

沉水植物对湖泊溶解性有机物的影响——以武汉东湖为例

符洪铭 郑冰清 孙彩云 吴振斌 李亮 王培

THE IMPACT OF SUBMERGED AQUATIC MACROPHYTES ON DISSOLVED ORGANIC MATTER IN LAKES: A CASE STUDY OF DONGHU LAKE IN WUHAN

FU Hong-Ming, ZHENG Bing-Qing, SUN Cai-Yun, WU Zhen-Bin, LI Liang, WANG Pei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2025.2024.0503>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

刚毛藻腐烂过程中溶解性有机物的释放和细菌群落的变化

DISSOLVED ORGANIC MATTER RELEASE AND BACTERIAL COMMUNITY SHIFTS DURING THE DECOMPOSITION OF *CLADOPHORA*

水生生物学报. 2023, 47(1): 80–91 <https://doi.org/10.7541/2022.2021.0309>

不同功能型沉水植物对溶解氧影响及环境效应

DIFFERENT FUNCTIONAL TYPES OF SUBMERGED MACROPHYTES ON DISSOLVED OXYGEN AND ITS ENVIRONMENTAL EFFECTS

水生生物学报. 2024, 48(2): 232–241 <https://doi.org/10.7541/2023.2023.0130>

贵州草海沉水植物现状调查与影响因素分析

Investigation of submerged macrophytes current situation and analysis of influence factors in Caohai, Guizhou

水生生物学报. 2024, 48(12): 2042–2054 <https://doi.org/10.7541/2024.2024.0161>

富营养化和渔业生产对保安湖沉水植物群落演替的影响

IMPACTS OF EUTROPHICATION AND FISHERY PRODUCTION ON THE SUCCESSION OF SUBMERGED MACROPHYTES IN BAO' AN LAKE

水生生物学报. 2023, 47(11): 1769–1777 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0390>

内源营养负荷对4种常见沉水植物生长、形态和资源分配策略的影响

INTERNAL NUTRIENT LOAD ON THE GROWTH, MORPHOLOGY, AND RESOURCE ALLOCATION STRATEGIES OF FOUR COMMON SUBMERGED PLANTS

水生生物学报. 2024, 48(3): 426–435 <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0152>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2025.2024.0503

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0503

沉水植物对湖泊溶解性有机物的影响——以武汉东湖为例

符洪铭^{1,2} 郑冰清^{2,3} 孙彩云^{2,3} 吴振斌² 李亮^{1*} 王培^{2*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541006; 2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 3. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要: 为探究沉水植物水生态修复对湖泊水体碳循环的影响, 以武汉东湖沉水植物水生态修复区和未修复区作为研究对象, 采用傅里叶变换离子回旋共振质谱(Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry, FT-ICR-MS)技术对比沉水植物水生态修复区与未修复区水体溶解性有机质(Dissolved Organic Matter, DOM)的化学多样性, 揭示沉水植物对水体DOM稳定性的影响。结果表明, 沉水植物水生态修复显著改善水体理化性质的同时改变了DOM分子的化学多样性。修复区与未修复区分别含有7814和7282种DOM分子, 其中修复区特有的1768种, 主要以CHO、CHON和CHOP类型为主; 未修复区特有的1236种, 主要以CHO和CHON类型为主。进一步分析发现, 修复区含P元素相对难降解的DOM分子类型(CHOP、CHONP、CHOPS和CHONPS)是未修复区的1.4—2.29倍且强还原态的DOM含量更高, 表明修复区DOM在热力学上比未修复区更稳定。综上所述, 沉水植物不仅改变了水体DOM分子组成, 同时提高了水体难降解DOM分子丰度。研究将有利于加深湖泊稳态碳转换过程对水体碳循环影响的认识, 为未来准确评估湖泊的碳汇潜力提供科学依据。

关键词: 水生态修复; 沉水植物; DOM; FT-ICR-MS; 化学多样性; 稳定性

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)07-072515-10



沉水植物作为初级生产者在湖泊生态系统中发挥着关键作用, 一方面其通过吸收水体的氮磷营养盐能有效减缓水体富营养化进程^[1]。边园琦等^[2]对莫愁湖的研究发现, 沉水植物对湖泊水体氮、磷的去除率分别达到79.9%和48%。对沉积物中氮、磷去除量可达到1136和387 mg/(kg·a)^[3]。另一方面其通过光合作用能将水体溶解氧浓度提高2—4 mg/L, 为水生生物提供适宜的生存环境^[4]。此外, 沉水植物通过改善湖泊生态环境和增强微生物碳泵机制能减少湖泊温室气体排放^[5]。郑冰清等^[6]的研究表明, 沉水植物能使湖泊水体的水气界面CO₂通量下降165%。因此, 当前研究主要集中在沉水植物对水体净化和温室气体排放等方面, 但对水体

DOM影响的研究相对较少。

沉水植物与湖泊DOM的组成和动态变化密切相关。Gracea等^[7]的研究表明, 沉水植物的根系能减少因水流冲刷而造成的沉积物再悬浮, 进而降低湖泊底泥中DOM的释放。此外, 沉水植物能够通过改变湖泊的微生态环境, 提高微生物碳、氮和硫转化相关功能基因的相对丰度^[8]。沉水植物产生的化感物质能够抑制藻类的生长, 从而改变湖泊内源有机质的来源。Wang等^[9]对华阳河湖泊研究表明, 沉水植物恢复后能使蓝藻的比例下降21%。同时, 沉水植物的生长和代谢过程也会向水体不断释放大量DOM, 致使湖泊水体中的内源DOM及碳、氮和磷等元素的储量发生变化^[10]。糖类、氨基酸、

收稿日期: 2024-12-30; 修订日期: 2025-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(42172285和41807205); 中国科学院未来网络伙伴计划专项(075GJHZ2023030FN); 广西重点研发计划(2023AB06025)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (42172285 and 41807205); International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences for Future Network (075GJHZ2023030FN); Guangxi Key Research and Development Plan Project (2023AB06025)]

作者简介: 符洪铭(1999—), 男, 硕士研究生; 主要从事内陆水体碳循环研究。E-mail: 18277998093@163.com

通信作者: 李亮(1983—), 男, 博士; 主要从事水文地质与岩溶碳汇等研究。E-mail: liliangjiexiang@163.com 王培(1987—), 男, 博士; 主要从事岩溶碳汇与内陆水体碳循环研究。E-mail: pwang@ihb.ac.cn *共同通信作者

有机酸等小分子物质及腐殖质等大分子物质是沉水植物释放的主要DOM, 它们的组成受植物的种类、生长阶段、环境条件等多种因素影响^[11]。An等^[12]的研究表明, 光降解后产生的DOM微生物利用效率低, 使水体中难降解的溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)含量增加20.04%。此外, 沉水植物为微生物提供附着基质, 能促进微生物对DOM的降解利用^[13]。

DOM是由C、H、O、N、P、S等多种元素组成的复杂混合物, 它们在水体中主要以碳水化合物、氨基酸和腐殖质等有机分子的形式存在^[14]。作为湖泊生态系统中微生物的重要营养源, 通过微生物的分解和转化释放能量和营养物质能促进湖泊的初级生产力。DOM的组成和浓度不仅能降低湖泊温室气体的排放, 还能直接影响微生物的代谢活动和群落结构, 因此其在调节湖泊的生态环境和生态健康起着至关重要的作用^[15–17]。尽管应用光谱学技术能对湖泊DOM进行表征^[18–20], 但分辨率的限制导致其难以有效揭示DOM的分子组成, 因此在分子水平上对其化学组成进行解析的研究相对较少。FT-ICR-MS技术作为最前沿的质谱技术之一, 能从分子水平解析DOM类型且具有高分辨率和质量精度, 已成为评估DOM来源及其生物地球化学反应性和生物利用度的有力工具, 提供了基于DOM分子组成变化推断元素循环过程的线索, 已成功应用于河流、湖泊和海洋等环境^[21–23]。本研究利用FT-ICR-MS技术对武汉东湖生态修复区及未修复区DOM分子组成及其化学多样性进行解析, 探究种植沉水植物对湖泊DOM分子组成影响; 通过对比修复区与未修复区DOM分子稳定性差异, 揭示沉水植物生态恢复对湖泊碳循环的潜在

影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

东湖(30°31'—30°36'N, 114°21'—114°28'E)位于武汉市东南部, 由于冰后期全球变暖, 长江水位上升, 两岸天然河堤发育、壮大, 侵蚀洼地的出口被淤塞而形成的沟谷壅塞湖。其湖形极其不规则, 南北最大纵距17 km, 东西最大横距18 km, 湖泊岸线长119.9 km, 现水域面积33.63 km²^[24]。东湖地处北亚热带季风性湿润气候内, 年均温度为16.7℃, 多年平均降水量为1180 mm。20世纪60年代以前, 由于人为影响较少水质相对较好, 但随着城市化发展, 每年有20余万吨城市污水排入东湖, 其中每年总氮和总磷排入量分别为536.3和87.8吨^[25, 26], 导致东湖面临着严重的水生态环境问题。为改善东湖水生态环境实施了基于沉水植物恢复的水生态修复工程, 通过在浅水区(水深2 m)建设围格, 同时采用扦插、沉床种植和抛种等方法种植沉水植物进行水生态修复^[27]。2021—2023年东湖水生态修复区的沉水植物覆盖面积已经从0.1 km²扩大到3.2 km²(图1a)^[27]。

本研究以2021年在东湖修建的一片水生态修复区及相对应的未修复区作为研究对象, 二者之间采用不透水围格将水体分隔开(图1b)。修复区最高水深不超过2 m, 平均水深1.66 m, 建设面积14600 m², 主要种植苦草(*Vallisneria natans*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、黑藻(*Hydrilla verticillate*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)等沉水植物。为使采集的样品具有代表性, 综合考虑修复区的形状、离岸距离和水深等综合因素在修复

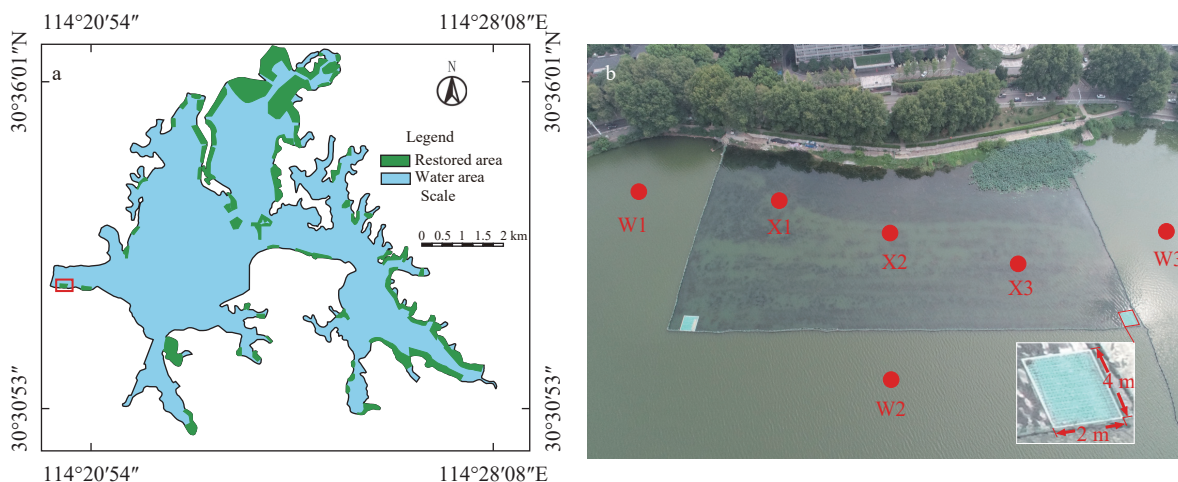


图1 研究区域位置及采样点分布

Fig. 1 Location of research area and distribution of sampling points

区设置了X1 (114°21'27"E, 30°32'45"N)、X2 (114°21'25"E, 30°32'46"N)和X3 (114°21'23"E, 30°32'47"N)三个采样点, 以及相对应的未修复区W1 (114°21'30"E, 30°32'45"N)、W2 (114°21'25"E, 30°32'49"N)和W3 (114°21'20"E, 30°32'46"N)三个采样点(图 1b)。

1.2 野外采样

野外采样时间为2023年10月11日早上9—11点, 采样时天气晴朗。现场利用美国YSI ProQuatro多参数水质分析仪测定修复区与未修复区的水温、溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)、电导率(Electrical Conductivity, EC)、盐度(Salinity, SAL)、pH和氧化还原电位(Oxidation Reduction Potential, ORP), 其精度分别为0.1℃、0.01 mg/L、0.1 μS/cm、0.01 ppt、0.01 pH和0.1 mV。水深使用Speed tech便携式测深仪SM-5A进行测定, 其精度为0.1 m。浊度(Turbidity, 为行文方便后文均用NTU表示)采用HACH 2100P手持浊度计测定, 精度为0.01 NTU。透明度(Transparency, 为行文方便后文均用SD表示)采用直径20 cm透明度盘进行测定, 精度为1 cm。使用2 L聚乙烯材质的采样瓶用采样点位水样润洗后采集水面以下30 cm处的水样用于检测总氮(Total Nitrogen, TN)、总磷(Total Phosphorus, TP)、亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、碱度(Alkalinity, ALK)、溶解性无机碳(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)和DOC。分别采集修复区X1、X2和X3处水面30 cm以下水样各150 mL, 混合后装入经475℃高温预处理的500 mL棕色玻璃瓶, 混合水样用于FT-ICR-MS检测^[28]。未修复区的采样方法同上。采集的水样带回实验室放入4℃冰箱, 水质指标在1周内测完。

1.3 室内分析

水化学测定 水质TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法检测(HJ636-2012); TP采用钼酸铵分光光度法检测(GB11893-89); $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用分光光度法测定(GB/T7493-87); $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏剂分光光度法测定(HJ535-2009); $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定(HJ/T346-2007); ALK采用盐酸滴定法测定; 将水样过0.45 μm玻璃纤维滤膜, 使用总有机碳/总氮分析仪(Elementar Inc, Germany)测定DOC。

固相萃取和FT-ICR-MS测定 采用固相萃取法提取水样中DOM, 将采集的水样过孔径0.45 μm玻璃纤维滤膜过滤, 再将过滤后的水样用优级纯盐酸酸化至pH=2。接着使用120 mL甲醇、24 mL pH=2酸化水和24 mL纯水活化固相萃取柱(Oasis HLB), 再用固相萃取仪将酸化后的水样通过活化后的固相萃取柱吸附DOM, 使用50 mL pH=2酸化

水和50 mL纯水进行脱盐, 接着使用氮气将固相萃取柱吹干, 最后使用15 mL甲醇洗脱固相萃取柱上的DOM。

将提取的DOM洗脱液用50%的甲醇稀释50倍后使用配备7 T超导磁体(Solari X 2XR, Bruker, Germany)、四极探测器和负离子模式的电喷雾电离[ESI(-)]的FT-ICR-MS仪进行检测。在检测前所有光谱均用甲酸钠的峰簇进行外部校准。选择信噪比(S/N)不小于4的峰进行进一步的数据处理。仪器设置的参数: 样品以250 μL/h的流速注入仪器; FT-ICR-MS谱图质量范围在107.5—1100 Da; 离子累积时间为0.006s, 飞行时间为0.5s; 平均扫描次数为450; 分子式的质量误差小于2 ppm。

1.4 数据分析及作图

FT-ICR-MS公式分配 FT-ICR-MS的化学方程式利用FTMSCalibrate算法进行内部校准, 使用FTMSDeu代码通过以下条件进行分配^[29]: 非卤代和卤代配方的信噪比分别大于6和10; 等价双键(Double Bond Equivalents, DBE)为 ≥ 0 的整数; 对于 $C \geq 5$ 的分子, $0.3 \leq H/C \leq 2.25$ 和 $0 \leq O/C \leq 1.2$; 对于 $C \leq 4$ 的分子, $H/C \leq 4$ 和 $0 \leq O/C \leq 1.2$; $1 \leq {}^{12}\text{C} \leq 50$ 和 ${}^{13}\text{C} \leq 2$; ${}^{18}\text{O} \leq 1$; $-10 \leq \text{DBE}-O \leq 10$; ${}^{14}\text{N} \leq 5$; ${}^{15}\text{N} \leq 1$; ${}^{32}\text{S} \leq 3$; ${}^{33}\text{S} \leq 1$; ${}^{34}\text{S} \leq 1$; $\text{P} \leq 1$; ${}^{35}\text{Cl} \leq 5$; ${}^{37}\text{S} \leq 5$; ${}^{79}\text{Br} \leq 5$ 和 ${}^{81}\text{Br} \leq 5$ 。

范氏图可视化 DOM分子的氧碳比(O/C)和氢碳比(H/C)分别反应其氧化程度和氢化程度, 使用范氏图可将DOM分为8类: 饱和化合物($0 \leq O/C \leq 0.52$, $1.5 \leq H/C \leq 2.2$), 氨基糖($0.52 < O/C \leq 0.71$, $1.5 \leq H/C \leq 2.2$), 碳水化合物($0.71 < O/C \leq 1.2$, $1.5 \leq H/C \leq 2.4$), 不饱和碳氢化合物($0 \leq O/C \leq 0.1$, $0.7 \leq H/C < 1.5$), 木质素($0.1 < O/C \leq 0.67$, $0.7 \leq H/C < 1.5$), 单宁酸($0.67 < O/C \leq 1.2$, $0.5 \leq H/C < 1.5$)和缩合芳香烃化合物($0 \leq O/C \leq 0.67$, $0.2 \leq H/C < 0.7$)和其他类型有机质^[30, 31]。

分子特征参数 碳的标准氧化态(Nominal Oxidation State of Carbon, NOSC)表示DOM分子潜在能量, 具有较高NOSC的有机分子在热力学上更容易被微生物被降解利用(式1)^[32]。每个DOM分子的相对强度(Relative Intensity, RI)为每个分子的峰值强度除以全部分子的峰值强度之和(式2)。通过每个DOM分子的相对峰值强度进行加权计算出样品的碳的标准氧化态加权平均值(NOSC_{wa} ; 式3)。而分子不稳定性边界(Molecular Lability Boundary, MLB)是基于有机质的分子式计算出的氢饱和度(H/C)值。当 $H/C \geq 1.5$ 时, MLB将有机质的组分进行分类, 其对应的是生物利用度更高的化学类区域

中更不稳定的分子类型。而 $H/C < 1.5$ 时,在所有的O/C比值中,代表相对稳定,更顽固的化学性质^[33]。

$$NOSC = 4 - \frac{4C + H - 3N - 2O + 5P - 2S}{C} \quad (1)$$

$$RI_i = I_i / \sum I_i \quad (2)$$

$$NOSC_{wa} = \sum (NOSC_i \times RI_i) \quad (3)$$

式中, C、H、O、N、P和S分别代表分子式中的碳、氢、氧、氮、磷和硫原子的数目, I_i 为每种DOM分子的峰值强度, i 表示DOM分子类型。

作图 采样点分布图利用CorelDRAW X7进行绘制。用Excel 2019进行数据整理和分析, Origin 2021进行绘图。FT-ICR-MS仪测得的质谱数据利用Data Analysis软件进行处理, 再用Matlab2021a对数据进行解析。

2 结果

2.1 水化学特征

如图2所示, 采样期间气温在21.8—29.7℃, 修复区采样点的水深在1.5—2.1 m, 平均水深为1.8 m, 未修复区采样点水深在1.5—2.3 m, 平均水深为1.9 m。

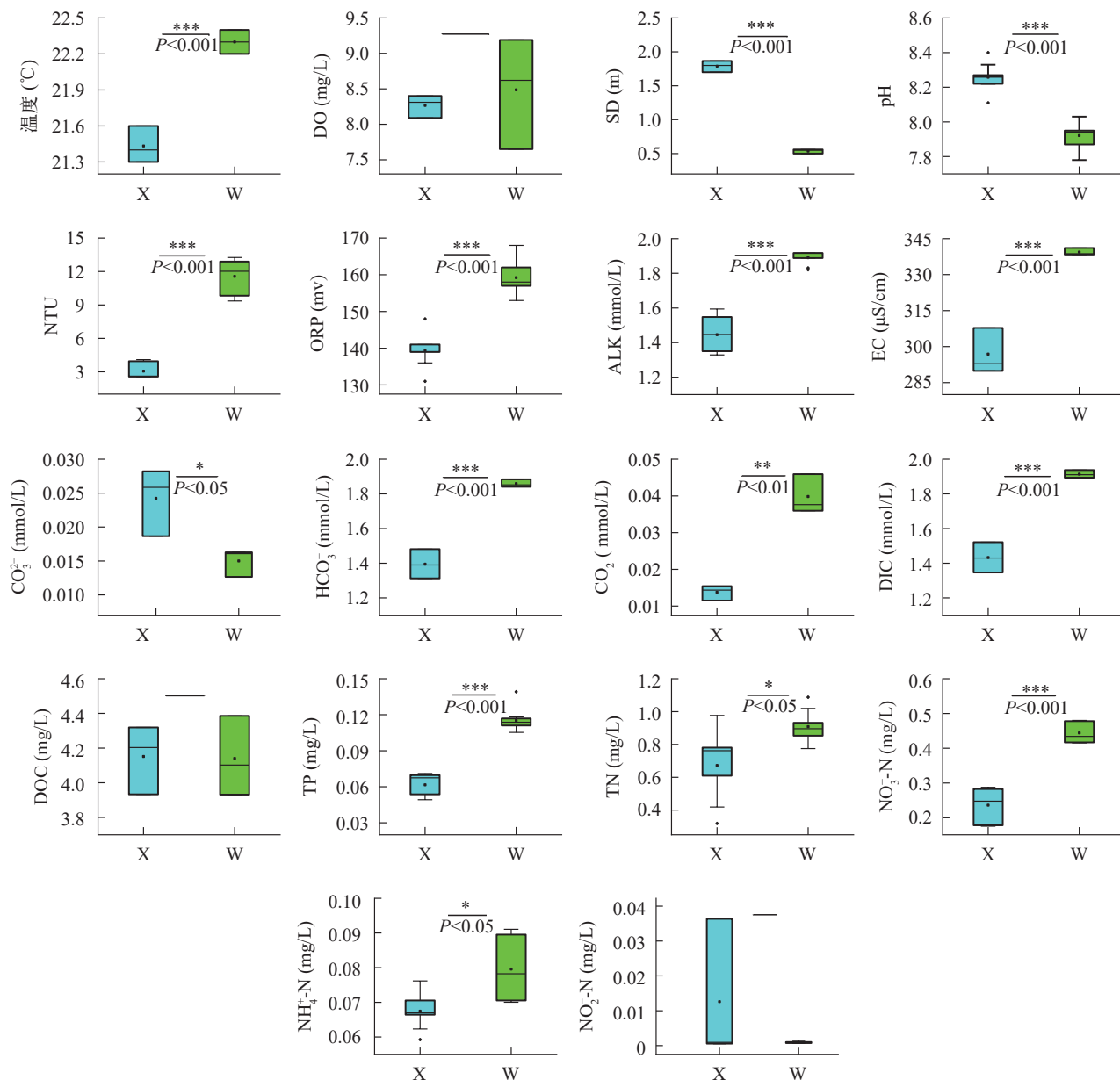


图2 修复区与未修复区水体理化性质对比

Fig. 2 Comparison of water physicochemical properties in the restored and unrestored areas

X为修复区, W为未修复区

X represents the restored area, W represents the unrestored area

除 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、DO和DOC等指标无显著差异外,修复区与未修复区其余水体指标均具有显著差异。其中修复区SD和pH提升了1.25 m和0.4,而NTU、ORP、ALK和EC降低了8.49、19.9 mV、0.44 mmol/L、42.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。在总溶解碳方面, CO_3^{2-} 含量升高了61.5%,而 HCO_3^- 、 CO_2 和DIC的含量分别下降了25%、65%和25%。在营养盐方面,水体中TP和TN分别下降了47.9%和26.2%,而水体中溶解性无机氮则是 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量分别降低了0.269 mg/L和0.01 mg/L,虽然两区域 $\text{NO}_2\text{-N}$ 差异不显著,但修复区平均升高了0.012 mg/L。由此可见,种植沉水植物进行湖泊修复能有效改善水体的理化指标,降低水体无机碳和氮、磷营养盐含量。

2.2 DOM分子组成特征

修复区与未修复区分别检测出7814和7282种类型的DOM分子(图3a),其中相似的有6046种。修复区含有1768种特有DOM分子,占修复区DOM分子总量的22.9%;而未修复区含有1236种特有的DOM分子,占未修复DOM分子总量的17%。修复区与未修复区特有DOM分子主要以类木质素为主,分别占特有DOM分子的61.7%和58%,其次是类饱和化合物DOM,分别占26%和26.6%(图3b)。由图3c可知水生态修复区特有DOM分子组成以CHON、CHO和CHOP为主,分别占26.4%、21.8%和20.7%;而未修复区特有DOM分子组成以CHON和CHO为主,分别占44.5%和25.1%。结果表明,种植沉水植

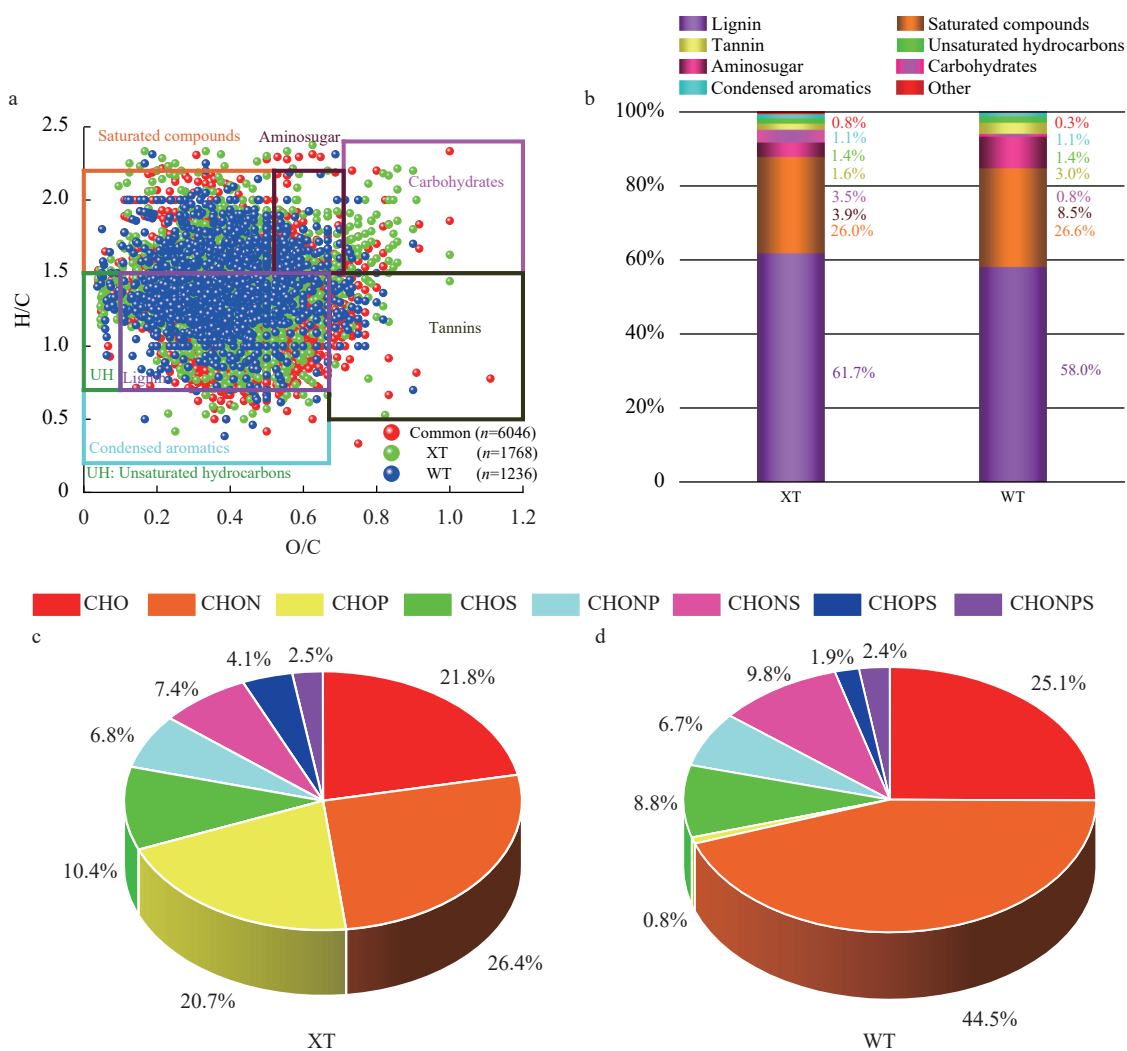


图3 修复区与未修复区水体DOM对比

Fig. 3 Comparison of DOM between restored and unrestored areas

a. 修复区与未修复区Van Krevelen图; b. 修复区与未修复区特有的DOM分子不同类型有机化合物对比图; c. 修复区特有的DOM分子百分比; d. 未修复区特有的DOM分子的百分比

a. Van Krevelen chart in the restored and unrestored areas; b. Comparison of different types of organic compounds of unique DOM molecules in the restored and unrestored areas; c. Percentage of unique DOM molecules in the restored area; d. Percentage of unique DOM molecules in the unrestored areas

物能引起湖泊DOM分子组成变化。

2.3 DOM分子稳定性

水生态修复区DOM分子NOSC值在-2—0概率密度更高,表明其富含更多强还原态有机物;未修复区NOSC值在0—1概率密度更高,表明未修复区的DOM分子更倾向于氧化态有机物(图4)。强还原态的有机物相对于氧化态较高的有机物更难于被微生物降解利用。同时,通过DOM分子的峰值强度进行加权计算出修复区与未修复区NOSC_{wa}分别为-0.47和-0.44,进一步表明水生态修复区的DOM分子在热力学上比未修复区更为稳定。此外,基于DOM分子不稳定性边界对DOM分子分类发现(表1),修复区相较于未修复区含有更丰富相对难降解的DOM分子类型,尤其是含磷(P)元素的DOM分子类型(CHOP、CHONP、CHOPS和CHONPS),修复区的种类是未修复区的1.4—2.29倍。总的来说,种植沉水植物能有效提高湖泊水体中相对难降解DOM

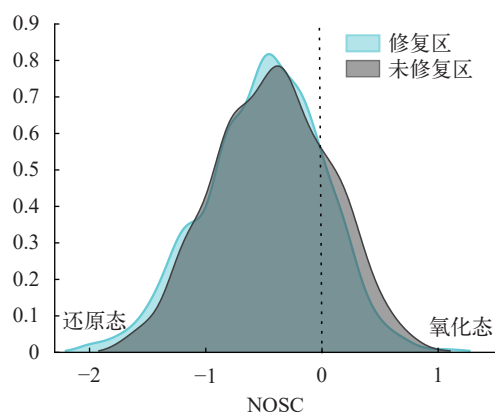


图4 修复区与未修复区特有DOM分子NOSC值的密度图

Fig. 4 Density map of NOSC values of unique DOM molecules in the restored and unrestored areas

分子的丰度,进而增强湖泊水体DOM的稳定性。

3 讨论

修复区水体中的CO₂浓度(0.014 mmol/L)显著低于未修复区(0.04 mmol/L),不仅减少了湖泊向大气释放温室气体的可能性,还可能使湖泊成为大气CO₂的汇。相对于未修复区较高的CO₂浓度可能导致其向大气中释放CO₂,进一步加剧温室效应。魏岩洁等^[34]在盛家湾的研究发现,与无沉水植物覆盖的区域相比有沉水植物区域能减少89%温室气体排放。因此,沉水植物的种植对减缓湖泊温室气体排放具有重要作用。在营养盐方面,修复区的TP和TN含量分别比未修复区降低了47.9%和26.2%,这表明沉水植物通过吸收、反硝化和微生物协同作用等多种机制,有效地降低了水体的氮磷负荷^[35]。此外,沉水植物释放的酚类、萜类和含芳香族溶解有机酸通过抑制藻类的光合效率、改变微观结构、破坏氮磷代谢等生理生化过程抑制藻类生长^[36, 37],致使湖泊从藻类占优势转变为以沉水植物为主的生态系统,湖泊内源DOM从藻源转向沉水植物来源^[38],从而改变湖泊水体DOM分子组成(图5)。修复区特有DOM分子主要以CHON、CHO和CHOP类型为主,而未修复区特有DOM分子则是以CHON和CHO类型,这可能与草源型与藻源型DOM特性密切相关。沉水植物衍生DOM富含多酚类物质,具有较高的芳香性,而浮游植物主要由多糖物质组成^[39, 40]。章奇等^[41]通过三维荧光平行因子分析也表明,藻源DOM以类色氨酸组分为主,草源DOM的荧光物质则以类酪氨酸组分为主。此外,虽然本次研究并未涉及到微生物群落组成变化,但有研究表明沉水植物对湖泊生态环境的改变会影响生物多

表1 修复区与未修复区DOM分子的稳定性

Tab. 1 Stability of DOM molecules in the restored and unrestored areas

分子类型Molecular type	水生态修复区Restored area			未修复区Unrestored area			水生态修复区/未修复区
	NOSC _{wa}	MLB _L 种类	MLB _R 种类	NOSC _{wa}	MLB _L 种类	MLB _R 种类	MLB _R 比率
CHO	-0.5	901	2638	-0.51	981	2482	1.06
CHON	-0.14	248	2129	-0.14	316	2145	0.99
CHOP	-1.01	491	220	-0.76	259	96	2.29
CHOS	-0.41	195	366	-0.45	170	316	1.15
CHONP	-0.63	102	102	-0.58	97	70	1.45
CHONS	-0.35	84	167	-0.24	77	165	1.01
CHOPS	-1.13	61	31	-1.06	23	20	1.55
CHONPS	-0.57	51	28	-0.62	45	20	1.4
总类型Total	-0.47	2133	5681	-0.44	1968	5314	1.07

注: MLB_L是易降解的DOM, MLB_R是相对难降解的DOM^[29]

Note: MLB_L refers to DOM that is labile, while MLB_R refers to DOM that is recalcitrant^[29]

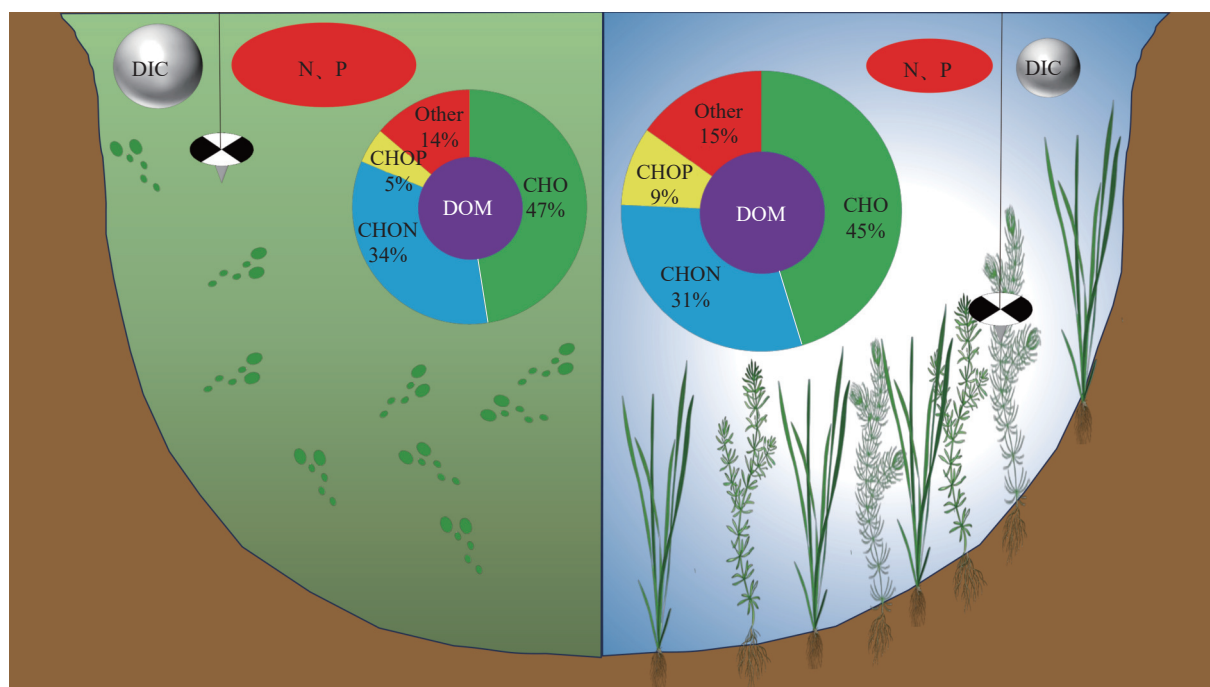


图5 修复区与未修复区示意图

Fig. 5 Schematic diagram in the restored and unrestored area

样性^[42-44],在以高等水生植物为主的湖泊中, β 变形菌门的细菌占优势;而在微囊藻占优势的湖泊中,放线菌门的浮游细菌占优势^[45],因此不同微生物对有机质的利用和转化也可能会引起有机质性质的差异。

水生态修复区含有更多难降解的DOM分子,表明沉水植物能提高水体DOM的稳定性。姚昕等^[46]研究显示,藻源型DOM在2 d内能降解约70%,而沉水植物源DOM的降解速率显著较低,通常需要更长时间完成降解转化。高岩等^[47]的研究也支持这一观点,他们发现沉水植物凋亡与分解过程中释放的木质素、纤维素和半纤维素等物质具有较高的稳定性。王亚茹等^[48]的研究也表明,在沉水植物降解释放的有机质中,大分子质量的DOM较多,且较为稳定不易被微生物降解。从元素组成上看,修复区含有更富含P元素(CHOP、CHONP、CHOPS和CHONPS)的相对难降解DOM分子,可能与沉水植物释放的含P元素DOM分子的稳定性相关。藻类有机磷分解产生的正磷酸盐释放速率是水生植物4倍,当有机物来源于藻类时有机磷的生物利用度更高,而来自水生植物的有机磷的生物利用度相对较差,往往被埋于沉积物^[49]。Guo等^[50]的研究表明,湖泊富营养化越严重,CHOP类型的不稳定有机物占比越高,表明藻源型有机磷活性较高。未修复区则有更多CHON类型的分子,这一现象可能与微生物群落结构和功能密切相关。Vila-Costa等^[51]的研究提供了有力证据,他们发现沉水植物能显著增强与氮循环相关的微生物群落中nirS和nirK功能基

因的活性,加速湖泊中有机氮的分解过程。因此,修复区中未被检测出的CHON类型DOM分子可能是因为沉水植物促进了微生物对原湖泊水体中有机氮的降解。

4 结论

(1)在水生态修复区和未修复区分别检测出DOM分子7814和7282种,其中水生态修复特有的DOM分子1738种主要以CHON、CHO和CHOP类型的为主,而未修复区特有的1236种DOM分子主要是CHON和CHO类型。这表明种植沉水植物能增加湖泊DOM分子的丰富度改变湖泊DOM的分子组成。(2)水生态修复区与未修复区相比DOM分子更趋向于还原态,而未修复区趋向于氧化态。水生态修复区与未修复区的NOSC_{wa}分别为-0.47和-0.44,表明水生态修复区DOM分子在热力学上更稳定,同时按分子不稳定性边界分类表明修复区含有更丰富相对难降解的DOM分子类型,尤其是含P元素相对于难降解的DOM分子类型是未修复区的1.4—2.29倍。因此种植沉水植物进行湖泊生态修复能提高湖泊水体DOM的稳定性。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Guo Y Q, Xue J H, Wu Y B, *et al.* Research progress on purification effects and restoration technologies of submerged macrophytes on eutrophic water [J]. *Journal*

- of Plant Resources and Environment*, 2020, **29**(3): 58-68. [郭雅倩, 薛建辉, 吴永波, 等. 沉水植物对富营养化水体的净化作用及修复技术研究进展 [J]. *植物资源与环境学报*, 2020, **29**(3): 58-68.]
- [2] Bian Y Q, Chai X, Tang T, *et al.* Study on purification of total nitrogen and total phosphorus by submerged plants in Nanjing Mochou Lake [J]. *Environmental Ecology*, 2024, **6**(2): 121-124. [边园琦, 柴夏, 唐坦, 等. 沉水植物对南京莫愁湖总氮、总磷的净化研究 [J]. *环境生态学*, 2024, **6**(2): 121-124.]
- [3] Huang X L, Guo Y M, Zhang Y M, *et al.* Controlling of internal phosphorus and nitrogen loading in lake sediment by submerged macrophytes and its application [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(12): 1524-1530. [黄小龙, 郭艳敏, 张毅敏, 等. 沉水植物对湖泊沉积物氮磷内源负荷的控制及应用 [J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(12): 1524-1530.]
- [4] Li H X, Yin C Y, Yang G L, *et al.* Different functional types of submerged macrophytes on dissolved oxygen and its environmental effects [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(2): 232-241. [李华歆, 殷春雨, 杨国梁, 等. 不同功能型沉水植物对溶解氧影响及环境效应 [J]. *水生生物学报*, 2024, **48**(2): 232-241.]
- [5] Guo Y, Zhou Q H, Wang P, *et al.* Research progress on the mechanism of carbon storage in inland waters [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(4): 141-150. [郭瑶, 周巧红, 王培, 等. 内陆水体储碳作用机制研究进展 [J]. *水生态学杂志*, 2023, **44**(4): 141-150.]
- [6] Zheng B Q, Sun C Y, Fu H M, *et al.* Ecological restoration of submerged aquatic macrophytes can reduce CO₂ emission and increase ecological benefits: a case study of Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(5): 496-506. [郑冰清, 孙彩云, 符洪铭, 等. 沉水植物水生态修复工程的水-气界面CO₂通量及生态效益研究——以武汉东湖为例 [J]. *环境科学学报*, 2024, **44**(5): 496-506.]
- [7] Grace K A, Juston J M, Finn D, *et al.* Substrate manipulation near the outflow of a constructed wetland reduced internal phosphorus loading from sediments and macrophytes [J]. *Ecological Engineering*, 2019(129): 71-81.
- [8] Wang B, Zheng X, Zhang H, *et al.* Metagenomic insights into the effects of submerged plants on functional potential of microbial communities in wetland sediments [J]. *Marine Life Science & Technology*, 2021, **3**(4): 405-415.
- [9] Wang Y, Wang W, Zhou Z, *et al.* Effect of fast restoration of aquatic vegetation on phytoplankton community after removal of purse seine culture in Huayanghe Lakes [J]. *Science of the Total Environment*, 2021(768): 144024.
- [10] Li B N, Ma S Y, Liu Y, *et al.* Research on submerged aquatic vegetation and its determinants in Caohai Lake, Guizhou Province [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(12): 2042-2054. [李贝宁, 马思怡, 刘懿, 等. 贵州草海沉水植物现状调查与影响因素分析 [J]. *水生生物学报*, 2024, **48**(12): 2042-2054.]
- [11] Wang Y R, Chen L, Fang W, *et al.* Decomposition characteristics of typical warm season and cold season submerged plant litters and change of microbial community in sediment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(24): 10214-10225. [王亚如, 陈乐, 房玮, 等. 典型冷暖季沉水植物凋落物分解特性及沉积物微生物群落变化 [J]. *生态学报*, 2022, **42**(24): 10214-10225.]
- [12] An S, Du Y, Huang X, *et al.* Long-term photochemical and microbial alterations lead to the compositional convergence of algal and terrestrial dissolved organic matter. [J]. *Environmental Sciences & Technology*, 2024, **58**(42): 18765-18776.
- [13] He Y, Li X M, Li H Q, *et al.* Characteristics of epiphytic bacterial community on submerged macrophytes in water environment supplemented with reclaimed water [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(5): 2707-2714. [贺赞, 李雪梅, 李宏权, 等. 再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征 [J]. *环境科学*, 2024, **45**(5): 2707-2714.]
- [14] Ren H, Wang G, Ding W, *et al.* Response of dissolved organic matter (DOM) and microbial community to submerged macrophytes restoration in lakes: a review [J]. *Environmental Research*, 2023(231): 116185.
- [15] Yuan D, Zhao Y, Guo X, *et al.* Impact of hydrophyte decomposition on the changes and characteristics of dissolved organic matter in lake water [J]. *Ecological Indicators*, 2020(116): 106482.
- [16] Song Y, Cao X, Li S A, *et al.* Human activities-impacted lake dissolved organic matter (DOM) affects phytoplankton microbial diversity and DOM diversification via carbon metabolism [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024(367): 122011.
- [17] Wen Z, Shang Y, Song K, *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.
- [18] Zhou Y, Zhou L, Zhang Y, *et al.* Autochthonous dissolved organic matter potentially fuels methane ebullition from experimental lakes [J]. *Water Research*, 2019(166): 115048.
- [19] Guo X J, He X S, Li C W, *et al.* The binding properties of copper and lead onto compost-derived DOM using Fourier-transform infrared, UV-vis and fluorescence spectra combined with two-dimensional correlation analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019(365): 457-466.
- [20] Li Z, Fu Z, Zhang Y, *et al.* Temporal and spatial distribution and fluorescence spectra of dissolved organic matter in plateau lakes: a case study of Qinghai Lake [J]. *Water*, 2021, **13**(24): 3481.
- [21] Liu Y, Liu X, Long Y, *et al.* Variations in dissolved organic matter chemistry on a vertical scale in the eastern Indian Ocean [J]. *Water Research*, 2023(232): 119674.
- [22] Zhou Y, Yao X, Zhang Y, *et al.* Response of dissolved organic matter optical properties to net inflow runoff in a large fluvial plain lake and the connecting channels [J].

- Science of the Total Environment*, 2018(639): 876-887.
- [23] Wen Z, Shang Y, Lyu L, *et al.* Sources and composition of riverine dissolved organic matter to marginal seas from mainland China [J]. *Journal of Hydrology*, 2021(603): 127152.
- [24] Li C A, Zhang Y F, Li G Q, *et al.* Formation of east lake, Wuhan, Eastern China [J]. *Earth Science*, 2021, **46**(12): 4562-4572. [李长安, 张玉芬, 李国庆, 等. 武汉东湖是如何形成的? [J]. *地球科学*, 2021, **46**(12): 4562-4572.]
- [25] Peng Q T, Li Z Q, Deng X W, *et al.* Nitrogen and phosphorus deposition in urban lakes and its impact factors: A case study of East Lake in Wuhan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2635-2643. [彭秋桐, 李中强, 邓绪伟, 等. 城市湖泊氮磷沉降输入量及影响因子——以武汉东湖为例 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(8): 2635-2643.]
- [26] Wan X T, Cheng Y Z. Pollution status of east lake in Wuhan and its prevention and protection [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 1996, **17**(21): 29-31. [万咸涛, 程玉珍. 武汉东湖污染现状及其防治和保护 [J]. *水利水电快报*, 1996, **17**(21): 29-31.]
- [27] Zhou H E, Hu S H, Feng Z, *et al.* Practice of water ecological restoration of large urban eutrophication lake—a case of study at East Lake, Wuhan [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, **24**(12): 81-83. [周汉娥, 胡胜华, 冯智, 等. 大型城市富营养化湖泊沉水植物修复工程实践——以武汉东湖为例 [J]. *绿色科技*, 2022, **24**(12): 81-83.]
- [28] Pailler L, Renard P, Nicol E, *et al.* How well do we handle the sample preparation, FT-ICR mass spectrometry analysis, and data treatment of atmospheric waters [J]? *Molecules*, 2022, **27**(22): 7796.
- [29] Fu Q L, Fujii M, Ma R. Development of a gaussian-based alignment algorithm for the ultrahigh-resolution mass spectra of dissolved organic matter [J]. *Analytical Chemistry*, 2023, **95**(5): 2796-2803.
- [30] Fu Q L, Fujii M, Kwon E. Development and application of a high-precision algorithm for nontarget Identification of organohalogen based on ultrahigh-resolution mass spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2020, **92**(20): 13989-13996.
- [31] Ren Y, Liu S, Liu L, *et al.* Deciphering the molecular composition and sources of dissolved organic matter in urban rivers based on optical spectroscopy and FT-ICR-MS analyses [J]. *Carbon Research*, 2024, **3**(1): 67.
- [32] Zhao S L, Liu W J, Sun D Y, *et al.* Effect of organic matter on iodine mobilization in groundwater of Datong basin [J]. *Earth Science*, 2023, **48**(12): 4699-4710. [赵仕琳, 刘文静, 孙丹阳, 等. 大同盆地地下水中有有机质对碘迁移转化的影响 [J]. *地球科学*, 2023, **48**(12): 4699-4710.]
- [33] D'Andrilli J, Romero C M, Zito P, *et al.* Advancing chemical lability assessments of organic matter using a synthesis of FT-ICR MS data across diverse environments and experiments [J]. *Organic Geochemistry*, 2023(184): 104667.
- [34] Wei Y J, Hu C, Li Y F, *et al.* Study on the mitigation effect of submerged vegetation on greenhouse gases emission from rivers [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(5): 1763-1770. [魏岩洁, 胡成, 李亚峰, 等. 沉水植被对河流温室气体释放减缓作用研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, **13**(5): 1763-1770.]
- [35] Ren T Y, Xu X H, Song Y Z, *et al.* Biomass and the potential denitrification rate of the Epiphyton on three kinds of submerged plants in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(1): 77-87. [任天一, 徐向华, 宋玉芝, 等. 太湖常见3种沉水植物附着生物的生物量及潜在反硝化速率 [J]. *湖泊科学*, 2024, **36**(1): 77-87.]
- [36] Lin C H, Ai J Y, Li X F, *et al.* Effect of vallisneria natans on algal growth in water-sediment-submerged macrophytes ecosystem [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(4): 43-47. [林春焕, 艾娇燕, 李鑫飞, 等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中藻类生长的影响 [J]. *环境工程*, 2019, **37**(4): 43-47.]
- [37] Kibuye F A, Zamyadi A, Wert E C. A critical review on operation and performance of source water control strategies for cyanobacterial blooms: Part II -mechanical and biological control methods [J]. *Harmful Algae*, 2021(109): 102119.
- [38] Shi Y, Zhang X, Zhao M, *et al.* The status of research on the root exudates of submerged plants and their effects on aquatic organisms [J]. *Water*, 2024, **16**(13): 1920.
- [39] Zhao C, Ma Q, Luo J, *et al.* Innovative utilization of plant-derived dissolved organic matter to promote polycyclic aromatic hydrocarbons removal in constructed wetlands: Unraveling the synergy among substrate adsorption, plant uptake, and microbial degradation [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024(190): 1590-1600.
- [40] Pan B, Liu S, Wang Y, *et al.* FT-ICR-MS combined with fluorescent spectroscopy reveals the driving mechanism of the spatial variation in molecular composition of DOM in 22 plateau lakes [J]. *Environmental Research. Section A*, 2023(232): 116272.
- [41] Zhang Q, Ju Q, Li J X, *et al.* Heterogeneous adsorption of macrophyte-and algae-derived dissolved organic matter on goethite in freshwater lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(4): 1041-1049. [章奇, 居琪, 李健欣, 等. 针铁矿对湖泊草、藻来源可溶有机质的非均质吸附 [J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(4): 1041-1049.]
- [42] Somogyi B, Boros E, Szabó-Tugyi N, *et al.* Dense macrophyte cover has significant structural and functional influence on planktonic microbial communities leading to bacterial success [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(829): 154576.
- [43] Wang C, Liu S, Zhang Y, *et al.* Bacterial communities and their predicted functions explain the sediment nitrogen changes along with submerged macrophyte restoration. [J]. *Microbial Ecology*, 2018, **76**(3): 625-636.
- [44] Kajan K, Osterholz H, Stegen J, *et al.* Mechanisms shap-

- ing dissolved organic matter and microbial community in lake ecosystems [J]. *Water Research*, 2023(245): 120653.
- [45] Wu Q L, Xing P, Li H B, *et al.* Impacts of regime shift between phytoplankton and macrophyte on the microbial community structure and its carbon cycling in lakes [J]. *Microbiology China*, 2013, **40**(1): 87-97. [吴庆龙, 邢鹏, 李化炳, 等. 草藻型稳态转换对湖泊微生物结构及其碳循环功能的影响 [J]. 微生物学通报, 2013, **40**(1): 87-97.]
- [46] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Different degradation mechanism of dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes in Lake Taihu, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 688-694. [姚昕, 张运林, 朱广伟, 等. 湖泊草、藻来源溶解性有机质及其微生物降解的差异 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 688-694.]
- [47] Gao Y, Li Z F, Liu Y, *et al.* Biodegradation of aquatic plant residues in macrophytic lake: a review [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, **38**(15): 53-59. [高岩, 李志斐, 刘阳, 等. 草型湖泊水生植物残体的生物降解研究进展 [J]. 中国农学通报, 2022, **38**(15): 53-59.]
- [48] Wang Y R, Zhang P Y, Zhang G M, *et al.* Release characteristics of dissolved organic matter during decomposition of different aquatic plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, **17**(12): 4017-4027. [王亚如, 张盼月, 张光明, 等. 不同种类水生植物分解过程中溶解性有机物的释放特征 [J]. 环境工程学报, 2023, **17**(12): 4017-4027.]
- [49] Feng W, Wang T, Zhu Y, *et al.* Chemical composition, sources, and ecological effect of organic phosphorus in water ecosystems: a review [J]. *Carbon Research*, 2023, **2**(1): 12.
- [50] Guo M, Yu M, Wang X, *et al.* Deciphering the link between particulate organic matter molecular composition and lake eutrophication by FT-ICR MS analysis [J]. *Water Research*, 2025(272): 122936.
- [51] Vila-Costa M, Pulido C, Chappuis E, *et al.* Macrophyte landscape modulates lake ecosystem-level nitrogen losses through tightly coupled plant-microbe interactions [J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, **61**(1): 78-88.

THE IMPACT OF SUBMERGED AQUATIC MACROPHYTES ON DISSOLVED ORGANIC MATTER IN LAKES: A CASE STUDY OF DONGHU LAKE IN WUHAN

FU Hong-Ming^{1,2}, ZHENG Bing-Qing^{2,3}, SUN Cai-Yun^{2,3}, WU Zhen-Bin², LI Liang¹ and WANG Pei²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. College of Resource & Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The growth and senescence processes of submerged aquatic macrophytes can affect the dynamic balance of dissolved organic matter (DOM) in lakes, thereby reshaping the carbon cycling patterns of lakes. To explore the impact of submerged aquatic macrophytes-based ecological restoration on lake water carbon cycling, this study focused on the submerged aquatic macrophytes restoration area and the unrestored area in Donghu Lake, Wuhan. Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry (FT-ICR-MS) was employed to compare the chemical diversity of DOM in the restored and unrestored areas, revealing the effects of submerged aquatic macrophytes on DOM stability in water. The results showed that submerged aquatic macrophyte plant restoration significantly improved the physicochemical properties of the water while altering the chemical diversity of DOM molecules. The restored and unrestored areas contained 7814 and 7282 types of DOM molecules, respectively. Among them, 1768 types were unique to the restored area, primarily consisting of CHO, CHON, and CHOP types, while 1236 types were unique to the unrestored area, mainly consisting of CHO and CHON types. Further analysis revealed that the restored area had 1.4 to 2.29 times more relatively recalcitrant DOM molecules containing phosphorus (CHOP, CHONP, CHOPS, and CHONPS) than the unrestored area. Additionally, the content of highly reduced DOM was higher, indicating that DOM in the restored area was more thermodynamically stable than that in the unrestored area. In summary, submerged aquatic macrophytes not only changed the composition of DOM molecules in the water but also increased the abundance of recalcitrant DOM molecules. This study enhances our understanding of the impact of lake carbon transformation processes on the carbon cycle and provides a scientific basis for accurately assessing the carbon sink potential of lakes in the future.

Key words: Water Ecological Restoration; Submerged Plants; Dissolved Organic Matter; Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry; Chemodiversity; Stability