DOI:10.15928/j.1674-3075.2019.04.005

环境因子对供水水库原生动物群落特征的影响

胡菊香[1],梁 亮[2],池仕运[1],赵 萍[1],余博识[2],马沛明[1],唐华峰[2],郑丹萍[2]

(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.绍兴市汤浦水库有限公司,浙江 上虞 312364)

摘要:为探究水库环境因子对原生动物群落特征的影响,2016年对浙江汤浦水库进行逐月全年采样,从上游库尾至下游坝前共设6个调查站位。结果表明,汤浦水库检出原生动物37种,隶属5纲、18科、22属;群落种类数呈现双峰型,夏季最高,秋季次之,春冬季相对较低;密度年均值为1 608个/L,呈现单峰型,高峰值出现在8月,食菌功能类群在夏季占比最高,夏秋季高于春冬季。水库纵向分布呈现种类数及密度均为上游高于中下游的特点,6月空间异质性处于最高水平。优势种分析表明,食菌功能类群的旋回侠盗虫(*Strobilidium gyrans*)、王氏似铃壳虫(*Tintinnopsis wangi*)、小筒壳虫(*Tintinnidium pusillum*)及膜袋虫(*Cyclidium* sp.)优势明显。典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis,CCA)前置选择发现,30个环境因子中,总氮、水温、藻类细胞数、总硅和浊度是影响汤浦水库原生动物群落结构的重要环境因子。Spearman秩相关分析结果显示,原生动物密度与藻类细胞数和水温呈显著正相关,而与总氮呈显著负相关。水库的3个雨季及6月泄洪阶段,是促使夏季原生动物高峰期出现的一个重要原因,营养状况差异是造成原生动物时空分布差异的主要原因。

关键词:原生动物;群落结构;环境因子;汤浦水库

中图分类号:Q145 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2019)04-0030-12

原生动物是水库污染的重要指示物种,其群落种类和数量可以随着水体污染程度变化而消长(Finlay, 1980; 许木启和曹宏, 2004)。由于原生动物个体小、结构简单、对环境变化敏感,常被用来反映水体营养水平现状或有机污染所造成的影响(Cairns & Schalie, 1980; 马徐发等, 2005; 李莉娜, 2009),已被广泛应用于评价河流、湖泊水质污染状况(许木启和翟家骥, 1998; 杨亮杰等, 2014; 吴明姝, 2015; 吴利等, 2017)。对于供水水库,原生动物是其水生态系统中重要的初级消费者和被捕食者,对物质循环和能量流动起重要作用(许木启等, 2001; 杨小林, 2008; 望甜, 2010);还是评估渔产力的重要指标(吕光俊, 2010; 郭凯等, 2013; 张家卫, 2016)。原生动物对水质有很好的响应关系,氮磷元素在影响原生动物群落组成与分布中起主要作用(陈小娟等, 2013; 郑金秀等, 2015)。水库中浮游动物常常具有纵向梯度分布和季节演替(李莉娜, 2009; 望甜, 2010; 刘丙阳等, 2011);与水文、水质等环境因子关系比较密切。

汤浦水库位于浙江省绍兴市上虞区汤浦镇与柯桥区王坛镇(120°30′ ~ 120°45′E; 29°38′ ~ 29°54′N),库容2.35亿 m^3,集雨面积460 km^2,是一座典型的丘陵型水库,季风盛行,四季分明,降雨充沛,降雨不均,3-8月降雨量约占全年降水量的85%以上。3个雨季的雨量明显高于其他时期,分别是3-4月的桃花雨季、6月的梅雨季和8-10月的台风季(石雯倩,2014)。水库以供水为主,兼顾防洪,为区域性专用水源地(马沛明等, 2016)。目前,已有汤浦水库水质状况的相关报道(朱建坤等, 2010; 石雯倩, 2014)。本项目组此前已报道了汤浦水库浮游植物群落结构(马沛明等, 2016; 张俊芳等, 2017)、浮游动物中的轮虫(赵萍等, 2017)、桡足类和枝角类(陈明秀等, 2014),但有关汤浦水库原生动物的群落结构尚未报道。原生动物作为水生态系统食物链中的初级消费者和被捕食者,对水生态系统变化响应迅速(郑金秀等, 2015)。通过对原生动物群落时空分布及其对环境因子响应的研究,可以反映汤浦水库水生态系统的状况及其发展趋势,以期为水生态保护提供技术支撑。

收稿日期:2019-02-03

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51279112);国家自然科学青年基金项目(51209148);湖北省自然科学基金项目(2017CFB678);江西省水利厅重点科研项目(KT201624);中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW036)。

作者简介:胡菊香,1966年生,女,研究员,主要从事水生态监测与评价研究。E-mail:hujuxiang2005@163.com;共同第一作者简介:梁亮,1983年生,男,工程师,主要从事水库水环境与水生态研究。E-mail:jouy_007@163.com

1　材料与方法

1.1　采样站位和时间设置

在汤浦水库共设置 6 个采样站位(图 1),从上游到坝前分别是库尾库湾站位 S1(双江溪)和 S2(王化溪)、库中站位 S3(托潭)和 S4(库中)、下游库湾站位 S5(宅阳)、坝前站位 S6(取水口)。2016 年的每月中旬进行 1 次采样,水库 3－5 月为春季,6－8 月为夏季,9－11 月为秋季,12－2 月为冬季。

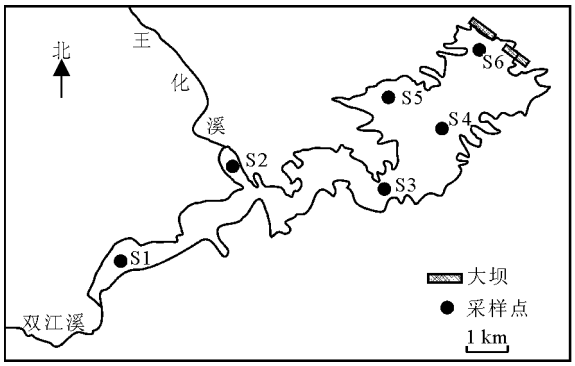


图 1　汤浦水库采样点分布

Fig.1　Location of sampling sites in Tangpu Reservoir

1.2　样品收集与处理

原生动物定性样品用 25 号浮游生物网(孔径为 64 μm)在水体表层呈“∞”字形来回拖动 3～5 min 捞取,4%福尔马林固定。定量样品在水表层 0.5 m 处采集 2 L,用 15%的鲁哥试液固定,经 48 h 沉淀后,浓缩至 30 mL,以备镜检。原生动物计数采用 0.1 mL的计数框,于显微镜下进行全片计数,然后换算成每升水中的个数,计数两次,取其均值。把生物体当作一个近似几何图形,由体积公式估算出生物量,并假定比重为 1,获得生物量(章宗涉和黄祥飞, 1991),原生动物分类鉴定及食性分析参考相关文献(蒋燮治等, 1983; Pratt & Cairns, 1985; 沈韫芬等, 1990;陈廷等, 2004)。

共测定 30 个环境因子。水质指标包括水温(WT)、电导率(EC)、浊度(Turbi)、色度(Color)、溶氧(DO)、透明度(SD)、酸碱度(pH)、氯化物(Cl)、氟离子(F)、硫酸根离子(SO_4^{2-})、氨氮(NH_4^+-N)、亚硝酸盐(NO_2^--N)、硝酸盐(NO_3^--N)、磷酸盐(PO_4^{3-}-P)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐(COD_{Mn})、叶绿素 a(Chl-a)、总碳(TC)、总无机碳(TOC)和总硅(TSi);生物指标包括藻类细胞数(Cells)和粪大肠菌群(FC);水文指标包括月降雨量(PRC)、日均供水(WS)、日均库容(SC)、日均入库流量(FL)、日均水位(WL)、月蒸发量(EV)和水力滞留时间(HRT)。水温、酸碱度、溶氧和电导率指标采用便携式水质分析仪(YSI－6600)现场测定;透明度采用塞式透明度盘现场测定;而生物指标和其他水质指标采用实验室水样检测方法获取;水文指标由绍兴市汤浦水库有限公司提供。

1.3　数据处理

原生动物群落与环境因子的关系用 CANOCO v5.0 分析,其中物种采用原生动物密度和生物量数据,而环境因子采用 30 个环境指标,除 pH 外,均进行 $\lg(x+1)$转换(冯佳等, 2016)。在进行多元统计分析前,密度数据未进行任何转换。在数据预分析阶段,对物种数据进行除趋势分析(Detrended Correspondence Analysis,DCA),根据第一轴长度选择 RDA(Redundancy Analysis)或 CCA(Canonical Correspondence Analysis)分析。若第一轴长度大于 4.0,则选择 CCA 分析;若小于 4.0,则选择 RDA 分析。分析过程中,环境因子进行自动前置选择,并经过 Monte Carlo Permutation 检验后,筛选出对物种数据影响较大的环境因子,关键环境因子使用 Spearman 秩相关分析。原生动物群落的逐月 Bray-Curtis 双序图采用 PC-ORD v6.19 绘制。基本图表绘制采用 Origin v9.0 和 SPSS v21.0。

2　结果与分析

2.1　环境因子

2016 年汤浦水库环境因子测定结果见表 1。就水文指标而言,汤浦水库降雨量较多的月份为 8 月、10 月(台风雨季)、6 月(梅雨季)和 3－4 月(桃花雨季),占全年总降雨量的 71.98%;日均入库流量与降雨量相似,较多的月份也为 6 月、10 月和 3－4 月,占全年总入库流量的 67.05%。日均供水量较多的月份为 7－8 月,日均库容较高的月份为 5－7 月,且日均水位维持在较高水平;7－8 月蒸发量处于较高水平。

就水质指标而言,水温在 6－10 月维持在 20℃以上水平,1－2 月水温则低于 10℃;溶氧除 7－11 月处于较低水平外,其余月份处于较高水平;水体在 3－10 月处于弱碱性,而在其余月份处于弱酸性;电导率除 1－2 月偏低外,其余月份波动不大;色度在 11－12 月处于较高水平,其余月份色度处于 10 度以下;粪大肠杆菌随月份波动幅度较大,最高值出现在 11 月;透明度除 10 月处于较低水平外,其余大部分月份在 1.5 m 以上;浊度在 1 月、10－11 月处于较

高水平，其余月份处于较低水平。藻类细胞数在5月、8－11月处于较高水平，叶绿素a在5月和10月处于较高水平，高锰酸盐指数在2.0 mg/L左右波动，氨氮水平处于地表水Ⅱ类限值以内，亚硝酸盐和硝酸盐随月份波动幅度较大，磷酸盐随月份波动幅度不大，硫酸盐在13.0 mg/L左右波动，总磷浓度维持在地表水Ⅱ－Ⅲ类水平，总氮含量大部分月份处于地表水劣Ⅴ类水平，总碳在5月和8月处于较高水平，氯化物远低于集中式生活饮用水地表水源地标准限值250 mg/L，氟离子处于地表水Ⅰ类水平，总无机碳基本在2.0 mg/L波动，总硅在7－8月处于较高水平，进入9月以后急剧下降。

表1　汤浦水库环境因子统计

Tab.1　Monthly variation of environmental parameters in Tangpu Reservoir

类型	参数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
水文	月降雨量/mm	41.0	105.2	112.6	141.7	62.0	287.4	17.7	246.9	57.5	287.3	43.8	91.4
	日均供水/万 m^3	83.8	63.2	84.9	85.9	88.6	89.4	103.9	104.2	96.0	90.9	89.5	89.7
	日均库容/亿 m^3	1.47	1.47	1.64	1.70	1.83	1.90	1.81	1.52	1.36	1.72	1.66	1.50
	水力滞留时间/d	175	232	193	198	206	212	174	146	142	189	185	167
	日均入库流量/万 m^3	69.9	111.4	153.1	106.4	64.0	314.6	17.8	43.6	19.6	262.7	13.3	71.7
	日均水位/m	29.1	29.1	30.4	30.9	31.9	32.4	31.7	29.5	28.2	31.0	30.6	29.4
	月蒸发量/mm	21.4	24.3	59.4	94.3	101.8	62.4	207.4	183.0	99.9	69.6	45.8	21.4
水质	水温/℃	8.1	8.6	10.8	15.9	18.5	23.9	28.7	30.9	27.2	21.6	18.0	13.3
	溶氧/mg·L^{-1}	10.96	11.44	11.70	10.58	10.04	8.94	7.79	7.28	7.51	7.18	7.18	8.40
	酸碱度	6.75	6.85	7.11	7.44	7.35	7.74	8.09	7.15	7.56	7.02	6.87	6.84
	电导率/μS·cm^{-1}	97.45	96.10	103.09	102.58	101.56	102.38	107.55	109.88	111.16	110.15	111.28	113.60
	色度	8.46	8.62	6.92	9.38	8.69	7.85	8.62	8.31	9.69	15.77	13.85	7.77
	透明度/m	2.37	2.33	2.34	2.20	1.77	2.85	2.59	1.79	2.10	1.00	1.96	1.64
	浊度/NTU	4.8	2.0	2.9	2.8	2.8	2.1	2.3	2.2	2.1	6.6	4.1	2.3
	叶绿素a/mg·L^{-1}	1.46	1.09	3.13	5.47	7.28	4.73	3.33	4.24	5.02	6.33	5.16	0.00
	高锰酸盐/mg·L^{-1}	1.25	1.35	1.17	1.72	1.95	1.95	2.05	2.05	1.85	1.98	1.85	1.74
	氨氮/mg·L^{-1}	0.088	0.106	0.048	0.030	0.030	0.056	0.062	0.030	0.047	0.074	0.08	0.041
	亚硝酸盐/mg·L^{-1}	0.022	0.017	0.019	0.014	0.018	0.027	0.021	0.014	0.014	0.036	0.012	0.027
	硝酸盐/mg·L^{-1}	1.946	1.938	1.800	1.969	1.969	1.877	1.454	1.323	1.562	2.177	2.008	1.700
	磷酸盐/mg·L^{-1}	0.014	0.013	0.012	0.011	0.012	0.014	0.014	0.014	0.010	0.014	0.011	0.010
	硫酸盐/mg·L^{-1}	13.62	13.68	13.65	14.31	13.72	3.80	13.08	13.35	13.82	13.54	13.14	12.12
	总氮/mg·L^{-1}	2.38	2.36	2.05	2.45	2.36	2.17	1.93	1.7	1.93	2.92	2.39	2.62
	总磷/mg·L^{-1}	0.025	0.018	0.012	0.019	0.027	0.021	0.020	0.020	0.018	0.037	0.029	0.016
	总碳/mg·L^{-1}	146.38	44.15	191.77	127.69	400.23	295.62	185.00	947.85	165.85	362.23	331.54	136.54
	氯化物/mg·L^{-1}	3.43	3.49	4.09	3.91	3.64	3.72	3.68	3.88	4.01	3.93	4.23	3.82
	氟离子/mg·L^{-1}	0.108	0.177	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.115	0.100	0.100	0.192	0.100
	总无机碳/mg·L^{-1}	2.34	2.28	1.52	2.02	2.05	1.73	2.24	2.27	1.97	2.00	1.63	1.48
	总硅/mg·L^{-1}	7.06	5.86	7.98	8.04	9.02	8.41	11.23	11.22	4.88	5.42	4.55	3.05
生物	藻细胞/×10^6 个·L^{-1}	1.95	1.66	2.58	3.75	5.27	2.40	3.34	4.38	4.60	5.84	4.61	2.79
	大肠杆菌/CFU·L^{-1}	237.54	37.62	56.62	194.31	195.69	141.69	58.92	246.46	165.08	83.92	248.08	22.54

综合营养状态指数计算结果表明(图2)，2016年汤浦水库除了1－3月中下游站位及12月所有站位处于贫营养状态外，其他月份各站位均处于中营养状态。从时间分布看，5月及10月各站位综合营养状态指数最高，12月处于最低；从空间分布看，上游站位S1、S2综合营养状态指数显著高于中游站位S3及下游站位S4、S5和S6。季节上看，水库营养水平表现为冬季贫营养，至春季上升为中营养，春季末上游双江溪库湾和王化溪库湾轻度富营养，其余站位维持中营养。从原生动物密度与综合营养状态指数相关性来看，水库原生动物密度随营养水平的增加而增加($r=0.334$，$P<0.01$)。

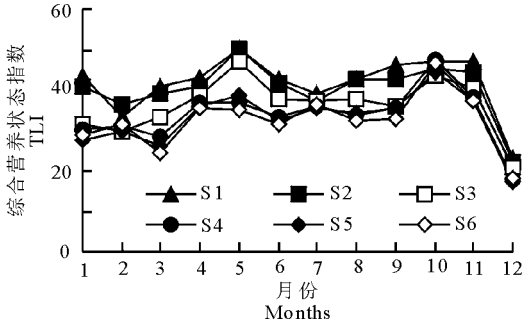


图2　2016年汤浦水库全年各样点综合营养状态指数变化

Fig.2　Monthly variation of the comprehensive nutritional status index at each sampling site of Tangpu Reservoir in 2016

2.2　种类组成

2016 年全年共检出原生动物 37 种,隶属 5 纲、18 科、22 属(表 2)。其中,肉足虫 11 种,纤毛虫 26 种。水库常年可见的原生动物有叉口砂壳虫、睥睨虫、蚤中缢虫、球吸管虫、膜袋虫、弹跳虫、小筒壳虫、淡水筒壳虫、湖沼似铃壳虫、旋回侠盗虫和王氏似铃壳虫。按照原生动物食性划分,汤浦水库有食菌和碎屑者(B 类)26 种,食藻者(A 类)21 种,无选择的杂食者(N 类)2 种,捕食者(R 类)4 种。总体来看,B 类和 A 类占比较大。

表 2　2016 年汤浦水库原生动物种类及功能类群

Tab.2　Protozoan species composition and the corresponding functional groups in Tangpu Reservoir in 2016

种类	缩写	功能类群	采样点					
			S1	S2	S3	S4	S5	S6
半圆表壳虫 *Arcella hemisphaerica*	Arhe	A,B		+				
球砂壳虫 *Difflugia globulosa*	Digl1	A	+	+	+		+	
橡子砂壳虫 *Difflugia glans*	Digl2	A,B	+	+		+		
叉口砂壳虫 *Difflugiagramen*	Digr	A	+	+	+	+	+	+
瓶砂壳虫 *Difflugia urceolata*	Diur	A,B	+	+	+			+
褐砂壳虫 *Difflugia bidens*	Dibi	A		+				
双叉砂壳虫 *Difflugia avellana*	Diav	A,B	+					
棘瘤砂壳虫 *Difflugia tuberspinifera*	Ditu	A,B	+	+	+	+	+	+
杂葫芦虫 *Cucarbitella mespiliformis*	Cume	A,B	+			+		
放射太阳虫 *Actinophrys sol*	Acso	N,A	+		+	+		
苍白刺日虫 *Raphidiophrys pallida*	Rapa	N,A					+	
简裸口虫 *Holophrya simplex*	Hosi	B		+				
腔裸口虫 *Holophrya atra*	Hoat	B					+	
纺锤斜吻虫 *Enchelydium fusidens*	Enfu	B	+		+			
天鹅长吻虫 *Lacrymaria olor*	Laol	R	+	+	+	+	+	
长颈虫 *Dileptus* sp.	Disp	A	+	+	+			
吻单环栉毛虫 *Didinium balbianii rostratum*	Dibr	B					+	
单环栉毛虫 *Didinium balbianii*	Diba	R					+	
双环栉毛虫 *Didinium nasutum*	Dina	R	+		+		+	+
睥睨虫 *Askenasia* sp.	Assp	B	+	+	+	+	+	+
蚤中缢虫 *Mesodinium pulex*	Mepu	B	+	+	+	+	+	+
球吸管虫 *Sphaerophrya* sp.	Spsp	R	+	+	+	+	+	
一种睫杵虫 *Ophryolena* sp.	Opsp	A						+
草履虫 *Paramecium* sp.	Pasp	B				+		
善变膜袋虫 *Cyclidium versatile*	Cyve	B	+					
膜袋虫 *Cyclidium* sp.	Cysp	B	+	+	+	+	+	+
浮游累枝虫 *Epistylis rotans*	Epro	B	+	+	+	+	+	+
钟虫 *Vorticella* sp.	Vosp	B	+	+		+	+	+
旋回侠盗虫 *Strobilidium gyrans*	Stgy	A,B	+	+	+	+	+	+
陀螺侠盗虫 *Strobilidium velox*	Stve	A,B			+			
弹跳虫 *Halteria* sp.	Hasp	B	+	+	+	+	+	+
小筒壳虫 *Tintinnidium pusillum*	Tipu	A,B	+	+	+	+	+	+
淡水筒壳虫 *Tintinnidium fluviatile*	Tifl	A,B	+	+	+	+	+	
王氏似铃壳虫 *Tintinnopsis wangi*	Tiwa	A,B	+	+	+	+	+	+
湖沼似铃壳虫 *Tintinnopsis lacutris*	Tila	A,B	+	+	+	+	+	+
中华似铃壳虫 *Tintinnopsis sinensis*	Tisi	A,B	+	+		+		
似铃壳虫 *Tintinnopsis* sp.	Tisp	A,B					+	
合　　计/种			26	23	21	20	22	15
有壳肉足虫比例/%			26.9	30.4	19.0	20.0	13.6	20.0

注:"+"表示样品中已检出。A:食藻者;B:食菌和碎屑者;N:无选择的杂食者;R:捕食者。

Note: "+" means that the samples have been detected. A: algae eaters; B: fungicides and debris eaters; N: omnivores without choice; R: predators.

原生动物种类数呈现双峰型,种类数最高出现在 7-8 月,均为 19 种;其次为 10 月,18 种;种类数最低出现在 4 月,为 4 种,其次为 3 月和 1 月,分别为 6 种和 8 种。原生动物种类组成上,上游站位的肉足虫占比显著大于中下游站位(表 2),且在 9 月达到最高,为 53%(图 3)。原生动物种类数在季节分布上,为夏秋季高于春冬季;各站位原生动物种类数季节分布表明,站位 S1、S2 在夏季种类数最高,

其次是秋季;其他各样点在秋季种类数最多,夏季其次。在空间分布上,站位S1、S2在夏秋季显著高于其他站位(图4)。

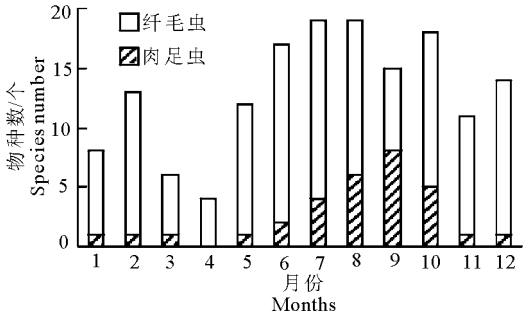


图3　2016年汤浦水库原生动物种类数

Fig.3　Monthly variation of protozoan species number of Tangpu Reservoir in 2016

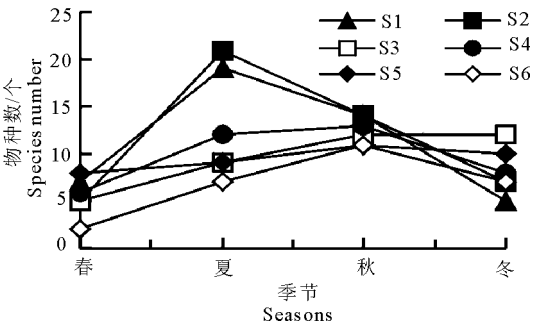
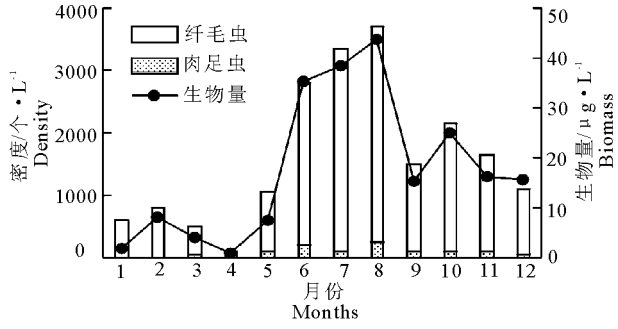


图4　2016年汤浦水库各站位原生动物种类数季节变化

Fig.4　Seasonal changes of protozoan species number at each sampling site of Tangpu Reservoir in 2016



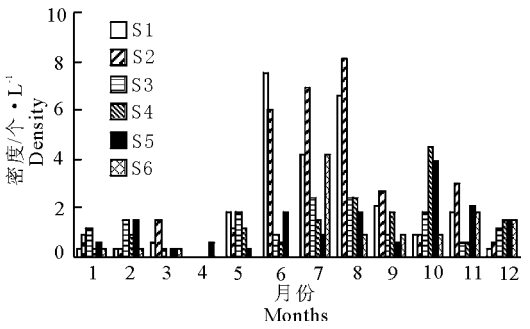


图5　2016年汤浦水库原生动物密度和生物量(a)及各站位密度(b)的时空分布

Fig.5　Monthly variation of protozoan density and biomass (a) and spatial-temporal distribution of protozoan density (b) in Tangpu Reservoir in 2016

2.3　现存量及优势种

2016年汤浦水库原生动物密度均值为1 608个/L,变化范围为100～3 700个/L。从时间上看,密度呈现单峰型分布,在8月达到最高,为3 700个/L;4月最低,为100个/L。生物量变动范围为1～43.8 μg/L,均值为17.7 μg/L,其变化趋势与密度基本一致(图5-a)。从空间分布来看,站位S1和S2原生动物密度在6－8月处于较高水平,S3原生动物密度在7－8月处于较高水平,S4和S5的原生动物密度均在10月达到最高水平,而S6的原生动物密度则在7月达到最高水平,其余月份处于较低水平(图5-b)。

在空间分布上,原生动物功能类群无论是A类还是B类,其密度和生物量均是上游显著高于中游和下游。从季节上来看,功能类群A和B的密度及生物量均为夏季处于最高水平(图6)。原生动物主要优势种有4种,分别为旋回侠盗虫(*Strobilidium gyrans*)、王氏似铃壳虫(*Tintinnopsis wangi*)、小筒壳虫(*Tintinnidium pusillum*)及膜袋虫(*Cyclidium* sp.)。优势种年均密度为966.7个/L,占总密度的60.1%,其中旋回侠盗虫在夏季分布较为广泛,王氏似铃壳虫在春秋季分布较为广泛,小筒壳虫在春冬季分布广泛,膜袋虫在冬季分布广泛,4种主要原生动物不同季节的优势度见表3。

2.4　时空异质性

对原生动物的密度进行lg(x＋100)处理后的误差条形图分析表明,站位S1、S2、S4、S6的时间变异性较高,而S3和S5较低,表明S1、S2、S4、S6原生动物的密度随月份波动幅度较大,S3和S5的波动幅度较小(图7-a);3－6月原生动物密度的空间变异性较高,而其他月份相对较低,表明汤浦水库原生动物密度空间异质性在3－6月处于较高水平,尤其是6月其空间异质性处于最高水平(图7-b)。

从不同站位原生动物的群落结构来看,春季3月和5月(由于4月只有1个站位检出有效数据,其余站位因藻类水华爆发未能检出有效数据,故无法做出双序图)同样是位于库尾的王化溪库湾和双江溪库湾群落结构差异较大(图8),夏秋季这两个站位的群落结构差异程度趋于减小(图9,图10),但冬季则又趋于增大(图11);而位于下游的取水口在5月、6月、8月与其他站点的原生动物群落结构显著不同(图8,图9)。

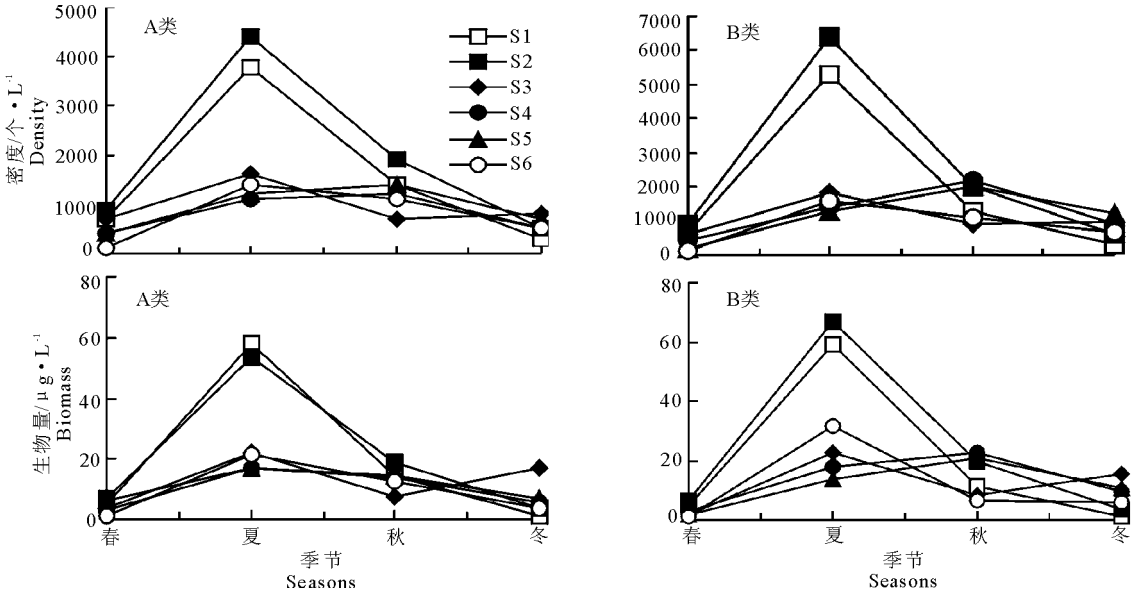


图 6　2016 年汤浦水库各样点原生动物功能类群 A、B 密度及生物量的季节变化

Fig.6　Seasonal changes of protozoan density and biomass for function group A and B in Tangpu Reservoir in 2016

表 3　2016 年汤浦水库不同季节原生动物优势度　%

Tab.3　Seasonal variation of dominant species in the protozoan community of Tangpu Reservoir

季节	旋回侠盗虫	王氏似铃壳虫	小筒壳虫	膜袋虫
春季		10.5	10.3	
夏季	9.9			
秋季		7.9		
冬季	2.0		4.0	2.7

2.5　生物多样性

就时间尺度而言,汤浦水库原生动物 Shannon-Wiener 指数年均值为 0.8319,在 1－5 月处于较低水平,而在 7－12 月则处于较高水平(图 12-a);就空间尺度而言,站位 S1、S2 和 S4 的原生动物 Shannon-Wiener 指数处于相对较高水平,而 S3、S5 和 S6 则处于相对较低的水平(图 12-b)。

2.6　群落与环境因子关系

对原生动物密度进行 DCA 分析结果表明,第一轴长度为 6.41,大于 4.0,选择 CCA 分析密度和环境因子间的关系,鉴于环境因子较多,利用前置选择筛方法选出较为重要的环境因子。蒙特卡洛置换检验结果表明,CCA 第一排序轴和所有排序轴的典范系数反映的回归系数均具有显著性(对第一轴,$P=0.002$,对所有轴,$P=0.008$),表明排序结果很好。前两轴共计解释了 14.04%的物种数据变异,物种-环境相关系数较高,且第一轴对物种-环境数据累计解释率达 51.03%,第二轴达 77.76%。

前置选择结果表明,有 5 个环境因子对原生动物群落结构有重要影响,总计解释了 18.05%的物种数据变异(表 4)。这 5 个重要环境因子分别为总氮、水温、藻细胞数、总硅和浊度(图 13)。基于原生动物密度和 5 个关键环境因子 Spearman 秩相关分析结果表明,原生动物密度与藻类细胞数和水温呈显著正相关,而与总氮呈显著负相关。浊度和总硅对原生动物密度的影响效应趋于弱化,与关键环境因子的相关性分析结果见表 5。

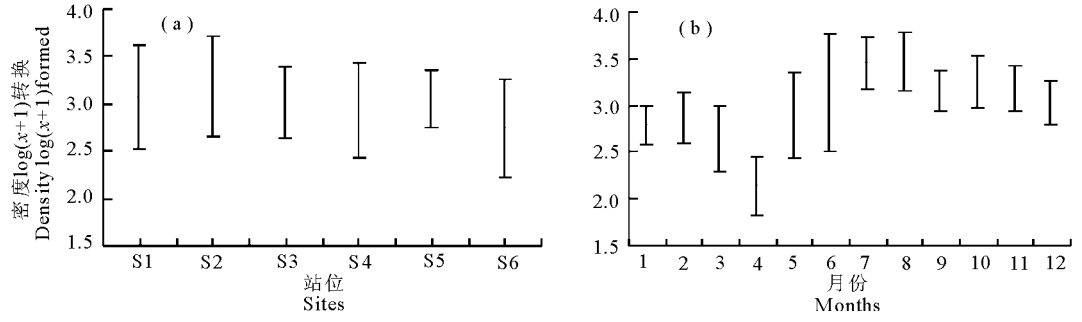


图 7　汤浦水库原生动物密度时空变异性分析

Fig.7　Spatiotemporal heterogeneity of protozoan community density in Tangpu Reservoir

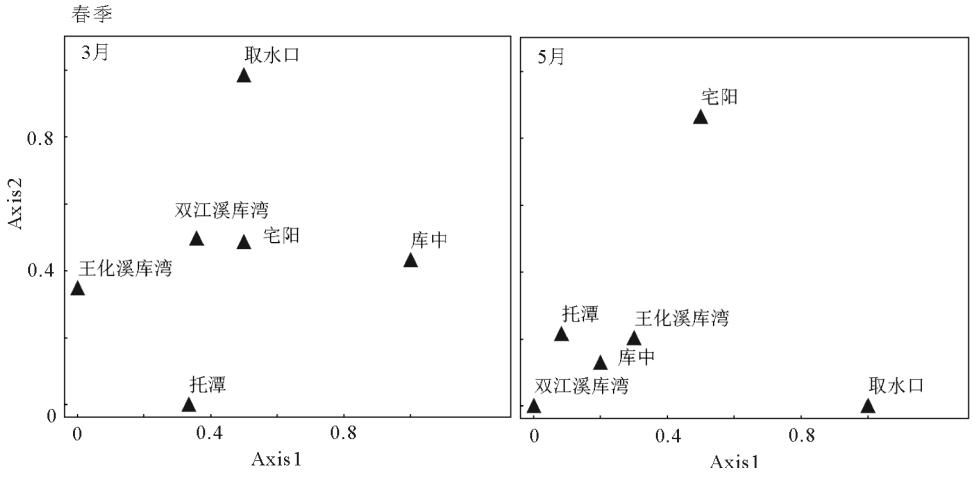


图 8 春季不同站位原生动物 Bray-Curtis 双序图

Fig.8 Bray-Curtis biplots of each site based on spring protozoan community structure

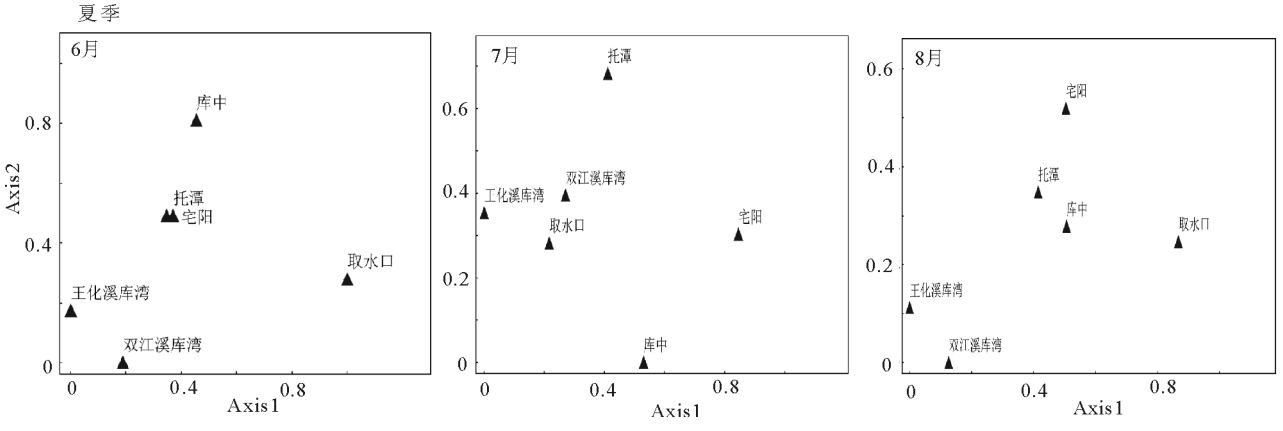


图 9 夏季不同站位原生动物 Bray-Curtis 双序图

Fig.9 Bray-Curtis biplots of each site based on summer protozoan community structure

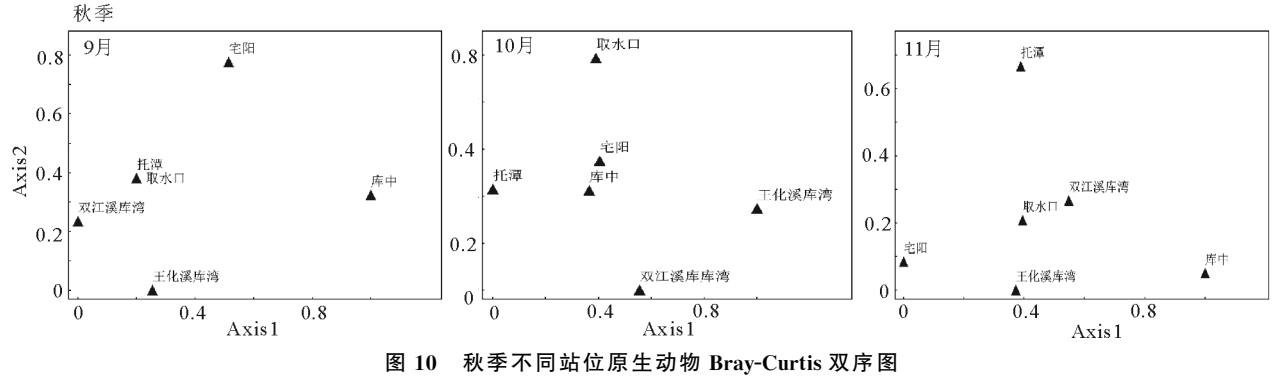


图 10 秋季不同站位原生动物 Bray-Curtis 双序图

Fig.10 Bray-Curtis biplots of each site based on autumn protozoan community structure

3 讨论

3.1 营养水平对群落特征的影响

水库是兼有河流和湖泊特性的半人工半自然水体,径流带来主要的营养物质(林秋奇和韩博平,2001)。作为汤浦水库主要支流的入库口,双江溪库湾和王化溪库湾分别接纳了70%和30%的来自支流的污染物(周晓燕等,2008),因此具有低透明度及高浓度的营养盐。随着水库流程延长和泥沙沉降,自净作用使得水质得到改善,托潭、库中、宅阳、取水口4个站位中,透明度逐渐升高,营养盐浓度下降。从季节上看,汤浦水库营养水平呈现冬季贫营养、春季中营养、春季末上游双江溪库湾和王化库湾轻度富营养、其余站位维持中营养水平的特点。与

其他相似类型水库对比，辽宁清河水库 2013 年综合营养状态指数为中营养（郑莉，2016）；湖北浮桥河水库 1998－1999 年营养水平为中-富营养水平（常秀岭等，2010）；汤浦水库只在部分时节氮磷处于较高水平。原生动物种类及密度在空间分布上，汤浦水库均为上游站位高于中游及下游站位，且上游肉足虫占比高于下游，可以推断出不同站位水质营养状况差异是造成原生动物空间分布差异的主要原因，结合原生动物密度与综合营养状态指数相关性来看（$r=0.334$，$P<0.01$），汤浦水库原生动物密度随营养水平的增加而增加，也反映出从上游至下游水质得到明显改善。

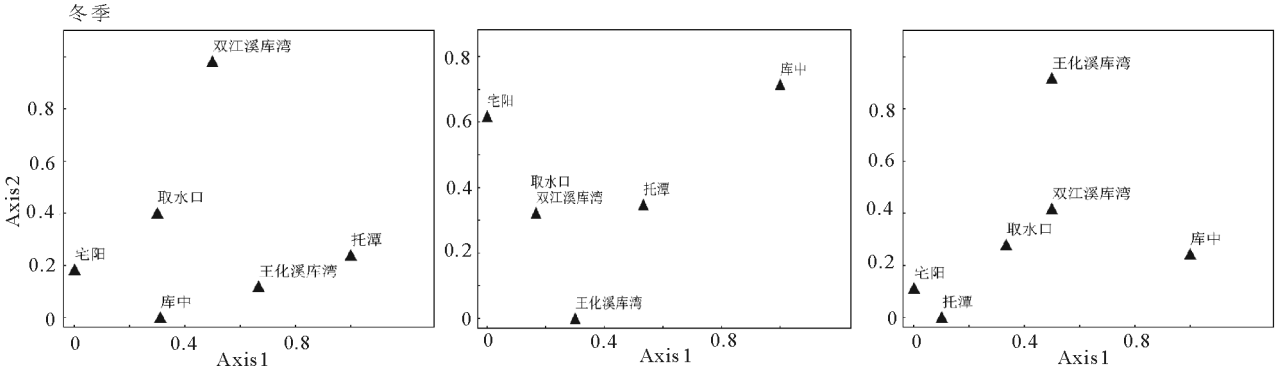


图 11　冬季不同站位原生动物 Bray-Curtis 双序图

Fig.11　Bray-Curtis biplots of each site based on winter protozoan community structure

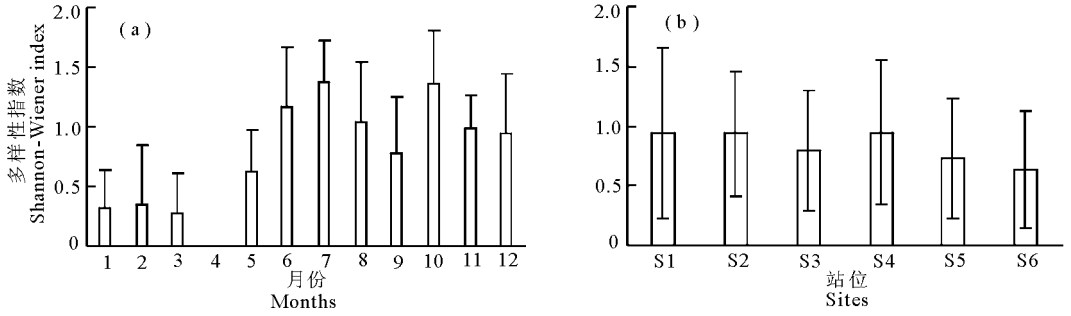


图 12　汤浦水库原生动物的 Shannon-Wiener 指数分布

Fig.12　Spatial-temporal distribution of the Shannon-Wiener indices of the protozoan community in Tangpu Reservoir

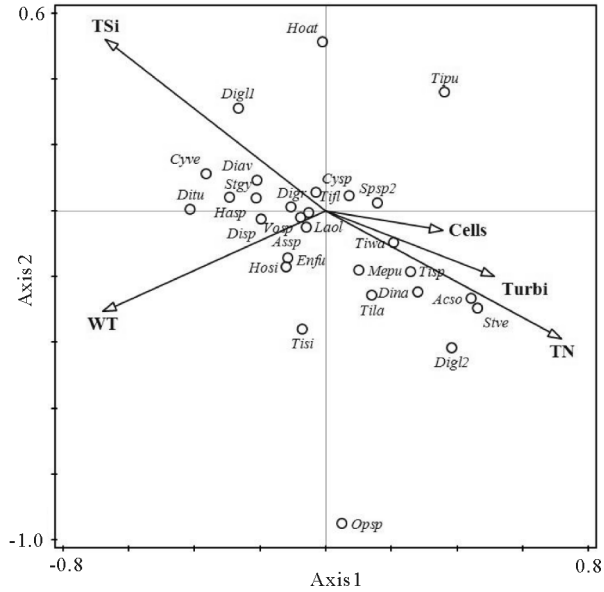


图 13　汤浦水库原生动物密度与环境因子 CCA 排序

Fig.13　CCA ordination of protozoan density and environmental factors of Tangpu Reservoir

表 4　重要环境因子解释的重要性和显著性检验结果

Tab.4　Importance of the selected environmental factors and significance testing

环境因子	重要性排序	解释率/%	贡献率/%	F	P
总氮	1	5.8	10.7	3.8	0.002
水温	2	3.4	6.3	2.3	0.006
藻细胞数	3	3.8	6.9	2.6	0.002
总硅	4	2.5	4.6	1.8	0.026
浊度	5	2.5	4.6	1.8	0.046

表 5　原生动物密度和关键环境因子相关性分析结果

Tab.5　Correlation coefficients between protozoan density and key environmental factors

指标	浊度	藻类细胞数	总氮	总硅	水温
r	0.228	0.385	－0.278	0.175	0.608
P	0.070	0.002	0.026	0.166	＜0.001
N	64	64	64	64	64

3.2　水文因子对群落特征的影响

汤浦水库原生动物密度季节分布上，为夏秋季

高于冬春季,这与纬度接近的其他丘陵型水库原生动物季节分布规律有所不同,如丹江口水库(109°25′-111°52′E,32°14′-33°48′N)(韩德举等,1997)、金沙河水库(114°32′-114°35′E,31°17′-31°23′N)(郭飞飞等,2016),原生动物密度季节分布规律均为秋季>春季>夏季>冬季;陆水水库(113°53′21″E,29°41′46″N)原生动物密度季节分布为冬季>秋季>春季>夏季(韩德举等,1996);这可能因为汤浦水库在春季、夏季及秋季分别受到桃花雨季、梅雨季节及台风季的影响,3个雨季的降雨量占全年总降雨量的71.98%,入库流量占全年总入库流量的67.05%。正是由于汤浦水库有明显的3个雨季,集中的降雨量和入库量改变水库的水文条件,从而模糊了水库生物的四季变化;同时,水库在梅雨季6月进行泄洪,破坏了水体的固有分层,使得分布在底层的 PO_4^{3-} 溶于水中,细菌也会均匀分布(功能类群B的种类数、密度及生物量在夏季所占比例最高),这可能在一定程度上促进了汤浦水库夏季原生动物高峰期的出现(Simek et al,2010)。

水文因子中,水力滞留时间和调水量起主要作用。调水量对浮游动物群落结构的影响,主要是通过水体流动和增加水体中的悬浮物起作用(Buyukates & Roelke,2005;孔令惠等,2010);水力滞留时间是影响轮虫群落组成和动态的主要非生物因子(陈丽光等,2013)。汤浦水库为丘陵型水库,常年有上游河流入库,夏季日均供水量也较多,但入库流量及水力滞留时间(HRT)均与原生动物分布的相关性并不明显,这与HRT是影响汤浦水库浮游植物的排序第一的环境因子不同(马沛明等,2016);也不同于峡谷型水库如三峡水库,通过水库调度的蓄洪补枯影响水库水文条件,进而影响原生动物的时空分布(郑金秀等,2015)。汤浦水库多年平均供水量2.78亿 m^3,日均供水量较多的月份为7-8月,处于下游的取水口站点原生动物种类、密度季节演替规律以及群落结构与其他站位不同,应该是受供水和水流条件双重影响。一方面,处于下游的取水口站点水流缓慢,营养盐较低,即使在雨季上游来水也不会直接影响到其群落结构;另一方面,夏季供水量较平时要高,取水口处会形成一定的水流,导致原生动物密度在7-8月达到最高水平,其余月份则处于较低水平。

3.3 生物因子对群落特征的影响

在水库生态系统中,浮游动物群落动态受到生物和非生物等环境因子的影响(王晓辉等,2009);生物因子中,主要是食物、捕食和竞争对浮游动物群落结构产生影响(Véronique et al,2005);水库高密度放养鱼类会导致浮游动物小型化(Threlkeld,1982;Pichlová & Brandl,2003;江孝军等,2013)。汤浦水库原生动物优势种主要为纤毛虫中的旋回侠盗虫、王氏似铃壳虫、小筒壳虫和膜袋虫,其体长全部在40 μm以内,小筒壳虫肉体和膜袋虫体长甚至小于25 μm,小型化趋势明显。浮游植物中的单细胞微型藻类是原生动物的食物,在硅藻异常增殖的春季4-5月,虽然优势种是硅藻中个体较小的弯壳藻(马沛明等,2013;2016;张俊芳等,2017),密度占总密度的34.7%~66.2%,其单个细胞体长在10~20 μm,但因其易形成链状群体,原生动物并不能摄食它们,因而春季原生动物的丰度没有随着硅藻的增多而增加;到了8月,单细胞个体较大的绿藻卵囊藻增多,小型原生动物仍然不能捕食卵囊藻;相反,高温可促使死亡的藻类分解加快,有机碎屑增多,加之夏季雨季的影响,原生动物才得以迅速增多。

汤浦水库与我国许多水库一样,也是每年放养鲢鳙以净化水质,防止藻类水华发生,鲢鳙对大型浮游动物中的枝角类、桡足类和轮虫的摄食力度较大。因此,作为小型浮游动物的原生动物,反而获得了生存空间。与同类型的放养水库相比,密度处于同一数量级,达到1 000个/L以上(吕光俊,2010);但与长江流域富营养化的湖泊相比(胡菊香等,2007),汤浦水库的原生动物密度要低2个数量级。对于汤浦水库上游的原生动物,由于其肉足虫占比较中下游高,而肉足虫为既可食藻、又可食菌和碎屑者的表壳虫和砂壳虫,其个体较大,对生物量的贡献也就较大。因此,上游站位的原生动物生物量普遍较中下游要高。

3.4 重要环境因子对群落特征的影响

汤浦水库原生动物群落与环境因子的CCA排序表明,重要环境因子排名前三的为总氮、水温和藻类细胞数。原生动物密度与水温和藻类细胞数呈显著正相关,而与总氮呈显著负相关。这与汤浦水库浮游植物主要受HRT和 SiO_2 影响完全不同,HRT主要影响浮游植物的尖尾蓝隐藻和模糊直链藻,SiO_2 影响浮游植物的硅藻-链状弯壳藻(马沛明等,2013)。原生动物优势种主要为混合营养的肉足虫和纤毛虫,其密度与浮游植物密度呈显著正相关,与武汉东湖(吴生桂和沈韫芬,2001)、杭州西溪国家湿地公园(孙志强等,2013)、太湖梅梁湾湖区(蔡后

建，1998)结果类似。有研究表明，在一定温度范围内，原生动物种群增长率与水温呈正相关(徐润林等，1991)。因本研究为周年逐月采样，水温变化明显影响到原生动物的群落结构。对于总氮，汤浦水库大部分月份处于地表水劣Ⅴ类水平，导致原生动物 Shannon-Wiener 指数年均值只有 0.8319，总氮已明显影响了原生动物的生物多样性水平。

参考文献

蔡后建，1998. 原生动物纤毛虫对太湖梅梁湾水质富营养化的响应[J]. 湖泊科学，10(3)：43－48.

常秀岭，刘家寿，胡传林，等，2010. 湖北浮桥河水库悬浮物的季节变化[J]. 湖泊科学，22(2)：300－306.

陈丽光，林秋奇，韩博平，2013. 茜坑水库轮虫群落结构组成和动态[J]. 水生态学杂志，34 (6)：27－33.

陈明秀，胡菊香，沈强，等，2014. 汤浦水库浮游甲壳类动物群落结构特征研究[J]. 水生态学杂志，35(5)：75－81.

陈廷，黄建荣，陈晟平，等，2004. 广州市区人工湖泊 PFU 原生动物群落群集过程及其对水质差异的指示作用[J]. 应用与环境生物学报，10(3)：310－314.

陈小娟，潘晓洁，邹曦，等，2013. 三峡水库小江回水区水华爆发期原生动物群落的初步研究[J]. 水生态学杂志，34 (6)：1－6.

冯佳，郭宇宁，王飞，等，2016. 太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析[J]. 环境科学，37(4)：1353－1361.

郭飞飞，张云，赵广，等，2016. 金沙河水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志，35(8)：2208－2216.

郭凯，赵文，焉鸿启，2013. 柴河水库浮游生物群落结构的时空格局及其渔产力研究[J]. 生态学杂志，34(6)：22－26.

韩德举，彭建华，简东，等，1997. 丹江口水库的饵料生物资源及水体营养状态评价[J]. 湖泊科学，9(1)：57－62.

韩德举，吴生桂，邹清，等，1996. 陆水水库的浮游生物及营养类型[J]. 湖泊科学，(4)：351－358.

胡菊香，吴生桂，唐会元，等，2007. 巢湖的原生动物及其对富营养化的响应[J]. 水生态学杂志，27(1)：76－79.

江孝军，韩博平，林秋奇，2013. 水库鱼类放养密度对浮游动物群落结构的影响[J]. 水生态学杂志，34(1)：30－36.

蒋燮治，沈韫芬，龚循矩，1983. 西藏水生无脊椎动物[M]. 北京：科学出版社：121－139.

孔令惠，蔡庆华，徐耀阳，等，2010. 丹江口水库浮游轮虫群落季节变动特征及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学，22(6)：941－949.

李莉娜，2009. 北京市密云水库浮游动物群落生态研究[D]. 北京：首都师范大学.

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.

刘丙阳，赵文，郭凯，等，2011. 辽宁汤河水库浮游动物的群落结构及其时空格局[J]. 大连海洋大学学报，26(6)：526－531.

吕光俊，2010. 不同类型水库养殖生态学的比较与放养结构调整的研究[D]. 武汉：华中农业大学.

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.

马沛明，施练东，赵先富，等，2013. 一种淡水水华硅藻—链状弯壳藻(*Achnanthidium catenatum*)[J]. 湖泊科学，25(1)：156－162.

马徐发，刘冬启，熊邦喜，等，2005. 道观河水库周丛原生动物群落结构的研究[J]. 水生态学杂志，25(5)：61－64.

沈韫芬，章宗涉，龚循矩，1990. 微型生物监测新技术[M]. 北京：中国建筑工业出版社：161－176.

石雯倩，2014. 汤浦水库流域水质变化及污染物总量控制模拟[D]. 杭州：浙江大学.

孙志强，施心路，徐琳琳，等，2013. 景观湿地夏季原生动物群落结构与水质关系[J]. 水生生物学报，37(2)：290－299.

王晓辉，望甜，林秋奇，等，2009. 华南地区典型抽水型水库后生浮游动物群落的种类组成与结构[J]. 生态学报，29(1)：456－465.

望甜，2010. 捕食与竞争—流溪河水库浮游动物群落的种间关系研究[D]. 广州：暨南大学.

吴利，周明辉，沈章军，等，2017. 巢湖及其支流浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 动物学杂志，(5)：792－811.

吴明姝，2015. 安徽省太平湖水库浮游动物群落结构及水质评价[D]. 上海：上海师范大学.

吴生桂，沈韫芬，2001. 从时空异质性看东湖富营养化中原生动物的演替[J]. 生态学报，21(3)：446－451.

徐润林，沈韫芬，顾曼如，1991. 武汉东湖浮游原生动物的生产量[C]. 第四次中国海洋与湖沼科学会议论文集[M]. 北京：科学出版社：287－301.

许木启，曹宏，2004. PFU 原生动物群落生物监测的生态学原理与应用[J]. 生态学报，24(7)：1540－1547.

许木启，翟家骥，1998. 利用 PFU 原生动物群落多样性快速监测北京通惠河水质[J]. 动物学杂志，(4)：1－7.

许木启，朱江，曹宏，2001. 白洋淀原生动物群落多样性变化与水质关系研究[J]. 生态学报，21(7)：1114－1120.

杨亮杰，吕光汉，竺俊全，等，2014. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价[J]. 水生生物学报，38(4)：720－728.

杨小林，2008. 株树桥水库浮游动物群落结构特征及水质生物学评价[D]. 长沙：中南林业科技大学.

张家卫，2016. 大伙房水库水生生物多样性及其鱼产力研究

[D]. 大连:大连海洋大学.

张俊芳,梁亮,余博识,等, 2017. 浙江省汤浦水库浮游植物功能群时空分布特征及水质评价[C]. 中国水利学会2017学术年会论文集[M]. 南京:河海大学出版社:1030-1037.

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:362-370.

赵萍,梁亮余,余博识,等,2017. 环境因子对供水水库轮虫群落影响的研究[C].中国水利学会2017学术年会论文集[M]. 南京:河海大学出版社,935-942.

郑金秀,池仕运,李聃,等, 2015. 三峡水库运行期间原生动物群落的时空异质性[J]. 生态学报, 35(11):3569-3579.

郑莉,2016. 十二五"期间清河水库水质状况[J]. 黑龙江环境通报,40(3):47-49.

周晓燕,沈雁,蔡海江,等,2008. 绍兴市饮用水源汤浦水库水质特征研究[J]. 给水排水,34(1):38-42.

朱建坤,俞海,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, (S1):219-221.

Buyukates Y, Roelke D, 2005. Influence of Pulsed Inflows and Nutrient Loading on Zooplankton and Phytoplankton Community Structure and Biomass in Microcosm Experiments Using Estuarine Assemblages[J]. Hydrobiologia, 548(1):233-249.

Cairns J Jr, Schalie W H V D, 1980. Biological monitoring part I-Early warning systems[J]. Water Research, 14(9):1179-1196.

Finlay B J, 1980. Temporal and vertical distribution of ciliophoran communities in the benthos of a small eutrophic loch with particular reference to the redox profile[J]. Freshwater Biology, 10(1):15-34.

Pichlová R, Brandl Z, 2003. Predatory impact of Leptodora kindtii on zooplankton community in the Slapy Reservoir[J]. Hydrobiologia, 504(1/3):177-184.

Pratt J, Cairns J Jr, 1985. Functional groups in the Protozoa: roles in differing ecosystems[J]. Journal of Eukaryotic Microbiology, 32(3):415-423.

Simek K, Macek M, Seda J, et al, 2010. Possible food chain relationships between bacterioplankton, protozoans, and cladocerans in a Reservoir[J]. International Review of Hydrobiology, 75(5):583-596.

Threlkeld S T, 1982. Water renewal effects on reservoir zooplankton communites[J]. Canadian Water Resources Journal, 7(1):151-167.

Véronique J, Nicole L, Lucien H, et al, 2005. Spatio-temporal patterns of protozoan communities in a meso-eutrophic reservoir (Esch-sur-Sure, Luxembourg)[J]. Hydrobiologia, 551(1):49-60.

(责任编辑 万月华)

Effects of Environmental Factors on the Protozoan Community in a Water Supply Reservoir

HU Ju-xiang[1], LIANG Liang[2], CHI Shi-yun[1], ZHAO Ping[1], YU Bo-shi[2],
MA Pei-ming[1], TANG Hua-feng[2], ZHENG Dan-ping[2]

(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. Tangpu Reservoir Co., Ltd. in Shaoxing City, Shangyu 312364, P.R.China)

Abstract: Protozoa are zooplankton characterized by small size, simple structure and sensitivity to environment change. As an important indicator of nutrient pollution, protozoa are widely used for evaluating water quality in reservoirs. In 2016, we carried out a monthly investigation of the spatial-temporal distribution of the protozoan community structure and water quality parameters in Shaoyu Plain water supply reservoir -Tangpu Reservoir. The objectives were to study the effect of environmental factors on protozoan community structure, determine the trophic status of Tangpu Reservoir and provide a scientific basis for protecting water quality in Tangpu Reservoir. Six sampling sites were set, from the upper channel to the dam, and water and protozoan samples were collected mid-month for determination of physiochemical parameters and analysis of protozoan community structure. A total of 37 protozoan species were collected, belonging to 22 genera, 18 families and 5 classes. The species richness of protozoa displayed a bimodal pattern, with the highest richness in summer (June - August) and then autumn (September - November). The annual average density was 1 608 ind/L, with a single peak in August. The proportion of the fungi-eating functional group was highest in summer, and much higher in summer and autumn than in spring (March - May) and winter (December - February). Spatially, species number and density in the upper reaches were higher than those in the middle and lower reaches of the reservoir and spatial heterogeneity was highest in June. From the fungi-eating functional group, *Strobilidium gyrans*, *Tintinnopsis wangi*, *Cyclidium* sp. and *Tintinnidium pusillum* were the dominant species and were clearly advantaged within the community. Canonical correspondence analysis (CCA) indicated that total nitrogen, water temperature, algae cell number, total silicon and turbidity were the environmental factors most affecting protozoan community structure in Tangpu Reservoir. Protozoan density was positively correlated with algae cell number and water temperature, but negatively correlated with total nitrogen. Rainfall during the rainy season and flood discharge in June were the primary factors accounting for protozoan peak in summer. Difference in nutrient level was the main reason for differences in spatial and temporal distribution of protozoa community in Tangpu Reservoir.

Key words: protozoan; community structure; environmental factors; Tangpu Reservoir