

2011-2024 年内蒙古查干淖尔叶绿素 a 演变及其驱动机制*

张昊^{1,2,3}, 史小红^{1,2,3**}, 卢俊平^{1,2,3}, 赵胜男^{1,2,3}, 孙标^{1,2,3}, 侯波^{1,4}, 张立杰^{1,5}

(1: 内蒙古乌梁素海湿地生态系统定位观测研究站, 巴彦淖尔 015000)

(2: 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)

(3: 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018)

(4: 内蒙古自治区呼和浩特市土默特左旗水务局, 呼和浩特 010018)

(5: 河北省石家庄市平山县水利服务中心, 石家庄 050400)

摘 要: 叶绿素 a 是湖泊生态系统初级生产力的重要指标, 其浓度变化反映水体的营养状态和生态健康。本研究基于 2011-2024 年查干淖尔水质及环境数据, 采用相关性和冗余分析等方法, 揭示叶绿素 a 浓度年际与年内变化特征及其关键驱动因子。结果表明: 2011-2024 年间, 查干淖尔叶绿素 a 浓度年际变化稳定, 夏季浓度最高, 冬季次之, 且自北向南递减。年际上, 叶绿素 a 浓度与高锰酸盐指数负相关, 与水量、水深、降水量、蒸发量和气温正相关, 径流量对其浓度有促进作用。年内, 叶绿素 a 浓度主要受总氮和气温影响, 蒸发量和径流量在夏冬季影响显著。春季叶绿素 a 与冬季叶绿素 a、气温和径流量正相关, 夏季与气温正相关、与总氮负相关, 秋季与夏季叶绿素 a、气温、径流量正相关、与总氮、总磷和高锰酸盐指数负相关, 冬季与气温、径流量和春季叶绿素 a 正相关。总的来说, 查干淖尔叶绿素 a 浓度变化受到多种环境因素的共同作用, 揭示湖泊生态系统对气候变化和水文条件的敏感性。

关 键 词: 叶绿素 a; 演变特征; 驱动因素; 查干淖尔

The Evolution of Chlorophyll-a Concentration and Its Driving Mechanisms in Lake Chagannaoer, Inner Mongolia (2011-2024)

Zhang Hao^{1,2,3}, Shi Xiaohong^{1,2,3**}, Lu Junping^{1,2,3}, Zhao Shengnan^{1,2,3}, Sun Biao^{1,2,3}, Hou Bo^{1,4}, Zhang Lijie^{1,5}

(1: Inner Mongolia Wuliangsu Lake Wetland Ecosystem Monitoring and Research Station, Bayannur 015000, P.R.China)

(2: National Key Laboratory of Water Engineering Ecological Environment in Arid Areas of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, P.R.China)

(3: Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, P.R.China)

(4: Water Affairs Bureau, Tumote Right Banner, Hohhot City, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, P.R.China)

(5: Water Resources Service Center, Pingshan County, Shijiazhuang City, Hebei Province, Shijiazhuang 050400, P.R.China)

Abstract: Chlorophyll-a is an important indicator of primary productivity in lake ecosystems, and its concentration changes reflect the nutrient status and ecological health of the water. This study, based on water quality and environmental data from 2011 to 2024 for Lake Chagannaoer, uses correlation and redundancy analysis to reveal the interannual and intra-annual variation characteristics of chlorophyll-a concentration and its key driving factors. The results show that between 2011 and 2024, the interannual variation of chlorophyll-a concentration in Lake Chagannaoer was stable, with the highest concentrations in summer and the lowest in spring,

*2024-12-10 投稿; 2025-02-20 收修改稿

国家自然科学基金黄河水科学联合基金项目(U2443225)、内蒙古黄河流域典型湖泊生态环境综合治理技术优化集成示范(2021GG0089)和内蒙古农业大学青年教师科研能力提升基金项目(BR220102)联合资助

*通讯作者: 史小红。E-mail: imaushixiaohong@163.com

and a decreasing trend from north to south. Interannually, chlorophyll-a concentration was negatively correlated with the permanganate index and positively correlated with water volume, water depth, precipitation, evaporation, and temperature. Runoff also had a promoting effect on its concentration.

Keywords: Chlorophyll-a; Evolution characteristics; Mechanisms; Lake Chagannaoer

全球气候变化和人类活动加剧了湖泊生态系统的环境压力, 准确解析叶绿素 a 浓度的时空变化已成为水生态学研究的重要课题^[1, 2]。叶绿素 a 作为湖泊生态系统初级生产力的重要指标^[3, 4], 广泛用于水体质量监测和生态健康评估^[5], 它不仅反映水体营养状态^[6], 还揭示光合作用能力^[7], 并为生态变化提供早期预警信息^[8]。

叶绿素 a 浓度不仅直接反映浮游植物的生物量和生产力, 还与湖泊的水质、营养盐含量以及气候变化等因素密切相关^[11, 12]。在不同气候和地理环境下, 湖泊生态系统的响应机制复杂多样, 叶绿素 a 浓度能够敏感地捕捉这些变化^[13, 14]。近年来, 随着遥感技术和高频监测手段的快速发展, 研究者们开始深入探讨叶绿素 a 浓度与环境参数(如水温、降水量、氮磷浓度等)之间的复杂交互作用^[15, 16]。这些研究不仅为湖泊生态学提供新的视角, 也为湖泊管理和保护策略的制定提供了科学依据。通过多维度的环境数据分析, 研究人员能够揭示叶绿素 a 浓度在不同气候条件下的变化规律^[17, 18], 进而为预测和评估气候变化对湖泊生态系统的潜在影响提供理论支持^[19, 20]。

查干淖尔是蒙新高原典型的干旱区内陆湖泊, 对维持区域草畜生态平衡、支撑畜牧业经济及调节局地气候具有不可替代的作用^[26]。然而, 受气候变化与人类活动叠加影响, 湖泊面积已从历史约 105.3 km² 急剧萎缩至 30 km² (萎缩率超 71%)^[27], 水资源短缺与生态退化威胁其生态服务功能。在此背景下, 叶绿素 a 作为反映浮游植物丰度与湖泊富营养化的核心指标, 其浓度动态可敏感表征水体营养状态及生态系统响应。本研究通过解析查干淖尔叶绿素 a 浓度的年际与年内变化特征, 结合水文、营养盐等环境因子关联分析, 旨在揭示富营养化的驱动机制, 明确生态退化的关键胁迫因素, 从而为精准制定水位恢复、污染调控等生态修复策略提供理论依据, 助力脆弱湖泊系统的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

查干淖尔(43°20'N~43°30'N, 114°45'E~115°5'E)位于内蒙古锡林郭勒盟阿巴嘎旗^[24, 25], 东亚季风区干旱与半干旱过渡带的封闭性内陆湖, 属于大陆性季风气候, 海拔 1300 m, 面积 30 km², 平均水深 2 m^[26, 27]。受极端气候影响显著, 冬季寒冷, 最低气温可达-42.4°C、夏季温暖, 最高温度可达 39.1°C^[28]。该湖泊生态系统季节性变化显著, 冬季为重度富营养, 夏秋季节为轻度富营养, 春季为中营养状态^[29], 气温和湖泊水量是影响查干淖尔水体富营养化的主要因素^[26]。

1.2 数据来源及检测方法

根据查干淖尔上游补给河流分布及湖区水文特征, 合理布设 5 个采样点^[30](图 1)。使用 2011-2024 年每年的冬季(2 月 10 日)、春季(5 月 10 日)、夏季(8 月 10 日)、秋季(10 月 5 日)的水质监测数据, 包括叶绿素 a、总氮、总磷、高锰酸盐指数等参数, 每项指标重复测定 3 次, 取其平均值作为最终测定值^[26, 31]。叶绿素 a(Chl.a)采用丙酮萃取分光光度计法测定, 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)和高锰酸钾指数(COD_{Mn})分别采用钼锑抗分光光度法和高锰酸钾滴定法测定^[32]。水深(H)则使用声纳进行测量^[33]。考虑到叶绿素 a 易降解, 所有样品在采集后立即冷藏, 并于 24 小时内送至实验室进行分析。同时, 收集和整理湖泊面积(S)、水深(H)、气温(T)、水量(Q)、降水量(P)、蒸发(E)等数据。气象数据来自阿巴嘎旗气象站, 面积(S)和水量(V)通过 Landsat 遥感反演获取^[26]。Excel2016 用于数据的基础处理与整理, SPSS26 用于统计分析, ArcGIS10.8 用于空间分析与制图, ENVI5.3 用于遥感影像处理, Canoco5 用于环境因子的冗余分析, Python 用于编写自定义脚本实现数据处理, Origin2024 用于科学绘图与可视化^[26]。

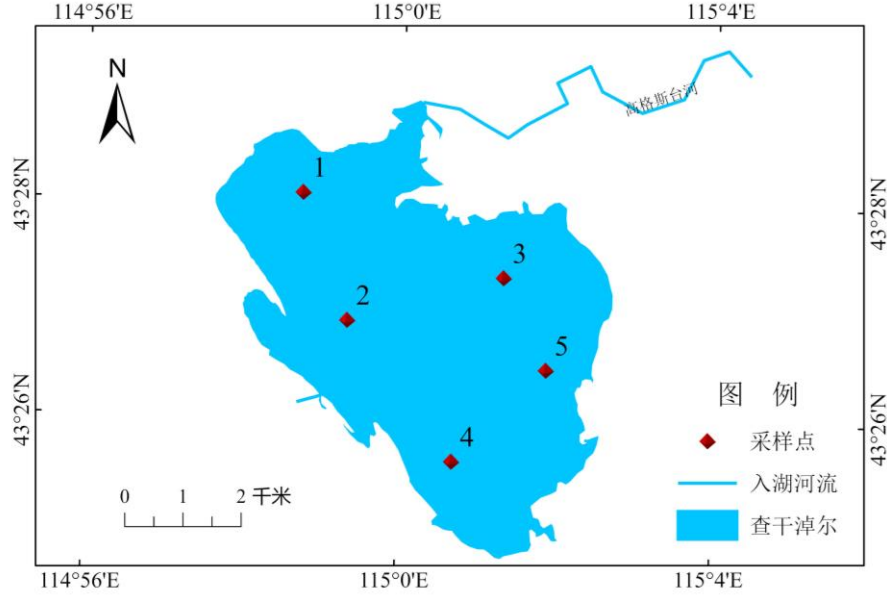


图 1 查干淖尔采样点位置

Fig. 1 Sampling locations in Lake Chagannaer

冗余分析（RDA）是一种多元统计方法，用于探讨自变量矩阵与因变量矩阵之间的关系，主要通过回归分析来衡量自变量对因变量的解释程度。其基本原理是通过回归分析找出哪些自变量能够解释因变量的方差，并利用主成分分析（PCA）对自变量矩阵进行降维，选取解释最大方差的主成分，最终计算冗余度，即自变量在因变量中的解释能力^[34]。其公式如下：

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (1)$$

$$\rho^2 = \frac{\text{tr}(X^T Y)}{\text{tr}(Y^T Y)} \quad (2)$$

其中： Y 是因变量矩阵。 X 是自变量矩阵。 β 是回归系数。 ϵ 是误差项。其中， $\text{tr}()$ 表示矩阵的迹（对角元素之和），即自变量矩阵在因变量矩阵中的解释度。冗余度 ρ^2 代表了自变量矩阵对因变量矩阵方差的解释比例。

2 结果与分析

2.1 叶绿素 a 浓度时空演变特征

叶绿素 a 浓度在年际变化上较为稳定，但在年内波动较大。从年际变化来看，2011 年叶绿素 a 浓度均值最高，达 3.78 $\mu\text{g/L}$ ，随后浓度逐渐下降，至 2013 年最低，降至 2.44 $\mu\text{g/L}$ 。2014 年至 2017 年间，浓度有所回升，2017 年均值为 3.39 $\mu\text{g/L}$ ，接近高峰水平。2018 年后，浓度再次下降，并在 2020 年、2021 年和 2022 年分别稳定在 2.65 $\mu\text{g/L}$ 、2.59 $\mu\text{g/L}$ 和 2.60 $\mu\text{g/L}$ 。2022 年至 2024 年浓度呈现先下降后上升的趋势，2023 年达到极值 2.09 $\mu\text{g/L}$ 。从年内季节变化来看，夏季叶绿素 a 浓度均值最高，达 4.32 $\mu\text{g/L}$ ，冬季次之，为 3.43 $\mu\text{g/L}$ ，秋季和春季浓度较低，分别为 2.48 $\mu\text{g/L}$ 和 1.73 $\mu\text{g/L}$ ，呈现明显的季节性波动特征，其中夏季为高峰，春季为低谷（图 2）。高锰酸盐指数年内呈现冬季 > 春季 > 夏季 > 秋季；总磷浓度呈现春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季；总氮浓度呈现夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季。叶绿素 a 浓度在北部最高（6~8 $\mu\text{g/L}$ ），随纬度逐渐向南降低，且中南部浓度最低（0~2 $\mu\text{g/L}$ ）的空间分布规律，且这种格局在各年份中相对稳定（图 3）。

2.2 叶绿素 a 浓度的年际影响因素

如图 4 所示，叶绿素 a 浓度与高锰酸盐指数显著负相关（ $p < 0.01$ ， $R^2 = 0.522$ ）。相反，叶绿素 a 浓度与水量（ $p < 0.01$ ， $R^2 = 0.769$ ）、水深（ $p < 0.01$ ， $R^2 = 0.694$ ）、降水量（ $p < 0.01$ ， $R^2 = 0.770$ ）、蒸发量（ $p < 0.01$ ， $R^2 = 0.588$ ）和气温（ $p < 0.01$ ， $R^2 = 0.750$ ）呈显著正相关。叶绿素 a 浓度受总磷（ $p < 0.05$ ， $R^2 = 0.028$ ）、总氮

($p<0.05$, $R^2=0.028$) 和湖泊面积 ($p<0.05$, $R^2=0.061$) 的影响较弱, 径流量 ($p<0.05$, $R^2=0.287$) 对叶绿素 a 浓度有一定促进作用。

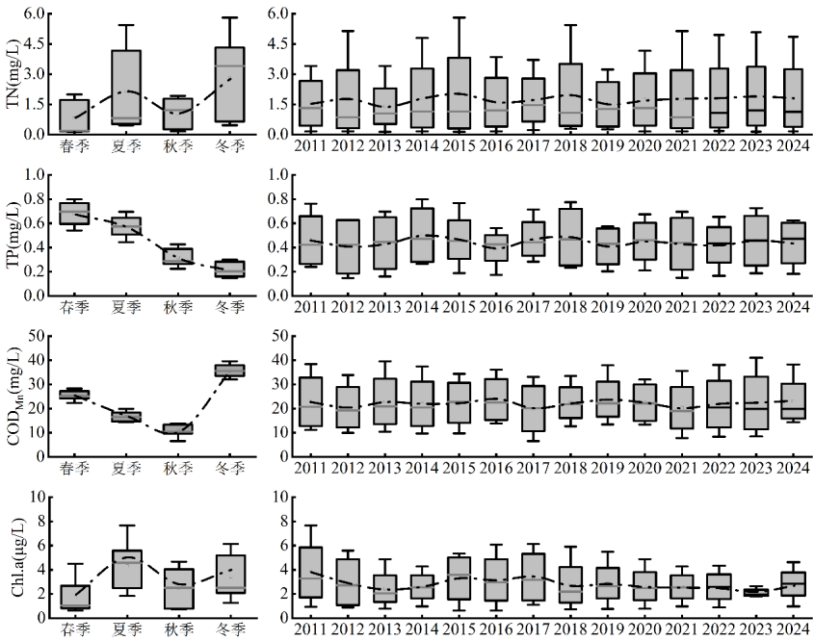


图 2 2011-2024 年叶绿素 a 浓度、总氮、总磷、高锰酸盐指数的年际与年内变化

Fig. 2 Interannual and intra-annual variations of Chlorophyll-a concentration, total nitrogen, total phosphorus, and permanganate index from 2011 to 2024

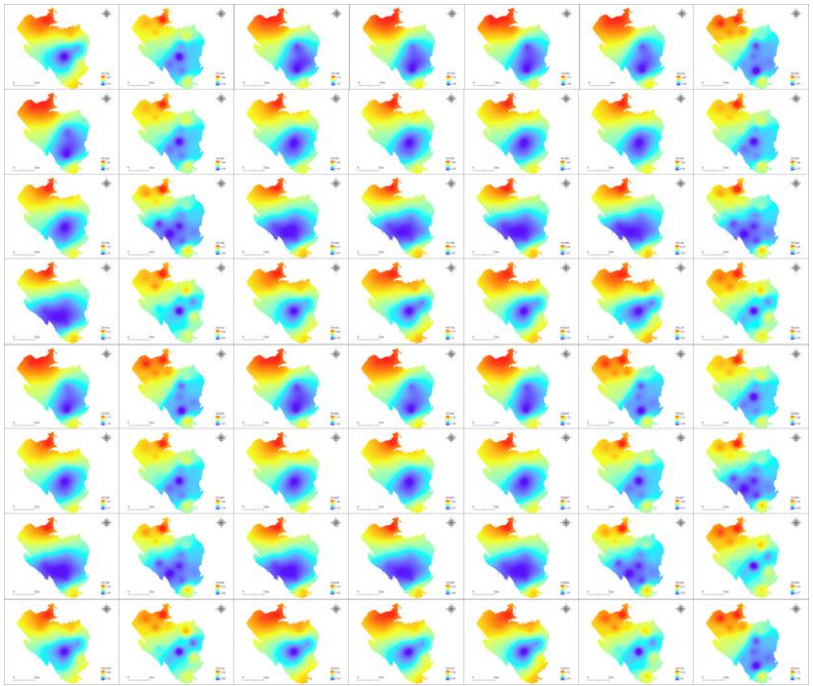


图 3 2011-2024 年查干淖尔叶绿素 a 时空分布图

Fig. 3 Spatial and Temporal Distribution Map of Chlorophyll-a in Lake Chagannaoer (2011–2024)

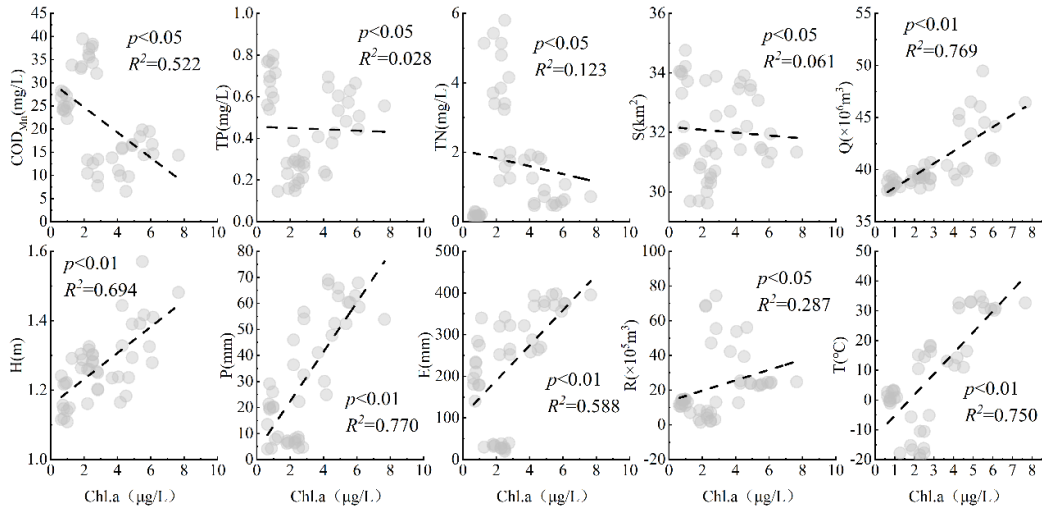


图4 叶绿素 a 浓度与环境因子的关系

Fig. 4 Relationship between chlorophyll-a and environmental factors

2.3 叶绿素 a 浓度的年内影响因素

图 5 展示了不同季节叶绿素 a 浓度与多个环境因子之间相关性。总氮和气温是影响查干淖尔叶绿素 a 浓度的主要因素，并在各季节中表现出较强的正相关性。蒸发量和径流量在夏季和冬季尤为显著，而高锰酸盐指数和总磷通常以负相关方式影响水体的叶绿素 a 浓度，尤其在春季和秋季。具体而言：春季，影响叶绿素 a 浓度的正相关因子排序为：总氮 > 气温 > 降水量 > 水量 > 径流量 > 水深 > 蒸发量。负相关因子按强度排序为：高锰酸盐指数 > 总磷。夏季，影响叶绿素 a 浓度的正相关因子按强度排序为：蒸发量 > 气温 > 径流量 > 降水量 > 水量 > 水深 > 总磷。负相关因子为：高锰酸盐指数 > 总氮。秋季，叶绿素 a 浓度与总氮、气温、降水量、水量、水深、径流量和蒸发量呈正相关，排序依次为：总氮 > 气温 > 降水量 > 水量 > 水深 > 径流量 > 蒸发量。负相关因子按强度排序为：高锰酸盐指数 > 总磷。冬季，影响叶绿素 a 浓度的正相关因子按强度排序为：气温 > 蒸发量 > 径流量 > 降水量 > 总磷 > 水量 > 水深。负相关因子为：高锰酸盐指数 > 总氮。

2.4 叶绿素 a 浓度与环境因子的冗余分析

对查干淖尔叶绿素 a 浓度与总氮、总磷、高锰酸盐指数、水深、降水、径流量、水温、蒸发等指标进行了冗余分析，并剔除了不显著的相关因子(图 6)。环境因子特征见表 1。轴 1 和轴 2 的特征值分别为 0.79 和 0.15，共解释了 95.34%的叶绿素 a 浓度变化。春季叶绿素 a 浓度与冬季叶绿素 a、春季气温、冬季气温及冬季径流量显著正相关($n=14$, $p<0.01$)，但与夏季面积显著负相关($n=14$, $p<0.01$)。夏季叶绿素 a 浓度与夏季气温显著正相关($n=14$, $p<0.01$)，与夏季总氮显著负相关($n=14$, $p<0.01$)。秋季叶绿素 a 浓度与夏季叶绿素 a、夏季气温和秋季径流量显著正相关($n=14$, $p<0.01$)，但与夏季总氮、秋季高锰酸盐指数和秋季总磷显著负相关($n=14$, $p<0.01$)。冬季叶绿素 a 浓度与冬季气温、春季气温、冬季径流量、春季叶绿素 a 显著正相关($n=14$, $p<0.01$)，但与夏季面积显著负相关($n=14$, $p<0.01$)。基于上述相关性分析，构建了查干淖尔春、夏、秋、冬四个季节叶绿素 a 与环境因子的关系方程，详见表 2。

表 1 查干淖尔的环境参数值

Tab.1 Environmental parameter of Lake Chagannaoer

时间/指标	面积 (km ²)	水量 (×10 ⁶ m ³)	水深 (m)	降水量 (mm)	蒸发量 (mm)	径流量 (×10 ⁵ m ³)	温度 (°C)
春季	33.13	38.61	1.17	16.91	222.82	130487.94	1.29
夏季	32.16	44.79	1.39	62.01	379.99	240892.52	32.10
秋季	33.13	38.61	1.17	16.91	222.82	130487.94	1.29
冬季	30.29	39.07	1.29	6.87	31.00	47988.34	-13.92

注：S 表示面积，Q 表示水量，H 表示水深，P 表示降水量，E 表示蒸发量，R 表示径流量，T 表示温度

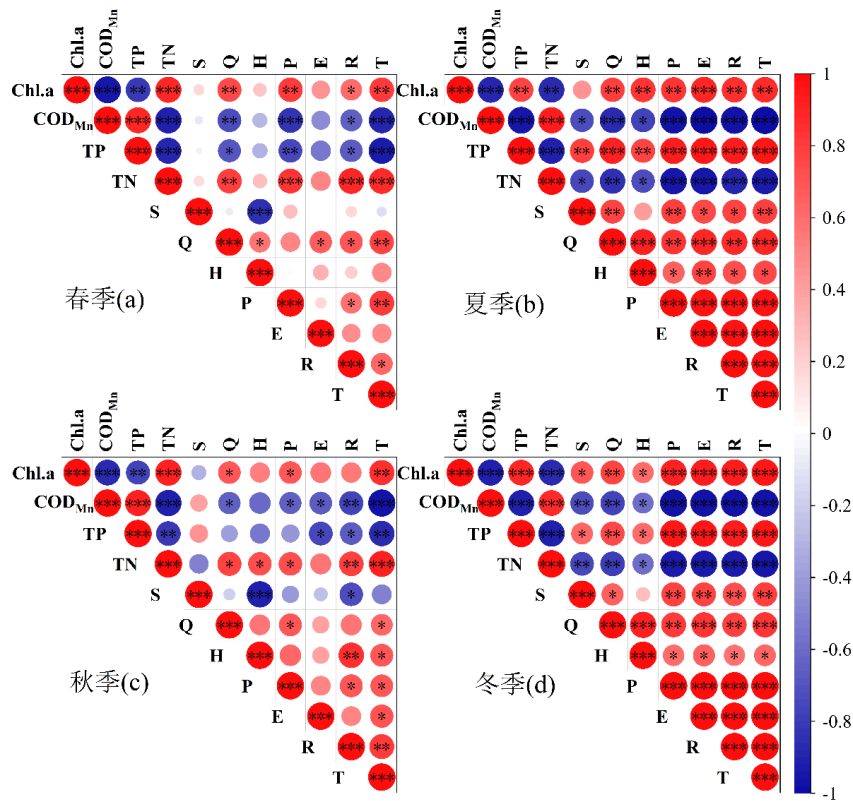


图5 不同季节叶绿素 a 浓度与环境因子的关系(* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$)

Fig. 5 Relationship Between chlorophyll-a and environmental factors in different seasons

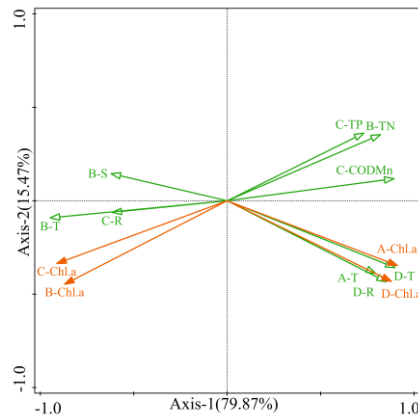


图6 叶绿素 a 浓度与环境因子的冗余分析 (A,B,C,D 分别表示春季、夏季、秋季和冬季)

Fig. 6 Redundancy analysis of chlorophyll-a concentration and environmental factors

表2 不同季节叶绿素 a 浓度与环境因子关系方程¹⁾

Tab.2 Relationship equation between chlorophyll-a and eEnvironmental factors in different seasons

时间	方程	相关性
春季	$\log(\text{A-Chl.a}) = 4.09 + 0.14 \times \log(\text{D-Chl.a}) - 0.24 \times \log(\text{A-T}) + 8.85 \times 10^{-6} \times \log(\text{D-R}) + 0.062 \times \log(\text{D-T}) - 0.08 \times \log(\text{B-S})$	($R^2 = 0.926$)
夏季	$\log(\text{B-Chl.a}) = 4.58 + 0.040 \times \log(\text{B-T}) - 0.41 \times \log(\text{B-TN})$	($R^2 = 0.781$)
秋季	$\log(\text{C-Chl.a}) = 55.00 - 0.40 \times \log(\text{B-Chl.a}) + 0.05 \times \log(\text{B-T}) + 2.0 \times 10^{-6} \times \log(\text{C-R}) - 0.92 \times \log(\text{B-TN}) - 0.23 \times \log(\text{C-COD}_{\text{Mn}}) + 7.48 \times \log(\text{C-TP}) - 1.57 \times \log(\text{B-S})$	($R^2 = 0.973$)
冬季	$\log(\text{D-Chl.a}) = 2.80 - 0.04 \times \log(\text{A-T}) + 0.06 \times \log(\text{D-T}) + 5.41 \times 10^{-7} \times \log(\text{D-R}) + 0.38 \times \log(\text{A-Chl.a})$	($R^2 = 0.915$)

1) A,B,C,D 分别表示春季、夏季、秋季和冬季

3 讨论

3.1 叶绿素 a 浓度时空变化特征

查干淖尔叶绿素 a 浓度在夏季达到最高值, 冬季次之。夏季水温高且光照充足, 促进浮游植物生长繁殖^[29, 35]; 冬季光照弱且日照时长短, 但冰层的存在使得冰下水体温度相对稳定^[13, 36]。同时, 由于北方冬季大部分时间没有积雪, 冰下水体仍能进行光合作用, 水中的浮游植物仍然表现出较高代谢率。此外, 随着气温下降, 冰层厚度逐渐增加, 冰中营养盐迁移到冰下水体, 导致叶绿素 a 在冰下水体聚集。总之, 迁移与新生成的共同作用促进冰下水体叶绿素 a 浓度的增高。

从空间分布来看, 北部水域水深较浅 (0.4-1.0 m), 光照充足, 水温波动较大, 且受农业排水和生活污水影响, 营养物质易于积累, 促进藻类生长, 导致叶绿素 a 含量较高。相比之下, 南部水域水深较深 (1.0-2.4 m), 光线穿透性较差, 水温变化缓慢, 抗干扰性强, 且泉水补给较为充足, 营养物质积累较少, 从而抑制藻类生长, 导致叶绿素 a 含量较低。

3.2 叶绿素 a 浓度影响因素分析

查干淖尔叶绿素 a 浓度的年际变化受到多种因素的综合作用。首先, 查干淖尔水体的高锰酸盐指数为劣 V 类。较高的有机物消耗水体中的溶解氧, 降低透明度, 抑制浮游植物光合作用, 从而导致叶绿素 a 浓度下降^[18]。除高锰酸盐外, 该湖泊的“水量小、水深浅、降水量少、蒸发大”也对叶绿素 a 浓度有重要影响。水量直接决定水体的容积和流动性, 水量不足时, 水体浓缩, 易导致营养物质积累, 进而促进藻类生长, 增加叶绿素 a 浓度^[27]。水深是另一个关键因素。较浅的水体能更好地让阳光穿透, 使藻类获得充足光照, 促进光合作用, 从而增加叶绿素 a 浓度^[28]。降水量的变化通过影响水体的补给与流动性, 夏季降水量较多时, 水流增强, 水体浑浊度增加, 导致底泥释放营养物质, 河流冲刷带来营养物质输入, 进而促进藻类生长, 增加叶绿素 a 浓度^[44]。蒸发通过改变营养盐浓度和光照等因素间接影响叶绿素 a 浓度。随着蒸发增大, 湖泊水位下降, 营养盐更加集中, 促进藻类生长, 从而提高叶绿素 a 浓度^[13]。

此外, 查干淖尔叶绿素 a 浓度在年内呈现季节性变化, 且不同季节对叶绿素 a 的影响机制有所不同。春季和秋季, 较低的气温限制了藻类对磷的吸收能力, 导致叶绿素 a 与总磷之间呈现负相关。进入夏季, 气温升高, 藻类对磷的需求增强, 使叶绿素 a 与总磷表现出正相关。然而, 高温可能通过加速总氮的挥发或限制生物过程, 导致总氮浓度降低, 从而与叶绿素 a 呈现负相关。到了冬季, 低温抑制了藻类生长, 导致氮的利用效率下降, 使得叶绿素 a 与总氮呈负相关。尽管如此, 由于磷的化学稳定性较高, 它仍能被藻类有效利用, 因此与叶绿素 a 呈正相关。不同季节的降水和径流量变化也显著影响了水体中营养元素的输入。春秋两季的氮输入量较多, 促进了叶绿素 a 的增加; 而夏季则是磷输入的高峰, 对叶绿素 a 浓度的提升起到了关键作用。到了冬季, 磷通过沉降过程被更多地保留, 这也进一步解释了季节性的相关性变化。同时, 季节性化学反应速度的差异, 尤其是在夏季高温下的氮的反硝化作用加速, 以及冬季低温对氮利用效率的抑制, 均加剧了这些关系的复杂性。

3.3 叶绿素 a 与环境因子的阈值研究

研究表明, 总氮浓度与叶绿素 a 浓度呈正相关^[45], 但当总氮浓度超过某一阈值时, 水体可能发生富营养化, 进而抑制藻类生长, 导致叶绿素 a 浓度反而下降^[16, 46, 47]。类似地, 总磷浓度通常与叶绿素 a 浓度正相关, 特别在春季和夏季, 总磷浓度达到 0.1~0.3 mg/L 时, 叶绿素 a 浓度通常较高。然而, 当磷浓度过高时, 可能导致水体富营养化, 从而抑制藻类生长。高锰酸盐指数对叶绿素 a 浓度的影响则表现出负相关关系, 高锰酸盐指数超过 5 mg/L 时, 会显著抑制藻类生长, 导致叶绿素 a 浓度下降^[17, 48]。水深也存在阈值效应。水深较浅 (<2 m) 时, 藻类能够更好地利用光照进行光合作用, 叶绿素 a 浓度较高, 但当水深过深时 (>10 m), 光照条件不足, 叶绿素 a 浓度明显下降^[18, 49]。径流量的增加则会携带更多的营养盐和有机物, 促进藻类生长, 径流量达到一定阈值 (如 50 m³/s) 时, 叶绿素 a 浓度会迅速上升^[19, 50-52]。水温和蒸发量也有类似的阈值效应。水温在 18°C 到 30°C 之间促进藻类的生长, 而当水温超过 30°C 时, 可能因过高温度导致藻类死亡, 叶绿素 a 浓度下降^[53]。蒸发量增加时, 水体中的溶解氧和营养盐浓度上升, 蒸发量超过一定阈值 (如 2 mm/d) 时, 会显著促进藻类生长和叶绿素 a 浓度的增加^[15, 20-23]。总之, 水体中的氮、磷、高锰酸盐、水深、径流量及水温等因子都对叶绿素 a 浓度具有显著影响, 且各因子存在阈值效应, 超出一定

范围时可能抑制藻类生长,甚至导致水体富营养化现象。因此,维持这些因子在适宜范围内对于水体生态健康至关重要。

4 结论

(1) 查干淖尔叶绿素 a 浓度在夏季达到最高值,冬季次之。夏季高水温和充足光照促进浮游植物生长;冬季尽管光照不足,随着冰层增厚,叶绿素 a 在冰中迁移到水中。其次冰下水体也进行光合作用,也会产生叶绿素 a。

(2) 查干淖尔叶绿素 a 浓度的年际变化受高锰酸盐抑制作用和水文因素的双重影响。高锰酸盐通过消耗氧气和增加水体浑浊度抑制藻类光合作用,从而导致叶绿素 a 浓度下降。相反,水量、水深、降水量、蒸发量和气温等水文因素通过增加营养盐输入和提供稳定的生长环境,促进了藻类的生长,从而提高了叶绿素 a 浓度。

(3) 查干淖尔叶绿素 a 浓度在年度内呈现季节性滞后效应。春秋季节,由于较低的气温限制藻类对磷的吸收,导致叶绿素 a 与总磷呈负相关;夏季,气温升高,藻类对磷的需求增加,叶绿素 a 与总磷呈正相关。然而,高温可能通过加速总氮挥发或限制生物过程,导致总氮浓度下降,从而与叶绿素 a 呈负相关;冬季则由于低温抑制藻类生长,影响其光合作用。

5 参考文献

- [1] García - Nieto, García - Gonzalo, Alonso Fernández et al. Forecast of chlorophyll-a concentration as an indicator of phytoplankton biomass in El Val reservoir by utilizing various machine learning techniques: A case study in Ebro river basin, Spain. *Journal of Hydrology*, 2024, DOI:10.1016/j.jhydrol.2024.131639.
- [2] Stefanidis, Varlas, Vourka et al. Delineating the relative contribution of climate related variables to chlorophyll-a and phytoplankton biomass in lakes using the ERA5-Land climate reanalysis data. *Water Research*, 2021, DOI:10.1016/j.watres.2021.117053.
- [3] Meng, Yao, Zhang et al. Impact of dust deposition on phytoplankton biomass in the Northwestern Pacific: A long-term study from 1998 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.152536.
- [4] Carlson. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(2):361-369. DOI:https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- [5] Schindler. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwaters. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(3):478-486. DOI:https://doi.org/10.4319/lo.1978.23.3.0478.
- [6] Du, Chen, Mao et al. Evaluation of eutrophication in freshwater lakes: A new non-equilibrium statistical approach. *Ecological Indicators*, 2019, DOI:10.1016/j.ecolind.2019.03.032.
- [7] Yong, Ruting, Xianyang. Using machine learning to reveal seasonal nutrient dynamics and their impact on chlorophyll-a levels in lake ecosystems: A focus on nitrogen and phosphorus. *Ecological Indicators*, 2024, DOI:10.1016/j.ecolind.2024.112916.
- [8] Zhang, Cao, Liu et al. Relationship between eutrophication and greenhouse gases emission in shallow freshwater lakes. *Science of the Total Environment*, 2024, DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.171610.
- [9] Su, Wang, Yang. Lake eutrophication modeling in considering climatic factors change: A review. *Ying yong sheng tai xue bao = The journal of applied ecology / Zhongguo sheng tai xue xue hui, Zhongguo ke xue yuan Shenyang ying yong sheng tai yan jiu suo zhu ban*, 2012, 23:3197-3206.
- [10] Lv XT, Lv YL, Song S, et al. Eutrophication of cold-water lakes driven by both climate change and human activities. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7375-7386.[吕笑天, 吕永龙, 宋帅 等. 气候变化与人类活动双重驱动的冷水湖泊富营养化. *生态学报*, 2017, 37(22):7375-7386.]
- [11] Zhao YH, Li T, Huang B, et al. Water quality and eutrophication evolution characteristics of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020 and their driving factors. *J Lake Sci*, 2022, 34(5): 1441-1451. [赵晏慧, 李韬, 黄波 等. 2016—2020 年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素. *湖泊科学*, 2022, 34(05):1441-1451.]

- [12] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL, et al. Changes in chlorophyll a and nutrients in the northern Taihu Lake from 2005 to 2017 and their influencing factors. *J Lake Sci*, 2018, 30(2): 279-295. [朱广伟, 秦伯强, 张运林 等. 2005-2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素. *湖泊科学*, 2018, **30**(02):279-295.]
- [13] Guo ZY, Li CY, Shi XH, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of chlorophyll a content in Hulun Lake of the cold-arid region and analysis of its influencing factors. *J Ecol Environ*, 2019, 28(7): 1434-1442. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.07.017. [郭子扬, 李畅游, 史小红 等. 寒旱区呼伦湖水体叶绿素 a 含量的时空分布特征及其影响因子分析. *生态环境学报*, 2019, **28**(07):1434-1442.]
- [14] Wang ZC, Yang JL, Yang F, et al. Distribution characteristics of microplastics in the ice cover of Wuliangsuhai and their response relationship with salinity and chlorophyll a. *Environ Sci*, 2021, 42(2): 673-680. DOI: 10.13227/j.hjlx.202007042. [王志超, 杨建林, 杨帆 等. 乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素 a 的响应关系. *环境科学*, 2021, **42**(02):673-680. DOI:10.13227/j.hjlx.202007042.]
- [15] Shi, Yu, Zhao et al. Impacts of environmental factors on Chlorophyll-a in lakes in cold and arid regions: A 10-year study of Wuliangsuhai Lake, China. *Ecological Indicators*, 2023, DOI:10.1016/j.ecolind.2023.110133.
- [16] Ma, Jia, Hu et al. Changes in chlorophyll a and its response to nitrogen and phosphorus characteristics over the past three decades in Poyang Lake, China. *Ecohydrology*, 2020, DOI:10.1002/eco.2270.
- [17] Zhang, Li, Zhao et al. Temporal dynamics of the Chlorophyll a-Total phosphorus relationship and algal production efficiency: Drivers and management implications. *Ecological Indicators*, 2023, DOI:10.1016/j.ecolind.2023.111339.
- [18] Yang C, Li Q. Analysis and countermeasures of pH and permanganate index exceedance in spring for northern small and medium-sized rivers. *China New Tech & Prod*, 2020, (17): 134-135. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2020.17.061. [杨琛, 李强. 北方中小河流春季 pH 值和高锰酸盐指数超标情况分析对策. *中国新技术新产品*, 2020, (17):134-135.]
- [19] Zhao, Zhu, Zhou et al. Trophic status and lake depth play important roles in determining the nutrient-chlorophyll a relationship: Evidence from thousands of lakes globally. *Water Research*, 2023, DOI:10.1016/j.watres.2023.120182.
- [20] Mercado-Bettl n, Clayer, Shikhani et al. Forecasting water temperature in lakes and reservoirs using seasonal climate prediction. *Water Research*, 2021, DOI:10.1016/j.watres.2021.117286.
- [21] Seyed Abbas, Alain, Isabelle et al. Spatiotemporal insights of phytoplankton dynamics in a northern, rural-urban lake using a 3D water quality model. *Journal of Environmental Management*, 2024, DOI:10.1016/j.jenvman.2024.122687.
- [22] Lester, Michael. Predicting lake chlorophyll from stream phosphorus concentrations. *Journal of the American Water Resources Association*, 2024, DOI:10.1111/1752-1688.13243.
- [23] Woolway, Benjamin, Jakob et al. Compound hot temperature and high chlorophyll extreme events in global lakes. *Environmental Research Letters*, 2021, DOI:10.1088/1748-9326/ac3d5a.
- [24] Xi, Riguge, Jiyao et al. Climatic implications on variations of Qehan Lake in the arid regions of Inner Mongolia during the recent five decades. *Environmental monitoring and assessment*, 2017, **189**(1):14.
- [25] Danyang, Chenhao, Lijie et al. Changes in and driving factors of the lake area of Huri Chagannao' er Lake in Inner Mongolia. *Journal of Limnology*, 2022, **81**(1):2079-2079.
- [26] Zhang H, Shi XH, Zhao SN, et al. Eutrophication characteristics and influencing factors of the East Lake water in Chagannaoer, Inner Mongolia. *Wetland Sci*, 2023, 21(6): 842-849. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2023.06.004. [张昊, 史小红, 赵胜男 等. 内蒙古查干淖尔湖东湖水体富营养化特征及其影响因素. *湿地科学*, 2023, **21**(06):842-849.]
- [27] Liu MP, Has, Chunxi. Analysis of the water volume changes and their causes in Chagannaoer, Inner Mongolia, over the past 50 years. *J Lake Sci*, 2015, 27(1): 141-149. [刘美萍, 哈斯, 春喜. 2015.27(01):141-149. [刘美萍, 哈斯, 春喜.近 50 年来内蒙古查干淖尔湖水量变化及其成因分析. *湖泊科学*, 2015, 27(01):141-149]
- [28] 侯波.变化环境下查干淖尔湖近 46a 湖泊演化过程及湖水来源解析研究[学位论文].内蒙古农业大学,2019.
- [29] 张昊.内蒙古查干淖尔生态环境特征及水量-水质-水生态耦合模拟[学位论文].内蒙古农业大学,2024.
- [30] 黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析.北京:中国标准出版社,2000.

- [31] Quan D, Shi XH, Zhao SN, et al. Nutrient status and influencing factors of Wuliangsuhai water in summer from 2006 to 2017. *J Lake Sci*, 2019, 31(5): 1259-1267. [全栋, 史小红, 赵胜男 等. 2006—2017 年乌梁素海夏季水体营养状态及影响因子. *湖泊科学*, 2019, 31(05):1259-1267.]
- [32] Xu, Ren, Liu. Spatial and Temporal Distribution of Surface Water Quality in Taipu River. *Journal of Water Resources Research*, 2020, 09(01):94-105. DOI:10.12677/jwrr.2020.91010.
- [33] Yiping, Giancarlo, Nils et al. Bathymetric Surveying with Imaging Sonar Using Neural Volume Rendering. *arXiv - CS - Robotics*, 2024, DOI:arxiv-2404.14819.
- [34] 范金城, 梅长林. 数据分析. 北京: 科学出版社, 2002.
- [35] Ma AH, Liu XN, Li T, et al. Remote sensing analysis of the temporal and spatial characteristics of chlorophyll a concentration in the northern South China Sea. *Acta Oceanol Sin*, 2013, 35(4): 98-105. [马翱慧, 刘湘南, 李婷 等. 南海北部海域叶绿素 a 浓度时空特征遥感分析. *海洋学报(中文版)*, 2013, 35(04):98-105.]
- [36] Wu, Liu, Zhang et al. Characterization of nitrogen and phosphorus at the ice-water-sediment interface and the effect of their migration on overlying water quality in Daihai Lake (China) during the freezing period. *Science of the Total Environment*, 2023, DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.164863.
- [37] Zhang, Hong, Liu et al. Autumn canopy senescence has slowed down with global warming since the 1980s in the Northern Hemisphere. *Communications Earth & Environment*, 2023, DOI:10.1038/s43247-023-00835-0.
- [38] Zohner, Mirzagholi, Renner et al. Effect of climate warming on the timing of autumn leaf senescence reverses after the summer solstice. *Science*, 2023, DOI:10.1126/science.adf5098.
- [39] Wang, Li, Chen et al. The spatial and temporal variation of total suspended solid concentration in Pearl River Estuary during 1987 - 2015 based on remote sensing. *Science of the Total Environment*, 2017, DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.09.196.
- [40] Yifan, Qian, Yue et al. Spatial and Temporal Variations of Total Suspended Matter Concentration during the Dry Season in Dongting Lake in the Past 35 Years. *Remote Sensing*, 2024, DOI:10.3390/rs16183509.
- [41] Gong, Tian, Liao et al. Global net climate effects of anthropogenic reactive nitrogen. *Nature*, 2024, DOI:10.1038/s41586-024-07714-4.
- [42] Hampton, Baron, Ladwig et al. Warming-induced changes in benthic redox as a potential driver of increasing benthic algal blooms in high-elevation lakes. *Limnology and Oceanography Letters*, 2023, DOI:10.1002/lol2.10357.
- [43] Li CM, Xu SR, Wang CP, et al. Control effect of potassium permanganate on algae cells and extracellular organic matter. *J Environ Eng*, 2018, 12(7): 1879-1887. [李春梅, 许仕荣, 王长平 等. 高锰酸钾对藻细胞及胞外有机物的控制效果. *环境工程学报*, 2018, 12(07):1879-1887.]
- [44] Yuanyi, Jian, Huan et al. A comparative study on aquatic environment of two mega reservoirs in the mainstream of Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2024, DOI:10.1016/j.jhydrol.2024.132095.
- [45] Wang J, Wei XH, Yao WZ, et al. Relationship between chlorophyll a concentration and nitrogen-phosphorus concentrations in the water of South Taihu Lake. *J Zhejiang Ocean Univ (Nat Sci)*, 2011, 30(3): 190-193+204. [王俊, 韦肖杭, 姚伟忠 等. 南太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2011, 30(03):190-193+204.]
- [46] 郭倩君, 黄月群, 董莹, 李文菁, 代丽娜, 黄寿琨. 水体富营养化评价方法研究. *环境保护前沿*, 2021, 11(2): 178-185.
- [47] 白峰青. 湖泊生态系统退化机理及修复理论与技术研究[学位论文]. 长安大学, 2004.
- [48] Chen, Rholl, Persaud et al. Permanganate preoxidation affects the formation of disinfection byproducts from algal organic matter. *Water Research*, 2023, DOI:10.1016/j.watres.2023.119691.
- [49] Setaro, Melack. Responses of phytoplankton to experimental nutrient enrichment in an Amazon floodplain lake1. *Limnology and Oceanography*, 1984, DOI:10.4319/lo.1984.29.5.0972.
- [50] Meng, Wu. Responses of Phytoplankton Communities to Flow Regulation in Northeastern Riverine Wetlands of China. *Diversity*, 2023, DOI:10.3390/d15121191.
- [51] Nunes, Adams, Rishworth. Shifts in phytoplankton community structure in response to hydrological changes in the shallow St Lucia Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, DOI:10.1016/j.marpolbul.2018.01.035.

- [52] Zeng, Sun, Liu et al. Changes in the limiting nutrients and dominant phytoplankton communities of three major European rivers: Response to catchment lithologies and human activities. *Journal of Hydrology*, 2024, DOI:10.1016/j.jhydrol.2024.131362.
- [53] Christiansen, Salter, Gorokhova et al. Sea Spray Aerosol Formation: Laboratory Results on the Role of Air Entrainment, Water Temperature, and Phytoplankton Biomass. *Environmental Science & Technology*, 2019, DOI:10.1021/acs.est.9b04078.
- [54] Li GC, Liu ZG, Zhang M, et al. Effects of temperature increase on the dynamic migration of nutrients in sediments of hypereutrophic shallow lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4016-4025. [李庚辰, 刘足根, 张敏 等. 升温对超富营养型浅水湖泊沉积物营养盐动态迁移的影响. *生态学报*, 2015, **35**(12):4016-4025.]