

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2026.02.001

藻源性污染的研究进展

宋高飞, 万栋, 李丹敏, 赵亚飞, 米武娟, 毕永红*

中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072

摘要: 由藻类异常增殖及其代谢产物(藻毒素、异味物质等)引发的藻源性污染是全球性水生态环境问题;藻源性污染破坏水生生态系统平衡,通过饮用水和水产品等途径威胁人类健康,造成显著的经济损失和健康风险。本文综述了藻源性污染的研究进展,重点介绍了其内涵、危害及最新研究动态,确认气候变暖已成为藻源性污染的重要驱动因子;揭示了研究热点已从基础生物学向多元交叉融合方向演进,指出了藻毒素与异味物质的健康风险评估、绿色降解技术与协同控制策略是新的研究热点。针对当前藻毒素、异味物质合成调控机理不清、处置技术低效等问题,提出了深化基础研究、构建风险评估与预警体系、开发高效低成本的处置技术等建议,相关信息可为从事本领域研究的同行提供参考依据。

关键词: 藻源性污染;水华;藻毒素;异味物质;气候变暖;风险评估;污染控制

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 2097-1486(2026)02-0111-11

Research progress in algae-derived pollution

SONG Gaofei, WAN Dong, LI Danmin, ZHAO Yafei, MI Wujuan, BI Yonghong*

Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

Abstract: Algae-derived pollution, triggered by abnormal algal proliferation and their metabolites (algal toxins, taste and odor compounds, etc.), constitutes a global aquatic ecological and environmental issue. It disrupts the balance of aquatic ecosystems, threatens human health through pathways of drinking water and aquatic products, and results in significant economic losses and health risks. This article reviewed the research advances in algae-derived pollution, with a focus on elucidating its definition, hazards, and the latest research trends. It confirmed that climate warming has become a crucial driver of algae-derived pollution. The review revealed that the research hotspot has evolved from fundamental biology towards interdisciplinary integration, and identified health risk assessment of algal toxins and taste and odor compounds, the green degradation technologies and the synergistic control strategies as the emerging frontiers. Regarding the current challenges of unclear regulatory mechanisms for the synthesis of algal toxins and taste and odor compounds, the inefficient treatment technologies, this paper proposed recommendations such as deepening fundamental research, establishing risk assessment and early warning systems, and developing efficient, low-cost treatment technologies. The relevant information might serve as a reference for researchers in this field.

Keywords: algae-derived pollution; algal blooms; algal toxins; taste and odor compounds; climate warming; risk assessment; pollution control

0 引言

藻源性污染是指藻类异常增殖引起的水体藻类

生物量大量积聚、释放藻毒素及异味物质,引发水质恶化、生态功能退化,威胁水生态环境、饮用水安全与人类健康的一系列复杂污染。

*通信作者

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3207801)

收稿日期:2026-01-05;修回日期:2026-02-09

藻源性污染的典型事件是藻类生物量快速聚积形成的藻类水华,其发生会显著降低水体透明度,并引发水体缺氧、水生食物网结构改变、鱼类大量死亡以及恶臭事件等一系列物理、化学与生物连锁反应,成为驱动水质恶化的关键因素^[1]。除藻类生物量外,藻毒素和异味物质作为关键的藻源性代谢产物,亦是污染的重要组成部分,在淡水生态系统中对水环境质量及人类用水安全的影响最为直接和显著^[2]。目前,全球范围内已鉴定的藻毒素在化学结构上已超过百种^[3]。在我国水体中,蓝藻毒素是主要的藻源性毒素类型。根据其化学结构可分为环肽类(cyclic peptides)、生物碱类(alkaloids)和脂多糖类(lipopolysaccharide, LPS);依据其作用靶器官,则可分为肝毒素(Hepatotoxins)、神经毒素(Neurotoxins)、皮炎毒素(Dermatotoxins)及其他具有生物活性的物质等。与此同时,由藻源性次级代谢产物引起的水体异味问题也是一个普遍且严重的环境问题。在经典异味轮状分类系统中,异味及其对应的挥发性化合物被划分为13类,其中8类属于嗅觉异味。土霉味、草木味、鱼腥味、烂菜味、腐败味等多与水体中藻类等微生物的次生代谢产物直接相关;而药味、氯味和化学药品味则通常源于工农业废水的排放^[4]。目前,已识别出的常见藻源性异味物质主要有6种,包括2-甲基异茨醇(2-MIB)、土臭素(Geosmin)、 β -环柠檬醛(β -Cyclocitral)、 β -紫罗兰酮(β -Ionone)、甲硫醚(DMS)和二甲基三硫醚(DMTS)。

鉴于藻源性污染对水域生态系统及其生态服务功能的诸多危害,为引起足够的重视,本文综述了藻源性污染的危害、研究动态,并指出了今后的研究方向,以期为从事该领域研究的同行提供资料参考。

1 藻源性污染的危害

藻源性污染是一个复杂的综合性生态环境问题,其影响具有系统性、链式传递性和跨领域的特点。不仅直接破坏水生态系统的结构和功能,还通过威胁水生态环境安全及人类健康,最终造成显著的社会经济损失。

1.1 破坏水生生态系统

藻类水华对水生生态系统构成系统性胁迫,其影响贯穿环境因子、生物群落乃至生态系统功能等层面。首先,大规模水华遮蔽水面,严重削弱水体透光性,抑制沉水植物光合作用与生长。其次,藻类衰亡分解阶段,微生物的强烈分解活动会急剧消耗溶解氧,形成缺氧甚至厌氧环境,并伴随黑臭等现

象^[5-7],直接导致鱼类、贝类等需氧生物窒息而大规模死亡。再者,许多藻类(特别是蓝藻)产生的藻毒素具有急性和慢性毒性,能对浮游动物、底栖动物、鱼类等不同营养级生物造成直接毒害甚至死亡^[8-9]。在这一系列复合压力下,水生生物群落结构发生不可逆性退化:耐污种逐渐成为优势类群,而鱼类、底栖动物与浮游动物普遍呈现小型化、简单化趋势,生物多样性显著降低,生态系统稳定性与恢复力下降^[7,10]。

1.2 威胁人类健康

藻源性污染通过多种暴露途径直接或间接危及人类健康。藻源性异味物质(如Geosmin、2-MIB)即使在极低浓度下也会严重影响饮用水感官品质,引发公众对水质安全的信任危机^[11]。部分化合物(如氯酚类、硫醚)本身还具有潜在毒性,长期暴露可能损害肝脏、神经与呼吸系统功能^[12-13]。藻类生物体及其代谢产物等是水中含氮/碳有机物的主要前体物。在饮用水氯消毒过程中,这些物质会与消毒剂反应,生成种类繁多、具有致癌、生殖和发育毒性的含氮/碳消毒副产物(Disinfection by-products, DBPs),构成长期的健康隐患^[14-16]。藻毒素可通过饮水、食用污染水产品、皮肤接触及呼吸道吸入等多种途径进入人体,引起急性肠胃炎、皮肤过敏、肝损伤、神经麻痹甚至死亡等健康问题,其长期慢性暴露风险不容忽视^[9,17-19]。

1.3 冲击社会生产生活

藻源性污染给相关产业与社会运行带来显著的直接或间接经济损失。藻类水华直接导致养殖鱼、虾、贝类因缺氧或中毒而大量死亡。即使存活,水产品也可能因富集藻毒素或异味物质而风味恶化、品质下降,丧失市场价值,给养殖业造成毁灭性打击^[20-21]。藻类水华导致水体变色、产生异味并伴随大量生物死亡,严重破坏水域的景观美学与休闲价值,导致旅游业收入下降^[22-23]。此外,为应对藻源性污染,自来水厂必须采用更复杂的预处理和深度处理工艺(如强化氧化、活性炭吸附等),这显著增加了饮用水处理的运营成本和能源消耗,给公共财政与民生负担带来持续压力^[24]。

2 藻源性污染的研究动态

为系统揭示藻源性污染领域的研究脉络与发展趋势,研究基于科睿唯安(Clarivate Analysis)Web of Science(WOS)核心合集的Science Citation Index Expanded(SCI-E)数据库和中国知网(CNKI)数据库,对1950年至2025年收录的相关文献进行

了检索。任何在标题或摘要或作者所提供的关键词位置含有“algal pollution or algae-derived pollution or algal metabolites”(WOS)或“藻或水华”(CNKI)的论文,经去重和剔除不相关文献后,运用Citespace软件对最终获取的7 829篇WOS文献与2 548篇CNKI文献进行了可视化分析。图1为全球与中国的藻源性污染研究增长轨迹,WOS年度发文量持续攀升,显示出该领域受到持续增长的全球性关注;相比之下,CNKI年度发文量在2008年达到高峰后趋于稳定,且整体数量低于同期WOS发文量。

我国该领域的研究在2007年迎来关键转折点,发表在WOS和CNKI数据库中的研究成果迅速增加。此前在CNKI数据库的年发文量始终低于50篇,研究规模有限。2007年太湖无锡饮用水危机的暴发,因蓝藻水华严重威胁城市供水安全,极大地触发了政府、学术界与公众对藻源性污染的重视^[22-23,25]。这一事件成为推动我国相关研究进入快速发展阶段的关键驱动力,并催生了多项重要研究计划与资金投入。

在WOS数据库中,出现频次最高的五个关键词依次为: growth(生长,942次)、harmful algal blooms(有害藻类水华,589次)、phytoplankton(浮游植物,

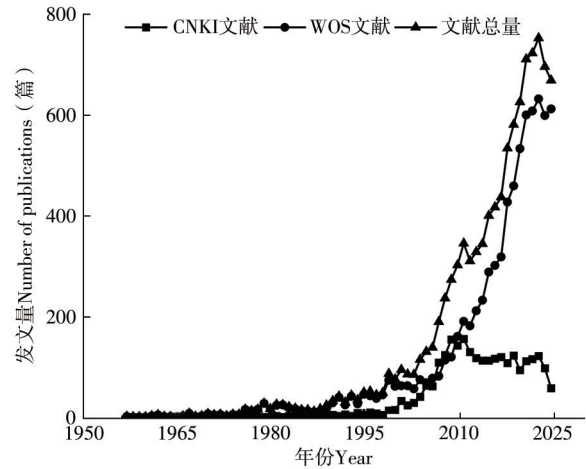


图1 1950年—2025年中国水库型水源地藻源性污染研究文献的年度分布

Figure 1 The number of publications related to algal contamination in the reservoir-type water sources in China from 1950 to 2025

582次)、nitrogen(氮,510次)和 toxicity(毒性,484次)。聚类分析生成了7个主要知识群组(图2),核心议题涵盖:富营养化驱动机制、铜绿微囊藻的生理生态及其对饮用水安全的影响、藻类次级代谢产物的生物活性、藻类对重金属/农药的耐受与修复、高附加值微藻产物的开发、藻毒素的鉴定以及藻类氨基酸研究。

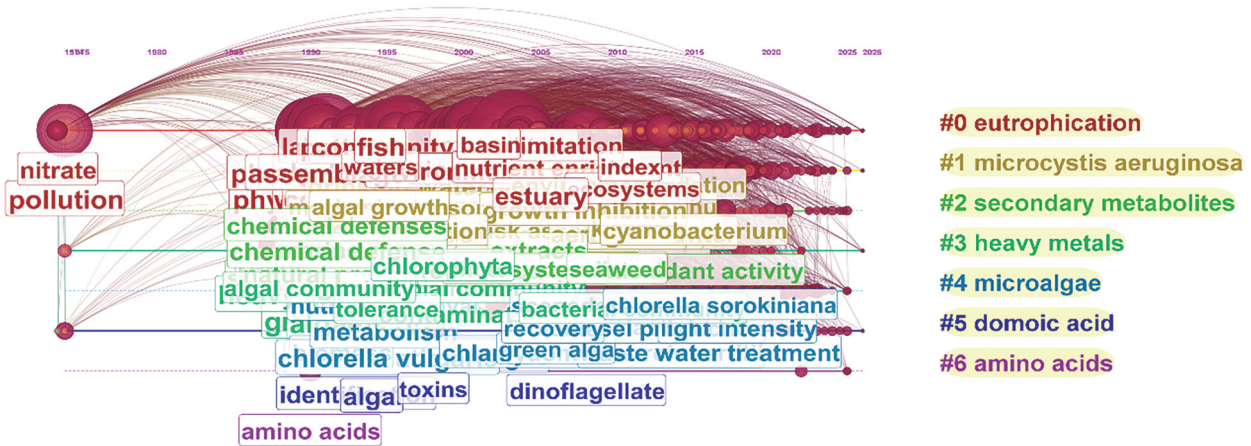


图2 WOS文献关键词聚类知识图谱

Figure 2 The keyword clustering knowledge map of literatures in WOS

在CNKI数据库中,出现频次最高的关键词为:蓝藻水华(649次)、水华(414次)、蓝藻(282次)、太湖(253次)和富营养化(169次),显示出强烈的地域问题导向。聚类分析形成了13个知识群组(图3),研究焦点高度集中于:蓝藻水华的驱动因子、监测预警与风险评价、水华的物理去除与生态调控、溶藻细菌与化感作用机制、微囊藻毒素的环境行为与健康风险,以及滇池、太湖等典型水体的案例研究。

关键词的演进清晰勾勒出藻源性污染研究从基础到应用、从单一到多元的发展路径。早期(1950—2007年)研究集中于藻类的基础生物学特征与简易水质监测方法,发文量少,增长缓慢。此阶段以美国、日本及欧洲机构为主导力量。中期(2008—2015年)研究重点转向藻类生长机制、污染检测技术与风险评估。分子生物学技术的引入深化了藻毒素研究,遥感技术开始应用于大范围水华监测。此阶段,中

定量归因分析表明,气温上升对水华风险期延长的贡献率达11%,远超总磷(5.3%)和总氮(3.5%)的贡献^[32]。这一结论得到大尺度模型研究结果的支持,2005年至2022年我国四大湖区97个重要湖库的数据分析发现,尽管80.5%湖库总磷下降,但61.8%的湖库藻类生物量仍呈增加趋势^[34],表明营养盐削减的效应在一定程度上被气候变化所抵消。该结论同时在全球生态尺度上获得印证,通过对北极海洋食物网长达19年的研究发现,气候变暖直接导致了藻毒素在食物网中的浓度升高,侧面证实了气候驱动的生态风险正在加剧^[35]。研究进一步揭示了水体类型与极端天气对气候响应的敏感差异。基于可解释机器学习模型的分析发现,水库系统对气候变暖的响应比天然湖泊更为敏感,其水华发生的气温阈值(12.6℃)显著低于湖泊(16.7℃)^[32]。这种差异主要源于水库更深水体、更强热分层效应以及更长水力滞留时间。此外,极端天气事件是触发水华的关键环节,通过对中国东部饮用水源地千岛湖60年降雨极端事件趋势研究发现,暴雨径流输入后存在约20天的水华触发“关键窗口期”^[36],表明极端降水事件与升温的协同效应可能诱发更剧烈的水华过程,其机制比单纯增温更为复杂。气候变化的影响还体现物种适应性与区域差异性。研究表明并非所有蓝藻均等受益于变暖,未来预测需充分考虑物种性状多样性^[37]。同时,区域分析显示,相较于高纬度湖区,未来低纬度湖区的藻类水华风险增幅预计更大^[38]。这些多维度发现对制定差异化、适应性的水资源管理策略具有重要指导意义。

而水华控制技术正从传统的物理、化学、生物方法,向环境友好、生态安全且具有资源化潜力的绿色技术演进。人工打捞、气浮、超声波等物理方法以及混凝、氧化等化学方法仍是常用手段^[39-40]。却存在成本高、易造成二次污染或生态破坏等局限^[41-44]。利用鲢鳙控藻、水生植物化感作用及溶藻菌等生物方法,因其生态兼容性好,在长期生态修复中展现出独特价值^[39,45-46]。近年来,水华控制技术非常活跃,在追求高效的同时,也更注重环境友好和生态安全。由香港城市大学研发的超高效可降解AIEgen光敏剂可在光照条件下迅速吸附藻细胞并引起氧化损伤,可自然降解,避免二次污染,为大规模水华控制提供了新思路^[47]。新型TiO₂/MIL-100(Fe)S型异质结光催化材料在模拟太阳辐射下,能通过产生活性氧自由基高效灭活铜绿微囊藻,细胞去除率和叶绿素a降解率分别达79.1%和82.4%^[48]。值得

注意的是,单一物理、化学或生物方法均存在局限,协同与综合防控已成为重要趋势^[49-52]。研究指出,综合应用多学科方法、构建集成处理范式,是形成高效且可持续防控策略的关键。同时,基于生态机理的精准调控策略日益受到重视。高可伟等在对我国典型湖泊及入湖河流氮磷水质协同控制探讨中提出一湖一策、分区断症的治理策略^[53]。这些进展标志着藻类水华防控从粗放的末端治理,转向基于深刻生态认知的源头预防与精准干预。

4 藻毒素的研究进展

藻毒素研究中,对微囊藻毒素(microcystins,MCs)的关注远高于其他类型毒素。一项涵盖全球66个国家869个淡水生态系统的综述表明MCs是世界范围内最常被记录的蓝藻毒素,占总数据条的63%,远高于拟柱孢藻毒素(cylindrospermopsin,CYN,10%)、鱼腥藻毒素(anatoxin,ATX,9%)、石房蛤毒素(saxitoxin,STX,8%)和节球藻毒素(nodularins,NOD,2%)^[54]。在中国,MCs的污染问题尤为突出。我国至少有56个湖泊和37个水库检测出MCs,其中太湖、巢湖、滇池和鄱阳湖是报道次数最多的水体^[55]。2020—2021年的调查显示,夏季滇池和冬季洱海的MCs高达1.03 μg/L和8.63 μg/L,均已超过WHO规定的饮用水指导标准(1 μg/L)^[56],表明了其潜在的饮用水安全风险。

开展蓝藻毒素人体健康风险评估对于明确环境暴露对人体健康的影响至关重要^[57]。美国环保署在针对美国1161个湖泊的大规模调查发现,在其所采集样本中检测出MCs、CYN、NOD、STX及ATX-a的存在,且MCs处于中高风险的样品数超过了样品总量的1.1%^[58]。类似对MCs、CYN的评估也显示其对人体构成中高风险^[59]。多项研究表明,不同蓝藻毒素共存可能比以前更常见^[60],且消毒剂的使用会增加产毒藻株的耐受性并刺激毒素的产生和释放^[61],其健康影响不容忽视。因此,对多种蓝藻毒素的复合暴露风险进行评估和管理,已成为当前研究的新热点。

另一方面,藻毒素的降解与去除技术正向高效、绿色及资源化方向快速发展。作为常用的物理吸附剂,活性炭虽吸附性能良好,但吸附MCs后存在二次污染问题;膜技术则受困于膜污染及藻毒素处理问题^[61-62];传统化学氧化法效果有限且成本高;传统的生物技术常利用自然生物的吸收、转化或摄食作用,可实现藻毒素的自然净化,但常用的毒素降解菌

降解效率有限。新兴的光催化技术展现巨大潜力。例如,新型光催化材料TiO₂/MIL-100(Fe)能在模拟太阳光下高效灭活铜绿微囊藻,并同步降解50.5%的微囊藻毒素,实现了除藻和解毒的双重功效^[48]。有人创新性地将毒素降解菌株接入微生物燃料电池,通过电极调控增强其代谢活性,从而高效降解多种MCs变体,并同步产出可达111 mW/m²的电能^[64-65]。该技术成功地将“污染控制”与“能源回收”相结合,为藻毒素治理提供了绿色低碳的新范式。将UV254紫外光降解与微藻生物修复联用,可先通过光分解污染物并降低其生物毒性,再利用微生物进行生物净化与资源回收^[66],构建了一条可持续的污染治理路径。结合多种技术的优点,实现协同增效是未来发展的重要方向。

5 藻源性异味物质的最新研究进展

藻源性异味物质作为影响饮用水感官品质的关键因素,近年来在来源解析、风险评估与控制技术等方面取得了显著进展。随着分析技术的提升和标准体系的完善,该领域研究呈现出从现象识别到机制探索、从单一处理到多技术协同的深刻转变。

藻源性异味物质具有极低的嗅味阈值(通常为ng/L级别),是引发饮用水感官问题的主要原因。自19世纪中期以来,国际学术界已系统开展水体异味研究^[67-69]。我国在1996—2007年期间,太湖、巢湖、北京密云水库、广东深圳水库、山东玉清湖水库、黄河内蒙古包头段等15个重要水源地均发生不同程度的水体异味问题^[70]。据估算,我国约80%的水源水和45%的出厂水存在嗅味问题,藻类代谢产物被认为是主要诱因^[71]。2023年4月实施的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)将2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(Geosmin)纳入强制执行指标,标志着我国异味物质管控进入新阶段^[72]。近期调查显示,长江流域典型水源地中2-MIB和Geosmin的超标率分别达59.4%和12.5%,凸显了异味控制的紧迫性^[72]。藻源性异味物质不仅影响水产品风味品质,还会引起人体感官不适,如眩晕、呕吐等症状^[73]。尽管大多数异味物质本身毒性较低^[74],但其存在的感官冲击会引发消费者对水质安全的信任危机,进而产生显著的社会心理影响。GB 5749—2022明确规定饮用水中2-MIB和Geosmin的嗅味阈值均不得超过10 ng/L。这一限值的设定不仅基于感官接受度考量,也体现了对潜在健康风险的预防性管理理念。目前,针对多种异味物质的复合暴露风

险及其长期健康效应仍需深入研究。

活性炭吸附仍是应用最广泛的除嗅技术,但其成本较高且性能受水质参数影响^[75]。超细粉末活性炭(SPAC)和改性活性炭材料的开发,通过增加比表面积和引入特定官能团,显著提升了吸附容量和选择性,为高效除嗅提供了新的材料基础^[76]。针对传统氧化技术易导致细胞破裂、产生副产物等问题,UV/过氧化氢(UV/H₂O₂)、光催化氧化等高级氧化工艺成为研究热点。这些技术通过产生强氧化性自由基,能够高效降解异味分子,且具有反应彻底、二次污染风险低的优势^[48,77]。研究表明,UV/H₂O₂工艺对2-MIB的降解率可达90%,且在控制后续消毒副产物毒性方面表现优异^[75]。生物滤池等生物膜法技术因其成本低、效率高、环境兼容性好,在异味控制中展现独特优势^[78]。通过筛选高效降解菌株、优化生物膜载体和运行参数,生物处理的稳定性和效率得到显著升高。面对复杂实际水质,组合工艺通过协同作用展现出比单一技术更优越的性能。研究证实,紫外光协同氧化+活性炭吸附、臭氧-生物活性炭等组合工艺能够实现异味物质的高效去除,同时有效控制副产物生成^[48,77]。当前,异味物质控制技术正朝着高效、经济、环境友好的方向快速发展,形成了多技术并举、协同增效的发展格局。

6 全球变化背景下的挑战与对策

前述研究表明,气候变化已成为藻源性污染的关键因素,其中,气候变暖是藻类水华风险格局变化的首要驱动因子,其影响强度甚至可能抵消营养盐控制措施的成效^[32,79]。更为严峻的是,全球气候变暖正在引起一系列复杂效应,有害藻类水华的地理分布向高纬度水域扩张,生长周期延长导致风险窗口持续加大;耐高温、强产毒藻种的竞争优势日益凸显^[37];此外,极端降水事件通过面源污染负荷,与水温升高产生协同效应,可能诱发更为剧烈的水华过程^[38]。这一系列的连锁放大效应,将对水生态环境安全、公众健康以及社会经济造成更为深远的复合型危害。在此背景下,从全球变化的宏观视角审视其未来趋势与挑战尤为重要;以气候变暖、极端天气频发及人为活动增强为主要特征的全球变化,正在深刻改变藻源性污染的发生模式与风险格局^[80-81],使其危害性、复杂性和不确定性显著增加,面对全球变化带来的严峻挑战,尽管当前藻源性污染研究取得了显著进展,但仍面临着诸多挑战:

首先,机制认识不足。目前对藻毒素、异味物质

的生物合成途径及其调控机制尚不完全清楚,特别是环境因素如何调控产毒藻类毒素合成的机制仍需深入研究^[82-86]。藻源性有机物(algae organic matter, AOM)的组成复杂,其对水处理过程的影响机制尚未完全阐明,尤其是不同生长时期AOM组成变化对混凝过程的影响机制仍需进一步研究^[87-88]。

其次,风险评估不足且处置技术存在瓶颈。当前对藻毒素、异味物质的健康风险评估主要基于单一物质,而实际环境中多种藻毒素、异味物质共存时的复合效应研究尚不充分;对藻毒素、异味物质的慢性暴露风险及其机制的认识仍需加强。现有水华、藻毒素、异味物质去除技术在实际应用中仍存在效率不高、成本昂贵等问题^[40,75],且蓝藻厌氧处理与资源化利用研究领域的关注度不高^[89],现有藻源性污染控制措施多以末端治理为主,缺乏从源头到末端的全过程协同控制策略。

为应对上述挑战,未来需要加强以下方向的基础研究与技术研发力度:

1、深化本领域的基础研究。加强藻毒素、藻源性异味物质生物合成途径及其调控机制研究,深入开展藻源性有机质组成、特性及其对水处理过程影响机制研究,特别需要关注气候变化背景下,藻类水华、藻毒素、藻源性异味物质的时空演变规律及其驱动机制的研究。

2、构建科学的风险评估与预警体系。开展多种藻毒素、藻源性异味物质共存的复合效应研究,建立精准的健康风险评估技术方法;融合机器学习、遥感监测等先进技术,完善藻类水华、藻毒素及藻源性异味物质的监测预警体系,开发耦合气候、水文与生态过程的综合预测模型,重点识别不同气候条件与水体类型下藻类水华、毒素及异味物质生成的关键阈值,推动预测目标从单纯预测藻类生物量向综合预判藻源性污染风险的跃升,提高预测预警能力。

3、着力开发高效、低成本的藻毒素、藻源性异味物质降解/处置技术,特别是能够同步去除藻类、毒素、异味及DBPs前体的多功能协同技术和基于微生物降解和高级氧化的组合工艺,推动微生物燃料电池等“过程控污-能源回收”范式^[64]的工程化应用,实现藻毒素、藻源性异味物质去除与能源回收的协同,积极探索藻源性污染物的资源化利用技术研发,如蓝藻厌氧发酵产酸等,实现变废为宝;建立从源头控制、过程阻断到末端治理的全过程藻源性污染预防与控制体系,根据不同水体的具体特点制定差异化的防控策略。

藻源性污染作为一个复杂的全球性环境问题,其有效控制需要多学科交叉、多技术集成和多方协同参与。通过基础研究的深化、技术研发的创新推动和构建综合防控技术体系,未来可望更好地应对藻源性污染的挑战,保障水生态环境安全和人类健康。

参考文献:

- [1] Paerl H W, Fulton R S, Moisander P H, et al. Harmful Freshwater Algal Blooms, With an Emphasis on Cyanobacteria [J]. *The Scientific World Journal*, 2001, 1: 76-113. DOI: 10.1100/tsw.2001.16.
- [2] 宋立荣, 李林, 陈伟, 等. 水体异味及其藻源次生代谢产物研究进展 [J]. *水生生物学报*, 2004(04): 434-439. DOI:10.3321/j.issn:1000-3207.2004.04.018.
- [3] Merel S, Walker D, Chicana R, et al. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins [J]. *Environment International*, 2013, 59: 303-327. DOI: 10.1016/j.envint.2013.06.013.
- [4] 王中杰. 蓝藻土霉异味物质合成基因的研究及其生态应用 [D]. 武汉: 中国科学院大学研究生院, 2012: 3-8.
- [5] Cai Yongjiu, Gong Zhijun, Qin Boqiang. Benthic macroinvertebrate community structure in Lake Taihu, China: Effects of trophic status, wind-induced disturbance and habitat complexity [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, 38: 39-48. DOI: 10.1016/j.jglr.2011.12.009.
- [6] Glibert P M. Eutrophication, harmful algae and biodiversity: Challenging paradigms in a world of complex nutrient changes [J]. *Marine pollution bulletin*, 2017, 124(2): 591-606. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.04.027.
- [7] Krzton W, Kosiba J. Variations in zooplankton functional groups density in freshwater ecosystems exposed to cyanobacterial blooms [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 730: 139044. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139044.
- [8] Xie Liqiang, Xie Ping, Guo Longgen, et al. Organ distribution and bioaccumulation of microcystins in freshwater fish at different trophic levels from the eutrophic Lake Chaohu, China [J]. *Environmental Toxicology*, 2005, 20(3): 293-300. DOI: 10.1002/tox.20120.
- [9] Chen Jun, Zhang Dawen, Xie Ping, et al. Simultaneous determination of microcystin contaminations in various vertebrates (fish, turtle, duck and water bird) from a large eutrophic Chinese lake, Lake Taihu, with toxic *Microcystis* blooms [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407: 3317-3322. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.02.005.

- [10] Chen Chao, Shi Xiaoli, Yang Zhen, et al. An integrated method for controlling the offensive odor and suspended matter originating from algae-induced black blooms[J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 526-532. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.072.
- [11] 阮杰, 苏晨, 张圣炜, 等. 饮用水臭味物质的多维度解析: 智能监测、绿色控制与全流程管理研究进展[J]. 中国生态环境产业与技术, 2025, 6: 92-98. DOI: 10.12184/wspzgsthjcyysWSP2633-771122.20250604.
- [12] Rappert S, Müller R. Microbial degradation of selected odorous substances [J]. *Waste Management*, 2005, 25 (9): 940-954. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.07.015.
- [13] 李勇, 张晓健, 陈超. 我国饮用水中臭味问题及其研究进展[J]. 环境科学, 2009, 30(02): 583-588. DOI: 10.3321/j.issn:0250-3301.2009.02.045.
- [14] 章超. 藻源性非受控含氮消毒副产物苯乙腈的生成研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016: 8-29.
- [15] Yang Xin, Guo Wanhong, Shen Qianqian. Formation of disinfection byproducts from chlor(am)ination of algal organic matter[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 197: 378-388. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.09.098.
- [16] 王姝楠, 杨丽, 陈丽梅, 等. 消毒副产物人群内暴露及健康影响研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2025, 15(2): 151-162. DOI: 10.13421/j.cnki.hjwsxzz.2025.02.011.
- [17] 于仁成, 罗璇. 我国近海有毒藻和藻毒素的研究现状与展望[J]. 海洋科学集刊, 2016, 51: 155-166. DOI: 10.12036/hyhxjk201607126001.
- [18] 俞顺章, 赵宁, 资晓林, 等. 饮水中微囊藻毒素与我国原发性肝癌关系的研究[J]. 中华肿瘤杂志, 2001, 23(2): 96-99. DOI: 10.3760/j.issn:0253-3766.2001.02.002.
- [19] Zhang Dawen, Xie Ping, Liu Yaqin, et al. Transfer, distribution and bioaccumulation of microcystins in the aquatic food web in Lake Taihu, China, with potential risks to human health[J]. *Science of The Total Environment*, 2009, 407(7): 2191-2199. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.12.039.
- [20] Robertson R F, Hammond A, Jauncey K, et al. An investigation into the occurrence of geosmin responsible for earthy-musty taints in UK farmed rainbow trout, *Onchorhynchus mykiss*[J]. *Aquaculture*, 2006, 259(1): 153-163. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2004.11.046.
- [21] Hallgraeff G M. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase [J]. *Phycologia*, 1993, 32(2): 79-99. DOI: 10.2216/i0031-8884-32-2-79.1.
- [22] Qin Boqiang, Zhu Guangwei, Gao Guang, et al. A Drinking Water Crisis in Lake Taihu, China: Linkage to Climatic Variability and Lake Management[J]. *Environmental Management*, 2010, 45 (1): 105-112. DOI: 10.1007/s00267-009-9393-6.
- [23] Yang Min, Yu Jianwei, Li Zonglai, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's Woes[J]. *Science*, 2008, 319(5860): 158. DOI: 10.1126/science.319.5860.158a.
- [24] 植许黎, 陈兴祥, 张慧欢. 西江流域肇庆段高藻污染及某水厂除藻措施[J]. 中国给水排水, 2025, 41(4): 92-97. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.015.
- [25] 蔡临明. 浙江省重要水库型饮用水水源地富营养化态势分析及对策[J]. 中国水利, 2010(11): 19-20. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2010.11.010.
- [26] Jia Yan, Xiao Zhiyu, Yang Liwen, et al. Enhancing Algal Bloom Level Monitoring with CYGNSS and Sentinel-3 Data[J]. *Remote sensing*, 2024, 16(20): 3915. DOI: 10.3390/rs16203915.
- [27] Liu Miao, Ling Hong, Wu Dan, et al. Sentinel-2 and Landsat-8 Observations for Harmful Algae Blooms in a Small Eutrophic Lake[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(21): 4479. DOI: 10.3390/rs13214479.
- [28] Paulino R S, Martins V S, Novo E M L M, et al. Generation of robust 10-m Sentinel-2/3 synthetic aquatic reflectance bands over inland waters [J]. *Remote sensing of environment*, 2025, 318: 114593. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114593.
- [29] Okomo J O, Nduati E, Kirimi F. Spatiotemporal modelling and monitoring of harmful algal blooms using IoT in Lake Victoria Basin Kenya [J]. *Scientific reports*, 2025, 15 (1): 38018-38053. DOI: 10.1038/s41598-025-21979-3.
- [30] Qiu Yinguo, Huang Jiacong, Luo Juhua, et al. Monitoring, simulation and early warning of cyanobacterial harmful algal blooms: An upgraded framework for eutrophic lakes [J]. *Environmental research*, 2025, 264(Pt 1): 120296. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120296.
- [31] Qian Jing, Pu Nan, Qian Li, et al. Identification of driving factors of algal growth in the South-to-North Water Diversion Project by Transformer-based deep learning [J]. *Water Biology and Security*, 2023 (2): 100184. DOI: 10.1016/j.watbs.2023.100184.
- [32] Ma Yiming, Wang Jingfu, Huo Shouliang, et al. Explainable machine learning reveals climate warming increases risk of algal blooms in lakes and reservoirs [J]. *Water Research*, 2025, 287(Pt B): 124460. DOI: 10.1016/j.watres.2025.124460.
- [33] Zhang Yaqin, Wang Yichong, Chen Jixin, et al. En-

- hancing short-term algal bloom forecasting through an anti-mimicking hybrid deep learning method[J]. *Journal of environmental management*, 2025, 379: 124832. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124832.
- [34] Zhang Shuai, Arhonditsis G B, Ji Yulai, et al. Climate change promotes harmful algal blooms in China's lakes and reservoirs despite significant nutrient control efforts[J]. *Water research*, 2025, 277: 123307. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123307.
- [35] Lefebvre K A, Charapata P, Stimmelmayer R, et al. Bowhead whale faeces link increasing algal toxins in the Arctic to ocean warming [J]. *Nature*, 2025, 644 (8077): 693-698. DOI: 10.1038/s41586-025-09230-5.
- [36] Qiu Yu, Xu Hai, Zou Wei, et al. Rainstorm regimes modulate cyanobacterial bloom dynamics in deep reservoirs: Synergistic effects of nutrient pulses and hydrological perturbations [J]. *Limnology and Oceanography*, 2025(9999): 1-15. DOI: 10.1002/lno.70222.
- [37] Zhang Yanxue, Wu Huaming, Wu Xingqiang, et al. Revisiting Cyanobacteria-Temperature Dynamics: Intra-specific Competition and Trait Diversity as Keys to Predicting Harmful Algal Blooms under Climate Change[J]. *Environmental science & technology*, 2025, 59(33): 17811-17821. DOI: 10.1021/acs.est.5c04849.
- [38] Su Shangke, Luo Zhaohe, Kang Jianhua, et al. How Does Climate Change Influence the Regional Ecological-Social Risks of Harmful Dinoflagellates A Predictive Study of China's Coastal Waters[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(7): e70323. DOI: 10.1111/gcb.70323.
- [39] 高雪, 付乐, 陈才高, 等. 高效浅层气浮工艺除藻效能研究[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(22): 18-22. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2014.22.004.
- [40] 庄锤健. 超滤-纳滤处理近海含藻水膜复合污染机制研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2025: 2-9.
- [41] 马军, 方晶云, 王立宁, 等. 臭氧预氧化对藻细胞及藻类有机物特性及其混凝处理效能的影响[J]. *中国给水排水*, 2006(7).
- [42] Du Xing, Li Bingxuan, Zhuang Zhongjian, et al. Salt tide affecting algae-laden micropolluted surface water treatment and membrane performance based on BDD electro-oxidation coupled with ceramic membrane process [J]. *Environmental research*, 2023, 237 (Pt 1): 116942. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116942.
- [43] Deriszadeh A, Husein M M, Harding T G. Produced water treatment by micellar-enhanced ultrafiltration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(5): 1767-1772. DOI: 10.1021/es902862j.
- [44] Zeng Guoming, Ma Zilong, Zhang Rui, et al. Mechanism of electrochemical algal control and its effect on metabolic pathways of algal cells [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 493: 138318. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138318.
- [45] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. *Myriophyllum spicatum*-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water research*, 2000, 34(11): 3026-3032. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00039-7.
- [46] Yin Chengjie, Guo Longgen, Yi Chunlong, et al. Physicochemical Process, Crustacean, and *Microcystis* Biomass Changes In Situ Enclosure after Introduction of Silver Carp at Meiliang Bay, Lake Taihu [J]. *Scientifica*, 2017, 2017: 9643234. DOI: 10.1155/2017/9643234.
- [47] Yue Qiang, He Xuewen, Yan Neng, et al. Photodynamic control of harmful algal blooms by an ultra-efficient and degradable AIEgen-based photosensitizer [J]. *Chemical engineering journal*, 2021, 417: 127890. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127890.
- [48] Zhang Jie, Lü Na, Wu Mingcan, et al. TiO₂/MIL-100(Fe) S-scheme heterojunction for efficient photocatalytic inactivation of *Microcystis aeruginosa* and microcystin degradation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025(524): 169033. DOI: 10.1016/j.cej.2025.169033.
- [49] 郝越, 杨霞, 龙萌, 等. 湖库蓝藻水华应急治理技术研究现状与展望[J]. *水资源研究*, 2023, 12(3): 226-237. DOI: 10.12677/jwrr.2023.123026.
- [50] 曹晶, 袁静, 赵丽, 等. 湖库蓝藻水华控制技术发展、应用及展望[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(2): 487-500. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20230453.
- [51] 史小丽, 杨瑾晟, 陈开宁, 等. 湖泊蓝藻水华防控方法综述[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(2): 349-375. DOI: 10.18307/2022.0201.
- [52] Liu Jiaming, Zhao Haoyu, Emmanuel C, et al. Interdisciplinary strategies for the management of harmful algal blooms: prospects & comprehensive review [J]. *Discover Environment*, 2025, 3(1): 18-93. DOI: 10.1007/s44274-025-00304-9.
- [53] 高可伟, 朱元荣, 孙福红, 等. 我国典型湖泊及入湖河流氮磷水质协同控制探讨[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(5): 1400-1414. DOI: 10.18307/2021.0509.
- [54] Svircev Z, Lalic D, Bojadzija S G, et al. Global geographical and historical overview of cyanotoxin distribution and cyanobacterial poisonings [J]. *Archives of Toxicology*, 2019, 93(9): 2429-2481. DOI: 10.1007/s00204-019-02524-4.
- [55] Wei Huimin, Jia Yunlu, Wang Zhi. Microcystin pollu-

- tion in lakes and reservoirs: A nationwide meta-analysis and assessment in China [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 309: 119791. DOI:10.1016/j.envpol.2022.119791.
- [56] 赵栩. 气候变化敏感区微囊藻毒素分布格局及风险评估[D]. 昆明: 云南大学, 2023: 3-9.
- [57] 孔凡玲, 石峰, 隋少峰. 藻毒素的人类健康效应及危险性评估[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(3): 286-288. DOI: 10.16241/j.cnki.1001-5914.2006.03.046.
- [58] Loftin K A, Graham J L, Hilborn E D, et al. Cyanotoxins in inland lakes of the United States: Occurrence and potential recreational health risks in the EPA National Lakes Assessment 2007 [J]. *Harmful Algae*, 2016 (56): 77-90. DOI: 10.1016/j.hal.2016.04.001.
- [59] Li Hongmin, Gu Xiaohong, Chen Huihui, et al. Co-occurrence of multiple cyanotoxins and taste-and-odor compounds in the large eutrophic Lake Taihu, China: Dynamics, driving factors, and challenges for risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2022 (294): 118594. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118594.
- [60] 肖诗曼. 蓝藻与蓝藻毒素对浮游动物的生态毒理学效应[D]. 昆明: 云南大学, 2024: 2-6.
- [61] Jia Yunlu, Huang Yi, Ma Jin, et al. Toxicity of the disinfectant benzalkonium chloride (C₁₄) towards cyanobacterium *Microcystis* results from its impact on the photosynthetic apparatus and cell metabolism [J]. *Journal of environmental sciences*, 2024, 135: 198-209. DOI: 10.1016/j.jes.2022.11.007.
- [62] 杨硕, 孔进, 徐少昌, 等. 饮用水去除藻毒素研究进展[J]. 净水技术, 2017, 36(6): 41-45. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2017.06.007.
- [63] Huang Winjun, Cheng Bailing, Cheng Yunling. Adsorption of microcystin-LR by three types of activated carbon [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 141(1): 115-122. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.122.
- [64] Liu Yan, Song Xinli, Wei Jia, et al. Dual-function microbial fuel cells: Bioenergy harvesting and microcystin detoxification through molecular docking insights [J]. *Journal of water process engineering*, 2025, 75: 107921. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107921.
- [65] Long Xizi, Yi Piao, Yang Weiqi, et al. Electrochemical stimulation of *Alcaligenes faecalis* D04 enhances anaerobic degradation of microcystin-LR in microbial fuel cells [J]. *Chemical engineering journal*, 2025, 520: 166192. DOI: 10.1016/j.cej.2025.166192.
- [66] He Xiaoman, Liu Dongyang, Liao Yongxin, et al. Sequential treatment of UV₂₅₄ photodegradation and microalgal bioremediation in aquaculture effluent: Florfenicol toxicity mitigation and nutrient recovery [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 500: 140393. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140393.
- [67] Watson S B, Ridal J, Boyer G L. Taste and odor and cyanobacterial toxins: impairment, prediction, and management in the Great Lakes [J]. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 2008, 65(8): 1779-1796. DOI: 10.1139/F08-084.
- [68] Watson S B. Aquatic taste and odor: a primary signal of drinking-water integrity [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 2004, 67(20-22): 1779-1795. DOI: 10.1080/15287390490492377.
- [69] Watson S B. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: Signals or by-products A review of their biological activity [J]. *Phycologia*, 2003, 42(4): 332-350. DOI: 10.2216/i0031-8884-42-4-332.1.
- [70] 李勇, 张晓健, 陈超. 我国饮用水中嗅味问题及其研究进展 [J]. 环境科学, 2009, 30(2): 583-588. DOI: 10.3321/j.issn:0250-3301.2009.02.045.
- [71] Du Hongxia, Wang Zihan, Sun Yongjun, et al. An Overview of the Progress made in Research on Odor Removal in Water Treatment Plants [J]. *Water*, 2024, 16(2): 280. DOI: 10.3390/w16020280.
- [72] 韦彦章, 朱广伟, 池怡, 等. 长江流域典型水源水库春季 2-甲基异莰醇浓度及其影响因素 [J]. 湖泊科学, 2026, 38(1). DOI: 10.18307/2026.0111.
- [73] 王愿珠, 张春梅, 毕永红, 等. 南水北调中线干渠异味物质时空动态及其影响因素 [J]. 水生生物学报, 2022, 46(02): 149-159. DOI: 10.7541/2022.2020.206.
- [74] Zhou Weicheng, Li Xiaoyu, Wang Yuming, et al. Physiological and transcriptomic changes of zebrafish (*Danio rerio*) embryos-larvae in response to 2-MIB exposure [J]. *Journal of hazardous materials*, 2021, 416: 126142. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126142.
- [75] 刘一夫, 龚思成, 刘佳伟, 等. 典型藻源性嗅味物质及其去除工艺研究进展 [J]. 净水技术, 2025, 44(3): 10-18. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.002.
- [76] Ma Lingfei, Peng Fangyuan, Li Haipu, et al. Adsorption of geosmin and 2-methylisoborneol onto granular activated carbon in water: isotherms, thermodynamics, kinetics, and influencing factors [J]. *Water Science & Technology*, 2019, 80(4): 644-653. DOI: 10.2166/wst.2019.284.
- [77] Li Sihong, Wang Hehua, Xu Hangzhou, et al. Investigation of nitro(so)- and chloro-disinfection byproduct formation mechanisms after UV/Cl₂ and UV/H₂O₂ oxidation of 2-methylisoborneol in the presence of algal organic matter [J]. *Water Research*, 2026, 288(Part A): 124616. DOI: 10.1016/j.watres.2025.124616.

- [78] Elovitz M S, Von Gunten U, Kaiser H. Hydroxyl Radical/Ozone Ratios During Ozonation Processes. II. The Effect of Temperature, pH, Alkalinity, and DOM Properties[J]. *The Journal of the International Ozone Association*, 2000, 22(2): 123-150. DOI: 10.1080/01919510008547216.
- [79] Paerl H W. Climate Change, Phytoplankton, and HABs[M]//Kennish M J, Paerl H W, Crosswell J R. Climate Change and Estuaries. Boca Raton: CRC Press, 2024: 315-334.
- [80] McDowell R W, Luo Dongwen, Pletnyakov P, et al. Anthropogenic nutrient inputs cause excessive algal growth for nearly half the world's population[J]. *Nature Communications*, 2025 (16): 1830. DOI: 10.1038/s41467-025-57054-8.
- [81] Feng Lian, Wang Ying, Hou Xuejiao, et al. Harmful algal blooms in inland waters [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5(9): 631-644. DOI: 10.1038/s43017-024-00637-8.
- [82] Zou Shanmei, Yu Xinke, Sun Tiantian, et al. Unveiling bacterial communities linked with *Alexandrium catenella*, their impact and influential mechanism on paralytic shellfish toxin production[J]. *Algal research*, 2024, 83: 103698. DOI: 10.1016/j.algal.2024.103698.
- [83] Bui Q, Pradhan B, Kim H S, et al. Environmental Factors Modulate Saxitoxins (STXs) Production in Toxic *Dinoflagellate Alexandrium*: An Updated Review of STXs and Synthesis Gene Aspects[J]. *Toxins*, 2024, 16(5): 210. DOI: 10.3390/toxins16050210.
- [84] Chen Heng, Huang Zehui, Guan Wanchun, et al. Phosphorus rather than nitrogen driving biosynthesis of diarrhetic shellfish toxins in *Prorocentrum caipirignum* via ATP[J]. *Harmful Algae*, 2025, 145: 102842. DOI: 10.1016/j.hal.2025.102842.
- [85] Yin Li, Shi Kaipian, Yin Yu, et al. Long-term suppression of *Microcystis aeruginosa* by tannic acid: Risks of microcystin pollution and proteomic mechanisms [J]. *J Hazard Mater*, 2025, 487: 137205. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.137205.
- [86] 张紫馨, 王寅初, 刘钦弘, 等. 微囊藻毒素生物学功能的研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2023, 18(2): 128-140. DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20220715001.
- [87] Li Lili, Cheng Shaozhe, Wang Zimin, et al. A critical review of the contradictory roles of algal organic matter in microalgae coagulation-flocculation: effects of composition, properties, and mechanisms [J]. *Water research*, 2025, 286: 124214. DOI: 10.1016/j.watres.2025.124214.
- [88] 张事, 孙凌凯, 马方凯, 等. 藻源污染物特性对高藻水微滤处理过程中膜污染的影响[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(7): 1096-1105. DOI: 10.7541/2023.2022.0264.
- [89] 付维莲, 郭太勇, 李双菊, 等. 基于 Citespace 的蓝藻厌氧处理研究文献计量和可视化分析[J]. *云南化工*, 2024, 51(11): 135-142.



毕永红,男,研究员,博士,博士生导师。中国藻类学会副理事长,中国海洋湖沼学会湖泊分会常务理事。主要从事水域生态学、藻类生理生态学、水体污染修复等方面的研究。先后承担国家级科研任务40余项,包括国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目、国家重点研发计划合成生物学专项、国家水体污染控制与治理科技重大专项等;在 *Environmental Science & Technology*, *Water Research*, *Journal of Hazardous Materials*, *Journal of cleaner production*, *Journal of environmental science* 等期刊发表论文180余篇,h-Index为36;有国家授权发明专利14项,参编(译)专著3部,获湖北省自然科学奖二等奖、上海市技术发明二等奖等。

(责任编辑:陈立)