

汤浦水库浮游植物功能群季节演替及关键驱动因子

张俊芳¹, 胡晓红², 马沛明¹, 陈威¹, 胡菊香¹

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 长江水利委员会河湖保护与建安中心, 湖北 武汉 430010)

摘要:为探究浮游植物功能群季节演替规律及其关键驱动因子,在汤浦水库流域布设 6 个采样点,于 2012 年每月中旬对浮游植物和环境指标进行一次采样调查。运用浮游植物功能类群(Functional group, FG)方法和冗余分析(Redundancy analysis, RDA)对数据进行分析。结果显示,调查期间汤浦水库共鉴定到浮游植物 7 门、117 种,细胞密度月均值为 9.37×10^6 个/L,其中 5 月最高,极易暴发以硅藻和丝状蓝藻为主的藻类水华。按照功能群分类,汤浦水库浮游植物共划分出 24 个功能组类群,其中全年优势功能组类群 9 组,分别是 C、D、F、J、L₀、MP、P、S2、X2;每月浮游植物优势功能组类群共 15 组,其季节演替趋势为 C+P→C+D+S2→C+P+S1→L₀+P→F+J+S1→P+S2→D→MP+S2→C+MP+X2→C+P。RDA 排序结果表明,空间异质性规律不明显,时间异质性呈现出一定的季节规律;其中,水温(WT)、水力滞留时间(HRT)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})是影响浮游植物功能群最显著的环境因子。

关键词:汤浦水库;浮游植物功能群;季节演替;环境因子

中图分类号:Q178.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)03-0055-08

浮游植物作为水体中重要的初级生产者,在淡水生态系统的能量流动和物质循环中起着至关重要的作用,且浮游植物生长周期短、对水体环境的变化反应迅速,因此其群落结构、时空分布等能直接反映水体环境状况,是水质生物学评价的重要指标(刘冬燕等,2009;熊莲等,2016)。以往对浮游植物的研究主要采用传统分类方法,分析群落结构及优势种组成、丰度及生物量的季节动态,从而反映水质状况(Naselli-Flores,2000;朱为菊等,2017);但水体中某种或某些种类的浮游植物成为优势类群的影响因素复杂,往往存在多个因素的协同作用,且同一种浮游植物可能适应不同生境,导致难以预测(张怡等,2012)。Reynolds 等(2002)根据大量温带湖泊生态系统浮游植物及生境研究,首先定义并运用浮游植物功能类群(Functional group, FG)方法,将特定生境具有相似适应性或响应机制的浮游植物种类归为一类,此方法尤其适用于小型湖泊或水库类水体;之后,Padisak 等(2009)对其修改完善,在此基础上根据功能类群对某些环境因子的敏感性和耐受性定义

了新的 38 种功能类群;相较之下,功能类群方法根据每个种类的生态适应性和生境特征进行划分,将不同种类的浮游植物缩小到一个或几个应该该生境的功能类群。因此,水体中功能类群组成及其动态可以反映生境的相关信息,反之亦然(Reynolds et al,2002)。

汤浦水库位于浙江省绍兴市与上虞市交界处、曹娥江下游的重要支流小舜江上,又称小舜江水库,坝址位于上虞市汤浦镇。汤浦水库建成于 2001 年,是一座以供水为主、兼顾防洪和改善水环境综合利用的大(二)型水库。有北溪、南溪、王化溪 3 条主要溪流汇入水库,控制流域集雨面积 460 km²,年均径流量 3.66 亿 m³,径流深 795.2 mm,径流系数 0.51,库区水面面积近 14 km²,总库容量 2.35 亿 m³,多年平均供水量 2.78 亿 m³(朱建坤等,2010)。汤浦水库库容量大,出库流量相对较小,因而水力滞留时间相对较长,水体交换不频繁,为典型的湖泊型水库。本研究通过对汤浦水库浮游植物、水文和水质等环境因子进行一周年的月度采样监测,分析浮游植物群落结构及功能群的演替特征,利用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)探究浮游植物功能群的时空分布规律及其与水文、水质等环境因子的关系,以为汤浦水库水质监测与生态系统管理提供科学理论依据。

收稿日期:2019-06-08 修回日期:2020-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51209148, 31000188, 51279113);绍兴市重点社会发展科研项目(2011A23005);中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW036)。

作者简介:张俊芳,1983 年生,女,工程师,主要从事淡水生态学及生物监测研究。E-mail: zjf2003316034@163.com

1 材料与方法

1.1 采样点设置

根据汤浦水库流域地理特征,本次研究共布设6个采样点(图1)。从上游库湾至下游坝前分别是Sj(双江溪)、Wh(王化溪)、Tt(托潭)、Kz(库中)、Zy(宅阳)、Qs(取水口)。于2012年的每月中旬进行一次月度采样。

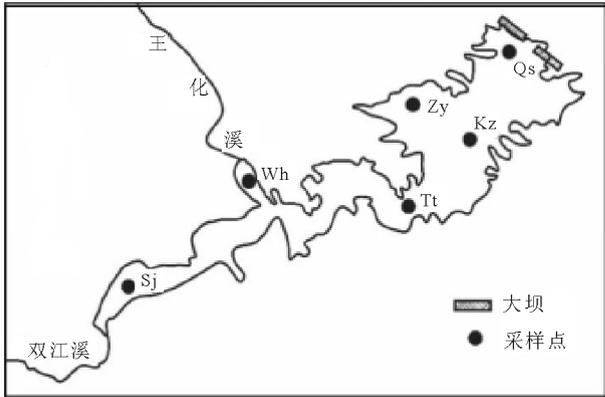


图1 汤浦水库采样点设置

Fig.1 Location of the sampling sites in Tangpu reservoir

1.2 浮游植物采集与检测

定性样品采用25号浮游生物网(孔径64 μm)在水面下0.5 m处进行“∞”字形捞取,并用4%甲醛溶液固定。定量样品采用5 L采样器,根据水层深度,分表层(水下0.5 m)、中层、底层(距底0.5 m)采集混合水样1 L,用10%~15%鲁哥试剂固定,静置48 h虹吸,再静置24 h浓缩至30 mL,用快速混匀器充分摇匀,迅速吸取0.1 mL水样置于0.1 mL浮游生物计数框内,在电子显微镜(Leica DM 5000B)10×40倍镜下鉴定并计数(章宗涉和黄祥飞,1991;胡鸿钧和魏印心,2006)。

1.3 水环境理化指标测定

水质理化样品与浮游植物样品同步采集,水温

(WT)、pH、溶解氧(DO)和电导率(EC)用多功能便携式水质分析仪现场测定,透明度(SD)用塞式透明度盘现场测定;高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总有机碳(TOC)、叶绿素a(Chl-a)、总氮(TN)、总磷(TP)、铁(Fe)、锰(Mn)、氯化物(Cl⁻)、硫酸盐(SO₄²⁻)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)和亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)测定均参考文献(国家环境保护总局,2002)。水力滞留时间(HRT)等于水库库容量与出流量的比值(林秋奇和韩博平,2001);降雨量(RA)等水文和部分水质指标数据由绍兴市汤浦水库有限公司提供。

1.4 数据处理与统计分析

环境因子的Pearson相关系数用SPSS21.0进行计算;浮游植物功能类群与环境因子的关系用Canoco5.0分析,功能类群数据采用浮游植物密度数据,为使浮游植物数据获得正态分布,对其进行lg(x+1)转换;除pH外,相关的环境因子数据也进行对数转换。优势度指数(Lampitt et al,1993)(Y)计算公式如下:

$$Y = (N_i / N) \times f_i$$

式中: N_i 为第*i*功能组的细胞总数; N 为样品中全部功能组的个数; f_i 为第*i*功能组在所有采样点中出现的频率;当 $Y \geq 0.02$ 时,认定为采样点内的优势功能组。

2 结果与分析

2.1 水文及水环境特征

汤浦水库年度降雨量动态见图2。根据年度降雨量分布情况,分为丰水期(6-8月)、枯水期(9-10月)、平水期(1-5月、11-12月)。日降雨量最高值出现在6月丰水期,为155.8 mm,8月的日均降雨量最高,为12.3 mm,10月枯水期的日均降雨量最低,仅0.8 mm。

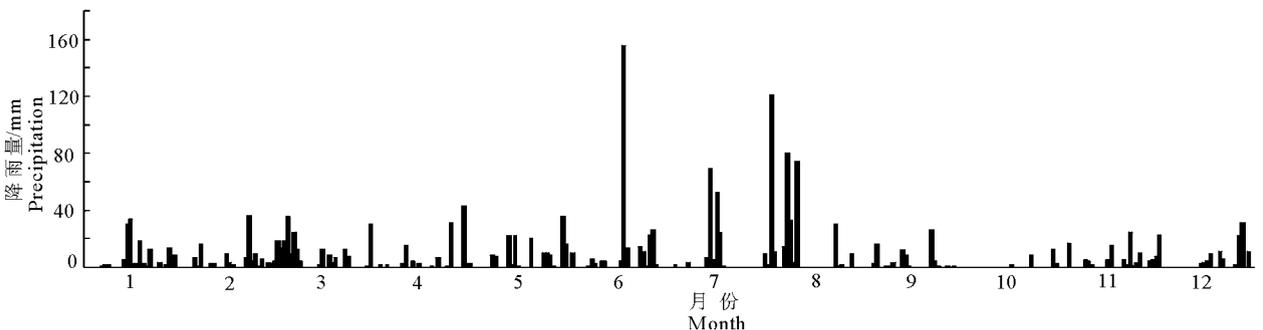


图2 汤浦水库降雨量动态

Fig.2 Dynamics of precipitation in Tangpu reservoir

汤浦水库水位、库容变化趋势基本一致。3月的平均水位和平均库容均为最高,分别是33.58 m和2.07 亿 m^3 ,自9月开始进入枯水期,由于降雨量的减少,而供水量变化不大,使得水库一直以低水位运行;至12月,水位和库容降至最低,分别为27.98 m和1.34 亿 m^3 。

水力滞留时间基本呈现逐渐下降趋势(图3)。2月的滞留时间最长(281 d),其次是1月(280 d),主要是由于1-2月的库容相对较大,而供水量相对较小,致使水力滞留时间延长;12月的滞留时间最短,仅166 d,主要是由于降雨量的减少使水库库容下降,而日常的供水量变化不大,因而水力滞留时间缩短。

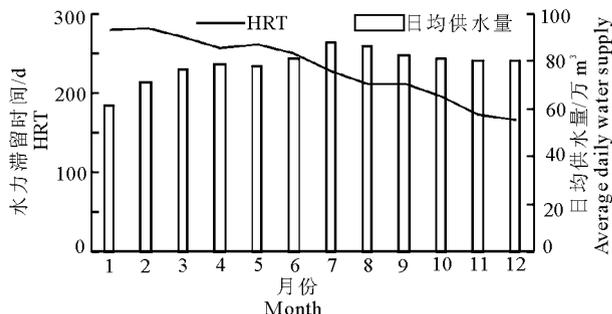


图3 汤浦水库日供水量及水力滞留时间

Fig.3 Dynamics of daily water supply and hydraulic retention time in Tangpu reservoir

表1 汤浦水库水文与水环境变量 Pearson 相关系数矩阵

Tab.1 Pearson correlation coefficient matrix of hydrological and water quality parameters in Tangpu reservoir

指标	WT	COD _{Mn}	TN	SO ₄ ²⁻	NO ₃ -N	Chl-a	TOC	WL	WS	EVAP	HRT
WT	1.000										
COD _{Mn}	0.766 **	1.000									
TN	-0.452**	-0.438**	1.000								
SO ₄ ²⁻	-0.675**	-0.524**	0.708**	1.000							
NO ₃ -N	-0.571**	-0.554**	0.940 **	0.825 **	1.000						
Chl-a	0.529**	0.781 **	-0.141	-0.210	-0.310**	1.000					
TOC	0.530**	0.810 **	-0.396**	-0.313**	-0.500**	0.748**	1.000				
WL	0.095	0.153	0.543**	0.498**	0.491**	0.332**	0.172	1.000			
WS	0.775 **	0.670**	-0.323**	-0.425**	-0.349**	0.388**	0.417**	-0.060	1.000		
EVAP	0.823 **	0.744**	-0.144	-0.382**	-0.267*	0.604**	0.530**	0.366**	0.733**	1.000	
HRT	-0.360**	-0.245*	0.603**	0.622**	0.576**	0.045	-0.092	0.823 **	-0.614**	-0.120	1.000

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关;相关系数大于0.750的值加粗显示。

Note: ** denotes significant correlation at 0.01 level (bilateral); * denotes significant correlation at 0.05 level (bilateral); Values greater than 0.750 are in bold.

根据 Padisak(2009)功能群分类方法,结合汤浦水库的水质状况,对浮游植物进行功能组类群划分,共划分出24个功能组类群,由浮游植物优势度计算公式,得出全年浮游植物优势功能类群9组,分别是功能组C、D、F、J、L₀、MP、P、S₂、X₂;每月浮游植物优势功能类群共15组(表2),再对这15组优势功

能群的相对丰度进行比较,探究汤浦水库浮游植物功能组类群的演替规律(以相对丰度>15%为准)。

汤浦水库水文和水环境变量 Pearson 相关系数矩阵见表1(表中仅列举至少有1个与其他变量相关系数 $r \geq 0.750$ 的变量, $n = 72$)。其中,水温(WT)与高锰酸盐指数(COD_{Mn})、供水量(WS)、蒸发量(EVAP)相关系数极高,呈极显著正相关,水温全年变化为7.5~30.6℃,其中3月的平均水温最低(8.0℃),8月的平均水温最高(30.0℃);COD_{Mn}除与WT极显著相关外,还与叶绿素a(Chl-a)、总有机碳(TOC)极显著正相关,高锰酸盐指数全年变化为1.3~3.2 mg/L,基本呈现单峰变化曲线,在7月达到最高峰;硝酸盐氮(NO₃-N)与总氮(TN)、硝酸盐氮(NO₃-N)与硫酸盐(SO₄²⁻)、水位(WL)与水力滞留时间(HRT)的相关系数也都极高,均呈现极显著正相关。

2.2 浮游植物功能群结构特征

通过对汤浦水库每月采集的样品进行鉴定,共检出浮游植物7门、117种。绿藻门(Chlorophyta)种类数最多(48种),其次是硅藻门(Bacillariophyta)和蓝藻门(Cyanophyta),分别为34种和20种,其余门类种数较少。细胞密度月均值为 9.37×10^6 个/L,全年为 $(1.01 \sim 36.50) \times 10^6$ 个/L,最低值和最高值分别为3月的双江溪断面和5月的王化溪断面;其中,月均细胞密度以5月最高(3.09×10^7 个/L)、8月最低(2.33×10^6 个/L)。

通过计算,得出如下演替规律:1-3月以C+P功能类群为主导,4月的P功能群消退,D+S₂功能群大量生长繁殖,C+D+S₂功能类群逐渐发展并占优势,相对丰度之和为85.28%;5月P+S₁功能

群取代 D+S2 功能群,以 C+P+S1 为主导,相对丰度之和为 80.81%;6 月则以 L₀+P 功能群为主导,其中 L₀ 为偶然性优势类群,仅在该月为优势,很快消退,P 功能群在 4 月消退一段时间后,5-6 月又成为优势功能类群;此后 7 月,F+J+S1 功能群成为新优势功能类群,相对丰度和为 82.17%;8 月又出现新优势功能类群 P+S2,其他类群均有所消退;9 月仅出现 D 功能类群,相对丰度为 53.71%;10 月以 MP+S2 功能群为主导,11 月 C 功能群重新出现

成为优势类群,同时 S2 消退,以 C+MP+X2 占优势地位,至 12 月,MP+X2 功能群消退,P 功能群浮游植物又大量繁殖成为优势类群,且以 C+P 功能群为主(79.55%)。

综上,汤浦水库的功能类群演替趋势为 C+P→C+D+S2→C+P+S1→L₀+P→F+J+S1→P+S2→D→MP+S2→C+MP+X2→C+P。从汤浦水库每月优势功能群相对丰度动态变化(图 4)也可以看出其演替趋势。

表 2 汤浦水库月度浮游植物优势功能类群

Tab.2 Dominant phytoplankton functional groups in Tangpu reservoir per month

类群	调查月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A										0.029	0.041	
C	0.538	0.273	0.227	0.341	0.182			0.079		0.039	0.187	0.180
D				0.151	0.083			0.064	0.537	0.048	0.037	0.044
F	0.024						0.348	0.091				
H1										0.027	0.025	
J						0.035	0.247	0.148	0.040	0.024		
K										0.049		
L ₀					0.040	0.266						
M								0.059	0.052	0.022		
MP						0.043				0.184	0.210	
P	0.268	0.696	0.702	0.059	0.291	0.515	0.026	0.155			0.085	0.615
S1					0.335		0.113					
S2				0.360				0.213	0.086	0.163	0.030	
X2	0.086		0.026		0.061	0.054	0.032	0.081	0.141	0.123	0.191	0.059
Y								0.033			0.024	

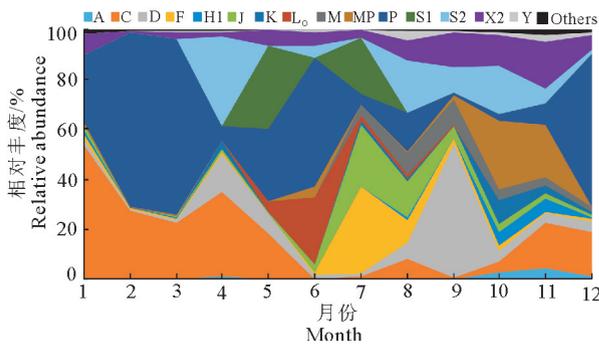


图 4 汤浦水库优势功能群相对丰度动态

Fig.4 Relative abundance dynamics of dominant functional groups in Tangpu reservoir

2.3 浮游植物功能群与环境因子的 RDA 分析

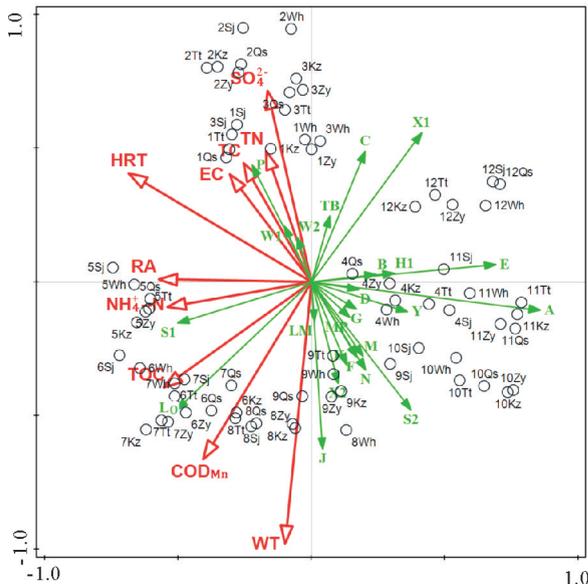
通过 Canoco 5.0 分析浮游植物功能群和环境因子的关系,首先对浮游植物功能群数据进行非约束性排序分析,显示响应变量数据梯度长度为 2.1,线形模型比较适合,因此功能群与环境因子的约束性排序选择冗余分析(RDA)。在 RDA 排序中,并不是所有的解释变量对于响应变量的解释都有显著贡献,需要筛选掉一些箭头较短以及与有显著影响

变量方向很一致的变量。通过筛选,最终选择 10 个环境因子,共解释 43.5%的功能群变化信息,前两轴累计解释了 27.75%的功能类群变化信息。

从排序图 5 可以看出,WT、HRT、COD_{Mn} 是影响浮游植物功能群最显著的环境变量。WT 与优势功能群 J、S2、L₀、S1、X2、N 等显著正相关,与优势功能群 X1、C、P 等显著负相关,是这些功能群生长繁殖的显著影响因子;HRT 与功能群 P、S1 显著正相关,与功能群 A、S2、E、J 显著负相关;COD_{Mn} 与功能群 L₀、J、S1、S2、X2 显著正相关,与功能群 X1、C、E、A、P 显著负相关;此外,SO₄²⁻、TOC、RA 等环境因子对浮游植物功能群的影响也较大。

从 RDA 排序中还可以看出,空间异质性规律不明显,时间异质性呈现出一定的规律。12 月集中在第一象限,与之密切联系的功能群是 X1,该功能组与大部分环境因子均负相关;1-3 月主要集中在第二象限,优势功能群为 C+P,这与之前分析的功能群演替规律相一致,与 HRT 显著正相关,与 WT 显著负相关;5-8 月主要集中在第三象限,主要受 WT、TOC、COD_{Mn} 和 RA 等因子的影响较大,其中

5月代表功能群为S1, 6月为功能群L₀, 8月代表功能群为J; 4月、9月、10月、11月主要集中在第四象限, 与大部分环境因子负相关, 主要代表功能群是S2、X2、A、E等。



红色箭头代表通过 Monte Carlo 置换检验有显著影响的环境因子, 绿色箭头代表浮游植物功能群, 黑色圆圈代表采样点, 其中前面数字表示月份, 后面字母是样点简称 (Sj: 双江溪, Wh: 王化溪, Tt: 托潭, Kz: 库中, Zy: 宅阳, Qs: 取水口)

图5 浮游植物功能群与环境因子的 RDA 排序

The red arrow represents the environmental factors that had significant influence through Monte Carlo replacement test, the green arrow represents different phytoplankton functional groups, and the black circle represents the sampling points, in which the number represents the month and the letters are the short form of sampling point (Sj: Shuangjiangxi, Wh: Wanghuaxi, Tt: Tuotan, Kz: Kuzhong, Zy: Zhaiyang, Qs: Qvshuikou)

Fig.5 RDA ordination of phytoplankton functional groups with environmental variables

3 讨论

3.1 浮游植物功能群的季节演替特征

2012年汤浦水库浮游植物种类为7门、117种, 与历年调查结果相比(2010年7门、105种; 2011年7门、115种)变幅较小, 且均以硅藻、绿藻、蓝藻三大门为主, 浮游植物细胞密度在5月达到最大值, 其中主要以克洛脆杆藻(*Fragilaria crotonensis*)、链状弯壳藻(*Achnanthes catenatum*)和湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)为优势种类, 且暴发形成水华。历年监测均发现, 汤浦水库每年春季暴发以硅藻和丝状蓝藻为主的藻类水华(马沛明等, 2016)。

从汤浦水库浮游植物功能类群演替来看, 冬季及初春(12-3月)以C+P功能群占绝对优势, 功能群C和P中的代表种类以适宜生长在浑浊的富营养型浅水水体、适应弱光低温条件的硅藻为主(Padisak et al, 2009; da Silva et al, 2005; 董静等, 2013), 其中主要是功能组C中的模糊沟链藻(*Aulacoseira ambigua*)、P功能组中的颗粒沟链藻极狭变种(*Au. granulata* var. *angustissima*)和颗粒沟链藻极狭变种螺旋变型(*Au. granulata* var. *angustissima* f. *spiralis*)现存量较高。冬季光照强度弱, 水温低, 水体无明显分层, 正好适宜对弱光、碳缺乏有较强耐受性, 对水体分层、硅有较强敏感性的C和P功能组大量生长繁殖而成为优势功能群。RDA分析结果也显示, 功能组C和P与总有机碳(TOC)、水温(WT)负相关, 进一步表明功能组C和P对低温、碳缺乏耐受性较强, 此季节适宜功能组C和P大量生长繁殖。

春季4-5月的水温逐渐升高, 以喜高温的湖泊假鱼腥藻(*P. limnetica*)等丝状蓝藻为代表的S1和S2功能组开始大量繁殖而占主导地位, 取代了P功能组原有的生态位。S1和S2功能群对弱光耐受, 对冲刷敏感, 适应稳定水体。根据水文数据分析, 此时汤浦水库属于平水期, 降雨量少, 水体较稳定, 随着温度逐渐升高, 特别有利于S1和S2功能群繁殖成为优势功能群; 此外, 由于春季水温还相对较低, 以硅藻为代表种类的部分功能群在此季节大量繁殖而占优势地位, 如C功能群中的链状弯壳藻(*Ac. catenatum*)在春季暴发形成硅藻水华、4月的D功能群中耐冲刷的尖针杆藻(*Synedra acus*)现存量升高也占优势地位, 同时P功能群在5月仍然优势明显。

夏季汤浦水库优势功能组变化较大, 每月均出现以蓝藻为代表种类的优势功能组。6月以色球藻(*Chroococcus* sp.)为代表的L₀功能组占优势, L₀具有广适性、耐受寡营养水体(Huszar et al, 2003; Lopes et al, 2005; 董静等, 2014), 而以丝状蓝藻为代表的S1和S2功能群又分别在7月和8月繁殖成为优势功能群。J功能组也是7-8月的优势功能群, 其中主要以栅藻(*Scenedesmus* sp.)为代表种类的非运动、不含胶质的绿球藻目中的藻类占主导地位, 多分布于混合性较好且富营养化的浅水水体。汤浦水库7-8月的降雨丰沛, 水体混合均匀, 7月的TC、NH₄⁺-N和COD_{Mn}含量均较高, 8月的TP、TN和Fe含量相较于其他月份高, 丰富的营养元素

有利于J功能组的生长繁殖。F功能组是7月优势度最高的功能群,其适应的生境为深层、混合均匀的水体,且对碳缺乏敏感,7月的TC和TOC含量相较于其他月份均高,且大量降雨使得水体混合均匀,因此特别适宜功能组F的生长,主要代表种类是单生卵囊藻(*Oocystis solitaria*)等绿藻门的种类;另外,P功能组在6月和8月仍为优势功能群。

秋季以尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*)为主要代表种类的X2功能组在9-11月均占优势地位,X2功能组具有较强的光照捕获能力和快速繁殖速率,对水体混合敏感,适应生境为中-富营养化的浅水水体(Padisak et al, 2009)。秋季,汤浦水库降雨量较小(9-10月为枯水期,11月为平水期),日均供水量平稳,水体稳定性较好,适宜X2功能组的生长繁殖。功能组MP为10-11月的优势功能群,主要代表种类是颤藻(*Oscillatoria* sp.)等丝状蓝藻,在水力滞留时间相对较长的水体中,MP功能组常表现出一定的优势;另外,功能组D、功能组S2和功能组C分别为9月、10月、11月的优势功能群。

3.2 浮游植物功能群的关键驱动因子

浮游植物功能类群与水体生境特征相对应,营养盐、光照条件、水动力学特征、浮游动物觅食压力、水文动态等环境因素都会影响水体中浮游植物的功能类群演替(田永强, 2015)。

RDA排序显示,水温是影响浮游植物功能群最显著的环境变量。从浮游植物群落及功能群季节演替分析可以看出,硅藻几乎为全年优势藻类,而以硅藻为优势代表种类的C、P功能群也几乎为全年优势功能群。硅藻一般适宜较低的温度,所以在7月硅藻繁殖速率低,被喜高温的蓝藻和绿藻取代。汤浦水库每年春季暴发以链状弯壳藻和丝状蓝藻为绝对优势种的藻类水华,其中水温是最关键的驱动因子,由于春季水温较低,适宜链状弯壳藻等硅藻生长繁殖,当水温逐渐升高,喜高温的丝状蓝藻开始大量繁殖。除水温外,还与丰沛的降雨量有关,雨水的冲刷和搅拌使得水体营养盐浓度升高,浮游植物吸收需要的营养元素(N、P、Si等)而大量繁殖暴发形成水华。雷波等(2017)对长寿湖浮游藻类以及水质监测结果分析得出,水温和营养盐是影响浮游藻类群落结构最重要的环境因子;易齐涛等(2016)研究表明,水温是驱动淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群季节演替的关键环境因子。

RDA排序结果表明,水力滞留时间是影响浮游植物功能群季节演替的第二大驱动因子。作为水库

调度的一个重要参考参数,对水环境具有干扰作用,水力滞留时间较短时,水体交换率加大,可提高水体离子浓度,强化水库的反硝化作用,此时整个水库呈现出河流区的特征;而当水力滞留时间较长时,则呈现出湖泊区特征。汤浦水库2012年平均水力滞留时间为232d,为典型的湖泊型水库特征,虽然水力滞留时间1月至12月基本呈现逐渐下降的趋势,但变化较为平缓,并不是导致春季水华暴发最关键的驱动因子,这与2011年汤浦水库浮游植物群落与环境变量的分析有所差异(马沛明等, 2016);此外,RDA排序显示,COD_{Mn}是仅次于水力滞留时间的影响浮游植物功能群季节演替的关键环境变量,还是控制硝化-反硝化反应的重要因子,有学者对浮游藻类季节变化分析时也认为COD_{Mn}是环境的关键因子(雷波等, 2017;王徐林等, 2018)。

综上所述,浮游植物功能群演替是多种环境因子在时空上综合作用的结果。总体来说,WT、HRT、COD_{Mn}是汤浦水库浮游植物功能群季节演替的关键驱动因子,但其他环境变量的影响作用也不可忽视。

志谢:汤浦水库管理局协助采样并提供了水文及水质数据,在此表示诚挚的谢意!

参考文献

- 董静,李艳晖,李根保,等,2013.东江水系浮游植物功能群季节动态特征及影响因子[J].水生生物学报,37(5):836-843.
- 董静,李根保,宋立荣,2014.抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群1960s以来演变特征[J].湖泊科学,26(5):735-742.
- 国家环境保护总局,2002.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社.
- 胡鸿钧,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.
- 雷波,刘朔孺,张方辉,等,2017.三峡水库上游长寿湖浮游藻类的季节变化特征及关键环境影响因子[J].湖泊科学,29(2):369-377.
- 林秋奇,韩博平,2001.水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J].生态学报,21(6):1034-1040.
- 刘冬燕,林文鹏,赵敏,2009.苏州河浮游植物群落结构特征[J].长江流域资源与环境,18(10):914-918.
- 马沛明,施练东,张俊芳,等,2016.浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析[J].环境科学,37(12):4560-4569.
- 田永强,2015.淡水浮游植物功能类群划分方法及其生态学

- 应用研究进展[J]. 亚热带植物科学, 44(4): 349-354.
- 王徐林, 张民, 殷进, 等, 2018. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素[J]. 湖泊科学, 30(2): 431-440.
- 熊莲, 刘冬燕, 王俊莉, 等, 2016. 安徽太平湖浮游植物群落结构[J]. 湖泊科学, 28(5): 1066-1077.
- 易齐涛, 陈求稳, 赵德慧, 等, 2016. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群的季节演替及其驱动因子[J]. 生态学报, 36(15): 4843-4854.
- 张怡, 胡韧, 肖利娟, 等, 2012. 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, 21(1): 107-117.
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 朱建坤, 俞海平, 施练东, 等, 2010. 汤浦水库富营养化趋势分析及防治研究[J]. 环境科学与技术, 33(6E): 219-221.
- 朱为菊, 庞婉婷, 尤庆敏, 等, 2017. 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, 29(3): 637-645.
- da Silva C A, Train S, Rodrigues L C, 2005. Phytoplankton assemblages in a Brazilian subtropical cascading reservoir system[J]. *Hydrobiologia*, 537: 99-109.
- Huszar V, Kruk C, Caraco N, 2003. Steady-state assemblages of phytoplankton in four temperate lakes (NE U.S.A.) [J]. *Hydrobiologia*, 502: 97-109.
- Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, et al, 1993. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean; Distribution, composition and role as a food source for migrating plankton[J]. *Marine Biology*, 116(4): 689-702.
- Lopes M R M, de Bicudo C E M, Ferragut M C, 2005. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, south-east Brazil[J]. *Hydrobiologia*, 542: 235-247.
- Naselli-Flores L, 2000. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationships between species composition and environmental factors[J]. *Hydrobiologia*, 424: 1-11.
- Padisak J, Crossetti L O, Naselli-Flores L, 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. *Hydrobiologia*, 621(1): 1-19.
- Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al, 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *Plankton Research*, 24(5): 417-428.

(责任编辑 万月华)

Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Key Driving Factors in Tangpu Reservoir

ZHANG Jun-fang¹, HU Xiao-hong², MA Pei-ming¹, CHEN Wei¹, HU Ju-xiang¹

- (1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, P.R.China;
2. River and Lake Protection and Construction Safety Center, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China)

Abstract: Tangpu reservoir is located at the junction of Shaoxing City and Shangyu City in Zhejiang Province. It is a lake-like reservoir with a long hydraulic retention time and slow water exchange that provides important ecological services including water supply, flood control and water quality improvement. In this study, a systematic investigation of phytoplankton and water quality variables in Tangpu reservoir was carried out monthly at six sampling sites in 2012. The objectives were to characterize seasonal succession of phytoplankton functional groups in Tangpu reservoir and identify the factors driving succession. Phytoplankton were categorized by functional group (FG) and the spatiotemporal distribution of the phytoplankton community and its relationship with the environmental variables were analyzed by redundancy analysis (RDA). The study provides data supporting water quality protection and ecosystem management in Tangpu reservoir. A total of 117 phytoplankton species from 7 phyla were identified during the investigation, dominated by Chlorophyta (48 species), Bacillariophyta (34 species) and Cyanophyta (20 species). The monthly average cell density of phytoplankton was 9.37×10^6 cells/L and was highest in May (3.09×10^7 cells/L) and lowest in August (2.33×10^6 cells/L). In May, blooms of diatoms and filamentous cyanobacteria occurred. There were 24 phytoplankton functional groups identified in Tangpu reservoir, with 9 functional groups dominant over the entire year (C, D, F, J, L₀, MP, P, S₂, X₂) and 15 functional groups dominant in different months, with the following seasonal succession; C+P→C+D+S₂→C+P+S₁→L₀+P→F+J+S₁→P+S₂→D→MP+S₂→C+MP+X₂→C+P. RDA indicated that phytoplankton functional groups followed a seasonal regularity, but spatial heterogeneity was not obvious. Water temperature (WT), hydraulic retention time (HRT) and chemical oxygen demand (COD_{Mn}) were the environmental variables most significantly affecting the phytoplankton functional groups.

Key words: Tangpu reservoir; phytoplankton functional groups; seasonal succession; environmental factors