

亚热带水库浮游植物群落结构季节演替及其春季水华成因分析 ——以浙江汤浦水库为例

施练东¹, 竺维佳¹, 张俊芳², 陈航¹, 梁亮¹, 马沛明²

(1. 绍兴市汤浦水库有限公司, 浙江 上虞 312364)

2. 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, 武汉 430079)

摘要: 为了研究汤浦水库浮游植物群落结构季节演替及水质状况, 于2010年5、8、11月及2011年2月连续4个季节分别对其浮游植物、水文特征和理化因子进行调查分析。结果表明, 浮游植物有7门、58属、105种, 主要由绿藻、硅藻和蓝藻组成, 其物种数季节变化为: 夏 > 秋 > 冬 > 春。各样点物种数呈现出由河流区向湖泊区递减的变化趋势。浮游植物丰度变幅较大, 在 $3.27 \times 10^6 \sim 128.90 \times 10^6$ 个/L, 其中冬季丰度最低, 春季最高。春季浮游植物主要由硅藻和蓝藻组成, 夏季主要由蓝藻和绿藻组成, 秋季为隐藻和硅藻, 冬季主要由硅藻组成。浮游植物丰度及其多样性指数均表明春季水质最差, 且暴发藻类水华, 其中微型硅藻链状弯壳藻 (*Achnanthes catenatum*) 为春季水华的绝对优势种。水华暴发可能受降水、水库调度、营养盐等因素的综合影响所致。

关键词: 浮游植物; 季节演替; 春季水华; 汤浦水库; 亚热带

中图分类号: Q145 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2013)02-0032-08

在水资源短缺和水环境恶化的双重考验下, 我国河湖供水水质明显退化, 加大了对水库水源的依赖; 特别是地处亚热带的东南沿海省市, 水库型水源日益成为区域经济社会可持续发展的重要保障(张建永等, 2011); 然而近10年来, 我国水库水质也呈下降趋势, 1/3重要供水水库出现富营养化现象(韩博平, 2010)。以浙江省为例, 对69个重要水库型水源地营养状况进行评价, 贫营养型水源地个数为0, 中营养水库占85.5%, 富营养水库占14.5%, 以春季硅藻和夏季蓝藻为主的水华事件频发, 不同程度破坏水库生态系统, 影响水源水质, 降低生态系统服务功能, 危及饮水安全(蔡临明等, 2010)。探索水源地水库浮游植物群落结构季节演替及水华生消机制的重要性不言而喻。欧洲高纬度温带湖泊、水库浮游植物组成与动态获得长期的研究, 结果表明水温和光照是浮游植物季节演替的主要驱动力(Reynolds, 2006); 而对中国地处亚热带地区的水库研究时间短, 而且因水库调度、营养化加剧和水库渔业等人为活动的影响, 导致季节异质性情况更为复杂, 研究难度加大。

汤浦水库又称小舜江水库, 位于浙江省绍兴县与上虞市的交界处, 主要由南溪、北溪和王化溪汇入, 正常蓄水库容1.8亿 m^3 , 集雨面积460 km^2 , 属大型水库(北京大学管理科学中心, 1999)。汤浦水库作为虞绍平原区域性专供水源地, 从根本上解决了该区域近400万人口的生活和生产用水, 其水质安全问题备受关注。浮游植物是水体生态环境的主要参数之一, 其丰欠程度反映了水质状况, 迄今还未见关于该水库浮游植物的全面研究报道。本文通过对汤浦水库浮游植物进行采样调查, 并结合水文、水质等基本信息进行综合分析, 研究该水库浮游植物群落结构的季节变化以及水质状况, 为维护健康水生态系统及保障水库供水安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置与采样频次

根据《淡水浮游生物研究方法》并结合汤浦水库的特点(章宗涉和黄祥飞, 1991), 于2010年5、8、11月及2011年2月(分别代表春、夏、秋、冬四季)在汤浦水库库区各设5个采样点(双江溪R1、王化溪R2、托潭R3、库中R4和取水口R5)进行浮游植物采样调查(图1)。

1.2 样品采集与处理

浮游植物定性样品用孔径为64 μm 的25号浮游生物网在水面下0.5m处以20~30cm/s的速度“∞”字形来回拖动约5~10min, 装入样品瓶中并

收稿日期: 2013-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209148); 绍兴市重点社会发展科研项目(2011A23005)。

通讯作者: 马沛明。E-mail: pablomaming@gmail.com

作者简介: 施练东, 1978年生, 男, 高级工程师, 主要从事水资源管理与生态保护工作。E-mail: liandong@sina.com

按 2% 加入甲醛固定。浮游植物定量样品用 5 L 有机玻璃采水器采集,取表层(离水面 0.5 m)、中层(0.5H, H 为采样时实测水深)和下层(离水底 0.5 m)的水样等体积混合均匀,取 2 L 水样,按 1.5% 加入鲁哥试剂现场固定,静置 48 h 以上,沉淀浓缩至 30 mL。观察计数前先摇匀,然后取 0.1 mL 样品放入浮游植物计数框中,在光学显微镜 Olympus BX51(10×40)下观察。计数方法采用目镜行格法,一般随机计数 2 个垂直行格,对于密度较高而不适宜采用行格法的采用视野计数法,细胞计数在 300 个以上,取 2 片的平均值,若 2 片差别在±15% 以上,则计数 3 片,取相近 2 片的平均值(章宗涉和黄祥飞,1991)。水库水文特征及理化因子由水库管理站提供。

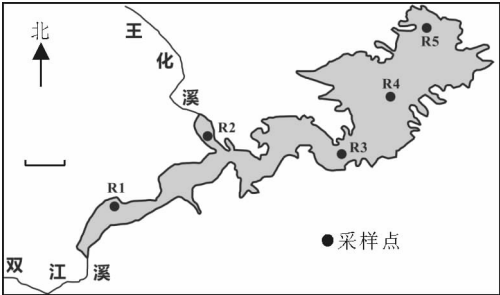


图 1 汤浦水库采样点

Fig.1 Sampling sites in Tangpu Reservoir

1.3 数据分析与处理

生物多样性采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Simpson 多样性指数 (D) 和 Pielou 均匀度指数 (J) 对水质进行评价,用优势度指数 (Y) 计算并确定优势种。各指数计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$$

表 1 汤浦水库水文及理化因子季节变化

Tab.1 Seasonal variation of hydrological characteristics and physico-chemical factors in Tangpu Reservoir

项 目		2010-05	2010-08	2010-11	2011-02
水 文 数 据	平均水位/m	33.00±0.35	31.12±0.52	30.39±0.45	28.48±0.07
	平均库容/万 m ³	19 841±492	17 276±683	16 322±571	13 958±80
	总供水量/万 m ³	2 396	2 696	2 280	1 556
	总降水量/mm	142	122	46	42
	总蒸发量/mm	82	144	43	28
	水力滞留时间/d	257	199	215	251
理 化 因 子	水温/℃	22.9±0.2	31.5±1.2	17.0±0.1	7.2±0.2
	透明度/m	1.06±0.05	2.42±0.83	2.20±0.74	1.92±0.81
	溶解氧/mg·L ⁻¹	13.16±0.36	9.26±0.74	9.70±0.62	11.92±1.40
	pH	9.60±0.01	8.50±0.69	7.10±0.07	6.90±0.08
	总磷/mg·L ⁻¹	0.022±0.010	0.015±0.009	0.017±0.007	0.013±0.005
	总氮/mg·L ⁻¹	1.90±0.08	1.42±0.04	1.70±0.04	2.27±0.59
	叶绿素 a/μg·L ⁻¹	46.14±3.65	8.21±6.53	7.97±3.80	4.06±1.25

$$J = H' / \log_2 R$$

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

式中: $P_i = N_i / N$, N_i 表示第 i 种浮游植物个体数, N 表示浮游植物总个体数。 R 为采集样品中浮游植物的总物种数, f_i 为第 i 种在各样品中出现的频率。 Shannon-Wiener 指数值 (H') 为 0~1 时表示水体重污染; 1~2 为 α -中污染; 2~3 为 β -中污染; 大于 3 为轻污或无污染。 Simpson 多样性指数 (D) 越高, 表明群落丰富度越高, 水质越好。 Pielou 均匀度指数 (J) 值 0~0.3 为重污染; 0.3~0.5 为中污染; 0.5~0.8 为轻污染或无污染。 取优势度 $Y \geq 0.02$ 的种类为优势种 (Shannon & Weaver, 1948; Simpson, 1949; 沈韞芬等, 1990; Pielou, 1966; Danilov & Ekelund, 1999; 孔繁翔, 2000; 张婷等, 2009)。 利用 SPSS15.0 分析环境因子之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 水文与水动力学特征

由水文特征数据可以看出, 2010 年 5 月的总降水量、平均库容及平均水位均最高, 且总蒸发量和供水量除 2010 年 8 月外也比较高, 而 2011 年 2 月的总降水量、总蒸发量、平均库容、总供水量和平均水位均最低, 2010 年 8 月和 11 月各水文特征居中。 水库理论水力滞留时间 (water retention time) 为水库库容与单位时间出库流量之比, 水力滞留时间越长、水体稳定性越高 (陈春浩等, 2012), 汤浦水库平均水力滞留时间为 231 d; 其中, 5 月最长, 为 257 d, 8 月最短, 仅为 199 d (表 1)。

2.2 理化因子

汤浦水库表层温度 (WT) 为 6.8~32.2℃; 其中, 8 月水温最高, 平均为 31.5℃, 2 月最低, 平均为

7.2℃。透明度(RD)为1.0~3.4 m;其中,5月最低,平均为1.06 m,8月最高,平均为2.42 m。溶解氧(DO)为8.6~13.5 mg/L;其中,5月最高,平均13.16 mg/L,8月最低,平均9.26 mg/L。水库的pH值呈中性至碱性,最高值出现在5月,最低值出现在2月。水库总磷(TP)浓度为0.008~0.041 mg/L;其中,5月最高,平均0.022 mg/L,2月最低,平均0.013 mg/L。总氮(TN)浓度为1.36~3.18 mg/L;其中,2月最高,平均2.27 mg/L,11月最低,平均1.70 mg/L。叶绿素a浓度变幅较大,为2.97~49.60 mg/L,其中5月最高,平均46.14 mg/L,2月最低,平均4.06 mg/L(表1)。可见2010年5月除水温和总氮浓度外,其余理化因子均高于其它月份。

相关分析表明($n=20$),pH与RD($P<0.05$, $r=-0.50$)、RD与DO($P<0.05$, $r=-0.54$)、RD与TN($P<0.05$, $r=-0.48$)显著负相关,pH与WT($P<0.01$, $r=0.66$)、pH与Chl-a($P<0.01$, $r=0.83$)、DO与Chl-a($P<0.01$, $r=0.57$)、TP与Chl-a($P<0.01$, $r=0.66$)极显著正相关,RD与TP($P<0.01$, $r=-0.67$)、RD与Chl-a($P<0.01$, $r=-0.75$)、WT与TN($P<0.01$, $r=-0.70$)极显著负相关(表2)。可见叶绿素a除与水温和总氮浓度不相关外,与其余因子相关性均极显著。

表3 汤浦水库浮游植物各门种类组成季节变化

Tab.3 Seasonal variation of phytoplankton species composition in Tangpu Reservoir									
时间	样点	硅藻门	甲藻门	金藻门	隐藻门	裸藻门	蓝藻门	绿藻门	合计
2010-05	R1	5	0	0	2	0	2	4	13
	R2	5	0	0	1	0	3	2	11
	R3	4	0	0	1	0	3	3	11
	R4	6	0	0	1	0	2	2	11
	R5	5	0	0	1	0	3	3	12
2010-08	R1	13	2	0	2	3	8	16	44
	R2	11	1	0	2	1	6	17	38
	R3	8	1	0	2	1	7	18	37
	R4	8	2	0	2	1	4	15	32
	R5	6	2	0	2	1	5	12	28
2010-11	R1	13	2	0	3	1	5	7	31
	R2	11	2	2	2	1	2	5	25
	R3	13	2	0	3	0	2	10	30
	R4	7	2	0	2	1	2	12	26
	R5	9	1	0	2	2	1	9	24
2011-02	R1	9	0	1	0	0	1	3	14
	R2	12	0	2	0	0	1	2	17
	R3	8	1	1	0	1	1	4	16
	R4	7	1	0	0	0	3	1	12
	R5	7	0	0	0	0	1	4	12
合 计		32	4	4	3	4	19	39	105

表2 汤浦水库理化因子相关分析

Tab.2 Correlation analysis of physico-chemical factors in Tangpu Reservoir

因子	pH	RD	WT	DO	TP	Chl-a	TN
pH	1						
RD	-0.50*	1					
WT	0.66**	0.10	1				
DO	0.39	-0.54*	-0.35	1			
TP	0.43	-0.67**	0.13	0.26	1		
Chl-a	0.83**	-0.75**	0.31	0.57**	0.66**	1	
TN	-0.22	-0.48*	-0.70**	0.35	0.14	0.02	1

注: * 代表显著水平 0.05; ** 代表极显著水平 0.01 (双尾检验)。

Note: * stand for significance level 0.05; ** stand for significance level 0.01 (two-tailed test).

2.3 浮游植物

2.3.1 浮游植物群落结构与组成 在汤浦水库的浮游植物调查中,共采集并鉴定到浮游植物7门、58属、105种(变种)(表3);其中,绿藻门(Chlorophyta)最多,为22属、39种,其次是硅藻门(Bacillariophyta)13属、32种,蓝藻门(Cyanophyta)13属、19种,其他门的种类较少,它们分别为甲藻门(Pyrrophyta)4属、4种,裸藻门(Euglenophyta)和金藻门(Chrysophyta)各2属、4种,隐藻门(Cryptophyta)2属、3种。

从调查结果可以看出,汤浦水库的浮游植物种类以绿藻(37.14%)、硅藻(30.48%)和蓝藻(18.10%)为主。常见的种(属)有硅藻门的链状弯壳藻(*Achnanthes catenatum*)、尖针杆藻(*Synedra acus*)、螺旋颗粒直链藻最窄变种(*Melosira granulata* var. *angustissima* f. *spiralis*)、模糊直链藻(*M. ambigua*)、小环藻(*Cyclotella* sp.)和脆杆藻(*Fragilaria* sp.),隐藻门的卵形隐藻(*Cryptomonas ovata*),绿藻门的狭形纤维藻(*Ankistrodesmus angustus*)和栅藻(*Scenedesmus* sp.)等。

从时间上看,各个季节硅藻门和绿藻门均占优势,蓝藻门在春夏季较秋冬季所占比例高;另外,隐藻门在春、夏、秋季均占一定的比例,裸藻门和甲藻门在夏、秋、冬季的部分样点出现,而金藻门仅在冬季的部分样点出现。各季节总浮游植物种数变化较大,其变化是导致浮游植物种类数量与组成变化的主要原因。总种数由高到低顺序为:夏>秋>冬>春;蓝藻门种数顺序为:夏>春>秋>冬;绿藻门为夏>秋>春>冬;硅藻门为秋>夏>冬>春。从空间上看,各采样点的浮游植物种数大体上变化情况表现为从库尾到取水口浮游植物种类数呈缓慢递减趋势。

2.3.2 浮游植物现存量的时空变化 浮游植物现存量可以通过细胞密度来体现。汤浦水库浮游植物的细胞密度较高,年均密度为 35.84×10^6 个/L;其中,5 月的细胞密度较其他月份高很多,平均为 128.90×10^6 个/L,其次是 11 月,但平均密度仅为 7.01×10^6 个/L,而 2010 年 8 月和 2011 年 2 月的平均密度更低,分别为 4.19×10^6 个/L 和 3.27×10^6 个/L(图 2)。从空间上看,同一时期各采样点间密度相差不大。

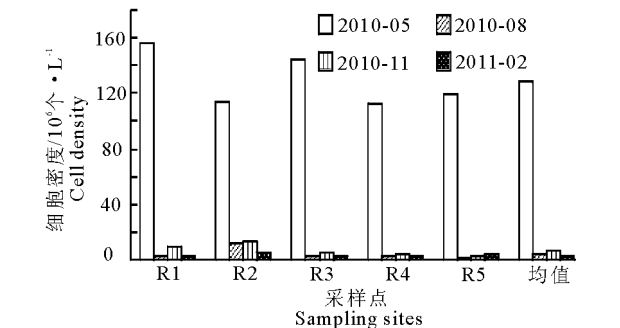


图 2 汤浦水库浮游植物细胞密度的时空分布
Fig. 2 Space-time distribution of phytoplankton cell density in Tangpu Reservoir

从浮游植物各门细胞密度组成来看,调查期间以硅藻、隐藻、蓝藻和绿藻为主,其余门密度较低。

各季节浮游植物密度组成变化情况,2010 年 5 月的密度组成以硅藻和蓝藻为主,8 月硅藻密度减小,蓝藻密度变化不大,而绿藻密度增加,2010 年 11 月绿藻和蓝藻密度减少,隐藻和硅藻密度增加,2011 年 2 月隐藻密度减少,硅藻密度进一步增加(图 3)。

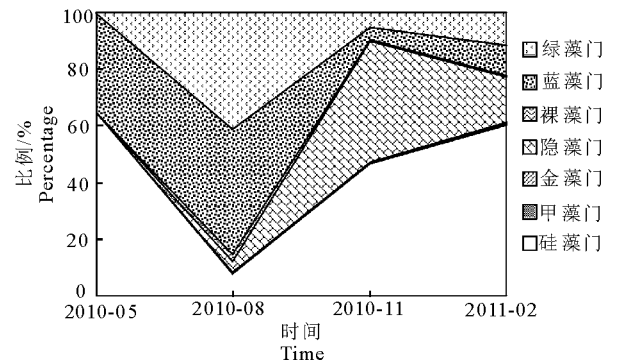


图 3 汤浦水库浮游植物各门细胞密度组成的季节变化
Fig. 3 Seasonal variation of phytoplankton cell density composition in Tangpu Reservoir

2.3.3 浮游植物优势种 以优势度 ≥ 0.02 的种类为优势种,则汤浦水库优势种共有 16 种,分属 5 门(表 4)。2010 年 5 月仅有 3 个优势种;其中,2 种的优势度特别高,分别是硅藻门的链状弯壳藻(*A. catenatum*) (0.635) 和蓝藻门的湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*) (0.302)。2010 年 8 月共有 7 个优势种;其中,绿藻门的单生卵囊藻(*Oocystis solitaria*) (0.276) 和蓝藻门的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*) (0.125) 优势度较高,其余种类优势度较低。2010 年 11 月共有 6 个优势种;其中,隐藻门的尖尾蓝隐藻(*Chroomonas acuta*) (0.346) 和硅藻门的模糊直链藻(*M. ambigua*) (0.280) 为绝对优势种。2011 年 2 月的优势种最多,共有 9 种;其中,链状弯壳藻(*A. catenatum*) 优势度最高(0.231),其次是尖尾蓝隐藻(*C. acuta*) (0.148),其余种类优势度较低。总体来看,链状弯壳藻(*A. catenatum*)、尖尾蓝隐藻(*C. acuta*)、小环藻一种(*Cyclotella* sp.) 在其中 3 个月份中均为优势种,而链状弯壳藻(*A. catenatum*) 和尖尾蓝隐藻(*C. acuta*) 优势度特别高,为绝对优势种。

2.3.4 浮游植物多样性指数 汤浦水库浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数为 1.066 ~ 3.654,平均为 (2.513 ± 0.635) ,最低值出现在 2010 年 5 月的 R5 采样点,最高值为 2010 年 8 月的 R1 采样点;Simpson 多样性指数为 0.420 ~ 0.894,平均值为 (0.711 ± 0.110) ,最低值出现在 2010 年 5 月的 R4 采样点;Pielou 均匀度指数为 0.322 ~ 0.821,平均值

表 4 汤浦水库浮游植物优势种
Tab. 4 Dominant species of phytoplankton in Tangpu Reservoir

	浮游植物	2010-05	2010-08	2010-11	2011-02
硅藻门	颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>				0.113
	模糊直链藻 <i>Melosira ambigua</i>			0.280	0.092
	小环藻一种 <i>Cyclotella</i> sp.		0.023	0.029	0.023
	美丽星杆藻 <i>Asterionella formosa</i>				0.088
	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>			0.027	0.042
	链状弯壳藻 <i>Achnantheidium catenatum</i>	0.635		0.076	0.231
隐藻门	尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>		0.033	0.346	0.148
	卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>			0.080	
裸藻门	鱼形裸藻 <i>Euglena pisciformis</i>		0.022		
蓝藻门	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>		0.125		0.026
	小形色球藻 <i>Chroococcus minor</i>		0.062		
	湖泊假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i>	0.302			
	假鱼腥藻一种 <i>Pseudanabaena</i> sp.	0.047			
绿藻门	单生卵囊藻 <i>Oocystis solitaria</i>		0.276		
	肾形藻 <i>Nephrocytium agardhianum</i>				0.033
	栅藻一种 <i>Scenedesmus</i> sp.		0.023		

为(0.604±0.104),最低值也出现在2010年5月的R4采样点。3种指数均显示2010年5月最低(图4)。由各指数水质判断标准,2010年5月的水质最差,2011年2月的水质最好,综合3种指数得出各个季节水质由好到差顺序为:冬>秋>夏>春。春季和其余季节的浮游植物多样性指数的评价结果相差甚大,主要原因是2010年5月浮游植物数量巨大(128.90×10⁶个/L),且优势种的优势度特别高。

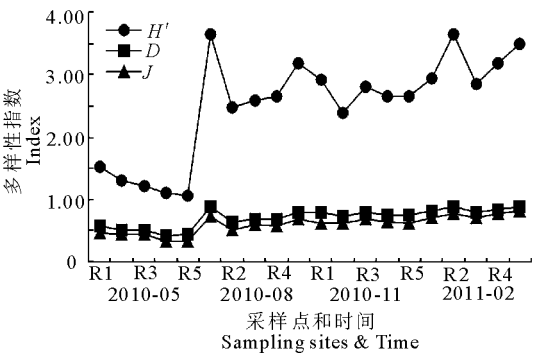


图 4 汤浦水库浮游植物各指数的时空变化
Fig. 4 Space-time distribution of each index of phytoplankton in Tangpu Reservoir

3 讨论

3.1 汤浦水库浮游植物群落季节演替

浮游植物群落是水生态系统的重要组成部分,在水库营养结构中起着重要的作用,其种类组成、数量分布通常呈季节性变化,是浮游植物群落动态的重要特征。通过对汤浦水库浮游植物连续4个季节的监测发现,春季,随着水温的逐渐升高以及逐渐增强和长久的光照,由于此时生长缓慢的浮游动物摄

食者的延迟出现,易被吞食且生长迅速的微型浮游植物(3~20 μm)充分利用水体营养而大量增殖,成为春季水华的优势种群。此次调查中,汤浦水库春季的绝对优势种链状弯壳藻(*A. catenatum*)正是在这种环境下大量繁殖的种类;随着浮游动物摄食压力增大,且水体中营养物质缺乏,春季水华结束,夏季则是个体较大、不易被摄食的种类如单生卵囊藻(*O. solitaria*)和铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)群体占优势;夏末温度下降,降水减少,因此常在秋季出现适宜在温度较低、中等的湍流环境中生长的硅藻和隐藻增殖(何国全等,2006);冬季由于水温的继续下降,适宜低温环境的硅藻进一步生长繁殖,而隐藻的优势度逐渐降低。汤浦水库浮游植物群落季节演替同 Sommer 等(1986)提出的著名 PEG(Plankton Ecology Group)模型基本一致,其通过对大量温带湖泊浮游生物和理化因子数据的分析,认为浮游植物群落季节演替大概是:从冬春的隐藻和硅藻转变为夏季的绿藻,到夏末秋初则是蓝藻占优势,秋季时硅藻数量再次上升(Sommer & Lampert,1986; Dos Santos & Calijur,1998);但由于 Sommer 等(1986)研究的是温带湖泊,因此和亚热带水库相比,浮游植物群落结构还是有细微的差别。由此可见,尽管汤浦水库水温与水体 Chl-a 含量无显著的相关关系,但对浮游植物群落结构演替仍起着至关重要的作用。

3.2 汤浦水库的水质状况

浮游植物的生长繁殖与水文、理化因子等有着密切的关系。在调查期间,汤浦水库总氮(TN)平均值为1.82 mg/L,根据 GB3838-2002 地表水环境质量标准,以 TN 的含量来评价汤浦水库,其水质为 V

类,但总磷(TP)浓度较低,平均值仅为 0.017 mg/L , N/P 比在 $85 \sim 174$,一般认为比值在 16 左右最好,可见汤浦水库属于磷限制的水体(欧阳昊和韩博平,2007)。

浮游植物丰度和群落结构反映出水体的营养水平,可作为判断水体富营养化程度的关键指标之一。从浮游植物丰度值来看,春季的浮游植物丰度异常偏高(128.90×10^6 个/L),其余季节浮游植物丰度较低(均值为 4.82×10^6 个/L),且变化不大,可见春季富营养化程度最严重。浮游植物多样性指数是反映均匀度和丰富度的综合指标,因此常被用来评价水质及生态环境的健康程度(王丽卿等,2011;申恒伦等,2012)。根据 3 种指数判断标准也得出,春季水质最差,为 α -中污水体;冬季水质最好,其次是秋季和夏季。此现象应引起管理部门的重视,加强春季水质的监测和管理。

3.3 汤浦水库春季水华暴发成因分析

浮游植物的群落动态在温带地区多与光照、水温有关,而低纬度的热带及亚热带的大型水体中,浮游植物的种类组成和丰度则更多地受水文特征影响(Pollinger, 1986; Talling, 1986; Reynolds, 2006; 胡韧等,2008;张怡等,2012)。

水库作为一个受人工调节程度较高的水体,其浮游植物动态在很大程度上更与水动力学有着密切的关系(Gomes & Miranda, 2001; Arfi, 2003; Horn, 2003;李秋华等,2011)。从空间上看,各采样点均在库区,水动力学条件变化不大,但从时间上看,因各个季节供水量、降水量及蒸发量等水体的交换,使得水动力学条件变化较大,浮游植物群落结构及丰度差异也较大。春季由于梅雨及台风天气的影响,降水量最大,而蒸发量和供水量较少,使得水位最高,水力滞留时间最长,水体交换能力减弱,随着春季温度的升高,充足的营养物质使得繁殖较快的微型藻类大量暴发,形成春季水华。朱圣潮和何爱兰(2003)在浙江瓯江开潭水库库区的调查中也发现,在丰水期,由于水体流速减慢,氮、磷的大量排放,使得浮游植物数量急剧上升,甚至发生水华;盛海燕等(2010)也指出,集中式降雨导致的水文过程剧烈变化能够显著地影响浮游植物群落。通过对汤浦水库的调查发现,春季相对于其他季节优势种最少,且其中的链状弯壳藻(*A. catenatum*)相对丰度特别高(最高达 70% 以上),为绝对优势种。显微镜下观察链状弯壳藻长约 $14\text{ }\mu\text{m}$,宽约 $3.5\text{ }\mu\text{m}$,一般为单细胞浮游藻类,偶尔为 2~3 个细胞呈链状群体,可见

该藻细胞比表面积较大以增加与水的摩擦力,因此非常适宜漂浮且能更好地到达水体表层吸收光照和营养物质而快速增殖;同时又由于此时春季大量的降水使得地表营养盐大量流入水库,这不仅为该藻类生长繁殖提供了充足的营养物质,而且加大了水体扰动,防止其沉降,这极可能是水华持续的关键条件。因此,降水的季节性变化是引起水体营养盐浓度和浮游植物变化的主要原因(刘蕾等,2008)。

藻类水华的暴发除与水动力学条件密切相关外,理化因子也是主要的影响因素。叶绿素 a 含量在一定程度上代表了浮游植物的含量,通过对叶绿素和各理化因子的相关分析表明,叶绿素 a 和 TP、DO、SD、pH 相关性极显著。氮、磷元素长期以来被认为是与浮游植物生长密切相关的营养物质,其中磷被广泛认为是淡水浮游植物生长的限制因子(欧阳昊和韩博平,2007)。汤浦水库为磷限制的水体,总氮浓度较高,这也可能是水华暴发的原因之一,所以应追溯氮来源并降低或限制其来源和输入。汤浦水库春季水体总磷浓度、水温、水力滞留时间等因子使得微型藻类链状弯壳藻(*A. catenatum*)大量增殖,因而水体中溶解氧增加、透明度降低、pH 升高;另外,春季小型硅藻的大量繁殖还可能与浮游动物、滤食性鱼类摄食以及水体中硅的含量等因素有关。

志谢:汤浦水库管理局的有关人员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

- 蔡临明,伍远康,吕振平,等. 2010. 浙江省水库藻类异常繁殖间接预警指标研究[J]. 中国水利, (13): 33-34.
- 陈春浩,张俊芳,马沛明,等. 2012. 茜坑水库浮游植物时空分布及水质风险评价[J]. 水生态学杂志, 33(2): 32-38.
- 韩博平. 2010. 中国水库生态学研究回顾与展望[J]. 湖泊科学, 22(2): 151-160.
- 何国全,雷冬梅,韩博平. 2006. 南亚热带河流型水库浮游植物群落季节变化-以广东飞来峡水库为例[J]. 热带亚热带植物学报, 14(3): 183-189.
- 胡韧,雷腊梅,韩博平. 2008. 南亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变化-以新丰江水库为例[J]. 生态学报, 28(10): 4652-4664.
- 孔繁翔. 2000. 环境生物学[M]. 北京:高等教育出版社:160-165.
- 李秋华,陈丽丽,夏品华,等. 2011. 贵州百花湖麦西河河口浮游植物群落结构及与环境因子关系[J]. 湖泊科学, 23(4): 612-618.

- 刘蕾,雷腊梅,肖利娟,等.2008.一座南亚热带小型水库水体营养状态与浮游植物的季节变化[J].生态科学,27(2):71-76.
- 欧阳昊,韩博平.2007.从东江调水后契爷石水库的水质和浮游植物群落结构特征[J].湖泊科学,19(2):204-211.
- 申恒伦,蔡庆华,邵美玲,等.2012.三峡水库香溪河流域梯级水库浮游植物群落结构特征[J].湖泊科学,24(2):197-205.
- 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等.1990.微型生物监测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社:134-137.
- 盛海燕,虞左明,韩轶才,等.2010.亚热带大型河流型水库—富春江水库浮游植物群落及其与环境因子的关系[J].湖泊科学,22(2):235-243.
- 王丽卿,施荣,季高华,等.2011.淀山湖浮游植物群落特征及其演替规律[J].生物多样性,19(1):48-56.
- 张建永,朱党生,曾肇京,等.2011.我国城市饮用水水源地分区安全评价与措施[J].水资源保护,(1):1-5.
- 张婷,李德亮,许宝红,等.2009.西洞庭湖养殖水体浮游植物调查与水质评价[J].水生态学杂志,2(5):12-17.
- 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.淡水浮游植物研究方法[M].北京:科学出版社.
- 朱圣潮,何爱兰.2003.浙江瓯江开潭水库库区浮游植物与水质的关系[J].湖泊科学,15(4):353-358.
- Arfi R.2003. The effects of climate and hydrology on the trophic status of Sélingué Reservoir, Mali, West Africa[J]. Lake and Reservoir: Research and management, 8: 247-257.
- Danilov R, Ekelund NGA.1999. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the level of eutrophication in lakes in central Sweden[J]. Science of the Total Environment, 234: 15-23.
- Dos Santos A C A, Calijur M C.1998. Survival strategies of some species of the phytoplankton community in the Barra Bonita Reservoir (Sao Paulo, Brazil) [J]. Hydrobiologia, 445:139-152.
- Gomes L C, Miranda L E.2001. Hydrologic and climatic regimes limit phytoplankton biomass in reservoirs of the Upper Paraná River Basin, Brazil[J]. Hydrobiologia, 457: 205-214.
- Horn H.2003. The relative importance of climate and nutrients in controlling phytoplankton growth in Saldenbach Reservoir [J]. Hydrobiologia, 504:159-166.
- Pielou E C.1996. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of the Oretical Biology, 13: 131-144.
- Pollinger U.1986. Phytoplankton periodicity in a subtropical lake (Lake Kinneret, Israel) [J]. Hydrobiologia, 138:127-138.
- Reynolds C S.2006. Ecology of phytoplankton[M]. New York: Cambridge University Press.
- Shannon C E, Weaver W.1948. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 27: 379-423,623-656.
- Simpson E H.1949. Measurement of diversity [J]. Nature, 163:688.
- Sommer U, Maciej GZ, Lampert W, et al.1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters[J]. Hydrobiologia, 106:433-471.
- Talling J F.1986. The seasonality of phytoplankton in African lakes[J]. Hydrobiologia, 138:139-160.

(责任编辑 万月华)

Seasonal Succession of Phytoplankton Community Structures and Analysis
of Spring Water Bloom in Subtropical Reservoir
——As Tangpu Reservoir in Zhejiang Province

SHI Lian-dong¹, ZHU Wei-jia¹, ZHANG Jun-fang², CHEN Hang¹, LIANG Liang¹, MA Pei-ming²

- (1. Shaoxing Tangpu Reservoir Co., Ltd., Shangyu 312364, P. R. China;
2. 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)

Abstract: Tangpu Reservoir, which is the important resource drinking water of Shaoyu Plain, plays an important role in regional economic and social developments. In order to understand the seasonal succession of the phytoplankton community structure and water quality status, Phytoplankton, hydrological characteristics and physic-chemical factors in Tangpu Reservoir were investigated in four consecutive seasons of May 2010, August 2010, November 2010 and February 2011. The results showed that there were 105 species of phytoplankton belonging to 7 classes and 58 genera, which were mainly composed of Chlorophyta, Bacillariophyta and Cyanophyta. The numbers of species varied in different seasons as follows: summer > autumn > winter > spring. The number of species in each sampling site showed a decreasing trend from riverine zone to lacustrine zone. Phytoplankton abundance ranged between 3.27×10^6 and 128.90×10^6 cells/L which was lowest in winter and highest in spring. Phytoplankton was mainly composed of Bacillariophyta and Cyanophyta in spring, Cyanophyta and Chlorophyta in summer, Cryptophyta and Bacillariophyta in autumn, and Bacillariophyta in winter. Phytoplankton abundance and diversity indices all indicated that water quality was worst in spring and algal bloom was outbroke. The nano-diatoms *Achnanthes catenatum* was the absolutely dominant species in spring bloom. The algae bloom may be due to the combined effects of rainfall, reservoir operation, nutrients and other factors.

Key words: phytoplankton; seasonal succession; spring water bloom; Tangpu Reservoir; subtropical