J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(4):000-000
DOI 10.18307/2027.0414
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

北方寒旱区典型浅水湖泊浮游植物与DOM组分的季节性相互作用*

刘文理[1,2]，高静淅[1,2**]，王青山[1,2]，王隆可[1,2]，汤世科[1,2]，刘洪洁[1,2]，李卫平[1,2]
（1：内蒙古科技大学能源与环境学院，包头 014010）
（2：内蒙古自治区高校黄河几字弯水环境保护与水生态安全工程研究中心，包头 014010）

摘　要：为揭示北方寒旱湖区不同季节浮游植物与溶解性有机质（DOM）的相互影响，以包头南海湖为例，于 2023 年 4、7、10 月和 2024 年 1 月在进水区、旅游开发区、湖心区与水草区进行季度采样。利用紫外-可见吸收光谱、三维荧光光谱结合平行因子分析解析 DOM 组分与来源；采用荧光显微镜进行浮游植物群落鉴定。采用相关性分析解析了 DOM 荧光参数与优势属的相关性。结果显示： DOC 呈夏＞春＞冬＞秋的季节性分布特征（夏季（39.97±0.89）mg/L，秋季（14.59±0.74）mg/L）；$SUVA_{254/260}$ 秋季最高而夏季最低，E_2/E_3 与 E_3/E_4 全年均＞3.5，指示 DOM 分子量偏小且以腐殖质为主。荧光指数与生物指数表明春夏季 DOM 以内源为主，秋季陆源输入增强，腐殖化指数 HIX 整体偏低。浮游植物共鉴定 8 门 56 属，夏秋绿藻占优，冬季绿藻与硅藻丰度较强。浮游植物的季节性更替驱动 DOM 来源和组分的变化：夏季以新鲜、易分解的蛋白样有机质为主；秋季外源输入的富里酸等腐殖质增加；冬季则以分子量较大的有机质为主。DOM 的吸光特性（分子量、芳香性）可通过影响光照和营养盐利用而影响浮游植物的群落结构，同时，浮游植物群落结构通过特异性代谢产物直接调控 DOM 的组分。总体上，水温、营养盐是浮游植物群落结构的季节性演替与 DOM 组分特征变化的主导因素。
关键词：溶解性有机质；光谱特征；浮游植物；季节变化

Seasonal interactions between phytoplankton and DOM components in a typical shallow lake in the cold and arid northern China*

Liu Wenli[1,2], Gao Jingtian[1,2**], Wang Qingshan[1,2], Wang Longke [1,2], Tang Shike[1,2], Liu Hongjie[1,2] & Li Weiping[1,2]
（1: *School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *P.R.China*）
（2: *Engineering Research Center for Water Environment Protection and Ecological Security of the Yellow River Jiziwan Reach, Universities in Inner Mongolia, Baotou* 014010, *P.R.China*）

Abstract: This study investigated the seasonal interactions between phytoplankton and dissolved organic matter (DOM) in lakes in the cold and arid regions of northern China. Lake Nanhai in Baotou was selected as the study area. Field sampling was conducted quarterly in April, July, and October 2023 and January 2024. Four typical lake zones were covered, including the inflow area, tourism development area, lake center area, and macrophyte-dominated area. UV–Vis absorption spectroscopy and three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factor analysis (PARAFAC) were used to characterize the composition and sources of DOM. Phytoplankton communities were identified by fluorescence microscopy. Correlation analysis was used to explore the relationships between DOM fluorescence indices and dominant phytoplankton genera. The results showed that dissolved organic carbon (DOC) varied seasonally in the order summer > spring > winter > autumn. The maximum value was 39.97 ± 0.89 mg/L in summer, and the minimum value was 14.59 ± 0.74 mg/L in autumn. SUVA254 and SUVA260 values peaked in autumn and were lowest in summer. The E2/E3 and E3/E4 ratios remained > 3.5 in all seasons. This indicates that DOM was dominated by

* 2026-02-04 收稿；2026-06-12 收修改稿；2026-08-06 录用。
内蒙古自然科学基金项目（2025MS02022）、内蒙古自治区科技创新重大示范项目（2025ZDSF0011）和内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目（2025YFHH0129）联合资助。
** 通信作者；E-mail:nkdgjtsmile@163.com。

low-molecular-weight humic substances. FI and BIX values indicated that DOM was mainly derived from autochthonous production in spring and summer. Terrestrial DOM inputs increased in autumn. HIX values remained relatively low throughout the study period. A total of 56 phytoplankton genera from 8 phyla were identified in the lake. Green algae dominated the phytoplankton community in summer and autumn. Green algae and diatoms were abundant in winter. The seasonal succession of phytoplankton communities strongly shaped the sources and composition of DOM. Fresh and labile protein-like DOM components were predominant in summer. Allochthonous fulvic-like and humic DOM components increased in autumn. High-molecular-weight organic matter was more abundant in winter. The optical properties of DOM, especially molecular weight and aromaticity, can modify phytoplankton community structure by regulating underwater light conditions and nutrient utilization. In turn, phytoplankton communities alter DOM composition by releasing taxa-specific metabolites. Overall, water temperature and nutrient availability were the main factors driving the seasonal succession of phytoplankton communities and the related changes in DOM composition.
Keywords: Dissolved Organic Matter (DOM), spectral characteristics, phytoplankton, seasonal Variation

溶解性有机质（DOM）作为湖泊生态系统中活性碳库的关键组分，其来源、组成与转化过程显著影响着水体生物地球化学循环及生态系统功能[1-2]。浮游植物作为初级生产者，其群落结构与代谢活动不仅是 DOM 的重要内源，同时受 DOM 光学特性与生物可利用性的调控[3]。尤其在北方寒旱区湖泊，季节性冰封与非冰封交替、水温剧烈波动、外源输入季节性差异显著[4-5]，DOM 与浮游植物间的相互作用必然呈现季节性差异[6-7]。目前，关于 DOM 与浮游植物关系的研究多聚焦于单一季节，而对寒旱区湖泊在完整年度周期内，二者间响应机制的认识仍较为有限。

DOM 的光谱特征可有效示踪其来源与组成。研究表明，春夏季节水温升高、光照增强，浮游植物活动旺盛，释放大量富含蛋白类、易降解的藻源 DOM，可能促进微生物活动并反馈影响浮游植物群落（尤其是绿藻、蓝藻）的演替[8-9]；而在秋冬季，随着水温降低、藻类衰退，DOM 可能更多地来源于陆源输入或颗粒物降解产生的腐殖质组分，其分子量增大、芳香性增强，DOM 可能通过改变光环境或络合微量营养物质，进而对偏好低光或不同营养策略的浮游植物类群（如硅藻）产生筛选作用[3,9]。然而，这一动态耦合关系在北方寒旱区湖泊中如何随季节转换，尚需系统探究。

南海湖具有季节性冰封和外源输入波动显著等特点，在北方寒旱区浅水湖泊中具有一定代表性，所以本研究以南海湖为研究对象，通过季度野外采样，综合运用紫外-可见吸收光谱、三维荧光光谱-平行因子分析（PARAFAC）及浮游植物群落鉴定技术，旨在：（1）分析湖泊 DOM 浓度与光谱特征的季节性变化特征；（2）明确浮游植物群落结构的季节演替规律；（3）探究不同季节 DOM 来源与组成的变化对浮游植物群落结构的影响机制。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与采样点布设

南海湖(40°30′8″~40°33′32″ N，109°59′26″~110°2′26″ E)，平均海拔为 1020 m，属于半干旱温带大陆性季风气候，总体地势北高南低，是由黄河故道改道南移后形成的天然湖泊，河水改道后形成水面和滩头草地，是黄河湿地的重要组成部分。占地面积为 2000 hm^2，其中水域面积约为 580 hm^2，东西长 3.5 km，南北宽 1.3 km，湖深 0.9~3.5 m。近年来受旅游业人为影响及工业、农业影响，水体污染程度加剧，水体营养化成为主要环境问题。根据南海湖进出水口位置、各湖区功能布设四个采样点（图 1），将水域划分为进水区（N1）、旅游开发区（N2）、湖心区（N3）以及水草区（N4）四个区域。

1.2 样品采集与处理

分别于 2023 年 4 月 15 日、7 月 18 日、10 月 22 日及 2024 年 01 月 16 日进行水样及浮游植物的采集，每次采样均在 9:00—11:00 进行，以尽量减小日内光照和温度变化对水质指标的影响。在 1 月采样时由于湖面处于冰封状态，首先采用冰钻将对冰盖上层进行切割破碎，接近水面时改用冰镐开出小口，采用真空吸水机深入冰盖下方采集水样。现场采用便携式溶解氧仪（HACH-HQ2100）测定溶解氧，采用便携式水质分析仪（HANNA-HI98194）测定水体的 pH、温度。同时采用真空吸水机采集表层（0~50 cm）

水样于 1000 mL 棕色聚乙烯瓶中，水样采集后于 4 ℃冷藏避光条件下在 4 h 内运回实验室。用于 DOM 光谱分析的样品立即过滤，并在 24 h 内完成测定。营养盐参数及叶绿素 a 在 48 h 内完成测定。每个采样点采集 3 个平行水样，所有测定结果以均值±标准差表示。依据《湖泊生态调查观测与分析》中的方法进行浮游植物的采集，采集表层（0~50 cm）处水样 1 L，现场立即加入 15 mL 鲁哥氏液进行固定，充分摇匀后避光保存，样品低温（4 ℃）运输至实验室后，静置 48 h，用虹吸管吸去上清液，浓缩至 50 mL，以备镜检计数用。

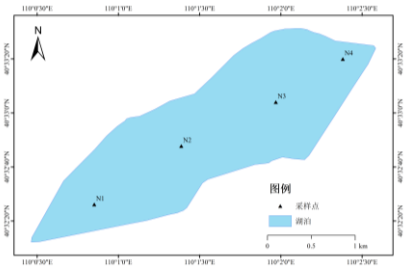

图 1 南海湖采样点分布示意图

Fig.1 Distribution of sampling sites of Lake Nanhai

镜检计数采用 20 mm × 20 mm、容积 0.1 mL 的浮游植物计数框（CC-F 型，上海市水产研究所）。每个样品充分摇匀后，吸取 0.1 mL 浓缩样品置于计数框中，静置 5 min 使细胞沉淀。每个样品计数 3 片，每片随机选取 256 个视野，取差异不显著（相对偏差＜15%）的计数结果计算平均值作为藻类丰度，浮游植物丰度单位为 cells/L。镜检计数所得的数据用于浮游植物优势度以及丰度的计算。质量控制：随机选取 10%的样品进行重复计数，两次计数的相对偏差均小于 15%，表明计数结果具有较好的可重复性。浮游植物的鉴定与计数采用荧光显微镜（XSP-10C 型）在 400 倍放大倍数下进行（目镜 10×，物镜 40×），通过参考《淡水微型生物图谱》以及《环境微生物图谱》对浮游生物的门、属进一步的划分归类。

总氮（TN）采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定；总磷（TP）采用钼酸铵分光光度法测定；化学需氧量（COD）采用重铬酸盐法测定；氨氮（NH_4^+-N）采用纳氏试剂分光光度法测定；叶绿素 a（chl-a）采用丙酮萃取后利用分光光度法测定。水样用 0.45 μm 玻璃纤维膜（标称孔径，Whatman GD/X）过滤后进行 DOM 的紫外-可见光吸收光谱以及荧光光谱分析。

1.3 分析方法

1.3.1 优势度 依据优势度（Y）确定浮游植物群落优势种，优势度指数 $Y \geq 0.02$ 确定，$Y \geq 0.1$ 为绝对优势种，优势度指数计算公式如下：

$$Y=\frac{n_i}{N}f_i \tag{1}$$

式中，n_i为样点中第i种浮游植物的个体数；N 为样点中所有浮游植物的总数；f_i为该属在各个样点中出现的频率，计算方法为物种i出现的采样点数与总采样点数的比值。

1.3.2 紫外吸收光谱特征参数 利用 L6s 型分光光度计（上海仪电）测定 DOM 的紫外-可见光光谱参数，扫描波长范围为 200~800 nm。所有水样在测定前稀释至总吸光度小于 0.3，以降低高浓度吸光对光程的影响。测定前，仪器使用空白水样进行基线校正，确保光程误差和仪器漂移对吸光度影响最小。每个样品测定三次取平均值，光谱数据在分析前进行了空白扣除与噪声平滑处理，保证光谱可靠性。A_{350} 为 350 nm 处的紫外吸光系数，用以反映 DOM 的相对含量。$SUVA_{254}$ 为 DOM 在 254 nm 处的紫外吸收系数与 DOC 浓度的比值，反映 DOM 的芳香化程度，通常认为 $SUVA_{254}$ 大于 4 表示高芳香性，在 2~4 范围中为中等，小于 2 为低芳香性；$SUVA_{260}$ 为 DOM 在 260 nm 处的紫外吸收系数与 DOC 浓度的比值，反映 DOM 的疏水性，其数值范围解释同 $SUVA_{254}$。E_2/E_3 和 E_3/E_4 分别为 250 nm 与 365 nm、300 nm 与 400 nm 处的紫外吸光系数比值，E_2/E_3 反映 DOM 相对分子量的分布特性，与相对分子量的大小成反比，E_2/E_3 大于 8

表示低分子量 DOM 占主导，小于 5 表示高分子量占主导；E_3/E_4 反映 DOM 腐殖化程度，且与腐殖化程度呈负相关性，E_3/E_4 大于 10 表示低腐殖化 DOM 占主导，小于 5 表示高腐殖化 DOM 占主导[7,10]。

1.3.3 三维荧光光谱特征参数　采用荧光分光光度计（F-7100 型，日本日立）测定水样中 DOM 的三维荧光光谱。测定参数设置为：150 W 氙灯为激发光源，PMT 电压设为 400 V，激发波长（Ex）为 200~450 nm，发射波长（Em）为 250~600 nm，间隔和狭缝宽度为 5 nm，扫描速度为 12000 nm/min。仪器开启预热 15 min 后，先用超纯水作为空白水样除去瑞利散射和拉曼散射造成的影响，后期将荧光光谱的荧光强度进行拉曼单位（R.U.）的标准化处理。

通过计算 FI、BIX 与 HIX 分析 DOM 的来源特性。FI 指激发波长在 370 nm 时，发射波长在 450 nm 和 500 nm 处荧光强度的比值，反映 DOM 的来源[7]，FI 小于 1.4 表示 DOM 主要来自陆源输入，在 1.4~1.8 范围中表示陆源与内源混合，大于 1.8 表示以内源水生来源为主。BIX 指激发波长在 310 nm 时，发射波长在 380 nm 和 430 nm 处荧光强度的比值，反映内源物质对 DOM 的相对贡献[7]，BIX 大于 1.0 表示生物源 DOM 占主导，在 0.8~1.0 范围中表示中等生物源，小于 0.8 表示生物源贡献较少。HIX 指激发波长在 254 nm 时，发射波长在 435-480 nm 和 300-345 nm 处荧光强度的比值，反映 DOM 腐质化程度，且与腐质化程度呈正相关[7]，HIX 小于 4 表示腐殖化程度低，在 4~6 范围中表示中等腐殖化程度，大于 6 表示腐殖化程度高。此外，在三维荧光光谱中，不同荧光峰位置对应不同类型的 DOM 组分。参照已有研究[11-12]：类富里酸组分通常对应传统 A 峰和 C 峰，指示陆源输入或腐殖化过程产生的腐殖质类物质；类色氨酸组分对应 T 峰，代表微生物降解产生的新生内源有机质；类酪氨酸组分对应 B 峰和 D 峰，反映与微生物活动及蛋白质降解相关的有机组分。

1.4 数据处理

通过 IBM SPSS Statistics 27 进行数据的统计，三维荧光-平行因子分析通过 Matlab R2022b 以及 EFC V1.2 完成，通过平方误差比较、核心一致性比较、分半检验比较以及残差分析法对水样中 DOM 进行最优组分模型模拟，来确定水中荧光组分。其他图表绘制和相关性分析通过 Origin 2022 完成。

2 结果与讨论

2.1 水环境因子

各季节南海湖水体呈弱碱性，pH 值为 9.06，水温四季变化明显。由春到夏的过程当中，DO、TN、TP、NH_4^+-N、COD 和 Chl-a 的含量均呈现上升趋势（图 2）。由春季到冬季， TN 与 NH_4^+-N 的含量持续上升，浓度变换范围分别为 1.28~4.05 mg/L 和 0.66~2.21 mg/L；而 TP 与 Chl-a 的含量在秋季达最大，浓度变换范围分别为 0.05~0.19 mg/L、9.82~67.96 mg/L；COD 含量在冬季达最高，这可能是因为冬天结冰过程中，污染物从冰中转移至水中所致；夏季溶解氧最高，可能与浮游植物的光合作用有关[13]。

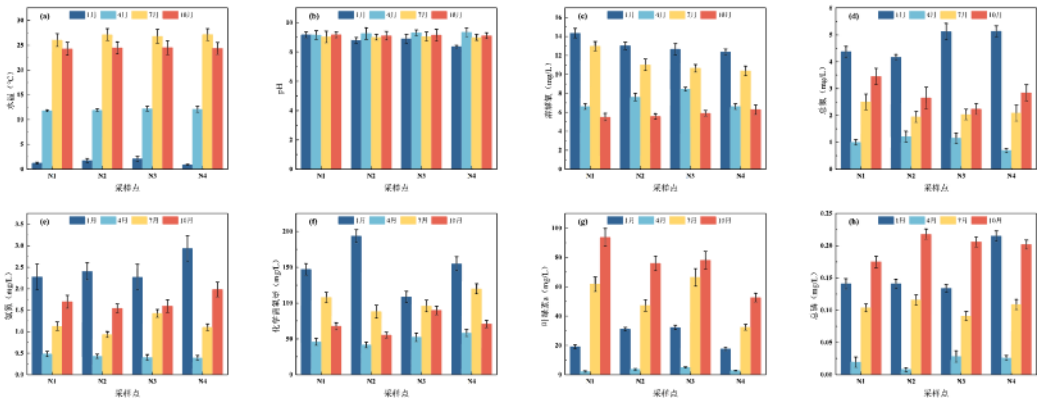

图 2 南海湖不同季节水质参数变化规律(a 水温;b pH; c 溶解氧;d 总氮; e 氨氮; f COD; g 叶绿素 a; h 总磷)

Fig.2 Seasonal Variation of Water Quality Parameters in Lake Nanhai, water temperature (a), pH (b), DO (c), TN (d), NH_4^+-N (e), COD (f), Chl-a (g), and TP (h)

2.2 浮游植物群落结构特征

2.2.1 藻类群落结构　2023 年的 4 月—2024 年 01 月期间，在南海湖共鉴定出浮游植物 8 门 56 属（图 3），其中绿藻门种类最多，为 20 属；蓝藻门次之，有 16 属；硅藻门 14 属；甲藻门 2 属；隐藻门、金藻门、裸藻门及黄藻门均为 1 属。在不同季节和点位，浮游植物群落差异明显。春季绿藻、蓝藻与硅藻相对均衡，湖心区除蓝藻外丰度普遍高于旅游开发区与进水区；夏季在高温与光照增强的共同作用下，绿藻跃升为优势类群、蓝藻维持较高水平而硅藻丰度减小，总丰度峰值出现在湖心区；秋季蓝藻适应性仍强，硅藻竞争力回升，总丰度梯度表现为水草区＜旅游开发区＜湖心区＜进水区；冬季绿藻为绝对优势、硅藻次之、蓝藻显著衰退，总丰度以进水区最高。

属水平上，绿藻优势属由春季的栅藻（*Scenedesmus*）转为夏秋的纤维藻（*Ankistrodesmus*）和冬季的小球藻（*Chlorella*）；蓝藻中，微囊藻（*Microcystis*）春夏高丰度、秋冬回落，夏季色球藻（*Chroococcus*）在进水区富集、尖头藻（*Anabaenopsis*）在湖心区富集；硅藻中针杆藻（*Synedra*）在湖心与进水区优势明显。与已有研究结论一致，等片藻（*Diatoma*）与脆杆藻（*Fragilaria*）在营养盐输入区更为常见，冬季双尖藻（*Nitzschia*）丰度增加[14]。

综合判断，高温扩展绿藻与蓝藻生态位，低温显著抑制蓝藻而相对提升绿藻与部分硅藻的竞争力；秋冬高丰度值向进水区转移，指示外源营养输送是驱动群落季节性演替的关键因子。

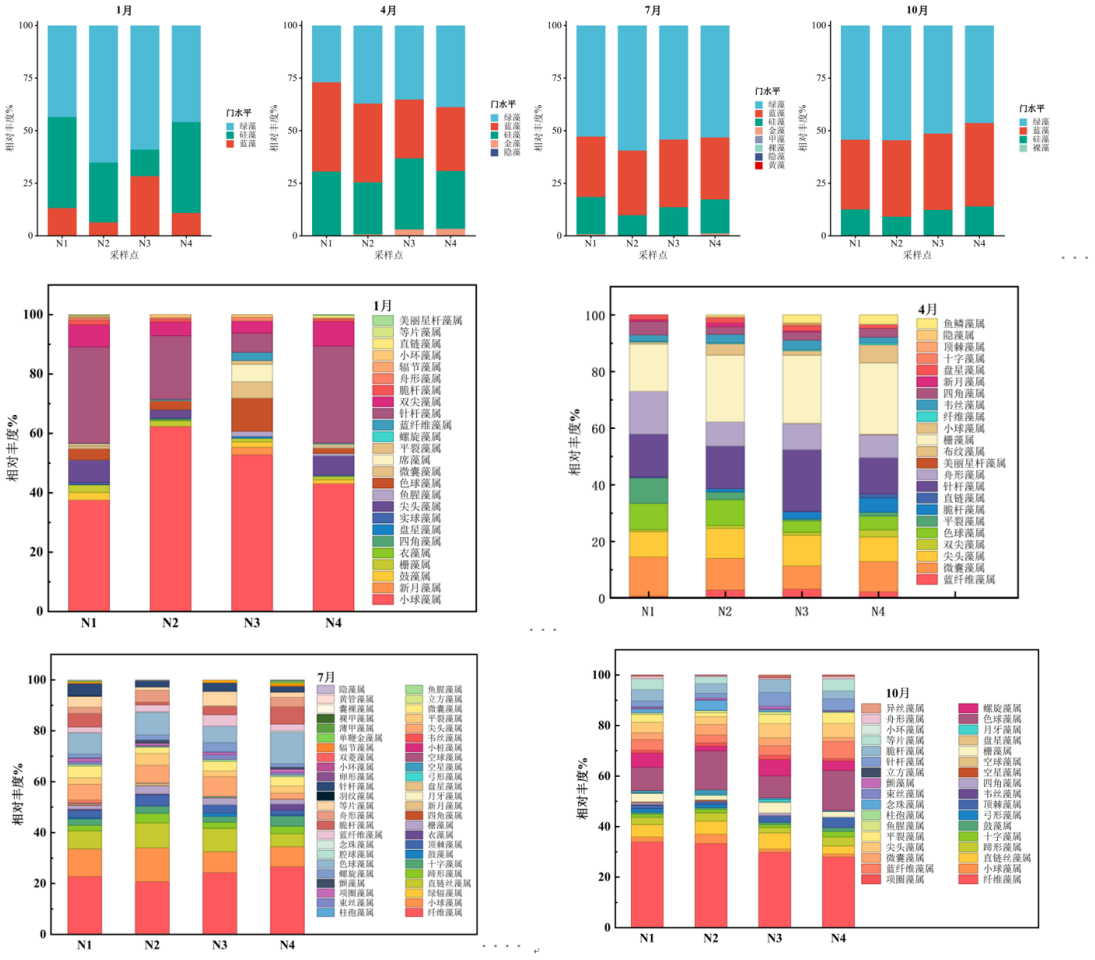

图 3　南海湖不同月份各采样点浮游植物群落结构

Fig.3 Phytoplankton community structure at different sites in Lake Nanhai in January, April, July, and October

2.2.2 优势属　2023 年 4 月至 2024 年 1 月期间，浮游植物以绿藻门、蓝藻门和硅藻门为主，共检出优势属隶属 3 门 14 属（表 1）。季节尺度上，优势属数量表现为春、秋高而冬季低，且“绝对优势属”仅见于秋冬——秋季进水区由纤维藻属形成单优势，冬季小球藻属（*Chlorella*）在除湖心区外的各区呈主导地位；空间尺度上，进水区与旅游开发区对外部扰动更为敏感，易产生单优势型群落，湖心区优势度分布相对均衡、群落稳定性较高，水草区受沉水植被竞争与遮蔽效应影响于夏秋生长期优势属较少。不同门类浮游植物的生态偏好清晰：绿藻的纤维藻属（*Ankistrodesmus*）在秋季占优，硅藻的针杆藻属（*Synedra*）偏好低温在春、冬活跃，而蓝藻的微囊藻属（*Microcystis*）仅春季出现。综合而言，外源营养输入与环境约束共同驱动其群落结构的季节性更替与空间分化。

表 1 南海湖四季浮游植物优势属和优势度

Tab.1 Dominant Phytoplankton Genera and Dominance in Lake Nanhai Across the Four Seasons

月份	门类	优势属	进水区	旅游开发区	湖心区	水草区
优势度 Y（1 月）	绿藻	小球藻属	0.12	0.13	0.1	0.12
	蓝藻	尖头藻属	0.02	-	-	0.02
		色球藻属	-	-	0.02	-
	硅藻	针杆藻属	0.10	0.05	-	-
		双尖藻属	0.02	-	-	0.02
优势度 Y（4 月）	绿藻	小球藻属	-	-	-	0.02
		栅藻属	0.02	0.06	0.07	0.07
	蓝藻	微囊藻属	0.02	0.03	0.03	0.03
		尖头藻属	-	0.03	0.03	0.02
	硅藻	针杆藻属	0.02	0.04	0.07	0.04
		舟形藻属	0.02	0.02	0.03	0.02
优势度 Y（7 月）	绿藻	纤维藻属	0.07	0.05	0.08	0.04
		小球藻属	0.03	0.03	0.03	-
		直链丝藻属	0.02	0.02	0.03	-
	蓝藻	尖头藻属	0.02	0.02	0.02	-
		色球藻属	0.02	0.02	0.02	0.02
	硅藻	脆杆藻属	0.02	-	-	-
		等片藻属	-	-	0.02	-
优势度 Y（10 月）	绿藻	纤维藻属	0.12	0.08	0.07	0.05
		直链丝藻属	0.02	-	0.02	-
		色球藻属	0.03	0.04	0.02	0.03
	蓝藻	螺旋藻属	0.02	-	0.02	-
		蓝纤维藻属	0.02	-	-	-
		尖头藻属	0.02	-	-	-
	硅藻	脆杆藻属	0.02	-	-	-
		等片藻属	0.02	-	-	-

2.2.3 浮游植物群落结构特征分析　浮游植物群落结构在 2023 年 4 月—2024 年 1 月期间表现出明显的时空差异。从季节尺度看，门水平群落组成经历了从春季的"三足鼎立"格局向夏季"绿藻主导"、秋季"绿藻-蓝藻共优"，最终演替为冬季"绿藻-硅藻并强"的完整序列，这一演替模式主要受水温梯度和营养盐供给动态的共同调控[15]。属水平分析进一步证实了这一变化趋势：绿藻门内部优势属从夏秋季的纤维藻属（*Ankistrodesmus*）转变为冬季的小球藻属（*Chlorella*），反映出不同温度条件下绿藻的生态策略分化；硅藻门中针杆藻属（*Synedra*）等类群在低温季节显著活跃；而蓝藻门仅在夏秋季特定区域形成优势，其季节性受限可能与水体氮磷化学计量比及微量元素有效性等抑制因素有关。

分析表明，各功能区的群落结构差异明显。湖心区由于水文条件相对稳定，群落结构最为均衡；进水区和旅游开发区受外源输入和人为干扰影响，易形成单优势种群落结构；水草区则可能因沉水植物的竞争抑制作用，在生长季表现出明显的藻类抑制效应[16]。

综合而言，南海湖浮游植物群落的时空差异是由多重环境因子协同驱动的结果。温度的季节变化决定了优势门类的演替序列，营养盐的可利用性调节了属水平的竞争格局，而空间差异则通过改变局部环境条件进一步改变了浮游植物群落的分布。

2.3 DOM 时空分布及光谱特征分析

2.3.1 DOM 时空分布　DOC 浓度表现出夏季（（39.97±0.89）mg/L）> 春季（（22.05±1.05）mg/L）> 冬季（（19.09±1.76）mg/L）> 秋季（（14.59±0.74）mg/L） 的规律，其中夏季 DOC 浓度高于其他季节，可能与该时期较高的水温促进微生物代谢与有机质分解、浮游植物大量生长释放胞外产物以及降雨径流输入增强等因素密切相关[17]；而秋季浓度最低则可能与有机质降解消耗及水文交换加剧导致的稀释作用有关[18]。

空间分布上，DOC 浓度总体表现为进水区 > 旅游开发区 > 水草区 > 湖心区，显示出外源输入对 DOC 空间分布的主导影响。进水区在春、秋、冬三季持续保持较高浓度，反映其作为陆源有机质输入的主要通道作用；而在夏季，出水口 DOC 浓度显著高于其他区域，这可能与夏季水体热分层、水动力条件变化以及局部内源有机质累积（如藻类聚集降解）等过程有关。

综合来看，南海湖 DOC 浓度受外源输入、内源生产共同调控：季节变化主要受温度驱动的生物化学循环过程控制，而空间格局则主要由流域输入路径与水动力扩散过程决定。

2.3.2 紫外-可见吸收光谱特征参数　南海湖 DOM 的紫外吸收光谱特征参数如图 4 所示。结果表明，$SUVA_{254}$ 与 $SUVA_{260}$ 值呈现明显的季节差异，其中秋季最高（$SUVA_{254}$: 2.04±0.09；$SUVA_{260}$: 1.89±0.08），表明该时期 DOM 芳香性与疏水性最强，可能与秋季植物凋落物输入增加及微生物降解过程中芳香结构产物的积累有关[13]；夏季最低（$SUVA_{254}$: 0.72±0.02；$SUVA_{260}$: 0.66±0.02），则反映了高温条件下浮游生物来源的蛋白质类、碳水化合物类等亲水性组分比例上升，DOM 结构趋于简单化。

另一方面，E_2/E_3 与 E_3/E_4 比值在所有季节均高于 3.5，表明南海湖 DOM 整体以低分子量、富里酸类组分为主。其中，夏季比值最高（E_2/E_3: 18.06±0.67；E_3/E_4: 9.85±2.33），进一步说明该时期 DOM 分子量最小、腐殖化程度最低，可能与夏季藻类生长旺盛、代谢活跃，释放大量易降解小分子有机物有关[19]；冬季比值最低（E_2/E_3: 9.85±0.68；E_3/E_4: 4.57±0.35），则反映 DOM 分子量相对增大、结构趋于复杂，可能与低温下降解速率减缓及陆源输入组分的累积有关。

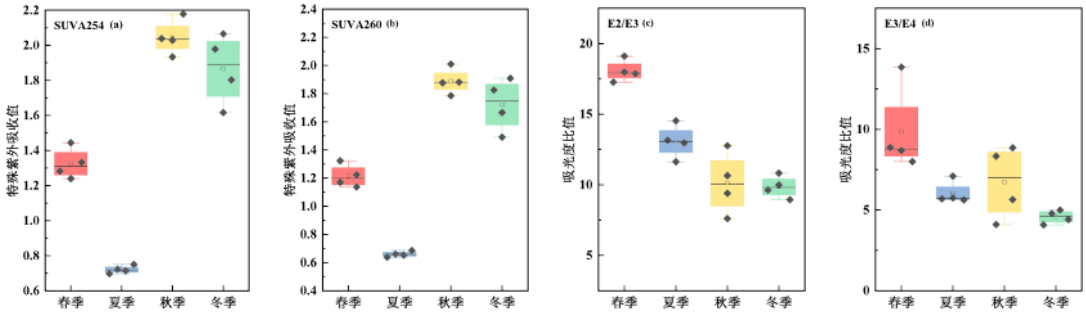

图 4 南海湖水体 DOM 的 $SUVA_{254}$、$SUVA_{260}$、E_2/E_3、E_3/E_4 变化

Fig.4 Variation of SUVA254, SUVA260, E2/E3, and E3/E4 of DOM in Lake Nanhai

2.3.3 荧光光谱特征参数　南海湖四季的荧光光谱参数变化如图 5 所示。从来源特征来看，荧光指数 FI 全年介于 1.73~1.85 之间，表明 DOM 由陆源与内源共同贡献，其中秋季 FI 值最高，可能是陆源输入与微生物降解产物增加共同导致，其他季节来源结构相对稳定。生物指数 BIX 在四季处于较高水平（1.17~1.23），说明水体新生内源 DOM 贡献大，其中夏季 BIX 值最高，与该时期水温适宜、藻类活动旺盛、有机质内源生产强烈密切相关，藻类在生长代谢过程中释放的胞外产物（如多糖、蛋白质、氨基酸等）富含类蛋白荧光基团，同时部分藻细胞裂解释放胞内有机物，从而使 BIX 值升高[20]；冬季 BIX 值最低，反映低温抑制了生物活性及内源 DOM 生成。腐殖化指数 HIX 全年较低（1.10~1.69），进一步印证 DOM 腐殖化程度较弱，以新产生的类蛋白物质为主，类腐殖质贡献有限，夏季尤其明显。

综合各荧光参数变化趋势可知，南海湖 DOM 在组成上具有明显的季节演替特征：夏季以高生物活性、低腐殖化的内源为主；秋季陆源贡献显著增强，类腐殖质组分占比上升，但内源仍维持一定水平；

冬季内源生成减弱但腐殖化程度仍维持较低水平。该变化表明，湖泊 DOM 的来源与性质主要受水温驱动的初级生产与微生物活动所调控，陆源输入则起到季节性补充作用，尤其在秋季表现明显。

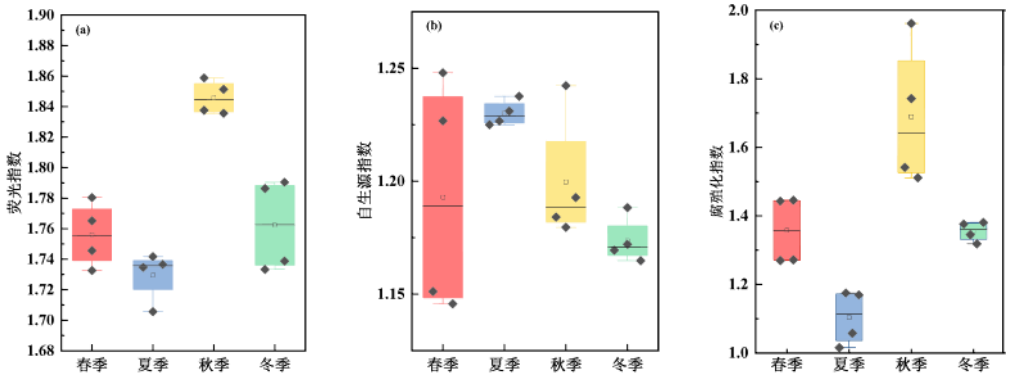

图 5 南海湖水体 DOM 的荧光指数 FI、生物指数 BIX 及腐殖化指数 HIX

Fig.5 FI, BIX, and HIX of DOM from Lake Nanhai

2.3.4 荧光组分特征　根据三维荧光光谱的平行因子分析，结果显示（图 6、图 7），南海湖 DOM 共解析出 4 种荧光组分，C2（类色氨酸）与 C3（类酪氨酸）组分同时检出并呈现较高强度，指示南海湖 DOM 中内源贡献占主导地位。类蛋白组分主要来源于浮游植物胞外释放、微生物代谢及有机颗粒物降解过程，其季节性丰度变化与水体初级生产力周期及微生物活动强度密切相关。夏季高温期藻类生长旺盛，类蛋白荧光强度增强，与夏季 BIX 指数最高、DOM 以低分子量内源为主的特征高度一致。冬季，以小球藻等耐低温绿藻为主，总体生物量虽下降，但其代谢产物仍贡献一定类蛋白物质，使内源 DOM 在低温季节仍保持一定水平；同时，微生物降解速率减缓可能延长此类组分的滞留时间，维持其在碳循环中的相对贡献。

另一方面，C1 与 C4 类富里酸组分的持续存在，反映了陆源输入对 DOM 的稳定贡献。这类组分主要来自流域土壤淋溶、植物凋落物分解等过程，其输入通量受水文条件及周边土地利用方式影响。虽然总体强度低于内源组分，但在秋季及春季径流增强期，类富里酸组分占比可能出现阶段性上升，水体混合增强可能促进沉积物再悬浮，释放结合态类富里酸物质，形成季节性补充。冬季期间，陆源输入因低温而有所减弱，但由于内源生产衰减，类富里酸组分的相对比例相对凸显。综合而言，荧光组分的解析表明，南海湖 DOM 由陆源腐殖质与内源蛋白质类物质共同构成，其中内源组分（类蛋白物质）在季节动态中可能占据主导，反映了该湖泊生态系统较高的生物活性与有机质内循环强度。

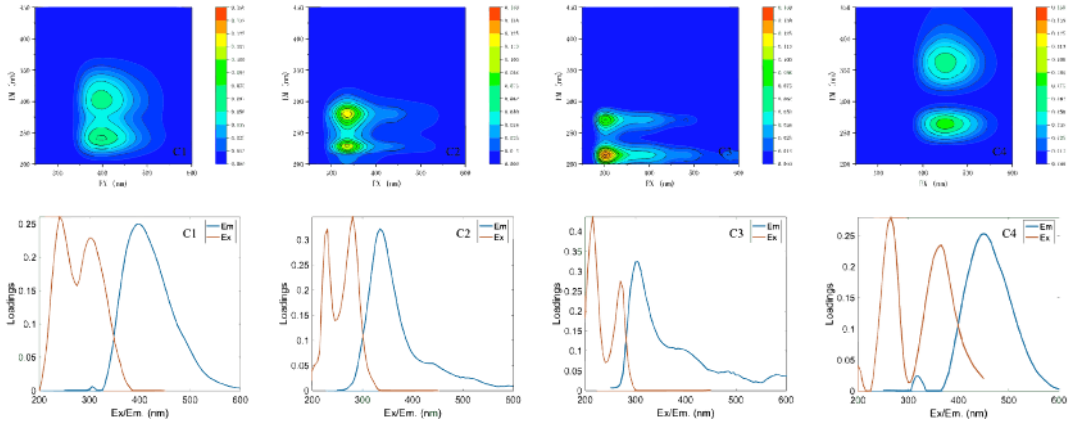

图 6 南海湖 DOM 荧光组分的 3D-EEMs 图谱

Fig.6 3D-EEMs Spectra of DOM Fluorescence Components in Lake Nanhai

2.3.5 荧光组分强度及分布特征　通过分析南海湖 DOM 荧光组分强度的时空变化，揭示了其来源组成与转化过程的季节变化特征。DOM 总荧光强度呈现秋季最高、夏季最低的季节性特点，其中 C3（类酪氨酸）组分在春季完全缺失，表明 DOM 分子结构存在明显的季节性重组，可能是春季优势藻属对类酪氨酸组分的包外分泌量较低所致。此外，可能春季水温较低导致浮游植物代谢活性有限，使得 C3 组分信号低于检测限。空间分布上，各功能区间的荧光强度差异较小，反映 DOM 组成在空间上具有较高的均质性。

在季节变化方面，C1 组分占比呈现先增后减的趋势，并于秋季达到峰值，与该时期降雨径流增强、陆源腐殖质输入增加直接相关，印证了外源输入是调控 DOM 组成的关键季节性因子。C2 组分贡献率随季节呈下降趋势，尤其在秋季明显降低，可能受到水温下降导致的微生物降解活性减弱的影响[21]；然而该组分全年保持较高占比，表明内源生物生产是 DOM 持续稳定的重要来源。

冬季，C2 与 C3 等类蛋白组分的占比有所下降，这与冬季浮游植物群落中以小球藻为代表的耐低温绿藻的代谢活动密切相关——该类群在低光照、低水温条件下仍可通过细胞代谢与降解过程持续释放蛋白类物质[22]。与此同时，C1 组分在冬季的占比相对秋季有所回落，但仍高于夏季，反映出在陆源输入减弱背景下，内源生产衰减使得类腐殖质组分的相对贡献依然明显。这种“内源输出为主、秋季外源输入增强”DOM 结构，可能通过影响水体光吸收特性及营养盐形态，进一步反馈调节浮游植物的光合效率与群落组成[22-23]。

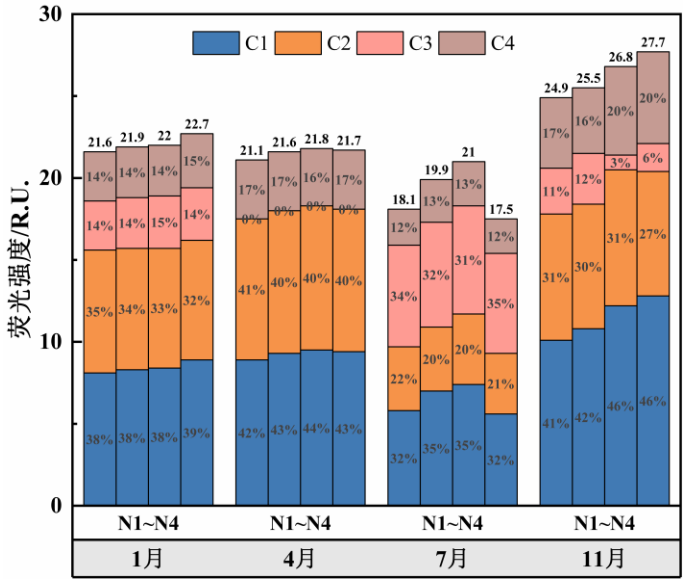

图 7 南海湖水体 DOM 组分荧光强度和相对丰度

Fig.7 Fluorescence Intensity and Relative Abundance of DOM Components in Lake Nanhai

2.4 浮游植物与 DOM 之间的关系

2.4.1 DOM 来源组成的季节性动态　DOM 来源和组成在南海湖呈现明显的季节性变化，反映了内源生产与外源输入之间的动态转换。春夏季节，浮游植物初级生产力旺盛（夏季绿藻门丰度达 54.90%），DOM 表现出明显的内源特征：夏季 BIX 值达到峰值（1.23），FI 维持在 1.80 左右，指示新生内源 DOM 占主导；类蛋白组分（C2、C3）荧光强度与叶绿素 a 及优势属如纤维藻属（*Ankistrodesmus*）、小球藻属（*Chlorella*）呈显著正相关（$P<0.05$）。结果表明，该时期藻类胞外释放及代谢产物构成了 DOM 主体，与前人研究一致，即夏季藻源 DOM 主导湖泊碳库[24-25]。

秋冬季，随着水温下降和浮游植物活动减弱（冬季蓝藻门丰度降至 13.85%），DOM 来源发生明显转变。秋季 FI 升至全年最高（1.85），SUVA254/260 达到峰值（2.04±0.09，1.89±0.08），表明陆源高芳香性腐殖质贡献增强；HIX 也较夏季上升， DOM 组分与优势藻属的相关性减弱，进一步支持外源腐殖

质类物质（C1、C4）占比提升。冬季，耐低温藻类如小球藻属（*Chlorella*）的持续代谢及微生物缓慢降解仍维持一定水平的类蛋白组分，但其生态作用已从“快速碳源供给”转向“缓慢释放与持续转化”。由此可见，南海湖 DOM 在春夏以内源为主，秋季陆源输入显著增强，冬季则呈现内源缓释与外源补充并存的特征。

2.4.2 DOM 光学特性对浮游植物群落结构的反馈调节　DOM 的光学特性不仅反映其组成，也直接影响浮游植物生长。夏季 $SUVA_{254}$ 全年最低（0.72±0.02），E2/E3 最高（18.06±0.67），说明 DOM 以小分子、低芳香性物质为主，吸光能力弱，利于水下光透过，为绿藻和蓝藻提供竞争优势，与夏季绿藻绝对优势一致。

秋季，$SUVA_{254}$ 显著升高、E2/E3 下降，表明 DOM 芳香性增强、分子量增大。基于此类 DOM 吸收光的特性，水下可利用光强可能下降，从而对高光需求藻类生长产生一定抑制作用。这种变化通过两种途径影响浮游植物：一方面 DOM 芳香性增强导致其对光的吸收增加，可能降低水下可利用光强，从而抑制高光需求藻类；另一方面高芳香性 DOM 的络合作用改变微量营养元素的生物可利用性，为适应低光或特殊营养策略的藻类（如脆杆藻属 *Fragilaria*、等片藻属 *Diatoma*）提供竞争优势[26-27]。冬季 HIX 仍高于 1.1，表明 DOM 腐殖化程度较夏秋季仍处于较高水平，但低温限制藻类生长，使 DOM 对群落结构的直接影响减弱。但 DOM 通过调控水下光热分布及营养盐再生，仍对耐低温藻类群落调节作用显著。

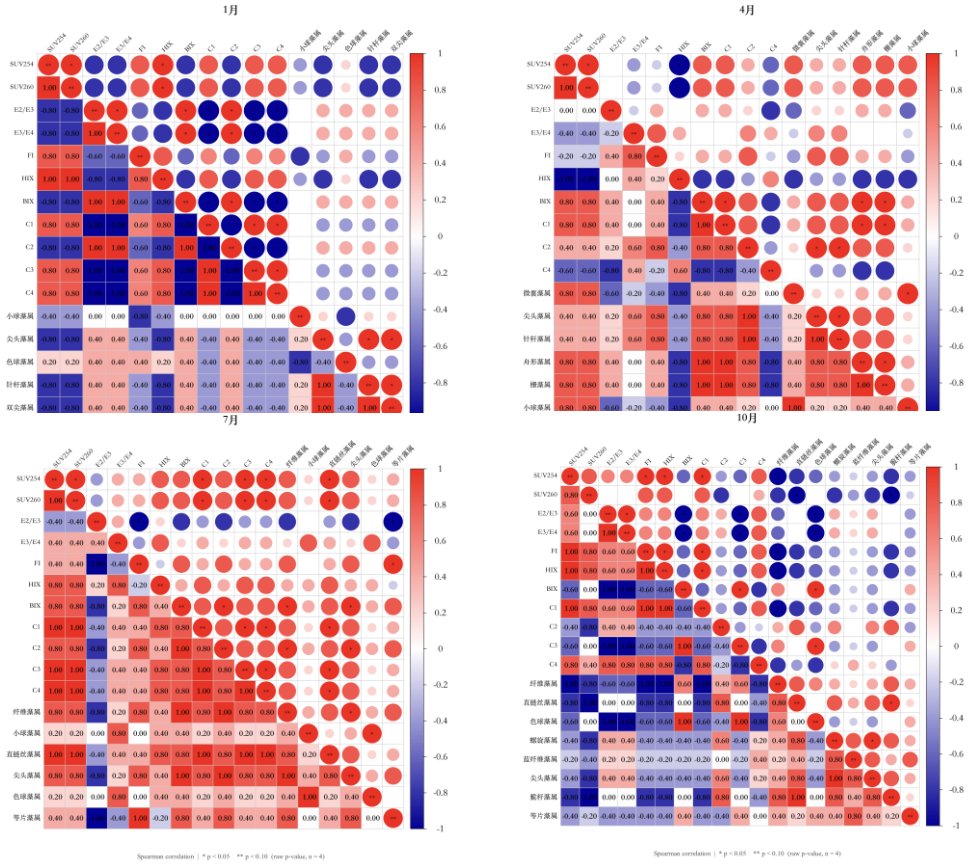

图 8 DOM 与浮游植物优势属的相关性热图

Fig.8 Heatmap of the Correlation Between DOM and Dominant Genera of Phytoplankton

2.4.3 浮游植物群落演替与 DOM 的相互影响　浮游植物群落演替与 DOM 组分特征形成动态交互。春季，绿藻门、蓝藻门和硅藻门共存（栅藻属 *Scenedesmus*、微囊藻属 *Microcystis*、针杆藻属 *Synedra*），DOM 来源多元，FI 为 1.76±0.02，BIX 为 1.19±0.05，反映群落均衡期 DOM 来源复杂。夏季，绿藻门绝对优

势及单一优势属的增长，使 DOM 产生途径趋同，大量易降解胞外有机质分泌导致类蛋白组分荧光强度达到年度峰值，BIX 达 1.23±0.01，显示 DOM 易降解性和生物可利用性最高[28]。秋冬季，群落结构重组：秋季绿藻优势减弱，蓝藻和硅藻类群增加（色球藻属 *Chroococcus*、脆杆藻属 *Fragilaria*）；冬季演替为“绿藻-硅藻并强”，优势属转为耐低温的小球藻属 *Chlorella* 及针杆藻属 *Synedra*、双尖藻属 *Nitzschia*。演替改变了 DOM 产生模式：秋季陆源输入增强，夏季藻源 DOM 进一步腐殖化转化；冬季以耐低温藻类缓释产物为主，同时沉积物再悬浮补充腐殖质[28]。总体上，DOM 组成呈现从“内源主导”向“外源增强并转化”再到“内源缓释与外源补充并存”的连续变化，体现浮游植物群落与 DOM 的相互影响关系。本研究结果对北方寒旱区同类型浅水湖泊、城市景观湖泊及受明显季节波动影响的富营养化水体中 DOM 演变与浮游植物群落响应关系研究提供参考。未来仍需结合高频连续监测及多湖泊对比分析，进一步提升相关结论的机制解释力与普适性。

3 结论

1)浮游植物群落结构呈现显著的季节性演替与空间异质性。共鉴定浮游植物 8 门 56 属，门水平呈“春季绿-蓝-硅藻均衡—夏季绿藻主导—秋季绿-蓝藻共优—冬季绿-硅藻并强”的季节特征；属水平优势种由夏秋季纤维藻属（*Ankistrodesmus*）演替为冬季小球藻属（*Chlorella*）。空间上，湖心区因环境扰动小而呈现较均衡的群落结构；进水区及旅游开发区因易受外源营养输入和人为干扰而倾向于形成单优势种群落。

2)DOM 浓度、组成与来源具有明显的季节差异。 DOC 浓度呈“夏＞春＞冬＞秋”季节性分布特征。光谱特征表明：春夏季 DOM 以低芳香性、低分子量内源组分为主；秋冬季陆源输入增强，DOM 芳香性及腐殖化程度显著升高。荧光组分分析进一步证实，类蛋白组分（C2、C3）与浮游植物活性同步变化，类腐殖质组分（C1、C4）在秋冬季相对贡献凸显。

3)浮游植物群落与 DOM 组分特征之间相互影响。 浮游植物群落结构通过门、属特异性代谢产物直接调控 DOM 的化学组成；DOM 的吸光特性与生物可利用性则通过调节水下光环境、营养盐再生途径及微生物活性，反向筛选与驱动浮游植物群落的季节演替。

4 参考文献

[1] Huang XX, Jiao LX, Liu YP *et al*. Distribution characteristics and environmental controls of dissolved organic matter in typical lakes and reservoirs in northern China. *J Lake Sci*, 2025, **37**(6): 2090-2103. DOI: 10.18307/2025.0628. [黄鑫鑫, 焦立新, 刘亚萍等. 我国北方典型湖库水体溶解性有机质赋存特征及影响因素. 湖泊科学, 2025, **37**(6): 2090-2103.]

[2] Liu SS, Hou JW, Suo CY *et al*. Molecular-level composition of dissolved organic matter in distinct trophic states in Chinese lakes: Implications for eutrophic lake management and the global carbon cycle. *Water Research*, 2022, **217**: 118438. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118438.

[3] Creed IF, Bergström AK, Trick CG *et al*. Global change-driven effects on dissolved organic matter composition: Implications for food webs of northern lakes. *Global Change Biology*, 2018, **24**(8): 3692-3714. DOI: 10.1111/gcb.14129.

[4] Feng WY, Deng YX, Yang F *et al*. Underlying mechanisms governing on distribution and stratification of DOM during seasonal freeze-thaw cycles. *Science of the Total Environment*, 2024, **928**: 172211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172211.

[5] Pan T, Zhang YM, Yang F *et al*. Characteristics of the presence and migration patterns of DOM between ice and water in the cold and arid Daihai Lake. *Science of the Total Environment*, 2024, **920**: 170876. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170876.

[6] Wu L, Lai MY, Yang M *et al*. Relationship between dissolved organic matter spectral characteristics and phytoplankton in early spring in Xiaolangdi Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(4): 1736-1747. DOI: 10.20103/j.stxb.202301090072. [武俐, 来梦媛, 杨萌等. 小浪底水库早春溶解性有机质光谱特征对浮游植物群落变化的响应. 生态学报, 2025, **45**(4): 1736-1747.]

[7] Gao JT, Tang SK, Liu WL *et al*. Seasonal variation in DOM spectral characteristics and sources in different types of lakes. *Environmental Science*, 2025, **46**(4): 2154-2164. DOI: 10.13227/j.hjkx.202401265. [高静湉, 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, 2025, **46**(4): 2154-2164.]

[8] Ai YD, Cheng HG, Quan WC *et al*. Response of phytoplankton community to dissolved organic matter composition and lake trophic state. *Journal of*

Environmental Management, 2024, **370**: 122793. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122793.

[9] Bai LL, Liu X, Wu YQ *et al*. Distinct seasonal variations of dissolved organic matter across two large freshwater lakes in China: Lability profiles and predictive modeling. *Journal of Environmental Management*, 2023, **339**: 117880. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117880.

[10] Zhang FF, Zhang WW, Wu SZ *et al*. Analysis of UV–Vis spectral characteristics and content estimation of soil DOM under mulching practices. *Ecological Indicators*, 2022, **138**: 108869. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108869.

[11] Jiang J, Zhu YR, He ZQ *et al*. Multiple spectral comparison of dissolved organic matter in the drainage basin of a reservoir in Northeast China: Implication for the interaction among organic matter, iron, and phosphorus. *Heliyon*, 2023, **9**(4): e14797. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14797.

[12] Li W, Li X, Han CX *et al*. A new view into three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy for dissolved organic matter. *Science of the Total Environment*, 2023, **855**: 158963. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158963.

[13] Xu WD, Duan LZ, Wen XY *et al*. Effects of seasonal variation on water quality parameters and eutrophication in Lake Yangzong. *Water*, 2022, **14**(17): 2732. DOI: 10.3390/w14172732.

[14] Zhao M, Ma YT, He SY *et al*. Dynamics of bacterioplankton community structure in response to seasonal hydrological disturbances in Poyang Lake, the largest wetland in China. *FEMS Microbiology Ecology*, 2020, **96**(8): fiaa064. DOI: 10.1093/femsec/fiaa064.

[15] Xu SN, Xiao YY, Xu YW *et al*. Effects of seasonal variations and environmental factors on phytoplankton community structure and abundance in Beibu Gulf, China. *Ocean & Coastal Management*, 2024, **248**: 106982. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106982.

[16] Guo SJ, Zhu ML, Zhao ZX *et al*. Spatial-temporal variation of phytoplankton community structure in Jiaozhou Bay, China. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, **37**(5): 1611-1624. DOI: 10.1007/s00343-019-8249-z.

[17] Xu YF, Wei Q, Wei ZP *et al*. Key roles of carbon metabolic intensity of sediment microbes in dynamics of algal blooms in shallow freshwater lakes. *Hydrobiologia*, 2024, **851**(20): 4873-4889. DOI: 10.1007/s10750-024-05644-w.

[18] Yang Z, Shi XL, Yu Y *et al*. Long-term and seasonal dynamic patterns and drivers of dissolved carbon in a shallow eutrophic lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, **197**(10): 1084. DOI: 10.1007/s10661-025-14552-y.

[19] Carr N, Davis CE, Blackbird S *et al*. Seasonal and spatial variability in the optical characteristics of DOM in a temperate shelf sea. *Progress in Oceanography*, 2019, **177**: 101929. DOI: 10.1016/j.pocean.2018.02.025.

[20] Niloy NM, Haque MM, Tareq SM. Characteristics, sources, and seasonal variability of dissolved organic matter (DOM) in the Ganges River, Bangladesh. *Environmental Processes*, 2021, **8**(2): 593-613. DOI: 10.1007/s40710-021-00499-y.

[21] Mohapatra S, Sharma N, Mohapatra G *et al*. Seasonal variation in fluorescence characteristics of dissolved organic matter in wastewater and identification of proteins through HRLC-MS/MS. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **413**: 125453. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125453.

[22] Jiang P, Wang Y *et al.* Fluorescence as an indicator of dissolved organic matter sources in 31 subtropical urban lakes at the Lower Yangtze River. *ACS ES&T Water*, 2025, **5**(12): 7492-7501. DOI: 10.1021/acsestwater.5c00995.

[23] Wu YQ, Jin W, Hua K *et al*. Spatial and temporal variation of dissolved organic matter and its biodegradability in typical algal bay. *Environmental Science*, 2025, **46**(3): 1406-1416. DOI: 10.13227/j.hjkx.202402012. [吴元强, 金伟, 化柯等. 典型藻型湖湾中溶解有机质及其生物可降解性的时空变化. 环境科学, 2025, **46**(3): 1406-1416.]

[24] Xiang R, Tian ZB, Zhang CD *et al*. Characterization of dissolved organic matter content, composition, and source during spring algal bloom in tributaries of the Three Gorges Reservoir. *Science of the Total Environment*, 2023, **879**: 163139. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163139.

[25] Zhang J, Chen MY, Hao ZN *et al*. Dynamic changes of dissolved organic matter derived from algal decomposition and the environmental effects in eutrophic lakes. *Environmental Science*, 2024, **45**(3): 1539-1552. DOI: 10.13227/j.hjkx.202305135. [张瑾, 陈明滢, 郝智能等. 富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应. 环境科学, 2024, **45**(3): 1539-1552.]

[26] Wei MJ, Gao C, Zhou YJ *et al*. Variation in spectral characteristics of dissolved organic matter in inland rivers in various trophic states, and their relationship with phytoplankton. *Ecological Indicators*, 2019, **104**: 321-332. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.05.020.

[27] Kang RY, An SL, Huang XL *et al*. Effect mechanism of photochemical transformation on microbial transformation of algal dissolved organic matter. *J Lake Sci*, 2025, **37**(4): 1198-1211. DOI: 10.18307/2025.0412. [康入蕴, 安世林, 黄秀琳等. 光化学转化对藻源溶解性有机质微生物转化的影响机制. 湖泊科学, 2025, **37**(4): 1198-1211.]

[28] Dory F, Cavalli L, Franquet E *et al*. Phytoplankton assemblage shifts with dissolved organic matter properties: A functional perspective for sentinel lakes. *Journal of Ecology*, 2023, **111**(1): 45-61. DOI: 10.1111/1365-2745.14013.