

寒旱区湖泊浮游植物特征及其对营养状态的指示作用

王世欢,张 生*,武 蓉,史小红,赵胜男,孙 标 (内蒙古农业大学水资源保护与利用自治区重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:为揭示内蒙古典型湖泊浮游植物群落特征及其对营养状态的响应,于2019年和2020年7月对呼伦湖,岱海,乌梁素海和居延海浮游植物和水质理化指标进行取样调查.结果显示,呼伦湖,岱海,乌梁素海和居延海分别鉴定出浮游植物101种,44种,125种和42种,绿藻门,硅藻门和蓝藻门是其优势门类.调查期间4个湖泊浮游植物的总丰度分别为 5.71×10^5 , 0.18×10^5 , 3.45×10^5 和 6.96×10^5 cells/L;根据优势度分析,居延海优势种最少为6种,其他湖泊优势种都在10种以上;CCA分析表明,综合营养指数(TLI),水温(T),总溶解性固体(TDS),氨氮(NH_4^+-N),盐度(SAL),pH值($P < 0.01$)是浮游植物优势种的主要影响因子.4个湖泊的浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数(H'),丰富度(D),均匀度(J)指数均值分别为 1.4,0.38 和 2.79 (呼伦湖),2.28,0.87 和 1.42(岱海),2.99,0.74 和 4.46(乌梁素海),2.39,0.75 和 0.75(居延海),其对应评价结果分别为中富/中/中营养,中/中富/贫营养,中/贫中/贫营养,中/中/贫营养;综合营养指数(TLI)评价结果依次为重度富营养、中度富营养、轻度富营养和中度富营养.3种多样性指数的评价结果存在不同,整体上浮游植物指数评价结果显著低于理化指标的评价结果,这是由于3种多样性指数不仅仅受TLI相关指标TP,TN,SD和Chl.a的影响, T ,pH值,SAL和TDS都与其显著相关,其中 J 与上述指标都显著相关,而 H' 与TLI相关指标关系显著, D 与 T ,pH值,SAL和TDS关系显著.因此,单独的采用多样性等生物评价可能并不适用于内蒙古高原湖泊,建议结合理化指标使用多种评价方式进行综合评价.

关键词: 寒旱地区; 浮游植物; 群落结构; 湖泊; 营养状态

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)01-0311-10

Characteristics of phytoplankton in cold and arid areas and their indicator of trophic status. WANG Shi-huan, ZHANG Sheng*, WU Rong, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, SUN Biao (IMAR Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China). *China Environmental Science*, 2023,43(1): 311~320

Abstract: To reveal the characteristics of phytoplankton community structure and their response to nutrient, phytoplankton and physicochemical indexes of water quality in Lake Hulun, Daihai, Ulansuhai and Juyanhai were sampled and investigated in July 2019 and July 2020. 101, 44, 125 and 42 phytoplankton species were identified in Lake Hulun, Daihai, Ulansuhai and Juyanhai with a total phytoplankton abundance of 5.71×10^5 , 0.18×10^5 , 3.45×10^5 and 6.96×10^5 cells/L, respectively. *Chlorophyta*, *Diatoms* and *Cyanobacteria* were the dominant phyla. However, only 6 dominant species were identified in Juyanhai, which was the least compared with more than 10 dominant species in the three other lakes. The dominant species of phytoplankton were mainly impacted by TLI, T , TDS, NH_4^+-N , SAL and pH ($P < 0.01$). The mean values of phytoplankton Shannon-Wiener diversity (H'), richness (D) and evenness (J) were 1.4, 0.38 and 2.79 in Hulun Lake, 2.28, 0.87 and 1.42 in Daihai, 2.99, 0.74 and 4.46 in Ulansuhai, 2.39, 0.75 and 0.75 in Juyanhai, which indicated the corresponding evaluation results were medium rich/medium/medium nutrition, medium/medium rich/poor nutrition, medium/poor medium/poor nutrition, medium/moderate/poor nutrition, respectively. However the evaluation results of the comprehensive nutrition index (TLI) were severe eutrophication, moderate eutrophication, mild eutrophication and moderate eutrophication, respectively. Obviously, the evaluation results of the three approaches were different. On the whole, the evaluation result of phytoplankton index was significantly lower than that of physical and chemical indicators. This might be because the three diversity indexes were not only affected by the comprehensive nutrition indexes like TP, TN, SD and Chl.a, but also significantly correlated with T , pH, SAL and TDS. The analyzed results showed that J was significantly correlated with all the indexes, while H' was significantly correlated with the indexes that were related to the comprehensive nutritional indexes and D was significantly correlated with T , pH, SAL and TDS. Therefore, the use of biological evaluation such as biodiversity alone may not be applicable to the lakes in the Inner Mongolia Plateau and it is suggested to use multiple evaluation methods in combination with physical and chemical indicators for a comprehensive evaluation.

Key words: cold and arid regions; phytoplankton; community structure; lake; nutritional status

浮游植物是湖泊水体的主要初级生产者,对水生态系统的物质循环与能量流动至关重要^[1-2].浮游植物群落对水质变化响应灵敏^[3-4],群落结构和多样性常作为评价水质和营养状况的生物指标^[5].但在

收稿日期: 2022-05-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0114800,2019YFC0409204); 国家自然科学基金资助项目(51869020,52060022,51909123)

* 责任作者, 教授, shengzhang@imau.edu.cn

实际应用中,受地理环境和气候因素(如水温,降雨,水动力等)影响,浮游植物群落多样性对营养状态和水质变化的响应具有明显的时空特征^[6],这些时空特征限制基于浮游植物群落多样性的评价方法的推广和应用^[7-8].在特定区域内,应用浮游植物群落生物指标评价方法^[7],需要研究积累,明确研究区的特征和应用评价方法的条件.

特定时期浮游植物群落反映的是所处环境状态^[7],浮游植物与营养盐的响应关系受其他因素的影响^[8].例如,由于水温,流速等环境因素的影响,太湖流域 96 条河流以浮游植物为指标的水质评价结果低于物理化学参数的评价结果^[9],在抚仙湖^[10]也有类似的研究结果,喀尔巴阡盆地(匈牙利)湖泊和河流的相关研究表明,由于气候和其它因素的影响,使用浮游植物多样性作为生态指标的有效性与水体类型有关^[11].

内蒙古高原大部分地区属于温带大陆性季风气候区,区域内湖泊多属内陆型湖泊,地表径流补给贫乏,区域特征明显.与环境梯度相关的地理,气候以

及水文条件是浮游植物生长与分布的重要影响因素^[12],此外,独特的湖泊形态和光热条件(如湖泊面积,光热状况和昼夜季节变化)^[13-15]对浮游植物多样性也有重要作用.但目前尚缺乏系统的研究阐述应用浮游植物多样性作为内蒙古高原湖泊水质,营养水平评价指标的有效性.

本研究旨在揭示内蒙古典型湖泊浮游植物特征,分析浮游植物多样性与湖泊营养状态和水质的关系,阐述应用浮游植物多样性作为内蒙古高原湖泊水质,营养水平评价指标的有效性.选取内蒙古典型湖泊呼伦湖,岱海,乌梁素海和居延海 4 个湖泊为研究对象,分析了各湖泊的浮游植物群落特征和营养状态水平,确定了各湖泊浮游植物多样性的主要影响因子,阐明了浮游植物多样性作为内蒙古高原湖区水质指标的适用性以及其对营养状态的指示作用.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

表 1 内蒙古典型湖泊基本特征
Table 1 Characteristics of the typical lakes in Inner Mongolia

湖泊	地理坐标	湖区面积(km ²)	湖泊类型	气候类型
呼伦湖	116°58'~117°48'E, 48°33'~49°20'N	2037	草原型湖泊	中温带半干旱草原气候
岱海	112°33'~112°46'E, 40°29'~40°37'N	50.3	山区盆地湖泊	中温带半干旱大陆性季风气候
乌梁素海	108°43'~108°57'E, 40°47'~41°43'N	325.31	灌区退水湖泊	中温带大陆性季风气候
居延海	101°12'~101°19'E, 42°10'~42°20'N	40.5	沙漠腹地型湖泊	极端干旱区气候

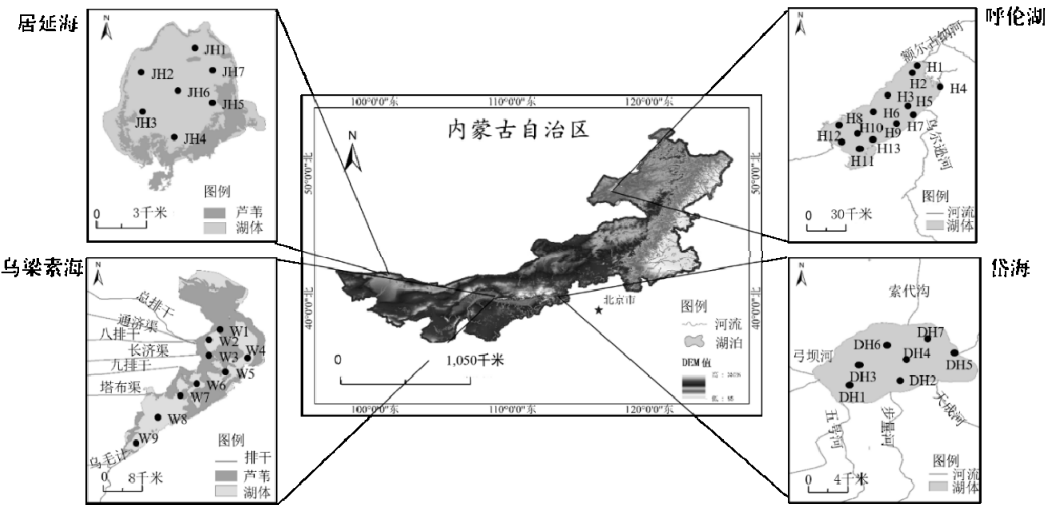


图 1 内蒙古典型高原湖泊位置图
Fig.1 Location of the typical lakes
●为采样点

呼伦湖(达赉湖)位于内蒙古自治区呼伦贝尔草原西部的新巴尔虎右旗境内,是我国第四大淡水湖,也是我国内陆高纬度半干旱地区的第一大草原型湖泊^[16]。湖泊主要的补给来源 4 条入湖河流分别为乌尔逊河,克鲁伦河,海拉尔河和新开河,以及降水和周围的地下水^[17]。岱海位于内蒙古自治区乌兰察布市凉城县境内,属于典型内陆咸水湖泊。湖水补给主要来源于地表径流,地下水补给和湖面降水。近年来湖面萎缩和矿化度升高速率加剧,2019 年年均矿化度达 13878mg/L,是 2004 年 4658.6mg/L^[18]的 2.98 倍,生物多样性锐减,鱼类灭绝。乌梁素海位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,是黄河改道形成的河迹湖。主要承接河套灌区农田退水,也是当地生活污水,工业废水的唯一承纳水体^[19],出水排至黄河。居延海位于内蒙古自治区阿拉善盟额济纳旗,是黑河流域的尾间湖,主要受上游人工生态下泄水量调控。湖泊所在区域受极端干旱区气候影响,常年降雨稀少,年均降水量为 34.5mm^[20],年平均水面蒸发量高达 1526.6mm^[21],受极端干旱气候影响在 20 世纪多次干涸,自 2002 年黑河上游生态下泄水量增加以来至今未见干涸,是典型的人工控制性湖泊。

1.2 采样点布设与样品采集

于 2019 年和 2020 年 7 月分别对选定的 4 个典型湖泊进行水质和浮游植物进行调查(图 1)。浮游植物定性与定量采集方法参考《湖泊生态调查观测与分析》^[22]。定性样品采集使用 25#浮游生物网在表层水体中呈用于浮游植物的定量计数。

1.3 样品分析与方法

现场测定水深(H),并且使用便携式多参数水质分析仪(YSI)测定 pH 值,溶解氧(DO),电导率(EC),总溶解性固体(TDS),盐度(SAL),水温(T),使用塞斯盘测定透明度(SD),总磷(TP),总氮(TN),叶绿素(Chl.a),氨氮(NH_4^+-N)的测定按照《水和废水监测分析方法》^[23]。

浮游植物定量计数使用光学显微镜(Zeiss Axioskop microscope),种类鉴定参照《中国淡水藻类—系统,分类及生态》,细胞计数参照《淡水生物资源调查技术规范》(DB43/T 432-2009)^[24]。通过 Jaccard 相似性指数(S)反映各湖泊之间群落的相似程度(表 2)^[4],用 Shannon-Wiener 多样性指数(H'), Margalef 物种丰富度指数(D),Pielou 均匀度指数(J)及优势度(Y)指数分析浮游植物多样性^[4]。计算公式如下:

$$S = c / (a + b) \quad (1)$$

式中: S 为相似性指数; c 为群落共有种数; a, b 为每个群落的种数。

表 2 相似性评价标准

Table 2 Similarity evaluation criteria

评价等级	阈值	等级描述
I	0	完全不相似
II	0.01-0.25	极不相似
III	0.26-0.50	轻度相似
IV	0.51-0.75	中度相似
V	0.76-0.99	极相似
VI	1	完全相似

$$H' = -\sum p_i \ln p_i \quad (2)$$

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

$$J = H' / \ln N \quad (4)$$

$$Y = f_i \times p_i \quad (5)$$

$$p_i = n_i / N \quad (6)$$

式中: H' 为多样性指数; p_i 为第 i 种个体数量占总个体数量的比例; D 为物种丰富度指数; S 为藻种数目; N 为群落中藻类的总个体数; J 均匀度指数; Y 为藻类优势度, $Y > 0.02$ 即为优势种^[5]; f_i 为第 i 个物种在采样点的出现频率; n_i 为第 i 个种的个体数目。

用综合营养状态指数(TLI)和浮游植物 D , H' 和 J 指数分别评价湖泊营养状态(表 3)^[25-26]。

表 3 水体营养状态评价的指标及标准

Table 3 Indicators and standards of eutrophication status evaluation

评价指标	极贫营养	贫营养	贫中营养	中营养	中富营养	富营养	超/重富营养
丰富度(D)	>6		4-6	2-4	1-2	<1	
多样性指数(H')		>3		2-3	1-2	0-1	
均匀度(J)		>0.5		0.3-0.5	0.2-0.3	<0.2	
综合营养指数(TLI)		<30		30-50	50-60	60-70	>70

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落特征

2.1.1 种类组成 4 个湖泊鉴定出的浮游植物种类数为:呼伦湖 8 门 101 种,岱海 8 门 44 种,乌梁素海 8 门 125 种,居延海 7 门 42 种(表 4)。乌梁素海与呼伦湖种类数是岱海和居延海的 2~3 倍。4 个湖泊的浮游植物均以绿藻门和硅藻门种类最多,蓝藻门次之,除居

延海其他湖泊均检测到黄藻门种类.

表 4 各湖泊浮游植物种类
Table 4 Species of phytoplankton in each lake

湖泊	硅藻门	蓝藻门	绿藻门	甲藻门	裸藻门	隐藻门	黄藻门	金藻门	总计
乌梁素海	39	15	53	3	7	5	1	2	125
呼伦湖	18	17	50	3	5	5	2	1	101
岱海	11	8	15	3	1	4	1	1	44
居延海	11	8	15	1	2	1	0	4	42

从浮游植物细胞丰度看,呼伦湖均值为 $5.71\times 10^5\text{cells/L}$,其中蓝藻细胞丰度最高,其次是绿藻,二者

占总丰度的 90%;岱海均值为 $0.18\times 10^5\text{cells/L}$,其中蓝藻占总丰度的 36%~72%;乌梁素海均值为 $3.45\times 10^5\text{cells/L}$,硅藻与绿藻为主,占总丰度的 64%~89%;居延海均值为 $6.96\times 10^5\text{cells/L}$,蓝藻为主,占总丰度的 32%~90%,其次是绿藻与金藻(图 2).

2.1.2 浮游植物优势种 呼伦湖优势种主要为蓝藻和绿藻,岱海优势种 7 门兼有,乌梁素海优势种主要为硅藻,蓝藻和绿藻,居延海优势种主要为蓝藻.4 个湖泊浮游植物优势种差异明显,居延海优势种与其它 3 个湖泊完全不同,其它 3 个湖泊有多个相同优势种(表 5).

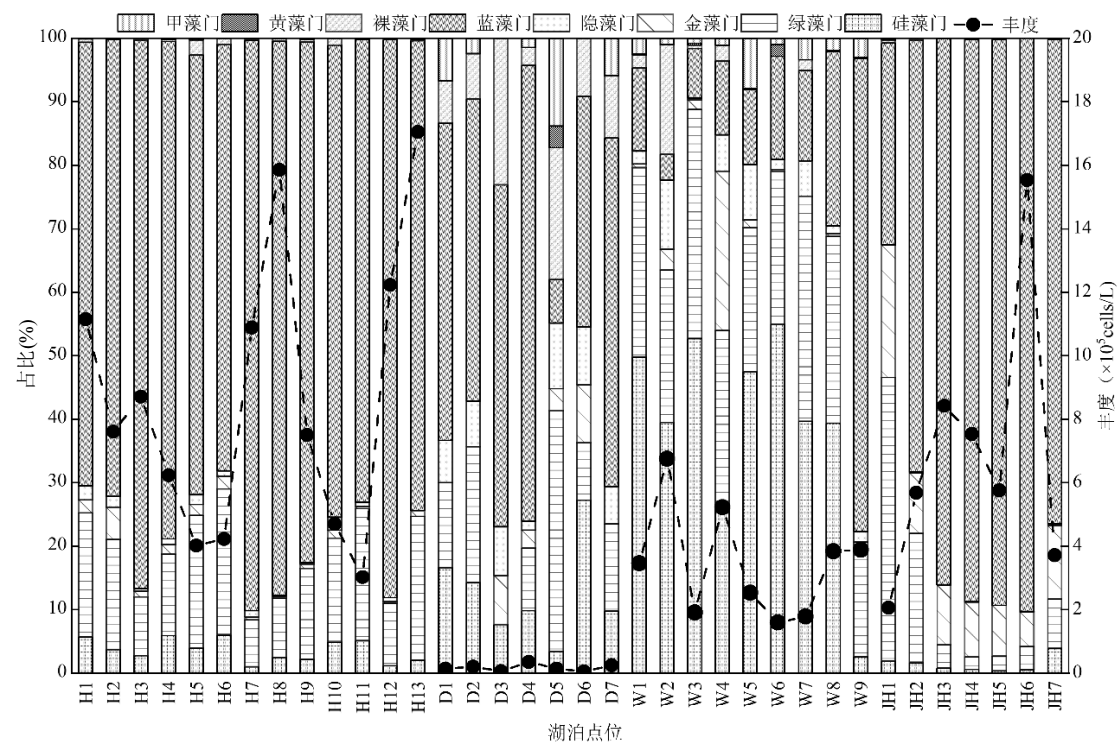


图 2 各湖泊浮游植物丰度及各门相对丰度
Fig.2 Phytoplankton abundance and relative abundance of phylum in each lake

表 5 内蒙古各湖泊浮游植物优势种及优势度
Table 5 Dominant species and degree of phytoplankton

门类	编号	优势种	呼伦湖	岱海	乌梁素海	居延海
硅藻门	n15	小环藻 <i>Cyclotella</i> spp.		0.026	0.075	
	n26	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz.			0.150	
	n16	菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.		0.028	0.025	
金藻门	n10	黄群藻 <i>Synura</i> sp.	0.046			
	n18	单鞭金藻 <i>Chromulina</i> sp.		0.020	0.041	
	n33	华美色金藻 <i>Chromulina elegans</i> .				0.082
蓝藻门	n12	卷曲鱼腥藻 <i>Anabaena circinalis</i> Rab.	0.121			
	n13	鱼腥藻 <i>Anabaena</i> sp.	0.033		0.060	
	n14	微小色球藻 <i>Chroococcus minutus</i> .	0.022			
	n21	束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> sp.		0.304	0.028	
	n22	纤细席藻 <i>Phormidium tenue</i> .		0.065		

续表 5

门类	编号	优势种	呼伦湖	岱海	乌梁素海	居延海
绿藻门	n23	假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> sp.		0.105	0.027	
	n28	细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i> .				0.256
	n29	马氏平裂藻 <i>Merismopedia marssonii</i> .				0.245
	n30	极小集胞藻 <i>Synechocystis minuscula</i> .				0.031
	n31	阿氏席藻 <i>Phormidium allorgei</i> .				0.126
	n1	针形纤维藻 <i>Nitzschia acicularis</i> .	0.021	0.020	0.025	
	n2	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.	0.037		0.033	
	n3	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp.	0.077			
	n4	空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.	0.021			
	n5	短鼓藻 <i>Cosmarium abbreviatum</i> Racib.	0.022	0.020		
	n7	空球藻 <i>Eudorina</i> sp.	0.024			
隐藻门	n8	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> .	0.050		0.067	
	n6	四足十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i> .	0.166			
	n9	螺旋弓形藻 <i>Schroederia spiralis</i> .	0.042			
	n17	实球藻 <i>Pandorina morum</i> O.F.Müll. Bory		0.024		
	n32	美丽网球藻 <i>Dictyosphaerium pulchellum</i> .				0.049
	n11	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.		0.028		
	n19	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i> Butcher		0.020		
	n24	裸藻 <i>Euglena</i> spp.		0.089		
	n27	尾裸藻 <i>Euglena caudate</i> .			0.020	
	n25	薄甲藻 <i>Glenodinium</i> sp.		0.024		

注:优势度>0.02为优势种,优势度>0.1为绝对优势种.

2.1.3 浮游植物多样性 4 个湖泊浮游植物多样性有明显的差异:呼伦湖的 Shannon-Wiener(H')与均匀度(J)均显著低于其它湖泊,而岱海 H' 明显高于乌梁素海与居延海, J 无明显差异;但呼伦湖丰富度指数(D)明显高于岱海与居延海,且 4 个湖泊间的丰富度指数差异显著(图 3).基于 H' , J 和 D 的湖泊营养状态

评价结果表明: H' 表明呼伦湖的营养状态为中富营养,岱海,乌梁素海和居延海的营养状态为中营养; J 表明除呼伦湖的营养状态为中营养外,其余湖泊营养状态都为极贫营养; D 表明呼伦湖和居延海的营养状态为中营养,岱海为中富营养,乌梁素海为贫中营养.相同湖泊,三种多样性指标的评价结果不一致.

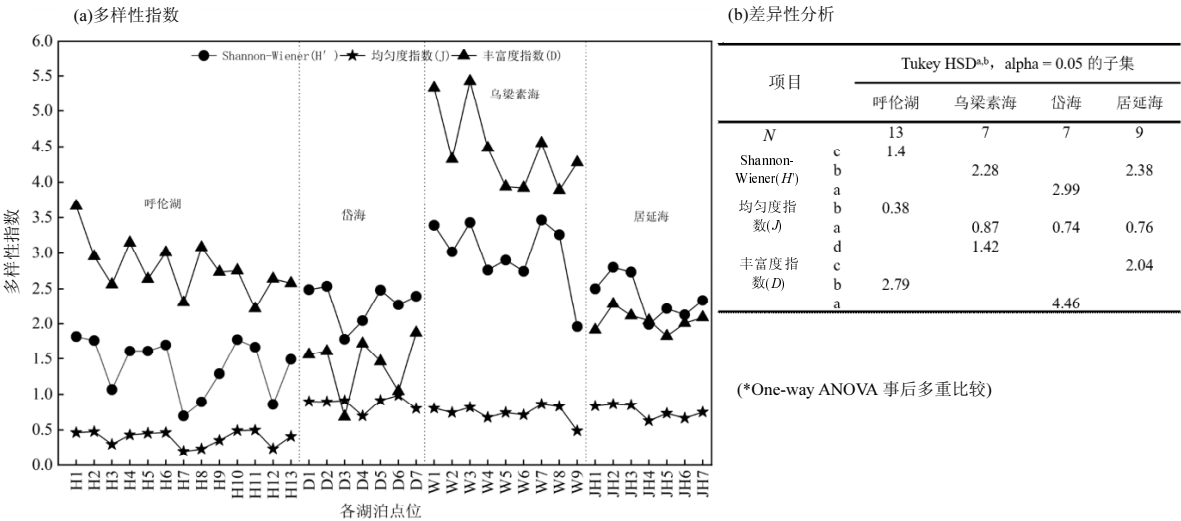


图 3 内蒙古各湖泊浮游植物多样性指数与差异性分析
Fig.3 Phytoplankton diversity indices and variance analysis

2.1.4 湖泊间浮游植物群落相似性 结果表明湖泊间浮游植物群落差异明显(表 6),其中乌梁素

海与呼伦湖为中度相似,岱海与乌梁素海,呼伦湖呈轻度相似,而居延海与其他湖泊差异较大,为极

不相似.

表 6 内蒙古典型湖泊浮游植物群落相似度指数
Table 6 Similarity index of phytoplankton community

湖泊	呼伦湖	岱海	乌梁素海	居延海
呼伦湖	1	0.38	0.67	0.08
岱海	轻度相似	1	0.33	0.05
乌梁素海	中度相似	轻度相似	1	0.09
居延海	极不相似	极不相似	极不相似	1

2.2 浮游植物群落与环境因子的关系

2.2.1 多样性指数与环境因子的关系 结果显示营养盐是浮游植物多样性指数 H' , J , D 的主要影响因素,富营养状态会在一定程度上对 H' , J 产生负影

响. T , SD ,水深,pH 值,TDS 和 SAL 等都是多样性指数的重要影响因子,值得注意的是,除 T 外的其他环境因子都对 D 和 H' 呈负相关(表 7).

2.2.2 浮游植物丰度与环境因子的关系 将各湖泊不同门类浮游植物丰度与环境因子进行相关性分析,结果显示,浮游植物丰度与环境因子之间的相关性在湖泊之间差异明显.呼伦湖蓝藻丰度与水深和 TLI 显著相关,居延海蓝藻丰度与 T 显著相关,但岱海各门浮游植物丰度均与环境因子没有显著相关关系.从环境因子上看, NH_4^+-N ,TLI, H 与呼伦湖和居延海浮游植物丰度有显著相关关系;EC 和 SAL 与 3 个湖泊的浮游植物丰度都呈显著关系.

表 7 浮游植物多样性指数与环境因子的相关性
Table 7 Correlation matrix between phytoplankton diversity index and environmental factors

指数	Chl.a	TN	TP	SD	TLI	NH_4^+-N	H	T	pH 值	EC	DO	TDS	SAL
H'	-0.59**	-0.76**	-0.63**	0.53**	-0.78**	-0.14	-0.61**	-0.05	-0.73**	-0.09	-0.34*	0.16	0.13
J	-0.77**	-0.70**	-0.33*	0.70**	-0.67**	-0.52**	-0.34*	-0.45**	-0.50**	0.001	-0.25	0.61**	0.59**
D	0.24	-0.20	-0.61**	-0.13	-0.32	0.68**	-0.47**	0.53**	-0.50**	-0.35*	-0.31	-0.65**	-0.64**

注:* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

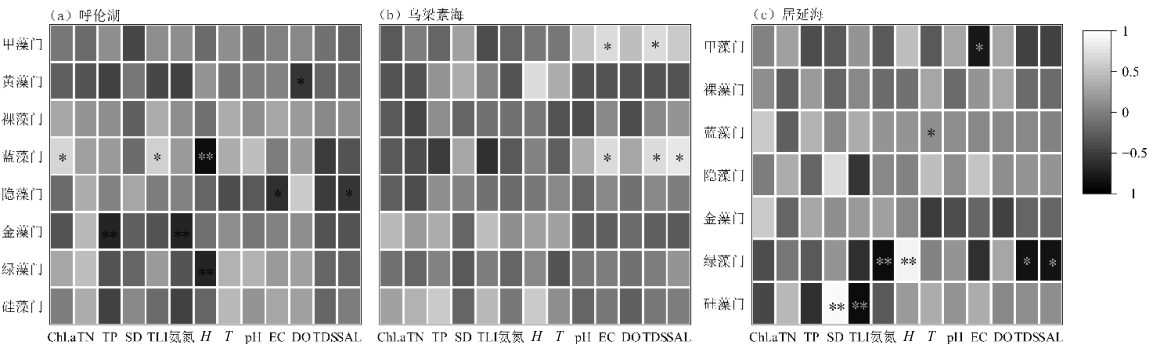


图 4 各湖泊各门类浮游植物丰度与环境因子相关性分析
Fig.4 Correlation analysis between phytoplankton abundance and environmental factors
* $P<0.05$; ** $P<0.01$

2.2.3 浮游植物优势种与环境因子的 CCA 分析 4 个湖泊共筛选出优势种 33 种,将各湖泊浮游植物优势种属(优势度 $Y\geq 0.02$)与 TN,TP,DO 等 12 项环境因子进行典范对应分析(CCA,梯度长度 6.9).结果显示,共筛选出 6 个对浮游植物优势种起重要作用的影响因子,即 TLI, T ,TDS, NH_4^+-N ,SAL,pH 值,其对浮游植物优势种的共同解释率达 72.1%,TLI 解释率为 23.3% ($P=0.002$, $F=10.3$), T 为 18.1% ($P=0.002$, $F=10.2$), TDS 为 21.8 ($P=0.002$, $F=18.9$), NH_4^+-N 为 3.7% ($P=0.006$, $F=3.4$),SAL 为 3.1%($P=0.008$, $F=3.0$)和 pH 值为 2.1%

($P=0.01$, $F=2.2$),且第一排序轴和第二排序轴累计解释了 53.64%的浮游植物信息,这说明排序图较好地反映了浮游植物与环境因子之间的关系(图 5).

4 个湖泊浮游植物样本明显分开,表明湖泊间浮游植物群落差异明显.呼伦湖浮游植物优势种主要位于第三象限,其中 n1(针形纤维藻),n2(纤维藻),n8(四尾栅藻)和 n13(鱼腥藻)离排序轴中心较近,说明其受多个环境因子的影响,而其他优势种与 pH 值,TLI 呈正相关,与 SAL,TDS 呈负相关.乌梁素海优势种位于第二象限,岱海优势种位于第二三象限中

间,二者与SAL,TDS 呈正相关,与 pH 值和 TLI 呈反比。居延海优势种位于第四象限,与 T 呈明显的正相关关系,与其他环境因子相关关系相对较弱。

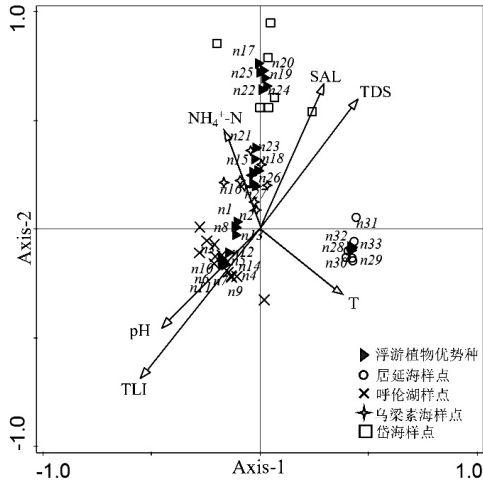


图5 浮游植物优势种与环境因子 CCA 排序

Fig.5 CCA ordination of phytoplankton and environmental factors

2.3 湖泊营养盐状态

4 个湖泊的营养状态差异显著。呼伦湖、岱海、乌梁素海和居延海 TN 浓度均值分别为 7.03,3.53,1.08 和 1.6mg/L(图 6a)。呼伦湖 TN 浓度最高,约是岱海 TN 的 2 倍,是乌梁素海与居延海的 5~6 倍,且呼伦湖和岱海 TN 浓度呈现较大的空间差异。4 个湖泊 TP 浓度均值分别为 0.16,0.19,0.03 和 0.1mg/L(图 6b),TP 浓度水平较为相近,其中岱海和呼伦湖 TP 浓度较高,乌梁素海最低。

综合富营养化指数评价,结果显示,呼伦湖 TLI(Σ)均值为 82.13,总体呈重度富营养状态,岱海 TLI(Σ)均值为 67.02,总体呈中度富营养状态,乌梁素海、居延海 TLI(Σ)均值分别为 54.72,66.08,分别呈轻度富营养状态和中度富营养状态(图 6c)。整体来看,呼伦湖富营养化状况最严重,为重度富营养化;岱海、居延海和乌梁素海均呈中度富营养状态。

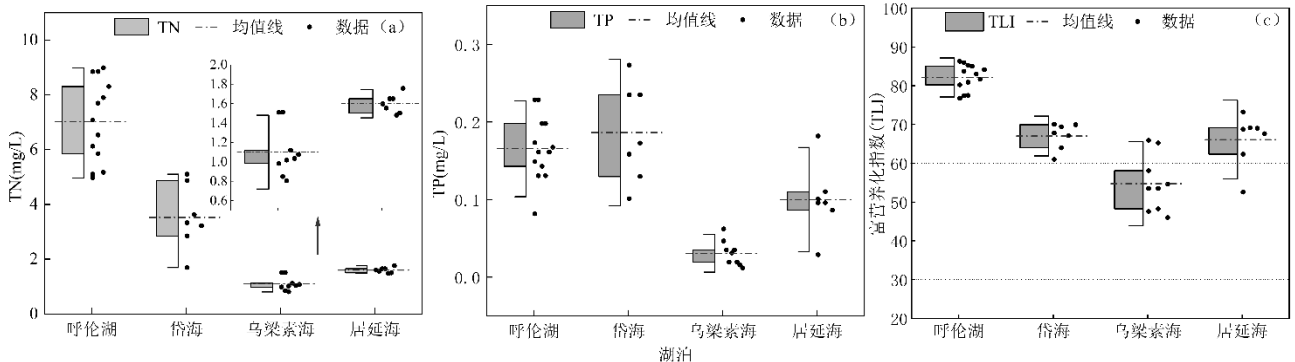


图6 内蒙古典型湖泊 TN,TP 和 TLI 分布

Fig.6 Distribution of TN, TP and TLI

3 讨论

3.1 内蒙古典型湖泊浮游植物群落结构特征

结果显示,呼伦湖、岱海和乌梁素海浮游植物种类主要由硅藻、绿藻和蓝藻组成,三类群占总种数的 80%以上,而居延海则是以蓝藻、绿藻和金藻为主。丰度上,呼伦湖和居延海浮游植物主要由蓝藻和绿藻组成,这与查干湖(2015 年)^[27]、洱海(2016 年)^[5]、达里诺尔湖(2015 年)^[13]研究结果一致;乌梁素海以硅藻、绿藻为主;岱海蓝藻、绿藻、硅藻和裸藻数量相当,且总丰度较其他湖泊小一个数量级。除岱海外,呼伦湖、乌梁素海和居延海的调查结果与杨朝霞^[28](呼伦湖

2019 年)、Chen^[29]、孙鑫^[30](乌梁素海 2016 年,2019 年)和郝媛媛^[15](居延海 2014 年)等人的研究结果相近,说明其浮游植物群落结构及水体环境处于相对稳定的状态。岱海浮游植物相较于吴东昊^[31]、徐兆安^[32]的研究结果种类增多了 35 种而丰度下降了 3 个数量级。

从湖泊面积来看,呼伦湖与乌梁素海面积更大,能为浮游植物提供更丰富的生境,本研究结果也表明两湖的物种多样性更高。相对其他类群,蓝藻喜高温,受气候影响,内蒙古夏季气温较高(蓝藻适宜的生长温度:25~35℃)^[33],居延海夏季水体平均温度更是达 27℃以上,这可能是蓝藻在居延海占绝对优势的

主要原因.相比于硅藻,蓝藻和绿藻更偏好静止或弱紊动的水体^[34],乌梁素海自 2015 年以来加大生态补水量^[35],每年自湖冰消融(3 月下旬)开始补水,并于 7 月雨季来临前加大排水预防山洪,大排大补下对湖水的扰动较强,可能是硅藻门浮游植物在乌梁素海形成生长优势的重要原因.岱海浮游植物结构与其他湖泊有较大的差异,盐度和矿化度的急剧增长可能在一定程度上抑制了适宜淡水生境的浮游植物生长.

3.2 浮游植物与环境因子的关系

环境选择是浮游植物群落结构形成的主导作用^[4].浮游植物多样性是浮游植物群落的主要特征.本研究结果表明,3 个多样性指数与 TN,TP,TLI,H 以及 pH 值都呈负相关,表明营养盐升高可能导致浮游植物群落多样性下降.

由 CCA 分析的结果表明,TLI,T,TDS,NH₄⁺-N,SAL,pH 值($P<0.01$)是浮游植物群落结构的主要影响因子,其对浮游植物优势种共同解释率达 72.1%,但优势种对环境因子的响应表现出显著的湖泊间差异.水体营养状态是浮游植物种群和组成的重要影响因子^[36],高温条件下,中营养或富营养化的水体中易暴发蓝藻水华,而重富营养化水体由于绿藻的竞争抑制作用反而不易形成蓝藻水华^[37],这可能是蓝藻在呼伦湖中仅在丰度上占据主导地位,而居延海中在丰度和种类上都占据主导地位的原因.此外,CCA 分析表明,TN,TP 浓度对浮游植物优势种无显著影响,而 NH₄⁺-N 对其有显著影响.这是由于 4 个湖泊氮、磷浓度都满足藻类生长需要的临界值(0.2 和 0.02mg/L)^[38],而浮游植物新陈代谢更偏好于铵态氮^[39].

pH 值是水体重要的理化因子,对浮游植物的生长繁殖有重要作用^[40].4 个湖泊 pH 值常年>8,高 pH 值环境有利于蓝藻^[41]发挥竞争优势,可能是蓝藻成为浮游植物主要组成的重要原因.

3.3 营养状态评价对比

基于浮游生物多样性指数(H' , D , J)对水体营养状态评价的结果与基于综合营养状态指数的评价结果不一致,前者评价的营养状态低于后者.类似情况在其他水体^[10,42]也有出现.印度迈索尔的 10 个湖泊(2010 年)^[43],太湖(2019 年)^[44]和白洋淀(2014 年)^[45]等湖泊两种评价结果相近,主要是因为其湖泊生态系统中浮游植物多样性与丰度较高,并且多样性指

数与环境因子有较好的相关性.而本研究中,四个湖泊的多样性指数 H' , D , J 与 TN,TP 以及 TLI 的相关性差异明显,表明多样性指数与营养盐的响应关系不同,这可能是以 H' , D , J 指数评价结果不一致的原因.同时,SAL,TDS 和 pH 值也与多样性指数有显著相关关系,表明这些因子可能影响浮游植物与营养盐的响应关系.有研究表明,在地理跨度大,地形复杂的河流生态系统,浮游植物并不是合适的水质评价指标^[46],同样湖泊浮游植物多样性在经度,纬度以及海拔等方面也显现出很强的梯度变化^[47],并且其显著区域特征可能会在一定程度上削弱浮游植物与环境因子之间的关系.因此,目前形成的基于浮游植物多样性的水质评价标准并不适合在内蒙古高原地区湖泊.对湖泊富营养化评价,应当充分考虑多样性指标及其主要的受控因子,并结合理化因子进行多种方式综合评价.

表 8 各湖泊营养状态评价结果
Table 8 Evaluation results of nutrient status

评价指标	营养状态评价结果			
	呼伦湖	岱海	乌梁素海	居延海
丰富度(D)	中营养	中富营养	贫中营养	中营养
多样性指数(H')	中富营养	中营养	中营养	中营养
均匀度(J)	中营养	贫营养	贫营养	贫营养
综合营养指数(TLI)	重度富营养	中度富营养	轻度富营养	中度富营养

4 结论

4.1 呼伦湖,岱海,乌梁素海和居延海浮游植物种类数分别 101 种,44 种,125 种和 42 种.其中岱海浮游植物丰度最低蓝藻最少,居延海浮游植物种类数最少蓝藻优势度最大.

4.2 4 个湖泊浮游植物共有 33 个优势种,各湖优势种组成存在明显差异,TLI,T,TDS,NH₄⁺-N,SAL,pH 值是影响优势种组成的主要因子.

4.3 基于浮游植物多样性指数的富营养评价结果显著低于基于综合营养状态指数的评价结果,目前的多样性评价标准不适用于该区域水体评价,建议使用生物评价和理化指标评价等多种方法进行综合评价.

参考文献:

[1] 朱为菊,庞婉婷,尤庆敏,等.淮河流域春季浮游植物群落结构特征及

- 其水质评价 [J]. 湖泊科学, 2017,29(3):637-645.
- Zhu W J, Pang W T, You Q M, et al. Phytoplankton community structure and the evaluation of water quality in spring, Huaihe River Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2017,29(3):637-645.
- [2] Mwedzi T, Bere T, Mangadze T. Macroinvertebrate assemblages in agricultural, mining, and urban tropical streams: implications for conservation and management [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(11):11181-11192.
- [3] 谢 斌,张 硕,李 莉,等.海州湾海洋牧场浮游植物群落结构特征及其与水质参数的关系 [J]. 环境科学学报, 2017,37(1):121-129.
- Xie Y, Zhang S, Li L, et al. Community structure of phytoplankton in the sea farming of Haizhou Bay and its relationship with environmental factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(1):121-129.
- [4] Kim H G, Hong S, Kim D K, et al. Drivers shaping episodic and gradual changes in phytoplankton community succession: taxonomic versus functional groups [J]. Science of the Total Environment, 2020,734:138940.
- [5] 杨洪允,周 雯,乔永民,等.洱海浮游植物群落结构及其与环境因子分析 [J]. 环境科学与技术, 2021,44(7):123-132.
- Yang H Y, Zhou W, Qiao Y M, et al. Community structure of Phytoplankton and its relationship with environmental factors in Erhai Lake [J]. Environmental Science & Technology, 2021,44(7):123-132.
- [6] Nguyen G T, Truong D H. Interrelation of phytoplankton and water quality at Bung Binh Thien reservoir, An Giang province, Vietnam [J]. Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability, 2020,4(4):110-115.
- [7] Elliott J A, Jones I D, Thackeray S J. Testing the sensitivity of phytoplankton communities to changes in water temperature and nutrient load, in a temperate lake [J]. Hydrobiologia, 2006,559(1):401-411.
- [8] Stoermer E F. Qualitative characteristics of phytoplankton assemblages [J]. Algae as Ecological Indicators, 1984,117:49-67.
- [9] Hosmani S P. Phytoplankton diversity in lakes of Mysore district, Karnataka state, India [J]. The Ecoscan, 2010,4(1):53-57.
- [10] 吉正元,刘绍俊.抚仙湖浮游植物群落结构,影响因子及水质评价 [J]. 中国环境监测, 2019,35(4):67-77.
- Ji Z Y, Liu S J. Phytoplankton community structure, related influencing factors and the evaluation of water quality in Fuxian Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2019,35(4):67-77.
- [11] Borics G, Görgényi J, Grigorszky I, et al. The role of phytoplankton diversity metrics in shallow lake and river quality assessment [J]. Ecological indicators, 2014,45:28-36.
- [12] Chen W, Ren K, Isabwe A, et al. Stochastic processes shape microeukaryotic community assembly in a subtropical river across wet and dry seasons [J]. Microbiome, 2019,7(1):1-16.
- [13] 徐 琼,贾克力,李文宝,等.达里诺尔湖夏季浮游植物群落结构及分布特征 [J]. 水生态学杂志, 2016,37(6):14-22.
- Xu J, Jia K L, Li W B, et al. Characteristics of summer phytoplankton community structure in Dalinore Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2016,37(6):14-22.
- [14] Stomp M, Huisman J, Mittelbach G G, et al. Large-scale biodiversity patterns in freshwater phytoplankton [J]. Ecology, 2011,92(11):2096-2107.
- [15] 郝媛媛,孙国钧,张立勋,等.黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2014,26(1):121-130.
- Hao Y Y, Sun G J, Zhi L X, et al. Relationship between community characteristics of phytoplankton and environmental factors in Heihe River Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2014,26(1):121-130.
- [16] 傅 侃,周筱宇,柴 夏,等.呼伦湖流域浮游植物群落结构特征与历史演替趋势 [J]. 环境生态学, 2021,3(9):27-32.
- Fu K, Zhou Y N, Chai X, et al. Characteristics of phytoplankton community structure and its historical succession trend in Hulun Lake Basin [J]. Environmental Ecology, 2021,3(9):27-32.
- [17] 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 [J]. 水产学杂志, 2020,33(3):31-41.
- Li X C, Yu H X, Dou H S, et al. Phytoplankton functional groups and related influencing factors in Hulun Lake and adjacent waters in spring [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2020,33(3):31-41.
- [18] 周云凯,姜加虎,黄 群,等.内蒙古岱海水质咸化过程分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2008,22(12):51-55.
- Zhou Y K, Jiang J H, Huang Q, et al. Analysis on water salinization process of Daihai lake in Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008,22(12):51-55.
- [19] 刘 禹.重金属在冰-水-底泥多相环境介质中的迁移规律研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017.
- Liu Y. Fate and transport of heavy metals in ice-water-sediment multi-medium—A case study in Ulansuhai during its ice growing and non-freezing period [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [20] 李 蓓,张一驰,于静洁,等.东居延海湿地恢复进程研究 [J]. 地理研究, 2017,36(7):1223-1232.
- Li B, Zhang Y C, Yu J J, et al. Study on restoration process of East Juyanhai Wetland [J]. Geographical Research, 2017,36(7):1223-1232.
- [21] 杨丽萍.内蒙古额济纳旗东居延海的水生态问题与治理保护措施 [J]. 内蒙古水利, 2021,(3):42-43.
- Yang L P. Water ecological problems and protection measures in the East Juyan Sea of Ejin Banner, Inner Mongolia [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2021,(3):42-43.
- [22] 黄翔飞.湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京:中国标准出版社, 2000.
- Huang X F. Lake ecological survey observation and analysis [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [23] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [24] 胡鸿均,魏印心.中国淡水藻类—系统,分类及生态 [M]. 北京:科学出版社, 2006:1-1023.
- Hu H J, Wei Y X. Freshwater algae in China—Systems, classification and ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006:1-1023.
- [25] 于 丹,刘红磊,邵晓龙,等.北方大型居住区景观水体富营养化特征研究 [J]. 环境工程, 2017,35(50):53-57.
- Yu D, Liu H L, Shao X L, et al. Eutrophication feature study in a landscape waterbody located in a large residential district, North China

- [J]. Environmental Engineering, 2017,35(50):53-57.
- [26] 胡俊,杨玉霞,池仕运,等.邳山提灌站浮游植物群落结构空间变化对环境因子的响应[J].生态学报,2017,37(3):1054-1062.
Hu J, Yang Y X, Chi S Y, et al. Spatial the variation of phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors at the Mangshan pumping station [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(3): 1054-1062.
- [27] 李梦晓.向海与查干湖湿地浮游植物群落结构及其与水环境因子的相关性研究[D].长春:东北师范大学,2017.
Li M X. Community structure of phytoplankton and the relationship with environmental factors in Xianghai and Chagan Lake [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2017.
- [28] 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[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
Yang Z X. Analysis on the relationship between phytoplankton community characteristics and water environmental factors in Hulun Lake [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [29] Chen Xiaojiao, Li Xing, Yang Jie. The spatial and temporal dynamics of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in Wuliangsuhai Lake, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021,14(8):713.
- [30] 孙鑫,李兴,李建茹,等.乌梁素海全季不同形态氮磷及浮游植物分布特征[J].生态科学,2019,38(1):64-70.
Sun X, Li X, Li J R, et al. Distribution characteristics of different forms nitrogen, phosphorus and phytoplankton of in the whole season of Wuliang Suhai lake [J]. Ecological Science, 2019,38(1):64-70.
- [31] 吴东浩,徐兆安,马桂芳,等.内蒙古典型湖泊夏季浮游植物群落结构特征及变化[J].水文,2012,32(6):80-85.
Wu D H, Xu Z A, Ma G F, et al. Characteristics and variation of phytoplankton community assemblage in typical lakes of Inner Mongolia [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(6):80-85.
- [32] 徐兆安,马桂芳,吴东浩,等.内蒙古典型湖泊夏季浮游植物群落特征及与环境变量的关系[J].水生态学杂志,2012,33(4):58-62.
Xu Z A, Ma G F, Wu D H, et al. Characteristics of phytoplankton community in typical lakes of Inner Mongolia and their relationship with environmental factors in summer [J]. Journal of Hydroecology, 2012,33(4):58-62.
- [33] Paerl H W, Huisman J. Blooms like it hot [J]. Science, 2008,320(5872):57-58.
- [34] 李飞鹏,高雅,张海平,等.流速对浮游藻类生长和种群变化影响的模拟试验[J].湖泊科学,2015,27(1):44-49.
Li F P, Gao Y, Zhang H P, et al. Simulation experiment on the effect of flow velocity on phytoplankton growth and composition [J]. Journal of Lake Sciences, 2015,27(1):44-49.
- [35] 关丽罡,赵天祺,崔晓东.内蒙古乌梁素海水质改善措施及成效[J].水科学与工程,2021,(5):10-13.
Guan L G, Zhao T Q, Cui X D. Measures to improve the water quality of Wuliangsuhai Lake effects [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2021,(5):10-13.
- [36] 彭彦彦,戴国飞,张伟,等.鄱阳湖不同湖区营养盐状态及藻类种群对比[J].湖泊科学,2018,30(5):1295-1308.
Peng N Y, Dai G F, Zhang W, et al. Comparison of nutrient status and algal population in different lakes of Poyang Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2018,30(5):1295-1308.
- [37] 朱伟,万蕾,赵联芳.不同温度和营养盐质量浓度条件下藻类的种间竞争规律[J].生态环境,2008,(1):6-11.
Zhu W, Wan L, Zhao L F. Interspecies competition rule of algae under different temperature and nutrient concentration condition. Ecology and Environmental Sciences, 2008,(1):6-11.
- [38] 雷沛,张洪,单保庆.丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究[J].环境科学,2012,33(9):3038-3045.
Lei P, Zhang H, Shan B Q. Dynamic characteristics of nitrogen and phosphorus in the representative input tributaries of Danjiangkou Reservoir [J]. Environmental Science, 2012,33(9):3038-3045.
- [39] Dortch Q. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton [J]. Marine Ecology Progress Series, 1990,61:183-201.
- [40] Jakobsen H H, Blanda E, Staehr P A, et al. Development of phytoplankton communities: Implications of nutrient injections on phytoplankton composition, pH and ecosystem production [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2015,473:81-89.
- [41] 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环境因子的关系[J].湖泊科学,2015,27(5):902-910.
Zhang Y, Ma X F, Guo F F, et al. Community structure of Phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahe Reservoir, Hubei Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2015,27(5):902-910.
- [42] 张辉,彭宇琼,邹贤妮,等.南亚热带特大型水库浮游植物群落特征及其与环境因子的关系:以新丰江水库为例[J].湖泊科学,2022,34(2):404-417.
Zhang H, Peng Y J, Zhou X N, et al. The characteristics of Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors of a large reservoir of South China: A case study of Xinfengjiang Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(2): 404-417.
- [43] Hosmani S P. Phytoplankton diversity in lakes of Mysore District, Karnataka State, India [J]. The Ecoscan, 2010,4(1):53-57.
- [44] Wu Z, Kong M, Cai Y, et al. Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: Do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2019,658:395-404.
- [45] Yan J, Liu J, Ma M. In situ variations and relationships of water quality index with periphyton function and diversity metrics in Baiyangdian Lake of China [J]. Ecotoxicology, 2014,23(4):495-505.
- [46] Yang J R, Lv H, Isabwe A, et al. Disturbance-induced phytoplankton regime shifts and recovery of cyanobacteria dominance in two subtropical reservoirs [J]. Water Research, 2017,120:52-63.
- [47] Ding Y, Pan B, Zhao G, et al. Geo-climatic factors weaken the effectiveness of phytoplankton diversity as a water quality indicator in a large sediment-laden river [J]. Science of the Total Environment, 2021,792:148346.

作者简介: 王世欢(1997-),男,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,主要从事湖泊水环境污染物控制与修复研究。