J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(3):000-000
DOI 10.18307/2026.0311

呼伦湖蓝藻水华驱动因子及防控对策*

李兴月[1,3]，刘晓民[1,2,4**]，刘廷玺[1,2]，张 生[1]，卢宗福[1]，王文娟[3,4]，王梓行[1]，杨耀天[1]
(1.内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室，呼和浩特 010018)
(2.黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理自治区协同创新中心，呼和浩特 010018)
(3.内蒙古金华源环境资源工程咨询有限责任公司，呼和浩特 010020)
(4.内蒙古黄河生态研究院，呼和浩特 010020)

摘 要：2022 年呼伦湖频繁暴发蓝藻水华现象，几乎覆盖了整个湖面，破坏水域景观并严重威胁湖泊生态系统健康与安全。为揭示寒旱区呼伦湖大面积暴发蓝藻的驱动机制，于 2022 年春季、夏季和秋季共选取 13 个采样点采集表层、中层和底层水样，开展了蓝藻种类、细胞密度、生物量和水质指标的研究。结果表明，共鉴定出蓝藻 22 种，优势类群 10 种，其中微囊藻(*Microcystis* spp.)为整个调查期间的优势类群。不同时期和不同深度的蓝藻密度和生物量均存在显著的变化，夏季蓝藻密度(2.58×10^9 cells/L)和生物量(3.30×10^2 mg/L)较春秋两季多 1~2 个数量级；春季蓝藻密度和生物量均是湖泊底层最大，夏季和秋季均是湖泊表层最大。相关性分析和冗余分析结果表明，蓝藻的影响因素存在季节差异，水温、氮磷含量、溶解氧和 pH 是影响蓝藻水华发生的关键环境因子。从控制策略上，适度控制营养盐含量、实施氮磷双控及提升蓝藻水华预测预警与应急处置能力是有效降低蓝藻水华风险的根本途径，对未来富营养化湖泊蓝藻水华防控具有重要意义。
关键词：呼伦湖；富营养化；蓝藻水华；驱动因子；控制策略

Driving factors and control measures of cyanobacterial bloom in Lake Hulun*

Li Xingyue[1,3], Liu Xiaomin[1,2,4**], Liu Tingxi[1,2], Zhang Sheng[1], Lu Zongfu[1], Wang Wenjuan[3,4], Wang Zihang[1] & Yang Yaotian[1]
(1: *State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P.R.China*)
(2: *Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Hohhot 010018, P.R.China*)
(3: *Inner Mongolia Jinhuayuan Environmental Resource Engineering Consulting Co., Ltd., Hohhot 010020, P.R.China*)
(4: *Inner Mongolia Yellow River Institute of Ecological Research, Hohhot 010020, P.R.China*)

Abstract: In 2022, frequent cyanobacterial blooms occurred in Lake Hulun, covering nearly the entire lake surface, degrading aquatic landscapes, and posing serious threats to ecosystem health. To investigate the drivers of these large-scale blooms, water samples were collected from surface, middle, and bottom layers at 13 sampling sites during spring, summer, and autumn of 2022. Cyanobacterial species composition, cell density, biomass, and key water quality indicators were analyzed. A total of 22 cyanobacterial species were identified, with 10 dominant groups observed over the study period. Microcystisspp. remained the dominant genus across all seasons. Cyanobacterial density and biomass varied significantly by season and depth. Summer values peaked at 2.58×10^9 cells/L and 3.30×10^2 mg/L, respectively, one to two orders of magnitude higher than those in spring

* 2025-04-27 收稿；2025-08-19 收修改稿。
内蒙古自治区科技领军人才团队(2022LJRC0007)、内蒙古农业大学基本科研业务费专项资金资助(BR22-12-04)和内蒙古自治区教育厅一流学科科研专项项目(YLXKZX-NND-010)联合资助
** 通信作者；E-mail: Lxm@imau.edu.cn

and autumn. Spatially, the highest density and biomass occurred in the bottom layer in spring, but shifted to the surface in summer and autumn. Correlation and redundancy analyses revealed seasonal differences in influencing factors, identifying water temperature, nitrogen and phosphorus concentrations, dissolved oxygen, and pH as key environmental drivers of bloom dynamics. For management, we recommend moderate nutrient control with a dual nitrogen-phosphorus reduction strategy, along with enhanced bloom prediction, early warning, and emergency response capabilities. These measures are essential for mitigating bloom risks in eutrophic lakes such as Lake Hulun and may inform future cyanobacterial bloom control strategies in similar ecosystems.
Keywords: Lake Hulun; eutrophication; cyanobacteria water bloom; driving factors; control strategy

湖泊作为重要的生态系统，对人类生活和生态系统平衡具有至关重要的作用。近几十年来，随着经济不断发展、工业化和城镇化加剧及农业化肥肆意使用等，大量未经处理的生活污水、工农业污水排入湖泊，加之养殖、湖滨带破坏等影响，导致大量氮、磷等元素输入，造成水体富营养化[1][2]。富营养化的直接表现是蓝藻快速繁殖并形成水华。蓝藻作为一类常见的浮游植物，其在水体生态系统中的作用备受关注。Ho 等[3]研究发现，20 世纪 80 年代以来，在研究的 71 个湖泊中，占比超过三分之二的湖泊在夏季水华强度有所增加，揭示了全球水华状况的恶化。蓝藻水华发生时藻体在水面聚集，导致光照无法透入深层水体，且分泌大量毒素、消耗水体溶解氧[4]，破坏水生生物生存环境，打破水生态系统平衡，降低生物多样性。经过世界各国不懈努力，湖库水质虽然得到一定程度改善[5]，但水环境状况尚未得到根本性好转。因此，了解蓝藻群落结构动态变化及其驱动因素成为当前研究的热点之一。

氮、磷等营养盐是引起水体富营养化和蓝藻水华暴发的关键营养元素。研究认为，蓝藻的变化趋势与水体中营养盐的变化趋势一致，水体中营养盐的增加会促进蓝藻的繁殖速度[6]。欧阳添等[7]研究发现氮含量和水温协同增加促进蓝藻水华的发生；高芮等[8]研究发现氮、磷营养盐是诱发巢湖蓝藻增殖的主要原因；陈文权等[9]研究发现氮磷比的降低增加了水库偶发蓝藻水华的风险，在营养盐满足的条件下，水温是蓝藻水华的主要驱动因素。

呼伦湖是典型的寒旱区湖泊(指分布在寒冷干旱地区的湖泊，其特点为纬度高、温度较低、降水稀少、蒸发量大及冰封期长)，也是中国第四大淡水湖，在控制污染、维持生态系统平衡和改善区域气候等方面起着重要的积极作用。近年来，受到气候变化、人类活动、水源补给等多种因素的影响，盐度、碱度、总氮和总磷含量分别增长了约 3 倍、10 倍、2.5 倍和 2 倍，水质逐渐恶化。虽然已对呼伦湖进行了长期的治理和保护，严格控制入湖营养盐负荷，但 2009 年以来水华暴发频率和面积日趋增大[10]，2018-2020 年有零星蓝藻水华，2021 年首次出现局部蓝藻水华，占湖泊总面积的 19.33%，到 2022 年夏季暴发了有记录以来最大的蓝藻水华，暴发面积几乎覆盖了整个湖面，蓝藻细胞密度高达 2.58×10^9 cells/L，远超过水华暴发临界值 1×10^7 cells/L[11]。

对蓝藻的研究多集中于亚热带温暖湿润地区的湖泊，该区域降水多、水体更换快、温度较高[12]且冬季不会全湖封冻(利于蓝藻越冬[13])、蓝藻生长季节较长、种类丰富及易受环境因素影响等，而对寒旱区湖泊研究较少且大多聚集在单一时期，该区域纬度高、气温变化显著、冰封期长(随着结冰过程的盐分排出，冰下水体各类营养盐浓度升高，且在低温刺激下部分蓝藻生长和代谢会发生改变，从而加剧来年气温回升后蓝藻水华暴发风险和水质恶化程度)、水流量少及水环境变化大[14]，蓝藻群落的季节性变化明显，多样性低，生长周期短，其丰度通常在夏季达到峰值，秋季和冬季随着水温下降而降低[15]。如李星醇等[16][17][18]探讨了呼伦湖单个季节或冰封期浮游植物群落结构与环境因子的关系。因此，为了解寒旱区蓝藻大面积暴发的驱动机制，本研究以呼伦湖为研究区，采用生态调查法于 2022 年春季、夏季和秋季对湖泊表、中和底层水体蓝藻群落特征及水质指标进行研究，揭示呼伦湖蓝藻群落结构的时空变化特征，识别蓝藻暴发的关键影响因素，提出新形势下蓝藻水华的防控对策。并基于文献综述及前期研究，提出以下两个科学假设：(1)不同时期、不同深度水体中的蓝藻细胞密度和生物量存在显著差异主要由水温导致；(2)氮磷营养盐和水温是驱动呼伦湖蓝藻水华暴发的核心因素。本研究有助于深入解析呼伦湖蓝藻水华的生态机制，为呼伦湖蓝藻暴发及健康水生态系统构建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

呼伦湖(48° 30′ ~49° 20′ N，116° 58′ ~117° 48′ E)(图 1 左)地处内蒙古自治区呼伦贝尔市，是中国第五大湖。湖面呈不规则矩形，湖面面积为 2237.5km^2(2022 年)，湖泊周长约 447km[16]，平均水深约 5.33m，最大水深约 8m，水量约 134.9 亿 m^3。湖泊补给水来源主要是地下水、降雨(6-8 月)、克鲁伦河和乌尔逊河，属于寒区封闭性湖泊。呼伦湖为中温带半干旱草原气候类型，年均气温为 1.76℃，年均降水量为 223.63mm，年均蒸发量为 1634.00mm。湖水于每年的 11 月初结冰，冰封期长达 170~180 天，冰面厚度可达 1.3m[19]。

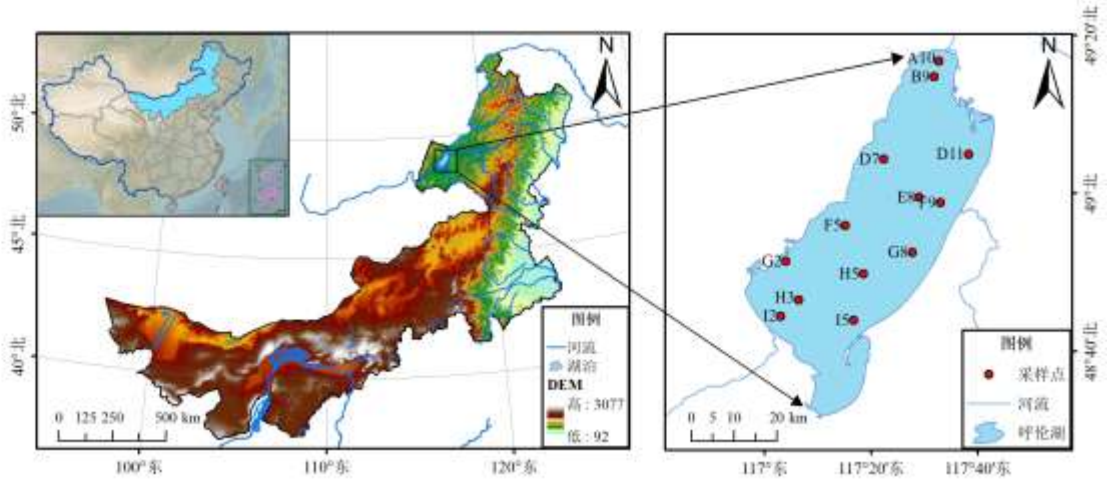

图 1 研究区位置和采样点位

Fig.1 Location of the study area and sampling points

1.2 采样点布设

参照《水和废水监测分析方法》[20]，结合气候条件、湖盆形状、补给水来源、水深等水动力条件，在呼伦湖均匀布设 13 个具有代表性的采样点(图 1 右)，其中 A10、I2、F9 点根据河流入口位置布设，其他采样点根据湖泊水深、面积及湖区年均风向等多种因素布设。

1.3 样品采集与分析

根据《内蒙古自治区气候划分标准》(5℃≤春季<20℃、夏季≥20℃、5℃≤秋季<20℃)，结合呼伦湖地区气候特征，本研究分别于 2022 年春季(6 月，平均气温 17.5℃)、夏季(8 月，平均气温 22.8℃)和秋季(11 月，平均气温 7.3℃)，对该湖泊表层(距水面 0.5m)、中层(表层和底层的均值)和底层(距沉积物 0.5m)水体进行了现场监测、取样和蓝藻样品的采集(每个采样点样品采集之前，先测量水体深度，测量方法为：将测深锤从湖面垂直放下，直到锤底触底，通过测量绳索的长度来确定水深)。

1.3.1 蓝藻样品采集与鉴定 在每个监测点分别采集一个定性样品和一个定量样品。定性样品现场使用网孔直径为 0.064mm 的 25#浮游生物网在水体表面划“∞”字形来回拖动 3~5min(阀门关闭，网口与水面垂直)，将采集到的样品过滤浓缩至 30mL 的聚乙烯瓶中(取样前，所有容器均使用蒸馏水进行冲洗)，并立刻加入 3 滴 5%甲醛固定保存。定量样品利用有机玻璃分层取水器在每个监测点采用自上而下的顺序在表层、中层、底层各采集 1L 水样，将水样装入 1L 聚乙烯瓶中(现场使用湖水对容器进行 3 次润洗)，并在现场立即加入 15mL Lugol’s 碘液固定后带回实验室避光静置 48h，通过细橡胶管缓慢吸去上清液浓缩至 30mL，待 Algae-Hub 藻类人工智能分析仪检测(基于形态学影像，利用 AI 算法对识别出的所有物种、所有细胞逐一提取形态参数，并结合式(1)精确计算其生物量)。

1.3.2 水质指标样品的采集及监测 使用有机玻璃分层取水器，在每个监测点位采用自上而下的顺序采集表层、中层、底层水样各 1L，将收集到的水样装入 1L 聚乙烯瓶中，置于 4℃的培养箱中保存，迅速运输回实验室后经过 0.45um 的滤膜过滤 150mL 水样，用于测定 NH_3-N。采用碱性过硫酸钾消解紫外分光

光度法测定 TN，采用钼酸铵分光光度法测定 TP，采用纳氏试剂比色法测定 NH_3-N[20]。为了减小实验误差，样品一式两份进行分析，并建立空白对照组。在采样现场利用便携式水质多参数分析仪(YSI 6600, USA)原位测定 pH、溶解氧(DO)、水温(WT)和盐度(SAL)。

1.4 数据处理

(1)生物量

每升水样中蓝藻数量以如下公式计算[21]：

$$生物量 = \rho \times V \times N \times 10^6 \tag{1}$$

式中：ρ 为蓝藻密度；V 为体积；N 为蓝藻丰度。

(2)优势种

浮游植物优势度(y)，y≥0.02 为优势种[22]，计算公式：

$$y = f_i \times P_i \tag{2}$$

$$P_i = n_i / N \tag{3}$$

式中：y 为优势度，f_i 为第 i 种蓝藻出现的频率，P_i 为第 i 种蓝藻个体数量占蓝藻总个体数量的比例，n_i 为第 i 种蓝藻个体数，N 为所有蓝藻个体总数。

1.5 统计分析

对水质指标数据进行正态分布和方差齐性检验，通过单因素方差分析比较不同季节水质指标、不同季节和不同深度蓝藻细胞密度和生物量的差异显著性。采用 Pearson 相关系数分析蓝藻和水质指标之间的相关性。为进一步确定影响蓝藻的主要环境因子，运用冗余分析(RDA，Redundancy analysis)确定蓝藻优势种与水质指标之间的关系。RDA 数据处理时，除 pH 外(pH 已经是 H^+或 OH^-浓度的 log 转换)，对优势种及水质指标数据进行 lg(x+1)转换。使用 ArcGIS 10.7 软件绘制采样地图，利用 Excel 处理数据，采用 Origin 2022 和 Canoco 5 绘制其他数据图。

2 结果

2.1 呼伦湖多源环境因子季节变化规律

监测期间，水质指标 TN、NH_3-N、TP、WT、pH、DO 和 SAL(图 2)均随季节变化差异显著。TN 浓度变化范围为 0.38~3.37 mg/L，平均值为 1.59 mg/L，夏季高于春秋两季，表层高于中、底层；NH_3-N 浓度变化范围为 0.27~3.64 mg/L，平均值为 0.94 mg/L，春季高于夏秋两季，中层高于表、底层；TP 浓度变化范围为 0.07~1.02 mg/L，平均值为 0.21 mg/L，春季高于夏秋两季，底层高于表、中层；WT 变化范围为 3.20~24.10℃，平均值为 14.29℃，夏季高于春秋两季，表层高于中、底层；pH 变化范围为 8.90~9.75，平均值为 9.19，春季高于夏秋两季，表层高于中、底层；DO 浓度变化范围为 6.50~14.62 mg/L，平均值为 10.18 mg/L，秋季高于春秋两季，春秋两季底层最大，夏季表层最大；SAL 变化范围为 0.50~0.75‰，平均值为 0.66‰，春季高于夏秋两季。

2.2 蓝藻群落结构季节变化特征

2.2.1 物种组成　综合调查结果，共鉴定出蓝藻 19 属 22 种类群，其中假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*)、泽丝藻属(*Limnothrix*)、平裂藻属(*Merismopedia*)、隐球藻属(*Aphanocapsa*)及微囊藻属(*Microcystis*)在整个调查期间均有出现。从时间上看(图 3)，春季(14 种)=秋季(14 种)＞夏季(12 种)。从空间上来看(图 4)，春季中层(均值 3.38 种)＞表层(均值 3.08 种)＞底层(均值 2.46 种)；夏季表层(均值 9.85 种)＞中层(均值 9.54 种)＞底层(均值 9.15 种)；秋季表层(均值 3.46 种)＞底层(均值 3.38 种)＞中层(均值 2.77 种)。

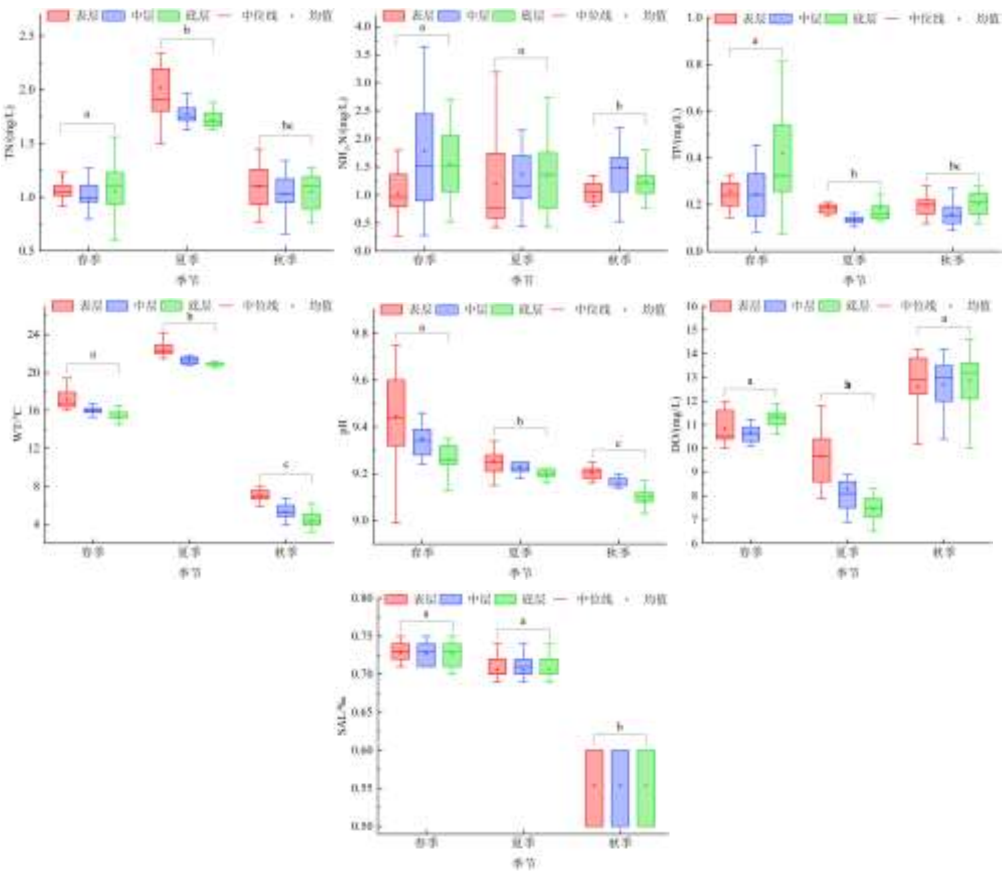

图 2 2022 年春、夏、秋季呼伦湖不同水层环境因子季节分布(上标不同大小写字母代表差异显著性，P＜0.05)

Fig.2 Seasonal distribution of environmental factors in different water layers of Lake Hulun in spring, summer and autumn of 2022 (Superscripted capital and lowercase letters indicate significant differences, P<0.05)

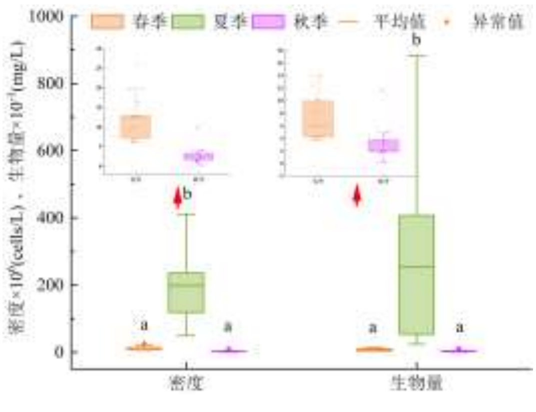

图 3 2022 年春、夏、秋季呼伦湖蓝藻总密度和生物量时间变化(上标不同大小写字母代表差异显著性，P＜0.05)

Fig.3 Temporal variation of total density and biomass of cyanobacteria in Lake Hulun in spring, summer and autumn of 2022(Superscripted capital and lowercase letters indicate significant differences, P<0.05)

2.2.2 细胞密度 呼伦湖三个季节浮游植物细胞密度的平均值为 1.05×10^9 cells/L，蓝藻门细胞密度最大，均值为 9.24×10^8 cells/L，占总细胞密度的 88.00%。从时间上来看(图 3)，夏季(2.58×10^9 cells/L)＞春季(1.59×10^8 cells/L)＞秋季(3.71×10^7 cells/L)。从空间上来看(图 4)，春季底层(3.70×10^6 cells/L)＞中层(3.64×10^6 cells/L)＞表层(3.24×10^6 cells/L)；夏季表层(1.62×10^9 cells/L)＞中层(5.87×10^8 cells/L)＞底层(3.64×10^8 cells/L)；秋季表层(1.32×10^7 cells/L)＞底层(1.29×10^7 cells/L)＞中层(1.10×10^7 cells/L)。

2.2.3 生物量 呼伦湖三个季节浮游植物生物量的均值为 4.54×10^2 mg/L，蓝藻门生物量均值为 1.15×10^2 mg/L，占总生物量的 25.33%。从时间上来看(图 3)，夏季(3.30×10^2 mg/L)＞春季(9.38 mg/L)＞秋季(4.19

mg/L)。从空间上来看(图 4)，春季底层(3.98 mg/L)＞表层(2.85 mg/L)＞中层(2.54 mg/L)；夏季表层(1.67×10^2 mg/L)＞中层(97.41 mg/L)＞底层(66.53 mg/L)；秋季表层(1.72 mg/L)＞中层(1.32 mg/L)＞底层(1.16 mg/L)。

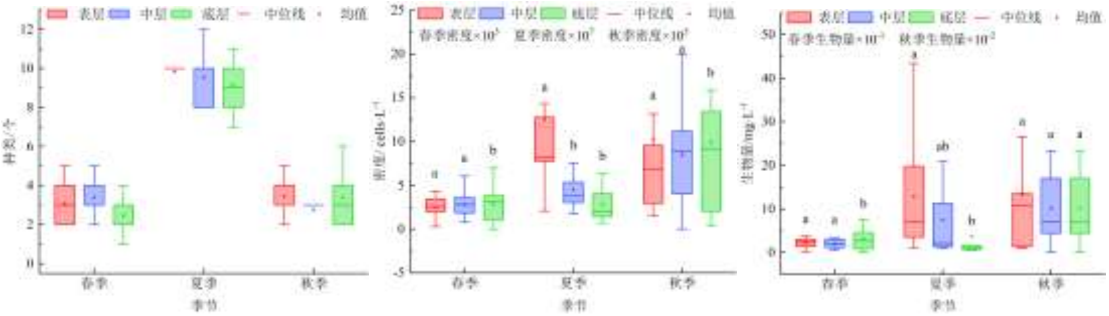

图 4 2022 年春、夏、秋季呼伦湖蓝藻种类、密度、生物量垂向分布(上标不同大小写字母代表差异显著性，P＜0.05)

Fig.4 Vertical distribution of species, density and biomass of cyanobacteria in Lake Hulun in spring, summer and autumn of 2022(Superscripted capital and lowercase letters indicate significant differences, P<0.05)

2.2.4 优势种　呼伦湖三个季节共鉴定出 10 种优势类群(表 1)，随时间变化表现为夏季(6 种)＞秋季(3 种)=春季(3 种)，其中微囊藻(*Microcystis* spp.)为整个调查期间的优势类群，夏季优势度高达 0.529。

表 1 2022 年春、夏、秋季呼伦湖蓝藻优势类群

Tab1 The dominant species of cyanobacteria in Lake Hulun in spring, summer and autumn of 2022

编号	优势类群	优势度		
		春季	夏季	秋季
1	微囊藻属(*Microcystis*)	0.377	0.529	0.380
2	环离浮鞘丝藻(*Planktolyngbya circumcreta*)	—	—	0.231
3	阿氏浮丝藻(*Planktothrix agardhii*)	—	—	0.045
4	螺旋浮丝藻(*Planktothrix spiroides*)	—	0.034	—
5	假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*)	—	0.066	—
6	水华长孢藻(*Dolichospermum flos-aquae*)	—	0.309	—
7	隐球藻属(*Aphanocapsa*)	0.179	—	—
8	史氏棒胶藻(*Rhabdogloea smithii*)	0.085	—	—
9	平裂藻属(*Merismopedia*)	—	0.016	—
10	束丝藻属(*Aphanizomenon*)	—	0.027	—

注：“—”代表优势度 y＜0.02。

2.3 蓝藻的影响因素

2.3.1 蓝藻细胞密度与水质指标的相关性分析　运用 Pearson 相关性分析对呼伦湖蓝藻细胞密度与水质指标的关系进行研究(图 5)。结果显示，春季蓝藻细胞密度与 WT、pH、TP 和 NH_3-N 呈极显著性正相关(P＜0.05，P＜0.01)，但隐球藻属(*Aphanocapsa*)与 TP 和 pH 呈极显著性负相关(P＜0.05)(图 5a)；夏季蓝藻细胞密度与 WT、pH、DO、TP、TN 和 NH_3-N 呈极显著性正相关(P＜0.05，P＜0.01)，与 SAL 呈极显著性负相关(P＜0.05，P＜0.01)(图 5b)；秋季蓝藻细胞密度与 WT、pH 和 DO 呈极显著性正相关(P＜0.05，P＜0.01)，与 TN 呈极显著性负相关(P＜0.05)，但索状气丝藻(*Aerosakkonema funiforme*)与 DO 呈极显著性负相关(P＜0.05)(图 5c)。

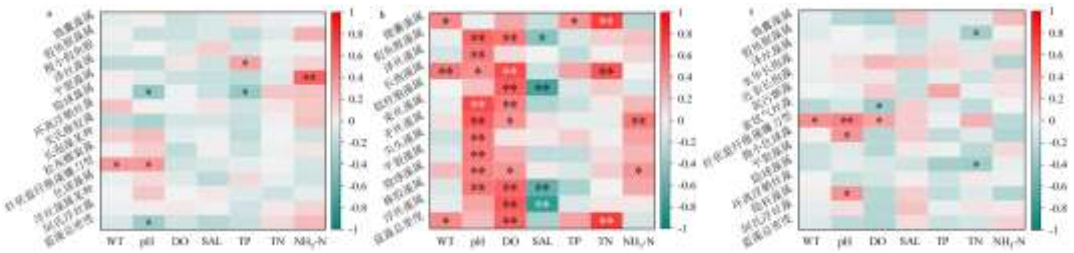

图 5 2022 年春、夏、秋季呼伦湖蓝藻优势类群与环境因子的相关性

(a.春季；b.夏季；c.秋季；*代表 $P<0.05$；**代表 $P<0.01$)

Fig.5 The correlation between dominant groups of cyanobacteria and environmental factors in Lake Hulun in spring, summer and autumn of 2022 (a. Spring; b. summer; c. Autumn; * represents $P<0.05$; ** represents $P<0.01$)

2.3.2 蓝藻优势种细胞密度与水质指标的 RDA 分析 蓝藻优势种细胞密度与水质指标的关系采用 RDA 进行分析(DCA 结果中的第一轴均小于 3.0)，结果见图 6。春季 RDA 第 1、2 轴对蓝藻优势种与水质指标的解释率达到 94.44%，表明蓝藻优势种与水环境因子的耦合程度较好。微囊藻属(*Microcystis*)、隐球藻属(*Aphanocapsa*)和史氏棒胶藻(*Rhabdogloea smithii*)主要影响因子为 TN、TP、DO、SAL 和 pH。夏季 RDA 第 1、2 轴对蓝藻优势种与水质指标的解释率达到 97.05%，表明蓝藻优势种与水环境因子的耦合程度较好。微囊藻属(*Microcystis*)、长孢藻属(*Dolichospermum flos-aquae*)、束丝藻属(*Aphanizomenon*)、假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*)、浮丝藻属(*Planktothrix spiroides*)和平裂藻属(*Merismopedia*)主要影响因子为 TN、DO、pH、WT、NH_3-N 和 SAL。秋季 RDA 第 1、2 轴对蓝藻优势种与水质指标的解释率达到 98.78%，表明蓝藻优势种与水环境因子的耦合程度较好。微囊藻属(*Microcystis*)、阿氏浮丝藻(*Planktothrix agardhii*)和环离浮鞘丝藻(*Planktolyngbya circumcreta*)的主要影响因子为 TN、TP、NH_3-N 和 DO。

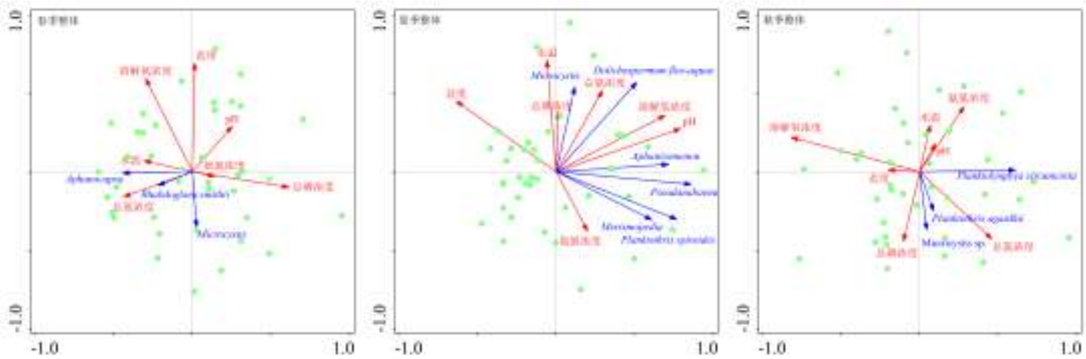

图 6 春季、夏季、秋季蓝藻优势类群与环境因子的 RDA 排序图

Fig.6 RDA ordination diagram of cyanobacteria dominant groups and environmental factors in spring, summer and autumn

3 讨论

3.1 呼伦湖蓝藻群落组成

调查期间共鉴定出蓝藻 22 种类群，细胞密度均值为 1.05×10^9 cells/L，生物量均值为 4.54×10^2 mg/L。远高于杨朝霞[21]于未发生蓝藻水华时期(2019 年)调查发现的蓝藻种类数(18 种)、细胞密度均值(3.94×10^5 cells/L)和生物量均值(2.42 mg/L)。水质指标数据显示当前湖区 TP、pH 和 DO 较 2019 年分别高 3.40 倍、1.02 倍及 1.17 倍，2019 年 TP 浓度变化范围为 0.05~0.30 mg/L，均值为 0.16 mg/L；pH 变化范围为 8.84~9.52，均值为 9.18；DO 含量变化范围为 5.00~12.47 mg/L，均值为 11.91 mg/L。通常而言，营养盐浓度升高会增加蓝藻的生长速率和生产力，进而导致细胞密度增大[23][24]。

假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*)、泽丝藻属(*Limnothrix*)、平裂藻属(*Merismopedia*)、隐球藻属(*Aphanocapsa*)

和微囊藻属(*Microcystis*)类群在调查期间均有出现，且微囊藻属(*Microcystis*)为整个调查期间的优势类群，夏季优势度高达 0.529。一方面，微囊藻极易适应环境条件，获取营养物质的能力较强，其通过调节伪空胞的气体含量来控制浮力，具有显著的垂向迁移能力，能够在水体中快速调整位置，获取最佳的光照和营养盐等条件[25]。绝大部分微囊藻在 20~30°C、偏碱性(pH 值为 8.5~9.5)的环境中生长最快[26]。2022 年呼伦湖三个季节水温变化范围在 3.20~24.10℃之间，pH 值变化范围在 8.90~9.75 之间，适宜微囊藻生长。另一方面，微囊藻能够形成群体，这种群体形态不仅有助于抵御草食性动物的摄食，还能增强对不良环境因子(如高光强、紫外辐射等)的耐受性[27]。

2022 年三个季节蓝藻细胞密度远高于暴发蓝藻水华的临界值(1×10^7 cells/L)[10]，这主要由水温导致。在时间上，蓝藻细胞密度和生物量在不同季节间存在显著差异，夏季蓝藻密度(2.58×10^9 cells/L)和生物量(3.30×10^2 mg/L)较春秋两季多 1~2 个数量级。作为寒旱区湖泊，夏季与春、秋两季温差大，夏季温度较高，高温会有效提高蓝藻对吸收光的利用率，增强其光合能力，蓝藻对高温的耐受能力高于其他藻类，水温＞20℃时适宜蓝藻生长[28]，如隐球藻属在 20~25℃、浮丝藻属和假鱼腥藻属在 25~30℃时生长最快，15℃以下时蓝藻的生长会受到限制[29]。本研究中，呼伦湖夏季平均水温为 22.41℃，水温高于蓝藻最适生长温度，加之夏季呼伦湖处于富营养化状态，这些都为夏季蓝藻的大量繁殖提供了良好的条件，而春季和秋季平均水温分别为 17.21℃和 7.09℃。类似现象已在太湖、滇池和巢湖富营养化湖泊研究中有过报道[30]。

在空间格局上，蓝藻细胞密度和生物量在同一季节不同水层存在显著差异，主要由水温导致。春季蓝藻细胞密度和生物量均是湖泊底层最大，主要是由于随着气温回升，底层水体温度逐渐升高，使得原本沉积在湖底的有机物质分解加速，释放出营养盐，促进了底层蓝藻的生长和繁殖，尤其是在水体流动性较差、水体分层现象不明显的情况下，底层蓝藻更容易以高密度和高生物量的形式聚集。夏季和秋季均是湖泊表层最大，主要是由于这两个季节日照时间长、光照充足，表层水体接受到的光照强度和光照时间显著增加，蓝藻作为光合生物，在充足的光照条件下会迅速繁殖；且夏季和秋季湖泊出现明显的水温分层现象，表层水温较高，而底层水温较低，温度分层导致水体垂向混合减弱，表层水体相对稳定，有利于蓝藻上浮聚集[23]；同时，水体中的营养盐浓度较高，尤其是在降雨的影响下，增加了表层营养盐的输入，为蓝藻提供了丰富的营养来源。

3.2 蓝藻与水质指标的关系

呼伦湖三个季节蓝藻密度与水质指标的 Pearson 相关性分析和 RDA 分析结果显示，WT、TN、TP、pH 和 DO 均是影响蓝藻的主要水环境因子，其中 WT 和氮磷营养盐是蓝藻水华暴发的主要核心驱动因素，但是同一水体不同时期的影响因子并不相同。主要是由于季节变化导致的环境条件的改变以及蓝藻自身的生理和生态适应性。在不同季节，水温、光照强度、营养盐浓度和水体分层等因素变化直接影响蓝藻的生长、繁殖和分布。

水温是影响蓝藻生长的关键因素之一，适宜的水温能够提高蓝藻的光合作用效率，从而能够更有效地利用光照和营养盐，水温还可以通过影响酶的活性来调节蓝藻的代谢过程。在适宜的温度范围内，酶的活性较高，有助于加快蓝藻的细胞代谢，从而促进种群的生长和繁殖[31][32][33]。3 个季节的蓝藻细胞密度呈夏季>春季>秋季的趋势，与水温变化一致。此外，Pearson 相关性和 RDA 分析结果表明，WT 与蓝藻呈显著性正相关关系。

当湖泊中营养盐浓度较为丰富时，蓝藻大量生长繁殖，光合作用增强，导致溶解氧浓度升高。本研究中夏季和秋季蓝藻细胞密度与 DO 呈显著正相关，与韦梦琳等[34]对上海鹦鹉洲湿地与外围河道浮游植物群落影响因子的研究结果一致。pH 是水体理化性质的直接反映[35]。水体的 pH 值对蓝藻细胞内化学物质的解离和生理过程具有显著影响。蓝藻在碱性环境中具有较高的初级生产力，pH 值影响蓝藻对无机盐的吸收和利用效率，这一影响机制进一步作用于蓝藻对 CO_2 的利用速度和光合作用的速率[26][31]，通常认为水体 pH＞8.0 时，对蓝藻生长具有促进作用[6]。本研究中蓝藻与 pH 呈显著相关关系，尤其是夏季(pH 均值为 9.23)，与王振方等[36]和杨丽等[37]的研究结果一致。

水体中氮磷营养盐是蓝藻生长与繁殖的重要物质基础，其浓度变化会影响蓝藻的群落分布[34]。磷是

蓝藻合成和能量传输的必要元素。当磷含量充足时，蓝藻能够高效地进行能量代谢和细胞分裂，从而影响蓝藻群落的动态格局[38]。氮是蓝藻生长代谢所必须的大量元素之一[39]。当氮含量充足时，蓝藻能够快速合成生物分子，从而促进细胞的分裂和生长。Pearson 相关性分析显示，夏季蓝藻与 TN 和 TP 呈显著性正相关关系。本研究三个季节呼伦湖 TP 浓度均值分别为 0.307 mg/L、0.169 mg/L 和 0.187 mg/L，TN 浓度均值为 1.082 mg/L、1.838 mg/L 和 1.059 mg/L，均达到适宜蓝藻生长的浓度(TP 浓度在 0.05~0.2 mg/L 时蓝藻生长会显著加快，大于 0.1 mg/L 时，蓝藻生长会较为旺盛；TN 浓度在 1.5~10 mg/L 范围内蓝藻快速生长[40]。)。

在部分研究中，当营养盐供应充足时，气象因素（如降水、光照和风速等）往往成为推动蓝藻生长繁殖的主要环境驱动因素。然而，在我们前期的研究中，除风速外，气候变化对蓝藻生长的影响并不显著[41]。

3.3 蓝藻水华防控建议

(1)适度控制氮磷营养盐含量

呼伦湖是封闭湖泊，其生态系统具有独特性。近年来，呼伦湖的富营养化问题日益突出，尤其是氮磷含量的增加，三个季节蓝藻均受到氮磷含量的影响，氮磷含量是湖泊暴发蓝藻水华的关键营养物质，严格控制氮磷含量成为了新形势下蓝藻水华防控的重要措施。20 世纪 70 年代，治理湖泊富营养化以控磷为主[42]，但在许多大型富营养化浅水湖泊的治理效果并不明显。沉积物中的外源磷通过再悬浮将磷释放至水体中[43]，且蓝藻在生长过程中也会消耗大量的磷[44]，单纯控磷难以得到理想效果。然而，与磷不同的是，氮除了被藻类同化吸收外还会通过反硝化作用脱离水体，使呼伦湖蓝藻受到氮的影响。因此，防治呼伦湖蓝藻水华在控制磷的基础上控氮也是必要的。

气候变暖导致的水温提前升高使呼伦湖内源磷污染日趋加重[43]，导致蓝藻水华对控制外源磷输入的响应比较缓慢，因此要加强对内源磷的治理。通常采用底泥疏浚的方法治理内源磷，但内源污染从根本上都是来自外源，长期的外源输入会使水质出现反弹[45]。因此，在控制内源磷的基础上管理外源营养盐输入也至关重要。相比于缺少脱除途径的磷，对氮的控制在减轻外源的基础上也应重视反硝化脱氮作用，比如培育水生植物[45]及搭建生态浮床[46]等提高反硝化效率。此外，还可以通过优化农业施肥结构，减少氮肥的流失，降低外源氮的输入。在暴发蓝藻水华之前，应通过监测和预警系统，及时掌握氮磷浓度的变化，采取针对性的措施，如投放微生物菌剂等，促进氮磷的转化和去除。

(2)提升蓝藻水华预测预警与应急处置能力

气候变化使极端天气事件频繁发生，加大了湖泊蓝藻水华暴发的概率与不确定性。加强建设呼伦湖蓝藻水华监控能力，是掌握呼伦湖蓝藻水华动态变化以及实施应急处置的基础，对蓝藻监控主要包括遥感、自动监测站和人工巡测等方式，其中人工巡测是至关重要的(在现有 13 个采样点的基础上，进一步加密蓝藻水华暴发频率较高区域的采样点，并在夏季将人工巡测频次提高至每两天至少一次。)。呼伦湖应建立水华蓝藻预测预警工作团队，同时配备蓝藻应急处置工作团队，实现预测预警和应急处置的协同作业。蓝藻水华应急防控应涵盖蓝藻应急打捞、应急处置及资源化利用。针对呼伦湖蓝藻水华重点防控区和敏感区，配置蓝藻智能拦挡导流、湖滨区高效除藻除臭装置、藻水分离与脱水干化及资源化设备和装置[6]。

需要说明的是，本研究仅基于一年的数据可能无法全面反映呼伦湖蓝藻水华的长期变化趋势。为了更准确地评估呼伦湖蓝藻水华的演变趋势，未来需要开展长期监测工作。此外，蓝藻水华的发生是一个复杂的过程，受多种因素的共同影响，且其内在机理复杂，未来应探究多个因素，并考虑彼此之间的联系，如水流速度、风力、湖泊生态系统的结构和功能等。

4 结论

1)2022 年春、夏和秋季共鉴定出蓝藻 22 种类群，优势类群 10 种，其中微囊藻(*Microcystis*)为整个调查期间的优势类群，夏季优势度高达 0.529。

2)2022 年蓝藻细胞密度和生物量在季节和空间上均存在显著性差异，夏季蓝藻密度(2.58×10^9 cells/L)和生物量(3.30×10^2 mg/L)较春秋两季多 1~2 个数量级；春季蓝藻密度和生物量均是湖泊底层最大，夏季

和秋季均是湖泊表层最大。

3)氮磷含量和 WT 是驱动呼伦湖蓝藻水华暴发的核心因素，pH 和 DO 等营养盐是驱动蓝藻水华的主要因素。为了有效控制呼伦湖蓝藻水华，使其处于无明显水华状况，强化湖泊的水质监测与管理，严格控制外源污染和内源释放，降低水体中的营养盐浓度，尤其是实施氮磷双控是有效降低蓝藻水华发生的有效措施。

5 参考文献

[1] Chou F, Zhang SY, Chen L, *et al*. Bottom-up and zooplankton's top-down effects on the phytoplankton communities in Yilong Lake. *China Environmental Science*, 2025, **45**(1): 406-415. [仇菲，张昭阳，陈丽等. 上行效应和浮游动物的下行效应对异龙湖浮游植物群落的影响. 中国环境科学, 2025, **45**(1): 406-415.]

[2] Shi WQ, Qin BQ. Cyanobacterial blooms in lakes and reservoirs under climate change: future trend and control strategy. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, **54**(8): 987-996. [施文卿，秦伯强. 气候变化下湖库蓝藻水华发展趋势及防控对策. 水利学报, 2023, **54**(8): 987-996.]

[3] Ho JC, Michalak AM, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 2019, **574**(7780): 667-670.

[4] Liu C, Liu XB, Zhou HD, *et al*. Drinking Water Crisis Caused by Eutrophication and Cyanobacterial Bloom in Lake Taihu: Cause and Measurement. *Advances in Earth Science*, 2019, **50**(12): 1479-1490. [刘畅，刘晓波，周怀东等. 水库缺氧区时空演化特征及驱动因素分析. 水利学报, 2019, **50**(12): 1479-1490.]

[5] Huang J, Zhang Y, Arhonditsis GB, *et al*. How successful are the restoration efforts of China's lakes and reservoirs?. *Environment International*, 2019, **123**: 96-103.

[6] Zhang Y, Ma XF, Guo FF, *et al*. Community structures of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahe Reservoir, Hubei Province. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 902-910. [张云，马徐发，郭飞飞等. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水质指标的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 902-910.]

[7] Ou YT, Zhao L, Ji LL, *et al*. Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4480-4488. [欧阳添，赵璐，纪璐璐等. 蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析. 环境科学, 2022, **43**(10): 4480-4488.]

[8] Gao R, Chen XZ, Qian Y, *et al*. Analysis to Dynamic changes and Driving Factors of Cyanobacteria Blooms in Chaohu Lake from 2012 to 2021. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, **51**(18): 69-73. [高芮，陈希子，钱圆等. 2010—2021 年巢湖蓝藻水华暴发的动态变化规律及驱动因素分析. 安徽农业科学, 2023, **51**(18): 69-73.]

[9] Chen WQ, Meng YY, Shan YG, *et al*. The driving forces of sporadic cyanobacterial blooms in oligo-meso trophic waters: A case study of Fangbian Reservoir, Nanjing. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(5): 1452-1460. [陈文权，孟洋洋，单延功等. 寡-中营养型水体偶发性蓝藻水华的驱动因素分析——以南京方便水库为例. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1452-1460.]

[10] Fang C, Song KH, Shang YX, *et al*. Remote sensing of harmful algal blooms variability for Lake Hulun using adjusted FAI(AFAI) algorithm. *Journal of Environmental Informatics*, 2018, **34.2**: 108-122.

[11] 赵孟绪，肖利娟. 粤港澳大湾区水库蓝藻水华特征与防治对策建议. 广东水利水电, 2023, (12): 41-46+78.

[12] Li YZ, Jia L, Zhang M, *et al*. Quantifying the difference between surface temperature and surface waterbulk temperature and its influencing factors at Lake Taihu with in-situ observation. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(5): 1808-1821. [李雨竹，贾磊，张弥等. 太湖表面温度与表层水温差异及其影响因素的观测分析. 湖泊科学, 2023, **35**(5): 1808-1821.]

[13] Yang LY, Yang XY, Ren LM, *et al*. Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(1): 18-27. [杨柳燕，杨欣妍，任丽曼等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 18-27.]

[14] Yao Z, Liu YJ, He GH, *et al*. Niche Analysis of the Dominant Phytoplankton Species in Nanhai Lakes in Northwest China. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, **41**(11): 91-100. [姚植，刘奕杰，何桂豪等. 寒旱区湖泊浮游植物优势种生态位分析——以包头南海湖为例. 灌溉排水学报, 2022, **41**(11): 91-100.]

[15] Yan DN, Xu H, Lan JH, *et al*. Warming favors subtropical lake cyanobacterial biomass increasing. *Science of the Total Environment*, 2020, **726**: 138606.

[16] Li XC, Yu HX, Dou HS, *et al*. Phytoplankton Functional Groups and Related Influencing Factors in Hulun Lake and Adjacent Waters in Spring. *Chinese Journal of Fisheries*, 2020, **33**(3): 31-41. [李星醇，于洪贤，窦华山等．呼伦湖及其周围水域春季浮游植物功能群及其影响因子．水产学杂志, 2020, **33**(3): 31-41.]

[17] Wang DP, Jun S, Chen L, *et al*. Community Structures of Phytoplankton in the Hulun Lake During Icebound Season and Its Relation with Environmental Factors. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(4): 59-66. [王东波，君珊，陈丽等．冰封期呼伦湖浮游藻类群落结构及其与水环境因子的关系．中国环境监测, 2019, **35**(4): 59-66.]

[18] 刘慧，刘鑫，何建东等．呼伦湖浮游植物群落构成特征与多样性研究．黑龙江水产, 2025, **44**(02): 150-153.

[19] Wu R, Zhang S, Liu Y, *et al*. Spatiotemporal variation in water quality and identification and quantification of areas sensitive to water quality in Hulun lake, China. *Ecological Indicators*, 2023, **149**: 110176.

[20] 国家环境保护总局．水和废水监测分析方法．北京：中国环境科学出版社, 2002.

[21] 杨朝霞．呼伦湖水体浮游植物群落特征与水环境因子关系分析[学位论文]．呼和浩特：内蒙古农业大学, 2020.

[22] Qian XY, Li JB, Ao W, *et al*. Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with environmental factors in Lake Hulun. *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.]

[23] Bao Q, He HB, Tang H, *et al*. Spatial and temporal characteristics of phytoplankton community structure and their driving environmental factors in Lake Lugu. *Journal of Lake Sciences*, 1-18[2025-04-22]. [鲍乾，贺海波，唐皓等．泸沽湖浮游植物群落结构时空特征及其环境驱动因子．湖泊科学, 1-18[2025-04-22].]

[24] Zhang YQ, Liu JY, Cai YF, *et al*. Research progress on cyanobacteria-bacteria interactions and their effects on carbon and nitrogen cycles. *Journal of Lake Sciences*, 2025, **37**(2): 339-353. [张玉晴，刘佳音，蔡元锋等．蓝藻-细菌互作及其对碳、氮循环的影响研究进展．湖泊科学, 2025, **37**(2): 339-353.]

[25] 杨甜甜．微囊藻群体垂直迁移规律及其水华形成关键影响因子研究[学位论文]．北京：中国科学院大学, 2021.

[26] 孙俊惠，杨傲傲，李修岭．环境因子对铜绿微囊藻生长影响的研究进展．生物化工, 2022, **8**(1): 168-172+175.

[27] Ailifeire A, Ma JJ, Wu ZS, *et al*. Seasonal dynamics and influencing factors in plankton communities of ecologically restoredand unrestored zones in Lake Xuanwu, Nanjing. *Journal of Lake Sciences*, 1-16[2025-02-20]. [艾丽菲热·安外尔，马静静，吴召仕等．南京玄武湖生态修复区与未修复区浮游生物群落的季节变化特征及影响因素．湖泊科学, 1-16[2025-02-20].]

[28] Li CC, Feng WY, Chen HY, *et al*. Temporal variation in zooplankton and phytoplankton community species composition and the affecting factors in Lake Taihu—a large freshwater lake in China. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 1050-1057.

[29] Robarts RD, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom - forming cyanobacteria. *New Zealand journal of marine and freshwater research*, 1987, **21.3**: 391-399.

[30] Wang QH, He LQZ, Yang C, *et al*. Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algal bloom conditions among Lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi(1981 − 2015). *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(4): 897-906. [王菁晗，何吕奇姝，杨成等．太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较(1981—2015 年)．湖泊科学, 2018, **30**(4): 897-906.]

[31] Yang WH, Liang JH, Li YF, *et al.* Cyanobacterial community characteristics during ice-covered and non-ice-covered periods in lakes of cold regions. *Journal of Lake Sciences*, 2025, **37**(1): 61-77. [杨文焕，梁俊泓，李艳芳等．寒区湖泊冰封期与非冰封期蓝藻群落特征分析．湖泊科学, 2025, **37**(1): 61-77.]

[32] Zhao QH, Sun GD, Wang JJ, *et al*. Coupling effect of water temperature and light energy on the algal growth in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(02): 385-393. [赵巧华，孙国栋，王健健等．水温、光能对春季太湖藻类生长的耦合影响．湖泊科学, 2018, **30**(02): 385-393.]

[33] 沈国英，施并章．海洋生态学．厦门：厦门大学出版社, 1990.

[34] Wei ML, Li FY, Hong TY, *et al*. Spatio-temporal differences of phytoplankton communities and their driving factors in the Yingwuzhou Wetland and its surrounding canals, Shanghai. *Journal of Lake Sciences*, 1-18[2025-02-10]. [韦梦琳，李法云，

洪天宇等. 上海鹦鹉洲湿地与外围河道浮游植物群落时空差异及其影响因子. 湖泊科学, 1-18[2025-02-10].]

[35] Kim H, Spivack AJ, Menden-Deuer S. pH alters the swimming behaviors of the raphidophyte Heterosigma akashiwo: implications for bloom formation in an acidified ocean. *Harmful Algae*, 2013, **26**: 1-11.

[36] Wang ZF, Zhang W, Yang L, *et al*. Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in different regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2249-2257. [王振方, 张玮, 杨丽等. 异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 2019, **40**(5): 2249-2257.]

[37] Yang L, Zhang W, Shang GX, *et al*. Succession characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3158-3167. [杨丽, 张玮, 尚光霞等. 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系. 环境科学, 2018, **39**(7): 3158-3167.]

[38] Ma Y, Lu XX, Fan YW. Correlation between phytoplankton community patterns and environmental factors in Harbin section of the Songhua River. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(1): 224-234. [马煜, 陆欣鑫, 范亚文. 松花江哈尔滨段浮游植物群落格局及其与环境因子的相关性. 生态学报, 2021, **41**(1): 224-234.]

[39] Paparazzo FE, Williams GN, Pisoni JP, *et al*. Linking phytoplankton nitrogen uptake, macronutrients and chlorophyll-a in SW Atlantic waters: The case of the Gulf of San Jorge, Argentina. *Journal of Marine Systems*, 2017, **172**: 43-50.

[40] Lakshmikandan M, Li M, Pan BZ. Cyanobacterial blooms in environmental water: Causes and solutions. *Current Pollution Reports*, 2024, **10.4**: 606-627.

[41] 李兴月. 基于气象和水环境质量的呼伦湖蓝藻水华成因及预警研究[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.

[42] Schindler DW. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science*, 1974, **184.4139**: 897-899.

[43] Qin BQ. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(5): 1229-1243. [秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, **32**(05): 1229-1243.]

[44] Xie LQ, Xie P, Li SX, *et al*. The low TN:TP ratio, a cause or a result of Microcystis blooms?. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2073-2080.

[45] Zhang JH, Yin P, Zhang L, *et al*. Effects of sediment dredging on the reduction of sediment internal loading of Lake Taihu and the self-recovery ability of benthic organism. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 828-838. [张建华, 殷鹏, 张雷等. 底泥疏浚对太湖内源及底栖生物恢复的影响. 环境科学, 2023, **44**(2): 828-838.]

[46] Tang W, Xu H, Zhan X, *et al*. Nitrogen and phosphorus purification effects of ecological floating bed in Qiandao Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(4): 926- 935. [唐伟, 许海, 詹旭等. 生态浮床对千岛湖水体氮磷净化效果研究. 环境科学研究, 2022, **35**(4): 926-935.]