

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.020

# 海子水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子

陈晓江, 杨 劼<sup>1</sup>, 杜桂森<sup>2</sup>, 刘 波<sup>3</sup>

(1. 内蒙古大学生命科学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 首都师范大学生命科学院, 北京 100045;  
3. 北京市水文总站, 北京 100081)

**摘要:**以位于北京市平谷区的北京海子水库为研究对象,以浮游植物功能群调查为基础,于2010年春、夏、秋三季对海子水库进行了生态调查;根据水库水环境特征,在北湖、南湖两个不同生境区域设置采样点,进行浮游植物水样采集,将3个季节中的浮游植物划分为16个功能群,利用典范对应分析方法,对同步取得的电导率、TN、TP、水温等环境因子与浮游植物功能群分之间的相关性进行分析。结果表明:2010年海子水库共鉴定出浮游植物74种(包括变种),分属于6门37属。浮游植物种类组成为:绿藻门20属45种,占种类总数的60.82%;蓝藻门7属11种,占14.86%;硅藻门5属8种,占10.81%;裸藻门2属7种,占9.46%;甲藻门2属2种,占2.70%;隐藻门1属1种,占1.35%。浮游植物丰度春季( $801.67 \times 10^4$  个/L) < 秋季( $3589.17 \times 10^4$  个/L) < 夏季( $13806.53 \times 10^4$  个/L), 三季均值为  $6065.78 \times 10^4$  个/L。代表性功能群的季节演替为:春季(J/Xph/P/C) → 夏季(Tc/S2/P/C) → 秋季(X1/C)。TP、水温、电导率是海子水库浮游植物功能群演替的主要驱动因子。

**关键词:**浮游植物功能群;群落结构;生态保护;季节演替;驱动因子;海子水库

中图分类号:S963.21<sup>+</sup>3 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)06-0122-06

## Seasonal succession of phytoplankton functional groups and its driving factors in Haizi Reservoir

CHEN Xiaojiang<sup>1</sup>, YANG jie<sup>1</sup>, DU Guishen<sup>2</sup>, LIU Bo<sup>3</sup>

(1. College of Life Sciences of Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;  
2. Capital Normal University College of Life Sciences, Beijing 100045, China;  
3. Beijing Hydrological Station, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Taking Beijing Haizi Reservoir in Pinggu district, Beijing, as the research object, based on phytoplankton functional group survey, ecological investigations were carried on in spring, summer and autumn, in 2010. According to the characteristics of the water environment in the reservoir area, two sampling sites were set in different ecological regions of northern lake and southern lake to collect the phytoplankton water samples. The phytoplankton in three seasons is divided into 16 functional groups. Using canonical correspondence analysis method, correlation analysis between environmental factors, including electrical conductivity, total nitrogen, total phosphorus and water temperature, and phytoplankton functional groups was conducted. The results showed that: 74 phytoplankton species (including mutations) are identified, which can be sorted into 37 genera and 6 phyla. The phytoplankton can be classified into: 45 genera and 20 species of Chlorophyta, which occupy 60.82%; 7 genera and 11 species of Cyanophyta, which occupy 14.86%; 5 genera and 8 species of Bacillariophyta, which occupy 10.81%; 2 genera and 7 species of Euglenophyta, which occupy 9.46%; 2 genera and 2 species of Pyrrhophyta, which occupy 2.70%; 1 genera and 1 species of Cryptophyta, which occupy 1.35%. Phytoplankton

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAC07B00)

作者简介: 陈晓江(1974—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水生态学。E-mail: cxjmy@126.com

通信作者: 杨劼, 教授, 博士生导师。E-mail: jyang@imu.edu.cn

abundance increased from spring ( $801.67 \times 10^4$  ind/L) < autumn ( $3\,589.17 \times 10^4$  ind/L) < summer ( $13\,806.53 \times 10^4$  ind/L). The average value in the three seasons is  $6065.78 \times 10^4$  ind/L. The dominant functional groups of the seasonal succession: Spring (J/Xph/P/C) → Summer (Tc/S2/P/C) → Autumn (X1/C). Total phosphorus, water temperature and electrical conductivity are the main driving factors of phytoplankton functional groups succession in Haizi reservoir.

**Key words:** phytoplankton functional groups; structure of community; ecological protection; seasonal succession; driving factors; Haizi Reservoir

海子水库位于北京市平谷区,主要开发有旅游业和渔业养殖业,但是在对其进行调查时的十多年来几乎没有进行库区的生态补水,水质日益下降。为了有效地恢复其湿地生态功能,需要对其生态系统结构进行深入研究,但是海子水库生态调查资料少。笔者根据实际条件,对水库进行了生态调查并进行了浮游植物功能分组的分析研究。浮游植物一般是指浮游藻类,多数为单细胞生物,而且藻类是生态系统重要的初级生产者,对环境因子的变化具有较强的敏感性<sup>[1-3]</sup>。浮游植物是一个生态学概念,诸多从生态学领域评价水质的文献资料,主要是从藻类群落构成、藻类密度变化和能够反映一定水质状况的指示种特征来揭示水环境的变化<sup>[4-8]</sup>;但是这种利用传统的浮游植物群落组成及其种类密度变化来分析水生态系统结构和功能的方法,具有局限性。20世纪80年代Lan等<sup>[9-10]</sup>依据浮游植物对环境的适应特征,提出了从生物的生态功能角度出发对浮游植物进行归类的功能类群分类法,定义了浮游植物功能群的概念,这是一种生态分类方法,与传统意义上的种类分类方法有区别,据此分析,可以客观地揭示浮游植物群落与环境因子的关系,具有重要的生态学意义<sup>[11-17]</sup>。

浮游植物功能群的概念提出后,国内外在河流湿地生态系统中进行了一定的研究,但在湖泊湿地系统的研究较少,国内查阅到的相关文献资料也较少,主要有高国敬等<sup>[11,14,17-18]</sup>对南方湖泊水库的研究。笔者以北京海子水库为研究对象,应用Colin等<sup>[10,19]</sup>确定的39个功能类群分类标准<sup>[20]</sup>,运用典范对应分析方法(CCA),对海子水库浮游植物功能群与其12个环境因子进行相关分析,通过研究海子水库浮游植物功能群季节演替动态及其驱动因子分析,以期为人工湿地——水库的生态保护提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样点设置

海子水库位于北京市平谷区,调查时储水量为1100万 $m^3$ 。依据文献<sup>[21]</sup>的论述和海子水库环境实际状况,在海子水库的南湖( $40^\circ 10.173' N$ ,  $117^\circ 18.721' E$ )、北湖( $40^\circ 10.927' N$ ,  $117^\circ 18.476' E$ )

设置了两个采样点采集水样。海子水库地理位置和采样点分布见图1。

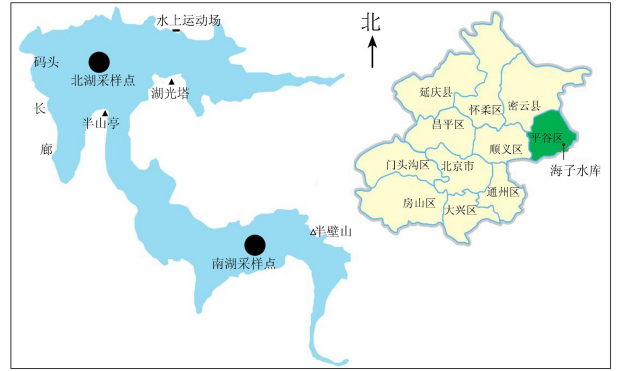


图1 海子水库地理位置和采样点分布

### 1.2 采样与监测参数设置

定性分析水样用25号浮游生物网(网孔为0.064mm的绢网)在水体表层(0.5m)以适当的速度拖动3~5min采集,然后加入贴有标签的50mL样品瓶中,并且滴入3mL甲醛液固定。定量分析水样用5L有机玻璃采水器于水体表面下0.5m处采集,取水1L加入贴有标签、带有容量刻度的1.2L样品瓶中并滴入15mL鲁哥试剂,带回实验室后在实验台上静置30h,去掉上清液浓缩至30mL再加入到有标签的50mL样品瓶中,作为浮游植物的定量鉴定的样品。定量鉴定采用显微镜视野下计数,先需要将浓缩沉淀后的瓶装水样充分摇匀,然后快速用移液枪从样品瓶中吸取0.1mL水样滴入0.1mL计数框内,盖上20mm×20mm盖玻片(注意不能有气泡)。采用视野法在显微镜下(400倍)计数浮游植物的个体数,每瓶水样标本记数两次(封装两片),每片记数100个视野,取两片数值的平均值。如果定量记数时发现了定性鉴定中没有的藻种,加记到定性统计表中。

监测参数有水深、透明度、水温、pH、电导率、DO、BOD、TN、TP、 $NH_4-N$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $COD_{Mn}$ 、Chl-a、浮游藻类(定性和定量)和水体感官性状15项指标<sup>[21]</sup>。

### 1.3 数据分析

运用Excel 2003软件统计藻类物种数和藻类密度,用CANOCO4.5软件进行去趋势分析(DCA)和典范对应分析(CCA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物群落结构特征

统计海子水库 2010 年春、夏、秋三季水样中鉴定出的浮游植物种类 74 种,分为 6 门 37 属,其中包括单角盘星藻具孔变种、二角盘星藻纤细变种、颗粒直链藻极狭变种 3 变种。其中绿藻门 20 属 45 种,占种类总数的 60.81%;蓝藻门 7 属 11 种,占 14.86%;硅藻门 5 属 8 种,占 10.82%;裸藻门 2 属 7 种,占 9.46%;甲藻门 2 属 2 种,占 2.70%;隐藻门 1 属 1 种,占 1.35%。优势种春季是绿藻门的单生卵囊藻、针形纤维藻、纤细角星鼓藻、四尾栅藻、链丝藻、多芒藻、透镜壳衣藻,硅藻门的湖沼圆筛藻、梅尼小环藻;夏季是蓝藻门的钝顶螺旋藻、绿色颤藻、优美裂面藻,绿藻门的纤细角星鼓藻、链丝藻、针形纤维藻、十字藻,硅藻门的梅尼小环藻,甲藻门的盾形多甲藻;秋季是蓝藻门的中华尖头藻,绿藻门的小球藻、美丽团藻,硅藻门的湖沼圆筛藻、梅尼小环藻。

分析海子水库 3 个季节浮游植物结构组成发现,春、夏、秋三季具有显著性差异(表 1),春季鉴定出浮游植物种类为 37 种,群落组成以绿藻门、硅藻门为优势门,其中绿藻门 18 属 22 种,硅藻门 6 属 6 种,裸藻门 2 属 5 种,蓝藻门 2 属 2 种,甲藻门 1 属 1 种,隐藻门 1 属 1 种;夏季鉴定出浮游植物种类数为 49 种,其群落组成以绿藻门、蓝藻门、硅藻门和甲藻门为优势门,其中绿藻门 19 属 25 种,蓝藻门 8 属 12 种,硅藻门 5 属 5 种,裸藻门 2 属 5 种,甲藻门 1 属 1 种,隐藻门 1 属 1 种;秋季鉴定出浮游植物种类数是 50 种,群落组成以绿藻门、硅藻门、蓝藻门为优势门,其中绿藻门 21 属 30 种,蓝藻门 7 属 8 种,硅藻门 6 属 6 种,裸藻门 2 属 3 种,甲藻门 2 属 2 种,隐藻门 1 属 1 种。

表 1 海子水库春夏秋三季浮游植物各门种类数比较

	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	裸藻门	甲藻门	隐藻门
春	2	22	6	5	1	1
夏	12	25	5	5	1	1
秋	8	30	6	3	2	1

### 2.2 浮游植物密度季节动态

海子水库浮游植物总密度春季为  $801.67 \times 10^4$  个/L,其中绿藻门的藻类相对丰度为 77.12%,硅藻门的藻类相对丰度为 13.07%,蓝藻门的藻类相对丰度为 4.58%,3 个门类的藻类相对丰度总量为 94.77%;夏季为  $13806.53 \times 10^4$  个/L,其中蓝藻门的藻类相对丰度为 68.88%,绿藻门的藻类相对丰度为 23.91%,硅藻门的藻类相对丰度为 4.74%,3 个门类的藻类相对丰度总量为 93.53%;秋季为  $3589.17 \times 10^4$  个/L,其中硅藻门的藻类相对丰度为 47.45%,蓝

藻门的藻类相对丰度为 24.82%,绿藻门的藻类相对丰度为 20.44%,3 个门类的藻类相对丰度总量为 92.71%,3 个季节浮游植物密度均值为  $6065.78 \times 10^4$  个/L。海子水库所设的采样点在春季的浮游植物总密度是南湖( $670.68.21 \times 10^4$  个/L) < 北湖( $932.66 \times 10^4$  个/L);夏季是北湖( $10269.75 \times 10^4$  个/L) < 南湖( $17343.3 \times 10^4$  个/L);秋季是南湖( $3300.99 \times 10^4$  个/L) < 北湖( $3877.36 \times 10^4$  个/L)。

### 2.3 浮游植物功能群演替

常用的浮游植物主要分类方法是林氏分类法和分子鉴定法,在生态学领域是研究浮游植物群落演替动态和进行水环境研究的基础。但是在实践应用上存在着不足,所以在种类鉴定基础上提出了浮游植物功能类群的概念,这是一种以浮游植物个体生态学为依据的生态分类法。按照 Colin 等<sup>[10,19]</sup>的功能分组划分规则,海子水库浮游植物分为 16 个功能群: M/S2/LM/G/J/F/X1/Wo/X2/C/Xph/D/P/W1/W2/Tc,功能群时空分布情况见表 2。Colin 等<sup>[10,19]</sup>提出把相对丰度大于 5% 的功能群规定为代表性功能群。通过分析,海子水库代表性功能群为 J/P/S2/C/Tc/X1/Xph。

表 2 海子水库浮游植物功能群在采样区的季节动态及相对丰度

功能群	北湖			南湖		
	春	夏	秋	春	夏	秋
Tc	0	++	0	0	0	0
Wo	+	+	+	+	+	+
M	0		+	0	+	+
S2	0	+++	0	0	++	0
J	+++	+	+	+++	+	+
G	+	+	+	+	+	+
X1	0	+	+	0	0	+++
X2	+	0	+	0	0	0
F	+	+	+	0	0	+
Xph	++	0		+	0	0
P	++	++	+	+	+	+
D	+	+	+	+	+	+
C	+++	++	+++	++	++	+
LM	0	0	+	0	0	+
W1	+	+	+	++	+	+
W2	+					

注: + 表示相对丰度小于 5%, ++ 表示大于 5%, +++ 表示大于 15%。

浮游植物功能分组以浮游植物个体生态学特征为基础,对生态环境变化与浮游植物群落演替间的相互作用关系有较清晰的解释,通过功能分组,可以更加直接地揭示生物对环境的适应性,更好地通过功能群组的演替来科学地把握环境变化情况。研究结果显示,海子水库浮游植物功能群:春季为 Wo/

G/X2/J/F/Xph/C/D/P/W1/W2, 其中代表性功能群为 J/Xph/P/C/W1; 夏季为 M/G/J/F/C/D/P/W1/LM/Wo/X1/X2, 其代表性功能群为 Tc/S2/P/C; 秋季为 M/Tc/LM/G/J/F/X2/C/D/P/W1/Wo/X1, 该季节代表性功能群为 X1 和 C。在海子水库两个采样区, 北湖代表性功能群春季为 J/Xph/P/C, 夏季为 Tc/S2/P/C, 秋季为 C; 南湖采样区代表性功能群春季为 J/C/W1, 夏季为 S2 和 C, 秋季为 X1。

## 2.4 功能群与理化因子相关性分析

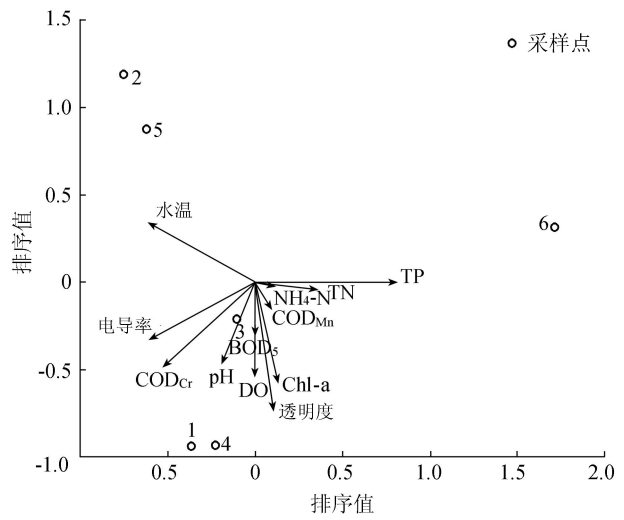
海子水库环境因子季节动态见表 3。

通过对浮游植物代表性功能群的去趋势分析(DCA), 四个轴长度梯度最大值为 2.547, 虽然最长梯度小于 3, 因为线性模型可以看作单峰模型的一种特例, 所以依然可以用单峰模型。故分析中选择单峰模型进行 CCA 分析是合适的。CCA 分析的种类与环境因子排序轴的相关性系数均为 1, 前两轴特征值分别为 0.599 和 0.463, 物种-环境关系的累积百分率为 75.7% (表 4)。在图 2 中, 与第一轴解释量较高的环境因子是 TP、水温、电导率, TP 与第一轴成正相关性 ( $P=0.0168$ ), 水温和电导率与第一轴成负相关, 从排序图上分析, 对于采样区夏季, 环境质量随着水温的升高而降低,  $\text{NH}_4\text{-N}$  和 TN 与第一轴成正相关性, 解释量较低; 与第二轴解释量较高的环境因子是透明度、Chl-a、DO、pH, 皆与第二轴成负相关性。图 2 还显示两个采样区中, 北湖春、夏、秋 (图中代表数字分别为 1、2、3) 和南湖春、夏、秋 (图中代表数字分别为 4、5、6), 两个采样区环境因子春季和夏季相似程度较高, 秋季两个样区的环境差异较大, 主要是在秋季, 南湖样区风扰动程度高于北湖样区。

表 4 排序轴特征值、种类与环境因子

排序轴的相关系数

轴序	特征值	种类-环境相关性	物种数据累积变化百分率/%	物种-环境相关性累积变化百分率/%
1	0.599	1	42.7	42.7
2	0.463	1	75.7	75.7
3	0.209	1	90.6	90.6
4	0.096	1	97.4	97.4



1—春季北湖采样点; 2—夏季北湖采样点; 3—秋季北湖采样点; 4—春季南湖采样点; 5—夏季南湖采样点; 6—秋季南湖采样点

图 2 环境因子与采样点 CCA 排序

## 3 结论

### 3.1 浮游植物功能群季节演替动态

比较 3 个季节的浮游植物功能群的差异率, 分析浮游植物功能群的演替动态, 结果显示为春季与夏季相比, 多 Wo/X2/Xph 功能群, 少 Tc/S2/M/X1 功能群, 差异率为 30.4%, 春季和夏季的代表性功能群都为 4 个功能群, 其中相同的功能群为 P 和 C, 差异率为 50%; 夏季和秋季相比多 S2 和 Tc 功能群, 少 LM 和 X2 功能群, 差异率为 16.7%, 代表性功能群夏季 4 个, 秋季 2 个, 其中相同的功能群只有 C, 差异率为 66.7%; 春季与秋季相比多 Xph 和 W2 功能群, 少 M/LM/X1 功能群, 差异率为 21.7%, 而春季代表性功能 4 个, 秋季 2 个, 其中相同的功能群只有 C, 差异率为 66.7%。上述比较说明代表性功能群更能反映出浮游植物群落季节演替特征。

### 3.2 浮游植物功能群与环境因子的相互作用

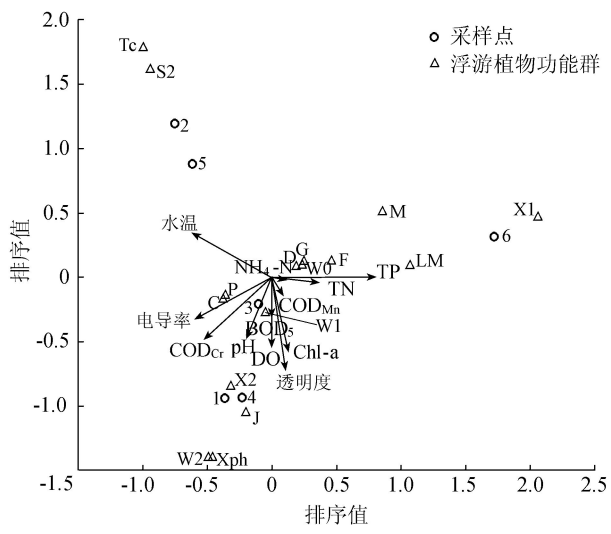
营养盐、光照、水体动力学特征、浮游动物、鱼类都会影响浮游植物功能群演替过程。海子水库长久生态水补充不足, 旅游业和养殖业发展较快, 导致水库污染严重, 在研究区域测得的 TN、TP 质量浓度最高时分别为 1.18 mg/L、0.13 mg/L, 达到了超富营养

表 3 海子水库环境因子季节动态

湖区	季节	水温/℃	pH 值	电导率/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	$\rho(\text{DO})$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NH}_4\text{-N})$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{BOD}_5)$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{TP})$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{TN})$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{Chl-a})$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	透明度/m
北湖	春	23.0	8.60	397	7.4	0.49	3.2	2.2	0.04	0.84	0.02171	15.2	1.0
	夏	28.0	7.90	370	5.9	0.48	2.6	0.4	0.03	0.92	0.00771	6.0	0.8
	秋	17.5	7.70	372	8.8	0.46	2.7	1.4	0.07	1.51	0.00871	7.1	0.9
南湖	春	23.0	8.73	344	10.2	0.24	3.4	4.6	0.08	0.86	0.01218	11.3	1.1
	夏	28.0	8.47	345	7.2	0.22	4.0	4.4	0.06	0.56	0.00968	13.0	0.7
	秋	18.0	8.02	322	7.0	0.45	3.2	2.0	0.13	1.18	0.01440	2.8	0.9

化水平。其浮游植物代表性功能群 C/J/Xph/P/S2/Tc/X1,适应的环境描述为富营养性或高度富营养型浅水水体和小型湖泊。应用 CCA 分析,从前两个排序轴上环境因子梯度长度看,浮游植物功能群演替主要驱动因子有 TP、水温、电导率、透明度、DO、pH。

水温是浮游植物生长的限制性因子,不同浮游植物群落结构对水温的适应性是不同的,在相对较高温度的环境下蓝藻、裸藻生长发育占优势,而在相对较低的水温条件下硅藻占优势,在相对中等水温条件下绿藻占优势<sup>[7,22]</sup>。海子水库在夏季有良好的光照和水温条件,所以夏季代表性功能群 Tc/S2/P/C 为喜较高水温条件的分组,在 CCA 分析图(图 3)中,该功能群类别与水温呈现一定正相关性。



1—春季北湖采样点;2—夏季北湖采样点;3—秋季北湖采样点;  
4—春季南湖采样点;5—夏季南湖采样点;6—秋季南湖采样点

图 3 采样点、功能群与环境因子的 CCA 分析

海子水库养殖业和周边农田增加了水体中的离子,引起电导率、TN 和 TP 浓度的增高,提高了海子水库水体的富营养化水平。电导率是监测水环境质量的重要参数,是影响浮游植物群落组成的重要因素之一,其变化会对浮游植物多样性产生影响<sup>[23]</sup>,水体电导率数值与水体中营养盐含量成正比<sup>[24-26]</sup>。在海子水库水体中,浮游植物功能群 Tc 和 P 因电导率的升高而种类和相对丰度增加,图 3 显示出电导率与 P 能组呈现正相关性。海子水库研究区的 TN、TP 值达到了水体富营养化的标准。CCA 分析结果显示,海子水库浮游植物功能群 W0/LM/F/D/G/M/X1 与 TP 呈正相关性,在秋季较低的水温条件下,因营养盐充足,功能群 W0/LM/M 组藻类生长良好。

水体透明度的降低会影响水生生物生长<sup>[27]</sup>。CCA 分析表明,水体透明度与第二排序轴呈负相关性(相关系数为-0.8981),因养殖和旅游增加了海子水库中营养盐含量,水体透明度受到较强影响,所

以对浮游植物群落具有较强的影响,功能群 F 藻种如湖生卵囊藻多生长于中富营养型较清澈水体中,图 3 中 F/G/M/D/W0 功能群与透明度呈正相关性。

海子水库浮游植物代表性功能群描述的是富营养化水体特征,富营养化防治关键在于降低营养盐的输入,治理好周边区域的点源和面源污染,有助于恢复海子水库湿地功能和水库生态系统可持续发展。

参考文献:

[1] 郑重. 海洋浮游生物和水域生产力[J]. 动物学杂志, 1964, 8(6): 287-289. (ZHEN Zhong. Marine phytoplankton and water productivity[J]. Chinese Journal of Zoology, 1964, 8(6): 287-289. (in Chinese))

[2] LUND J W G. The ecology of the freshwater phytoplankton [J]. Biological Reviews, 1965, 40(2): 231-290.

[3] 李建平, 吴立波, 戴永康, 等. 不同氮磷比对淡水藻类生长的影响及水环境因子的变化[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 342-346. (LI Jianping, WU Libo, DAI Yongkang, et al. Effects of different nitrogen-phosphorus ratio on the freshwater phytoplankton growth and the variations of environmental factors [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 342-346. (in Chinese))

[4] 路学堂. 东平湖浮游植物群落结构与驱动因子及蓝藻水华可能性研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.

[5] 陈长平, 高亚辉, 林鹏. 福建漳江口红树林保护区浮游植物群落季节变化研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(7): 25-31. (CHEN Changping, GAO Yahui, LIN Peng. Seasonal change of phytoplankton community in waters of mangrove in the estuarine of the Zhangjiang River, Fujian Province, China [J]. Marine Sciences, 2007, 31(7): 25-31. (in Chinese))

[6] 杨珏. 浮游植物时空发展的非线性特点与赤潮的关系研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[7] 陈晓江, 高琼, 杜桂森, 等. 北京红领巾湖的富营养化状态与水质分析[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(5): 36-39. (CHEN Xiaojiang, GAO Qiong, DU Guisen, et al. Analysis on eutrophication and water quality of Honglingjin Lake in Beijing [J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(5): 36-39. (in Chinese))

[8] 张妮, 陈晓江, 杜桂森, 等. 北京怀柔水库的浮游藻类与水体营养状态[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 55-58. (ZHANG Ni, CHEN Xiaojiang, DU Guisen, et al. Planktonic algae and trophic state in Huirou Reservoir in Beijing City [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 55-58. (in Chinese))

[9] LAN M. Physiological ecology of phytoplankton [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1980: 235-238.

[10] COLIN S R, VERA H, CARLA K, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(5): 417-428.

[11] 高国敬, 肖利娟, 林秋奇, 等. 海南省典型水库浮游植物

- 功能类群的结构特征与水质评价[J]. 生态科学, 2013, 32(2): 144-150. (GAO Guojing, XIAO Lijuan, LIN Qiuqi, et al. Structure of phytoplankton functional groups and water quality assessment of main reservoirs in Hainan Province[J]. Ecological Science, 2013, 32(2): 144-150. (in Chinese))
- [12] 黄享辉, 胡韧, 雷腊梅, 等. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 311-318. (HUANG Xianghui, HU Ren, LEI Lamei, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern China [J]. Ecology and Environmental Sciences 2013, 22(2): 311-318. (in Chinese))
- [13] 宋书群. 黄、东海浮游植物功能群研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- [14] 王雅文, 杨扬, 潘鸿, 等. 基于浮游植物功能类群的广东省大型水库生态分区初探[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 147-153. (WANG Yawen, YANG Yang, PAN Hong, et al. Ecological region classification of 10 key reservoirs in Guangdong Province based on phytoplankton functional groups[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(1): 147-153. (in Chinese))
- [15] 杨文, 朱津永, 陆开宏, 等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1833-1840. (YANG Wen, ZHU Jinyong, LU Kaihong, et al. The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1833-1840. (in Chinese))
- [16] 张怡, 胡韧, 肖利娟, 等. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 107-117. (ZHANG Yi, HU Ren, XIAO Lijuan, et al. Comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(1): 107-117. (in Chinese))
- [17] 岳强, 黄成, 史元康, 等. 粤北 2 座不同营养水平水库浮游植物功能类群的季节演替[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 432-438. (YUE Qiang, HUANG Cheng, SHI Yuankang, et al. Seasonal succession of phytoplankton function groups in two reservoirs different in eutrophic level in Northern Guangdong Province, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(4): 432-438. (in Chinese))
- [18] 高健, 周敏, 闵婷婷, 等. 惠州西湖生态修复对浮游植物功能类群的影响[J]. 生态科学, 2013, 32(5): 540-545, 563. (GAO Jian, ZHOU Min, MIN Tingting, et al. Response of the phytoplankton functional groups to ecological restoration in Huizhou Lake [J]. Ecological Science, 2013, 32(5): 540-546, 563. (in Chinese))
- [19] JUDIT P, LUCIANE O C, LUIGI N F. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. Hydrobiologia, 2009, 621(1): 1-19.
- [20] 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文. 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1264-1273. (LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen. Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1264-1273. (in Chinese))
- [21] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] REYNOLDS C S, JUDIT P, SOMMER U. Intermediate disturbance in the ecology of phytoplankton and the maintenance of species diversity: a synthesis [J]. Hydrobiologia, 1993, 249(1): 183-188.
- [23] 李德亮, 张婷, 肖调义, 等. 大通湖浮游植物群落结构及其与环境因子关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2107-2113. (LI Deliang, ZHANG Ting, XIAO Tiaoyi, et al. Phytoplankton's community structure and its relationships with environmental factors in an aquaculture lake, Datong Lake of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2107-2113. (in Chinese))
- [24] 胡胜华, 高云霓, 张世羊, 等. 武汉月湖水体营养物质的分布与硅藻的生态指示[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 856-864. (HU Shenghua, GAO Yunni, ZHANG Shiyang, et al. Distribution of nutrients and ecological indexes of Diatom about Moon Lake in Wuhan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 856-864. (in Chinese))
- [25] 刘兴荣. 基于环境影响的硅藻研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3092-3093. (LIU Xingrong. Base on the environment impact to bacillariophyta research progress [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(6): 3092-3093. (in Chinese))
- [26] 王文林, 周瑞云, 成庆利. 丹江口水库水体主要营养盐含量变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2008, 39(2): 123-129. (WANG Wenlin, ZHOU Ruiyun, CHENG Qingli, Characteristics of water quality in the Danjiangkou Reservoir [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2008, 39(2): 123-129. (in Chinese))
- [27] 王锦旗, 郑有飞, 王国祥. 玄武湖菹草种群的发生原因及人工收割对水环境的影响[J]. 水生生物学报, 2013, 37(2): 300-304. (WANG Jinqi, ZHENG Youfei, WANG Guoxiang. Reasons for the occurrence of potamogeton crispus population and harvesting impact on the water environment in Xuanwu Lake [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(2): 300-304. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-01-23 编辑: 徐娟)