J. Lake Sci.(湖泊科学),2025,**37**(6):1938-1947
DOI 10.18307/2025.0615

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: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)
(3:内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,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,其浓度变化反映湖泊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* 浓度的年际变化稳定,主要受水文条件、营养盐输入和人类活动的影响。在季节变化上,叶绿素 *a* 浓度呈现夏季>冬季>秋季>春季。春季水体稀释导致叶绿素 *a* 浓度下降,夏季气温升高促进浮游植物增殖,秋季温度降低抑制繁殖,冬季结冰导致营养物质向水体迁移以及冰下光合作用保持了较高的叶绿素 *a* 浓度。本研究进一步发现,春季和秋季,叶绿素 *a* 浓度与总氮呈正相关、与总磷呈负相关;而在夏季和冬季,叶绿素 *a* 浓度与总氮呈负相关、与总磷呈正相关,这反映了水体营养盐变化对浮游植物生长的季节性影响。冗余分析进一步表明叶绿素 *a* 浓度的季节性变化不仅受当季气候和环境因素的影响,还受到前后季节交互作用的影响,形成跨季节的连锁效应。未来的研究应关注季节间的相互关系及环境效应,以进一步揭示湖泊生态系统的复杂性,为湖泊管理和保护提供科学依据。
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: *National Key Laboratory of Water Engineering Ecological Environment in Arid Areas, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *P. R. China*)
(2: *Wuliangsuhai Wetland Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Bayannur* 015000, *P. R. China*)
(3: *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *P. R. China*)
(4: *Water Affairs Bureau of Tumed Left Banner, Hohhot City, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot* 010018, *P. R. China*)
(5: *Water Resources Service Center in 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 nutritional status and ecological health of lakes. Based on water quality and environmental data from Lake Chagannaoer between

---

* 2024-12-10 收稿;2025-02-20 收修改稿。
国家自然科学基金项目(U2443225, 52260028, 52369014)、内蒙古自治区科技计划项目(2023YFDZ0022, 2025YFHH0188)、内蒙古自治区直属高校基础研究资金项目(BR251202)、内蒙古湿地生态系统定位观测与研究站能力提升项目(BR251009)和内蒙古自治区科技领军人才团队项目(2022LJRC0007)联合资助。
** 通信作者; E-mail:imaushixiaohong@163.com。

2011 and 2024, this study used correlation and redundancy analysis to reveal the interannual and seasonal variation characteristics of chlorophyll-*a* concentration and its key driving factors. The results showed that between 2011 and 2024, the interannual variation of chlorophyll-*a* concentration in Lake Chagannaoer was stable, mainly regulated by hydrological conditions, nutrient inputs, and human activities. Seasonally, chlorophyll-*a* concentration follows the pattern of summer>winter>autumn>spring. In spring, water dilution led to a decrease in chlorophyll-*a* concentration, while in summer, the rise in temperature promoted phytoplankton proliferation. Autumn cooling inhibited reproduction, and winter freezing led to the migration of nutrients into the water, with photosynthesis under the ice maintaining relatively high chlorophyll-*a* concentrations. The study further found that in spring and autumn, chlorophyll-*a* concentration was positively correlated with total nitrogen and negatively correlated with total phosphorus; whereas in summer and winter, chlorophyll-*a* concentration was negatively correlated with total nitrogen and positively correlated with total phosphorus, reflecting the seasonal impact of nutrient changes on phytoplankton growth. Redundancy analysis further indicated that the seasonal variation of chlorophyll-*a* concentration was influenced not only by the current season's climate and environmental factors but also by the interactions between consecutive seasons, creating cross-seasonal chain effects. Future research should focus on inter-seasonal relationships and environmental effects to further uncover the complexity of lake ecosystems, providing scientific evidence for lake management and conservation.

Keywords: Chlorophyll-*a*; evolution characteristics; driving 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,还与湖泊水质、营养盐浓度以及气候变化等因素密切相关[9-10]。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[11-12]。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[13-14]。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[15-16],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[17-18]。

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[19]。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 km^2 急剧萎缩至 30 km^2(萎缩率超 71%)[20],水资源短缺与生态退化威胁湖泊生态服务功能。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′~43°30′N,114°45′~115°5′E)位于内蒙古锡林郭勒盟阿巴嘎旗[21],是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,海拔为 1300 m,面积为 30 km^2,平均水深为 2 m[19-20]。受极端气候影响,查干淖尔冬季寒冷,最低气温可达－42.4 ℃,夏季温暖,最高温度可达 39.1 ℃[22-23]。查干淖尔湖泊生态系统季节性变化显著,冬季水体呈重度富营养状态,夏秋季水体呈轻度富营养状态,春季水体呈中营养状态[24]。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[19]。

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[25](图 1)。使用 2011－2024 年每年冬季(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*(Chl. *a*)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})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[19, 26]。Chl. a 浓度采用丙酮萃取分光光度计法测定,TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP 和 COD_{Mn} 分别采用钼锑抗分光光度法和高锰酸钾滴定法测定[27]。水深(H)则使用声呐进行测量[24]。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 h 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)、径流量(R)等数据。气象数据来自阿巴嘎旗气象站,面积(S)和水量(Q)通过 Landsat 遥感反演获取[28]。运用 Excel 2024 软件进行数据的基础处理与整理,运用 SPSS 26 进行统计分析,ArcGIS 10.8 用于空间分析与制图,ENVI 5.3 用于遥感影像处理,Canoco5 用于环境因子的冗余分析(RDA),Python 用于编写自定义脚本实现数据处理,Origin 2024 用于科学绘图与可视化[19]。

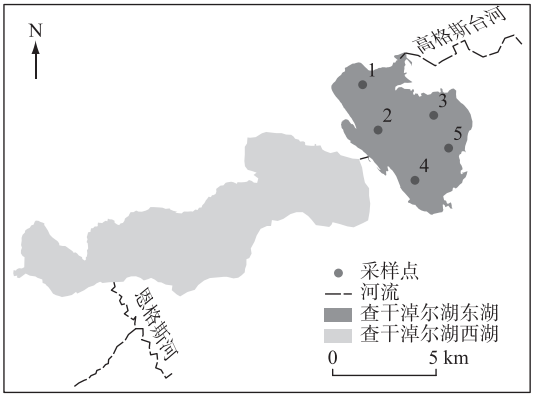

图 1 查干淖尔采样点位置

Fig. 1 Location of sampling sites in Lake Chagannaoer

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[29],其公式如下:

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{1}$$

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

式中,Y 是因变量矩阵,X 是自变量矩阵,β 是回归系数,ε 误差项。其中,$tr(\,)$ 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

2011－2024 年叶绿素 a 浓度无显著年际差异($P=0.15$),但在年内波动较大($P<0.05$)。从年际变化来看,2011 年叶绿素 a 浓度均值最高,达 3.78 μg/L,随后浓度逐渐下降,至 2013 年最低,为 2.44 μg/L。2014－2017 年间,叶绿素 a 浓度有所回升,2017 年均值为 3.39 μg/L,接近高峰水平。2018 年后,叶绿素 a 浓度再次下降,并在 2020 年、2021 年和 2022 年分别稳定在 2.65、2.59 和 2.60 μg/L。2022－2024 年浓度呈先下降后上升的趋势,2023 年达到极小值(2.09 μg/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 μg/L,冬季次之,为 3.43 μg/L,秋季和春季浓度较低,分别为 2.48 和 1.73 μg/L(图 2)。

2.2 叶绿素 a 浓度的年际影响因素

如图 3 所示,叶绿素 a 浓度与高锰酸盐指数($P<0.05$,$R^2=0.522$)、总磷($P<0.05$,$R^2=0.123$)、总氮($P<0.05$,$R^2=0.123$)和湖泊面积($P<0.05$,$R^2=0.061$)呈负相关,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($P<0.01$,$R^2=0.588$)、气温($P<0.01$,$R^2=0.750$)和径流

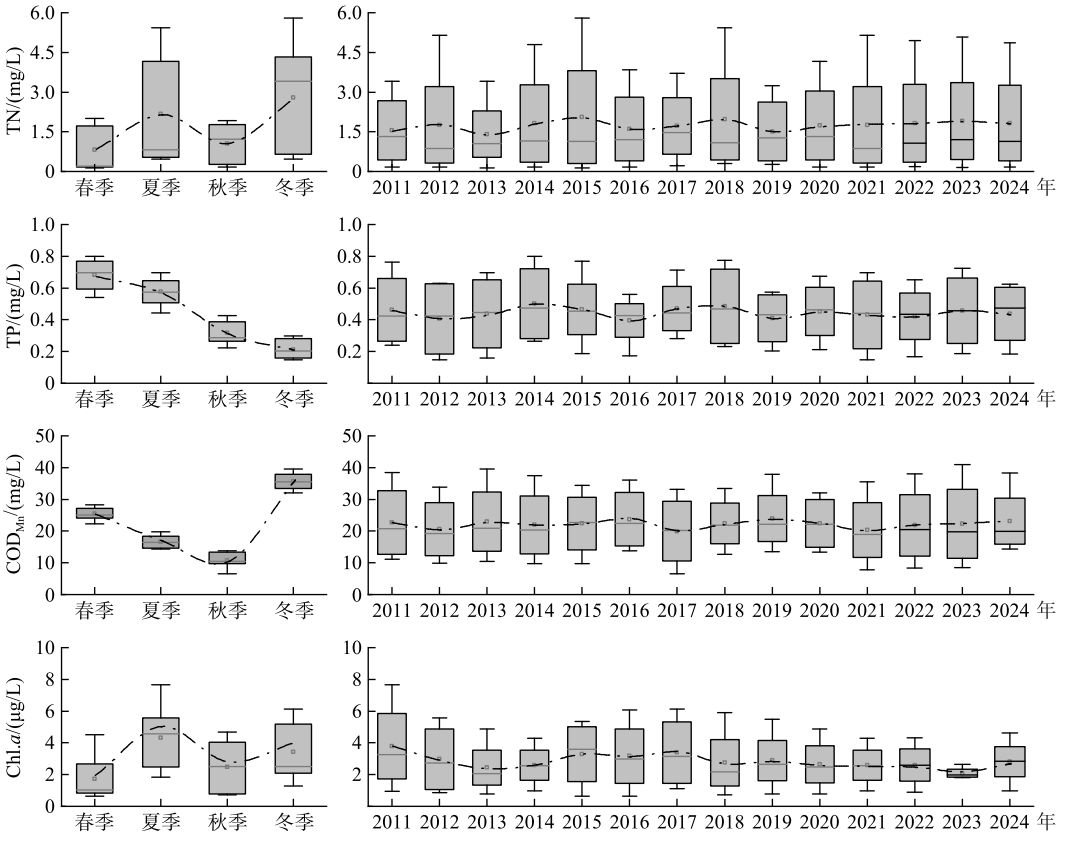

图 2 2011－2024 年叶绿素 *a* 浓度、总氮、总磷、高锰酸盐指数的年际和年内变化

Fig. 2 Interannual and intraannual variations of chlorophyll-*a* concentration, total nitrogen, total phosphorus, and permanganate index of Lake Chagannaoer during 2011-2024

量($P<0.05$,$R^2=0.287$)均呈正相关。

2.3 叶绿素 *a* 浓度的年内影响因素

图 4 展示了不同季节叶绿素 *a* 浓度与多种环境因子之间的相关性。春季,影响叶绿素 *a* 浓度的正相关因子按大小排序为:总氮>气温>降水量>水量>径流量>水深>蒸发量;负相关因子按大小排序为: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大小排序为:蒸发量>气温>径流量>降水量>水量>水深>总磷;负相关因子按大小排序为:高锰酸盐指数>总氮。秋季,影响叶绿素 *a* 浓度的正相关因子按大小排序为:总氮>气温>降水量>水量>水深>径流量>蒸发量;负相关因子按大小排序为: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大小排序为:气温>蒸发量>径流量>降水量>总磷>水量>水深;负相关因子按大小排序为: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、降水量、径流量、水温、蒸发量等指标进行冗余分析,并剔除不显著的相关因子(图 5)。查干淖尔不同季节环境参数见表 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呈显著正相关($n=14$,$P<0.01$),与夏季面积呈负相关($n=14$,$P=0.13$)。夏季叶绿素 *a* 浓度与夏季气温呈显著正相关($n=14$,$P<0.01$),与夏季总氮呈显著负相关($n=14$,$P<0.01$)。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呈显著正相关($n=14$,$P<0.01$),但与夏季总氮、秋季高锰酸盐指数和秋季总磷均呈显著负相关($n=14$,$P<0.01$)。冬季叶绿素 *a* 浓度与冬季气温、春季气温、冬季

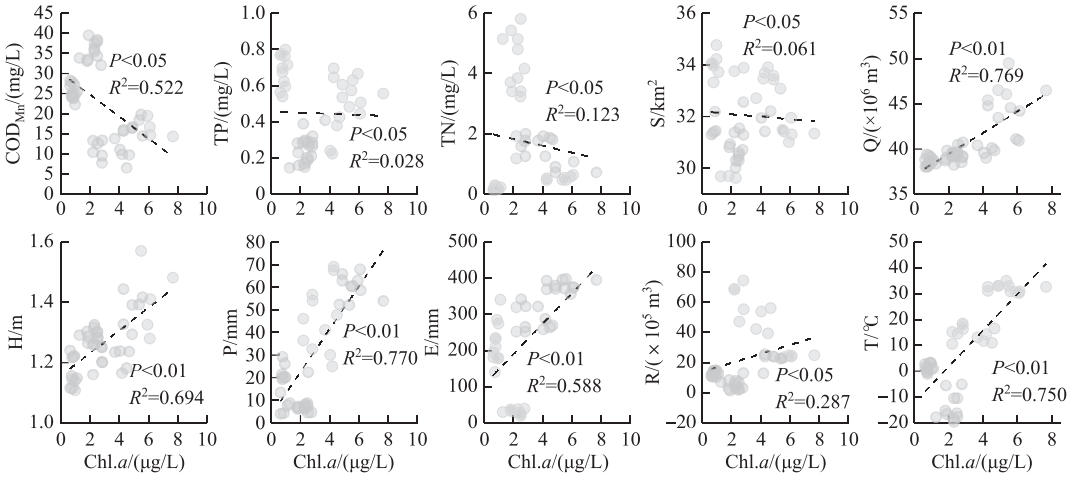

图 3 叶绿素 *a* 浓度与环境因子的关系

Fig. 3 Relationship between chlorophyll-*a* concentration and environmental factors

径流量、春季叶绿素 *a* 均呈显著正相关($n=14$, $P<0.01$),与夏季面积呈负相关($n=14$, $P=0.21$)。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

Tab. 1 Environmental parameters of Lake Chagannaoer

季节	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/ ℃
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	28.32
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

表 2 不同季节叶绿素 *a* 浓度与环境因子的关系方程*

Tab. 2 Relationship equations between chlorophyll-*a* concentration and environmental factors in different seasons

季节	方程	解释度
春季	$\ln(\text{A-Chl.}a)=4.09+0.14\times\ln(\text{D-Chl.}a)-0.24\times\ln(\text{A-T})+8.85\times10^{-6}\times\ln(\text{D-R})+0.062\times\ln(\text{D-T})$	($R^2=0.926$)
夏季	$\ln(\text{B-Chl.}a)=4.58+0.040\times\ln(\text{B-T})-0.41\times\ln(\text{B-TN})$	($R^2=0.781$)
秋季	$\ln(\text{C-Chl.}a)=55.00-0.40\times\ln(\text{B-Chl.}a)+0.05\times\ln(\text{B-T})+2.0\times10^{-6}\times\ln(\text{C-R})-0.92\times\ln(\text{B-TN})-0.23\times\ln(\text{C-COD}_{Mn})+7.48\times\ln(\text{C-TP})$	($R^2=0.973$)
冬季	$\ln(\text{D-Chl.}a)=2.80-0.04\times\ln(\text{A-T})+0.06\times\ln(\text{D-T})+5.41\times10^{-7}\times\ln(\text{D-R})+0.38\times\ln(\text{A-Chl.}a)$	($R^2=0.915$)

* A、B、C、D 分别表示春季、夏季、秋季和冬季。

3 讨论

查干淖尔具有水量小、水深浅、降水量少、蒸发量大和有机物含量高的特征。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[19,30]。水深

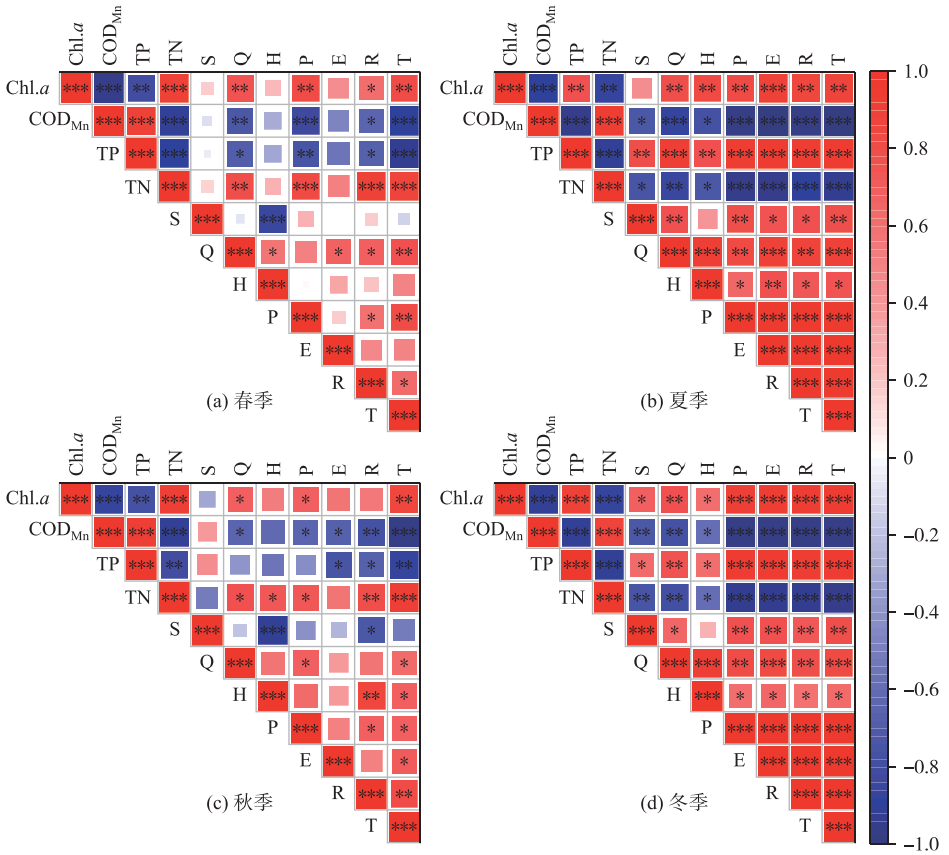

图 4 不同季节叶绿素 *a* 浓度与环境因子的关系(* $P \leqslant 0.05$, ** $P \leqslant 0.01$, *** $P \leqslant 0.001$)

Fig. 4 Relationship between chlorophyll-*a* and environmental factors in different seasons

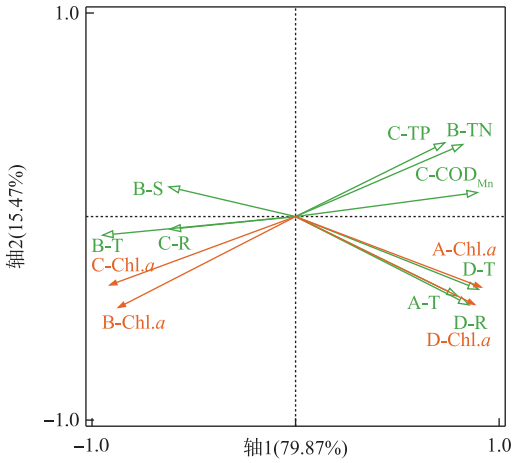

图 5 叶绿素 *a* 浓度与环境因子的冗余分析(A、B、C、D 分别表示春季、夏季、秋季和冬季)

Fig. 5 Redundancy analysis of chlorophyll-*a* concentration and environmental factors (A, B, C, D represent spring, summer, autumn and winter, respectively)

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[24,31]。降水量的变化通过影响水体的补给与流动性。夏季查干淖尔降水量增多,水流增强,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[32-33]。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,营养盐浓缩,促进藻类生长,从而提高叶绿素 *a* 浓度[13]。有机物浓度过高可能降低光线进入水体,藻类光合作用受限,从而导致叶绿素 *a* 浓度下降[16]。总之,查干淖尔叶绿素 *a* 浓度变化受多重因素的综合作用与相互驱动,表现出复杂的动态响应。

3.1 叶绿素 *a* 浓度时空变化特征

查干淖尔叶绿素 *a* 的年际变化与年内变化的驱动机制差异源于时间尺度的不同。查干淖尔叶绿素 *a* 浓度年际变化稳定,主要受水文条件、营养盐输入与人类活动等多因素协同调控。作为干旱半干旱区封闭型湖泊,查干淖尔区域水文气候条件相对稳定,为浮游植物提供了一个稳定的生长环境[34-35]。同时,外源营养盐输入、内源沉积物释放与水生植被吸收之间形成动态平衡[36-37],从而使叶绿素 *a* 浓度在年际尺度上表现出较强的稳定特征。查干淖尔叶绿素 *a* 浓度在年内呈现夏季>冬季>秋季>春季的特征。春季气温回升,冰雪消融,湖泊水量迅速增加,导致水体稀释效应增强,从而使叶绿素 *a* 浓度减小[19]。夏季气温持续升高,蒸发量增大,进一步促进浮游植物增殖,叶绿素 *a* 浓度达到峰值[38-39]。进入秋季后,气温下降使浮游植物生长减缓,叶绿素 *a* 浓度逐渐降低[40]。冬季气温骤降导致湖面结冰(冰水厚度比可达 1∶1),冰层中物质向水中迁移,导致冰下水体营养物质浓度升高[27]。同时,由于北方冬季大部分时间没有积雪,冰下水体浮游植物仍能进行光合作用,导致冰下叶绿素 *a* 浓度非但未减少,反而因浮游植物的稳定活动而有所升高[13,27]。

3.2 叶绿素 *a* 浓度与环境因子关系

查干淖尔叶绿素 *a* 浓度在春、秋季与总氮呈正相关、与总磷呈负相关,而在夏、冬季则与总氮呈负相关、与总磷呈正相关。在春季,水温回升和冰雪消融促使浮游植物复苏[41],而查干淖尔的春季总氮浓度较低,这可能成为限制春季浮游植物生长的关键因素,因此叶绿素 *a* 与总氮呈正相关[42]。同时,春季水体中的总磷浓度较高,说明春季水中浮游植物对磷的需求较低,导致叶绿素 *a* 与总磷呈负相关[43]。在夏季,随着气温升高,浮游植物的生长速度快速增加,对水体中磷的需求增加,因此叶绿素 *a* 与总磷呈正相关[44]。夏季查干淖尔水体中的总氮浓度较高,叶绿素 *a* 与总氮呈负相关,说明总氮可能不是限制浮游植物夏季生长的关键因素[45]。秋季,水温降低并伴随总氮浓度较低,表明浮游植物对氮的需求较高,从而导致叶绿素 *a* 浓度与总氮呈正相关[45]。同时,秋季浮游植物吸收总磷,导致水中总磷浓度降低,叶绿素 *a* 浓度增加,因此叶绿素 *a* 与总磷呈负相关[46]。冬季,气温降低,湖泊结冰,冰下水体总氮浓度较高,说明浮游植物对总氮的需求减少,因此叶绿素 *a* 与总氮呈负相关。冬季冰下水中总磷浓度最低,说明总磷可能成为限制冬季冰下水体浮游植物生长的关键因素,使得叶绿素 *a* 与总磷呈正相关[13,19]。

查干淖尔叶绿素 *a* 浓度与气候及水质在不同季节之间存在滞后和延续的相互作用。春季叶绿素 *a* 浓度与冬季叶绿素 *a*、春季气温、冬季气温和冬季径流量呈显著正相关,表明春季的温度升高及冬季径流量增加可能促进春季浮游植物的生长[47]。较高的冬季气温可能缩短冰封期,延长藻类的生长周期,而冬季径流可能带来更多的营养物质(如氮、磷),为春季藻类的增殖奠定基础[48]。夏季叶绿素 *a* 浓度与夏季气温呈显著正相关,表明温度升高可能直接促进藻类代谢与繁殖[43]。然而,夏季叶绿素 *a* 与总氮呈显著负相关,这可能是由于总氮浓度较高,导致藻类生长受到总氮限制的影响较小[49]。秋季叶绿素 *a* 与夏季叶绿素 *a*、夏季气温呈显著正相关,表明前期藻类生物量和温暖条件可能对秋季浮游植物群落产生延续性影响[43,45]。同时,秋季叶绿素 *a* 与秋季径流量呈正相关,说明径流将陆源营养盐和有机物输入水体,为秋季浮游植物生长提供一定的营养物质[50]。然而,秋季叶绿素 *a* 与秋季高锰酸盐指数和秋季总磷呈负相关,说明径流输入可能带来过量的磷和有机物[45,50]。而此前发现叶绿素 *a* 与总氮呈正相关,可能是输入的总氮浓度较低,未能完全满足浮游植物的生长要求[45]。冬季叶绿素 *a* 浓度与冬季气温和冬季径流量均呈显著正相关,表明暖冬条件与较高的径流量可能共同维持了冬季藻类的生理活性,从而导致冰下水体中叶绿素 *a* 浓度升高,反映出冬季浮游植物生物量较高[43,48]。此外,冬季叶绿素 *a* 浓度与春季叶绿素 *a* 浓度、春季气温也呈正相关,说明随着气温回升,冬季浮游植物会对春季浮游植物群落的动态变化产生显著影响[19,51]。

4 结论

1)查干淖尔叶绿素 *a* 的年际变化主要由水文条件、营养盐输入与人类活动等因素协同调控,受相对稳定的水文气候与低波动的降水和地下水补给影响。年内变化呈现夏季>冬季>秋季>春季,春季水量增加导致水体稀释,叶绿素 *a* 浓度降低;夏季气温升高促进浮游植物生长,叶绿素 *a* 浓度达到峰值;秋季气温下降使浮游植物生长减缓,叶绿素 *a* 浓度降低;冬季冰封期,冰层物质向水中迁移,冰下水体浮游植物仍进行光合作用,导致叶绿素 *a* 浓度升高。

2)在春季和秋季,查干淖尔叶绿素 *a* 浓度与总氮呈正相关,与总磷呈负相关;在夏季和冬季,叶绿素 *a* 浓度与总氮呈负相关,与总磷呈正相关。水体营养盐的季节性变化显著影响浮游植物生长和叶绿素 *a* 浓度。

3)叶绿素 *a* 浓度的变化受季节性气候和环境因素的影响,形成跨季节的连锁效应。未来研究应关注季节间的相互关系和环境效应,揭示湖泊生态系统的复杂性,为湖泊管理和保护提供科学依据。

5 参考文献

[1] García-Nieto PJ, García-Gonzalo E, Alonso Fernández JR *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, **639**: 131639. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131639.

[2] Stefanidis K, Varlas G, Vourka A *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, **196**: 117053. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117053.

[3] Meng XL, Yao FM, Zhang JH *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*, 2022, **813**: 152536. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152536.

[4] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361-369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.

[5] Schindler DW. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwaters. *Limnology and Oceanography*, 1978, **23**(3): 478-486. DOI: 10.4319/lo.1978.23.3.0478.

[6] Du HB, Chen ZN, Mao GZ *et al*. Evaluation of eutrophication in freshwater lakes: A new non-equilibrium statistical approach. *Ecological Indicators*, 2019, **102**: 686-692. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.03.032.

[7] Fang Y, Huang RT, Shi XY. 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, **169**: 112916. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112916.

[8] Zhang JJ, Cao LF, Liu ZH *et al*. Relationship between eutrophication and greenhouse gases emission in shallow freshwater lakes. *Science of the Total Environment*, 2024, **925**: 171610. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171610.

[9] Zhao YH, Li T, Huang B *et al*. Evolution characteristics and driving factors of water quality and eutrophication of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1441-1451. DOI:10.18307/2022.0503. [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**(5): 1441-1451.]

[10] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al*. Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005-2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 279-295. DOI:10.18307/2018.0201. [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**(2): 279-295.]

[11] 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. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(7): 1434-1442. [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**(7): 1434-1442.]

[12] Wang ZC, Yang JL, Yang F *et al*. Distribution characteristics of microplastics in ice sheets and its response to salinity and chlorophyll *a* in the Lake Wuliangsuhai. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 673-680. DOI: 10.13227/j.hjkx.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**(2): 673-680.]

[13] Shi XH, Yu HF, Zhao SN *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, **148**: 110133. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110133.

[14] Ma MZ, Jia JJ, Hu Y *et al*. Changes in chlorophyll *a* and its response to nitrogen and phosphorus characteristics over the past three decades in Poyang Lake, China. *Ecohydrology*, 2021, **14**(3): e2270. DOI: 10.1002/eco.2270.

[15] Zhang XY, Li Y, Zhao J *et al*. Temporal dynamics of the Chlorophyll a-Total phosphorus relationship and algal production efficiency: Drivers and management implications. *Ecological Indicators*, 2024, **158**: 111339. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111339.

[16] 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. [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与对策. 中国新技术新产品, 2020, (17): 134-135.]

[17] Zhao L, Zhu R, Zhou QC *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, **242**: 120182. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120182.

[18] Mercado-Bettín D, Clayer F, Shikhani M *et al*. Forecasting water temperature in lakes and reservoirs using seasonal climate prediction. *Water Research*, 2021, **201**: 117286. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117286.

[19] Zhang H, Shi XH, Zhao SN *et al*. Eutrophication characteristics and influencing factors of the East Lake water in Chagannaoer, Inner Mongolia. *Wetland Science*, 2023, **21**(6): 842-849. [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**(6): 842-849.]

[20] Liu MP, Ha S, Chun X. Variation and causation of Lake Qehan, Inner Mongolia over the recent 50 years. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 141-149. DOI: 10.18307/2015.0117. [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**(1): 141-149.]

[21] Zhang H, Shi XH, Lu JP *et al*. Simulation and prediction of chlorophyll *a* concentration in chagannaoer based on ARIMA model and multiple stepwise regression model. *Journal of Water Ecology*, 2025: 1-11. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202502210001. [张昊, 史小红, 卢俊平等. 基于 ARIMA 模型和多元逐步回归模型的查干淖尔叶绿素 *a* 浓度模拟与预测. 水生态学杂志, 2025: 1-11.]

[22] Zhang H, Shi XH, Lu JP *et al*. Characteristics of phytoplankton communities in lake ice and their relationship withenvironmental factors. *J Lake Sci*, 2025, **37**(6): 1962-1977. DOI: 10.18307/2025.0617. [张昊, 史小红, 卢俊平等. 湖冰中浮游植物群落特征及其环境因子关系. 湖泊科学, 2025, **37**(6): 1962-1977.]

[23] 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]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.

[24] 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]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.

[25] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000.

[26] Quan D, Shi XH, Zhao SN *et al*. Eutrophication of Lake Ulansuhai in 2006-2017 and its main impact factors. *J Lake Sci* 2019, **31**(5): 1259-1267. DOI: 10.18307/2019.0503. [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**(5): 1259-1267.]

[27] Zhang H, Shi XH, Cui ZM *et al*. Characteristics of phytoplankton community structure and their driving factors in the east Chagannaoer Lake during the ice-covered and non-ice-covered periods. *Wetland Science* 2025, **23**(1): 150-159. [张昊, 史小红, 崔志谋等. 冰封期与非冰封期查干淖尔湖东湖浮游植物群落结构特征及其驱动因子. 湿地科学, 2025, **23**(1): 150-159.]

[28] Zhang H, Shi XH, Lu JP *et al*. Hydrogen and oxygen isotope characteristics and recharge-discharge relationships of different water bodies in the Chagannaoer Lake during non-ice-covered and ice-covered period. *Wetland Science*, 2025, **23**(3): 600-607. [张昊, 史小红, 卢俊平等. 非冰封期和冰封期查干淖尔湖不同水体氢氧同位素特征及补排关系研究. 湿地科学, 2025, **23**(3): 600-607.]

[29] 范金城, 梅长林. 数据分析. 北京: 科学出版社, 2002.

[30] Su JQ, Wang X, Yang ZF. Lake eutrophication modeling in considering climatic factors change: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(11): 3197-3206. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2012.0477. [苏洁琼, 王烜, 杨志峰. 考虑气候因子变化的湖泊富营养化模型研究进展. 应用生态学报, 2012, **23**(11): 3197-3206.]

[31] Lv XT, Lv YL, Song S *et al*. Eutrophication in cold-water lakes driven by combined effects of climate change and human activities. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7375-7386. DOI: 10.5846/stxb201704110632. [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.]

[32] Wang CY, Li WJ, Chen SS *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*, 2018, **618**: 1125-1138. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.196.

[33] Zohner CM, Mirzagholi L, Renner SS *et al*. Effect of climate warming on the timing of autumn leaf senescence reverses after the summer solstice. *Science*, 2023, **381**(6653): eadf5098. DOI: 10.1126/science.adf5098.

[34] Li L, Yan YP, Shi XL *et al*. The mechanism of groundwater's influence on carbon balance in small closed-loop lakes in arid-semi-arid areas. *Earth and Environment*, 2025, **53**(1): 89-98. [李璐, 燕亚平, 史晓珑等. 地下水对干旱—半干旱区小型闭流湖泊碳平衡的影响机制. 地球与环境, 2025, **53**(1): 89-98.]

[35] Ma YZ, Qin XL, Ling HB *et al*. Spatiotemporal characteristics and trend analysis of area changes in small and medium-sized lakes in Xinjiang from 1991 to 2020. *Arid Zone Research*, 2024, **41**(6): 905-916. DOI:10.13866/j.azr.2024.06.01. [马元植, 覃小林, 凌红波等. 1991－2020 年新疆中小湖泊面积变化时空特征及趋势分析. 干旱区研究, 2024, **41**(6): 905-916.]

[36] Qin BQ. Studies on limnology of shallow lakes and eutrophication control in Taihu Lake. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501. [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**(5): 1229-1243.]

[37] Liu ZW, Zhang XF, Chen FZ *et al*. Coupling of benthic-open water habitats in shallow Lakes and its response to eutrophication and mechanisms of steady-state transition: Implications for Lake Restoration. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2020.0101. [刘正

文, 张修峰, 陈非洲等. 浅水湖泊底栖-敞水生境耦合对富营养化的响应与稳态转换机理: 对湖泊修复的启示. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 1-10.]

[38] Woolway RI, Kraemer BM, Zscheischler J *et al*. Compound hot temperature and high chlorophyll extreme events in global lakes. *Environmental Research Letters*, 2021, **16**(12): 124066. DOI: 10.1088/1748-9326/ac3d5a.

[39] Ma AH, Liu XN, Li T *et al*. The satellite remotely-sensed analysis of the temporal and spatial variability of chlorophyll *a* concentration in the northern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 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, 2013, **35**(4): 98-105.]

[40] Wu ZX, Kong XS, Xu ZP *et al*. Spatiotemporal variation of chlorophyll-*a* concentration in Chinese lakes over the past 40 years. *Marine and Lake Science*, 2024, **55**(2): 347-362. [武昭鑫, 孔祥生, 徐兆鹏等. 近 40 年来中国湖泊叶绿素 *a* 浓度的时空分异特征分析. 海洋与湖沼, 2024, **55**(2): 347-362.]

[41] Bueno JVL, Kerr R, da Consolação de Oliveira Carvalho A *et al*. The role of phytoplankton in the deep chlorophyll maximum CO_2 dynamics along a zonal section (34.5°S) in South Atlantic Ocean. *Marine Environmental Research*, 2025, **210**: 107314. DOI: 10.1016/j.marenvres.2025.107314.

[42] Xu H, Chen J, Zhu GW *et al*. Influence of nitrogen and phosphorus nutrient levels on the dominance of blue algae. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1239-1247. DOI: 10.18307/2019.0518. [许海, 陈洁, 朱广伟等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1239-1247.]

[43] Zhang M, Gao R, Yang Z *et al*. Seasonal fluctuations of phosphorus in Lake Chaohu and its driving factors. *J Lake Sci*, 2024, **36**(6): 1650-1659. DOI: 10.18307/2024.0612. [张民, 高芮, 阳振等. 巢湖水体中磷的季节性波动及其驱动因素. 湖泊科学, 2024, **36**(6): 1650-1659.]

[44] Deng JM, Qin BQ. Research progress on the impact of global warming on phytoplankton in freshwater Lakes. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2015.0101. [邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 1-10.]

[45] Ji PF, Xu H, Zhan X *et al*. Spatiotemporal variation of nitrogen to phosphorus ratio in lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its influencing factors. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4030-4041. [季鹏飞, 许海, 詹旭等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素. 环境科学, 2020, **41**(9): 4030-4041.]

[46] Wang PX, Laws EA, Liu X *et al*. Proportion of dead cells in phytoplankton modulates community structure. *Progress in Oceanography*, 2023, **219**: 103142. DOI: 10.1016/j.pocean.2023.103142.

[47] 刘世明. 温度与光照错配对春季藻类生长及演替的影响[学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2014.

[48] Hrycik AR, Isles PDF, Adrian R *et al*. Earlier winter/spring runoff and snowmelt during warmer winters lead to lower summer chlorophyll-*a* in north temperate lakes. *Global Change Biology*, 2021, **27**(19): 4615-4629. DOI: 10.1111/gcb.15797.

[49] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al*. Changes in chlorophyll-*a* and nutrient salts in northern Taihu Lake from 2005 to 2017 and their influencing factors. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 279-295. DOI: 10.18307/2018.0201. [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**(2): 279-295.]

[50] Zhao J, Shi YQ, Shan XJ *et al*. Community variation of zooplankton in the Bohai Sea during summer and autumn of 2021. *Progress in Fisheries Science*, 2025: 1-17. [赵杰, 时永强, 单秀娟等. 2021 年夏秋季渤海浮游动物群落变化特征. 渔业科学进展, 2025: 1-17.]

[51] Dong J, Gao YN, Li GB. Response of freshwater phytoplankton to eutrophication and climate warming. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(3): 615-623. [董静, 高云霓, 李根保. 淡水湖泊浮游藻类对富营养化和气候变暖的响应. 水生生物学报, 2016, **40**(3): 615-623.]