

王美琳, 陈鲁海, 刘亚男. 微纳米气泡的气液界面作用在水处理与农业种植及水产养殖中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(6): 14-21.

WANG M L, CHEN L H, LIU Y N. Application of gas-liquid interface interaction of micro-nano bubbles in water treatment and agricultural planting and aquaculture[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(6): 14-21.

微纳米气泡的气液界面作用在水处理与农业种植及水产养殖中的应用

王美琳¹, 陈鲁海², 刘亚男^{1,*}

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 纳泡检测技术<上海>股份有限公司, 上海 201709)

摘要 近年来, 微纳米气泡(MNBs)由于其具有比表面积大、水中停留时间长、气液传质效率高、Zeta 电位高和能产生大量含氧活性基团等独特物理、化学特性而受到人们的广泛关注。随着对 MNBs 产生原因及其机理的不断研究, 人们发现 MNBs 在环境修复、医疗、工业、农业等领域具有很好的应用潜能。文中简要介绍了 MNBs 强化气液传质、高 Zeta 电位与高稳定性、强化自由基生成等气液界面作用, 并对 MNBs 技术在水处理、农业种植与水产养殖中的应用进行了综述, 希望为其在相关领域应用提供理论和技术参考。

关键词 微纳米气泡 气液界面作用 水处理 农业种植 水产养殖

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)06-0014-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.06.003

Application of Gas-Liquid Interface Interaction of Micro-Nano Bubbles in Water Treatment and Agricultural Planting and Aquaculture

WANG Meilin¹, CHEN Luhai², LIU Yanan^{1,*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Nanobubble Technology <Shanghai> Co., Ltd., Shanghai 201709, China)

Abstract In recent years, micro-nano bubbles (MNBs) draw widespread attention due to the unique physical and chemical properties, such as high surface area, long residence time in water, high gas-liquid mass transfer efficiency, high Zeta potential and the ability to generate a large number of reactive oxygen species. With the continuous study of the causes and mechanisms of MNBs, it has been found that MNBs have good application potential to be applied in environmental remediation, medical treatment, industry and agriculture. In this paper, the gas-liquid interface interaction such as strengthen gas/liquid mass transfer, high Zeta potential, high stability and strengthen free radical generation are briefly introduced. This paper reviews the application of MNBs technology in the fields of water treatment, agricultural planting and aquaculture, to provide a theoretical and technical reference for the application in related fields.

Keywords micro-nano bubbles (MNBs) gas-liquid interface interaction water treatment agriculture planting aquaculture

近年来, 微纳米气泡(MNBs)技术快速发展, 在胶片制作、医学诊疗、浮选、污水处理、水产养殖、无

土栽培及冶金等方面得到了广泛应用^[1-2]。按照国际标准化组织定义, 微气泡(MBs)指的是直径 $>1\ \mu\text{m}$ 且 $\leq 100\ \mu\text{m}$ 的气泡, 而通常直径 $\leq 1\ \mu\text{m}$ 的称为纳米气泡(NBs)或超微气泡, 二者统称为MNBs。它们具有许多大气泡所不具备的独特性质, 如气液传质效率高、上升速率低、界面 Zeta 电位高、强化自由基生成等^[3-4]。MNBs 对环境友好且成本较低的优势已逐步显现并受到人们越来越多的关注, 但该技术机理和应用研究仍处于起步阶段^[5]。

[收稿日期] 2022-04-18

[基金项目] 上海市科技兴农项目[沪农科推字(2022)第2-2号]; 国家自然科学基金项目(51979039)

[作者简介] 王美琳(1999—), 女, 硕士, 研究方向为微纳米气泡种养结合, E-mail: 1607457861@qq.com。

[通信作者] 刘亚男(1978—), 女, 博士, 研究方向为微纳米气泡水处理及农业应用, E-mail: liuyan@dh.edu.cn。

传统的水处理技术往往需要消耗大量化学药剂和能量才能达到预期处理效果,而 MNBs 可在不使用外加化学药剂的情况下产生高活性自由基,实现污染物去除,是一种可持续发展的现代净水技术^[6]。此外,深入实施农业技术创新与改革,支持建设国家现代农业产业园、优势特色产业集群是我国农业发展的战略方向。将 MNBs 应用于农业方面,有利于提高农作物产量和质量,改良土壤,减少农业排放对环境的污染,实现我国农业的可持续绿色发展。

1 MNBs 强化气液传质

气泡的上升速度是与气泡在水环境中行为有关的重要参数。斯托克斯方程给出了层流状态下气泡的上升速度方程,如式(1)。由式(1)可知,气泡的上升速度与直径成正比,MNBs 的直径在上升过程中会随着表面张力的增加而逐渐变小,直径小的 MNBs 与大气泡相比具有更低的上升速度和更长的停留时间,传质能力也随之升高^[7]。

$$v = \frac{(\rho_l - \rho_g)gd_b^2}{18\mu} \quad (1)$$

其中: v ——上升速度, m/s;

g ——重力加速度, m/s²;

ρ_g ——气体密度, kg/m³;

ρ_l ——液体密度, kg/m³;

d_b ——气泡直径, m;

μ ——液体黏度, Pa·s。

MNBs 表面为负电位,气泡之间因相互排斥不会融合而得以在整个液体环境中持续传输气体。MNBs 具有微小的曲率半径并受表面张力的持续影响,气泡内部压力明显高于外部环境,因此,气体在液体中的溶解度增大,气液传质效率显著提高^[8]。

1.1 净水增氧

在水处理过程中,常常需要曝气增氧,氧气不仅是维持生物生命活动的重要物质,也是某些污染物降解过程中的反应物。传统的机械曝气需要消耗大量电能,而氧传输效率只有 6%~10%,用 MNBs 技术代替传统曝气可以强化氧传质,提高水体溶解氧(DO)浓度。DO 的升高可以增强生物酶活性,加速生物膜生长,促进细胞的新陈代谢和微生物的生长繁殖,胞外聚合物含量也随之增多^[9],水体和沉积物中污染物的生物降解速率加快^[10]。Yao 等^[11]使

用传统曝气和微纳曝气进行 40 min 充氧试验,结果显示 MNBs 曝气过程中氧转移系数(K_{La})、氧转移速率(OTR)和氧转移效率(OTE)分别为 0.56 min⁻¹、0.36 kg/(m³·h)和 71.43%,这些指标是常规曝气的 15 倍。通过短期间歇试验和长期(40 d)序批式试验,发现 MNBs 曝气的氨氮去除率是常规曝气的 3.2 倍且比传统曝气节能 50%。Wu 等^[12]利用 MNBs 技术处理黑臭水体,经 5 d 曝气后,水体 DO 质量浓度从 0.60 mg/L 增至 5.00 mg/L 以上,氧化还原电位(ORP)从负值增至 100.00 mV 以上,化学需氧量(COD)和氨氮的去除率达到 50%左右。

1.2 营养液增氧

营养液所含 DO 对水培植物产量和品质至关重要。现今,农业中常采用泵循环方式增氧,但该方式效率不高,很难满足水培植物的生长需求^[13]。MNBs 技术能够增加水中 DO,且能去除营养液中的部分污染物和病原体,增强根系对营养物质的吸收能力,从而提高农产品产量和品质。周云鹏等^[14]利用不同浓度的微纳米气泡水加氧(MNBO)灌溉水培油麦菜、小白菜、小油菜,发现它们的干重随着 DO 含量的上升均呈现出先增后降的趋势,而根长则随 DO 含量的上升一直增加。综合考虑,MNBO 适宜的 DO 质量浓度为 10~20 mg/L。

1.3 水产养殖增氧

在水产养殖业中使用 MNBs 技术,一方面可以充分发挥其增氧作用,养殖塘底部较高的 DO 有利于底泥沉积物的好氧分解,减少沉积物对养殖塘水质的不利影响;另一方面发挥其曝气作用,曝气时, MNBs 可以将沉积的氨氮、硫化氢等有毒有害物质带到水面,排出塘体,达到净化水质的目的^[15]。王扬才等^[16]发现,经 NBs 增氧的养殖水体中 DO 比传统曝气平均提高 7.66%。Budhijanto 等^[17]研究发现,MBs 曝气组中鱼的死亡率始终低于传统曝气组,试验结束时,MBs 曝气组中鱼的长度比传统曝气组长 25%,平均质量约是传统曝气组的 2 倍。

2 MNBs 的荷电性与稳定性

Zeta 电位常用于表示颗粒和气泡之间的吸引力或静电排斥力的大小,也是决定胶体分散系中 MNBs 寿命的重要物理指标,一般 Zeta 电位绝对值越高,气泡物理稳定性就越好。Zeta 电位取决于气体在气液界面产生 OH⁻ 的能力, MNBs 在 pH 值为

2~12 时通常带负电^[18]。当 MNBs 收缩时,电荷离子在非常狭小的气泡界面上快速聚集,Zeta 电位显著增加,到 MNBs 破裂前在界面处可形成非常高的 Zeta 电位值,气泡具有极强的稳定性。试验^[19]发现,在高 pH、低温和低盐的溶液中,气泡的负 Zeta 电位更高。

2.1 气浮除污

MNBs 由于其具有比表面积大、停留时间长、稳定性高的特点,更易分散在水环境中,气泡与颗粒的碰撞几率也大幅度增加。MNBs 能够黏附更小的微粒或油滴,黏附在单个颗粒或油滴上的气泡数量也会增多,在 MNBs 气泡联合拖曳力的作用下,污染物会以更高的上升速度被提升到废水表面,杂质的分离效率大大提高^[20]。同时,MNBs 可以增强 MBs 和大气泡对杂质的黏附力,使颗粒团聚现象更易发生^[21-22]。MNBs 可以选择性地吸附到疏水性颗粒表面上,提高目标物的可浮性,将其带到水体表面去除。由于 MNBs 的特性,它们可被应用于去除细小的胶体颗粒、分散油类、离子和胺类化合物等^[23-24]。

Etchepare 等^[25]利用 MNBs 气浮去除胶体沉淀物和纳米氢氧化铁颗粒,水中固体的去除率可达 99%,铁的总残留量小于 1 mg/L。Kim 等^[26]采用 MNBs 预处理去除水中氟化物,选用聚合氯化铝 (PAC)、硫酸铝 (明矾)、F900 [$M(OH)_x(Cl)_y$] 及 A-聚合物和 A-430P 聚合物混合作为混凝剂。使用 MNBs 预处理后,除明矾和 A-430P 的组合外,各组氟化物去除率都有增加,PAC 和 A-430P 聚合物与 MNBs 组合的除氟率最高为 76.9%。明矾和 A-430P 聚合物与 MNBs 预处理的组合对 COD 的去除率最高为 64.6%。反应时间为 1 h 时最佳,沉降需要超过 20 min。Silva 等^[27]将混凝气浮工艺与 MNBs 技术结合处理锅炉水,结果表明,以 50 mg/L 磷酸钠为沉淀剂,20 mg/L 油酸钠作为疏水剂时,在 pH 值为 11.5、饱和压力为 0.4 MPa 的条件下可产生约 2.5×10^8 个/mL 的 NBs (气泡直径为 100~500 nm),并获得最佳处理效果。在中试中污水总硬度降低 80%,剩余钙离子和磷酸盐离子质量浓度分别为 12 mg/L 和 2 mg/L。

2.2 气浮澄清

Azevedo 等^[28]研究了在离心多相泵中注入空气产生 MNBs 气浮澄清原水的方法。在泵压力为 0.4 MPa 的最佳压力下,液体含气率为 1.2%,NBs 含量

为 1×10^8 个/mL。在巴西某水处理厂澄清池中利用多相泵 (F-MP) 形成气浮和层状沉淀,在高水力负荷下 (9~15 m/h),即使不使用混凝剂,F-MP 也表现出较好的处理效果,出水浑浊度达到 2 NTU (原水浑浊度为 10~25 NTU)。MNBs 与泵结合的使用拓宽了现代气浮的研究方向和应用范围。

3 强化自由基生成

MNBs 能够产生大量活性氧自由基 (ROS) 从而强化污染物的去除。MNBs 内部气体溶解到水中,使气泡不断收缩最终破灭。气液界面快速收缩导致离子在界面附近积聚,电荷密度增大。气泡破裂瞬间,气液界面的消失使 Zeta 电位的绝对值迅速增加并形成能量场,这种能量场使氧分子分解,分解产物利用分散在界面周围积累的化学势能生成羟基自由基 ($\cdot OH$)^[29]。

3.1 强化污染物去除

臭氧 (O_3) 由于其极强的氧化能力,在水处理中得到了广泛的应用。然而, O_3 在水相中的低溶解度和快速分解特性使其在水环境中的作用受到限制。MNBs 具有较高的传质速率和相对长的停留时间,可延长 O_3 半衰期使其在水中保持稳定,以保证其反应活性^[30-31]。Nam 等^[32]利用臭氧微纳米气泡 (OMNBs) 和 O_3 大气泡降解苯并 [a] 芘,去除率分别为 94.19% 和 85.56%,OMNBs 对苯并 [a] 芘的去除率明显高于 O_3 大气泡。对于 O_3 氧化,人们最关心的一大问题便是安装成本和效益。最近进行的一项成本效益分析表明,安装 OMNBs 发生器对水处理厂有益,总成本可减少 3/4 倍^[31]。Hu 等^[33]发现 OMNBs 曝气 22 min 后 O_3 质量浓度达到峰值,约为 10.09 mg/L,而毫米气泡曝气的 O_3 质量浓度最高仅为 0.64 mg/L。利用 OMNBs 技术对三氯乙烯 (TCE) 污染场地的地下水进行原位修复,TCE 去除率达到 99%。Xia 等^[34]利用该技术处理化工污染场地的地下水,试验结果表明,处理 30 min 后,苯和氯苯去除率达到 95% 以上,硝基苯和对 (邻) 硝基氯苯的去除率分别为 67% 和 35%。OMNBs 技术对修复受有机物污染的地下水具有良好的效果,很可能在未来成为原位修复地下水的一种创新技术。

MNBs 产生的 $\cdot OH$ 可与过氧化氢 (H_2O_2) 结合产生过氧羟基自由基 ($\cdot O_2H$) 和超氧自由基 ($\cdot O_2$),能够更有效地降解污染物^[35]。Ma 等^[36]采用 MNBs

技术联合 Fenton (MNBs+FT) 降解刚果红 (CR), 结果表明, pH 值为 7 时, MNBs+FT 对 100 mg/L CR 的降解率可达 94.40%, 比 Fenton 氧化法提高 72%, 比 MNBs 法提高 79%。在相同的降解效率下, 传统 Fenton 工艺所需的氧化剂剂量是 MNBs+FT 的 8 倍。Chen 等^[37] 采用 H₂O₂ 联合 MNBs 技术实现了对四环素废水的高效降解, 降解率可达 92.43%, 是 MNBs 和 H₂O₂ 单独降解的 9.44 倍和 3.94 倍。

尽管材料科学的创新使光催化技术取得了新的进展, 但由于总效率低, 光催化剂在水处理中的应用仍然受到阻碍, 引入 MNBs 技术可以显著提高光催化效率。Fan 等^[38] 利用 MNBs 与光催化 (UV/TiO₂) 集成系统处理二沉池出水, 相比于单一的 UV/TiO₂ 处理, 污水的 COD 和 UV₂₅₄ 去除率分别提高了 27.52% 和 14.38%, 结果表明 MNBs 与 UV/TiO₂ 具有协同作用, 二者可相互提供氧气和电子, 从而提高反应速率和 ROS 产量, 实现对污染物的高效去除。采用该技术降解有机污染物亚甲基蓝, 污染物的去除率比用常规大气泡高 41%~141%, DO 越高, 对亚甲基蓝的去除效果越好^[39]。

3.2 消毒灭菌

Abate 等^[40] 利用 MNBs 技术消除海水中的耐热大肠菌群, 研究表明当海水与 OMNBs 体积比为 3:1 时, 去除率最高, 达到 96%。Jhunkeaw 等^[41] 发现 OMNBs 对无乳链球菌和维氏气单胞菌有较好的去除效果, 试验在尼罗罗非鱼养殖池 (初始细菌含量为 8.18×10⁵ CFU/mL) 中连续进行 3 次 [每隔 15 min 通臭氧纳米气泡 (ONBs) 10 min]。第 1 次、第 2 次和第 3 次处理后细菌分别减少了 59.63%、87.25% 和 99.29%。常用的种子消毒剂有氯化汞、H₂O₂、次氯酸钠等化学药剂^[42-43], 这些化学消毒剂往往会产生多种有害副产物, 而利用 MNBs 技术完全可以避免这一问题。Kwack 等^[44] 用臭氧微气泡水 (OMBW) 处理苜蓿种子, 结果表明 OMBW 处理对减少微生物总量和消除大肠杆菌十分有效, 且对苜蓿芽的萌发和生长没有任何负面影响。

先进的光催化技术已经成为一种灭活细菌孢子的有效方法, 但是整个流程的效率仍然需要显著改进。Fan 等^[45] 利用光催化 (Ag/TiO₂) 联合 MNBs 灭活细菌孢子, 枯草芽孢杆菌孢子的灭活速率常数可达到 1.28 h⁻¹, 是未添加 MNBs 时的 5.6 倍。MNBs 的界面光电效应也被证实是导致孢子失活的原因之

一, MNBs 引起了强光散射, 使光催化介质在 700 nm 处的光路长度增加了 54.80%, 增强了光催化剂对光的吸收。

4 MNBs 生物学作用

MBs 不仅能提高水中的 DO 和电导率, 还能有效降低渗透压, 从而抑制真菌病害并改善作物生长条件。NBs 产生的·OH 显著增强了与生成过氧化物酶和还原型辅酶 II、细胞增殖和细胞分裂有关的基因表达^[46]。MNBs 可以改变微生物的丰度和代谢途径, 提高灌溉水的利用效率 (IWUE), 促进根和植物的生长, 在节水的同时提高作物的产量和质量。

4.1 MNBs 育种

Liu 等^[47] 分别用蒸馏水、高浓度 (未经稀释) 和低浓度 (经蒸馏水稀释, 浓度为原值的 20%) 纳米气泡水 (NBW) 浸泡菠菜种子和胡萝卜种子, 在相似的 DO 下, 菠菜种子的发芽率分别为 54%、65% 和 69%, 对于胡萝卜种子, 高浓度 NBW 却对其发芽产生了不利影响。研究人员^[48] 利用 3'-p-氨基苯基荧光探针, 证实了 NBW 产生的 ROS 为·OH, 高浓度 NBW 中的·OH 含量超过了胡萝卜种子的毒性阈值, 不利于种子下胚轴伸长和叶绿素的形成。因此, 在使用 MNBs 水育种前, 应做好预试验, 选择合适的 MNBs 浓度。

4.2 改良土壤

将 MNBs 应用于土壤灌溉, 可以增加土壤的 DO、速效氮和速效磷的含量, 提高根际土壤湿润体的通透性, 提高养分固定或利用效率, 改变土壤菌落结构, 增强土壤酶活性, 促进根系的生长发育^[49-51]。Zhou 等^[52] 利用 MNBO 灌溉番茄和黄瓜作物, 发现 MNBO 通过增加根际土壤脲酶和磷酸酶含量, 以及土壤微生物种类来改善土壤质量, 有望增加土壤有效养分, 从而促进作物根系生长发育。Sang 等^[53] 试验发现, 与常规灌溉相比, 经 MNBO 灌的早稻氮素积累量增加了 6.8%~10.8%。MNBO 灌溉能提高土壤的 ORP, 加快稻田氮的硝化而减少氮素流失^[54]。

4.3 作物增产

水稻是我国最重要的粮食作物之一, 其种植面积占我国粮食总产量的 25%, 产量占全国粮食总产量的 37%^[55]。人口增长和气候变化对进一步的稻米生产构成了巨大挑战^[56]。MNBs 技术的使用, 可以在减少肥料、药剂使用量的同时增加作物产量, 且

由于外源投加物质的减少以及 MNBs 对污水的净化作用,在作物增产的同时减少了农业耕种对环境的影响^[57-58]。钱银飞等^[59]采用微纳米气泡水(MNBW)与普通水对常规稻和超级稻进行浇灌,结果表明 MNBs 促进了常规稻分蘖,使水稻相比与普通水浇灌增产 8.5%~17.9%;对于超级稻, MNBs 促进了其后期的作物光合作用,增加了穗粒数和结实率,增产 11.3%~22.1%。Liu 等^[60]通过地下滴灌种植番茄和黄瓜,试验表明番茄和黄瓜的最佳 MNBW 配比分别为 1:4(MNBW 与地下水的混合比例)和 1:0,加氧频率为 5 d/次,在最佳处理条件下,番茄和黄瓜的产量分别提高 16.9%和 22.1%。

4.4 种养结合

笔者所在团队在上海市崇明区陈家镇将微纳米气液界面技术应用于稻蟹混养,在 10 亩(1 亩 ≈ 666.67 m²) 试验田和 10 亩对照田里,种植南梗

5055 水稻,并套养中华绒螯蟹, MNBs 指标如表 1 所示。结果表明,采用微纳米气液界面技术结合微生物菌剂的种养结合模式,与常规的稻蟹混养模式相比,不仅水稻产量相对于常规有机稻大幅增产,蟹产量也有较大增长(表 2),农户增收显著。试验田实现了种养殖尾水循环利用,水质保持稳定, ORP 提高,底质底泥大幅改善,作物和水产品无农残及抗生素检出。

表 1 MNBs 指标
Tab. 1 MNBs Indices

指标名称	指标数值	备注
水中气泡密度/(个·mL ⁻¹)	10 ⁷ ~10 ⁹	水中气泡密度指的是纯水中气泡密度
水中气泡直径/nm	50~600	/
水中气泡直径峰值/nm	150±30	/
纳微米气液界面电位/mV	-40~-30	/

表 2 MNBs“三联动”试验田与对照田的水稻产量、蟹产量和蟹规格^[61]
Tab. 2 Rice Yields, Crab Yields and Crab Specifications in MNBs "Triple Linkage" Experimental Fields and Control Fields^[61]

农田种类	水稻亩产/ 斤	蟹亩产/ 斤	蟹规格占比 (3 两以下)	蟹规格占比 (3.0~3.5 两)	蟹规格占比 (3.6~3.9 两)	蟹规格占比 (4 两以上)
对照田	1 100.6	110	25%	35%	25%	15%
试验田	1 582.1	130	17%	35%	30%	18%

注:1 斤=0.5 kg,1 两=0.05 kg。

5 结语

随着人们对水质和农产品产量、质量的要求越来越高,传统水处理技术已经不能满足我国当下水处理行业和农业发展需求。MNBs 技术作为一种新兴技术,具有无药剂添加条件下的消毒除污、曝气增氧、水培育种、增产提质、改良土壤等诸多作用,且不会产生二次污染,在水处理领域和农业种植与水产养殖等领域具有巨大的应用潜力。市面上的 MNBs 发生器种类繁多,但能产生的 NBs 在气泡总体中占比较少。若要大规模使用 MNBs 并使其呈现良好作用,还需要对发生器进行改造,力求减小气泡尺寸和降低仪器制造成本。现在对 MNBs 的应用研究大多还停留在小范围试验阶段,想要形成完整的应用体系,还需要对其作用影响因素与其他工艺组合的机理进行深究。相信在不久的将来,随着 MNBs 技术的推广应用, MNBs 将助力我国生态环境保护和相关产业的绿色可持续发展。

参考文献

- [1] 李兆军,杜浩.我国微细气泡技术发展综述[J].过程工程学报,2017,17(4):655-663.
LI Z J, DU H. Review of the development of fine bubble technology in China [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(4): 655-663.
- [2] 蔡九茂,翟国亮,吕谋超,等.微纳米气泡在农业灌溉领域的应用展望[J].灌溉排水学报,2016,35(s1):102-107.
CAI J M, ZHAI G L, LÜ M C, et al. Application prospect of micro-nano bubbles in agricultural irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(s1): 102-107.
- [3] TEMESGEN T, THI T B, HAN M, et al. Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 246: 40-51. DOI: 10.1016/j.cis.2017.06.011.
- [4] LI H Z, HU L M, SONG D J, et al. Characteristics of micro-nano bubbles and potential application in groundwater bioremediation [J]. Water Environment Research, 2014, 86(9): 844-851.

- [5] MOVAHED S M A, SARMAH A K. Global trends and characteristics of nano- and micro-bubbles research in environmental engineering over the past two decades: A scientometric analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147362. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147362.
- [6] SINGH B, SHUKLA N, CHO C H, et al. Effect and application of micro- and nanobubbles in water purification [J]. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 2021, 13: 9–16. DOI: 10.1007/s13530-021-00081-x.
- [7] 代朝猛, 张峻博, 段艳平, 等. 微纳米气泡特性及在环境水体修复中的应用 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 431–438.
DAI Z M, ZHANG J B, DUAN Y P, et al. Characteristics of micro-nano bubbles and their application in environmental water remediation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(3): 431–438.
- [8] PATEL A K, SINGHANIA R R, CHEN C W, et al. Advances in micro-and nano bubbles technology for application in biochemical processes [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 23: 101729. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101729.
- [9] XIAO W T, XU G R. Mass transfer of nanobubble aeration and its effect on biofilm growth: Microbial activity and structural properties [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134976. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134976.
- [10] XIAO Z G, AFTAB T B, LI D X. Applications of micro-nano bubble technology in environmental pollution control [J]. *Micro & Nano Letters*, 2019, 14(7): 782–787.
- [11] YAO G J, REN J Q, ZHOU F, et al. Micro-nano aeration is a promising alternative for achieving high-rate partial nitrification [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148899. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148899.
- [12] WU Y F, LIN H, YIN W Z, 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.
- [13] 薛晓莉, 张慧娟, 杨文华, 等. 微纳米气泡技术及其在农业领域的应用 [J]. *农村科技*, 2017(8): 65–68.
XUE X L, ZHANG H J, YANG W H, et al. Micro-nano bubble technology and its application in agriculture [J]. *Rural Science & Technology*, 2017(8): 65–68.
- [14] 周云鹏, 徐飞鹏, 刘秀娟, 等. 微纳米气泡加氧灌溉对水培蔬菜生长与品质的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(8): 98–100, 104.
ZHOU Y P, XU F P, LIU X J, et al. Influence of micro bubble oxygen irrigation on vegetable growth and quality effect [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(8): 98–100, 104.
- [15] 鲍旭腾, 陈庆余, 徐志强, 等. 微纳米气泡技术在渔业水产行业的研究进展及应用综述 [J]. *净水技术*, 2016, 35(4): 16–22, 51.
BAO X T, CHEN Q Y, XU Z Q, et al. Overview of research advances and application of micro-nano bubbles technology in fishery and aquaculture sector [J]. *Water Purification Technology*, 2016, 35(4): 16–22, 51.
- [16] 王扬才, 刘又毓, 孙元, 等. 超微气泡技术在对虾室内养殖中的初步应用 [J]. *渔业现代化*, 2018, 45(2): 21–28.
WANG Y C, LIU Y Y, SUN Y, et al. Primary application of micro-nano-bubble technology in indoor shrimps aquaculture [J]. *Fishery Modernization*, 2018, 45(2): 21–28.
- [17] BUDHIJANTO W, DARLIANTO D, PRADANA Y S, et al. Application of micro bubble generator as low cost and high efficient aerator for sustainable fresh water fish farming [C]. Indonesia: Proceedings of the 3rd International Seminar on Fundamental and Application of Chemical Engineering (ISFACHe), 2017.
- [18] KHAN P, ZHU W J, HUANG F, et al. Micro-nanobubble technology and water-related application [J]. *Water Supply*, 2020, 20(6): 2021–2035.
- [19] NIRMALKAR N, PACEK A W, BARIGOU M. On the existence and stability of bulk nanobubbles [J]. *Langmuir*, 2018, 34(37): 10964–10973.
- [20] ULATOWSKI K, SOBIESZUK P. Gas nanobubble dispersions as the important agent in environmental processes-Generation methods review [J]. *Water and Environment Journal*, 2020, 34: 772–790. DOI:10.1111/wej.12577.
- [21] PAWLISZAK P, ULAGANATHAN V, BRADSHAW-HAJEK B H, et al. Mobile or immobile? Rise velocity of air bubbles in high-purity water [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(24): 15131–15138.
- [22] DING S H, XING Y W, ZHENG X, et al. New insights into the role of surface nanobubbles in bubble-particle detachment [J]. *Langmuir*, 2020, 36(16): 4339–4346.
- [23] AZEVEDO A, OLIVEIRA H, RUBIO J. Bulk nanobubbles in the mineral and environmental areas: Updating for research and applications [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 271: 101992. DOI:10.1016/j.cis.2019.101992.
- [24] ZHANG F F, SUN L J, YANG H C, et al. Recent advances for understanding the role of nanobubbles in particles flotation [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, 291: 102403. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102403.
- [25] ETCHEPARE R, AZEVEDO A, CALGAROTO S, et al. Removal of ferric hydroxide by flotation with micro and nanobubbles [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 184: 347–353. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.05.014.
- [26] KIM E S, SHARIFUZZAMAN M, SEO S G, et al. Reduction of fluoride in water phase by micro-nano bubble pretreatment process [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 19(2): 1155–1157.

- [27] SILVA R D R, RODRIGUES R T, AZEVEDO A C, et al. Calcium and magnesium ion removal from water feeding a steam generator by chemical precipitation and flotation with micro and nanobubbles[J]. *Environmental Technology*, 2020, 41 (17): 2210–2218.
- [28] AZEVEDO A, ETCHEPARE R, RUBIO J. Raw water clarification by flotation with microbubbles and nanobubbles generated with a multiphase pump [J]. *Water Science & Technology*, 2017; 2342–2349. DOI: 10.2166/wst.2017.113.
- [29] WANG W T, 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 and Soil Pollution*, 2018, 229 (3): 86. DOI: 10.1007/s11270–018–3745–x.
- [30] FAN W, AN W G, HUO M X, et al. Solubilization and stabilization for prolonged reactivity of ozone using micro-nano bubbles and ozone-saturated solvent: A promising enhancement for ozonation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 238: 116484. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116484.
- [31] SERIDOU P, KALOGERAKIS N. Disinfection applications of ozone micro- and nanobubbles[J]. *Environmental Science-Nano*, 2021, 8(12): 3493–3510.
- [32] NAM G, MOHAMED M M, JUNG J. Enhanced degradation of benzo a pyrene and toxicity reduction by microbubble ozonation [J]. *Environmental Technology*, 2021, 42(12): 1853–1860.
- [33] HU L M, XIA Z R. 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.
- [34] XIA Z, HU L M. Treatment of organics contaminated wastewater by ozone micro-nano-bubbles[J]. *Water*, 2019, 11 (1): 55. DOI: 10.3390/w11010055.
- [35] SELIHIN N M, TAY M G. A review on future wastewater treatment technologies: Micro-nanobubbles, hybrid electro-Fenton processes, photocatalytic fuel cells, and microbial fuel cell[J]. *Water Science and Technology*, 2022, 85 (1): 319–341.
- [36] MA P, HAN C, HE Q Q, et al. Oxidation of congo red by Fenton coupled with micro and nanobubbles[J]. *Environmental Technology*, 2022. DOI: 10.1080/09593330.2022.2036245.
- [37] CHEN Z B, FU M, YUAN C X, et al. Study on the degradation of tetracycline in wastewater by micro-nano bubbles activated hydrogen peroxide [J]. *Environmental Technology*, 2021, 43 (23): 3580–3590.
- [38] FAN W, ZHOU Z, WANG W T, et al. Environmentally friendly approach for advanced treatment of municipal secondary effluent by integration of micro-nano bubbles and photocatalysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117828. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117828.
- [39] FAN W, LI Y H, WANG C L, et al. Enhanced photocatalytic water decontamination by micro-nano bubbles: Measurements and mechanisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55 (10): 7025–7033.
- [40] ABATE B, VALVERDE J. Reduction of thermotolerant coliforms present in the sea water by means of micro-nanobubbles of air-ozone of the beach los pavos, lima, peru [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, 17 (1). DOI: 10.3303/CET1760053.
- [41] JHUNKEAW C, KHONGCHAROEN N, RUNGRUENG N, et al. Ozone nanobubble treatment in freshwater effectively reduced pathogenic fish bacteria and is safe for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture*, 2021, 534: 736286. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2020.736286.
- [42] 刘昊, 杨雨晴, 邵一飞, 等. 番茄种子消毒方法探究 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(3): 393–398.
- LIU H, YANG Y Q, SHAO Y F, et al. Exploration for the disinfectant method of tomato seed [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 50 (3): 393–398.
- [43] 马梦雪, 赵玲玲, 唐思, 等. 消毒方法对红花种子发芽率的影响和种子环境细菌研究 [J]. *作物杂志*, 2018(6): 162–167.
- MA M X, ZHAO L L, TANG S, et al. The effects of different disinfection methods on seed germination and study on the environmental bacteria in safflower (*Carthamus tinctorius L.*) [J]. *Crops*, 2018(6): 162–167.
- [44] KWACK Y, KIM K K, HWANG H, et al. An ozone micro-bubble technique for seed sterilization in alfalfa sprouts [J]. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 2014, 32 (6): 901–905.
- [45] FAN W, CUI J Y, LI Q, et al. Bactericidal efficiency and photochemical mechanisms of micro/nano bubble-enhanced visible light photocatalytic water disinfection [J]. *Water Research*, 2021, 203: 117531. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117531.
- [46] LIU S, OSHITA S, KAWABATA S, et al. Nanobubble water's promotion effect of barley (*Hordeum vulgare L.*) sprouts supported by rna-seq analysis [J]. *Langmuir*, 2017, 33 (43): 12478–12486.
- [47] LIU S, KAWAGOE Y, MAKINO Y, et al. Effects of nanobubbles on the physicochemical properties of water: The basis for peculiar properties of water containing nanobubbles [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 93: 250 – 256. DOI: 10.1016/j.ces.2013.02.004.
- [48] 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.
- [49] 曹雪松, 郑和祥, 佟长福, 等. 微纳米气泡水地下滴灌对紫

- 花苜蓿土壤酶活性与根系脯氨酸的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 67-73.
- CAO X S, ZHENG H X, TONG C F, et al. Effects of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water on soil enzyme activity and root proline of alfalfa[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 67-73.
- [50] 曹雪松, 郑和祥, 王军, 等. 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根际土壤养分和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 24-30.
- CAO X S, ZHENG H X, WANG J, et al. Effects of subsurface drip irrigation with micro-nano bubble water on rhizosphere soil nutrients and yield of alfalfa [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 24-30.
- [51] AHMED A K A, SHI X N, HUA L K, et al. Influences of air, oxygen, nitrogen, and carbon dioxide nanobubbles on seed germination and plant growth [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(20): 5117-5124.
- [52] ZHOU Y P, BASTIDA F, ZHOU B, et al. Soil fertility and crop production are fostered by micro-nano bubble irrigation with associated changes in soil bacterial community[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2020, 141: 107663. DOI: 10.1016/j.soilbio.2019.107663.
- [53] SANG H H, JIAO X Y, WANG S F, et al. Effects of micro-nano bubble aerated irrigation and nitrogen fertilizer level on tillering, nitrogen uptake and utilization of early rice[J]. Plant Soil and Environment, 2018, 64(7): 297-302.
- [54] 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 167-174.
- HU J J, ZHU L F, HU Z H, et al. Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 167-174.
- [55] HUANG Z Y, LÜ Q M, HOSSAIN M A, et al. Low fertilizer inputs do not adversely affect yield or performance of Indica hybrid rice [J]. Scientia Agricola, 2022, 79(4). DOI: 10.1590/1678-992x-2020-0402.
- [56] GU H Y, LIANG S H, ZHAO J L. Novel sequencing and genomic technologies revolutionized rice genomic study and breeding[J]. Agronomy-Basel, 2022, 12(1): 218. DOI: 10.3390/agronomy12010218
- [57] 才硕, 时红, 潘晓华, 等. 微纳米气泡增氧灌溉对双季稻需水特性及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2017(2): 12-15.
- CAI S, SHI H, PAN X H, et al. Effects of micro-nano bubble aerated irrigation on water requirement characters and yield of double season rice[J]. Water Saving Irrigation, 2017(2): 12-15.
- [58] 才硕. 微纳米气泡增氧灌溉技术在水稻灌区节水减排中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2016(9): 117-120, 128.
- CAI S. Application research of micro-nano bubble aerated irrigation technique in water conservation and wastewater discharge from rice irrigation area[J]. Water Saving Irrigation, 2016(9): 117-120, 128.
- [59] 钱银飞, 陈金, 邵彩虹, 等. 不同类型水稻品种产量形成对微纳米气泡响应的差异[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(11): 1893-1901.
- QIAN Y F, CHEN J, SHAO C H, et al. Effect of micro-nano bubbles on the yield of different rice types[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1893-1901.
- [60] LIU Y, ZHOU Y, WANG T, 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.
- [61] 杨晓东, 陈鲁海, 张立娟, 等. 微纳气泡技术及在农业种植与养殖方面的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(2): 118-126.
- YANG X D, CHEN L H, ZHANG L J, et al. Application of micro-nano bubbles in agricultural planting and aquaculture[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(2): 118-126.

(上接第13页)

- [43] LIANG H, GONG W J, CHEN Z L, et al. Effect of chemical preoxidation coupled with in-line coagulation as a pretreatment to ultrafiltration for algae fouling control [J]. Desalination and Water Treatment, 2009, 9(1/2/3): 241-245. DOI: 10.5004/dwt.2009.809.
- [44] 陈禹志. 预氧化强化混凝-膜除藻工艺膜污染控制研究[J]. 膜科学与技术, 2016, 36(1): 104-108.
- CHEN Y Z. Research on membrane fouling control by process of pre-oxidation enhanced coagulation membrane to remove algae [J]. Membrane Science and Technology, 2016, 36(1): 104-108.
- [45] 瞿芳术, 梁恒, 雒安国, 等. 高锰酸盐复合药剂预氧化缓解超滤膜藻类污染的中试研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(7): 1366-1371.
- QU F S, LIANG H, LUO A G, et al. Pilot study on the control of algal membrane fouling by preoxidation with potassium permanganate composites [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(7): 1366-1371.
- [46] QU F S, DU X, LIU B, et al. Control of ultrafiltration membrane fouling caused by *Microcystis* cells with permanganate preoxidation: Significance of in situ formed manganese dioxide [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 279: 56-65. DOI: 10.1016/j.cej.2015.05.009.