三峡水库175 m蓄水前后香溪河库湾浮游植物的群落结构

方丽娟[1],刘德富[1,2],张佳磊[2],杨正健[2,3],田泽斌[1]

(1. 三峡大学水利与环境学院,宜昌 443002; 2. 湖北工业大学轻工学部资源与环境学院,武汉 430068;
3. 武汉大学水利水电学院,武汉 430072)

摘要:2011年9-11月三峡水库175 m蓄水期前后,在香溪河库湾沿程布点和采样,监测分析库湾浮游植物群落结构及水体环境的时空动态。结果表明,蓄水期前后香溪河库湾共鉴定浮游植物7门、42属,主要为绿藻和硅藻;浮游植物密度随时间变化呈降低趋势,浮游植物成分空间差异不显著,时间上则由绿藻向硅藻演替;营养物质、光热条件等环境因子时间差异明显,空间差异不显著。利用物种多样性指数评价香溪河库湾水质,蓄水期前后库湾水质较好,为中污染状态。利用冗余分析(redundancy analysis, RDA)浮游植物群落结构与环境因子之间的关系,水位、表底温差、溶解性硅酸盐浓度$\rho(SiO_3^{2-}\text{-}Si)$、真光层深度/混合层深度($Z_{eu}/Z_{mix}$)、水位日变幅、硝酸盐氮浓度是浮游植物群落结构的主要影响因子。

关键词:浮游植物;群落结构;香溪河库湾;三峡水库

中图分类号:Q145 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2014)03-0001-09

浮游植物是水生态系统的初级生产者,其群落结构和物种多样性随着水体环境的改变而变化(韩博平等,2003)。三峡水库作为人工调蓄水体,采用枯期蓄水、汛期泄洪这种"冬蓄夏排"周期性蓄水模式,水位变化幅度较大(李媛等,2012),因此将会改变水体的原有环境,影响浮游植物的生长(Naselli-Flores et al,2005)。三峡水库自2003年蓄水以来,先后经历了135 m、156 m和172.5 m试验性蓄水阶段,水库出现了富营养问题,部分支流水华现象引起了广泛的关注。目前,诸多学者对3次试验性蓄水过程中的浮游植物群落及水质评价开展了研究工作(张远等,2006;郭劲松等,2008;2012;李哲等,2012)。2010年试验蓄水时首次达到设计蓄水位175 m(刘兰玉等,2012;熊超军等,2013);2011年是三峡工程建成后实现设计运行的第一年,蓄水期11月1日的水位升至175.04 m。高水位下的水体环境及浮游植物群落结构将影响三峡水库的运行方式,但目前对175 m蓄水后支流库湾浮游植物群落结构的报道较少,对蓄水过程中浮游植物动态追踪的研究明显不足。香溪河是三峡水库湖北库区的最大支流,也是水库蓄水以来发生水华最严重的支流之一,具有一定的代表性。

项目组于2011年9-11月三峡水库175 m蓄水期时在香溪河布点监测浮游植物的变化,分析水环境变化特点,探讨其群落结构分布特征及影响因子,旨在寻找三峡水库不同蓄水阶段时浮游植物群落变化规律、研究水华发生机理及防控水体富营养化提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样点设置

香溪河是靠近三峡大坝的较大支流,干流长94 km,流域面积3 099 km^2(31°04′~31°34′ N,110°25′~111°06′ E),属亚热带大陆性季风气候区。三峡水库蓄水位175 m时,香溪河库湾对应回水长度约为42 km。依托三峡大学水生态与环境野外观测站,于2011年三峡水库175 m蓄水期间,在香溪河口至昭君镇段沿河道中泓共布设11个监测点(相邻监测点间距约3 km左右),依次记为X0~X10;在与香溪河交汇的水库干流布设1个监测点,记为CJ(图1)。为探讨蓄水对浮游植物群落结构的影响,监测期间的采样范围均在回水区域内,因此不同水位下的采样点位置略有不同。

香溪河口与三峡大坝相距仅38 km,从河口至回水区水力坡降很小,因此本研究采用坝前水位,即凤凰水文站的实测水位表征香溪河河口水位。2011年蓄水期前后香溪河库湾水位及水位日变幅过程见图2。蓄水期前的9月3日水位为150.49 m,随后

收稿日期:2014-03-03

基金项目:国家自然科学基金面上项目(批准号:51179095);国家自然科学基金青年基金(51009080;51009081;51209123);三峡大学硕士学位论文培优基金(2013PY001)。

通讯作者:张佳磊。E-mail:zhangjialei@mail.hbut.edu.cn

作者简介:方丽娟,1989年生,女,土家族,硕士研究生,研究方向为生态水工学。E-mail:fanglijuan0417@163.com

水位缓慢上升，至9月10日蓄水开始时水位为152.53 m。蓄水期间水位经历了上升－下降－上升－缓慢增长过程，于11月1日增长至175.04 m。蓄水期间水位最大日升幅为2.55 m，最大日降幅为0.68 m。

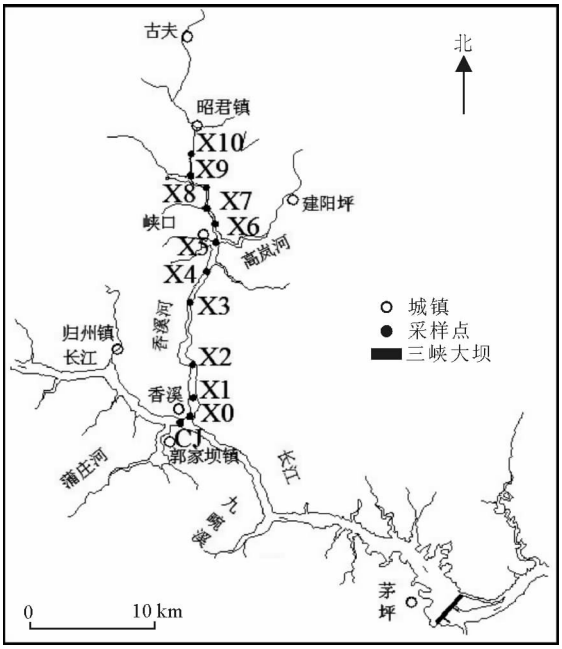

图1 香溪河库湾采样点

Fig.1 Sampling sites in Xiangxi Bay

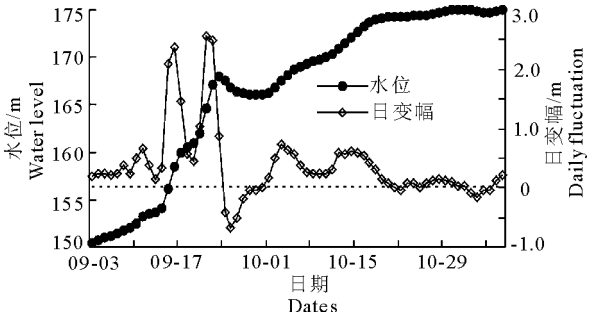

图2 香溪河库湾2011年蓄水期前后水位与日变幅

Fig.2 Water lever and its daily fluctuation in Xiangxi Bay before and after impoundment in 2011

1.2 采样频率与指标

监测时间为2011年9月3日至11月7日三峡水库175 m蓄水期前后，监测频率随水位变化稍有不同。蓄水期前(9月3日)进行了1次库湾水体环境监测，蓄水初期(9月)监测频次为5 d，后期频次降低，为10 d。9月3日和9月10日水位低于156 m，香溪河库湾回水长度小于30 km，X10位于回水区域之外，因此采样范围为CJ～X9，此后X10位于回水区域末端，采样范围为CJ～X10。主要监测指标为浮游植物密度及种类、水温、透明度、硝态氮(NO_3^--N)、正磷酸盐(PO_4^{3-}-P)、硅酸盐(SiO_3^{2-}-Si)浓度等。

在各监测点用采水器取350 mL表层水2瓶，其中一瓶加酸至pH＜2，在实验室内进行水化学试验，测定NO_3^--N浓度；另一瓶经电动抽滤机用醋酸纤维滤膜(孔径0.45 μm)抽滤，抽滤的水样用于测定PO_4^{3-}-P和SiO_3^{2-}-Si浓度。NO_3^--N、PO_4^{3-}-P浓度测定方法参照《水和废水监测分析方法(第4版)》(国家环境保护总局，2002)；SiO_3^{2-}-Si浓度采用硅钼黄分光光度法测定(黄翔飞，2000)。水位数据由中国长江三峡集团公司提供。水温由Hydrolab DS5多参数水质监测仪(美国)现场测定，透明度采用塞氏盘法现场测定。用PVC塑料瓶取1 200 mL表层水样，加鲁哥试剂固定，带回实验室沉降浓缩至75 mL，在显微镜(10×40倍)下对浮游植物细胞进行计数，藻类鉴定参考有关文献(周凤霞等，2005；胡鸿钧等，2006)。

1.3 数据处理

采用Shannon-Wiener多样性指数(H)、Pielou均匀度指数(J)和Margalef丰富度指数(D)对浮游植物进行多样性评价(沈韫芬，1990)，计算公式为：

$$H = -\sum_{i=1}^{s} P_i \log_2 P_i ; P_i = N_i / N \quad (1)$$

$$J = H / \ln S \quad (2)$$

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

式中：S为浮游植物种类数；N_i为样品中物种i的个体数；N为样品中全部物种的个体数。

Z_{eu}是浮游植物光合作用得以发生的水体深度，Z_{mix}用来表征水体垂向紊动混合情况，一般采用Z_{eu}/Z_{mix}比值来判别光照的垂向分布和水体的垂向掺混对藻类生长的影响(Lawrence et al, 2000)。采用2.7倍的透明度作为真光层深度(Z_{eu})，取温度梯度＜0.2℃/m时的深度作为混合层深度(Z_{mix})。

由于实测时水体含沙量较小，因此可忽略泥沙对水体密度的影响；根据Lawson等(2007)的公式，计算不同水温(T)对应的水体密度：

$$\rho_T = 1000\left[1 - \frac{T+288.9414}{508929.2(T+68.12963)}(T-3.9863)^2\right] \quad (4)$$

水体稳定系数(RWCS)是一个无量纲参数，通过比较底部(ρ_b)和表面(ρ_s)水的密度差异与纯水在4℃(ρ_4)和5℃(ρ_5)时的密度差异得出，计算公式如下(Padisak et al,2003)：

$$\mathrm{RWCS} = \frac{\rho_b - \rho_s}{\rho_4 - \rho_5} \quad (5)$$

利用 SPSS17.0 统计软件对浮游植物和环境因子的时空分布进行显著性差异分析,采取单因素 ANOVA 均值分析方法。若 $P \leqslant 0.01$ 表示差异显著,反之则不显著。

采用 Canoco for Windows 4.5 对物种变量和环境变量进行梯度分析(任艳芹等,2011;董旭辉等,2007)。首先对物种变量进行除趋势对应分析(DCA)(张金屯,2004),典范轴的最大梯度≤3.0 时采用冗余分析(RDA),用 499 次蒙特卡罗(Monte-Carlo)置换检验环境变量的显著性,检验标准 $P \leqslant 0.01$。

2　结果与分析

2.1　浮游植物群落组成

镜检结果表明,2011 年 9－11 月三峡水库香溪河库湾共有浮游植物 7 门、42 属;其中,绿藻 22 属,硅藻 11 属,蓝藻 4 属,甲藻 2 属,隐藻、黄藻、裸藻各 1 属,监测期内的藻种之和约占香溪河库湾藻类物种总数的 40%;各种藻的出现频率如图 3 所示。监测期间香溪河库湾常见种类有小环藻(*Cyclotella*),在采样中的出现频率为 100%;其次为直链藻(*Melosira*)99.13%、小球藻(*Chlorella*)99.13%,隐藻(*Cryptomonas*)87.83%、衣藻(*Chamydomonas*)83.48%;浮游植物群落由绿藻、硅藻、隐藻、甲藻和蓝藻门的各属组成,裸藻(*Euglena*)和黄丝藻(*Tribonema*)仅偶尔可见,出现频率较低。

2.2　浮游植物细胞密度变化规律

监测期内香溪河库湾浮游植物细胞密度时空差异性显著(图 4)。9 月 3 日的浮游植物密度较高,最大值为 44.82×10^6 个/L,出现在 X8;蓄水初期 X2～X9 浮游植物密度仍维持较高水平,其中 X9 在 9 月 16 日达到 27.38×10^6 个/L;9 月 16 日至 10 月 15 日,库湾浮游植物密度整体较低;10 月 16 日的浮游植物密度显著增加,在 7.35×10^6 ～ 22.05×10^6 个/L,最大值出现在 X8;随后再次衰减,至蓄水期结束浮游植物仍处于较低水平。已有研究表明,2011 年春夏季香溪河库湾浮游植物密度在 0.02×10^6 ～ 126.74×10^6 个/L(姚绪姣,2013)。蓄水期前后库湾浮游植物密度低于春夏季;且随着时间变化,其密度有降低的趋势。

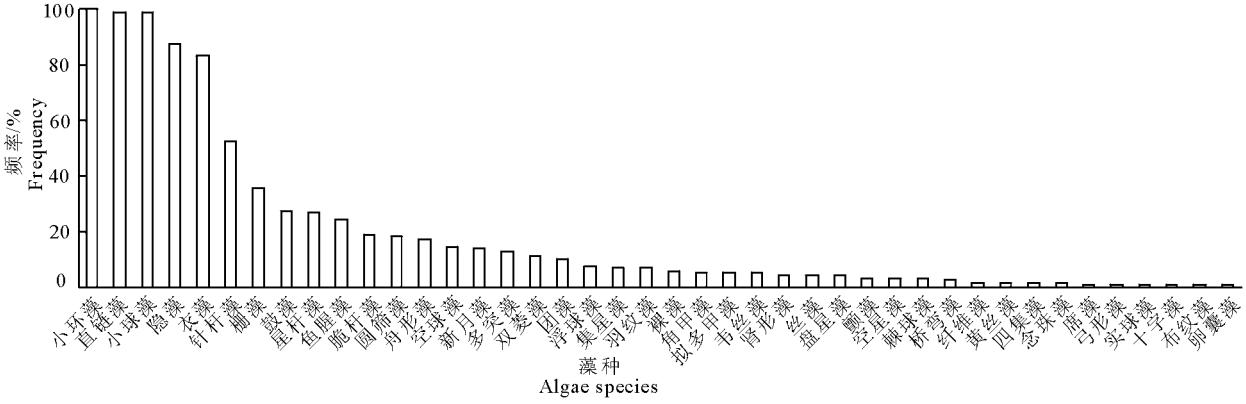

图 3　2011 年蓄水期前后香溪河库湾各藻种出现频率

Fig. 3　Frequency distribution of species of phytoplankton in Xiangxi Bay before and after impoundment in 2011

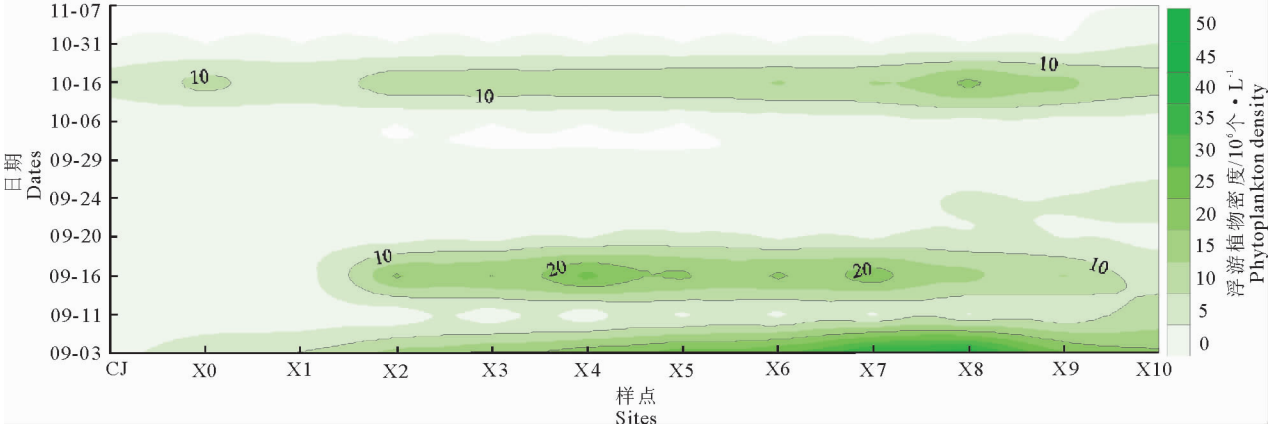

图 4　2011 年蓄水期前后香溪河库湾浮游植物密度时空分布

Fig. 4　Spatiotemporal dynamics of phytoplankton density in Xiangxi Bay before and after impoundment in 2011

2011年蓄水期前后香溪河库湾浮游植物组成也存在一定的差异(图5)。9月3日库湾浮游植物主要由硅藻和绿藻组成,绿藻所占比例相对较高,为55.28%;蓄水期浮游植物主要种类仍由硅藻和绿藻组成,但呈现了由绿藻向硅藻占优的演替趋势,这种趋势在蓄水末期较为明显。9月11日,绿藻比例为60.38%,硅藻比例为30.91%,10月31日绿藻比例减小至16.13%,而硅藻比例上升至80.38%。11月7日蓄水期结束后,库湾浮游植物仍是硅藻占优势,隐藻和蓝藻密度所占比例较蓄水期时有所增加,但比值仍较低。浮游植物成分空间分布相似,硅藻和绿藻分布于整个库湾,且变化较平稳。硅藻相比于绿藻所占比例较高。监测期内甲藻、黄藻、裸藻密度均较低,所占比例较小。

2.3 浮游植物多样性指数

由图6可知,监测期间,香溪河库湾 H 值在1.52~2.24,最大值出现在9月29日;D 值变化范围为0.28~0.46,最大值出现在10月6日;H 值和 D 值随时间变化明显,空间差异不显著。J 最高值出现在11月7日,为0.77,低值出现在10月16日,为0.46;J 值随时间变化的差异明显,空间分布上,各样点差异不显著。

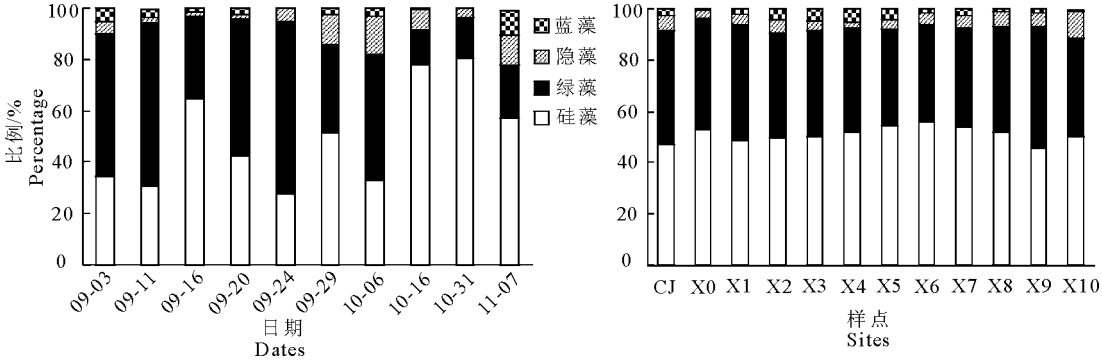

图5 2011年蓄水期前后香溪河库湾浮游植物密度组成

Fig. 5 Population density of phytoplankton in Xiangxi Bay before and after impoundment in 2011

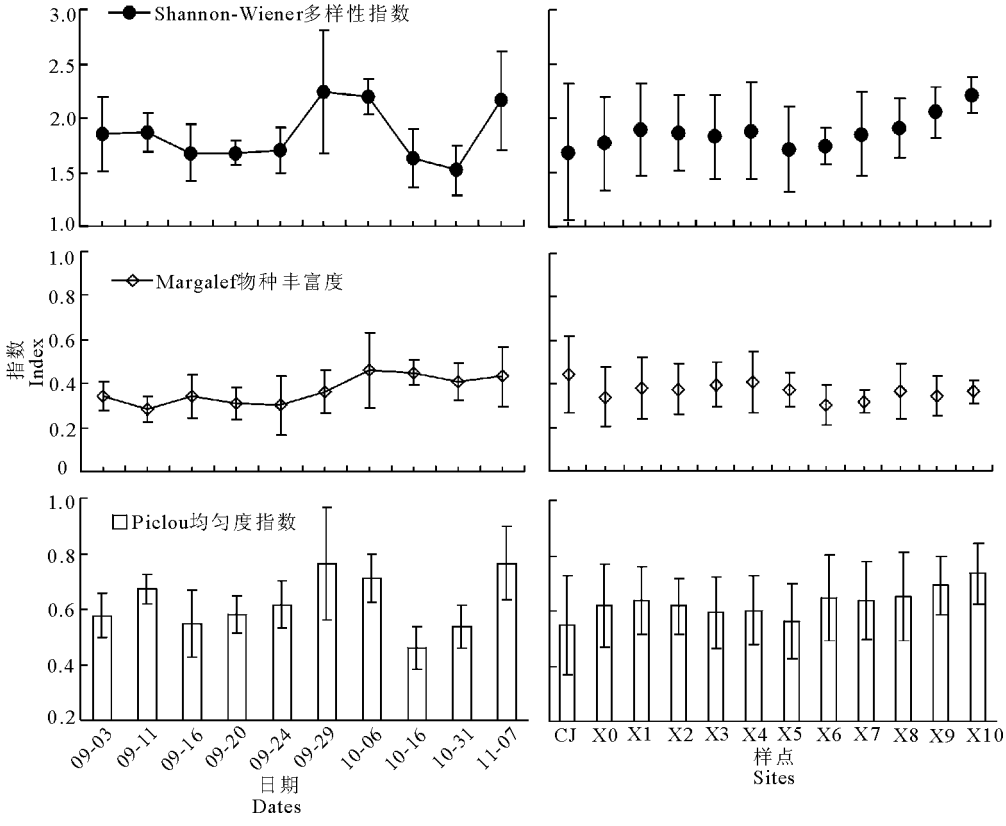

图6 2011年蓄水期前后香溪河库湾物种多样性时空分布

Fig. 6 Spatiotemporal dynamics of phytoplankton species diversity in Xiangxi Bay before and after impoundment in 2011

2.4　浮游植物与环境因子的关系

结合图 4 分析,监测期间浮游植物密度随时间变化逐渐降低。由图 5 可知,浮游植物种类以绿藻和硅藻为主,其群落结构空间差异不显著,但随着时间的变化,呈现由绿藻向硅藻演替的现象。为了研究监测期间浮游植物密度降低的成因及藻种演替与环境因子之间的响应关系,根据浮游植物的出现频率和密度,剔除监测期间藻细胞密度较低的 CJ 和 X0 样点,取 X1 ~ X10 区域中出现频率较高与密度较大的硅藻和绿藻,即小环藻、直链藻、小球藻、衣藻、栅藻、针杆藻和圆筛藻与水位、表层水温、表底温差、Z_{eu}/Z_{mix}、RWCS 及营养盐浓度进行梯度分析。首先对物种变量进行 DCA 分析,结果显示典范坐标轴的最长梯度为 1.500 < 3,适用梯度分析中的线性模型,进行群落结构的冗余分析(RDA)。

RDA 分析典范轴的 Monte-Carlo 检验结果见表 1。第一和第二的特征值分别为0.3704和0.037,物种与环境变量的相关系数为 0.817 和 0.564,解释了物种 - 环境关系累计方差的 91.2%,主轴 1 和所有典范轴蒙特卡罗检验 $P < 0.01$,说明 RDA 分析结果有效。由 RDA 分析排序图 7 可知,直链藻与水温夹角较小,栅藻、小环藻和圆筛藻与 Z_{eu}/Z_{mix} 夹角较小,表明两者的相关性较高;衣藻和小球藻与各环境变量之间的夹角相对较大,说明这 3 种藻在监测期间没有限制其生长的环境变量,适合在蓄水期前后生长。

各环境变量的 Monte-Carlo 显著性检验结果见表 2。结果表明,蓄水期前后影响浮游植物群落结构的主要环境因子($P = 0.002$)为水位、SiO_3^{2-}-Si、Z_{mix}/Z_{eu}、表底温差,其次为水位日变幅($P < 0.01$),NO_3^--N、PO_4^{3-}-P、RWCS 和水温对浮游植物群落结构分布影响不显著($P > 0.01$)。

表 1　常见藻种与环境变量间的 RDA 分析结果

Tab. 1　Statistics for redundancy analysis of common algae species and environmental variables

RDA 统计量	典范轴				总和
	1	2	3	4	
特征值	0.370	0.037	0.026	0.007	1.000
物种 - 环境相关性	0.817	0.564	0.542	0.277	
物种累积方差/%	37.0	40.7	43.3	44.1	
物种 - 环境关系累计方差/%	82.8	91.2	97.1	98.7	
典范坐标轴的总特征值					0.446
第 1 典范轴的蒙特卡罗检验结果	$F = 52.757$			$P = 0.002 < 0.01$	
所有典范轴的蒙特卡罗检验结果	$F = 8.062$			$P = 0.002 < 0.01$	

表 2　RDA 分析中环境变量显著性检验结果

Tab. 2　Significance test results for each variable through redundancy analysis

环境因子	水位	SiO_3^{2-}-Si	Z_{eu}/Z_{mix}	表底温差	水位日变幅	NO_3^--N	PO_4^{3-}-P	RWCS	水温
F	28.61	12.64	6.42	4.53	2.58	3.28	1.87	1.05	0.72
P	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004	0.012	0.094	0.386	0.602

注:显著性检验系数 $P < 0.01$,分析具有统计学意义。

Note: Significance test coefficient ($P < 0.01$) has a statistical significance.

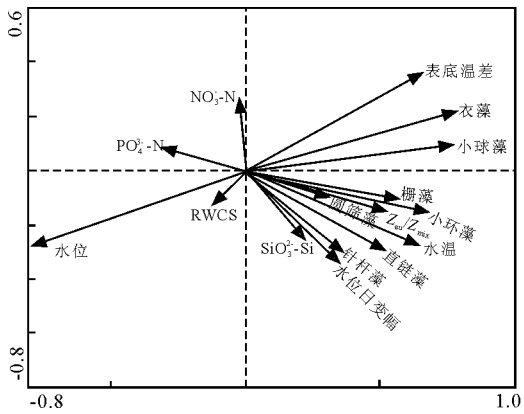

图 7　RDA 分析结果

Fig. 7　Results of redundancy analysis

2011 年 9 - 11 月三峡水库蓄水期前后,水位、SiO_3^{2-}-Si、Z_{eu}/Z_{mix}、表底温差是浮游植物群落结构的主要环境变量(表 2),因此有必要研究该因子的时空变化特性(表 3 - 4)。监测期间,库湾 $\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$ 在 3.43 ~ 7.43 mg/L,浓度较高;9 月 3 日库湾的 $\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$ 最低,均值为 5.42 mg/L;蓄水期,随着干流水体倒灌,高浓度硅酸盐水体进入库湾(杨正健等 2010),使得水体 $\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$ 变高。空间分布上,监测期间香溪河库湾 $\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$ 空间差异不显著,库湾 Z_{eu}/Z_{mix} 存在一定的时空差异。9 月3 日蓄水期前,库湾 Z_{eu}/Z_{mix} 较大,均值达到 1.70;蓄水期间水位上升,日变幅较大,Z_{eu}/Z_{mix} 在

0.13～0.79；蓄水期结束，Z_{eu}/Z_{mix}值较低。监测期内CJ和X0的Z_{eu}/Z_{mix}值较小，水体混合层深度远大于真光层深度，X1～X10值相对较大，且空间差异不显著。表层水温在18.52～30.23℃，随时间变化，库湾表层水温逐渐降低，主要是受气温的影响。空间分布上，各样点表层水温变化较平稳；9月3日表底温差均值为5.00℃，随着175 m蓄水开始，表底温差波动较大；至蓄水末期，温差减小，10月31日表底温差均值仅为0.84℃。空间上来看，从河口至库湾，表底温差逐渐上升，X10的温差达到6.39℃。

表3 2011年蓄水期前后香溪河库湾环境因子随时间变化特性

Tab.3 Temporal variations of environmental factors in Xiangxi Bay before and after impoundment in 2011

日期	$\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$/mg·L^{-1}			真光层/混合层(Z_{eu}/Z_{mix})			表层水温/℃			表底温差/℃		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
09-03	6.06	5.01	5.42	2.86	0.02	1.70	30.23	26.70	28.57	8.86	0.12	5.00
09-11	7.01	6.02	6.49	1.49	0.02	0.46	27.02	26.18	26.63	8.59	0.05	3.69
09-16	7.43	6.39	6.83	1.53	0.32	0.79	27.86	27.00	27.53	8.88	0.81	5.57
09-20	6.49	4.26	5.81	0.63	0.03	0.17	26.22	24.98	25.93	9.06	0.03	5.45
09-24	6.44	6.08	6.32	1.20	0.02	0.60	26.70	24.98	26.00	8.66	0.18	7.58
09-29	6.83	6.50	6.68	0.42	0.04	0.13	25.14	24.83	25.01	6.75	0.15	3.28
10-06	6.77	5.75	6.22	1.55	0.16	0.50	24.77	22.24	23.97	7.17	0.84	3.96
10-17	6.73	3.43	6.00	1.11	0.14	0.34	22.93	20.50	22.22	4.95	0.50	1.37
10-31	7.19	6.75	6.89	0.49	0.08	0.13	20.77	18.52	20.22	3.74	0.03	0.84
11-07	7.13	6.27	6.60	0.81	0.11	0.25	20.77	18.78	20.18	4.45	0.01	1.14

表4 2011年蓄水期前后香溪河库湾环境因子空间变化特性

Tab.4 Spatial variations of environmental factors in Xiangxi Bay before and after impoundment in 2011

日期	$\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$/mg·L^{-1}			真光层/混合层(Z_{eu}/Z_{mix})			表层水温/℃			表底温差/℃		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
CJ	7.39	5.94	6.70	0.21	0.02	0.09	26.78	19.51	23.97	1.18	0.03	0.44
X0	7.43	5.66	6.58	0.43	0.05	0.14	27.00	18.52	24.24	3.22	0.06	1.75
X1	6.93	5.89	6.48	1.89	0.14	0.62	27.36	20.19	24.59	3.27	0.01	1.71
X2	6.83	5.43	6.37	2.75	0.05	0.90	29.12	20.64	24.92	4.59	0.05	1.74
X3	6.89	5.26	6.47	2.86	0.05	0.60	28.91	20.57	24.52	4.95	0.13	2.46
X4	7.13	5.14	6.31	1.73	0.07	0.48	29.15	20.73	24.56	6.30	0.03	3.01
X5	6.84	5.14	6.26	1.14	0.08	0.39	28.39	20.42	24.63	7.22	0.24	3.63
X6	7.02	3.43	5.98	1.76	0.08	0.51	28.49	18.78	24.40	7.93	0.06	6.45
X7	6.83	4.18	6.03	1.61	0.09	0.41	29.26	19.85	24.83	8.50	0.32	4.76
X8	6.81	4.26	6.14	2.28	0.12	0.60	30.11	20.11	24.74	8.86	0.20	5.06
X9	6.99	5.29	6.21	2.79	0.10	0.69	30.23	18.85	24.51	9.06	1.50	6.06
X10	6.83	6.03	6.46	1.55	0.29	0.73	26.70	19.98	23.49	9.06	3.74	6.39

3 讨论

3.1 基于浮游植物多样性与优势种的水质评价

物种多样性是群落的重要特征之一，反映了物种组成和个体丰度特征（田永强等，2012）。生物水质监测中，浮游植物H值0～1为重污染，1～2为α-中污染，2～3为β-中污染，>3为寡污染。研究期间，香溪河库湾H值在1.01～2.77，处于α-β-中污染状态。通过藻类污染指示种来看，监测期间密度较高的小环藻、小球藻、衣藻、隐藻、鱼腥藻均是中污染的指示生物（况琪军等，2005）。因此，蓄水期前后香溪河库湾水质为中污染状态。

3.2 蓄水期前后浮游植物群落结构的影响因子

浮游植物的生长和演替与水体环境变化相关，其群落结构分布与环境因子关系密切，生态系统中环境因子的改变直接影响着浮游植物群落结构（Ignatiades et al，1985；Proulx et al，1996）。当浮游动物和鱼类的植食压力较低时，光强、水温和营养盐是决定水体浮游植物群落结构特征的主要因子（González et al，2000）；在水库中，水动力学条件也可成为影响浮游植物的主要因子（Beyruth，2000）；其中任何一个环境变量均有可能导致浮游植物的密度和种类发生改变。

3.2.1 营养盐对藻类演替的影响 香溪河库湾属于湖泊型水体，营养盐含量丰富，富营养化敏感性高（郑丙辉等，2006），营养盐不会对浮游植物的生长产生限制；因此在RDA分析中，$\rho(NO_3^-\text{-N})$、$\rho(PO_4^{3-}\text{-P})$对浮游植物群落结构分布的解释能力相对其他因子较低（表2）。Habib等（1997）指出，硅是影响浮游植物群落的重要环境因子，$\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$

对浮游植物群落结构解释能力较高($F=12.64$, $P=0.002$)。分析其原因,硅是硅藻生长合成硅壳必不可少的元素,水体中的$\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$是主要的硅供给者。蓄水期前后硅藻是浮游植物群落中主要成分之一,因此$\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$与浮游植物群落结构相关性显著;但结合表 3 和表 4 分析,监测期间库湾$\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$一直处于较高水平,其对硅藻的限制作用应较小,对蓄水末期库湾呈现绿藻向硅藻演替现象的解释能力较低;因此,$\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$影响浮游植物植物的群落结构,但不是蓄水末期由绿藻向硅藻演替的影响因子。

3.2.2　表底温差和 Z_{eu}/Z_{mix} 对浮游植物群落组成的影响　研究发现,适合硅藻生长的温度范围较广,但以 13 ~25℃为最佳,绿藻的最适生长温度为 20 ~30℃(代玲玲,2007)。监测期间库湾水温为 20.18 ~28.57℃,适合硅藻和绿藻生长,因此水温对浮游植物生长不构成限制。表层水温对浮游植物群落结构分布的解释能力较低。2011 年蓄水期前后,表底温差和 Z_{eu}/Z_{mix} 是浮游植物群落组成的重要影响因子。蓄水初期,表底温差较大,最大为 9.06℃,对比表 3 和表 4 发现,Z_{eu}/Z_{mix} 相对较大,水温分层显著,浮游植物生长受光限制的影响较小,浮游植物密度较大(图 4)。随着时间变化,底部水温降低滞后于表层,表底温差减小,Z_{eu}/Z_{mix} 较小,水温分层不显著,浮游植物容易被掺混至真光层以下,其接受光照的机会大大减小,生长就受到限制(刘流等,2012),浮游植物密度较低(图 4)。参考 Reynolds 等(2002)根据藻种对能量利用和营养摄取的生理特性与藻类形态及生长特性进行的功能分组,本次监测期间出现的绿藻隶属于 X1、X2、J 功能组,对水温分层下的水体耐受性好,而对混合水体较为敏感;硅藻隶属于 B、D、P 功能组,对水温分层下的水体较为敏感,适宜生活在混合水体中;因此,表底温差降低、Z_{eu}/Z_{mix} 减小、水温分层减弱可能是蓄水末期浮游植物由绿藻向硅藻演替的主要原因之一。

3.2.3　水位及其日变幅对浮游植物密度的影响　尽管监测期间水温适宜,营养物质充足,Z_{eu}/Z_{mix} 也在适合浮游植物生长的范围之内(Oliver et al, 2000),浮游植物密度较低,且随着时间变化呈现降低的趋势。分析其原因,可能与水位波动及其日变幅较大有关。蓄水期间,水位逐渐上升,虽然 9 月 23 –28 日有一个水位下降阶段,但降低幅度较小,最大日降幅仅为 0.68 m,而最大日升幅却达到 2.55 m。水位升高,水体日变幅较大,干流水体以倒灌的形式进入库湾(纪道斌等,2010),库湾水体或因水体掺混较之春夏季较强,水环境不再适合浮游植物生长;或因库湾水体变大,浮游植物被稀释,密度呈降低的趋势。表 2 中,水位及其日变幅的显著性和贡献率较高,因而水位波动是浮游植物密度降低的诱因。

4　结论

(1)2011 年三峡水库 175 m 蓄水期前后香溪河库湾共有藻类 7 门、42 属,主要门类为绿藻和硅藻;浮游植物密度随时间变化大致呈降低的趋势,其组成在蓄水末期由绿藻向硅藻演替,空间差异不显著。

(2)物种多样性指数及均匀度指数时间上差异明显,空间差异不显著,2011 年 9 – 11 月蓄水期前后香溪河库湾水质状态为中污染。

(3)水位波动是浮游植物密度降低的主要诱因;表底温差、Z_{eu}/Z_{mix} 是蓄水末期由绿藻向硅藻演替的主要因子;$\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$对硅藻生长有重要影响。

参考文献

代玲玲. 2007. 三峡水库富营养化藻类特征及环境因素影响研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与工程学院.

董旭辉,羊向东,刘恩峰,等. 2007. 冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积指标体系中的应用——以太白湖为例[J]. 地理研究, 26(3):477 – 484.

郭劲松,陈杰,李哲,等. 2008. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学,29(10):2710 – 2715.

郭劲松,谢丹,李哲,等. 2012. 三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价[J]. 环境科学, 33(4):1129 – 1135.

国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社:230 – 236.

韩博平,李铁,林旭钿,等. 2003. 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究[M]. 北京:科学出版社:7 – 8.

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.

黄翔飞. 2000. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社:56 – 57.

纪道斌,刘德富,杨正健,等. 2010. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,40(1): 101 – 112.

况琪军,马沛明,胡征宇,等. 2005. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报,5(2): 87 – 91.

李媛,刘德富,孔松,等. 2012. 三峡水库蓄泄水过程对香溪河库湾水华影响的对比分析[J]. 环境科学学报,32(8):1882-1893.

李哲,王胜,郭劲松,等. 2012. 三峡水库156 m蓄水前后澎溪河回水区藻类多样性变化特征[J]. 湖泊科学,24(2):227-231.

刘兰玉,蒋昌潭,安贝贝,等. 2012. 三峡水库175 m蓄水对长江重庆段水质的影响[J]. 水资源保护,28(2):34-36.

刘流,刘德富,肖尚斌,等. 2012. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. 环境科学,33(9):3046-3050.

任艳芹,陈开宁. 2011. 巢湖沉水植物现状(2010年)及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学,23(3):409-416.

沈韫芬. 1990. 微型生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社:134-137.

田永强,俞超超,王磊,等. 2012. 福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子[J]. 应用生态学报,23(9):2559-2565.

熊超军,刘德富,纪道斌,等. 2013. 三峡水库汛末175 m试验蓄水过程对香溪河库湾水环境的影响[J]. 长江流域资源与环境,22(5):648-656.

杨正健,刘德富,纪道斌,等. 2010. 三峡水库172.5 m蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. 中国科学:技术科学,40(4):358-369.

姚绪姣,2013. 三峡水库香溪河库湾浮游植物群落结构演替规律研究[D]. 宜昌:三峡大学.

张金屯. 2004. 数量生态学[M]. 北京:科学出版社:145-180.

张远,郑丙辉,刘鸿亮. 2006. 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境,15(2):254-258.

郑丙辉,张远,富国,等. 2006. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报,26(6):1022-1030.

周凤霞,陈剑虹. 2005. 淡水微型生物图谱[M]. 北京:化学工业出版社:35-178.

Beyruth Z. 2000. Periodic disturbances, trophic gradient and phytoplankton characteristics related to cyanobacterial growth in Guarapiranga Reservoir, São Paulo State, Brazil [M]. The Trophic Spectrum Revisited, Springer:51-65.

González E J. 2000. Nutrient enrichment and zooplankton effects on the phytoplankton community in microcosms from El Andino reservoir (Venezuela)[J]. Hydrobiologia. 434(1-3):81-96.

Habib O A, Tippett R, Murphy K J. 1997. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physicochemical factors in Loch Lomond, Scotland[J]. Hydrobiologia,350(1):63-79.

Ignatiades L, Vassiliou A, Karydis M. 1985. A comparison of phytoplankton biomass parameters and their interrelation with nutrients in Saronicos Gulf (Greece)[J]. Hydrobiologia,128(3):201-206.

Lawrence I, Bormans M, Oliver R, et al. 2000. Physical and nutrient factors controlling algal succession and biomass in Burrinjuck Reservoir[R]. Land & Water Resources Australia:119-120.

Lawson R, Anderson M A. 2007. Stratification and mixing in lake Elsinore, California: an assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake[J]. Water Research, 41(19):4457-4467.

Naselli-Flores L, Barone R. 2005. Water-level fluctuations in Mediterranean reservoirs: setting a dewatering threshold as a management tool to improve water quality[J]. Hydrobiologia, 548(1):85-99.

Oliver R L, Hart B T, Olley J, et al. 2000. The Darling River: Algal growth and the cycling and sources of nutrients[R]. Murray Darling Basin Commission, Project.

Padisak J, Bareosa F, Koschel R, et al. 2003. Deep layer cyanoprokaryota maxima in temperate and tropical lakes[J]. Arch Hydrobiol Spec Issues Advanc Limnol, 58: 175-199.

Proulx M, Pick F R, Mazumder A, et al. 1996. Experimental evidence for interactive impacts of human activities on lake algal species richness[J]. Oikos, 76: 191-195.

Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 24(5):417-428.

(责任编辑 万月华)

Phytoplankton Community Structure of Xiangxi Bay before and after the 175 m Impoundment of Three Gorges Reservoir

FANG Li-juan[1], LIU De-fu[1,2], ZHANG Jia-lei[2], YANG Zheng-jian[2,3], TIAN Ze-bin[1]

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, P. R. China;
2. College of Resources and Environment Engineering, Faculty of Light Industry, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, P. R. China;
3. School of Water Resources & Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: From September to November 2011, the succession of phytoplankton community structure and temporal-spatial dynamic of water environment along the Xiangxi Bay (XXB) were monitored before and after the 175 m impoundment of Three Gorges Reservoir. The results showed that total of 7 phyla, 42 genera of phytoplankton were identified with the main dominance of green algae and diatom. During the period of investigation, the density of phytoplankton exhibited a tendency of decline and the composition of phytoplankton was characterized by the succession of the phytoplankton community from green algae to diatom, however, the spatial difference of phytoplankton composition wasn't significant. Environmental factors such as nutrients, light and heat conditions varied greatly with time, while no significant difference was observed in terms of spatial variations. Analysis on diversity index indicated that the water of XXB was moderately polluted. Redundancy Analysis (RDA) was applied to analyze the relationship of phytoplankton structure and environmental factors and showed that water level, temperature difference, concentration of soluble silicates $\rho(SiO_3^{2-}\text{-Si})$, thickness of the euphotic layer and the mixed layer (Z_{eu}/Z_{mix}), daily fluctuation of water level, nitrate nitrogen concentration were the main factors which affected the phytoplankton community structure.

Key words: phytoplankton; community structure; Xiangxi Bay; Three Gorges Reservoir