

上海崇明明珠湖原生动物的群落结构

陈立婧¹, 顾静¹, 胡忠军², 彭自然², 刘其根^{2*}

(1. 上海海洋大学省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306;

2. 上海海洋大学农业部水产种质资源与养殖生态重点开放实验室, 上海 201306)

摘要: 于2008年1-12月对明珠湖原生动物的群落结构进行调查。采用淡水浮游生物调查方法,对原生动物进行采集、鉴定,并对明珠湖原生动物的种类分布、群落结构、种类组成、优势种及物种多样性等进行了分析。结果表明,全年共鉴定出原生动物60种,隶属于3纲26属。优势种包括二角多甲腰鞭虫、尾眼虫、膝曲眼虫、绿急游虫、裸腰鞭虫、恩茨筒壳虫和游仆虫未定种1种;原生动物的生物密度年均值为 $(42\ 075 \pm 21\ 594)$ ind/L,生物量年均值为 (1.531 ± 1.384) mg/L;明珠湖原生动物的Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielou均匀度指数均较低,物种多样性指数的变化与水质状况密切相关;原生动物功能营养类群中,食藻者群、细菌碎屑取食者群较多,光合自养者群、食肉者群较少;影响明珠湖原生动物生态特征分布的主要因子是水温、叶绿素a含量、总氮和总磷。目前,明珠湖水水质呈中度污染。

关键词: 原生动物;群落结构;物种多样性;崇明明珠湖

中图分类号: Q 145+.2

文献标识码: A

原生动物在湖泊水生态系统中,作为湖泊四大浮游动物类群之一具有重要地位。作为捕食者和被捕食者,在生态系统的能量流转和物质循环中起着重要作用^[1]。此外,原生动物群落演变与湖泊富营养化进程关系密切,它们的种群动态和群落结构与功能的变化直接或间接地反映着湖泊水体的状况及其发展趋势^[2]。许多专家学者利用对原生动物群落结构变化特征的研究来监测、评价湖泊富营养化水体^[2-9],并发现原生动物种类和数量能够随着水体的污染程度变化而消长^[10-12]。另一方面,就整个原生动物群落而言,它们对生存环境条件的变化十分敏感,从种类的多样性、结构上的特殊性及其分布特点来看,原生动物可作为污染评价的理想指示生物^[13]。许多种类正在越来越多地被认为是水体污染的指示生物而为人们广泛采用^[14-20]。因此,对原生动物群落结构及其种类分布的调查研究具有十分重要的意义。

崇明岛地处长江口,是中国第三大岛,为世界上最大的河口冲积岛,也是世界上最大的沙岛。明珠湖面积3 km²,是目前岛上最大的天然湖泊,是崇明岛重要的开发区。近年来,许多学者对崇明岛明珠湖水域的鱼类、水生植物生态学、底栖生物生态学和轮虫群落结构等进行了研究^[21-24]。但对明珠湖水域中原生动物群落结构特征的研究还未见报导。随着崇明岛上的经济发展以及旅游景点的开发开放,对明珠湖水域水质状况的影响正逐步扩大,要想实现崇明岛建设现代化生态岛区并且作为2010年上海世博会的配套服务市场、农家乐旅游线路之一的明珠湖水域环境保护,对其水域水质的监测和研究显得尤为重要。为此,本文对明珠湖的原生动物群落结构与物种多样性变化进行了研究,以期对崇明岛水域环境的污染治理提供基础资料,为崇明岛乃至整个上海地区淡水生态系统原生动物生态学的深入研究与应用提供基础数据。

收稿日期:2010-04-21 修回日期:2010-06-22

资助项目:上海市科技兴农推广项目[沪农科推字(2006)第3-4号];上海海洋大学博士启动项目;上海市重点学科建设项目(S30701);校研究生科研基金项目(A-87032)

通讯作者:刘其根,E-mail:qgliu@shou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 采样点设置

于2008年1-12月每月中旬采样一次。共设6个采样点(图1)。采样点设置见表1。

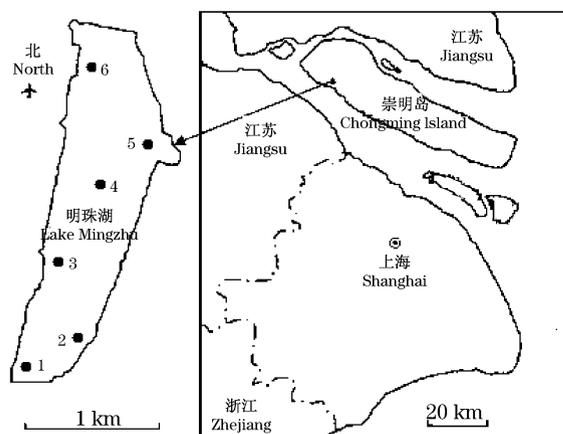


图1 崇明岛明珠湖的原生动物采样站点(·)分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites (·) in Mingzhu Lake of Chongming Island

表1 明珠湖采样站点设置

Tab. 1 Setting up of sampling sites in Mingzhu Lake

站号 site	经纬度 location	区域 area
1号站点 site 1	N31°43'47.16", E121°14'51.47"	入水口附近 entrance
2号站点 site 2	N31°43'55.58", E121°15'05.93"	水草区 aquatic area
3号站点 site 3	N31°44'07.89", E121°15'00.58"	服务区 service are
4号站点 site 4	N31°44'20.38", E121°15'10.50"	湖中心 center of lake
5号站点 site 5	N31°44'33.58", E121°15'19.70"	码头区 dock
6号站点 site 6	N31°44'54.96", E121°15'04.61"	养殖区 cultural area

1.2 实验方法

定性样品用25号筛绢制成的浮游生物网(网目64 μm)拖捞获取。定量样品用5 L采水器于距表层0.5 m水深处和离底层0.5 m水深处各取5 L,充分混匀^[25]。取1 L水样现场用鲁哥氏液固定,然后带回实验室经48 h沉淀后浓缩至50 mL,加4%甲醛溶液保存以备镜检。原生动物计数采用0.1 mL计数框,在显微镜下全片计数,取2片计数的平均值,然后按下式换算成单位

体积中的个体数量: $N = (V_s \times n) / (V \times V_a)$,式中, N 为1 L水中原生动物的个体数(ind/L); V 为采样体积(L); V_s 为沉淀体积(mL); V_a 为计算体积(mL); n 为计数所得的个体数。生物量的计算根据把生物体当作一个近似几何图形,由求积公式估算出生物体积,并假定比重为1,获得生物量^[26],原生动物种类鉴定参照文献^[27-28]。用柱状采水器采集湖水1 000 mL,回实验室后用钼酸铵分光光度法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法分别分析水化指标(TN, TP),同时运用单色法测定叶绿素a含量;现场运用溶氧仪、pH计等仪器测量水温、水深、透明度、溶解氧等水质因子。

1.3 数据处理

采用 $Y = (N_i/N) f_i$ 计算种类优势度。其中, N_i 为第*i*种的个体数; N 为样品中所有种类的总个体数; f_i 为第*i*种的出现频率。 $Y > 0.02$ 以上为优势种^[29]。

采用Shannon-Wiener物种多样性指数 $H' = -\sum (N_i/N) \ln(N_i/N)$,Margalef物种丰富度指数 $D = (S - 1) / \ln N$,Pielou物种均匀度指数 $J = H' / \ln S$ 进行群落种类组成的多样性分析。其中: N 为样品中所有种类的总个体数; S 为样品中种类总数; N_i 为第*i*种的个体数^[30]。

根据植鞭毛虫种类数算出植鞭毛虫占原生动物总种数的百分比^[31]。

原生动物功能营养类群以及不同级别污染指示物种的划分方式、定义参考文献^[1]。

利用SPSS 18.0统计分析软件,分析环境因子对明珠湖原生动物群落结构特征的影响。

2 结果与分析

2.1 明珠湖原生动物种类组成和优势种季节变化

2008年1-12月对明珠湖原生动物的鉴定发现,共有原生动物60种,隶属于3纲26属。其中鞭毛纲6属12种,肉足虫纲9属25种,纤毛纲11属23种;可见肉足虫纲最多,占种类总数的41.67%,其中最多的为砂壳虫属有7种。该湖常年可见的原生动物为绿急游虫(*Strombindium bipes*)、二角多甲腰鞭虫(*Peridinium bipes*)、膝曲眼虫(*Englena geniculata*)、恩茨筒壳虫(*Tintinnidium entzii*)。由图2可以看出,原生动物的种类数最高值在10月份为31种,其次分别为11月份29种、7月份28种,种类数最低值在3月份为

17种,其次分别为2月份20种、4月份23种。

明珠湖原生动物的优势种存在明显的季节变化(图3)。春季优势种为游仆虫(*Euplotes* sp.)、膝曲眼虫、绿急游虫、巢居法帽虫(*Phryganella nidulus*),优势度分别为0.14、0.11、0.08、0.06;夏季优势种为二角多甲腰鞭虫、尾眼虫(*E. caudata*)、游仆虫、绿急游虫,优势度分别为0.17、0.11、0.05、0.03;秋季优势种为膝曲眼虫、尾眼虫、裸腰鞭虫(*Gymnodinium aeruginosum*)、扁眼虫(*Phacus* sp.),优势度分别为0.15、0.14、0.08、0.05;冬季优势种仅为绿急游虫一种,优势度为0.11。优势种多属鞭毛纲和纤毛纲,其中膝曲眼虫、尾眼虫、绿急游虫优势度指数较大,分别占优势种类总生物密度的21%、20%、18%。

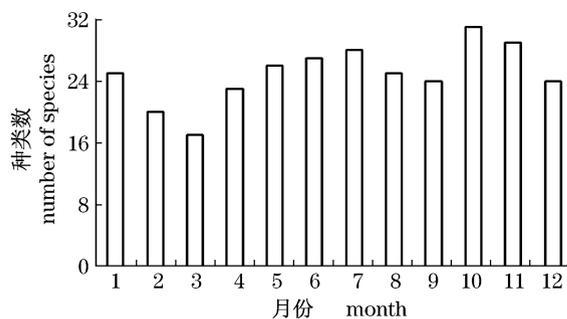


图2 2008年明珠湖原生动物种类的周年变化

Fig. 2 Annual variation of species number in Mingzhu Lake in 2008

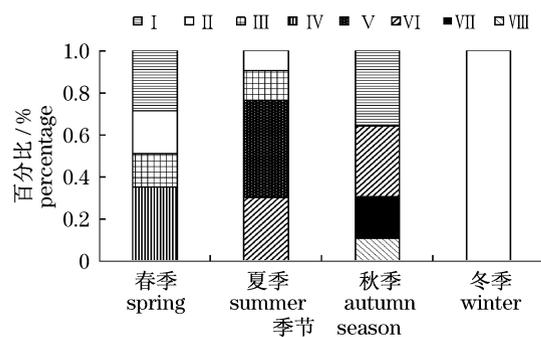


图3 明珠湖原生动动物优势种优势度

百分比组成的年变化

I. 膝曲眼虫; II. 绿急游虫; III. 巢居法帽虫; IV. 游仆虫;
V. 二角多甲腰鞭虫; VI. 尾眼虫; VII. 裸腰鞭虫; VIII. 扁眼虫。

Fig. 3 Annual variation in species composition shown as a percentage of dominant species of protozoa in Mingzhu Lake

I. *Euglenaceae geniculata*; II. *Strombidium viride*; III. *Phryganella nidulus*; IV. *Euplotes*; V. *Peridinium bipes*; VI. *E. caudata*; VII. *Gymnodinium aeruginosum*; VIII. *Phacus* sp.

2.2 明珠湖原生动动物现存量的变化

由图4可知,明珠湖原生动动物现存量存在明显的季节变化。冬春季,原生动动物密度较低,为 $(24\ 542 \pm 11\ 301)$ ind/L,其中2月份(10 042 ind/L)最低,密度较高的种类为绿急游虫、二角多甲腰鞭虫、膝曲眼虫;夏秋季,原生动动物密度升高,为 $(51\ 771 \pm 21\ 911)$ ind/L,其中7月份(91 833 ind/L)最高,密度较高的种类为尾眼虫、膝曲眼虫、裸腰鞭虫、二角多甲腰鞭虫。

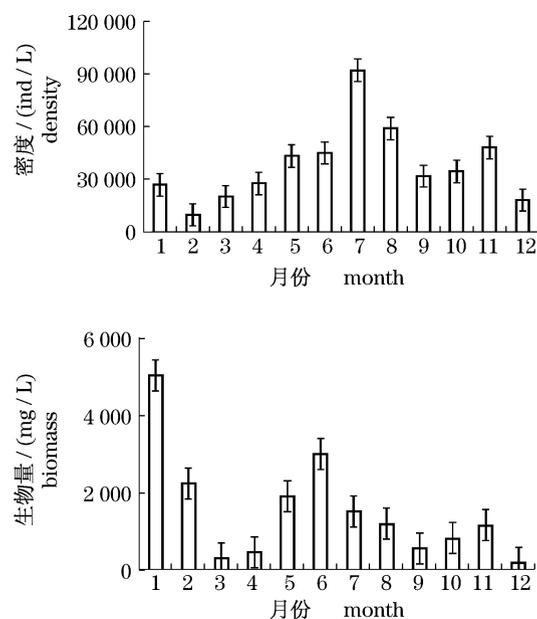


图4 2008年明珠湖原生动动物密度和生物量的变化

Fig. 4 Change of density and biomass of protozoa in Mingzhu Lake in 2008

各站点中,3号站点生物密度最大,为 $(47\ 625 \pm 32\ 304)$ ind/L;2号站点生物密度最小,为 $(31\ 250 \pm 23\ 278)$ ind/L。但由于明珠湖面积不大,各站点空间密度差异不明显($F = 0.514$, $P = 0.765 > 0.05$)。

由于不同种类的原生动动物个体鲜质量存在较大差异,故其生物量的高低与密度的大小不完全一致。明珠湖原生动动物生物量的最大值在1月份,为5.022 mg/L,其次为5月(1.906 mg/L)、6月(2.944 mg/L),这和密度较大值出现在7、8、11月不同(图4)。原因在于1月份出现了大变形虫(*Amoeba proteus*),5、6月出现了绿急游虫、二角多甲腰鞭虫、尾眼虫等个体鲜质量较大的种类,而7、8、11月出现的物种多为法帽虫、刺胞虫(*Acanthocystis* sp.)、砂壳虫(*Diffflugia* sp.)等个

体鲜质量相对较小的种类,导致与密度高峰有一定的差异。各调查站点中,1号站点生物量最高,为3.045 mg/L,这与1号站点中变形虫数量相对较多有关。

2.3 明珠湖原生动物结构功能参数及多样性分析

2008年明珠湖原生动物种类周年变化中,植鞭毛虫所占比例见表2。由表中可以看出,植鞭毛虫所占比例较高的为夏秋季,最高在9月份占29.17%,冬春季植鞭毛虫所占比例较低,最低值在1月份占12.00%,这可能是由于夏秋季温度较高,光照较好,适宜营光合作用的植鞭毛虫生存,冬春季温度较低,光照较差,不适宜植鞭毛虫生存。

表2 2008年明珠湖原生动物植鞭毛虫所占比例
Tab.2 Proportion of Phytomastigophorea in Mingzhu Lake in 2008

月份 month	种类数 no. of species	植鞭毛虫数 no. of Phytomastigophorea	所占百分比(%) percentage
1月	25	3	12.00
2月	20	4	20.00
3月	17	4	23.53
4月	23	4	17.39
5月	26	5	19.23
6月	27	6	22.22
7月	28	7	25.00
8月	25	6	24.00
9月	24	7	29.17
10月	31	9	29.03
11月	29	8	27.59
12月	24	6	25.00

在明珠湖原生动物多样性指数中(图5), H' 值周年均值为 (2.193 ± 0.405) ,最低值在1月份仅为1.646,最高值在7月份为2.573; D 值周年均值为 (1.310 ± 0.335) ,最低值在2月份为0.803,最高值在7月份为1.756; J 值周年均值为 (0.821 ± 0.134) ,最低值在1月份0.639,最高值在3月份为0.886,均匀度指数 J 值周年变化差异不明显。3种指数在各站点空间差异均不显著(F 值分别为0.385、0.831、0.732; P 均大于0.1)。根据SPSS统计分析软件比较均值单因素分析得出,群落因素对明珠湖原生动物物种多样性指数月变化的影响表现为原生动物的 H' 值与原生动物

物种数呈现出极显著的正相关关系($H' = 1.411 + 0.055 \times$ 种类数, $r = 0.655, P < 0.001$), D 值与种类数呈正相关关系($D = 0.107 + 0.095 \times$ 种类数, $r = 0.213, P < 0.1$), J 值与种类数呈负相关关系($J = 0.850 - 0.001 \times$ 种类数, $r = -0.039, P < 0.5$)。明珠湖原生动物优势度指数与 H' 值、 D 值呈负相关关系($H' = 2.476 - 3.331 \times$ 优势度指数, $r = -0.251, P < 0.5$; $D = 1.881 - 6.719 \times$ 优势度指数, $r = -0.516, P < 0.1$),与 J 值呈正相关关系($J = 0.779 + 0.498 \times$ 优势度指数, $r = 0.146, P < 0.5$)。

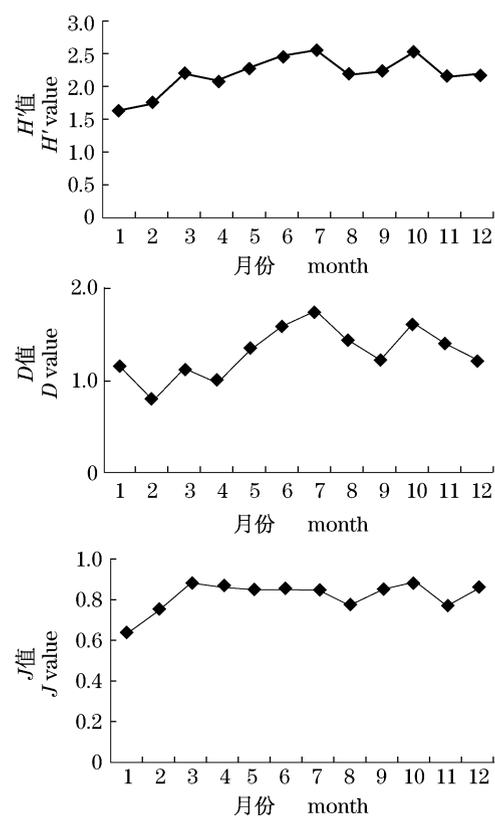


图5 2008年明珠湖原生动物多样性指数周年变化
Fig.5 Diversity index of annual variation of protozoa in Mingzhu Lake in 2008

2.4 明珠湖原生动物功能类群及污染指示

Pratt等^[32]建议按照食性将原生动物划分为6个功能类群,即光合作用类群P、食藻类群A、腐生营养类群S、食菌—碎屑类群B、食肉类群R、无选择性的杂食类群N。在已知的原生动物功能类群分类中^[1],2008年明珠湖所鉴定的原生动物主要功能类群为A群共18种,其次为B群(16种)、N群(10种)、R群(3种)、N群(5种)。由表3可见

明珠湖原生动物功能类群中,A 群所占比例较大,其次为 B 群,P 群和 R 群所占比例较小。

天然水体受到一定程度的污染后,由于自然界物理、化学及生物等过程的作用,会使污染得到净化。根据其特点,可以将水体划分为多污性水体、 α -中污性水体、 β -中污性水体和寡污性水体^[33]。2008 年 1-12 月,在明珠湖 6 个站点发现的原生动物中,原生动物污染指示种共 27 种,其中多污性 1 种、 α -中污性 11 种、 β -中污性 11 种、寡污性 11 种,中污性指示种种类数所占鉴定污染指示种的 77.78%,各污染级种类数差别不

大(表 4),从不同污染等级的原生动物种类占总数比例来看,明珠湖水体已受到一定的污染。

表 3 2008 年明珠湖原生动物功能类群所占比例
Tab.3 Proportion of protozoa functional group in Mingzhu Lake in 2008

	功能类群 functional group				
	A 组	B 组	P 组	R 组	N 组
种类数 no. of species	18	16	10	3	5
所占比例(%) percentage	34.62	30.77	19.23	5.77	9.62

表 4 2008 年明珠湖原生动物污染指示种类
Tab.4 Types of pollution indicators in Mingzhu Lake in 2008

种名 species	污染类型 pollution sorts			
	多污性 heavy-polluted	α -中污性 α -medium-polluted	β -中污性 β -medium-polluted	寡污性 light-polluted
卵形隐滴虫 <i>Cryptomonas ovate</i>		+		
嗜蚀隐滴虫 <i>C. erosa</i>		+		
尾眼虫 <i>Euglena caudata</i>		+		
裸腰鞭虫 <i>Gymnodinium aeruginosum</i>			+	
二角多甲腰鞭虫 <i>Peridinium bipes</i>				+
表壳虫属 <i>Arcella</i> sp.		+		
结节鳞壳虫 <i>Euglypha tuberculata</i>		+	+	
斜口三足虫 <i>Trinema enchelys</i>		+	+	
放射太阳虫 <i>Actinophrys sol</i>		+	+	
旋匣壳虫 <i>Centrophxis aerophila aerophila</i>				+
湖沼砂壳虫 <i>Diffugia limnetica</i>				+
片口砂壳虫 <i>D. lobostoma</i>				+
球形砂壳虫 <i>D. glouloza</i>				+
壶形砂壳虫 <i>D. lebes</i>				+
尖顶砂壳虫 <i>D. acuminata</i>				+
长圆砂壳虫 <i>D. oblonga oblonga</i>				+
弯角长圆砂壳虫 <i>D. oblongia curvicaulis</i>				+
池沼多核变形虫 <i>Pelomyxa palustris</i>	+			
大变形虫 <i>Amoeba proteus</i>			+	
泡状变形虫 <i>A. alveolata</i>			+	
泥生变形虫 <i>A. limicola</i>			+	
单环栉毛虫 <i>Didinium balbianii</i>		+	+	
小单环栉毛虫 <i>D. balbianii nanum</i>		+	+	
膜袋虫属 <i>Cyclidium</i> sp.		+		
淡水筒壳虫 <i>Tintinnidium fluviatile</i>			+	+
游仆虫属 <i>Euplotes</i> sp.			+	
旋回侠盗虫 <i>Strobilidium gyrans</i>				+

2.5 明珠湖原生动物现存量与理化因子的关系

水中 N 和 P 作为水生生物生长的最重要的营养要素,是水生生态系统中不可缺少的物质^[10]。

但过量的 N 和 P 将导致水体的富营养化,因此水中的 TN 和 TP 的含量代表着水体有机污染的程度。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标

准》,可将明珠湖水质指标进行营养状况评价,由表 5 可知,明珠湖总氮、总磷、 COD_{Mn} 、叶绿素 a 含量均已达到 GB 3838—2002 的中营养—轻度富营养水平,因为 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中没有叶绿素 a 的评价标准,可以参考 GHZB 1—1999《地表水环境质量标准》。2008 年明珠湖水温为 17.6~18.0 °C,水深为 1.4~3.2 m,透明度为 61.6~67.5 cm,pH 为 7.7~7.8,溶解氧为

8.55~8.63 mg/L,总氮为 1.050~1.156 mg/L,总磷为 0.098~1.109 mg/L^[24]。通过 SPSS 18.0 统计软件相关分析得出,原生动物的现存量与理化因子相关性为:密度和生物量均与水温、溶解氧、pH、总氮、总磷、叶绿素 a 呈正相关关系,其中密度与水温、总磷呈极显著正相关关系,与叶绿素 a 呈显著正相关关系;生物量与溶解氧呈极显著正相关关系,与总磷呈显著正相关关系(表 6)。

表 5 水体营养类型评价标准
Tab. 5 Nutritional type of evaluation criteria in freshwater

营养类型 nutritional type	总磷(mg/L) TP	总氮(mg/L) TN	化学需氧量(mg/L) COD_{Mn}	叶绿素 a($\mu\text{g/L}$) Chl. a
贫营养 oligotrophy	0.01	0.2	<4	1
中营养 mesotrophy	0.025	0.5	4	4
轻度富营养 light eutrophy	0.05	1.0	6	10
中度富营养 mid-eutrophy	0.1	1.5	10	30
严重富营养 bad eutrophy	0.2	2.0	15	65
极富营养 the worst eutrophy	0.5	5.0	20	100
明珠湖的年均值 average	0.10	1.04	4.30	20.51

表 6 明珠湖主要理化参数与原生动
密度和生物量的相关系数

Tab. 6 Regression coefficient of main physicochemical parameters in Mingzhu Lake with density and biomass of protozoa ($n = 66$)

参数 parameter	密度 density	生物量 biomass
水温 water temperature	0.548 **	0.157
溶解氧 DO	0.142	0.370 **
pH	0.107	0.135
总氮 TN	0.114	0.223
总磷 TP	0.369 **	0.273 *
叶绿素 a Chl. a	0.273 *	0.049

注: ** $P < 0.01$, 为极显著相关; * $P < 0.05$, 为显著相关。

Notes: ** $P < 0.01$, indicates very significant difference; * $P < 0.05$, indicates significant difference.

3 讨论

3.1 明珠湖原生动物的现存量及优势种的季节动态和空间差异

沈韞芬等^[28]指出,原生动物的生长温度范围为 0~35 °C,但最适温度范围较窄,多在 10~25 °C,有些原生动物的耐温性较强,有些则能耐低温。所以,明珠湖原生动物的现存量和优势种会随着季节的变化而变化,也是可以理解的。在北半球水体中,春季是原动物开始生长的

高峰期,冬季是原动物生长的低潮,夏季由于高温、种内竞争等因素抑制了原动物的生长,秋季的气温下降,原动物种类数又会增加^[34],即原动物数量的周年变化通常表现为春季和秋季高峰。如明珠湖夏季 8、9 月份种类为 25 种,24 种,10 月份上升至 31 种。这种变化规律在多个水域中都得到验证^[10,34,36-39],由明珠湖原动物种类数量周年变化可以看出,明珠湖水体也符合此规律。

冬春季,明珠湖原动物种类为 19 种,出现了如淡水筒壳虫、巢居法帽虫、变形虫等肉足虫纲占优势的种类;夏秋季,明珠湖原动物种类为 28 种,出现了如恩茨筒壳虫、膝曲眼虫、卵形隐滴虫等鞭毛虫纲、纤毛虫纲占优势的种类,其中四季均出现的种类有 11 种,如二角多甲腰鞭虫、绿急游虫、旋匣壳虫、膝曲眼虫、裸腰鞭虫、单环栉毛虫、小单环栉毛虫、湖沼砂壳虫、扁眼虫、球形砂壳虫、锥形似铃壳虫(*Tintinnopsis conicus*)等。可见这 11 种原动物所适应的温度范围较宽。同时,冬春季出现的优势种较夏秋季少,也印证了原动物最适生活温度范围较窄。

明珠湖原动物现存量各站点间差异不明显,这与杭州沼泽性水域^[34]、哈尔滨人工湖^[40]等面积不大的水域站点间差异不显著的结果相似。

3.2 明珠湖原生动动物密度的生态限制因子

在水中,原生动物的分布、现存量与温度、pH、溶解氧等生态限制因子有关^[27,33]。其中对绝大多数自由生活的原生动物来说,最理想的pH应在6.7~7.0,不过pH 6.0~9.8也不会产生太大影响。2008年明珠湖测得的理化因子中,pH均值为7.8,并且基本维持稳定,可见pH对明珠湖原生动物密度影响不大;2008年明珠湖测得的溶解氧变动范围为8.55~8.63 mg/L,变化不大,故对该湖原生动物现存量影响不大。温度是原生动物重要的生态限制因子^[1]。明珠湖原生动物密度与水温呈极显著正相关关系,在温度较低的冬春季,原生动物密度仅为温度较高的夏秋季密度的二分之一,可见水温是影响明珠湖原生动物密度的主要生态限制因子。

叶绿素a含量是表征藻类现存量的重要指标之一^[41],其变化直接反映了藻类数量的变化。明珠湖叶绿素a含量夏秋季为30.719 μg/L,冬春季为10.303 μg/L,可见明珠湖藻类的变化亦是夏秋季较高、冬春季较低,明珠湖原生动物以食藻者和食菌-碎屑者居多,光合作用者较少,因此,明珠湖水体中叶绿素a含量的变化与原生动物密度的季节变化一致。通过分析得出2008年明珠湖总氮、总磷与原生动物现存量呈正相关关系,这可能由于明珠湖在2009年前曾经在湖中投饵,水产粪便、饵料残留物等物质使水体中氮、磷含量不断增加,导致藻类数量上升,而藻类和大量的碎屑为以食藻为生的原生动物提供了充足适宜的饵料,为原生动物数量的增长提供了条件。因此,明珠湖原生动物密度高峰出现在夏秋季,这与哈尔滨人工湖^[40]、武汉南湖^[42]、洞庭湖^[43]、湖北梁子湖区四湖泊^[44]等变化规律基本一致。可见,叶绿素a含量、总氮、总磷也是影响明珠湖原生动物现存量的主要生态因子。

3.3 原生动物对湖泊富营养化的响应

原生动物的功能营养类群可反映水环境的营养水平。水体富营养化是影响原生动物时间异质性的主要因子,可直接影响自养鞭毛虫和混合营养的纤毛虫,其它原生动物则主要受到间接影响,这种影响与营养物质增加导致的食物源增加有关^[45-46],一般认为,在较清洁的水体中,行光合自养类群P和食藻类群A较多,而营养水平高的水体中以食细菌-碎屑的B类群和食肉者R

类群丰富^[42]。明珠湖原生动物的功能营养类群中,以吞食藻类为生的肉足虫、纤毛虫为主,其次是吞食细菌和附有大量细菌的碎屑为生的种类,而营光合作用的植鞭毛虫种类较少,同时食肉类群R较少,说明该湖存在一定有机污染。

水体中原生动物的个体数量和生物量的高低往往被作为判断水体富营养化程度的一个重要指标,湖泊营养状况与浮游动物生物量呈显著正相关^[47],因此明珠湖营养状况随原生动物现存量的变化而变化,这变化趋势与武汉东湖^[48]、安徽巢湖^[49]、Müggelsee湖^[50]的结果非常相似。

3.4 明珠湖原生动物对水质的污染指示

德国学者Kolrutz和Marsson早在1909年就提出了污水生物系统,并给出各种生物(包括原生动物)在4个不同污染带(多污带、α-中污带、β-中污带、寡污带)中的指示种类。一般来说,在自然环境中,水质较好的水体自养程度高,植物性鞭毛虫所占比例较高^[1];随着水体有机污染程度的提高,异养程度增加,肉足虫、纤毛虫、动物性鞭毛虫所占比例将增加。即植物性鞭毛虫和肉足虫最敏感,纤毛虫次之,动物性鞭毛虫耐受性最强。明珠湖2008年所鉴定的原生动物种类中,多污性指示种仅池沼多核变形虫1种;中污性指示种中,肉足虫纲最多为7种,其次为纤毛虫纲5种、鞭毛虫纲4种;寡污性指示种为8种,其中肉足虫纲占优势为7种。普遍认为在受有机污染较严重的水体,耐污种类形成优势种群而具有很高的个体数量和生物量^[2]。明珠湖原生动物14种优势种中,植鞭毛虫占总优势种类数的43%,耐污性较高的纤毛虫、肉足虫占优势种类数的36%、21%,可见明珠湖水质存在一定污染。明珠湖原生动物年均H'值为(2.193±0.405)(H' > 3为轻污染或无污染,3~2为β-中污,2~1为α-污染,<1为严重污染^[51])。因此,明珠湖水体总体达中污染程度。

明珠湖在调查期间,每2~3个月换一次水,对湖体水质有一定程度的改善。但原生动物的多样性指数和污染指示种显示了该湖水体已受到一定的污染,这可能由于明珠湖进行水产养殖有关,残留的饵料、水产品的粪便等沉积下来,而湖泊沉积物的积累也是导致湖泊内源性污染的一个重要原因^[37],湖泊沉积物是营养盐的重要蓄积库,积累在湖泊底泥中的氮、磷等会释放到水体中,会加

重水质有机污染,同时随着崇明明珠湖旅游的开发,一定程度上也增加了明珠湖周边生活垃圾污染,影响了明珠湖水质。

上海海洋大学水产与生命学院吴竹臣、张维、王文健、蔡骏等同学参加部分野外调查与室内实验。调查期间,上海崇明明珠湖发展有限公司施兵、陆美超等同志给予了大量支持,一并感谢。

参考文献:

- [1] 沈韞芬,章宗涉. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1990:1-524.
- [2] 许木启,朱江,曹宏. 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,2001,21(7): 1114-1120.
- [3] 沈韞芬,龚循矩,顾曼如. 用PFU原生动物群落进行生物监测的研究[J]. 水生生物学报,1985,9(4):299-308.
- [4] 施心路,余育和,沈韞芬. 钟形钟虫形态学及表膜下纤毛系的研究[J]. 水生生物学报,2003,27(1): 64-68.
- [5] Wang C C, Nie D S. Report on the rare and new species of freshwater infusoria[M]. Part I. Cont Biol Lab Sci China,1933:10.
- [6] Wang C C, Nie D S. Report on the rare and new species of freshwater infusoria[J]. Part II. Sinensia, 1935,6(4):300-524.
- [7] 许木启,曹宏. 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,2004,24(7): 1540-1547.
- [8] 许木启, Petter K. 德国柏林市 Stechlin 湖原生动物群落多样性特征的初步研究[J]. 湖泊科学,2001, 13(4):322-330.
- [9] 徐润林,白庆笙,谢瑞文. 珠江广州市段 PFU 原生动物群落特征及其与水质的关系[J]. 生态学报, 2002,22(4):479-489.
- [10] Finlay B J. Temporal and vertical distribution of the ciliophoran communities in the benthos of a small eutrophic lake with particular reference to the redox profile[J]. Fre Biol,1980,10:15-34.
- [11] Bark A W. The temporal and spatial distribution of planktonic and benthic protozoa communities in a small productive lake[J]. Hydrobiol,1981,85(3): 239-255.
- [12] 宋微波,刘桂荣. 青岛小西湖春季原生动物生态的初步研究[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 1993,23(3):99-106.
- [13] Cairns J J, Schalie W H. Review paper biological monitor ring part- I -early warning systems [J]. Water Res,1980,14:1179-1196.
- [14] 许木启,翟家骥,邵永怡. 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,1998,33(4):1-7.
- [15] 田家怡. 小清河的浮游动物与水质污染评价[J]. 海洋湖沼通报,1985,7(2):64-71.
- [16] 高玉荣,许木启. 乐安江重金属污染对浮游植物群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报,1996,2(2):175-183.
- [17] 许木启. 利用PFU原生动物群落监测北京排污河净化效能的研究[J]. 生态学报,1991,11(1): 80-85.
- [18] Cairns J J. A strategy for use of protozoa in evaluation of hazardous substances [M]. Biol Indicators of Water Quality,1979:61-67.
- [19] Henebry M S, Cairns J J. Monitoring of stream pollution using protozoa communities on artificial substrates[J]. Trans Amer Micro Soc,1980,99(2): 151-160.
- [20] 陈廷,黄建荣,陈晟平. 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,2004,10(3): 310-314.
- [21] 章飞军,童春富,谢志发,等. 长江口潮间带大型底栖动物群落演替[J]. 生态学报,2007,27(12): 4944-4952.
- [22] 戴雅奇,熊昀青,由文辉. 疏浚对苏州河底栖动物群落结构的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2003,2(3):83-87.
- [23] 胡忠军,刘其根,陈立婧,等. 上海崇明明珠湖摇蚊幼虫群落结构特征及其对水质的指示作用[J]. 应用生态学报,2009,20(4):929-935.
- [24] 陈立婧,顾静,彭自然,等. 上海崇明岛明珠湖轮虫群落结构[J]. 应用生态学报,2009,20(12): 3057-3062.
- [25] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社,2000:1-247.
- [26] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社,1991.
- [27] Patterson D J. Free-living freshwater protozoa, a colour guide [M]. Manson Publishing Ltd, 1996: 7-221.
- [28] 沈韞芬. 原生动物学[M]. 北京: 科学出版社,1999.
- [29] 王云龙,袁骥,沈新强. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征[J]. 中国水产科学,2005,12

- (3):300-306.
- [30] 李共国,虞左明. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价[J]. 湖泊科学,2003,15(2):169-178.
- [31] 沈韞芬. 河流的污染监测[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [32] Pratt J R, Caims J Jr. Functional groups in the protozoa: roles in differing ecosystems [J]. J Protozool,1985,32(3):415-423.
- [33] 王家楫,沈韞芬,龚循矩. 废水生物处理微型动物图志[J]. 北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [34] 陈红,施心路,谭晓丽,等. 杭州沼泽性水域原生动物群落变化规律[J]. 生态学杂志,2007,26(10):1549-1554.
- [35] Lewis W M Jr. Protozoa abundance in the plankton of two tropical lakes[J]. Arch Hydrobiol,1985,104:337-343.
- [36] 徐润林,郑永利. 广州市区越秀湖浮游纤毛虫群落的变化[J]. 湖泊科学,2000,12(2):127-131.
- [37] 李凤超,沈韞芬,刘存歧,等. 应用原生动物群落评价枯水期白洋淀的水质现状[J]. 生态学杂志,2005,24(7):785-789.
- [38] Hecky R E, Kling H J. The phytoplankton and protozooplankton of the euphotic zone of Lake Tanganyika: Species composition, biomass, chlorophyll content, and spatiotemporal distribution [J]. Limnol & Oceanogr,1981,26:548-564.
- [39] Hunt G W, Chein S M. Seasonal distribution, composition and abundance of the planktonic Ciliata of Cayuga Lake[J]. Hydrobiol,1983,120:3-9.
- [40] 谭晓丽,施心路,刘桂杰,等. 哈尔滨人工湖泊中原生动物群落变化规律[J]. 生态学报,2005,25(10):2651-2657.
- [41] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll a and phaeopigments: Spectrophotometric equations [J]. Limnol & Oceanogr,1967,12:343-346.
- [42] 呼光富,刘红,马徐发. 武汉南湖原生动物的初步研究[J]. 水利渔业,2007,27(3):77-78.
- [43] 宋碧玉. 长江洞庭湖口原生动物的生态学研究[J]. 水生生物学报,2000,24(4):317-321.
- [44] 熊金林. 不同营养水平湖泊浮游生物和底栖动物群落多样性的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
- [45] Taylor G T. The role of pelagic heterotrophic protozoa in nutrient cycling: A review [J]. Ann Inst Oceanogr(Paris)1982,58(Supl. 1):227-241.
- [46] Beaver J R, Crisman T L. The role of ciliated protozoa in pelagic freshwater ecosystems [J]. Micro Ecol,1989,17:111-136.
- [47] 沈韞芬,陈受忠. 武昌东湖浮游动物数量季节变动的初步观察[J]. 水生生物学集刊,1965,5(2):133-145.
- [48] 吴生桂,沈韞芬. 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,2001,21(3):446-451.
- [49] 胡菊香,吴生桂,唐会元,等. 巢湖的原生动物及其对富营养化的响应[J]. 水利渔业,2007,27(1):76-79.
- [50] Bays J S, Crisman T L. Zooplankton and trophic state relationships in Florida Lakes [J]. Can J Fish Quat Sci,1983,40:1813-1819.
- [51] 尚玉昌. 普通生态学[M]. 北京:北京大学出版社,2002.

The research of protozoa community structure in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai

CHEN Li-jing¹, GU Jing¹, HU Zhong-jun², PENG Zi-ran², LIU Qi-gen^{2*}

(1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquaculture Ecology Certificated by the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A comprehensive survey on the community structure of protozoa was conducted in Mingzhu Lake of Chongming Island in each month of 2008. The protozoa was collected and identified using freshwater plankton survey methodology, and the type of protozoa distribution, community structure, species composition, dominant species and species diversity were analyzed. The results showed that there were 60 species of protozoas in Mingzhu Lake, belonging to 3 classes, 26 genera. The dominant species were *Peridinium bipes*, *Euglena caudate*, *E. geniculata*, *Strombidium viride*, *Gymnodinium aeruginosum*, *Tintinnidium evtzii*, *Euplotes* sp. The average annual density of protozoa was $(42\ 075 \pm 21\ 594)$ ind/L and the average annual biomass was (1.531 ± 1.384) mg/L. The Shannon-Wiener diversity, evenness index and richness index of the protozoa community in the Lake were relatively low. The relationship between species diversity index and the quality of water was closely correlated. In the functional nutrition taxa of protozoa, the proportion of algivores and bacterivores-detritivores were higher than the photosynthetic autotrophs and raptors. The significant factor affecting protozoa distribution was temperature, *Chl. a* content, TN and TP which suggested that the Mingzhu Lake was moderately polluted.

Key words: protozoa; community structure; species diversity; Mingzhu Lake of Chongming Island

Corresponding author: LIU Qi-gen. E-mail: qgliu@shou.edu.cn