



环境科学研究

Research of Environmental Sciences

乌梁素海浮游植物群落及其对生态补水的响应特征

梁帅 邹清洋 田世民 赵凌栋 耿菲 景永才 韩冰

Response of Phytoplankton Community in Wuliangsu Hai Lake to Ecological Water Supplementation

LIANG Shuai, ZOU Qingyang, TIAN Shimin, ZHAO Lingdong, GENG Fei, JING Yongcai, HAN Bing

在线阅读 View online: <https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2025.07.23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于功能群的浮游植物群落驱动因子及水质评价适用性分析：以骆马湖为例

Driving Factors of Phytoplankton Functional Groups and Applicability of Water Quality Evaluation: A Case Study of Lake Luoma

环境科学研究. 2023, 36(10): 1915–1926. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.07.17>

生态调控后贵州花溪水库浮游植物群落结构的变化特征及影响因素

Variation Characteristics and Influencing Factors of the Structure of a Phytoplankton Community After an Ecological Regulation in Huaxi Reservoir, Guizhou Province

环境科学研究. 2020, 33(3): 589–598. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2019.09.02>

海河流域天津段浮游植物功能群分布特征及其与环境因子的关系

Distribution Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationship with Environmental Factors in Tianjin Section of Haihe River Basin

环境科学研究. 2024, 37(10): 2192–2203. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.08.02>

利用环境DNA与生态网络分析探索赣江浮游植物对水质的指示作用

Exploring Indication Function of Phytoplankton on Water Quality in Ganjiang River through the Analysis of Environmental DNA and Ecological Network

环境科学研究. 2025, 38(7): 1430–1439. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2025.05.12>

基于环境DNA技术与生态网络分析的长江口春季浮游植物群落研究

Study on the Eukaryotic Phytoplankton Community in the Yangtze River Estuary in Spring Using Environmental DNA Technology and Ecological Network Analysis

环境科学研究. 2025, 38(7): 1407–1417. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2025.06.14>

洞庭湖区南汉垸水体浮游植物群落结构特征及其影响因素

Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Nanhan Polder Area of Dongting Lake

环境科学研究. 2020, 33(1): 147–154. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2019.06.17>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

乌梁素海浮游植物群落及其对生态补水的响应特征

梁 帅^{1,2,3}, 邹清洋^{1,2,3}, 田世民^{1,2,3}, 赵凌栋^{1,2,3}, 耿 菲⁴, 景永才^{1,2,3}, 韩 冰^{1,2,3*}

1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003
2. 河南省黄河水生态环境工程技术研究中心, 河南 郑州 450003
3. 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 河南 郑州 450003
4. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450003

摘要: 黄河已连续 20 余年向乌梁素海开展生态补水。为分析乌梁素海夏季浮游植物群落结构特征及其对生态补水的响应, 于 2020—2023 年夏季(春季补水后)在乌梁素海布设 9 个监测点, 对浮游植物群落结构及水体理化指标进行监测, 分析乌梁素海夏季浮游植物群落结构特征, 并结合历史文献调研, 探究浮游植物群落对生态补水的响应特征。结果表明: ①2020—2023 年乌梁素海共鉴定出浮游植物 7 门 131 种(含变种), 在物种数量上以硅藻门为主, 绿藻门和蓝藻门次之。伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)、平裂藻(*Merismopedia* sp.)、点形平裂藻(*Merismopedia punctata*)和梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)为研究区域绝对优势物种(优势度>0.1)。②浮游植物可划分为 26 个功能群, 其中优势功能群有 7 个, 分别为 A、D、H2、J、L₀、MP 和 Y, 2020—2023 年优势功能群由 A+D+J+L₀+MP+Y 演变为 A+H2+L₀+MP, 绝对优势功能群由 MP 主导类型演变为由 L₀ 主导类型。③RDA 分析结果表明, 总氮(TN)、水温(WT)和氨氮(NH₃-N)是影响乌梁素海夏季浮游植物群落结构的关键因子。④生态补水以来, 乌梁素海水质由劣 V 类提升至 IV 类(GB 3838—2002《地表水环境质量标准》), 夏季浮游植物密度和生物量分别降低 82.63% 和 84.90%, 水体富营养化程度改善, 但目前仍存在较高富营养化风险。研究显示, 生态补水在减轻乌梁素海水体污染和改善浮游植物生态功能上有积极作用。

关键词: 浮游植物; 功能群; 生态补水; 乌梁素海

中图分类号: X826

文章编号: 1001-6929(2025)11-2549-12

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2025.07.23

Response of Phytoplankton Community in Wuliangsuhai Lake to Ecological Water Supplementation

LIANG Shuai^{1,2,3}, ZOU Qingyang^{1,2,3}, TIAN Shimin^{1,2,3}, ZHAO Lingdong^{1,2,3}, GENG Fei⁴, JING Yongcai^{1,2,3}, HAN Bing^{1,2,3*}

1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China
2. Henan Engineering Technology Research Center of Aquatic Eco-Environment, Zhengzhou 450003, China
3. Henan Key Laboratory of YB Ecological Protection and Restoration, Zhengzhou 450003, China
4. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450003, China

Abstract: The Yellow River has supplied ecological water to Wuliangsuhai Lake for over 20 years. To analyze the structural characteristics of the phytoplankton community and its response to ecological water supplementation in Wuliangsuhai Lake, nine monitoring sites were established during the summers from 2020 to 2023. Phytoplankton composition and physicochemical water parameters were monitored, and historical data were integrated to analyze responses to ecological water supplementation. A total of 131 phytoplankton species, including morphological variants, from seven phyla were identified. Bacillariophyta exhibited the highest species richness, followed by Chlorophyta and Cyanophyta. The absolutely dominant species (dominance > 0.1) were *Pseudanabaena* sp., *Merismopedia* sp., *Merismopedia punctata*, and *Cyclotella meneghiniana*. Twenty-six functional groups were identified, with A, D, H2, J, L₀, MP and Y being the dominant ones. The dominant functional groups in Wuliangsuhai Lake changed from A, D, J, L₀, MP and Y (2020) to A, H2, L₀, and MP in 2023, while the absolute dominant functional group changed from MP to L₀. RDA results indicated that total nitrogen (TN), water temperature (WT), and ammonia nitrogen (NH₃-N) were the primary factors shaping the summer phytoplankton composition. Since the implement of ecological water supplementation, water quality in Wuliangsuhai Lake improved from below Grade V to Grade IV (*Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002)), while in summer phytoplankton density and

收稿日期: 2025-03-27 修订日期: 2025-06-25

作者简介: 梁帅(1994-), 男, 甘肃陇南人, 工程师, 硕士, 主要从事水污染治理与水生态修复综合研究, ls941015@163.com

* 责任作者: 韩冰(1985-), 男, 河南濮阳人, 高级工程师, 博士, 主要水生态修复与污染防治研究, 304732166@qq.com

基金项目: 河南省自然科学基金面上项目(No.252300420295)

Supported by General Program of Henan Provincial Natural Science Foundation, China (No.252300420295)

biomass decreased by 82.63% and 84.90%, respectively. Although these changes indicate mitigated eutrophication, significant eutrophication risks remain. This research confirms that ecological water supplementation effectively reduces pollution while enhancing the ecological functions of phytoplankton in Wuliangsu Hai Lake.

Keywords: phytoplankton; functional group; ecological water supplementation; Wuliangsu Hai Lake

湖泊作为区域水循环的重要组成部分,对气候变化十分敏感,是反映地区或流域气候变化的关键表征因子,在维持区域水平衡、调节区域气候、维持生物多样性以及提供关键生态系统服务方面发挥着重要作用^[1-4]。近几十年,在气候变化和人类活动多重因素的影响下,湖泊水位下降、湖面萎缩、水质恶化事件频发,引发了一系列水生态环境问题,其中富营养化已成为国内外湖泊治理面临的最大挑战^[5-8]。研究表明,全球超过75%的湖泊和水库正在经历不同程度的水质恶化和富营养化^[9]。2023年《中国生态环境状况公报》显示,我国205个重点湖(库)中仍有27.3%处于富营养化水平。

乌梁素海是黄河上游最大的滨水湖泊,被誉为黄河生态安全的“自然之肾”,在净化河套灌区水源、保护黄河水环境、维持水盐平衡、控制灌区土壤盐渍化方面发挥着重要作用^[10-11]。乌梁素海是河套灌区农田灌溉排水和退水及周边村镇工业废水和生活污水的唯一承泄区^[12]。20世纪90年代,大量未经处理的生活废水和农田退水排入乌梁素海,加之入湖水量锐减,造成乌梁素海水质逐年恶化^[13]。2008年乌梁素海湖区暴发大面积“黄苔”,按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),其水质一度恶化为劣V类,严重影响周边居民的日常生活^[14]。为修复乌梁素海受损的生态系统,2016年10月,内蒙古自治区人民政府批复《乌梁素海综合治理规划》,提出“生态补水、控源减污、修复治理、资源利用、持续发展”的治理思路,规划了湖泊生态补水配套工程。通过实施黄河水量统一调度,到2024年黄河干流累计向乌梁素海生态补水超 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$,有效改善了湖区水生态环境。

浮游植物作为河湖生态系统初级生产力的核心承载者,是构成河湖生态系统能量转换、物质循环及生物信息交互的基本要素^[15]。浮游植物生命周期短,对水环境变化较为敏感,常被用作水生态系统评价的指示物种^[16-17]。基于此,本研究采用乌梁素海长时间序列浮游植物及水环境调查监测成果,系统研究了生态补水过程中乌梁素海浮游植物群落特征及影响因素,明确植物群落对生态补水的响应特征,以期为乌梁素海水生态环境保护与恢复提供决策支撑。

1 研究区域概况

乌梁素海(40°36'N~41°03'N、108°43'E~108°57'E)

位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,是历史上黄河改道南移后,北支乌加河和河套地区灌渠排水汇流而成的河迹湖^[18],是中国八大淡水湖之一,2002年被《湿地公约》列为国际重要湿地。乌梁素海湖区北部为丘陵地形与小部分冲积平原,南部则分布有零星的丘陵与冲积平原。湖区属温带大陆性干旱气候,夏季炎热少雨,冬季寒冷干燥,多年平均降水量为224.2 mm,6—8月降水量约占全年的66%,蒸发量为1234 mm。乌梁素海南北长35~40 km,东西宽5~10 km,湖泊面积为293 km²,其中一半以上为天然或人工芦苇区。湖面在10月末至11月初开始结冰,翌年3月末至4月初解冰。

黄河春季凌汛分水乌梁素海生态补水的重要来源之一。本研究于2020—2023年连续4年对乌梁素海夏季(春季补水后)浮游植物及水环境状况进行了调查监测。乌梁素海湖区有一半以上为芦苇区,本研究仅在水面开阔区布设9个监测点(见图1)。

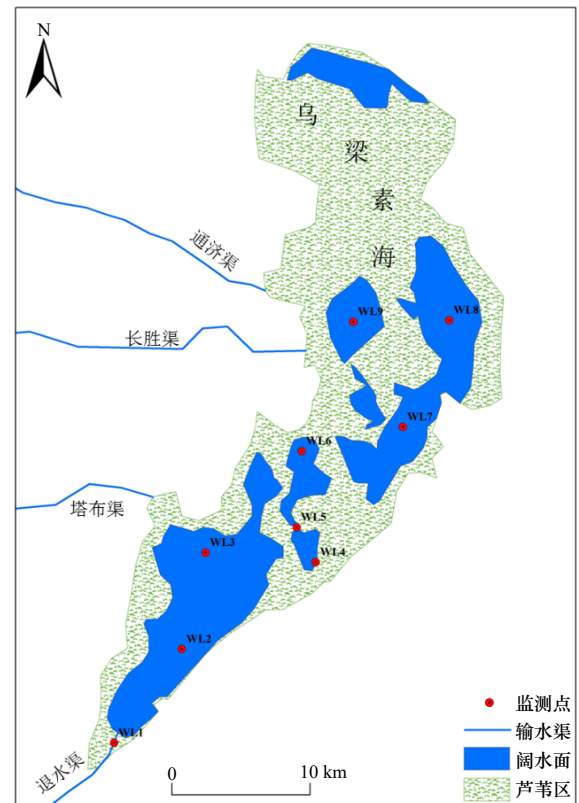


图1 乌梁素海浮游植物监测点分布

Fig.1 Distribution of phytoplankton monitoring points in Wuliangsu Hai Lake

2 研究方法

2.1 样品采集

浮游植物样品采集和测定按照《水质 浮游植物的测定 0.1 mL 计数框-显微镜计数法》(HJ 1216—2021) 执行。浮游植物定性样品采用 25 号浮游生物网, 关闭浮游生物网底端出水活塞开关, 在水面表层至 0.5 m 深处以 20~30 cm/s 的速度做“∞”字往复, 缓慢拖动约 1~3 min, 待网中明显有浮游植物进入, 将浮游生物网提出水面, 网内水自然通过网孔滤出, 待底部还剩少许水样 (5~10 mL) 时, 将底端出水移入 100 mL 定性采样瓶中, 现场加入适量 (水样体积的 1.0%~1.5%) 鲁哥氏液固定, 避光冷藏带回实验室镜检分类。浮游植物定量样品用有机玻璃采水器采集 0.5 m 水深处的表层水, 取 1 L 水样置于棕色广口塑料瓶中, 现场用适量 (水样体积的 1.0%~1.5%) 鲁哥氏液固定。样品避光冷藏带回实验室后静置沉降 24 h 以上, 沉淀浓缩后计数。

pH、水温 (WT)、电导率 (Cond)、溶解性总固体 (TDS) 和溶解氧 (DO) 等指标采用多参数水质分析仪 (YSI) 现场测定, 水深 (WD) 采用测深杆测定, 氨氮 (NH₃-N)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 和高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 等水质样品采集和检测按照《水环境监测规范》(SL 219—2013) 进行。

2.2 数据分析与处理

α -多样性用于描述一个特定区域生态系统内物种特征, 包含 Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Margalef 丰富度指数 (d) 和 Pielou 均匀度指数 (J) 等指标^[19-22], 浮游植物优势种采用优势度指数来 (Y) 判定^[23], 当 $Y>0.02$ 时被确定为优势种, 多样性和优势度指数计

算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$d = \frac{S-1}{\ln N} \quad (2)$$

$$J = H / \ln S \quad (3)$$

$$Y = \frac{n_i f_i}{N} \quad (4)$$

式中, S 为总物种数, P_i 为采集样品中第 i 种的个体比例, n_i 为第 i 种浮游植物的个体数, N 为浮游植物总个体数, f_i 为第 i 物种出现的频率。

使用 SPSSAU 软件对浮游植物年际变化情况进行 Kruskal-Wallis 非参数检验分析; 使用 OriginPro 2022 软件对浮游植物相关性变化特征进行分析与制图; 采用 CANOCO 5.0 软件冗余分析模块分析环境因子对浮游植物功能群的综合影响^[24]。

3 结果与分析

3.1 水质指标及补水量变化分析

如表 1 所示, 2020—2023 年夏季乌梁素海 TN、TP 和 DO 浓度均呈波动上升趋势, 三者变化范围分别为 0.97~1.22、0.01~0.03 和 4.49~6.32 mg/L。COD 和 COD_{Mn} 浓度均呈波动下降趋势, 其变化范围分别为 16.3~35.4 和 3.51~4.69 mg/L。WD 变化范围在 0.97~1.14 m 之间, pH 在 8.5 以上且水体电导率较高, 水体呈现出较明显的盐碱性。根据 Kruskal-Wallis 非参数检验结果, 乌梁素海各环境因子年际变化趋势均不显著。整体来看, 水质由 2020 年夏季的 V 类水上升到 2023 年的 IV 类水 (GB 3838—2002)。乌梁素海凌汛期生态补水水质均为 II 类水。

表 1 2020—2023 年乌梁素海夏季水质指标变化

Table 1 Temporal variation of water quality indicators in Wuliangsu Lake in summer from 2020 to 2023

年份	TN浓度/(mg/L)	NH ₃ -N浓度/(mg/L)	TP浓度/(mg/L)	COD _{Mn} 浓度/(mg/L)	COD浓度/(mg/L)	DO浓度/(mg/L)
2020	0.97±0.07	0.25±0.02	0.02±0.01	4.56±0.47	35.4±1.78	4.49±0.91
2021	0.87±0.03	0.69±0.03	0.01±0.01	4.69±0.50	24.5±1.67	5.80±0.73
2022	1.12±0.20	0.19±0.03	0.02±0.01	3.64±0.52	16.3±0.80	5.72±0.47
2023	1.22±0.09	0.45±0.03	0.03±0.01	3.51±0.13	19.0±0.48	6.32±0.34
年份	TDS浓度/(mg/L)	Cond/(μS/cm)	pH	WT/°C	WD/m	
2020	1 384.40±154.20	1 962.60±220.10	8.79±0.09	21.10±0.15	1.02±0.17	
2021	1 869.80±148.30	2 923.20±218.60	8.78±0.11	24.70±0.19	0.97±0.15	
2022	1 991.30±190.10	2 966.90±274.30	9.08±0.10	23.80±0.48	1.41±0.04	
2023	1 998.00±192.30	1 987.60±263.80	9.02±0.07	24.50±0.27	1.32±0.12	

基于历史文献^[25-26] 对比分析, 生态补水后乌梁素海水水质由劣 V 类提升至 IV 类 (GB 3838—2002), 水质状况明显好转。乌梁素海 2005 年以来补水量及主要

水质指标变化如图 2 所示。生态补水是乌梁素海综合治理的主要措施之一, 其补水过程大致可分为 3 个阶段: ①2005—2013 年受各种条件限制, 年均生态补

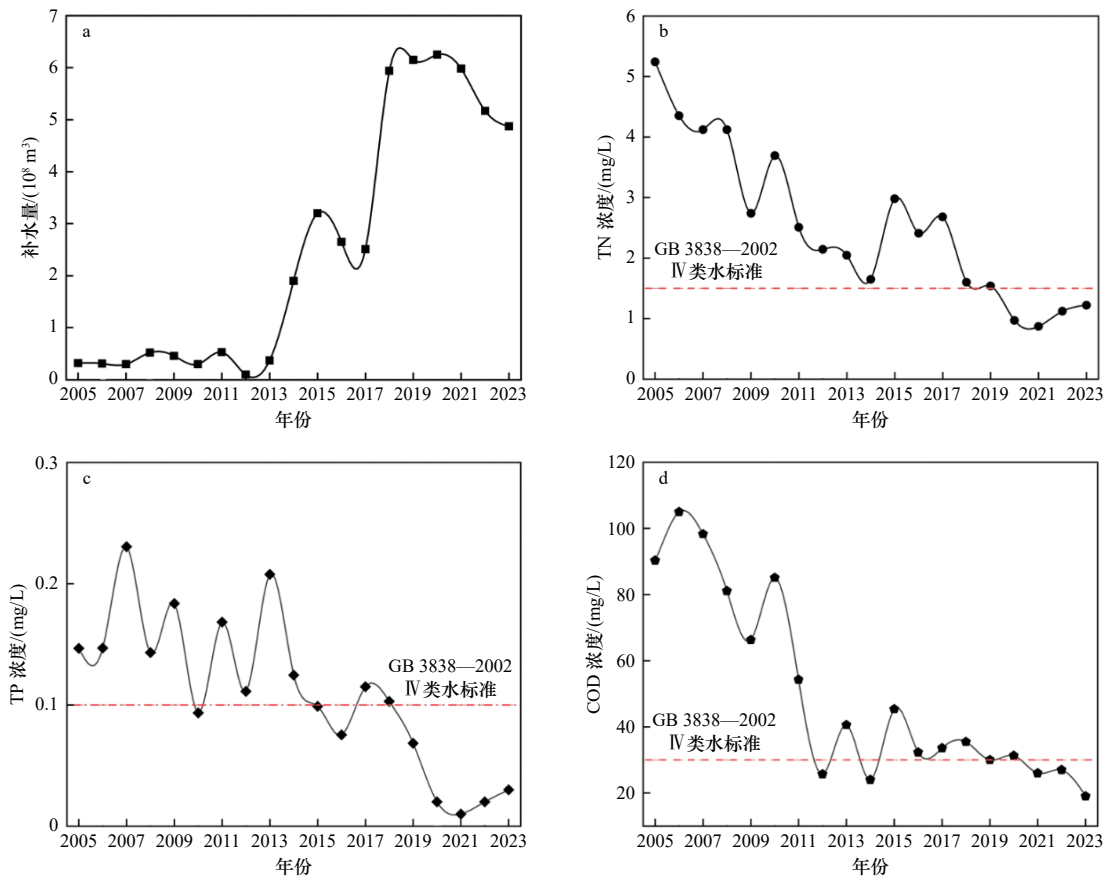


图2 2005—2023年乌梁素海生态补水量及水质变化趋势

Fig.2 Temporal variation of ecological water supplement amount and water quality in Wuliangsuohai Lake from 2005 to 2023

水量维持在 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以下; ②2014—2017年, 年均生态补水量维持在 $2 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间; ③2018年至今, 每年生态补水量增至 $5 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8 \text{ m}^3$ [见图2(a)]。TN和TP是衡量水体富营养化的重要指标。2005—2023年, 乌梁素海TN和TP浓度下降趋势明显, 降幅分别达到76.7%和80.0% [见图2(b)(c)]。TN浓度由2018年以前的劣V类水标准升至2023年的IV类水标准, TP浓度由2007年的劣V类水标准升至2023年的IV类水标准。COD浓度是表征地表水有机污染程度的重要指标。2005—2023年, 乌梁素海COD浓度降幅达到78.9% [见图2(d)], 由2015年前的劣V类水标准升至2023年的IV类水标准。目前, 乌梁素海湖心区水质基本稳定在IV类水。

3.2 浮游植物群落特征

2020—2023年夏季乌梁素海共鉴定出浮游植物7门131种(含变种), 其中硅藻门最多, 共计51种, 占浮游植物总物种数的38.9%, 其次为绿藻门(42种)和蓝藻门(20种), 占比分别为32.1%和15.3%。其余物种分别为裸藻门11种, 甲藻门3种、隐藻门3种、

金藻门1种, 总占比为13.7%。2020—2023年夏季乌梁素海硅藻门和裸藻门物种数占比逐渐增加, 绿藻门占比逐渐减少, 蓝藻门和其他物种占比变化不明显(见图3)。优势种年际变化如表2所示。2020—2023年夏季乌梁素海各监测点共筛选出11种优势物种, 分别为伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)、平裂藻(*Merismopedia* sp.)、腔球藻(*Coelosphaerium* sp.)、点形平裂藻(*Merismopedia punctata*)、鱼腥藻(*Anabaena* sp.)、绿色颤藻(*Oscillatoria chlorine*)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、啮蚀隐藻(*Cryptomonas erosa*)和四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*), 其中蓝藻门的伪鱼腥藻、平裂藻、点形平裂藻和硅藻门的梅尼小环藻为绝对优势物种($Y > 0.1$), 蓝藻门为乌梁素海夏季水体中绝对优势种群。

3.3 浮游植物密度、生物量及多样性

2020—2023年乌梁素海夏季浮游植物平均密度和生物量箱线图及非参数检验结果如图4所示, 2020年、2021年、2022年和2023年浮游植物平均密

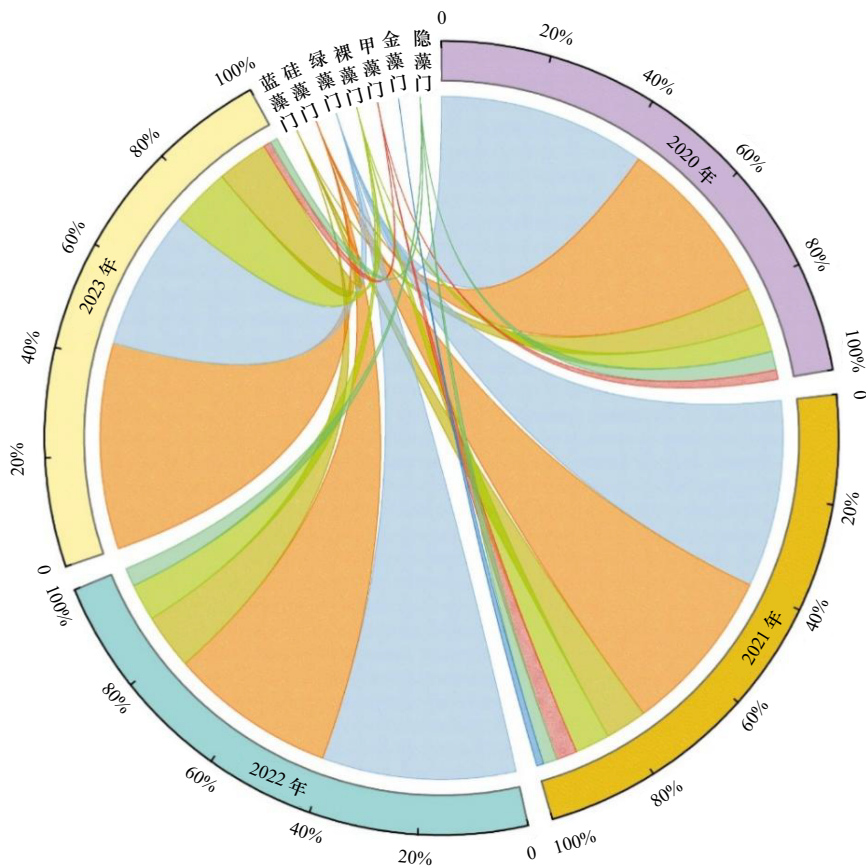


图 3 2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植物比例变化弦图

Fig.3 Chord diagram of variation in phytoplankton proportion in Wuliangsuhai Lake in summer from 2020 to 2023

表 2 2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植物优势种变化

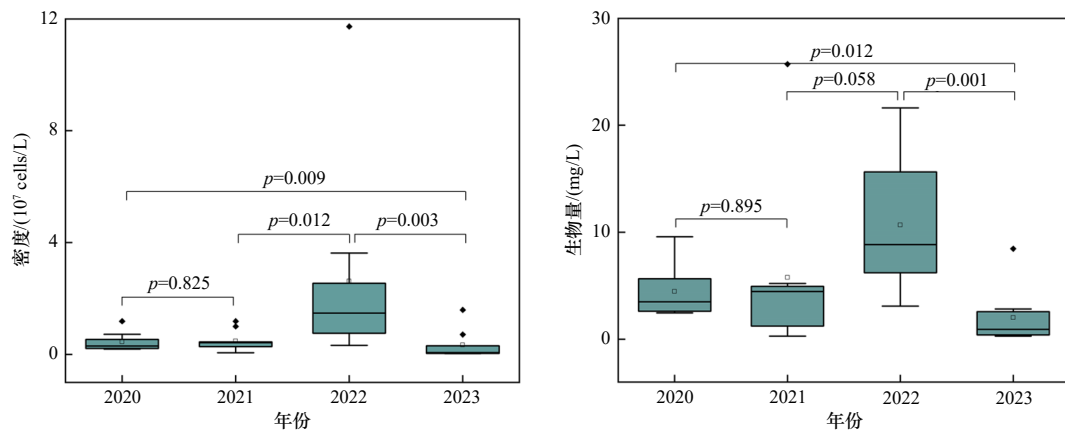
Table 2 Temporal variation in dominant phytoplankton species in Wuliangsuhai Lake in summer from 2020 to 2023

门	种属	优势度(Y)			
		2020年	2021年	2022年	2023年
蓝藻门	伪鱼腥藻(<i>Pseudanabaena</i> sp.)	0.523	0.134	0.073	0.135
	平裂藻(<i>Merismopedia</i> sp.)	0.184			0.404
	腔球藻(<i>Coelosphaerium</i> sp.)		0.072		
	点形平裂藻(<i>Merismopedia punctata</i>)		0.121	0.465	
	鱼腥藻(<i>Anabaena</i> sp.)				0.056
	绿色颤藻(<i>Oscillatoria chlorine</i>)				0.066
硅藻门	梅尼小环藻(<i>Cyclotella meneghiniana</i>)		0.191	0.142	0.036
	尖针杆藻(<i>Synedra acus</i>)	0.023		0.074	
	小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	0.034			
隐藻门	嗜蚀隐藻(<i>Cryptomonas erosa</i>)	0.048	0.077	0.024	
绿藻门	四尾栅藻(<i>Scenedesmus quadricauda</i>)	0.024	0.069	0.025	

注: 伪鱼腥藻 (*Pseudanabaena* sp.) 在 2020 年、2022 年和 2023 年 9 个监测点均为优势物种, 其余物种仅在部分监测点为优势物种。

度分别为 4.5×10^5 、 4.8×10^5 、 2.6×10^6 和 3.3×10^5 cells/L, 平均生物量分别为 4.45、5.77、10.68 和 2.01 mg/L。

从年际变化来看, 乌梁素海浮游植物密度和生物量均呈现先增加后减少的趋势, 2022 年达到顶峰, 2023 年



注: $p < 0.05$ 表示差异显著, $p < 0.01$ 表示差异极显著。

图 4 2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植物密度及生物量变化

Fig.4 Changes on phytoplankton density and biomass in Wuliangsu Hai Lake in summer from 2020 to 2023

降至最低水平。2023 年浮游植物生物量和密度显著小于 2022 年 ($p < 0.05$), 表明相较于 2022 年, 2023 年乌梁素海水环境条件可能发生了较大变化。乌梁素海夏季浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数在 1.62~1.94 之间, Margalef 丰富度指数在 1.29~1.61 之间, Pielou 均匀度指数在 0.53~0.62 之间, 3 个指数在年际变化上差异均不显著 (见表 3)。根据 Shannon-Wiener 多样性指数的水体污染评价等级, 乌梁素海水质整体处于轻-中度污染状态 ($1 < H < 3$)。

表 3 2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植物多样性指数
Kruskal-Wallis 非参数检验结果

Table 3 Results of Kruskal-Wallis nonparametric test for phytoplankton diversity index in Wuliangsu Hai Lake in summer from 2020 to 2023

项目	Shannon-Wiener 多样性指数	Margalef 丰富度指数	Pielou 均匀度指数
2020年	1.82	1.51	0.54
2021年	1.75	1.72	0.55
2022年	2.11	1.45	0.68
2023年	1.66	1.28	0.60
统计量H值	5.408	5.362	3.985
p	0.144	0.147	0.236

3.4 浮游植物功能群组成及优势功能群分布特征

根据 FG 功能群分类方法^[27]对 2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植物进行分组筛选, 共可划分为 26 组常见功能群, 分别为 A、C、D、E、F、G、H2、J、K、L_M、L_O、M、MP、N、NA、P、S₂、S_N、T、TD、W1、W2、X1、X2、X3 和 Y (见表 4)。基于浮游植物功能群划分方法, 将 $Y > 0.02$ 的功能群界定为优势功能群, 将

$Y > 0.2$ 的功能群界定为绝对优势功能群^[28-29]。结果显示, A、D、H2、J、L_O、MP 和 Y 为研究期内乌梁素海优势功能群, 其中 L_O 和 MP 为绝对优势功能群。2020 年夏季乌梁素海优势功能群为 A+D+J+L_O+MP+Y 组合, 生物量占比为 92.7%; 2021 年优势功能群为 A+J+L_O+MP+Y 组合, 生物量占比为 71.7%; 2022 年优势功能群为 A+D+J+L_O+MP+Y 组合, 生物量占比为 67.2%; 2023 年优势功能群为 A+H2+L_O+MP 组合, 生物量占比为 85.1%。2020—2023 年, 乌梁素海夏季浮游植物绝对优势功能群的演替呈现出一定的规律性, 其中 MP 功能群生物量占比由 58.5% 降至 25.8%, L_O 功能群生物量占比则从 22.3% 升至 45.8%, 功能群由 MP 主导类型逐渐演变为由 L_O 主导类型。从空间变化来看, 2020—2023 年监测点 WL1 浮游植物功能群演变最为剧烈, MP 功能群生物量占比由 47.3% 降至 5.4%, L_O 功能群生物量占比则从 34.0% 升至 69.3%。

3.5 环境因子对浮游植物功能群的影响

2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植物密度、生物量及生物指数与环境因子的 Pearson 相关性分析如图 5 所示, 浮游植物生物量和密度均与 TN 浓度和 WT 呈显著正相关 ($p < 0.05$), 与 WD 呈显著负相关 ($p < 0.05$), NH₃-N 浓度与浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均呈显著负相关 ($p < 0.05$), 表明以上环境因子共同主导乌梁素海夏季浮游植物的生长状况。从浮游植物内部关系来看, 生物量和密度呈显著正相关, 均匀度与多样性呈显著正相关 ($p < 0.05$)。

为探究环境因子对浮游植物功能群的影响, 选择浮游植物优势功能群的密度进行 RDA 冗余分析 (见图 6)。

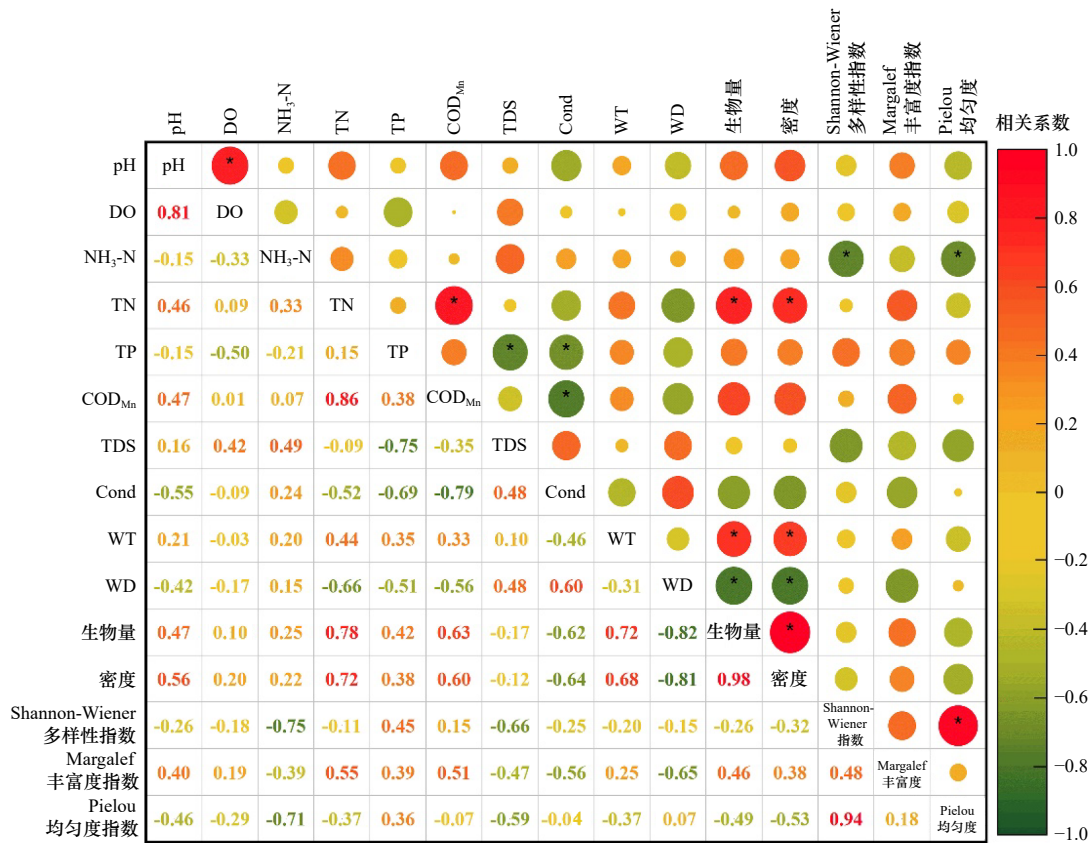
表 4 2020—2023 夏季乌梁素海浮游植物功能群组成

Table 4 Composition of phytoplankton functional groups in Wuliangsu Lake in summer from 2020 to 2023

功能群	代表属	生境特征
A	小环藻属(<i>Cyclotella</i> sp.)	贫营养、洁净、深水
C	星杆藻属(<i>Asterionella</i> sp.)	富营养、中小型水体
D	针杆藻属(<i>Synedra</i> sp.)、菱形藻属(<i>Nitzschia</i> sp.)	含有营养盐、浑浊
E	锥囊藻属(<i>Dinobryon</i> sp.)	贫营养或异养型、小型水体、浅水
F	卵囊藻属(<i>Oocystis</i> sp.)、网球藻属(<i>Dictyosphaeria</i> sp.)	中到富营养、洁净、混合强
G	实球藻属(<i>Pandorina</i> sp.)	富营养、停滞水体
H2	鱼腥藻属(<i>Anabaena</i> sp.)	贫到中营养、深水、光照好
J	四角藻属(<i>Tetraedron</i> sp.)、栅藻属(<i>Scenedesmus</i> sp.)、十字藻属(<i>Crucigenia</i> sp.)、集星藻属(<i>Actinastrum</i> sp.)、空星藻属(<i>Coelastrum</i> sp.)、四星藻属(<i>Tetrastrum</i> sp.)、盘星藻属(<i>Pediastrum</i> sp.)	高营养、混合、浅水
K	隐球藻属(<i>Pediastrum</i> sp.)	富营养的浅水
L _M	角甲藻属(<i>Ceratium</i> sp.)、束球藻属(<i>Gomphosphaeria</i> sp.)	富到超富营养、中小型水体
L _O	平裂藻属(<i>Gymnodinium</i> sp.)、羽纹藻属(<i>Pinnularia</i> sp.)、多甲藻属(<i>Peridinium</i> sp.)、色球藻属(<i>Chroococcus</i> sp.)	贫到富营养、中到大型水体、可深可浅
M	微囊藻属(<i>Microcystis</i> sp.)	小到中型、富营养到超富营养、稳定、透明度较高
MP	伪鱼腥藻属(<i>Pseudanabaena</i> sp.)、桥弯藻属(<i>Cymbella</i> sp.)、短缝藻属(<i>Eunotia</i> sp.)、舟形藻属(<i>Navicula</i> sp.)、卵形藻属(<i>Cocconeia</i> sp.)、曲壳藻属(<i>Achnanthes</i> sp.)、双菱藻属(<i>Surirella</i> sp.)、辐节藻属(<i>Stauroneis</i> sp.)、颤藻属(<i>Oscillatoria</i> sp.)	经常性搅动、浑浊、浅水
N	鼓藻属(<i>Cosmarium</i> sp.)、角星鼓藻属(<i>Staurastrum</i> sp.)	低营养、持续或半持续的混合水层
NA	顶接鼓藻属(<i>Pondylosium</i> sp.)	贫到中营养、静水、低纬度地区
P	新月藻属(<i>Closterium</i> sp.)、直链藻属(<i>Melosira</i> sp.)、脆杆藻属(<i>Fragilaria</i> sp.)、等片藻属(<i>Diatoma</i> sp.)	中光照、持续或半持续的混合水层
S ₂	螺旋藻属(<i>Spirulina</i> sp.)	温暖、高碱性、浅水
S _N	小尖头藻属(<i>Raphidiopsis</i> sp.)	温暖、混合
T	转板藻属(<i>Mougeotia</i> sp.)、并联藻属(<i>Quadrigula</i> sp.)	低营养、持续混合水
TD	丝藻属(<i>Ulothrix</i> sp.)、水绵藻属(<i>Spirogyra</i> sp.)	中营养、静水或流动缓慢、有沉水植物
W ₁	盘藻属(<i>Gonium</i> sp.)、裸藻属(<i>Euglena</i> sp.)、扁裸藻属(<i>Phacus</i> sp.)	有机污染、浅水
W ₂	陀螺藻属(<i>Strombomonas</i> sp.)、囊裸藻属(<i>Trachelomonas</i> sp.)	中营养、浅水
X ₁	纤维藻属(<i>Ankistrodesmus</i> sp.)	超富营养、浅水
X ₂	衣藻属(<i>Chlamydomonas</i> sp.)、蓝隐藻属(<i>Chroomonas</i> sp.)	中到富营养、浅水
X ₃	布纹藻属(<i>Gyrosigma</i> sp.)	贫营养、混合、浅水
Y	隐藻属(<i>Cryptomonas</i> sp.)、薄甲藻属(<i>Glenodinium</i> sp.)	静水环境

结果显示,轴 1 和轴 2 分别解释了 28.91% 和 20.99% 的浮游植物优势功能群与环境因子之间的关系信息,表明所选 10 个环境因子与乌梁素海夏季浮游植物群落变化关系密切。TN 几乎对所有功能群的密度均起显著正向作用,WT 对 J 和 L_O 功能群的密度起到显著正向作用,NH₃-N 对 A、D 和 Y 功能群密度起显

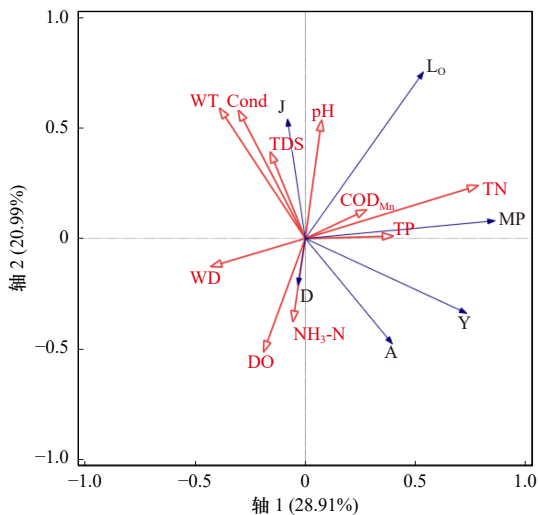
著正向作用,TP 和 COD_{Mn} 与功能群 A、L_O、MP 和 Y 密度存在正相关关系,WD 与除 D 以外的所有功能群密度均存在负相关关系。蒙特卡罗置换检验表明,TN、WT 和 NH₃-N 是影响乌梁素海夏季浮游植物功能群差异性的显著因子 ($p < 0.05$),其解释度分别为 29.3%、18.1% 和 14.5%。



注: *表示 $p < 0.05$ 。TDS、DO、NH₃-N、TN、TP 均表示其浓度。

图 5 2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植物生物指标与环境因子间的相关关系

Fig.5 Correlation between phytoplankton bio-indicators and environmental factors in Wuliangsohai Lake in summer from 2020 to 2023



注: TDS、DO、NH₃-N、TN、TP 和 COD_{Mn} 均表示其浓度。

图 6 2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植物各物种密度与环境因子间 RDA 分析

Fig.6 RDA analysis between the density of phytoplankton species and environmental factors in Wuliangsohai Lake in summer from 2020 to 2023

4 讨论

4.1 生态补水对乌梁素海水质和浮游植物群落的影响

自 2005 年实施生态补水以来,乌梁素海水体中 TN、TP 和 COD 等主要污染物浓度均呈显著下降趋势(见图 2)。在生态补水第一阶段, TN 和 COD 浓度分别下降了 61.0% 和 55.1%, TP 浓度呈波动性变化,下降趋势不显著^[26]。第二阶段虽然生态补水量增加,但由于 2015 年湖区开挖水道,内源污染释放,2017 年冬季补水量减少等因素影响^[30],该阶段 TN、TP 和 COD 等污染物浓度呈现短暂波动上升趋势。随着第三阶段生态补水量的持续增加,2018 年乌梁素海水质全面达到 V 类水标准(GB 3838—2002),2021 年后水质基本稳定在 IV 类水标准。水质与营养状态评价结果表明,2018 年乌梁素海水质从重度污染转变为中度污染,2023 年转变为轻度污染,营养状况由 2014 年的重度富营养化转变为 2023 年的轻度富营养化^[30],可见乌梁素海水质向好趋势和生态补水量具有良好的一致性^[25]。

生态补水对浮游植物物种组成、群落结构和多样性指数有明显影响^[31],通常随着水体营养盐浓度下降,水生生物会显示出种类增多、数量减少的特征^[32]。对比本研究结果和历史文献表明,生态补水实施显著降低了乌梁素海 N、P 等营养盐浓度,夏季浮游植物群落状况发生了较大变化。相较于 2004—2005 年夏季^[33],本研究期内乌梁素海浮游植物密度和生物量显著下降,分别下降 82.63% 和 84.90%,当前乌梁素海夏季浮游植物密度和生物量处于中等水平。从浮游植物群落结构组成来看,2018 年乌梁素海生态补水量大幅增加,水质全面达到 V 类水标准(GB 3838—2002),浮游植物群落结构特征也在该时期发生重大变化,由绿藻门-硅藻门-蓝藻门格局演变为硅藻门-绿藻门-蓝藻门格局并持续至今^[34],可见生态补水对乌梁素海环境因子变化有直接的驱动作用从而进一步影响浮游植物群落结构。此外,在生态补水过程中,乌梁素海夏季浮游植物优势功能群也发生了变化,2012 年夏季主要为 D+L₀+MP+TC+S_N 组合^[35],2017 年夏季主要为 L₀+MP+M+TC 组合^[36],2023 年夏季为 A+H₂+L₀+MP 组合,其中 A 功能群(以小环藻属为主)适应的环境特征主要为贫营养、洁净的深水水体,对低营养环境有更高的耐受力^[28],H₂ 功能群(以鱼腥藻属为主)适宜在贫到中营养、光照好的深水水体中生长^[37]。监测点 WL1 浮游植物功能群变化更为显著,可能与该监测点位于乌梁素海退水口,受生态补水影响较大有关。

综合分析乌梁素海生态补水前后的水环境因子、浮游植物密度与生物量及水体富营养化程度发现,在整个生态补水期间,乌梁素海水体中的营养盐浓度大幅削减,浮游植物密度与生物量显著降低,水体富营养化程度明显改善,但目前乌梁素海夏季水体中蓝藻门种群仍处于绝对优势地位,表明水体营养水平仍偏高,存在较高富营养化和浮游植物种群结构失衡风险。乌梁素海治理是一项长期而艰巨的任务,生态补水作用也是一个长期渐进的过程,未来还需加强对乌梁素海及周边水生态环境的跟踪监测,密切关注补水期间水质和水生生物的变化,及时开展生态补水效果评估,从而充分发挥生态补水效益。

4.2 乌梁素海浮游植物群落结构与环境因子的关系

水体中浮游植物群落演变通常是多种环境因子共同作用的结果,但浮游植物的生长繁殖也会影响湖泊的水质状况,水环境因子与浮游植物群落结构间存在着直接响应关系^[38]。Pearson 相关性分析和 RDA 分析结果表明,2020—2023 年夏季乌梁素海浮游植

物生物量和密度均与 TN 浓度和 WT 呈显著正相关,与 WD 呈显著负相关,且 TN、WT 和 NH₃-N 是影响乌梁素海夏季浮游植物功能群密度的重要环境因子(见图 5 和图 6)。N、P 是浮游植物生长繁殖的重要营养盐,但由于浮游植物对 N、P 元素需求的比例不同,其也可能成为限制性元素。有研究表明,以 N/P(TN 与 TP 质量比)作为湖泊营养限制指标,N/P<9 时为氮限制状态,N/P≥22.6 时为磷限制状态^[39]。本研究中,乌梁素海夏季浮游植物主要优势功能群 A、L₀、MP 和 Y 密度均与 TN 浓度呈正相关,各监测点 N/P 在 8.8~34.7 之间,55.6% 的样本 N/P≥22.6,表明乌梁素海夏季整体处于氮过剩状态。伪鱼腥藻是整个研究期内所有样点均出现的优势物种。目前研究普遍认为 N/P 较高时有利于非固氮蓝藻伪鱼腥藻等的生长繁殖^[40],说明乌梁素海伪鱼腥藻在高 N 低 P 的水环境中更具竞争优势^[41]。此外,以伪鱼腥藻属为代表的功能群 MP 对于经常性搅动且浑浊的浅水具有良好的适应性^[37],表明生态补水导致的冲刷和扰动也可能是乌梁素海夏季伪鱼腥藻等丝状蓝藻成为优势种的原因之一。

水温和光照是影响浮游植物生长的重要环境因子,适宜范围内光照和温度的升高可加速光合作用,促进浮游植物生长繁殖^[42]。WT 主要通过调节光合作用酶促反应和呼吸作用强度,进而影响藻类的生长^[43]。不同浮游植物的最适生长温度不同,与硅藻喜低温不同,高温能促进蓝藻和绿藻生长繁殖^[44]。本研究中 WT 范围在 21.1~24.7 °C 之间,处于蓝藻和绿藻适宜生长温度范围,WT 与优势功能群 J(以栅藻属为主)和 L₀(以平裂藻属为主)密度均呈正相关,表明夏季较高的水温是绿藻门栅藻属和蓝藻门平裂藻属成为优势功能群的关键因子。WD 对浮游植物的影响主要体现在光照上,浅水区光照充足,浮游植物能够有效进行有效光合作用,而在深水区,光照穿透能力受限,光合作用受阻,限制了浮游植物的生长与繁殖,这也是本研究中浮游植物生物量及优势功能群 A、H₂、J、L₀、MP 和 Y 密度均与 WD 呈负相关的主要原因。NH₃-N 在浮游植物生长阶段起着至关重要的作用,是影响绿藻和裸藻分布的重要因素^[45]。研究表明,低浓度 NH₃-N 促进浮游植物生长,较高浓度则产生抑制作用,而硅藻门藻类通常对 NH₃-N 浓度具有较广泛的适应性^[46],这也是 NH₃-N 浓度与优势功能群 A(以小环藻属为主)和 D(以针杆藻属为主)密度呈正相关的原因。综合来看,乌梁素海夏季浮游植物功能群受 TN、WT 和 NH₃-N 等因素的综合影响,与已有研

究结论^[42,47-48]一致。

5 结论

a) 乌梁素海夏季浮游植物群落演替具有明显时间演变规律,2020年、2021年、2022年、2023年浮游植物平均密度分别为 4.5×10^5 、 4.8×10^5 、 2.6×10^6 和 3.3×10^5 cells/L,平均生物量分别为 4.45、5.77、10.68 和 2.01 mg/L,均以蓝藻为优势类群。

b) 乌梁素海夏季优势功能群组合发生明显变化,由 A+D+J+L₀+MP+Y 组合演变为 A+H₂+L₀+MP 组合,绝对优势功能群由 MP 主导类型演变为由 L₀ 主导类型。

c) 生态补水显著影响了水体 TN 和透明度等环境因子,TN、WT 和 NH₃-N 是控制浮游植物群落结构的关键驱动因子。

d) 生态补水可能通过多重路径共同改善水生态系统状态,生态补水以来乌梁素海水质明显好转,浮游植物密度和生物量显著降低,水体富营养化程度改善,但目前水体营养水平仍偏高,存在较高的富营养化风险。

参考文献 (References):

- [1] WOOLWAY R I,KRAEMER B M,LENTERS J D,et al.Global lake responses to climate change[J].*Nature Reviews Earth & Environment*,2020,1(8):388-403.
- [2] ABELL R,THIEME M L,REVENGA C,et al.Freshwater ecoregions of the world:a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation[J].*BioScience*,2008,58(5):403-414.
- [3] RINKE K,KELLER P S,KONG X Z,et al.Ecosystem services from inland waters and their aquatic ecosystems[M].Cham: Springer International Publishing,2019:191-195.
- [4] ADRIAN R,O'REILLY C M,ZAGARESE H,et al.Lakes as sentinels of climate change[J].*Limnology and Oceanography*,2009,54:2283-2297.
- [5] AYELE H S,ATLABACHEW M.Review of characterization, factors,impacts,and solutions of Lake eutrophication:lesson for lake Tana,Ethiopia[J].*Environmental Science and Pollution Research*,2021,28(12):14233-14252.
- [6] HU M Q,MA R H,XUE K,et al.Eutrophication evolution of lakes in China:four decades of observations from space[J].*Journal of Hazardous Materials*,2024,470:134225.
- [7] LI S J,CHEN F F,SONG K S,et al.Mapping the trophic state index of eastern lakes in China using an empirical model and Sentinel-2 imagery data[J].*Journal of Hydrology*,2022,608:127613.
- [8] ZUO J,XIAO P,HEINO J,et al.Eutrophication increases the similarity of cyanobacterial community features in lakes and reservoirs[J].*Water Research*,2024,250:120977.
- [9] YU H F,SHI X H,SUN B,et al.Effects of water replenishment on lake water quality and trophic status:an 11-year study in cold and arid regions[J].*Ecotoxicology and Environmental Safety*,2024,281:116621.
- [10] HAO X Y,SHI X H,ZHAO S N,et al.Impacts of temperature and nutrient dynamics on phytoplankton in a lake:a case study of Wuliangsuhai Lake,China[J].*Sustainability*,2024,16(24):11195.
- [11] WAN F,ZHANG F,ZHENG X K,et al.Study on ecological water demand and ecological water supplement in Wuliangsuhai Lake [J].*Water*,2022,14(8):1262.
- [12] 赵雯雯,杨慧婷,许诺,等.乌梁素海和呼伦湖表层水体中农药的污染水平、来源分布及风险评估[J].*生态毒理学报*,2025,20(1):95-108.
ZHAO W W,YANG H T,XU N,et al.Pollution levels,distribution, sources and risk assessment of pesticides in surface water of the Wuliangsuhai Lake and Hulun Lake[J].*Asian Journal of Ecotoxicology*,2025,20(1):95-108.
- [13] 万新宇,王光谦,黄跃飞,等.乌梁素海湿地研究进展[J].*人民黄河*,2010,32(11):14-16.
- [14] 李兴,勾芒芒.内蒙古乌梁素海“黄苔”暴发初探及防治对策[J].*环境工程*,2010,28(6):28-30.
LI X,GOU M M.Analysis of factors of algal bloom of Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia[J].*Environmental Engineering*,2010,28(6):28-30.
- [15] WEI J,JI X N,HU W.Characteristics of phytoplankton productivity in three typical lake zones of Taihu,China[J].*Sustainability*,2024,16(6):2376.
- [16] O'FARRELL I,de TEZANOS PINTO P,IZAGUIRRE I. Phytoplankton morphological response to the underwater light conditions in a vegetated wetland[J].*Hydrobiologia*,2007,578(1):65-77.
- [17] REYNOLDS C S.Variability in the provision and function of mucilage in phytoplankton:facultative responses to the environment[J].*Hydrobiologia*,2007,578(1):37-45.
- [18] 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[J].*湖泊科学*,2019,31(5):1259-1267.
QUAN D,SHI X H,ZHAO S N,et al.Eutrophication of Lake Ulansuhai in 2006-2017 and its main impact factors[J].*Journal of Lake Sciences*,2019,31(5):1259-1267.
- [19] 杨晓楠,玉溪飞井水库浮游植物群落结构周年变化特征及水质生物评价[J].*环境科学导刊*,2022,41(1):71-76.
YANG X N.Anual variation characteristics of phytoplankton community structure and bio-assessment of the water quality of Feijing Reservoir in Yuxi[J].*Environmental Science Survey*,2022,41(1):71-76.
- [20] SHANNON C E,WEAVER W.The Mathematical theory of communication[M].Urbana:University of Illinois Press,1949.
- [21] MARGALEF D R.Perspectives in ecological theory[M].Chicago: The University of Chicago Press,1968.
- [22] PIELOU E C.Ecological Diversity[M].New York:Wiley-Interscience,1975.
- [23] 解成杰,谢焱,宁中华,等.黄河三角洲潮沟浮游生物群落结构特

- 征及其影响因素 [J]. 湿地科学, 2024, 22(5): 769-780.
- XIE C J, XIE T, NING Z H, et al. Characteristics of plankton community structure and its influencing factors in tidal channels of the Yellow River Delta [J]. Wetland Science, 2024, 22(5): 769-780.
- [24] HAN L B, LI Q H, CHEN W S, et al. The key environmental factors driving the succession of phytoplankton functional groups in Hongfeng Reservoir, southwest China [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2022, 40(4): 1472-1484.
- [25] 刘莹慧, 卢俊平, 赵胜男, 等. 基于长时间序列乌梁素海海水环境变化趋势及生态补水等关键驱动因子分析 (2011—2020 年) [J]. 湖泊科学, 2023, 35(6): 1939-1948.
- LIU Y H, LU J P, ZHAO S N, et al. Water environment change trend and ecological water replenishment of Lake Wuliangsu Hai and other key driving factors analysis based on long time series (2011-2020) [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(6): 1939-1948.
- [26] 田伟东, 贾克力, 史小红, 等. 2005—2014 年乌梁素海湖泊水质变化特征 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1226-1234.
- TIAN W D, JIA K L, SHI X H, et al. Water quality variation in Lake Wuliangsu Hai, 2005-2014 [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(6): 1226-1234.
- [27] REYNOLDS C S. Vegetation processes in the pelagic: a model forecosystem theory [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1998, 17: 138-140.
- [28] 张羽彤, 田爽, 韩温诺, 等. 海河流域天津段浮游植物功能群分布特征及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(10): 2192-2203.
- ZHANG Y T, TIAN S, HAN W N, et al. Distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in Tianjin section of Haihe River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(10): 2192-2203.
- [29] 彭梦, 吴嘉伟, 李罗新, 等. 澜沧江小湾库区 2017—2019 夏季浮游植物功能群特征及其环境驱动因子 [J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 50-57.
- PENG M, WU J W, LI L X, et al. Characteristics of phytoplankton functional groups and their environmental drivers in Xiaowan Reservoir area of Lancang River during the summer of 2017-2019 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(1): 50-57.
- [30] 杨文焕, 李艳芳, 张明宇, 等. 基于长时间序列内蒙古典型湖泊水质变化特征及趋势分析 [J]. 湖泊科学, 2025, 37(4): 1249-1266.
- YANG W H, LI Y F, ZHANG M Y, et al. Variation and trend analysis of water quality of typical lakes in Inner Mongolia based on long-term data [J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(4): 1249-1266.
- [31] 张天娇, 杜立伟, 李添雨, 等. 永定河 (北京段) 生态补水后浮游植物群落特征及其与环境因子关系 [J/OL]. 生态学杂志, 2025: 1-13. (2025-04-30). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20250429.1644.012.html>.
- ZHANG T J, DU L W, LI T Y, et al. Phytoplankton community characteristics and their associations with environmental factors following ecological water replenishment in the Yongding River (Beijing section) [J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 2025: 1-13. (2025-04-30). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20250429.1644.012.html>.
- [32] 丁瑞睿, 郭匿春, 马友华. 巢湖双桥河底泥疏浚过程中浮游植物功能群分类研究 [J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2427-2438.
- DING R R, GUO N C, MA Y H. A study of the phytoplankton functional classification of the Shuangqiao River in the Chaohu basin during a sediment dredging period [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2427-2438.
- [33] 李畅游, 武国正, 李卫平, 等. 乌梁素海浮游植物调查与营养状况评价 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊1): 283-287.
- LI C Y, WU G Z, LI W P, et al. Phytoplankton and nutritional levels in Lake Wuliangsu Hai [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(Suppl 1): 283-287.
- [34] 孙林丹, 沈建忠, 艾桃山, 等. 放养鱼类对乌梁素海浮游植物群落结构的影响 [J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(3): 87-95.
- SUN L D, SHEN J Z, AI T S, et al. Effect of fish stocking on phytoplankton community structure in Wuliangsu Hai Lake [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(3): 87-95.
- [35] 李兴, 李建茹, 徐效清, 等. 乌梁素海浮游植物功能群季节演替规律及影响因子 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(10): 1668-1675.
- LI X, LI J R, XU X Q, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in Wuliangsu Hai Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(10): 1668-1675.
- [36] 金业. 乌梁素海浮游植物功能群时空变异性及其影响因子研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [37] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用 [J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 11-23.
- HU R, LAN Y Q, XIAO L J, et al. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1): 11-23.
- [38] 骆鑫, 蓝文陆, 李天深, 等. 钦州湾春、夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2603-2613.
- LUO X, LAN W L, LI T S, et al. Distribution of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Qinzhou Bay in spring and summer [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2603-2613.
- [39] QIN B Q, ZHOU J, ELSER J J, et al. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(6): 3191-3198.
- [40] XIE L Q, XIE P, LI S X, et al. The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? [J]. Water Research, 2003, 37(9): 2073-2080.
- [41] GAO J S, ZHU J, WANG M W, et al. Dominance and growth factors of *Pseudanabaena* sp. in drinking water source reservoirs, Southern China [J]. Sustainability, 2018, 10(11): 3936.
- [42] 郭旭东, 王雨春, 曾艳, 等. 长江干流南京段浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J/OL]. 环境科学研究, 2025. doi: 10.13198/j.issn.1001-6929.2025.04.04.
- GUO X D, WANG Y C, ZENG Y, et al. Plankton community

- structure characteristics and relationship with environmental factors in the Nanjing section of the mainstream Yangtze River [J/OL]. *Research of Environmental Sciences*, 2025. doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2025.04.04.
- [43] OREJAS C, GILI J M, ARNTZ W. The role of the small planktonic communities in the diet of two Antarctic octocorals (*Primnoisis antarctica* and *Primnoella* sp.) [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 250: 105-116.
- [44] LI Y, ZHOU S L, ZHU Q, et al. One-century sedimentary record of heavy metal pollution in western Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 709-716.
- [45] HE H, KANG Y H, LIU Z W. Nitrogen inputs enhance phytoplankton growth during sediment resuspension events: a mesocosm study [J]. *Hydrobiologia*, 2015, 744(1): 297-305.
- [46] 宋玉芝, 杨旻, 杨美玖, 等. 氨氮浓度对附植藻类在菹草上定植及演替的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2): 375-382.
- SONG Y Z, YANG M, YANG M J, et al. Response of colonization and community succession of epiphytic algae on *Potamogeton crispus* L. to ammonia loads [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2): 375-382.
- [47] 张琦, 陈宇琛, 林育青, 等. 澜沧江梯级水库浮游植物群落结构特征及其关键驱动因子 [J]. *湖泊科学*, 2023, 35(2): 530-540.
- ZHANG Q, CHEN Y C, LIN Y Q, et al. Characteristic of phytoplankton community structure and its driving factors along the cascade reservoirs in the Lancang River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(2): 530-540.
- [48] 张家卫, 王吉毅, 黄迎艳, 等. 珠江流域浮游植物群落特征及驱动因素 [J]. *环境科学研究*, 2024, 37(11): 2490-2502.
- ZHANG J W, WANG J Y, HUANG Y Y, et al. Community characteristics and driving factors in the Pearl River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(11): 2490-2502.

(责任编辑: 周巧富)