

湖泊水体溶解有机质行为及生态环境效应研究进展与展望*

徐华成^{1**}, 李 昂^{1,2}

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 211135)

(2:南京师范大学, 南京 210023)

摘 要: 溶解有机质 (DOM) 是一类结构组成多样、理化性质复杂、分子量分布范围广的混合物质, 主要包含腐殖酸、富里酸、蛋白质、脂类等多种有机组分以及羧基、羟基、酚基、醛基等活性基团。DOM 在湖泊生态系统中广泛存在, 可参与多种生物地球化学过程、影响生源要素及污染物的迁移转化和归趋行为, 并在生态系统碳源汇转换中发挥着重要作用。湖泊水体 DOM 具有多种环境行为, 如 DOM 可吸附至水体颗粒表面, 调控 DOM 在溶解/悬浮相中的分配特征; 环境条件下湖泊 DOM 会经历光及微生物降解过程, 改变 DOM 在湖泊水体中的含量和结构组成; 湖泊 DOM 中的多官能团极易与金属离子发生络合, 还可因电子跃迁产生活性氧物种。此外, 湖泊 DOM 还具有显著的生态环境效应, 如 DOM 可负载在胶体颗粒表面, 影响胶体颗粒稳定性及水体透明度; DOM 与重金属络合会改变重金属离子生物有效性, 进而影响湖泊生态系统健康; 湖泊 DOM 可通过活性氧物种媒介作用促进有机污染物降解, 也可通过光屏蔽作用抑制污染物的降解。需要指出的是, 湖泊 DOM 行为及生态环境效应与其分子量、活性基团及分子结构组成息息相关。本文系统综述了湖泊 DOM 行为及生态环境效应, 及其与 DOM 分子结构组成的关联性, 以期对湖泊污染过程及机理、湖泊修复及调控、湖泊管理及规划等提供理论指导和技术支持。

关键词: 湖泊 DOM; 环境行为; 生态环境效应; 分子量分布; 结构组成表征

Progress and prospects on the behaviors and eco-environmental effects of dissolved organic matter in lakes

Xu Huacheng^{1**} & Li Ang^{1,2}

(1: Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(2: Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) is a substance that is characterized by a variety of structural compositions, complex physicochemical properties and a wide molecular weight distribution. It is composed primarily of humic acids, fulvic acids, proteins, lipids and other organic components, as well as carboxylic acids, hydroxyl, phenolic, aldehyde and other reactive groups. Domains of the dissolved organic matter (DOM) are ubiquitous in lake ecosystems, where they participate in a variety of biogeochemical processes. These processes influence the migration, transformation and behavior of biotic elements and pollutants, and play an important role in the conversion of carbon sinks in ecosystems. DOM in lake water exhibits a variety of environmental behaviors. For instance, DOM can be adsorbed to the surface of water particles, and the distribution of DOM in the dissolved/suspended phase can be regulated; DOM in lakes will undergo photo- and microbial degradation, which will change the content and structural composition of DOM samples; the multifunctional groups in DOM in lakes can be easily complexed with metal ions, and can also undergo electron transfer to produce reactive oxygen species. Furthermore, the existence of dissolved organic matter (DOM) in lakes has been proven to have substantial ecological and environmental impacts. Specifically, DOM in colloidal particles significantly influences the stability of these colloids and the transparency of the

* 2024-12-19 收稿; 2025-05-13 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2023YFC3208900, 2023YFC3208902)、国家自然科学基金(52479079)和江苏省重点研发计划社发项目(BE2023846)联合资助。

** 通信作者; Email: hcxu@niglas.ac.cn

surrounding water. Moreover, the binding of DOM with heavy metals can change the bioavailability of these metals, thus influencing the well-being of lake ecosystems. Additionally, DOM in lakes can either facilitate the degradation of organic pollutants via reactive oxygen species mediation or impede this process by acting as a light shield. It is crucial to emphasize that the behavior and ecological effects of lake DOM are intricately linked to its molecular weight, active groups, and molecular structure. In this paper, we conduct a comprehensive and systematic review of the behavior and ecological effects of lake DOM, as well as its correlation with molecular structure composition. The findings of this review can offer valuable theoretical guidance and technical support for understanding the processes and mechanisms of lake pollution, implementing lake restoration and regulation measures, and formulating lake management and planning strategies.

Keywords: Lake DOM; Environmental behavior; Ecological effects; Molecular weight distribution; Structural composition characterization

溶解有机质 (DOM) 是指水中能够通过特定孔径 (通常是 $0.45\ \mu\text{m}$) 滤膜的有机质组分, 主要由腐殖酸、富里酸、蛋白质、脂类等组成, 且含有羧基、羟基、氨基、醛基等多种活性基团^[1]。DOM 分子量小但比表面积大, 是湖泊水体中极具活性的一类物质, 可显著影响湖泊水体质量和生态系统物质能量循环^[2]。湖泊 DOM 与周围环境的相互作用是一个复杂而精细的过程, 该过程对湖泊生态系统及碳循环均有深远的影响。一方面, DOM 作为湖泊生态系统中的重要组成部分, 其含量、组成及动态变化直接影响着水生生物的群落结构和组成。湖泊 DOM 不仅为水生生物提供了必要的营养来源, 还可改变水体 pH、氧化还原电位, 显著影响生态系统的健康和稳定性^[3]。因此, DOM 含量及结构组成变化可被视为指示湖泊环境变化和人类活动影响的重要指标, 为湖泊生态环境的保护和修复提供了重要依据。另一方面, 湖泊 DOM 在生态系统碳循环中扮演着举足轻重的角色。DOM 降解过程可通过释放二氧化碳等温室气体加速陆地植物的光合作用, 还可促进碳元素在湖泊水体、沉积物和大气之间的交换和循环, 影响湖泊生态系统碳循环的平衡和稳定^[4]。因此, 深入研究湖泊 DOM 的行为和生态环境效应, 对于理解生态系统碳循环的机制、预测气候变化趋势以及制定有效的环境保护政策具有重要意义。基于其在湖泊生态系统中的重要作用, 近年来关于湖泊 DOM 行为及生态环境效应解析已成为研究者关注的热点问题。

湖泊水体 DOM 的来源可分为外源输入和内源产生 (见图 1)。外源输入主要来自陆地输入和大气沉降, 陆地输入主要包含河流、地表径流携带的陆生植物凋落物、土壤有机物以及人类生产生活过程中产生的有机物质, 大气沉降主要包括大气颗粒物或降水中的有机物; 内源产生主要来自水生动植物的分解和底层沉积物有机质的释放^[5]。申钊颖等^[6]运用荧光区域积分法解析了鄱阳湖 DOM 的来源, 发现鄱阳湖水体 DOM 主要为陆源输入, 且受人类活动影响较小。史小红等^[7]利用三维荧光光谱分别测定岱海表层、中层、底层水体, 证实岱海水体 DOM 既有河流补给所携带的陆源有机质, 又有水体微生物代谢产生的有机质。通过对加拿大安大略省南部 3 个大型湖泊 (西姆科湖、伊利湖和安大略湖) 进行平行因子分析识别出 3 种外源 DOM 组分和 2 种内源 DOM 组分。其中汉密尔顿港接收的外源量最大, 这与它较高的流域与湖泊表面积比有关, 伊利湖和安大略湖接收的外源输入最少。西姆科湖由于近岸水域大型植物和浮游植物生物量丰富, 内源 DOM 的含量相对较高^[8]。高静湑等^[9]采用紫外-荧光联合分析方法探究了湖泊 DOM 来源的季节性特征, 发现乌梁素海 DOM 在春季以内源为主, 夏季则转向以外源为主。春季 DOM 主要来源于微生物分解、藻类降解等内源过程, 而夏季则受到农田退水等外源输入的显著影响。受季节变化影响, 乌梁素海 DOM 的芳香性和疏水性显著增强, 溶解有机碳 (DOC) 平均浓度从春季的 $13.64\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至夏季的 $23.13\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 增长了 69.57%。同时, 伴随着 DOM 来源的变化, 从春季到夏季乌梁素海的总氮 (TN)、总磷 (TP) 和叶绿素 a 浓度上升, 而溶解氧和生化需氧量下降。这些变化表明随营养物质输入增加, 初级生产力增强, 但有机物降解过程减弱, 水体复氧能力下降。由此看出, 湖泊 DOM 的来源与流域特征、湖泊属性及季节等因素有关。

湖泊水体 DOM 具有吸附、降解、离子结合和能量跃迁等行为特征, 可显著影响生源要素循环和湖泊水体质量^[10]。湖泊 DOM 可吸附在颗粒表面, 影响颗粒表面污染物的分布和迁移规律^[11]; 环境条件下湖泊 DOM 会经历光及微生物降解过程, 释放出的微量元素不仅为微生物提供了营养来源, 还可调节碳、氮和磷等元素的生物地球化学循环; 湖泊 DOM 中的多官能团极易与金属离子发生络合, 形成稳定的络合物或

沉淀物，改变金属离子的溶解度和迁移能力；DOM 中特定基团吸收能量后发生电子跃迁并产生活性氧物种，可影响湖泊水体质量及生态系统平衡。此外，湖泊 DOM 还具有显著的生态环境效应，如 DOM 可负载在胶体颗粒表面，影响胶体颗粒稳定性及分散/团聚性能，进而影响水体透明度^[10]；DOM 与金属络合会改变金属离子生物有效性，进而影响湖泊生态系统健康；湖泊 DOM 可通过活性氧物种媒介作用促进有机污染物降解，也可通过光屏蔽作用抑制污染物的降解。需要指出的是，湖泊 DOM 上述行为及生态环境效应与其分子量、活性基团及分子结构组成息息相关^[12]。所以，系统剖析湖泊 DOM 的分子量及结构组成特征，明确湖泊 DOM 行为及生态环境效应过程及机理，揭示影响其行为及生态环境效应的分子层面机理，是湖泊 DOM 领域当前研究的热点问题，也是相关管理部门关心的难点问题。

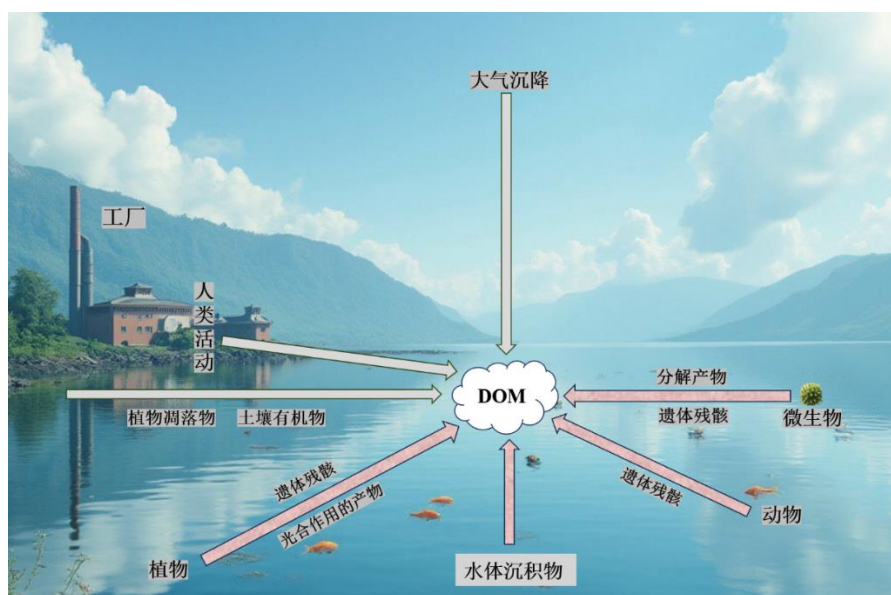


图 1 湖泊水体中 DOM 的来源途径解析

Fig.1 Analysis of the source and pathway of DOM in lake water

1 湖泊水体 DOM 含量及分布规律

图 2 为我国 78 个水域面积大于 5 平方公里的湖泊平均 DOC [数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心-湖泊-流域分中心 (<http://lake.geodata.cn>)]。可知，不同地域湖泊 DOC 含量因地貌、气候、水文条件、人类活动等差异具有显著的异质性。宋开山等^[13]通过对全国 936 个湖泊水样的分析得到，云贵湖区 DOC 平均含量为 5.25 mg/L，东部湖区为 5.92 mg/L，蒙新湖区为 25.78 mg/L，东北湖区为 27.22 mg/L，青藏高原湖区为 34.96 mg/L，五个湖区间 DOC 差异具有统计学意义 ($p < 0.001$)。青藏高原湖区由于大部分为咸水、微咸水和盐水湖泊，高盐度湖泊由于水力停留时间长和蒸发凝结作用更容易积累 DOM，从而导致 DOC 含量高。同时，该地区高辐射、低温和强烈季节性变化的气候条件，也会促进 DOM 的累积^[14]。而云贵湖区较低的 DOC 含量可能归因于复杂地形导致的快速水流减少了有机物的停留时间，同时亚热带季风气候有利于 DOM 的光降解^[15]。具体来看，东部湖区鄱阳湖 DOC 含量为 5.47 mg/L，巢湖 DOC 含量为 7.07 mg/L，太湖 DOC 含量为 9.89 mg/L^[16]；云贵湖区洱海 DOC 含量为 6.87 mg/L，滇池 DOC 含量为 16.27 mg/L。青藏高原湖区 DOC 含量显著高于东部湖区及云贵高原湖区 DOC 含量，如青藏高原湖区色林错 DOC 含量为 67.99 mg/L，青海湖 DOC 含量为 48.04 mg/L。蒙新湖区 DOC 的含量介于青藏高原湖区和云贵高原湖区之间，如蒙新湖区呼伦湖 DOC 含量为 14.33 mg/L，博斯腾湖受入湖河流量及携带的大量陆源类腐殖质影响^[17]，DOC 含量较高，为 55.93 mg/L；东北湖区 DOC 的含量与蒙新湖区相当，但均显著高于东部湖区 DOC 含量。例如，东北湖区兴凯湖 DOC 含量为 18.11 mg/L，查干湖 DOC 含量为 15.77 mg/L，其浓度约为东部湖区的 4~5 倍。整体而言，我国五大湖区中青藏高原湖区、蒙新湖区和东北湖区 DOC 的含量较高，而东部湖区和云贵湖区 DOC 含量较低。

从世界范围来看，全球 7514 个湖泊 DOC 浓度范围为 0.1~332 mg/L，中位数 5.71 mg/L，多数湖泊在

1~20 mg/L 之间，且超半数湖泊的 DOC 浓度高于 5 mg/L^[18]。受多种因素影响，世界湖泊 DOC 浓度分布区域差异明显，北极湖泊因永久冻土和低生产力导致 DOC 浓度低；北方针叶林地区因土壤富含有机质、微生物降解慢，高 DOC 湖泊较多；加拿大萨斯喀彻温省北部大平原湖泊，因缺乏流出和高蒸发，DOC 浓度最高；温暖气候区 DOC 浓度变化则无明显规律。

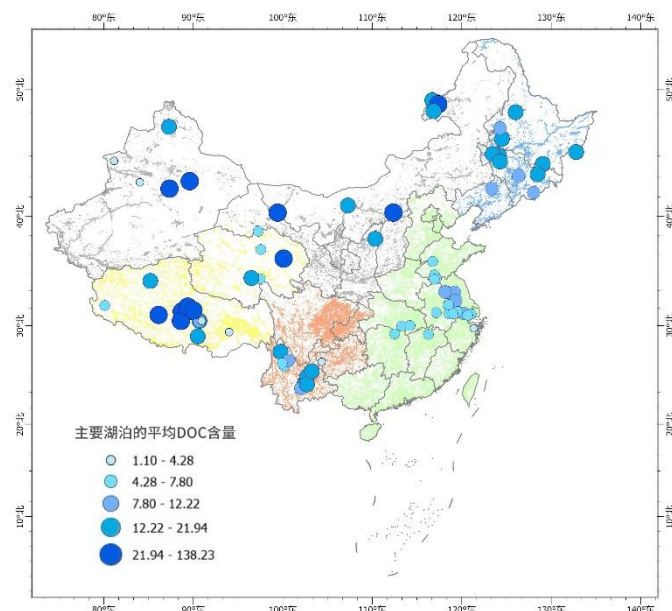


图2 中国五大湖区 DOC 含量分布[数据来源 <http://lake.geodata.cn>; 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2982 号的标准地图制作，底图无修改。]

Fig.2 Distribution of DOC concentration in five lake regions of China (Data source <http://lake.geodata.cn>)

2 湖泊 DOM 的表征方法

2.1 光谱表征技术

湖泊 DOM 结构组成和分子量解析是探讨其行为及生态环境效应的关键。现阶段对湖泊 DOM 结构组成表征最常见的是紫外-可见吸收光谱、三维荧光光谱、核磁共振光谱、傅里叶变换红外光谱等。紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱能够对湖泊 DOM 的相对丰度、组成以及来源信息进行解析。例如，光学参数 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₈₀ 可用于表征 DOM 中芳香类和蛋白质类物质的丰度^[19]，光谱斜率比 (S_R) 可指示 DOM 的分子量分布^[20]。在常见的光谱参数中，吸光度比值 ($E2/E3$ ，250 nm 和 365 nm 处吸光度之比) 和光谱斜率 ($S_{275-295}$ 和 $S_{350-400}$ ，波长 275-295 nm 和 350-400 nm 区间内吸光系数的指数拟合) 与 DOM 的相对分子量呈反比^[21]。荧光参数中荧光指数 (FI)、生物源指数 (BIX)、腐殖化指数 (HIX) 和新鲜度指数 ($\beta:\alpha$) 能够反映 DOM 的来源、生物可利用性、腐殖化程度和新鲜度等信息^[22]。两种方法虽然在 DOM 研究中应用广泛，但均存在一定的局限性。紫外-可见吸收光谱的灵敏度较低，难以检测低浓度样品，且复杂样品中可能出现吸收峰重叠，此外它无法提供详细的分子结构信息^[23]。三维荧光光谱的应用仅限于具有荧光特性的有机质，同时荧光强度易受环境因素（如 pH、温度、离子强度）影响，复杂样品中可能发生荧光猝灭或峰重叠，增加了数据解析的难度^[24]。

核磁共振光谱是在磁场作用下，自旋能级通过发生塞曼分裂，吸收某特定频率的射频辐射，利用该过程产生的各种参数推算 DOM 的组成和官能团等特征，且根据碳谱 ($^{13}\text{C-NMR}$) 和氢谱 ($^1\text{H-NMR}$) 可以确定样品中各官能团的百分比含量^[25]。例如，通过 $^{13}\text{C-NMR}$ 可获得 DOM 的脂肪烃、含氧杂脂肪、醛基、芳香烃、羧基、羰基等碳组分信息，通过 $^1\text{H-NMR}$ 可获得脂肪烃、芳香烃、羟基、含氧杂芳香烃等氢组分信息^[26]。在实际应用中，核磁共振光谱的分析时间较长，且复杂样品的谱图解析难度较大，需要专业知识和技术支持^[27]，尤其是对于 DOM 这种高度复杂的混合物，谱峰重叠和信号干扰现象较为常见^[28]，这在一定程度上增加了实验结果分析的难度。

傅里叶变换红外光谱可根据特征吸收峰的变化来反映 DOM 的结构组成变化^[29]。在红外光谱中,波数为 1640 cm^{-1} 的峰为苯环、烯烃类 C=C 和醛、酮中的 C=O 伸缩振动及分子间振动引起,表明 DOM 中可能含有较多的芳香族不饱和物质;波数为 1541 cm^{-1} 的峰为酰胺 II 带 C=O 及仲酰胺 N-H 振动峰;波数为 1455 cm^{-1} 的峰为脂肪族 CH_3 和 CH_2 中 C-H 的振动,羧基上的不对称伸缩振动或 C-OH 的变形振动,表明含有较多的脂肪类化合物;波数为 1415 cm^{-1} 的峰为 DOM 中 N-H 的弯曲振动,表明样品中可能存在蛋白类物质;波数为 1142 cm^{-1} 的峰为多糖类物质 C-O 的伸缩振动峰^[30]。李崇蔚等^[31]利用红外光谱分析发现乌梁素海水体 DOM 具有多官能团特征,其主要官能团为 C=O (1640 cm^{-1})、C-H (1455 cm^{-1})、N-H (1415 cm^{-1}) 和 C-O (1142 cm^{-1})。Fan 等^[32]在研究 DOM 与 Cu^{2+} 结合能力时发现两者形成复合物的过程中,主要参与的基团为芳香烃、脂肪族基团、酰胺 I 带和羧基官能团。傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 虽然在检测有机质官能团和化学键方面具有广泛适用性,但 FTIR 对水溶性样品的检测效果较差,且只能提供官能团的定性信息,这也限制了其在复杂体系中的应用^[33]。

2.2 质谱表征技术

目前,随着质谱技术的飞速发展,傅里叶变换等离子回旋共振质谱 (FT-ICR-MS) 的应用可以更为精准的获得 DOM 详细的分子结构信息^[34]。Van Krevelen 图作为一种广泛应用的 FT-ICR-MS 数据可视化手段,借助绘制氢碳比 (H/C) 和氧碳比 (O/C),能够有效区分湖泊 DOM 有机组分的类别及行为过程。具体而言,O/C 比例的变化能够体现氧化或还原反应的发生,H/C 比例的变化能够指示加氢或脱氢过程,而当 H/C 和 O/C 比例在图中对角线方向上变动时,分别对应着甲基化或去甲基化,以及水解或缩合过程^[35]。Liu 等^[36]采用 FT-ICR-MS 技术对太湖、滇池等富营养化湖泊 DOM 样品进行了特性描述,通过 Van Krevelen 图的解析发现,湖泊中源自大型水生植物的 DOM 成分以木质素为主导,而来自藻类的 DOM 则富含脂质类物质。Xu 等^[37]利用 FT-ICR-MS 技术研究不同盐度对 DOM 组成的影响,结果表明在较高盐度下,DOM 的平均分子量较大、氧化程度较高、芳香性较低,且通过不同异原子数量分析发现高盐度湖泊中 DOM 的氧原子数量分布范围更广,且存在更多不饱和分子和羧基团。Feng 等^[38]采用 FT-ICR-MS 技术在分子水平上表征洱海盆地湿沉降的溶解有机氮 (DON) 发现,DON 在洱河流域湿沉降样品中占比 18.3%,其中大部分 DON 分子仅含有一个氮原子。尽管 FT-ICR-MS 在分子水平表征方面具有无可比拟的优势,但其高昂的成本和复杂的操作限制了其广泛应用^[35]。

2.3 分子量表征技术

除结构组成复杂等特征外,湖泊 DOM 还具有分子量连续分布等特征,DOM 分子量分布特征可显著影响其在水体中的行为及生态环境效应。目前,湖泊 DOM 分子量常用表征技术包括尺寸排阻色谱法、切向超滤、正向超滤、液相色谱法、流场流分离系统等。尺寸排阻色谱法 (SEC) 是一种基于尺寸大小的分离技术,广泛应用于溶液中大分子的分离与相对分子量表征。由于其在大分子溶液行为方面存在盲点,目前多采用尺寸排阻色谱与多角度激光光散射联用技术 (SEC-MALS) 对湖泊 DOM 的分子量进行表征,该技术无需分子量标准品校正即可直接测定 DOM 绝对分子量和尺寸,并进一步揭示其溶液构象信息^[39]。正向超滤技术是利用超滤膜的微孔结构,在外界压力 (通常为 0.1~0.5 MPa) 的作用下,实现对溶液中小分子物质与大分子物质的分离^[40]。陈雪霜等^[41]利用不同孔径超滤膜结合正向超滤技术将三峡消落带沉积物中 DOM 分为 4 个级别:高分子量组分 (30 kDa~0.22 μm)、中分子量组分 (10~30 kDa)、低分子量组分 (1~10 kDa)、真溶态 (<1 kDa)。而切向超滤技术的特点在于液体流动方向与过滤方向呈现垂直状态,即切向流动。这种技术通过压力驱动溶剂通过膜孔隙,实现溶剂与颗粒、高分子物质等固体杂质的分离^[42]。兰莹等^[43]通过切向超滤技术对水中腐殖质和悬浮物等高分子有机物进行分离,同时探究不同压力下的分离效率。徐华成等^[44]采用切向超滤技术比较了河流、湖泊、海洋等不同生态系统 DOM 分子量的差异,发现与湖泊和河流 DOM 样品,海洋 DOM 中 <1 kDa 的低分子量组分占比超过 50%。

当前,随着色谱技术的发展,液相色谱-有机碳-有机氮检测 (LC-OCD-OND) 已经逐渐发展并运用到湖泊 DOM 的分子量分级中^[45-46]。该技术是让样品通过液相色谱柱进行分离,利用固定相和流动相之间的分配作用将不同组分的有机质分离,分离后的组分通过有机碳检测器进行定量分析,同时可选配固定波长紫外检测器 (UVD) 和有机碳检测器 (OND) 以获得更多信息。袁博等^[47]运用 LC-OCD-OND 技术对瀾河

流域 DOM 进行分级, 根据分子量的差异得到 5 大类物质: 分子量 > 2 kDa 的生物大分子、分子量 > 1 kDa 的腐殖质、分子量介于 300~500 Da 的腐殖质降解产物、分子量 < 350 Da 的低分子有机酸和中性物质。此外, 流场流分离系统 (FIFFF) 是一种适用于大分子、胶体颗粒和微粒的无破坏分离技术, 可精准测定湖泊有机质分子量的连续分布信息^[44]。傅肖蔚等^[48]对 FIFFF 技术进行了系统优化, 并采用该技术揭示了湖泊 DOM 在 0.3 kDa~0.45 μ m 分子量区间的连续分布信息。

近年来, 为突破单一技术的瓶颈, 研究者开始整合多尺度分析策略, 例如结合荧光光谱与平行因子 (PARAFAC) 识别 DOM 组分来源, 再通过质谱构建分子网络关联其环境行为^[49]。这种表征框架不仅提升了 DOM 结构解析的精度, 更推动了 DOM 研究从分子水平到生态系统尺度的跨越。白雷雷等^[50]通过三维荧光光谱与 PARAFAC 识别藻源 DOM 的组分, 结合高效液相色谱 (HPLC) 和超高分辨率质谱 (ESI-FT-ICR-MS), 系统揭示了 DOM 的分子组成与生物降解特性, 为湖泊碳氮循环机制提供了分子水平的证据。于波等^[51]采用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱分析 DOM 的芳香性与官能团组成, 结合高效尺寸排阻色谱 (HPSEC) 测定分子量分布。结果显示, 芦苇区和龙须眼子菜区的 DOM 具有低分子量、高芳香性特征, 与 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的结合性能显著高于穗花狐尾藻区。可见, 通过不同光谱、质谱及分子量表征技术的联合, 可有效解析 DOM 结构组成的差异性。

3 湖泊 DOM 的行为特征

3.1 吸附行为

湖泊水体除 DOM 外, 还存在大量粒径较小的胶体颗粒, DOM 会通过物理和/或化学作用吸附在这些颗粒表面 (见图 3)。物理吸附作用包括库仑力、范德华力、疏水力 (溶剂排斥) 等, 化学吸附作用主要是利用配体交换 (与表面羟基的缩合)、氢键、阳离子架桥和表面离子螯合等作用^[52]。需要指出的是, 在湖泊复杂生态系统中 DOM 与胶体颗粒的吸附往往是多种机制共同作用。例如, 有研究发现 DOM 可通过疏水作用、配体交换和静电效应等多种机制吸附于铁胶体颗粒表面^[53]。

影响湖泊 DOM 与胶体颗粒吸附效果的因素较多, 包括胶体颗粒性质 (如比表面积、平均表面电荷等)、DOM 特性 (如 DOM 来源、电荷、疏水性、分子量等) 和环境因子 (如 pH、离子强度、离子价态和温度等)^[54]。其中 DOM 的来源对其在胶体颗粒表面的吸附性能具有重要影响。吴丰昌等^[55]在研究中发现藻源 DOM 和腐殖源 DOM 在水铁矿胶体颗粒表面具有截然不同的吸附性能, 腐殖源 DOM 吸附容量可达 542 mg/g, 远高于藻源 DOM 的吸附量 (231 mg/g), 但是藻源 DOM 的吸附速率 (1.82 min^{-1}) 比腐殖源 DOM 的吸附速率 (0.88 min^{-1}) 更快。Gao 等^[56]的研究认为 DOM 浓度可显著影响吸附性能, 在一定范围内胶体颗粒吸附容量随 DOM 浓度的升高而增加, 但当 DOM 浓度超过临界值时, 其吸附性能受到抑制。此外, 其他研究还发现胶体颗粒的性质对吸附效果也会产生影响。胶体颗粒的比表面积越大, 其与 DOM 的接触机会越大, 越有利于 DOM 的吸附。胶体颗粒的表面电荷特性也会影响其与 DOM 的吸附性能, 带负电的胶体颗粒更容易吸附带正电的 DOM 分子, 反之亦然^[57]。杜晓丽等^[58]通过 Langmuir 模型较好地描述了不同 pH 时胶体对 DOM 的等温吸附过程, 发现随 pH 升高其最大吸附量逐渐减小, 当 $\text{pH} \geq 6$ 时, 最大吸附量逐渐趋于稳定。

3.2 产生活性氧物种行为

光照条件下, 湖泊水体 DOM 通过吸收光电子辐射, 其能量从基态跃迁至激发态, 跃迁至激发态的电子与氧原子结合, 从而产生活性氧物种, 包括 $^1\text{DOM}^*$ 、 $^1\text{O}_2$ 和 $\cdot\text{OH}$ 。具体过程见图 3。

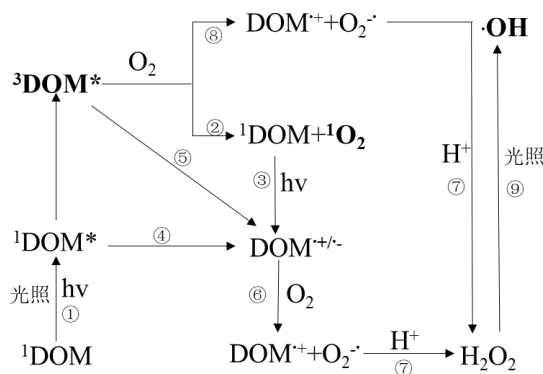


图3 光照条件下湖泊 DOM 生成活性氧物种的过程

Fig. 3 The process of reactive oxygen species formation for lake DOM under light conditions

光照条件下，部分电子基态 DOM 吸收辐射转变为激发单线 ($^1\text{DOM}^*$)， $^1\text{DOM}^*$ 可以通过荧光发射或无辐射跃迁等过程释放能量回到基态，或者通过自旋轨道耦合发生系间窜越到达 $^3\text{DOM}^*$ (反应①)。接着光激发态的 $^3\text{DOM}^*$ 与分子氧之间通过能量转移，可以生成 $^1\text{O}_2$ (反应②) [59]。除此之外，基态 DOM 吸收光能发生电子转移或者激发态的溶解性有机 ($^1\text{DOM}^*$ 、 $^3\text{DOM}^*$ 等) 通过分子内电子转移可以生成具有双自由基特征的复合物 $\text{DOM}^{+/-}$ ，它可以作 H_2O_2 的前体。 $\text{DOM}^{+/-}$ 与 O_2 之间通过电子转移，生成超氧化物 $\text{O}_2^{\cdot-}$ (反应⑥)，随后 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 在氢离子的作用下，发生歧化反应生成 H_2O_2 (反应⑦)。另一种不涉及 $\text{DOM}^{+/-}$ 的 H_2O_2 生成途径如反应⑧所示， $^3\text{DOM}^*$ 直接被 O_2 氧化生成 $\text{O}_2^{\cdot-}$ ，再转化为 H_2O_2 ， H_2O_2 通过光解反应参与生成 $\cdot\text{OH}$ 的过程 (反应⑨)。

光照条件下湖泊 DOM 产生活性氧物种的过程比较复杂，影响活性氧物种生成浓度的因素很多，如光照条件 (强度、波长)、DOM 特性 (组分和含量)、环境因子 (pH、离子强度、离子种类) 等。不同的光照波长对活性氧物种生成的贡献有所差异，武俐等 [60] 通过模拟不同波长太阳光源，发现 UVA (320~400 nm) 和 UVB (280~320 nm) 区间对光解的贡献率分别为 38.60% 和 34.74%，可见光 (Vis) 区间对光解贡献率最小，仅为 26.67%。光源强度也会影响 DOM 产生活性氧物种的能力。刘砚弘等 [61] 研究发现，汞灯照射下 DOM 产生活性氧物种的能力显著高于氙灯照射条件下。不同季节中湖泊 DOM 的含量及各组分差异明显，季节变化也会显著影响活性氧物种产生。研究发现， $^3\text{DOM}^*$ 在夏季和秋季的产生速率和稳态浓度显著高于冬季和春季，其产生速率和稳态浓度分别达到 $4.48 \times 10^{-9} \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{s})$ 和 $0.90 \times 10^{-15} \text{ mol/L}$ ；夏季和秋季水体中 $^1\text{O}_2$ 产生速率分别为 4.20×10^{-9} 和 $3.90 \times 10^{-9} \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{s})$ ，高于春季和冬季水体中 $^1\text{O}_2$ 产生速率 [2.78×10^{-9} 和 $2.62 \times 10^{-9} \text{ mol}/(\text{L} \cdot \text{s})$]，夏季和秋季水体中 $^1\text{O}_2$ 的稳态浓度分别达到 0.17×10^{-15} 和 $0.16 \times 10^{-15} \text{ mol/L}$ ；夏、秋季水体中的 $\cdot\text{OH}$ 产生速率 (13.06×10^{-10} 和 $13.70 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$) 明显高于冬、春季 (11.12×10^{-10} 和 $12.06 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$)。由于夏季和秋季湖泊 DOM 中的芳香族化合物的含量比较高，故其水体中活性氧物种产生速率和稳态浓度显著高于春季和冬季水体 [45]。pH 也是影响 DOM 产生活性氧物种的重要因素，模拟太阳条件下腐殖酸生成 $^1\text{O}_2$ 的研究表明， $^1\text{O}_2$ 的稳态浓度在 pH 为 7.0 时最高，此后随 pH 的增加或减小均呈现逐渐减小趋势 [62]。

除光照外，非光照条件下也会产生活性氧物种 [63]。Cory 等团队揭示了 DOM 中醌基团和酚类物质的电子穿梭能力，提出暗反应条件下其通过单电子转移生成 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 的机制 [64]。进一步，周东美等聚焦水稻土非光照干湿交替过程中 DOM 产生活性氧的过程与机理，发现活性氧生成潜力与土壤及 DOM 性质显著相关 [65]。

3.3 离子结合行为

湖泊水体 DOM 含有羧基、羟基、酚基、醛基等多种活性基团，能与金属离子发生离子交换、吸附络合、氧化还原及甲基化等作用，从而影响金属离子在环境中的迁移转化和生物有效性 [66]。DOM 与金属离子的相互作用可归为两大类：一类是通过离子键与碱金属及碱土金属离子结合，另一类则是通过络合反应生成配位化合物 [67]。除了与金属离子形成不同稳定程度的络合物外，DOM 的活性基团还能与稀土金属离

子如 La^{3+} 、 Nd^{3+} 等发生螯合或配位反应。

表 1 DOM 与不同金属离子反应的行为及特点

Tab. 1 Behavior and characteristics of DOM interaction with different metal ions

反应金属	反应特点	研究者
Pb^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+}	Cu^{2+} 与 DOM 中各种成分的结合能力相对较强，而 Pb^{2+} 和 Ni^{2+} 则主要与类腐殖质成分结合。	Zhao 等 ^[68]
Cu	不同分子量的 DOM 与 Cu 的络合能力不同，分子量在 3-5 kDa 的 DOM 具有更大的结合容量 ^[70]	石陶然等 ^[69]
As	随着 DOM 中腐殖质相对分子质量的降低，其与 As（III）和 As（V）的结合能力均呈增加趋势	REN 等 ^[71]
Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+}	DOM 中的胡敏酸对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的结合强度依次降低，金属离子浓度增大，吸附量增高，吸附率下降	胡书燕 ^[72]
La^{3+} 、 Nd^{3+}	DOM 中的胡敏酸对 La^{3+} 和 Nd^{3+} 的作用主要表现为螯合或配位反应	贾黎等 ^[73]
Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+}	DOM 中的富里酸对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的结合反应为快结合、慢结合及结合动态平衡 3 阶段，主要以液膜扩散阻力和化学吸附作用	汪精华 ^[74]

DOM 与金属离子的结合行为受多种因素的影响，如金属离子的种类及浓度、DOM 的特性以及环境因素（盐度、温度）等（表 1）。目前测定 DOM 与重金属结合能力的方法主要有离子交换法、液-液萃取法和固相萃取竞争配体交换法（CLE-SPE）^[75]。Wang 等^[76]通过建立的数学模型揭示了不同金属离子与 DOM 的络合常数，发现 Ni（II）与 DOM 络合物的稳定性常数（ $\log K_L$ ）为 3.7 ± 0.4 ，而 Cu（II）与 DOM 络合物的 $\log K_L$ 值为 4.7 ± 0.3 。DOM 的金属离子络合性能也与金属离子浓度显著相关，研究表明^[77]，DOM 与 Cd^{2+} 的结合容量随着 Cd^{2+} 浓度的增大而减小，当 pH 为 2.5 时， Cd^{2+} 为 0.3 mM 时其结合率为 27.1%，而 Cd^{2+} 为 1.0 mM 时结合率降为 12.3%。DOM 中不同组分对金属离子的结合性能也具有明显差异性，研究发现纤维素作为一种简单的有机物质，其结构主要由线性葡萄糖亚基链组成，缺乏与金属离子结合的复杂官能团，因此对金属离子的结合能力较弱^[78]。相比之下，腐殖质则能显著结合 Cd 和 Cu 并与金属离子形成可溶性复合物。此外，吴福勇等^[79]研究表明不同分子量 DOM 与金属离子形成的络合物溶解度也有较大的差异，分子量 <1000 u 的 DOM 组分中总 Cu 含量为 5.578 mg，当 DOM 分子量 >10000 u 的 DOM 组分中总 Cu 含量为 3.777 mg。一般来说，低分子量 DOM 易结合形成溶解性络合物，而高分子量 DOM 易结合形成难溶性络合物。盐度也是影响 DOM 与重金属离子结合的重要因素。有研究表明，水中的 Cl^- 能与 Hg（II）形成 HgCl_n （ $n=1-4$ ）络合物，并与 DOM 竞争 Hg（II）的结合位点，从而影响 DOM 与 Hg（II）的络合性能^[80]。

除金属离子外，DOM 还可与有机污染物发生结合作用。如 DOM 中的 COO^- 能够与有机污染物生成络合物，抑制有机污染物的扩散及跨膜运输过程^[81]。由于其较高的氮和氨基酸基团含量，蛋白质类物质可通过静电作用与范德华引力为有机污染物创造了更多结合位点，并改变其在环境中的行为^[82]。脂质类物质属于两亲性化合物，可通过疏水作用与有机污染物相互作用，从而减轻污染物的毒性^[83]。

3.4 降解行为

3.4.1 光降解行为 光照辐射条件下，湖泊 DOM 会发生光降解（见图 4），其降解途径分为直接光降解和间接光降解^[84]。直接光降解是 DOM 分子在接受光能后发生的直接化学反应，导致分子结构和组成发生变化，包括异构化键的断裂、光解、以及大分子 DOM 分解为小分子物质^[85]。间接光降解是由于 DOM 含有苯环、羧基、羟基及羰基等发色团，在光照条件下能吸收光子转变为激发态 DOM，进而生成活性氧物种，影响 DOM 降解^[86-87]。

影响湖泊水体 DOM 光降解行为的因素较多，包括光辐射特性（光强、波长）、DOM 特性（来源、分子量、浓度）及环境因子（温度、悬浮物浓度）等。杜瑛珣等^[88]研究发现不同光照辐射对 DOM 降解效率有所差异，紫外光作用下陆源腐殖质在 4 天时间内降解率达到 34.1%，紫外光对 DOM 降解作用显著高于可见光。湖泊水体广泛存在的胶体颗粒一方面可吸收太阳辐射抑制 DOM 光降解，另一方面又可产生活性物种促进 DOM 光降解。研究发现无胶体存在时湖泊藻源 DOM 的光降解效率可达 26.92%~41.73%，而胶

体颗粒存在时其光降解效率降为 21.78%~27.92%，表明湖泊胶体颗粒的存在抑制了藻源 DOM 的光降解效率。同时，不同来源的有机质光降解效率也有所差异，无胶体颗粒存在时，陆源 DOM 光降解效率为 49.30%~67.85%，光降解速率为 1.98~2.45 h⁻¹；而藻源 DOM 的光降解效率为 26.92%~41.73%，光降解速率为 0.32~1.22 h⁻¹，由于陆源 DOM 具有更高光敏性，其光降解效率和速率显著高于藻源 DOM^[89]。此外，水深也是影响 DOM 光降解性能的另一重要因子，深水湖泊底层很难接收到光子能量而导致水体间接光反应产物的含量较低，而在浅水和清澈的水体中，光化学反应的效率往往较高^[90]。研究表明，不同水深的 O₂⁻浓度差异较大，O₂⁻浓度在 4.5m 处大幅下降，为表层水的 65.6%，证实不同水深可影响 DOM 光降解性能^[91]。

3.4.2. 微生物降解行为 作为地球生态系统碳的重要源汇，湖泊生态系统蕴养着无数的微生物。湖泊微生物通过合作、竞争、互惠等相互作用，构成了一个复杂而精细的生态网络，在自然界的碳、氢和硫循环中起着重要作用。这些相互作用显著影响湖泊 DOM 的合成分解过程（见图 4），而 DOM 的组成与生物可利用性又反过来影响着微生物的生存与代谢^[34]。

影响湖泊 DOM 微生物降解的因素也很多，包括微生物种类（细菌、真菌）、DOM 特性（来源、结构组成、分子量）、环境条件（盐度、温度、pH）等。Chen 等^[92]在实验中发现，不同种类的微生物对 DOM 的特定成分具有不同的降解能力。某些细菌（如 *SAR11* 类群、*Roseobacter* 类群）能够高效降解蛋白质和多糖，而真菌则更擅长降解木质素等难降解的有机物质。此外，微生物对不同来源 DOM 的利用程度有所差异。Guillemette 等^[93]的研究表明，细菌在合成代谢过程中更倾向于利用外源性溶解有机碳，而内源藻类产生的有机碳则更多地被用于细菌的分解代谢，表明细菌群落对湖泊 DOM 来源具有选择性利用的特点。湖泊 DOM 的生物降解潜力与其分子量和结构组成也具有相关性。研究表明，细菌可快速同化相对分子质量低、不稳定的 DOM，促进细菌生物量增加。对于相对分子质量高的 DOM（如木质素、腐殖酸和芳香分子），微生物需将其水解或氧化至相对分子质量低的 DOM 才能被进一步利用，此过程微生物耗能较高^[94-95]。此外，张佩莲等^[96]探究了青藏高原湖泊不同盐度条件下细菌群落及 DOM 分布特征，证实芽孢杆菌 *Bacilli* 与盐度呈显著正相关关系且能通过转化含氮化合物加速 DOM 的腐殖化^[97]。

需要指出的是，环境水体中 DOM 的光降解与微生物降解往往同时存在，其交互作用受环境条件（如氧气含量、光照强度、盐度及水体滞留时间）影响。在表层富氧水体中，光降解过程将高分子量 DOM（如芳香族化合物）裂解为低分子量组分（如羧酸类物质），这些产物可作为微生物代谢的易利用底物，促进后续的微生物降解，形成协同效应^[98]。研究发现，光降解生成的生物不稳定性中间产物可显著增强微生物活性，加速 DOM 的矿化^[99]。然而，在缺氧环境（如深层地下水或高盐湖泊）中，光降解作用受限，此时微生物降解主导 DOM 转化，优先消耗腐殖质等高氧化态组分，同时积累还原性物质（如脂类和硫化物）^[99-100]。此外，高盐环境可能抑制微生物活性，导致光降解对 DOM 组成的影响更为显著^[100]。

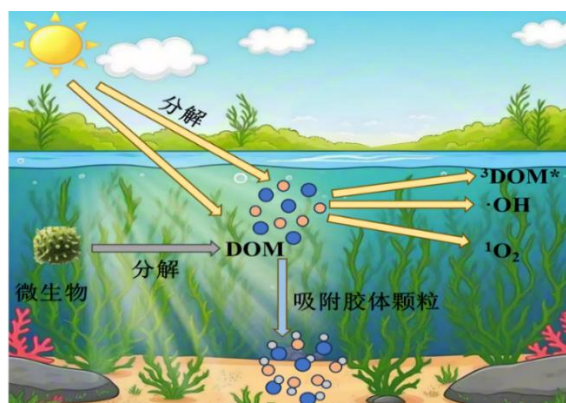


图 4 湖泊 DOM 的吸附和降解作用（黄色箭头表示光降解过程，灰色箭头表示 DOM 微生物分解的过程，蓝色箭头表示 DOM 的吸附行为）

Fig.4 Adsorption and degradation processes of lake DOM (yellow arrow indicates photodegradation process, gray arrow indicates DOM microbial decomposition process, and blue arrow indicates DOM adsorption behavior)

4 湖泊 DOM 的生态环境效应

作为维持湖泊生态系统稳定性的重要载体, DOM 可通过一系列理化作用影响重金属的生物有效性、调控胶体颗粒的分散/团聚性能和水体透明度、影响有机污染物的降解过程等, 进而影响水体质量和生态系统平衡, 具有显著的生态环境效应。

4.1 DOM 影响重金属生物有效性

湖泊水体中广泛存在的重金属可影响生物体生长及新陈代谢过程, 进而影响湖泊生态系统平衡和人类健康。湖泊 DOM 一方面可以通过其丰富的羧基、酚羟基等官能团与重金属发生络合作用, 改变重金属的生物有效性^[101], 另一方面, DOM 的氧化还原活性组分(如醌基)可直接参与重金属的还原过程, 改变其生物有效性^[102-103], 这一过程受 DOM 的含量、种类、结构组成及分子量等因素影响。DOM 的浓度和分子量是影响重金属生物有效性的最重要因素, 三种不同分子量 DOM(腐殖酸>富里酸>柠檬酸)对小球藻富集 Cu 的研究结果表明^[104], 低浓度(10 mg/L)柠檬酸可促进重金属 Cu 的生物有效性, 而当浓度较高时(20 mg/L)则抑制其生物有效性。但是, 高分子量的富里酸和腐殖酸在不同浓度下均可抑制 Cu 的生物有效性, 低浓度时生物有效性抑制率分别为 64%和 83%, 而高浓度时抑制率分别高达 87%和 91%。整体而言, 湖泊 DOM 对重金属生物有效性的抑制效果随 DOM 浓度和分子量的升高而不断增强。Zhu 等^[105]利用 BL-TK-TD 模型探讨了不同富里酸浓度下 Cd 的生物有效性, 发现当富里酸浓度从 0 增加到 6.48×10^{-5} M 时, 游离 Cd^{2+} 浓度从 1.78×10^{-6} M 降低到 1.30×10^{-6} M, 故富里酸浓度的增加可降低斑马鱼幼虫体内 Cd 的积累并提高它们的存活率。此外, 研究还发现, 24 小时游离 Cd^{2+} 的中位致死浓度($\text{LC}_{50\text{Cd}^{2+}}$)与富里酸的浓度呈正相关关系。当富里酸浓度从 0 增加到 6.48×10^{-5} M 时, 暴露于 Cd^{2+} 环境中的斑马鱼幼体的 $\text{LC}_{50\text{Cd}^{2+}}$ 从 3.87×10^{-6} M 增加到 19.4×10^{-6} M, 表明有机质浓度的升高显著提升了斑马鱼幼体对重金属离子的耐受性。

4.2 DOM 影响胶体颗粒分散/团聚性能

湖泊水体胶体颗粒的来源主要分为自然来源和人为来源^[106]。自然来源主要是入湖河流中携带的大量粘土和矿物质等无机物质进入湖泊水体、湖泊沉积物在风浪等作用下的再悬浮过程, 以及湖泊水体浮游植物的光合作用、微生物细胞溶解和分泌、浮游动物的排泄和死亡以及异养微生物的代谢等多种过程。人为来源主要是工业废水和生活污水的排放, 污水中携带的金属氧化物进入湖泊水体形成胶体颗粒。一般而言, 湖泊水体胶体颗粒的浓度约 2~30 mg/L 左右, 浅水湖泊胶体颗粒浓度高于深水湖泊^[107]。

胶体颗粒粒径小、比表面积大, 具有自发团聚的趋势, 其分散/团聚性能可显著影响水体透明度及污染物迁移转化。湖泊 DOM 极易负载在胶体颗粒表面, 从而影响胶体颗粒的分散/团聚性能^[108]。该影响过程与 DOM 特征(含量、组成、分子量等)、离子类型及离子强度等因素有关。Li 等^[109]研究发现 DOM 通过空间位阻效应可增强胶体颗粒的稳定性, 抑制其聚集趋势, 且随着 DOM 分子量的增加, 胶体颗粒的聚集效率不断降低。例如, 当向溶液中添加腐殖酸、牛血清白蛋白及脱氧核糖核酸后, 胶体颗粒的附着效率分别从 1 降低到 0.67、0.29 和 0.02。Zehlke 等^[110]发现 DOM 的亲疏水性能也是影响胶体颗粒分散/团聚性能的重要因素。具体而言, 亲水性 DOM 更容易在胶体颗粒表面形成稳定的水化层, 从而增加颗粒的稳定性; 疏水性 DOM 更倾向于通过疏水作用与胶体颗粒结合, 但其对胶体颗粒稳定性效果不如亲水性 DOM。

此外, 水环境中广泛存在的离子强度会影响胶体颗粒的等电点, 进而影响胶体颗粒的分散/团聚性能^[111]。例如, 二氧化钛胶体颗粒的等电点为 2.9, 而在 0.12M NaCl 溶液中, 其等电点升至 6.4, 降低了胶体颗粒间的静电斥力, 增强了其团聚潜势。离子种类对胶体颗粒的分散/团聚性能也有较大影响。Dai 等^[112]实验发现, 二价阳离子(Mg^{2+} 、 Ca^{2+})比一价阳离子(Na^{+} 、 K^{+})更能促进胶体颗粒的聚集。例如, 在相同条件下, 加入 NaCl 时, 氧化锌、氧化铈、氧化铁及氧化铜等胶体颗粒的水力学粒径从 439 nm、750 nm、643 nm 和 1377 nm 增加到 445 nm、767 nm、654 nm 和 1386 nm, 加入 CaCl_2 时则增加到 464 nm、780 nm、668 nm 和 1402 nm。与单价阳离子相比, 二价阳离子能更有效地压缩双电层, 降低了颗粒间的静电排斥能垒, 使得颗粒更容易克服能垒而发生聚集。

4.3 DOM 影响有机污染物降解

近年来, 由于经济发展及人类活动频次的增加, 大量有机污染物排入到湖泊水体。这些有机污染物具

有生物累积性特征，能够通过食物链进行浓缩富集，进而对生态系统和人体健康构成威胁^[113-114]。研究表明，长江中下游太湖沉积物中多环芳烃有机污染物的浓度达到 436.6~1334.9 ng/g，有机氯农药的浓度达到 4.22~461 ng/g，且在藻类和鱼类体内均能检测到有机污染物^[115]。

光照条件下湖泊 DOM 产生的活性氧物种 ($^3\text{DOM}^*$ 、 $^1\text{O}_2$ 和 $\cdot\text{OH}$)可显著影响有机污染物的降解，但不同形态活性氧物种对污染物的降解机理不尽相同(见图 5)。具体而言， $^3\text{DOM}^*$ 主要通过三种途径诱发有机污染物降解：(1)将能量直接传递给污染物，引起污染物发生如裂解、异构化等化学转化反应；(2)从污染物分子中移除氢原子，从而引发污染物的氧化分解过程；(3)从污染物的芳香结构中提取电子，导致其发生氧化分解反应^[116]。 $^1\text{O}_2$ 主要通过攻击有机污染物分子中的双键结构，引起污染物的转化与降解过程。而 $\cdot\text{OH}$ 与有机污染物主要通过以下三种方式发生反应：(1)与不饱和碳结构如 $\text{C}=\text{C}$ 、 $\text{C}\equiv\text{C}$ 及芳香环等发生加成反应；(2)从饱和碳链中的碳原子上提取氢原子；(3)从芳香环、碳碳双键以及羧酸盐或酯类结构中剥夺电子^[117]。此外，由于 DOM 结构组成的复杂性，其含有的大量不具或只具很弱吸光能力的惰性物质会对有机污染物质的光降解产生抑制作用，且这些光惰性物质是淬灭活性氧物种的主要部分^[118]。同时，由于 DOM 具有滤光和抗氧化效应，会通过过滤入射光或氧化作用抑制有机污染物的光降解。

DOM 对有机污染物的降解效率也与 DOM 特征（含量、结构、分子量）、环境因素（pH、光照）等相关。Ren 等^[119]发现较低浓度下（10.0 mg-C/L），DOM 显著促进敌草隆的光解，且促进作用随 DOM 浓度增加呈线性增长。然而随着 DOM 浓度进一步升高，光屏蔽效应逐渐增强，导致促进作用减弱甚至转变为抑制作用。DOM 对有机污染物的降解效率与 DOM 结构组成显著相关，研究表明，与腐殖酸相比，富里酸更能促进 β -雌二醇类有机污染物的光降解性能^[120]，由于富里酸结构中含有大量酚羟基、羰基等基团，具有更高的极性指数和芳香结构含量差异，这些结构特性使得富里酸在光照条件下能够产生更多的活性氧物种，这些活性氧物种对 β -雌二醇类有机污染物的降解起到了关键作用。进一步研究表明，光照条件下 DOM 诱导的活性氧物种可促进酚类和磺胺类污染物的降解，在酚类化合物、磺胺类药物和阿莫西林等污染物的光降解过程， $^1\text{O}_2$ 的贡献为 0.03%~0.08%， $\cdot\text{OH}$ 的贡献为 10%~20%，而 $^3\text{DOM}^*$ 的贡献占到 40%~74%^[121]。杨欣等^[122]在研究中表明，DOM 不仅有光屏蔽和淬灭自由基的作用，还能够通过还原污染物中间体来阻碍有机污染物的降解性能。此外，光源类型也是影响 DOM 存在条件下有机污染物降解效率的重要因素。Peng 等^[123]研究发现，在 UV-Vis 辐照下（ $\lambda>200\text{ nm}$ ），DOM 抑制了普萘洛尔类污染物的光降解性能，而在模拟太阳辐照下（ $\lambda>290\text{ nm}$ ），DOM 可促进其光降解效能。湖泊水体 pH 可改变 DOM 分子团聚特性和结构组成，进而影响 DOM 产生活性反应中间体的浓度^[124]。张亚楠等^[125]的研究揭示，DOM 存在条件下四环素的光解速率常数随着溶液酸碱度的增加而上升。DOM 含有的大量含氧官能团及芳香官能团在光照条件下可生成苯氧自由基，这些自由基可与四环素发生络合作用。在碱性环境下，四环素对活性氧的敏感性增强，从而提高了其反应效率和光降解效能^[126]。

4.4 DOM 影响微生物多样性

微生物是湖泊生态系统重要的生产者和分解者，参与湖泊生态系统能量传递及碳、氮、磷等生源要素循环^[127-128]。DOM 的性质（浓度、结构组成）和环境条件可显著影响微生物多样性，如高钙环境下微生物优先利用异源 DOM，进而促进具有特定降解能力的微生物（如放线菌门、 γ -变形菌门）生长^[129]。Song 等^[130]发现，陆源输入 DOM 可为微生物提供营养源，有利于维持微生物的多样性；而微源 DOM 输入因含有抑制藻类生长的物质，会导致微生物群落的不稳定。DOM 分子的 H/C 也会影响微生物种类，低 H/C 比（ <1.5 ）的 DOM 分子与寡营养型微生物（如 α -变形菌）呈正相关，而高 H/C 比（ >1.5 ）的分子易被富营养型菌群（如拟杆菌门）快速利用^[131]。关于 DOM 浓度对微生物多样性的影响，研究表明一定的 DOM 浓度有利于维持微生物的多样性^[132]，而高 DOM 输入可能导致水体缺氧，促进厌氧微生物（如甲烷菌和硫酸盐还原菌）的增殖^[131]，并改变微生物群落的平衡^[108]。

4.5 DOM 影响营养元素循环和富营养化过程

DOM 通过多种途径影响营养元素循环和藻类生长，如蓝藻衍生的 DOM 直接为浮游藻类提供关键营养源造成藻类水华的爆发。此外，DOM 中的腐殖质可通过络合作用调节微量元素 Mn 的生物可利用性，而 Si 的循环也可能因 DOM 介导的吸附过程发生改变，进而影响硅藻等依赖硅的藻类群落^[133]。另一方面，外

源输入的DOM富含蛋白类荧光物质（如色氨酸类似物），这种DOM的输入会提高下游水体的N、P负荷，加剧富营养化风险，同时其高生物可利用性可促进异养微生物活动，间接影响藻类竞争^[134]。

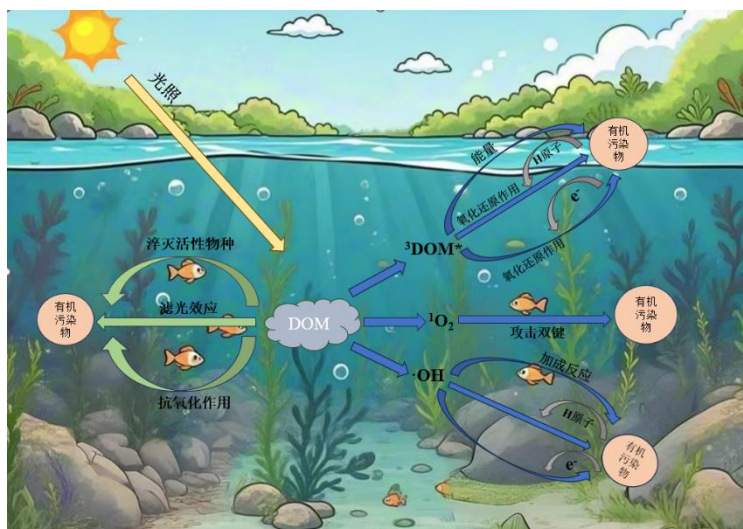


图 5 DOM 对有机污染物降解的作用示意图

Fig.5 Schematic diagram of the effect of DOM on the degradation of organic pollutants

5 结论与展望

本文系统综述了湖泊 DOM 的来源和结构组成及分子量表征技术，阐明了湖泊 DOM 的吸附、降解、离子结合及产生活性氧物种等行为特征及机理，揭示了湖泊 DOM 对金属污染物生物有效性、胶体颗粒分散/团聚性能及有机污染物降解的影响及机理，主要结论如下：

（1）不同湖泊水体 DOM 含量存在着显著差异性，该差异受地貌、气候、水文条件、流域特征及人类活动等多种多重因素的影响。整体上看，青藏高原湖区、蒙新湖区和东北湖区 DOC 含量较高，而东部湖区和云贵湖区 DOC 含量较低。

（2）通过紫外-可见吸收光谱、三维荧光光谱、核磁共振光谱、红外光谱、FT-ICR-MS 等技术可表征湖泊 DOM 的来源、性质及分子结构组成；通过体积排阻色谱、超过滤及 FIFFF 等技术可表征湖泊 DOM 的分子量分级及连续分布特征。

（3）湖泊 DOM 具有吸附、光降解、微生物降解、离子结合及产生活性氧物种等行为特征，这些特征与 DOM 的来源、结构组成及分子量分布息息相关。

（4）湖泊 DOM 的多官能团和多活性位点特征可影响重金属的生物有效性、胶体颗粒的分散/团聚潜势、有机污染物的降解及湖泊微生物的多样性，进而影响湖泊水体质量及生态系统健康。

尽管我们对湖泊 DOM 行为及生态环境效应领域的研究已取得了一定的积累，但随着全球气候变化及人类活动的不断加剧，湖泊 DOM 的行为特征及生态环境效应也在不断变化过程中。所以，在未来研究中，关于湖泊 DOM 的探讨可重点关注以下几个方面：

（1）湖泊 DOM 分子结构组成表征技术。应研发更高效更精密的光谱和质谱联合表征技术，解析湖泊 DOM 的微观结构组成及其在环境条件下的变化特征。研发湖泊 DOM 分子量连续分布表征技术，实现对湖泊 DOM 的动态精确监测。研发基于人工智能的 DOM 解析技术，如采用深度学习算法整合质谱和光谱等多源数据，有望突破传统方法在复杂 DOM 分子识别与动态预测方面的瓶颈。

（2）多因素环境条件下湖泊 DOM 行为及效应。目前关于湖泊 DOM 行为及效应的研究多关注单因素影响，如 pH、离子强度、离子种类、光照等。但是，实际环境条件下往往是多种因素共同作用的结果，不同因素对湖泊 DOM 行为效应具有协同或拮抗作用。未来研究中，应注重环境条件下多因素共同作用下湖泊 DOM 行为及生态环境效应的特征及机理。

（3）聚焦未来气候变化背景下 DOM 行为效应研究。可重点关注极端气候事件下 DOM 迁移转化路径

的重构、冻土消融下 DOM 的碳归趋、DOM 对温室气体排放的影响等。

致谢:

国家重点研发计划项目 (2023YFC3208900, 2023YFC3208902), 国家自然科学基金 (52479079, 52300224), 江苏省社发项目 (BE2023846), 青海省自然科学基金 (2024-ZJ-936)。

6 参考文献

- [1] Li YN, Xu HC, Jiang HL. Molecular weight distribution, fluorescence characteristics and effects on heavy metal distribution of dissolved organic matter in Poyang Lake. *Journal of Lake Science*, 2020, **32**(4): 1029-1040. [李雅妮, 徐华成, 江和龙. 鄱阳湖水体溶解有机质分子量分布、荧光特征及对重金属分布的影响. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1029-1040.]
- [2] Rochelle-Newall EJ, Fisher TR. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 23-41. DOI: 10.1016/S0304-4203(01)00073-1.
- [3] Zhu DD, Yu BC, Wang Y *et al.* Distribution and ecological risk assessment of mercury and methylmercury in sediments from multiple ecotypes of Lake Taihu. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 1-18[2025-03-24]. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0609. [朱冬冬, 俞博超, 王燕等. 太湖多生态类型湖区沉积物汞和甲基汞的分布与生态风险评价. 生态与农村环境学报, 1-18[2025-03-24].]
- [4] Guo Y, Zhou QH, Wang P *et al.* Progress on the mechanism of carbon storage in inland waters. *Journal of Water Ecology*, 2023, **44**(04): 141-150. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202109220332. [郭瑶, 周巧红, 王培等. 内陆水体储碳作用机制研究进展. 水生态学杂志, 2023, **44**(04): 141-150.]
- [5] Hu B, Wang PF, Bao TL *et al.* The photochemical release of dissolved organic matter from resuspended sediments: Insights from fluorescence spectroscopy. *Chemosphere*, 2020, **257**: 127161. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127161.
- [6] Véronique PH, Caren B, Todd EH. Dissolved organic matter quantity and quality in Lake Simcoe compared to two other large lakes in southern Ontario. *Inland Waters*, 3: 2, 139-152, DOI: 10.5268/IW-3.2.535.
- [7] Shen ZY, Gong XF, Jiang L *et al.* The fluorescence region integration method was used to analyze the composition and source of DOM in Poyang Lake. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(05): 196-203. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.05.029. [申钊颖, 弓晓峰, 江良等. 利用荧光区域积分法解析鄱阳湖 DOM 组成及来源. 环境科学与技术, 2019, **42**(05): 196-203.]
- [8] Wang SH, Shi XH, Zhao SN *et al.* Optical characteristics and source analysis of dissolved organic matter in hypersaline lakes in cold and arid regions. *Environmental Science*, 2024, **45**(11): 6574-6582. DOI: 10.13227/j.hjxx.202311148. [王世欢, 史小红, 赵胜男等. 寒旱区高盐湖泊溶解性有机质的光学特征及来源解析. 环境科学, 2024, **45**(11): 6574-6582.]
- [9] Gao JT, Tang SK, Liu WL *et al.* Seasonal variations of DOM spectral characteristics and sources of different types of lakes. *Environmental Science*, 1-12[2024-12-09]. DOI: 10.13227/j.hjxx.202401265 [高静湑, 汤世科, 刘文理等. 不同类型湖泊 DOM 光谱特征及来源的季节性变化. 环境科学, 1-12]
- [10] Wei GR, Song ZH, Guan XH *et al.* Characterization analysis and environmental effects of dissolved organic matter in water bodies. *Environmental Engineering*, 2024, **42**(9): 74-90. DOI: 10.13205/j.hjgc.202409007. [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. 环境工程, 2024, **42**(9): 74-90.]
- [11] 何歆逸, 姚倩倩, 焦伟等. 水体中天然有机物与新污染物的相互作用及环境影响研究进展. 环境科技, 2024, **37**(4): 65-69+74.
- [12] Cai BC, Hu XF, Li YJ *et al.* Progress in the photochemical generation of chlorinated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the aqueous environment and the factors affecting them. *Environmental Chemistry*, 2024, **43**(10): 3459-3469. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2023050901. [蔡北川, 胡学锋, 李昱洁等. 水环境中氯代多环芳烃的光化学生成及影响因素研究进展. 环境化学, 2024, **43**(10): 3459-3469.]
- [13] Song KS, Shang YX *et al.* Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis. *Water Research*, 2019, **15**: 403-417. DOI: 10.1016/j.watres.2018.12.004.
- [14] Zhang PL, Zhang HX, Huo SL *et al.* Bacterial diversity and DOM composition distribution in lakes with different salinity levels on Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(5): 158-168. DOI: 10.13671/j.hjxxb.2023.0353[张佩莲, 张含笑, 霍守亮等. 青藏高原不同盐度湖泊细菌群落多样性及 DOM 分布特征. 环境科学学报, 2024, **44**(5): 158-168.]
- [15] Zhang Y, Wang J, Tao J *et al.* Concentrations of dissolved organic matter and methane in lakes in southwest China: Different roles

- of external factors and in-lake biota. *Water Research*, 2022, **225**: 119190. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119190.
- [16] Yang DT, Chen WM. Spatial and temporal distribution of soluble organic carbon in lakes of the lower Yangtze River. *Environmental Pollution and Prevention*, 2004, (04): 275-277+323. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2004.04.01. [杨顶田, 陈伟民. 长江下游湖泊中可溶性有机碳的时空分布. 环境污染与防治, 2004, (04): 275-277+323.]
- [17] Jiang XT, Xiao QT, Li YM *et al.* Spatial and temporal effects of riverine inputs on the composition of dissolved organic matter in Lake Bosten. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, **43**(05): 1636-1644. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2023)05-1636-09. [蒋昕桐, 肖启涛, 李一民等. 河流输入对博斯腾湖溶解性有机物组成的时空影响. 光谱学与光谱分析, 2023, **43**(05): 1636-1644.]
- [18] Sobek S, Tranvik LJ *et al.* Patterns and regulation of dissolved organic carbon: An analysis of 7500 widely distributed lakes, *Limnology & Oceanogra*, 2007, **52**(3): 1208-1219. DOI: 10.4319/lo.2007.52.3.1208.
- [19] Kolic PE, Roy ED, White JR *et al.* Spectroscopic measurements of estuarine dissolved organic matter dynamics during a large-scale Mississippi River flood diversion. *Science of the Total Environment*, 2014, **485**: 518-527. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.03. 121.
- [20] Helms JR, Stubbins A, Ritchie JD *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*, 2009, **53**(3): 955-969. DOI: 10.4319/lo.2008.53.3.0955.
- [21] Fichot CG, Benner R. The spectral slope coefficient of chromophoric dissolved organic matter ($S_{275-295}$) as a tracer of terrigenous dissolved organic carbon in river-influenced ocean margins. *Limnology and Oceanography*, 2012, **57**(5): 1453-1466. DOI: 10.4319/lo.2012.57.5.1453.
- [22] Huguet A, Vacher L, Relexans S *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2009.03.002.
- [23] 姚顺春, 黎珈彤, 郭松杰等. 光谱诊断技术在氨燃烧组分测量中的研究进展. 洁净煤技术, 1-16.
- [24] Ao J, Wang T, Chang RY. Application of three-dimensional fluorescence spectrometry in the analysis of soil dissolved organic matter fractions. *Soil Bulletin*, 2022, **53**(03): 738-746. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021072302. [敖静, 王涛, 常瑞英. 三维荧光光谱法在土壤溶解性有机质组分解析中的应用. 土壤通报, 2022, **53**(03): 738-746.]
- [25] Wu DM, He CC, Deng X *et al.* Research progress on component separation and characterization technology of soil dissolved organic matter, *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2022, **47**(02): 48-55. DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2022.02.011. [吴东明, 何翠翠, 邓晓等. 土壤溶解性有机质的组分分离与表征技术研究进展. 东北农业科学, 2022, **47**(02): 48-55.]
- [26] Minor EC, Swenson MM, Mattson BM *et al.* Structural characterization of dissolved organic matter: a review of current techniques for isolation and analysis. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2014, **16**(9): 2064-2079. DOI: 10.1039/c4em00062e.
- [27] Liu SS, Zhang B, Li XY *et al.* Research progress on the application of machine learning in environmental analysis and testing. *Journal of Analytical Testing*, 2024, **43**(08): 1105-1116. DOI: 10.12452/j.fxcxb.24052775. [刘思思, 张波, 李星颖等. 机器学习在环境分析检测中的应用研究进展. 分析测试学报, 2024, **43**(08): 1105-1116.]
- [28] Wang GF, Ma TC, Liu ML. New progress in the application of nuclear magnetic resonance spectroscopy in analytical chemistry. *Journal of Chemistry*, 2012, **70**(19): 2005-2011. DOI: 10.6023/A12060339. [王桂芳, 马廷灿, 刘买利. 核磁共振波谱在分析化学领域应用的新进展. 化学学报, 2012, **70**(19): 2005-2011.]
- [29] 阮驰驰. CNCs/SiO₂ 气凝胶制备及其对水中污染物的吸附研究[学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- [30] Yu GH, Tang Z, Xu YC *et al.* Multiple fluorescence labeling and two dimensional FTIR-¹³C NMR heterospectral correlation spectroscopy to characterize extracellular polymeric substances in biofilms produced during composting, 2011, **45**(21): 9224-9231. DOI: 10.1021/es201483f.
- [31] Li CW, Yu HB, Yang F *et al.* SFS and FTIR two-dimensional correlation spectroscopy were used to study the composition and spatial differentiation characteristics of DOM in water. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, **40**(07): 2005-2010. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)07-2005-06. [李崇蔚, 于会彬, 杨芳等. 应用 SFS 与 FTIR 二维相关光谱研究水体中 DOM 组成结构及空间分异特征. 光谱学与光谱分析, 2020, **40**(07): 2005-2010.]
- [32] Fan TT, Yao X, Ren HY *et al.* Multis-pectroscopic investigation of the molecular weight distribution and copper binding ability of

- dissolved organic matter in Dongping Lake, China. *Environmental Pollution*, 2022, **300**: 118931. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.118931.
- [33] Wang C, Li Z, Wei J *et al.* Progress in the study of microplastic sources, ecotoxicological effects and treatment technologies in water. *Journal of Environmental Engineering and Technology*, 2023, **13**(05): 1883-1892. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20221121. [王成, 李哲, 魏健等. 水中微塑料来源、生态毒理效应及处理技术研究进展. 环境工程技术学报, 2023, **13**(05): 1883-1892.]
- [34] Zhang PL, Zhang HX, Huo SL *et al.* Research progress on the interaction between lake microorganisms and dissolved organic matter. *Environmental Monitoring in China*, 2024, **40**(05): 171-178. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2024.05.18. [张佩莲, 张含笑, 霍守亮等. 湖泊微生物与溶解有机质相互作用关系研究进展. 中国环境监测, 2024, **40**(05): 171-178.]
- [35] Wu HH, Gao SJ, Liu TT *et al.* Research progress on traceability and characterization of dissolved organic matter in water environment. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, **14**(02): 474-486. [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. 环境工程技术学报, 2024, **14**(02): 474-486.]
- [36] Liu SS, He ZQ, Tang Z *et al.* Linking the molecular composition of autochthonous dissolved organic matter to source identification for freshwater lake ecosystems by combination of optical spectroscopy and FT-ICR-MS analysis. *The Science of the total environment*, 2020, **703**(0): 134764. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134764.
- [37] Xu W, Gao Q, He C *et al.* Using ESI FT-ICR MS to characterize dissolved organic matter in salt lakes with different salinity. *Environmental Science And Technology*, 2020, **54**(20): 12929-12937. DOI: 10.1021/acs.est.0c01681.
- [38] Feng S, Zhang L, Wang S *et al.* Characterization of dissolved organic nitrogen in wet deposition from Lake Erhai basin by using ultrahigh resolution FT-ICR mass spectrometry. *Chemosphere*, 2016, **156**(0): 438-445. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.04.039.
- [39] Cui ML, Lan J. Size exclusion chromatography/asymmetric field-flow separation coupled with multi-angle light scattering to characterize macromolecules. Wuhan: The 11th National Symposium on Molecular and Structural Characterization of Polymers, 2018.
- [40] 斯文婷. 密闭空间低浓度 CO₂ 固态胺材料的吸附性能及其构效关系[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [41] Chen XS, Jiang T, Lu S *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristics of different molecular weight components of DOM in the subsidence zone of the Three Gorges Reservoir area. *Environmental Science*, 2016, **37**(03): 884-892. DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.03.012. [陈雪霜, 江韬, 卢松等. 三峡库区消落带水体 DOM 不同分子量组分三维荧光特征. 环境科学, 2016, **37**(03): 884-892.]
- [42] 苏保卫. 克林霉素磷酸酯乙醇水溶液的纳滤浓缩及其传递特性的研究[学位论文]. 天津: 天津大学, 2004.
- [43] Lan Y, Geng AC, Geng C *et al.* Experimental study on the purification of coal mine water by non-submerged ultrafiltration technology. *Industrial Water Treatment*, 2024, **44**(04): 179-186. DOI: 10.19965/j.cnki.iwt.2023-0190. [兰莹, 耿安朝, 耿策等. 非浸没式超滤技术净化处理煤矿井水的试验研究. 工业水处理, 2024, **44**(04): 179-186.]
- [44] Xu HC, Guo LD. Molecular size-dependent abundance and composition of dissolved organic matter in river, lake and sea waters. *Water Research*, 2017, **117**(0): 115-126. DOI: 10.1016/j.watres.2017.04.006.
- [45] Huber SA, Balz A, Abert M *et al.* Characterisation of aquatic humic and non-humic matter with size-exclusion chromatography-organic carbon detection-organic nitrogen detection(LC-OCD-OND). *Water Research*, 2011, **45**(2): 879-885. DOI: 10.1016/j.watres.2010.09.023.
- [46] Bagtho SA, Sharma SK, Guitard M *et al.* Removal of NOM-constituents as characterized by LC-OCD and F-EEM during drinking water treatment. *Journal of water supply Research and technology-Aqua*, 2020, **60**(7): 412-424. DOI: 10.2166/aqua.2011.059.
- [47] Yuan B, Guo MJ, Zheng X *et al.* Molecular weight classification characterization of dissolved organic matter in the Bahe River Basin and its correlation with water quality. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(11): 3773-3782. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201811.015. [袁博, 郭梦京, 郑兴等. 灞河流域溶解性有机质分子量分级表征及其与水质的相关性. 应用生态学报, 2018, **29**(11): 3773-3782.]
- [48] Fu XW, Pan JZ, Xu HC. Characterization and modification of the molecular weight distribution within dissolved organic matter using flow field-flow fractionation. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2020, **18**(10): 560-569. DOI: 10.1002/lom3.10384.

- [49] Kellerman AM, Kothawala DN, Dittmar T *et al.* Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(6): 454-457. DOI: 10.1038/ngeo2440.
- [50] Bai LL, Cao CC, Wang CH *et al.* Toward quantitative understanding of the bioavailability of dissolved organic matter in freshwater lake during cyanobacteria blooming. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(11): 6018-6026. DOI: 10.1021/acs.est.7b00826.
- [51] Yu B, He J *et al.* Characterization of lake DOM binding with heavy metal ions based on aquatic plant partitioning. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2015, **34**(12): 2343-2348. DOI: 10.11654/jaes.2015.12.013. [于波, 何江等. 基于水生植物分区的湖泊 DOM 与重金属离子的结合特性研究. 农业环境科学学报, 2015, **34**(12): 2343-2348.]
- [52] Philippe A, Schaumann GE. Interactions of Dissolved Organic Matter with Natural and Engineered Inorganic Colloids: A Review. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(16): 8946-8962. DOI: 10.1021/es502342r.
- [53] Wang H, Zhao XL *et al.* Colloidal stability of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles differentially impacted by dissolved organic matter and cations in synthetic and naturally-occurred environmental waters. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 912-921. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.06.029.
- [54] 辛鑫. 不同水质条件下纳米颗粒物的聚集动力学过程研究[学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- [55] Fu R, Liu SS, Suo CY *et al.* Spatiotemporal evolution of lake organic matter related indexes in China from 2008-2022. *China Environmental Science*, 2024, **44**(03): 1426-1435. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231127.011. [付蕊, 刘沙沙, 索诚宇等. 2008~2022 年我国湖泊有机质相关指标时空演变. 中国环境科学, 2024, **44**(03): 1426-1435.]
- [56] Gao YZ, Xiong W, Ling WT *et al.* Impact of exotic and inherent dissolved organic matter on sorption of phenanthrene by soils. *Journal of hazardous materials*, 2007, **140**(1-2): 138-144. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.053.
- [57] Binding CE, Jerome JH, Bukata RP *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(4): 1702-1711. DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.017.
- [58] Liu DW, Du XL, Fu XY *et al.* Binding properties of colloids and dissolved organic compounds in urban surface runoff. *China Environmental Science*, 2022, **42**(08): 3690-3695. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220314.012. [刘殿威, 杜晓丽, 付霄宇等. 城市地表径流胶体与溶解性有机物结合特性. 中国环境科学, 2022, **42**(08): 3690-3695.]
- [59] Sun WJ, Liu TM, Hou MF *et al.* Dissolved organic matter affects the biological effects of organic pollutants in aquatic environments. *Journal of Earth Environment*, **15**(5): 742-758. DOI: 10.7515/JEE231013. [孙炜钧, 刘天明, 侯梅芳等. 水体中溶解有机质对有机污染物生物效应的影响. 地球环境学报, **15**(5): 742-758.]
- [60] Wu L, Liu XY, Li XL *et al.* Photolytic effects of nitrocellulose membrane degradation on acetaminophen under photoexcitation. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(06): 1432-1439. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.02.31 *et al.* [武俐, 刘兴勇, 李啸林等. 光激发下硝酸纤维素膜降解对乙酰氨基酚的光解影响. 环境科学研究, 2022, **35**(06): 1432-1439.]
- [61] Liu YH, Li W, Han JG. Effect of Fe(III) on the photochemical activity of dissolved organic matter from different sources. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(11): 2563-2572. DOI: 10.11654/jaes.2019-0411. [刘砚弘, 李威, 韩建刚. Fe(III)对不同来源溶解性有机质的光化学活性的影响. 农业环境科学学报, 2019, **38**(11): 2563-2572.]
- [62] 员乐. 城镇化背景下湖泊溶解性有机物特征及光化学活性构效关系研究[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [63] Liu JS, Zhu CY, Zhu FX *et al.* Strong Substance Exchange at Paddy Soil-Water Interface Promotes Nonphotochemical Formation of Reactive Oxygen Species in Overlying Water. *Environmental Science & Technology*, 2024, **58**(17): 7403-7414. DOI: 10.1021/acs.est.3c10866.
- [64] Cory RM, McNeill K, Cotner JP *et al.* Singlet oxygen in the coupled photochemical and biochemical oxidation of dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(10): 3683-3689. DOI: 10.1021/es902989y.
- [65] Chen N, Huang DY, Zeng Y *et al.* Long-term application of agricultural amendments regulate hydroxyl radicals production during oxygenation of paddy soils. *Environmental Science & Technology*, 2024, **58**(30): 13509-13520. DOI: 10.1021/acs.est.4c03917.
- [66] 李会杰. 腐殖酸和富里酸的提取与表征研究[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [67] Tao H, Yu D, Gu Y *et al.* Study on the mechanism of PFOA degradation by Fe²⁺/PMS/UF combination process. *Environmental Science and Technology*, 2023, **36**(02): 24-30. DOI: 10.19824/j.cnki.cn32-1786/x.2023.0017. [陶辉, 于多, 顾颖等. Fe²⁺/PMS/UF 组

合工艺降解 PFOA 的机制研究. 环境科技, 2023, **36**(02): 24-30.]

- [68] Zhao C, Gao SJ, Zhou L *et al.* Dissolved organic matter in urban forestland soil and its interactions with typical heavy metals: a case of Daxing District, Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019, **26**(3): 2960-2973. DOI: 10.1007/s11356-018-3860-7.
- [69] Shi TR, Wu FY, Yu T *et al.* Equilibrium dialysis-multi-spectroscopy to study dissolved organic matter of different molecular weights and its interaction with copper in Taihu Lake. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(11): 2386-2393. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.11.2016032904.[石陶然, 吴福勇, 于涛等. 平衡透析-多种光谱法研究太湖不同分子量溶解性有机质及其与铜的相互作用. 环境化学, 2016, **35**(11): 2386-2393.]
- [70] Zhao C, Wang CC, Li JQ *et al.* Distribution of dissolved organic compounds of different molecular weights in runoff rainwater and their interaction with Cu²⁺. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(04): 757-765. [赵晨, 王崇臣, 李俊奇等. 径流雨水中不同分子量溶解性有机物分布及其与 Cu²⁺相互作用. 环境化学, 2016, **35**(04): 757-765.]
- [71] Ren J, Fan W, Wang X *et al.* Influences of size -fractionated humic acids on arsenite and arsenate complexation and toxicity to *Daphnia magna*. *Water Research*, 2017, **108**: 68-77. DOI: 10.1016/j.watres.2016.10.052.
- [72] 胡书燕. 腐殖酸对重金属的吸附作用及金属竞争吸附特征[学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [73] Jia L, Zhang ZL. Study on the adsorption of humic acid on mixed systems of heavy metal ions such as La³⁺ and Nd³⁺. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2009, **27**(06): 816-821. [贾黎, 张自立. 腐殖酸对 La³⁺, Nd³⁺等重金属离子混合体系吸附的研究. 中国稀土学报, 2009, **27**(06): 816-821.]
- [74] Liu D, Lu K, Yu H *et al.* Applying synchronous fluorescence spectroscopy conjunct second derivative and two-dimensional correlation to analyze the interactions of copper (II) with dissolved organic matter from an urbanized river. *Talanta*, 2021, **235**: 122738. DOI: 10.1016/j.talanta.2021.122738.
- [75] Gasper JD, Aiken GR, Ryan JN. A critical review of three methods used for the measurement of mercury (Hg²⁺)-dissolved organic matter stability constants. *Applied Geochemistry*, **22** (8): 1583-1597. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2007.03.018.
- [76] Wang JM, Huang CP, Allen HE. Modeling heavy metal uptake by sludge particulates in the presence of dissolved organic matter. *Water Research*, 2003, **37**(20): 4835-4842. DOI: 10.1016/j.watres.2003.08.021.
- [77] 翟莹雪. 富里酸与几种金属离子的相互作用及影响因素研究[学位论文]. 西南大学, 2003.
- [78] Besser JM, Brumbaugh WG, Ingersoll CG. Effects of organic amendments on the toxicity and bioavailability of cadmium and copper in spiked formulated sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22** (4): 805-815.
- [79] Shi TR, Wu FY, Yu T *et al.* Effect of molecular weight and concentration gradient on the binding of dissolved organic matter to heavy metals. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(02): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2017.02.001. [石陶然, 吴福勇, 于涛等. 分子量和浓度梯度对溶解性有机质结合重金属的影响. 环境科学与技术, 2017, **40**(02): 1-8.]
- [80] Wufuer R, Liu Y, Pan XL *et al.* Interaction of dissolved organic matter with Hg(II) along salinity gradient in Boston Lake. *Geochemistry International*, 2014, **52**(12): 1072-1077. DOI: 10.1134/S001670291412009X.
- [81] Chen ZY, Zhang YJ, Gao YZ *et al.* Influence of dissolved organic matter on tetracycline bioavailability to an antibiotic-resistant bacterium. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(18): 10903-10910. DOI: 10.1021/acs.est.5b02158.
- [82] Xia XH, Dai ZN, Rabearisoa AH *et al.* Comparing humic substance and protein compound effects on the bioaccumulation of perfluoroalkyl substances by *daphnia magna* in water. *Chemosphere*, 2015, **119**: 978-986. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.09.034.
- [83] Deese RD, LeBlanc MR, Cook RL. Surfactant toxicity to *artemia franciscana* and the influence of humic acid and chemical composition. *Environmental Chemistry*, 2016, **13**(3): 507. DOI: 10.1071/EN15108.
- [84] Gligorovski S, Strekowski R, Barbati S *et al.* Environmental Implications of Hydroxyl Radicals (OH). *Chemical Reviews*, 2015, **115**(24). DOI: 10.1021/cr500310b.
- [85] Christian L, Luc T. Compositional differences between size classes of dissolved organic matter from freshwater and seawater revealed by an HPLC-FTIR system. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(3): 1700-1707. DOI: 10.1021/es203711v.
- [86] Parker KM, Pignatello JJ, Mitch WA. Influence of Ionic Strength on Triplet-State Natural Organic Matter Loss by Energy Transfer

- and Electron Transfer Pathways. *Environmental Science & Technology*, 2013, **49**(19): 10987-10994. DOI: 10.1021/es401900j.
- [87] Xu HC, Guo LD. Molecular size-dependent abundance and composition of dissolved organic matter in river, lake and sea waters. *Water Research*, 2017, **117**: 115-126. DOI: 10.1016/j.watres.2017.04.006.
- [88] Du YX, Zhan YY, Chen TZ *et al.* Photochemical reactivities of dissolved organic matter (DOM) in a sub-alpine lake revealed by EEM-PARAFAC: An insight into the fate of allochthonous DOM in alpine lakes affected by climate change. *Science of the Total Environment*, 2016, **568**: 216-225. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.036.
- [89] Li FF, Xu HC, Jiang HL. Effect of colloidal TiO₂ particles on photodegradation of dissolved organic matter from different sources: based on molecular weight difference analysis. *Journal of Lake Science*, 2021, **33**(04): 1163-1174. [李芳芳, 徐华成, 江和龙. 胶体 TiO₂ 颗粒对不同来源溶解性有机质光降解的影响: 基于分子量差异分析. 湖泊科学, 2021, **33**(04): 1163-1174.]
- [90] Liu X, Wei Y, Li WK *et al.* Effects of photochemical properties of dissolved organic matter in Poyang Lake wetland on seasonal variation of photoactive intermediates (PPRIs) in water. *Journal of Lake Science*, 2024, **36**(03): 807-816. [刘新, 尉艺, 李文康等. 鄱阳湖湿地溶解性有机质的光化学属性对水体光活性中间体(PPRIs)季节性变化的影响. 湖泊科学, 2024, **36**(03): 807-816.]
- [91] Zhang T, Hansel CM, Voelker BM *et al.* Extensive dark biological production of reactive oxygen species in brackish and freshwater ponds. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(6): 2983-2993. DOI: 10.1021/acs.est.5b03906.
- [92] Chen ML, Hur J, Gu JD *et al.* Microbial degradation of various types of dissolved organic matter in aquatic ecosystems and its influencing factors. *Science China-Earth Sciences*, 2023, **66**(2): 169-189. DOI: 10.1007/s11430-021-9996-1.
- [93] Guillemette F, McCallister SL, Giorgio PAD. Selective consumption and metabolic allocation of terrestrial and algal carbon determine allochthony in lake bacteria. *The ISME Journal*, 2015, **10**(6). DOI: 10.1038/ismej.2015.215.
- [94] Guillemette F, McCallister SL, del Giorgio PA. Differentiating the degradation dynamics of algal and terrestrial carbon within complex natural dissolved organic carbon in temperate lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**(3): 963-973. DOI: 10.1002/jgrg.20077.
- [95] Zhou L, Zhou YQ, Tang XM *et al.* Biodegradable dissolved organic carbon shapes bacterial community structures and cooccurrence patterns in large eutrophic Lake Taihu. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **107**: 205-217. DOI: 10.1016/j.jes.2021.02.011.
- [96] Zhang PL, Zhang HX, Huo SL *et al.* Bacterial community diversity and DOM distribution characteristics of lakes with different salinity in the Tibetan Plateau. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(05): 158-168. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0353. [张佩莲, 张含笑, 霍守亮等. 青藏高原不同盐度湖泊细菌群落多样性及 DOM 分布特征. 环境科学学报, 2024, **44**(05): 158-168.]
- [97] Tang G, Zheng X, Liu CX. Microbial metabolism changes molecular compositions of riverine dissolved organic matter as regulated by temperature. *Environmental Pollution*, 2022, **306**: 119416. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119416.
- [98] Fan TT, Yao X, Sang DL *et al.* Composition characteristics and metal binding behavior of macrophyte-derived DOM (MDOM) under microbial combined photodegradation: A state closer to actual macrophytic lakes. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, **465**: 133124. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133124.
- [99] McDonough LK, Andersen MS, Behnke MI *et al.* A new conceptual framework for the transformation of groundwater dissolved organic matter. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 2153. DOI: 10.1038/s41467-022-29711-9.
- [100] Zhang YL, Yang KL, Chen HM *et al.* Origin, composition, and accumulation of dissolved organic matter in a hypersaline lake of the Qinghai-Tibet Plateau. *Science of The Total Environment*, 2023, **868**: 161612. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161612.
- [101] Ma JB, Liu SW, Wang B *et al.* Research Progress on the Effect of Dissolved Organic Matter on the Environmental Behavior of Cadmium in the Environmental Remediation. *Rock and Mineral Analysis*, 2025, **44**(3): 1-14. DOI: 10.15898/j.ykcs.202406180134. [马嘉宝, 刘斯文, 王博等. 环境修复过程中溶解性有机质对镉环境行为影响研究进展. 岩矿测试, 2025, **44**(3): 1-14.]
- [102] Yao YR, Ma K, Li SY *et al.* Dissolved organic matter and Fe/Mn enhance the combination and transformation of As in Lake Chaohu Basin. *Journal of Environmental Management*, 2024, **340**: 119425. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119425.
- [103] Gaberell M, Chin YP, Hug SJ *et al.* Role of dissolved organic matter composition on the photoreduction of Cr(VI) to Cr(III) in the presence of iron. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(19): 4403-4409. DOI: 10.1021/es034261v.
- [104] 胡释尹. 不同分子量的 DOM 对蛋白核小球藻(活体)富集 Cu 和 Pb 行为的影响[学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.

- [105] Gao YF, Zhu JX, He A. Effect of dissolved organic matter on the bioavailability and toxicity of cadmium in zebrafish larvae: Determination based on toxicokinetic-toxicodynamic processes. *Water Research*, 2022, **226**: 119272. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119272.
- [106] Ding WQ, He JH, Liu XM *et al.* Study on the influence mechanism of organic matter on soil colloidal particle agglomeration in the water body of the Three Gorges Reservoir area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(04): 166-171. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.04.027. [丁武泉, 何家洪, 刘新敏等. 有机质对三峡库区水体中土壤胶体颗粒凝聚影响机制研究. 水土保持学报, 2017, 31(04): 166-171.]
- [107] Xu HC, Lin H, Jiang HL *et al.* Dynamic molecular size transformation of aquatic colloidal organic matter as a function of pH and cations. *Water Research*, 2018, **144**: 543-552. DOI: 10.1016/j.watres.2018.07.075.
- [108] 张杭君, 汪美贞, 袁霞. 环境生态工程导论. 北京: 化学工业出版社, 2024.
- [109] Yan CR, Li Y *et al.* Influence of dissolved organic matter, kaolinite, and iron oxides on aggregation and transport of biochar colloids in aqueous and soil environments. *Chemosphere*, 2022, **306**: 13555. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135555.
- [110] Zehlke L, Peters A, Ellerbrock RH *et al.* Aggregation of TiO₂ and Ag nanoparticles in soil solution - Effects of primary nanoparticle size and dissolved organic matter characteristics. *Science of The Total Environment*, 2019, **688**: 288-298. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.020.
- [111] Allouni ZE, Cimpan MR, Hol PJ *et al.* Agglomeration and sedimentation of TiO₂ nanoparticles in cell culture medium. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2009, **68**(01): 83-87. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2008.09.014.
- [112] Dai H, Han T, Cui J *et al.* Stability, aggregation, and sedimentation behaviors of typical nano metal oxide particles in aqueous environment. *Journal of environmental management*, 2022, **316**: 115217. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115217.
- [113] Yue LY. Monitoring and research of organic pollutants in the water environment. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2020, **38**(04): 159-162. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2020.04.045. [岳凌云. 水环境中有机污染物的监测研究. 中国资源综合利用, 2020, 38(04): 159-162.]
- [114] 黄伟杰, 刘学智, 唐红亮等. 水环境中持久性有机污染物污染现状及处理技术简析. 广东化工, 2021, **48**(20): 181-183.
- [115] Li C, Yang LL, Shi MW *et al.* Persistent organic pollutants in typical lake ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **180**: 668-678. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.05.060.
- [116] Canonica S, Hellrung B, Wirz J. Oxidation of phenols by triplet aromatic ketones in aqueous solution. *Journal of Physical Chemistry*, 2000, **104**(6): 1226-1232. DOI: 10.1021/jp9930550.
- [117] Ren D, Huang B, Pan XJ. Photodegradation of 17 α -ethynylestradiol in dissolved humic substances solution: Kinetics, mechanism and estrogenicity variation. *Journal of environmental sciences*, 2017, **54**: 196-205. DOI: 10.1016/j.jes.2016.03.002.
- [118] Davis CA, Erickson PR, McNeill K *et al.* Environmental photochemistry of fenamate NSAIDs and their radical intermediates. *Environmental Science-Process&Impacts*, 2017, **16**(5): 656-665. DOI: 10.1039/c7em00079k.
- [119] Ren ZG, Zhang HY, Wang YW *et al.* Multiple roles of dissolved organic matter released from decomposing rice straw at different times in organic pollutant photodegradation. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **401**: 123434. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123434.
- [120] Ren D, Chen F, Pu HY *et al.* Photochemical behavior of dissolved organic matter and its environmental effects. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(05): 563-572. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0319. [任东, 陈芳, 蒲红玉等. 溶解有机质的光化学行为及其环境效应. 生态与农村环境学报, 2019, 35(05): 563-572.]
- [121] Xu HM, Cooper WJ, Jung J *et al.* Photosensitized degradation of amoxicillin in natural organic matter isolate solutions. *Water Research*, 2011, **45**(2): 632-638. DOI: 10.1016/j.watres.2010.08.024.
- [122] Zhao GR, Hai Z, Yun W. Multiple roles of dissolved organic matter released from decomposing rice straw at different times in organic pollutant photodegradation. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **401**: 123434. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123434.
- [123] Peng N, Wang KF, Liao PP *et al.* Dual roles of fulvic acid on the photodegradation of propranolol under different light-source irradiation. Tokyo: 1st International Conference on Environment Prevention and Pollution Control Technology (EPPCT), 2018.
- [124] Baena-Nogueras RM, González-Mazo E, Lara-Martín PA. Degradation kinetics of pharmaceuticals and personal care products in

- surface waters: photolysis vs biodegradation. *Science of the Total Environment*, 2017, **590**: 643-654. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.015.
- [125] Zhang YN, Zhao JC *et al.* Combined effects of dissolved organic matter, pH, ionic strength and halides on photodegradation of oxytetracycline in simulated estuarine waters. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2019, **21**(1): 155-162. DOI: 10.1039/c8em00473k.
- [126] Zhang X, Liu YF, Liu Q *et al.* Dissolved Black Carbon Enhanced the Photodegradation of Tetracycline in Aqueous Solution. *Environmental Chemistry*, 2023, **42**(6): 2064-2075.
- [127] Kirchman DL. Microbial proteins for organic material degradation in the deep ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, **115**(3): 445-447. DOI: 10.1073/pnas.1720765115.
- [128] Bleyen N, Hendrix K, Moors H *et al.* Biodegradability of dissolved organic matter in boom clay pore water under nitrate-reducing conditions: Effect of additional C and P sources. *Applied Geochemistry*, 2018, **92**: 45-58. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.02.005.
- [129] Xia F, Liu ZH, Zhang YL *et al.* Calcium regulates the interactions between dissolved organic matter and planktonic bacteria in Erhai Lake, Yunnan Province, China. *Water Research*, 2024, **261**: 121982. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121982.
- [130] Song YY, Cao XH, Li SA *et al.* Human activities-impacted lake dissolved organic matter (DOM) affects phycosphere microbial diversity and DOM diversification via carbon metabolism. *Journal of Environmental Management*, 2024, **367**: 122011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122011.
- [131] Hu A, Choi M, Tanentzap AJ *et al.* Ecological networks of dissolved organic matter and microorganisms under global change. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 3600. DOI: 10.1038/s41467-022-31251-1.
- [132] Kajan K, Osterholz H, Stegen J *et al.* Mechanisms shaping dissolved organic matter and microbial community in lake ecosystems. *Water Research*, 2023, **245**: 120653. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120653.
- [133] Shi LM, Huang YX, Lu YP *et al.* Stocks and dynamics of particulate and dissolved organic matter in a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) with dense cyanobacterial blooms. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, **36**: 738-749. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00343-018-7031-y>.
- [134] Ryan KA, Palacios LC, Encina F *et al.* Assessing inputs of aquaculture-derived nutrients to streams using dissolved organic matter fluorescence. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**(2): 150785. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150785.