

# 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

徐兆安<sup>1</sup>, 马桂芬<sup>2</sup>, 吴东浩<sup>1</sup>, 王玉<sup>1</sup>, 高怡<sup>1</sup>

(1. 太湖流域管理局水文水资源监测局, 江苏 无锡 214024; 2. 内蒙古自治区水文总局, 呼和浩特 010010)

**摘要:**2011年8月对内蒙古岱海、乌梁素海和呼伦湖3个典型湖泊的浮游植物群落结构及水环境状况进行了调查。结果表明,3个湖泊共采集到浮游植物92种,隶属于6门、24科、47属,未采集到黄藻门和金藻门种类。岱海、乌梁素海和呼伦湖分别采集到浮游植物19种、55种和55种。岱海优势种为绿藻中的卵囊藻(*Oocystis* sp.),占浮游植物总密度的73%;乌梁素海和呼伦湖的优势种群均为蓝藻,但优势种不同,乌梁素海的优势种依次为颤藻(*Oscillatoria* sp.)、假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)和阿氏项圈藻(*Anabaenopsis arnoldii*),三者占到浮游植物总密度的76%;呼伦湖的优势种依次为点状平裂藻(*Merismopedia minima*)、螺旋鱼腥藻(*Anabaena variabilis*)和柔细束丝藻(*Aphanizomenon issatschenkoi*),三者占到浮游植物总密度的53%,反映出浮游植物群落结构之间的差异。3个湖泊均已达到富营养水平,部分指标超过V类水标准。典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)表明,Cd和COD<sub>Mn</sub>是影响夏季岱海浮游植物群落演替的重要因子,TP和BOD<sub>5</sub>是乌梁素海的重要因子,浊度、DO、TN和pH等因子对呼伦湖的影响作用较大,其中浊度的影响作用最大。

**关键词:**浮游植物;群落结构;环境因子;典型湖泊;内蒙古

**中图分类号:**X826 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2012)04-0058-05

内蒙古自治区有大小湖泊1 000多个,由于地处特殊的地理环境,湖泊生态系统较为脆弱(李亚威和韩天成,2000)。一直以来,关于内蒙古湖泊的调查评估更多的是关注水质及水文要素的变化(孙占东等,2005;岳彩英等,2008;张晓晶等,2009;曾海鳌和吴敬禄,2010),鲜有水生态方面的研究或仅局限在湖泊某一水体(李宝林等,1993;武国正等,2008;庞科等,2011;王俊等,2011)。本文以内蒙古的岱海、乌梁素海和呼伦湖3个典型湖泊为对象,调查了浮游植物群落结构和水环境现状,并分析二者之间的关系,旨在准确反映内蒙古地区湖泊的浮游植物群落结构现状,为湖泊生态管理提供参考。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 区域概况

2011年8月调查了岱海、乌梁素海和呼伦湖的浮游植物。内蒙古湖泊以湖面小和湖水浅的居多,淡水湖少而盐湖居多。岱海湖泊面积为109 km<sup>2</sup>,受工业污染较为严重(孙占东等,2005;高兴东,2006);乌梁素海湖泊面积为293 km<sup>2</sup>,是黄河中上游重要的保水、蓄水和调水基地,其补水来源主要是

河套灌区的农田退水(张利等,2009;张亚丽等,2011);呼伦湖是内蒙古地区最大的湖泊,但面积逐年萎缩,目前仅为1 700 km<sup>2</sup>,是典型的“藻型”湖泊,属国家级自然保护区,并于2002年加入了“国际重要湿地”,被联合国教科文组织纳入世界生物圈保护区网络,是世界重要湿地之一(李宝林等,1993;王俊等,2011)。在3个湖泊各设置了4个站点,共12个站点(表1)。站点的设置综合考虑了调查湖泊不同水域的污染状况以及河流来水的影响。

### 1.2 样本采集与检测

现场测定水温(T)、透明度(SD)、酸碱度(pH)和溶解氧(DO)。总磷的测定采用钼酸铵分光光度法(GB11893-1989);总氮经过碱性过硫酸钾消解后用紫外分光光度法测定(GB11894-1989);氨氮的测定采用纳氏试剂分光光度法(GB7479-1987);硝态氮的测定采用酚二磺酸分光光度法(GB7480-1987);生化需氧量的测定采用稀释与接种法(GB7488-1987);总硬度采用EDTA测定法(GB7477-1987);铜、镉、铅、锌的测定采用原子吸收分光光度法(GB7475-1987)。

浮游植物定量样品用有机玻璃采水器在水深0.5 m处采集水样1 000 mL,现场加入15 mL鲁哥试剂并摇匀,带回实验室静置沉淀48 h后浓缩并定容至50 mL供镜检。镜检前先将浓缩沉淀水样充分摇匀,然后立即准确吸取0.1 mL样品注入0.1 mL计数框内(20 mm×20 mm),在盖盖玻片时,要求计

收稿日期:2012-02-10

基金项目:水利部水文局西部典型湖库生态调研项目。

作者简介:徐兆安,1972年生,男,高级工程师,主要从事水质及水生态监测工作。E-mail: xuzhaoran@vip.sina.com

数框内没有气泡,样品不溢出计数框。人工镜检在10×40倍显微镜下进行(水利部中国科学院水库渔业研究所,1997)。每个样本计数2片取其平均值,

同一样品的2片计算结果误差在±15%视为有效,否则还必须再取样测定。浮游植物鉴定参照胡鸿均和魏印心(胡鸿均和魏印心,2006)。

表1 内蒙古生态调研湖泊站点位置

Tab.1 Geographic location of sampling sites of studied lakes in Inner Mongolia

编号	站名	经纬度	编号	站名	经纬度	编号	站名	经纬度
1	岱海 S1	40°33'17.40"N 112°37'51.06"E	5	乌梁素海 S1	40°59'39.66"N 108°51'11.58"E	9	呼伦湖 S1	48°58'32.66"N 117°26'44.87"E
2	岱海 S2	40°34'37.83"N 112°41'06.20"E	6	乌梁素海 S2	40°54'15.90"N 108°49'10.80"E	10	呼伦湖 S2	48°48'15.41"N 117°08'03.34"E
3	岱海 S3	40°35'25.20"N 112°42'46.26"E	7	乌梁素海 S3	40°49'52.68"N 108°45'3.24"E	11	呼伦湖 S3	49°03'08.32" N 117°38'04.64"E
4	岱海 S4	40°32'59.34"N 112°41'15.66"E	8	乌梁素海 S4	40°56'28.50"N 108°53'17.04"E	12	呼伦湖 S4	49°15'22.62"N 117°35'50.51"E

### 1.3 数据分析

基础数据分析在 Excel 2003 中完成,绘图在 Origin 17.0 中完成。应用 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 评价内蒙古各湖泊站点浮游植物  $\alpha$  多样性:

$$H' = - \sum_{i=1}^n \left( \frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left( \frac{n_i}{N} \right)$$

式中: $N$  为样品中所有浮游植物的总个体数; $n_i$  为第  $i$  个物种的密度。

参照地表水质量技术规程(SL395-2007)评价水体的营养程度。

典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)在 CANOCO 4.53 中完成。在进行 CCA 分析之前,首先手动删除环境变量中相关性较大 ( $|r| \geq 0.7$ ) 的变量,然后对水体理化因子数据和物种数据进行对数转换,并降低稀有种的干扰,从而减小极端值对结果的影响(吴东浩等,2010)。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质指标

3个湖泊表观特征和营养负荷存在明显差异,呼伦湖水体的透明度较低,仅为0.23 m,水体呈墨绿色,溶解氧浓度较高;乌梁素海部分站点的水体散发异味,溶解氧几乎为0,平均浓度为3个湖泊的最低,仅为2.82 mg/L;岱海水体的透明度大于另外2个湖泊,但其电导率也明显高于呼伦湖和乌梁素海,说明岱海水体中的矿物质浓度较高(表2)。

3个湖泊的营养负荷均较高,依据 TP、TN、COD<sub>Mn</sub> 平均浓度,参照地表水质量标准(GB3838-2003),分别为IV类、劣V类和劣V类。呼伦湖的TN和COD<sub>Mn</sub>浓度都较高,一定程度上反映出草原放牧对水体的负面影响。河套灌区的农田退水经过排干总渠将大量的N、P排入乌梁素海,水体中的TN

和TP浓度都较高。岱海的有机污染较严重,COD<sub>Mn</sub>和BOD<sub>5</sub>浓度都为劣V类;另外,岱海中的Cd浓度较高,反映出其受到工业污染的影响较大。水体营养评价结果表明,呼伦湖、岱海和乌梁素海分别为中度、轻度和中度富营养状态。

表2 各湖泊水环境状况

Tab.2 Water environment factors of studied lakes

指标	呼伦湖	乌梁素海	岱海
水温/°C	21.32	23.23	25.45
pH	9.34▲	8.74	9.15▲
溶解氧/mg·L <sup>-1</sup>	10.71	2.82	8.86
电导率/μS·cm <sup>-1</sup>	2 517	2 700	7725
浊度/NTU	51.60	6.82	6.76
总硬度/mg·L <sup>-1</sup>	456	662	785
透明度/m	0.23	0.68	1.01
TP/mg·L <sup>-1</sup>	0.08	0.19	0.08
TN/mg·L <sup>-1</sup>	4.59▲	3.65▲	1.95
COD <sub>Mn</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	12.43	14.35	22.98▲
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	0.05	0.08	0.03
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.04	0.12	0.03
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>	0.02	1.42	0.28
BOD <sub>5</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	2.20	41.53▲	43.80▲
Cd/mg·L <sup>-1</sup>	<DL	0.01	0.04▲
Pb/mg·L <sup>-1</sup>	<DL	<DL	0.07
Cu/mg·L <sup>-1</sup>	<DL	<DL	0.01
Zn/mg·L <sup>-1</sup>	<DL	0.03	0.05

注:▲表示超过地表水V类水标准;<DL表示低于检测限。

Note: ▲ indicated above grade v according to GB3838-2002; <DL indicated below detection limit.

### 2.2 浮游植物

3个湖泊共采集到浮游植物92种,隶属于6门、24科、47属,未采集到黄藻门和金藻门种类。岱海、乌梁素海和呼伦湖分别采集到浮游植物19种、55种和55种。岱海优势种为绿藻中的卵囊藻(*Oocystis* sp.),占浮游植物总密度的73%;乌梁素海和呼伦湖的优势种群均为蓝藻,但优势种完全不同,乌

梁素海的浮游植物优势种依次为颤藻 (*Oscillatoria* sp.)、假鱼腥藻 (*Pseudanabaena* sp.) 和阿氏项圈藻 (*Anabaenopsis arnoldii*), 三者占到浮游植物总密度的 76%; 呼伦湖的优势种依次为点状平裂藻 (*Merismopedia minima*)、螺旋鱼腥藻 (*Anabaena variabilis*) 和柔细束丝藻 (*Aphanizomenon issatschenkoi*), 三者占到浮游植物总密度的 53%, 反映出湖泊浮游植物群落结构之间的差异。

调查的 3 个湖泊浮游植物密度存在较大差异 (图 1)。呼伦湖的浮游植物密度最高, 达到  $1.87 \times 10^8$  个/L, 略高于王俊等 (2011) 的调查结果; 乌梁素海次之, 为  $1.25 \times 10^8$  个/L; 岱海最少, 为  $1.35 \times 10^7$  个/L, 3 个湖泊的平均密度为  $1.09 \times 10^8$  个/L。呼伦湖和乌梁素海的浮游植物群落多样性指数较高, 分别为 3.30 和 2.57, 岱海最低, 仅为 1.11。

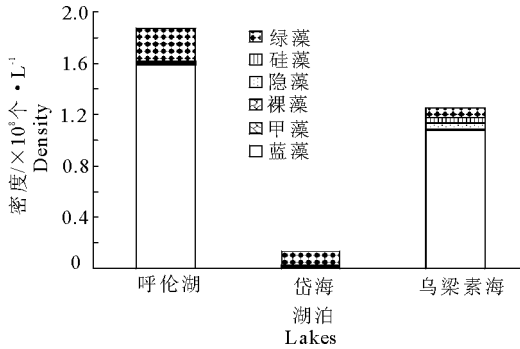


图 1 3 个湖泊的浮游植物密度比较

Fig. 1 Comparison of phytoplankton density among the studied lakes

### 2.3 浮游植物群落结构与环境变量的关系

从表 3 看出, 物种 CCA 排序轴与环境因子相关, 第一轴和第二轴的特征值分别为 0.601 和 0.559, 物种-环境相关性为 0.998 和 0.997, 物种-环境方差累计贡献率达到 41.1%。

表 3 调查湖泊站点排序的特征值和物种与环境的相关性

Tab. 3 The eigenvalues and correlations between species axes and environmental axes for sampling sites

项目	排序轴			
	1	2	3	4
特征值	0.601	0.559	0.405	0.349
物种-环境相关性	0.998	0.997	0.999	1.000
物种方差累计贡献率/%	20.4	39.4	53.1	65.0
物种-环境方差累计贡献率/%	21.3	41.1	55.5	67.9
总特征值	2.945			
总典范分析特征值	2.819			

站点与环境变量 CCA 双序图 2 中, 箭头连线的长短表示不同环境变量与调查站点浮游植物的相关性大小, 箭头连线与排序轴夹角的大小表示环境变

量与排序轴相关性的大小, 夹角越小说明关系越密切, 箭头所处的象限表示环境与排序轴之间的正负相关性。CCA 排序第一轴与生化需氧量呈正相关, 相关系数为 0.95; 与浊度负相关, 相关系数为 -0.95, 即沿 CCA 排序第一轴从左到右,  $BOD_5$  浓度逐渐升高, 水体的浊度逐渐降低。

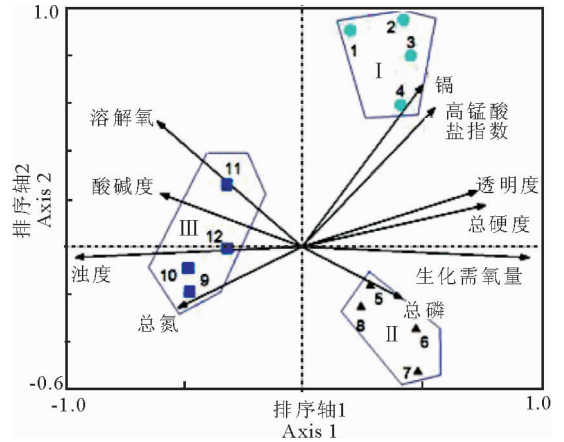


图 2 站点与环境变量 CCA 双序图

Fig. 2 Biplot of sampling sites and environmental factors in the study lakes

图 2 选取的 11 个环境变量共解释了 96% 的物种变异, 说明选取的因子具有很好的代表性。12 个站点被明显分为 3 组, 组 I 的点位于岱海, 这些站点受到 Cd 和  $COD_{Mn}$  的影响较大; 组 II 的点位于乌梁素海, 这些站点受到 TP 和  $BOD_5$  的影响作用较大; 组 III 的点位于呼伦湖, 这些站点受到浊度、DO、TN 和 pH 等因子的影响作用较大, 其中浊度的影响作用最大。组 I、II 和 III 之间的相互距离比较远, 说明 3 个湖泊各站点的浮游植物群落结构相似性较高且存在明显差异。

## 3 讨论

### 3.1 内蒙古湖泊的水环境状况

呼伦湖、岱海和乌梁素海是内蒙古地区不同面积的代表, 呼伦湖是内蒙古面积最大的湖泊, 是典型的草原型湖泊, 受到草原放牧的影响较大; 岱海和乌梁素海则分别是内蒙古地区小型和中型湖泊的代表, 受工业和农业的影响较大。总体而言, 内蒙古地区的湖泊有机污染较严重, 部分指标为劣 V 类。近 50 年来, 我国北方呈现出明显的暖干化趋势 (邓振镛等, 2010), 加之入湖水量的锐减, 导致蒙新高原的湖泊均表现出面积萎缩、水位下降、水量下降和水资源短缺加重, 在这一过程中, 人为干扰逐渐加强, 所以内蒙古地区湖泊水质持续恶化, 富营养化更加

严重,水生态环境呈现退化趋势(曾海鳌和吴敬禄,2010;张亚丽等,2011)。

### 3.2 湖泊群落结构存在差异的原因

有害蓝藻通常是富营养化湖泊浮游植物的优势种(Yamamoto & Nakahara,2009)。呼伦湖与乌梁素海的浮游植物优势种群均为蓝藻且密度较高,但岱海浮游植物优势种群为绿藻中卵囊藻而并非蓝藻。岱海的电导率为  $7\ 725\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ,明显大于另外2个湖泊;一般认为当总碱度大于  $3.5\ \text{meq}/\text{L}$  时,会抑制水生生物正常生长。赵斌等(2000)调查结果表明,岱海的总碱度已远超  $3.5\ \text{meq}/\text{L}$ ;水体的重金属超标,这些特殊的环境条件可能是已达富营养化水平的岱海浮游植物优势种为绿藻的一个重要原因(Oliva et al, 2001)。呼伦湖和乌梁素海的蓝藻优势种完全不同,浮游植物群落结构存在明显差异,这可能与所调研湖泊的地理位置差异较大有关;另外,2个湖泊的 N、P 浓度及 N/P 比差异较大,导致二者的群落结构存在明显差异(孙凌等,2006;许海等,2011)。

### 3.3 影响湖泊群落结构变化的关键因子

CCA 分析结果表明,岱海中 Cd 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  是影响其水体浮游植物变化的重要因子;乌梁素海中 TP 和  $\text{BOD}_5$  是重要因子;呼伦湖因面积大,浊度、DO、TN 和 pH 等因子的影响作用较大,其中浊度的影响作用最大。影响3个湖泊夏季浮游植物群落结构变化的主要环境变量有所不同,在湖泊生态管理中应采取有针对性的措施。

#### 参考文献

邓振镛,王强,张强,等.2010.中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J].生态学报,30(22):6278-6288.

高兴东.2006.岱海湖泊营养盐的环境地球化学特征研究[D].呼和浩特:内蒙古大学.

胡鸿均,魏印心.2006.中国淡水藻类——系统、分类及生态[M].北京:科学出版社.

李宝林,王玉亭,张路增.1993.以浮游植物评价达赉湖水质污染及营养水平[J].水生生物学报,17(1):27-34.

李亚威,韩天成.2000.内蒙古湖泊水资源及主要环境问题[J].内蒙古环境保护,(2):17-21.

庞科,姚锦仙,王昊,等.2011.额尔古纳河流域秋季浮游植物群落结构特征[J].生态学报,31(12):3391-3398.

水利部中国科学院水库渔业研究所.1997.水库渔业资源调查技术规范(SL-167-1996)[S].

孙凌,金相灿,钟远,等.2006.不同氮磷比条件下浮游藻类群落变化[J].应用生态学报,17(7):1218-1223.

孙占东,姜加虎,黄群.2005.近50年岱海流域气候与湖泊水文变化分析[J].水资源保护,21(5):16-18.

王俊,冯伟业,张利,等.2011.呼伦湖水质和生物资源量监测及评价[J].水生态学杂志,32(5):64-68.

吴东浩,张勇,于海燕,等.2010.影响浙江西苕溪底栖动物分布的关键环境变量指示种的筛选[J].湖泊科学,22(5):693-699.

武国正,李畅游,周龙伟,等.2008.乌梁素海浮游动物与底栖动物调查及水质评价[J].环境科学研究,21(3):76-81.

许海,朱广伟,秦伯强,等.2011.氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J].中国环境科学,31(10):1676-1683.

岳彩英,赵卫东,李明娜,等.2008.达赉湖水质状况及影响因素分析[J].内蒙古环境科学,20(2):7-9.

曾海鳌,吴敬禄.2010.蒙新高原湖泊水质状况及变化特征[J].湖泊科学,22(6):882-887.

张利,刘海涛,高文海,等.2009.乌梁素海生态治理技术[J].水生态学杂志,28(6):141-145.

张晓晶,李畅游,贾克力,等.2009.乌梁素海水体透明度分布及影响因子相关分析[J].湖泊科学,21(6):879-884.

张亚丽,许秋瑾,席北斗,等.2011.中国蒙新高原湖区水环境主要问题及控制对策[J].湖泊科学,23(6):828-836.

赵斌,蔡庆华,刘瑞秋,等.2000.岱海水质咸化过程中若干生态因子的变化[J].水生生物学报,24(5):502-508.

Oliva M G, Lugo A, Alcocer J, et al. 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake[J]. Hydrobiologia, 466(1): 299-306.

Yamamoto Y, Nakahara H. 2009. Seasonal variations in the morphology of bloom-forming cyanobacteria in a eutrophic pond[J]. Limnology, 10(3): 185-193.

(责任编辑 万月华)

## Characteristics of Phytoplankton Community in Typical Lakes of Inner Mongolia and Its Relationship with Environment Factors in Summer

XU Zhao-an<sup>1</sup>, MA Gui-fen<sup>2</sup>, WU Dong-hao<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, GAO Yi<sup>1</sup>

(1. Monitoring Bureau of Hydrology and Water Resources, Taihu Basin Authority, Wuxi 214024, P. R. China;

2. Bureau of Hydrology, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, P. R. China)

**Abstract:** Phytoplankton assemblages and environmental factors of Hulun Lake, Wuliangsu Lake and Daihai Lake were investigated in August, 2011. A total of 92 taxa belonging to 6 phylums (Cyanophyta, Chlorophyta, Bacillariophyta, Cryptophyta, Pyrroptata, Euglenophyta) and 24 families and 47 genera were identified. *Oocystis* sp. was the dominant species in Dai Lake, accounted for 73% of the total density. Cyanobacterium was the dominant population in other two lakes, while the main species were different, with *Oscillatoria* sp., *Pseudanabaena* sp. and *Anabaenopsis arnoldii* being the dominant species in Wuliangsu Lake and *Merismopedia minima*, *Anabaena variabilis* and *Aphanizomenon issatschenkoi* in Hulun Lake were the, which accounted for 76% and 53% of the total density respectively. These results indicated that phytoplankton community structures were different among the three lakes. According to the Chinese Standard of Surface Water Environment Quality (GB3838-2002), Three lakes all were eutrophicated, with some environmental indicators above the water quality standards of grade V. Results of CCA indicated that Cd and COD<sub>Mn</sub> were the key factors influencing phytoplankton succession in Daihai Lake, while TP and BOD<sub>5</sub> were the key factors in Wuliangsu Lake, and turbidity, DO, TN and pH were the key factors in Hulun Lake, among which turbidity was the most important.

**Key words:** phytoplankton; assemblages; environment factors; typical lakes; Inner Mongolia