

水库溶解性有机质的多维解析、环境效应及调控机制研究进展

崔 嵩^{1,2}, 张寅震^{1,2}, 牟天奇^{1,2}, 胡 鹏³

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院; 2. 东北农业大学松花江流域生态环境保护研究中心;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室)

摘要:作为消毒副产物的前体物及重金属的络合剂,溶解性有机质(DOM)对水质安全与生态系统健康具有显著的环境效应。本文综述了水库 DOM 的来源、环境效应及调控机制,梳理了高分辨率质谱与三维荧光光谱等先进分析技术在揭示 DOM 分子多样性及环境行为方面的研究进展,并探讨了多种分析技术联用并耦合随机森林、神经网络等算法解析 DOM 分子指纹,从而精准预测其消毒副产物生成潜能与碳埋藏效率的方法路径。发现水库 DOM 兼具碳汇与碳源功能,其分子结构特征对温室气体排放及碳埋藏效率具有重要影响;水库 DOM 的来源包括陆源输入和内源释放,并受水文调度、氧化还原条件及微生物活动等因素的调控。未来研究中应注重跨学科融合,构建系统化的水库 DOM 数据库以支撑国家“双碳”战略的有效实施。

关键词:水库;溶解性有机质;碳循环;多维解析;调控机制

Research progress in multidimensional characterization, environmental effects and regulatory mechanisms of reservoir dissolved organic matter//Cui Song^{1,2}, Zhang Yinzen^{1,2}, Mu Tianqi^{1,2}, Hu Peng³ (1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University; 2. Research Center for Eco-Environment Protection of Songhua River Basin, Northeast Agricultural University; 3. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM), as a precursor of disinfection by-products and a complexing agent for heavy metals, has significant environmental effects on water quality safety and ecosystem health. This article reviews the sources, environmental effects, and regulatory mechanisms of DOM in reservoirs, outlines the research progress of advanced analytical techniques such as high-resolution mass spectrometry and three-dimensional fluorescence spectroscopy in revealing the molecular diversity and environmental behavior of DOM, and explores the methodological approaches for accurately predicting the potential for disinfection byproduct formation and carbon sequestration efficiency by integrating multiple analytical techniques with algorithms, such as random forests and neural networks to decipher DOM molecular fingerprints. It has been discovered that DOM in reservoirs serves as both a carbon sink and a carbon source, and its molecular structural characteristics have a significant impact on greenhouse gas emissions and carbon sequestration efficiency. The sources of DOM in reservoirs include terrestrial inputs and endogenous releases, and are regulated by hydrological regulation, redox conditions, and microbial activity. Future work should emphasize interdisciplinary integration and the development of a systematic reservoir DOM database to support the effective implementation of the national “dual carbon” strategy.

Key words: reservoir; dissolved organic matter; carbon cycle; multidimensional characterization; regulatory mechanisms

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是一种化学组分复杂的混合物,包含腐殖质、蛋白质、碳水化合物等多种组分,其分子的多样性与环境功能密切相关^[1]。在水库生态系统中,DOM 作为高度活跃的碳载体,其动态变化对水质特征、生物地球

化学循环乃至全球碳循环均具有深远影响。然而,DOM 在水库系统中究竟是碳汇还是碳源,至今尚无定论。一方面,DOM 可通过光化学降解与微生物代谢释放出 CO₂ 与 CH₄,成为温室气体的潜在来源^[2-3];另一方面,DOM 与铁铝氧化物等矿物的共沉

基金项目:黑龙江省杰出青年基金项目(JQ2023E001);流域水循环与水安全全国重点实验室自主研究课题项目(WR110146B0022024)

作者简介:崔嵩(1981—),男,教授,博士,主要从事农业水土资源环境效应研究。E-mail:cuisong-bq@neau.edu.cn

通信作者:胡鹏(1985—),男,正高级工程师,博士,主要从事生态水文与生态水力学研究。E-mail:hp5426@126.com

淀过程可通过化学键合形成矿物结合态有机碳促进碳的埋藏,从而形成长期碳汇^[4]。值得注意的是,陆源腐殖质与水体 CO₂ 之间的耦合关系不仅源于有机质的降解过程,还可能受到共同的陆生驱动因素影响,这为碳循环研究提供了新的视角^[5]。近年来,随着傅里叶变换离子回旋共振质谱(Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry, FT-ICR MS)等高分辨率分析技术的重大突破,DOM 的分子多样性及其环境效应逐步被揭示^[6]。研究人员已利用该技术成功解析了丹江口水库 DOM 的分子特征,为深入理解不同生态系统中 DOM 的分子结构特征提供了重要的理论依据^[6]。因此,从多维视角解析 DOM 的行为机制,有助于厘清其在碳循环中的作用,凸显其在实现碳达峰碳中和(以下简称“双碳”)战略目标中的关键科学意义。

全球范围内大规模建设的梯级水库改变了 DOM 的迁移路径及其存在形态。水文调度引起的水位频繁波动延长了 DOM 在水库中的停留时间^[7],促进了厌氧条件下难降解组分的累积^[8],并加速了表层水体的光化学降解进程^[9-10]。同时,湍流过程显著提升了 DOM 的生物地球化学循环速率,导致内源贡献凸显^[11]。气候变化与人类活动的叠加效应进一步加剧了 DOM 组成的复杂性;极端降雨事件会向水库中输入大量的陆源腐殖质^[12-13],而水温升高则可能激活沉积物与水界面间的内源释放过程^[14],从而形成外源-内源相互作用的动态模式^[15]。水库 DOM 以内源性组分为主,其中疏水性成分是消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)的重要前体物。这些成分的分子特性,如芳香度和分子量,直接影响 DBPs 的生成量,进而增加饮用水处理过程中的健康风险^[16-17]。此外,DOM 与颗粒态有机质(particulate organic matter, POM)之间的相互转化过程以及光诱导活性氧的生成机制,也进一步加剧了生态风险的不确定性^[18]。

机器学习等相关技术的兴起正在推动 DOM 研究范式的革新。以三维荧光光谱(excitation-emission-matrix spectra, EEMs)与紫外-可见吸收光谱(UV-Vis)为代表的多技术联用方法,已成为表征 DOM 光学特性及分子组成的主要手段。通过高分辨率质谱技术解析得到的 DOM 分子指纹,结合同位素示踪技术(如 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC、 $\delta^{15}\text{N}$ -DON),可有效追踪碳氮循环路径^[3]。在此基础上,融合多源数据的机器学习模型将有助于构建水库 DOM 全面认知体系^[19]。同时,通过优化生态缓冲带设计减少陆源输入以及构建人工湿地靶向去除 DBPs 前体物等新型控制策略正日益受到广泛关注。

尽管针对 DOM 分子特性及其环境行为进行了大量研究,但仍存在以下不足:DOM 分子特性与其环境行为之间的关系尚不明确^[20-21],如氧化还原与微生物协同作用下,高芳香性组分对重金属的络合能力仍有待阐明^[12];关于跨尺度耦合机制的研究较为匮乏,目前在分子层面(如 FT-ICR MS 数据)与生态系统尺度(如碳通量模型)之间缺少有效的衔接机制^[10]。基于“来源-过程-效应-调控”研究框架,本文突破传统单一学科的研究局限,从环境科学、水文学和人工智能等多学科交叉视角出发,系统梳理并总结水库 DOM 的调控机制,以为水库智慧化管理提供理论支撑。

1 水库 DOM 的组成特征与分析方法

1.1 DOM 的多维化学组成特征

DOM 的化学多样性体现在其高度复杂的组分结构上。作为 DOM 的主要组分,腐殖质包含以芳香结构为主的腐殖酸和富里酸,具有氧化还原性质,在重金属迁移以及碳循环过程中起着极为关键的作用^[22]。而蛋白质和碳水化合物主要源自微生物代谢和藻类活动,其生物可利用性与水体营养状态密切相关^[23-24]。表征技术的突破深化了对 DOM 的认知,以 EEMs 结合平行因子分析(PARAFAC)技术为例,该技术能够有效区分陆源(呈现类腐殖酸荧光峰)与内源(呈现类蛋白质峰)DOM 的指纹特征^[25],并可追踪暴雨事件中外源 DOM 输入的脉冲式增长过程^[26]。FT-ICR MS^[27]、EEMs^[28]、UV-Vis^[26]技术、原位传感网络及同位素示踪技术^[29]的突破性进展(表 1)^[30-36],显著提升了 DOM 分子特征及动态变化过程的解析能力,并推动了认知从黑箱模型向分子机制的跨越^[37]。在分子水平表征技术方面,FT-ICR MS 技术的应用精准揭示了 DOM 中包括脂质、木质素衍生物以及缩合芳香化合物等数千种不同的分子式^[27,38],并可结合分子量分布与双键当量(double bond equivalent, DBE)参数进一步分析 DOM 的光反应活性和微生物代谢偏好^[39]。紫外-可见光传感器网络等原位监测技术实现了对 DOM 动态变化的实时监测^[30],结合高频水文数据还能够深入剖析水位波动对 DOM 中氧化还原敏感组分迁移转化过程的调控机制^[4,40]。多技术联用已经成为当前 DOM 研究的重要方向,其核心优势在于实现不同分析技术间的互补。单一技术通常仅能解析 DOM 的某一维度特征,而多种技术联用则有助于构建更为系统的认知框架。例如,EEMs 结合 PARAFAC 可有效识别 DOM 的荧光组分,揭示其来源和光学性质;稳定同位素示踪技术能够解析碳、氮等元素的生物地球

表 1 多技术联用的水环境 DOM 研究案例
Table 1 Cases of multi-technique combined research on DOM

联用技术	研究区	研究内容	参考文献
UV-Vis、EEMs、PARAFAC	中国云贵高原湖泊	CDOM 吸光与荧光特征及其组成和来源	[30]
EEMs、FT-ICR MS	中国安徽某水库	DOM 的来源、组分特征及空间分布差异	[31]
EEMs、PARAFAC	西班牙索尔水库	DOM 来源解析	[32]
EEMs、 $\delta^{13}\text{C}$ 、生物标志物	中国三峡水库支流	藻华暴发期 DOM 含量、组成及来源分析	[33]
EEMs、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$	韩国米湖河	季风前期、季风暴雨期和季风后期 DOM 来源与变化	[34]
EEMs、FT-ICR MS	中国鄱阳湖	DOM 光学性质和分子特征的水文变化和空间变化	[35]
UV-Vis、EEMs、PARAFAC	美国珀尔河	DOM 来源和性质的季节变化	[36]

化学循环路径;原位传感器网络则可获取 DOM 浓度与光学性质的高频动态数据。通过整合来自不同维度的信息,研究者能够更全面地阐释 DOM 的组成、来源、转化过程及其生态环境效应,从而推动对 DOM 环境行为与功能的深入理解。在丹江口水库的研究中通过 FT-ICR MS 与核磁共振(NMR)技术^[41]联用,发现铁氧化物会引起 DOM 分子的分馏现象,小分子羧酸优先吸附导致芳香化合物保留在水相,显著影响重金属的络合迁移^[6]。环境胁迫的影响同样被揭示,研究表明,在低水文连通性地区,DOM 表现出芳香性降低与高不饱和化合物增加的特点,验证了环境条件对分子组成的塑造作用^[42]。通过同位素联用技术(如 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 和 $\delta^{15}\text{N}$ -DON)溯源碳氮循环路径,华南闸控河流暴雨事件中 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负,证实了陆源 DOM 脉冲式输入对水库碳汇功能的冲击^[43]。

1.2 分析方法的技术突破与整合

在分析方法创新方面,多模态数据融合与智能算法的运用已成为关键趋势。相关性分析揭示了 DOM 组成与土地利用类型、水环境化学等因素的联系^[19],机器学习模型如随机森林、神经网络等通过整合 EEMs 数据、质谱数据以及环境参数,成功预测了 DOM 的 DBPs 生成潜能^[44],并识别 SUVA₂₅₄ 为关键预测指标^[45]。基于数字孪生技术建立的水库 DOM 动态模型^[46],结合水文-生物地球化学过程^[47],可模拟不同调度情景下溶解性有机碳(DOC)埋藏效率,为碳中和目标的实现提供了有力的决策支撑^[48]。

机器学习与 FT-ICR MS 的深度耦合正推动水库 DOM 研究迈入新阶段,该方法的核心在于利用 FT-ICR MS 所提供的超高分辨率分子指纹信息作为机器学习算法的输入特征。FT-ICR MS 凭借其高达百万级的分辨率能力,能够依据离子在超高真空环境中的回旋共振频率精准反演其质荷比,进而解析出数千种 DOM 分子式,系统揭示其在分子层面的化学多样性组成^[27,37]。在此基础上,机器学习算法能够从海量、高维的质谱数据中自动挖掘潜在模式,

构建分类或预测模型^[19]。两者的结合不仅深化了对 DOM 分子组成结构的基本认知,更显著增强了对 DOM 环境行为与生态功能的预测能力,推动 DOM 研究从描述性分析向机制解析与预测预警拓展。

近期研究表明,深入解读 DOM 的化学生物交互作用至关重要。宏基因组学证实特定微生物群落(如变形菌门)的基因丰度跟木质素衍生物降解呈正相关,其分泌的胞外酶可重塑 DOM 分子结构^[49]。分层水库中,联合单细胞拉曼光谱和稳定同位素探针技术发现,厌氧层微生物会优先利用含硫的 DOM 组分,并释放出 CH₄ 的前体物^[50]。这些研究成果推动了 DOM 研究从单纯的组成描述向机制解析方向深入拓展。

2 水库 DOM 的源-汇动态与驱动机制

2.1 水库 DOM 的多维源-汇传输路径

作为陆地与水生生态系统的连接枢纽,水库 DOM 的输入路径呈复杂多维性特征(图 1)。陆源输入受土地利用变化主导,农业区大量施肥和森林砍伐会显著增加腐殖酸类 DOM 的输入量^[51]。而在城市化区域,生活污水及工业废水排放同样会增加含有蛋白质和脂类成分 DOM 的输入^[52]。内源释放则表现为厌氧环境下沉积物与水体界面物质的交换过程,微生物分解有机质释放出高芳香性 DOM^[53];同时,Fe、Mn 等金属离子发生氧化还原反应促进 DOM 絮凝沉降与再悬浮,驱动其垂向迁移^[54]。此外,藻类产生的 DOM 还呈现出显著的季节性变化规律^[55],夏季水体分层,藻类大量繁殖产生易分解且富含氮元素的 DOM;冬季水体混合,低温环境抑制了藻类的生长及代谢,DOM 来源转向陆源输入^[13]。

水库 DOM 的迁移转化过程涉及复杂的多相耦合机制。光化学降解会选择性去除紫外敏感组分(如多环芳烃类物质)^[56],长日照时间显著降低高纬度水库 DOM 分子量,并生成大量低分子量光降解产物作为微生物代谢的优先底物^[57]。微生物通过

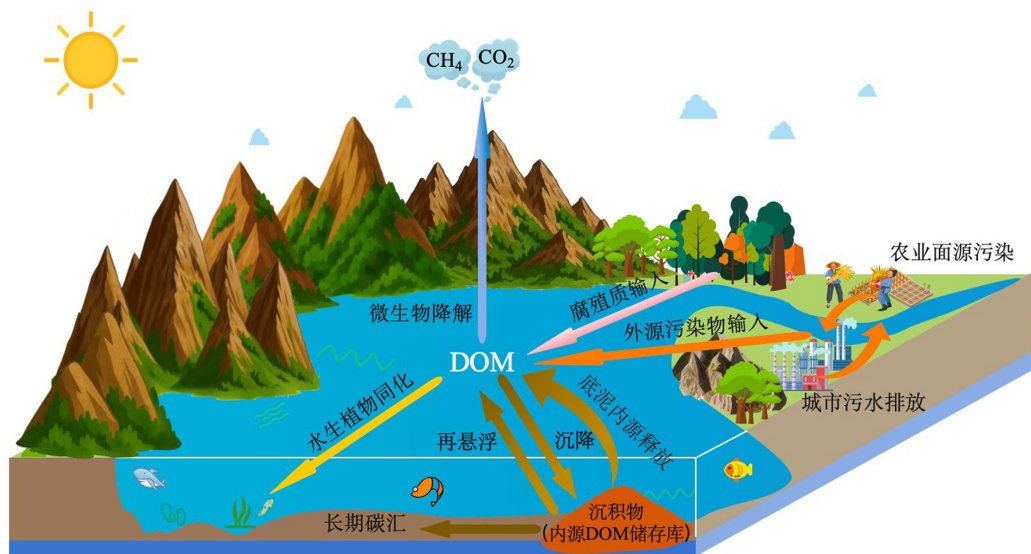


图 1 水库 DOM 的源-汇动态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of source-sink dynamics of reservoir DOM

功能基因共表达网络驱动碳重构。例如产甲烷菌利用乙酸类前体会显著提升 CH_4 排放的潜力^[58],而硝化菌群的活动则促进 DOM 氮组分的形态转化^[59]。金属离子介导的絮凝沉降在水库滞水区尤为突出^[60],其中铁铝氢氧化物对疏水性 DOM 的吸附效率可达 60%~80%^[61]。这种“生物地球化学滤网”效应能够显著调控 DOM 的分子组成与碳埋藏效率。

2.2 关键驱动因子的协同作用机制

水文调度、氧化还原条件以及微生物与矿物的界面作用是调控水库 DOM 源-汇动态的关键要素。水文调度通过改变水位波动幅度和水体滞留时间影响 DOM 的归趋。高水位运行通过延长水体滞留时长,促进微生物降解与光化学反应^[62],但水体分层的加剧导致底层厌氧区 DOM 累积^[8],而频繁的水位调节可促使沉积物再悬浮以增加内源 DOM 释放^[63]。氧化还原条件直接决定 DOM 的代谢途径,在分层水库的温跃层以下,硫酸盐还原菌以 DOM 作为电子供体,将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ^[64],生成的高反应活性硫代 DOM 中间体通过与重金属离子结合影响其生物有效性^[65]。微生物与矿物之间的协同作用则通过界面化学反应改变 DOM 的分子组成^[66],在厌氧条件下铁氧化物发生还原溶解,释放出矿物结合态 DOM,同时产生的 Fe^{2+} 可催化 DOM 发生芬顿反应,生成羟基自由基,加速难以降解的 DOM 分解转化^[67]。

在研究方法上,FT-ICR MS 与机器学习算法的融合为精准解析 DOM 的分子组成和转化路径提供了有力支撑^[37]。通过建立 DOM 分子式(如 CHO、CHON 类化合物)与水文参数的关联模型,可以定量推断不同水文调度情景下 DOM 的演化趋势^[68]。

稳定同位素探针技术(如 $\delta^{13}\text{C}$ -DNA-SIP)能够追踪特定 DOM 组分在微生物群落中的利用情况,为深入探究功能微生物在碳循环中的功能冗余性提供了支持^[69]。

3 水库 DOM 的环境效应

水库 DOM 紧密关联多个生态过程(图 2),直接影响水质安全以及生态系统健康,并在碳循环中起着关键作用,进而影响区域乃至全球的气候变化^[63]。高分辨率分析技术以及多学科交叉研究的突破,推动了对 DOM 环境行为及驱动机制的认知正从宏观现象描述向分子水平发展,为全面理解 DOM 的生态功能提供了全新视角^[70]。

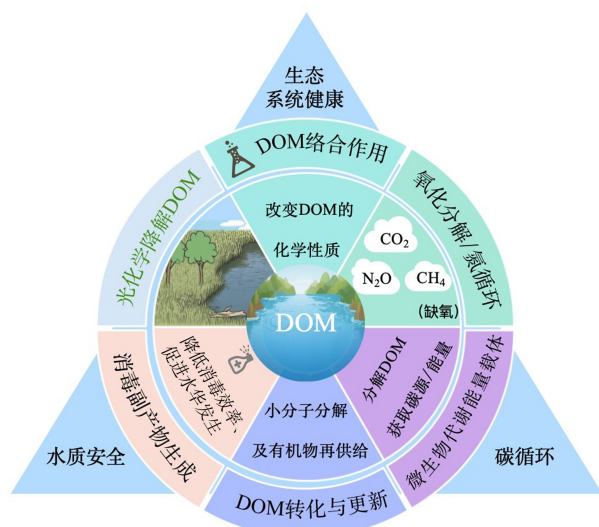


图 2 水库 DOM 的环境效应

Fig. 2 Environmental effects of reservoir DOM

3.1 DOM 对水质安全的影响机制

DOM 是 DBPs 的主要前体物,其分子特性显著

影响氯化消毒过程中三卤甲烷 (THMs)、卤乙酸 (HAAs) 等致癌物质的生成量^[71]。Wang 等^[72]的研究表明,水库 DOM 中类腐殖酸组分的芳香性指数 (SUVA₂₅₄) 和 DBPs 生成潜力呈显著正相关关系,而类蛋白质组分会促进含氮 DBPs (如亚硝胺) 的生成并增加人体健康的潜在风险^[73]。例如,高原喀斯特水库疏水性 DOM 对 DBPs 生成潜力的贡献高达 94.5%,其中类胡敏酸组分的卤代活性尤为突出^[16]。DOM 还通过配位作用影响重金属在水体中的迁移特性,腐殖质中的羧基和酚羟基可增强铜、铅等金属的络合能力^[74];富里酸等小分子 DOM 则通过竞争吸附作用促使沉积物释放砷、镉等重金属,引发沉积物-水界面的二次污染^[75]。值得注意的是,新污染物 (如抗生素、微塑料) 与 DOM 的共同迁移现象进一步加剧了水体复合污染的危害^[76]。DOM 通过溶解性遗传物质与微生物膜的直接接触,显著增强了抗生素抗性基因 (ARGs) 在微生物间的水平转移效率^[77]。

3.2 DOM 驱动的生态过程与微生物响应

水生生态系统中,DOM 是重要的能量载体,其多样的化学组成显著影响着微生物代谢网络与食物网结构。FT-ICR MS 分析发现,水库 DOM 中的脂类和糖类组分更容易被变形菌门 (Proteobacteria) 微生物利用^[78];而芳香族化合物则与放线菌门 (Actinobacteria) 中的降解功能基因 (例如加氧酶编码基因) 密切相关^[79]。这种特定的代谢途径会产生 DOM 激发效应,当活性 DOM (如藻源碳水化合物) 进入水体后,可以提高惰性 DOM (如陆源木质素) 的矿化速度^[80],使水库沉积物内碳的周转效率增长 30%~50%^[81]。在富营养化水库中,DOM 经光降解产生的低分子有机酸可刺激蓝藻释放藻毒素^[82],进而改变浮游动物群落结构,引起“DOM-藻华-食物网”的一系列反应^[83]。此外,DOM 的氧化还原特性同样显著影响氮循环过程:厌氧条件下,DOM 可作为电子供体驱动反硝化作用^[84];在分层水库温跃层,类腐殖质组分可通过介导铁锰氧化物的还原活动,提高氨氧化菌的活性,导致 N₂O 间歇性出现大量排放^[85]。

3.3 DOM 在碳循环中的源-汇平衡机制

DOM 在全球碳循环中具有关键作用,但其主导功能究竟为碳汇还是碳源仍存在争议。这一根本分歧源于 DOM 的激发效应与其埋藏效率之间的动态平衡关系。作为碳源,DOM 可通过微生物矿化分解与光化学降解途径生产 CO₂ 和 CH₄,成为温室气体排放的重要来源^[2,56]。热带水库因温度较高,DOM 矿化速率显著增强,常表现为净碳源,其 CO₂ 通量

通常为 50~200 g/(m²·a) (以碳含量计),极端情况下可达 300 g/(m²·a)^[86-87]。作为碳汇,DOM 的固碳机制主要包括两方面:一是通过物理-化学保护作用形成稳定的矿物结合态有机碳^[4,61];二是在低温缺氧环境中其降解受到抑制,从而实现短期高效埋藏^[88-89]。例如,寒温带水库因漫长冰封期的低温和缺氧条件,有效延缓了有机碳的分解^[88]。高纬度泥炭地水库在冰封缺氧阶段短期碳埋藏效率可达到 40%~60%^[89],但受融冰期沉积物再悬浮等因素影响,全球多数寒温带水库全年碳埋藏效率普遍低于 30%^[90-91]。此外,Fe³⁺、Al³⁺ 等金属离子可促使 DOM 絮凝,使 30%~70% 的有机碳稳定富集于沉积物中,其中与矿物表面形成共价键的难降解组分半衰期甚至超过千年^[92]。DOM 的分子特性对温室气体排放呈现双重调控作用:芳香族化合物 (如多酚类物质) 可以抑制产甲烷古菌辅酶 F₄₂₀ 的活性,进而减少 CH₄ 的排放^[93];而脂类组分作为产乙酸菌的底物,则通过乙酰辅酶 A (Acetyl-CoA) 促进 CH₄ 的排放^[94-95]。在气候变化背景下,极端降雨等水文扰动会改变 DOM 输入量与滞留时间,可能导致水库由碳汇向短期强碳源转变^[96]。因此,揭示该转变的关键阈值与响应机制,特别是从 DOM 分子特性出发,解析其经由微生物代谢与物理化学过程最终调控净碳汇/源效应的内在路径,已成为当前研究的核心议题。

4 水库 DOM 的调控策略与技术

4.1 水库 DOM 的多尺度调控策略

水库 DOM 调控是一项复杂的系统工程,需进行“源头-过程-末端”全链条协同调控,通过生态修复、工程干预与智能技术融合实现多目标协同优化,近年来研究重点已从单一组分去除转向 DOM 分子特性及其生态功能的精准调控。水库 DOM 调控机制的核心在于通过人为干预影响 DOM 的来源输入、迁移转化路径及环境效应,其成效依赖于对关键驱动过程的靶向调节^[4]。在具体调控策略中,常用手段包括环境因子调控、功能材料投加与工艺参数优化等方法;输入参数通常涵盖水文气象数据、水质指标、DOM 分子组成特征及微生物群落结构等信息;目标函数多设定为最小化有害副产物生成或最大化碳埋藏等有益功能;约束条件则涉及工程经济成本、生态风险评估、技术可行性、气候变化不确定性等多重因素^[40]。例如,悬浮颗粒物可以通过吸附-共沉淀作用选择性去除芳香性 DOM 组分,并调节微生物代谢途径,从而有效降低 CH₄ 排放通量^[63]。

源头调控方面应聚焦流域尺度,以降低 DOM

通量并优化其组成为目标。研究人员致力于通过多技术联用降低 DBPs 生成潜力、抑制温室气体排放并提高碳埋藏效率^[97]。基于机器学习构建的土地利用 DOM 输移模型,如 SWAT-DOM 耦合框架,可以精准量化农业面源、城市径流等输入源对 DOM 的贡献率,为精准截污提供了科学依据^[98-99]。优化生态缓冲带设计需充分考虑植物根系分泌物的特性,例如香蒲、芦苇等湿地植物根系分泌的有机酸既能促进 DOM 的生物降解,又能固定陆源输入的高分子量腐殖质^[100]。针对水库 DOM 的迁移转化过程需采取干预措施,如曝气增氧技术可通过改变水体的氧化还原条件调控微生物的代谢途径^[101]。微生物群落结构显著影响 DOM 的化学多样性,例如浮游细菌群落通过代谢网络调控 DOM 分子组成,其 β 多样性指数与 DOM 分子特征参数(如氢碳比、不饱和度等)显著相关^[27]。在分层水库中,当底层水体的溶解氧质量浓度达到 1.5~2 mg/L 时,甲烷氧化菌(*Methylocystis*)的丰度会增加 2~3 倍,抑制 CH₄ 的排放^[102]。人工湿地的设计正朝着功能分区化的方向发展,在反硝化区用植物根系分泌物引发共代谢作用以加速蛋白质类 DOM 的降解速率^[103];在深度处理区,铁基填料介导的芬顿反应可以定向去除难以降解的芳香族化合物^[104]。例如,在丹江口水库的研究中,通过优化生态缓冲带成功固定腐殖质类 DOM,显著降低了 DBPs 的生成风险^[6]。微生物生态学在水库 DOM 调控中扮演着重要角色。DOM 的生物降解是其环境归趋的关键环节,特定功能微生物(如变形菌门、放线菌门)通过编码胞外酶直接作用于 DOM 分子结构,驱动其转化与矿化过程^[49,105]。研究表明,微生物群落的组成结构及其功能基因丰度与 DOM 的分子特性密切相关,两者共

同决定了 DOM 的生物可利用性、降解路径及最终产物^[78,106]。因此,未来 DOM 调控策略应更深入地聚焦微生物群落的定向构建与功能调控。例如,可通过生物刺激或生物强化等手段,优化微生物群落结构,靶向提升难降解 DOM 组分的生物转化效率,或抑制产甲烷菌活性以减少 CH₄ 排放^[58,102]。将微生物生态机制深度融入 DOM 调控体系,将显著增强调控策略的精准性与生态可持续性。

4.2 水库 DOM 靶向去除与智能调控技术

功能材料的研发积极推动了 DOM 靶向去除技术的发展(表 2)。金属有机框架材料(MOFs),如 MIL-101(Cr),通过孔径筛选与配位协同作用能高效吸附富里酸、卤代苯酚等典型三卤甲烷前体物^[107]。生物电化学系统通过电极驱动的氧化还原反应促进难降解 DOM 的转化^[108]。相关研究表明,定向富集阴极功能微生物群落结合阳极电势调控,可显著提高氯代副产物前体物的去除率^[109]。FT-ICR MS 与神经网络联用技术能够剖析 DOM 分子式与环境行为之间的定量关系为精准调控提供了分子层面的解析^[110]。应用数字孪生技术实现了动态调控,基于机器学习构建的 DOM-Cl 反应模型可以实时预测 DBPs 的生成风险,为水库调度与水厂工艺参数的协同优化提供了依据^[111]。

5 研究挑战与建议

5.1 研究挑战

a. DOM 研究的核心挑战。DOM 作为水生态系统中的关键组成部分,其复杂的分子构成和动态变化显著影响着水环境的生态功能。当前研究在建立 DOM 分子特性与环境行为之间的定量关系方面仍面临诸多挑战,尤其在深入研究不同来源 DOM 的

表 2 水库 DOM 去除技术分类

Table 2 Classification of reservoir DOM remove technologies

技术类型	应用场景	具体措施	效果
物理吸附	生态缓冲带	优化设计,利用植物根系分泌物吸附 DOM	减少芳香性 DOM 组分,降低 DBPs 风险
	悬浮颗粒物	吸附共沉淀芳香性 DOM 组分	减少 CH ₄ 排放,调节微生物代谢途径
	湿地植物	利用根系分泌物推动 DOM 生物降解	截留高分子量腐殖质,减少 DOM 输入
化学氧化	曝气增氧技术	曝气改变水体氧化还原条件	抑制 CH ₄ 排放,促进 DOM 降解
	光化学降解	光解去除紫外敏感组分	减少难降解 DOM,促进微生物代谢
	铁基填料	在人工湿地深度处理区使用	定向去除难降解芳香族化合物
生物降解	人工湿地	分区化设计,植物和微生物协同降解 DOM	提高碳埋藏效率,减少污染物迁移
	微生物群落调控	调控浮游细菌群落	提高 DOM 降解效率,影响代谢网络
	浮游细菌群落	代谢网络调控 DOM 分子组成	调节 DOM 化学多样性,优化碳循环
功能材料	水库水体	使用 MOFs 吸附三卤甲烷前体物	高效去除有害 DOM 前体物
	生物电化学体系	电极驱动氧化还原反应转化 DOM	提高难降解 DOM 转化效率
	金属氧化物	催化芬顿反应降解 DOM	提高 DOM 降解效率,减少污染物
数字孪生技术	水库调度	机器学习模型预测 DBPs 生成风险	指导水厂工艺参数动态调整
	水库监测	结合原位传感网络和高频水文数据监测 DOM 动态	解析水位波动对 DOM 迁移转化的影响
	水库管理	多源数据模型模拟 DOC 埋藏效率	支撑碳中和决策

特有分子特性以及如何调控其在水体中的迁移转化过程中。此外,DOM 在分子尺度的活动如何影响生态系统层面的微生物代谢、营养物质循环以及温室气体排放等关键问题,同样亟须多学科协同研究。同时,对于微生物介导的 DOM 降解与转化的分子机制、微生物-DOM 相互作用的动态过程以及 DOM 激发效应如何反馈于微生物群落结构与功能演变等核心问题,也亟待系统性与机制性地研究探索。

b. 分析技术与模型构建的技术瓶颈。现有分析技术在复杂水体基质中超痕量 DOM 组分的检测仍存在明显局限。尽管 FT-ICR MS 和同位素示踪技术已广泛应用于 DOM 分析,但在复杂水体的实际检测中,基质干扰和灵敏度不足的问题仍然突出。未来研究需开发更精准的检测技术,如结合人工智能算法优化光谱分析方法,以此提高 DOM 组分检测的精度和工作效率。DOM 耦合模型的验证及优化同样面临挑战,现有模型难以全面、准确地反映出 DOM 在不同环境条件下的动态变化。同时,需结合大数据分析手段构建更完善的多过程耦合模型,更真实地模拟 DOM 在复杂水体中的行为及生态效应。

c. 新污染物与 DOM 的相互作用。随着微塑料、药物残留物等新污染物在水体中被广泛检出,其与 DOM 之间的相互作用机制已成为研究热点。已有研究表明,这些新污染物可与 DOM 结合生成复合物,从而改变其迁移转化行为和生态效应。新污染物与 DOM 互作机制方面的研究处于起步阶段,尤其是在分子层面阐明其作用机制及对水环境的影响仍需开展系统性研究。后续的研究可通过人工智能技术开发针对 DOM 动态行为的预测预警系统以及基于机器学习算法的预测模型,结合遥感技术与现场监测数据,可实现水库 DOM 时空分布的动态监测与实时预警,为水库水质管理和污染防控提供科学的决策依据。

5.2 建议

a. 建立统一规范的水库 DOM 数据库。当前全球性 DOM 数据库的缺失已成为制约深入开展跨区域研究的关键因素,亟须建立统一规范的水库 DOM 数据库,系统整合其分子组成、来源及环境效应等多维数据,并建立标准化的数据采集与质控流程、存储架构与共享机制,从而确保数据的可比性与可靠性,为全球及区域尺度水库碳核算提供科学依据。在此基础上,制定科学合理的水库 DOM 管理策略对于优化水库调度、减少温室气体排放及保障水质安全具有重要实践意义。同时,应加快建立以“双碳”目标为导向的 DOC 管理标准体系,明确不同气候带与水文特征的水库 DOC 埋藏效率目标阈值及温室气

体排放控制标准,为推进水库智慧化管理提供技术依据。这些工作的推进将有效促进水库 DOM 管理从经验判断向精准调控的范式转变,实现生态效益与碳减排目标的协同提升。

b. 多学科领域融合研究。为系统推进水库 DOM 研究,应坚持以跨学科融合为核心路径,有机整合环境科学、水文学、微生物生态学及人工智能等多学科领域的理论方法和技术手段。通过建立联合实验室、构建数据共享平台、推行标准化分析方法等协同机制,深度解析 DOM 分子特性与环境行为之间的定量关系,有效突破当前在理论认知与技术方法上面临的瓶颈。未来可开展以下方面工作:一是开发高效的检测及调控技术,提升 DOM 管理的精度与效能;二是探究 DOM 分子特性在生态功能中的作用阈值;三是明确 DOM 与新污染物的拮抗和协同作用机理及其动态调控机制;四是构建全球协作网络,促进水库 DOM 研究的标准化与数据共享。通过构建系统认知体系、研发智能监测技术、制定管理规范,为全球水库碳核算、水质安全及生态环境健康提供科学依据,推动实现“双碳”战略目标与“美丽中国”建设愿景。

参考文献:

[1] Tanentzap A J, Fonvielle J A. Chemodiversity in freshwater health: dissolved organic matter may offer a way to track and restore the health of fresh waters[J]. Science, 2024, 383(6690): 1412-1414.

[2] Pearce N J T, Larson J H, Evans M A, et al. Dissolved organic matter transformations in a freshwater river mouth [J]. Biogeochemistry, 2023, 163(3): 245-263.

[3] 吴函鸿,高思佳,刘婷婷,等. 水环境溶解性有机质溯源与表征技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(2): 474-486. (Wu Hanhong, Gao Sijia, Liu Tingting, et al. Research progress on tracing and characterization of dissolved organic matter in water environment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(2): 474-486. (in Chinese))

[4] 韩兰芳,杨妍,孙可. 共沉淀引发的溶解性有机质在水铁矿/水界面的分子分馏特性[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 767-775. (Han Lanfang, Yang Yan, Sun Ke. Co-precipitation triggered molecular fractionation of dissolved organic matter at the ferrihydrite/water interface[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 767-775. (in Chinese))

[5] 张羿,王晗,马永梅,等. 溶解性有机碳耦合营养状态解析河流 CO₂ 动态及驱动因素[J]. 湖泊科学, 2024, 36(3): 794-806. (Zhang Yi, Wang Han, Ma Yongmei, et al. Deciphering riverine CO₂ dynamics and driving factors coupled with dissolved organic carbon and nutrient status

- [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(3): 794-806. (in Chinese))
- [6] 周雅茹, 郝蓉, 伍玉鹏, 等. 丹江口水库土壤和水体溶解性有机质的分子结构特征分析[J]. 分析测试学报, 2023, 42(3): 283-291. (Zhou Yaru, Hao Rong, Wu Yupeng, et al. Molecular structures analysis of dissolved organic matter in soil and water of Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2023, 42(3): 283-291. (in Chinese))
- [7] Yuan Danni, Li Siyue, Ye Chen, et al. Dissolved organic matter (DOM) rather than warming and eutrophication directly affects partial pressure of CO₂ (pCO₂) in mesocosm systems [J]. Water Research, 2024, 267: 122448.
- [8] Meredith K T, Baker A, Andersen M S, et al. Isotopic and chromatographic fingerprinting of the sources of dissolved organic carbon in a shallow coastal aquifer[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(4): 2167-2178.
- [9] 张怡珏, 庞锐, 任源鑫, 等. 不同来源有色溶解性有机物光化学/微生物降解过程[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1550-1561. (Zhang Yixuan, Pang Rui, Ren Yuanxin, et al. Photochemical and microbial alteration of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in aquatic ecosystems associated with different sources [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1550-1561. (in Chinese))
- [10] Xenopoulos M A, Barnes R T, Boodoo K S, et al. How humans alter dissolved organic matter composition in freshwater; relevance for the Earth's biogeochemistry[J]. Biogeochemistry, 2021, 154(2): 323-348.
- [11] 龙靖潇, 王志康, 王晗, 等. 喀斯特湖泊-河流系统溶解性有机质光谱特征[J]. 生态学报, 2024, 44(11): 4584-4596. (Long Jingxiao, Wang Zhikang, Wang Han, et al. Unraveling spectral characteristics of dissolved organic matter in a karst lake-river system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4584-4596. (in Chinese))
- [12] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 等. 水生生态系统中溶解性有机质表生行为与环境效应研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(3): 341-355. (He Wei, Bai Zelin, Li Yilong, et al. Advances in environmental behaviors and effects of dissolved organic matter in aquatic ecosystems [J]. Scientia Sinica Terrae, 2016, 46(3): 341-355. (in Chinese))
- [13] 李丹, 范中亚, 罗千里, 等. 华南中小型闸控入海河流 DOM 特征及藻源影响[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2): 911-922. (Li Dan, Fan Zhongya, Luo Qianli, et al. Characteristics and algal source effect of dissolved organic matter in small and medium-sized gate-controlled seagoing rivers of South China [J]. China Environmental Science, 2024, 44(2): 911-922.
- [14] 王计超, 黄涛, 许丹, 等. 春夏季巢湖湖滨沉积物-水界面磷动态与内源释放潜力[J]. 中国环境科学, 2024, 44(9): 4948-4957. (Wang Jichao, Huang Tao, Xu Dan, et al. Dynamics and endogenous release potential of phosphorus at sediment-water interface in Chaohu lakeshore in spring and summer [J]. China Environmental Science, 2024, 44(9): 4948-4957. (in Chinese))
- [15] Zhou Lei, Zhou Yongqiang, Zhang Yunlin, et al. Hydrological controls on dissolved organic matter composition throughout the aquatic continuum of the watershed of Selin Co, the largest lake on the Tibetan Plateau [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(11): 4668-4678.
- [16] 王志康, 韩月, 苟攀, 等. 阿哈水库 DOM 的分离及其对消毒副产物的贡献[J]. 环境科学研究, 2018, 31(6): 1088-1095. (Wang Zhikang, Han Yue, Gou Pan, et al. The fraction of DOM and their contribution to the disinfection by-products formation; a case study in Aha Reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(6): 1088-1095. (in Chinese))
- [17] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 周村水库汛期暴雨中溶解有机物 (DOM) 的光谱特征及来源解析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 493-506. (Zhou Shilei, Zhang Yiran, Huang Tinglin, et al. Spectral characteristics and sources of rainstorms dissolved organic matter in Zhoucun Reservoir during flood season [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 493-506. (in Chinese))
- [18] Ge Linke, Zheng Jinshuai, Halsall C, et al. Aquatic photo-transformation and enhanced photoinduced toxicity of ionizable tetracycline antibiotics [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2024, 18(11): 139.
- [19] Gad M, Khomami N T S, Krieg R, et al. Environmental drivers of dissolved organic matter composition across central European aquatic systems: a novel correlation-based machine learning and FT-ICR MS approach [J]. Water Research, 2025, 273: 123018.
- [20] Sert M F, Niemann H, Reeves E P, et al. Compositions of dissolved organic matter in the ice-covered waters above the Aurora hydrothermal vent system, Gakkel Ridge, Arctic Ocean [J]. Biogeosciences, 2022, 19(8): 2101-2120.
- [21] Li Xiaolu, Hu Zhen, Guo Minli, et al. Insight into the characterization of dissolved organic matter in shallow lakes with different trophic states and their net photo-generation capacity of reactive oxygen species [J]. Water Research, 2025, 276: 123204.
- [22] 林来昌, 谢蓉蓉, 吴如林, 等. 闽江感潮河段 2018—2020 年枯水期 DOM 图谱及特征参数影响 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2023, 59(4): 639-648. (Lin Laichang, Xie Rongrong, Wu Rulin, et al. Changes of DOM spectrum and characteristic index in the tidal reach of Minjiang River during dry season from 2018 to 2020 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,

- 2023,59(4):639-648. (in Chinese))
- [23] 韦庚锐,宋朝晖,关翔鸿,等. 水体溶解性有机物的性质特征、分析手段与环境效应[J]. 环境工程,2024,42(9):74-90. (Wei Gengrui, Song Zhaohui, Guan Xianghong, et al. Properties, characterization methods, and environmental impacts of dissolved organic matter in aquatic systems[J]. Environmental Engineering,2024,42(9):74-90. (in Chinese))
- [24] 李雨桐,何鑫龙,彭一帆,等. 藻源溶解性有机质对汞甲基化的影响[J]. 浙江农林大学学报,2021,38(2):362-368. (Li Yutong, He Xinlong, Peng Yifan, et al. Influence of algal derived dissolved organic matter on mercury methylation in water[J]. Journal of Zhejiang A&F University,2021,38(2):362-368. (in Chinese))
- [25] 周骅,智国铮. 基于三维荧光光谱和水质特征因子检测技术的排水管网地下水入渗分析研究[J]. 给水排水,2022,48(5):128-133. (Zhou Hua, Zhi Guozheng. Groundwater infiltration analysis of urban drainage networks based on 3D-EEM technology and marker species technology[J]. Water & Wastewater Engineering,2022,48(5):128-133. (in Chinese))
- [26] 刘稜,方逸川,孙孝龙. 基于三维荧光光谱-平行因子分析(EEM-PARAFAC)的有机质研究进展[J]. 净水技术,2022,41(10):7-16. (Liu Leng, Fang Yichuan, Sun Xiaolong. Research progress of organic matter based on three-dimensional fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) [J]. Water Purification Technology,2022,41(10):7-16. (in Chinese))
- [27] Li Wanzhu, Liu Na, Li Jianfeng, et al. Chemodiversity of dissolved organic matter is governed by microbial biogeography in inland waters[J]. Environmental Science & Technology,2023,57(20):7753-7763.
- [28] Yu Jinlan, Xiao Kang, Xue Wenchao, et al. Excitation-emission matrix (EEM) fluorescence spectroscopy for characterization of organic matter in membrane bioreactors: principles, methods and applications [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering,2020,14(2):31.
- [29] Hanson B, Wünsch U, Buckley S, et al. DOM molecular weight fractionation and fluorescence quantum yield assessment using a coupled in-line SEC optical property system[J]. ACS ES & T Water,2022,2(12):2491-2501.
- [30] Yang Xuan, Zhou Yongqiang, Yang Xiaoying, et al. Optical measurements of dissolved organic matter as proxies for COD_{Mn} and BOD₅ in plateau lakes [J]. Environmental Science and Ecotechnology,2024,19:100326.
- [31] 张思宇,岳正波,余智祥,等. 某酸性矿山排水中溶解性有机物的特征分析[J]. 中国环境科学,2020,40(8):3401-3407. (Zhang Siyu, Yue Zhengbo, She Zhixiang, et al. Characteristics analysis of dissolved organic matter in the acid mine drainage[J]. China Environmental Science,
- 2020,40(8):3401-3407. (in Chinese))
- [32] Marcé R, Verdura L, Leung N. Dissolved organic matter spectroscopy reveals a hot spot of organic matter changes at the river-reservoir boundary [J]. Aquatic Sciences, 2021,83(4):67.
- [33] Xiang Rong, Tian Zebin, Zhang Chuandong, et al. Characterization of dissolved organic matter content, composition, and source during spring algal bloom in tributaries of the Three Gorges Reservoir [J]. Science of the Total Environment,2023,879:163139.
- [34] Kim M S, Lim B R, Jeon P, et al. Innovative approach to reveal source contribution of dissolved organic matter in a complex river watershed using end-member mixing analysis based on spectroscopic proxies and multi-isotopes [J]. Water Research,2023,230:119470.
- [35] Xu Lei, Hu Qian, Liu Zetian, et al. Hydrological alteration drives chemistry of dissolved organic matter in the largest freshwater lake of China (Poyang Lake) [J]. Water Research,2024,251:121154.
- [36] Singh S, Dash P, Sankar M S, et al. Hydrological and biogeochemical controls of seasonality in dissolved organic matter delivery to a Blackwater estuary[J]. Estuaries and Coasts,2019,42(2):439-454.
- [37] Qi Yulin, Xie Qiaorong, Wang Junjian, et al. Deciphering dissolved organic matter by Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry (FT-ICR MS): from bulk to fractions and individuals [J]. Carbon Research, 2022, 1(1):3.
- [38] McDowell W H. DOM in the long arc of environmental science: looking back and thinking ahead [J]. Biogeochemistry,2023,164(1):15-27.
- [39] Miranda M L, Osterholz H, Giebel H A, et al. Impact of UV radiation on DOM transformation on molecular level using FT-ICR-MS and PARAFAC [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020,230:118027.
- [40] 陈袁波,邓思宇,余珂,等. 泥炭沼泽湿地土壤分解过程中可溶性有机质氧化还原能力变化特征及其影响机制[J]. 生态学报,2020,40(24):8948-8957. (Chen Yuanbo, Deng Siyu, Yu Ke, et al. Change and influence mechanism of the dissolved organic matter redox capacity during peat bog soil decomposition [J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(24):8948-8957. (in Chinese))
- [41] 蔡阮鸿,郑强,陈晓炜,等. 微型生物碳泵研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2021,60(2):355-366. (Cai Ruanhong, Zheng Qiang, Chen Xiaowei, et al. Research progress on microbial carbon pump[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(2): 355-366. (in Chinese))
- [42] Maurischat P, Seidel M, Dittmar T, et al. Complex dissolved organic matter (DOM) on the roof of the world-

- Tibetan DOM molecular characteristics indicate sources, land use effects, and processing along the fluvial-limnic continuum [J]. *Biogeosciences*, 2023, 20 (14): 3011-3026.
- [43] Zhou Lei, Zhou Yongqiang, Zhang Yunlin, et al. Rainstorm-induced organic matter pulses: a key driver of carbon emissions from inland waters[J]. *The Innovation*, 2025, 6(3): 100746.
- [44] 皇甫小留,王晶瑞,龙鑫隆,等. 机器学习在水处理系统中的应用[J]. *给水排水*, 2022, 58 (11): 153-165. (Huangfu Xiaoliu, Wang Jingrui, Long Xinlong, et al. Application of machine learning in water treatment system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58 (11): 153-165. (in Chinese))
- [45] 崔鹤,刘昆,瞿晓磊. 基于紫外-可见光谱和机器学习方法的溶解性有机质吸附预测模型研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, 57 (3): 356-363. (Cui He, Liu Kun, Qu Xiaolei. Sorption model for dissolved organic matter based on UV-visible spectra and machine learning [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2021, 57(3): 356-363. (in Chinese))
- [46] 崔培,张涛,曾斌,等. 数字孪生水利动态时空数据底板构建研究[J]. *中国水利*, 2025 (2): 52-64. (Cui Pei, Zhang Tao, Zeng Bin, et al. Research on the construction of digital twin water conservancy dynamic spatiotemporal data base plate[J]. *China Water Resources*, 2025(2): 52-64. (in Chinese))
- [47] Wardinski K M, Hotchkiss E R, Jones C N, et al. Water-soluble organic matter from soils at the terrestrial-aquatic interface in wetland-dominated landscapes [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, 127 (9): e2022JG006994.
- [48] Jiao Nianzhi, Luo Tingwei, Chen Quanrui, et al. The microbial carbon pump and climate change [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, 22(7): 408-419.
- [49] Li Jialing, Duan Li, Wu Ying, et al. Unraveling microbe-mediated degradation of lignin and lignin-derived aromatic fragments in the Pearl River Estuary sediments [J]. *Chemosphere*, 2022, 296: 133995.
- [50] Schaible G A, Kohtz A J, Cliff J, et al. Correlative SIP-FISH-Raman-SEM-NanoSIMS links identity, morphology, biochemistry, and physiology of environmental microbes [J]. *ISME Communications*, 2022, 2(1): 52.
- [51] Jin Meiyang, Lee J J, Oh H J, et al. The response of catchment ecosystems in eutrophic agricultural reservoirs to water quality management using DOM fluorescence[J]. *Sustainability*, 2019, 11(24): 7207.
- [52] Lambert T, Perolo P, Escoffier N, et al. Enhanced bioavailability of dissolved organic matter (DOM) in human-disturbed streams in Alpine fluvial networks[J]. *Biogeosciences*, 2022, 19(1): 187-200.
- [53] Ni Zhaokui, Huang Dongling, Wu Yue, et al. Intrinsic linkage mechanisms of DOM properties to organic phosphorus in lake sediments: evidence from coupled molecular weight ultrafiltration and spectral analysis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 459: 141496.
- [54] Loginova A N, Dale A W, Le Moigne F A C, et al. Sediment release of dissolved organic matter to the oxygen minimum zone off Peru [J]. *Biogeosciences*, 2020, 17 (18): 4663-4679.
- [55] Johnes P J, Evershed R P, Jones D L, et al. Exploring the nature, origins and ecological significance of dissolved organic matter in freshwaters: state of the science and new directions[J]. *Biogeochemistry*, 2023, 164(1): 1-12.
- [56] 刘璐,栾日坚,沈秋岑,等. 新污染物在含溶解有机物水体中光降解行为研究进展[J]. *环境化学*, 2024, 43 (5): 1429-1444. (Liu Lu, Luan Rijian, Shen Qiucen, et al. Research progress on photodegradation behavior of emerging pollutants in water containing dissolved organic matter[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(5): 1429-1444. (in Chinese))
- [57] 魏子卓,李娜,晏明全,等. 南水北调中线清河溶解性有机物的光降解行为[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(11): 3568-3576. (Wei Zizhuo, Li Na, Yan Mingquan, et al. Photodegradation behavior of dissolved organic matter in Qinghe River of middle route of south-to-north water diversion project [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(11): 3568-3576. (in Chinese))
- [58] 韩燕云,吴永红,李丹,等. 微生物介导的稻田水土界面温室气体排放及其农事减排措施研究进展[J]. *环境科学研究*, 2023, 36 (12): 2369-2381. (Han Yanyun, Wu Yonghong, Li Dan, et al. Advancements in research on microbe-mediated greenhouse gas emissions at the rice paddy soil-water interface and agricultural mitigation strategies[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(12): 2369-2381. (in Chinese))
- [59] Liu Qian, Chen Yuhao, Xu Xuewei. Genomic insight into strategy, interaction and evolution of nitrifiers in metabolizing key labile-dissolved organic nitrogen in different environmental niches [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1273211.
- [60] Chen Kaiyue, Liu Yuting, Hung J T, et al. Synergism of Fe and Al salts for the coagulation of dissolved organic matter: structural developments of Fe/Al-organic matter associations[J]. *Chemosphere*, 2023, 316: 137737.
- [61] 文帅龙,刘静静,戴家如,等. 铁(氢)氧化物介导的溶解性有机质、无机磷的固定及相互作用研究进展[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(5): 1428-1440. (Wen Shuailong, Liu Jingjing, Dai Jiaru, et al. Iron (hydr) oxides mediated immobilization and interaction of dissolved organic matter and inorganic phosphate: a review [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(5): 1428-1440. (in Chinese))

- [62] Broder T, Knorr K H, Biester H. Changes in dissolved organic matter quality in a peatland and forest headwater stream as a function of seasonality and hydrologic conditions [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 2035-2051.
- [63] 董浪生, 张洪刚, 刘凡, 等. 利用悬浮颗粒物调控天然水体溶解性有机质特征及其环境效应 [J]. *环境工程学报*, 2024, 18(12): 3454-3466. (Dong Langsheng, Zhang Honggang, Liu Fan, et al. Regulation of dissolved organic matter characteristics and related environmental effects in natural water bodies using suspended particulate matter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(12): 3454-3466. (in Chinese))
- [64] Newsome L, Falagán C. The microbiology of metal mine waste: bioremediation applications and implications for planetary health [J]. *GeoHealth*, 2021, 5(10): e2020GH000380.
- [65] 王亚鑫, 吴玉, 张洪琳, 等. 微生物硫代谢及其驱动下建立的生物生态关系 [J]. *微生物学报*, 2022, 62(3): 930-948. (Wang Yaxin, Wu Yu, Zhang Honglin, et al. Microbial sulfur metabolism and the bioecological relationships driven by sulfur metabolism [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(3): 930-948. (in Chinese))
- [66] Kleber M, Bourg I C, Coward E K, et al. Dynamic interactions at the mineral: organic matter interface [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(6): 402-421.
- [67] Xiao Yihua, Carena L, Näsi M T, et al. Superoxide-driven autocatalytic dark production of hydroxyl radicals in the presence of complexes of natural dissolved organic matter and iron [J]. *Water Research*, 2020, 177: 115782.
- [68] Müller M, D'Andrilli J D, Silverman V, et al. Machine-learning based approach to examine ecological processes influencing the diversity of riverine dissolved organic matter composition [J]. *Frontiers in Water*, 2024, 6: 1379284.
- [69] Liu Ying, Fang Jiasong, Jia Zhongjun, et al. DNA stable-isotope probing reveals potential key players for microbial decomposition and degradation of diatom-derived marine particulate matter [J]. *MicrobiologyOpen*, 2020, 9(5): e1013.
- [70] Coffey N R, Dewey C, Manning K, et al. Annotation of DOM metabolomes with an ultrahigh resolution mass spectrometry molecular formula library [J]. *Organic Geochemistry*, 2024, 197: 104880.
- [71] 李淑而, 张璧洁, 李梓韶, 等. 溶解性有机物与活性氯物种反应过程中其分子组成对消毒副产物生成的影响 [J]. *环境工程学报*, 2024, 18(6): 1593-1603. (Li Shuer, Zhang Bijie, Li Zishao, et al. The influencing mechanism of molecular composition of dissolved organic matter on the formation of disinfection byproducts mediated by reactive chlorine species [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(6): 1593-1603. (in Chinese))
- [72] Wang Yunwen, Ren Dong, Li Yunxiang, et al. Spatiotemporal dynamics of dissolved organic matter and disinfection by-products formation potential of Shengzhong Lake in southwest China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(14): 21568-21577.
- [73] 伍观保, 陈文文, 赵文玉, 等. 水中 *N*-亚硝胺的污染状况、来源及风险 [J]. *环境化学*, 2024, 43(8): 2539-2554. (Wu Guanbao, Chen Wenwen, Zhao Wenyu, et al. Occurrence, sources, and risk of *N*-nitrosamines and precursors in water: a review [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(8): 2539-2554. (in Chinese))
- [74] Yang Ting, Hodson M E. The impact of varying abiotic humification conditions and the resultant structural characteristics on the copper complexation ability of synthetic humic-like acids in aquatic environments [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 165: 603-610.
- [75] 樊月婷, 昌盛, 张茉莉, 等. 海拉尔河典型傍河型地下水源砷的富集机制与溶解性有机物三维荧光特性解析 [J]. *环境化学*, 2024, 43(7): 2280-2290. (Fan Yueting, Chang Sheng, Zhang Moli, et al. The enrichment mechanisms of arsenic and three-dimensional fluorescence spectroscopy characteristics of dissolved organic matters in typical riverside groundwater sources of the Hailar River [J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(7): 2280-2290. (in Chinese))
- [76] 陆卞和, 王沛芳, 钱进, 等. 农田生态系统中新污染物的生态环境效应与去除技术研究 [J]. *水资源保护*, 2025, 41(3): 244-254. (Lu Bianhe, Wang Peifang, Qian Jin, et al. Research on ecological and environmental effects and removal technologies of emerging contaminants in agricultural ecosystems [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3): 244-254. (in Chinese))
- [77] Michaelis C, Grohmann E. Horizontal gene transfer of antibiotic resistance genes in biofilms [J]. *Antibiotics*, 2023, 12(2): 328.
- [78] Zhou Lei, Zhou Yongqiang, Tang Xiangming, et al. Resource aromaticity affects bacterial community successions in response to different sources of dissolved organic matter [J]. *Water Research*, 2021, 190: 116776.
- [79] Li Jialing, Wang Pandeng, Salam N, et al. Unraveling bacteria-mediated degradation of lignin-derived aromatic compounds in a freshwater environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141236.
- [80] 程琼, 庄婉娥, 杨丽阳. 水生系统中溶解态有机质的激发效应研究进展 [J]. *环境化学*, 2018, 37(1): 10-18. (Cheng Qiong, Zhuang Wane, Yang Liyang. Priming effect

- of dissolved organic matter in aquatic ecosystems; a review [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37 (1) : 10-18. (in Chinese))
- [81] Sobek S, Durisch-Kaiser E, Zurbügg R, et al. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source [J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54 (6) : 2243-2254.
- [82] Mostofa K M G, Liu Congqiang, Vione D, et al. Sources, factors, mechanisms and possible solutions to pollutants in marine ecosystems [J]. Environmental Pollution, 2013, 182:461-478.
- [83] Wen Zhidan, Shang Yingxin, Song Kaishan, et al. Composition of dissolved organic matter (DOM) in lakes responds to the trophic state and phytoplankton community succession [J]. Water Research, 2022, 224:119073.
- [84] 翁蕊, 韦政, 杨燕梅, 等. 城市河道沉积物溶解性有机质特征及其对反硝化过程的影响研究 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2021 (4) : 46-54. (Weng Rui, Wei Zheng, Yang Yanmei, et al. Characteristics of dissolved organic matter and its effects on denitrification in urban river sediments [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2021 (4) : 46-54. (in Chinese))
- [85] 林伟, 李玉中, 李昱佳, 等. 氮循环过程的微生物驱动机制研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (6) : 1146-1155. (Lin Wei, Li Yuzhong, Li Yujia, et al. Advances in the mechanism of microbe-driven nitrogen cycling [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (6) : 1146-1155. (in Chinese))
- [86] 许伟翔, 白国梁, 李贝宁, 等. 浅水湖泊沉积物碳储存与释放及其影响因素研究进展 [J]. 水生生物学报, 2024, 48 (5) : 878-888. (Xu Weixiang, Bai Guoliang, Li Beining, et al. Advances in researches on carbon storage and emission of sediment and factors in shallow lakes [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48 (5) : 878-888. (in Chinese))
- [87] Deemer B R, Harrison J A, Li Siyue, et al. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis [J]. Bioscience, 2016, 66 (11) : 949-964.
- [88] 韩磊, 胡盎, 任明磊, 等. 湖泊微生物群落及其介导的碳循环过程 [J]. 生命科学, 2023, 35 (12) : 1613-1629. (Han Lei, Hu Ang, Ren Minglei, et al. Lake microbial communities and their mediated carbon cycling processes [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2023, 35 (12) : 1613-1629. (in Chinese))
- [89] Sobek S, Durisch-Kaiser E, Zurbügg R, et al. Organic carbon burial efficiency in lake sediments controlled by oxygen exposure time and sediment source [J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54 (6) : 2243-2254.
- [90] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate [J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54 (6part2) : 2298-2314.
- [91] Kortelainen P, Rantakari M, Pajunen H, et al. Carbon evasion/accumulation ratio in boreal lakes is linked to nitrogen [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2013, 27 (2) : 363-374.
- [92] Xu Zibo, Tsang D C W. Mineral-mediated stability of organic carbon in soil and relevant interaction mechanisms [J]. Eco-Environment & Health, 2024, 3 (1) : 59-76.
- [93] Matra M, Phupaboon S, Totakul P, et al. Microencapsulation of *Mitragyna* leaf extracts to be used as a bioactive compound source to enhance *in vitro* fermentation characteristics and microbial dynamics [J]. Animal Bioscience, 2024, 37 (1) : 74-83.
- [94] 李冬娜, 马晓军. 污泥厌氧发酵产酸机理及应用研究进展 [J]. 生物质化学工程, 2020, 54 (2) : 51-60. (Li Dongna, Ma Xiaojun. Mechanism and research progress of acid synthesis during sludge anaerobic fermentation [J]. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54 (2) : 51-60. (in Chinese))
- [95] 刘超, 罗刚, 王雯, 等. 微生物转化合成气制取生物燃料和化学品的研究进展 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2017, 44 (5) : 2-12. (Liu Chao, Luo Gang, Wang Wen, et al. Research progress in biofuel and biochemicals production from syngas fermentation [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2017, 44 (5) : 2-12. (in Chinese))
- [96] Li Yuyang, Zhou Yongqiang, Zhou Lei, et al. Changes in water chemistry associated with rainstorm events increase carbon emissions from the inflowing river mouth of a major drinking water reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56 (22) : 16494-16505.
- [97] Yang Xin, Rosario-Ortiz F L, Lei Yu, et al. Multiple roles of dissolved organic matter in advanced oxidation processes [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56 (16) : 11111-11131.
- [98] 吕清华. SWAT 模型对农业面源污染模拟的适用性分析 [J]. 云南水力发电, 2022, 38 (2) : 57-59. (Lyu Qinghua. Applicability analysis of SWAT model to agricultural non-point source pollution simulation [J]. Yunnan Water Power, 2022, 38 (2) : 57-59. (in Chinese))
- [99] National Research Council. Urban stormwater management in the United States [M]. Washington: The National Academies Press, 2009.
- [100] Canarini A, Kaiser C, Merchant A, et al. Root exudation of primary metabolites: mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10:157.

(下转第 88 页)

[43] Xu Wenxin, Chen Jie, Corzo G. Combining data augmentation and hybrid modeling approaches for deep learning-based monthly streamflow forecasting[J]. Journal of Hydrology,2025,659:133318.

[44] Kratzert F, Klotz D, Brenner C, et al. Rainfall-runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018,22(11):6005-6022.

[45] 贾玉雪,张奇,曾冰茹,等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 8-16. (Jia Yuxue, Zhang Qi, Zeng Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 8-16. (in Chinese))

[46] He Shaoyang, Zhang Yongqiang, Ma Ning, et al. A daily and 500 m coupled evapotranspiration and gross primary production product across China during 2000-2020[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5463-5488. (收稿日期:2025-05-08 编辑:王芳)

+++++

(上接第 31 页)

[101] DelSontro T, Boutet L, St-Pierre A, et al. Methane ebullition and diffusion from northern ponds and lakes regulated by the interaction between temperature and system productivity[J]. Limnology and Oceanography, 2016, 61(S1): S62-S77.

[102] 秦宇,黄璜,李哲,等. 内陆水体好氧甲烷氧化过程研究进展[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1004-1017. (Qin Yu, Huang Huang, Li Zhe, et al. Research progress of aerobic methane oxidation process in inland waters[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4): 1004-1017. (in Chinese))

[103] 杨可昀,宋海亮,黄诗蓓,等. 根系分泌物调控对人工湿地去除雌激素的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 59-66. (Yang Keyun, Song Hailiang, Huang Shibei, et al. Influence of different root exudates on steroidal estrogen removal in constructed wetlands [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 59-66. (in Chinese))

[104] 郭小熙,田鹏飞,孙杨,等. 工业有机废水深度处理:非均相 Fenton 催化剂研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(2): 605-620. (Guo Xiaoxi, Tian Pengfei, Sun Yang, et al. Tertiary treatment of industrial organic wastewater: development of heterogeneous Fenton catalysts [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(2): 605-620. (in Chinese))

[105] 陆帅帅,周念清,蔡奕,等. 洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 122-130. (Lu Shuaishuai, Zhou Nianqing, Cai Yi, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus migration and transformation and driving mechanism in hyporheic zone groundwater of Dongting Lake wetland[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 122-130. (in Chinese))

[106] 邱英英,郑西来,刘乐成,等. 干湿交替频率影响下非饱和带有机氮转化的生物学机制[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 242-250. (Qiu Yingying, Zheng Xilai, Liu Lecheng, et al. Biological mechanism of dry-wet alternation frequency affecting organic nitrogen transformation in vadose zone [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 242-250. (in Chinese))

[107] 兰梓溶,清江,陈有为,等. 金属有机框架材料 MIL-101 在吸附去除水中有机污染物中的应用进展[J]. 分析测试学报, 2024, 43(4): 654-662. (Lan Zirong, Qing Jiang, Chen Youwei, et al. Research progress of adsorption and removal of organic pollutants in water by metal-organic framework MIL-101 [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(4): 654-662. (in Chinese))

[108] Brachi M, El Housseini E, Beaver K, et al. Advanced electroanalysis for electrosynthesis[J]. ACS Organic & Inorganic Au, 2024, 4(2): 141-187.

[109] 张璧洁,杨奎,张众. 基于耦合电氧化-还原的反应性电化学膜工艺处理高含氯难处理工业废水[J]. 环境工程学报, 2024, 18(6): 1582-1592. (Zhang Bijie, Yang Kui, Zhang Zhong. Treatment of high chlorine-containing refractory industrial wastewater using reactive electrochemical membrane coupled with electro-oxidation and reduction processes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(6): 1582-1592. (in Chinese))

[110] 何晨,何丁,陈春茂,等. 傅里叶变换离子回旋共振质谱在溶解性有机质组成分析中的应用[J]. 中国科学:地球科学, 2022, 52(12): 2323-2341. (He Chen, He Ding, Chen Chunmao, et al. Application of Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry in molecular characterization of dissolved organic matter [J]. Scientia Sinica Terrae, 2022, 52(12): 2323-2341. (in Chinese))

[111] Lowe M, Qin Ruwen, Mao Xinwei. A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring[J]. Water, 2022, 14(9): 1384. (收稿日期:2025-09-11 编辑:王芳)