

呼伦湖及周边水域浮游植物群落构建机制与关键驱动因子分析*

周健华, 白凯**, 君珊 乌日古木勒, 陈鑫, 王文惠, 郭宇川

(内蒙古自治区环境监测总站呼伦贝尔分站, 呼伦贝尔 021008)

摘要: 寒旱区湖泊生态系统对气候变化与人为干扰响应敏感, 其浮游植物群落动态是表征水生态环境变化的重要指示。呼伦湖作为我国北方干旱半干旱区的典型浅水湖泊, 在“引河济湖”工程实施后, 水体呈现富营养化特征。因此, 探究其浮游植物群落的构建机制及关键环境驱动因子, 对于湖泊生态修复与水华防控具有重要意义。本研究于 2024 年至 2025 年的春、夏两季, 对呼伦湖主体湖区及主要入湖水域的 25 个点位进行了系统的生态调查, 旨在解析浮游植物群落季节演替规律、分类 Beta 多样性特征及其与环境因子的耦合关系。结果表明: 呼伦湖及周边水域浮游植物群落结构呈现显著的季节演替。春季以绿藻门、蓝藻门为优势类群; 夏季则转变为以蓝藻门为绝对优势类群, 铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和卷曲鱼腥藻 (*Anabaena circinalis*) 成为优势物种。浮游植物细胞密度年平均值为 2.42×10^5 cells/L, 季节分布呈现夏季 ($2.95-3.20 \times 10^6$ cells/L) 显著高于春季 ($1.68-1.76 \times 10^6$ cells/L) 的特征。尽管夏季物种丰富度较高, 但群落的 Shannon-Wiener 多样性指数显著低于春季。典范对应分析 (CCA) 表明春季群落主要受总磷 (TP)、浊度 (Turb) 和化学需氧量 (COD_{Cr}) 影响; 而夏季群落则主要受水温 (WT)、总氮 (TN)、五日生化需氧量 (BOD_5) 和叶绿素 a (Chl-a) 等因子驱动。分类 Beta 多样性分解显示, 季节间和年际间的分类 Beta 多样性主要由周转组分主导, 这表明物种替换是呼伦湖及周边水域浮游植物群落构建的核心过程, 反映了强烈的环境筛选作用及生境异质性。本研究从物种组成和群落构建机制两个维度, 揭示了环境过滤是影响呼伦湖及周边水域浮游植物群落季节动态的核心驱动力。研究成果不仅明确了呼伦湖及周边水域富营养化过程中的关键调控因子, 也为该湖及我国北方同类型寒旱区湖泊的水生态健康评估、蓝藻水华预警与生态修复实践提供了重要的科学依据。

关键词: 呼伦湖; 浮游植物; 水体富营养化; 群落结构; 群落构建机制

Analysis of phytoplankton community assembly mechanisms and key driving factors in Lake Hulun and its adjacent water bodies

Zhou JianHua¹, Bai Kai^{1**}, Junshan Wuruigumule, Chen Xin, Wang Wenhui, Guo Yuchuan

(Hulunbuir Sub-station of Inner Mongolia Environmental Monitoring Station, Hulunbuir 021008, P.R.China)

Abstract: Lake ecosystems in cold and arid regions are sensitive to climate change and human disturbances, and the dynamics of their phytoplankton communities serve as important indicators characterizing changes in the aquatic ecological environment. Lake Hulun, a typical shallow lake in the arid and semi-arid regions of northern China, has exhibited eutrophication characteristics following the implementation of the "River Diversion to Lake" project. Therefore, exploring the assembly mechanism of its phytoplankton community and the key environmental driving factors is of great significance for lake ecological restoration and algal bloom prevention and control. From spring to summer of 2024 to 2025, a systematic ecological investigation was conducted at 25 sites in the main lake area and main inflow waters of Lake Hulun, aiming to analyze the seasonal succession patterns, taxonomic beta diversity characteristics of phytoplankton communities, and their coupling relationships with environmental factors. The results indicated that the phytoplankton community structure in Lake Hulun displayed significant

* 2025-10-29 收稿; 2026-01-13 收修改稿

内蒙古自治区重点研发与成果转化计划项目 (2023YFSW0007) 资助。

**通讯作者; E-mail: esrihlb@163.com

seasonal succession: in spring, Chlorophyta and Cyanophyta were the dominant groups; in summer, Cyanophyta became the absolute dominant group, with *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena circinalis* as the dominant species. The annual average phytoplankton cell density was 2.42×10^5 cells/L, and the seasonal distribution showed that the density in summer ($2.95-3.20 \times 10^5$ cells/L) was significantly higher than that in spring ($1.68-1.76 \times 10^5$ cells/L). Although species richness was relatively higher in summer, the Shannon-Wiener diversity index of the community was significantly lower than that in spring. Canonical Correspondence Analysis (CCA) showed that the spring community was mainly affected by total phosphorus (TP), turbidity (Turb), and chemical oxygen demand (COD_{Cr}), while the summer community was mainly driven by factors such as water temperature (WT), total nitrogen (TN), five-day biochemical oxygen demand (BOD₅), and chlorophyll a (Chl-a). Decomposition of taxonomic beta diversity revealed that the taxonomic beta diversity between seasons and years was dominated by the turnover component, indicating that species replacement is the core process in the assembly of the phytoplankton community in Lake Hulun, reflecting strong environmental filtering effects and habitat heterogeneity. This study demonstrates that environmental filtering is the core driving force affecting the seasonal dynamics of the phytoplankton community in Lake Hulun from two dimensions: species composition and community assembly mechanism. The research results not only identified the key regulatory factors in the eutrophication process of Lake Hulun but also provided an important scientific basis for the aquatic ecological health assessment, cyanobacterial bloom early warning, and ecological restoration practices of this lake and similar cold and arid lakes in northern China.

Keywords: Lake Hulun; Phytoplankton Eutrophication of water bodies; Community structure; Community construction mechanism

浮游植物是单细胞真核藻类，是水生生态系统中至关重要的初级生产者^[1]。浮游植物主要分布于水层间，其移动可以依赖水流的被动运输^[2,3]。水体理化因子与水动力条件共同塑造了浮游植物的群落演替特征，营养盐水平作为关键内在驱动因子，直接决定着其种类组成、群落结构及优势种分布^[4]。受季节性气候波动驱动，环境因子的变化导致浮游植物群落呈现显著的季节演替动态。具体表现为，其对环境筛选作用的响应集中体现在优势种种群结构的季节性更迭上，例如，夏季高温、强光及低氮条件通常促使蓝藻（如微囊藻）成为绝对优势种；而春季的低温、高氮磷比则更利于硅藻（如小环藻）的增殖。由此可见，环境过滤是驱动浮游植物群落季节演替的核心动力。另有研究表明，除温度、光照等物理因子外，水体的氮、磷等营养盐浓度及其比例，直接调控着浮游植物的生理代谢与种群竞争，是决定群落结构与优势种演替的关键化学因子^[2,3,5]。因此，揭示关键环境因子对群落结构的驱动机制，对于理解水生生态系统的功能与稳定性至关重要。作为典型的生态脆弱带，寒旱区湖泊生态系统对气候波动及人为干扰的响应远较其他地区敏感与剧烈^[5-8]。其生物群落结构及多样性维持机制，更直接地受限于营养盐输入等局地环境因子的变化。因此，精准识别该区域湖泊藻类细胞密度及群落构建对环境驱动响应规律，并揭示浮游植物群落结构演变的驱动机制是本研究关注的重要科学问题。

水生环境是地球上最多样化和最脆弱的生态系统之一，在生物多样性保护和生态系统服务提供方面发挥着重要作用^[5-8]。湖泊生态系统在全局水生环境中占据关键地位，是维系生物多样性与提供供给、调节等服务的核心载体^[6]。以位于中国北方干旱、半干旱区的典型草原湖泊呼伦湖为研究对象，该湖地处高纬度，具有浅水、富营养化及季节性冰冻等鲜明的地理与环境特征。自 2010 年“引河济湖”工程实施以来，呼伦湖的水体循环结构与周边污染源格局均发生了显著改变^[6,9]。已有研究表明浮游植物群落的构建过程受到环境筛选（如严峻的冰冻期低温、生长季的氮限制）影响。在此修复关键时期，开展浮游植物群落监测，既可动态评估湖区水质现状，也能为蓝藻水华及富营养化风险的早期预警提供直接依据；本研究采用湖泊生态系统经典调查方法，系统开展浮游植物群落与水质理化指标的季节性监测。主要研究目标如下：

（1）解析呼伦湖及周边水域浮游植物群落的组成结构、优势种变化及分类 Beta 多样性特征；（2）揭示呼伦湖及周边水域水质理化指标的季节动态规律。以期精准掌握呼伦湖水域浮游植物群落结构的季节波动规律，明确不同季节优势种的生物学特性与时空分布特征；进一步结合多元统计分析等手段，探究驱动浮游植物群落结构变化的关键环境因子。本研究成果可为呼伦湖及周边水域的富营养化综合治理提供科学依据

与技术支撑, 补充完善其生态保护与修复的基础数据体系。同时, 也为我国北方寒冷干旱区内陆湖泊的生态学研究提供了典型案例与基础资料, 有助于推动区域湖泊生态系统研究的理论发展与实践应用。本研究揭示了环境过滤驱动的物种周转是呼伦湖及周边水域浮游植物群落构建的核心机制, 并识别了水温、总氮等关键驱动因子及其生态效应, 从而为当地及我国北方同类型湖泊的富营养化控制与水华防控提供了明确的管理靶点与理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

呼伦湖(116°58'E—117°47'E, 48°33'N—49°20'N), 是我国东北地区最大内陆淡水湖, 部分季节呈微咸水特征, 为呼伦贝尔草原生态系统核心水文枢纽及周边入湖水域(含呼伦湖东南部附属湿地湖泊乌兰诺尔湖、克鲁伦河与乌尔逊河等主要入湖支流); 该区域属典型温带大陆性季风气候, 四季分明且昼夜温差大, 春季年均气温-2~2°C、降水量 250~350mm(60%~70%集中于夏季)、蒸发量 1500~1800mm, 夏季(6—8 月)平均气温 18~22°C(浮游植物生长活跃期)。本研究共设置 25 个监测点位(见图 1), 其中呼伦湖主体湖区 17、乌兰诺尔湖 3 个、周边入湖水域 5 个; 监测周期涵盖 2024—2025 年, 每年度于春季(5—6 月)、夏季(7—8 月)各开展 1 次野外调查。

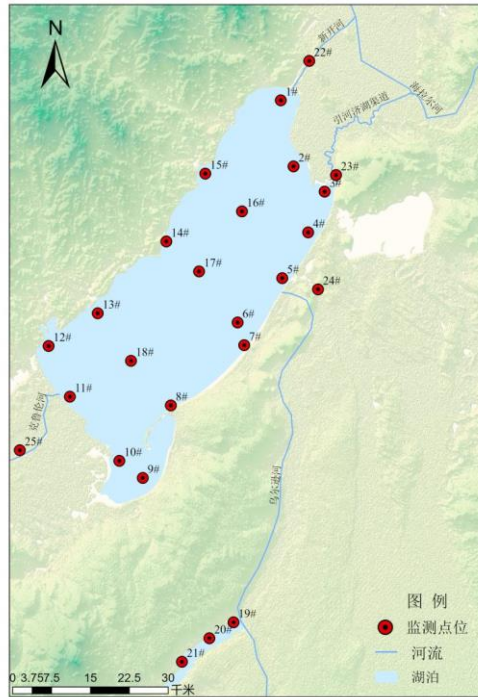


图 1 呼伦湖及周边水域采样点位设置

Fig.1 Location of sampling sites in Lake Hulun and adjacent water bodies

1.2 样品的采集与测定

1.2.1 浮游植物样品的采集与分析 浮游植物定性样品使用 25#浮游生物网在各采样点表层至 0.5m 水深处以 20cm/s~30cm/s 的速度做“∞”形往复、缓慢拖动约 1min~3min 提出水面, 样品盛于采样瓶中并加入水样体积为 1.0%~1.5%的鲁哥试液进行固定; 浮游植物定量样品根据水深不同分层采样, 具体如下: 当水深 ≤5m 时, 取表层水样; 当 5m<水深≤10m 时, 分上、下 2 层采集水样; 当水深>10m 时, 在离水底 0.5m 处分上、中、下 3 层采集水样。采集后的 1L 水样用鲁哥试液固定后带回实验室静置 48h, 吸去上清液浓缩至 50mL 盛于采样瓶中。浮游植物样品在 400 倍显微镜下鉴定, 物种鉴定到最小分类单元。

1.2.2 理化因子的样品采集与分析 使用便携式水质分析仪(WTW Multi3430型)和便携式浊度仪(2100Q)现场测定每个采样点水面以下0.5m处的水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、电导率(SpCond.)和浊度(Trub)。水样于4℃冷藏保存并运至实验室,分析指标包括:营养盐指标——总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP);有机物指标——高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD_{Cr})、五日生化需氧量(BOD₅)和氟化物(F);其他指标——叶绿素a(Chl-a)和砷(As)。所有指标的测定均严格参照《水和废水监测分析方法(第四版增补版)》中的标准方法。

1.3 数据处理与分析 使用Shannon-Wiener多样性指数(H')以及优势度(Y)描述浮游藻类群落特征^[8-9],计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

$$J = H' / \ln S$$

$$Y = n_i / N \times f_i$$

式中: $p_i = n_i / N$; p_i 为第*i*种藻类密度与总密度的比值; n_i 为第*i*种藻类密度; N 为总密度; S 为藻类物种数; f_i 为第*i*种藻类各采样点出现频率。将 $Y \geq 0.02$ 的藻类定为优势种。使用 R4.4.2 的 vegan、betapart 等包对数据统计分析和作图。基于采样点的地理坐标,通过主坐标邻距矩阵分析生成一组空间特征变量(PCNM 变量)。将上述 PCNM 变量(空间因子)与筛选后的环境因子共同作为解释变量,通过 VPA 量化它们对浮游植物群落结构变异的独立与联合解释率。为检验水体理化因子在季节或年际间的差异是否具有统计学意义,本研究采用配对样本 t 检验(Paired-sample t-test)进行分析。显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$,当 $p < 0.05$ 时认为差异显著, $p < 0.01$ 时认为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构的季节变化

呼伦湖及周边水域 2024 年春季共鉴定出浮游植物 134 种,蓝藻门为优势类群,相对丰度达 54.32%;绿藻门次之,为 36.23%。夏季浮游植物物种数增至 147 种,蓝藻门相对丰度显著上升至 82.00%,硅藻门以 9.99% 的比例成为第二优势类群(图 2)。2025 年春季鉴定出 134 种浮游植物,优势类群转变为绿藻门(62.62%),硅藻门次之(28.67%);夏季种类为 131 种,蓝藻门再次成为绝对优势类群,相对丰度为 73.09%,绿藻门次之(19.81%)。

浮游植物细胞密度年平均值为 2.42×10^5 cells/L,呈现夏季($2.95-3.20 \times 10^5$ cells/L)显著高于春季($1.68-1.76 \times 10^5$ cells/L)的季节特征。2024 年春季以蓝藻门(8.50×10^4 cells/L)、绿藻门(6.80×10^4 cells/L)和硅藻门(2.30×10^4 cells/L)为主;夏季蓝藻门密度显著上升至 1.85×10^5 cells/L,绿藻门增至 9.80×10^4 cells/L,其他类群亦有增加。2025 年春季群落结构与 2024 年相似,蓝藻、绿藻、硅藻密度分别为 7.20×10^4 cells/L、 6.20×10^4 cells/L 与 2.60×10^4 cells/L;夏季则以蓝藻门(1.62×10^5 cells/L)和绿藻门(9.20×10^4 cells/L)为主。与 2024 年相比,2025 年浮游植物总密度呈下降趋势:春季由 1.76×10^5 cells/L 降至 1.68×10^5 cells/L(降幅 4.5%),夏季由 3.20×10^5 cells/L 降至 2.95×10^5 cells/L(降幅 7.8%)。其中蓝藻门下降较为明显,春季与夏季分别降低 15.3% 与 12.4%;绿藻门降幅较小,分别为 8.8% 与 6.1%。硅藻门等其他类群季节间变化相对稳定。与 2022 年研究结果(年均值 1.05×10^9 cells/L)相比,2024–2025 年浮游植物细胞密度整体偏低,蓝藻门密度较 2022 年同期显著下降。研究期间,蓝藻门在夏季始终保持绝对优势地位。根据 2024 年与 2025 年连续两年的野外调查数据及后续统计分析结果显示,研究区域内春季的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')均高于同期夏季的指数水平。尽管从物种丰富度(即群落中物种的总数量)来看,夏季群落的物种总数通常多于春季,但春季群落的多样性特征更为突出。

2.1.1 浮游植物优势种 如附表 1 所示呼伦湖及周边水域 2024 年共鉴定到 27 个浮游植物优势种。这些优势种的种类数量在春夏两季之间有明显差别,其组成也发生了显著变化(附表 1)。在春季共鉴定到 12 个浮游植物优势种,而在夏季共鉴定到 20 个浮游植物优势种。水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae*)和卷曲鱼腥藻(*Anabeana circinalis*)在春、夏两个季节中均为主要优势种,优势度(Y)均在 0.080 以上。此外,梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)是春季优势度最高的藻种,而铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)则为夏季优势

度最高的藻种，并且这 2 个藻种对比其他同季优势种具有明显优势。如附表 2 所示在 2025 年共鉴定到 26 个浮游植物优势种。在春季共鉴定到 11 个浮游植物优势种，而在夏季共鉴定到 19 个浮游植物优势种。针形菱形藻(*Nitzschia acicularis*)是春季优势度最高的藻种，卷曲鱼腥藻(*Anabaena circinalis*)则是夏季优势度最高的藻种，并且这两个藻种对比其他同季优势种具有明显优势。

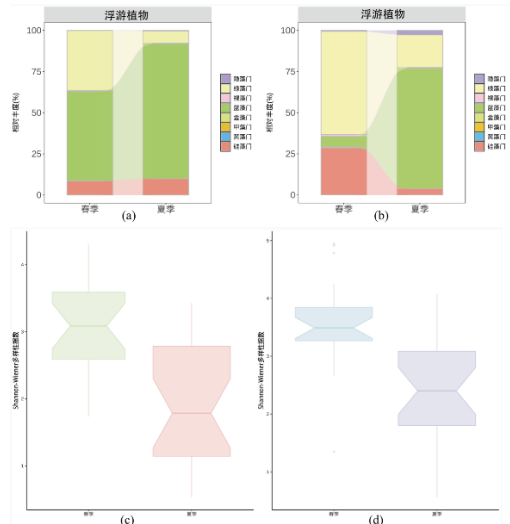


图 2 呼伦湖及周边水域浮游植物 2024 年春季与夏季(a)、2025 年春季与夏季(b)的主要类群相对丰度，以及 2024 年(c)、2025 年(d)的多样性指数分析结果

Fig. 2 The relative abundance of the main groups of phytoplankton in Lake Hulun and its adjacent water bodies in the spring and summer of 2024 (a) and the spring and summer of 2025 (b), as well as the diversity index analysis results in 2024 (c) and 2025 (d)

2.2 水体理化因子对呼伦湖及周边水域群落构建的影响及响应机制

2024 年春、夏两季水体理化因子监测数据，呼伦湖春季水温平均 20.58℃、夏季升至 23.57℃，pH 值春季 8.74(8.00-9.00)、夏季 8.86(8.00-9.10)，水体呈弱碱性且温度符合季节规律；氮磷营养盐中，氨氮春夏均为 0.06mg/L(夏季波动扩至 0.04-0.23 mg/L)，总磷夏季低于春季，总氮夏季高于春季；有机物相关指标里，高锰酸盐指数、五日生化需氧量夏季略高，化学需氧量夏季低于春季；与春季相比，夏季水体溶解氧均值升高但波动加剧，氟化物与砷浓度则保持稳定；物理特性上，电导率升高且波动增大，透明度略降，浊度均值及波动性下降；而叶绿素 a 浓度呈现剧增，从春季的 0.01μg/L(0.00-0.03μg/L)升至夏季的 70.40μg/L(0.06-207.00μg/L)(图 3)。在 2025 年春、夏两季水体理化因子监测数据，春季水温平均 12.62℃(10.20-16.00℃)、夏季升至 23.94℃(22.00-25.90℃)，温度随季节变化呈现明显上升趋势；pH 值春季 8.94(8.00-10.10)、夏季 8.69(8.10-8.90)，水体整体呈弱碱性；氮磷营养盐方面，氨氮春季 0.04mg/L(0.03-0.08mg/L)、夏季 0.12mg/L(0.06-0.92mg/L)，夏季浓度及波动幅度均有所上升；总磷夏季 0.14mg/L(0.10-0.18mg/L)低于春季 0.17mg/L(0.09-0.20mg/L)；总氮夏季 1.44mg/L(0.39-3.45mg/L)高于春季 1.28mg/L(0.60-2.46mg/L)；有机物相关指标里，高锰酸盐指数、化学需氧量夏季略低，五日生化需氧量夏季 2.65mg/L(1.10-5.20mg/L)高于春季 1.66mg/L(1.00-4.30mg/L)；溶解氧夏季均值 8.12mg/L(7.50-9.60mg/L)低于春季 10.58mg/L(9.20-12.10mg/L)；物理特性上，电导率夏季略升，透明度夏季 23.76cm(-1.00-38.00cm)略低于春季，浊度夏季均值有所上升(图 3)。

研究期间呼伦湖理化因子季节差异显著，WT 和 BOD₅ 夏季均极显著高于春季，2024 年夏季 DO 显著高于春季(图 3)，2025 年夏季极显著低于春季(图 4)。此外，2024 年夏季 COD_{Mn}、TN、Chl-a 极显著高于春季；2025 年夏季 pH、NH₄⁺-N、TP 显著或极显著高于春季。而在 2024 年 pH、TP、COD_{Cr}、SpCond₁₅、Transp、Trub 等在两年春夏季均无显著差异。

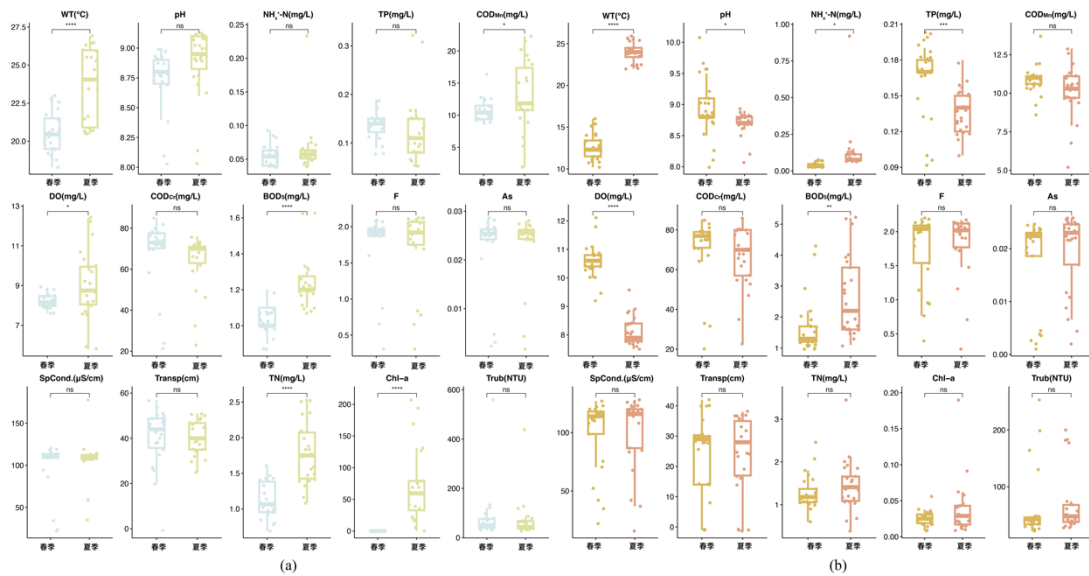


图3 呼伦湖及周边水域(a)2024 春季、夏季(b)2025 春季、夏季水体理化因子差异性分析

Fig.3 Analysis of the differences in physical and chemical factors of water bodies in Lake Hulun and its adjacent water bodies (a) in spring and summer 2024 and (b) in spring and summer 2025

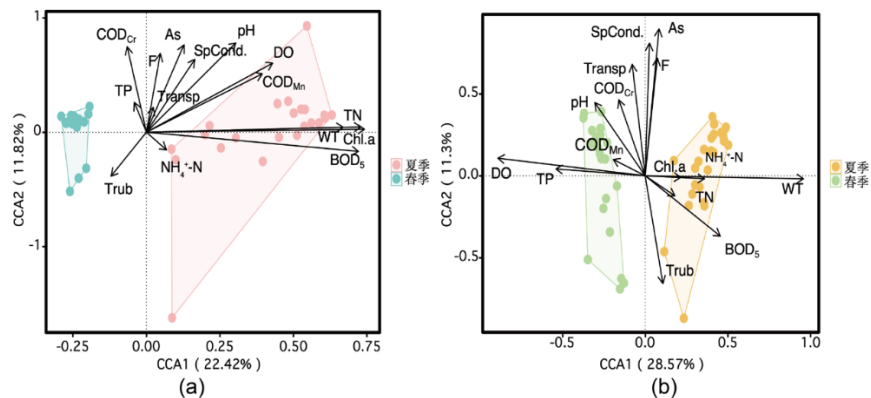


图4 呼伦湖及周边水域浮游植物 2024 春季、夏季(a)和 2025 春季、夏季(b)CCA 分析结果

Fig.4 Shows the CCA analysis results of phytoplankton in Lake Hulun and its adjacent basins in spring 2024 and summer (a) and spring 2025 and summer (b)

2024 年春季、夏季 (图 4a) 的 CCA1 轴特征值可解释 22.42% 的变差, CCA2 轴特征值可解释 11.82% 的变差; 2025 年春季、夏季 (图 4b) 的 CCA1 轴特征值可解释 28.57% 的变差, CCA2 轴特征值可解释 11.3% 的变差, WT、TN、BOD₅、COD_{Mn} 及 TP 是驱动呼伦湖及周边水域浮游植物群落结构变化的关键环境因子。季节差异是群落变化的主要特征: 春季群落与 DO、TP 等因子相关性较高; 而夏季群落主要受 WT、TN、BOD₅、COD_{Mn} 及 NH₄⁺-N 的影响。年际对比显示, 上述季节性格局在 2024 与 2025 年基本一致(图 4), 表明驱动呼伦湖及周边水域浮游植物群落季节性演替的关键环境因子具有较好的重现性。

2024–2025 年不同季节间物种 Beta 多样性分解结果的分析表明, 总 Beta 多样性均主要由周转组分 (Turnover) 所贡献, 嵌套组分 (Nestedness) 的贡献相对较小(图 5)。结果表明, 两个年份季节尺度上群落组成差异主要源于物种周转过程, 嵌套性作用不显著, 反映出该生态系统中物种替换(周转)是季节性群落动态的主导机制。呼伦湖及周边水域 2024 年、2025 年春季和夏季浮游植物群落构建过程主要受到环境过滤影响。

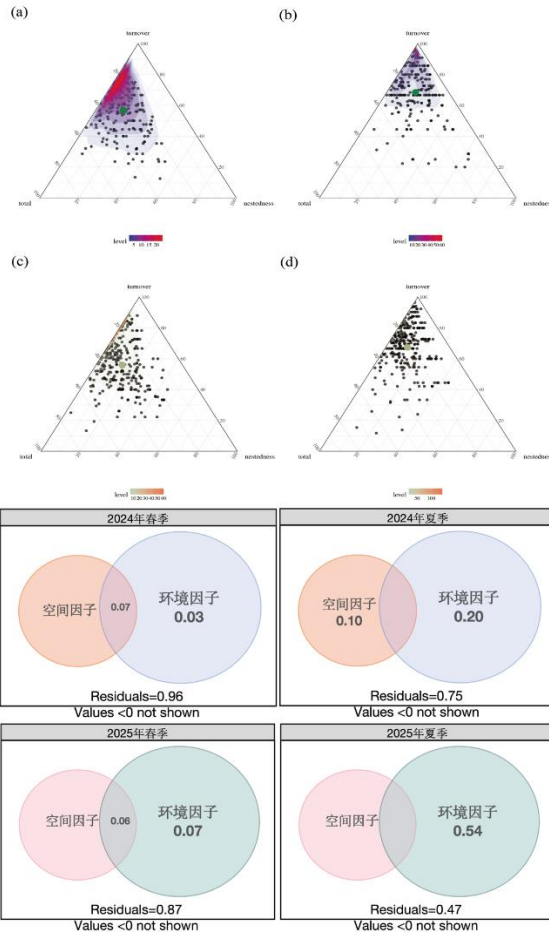


图5 呼伦湖及周边水域浮游植物 2024 春季(a)、夏季(b)和 2025 春季(c)、夏季(d)分类 Beta 多样性分析及 VPA 分析

Fig.5 Beta diversity analysis and VPA analysis of phytoplankton in Lake Hulun and its adjacent water bodies in spring 2024 (a), summer 2024 (b), and spring 2025 (c), summer 2025 (d)

3 讨论

3.1 呼伦湖及周边水域浮游植物群落组成与环境因子关系分析

湖泊生态系统受到多种环境因素影响，包括营养物质过度富集、水流状态改变和气候变化。这些环境因素对生态系统造成不利影响，引发栖息地退化、水质恶化，以及生物群落和物种间关系的变化^[10,11]。2024 与 2025 年春、夏两季，呼伦湖及周边水域浮游植物均以蓝藻门、绿藻门、硅藻门为主要类群^[7,8]，呈现典型的温带水体藻类季节演替特征，且硅藻与绿藻的季节消长差异反映了物种适应性与环境因子的精准匹配。水体营养状况的人为改变可以显著改变氮磷比，进而会影响生态系统内微生物的代谢和生长速度^[12,13]。WT、DO 及营养盐等主要环境驱动因子的改变，是浮游植物群落发生适应性演替的关键因素^[14-18]。硅藻春季相对占优的核心驱动机制体现在物种特化适应性与春季生境的高度契合，这一结果与同纬度其他湖泊(查干湖、乌伦古湖)相似^[5,6,19,20]。作为春季优势种的梅尼小环藻，其硅质细胞壁赋予的耐低温特性(适宜生长水温 8-20°C)与春季水温回升初期的环境条件完全适配^[21]。呼伦湖春季因表层水温上升，导致水体热力分层减弱，在风浪等外力驱动下发生垂向对流混合，促使底层沉积的氮、磷等营养盐向表层水体输送，而梅尼小环藻对低浓度营养盐的高效利用能力使其在资源竞争中占据先机^[22]。此外，春季硅藻的早期增殖可通过光合作用提升水体 DO 水平，为夏季绿藻的生长奠定氧化环境基础，这种群落内部的“接力效应”进一步强化了季节演替的稳定性^[16,23,24]。同时，夏季呼伦湖 TN、COD_{Mn} 等指标升高带来的有机质富集，为绿藻提

供了额外碳源^[25]。夏季蓝藻虽成为绝对优势类群,但绿藻与蓝藻的生态位重叠度较低,二者对光照和营养盐的需求差异减少了直接竞争压力^[22]。上述群落结构变化与环境因子的季节性波动形成精准响应:春季水层翻转带来的营养盐补充与温和温光条件,完全适合硅藻的生理生态需求;夏季高温、水体营养环境上升使得环境中微囊藻属大幅增加(图 3)。在本研究期间(2024-2025 年)夏季蓝藻优势种优势度极高(如铜绿微囊藻优势度 0.595),较 2019 年(卷曲长孢藻优势度 0.12)和 2022 年(微囊藻属优势度 0.49)进一步上升,表明即使整体蓝藻密度略有下降,但是仍然具有水华风险^[6]。随着季节更替与湖泊水温持续升高,浮游动物(如枝角类)对浮游植物(以硅藻为主)的摄食作用增强,导致摄食压力不断上升,同时水体中营养盐逐渐消耗抑制了硅藻的生长与繁殖^[20]。蓝藻在夏季所占比例显著上升,其增长可能与水温升高、光照充足以及水体中氮、磷浓度较高等环境因素密切相关^[26]。相比之下,绿藻更能适应高温及低营养条件,因而在夏季逐渐成为优势类群^[17]。

CCA 分析结果进一步表明,WT 和 TN 是驱动呼伦湖及周边水域硅藻-绿藻群落季节演替的核心环境因子(图 5)。WT 从春季的 12.62-20.58°C 升至夏季的 23.57-23.94°C; TN 在 2024 年夏季最高达 1.73mg/L(表 3,表 4)。这表明偏好高温、高氮的蓝藻(如铜绿微囊藻)和绿藻在夏季能够取代硅藻成为主导,主要是实测环境条件正好满足了其最适生长需求。2024-2025 年研究期间湖体的 TN、TP 浓度(均值分别为 1.43、0.12mg/L 和 1.36、0.15mg/L)虽仍远超公认的水华爆发阈值(氮>0.5mg/L,磷>0.02mg/L)^[7,8],但与 2022 年李兴月等人^[7,8]呼伦湖研究的 TN、TP 的平均值 1.59mg/L 和 0.21mg/L 相比已呈现出一定的下降趋势。这一改善发生于中国‘十四五’规划(2021-2025 年)对重点湖泊流域“氮磷双控”关键期。在此期间,呼伦湖流域作为生态安全屏障,是多项环境治理工程与政策的核心实施区域。整合研究期及过往水体理化参数与浮游植物群落结构数据,能清晰揭示呼伦湖富营养化的主导地位及其季节性动态,为理解其生态效应并制定针对性管理策略奠定了科学基础。

作为评估水体生态系统状态的关键参数,浮游植物多样性指数是分析群落结构的核心手段之一^[2,16,24]。对呼伦湖及周边水域而言,春季融冰是营养盐输入的关键过程^[6,7,8,20]。由于春季融冰将冰封期阻留的营养物质大量释放入湖^[27-29],使得湖水中 TP 浓度在春季维持在较高水平(图 4);这一变化使得 TP 在春季成为影响物种群落结构的主要环境因子(图 5),且该结果在 2025 年的数据中更为突出。因此春季呼伦湖及周边水域的 Shannon-Wiener 多样性指数一直高于夏季,表明其群落结构趋于简单化,这意味着生态系统稳定性降低,对外界干扰(如水华)的抵抗力和恢复力减弱。因此,夏季群落耐受水华等胁迫事件的能力很可能更低,生态系统更为脆弱。与钱玺亦等人和李兴月等人之前对呼伦湖的研究结论一致^[6,7,8],呼伦湖浮游植物群落的季节性动态显著。春季,优势种以梅尼小环藻等适应低温、高营养盐的硅藻为主;随着季节推进至夏季,优势种则转为偏好高温、强光的微囊藻属等蓝藻。此演替类型符合温带湖泊的典型模式,揭示了环境过滤作用对群落结构的塑造^[30]。

3.2 呼伦湖及周边水域浮游植物群落构建机制的季节性动态特征

本研究通过对呼伦湖及周边水域浮游植物群落的周年监测,揭示了其群落构建过程存在显著的季节性动态。水生生态系统中的环境异质性(水温、营养盐的季节性变化)是驱动群落构建过程的基础:浮游植物通过生态廊道完成扩散并伴随环境过滤筛选,最终在适宜生境中定殖并完成建群过程^[29]。为深入解析此过程,本研究基于分类 Beta 多样性及其组分,将群落构建模式分解为物种周转(Turnover)与嵌套(Nestedness)。结果表明,周转是群落结构动态的主要组分(图 6),这意味着物种的季节性演替主要表现为生境间的物种完全替换,而非物种数量的增减。这一过程具有较大随机性,使得不同水域的浮游植物群落差异显著。也进一步说明物种较少的样点并非丰富样点的简单子集,而是拥有各自独特的物种组合。这一模式凸显了环境过滤等确定性过程在呼伦湖及周边水域浮游植物群落季节性构建中的主导作用,与前述 WT、TN 等核心环境因子的驱动效应相呼应。这一格局主要归因于呼伦湖作为一个典型温带半干旱区湖泊所经历的高度环境异质性和强烈的水文动态^[6,7,8]。周转过程的主导地位与环境过滤等生态过程的季节性消长密切相关。春季融冰导致水体混合均匀,这极大地促进了浮游植物的扩散^[31]。然而,此时较低的水温和不稳定的光照等非生物条件构成了强烈的环境过滤,只有具备特定功能性状(如耐低温、高混浊耐受性)的物种(梅尼小环藻)能够生存^[32]。这种强烈的环境选择压力,滤除了无法适应局地环境条件的物种,进而在不同湖区形成

经环境筛选的群落；且湖区群落的物种组成差异显著，最终表现为环境过滤主导群落构建过程的高周转特征。进入夏季，水温升高、营养盐浓度因内源释放和水文输入而变化，水体分层趋于稳定，这为更多种类的浮游植物(如蓝藻、绿藻)的生存创造了条件。高温构成了一个强烈的选择压力，筛选出具有耐高温生理性状的类群。已有大量生理学研究证实，许多蓝藻(如微囊藻)能够通过产生耐热蛋白、维持高温下光合系统 II 的稳定性、以及利用伪空泡调节垂直位置以避免表层过热等性状来适应高温环境^[39-40]。因此，夏季呼伦湖的高水温通过正向选择上述耐热性状，从而导致了蓝藻主导的群落结构。尽管本研究未直接测定这些性状，但类群水平的响应模式与已知的性状-环境关系高度一致，支持了高温作为关键环境过滤因子的作用。此时，虽然环境过滤依然存在，但其强度相对减弱。而丰富的物种数量和可能存在的种间竞争(对光照和营养的竞争)开始对群落结构产生重要影响^[33]。根据生态位理论，竞争排斥会导致相似生态位的物种无法共存，从而促进了群落的周转^[34-36]。因此，夏季可能是一个由环境过滤和生物相互作用共同驱动周转的时期。相比之下，嵌套过程在群落构建中作用有限。这种以周转为主导的格局，主要是由季节性的环境过滤以及环境过滤与生物相互作用的共同作用所驱动。这意味着，控制外源性氮输入、关注农业面源以及水体有机污染，是缓解夏季蓝藻水华风险更具针对性的策略^[14]，此外建议管理者在春季通过硅藻增殖抑制蓝藻，并优先控制外源氮输入。由于硅藻通常具有较高的最大生长速率和对磷的较高亲和力，这使它们在春季水温回升、营养盐相对有限的条件下能够快速启动生长，抢占生态位^[41-42]。硅藻光合作用的最适温度普遍低于蓝藻，且已有研究表明在春季典型的较低水温(如 15-20°C)和延长光周期下，硅藻在磷竞争中更具优势^[39]。因此，在蓝藻最适高温(通常>25°C)到来之前，春季的物理化学环境本身即构成了对硅藻的选择性过滤^[39-42]。基于此生态位差异，通过人工措施(如在关键时期补充可溶性硅等营养盐)进一步强化硅藻的初始竞争优势，是合理且具有生态学依据的预控策略。同时，周转主导意味着群落可能存在周期性都会“组成重置”，这在生长季初期(春季)通过生态手段引导群落向硅藻等有益方向演替提供了“生态位”。呼伦湖作为对我国北方同类型湖泊的研究与保护的典型案例，其浮游植物存在“强烈环境过滤驱动高周转”模式，很可能在广大寒旱区湖泊中普遍存在。这为区域性的湖泊比较生态学研究提供了研究范式，也警示在气候变化背景下温度与水文格局的改变可能通过影响环境过滤强度，进而迅速地重构这些脆弱湖泊的整个水生生态系统。未来研究可进一步聚焦如浮游动物摄食压力等未被直接测定的关键过程，以更全面地解析其生态机制。

4 结论

- 1) 呼伦湖及周边水域 2024 年、2025 年春季平均鉴定出 134 种，夏季平均鉴定出 144 种，其中主要以蓝藻门、绿藻门以及硅藻门为主。
- 2) 春季的优势种主要为梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)；夏季优势种主要是卷曲鱼腥藻(*Anabaena circinalis*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)。
- 3) 呼伦湖及周边水域 2024、2025 年的夏季 Shannon-Wiener 多样性指数显著低于春季。
- 4) 影响浮游植物群落的关键环境因子具有明显的季节差异。2024 年春季主要为 TP、Turb 和 COD_{Cr}，夏季转为 WT、BOD₅、DO、TN 和 Chl-a；2025 年春季以 DO、TP 和 COD_{Mn} 为主，夏季则主要受 WT、BOD₅ 和 TN 驱动。这一规律揭示了农业面源污染是导致水体富营养化的主要风险来源。在未来的富营养化风险预测与防控中，必须将农业面源污染的监测、评估与管理作为核心关注点。
- 5) 空间异质性驱动的“周转”过程是呼伦湖及周边水域浮游植物群落构建的主导力量。因此，未来的环境管理与监测应突破“整体均一”的思路，重点关注局地的特异性环境驱动因子和环境异质性。

5 附件

附表 1 和附表 2 见电子版(10.18307/2026.0513)。

6 参考文献

- [1] Pound K L, Larson C A, Passy S I. Current distributions and future climate-driven changes in diatoms, insects and fish in U.S. streams[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(1): 63-78.
- [2] Ma C, Cui R, Duan Y, et al. Differences in biodiversity and assembly mechanisms between planktonic and benthic diatom communities in riverine ecosystems: a case study in the ashi river[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 157: 111258.

- [3] Rusanov A G, Bíró T, Kiss K T, et al. Relative importance of climate and spatial processes in shaping species composition, functional structure and beta diversity of phytoplankton in a large river[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 150891.
- [4] Dodds W K. Eutrophication and trophic state in rivers and streams[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1part2): 671-680.
- [5] Chang CR, Wang YY, Zhao C, et al. Seasonal Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Influencing Factors in Chagan Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43 (5): 1227-1233. [常畅然, 王莹莹, 赵昶等. 查干湖浮游植物功能群季节演替特征及其影响因子. *生态学杂志*, 2024, 43 (5): 1227-1233.]
- [6] Qian XY, Li JB, Ao W, et al. Seasonal Dynamics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Hulun Lake. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34 (6): 1814-1827. [钱玺亦, 李金彪, 敖文等. 呼伦湖浮游植物群落季节动态及其与环境因子的关系. *湖泊科学*, 2022, 34 (6): 1814-1827.]
- [7] Li XY, Zhang S, Liu Y, et al. Evolutionary Characteristics of Phytoplankton and Their Influencing Factors in Hulun Lake. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37 (1): 50-60. [李兴月, 张生, 刘禹等. 呼伦湖浮游植物演变特征及影响因素. *湖泊科学*, 2025, 37 (1): 50-60.]
- [8] Li XY, Liu XM, Liu TX, et al. Driving factors and control measures of cyanobacterial bloom in Hulun Lake. *Journal of Lake Sciences*, 2026, (3): 000-000. DOI: 10.18307/2026.0311. [李兴月, 刘晓民, 刘廷玺等. 呼伦湖蓝藻水华驱动因子及防控对策. *湖泊科学*, 2026, (3): 000-000. DOI: 10.18307/2026.0311.]
- [9] Jun S, Wang DB, Zhou JH, et al. Structural Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Lhasa River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (3): 787-798. [君珊, 王东波, 周健华等. 拉萨河流域浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系. *生态学报*, 2019, 39 (3): 787-798.]
- [10] Yu HF, Shi XH, Sun B, et al. Analysis on Changes of Water Quality and Eutrophication in Hulun Lake from 2011 to 2020. *Arid Zone Research*, 2021, 38 (6): 1534-1545. [于海峰, 史小红, 孙标等. 2011—2020年呼伦湖水质及富营养化变化分析. *干旱区研究*, 2021, 38 (6): 1534-1545.]
- [11] Feld C K, Fernandes M R, Ferreira M T, et al. Evaluating riparian solutions to multiple stressor problems in river ecosystems — a conceptual study[J]. *Water Research*, 2018, 139: 381-394.
- [12] Carr M, Li L, Sadeghian A, et al. Modelling the possible impacts of climate change on the thermal regime and macroinvertebrate species of a regulated prairie river[J]. *Ecohydrology*, 2019, 12(6): e2102.
- [13] Elser J J, Devlin S P, Yu J, et al. Sustained stoichiometric imbalance and its ecological consequences in a large oligotrophic lake[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(30): e2202268119.
- [14] Yu W, Liu F, Jiao X, et al. Human-induced N-P imbalances will aggravate GHG emissions from lakes and reservoirs under persisting eutrophication[J]. *Water Research*, 2025, 276: 123240.
- [15] Xu S, Xiao Y, Xu Y, et al. Effects of seasonal variations and environmental factors on phytoplankton community structure and abundance in beibu gulf, china[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2024, 248: 106982.
- [16] Christensen I, Pedersen L K, Søndergaard M, et al. Impact of zooplankton grazing on phytoplankton in north temperate coastal lakes: changes along gradients in salinity and nutrients[J]. *Hydrobiologia*, 2023, 850(20): 4609-4626.
- [17] Nan J, Li J, Yang C, et al. Phytoplankton functional groups succession and their driving factors in a shallow subtropical lake[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2020, 35(1): 409-427.
- [18] Maberly S C, Chao A, Finlay B J. Seasonal patterns of phytoplankton taxon richness in lakes: effects of temperature, turnover and abundance[J]. *Protist*, 2022, 173(6): 125925.
- [19] Zhang S, Pang Y, Xu H, et al. Shift of phytoplankton assemblages in a temperate lake located on the eastern route of the south-to-north water diversion project[J]. *Environmental Research*, 2023, 227: 115805.
- [20] Wang HB, Cong YF, Sun JW et al. Community Structure of Phytoplankton and Its Relationship with Aquatic Environmental Factors in Tiehala Pao of Lianhuan Lake. *Chinese Journal of Fisheries*, 2023, 36 (6): 69-77. [王慧博, 丛艳锋, 孙佳伟等. 连环湖铁哈拉泡浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系. *水产学杂志*, 2023, 36 (6): 69-77.]

- [21] Zhao W, Pu WM, Sheng XR et al. Response and Succession Mechanism of Phytoplankton Community to Seasonal Environmental Changes in Ulungur Lake, Xinjiang. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37 (5): 1495-1510. [赵巍, 普文淼, 生绪冉等. 新疆乌伦古湖浮游植物群落对季节性环境变化的响应与演替机制. *湖泊科学*, 2025, 37 (5): 1495-1510.]
- [22] Fanesi A, Wagner H, Becker A, et al. Temperature affects the partitioning of absorbed light energy in freshwater phytoplankton[J]. *Freshwater Biology*, 2016, 61(9): 1365-1378.
- [23] Peng M, Huang CC, Li LJ et al. Niche Characteristics and Interspecific Association Analysis of Dominant Phytoplankton Species in Changhu Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (4): 1549-1563. [彭梦, 黄城晨, 李立杰等. 长湖浮游植物优势种生态位特征及种间联结性分析. *生态学报*, 2024, 44 (4): 1549-1563.]
- [24] Rigosi A, Fleenor W, Rueda F. State-of-the-art and recent progress in phytoplankton succession modelling[J]. *Environmental Reviews*, 2010, 18(NA): 423-440.
- [25] Jun Shan , Wang Dongbo , Zhou Jianhua, et al. Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the lhasa river[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3).
- [26] Permann C, Becker B, Holzinger A. Temperature- and light stress adaptations in zygmatophyceae: the challenges of a semi-terrestrial lifestyle[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 945394.
- [27] Wang X, Liu X, Qin B, et al. Green algae dominance quickly switches to cyanobacteria dominance after nutrient enrichment in greenhouse with high temperature[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2015, 38(3): 293-305.
- [28] Hampton S E, Galloway A W E, Powers S M, et al. Ecology under lake ice[J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(1): 98-111.
- [29] Heino J, Grönroos M, Soininen J, et al. Context dependency and metacommunity structuring in boreal headwater streams[J]. *Oikos*, 2012, 121: 537-544.
- [30] Kääh A, Prowse T. Cold-regions river flow observed from space: COLD-REGIONS RIVER FLOW FROM SPACE[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(8): n/a-n/a.
- [31] Zdorovenova G, Palshin N, Golosov S, et al. Dissolved oxygen in a shallow ice-covered lake in winter: effect of changes in light, thermal and ice regimes[J]. *Water*, 2021, 13(17): 2435.
- [32] Riddley M, Hepp S, Hardeep F, et al. Differential roles of deterministic and stochastic processes in structuring soil bacterial ecotypes across terrestrial ecosystems[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 2337.
- [33] Zhou J, Ning D. Stochastic community assembly: does it matter in microbial ecology?[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2017, 81(4): e00002-17.
- [34] Soininen J. A quantitative analysis of species sorting across organisms and ecosystems[J]. *Ecology*, 2014, 95(12): 3284-3292.
- [35] Litchman E, Klausmeier C A. Trait-based community ecology of phytoplankton[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39(1): 615-639.
- [36] Lu X, Zhang Y, Liu Y, et al. Differences in planktonic and benthic diatoms reflect water quality during a rainstorm event in the songhua river basin of northeast China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109547.
- [37] Duan Y, Hou Z, Han S, et al. Habitat preference drives the community composition, beta diversity and assembly processes of benthic diatoms: a case study of a wetland cluster in a cold region[J]. *Environmental Research*, 2025, 270: 121054.
- [38] Zhang S, Pang Y, Xu H, et al. Shift of phytoplankton assemblages in a temperate lake located on the eastern route of the south-to-north water diversion project[J]. *Environmental Research*, 2023, 227: 115805.
- [39] Allakhverdiev S I, Kreslavski V D, Klimov V V, et al. Heat stress: an overview of molecular responses in photosynthesis[J]. *Photosynthesis Research*, 2008, 98(1-3): 541-550.
- [40] Litchman E, Klausmeier C A. Trait-based community ecology of phytoplankton[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39: 615-639.
- [41] Huisman J, Cózar A, Verspagen J M H, et al. Competition for nutrients and light: A theoretical framework for phytoplankton diversity and community structure[J]. *Limnology and Oceanography*, 2023, 68(4): 821-834.
- [42] Sommer U, Adrian R, De Senerpont Domis L, et al. Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) model: Mechanisms driving plankton succession[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43: 429-448.

附表 1 呼伦湖及周边水域 2024 年春夏季节浮游植物优势种及其优势度

Appended Tab. 1 Dominant species of phytoplankton and their dominance in Lake Hulun during the spring and summer of 2024

门	优势种	2024 年春季	2024 年夏季
硅藻	针状菱形藻 <i>Nitzschia acicularis</i>	0.043	—
	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	0.028	—
	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.328	0.063
	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	—	0.206
	颗粒直链藻极狭变种螺旋变形 <i>Melosira granulata var. angustissima f. spiralis</i>	—	0.033
	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata var. angustissima</i>	—	0.033
蓝藻	两栖颤藻 <i>Oscillatoria amphibia</i>	—	0.037
	爬行颤藻 <i>Oscillatoria animalis</i>	—	0.112
	水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	0.082	0.150
	固氮鱼腥藻 <i>Anabaena azotica</i>	—	0.031
	卷曲鱼腥藻 <i>Anabeana circinalis</i>	0.092	0.313
	浮游长孢藻 <i>Dolichospermum planctonica</i>	—	0.088
	浮游长孢藻 <i>Dolichospermum planctonica</i>	0.145	—
	柔细束丝藻 <i>Aphanizomenon gracile</i>	—	0.164
	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	—	0.213
	细小隐球藻 <i>Aphanocapsa elachista</i>	—	0.321
	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	—	0.595
	鱼害微囊藻 <i>Microcystis ichthyoblabe</i>	—	0.038
	史密斯微囊藻 <i>Microcystis smithii</i>	—	0.073
	惠氏微囊藻 <i>Microcystis wesenbergii</i>	0.057	0.242
	浮生微囊藻 <i>Microcystis natans</i>	—	0.295
	绿藻	河生集星藻 <i>Actinastrum fluviatile</i>	0.282
四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i>		0.186	—
四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>		0.044	—
直角十字藻 <i>Crucigeniella rectangularis</i>		0.025	—
游丝藻 <i>Planctonema lauterbornii</i>		0.052	0.031
隐藻	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	—	0.021

“—”表示该物种在相应季节为非优势种

附表 2 呼伦湖及周边水域 2025 春夏季节浮游植物优势种及其优势度

Appended Tab.2 Dominant Species of Phytoplankton and Their Dominance in spring, summer, Lake Hulun.

门	优势种	2025 年春季	2025 年夏季
硅藻	针形菱形藻 <i>Nitzschia acicularis</i>	0.401	—
	华丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>	0.067	—
	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.077	0.031
	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	0.024	0.022
	眼斑小环藻 <i>Cyclotella ocellata</i>	—	0.041
	矮小沟链藻 <i>Aulacoseira pusilla</i>	—	0.154
	颗粒直链藻极狭变种螺旋变型 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> f. <i>spiralis</i>	—	0.022
蓝藻	绿色颤藻 <i>Oscillatoria chlorina</i>	0.024	—
	点形平裂藻 <i>Merismopedia convoluta</i>	—	0.040
	两栖颤藻 <i>Oscillatoria amphibia</i>	—	0.034
	环离浮鞘丝藻 <i>Planktolyngbya circumcreta</i>	—	0.023
	卷曲鱼腥藻 <i>Anabeana circinalis</i>	—	0.345
	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	—	0.142
绿藻	狭形纤维藻 <i>Ankistrodesmus angustus</i>	0.025	—
	四角十字藻 <i>Crucigenia quadrata</i>	0.057	0.058
	短刺四星藻 <i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i>	0.023	—
	游丝藻 <i>Planctonema lauterbornii</i>	0.022	0.070
	实球藻 <i>Pandorina morum</i>	0.031	—
	二角盘星藻 <i>Pediastrum duplex</i>	—	0.098
	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	—	0.137
	直角十字藻 <i>Crucigeniella rectangularis</i>	—	0.069
	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	—	0.067
	河生集星藻 <i>Actinastrum fluviatile</i>	0.033	—
	隐藻	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	—
卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>		—	0.022
啮蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>		—	0.052

“—”表示该物种在相应季节为非优势种