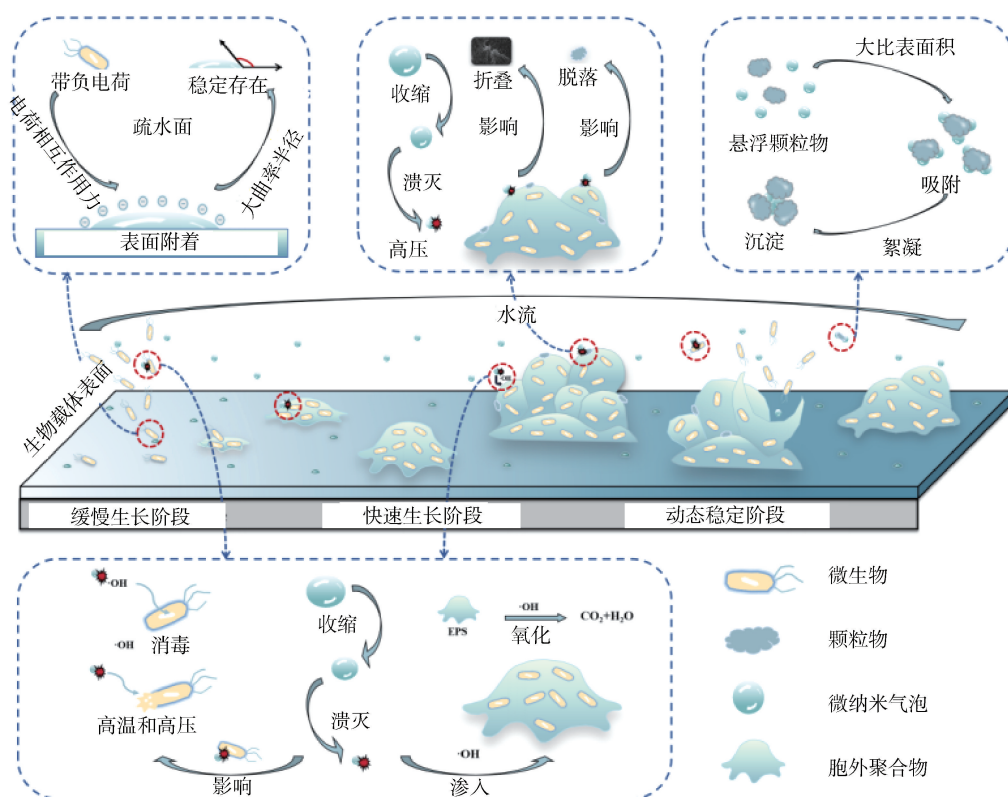


图 1 MNBs 在不同阶段对生物膜生长的调控机理^[13]

Fig. 1 Regulation Mechanism of MNBs on Biofilm Growth at Different Stages^[13]

质安全,降低对环境的影响。此外,在管道和储水设施中引入 MNBs,可以确保紫外光在水体中均匀分布,提高紫外消毒技术的均匀性,降低紫外消毒系统的维护频率,延长设备使用寿命。

(3) 终端用户水质保障

在用户端添加 MNBs 装置,可在氯消毒的基础上进一步确保水质安全,增强终端消毒效果,提高用户饮水安心度。在家庭、商业和工业用水的终端设施中,结合 MNBs 和紫外消毒装置,可提升用户饮水信心。MNBs 与膜过滤结合可以有效去除水中细菌、病毒和有机物,提供安全、健康的饮用水,显著改善水的口感和清澈度,提升用户的饮水体验,具有巨大的商业前景。

4 未来展望

MNBs 技术是一种新兴的水处理技术,在水处理领域具有较大应用潜力,尤其在分散式供水、精准治理场景中。随着智能化控制[如物联网(IoT)实时监测]和材料科学的进步,其应用将更趋成熟,推动水质保障从“达标处理”向“健康增值”转型。在相关政策(如我国“水十条”、欧盟水框架指令等)推动水处理技术升级,MNBs 契合“双碳”目标,技术创新(如低能耗气泡发生器、多技术联用持续突破,提升处理效率与适用性)的需求以及新兴需求(如高端饮用水市场兴起)增长的三重背景驱动下,MNBs 可赋予产品差异化商业价值。MNBs 主要具备以下几个关键优点,能够有效提升饮用水的安全性和质量。

(1) 增强气体溶解能力:MNBs 具有较大的比表面积,使得气体(如氧气、臭氧等)在水中溶解更加充分,从而增强水的氧化能力和杀菌效果。

(2) 物理和化学去污能力:MNBs 能够携带和聚集水中的污染物,通过物理作用(如絮凝、沉降等)促进污染物的去除。还可结合臭氧 MNBs 技术,实现高效消毒,保障管道末梢水质安全。

(3) 增强过滤效果:在家用净水设备中集成 MNBs 模块,可增强过滤效果,去除余氯、异味,提升直饮水口感。

此外,未来还需要关注以下几个方面,才能进一步推动 MNBs 技术在净水领域的应用。

(1) 长效与安全性评估:需开展长期跟踪研究,评估 MNBs 技术对饮用水质量的长期影响,以及其

对生态系统的影响,确保其安全性和有效性。

(2) 多功能与集成化发展:探索 MNBs 技术与其他水处理技术的结合,如与膜技术、紫外线消毒等的联用,以实现更高效的综合水处理解决方案。

(3) 公众认知与接受度:提升公众对 MNBs 技术的认知和接受度,开展科普活动,增进社会对新技术的理解和信任,以促进其在饮用水处理领域的应用。

参考文献

- [1] 王巧芝. 体相微纳米气泡的产生、性能及其模板化作用的研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
WANG Q Z. Generation, properties and templating functionality of bulk micro and nanobubbles [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [2] NIRMALKAR N, PACEK A W, BARIGOU M. On the existence and stability of bulk nanobubbles [J]. Langmuir, 2018, 34 (37): 10964–10973.
- [3] WANG T Z, YANG C, SUN P, et al. Generation mechanism of hydroxyl free radicals in micro-nanobubbles water and its prospect in drinking water [J]. Processes, 2024, 12(4): 683. DOI: 10.3390/pr12040683.
- [4] LUO P Y, WANG T Z, LIN F W, et al. Promoting strategies for biological stability in drinking water distribution system from the perspective of micro-nano bubbles [J]. Science of the Total Environment, 2024, 954: 176615. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176615.
- [5] LIU Y, ZHOU Y, WANG T Z, et al. Micro-nano bubble water oxygation: Synergistically improving irrigation water use efficiency, crop yield and quality [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 222: 835–843. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.208.
- [6] HANIF I M, EFFENDI I, BUDIARDI T, et al. The recirculated aquaculture system (RAS) development with nanobubble application to improve growth performance of grouper fish fry culture[J]. Jurnal Akuakultur Indonesia, 2021, 20(2): 181–190.
- [7] LUO P, WANG T Z, LIN F, et al. Promoting strategies for biological stability in drinking water distribution system from the perspective of micro-nano bubbles [J]. Science of the Total Environment, 2024, 954, 176615. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176615.
- [8] 刘玉德, 吴刚, 张浩, 等. 微纳米气泡的特性及其在果蔬中的应用[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(3): 83–88.
LIU Y D, WU G, ZHANG H, et al. Characteristics of micro-nano-bubble and its application in fruits and vegetables [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 35(3): 83–88.

(下转第 156 页)

- WU Z Y, ZHOU Y L, PAN X Y, et al. Research on the whole cycle technical treatment and disposal system of dredging sludge [J]. *Journal of Municipal Technology*, 2023, 41 (3): 182–190.
- [11] SCHNELL M, HORST T, QUICKER P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 263: 110367. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110367.
- [12] 陈功. 通沟污泥处理的提质增效改进工艺设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(16): 78–82.
- CHEN G. Process design to improve quality and efficiency of sewer sludge treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(16): 78–82.
- [13] 郁片红, 赵国志. 浦东新区排水管道污泥处理处置规划研究[J]. *上海建设科技*, 2018(2): 56–57.
- YU P H, ZHAO G Z. Research and planning of sludge treatment and disposal in the sewerage system in Pudong New District [J]. *Shanghai Construction Science and Technology*, 2018(2): 56–57.
- [14] 郭瑞, 陈同斌, 张悦, 等. 不同污泥处理与处置工艺的碳排放[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(4): 673–679.
- GUO R, CHEN T B, ZHANG Y, et al. Review of carbon emission in the process of sludge treatment and disposal [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(4): 673–679.
- [15] 刘洪涛, 陈同斌, 杭世珩, 等. 不同污泥处理与处置工艺的碳排放分析[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(17): 106–108.
- LIU H T, CHEN T B, HANG S J, et al. Analysis on carbon emission from different sewage sludge treatment and disposal processes [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26 (17): 106–108.
- [16] 梁恒, 杜鹏, 刘宁, 等. 污水厂污泥好氧堆肥设计及运行[J]. *净水技术*, 2017, 36(2): 95–98.
- LIANG H, DU P, LIU N, et al. Design and operation of sludge aerobic composting for wastewater treatment plant (WWTP) [J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(2): 95–98.
- [17] 王怡. 城市建筑垃圾和园林废弃物资源化途径和模式研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- WANG Y. Investigation on the approach and model of construction waste and garden waste recycling [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [18] LI C, SONG Z, ZHANG W, et al. Impact of hydroxyl aluminum speciation on dewaterability and pollutants release of dredged sludge using polymeric aluminum chloride [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 103051. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103051.
- [19] CAI S, LIU M, ZHANG Y, et al. Molecular transformation of dissolved organic matter and formation pathway of humic substances in dredged sludge under aerobic composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 364: 128141. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128141.
- [20] 陈星. 利用发芽指数评价堆肥腐熟度方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- CHEN X. Study on evaluation method of compost maturity by germination index [D]. Yanglin: College of Natural Resources and Environment Northwest A&F University, 2022.
- [21] PENG L, CHEN B. Investigation on rapid solidification of waste dredged sludge with magnesium phosphate cement modified by GGBFS [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(14): 7319–7344.
- [22] WANG S, HE X, GONG S, et al. Influence mechanism of fulvic acid on the strength of cement-solidified dredged sludge [J]. *Water*, 2022, 14(17): 2616.
- [23] MUSCOLO A, PAPALIA T, SETTINERI G, et al. Are raw materials or composting conditions and time that most influence the maturity and/or quality of composts? Comparison of obtained composts on soil properties [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 93–101. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.204.

(上接第 5 页)

- [9] 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, 229: 1–11. DOI: 10.1007/s11270-018-3745-x.
- [10] 闫聪聪, 崔海航, 张鸿雁, 等. 微气泡生长与溃灭对邻近微球影响的数值模拟研究[J]. *应用力学学报*, 2019, 36(3): 580–587, 758.
- YAN C C, CUI H H, ZHANG H Y, et al. Numerical simulation of the effects of microbubble expansion and collapse on adjacent microspheres [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(3): 580–587, 758.
- [11] LU J, HUANG X, ZHANG Z, et al. Co-coagulation of micro-nano bubbles (MNBs) for enhanced drinking water treatment: A study on the efficiency and mechanism of a novel cleaning process [J]. *Water Research*, 2022, 226: 119245. DOI: 10.1016/j.watres.2023.121032.
- [12] 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.
- [13] HU L, XIA Z. Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 342: 446–453. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.08.030.
- [14] LUO A, WANG T Z, LUO P, et al. Mechanism by which micro-nano bubbles impact biofilm growth in drinking water distribution systems [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2025 (3): 754–767. DOI: 10.1039/D4EW00704B.