

净水技术前沿与热点综述

刘一夫, 龚思成, 刘佳伟, 等. 典型藻源性臭味物质及其去除工艺研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 10-18, 26.

LIU Y F, GONG S C, LIU J W, et al. Research progress of typical algae-derived odorants and its removal processes [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 10-18, 26.

典型藻源性臭味物质及其去除工艺研究进展

刘一夫, 龚思成, 刘佳伟, 郭思颖, 史俊, 邓慧萍*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 【目的】随着水体富营养化日益严重, 饮用水中藻源性臭味问题逐渐凸显, 影响饮用水品质并对供水安全造成威胁。文章旨在综述典型藻源性臭味物质及其主要去除工艺的现状, 以有效识别水中的臭味物质的来源并高效控制饮用水中的臭味, 从而提高饮用水品质, 为供水行业的水质管理提供借鉴意义。【方法】文章首先概述了主要藻源性臭味物质, 包括 2-甲基异莰醇 (2-MIB)、土臭素 (GSM) 等的臭味特点、理化性质和产生环境。其次, 对活性炭吸附、传统氧化、高级氧化和光催化氧化等去臭工艺的降解原理和前沿研究进展进行了系统梳理与比较, 重点分析其去除机制、优缺点和适用条件。【结果】研究表明, 活性炭吸附对 2-MIB 和 GSM 等臭味物质有较好去除效果, 但成本较高; 氯氧化和高锰酸钾对藻类失活效果好, 但会释放胞内臭味物质; 臭氧和高级氧化工艺 (如紫外/过氧化氢、紫外/氯等) 对多种臭味物质有效, 但易产生副产物。光催化氧化因其高效性与无污染潜力被认为是未来发展的重要方向。【结论】目前, 单一工艺难以全面去除臭味, 组合工艺展示出更佳效果。未来研究应聚焦多工艺组合优化, 提升去除效率, 控制副产物生成, 为水厂提供更科学的技术选择, 保障饮用水的安全与质量。

关键词 饮用水 藻源性臭味物质 臭味 光催化 高级氧化工艺

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)03-0010-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.002

Research Progress of Typical Algae-Derived Odorants and Its Removal Processes

LIU Yifu, GONG Sicheng, LIU Jiawei, GUO Siying, SHI Jun, DENG Huiping*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] With the increasing issue of water eutrophication, various odor substances produced by algae pose significant challenges to drinking water quality and safety. This paper aims to review the main types of algae-derived odorants and the latest advancements in removal processes to effectively identify the source of odorants in water and efficiently control odors in drinking water, so as to improve the quality of drinking water, and provide reference for water quality management in water supply industry. [Methods] The study provides an overview of the physicochemical properties and sources of key algae-derived odorants, such as 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin (GSM). It then systematically compares removal processes, including activated carbon adsorption, conventional oxidation, advanced oxidation and photocatalytic oxidation, focusing on removal mechanisms, advantages, and limitations. [Results] Findings indicate that activated carbon adsorption can effectively remove 2-MIB and GSM, but it is costly; chlorine and potassium permanganate are effective in deactivating algae but may release intracellular odorants; ozone and advanced oxidation processes (e.g. ultraviolet/hydrogen peroxide, ultraviolet/chlorine) show broad efficacy in removing various odorants but may produce by-products. Photocatalytic oxidation, with its high efficiency and pollution-free potential, is highlighted as a promising

[收稿日期] 2024-05-26

[基金项目] 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目; 城市建筑光催化技术应用示范及环境净化性能评估 (20dz1204102)

[作者简介] 刘一夫 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事饮用水处理工作, E-mail: 2232851@tongji.edu.cn。

[通信作者] 邓慧萍 (1964—), 女, 教授, 研究方向为高级氧化水处理技术, E-mail: denghuiping@tongji.edu.cn。

future solution. [Conclusion] Single processes struggle to fully remove odorants, while combined processes offer superior result. Future research should focus on optimizing multi-process combinations to improve removal efficiency and control by-product formation, providing more reliable technical options for water treatment plants to ensure drinking water safety and quality.

Keywords drinking water algae-derived odorant taste and odor photocatalysis advanced oxidation process(AOP)

气味是评价饮用水水质最直观的指标之一,饮用水中嗅味物质存在的问题一直是水处理行业面临的重要难题。以“water & odor”为主题在 Web of Science 上进行检索。检索结果显示,2014 年—2023 年,相关研究的发文量呈现显著的增长趋势,尤其在 2019 年和 2021 年达到了高峰,分别为 1 698 篇和 4 269 篇,随后略有回落至 2023 年的 3 727 篇。这表明水的嗅味问题仍然是水处理研究的一个关注热点领域。

调查显示,我国约 80%的水源水、45%的出厂水存在嗅味问题,藻类被认为是造成水体嗅味问题的重要原因^[1]。《2022 年中国生态环境状况公报》显示,我国开展营养状态监测的 204 个重要湖泊(水库)中,富营养化湖泊水库占比近 30%^[2]。水体富营养化程度不断加剧,藻类过度生长不断分泌产生各种藻源性嗅味物质导致饮用水嗅味,严重影响饮用水的质量^[3]。

饮用水嗅味问题引发公众对水质的担忧,也对供水安全造成威胁。2023 年 4 月 1 日实施的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)更加体

现了对饮用水的嗅味指标的重视,将 2-甲基异茨醇(2-methylisoborneol, 2-MIB)和土臭素(geosmin, GSM)列入控制指标,并在附录 A 中列入硫醚类嗅味物质二甲基二硫醚(dimethyl disulfide, DMDS)和二甲基三硫醚(dimethyl trisulfide, DMTS)。饮用水中典型藻源性嗅味物质的研究尽管取得了一定进展,但仍存在诸多问题亟须解决。藻源性嗅味物质种类繁多,其生成与环境因素、藻类种类及代谢途径密切相关,目前的检测手段在面对复杂水质时,难以准确识别和定量分析不同的嗅味物质。同时,因不同藻类在特定环境条件下的嗅味物质的生成机制和释放规律尚未完全阐明,所以现有的部分去除工艺在实际应用中仍存在处理效率低、能耗和运行成本较高等问题,需要进一步的研究优化。在此基础上,文章系统梳理了典型藻源性嗅味物质的种类、来源、危害和去除工艺的国内外研究进展,期望为水厂进一步控制藻源性嗅味物质提供参考。

1 典型藻源性嗅味物质性质

典型藻源性嗅味物质的基本性质如表 1 所示。

表 1 典型藻源性嗅味物质的基本性质^[4-5]

Tab. 1 Basic Properties of Common Algae-Derived Odorants^[4-5]

英文名称	中文名称	嗅味类型	分子式	嗅阈值/(ng·L ⁻¹)	GB 5749—2022 限值/(ng·L ⁻¹)
2-methylisoborneol (2-MIB)	2-甲基异茨醇	土霉味	C ₁₁ H ₂₀ O	10	10
geosmin (GSM)	土臭素	土霉味	C ₁₂ H ₂₂ O	4	10
β -cyclocitral	β -环柠檬醛	草木味	C ₁₀ H ₁₆ O	19.3	-
β -ionone	β -紫罗兰酮	紫罗兰味	C ₁₃ H ₂₀ O	7	-
dimethyl disulfide (DMDS)	二甲基二硫醚	腐烂/大蒜味	C ₂ H ₆ S ₂	300	30
dimethyl trisulfide (DMTS)	二甲基三硫醚	腐烂/烂菜味	C ₂ H ₆ S ₃	10	30

1.1 2-MIB 和 GSM

2-MIB 与 GSM 是具有强烈土霉味或泥腥味的萜类化合物,其化学结构式如图 1 所示^[6]。GSM 在藻类细胞中的生物合成主要分为 3 个路径:2-甲基赤藓糖醇-4-磷酸(2-methylerythritol-4-phosphate, MEP)路径、甲羟戊酸路径和 L-亮氨酸路径。其中最主要的一个路径为 MEP 合成。而 2-MIB 主要是

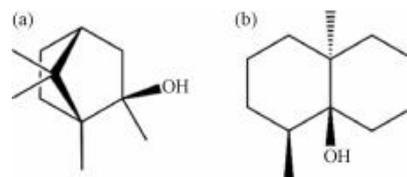


图 1 (a) 2-MIB; (b) GSM 的化学结构式

Fig. 1 Chemical Structure of (a) 2-MIB; (b) Geosmin

叶基焦磷酸(geranyldiphosphate, GPP)衍生而来,即GPP甲基化再经环化形成2-MIB。2-MIB的气味阈值为10 ng/L, GSM的气味阈值为4 ng/L,二者均可在极低浓度下被人类嗅觉感受到。虽然这2种臭味物质一般被认为对人体无毒,但由于其极低的嗅阈值仍可能引起不适症状^[7]。

Wang等^[8]对50余座城市近200个水厂的调查发现,2-MIB与GSM是导致我国地表水水源中产生土霉味的主要物质,两者在水源水中的检出率均在50%以上,且湖泊/水库型原水中2-MIB的检出率高达80%。在出厂水中,2-MIB和GSM检出率分别为36%和50%,且2-MIB的最高检出浓度和平均检出质量浓度为576 ng/L和7.4 ng/L,可能造成出水明显臭味。

2-MIB与GSM最初是从需氧丝状放线菌的分离物中鉴定出来的,而后发现水中2-MIB与GSM主要由蓝藻产生^[9]。Li等^[10]研究部分藻株与太湖水体臭味物质的关系,在鱼腥藻水华中测出了高浓度的2-MIB,周年水样分析结果显示,鱼腥藻细胞数与MIB浓度变化规律一致,推测鱼腥藻可能是2-MIB的重要来源。Li等^[11]研究了太湖原水中2-MIB与原水藻类密度、光照变化和营养物之间的关系,发现2-MIB与藻类细胞活性高度相关。因此,藻类活动较活跃的湖泊和水库水源容易暴发由2-MIB和GSM导致的季节性土霉味问题,采用此类水源的水厂需要特别关注水源藻类群落组成及其动态变化,及时做好臭味预警和应急准备。

1.2 含硫化合物

常见的藻类产生的含硫化合物主要有DMDS、DMTS等,其气味通常被描述为沼泽/化粪池味、腐烂、腐臭和恶臭味。DMDS和DMTS的气味嗅阈值分别为300 ng/L和10 ng/L,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)将DMDS、DMTS的限值确定为30 ng/L。2007年5月下旬,太湖蓝藻水华在无锡取水口附近暴发并堆积,导致了严重的饮用水臭味事件。此次事件中,DMDS和DMTS等含硫化合物被认为是主要污染物。DMDS、DMTS的化学式如图2所示。

Wang等^[12]对我国31个城市的56个水厂的原水和出水进行了气味表征,发现在48.3%的原水水样和31.1%的出水水样中可以检测到硫醚。在分布范围上,水中DMDS等物质分布范围较广,DMDS

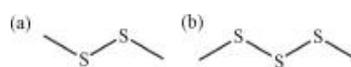


图2 (a) DMDS;(b) DMTS的化学结构式

Fig. 2 Chemical Structure of (a) DMDS; (b) DMTS

和DMTS是我国主要的沼泽味/腥臭味致嗅物质,主要分布在我国长江、黄河、太湖和珠江等流域,其中无锡市水源中硫醚的总浓度最高,在原水和出水中质量浓度分别为55.9 ng/L和64.4 ng/L。

硫醚的产生与大量蓝藻的厌氧分解有关,蓝藻细胞的分解可以产生大量挥发性硫化物。Wang等^[13]研究了温度和藻类生物量对DMTS生成的影响,发现藻类密度越高、温度越高,藻类的分解速度越快,DMTS的浓度也随之增加,水中的硫醚等含硫化合物还可能与其他臭味物质发生协同作用,在较低的浓度下使水体表现出较强的沼泽/化粪池味。

1.3 β -ionone 与 β -cyclocitral

β -ionone 与 β -cyclocitral 的结构式如图3所示。 β -ionone 被描述为芳香物质, β -cyclocitral 则是草木味物质,其在复杂的水环境中容易导致水体臭味,在臭味事件中起着重要的作用。 β -ionone 在水体中的嗅阈值很低,仅有7 ng/L。在2007年的太湖水危机事件中,除含硫化合物, β -cyclocitral 与 β -ionone 也是主要的致嗅物质^[14]。

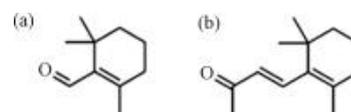


图3 (a) β -cyclocitral;(b) β -ionone 的结构式

Fig. 3 Chemical Structure of (a) β -cyclocitral;
(b) β -ionone

β -ionone 与 β -cyclocitral 都是藻类光合色素胡萝卜素的氧化的衍生物,蓝藻(如颤藻)和其他真核藻类(如小球藻)都能产生,在微囊藻占优势的水体,常产生高浓度的 β -cyclocitral。Pan等^[15]发现, β -ionone 与 β -cyclocitral 具有化感作用,通过调节相关基因表达可以引起其他水生植物细胞程序性死亡,进一步加剧蓝藻水华。Zhang等^[14]研究了我国太湖、巢湖和松花湖的藻源性臭味物质,发现 β -ionone 是主要的臭味化合物。

2 藻源性臭味物质去除工艺

为了保证饮用水品质可靠,水厂需要在净水过程中选择适当的处理工艺将臭味有效控制。饮用水常规工艺难以有效控制藻源性臭味物质。Wang等^[16]

调查了我国 31 个城市 98 家水厂的出厂水臭味情况,结果显示,常规工艺水厂出厂水中的藻源性物质浓度(表 2)处理效果并不理想,2-MIB、GSM 和 β -cyclocitral 等物质仍处于较高水平。此外,由于常规工艺可能破

坏藻类细胞导致胞内臭味物质释放等,导致出厂水部分臭味物质浓度高于原水的情况。为了取得较好的除嗅效果,可以采用包括吸附处理、氧化处理和高级氧化工艺等多种方式去除藻源性臭味物质^[17]。

表 2 藻源性臭味物质在常规工艺水厂中的浓度^[16]

Tab. 2 Concentrations of Algae-Derived Odorants in Conventional WTPs^[16]

臭味物质	原水			出厂水		
	最高质量浓度/ (ng·L ⁻¹)	平均质量浓度/ (ng·L ⁻¹)	检出百分比	最高质量浓度/ (ng·L ⁻¹)	平均质量浓度/ (ng·L ⁻¹)	检出百分比
2-MIB	148.0	7.5	43%	576.0	11.3	34%
GSM	3.80	0.87	61%	10.00	1.00	59%
β -cyclocitral	25.5	4.8	40%	57.4	6.3	39%
β -ionone	12.90	0.21	2.3%	11.60	0.13	1.1%
DMDS	714.00	19.30	84%	8.70	0.85	44%
DMTS	84.40	2.40	57%	3.30	0.27	23%

2.1 活性炭吸附

活性炭吸附处理是目前常用的处理水中臭味物质的技术。活性炭由于其丰富的孔隙结构、较大的比表面积、大量的官能团结构和良好的有机物吸附等性能,可以有效去除水中的异味。Bertone 等^[18]研究了不同条件下粉末活性炭吸附臭味物质的效能,发现粉末活性炭投加量越高、接触时间越长,臭味物质的去除效率越高。Huang 等^[19]研究了粉末活性炭对不同结构的臭味化合物的吸附能力,试验中将污染物初始浓度设置为其嗅阈值的 10~50 倍,使用碘值为 1 000 mg/g 的粉末活性炭处理 24 h。结果显示,粉末活性炭投加量达到 100 mg/L 时,DMDS 和 DMTS 等含硫臭味物质仍无法降至嗅阈值以下,表明粉末活性炭不适合处理这些物质,而 20 mg/L 的粉末活性炭则能有效降低 2-MIB、GSM、 β -cyclocitral 等臭味物质至嗅阈值以下。李一兵等^[20]比较了 5 种市售煤质粉末活性炭对水中 2-MIB 和 GSM 的吸附效果,发现吸附效果与微孔的比表面积(或孔容积)显著相关,粉末活性炭的碘值可以反映其对 2-MIB 的吸附性能,因此可以作为水厂选取粉末活性炭的主要参考。

在投加粉末活性炭吸附藻源性臭味物质时,应合理选择投加位置以确保吸附效果,常见投放点包括原水泵房吸水井和絮凝沉淀池入口等。表 3 总结了不同投加位置的优缺点。若条件允许,还可采用多点投加方式以提高臭味物质的去除效果。吕强等^[21]在投加粉末活性炭吸附水中土臭味时发现,预氧化会破坏

水中溶解性有机物的结构,改变其亲疏水性,增加与臭味物质的竞争吸附,导致粉末活性炭对 2-MIB、GSM 的去除率分别降低 29.5%、31.6%。预氯化还会氧化粉末活性炭表面活性基团,降低其吸附能力。因此,如果同时采用粉末活性炭吸附与氯化,应考虑在工艺流程中保持足够的距离以避免影响效果。

颗粒活性炭(GAC)成本比粉末活性炭更低,且能够再生,主要用于富营养化严重、需要长期消除异味的水源。Ma 等^[22]研究了 GAC 对水中 2-MIB、GSM 的吸附能力,发现在 GAC 投加量为 20 mg/L、接触时间为 2 h 时,即可将初始质量浓度为 500 ng/L 的 2-MIB、GSM 的浓度降低至嗅阈值以下。超细粉末活性炭(SPAC)的粒径比粉末活性炭更小,其比表面积、吸附容量更大。Matsui 等^[23]采用湿磨法将粉末活性炭研磨制得到微米级别的 SPAC,并研究了其对 GSM 和 2-MIB 的去除效果。试验结果表明,0.5 mg/L 的 SPAC 几乎与 3 mg/L 粉末活性炭的去除效率相同,且 SPAC 的吸附速度远超过粉末活性炭。虽然 SPAC 除嗅效果更加显著,但应注意其可能穿透滤池,影响出水水质。

2.2 传统氧化工艺

传统氧化工艺是指直接向水中投氧化剂,利用氧化剂本身的氧化能力与致嗅化合物发生氧化还原反应破坏其结构,从而去除异味。通常水厂使用的氧化剂包括:氯气(Cl₂)、次氯酸钠(NaClO)、高锰酸钾(KMnO₄)和臭氧(O₃)等。常用氧化剂对臭味物质的去除效果比较如表 4 所示。

表3 不同投加点粉末活性炭臭味去除效果比较^[24]

Tab. 3 Comparison of Taste and Odor Removal Effects of Different Dosing Points with Powdered Activated Carbon^[24]

投加点	工艺参数	去除效果	优点	不足
取水口上游 5 km 处及水厂进水口处	GSM 质量浓度为 895 ng/L; 取水口上游 5 km 处投加 10 mg/L 粉末活性炭; 水厂进水口处投加 5 mg/L 粉末活性炭	87%~98.7%	活性炭吸附时间较长	可能受天然有机物等影响, 导致竞争吸附, 当竞争吸附现象严重时, 吸附效果降低
原水总管	原水中 2-MIB 质量浓度不超过 100 ng/L; 20~30 mg/L 粉末活性炭; 吸附时间为 1.0~1.5 h	90.27%		
混凝过程	原水 2-MIB 质量浓度为 200~350 ng/L; 投加 40 mg/L 粉末活性炭	34%	粉末活性炭可以快速扩散, 与絮凝剂结合, 并在过滤过程中与水分离	絮凝剂与粉末活性炭形成絮凝体, 会降低粉末活性炭的吸附效率

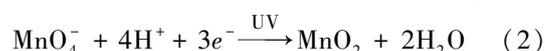
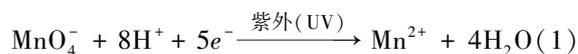
2.2.1 氯氧化

含氯氧化剂是我国水厂常备的消毒剂和氧化剂。Zhao 等^[25]研究了 NaClO 对水中藻源性臭味物质的去除效果, 发现 NaClO 对 2-MIB 和 GSM 的最高去除率均不超过 20%, 难以将这 2 种臭味物质降低到嗅阈值以下。苏晓等^[26]使用 0.5 mg/L 的 NaClO 氧化引滦水中的 2-MIB, 发现水中 2-MIB 浓度几乎不变, 且溶解态 2-MIB 增加, 可能是因为 NaClO 破坏藻类细胞, 使藻细胞内部结合态 2-MIB 释放到胞外, 且其氧化能力不足以有效去除溶解态 2-MIB。2-MIB 和 GSM 的化学结构均为饱和环醇类化合物, 具有一定抗氧化性, 单独使用 NaClO 氧化处理这 2 类臭味物质效果不佳。郑旭辉等^[27]发现, β -ionone 与 β -cyclocitral 在氯化过程中生成消毒副产物的潜力较高, 因此, 当在原水中此类臭味物质浓度较高时, 应考虑消毒副产物的生成风险。相比之下, NaClO 对 DMDS 等含硫臭味化合物氧化效果较好, 能够快速去除具有硫化物气味物质, 且副产物生成较少。因此, 采用含氯氧化剂去除水中藻源性臭味物质时, 需根据水体主要臭味物质谨慎选择氧化剂类型。

2.2.2 KMnO₄ 氧化

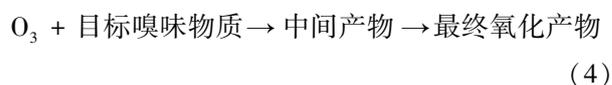
KMnO₄ 是一种绿色、高效的氧化剂。在反应体系 pH 值小于 3.5、pH 值为 3.5~12.0 以及 pH 值大于 12 的环境下分别按式(1)~式(3)进行氧化反应。在饮用水处理中, KMnO₄ 常按式(2)反应, 产生不溶性二氧化锰 (MnO₂), 既环境友好又易从溶液中分离, 并具备一定的吸附作用。尽管 KMnO₄ 直接氧化去除 2-MIB 与 GSM 的能力较弱, 1 mg/L 的 KMnO₄ 60 min 内仅能去除不到 10% 的 2-MIB, 但它与含藻水中藻类细胞的反应速率适中、可控, 除藻效

果较好, 并有助于避免藻细胞破裂导致的胞内臭味物质释放^[28]。因此, 在藻类含量较高的原水中可与其他除嗅工艺联合使用。Omoike 等^[29]以 1-丙醇、硝酸锰 [Mn(NO₃)₂] 和 KMnO₄ 为原料合成具有缓释性能的 KMnO₄“核”-MnOx“壳”颗粒去除天然水中的臭味物质, 该方法在提高去嗅效果的同时也减少了 MnO₄⁻ 和 Mn²⁺ 离子的残留, 有效防止藻细胞破裂导致臭味物质释放。在 2007 年无锡水危机期间, 使用 KMnO₄ 投加于取水口并配合活性炭吸附的应急处理工艺, 成功在输水过程中氧化去除了致嗅物质和污染物, 取得了良好效果。



2.2.3 O₃ 氧化

O₃ 氧化工艺发展成熟、技术可靠, 氧化能力较强。臭味物质的 O₃ 氧化过程有 2 种途径: 直接氧化和间接自由基氧化。直接氧化的特点为速度慢且有选择性, 反应过程如式(4)所示。



间接自由基氧化为分解产生氧化能力更强的羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$), $\cdot\text{OH}$ 可以非选择性氧化, 与有机物反应速率快, 反应速率常数一般为 $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^9 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$, 其反应过程如式(5)~式(6)所示。



在实际饮用水处理中, O₃ 投加浓度通常较低,

表 4 常规氧化工艺去嗅效果比较

Tab. 4 Comparison of Taste and Odor Removal Effects of Conventional Oxidation Technology

氧化剂种类	工艺参数氧化还原	去除效果	优点	缺点	参考文献
NaClO	pH 值 = 7.0; 25 °C; 2-MIB 与 GSM 质量浓度均为 2.0 μg/L; NaClO 质量浓度为 0.8 mg/L; 反应时间为 120 min 28 629 ng/L β-cyclocitral; 3.0 mg/L NaClO; 反应时间为 30 min pH 值 = 7.0; 20 ng/L DMDS; 1.0 mg/L NaClO	2-MIB 为 11%, GSM 约为 20% 1 min 去除 β-cyclocitral 99% 以上 2 h 以内去除 DMDS 100%	价格低廉, 应用广泛, 对含硫臭味物质、对 β-cyclocitral 氧化能力较强	对 2-MIB 与 GSM 2 种臭味物质降解效果较差; 能够直接破裂藻细胞导致 2-MIB、GSM、β-ionone 等臭味物质上升; 易产生消毒副产物	[25] [30] [31]
KMnO ₄	pH 值 = 7.5; 25 °C; 2-MIB 质量浓度为 1 000 ng/L; KMnO ₄ 质量浓度为 3 mg/L pH 值 = 7.0; 25 °C; GSM 质量浓度为 2.0 μg/L; KMnO ₄ 质量浓度为 1.2 mg/L pH 值 = 7.0; 20 °C; 20 μg/L β-cyclocitral; 2.0 mg/L KMnO ₄ 5.0 mg/L KMnO ₄ ; 100 ng/L β-ionone; 以 1 000 r/min 快速搅拌 1 min; 以 200 r/min 慢速搅拌反应 30 min pH 值 = 7.0; 20 μg/L DMDS; 1.0 mg/L KMnO ₄	2 h 以内 2-MIB 去除率为 13% 2 h 以内 GSM 去除率不到 20% 2 h 以内 β-cyclocitral 去除率为 98.72% 0.5 h 以内 β-ionone 去除率约为 60% 2 h 以内 DMDS 去除率为 55%	氧化能力适中, 能够使藻细胞失活而不破坏藻细胞, 避免胞内臭味物质流出, 产生消毒副产物风险较低	对 2-MIB、GSM 等抗氧化能力较强的臭味物质去除效率低	[32] [25] [33] [31]
O ₃	2 mg/L O ₃ ; 100 ng/L β-cyclocitral; 5 mg/L O ₃ ; 100 ng/L β-ionone 反应时间均为 10 min pH 值 = 7.10 ~ 7.21; 25 °C; DMDS 与 DMTS 均为 100 ng/L; 0.5 mg/L O ₃ 反应时间为 20 min	β-cyclocitral 去除率为 94.7%; β-ionone 去除率为 90.1% DMDS 去除率约为 87%; DMTS 去除率约为 91%	氧化能力强、适用范围广泛、反应快, 对各类臭味物质去除效果均较好	需要现用现制, 设备、管理成本较高, 易产生溴酸盐等氧化副产物	[34]

降解效果不如实验室条件。黄瑜琪等^[35]的中试研究表明, 当预 O₃ 投加量为 0.56 mg/L 时, 预 O₃ 段对 2-MIB 和 GSM 的去除率为 34.60% 和 35.84%。然而 O₃ 极易与水中的有机物或溴离子反应, 生成具有不同程度生物毒性的副产物(如醛、酮、羧酸和溴酸盐等)。因此, 为有效控制副产物含量, 可在 O₃ 处理后接活性炭吸附工艺。

2.3 高级氧化工艺

藻源性臭味物质不同种类性质差异较大, 依靠单一氧化剂难以有效去除臭味物质。高级氧化工艺具有占地面积小、操作简单且运行稳定等优势, 除臭应用潜力较高。高级氧化技术主要包括 UV 高级氧化法、光催化氧化法、超声氧化法、Fenton 氧化法等, 文章将重点介绍 UV 高级氧化和非均相光催化氧化。

2.3.1 UV 高级氧化

UV 高级氧化技术是利用 UV 辐照激发产生具有强氧化性的活性自由基, 主要包括 UV/过氧化氢(H₂O₂)、UV/氯、UV/过硫酸盐(PS)等工艺, 具有无二次污染、高污染物降解效率等特点, 是去除臭味物

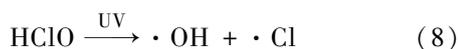
质的有效方法^[36]。

UV/H₂O₂ 是近年来应用最为广泛的高级氧化技术之一, 以 ·OH 为主要活性物种, 其氧化原理如式(7)。Jiang 等^[37]在 UV/降解饮用水中的 GSM、2-MIB 的中试研究中, 在 pH 值 = 7.5、UV₂₅₄ 辐射强度为 750 mJ/cm²、质量浓度为 13 mg/L 时, UV/H₂O₂ 可将 100 ng/L GSM、2-MIB 的降解约 90%, 结合 PAC 吸附后, 总去除率可进一步达到 95%。UV/H₂O₂ 高级氧化法对 GSM 和 2-MIB 这 2 种典型臭味物质的去除率随着 H₂O₂ 剂量的增加呈先快后慢的上升趋势, 综合成本考虑, 建议投加剂量为 5 ~ 10 mg/L 即可。

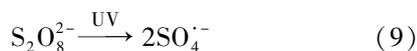


UV/O₃ 高级氧化工艺降解臭味物质的反应机理中, 主导部分为 O₃ 分子在 UV 辐照下生成的大量 ·OH 对污染物的间接氧化降解, 相比直接使用 O₃, UV/O₃ 氧化的利用效率更高, 能够以低浓度的 O₃ 更有效地降解 GSM 和 2-MIB, 减少溴酸盐等副产物的产生。

UV/氯高级氧化工艺通过 UV 激活氯形成·Cl、·Cl₂和·OH 等强氧化性活性自由基, 以此氧化目标化合物, 相关反应式如式(8)所示。在低压或中压汞灯的 UV 照射下, 氯光解的量子产率高于 H₂O₂ 与 PS, 且无需像 UV/H₂O₂ 过程中那样淬灭残留氧化剂。Xiang 等^[38]研究了 UV/氯对 β-cyclocitral 的降解效果。结果显示, 单独使用 UV、PS 和氯化在 20 min 的降解率分别为 12%、17% 和 6%, 而 UV/氯联合工艺的降解率显著提升至 92.7%。



硫酸根自由基(SO₄⁻)氧化还原电位(2.5~3.1 V)较高, 比·OH 选择性更高, 且能够与大多数有机物反应, 存在寿命远高于·OH(半衰期分别为 4 s 和 1×10⁻⁴ s), 在中性或碱性条件比·OH 氧化能力更强^[39-40]。PS 的活化机理如式(9)~式(10)。Wu 等^[41]研究发现, 采用 UV/PS 工艺, 投加 2.3 mg/L 的 PS 并反应 600 s 后, 2-MIB 和 GSM 的降解率分别达到 86.0% 和 94.5%, 且在实际水体中的降解效果优于超纯水条件。



2.3.2 半导体光催化氧化

半导体光催化氧化技术是利用二氧化钛(TiO₂)、三氧化钨(WO₃)等半导体光催化材料, 在 UV 或太阳光照射下产生·OH、超氧自由基(O₂⁻)等自由基, 从而氧化降解污染物。其基本原理为半导体材料上的光辐射能量激发光量子、使价带(VB)电子跃迁至导带(CB), 形成电子-空穴(e⁻/h⁺)对。其中, h⁺ 具有很强的氧化性, 能够将吸附到催化剂表面的 H₂O 氧化为·OH, e⁻ 可以将 O₂ 还原为 O₂⁻, 从而产生强氧化性自由基与有机污染物反应并实现降解。TiO₂ 光催化氧化发展较早、成本较低且技术较为成熟。

纳米光催化剂在降解臭味物质方面效率较高, 但回收困难影响了实际应用。固定化光催化体系可有效解决这一回收难题。Yapararne 等^[42]通过将 P-25 粉末改性 TiO₂ 以 TiO₂-二氧化硅(SiO₂)溶胶-凝胶混合, 并黏合在玻璃片上, 煅烧固定形成催化膜。含 SiO₂ 的薄膜在 1 h 内对初始质量浓度为

500 ng/L 的 2-MIB 和 GSM 降解率达到了 80%, 并且 10 次重复使用试验后光催化性能几乎没有变化, 保持了优异的去效率和稳定性。

3 总结与展望

本文简要介绍了 GSM、2-MIB、含硫化合物、β-ionone、β-cyclocitral 等藻源性臭味物质的产生机理和化学性质, 并介绍了以活性炭法吸附工艺; 氯氧化、KMnO₄ 氧化、O₃ 氧化等传统氧化工艺; UV 高级氧化工艺和光催化氧化工艺。这些工艺具有以下特点。

(1) 吸附工艺应用广泛, 见效快且使用方便, 作为应急处理手段效果良好, 但成本较高。在应用中应考虑投加位置对吸附效果的影响。

(2) 传统氧化技术成熟, 但对部分典型藻源性臭味物质效果不佳, 部分氧化剂还会破坏藻细胞导致臭味物质流出, 存在产生消毒副产物的风险。

(3) 高级氧化工艺, 特别是 UV/H₂O₂、UV/O₃ 技术较为成熟, 但需要考虑控制氧化副产物和过量氧化剂灭活; 光催化工艺非常具有潜力, 但其研究多集中在直接投加光催化剂形成悬浮体系降解臭味物质。操作繁琐且催化剂分离复用困难而难以应用于饮用水处理, 因此光催化工艺的重点应当是开发低成本、稳定的固定化光催化体系。

单一技术往往不能完全去除臭味, 而组合工艺则能够实现技术协同促进去嗅效果。因此, 目前的藻源性臭味物质及其去除技术的研究正在朝着多样化的方向发展, 多种工艺的优化组合及其在实际水处理中的应用将成为研究重点。同时, 研究也将更加深入探讨臭味物质的生成机制, 特别是在不同环境条件下的动态变化。针对原水中藻源性臭味物质的污染特点, 未来应结合吸附工艺和高级氧化工艺的不同能力与特性, 优化与常规处理工艺的组合, 提高去除臭味物质的效率, 降低运行与管理成本, 为公众提供安全、优质的饮用水。

参考文献

- [1] DU H X, WANG Z H, SUN Y J, et al. An overview of the progress made in research on odor removal in water treatment plants [J]. Water, 2024, 16(2): 280-280.
- [2] 佚名. 2022 年中国生态环境状况公报(摘录) [J]. 环境保护, 2023, 51(9): 66-83.
Unknown. China ecological environment status bulletin 2022 (excerpt) [J]. Environmental Protection, 2023, 51(9): 66-

- 83.
- [3] 张孝洪, 吴小刚, 张可佳, 等. 基于公众反馈的多水源地区自来水嗅味情况调查及思考——以舟山为例 [J]. 净水技术, 2022, 41(6): 30-38.
ZHANG X H, WU X G, ZHANG K J, et al. Investigation and reflection on the taste and odor of tap water in multi-source area based on public feedback—Case of Zhoushan [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 30-38.
- [4] 吕成旭, 石瑞洁, 季铭, 等. 高外源性藻类输入的城市河道嗅味物质分布特征及影响因素 [J]. 环境化学, 2022, 41(5): 1579-1590.
LÜ C X, SHI R J, JI M, et al. Distribution characteristics and influencing factors of odorants in urban rivers with high exogenous algae input[J]. 2022, 41(5): 1579-1590.
- [5] 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. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121511.
- [6] DIETRICH A M, BURLINGAME G A. A review: The challenge, consensus, and confusion of describing odors and tastes in drinking water [J]. Science of the Total Environment, 2020, 713: 135061. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135061.
- [7] AZARIA S, NUSSINOVITCH A, NIR S, et al. Removal of geosmin and 2-methylisoborneol from aquaculture water by novel, alginate-based carriers: Performance and metagenomic analysis [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 42: 102125. DOI:10.1016/j.jwpe.2021.102125.
- [8] WANG C M, YU J W, GUO Q Y, et al. Simultaneous quantification of fifty-one odor-causing compounds in drinking water using gas chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 79: 100-110. DOI: 10.1016/j.jes.2018.11.008.
- [9] FRANKLIN H M, PODDUTURI R, JORGENSEN N O G, et al. Potential sources and producers of 2-methylisoborneol and geosmin in a river supplying a drinking water treatment plant [J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2023, 14: 100455. DOI: 10.1016/j.ceja.2023.100455.
- [10] LI W W, GUO K N, LIU L W, et al. Relationship of odor compounds to some algal strains associated with bloom in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(4): 916-924.
- [11] LI L, YANG S H, YU S L, et al. Variation and removal of 2-MIB in full-scale treatment plants with source water from Lake Tai, China [J]. Water Research, 2019, 162: 180-189. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.066.
- [12] WANG C M, YU J W, GUO Q Y, et al. Occurrence of swampy/septic odor and possible odorants in source and finished drinking water of major cities across China [J]. Environmental Pollution, 2019, 249: 305-310. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.041.
- [13] WANG G F, HUANG R, FANG Y. Effects of temperature and algae biomass on algae decay and the production of dimethyl trisulfide [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2023, 21(6): 5595-5605.
- [14] ZHANG R, QI F, LIU C, et al. Cyanobacteria derived taste and odor characteristics in various lakes in China: Songhua Lake, Chaohu Lake and Taihu Lake [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 181: 499-507. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.06.046.
- [15] PAN N, XU H Z, CHEN W B, et al. Cyanobacterial VOCs beta-ionone and beta-cyclocitral poisoning Lemna turionifera by triggering programmed cell death [J]. Environmental Pollution, 2024, 342: 123059. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123059.
- [16] WANG C M, GALLAGHER D L, DIETRICH A M, et al. Data analytics determines co-occurrence of odorants in raw water and evaluates drinking water treatment removal strategies [J]. Environmental Science and Technology, 2021, 55(24): 16770-16782.
- [17] 辛晓东, 王明泉, 赵清华, 等. 饮用水嗅味物质检测与控制技术研究进展[J]. 中国给水排水, 2013, 29(14): 13-15.
XIN X D, WANG M Q, ZHAO Q H, et al. State-of-the-art of detection and control technologies of odorous compounds in drinking water[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(14): 13-15.
- [18] BERTONE E, CHANG C, THIEL P, et al. Analysis and modelling of powdered activated carbon dosing for taste and odour removal [J]. Water Research, 2018, 139: 321-328. DOI: 10.1016/j.watres.2018.04.023.
- [19] HUANG X, LU Q, HAO H T, et al. Evaluation of the treatability of various odor compounds by powdered activated carbon [J]. Water Research, 2019, 156: 414-424. DOI: 10.1016/j.watres.2019.03.043.
- [20] 李一兵, 方华, 韩正双, 等. 活性炭指标对吸附去除 2-MIB 和土臭素效能的影响 [J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 91-96.
LI Y B, FANG H, HAN Z S, et al. Effect of powder activated carbon indicators on the adsorption removal efficiency of 2-MIB and geosmin [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(10): 91-96.
- [21] 吕强, 魏群山, 黄鑫, 等. 应对南方某水厂土霉嗅味的活性炭技术 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(11): 3034-3042.
LÜ Q, WEI Q S, HUANG X, et al. Powdered activated carbon for treatment of musty odor in a southern China water treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(11): 3034-3042.
- [22] MA L F, PENG F Y, LI H P, et al. Adsorption of geosmin and 2-methylisoborneol onto granular activated carbon in water: Isotherms, thermodynamics, kinetics, and influencing factors [J]. Water Science and Technology, 2019, 80(4): 644-653.
- [23] MATSUI Y, NAKAO S, TANIGUCHI T, et al. Geosmin and 2-

- methylisoborneol removal using superfine powdered activated carbon: Shell adsorption and branched-pore kinetic model analysis and optimal particle size[J]. *Water Research*, 2013, 47(78): 2873-2880.
- [24] 张旭东, 张学博, 刘畅, 等. 天津滨海新区自来水臭味事件成因分析及应急处理 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(13): 46-49.
ZHANG X D, ZHANG X B, LIU C, et al. Cause for odor problem and its emergent treatment in Tianjin Binhai New Area [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(13): 46-49.
- [25] ZHAO H X, ZHANG S, ZHANG T Y, et al. Comparison of four pre-oxidants coupled powdered activated carbon adsorption for odor compounds and algae removal: Kinetics, process optimization, and formation of disinfection byproducts [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 168920. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168920.
- [26] 苏晓, 韩宏大, 胡建坤, 等. 预氧化联合 PAC 强化混凝沉淀去除引滦水中 2-MIB [J]. *中国给水排水*, 2023, 39(21): 27-33.
SU X, HAN H D, HU J K, et al. Pre-oxidation combined with powdered activated carbon enhanced coagulation-sedimentation for removal of 2-methylisoborneol in water from Luanhe diversion project [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(21): 27-33.
- [27] 郑旭辉, 安娜, 高乃云, 等. 两种异臭化合物 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮在氯化过程中消毒副产物的生成及其影响因素 [J]. *净水技术*, 2020, 39(1): 52-57, 74.
ZHENG X H, AN N, GAO N Y, et al. Formation and influence factors of DBPs of two odorous compounds β -cyclocitral and β -ionone during chlorination process [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(1): 52-57, 74.
- [28] PIEZER K, LI L, JEON Y, et al. The application of potassium permanganate to treat cyanobacteria-laden water: A Review [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 148: 400-414. DOI: 10.1016/j.psep.2020.09.058.
- [29] OMOIKE A I, HARMON D. Slow-releasing permanganate ions from permanganate core-manganese oxide shell particles for the oxidative degradation of an algae odorant in water [J]. *Chemosphere*, 2019, 223: 391-398. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.036.
- [30] 张童, 杨舒, 孟向军, 等. 不同氧化剂对铜绿微囊藻及其臭味物质氧化作用研究 [J]. *给水排水*, 2022, 48(12): 18-26.
ZHANG T, YANG S, MENG X J, et al. Effects of different pre-oxidants on microcystis aeruginosa and its odor compound [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(12): 18-26.
- [31] ZHANG J Z, LIAO Y, WANG Q, et al. Degradation of odorous sulfide compounds by different oxidation processes in drinking water: Performance, reaction kinetics and mechanism [J]. *Water Research*, 2021, 189: 116643. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116643.
- [32] LI L, ZHU C W, XIE C Q, et al. Kinetics and mechanism of pseudoanabaena cell inactivation, 2-MIB release and degradation under exposure of ozone, chlorine and permanganate [J]. *Water Research*, 2018, 147: 422-428. DOI: 10.1016/j.watres.2018.10.023.
- [33] 张君枝, 刘方, 王齐, 等. 高锰酸钾氧化饮用水中醛类臭味物质的效果及动力学研究 [J]. *环境化学*. 2024, 43(2): 425-433.
ZHANG J Z, LIU F, WANG Q, et al. Study on the effect and kinetics of aldehydes oxidation by potassium permanganate in drinking water [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(2): 425-433.
- [34] 武珉辉. 高级氧化工艺降解金泽原水典型致嗅物质的效能 [J]. *净水技术*, 2021, 40(s1): 15-19.
WU M H. Efficacy of advanced oxidation process for degradation of typical odor-causing substances in Jinze reservoir [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(s1): 15-19.
- [35] 黄瑜琪, 李翠梅, 徐琛宇, 等. 预臭氧对常规工艺去除 2-MIB & GSM 效果与机理中试研究 [J]. *水处理技术*, 2017, 43(9): 96-100.
HUANG Y Q, LI C M, XU C Y, et al. Pilot study on the efficiency and mechanism of pre-ozonation conventional process for 2-MIB & GSM removal [J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(9): 96-100.
- [36] 张宇峰, 张欣然, 曹宇安, 等. 高级氧化降解饮用水中臭味物质土臭素和 2-甲基异茨醇的研究进展 [J]. *化学通报*, 2023, 86(12): 1451-1458.
ZHANG Y F, ZHANG X R, CAO Y A, et al. Research progress in degradation of odor compounds geosmin and 2-methylisoborneol in drinking water by advanced oxidation processes [J]. *Chemistry*, 2023, 86(12): 1451-1458.
- [37] JIANG Q Y, WANG Y L, TIAN L P, et al. Pilot-scale and mechanistic study of the degradation of typical odors and organic compounds in drinking water by a combined UV/H₂O₂-BAC process [J]. *Chemosphere*, 2022, 292: 133419. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133419.
- [38] XIANG H M, SHAO Y S, GAO N Y, et al. Removal of β -cyclocitral by UV/persulfate and UV/chlorine process: Degradation kinetics and DBPs formation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 382. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122659.
- [39] 马祯, 宋小三, 张轩, 等. 紫外/过硫酸盐高级氧化技术在饮用水处理中的研究进展 [J]. *应用化工*, 2022, 51(5): 1466-1471.
MA Z, SONG X S, ZHANG X, et al. Research progress of ultraviolet/persulfate advanced oxidation technology in drinking water treatment [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(5): 1466-1471.

(下转第 26 页)

- 3886-3893.
MA Q Q, YUAN L J, NIU Z D, et al. Microbial community structure of activated sludge and its response to environmental factors[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3886-3893.
- [42] 康华, 王帆, 刘文爱, 等. A²O 工艺处理低温污水污泥膨胀及恢复机理研究[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(6): 117-123.
KANG H, WANG F, LIU W A, et al. Study on sludge bulking and recovery mechanism for low temperature sewage treatment by A²O process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(6): 117-123.
- [43] 魏东洋, 肖才林, 周雯, 等. FeCl₃-生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 5040-5047.
WEI D Y, XIAO C L, ZHOU W, et al. Control of sludge bulking caused by unknown reason through FeCl₃ coupled with biochemical methods [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 5040-5047.
- [44] WU T, YANG S S, ZHONG L, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal: What have we done so far and how do we need to do in the future? [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 158977. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158977.
- [45] LI S Y, FEI X N, CHI Y Z, et al. Integrated temperature and DO effect on the lab scale A²O process; Performance, kinetics and microbial community [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 133: 170-179. DOI: 10.1016/j.ibiod.2018.07.006.
- [46] 龚立, 王启镔, 刘志远, 等. 某大型造纸废水处理厂的污泥膨胀控制及微生物群落结构分析[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(6): 1761-1768.
GONG L, WANG Q B, LIU Z Y, et al. Sludge bulking control and microbial community structure analysis of a large papermaking wastewater treatment plant[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(6): 1761-1768.
- [47] 周顺. 厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理养殖废水优化调控及微生物群落特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
ZHOU S. Study on optimal regulation and microbial community of simultaneous anammox and denitrification process in the treatment of livestock wastewater[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [48] 宋建超, 尚斌, 陶秀萍, 等. 中试膜生物反应器处理奶牛养殖污水的微生物群落结构分析[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(9): 2093-2103.
SONG J C, SHANG B, TAO X P, et al. Microbial community structure analysis of a pilot-scale membrane bioreactor for dairy farm wastewater [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(9): 2093-2103.
- [49] ZHI M, ZHOU Z, YANG C, et al. Solid retention time regulates partial nitrification by algal-bacterial consortia in wastewater treatment: Performance and mechanism [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 452: 139537. DOI: 10.1016/j.cej.2022.139537.
- [50] ZHENG M, TIAN Z, CHAI Z, et al. Ubiquitous occurrence and functional dominance of comammox *Nitrospira* in full-scale wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2023, 236: 119931. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119931.
- [51] ZHU Y, LIU Y, CHANG H, et al. Deciphering the microbial community structures and functions of wastewater treatment at high-altitude area[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2023, 11: 1107633. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1107633.
- [52] XIE N, ZHONG L, OUYANG L, et al. Community composition and function of bacteria in activated sludge of municipal wastewater treatment plants [J]. *Water*, 2021, 13(6): 852-852. DOI: 10.3390/w13060852.
- [53] YANG K, LIU W, LIN H M, et al. Ecological and functional differences of abundant and rare sub-communities in wastewater treatment plants across China [J]. *Environmental Research*, 2024, 243: 117749. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117749.

(上接第 18 页)

- [40] WANG J L, WANG S Z. Activation of persulfate (PS) and peroxymonosulfate (PMS) and application for the degradation of emerging contaminants [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 1502-1517. DOI: 10.1016/j.cej.2017.11.059.
- [41] WU Q D, CHEN C, SHU J Y, et al. Efficiency of a combined biological aerated filter and ultrafiltration process for removal of odor compounds in rural drinking water [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 342: 126991. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126991.
- [42] YAPARATNE S, TRIPP C P, AMIRBAHMAN A. Photodegradation of taste and odor compounds in water in the presence of immobilized TiO₂-SiO₂ photocatalysts [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 346: 208-217. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.12.029.