

白洋淀原生动物群落多样性变化与水质关系研究

许木启, 朱 江, 曹 宏

(中国科学院动物研究所, 北京 100080)

摘要:报道了大型浅水型湖泊原生动物群落变化与富营养化关系的研究。通过对华北平原最大淡水湖——河北白洋淀两个湖区 9 个采样站的初步调查,共鉴定出 77 种原生动物,其中 43 种为该湖首次记录;利用 PFU 原生动物群落结构和功能方法快速(两次实验的群集速度均为 1d 时间)监测了不同湖区的水质状况。水质分析及原生动物定性和定量调查结果表明,湖区 I(安州至枣林庄 5 个采样点)水体的污染程度明显大于湖区 II(圈头至端村 4 个采样站)。通过与 20 世纪 50 年代的调查资料比较,较好地反映了白洋淀富营养化的发展趋势。

关键词:白洋淀;原生动物;PFU 方法;水质

The relationship between the protozoan community diversity and the water quality in the Baiyangdian Lake

XU Mu-Qi, ZHU Jiang, CAO Hong (Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper deals with the relationship between the protozoan community diversity and the water quality in the Baiyangdian Lake, the largest fresh water Lake in the Northern China Plain. Through two times of investigation, 77 species of protozoa were identified and 43 protozoan species were first recorded in the Baiyangdian Lake. PFU protozoan method was used to monitor water quality in two lake zones. Results of PFU protozoan colonization rates (one day), quantitative analyses and other parameters identically indicated that water pollution in the lake zone I was much more serious than that in the lake zone II. Data of protozoa in 1990s were compared with those in 1950s to show the developing tendency towards eutrophication in this lake.

Key words: Baiyangdian Lake; protozoa; PFU method; water quality

文章编号:1000-0933(2001)07-1114-07 中图分类号:Q958 文献标识码:A

原生动物组成湖泊四大浮游动物类群之一(原生动物、轮虫、枝角类、桡足类),它在湖泊水生生态系统具有重要的地位。作为捕食者(或初级消费者)和被捕食者,原生动物在湖泊的物质循环和能量流动过程中发挥了十分重要的作用。它们通过对有机颗粒物、细菌和藻类的摄食和吸收,直接将能量进行转化,使较复杂的物质转换成较简单的成分并得以在水环境中再循环。同时,通过它们的摄食作用,刺激了藻类和细菌的生长,促进了有机物的分解,加速了水体中物质循环与能量流动。另一方面,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。有些学者在研究湖泊水体富营养化和恢复过程中原生动物种群、群落的时空分布规律时发现,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^[1~4]。

近年来,有些学者利用 PFU(Polyurethane Foam Unit 聚氨酯泡沫塑料块)人工基质方法研究原生动物

基金项目:国家自然科学基金(项目批号:39730070,39970138)和中国科学院院长基金资助项目

收稿日期:1999-11-09 修回日期:2000-05-15

作者简介:许木启(1950~),男,博士,研究员。主要从事原生动物生态学研究。

物结构与功能变化,监测评价河流、湖泊水质,取得了令人满意的结果^[5-9]。

白洋淀是华北地区一个大型淡水湖泊,位于北京、天津、保定和石家庄之间。它的流域面积大约 31 200 km²,湖区表面积为 360km²,水深随水文条件的变化而改变,一般平均低于 3m。它在供水、养殖、旅游及航运等诸多方面发挥了重要作用。在 20 世纪 60 年代初以前,由于湖区水质优良,物产丰富,交通便利,田园交错,风景宜人,故素有“北国江南”、“华北明珠”之美称。但是自 60 年代中以来,由于河北保定地区的工业迅速发展,工业废水和生活污水排放逐年增加。大量未经处理的生活污水和部分工业废水通过府河直接排入白洋淀,部分工业废水通过引污干渠进入唐河污水库进行初步自然净化处理后排入淀区,导致淀区水环境发生很大变化,水体富营养化程度日趋严重,水产资源不断下降^[10,11]。有关白洋淀水生生物各种类群的分布与变化特征从 50 年代至 90 年代,不少学者进行了广泛深入的研究,积累了丰富的资料。但是原生动物的研究仅见于 50 年代的简报报道^[12]。尽管近 35a 来白洋淀的环境状况发生了很大变化,尚没有原生动物的进一步开展。作者分别于 1993 年 7 和 10 月份两次对白洋淀原生动动物群落的生态学特征及其与水体质量的相互关系进行了初步的调查研究,主要目的是试图利用原生动动物群落结构的综合指标(种类组成、个体数量、生物量和多样性指数 d 值)和功能参数(PFU 原生动动物 24h 的群集速度)监测和评价白洋淀不同淀区的污染程度。利用这些调查结果与 60 年代的相关资料进行比较以反映白洋淀水质富营养化的发展趋势,以此为白洋淀水域的污染控制和综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样站设置 两次采样调查期间在淀区共设置 9 个采样站(图 1)。其中 1~5 号采样站(安州、东向阳、漾堤口、王家寨、枣林庄)接受来自府河排放的污水,水体富营养化的程度较高,在本文中称为湖区 I; 6~9 站(圈头、端村、前塘、韩村)位于淀区开放水面,不受府河污水排放的影响,水质相对较为干净,称之为湖区 II。9 个采样站的布置与 50 年代基本相同。

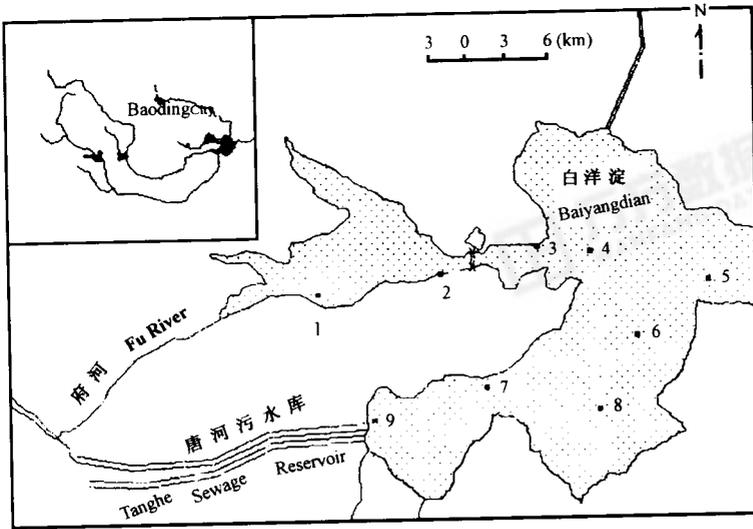


图 1 白洋淀原生动动物采样站布置图

Fig. 1 Map of Baiyangdian Lake area showing sampling sites

1 安州, 2 东向阳, 3 漾堤口, 4 王家寨, 5 枣林庄, 6 圈头, 7 端村, 8 前塘, 9 韩村

1.2 PFU 样品的挂放与采集 实验所用的 PFU 人工基质孔径为 100~150 μ m。使用时将其制作成 5.5cm × 6.5cm × 7.5cm 的小块。在各采样站水下约 20cm 处悬挂 2 块 PFU (9 个站可在间隔时间内挂放), 使其在水中浸泡 24h 后采集样品。样品用食品塑料袋包装携带回驻地, 在显微镜下进行活体种类观察鉴定。

1.3 定量样品采集与计算 由于湖泊较浅(平均 2.5m 左右), 各采样站定量样品取表、中层混合 1L 水样

(超过 3m 水深的采样站取上、中、下层混合水样),现场用鲁哥氏液固定。样品带回实验室沉淀 48h 后浓缩定容至 30ml,然后用定量吸管吸取 0.1ml 的浓缩液注入 0.1ml 的计数框中,在 10×20 的放大倍数下计数 3 次样品,取其平均值。然后按下列公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 1L 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^[13]。

1.4 多样性指数计算 多样性指数 d 值按 Margalef 多样性指数公式:

$$d = (S - 1) / \ln N$$

式中, d 为多样性指数; S 为种类数; N 为个体数。 d 值的高低表明种类多样性的丰富与贫乏,由此可反映水质的优劣程度。

1.5 水质指标分析 为了与各采样站的生物资料进行比较,本文利用了白洋淀地区有关环境保护监测部门提供的 1990~1993 年白洋淀水质分析参数的平均值,其测定方法与传统方法相同。

2 结果与讨论

2.1 9 个采样站化学指标的变化 白洋淀两个湖区 9 个采样站水体中溶解氧及几种主要污染物浓度的变化见表 1。从表 1 可以看出,无论是溶解氧(DO),还是几种主要污染物(SS、COD_{mn}、NH₄-N 和 T-P)浓度在两个湖区 9 个采样站的分布存在十分明显的差异。湖区 I (1~5 号采样站)由于接纳来自府河的污水排放,水质很差,水体富营养化程度较高。与湖区 II (6~9 号采样站)比较,明显的特征是该湖区 5 个采样站具有低的溶解氧和高度的污染物浓度。其中,在靠近府河污染源排放的 1 号站(安州)和 2 号站(东向阳)水体中溶解氧含量近 4a 的平均值仅分别为 1.4mg/L 和 3.4mg/L,而 4 种主要污染物的浓度是所有 9 个采样站中最高的。湖区 I 另外的 3,4 和 5 号采样站由于离开污染源冲击影响一段较远的距离,加之水体自净功能,溶解氧含量逐渐上升,各种污染物浓度含量逐站降低。湖区 II 的 6~9 号 4 个采样站已远离府河污染物排放,基本不受其影响,水质相对较为干净。但是这几个采样站的水质指标与 20 世纪 50 年代和 60 年代比较,水质明显下降^[11]。这主要是受该湖区内几个大的村庄(端村、圈头、采蒲台每个村庄的人口均超过一万人)的生活污水排放的影响。另外,淀区内网箱水产养殖也是造成水质下降的重要因素之一。从表 1 还可以看出,该湖区的 9 号采样站的水质明显差于其它 3 个采样站(6,7,8),原因是该采样站靠近唐河污水库(图 1),由于该污水库净化系统出口的闸门不严实而渗漏污水,在一定程度上对该采样站的水质造成影响。

表 1 白洋淀 9 个采样站溶解氧(DO)和几种主要污染物浓度(mg/L)比较(1990~1993 年平均值)

Table 1 Comparison of mean annual values of DO and pollutants(mg/L) from 1990~1993 in Baiyangdian Lake for nine sampling stations

	采样站 Sampling stations								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DO	1.4	3.4	4.8	6.7	6.2	7.1	8.2	7.8	6.5
SS	49.4	45.0	35.6	55.4	17.7	15.8	16.4	15.4	20.1
COD _{mn}	39.6	33.66	11.05	6.09	6.81	4.08	4.83	3.34	5.56
NH ₄ -N	6.71	7.91	2.59	0.64	0.36	0.27	0.29	0.13	0.4
T-P	1.73	1.29	0.88	0.25	0.29	0.022	0.035	0.018	0.19

2.2 白洋淀原生动物的种类组成 1958 年仅报道原生动物共计 38 个属,其中鞭毛纲 4 个属,纤毛纲 20 个属和肉足虫纲 14 个属^[12]。1993 年两次 PFU 采集(均为 1d 时间)共采集到原生动物 77 种(属),其中鞭毛虫 27 种(属),肉足虫 13 种(属),纤毛虫 37 种(属)。原生动物种类在各个采样站的分布见表 2。这里需要加以两点说明,一是 50 年代所发现的原生动物种类远远多于 50 年代的原生动物种类,这种差异主要是所采用的调查方法不一样所致。更重要的是 50 年代所有的原生动物仅鉴定到属的水平,而 90 年代大多数原

生动物被鉴定到种。(2)77种(属)仅是2次1d的采集所发现的种类,因此,肯定只是整个湖泊原生动动物种类组成的一部分而不是全部。随着PFU挂放时间的延长,还可能发现一些新的以前未被记录的种类。从表2可以看出,原生动动物总的种类数在湖区I和湖区II之间存在十分明显的差异。湖区I由于接纳来自府河的大量污水,水质较差,原生动动物的种类较少,5个采样站种类的变化幅度在15~59种之间。最低为1号采样站(安州),仅发现15种。随着采样站距离的延长,污水得到自然净化,水质得以改善,原生动动物种类逐步增加,至第5号的枣林庄采样站,净化效果最好,原生动动物上升到59种。与湖区I相比,湖区II的4个采样站具有较高的种类数目,其种类的变化幅度在62~75种之间。该湖区6、7和8号3个采样站原生动动物种类数比较接近,分别为74、72和75种,种类组成也较相似(表2),9号采样站总的种类数比起6、7、8号3个采样站的种类稍低。分析这种原因可能是该站接近于唐河污水库大闸,由于污水渗漏,不同程度地污染了该采样站的水体,导致种类数下降。另外,从表2还可看到一些在干净水体常可见到的种类,如单鞭金藻、黄团藻、砂壳虫、匣壳虫等在湖区II均有分布,而在湖区I的前几个采样站不见其踪迹。这种现象表明,湖区II的水质优于湖区I的水质。

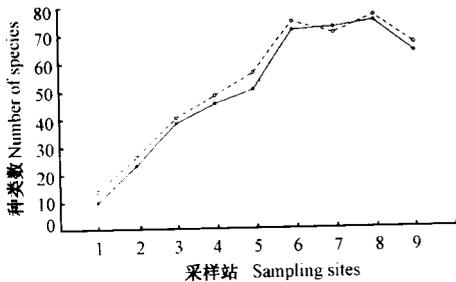


图2 白洋淀9个采样站PFU原生动动物1d的群集曲线
Fig. 2 PFU protozoan colonization curves at 9 sampling stations in the Baiyangdian Lake

.....○.....10月20日 — — — — —7月11日

(图3)。湖区I的1和2号两个采样站 d 值最低,分别为1.38和2.34。3、4和5号采样站由于水质改善,多样性指数 d 值分别上升至3.78、5.02和6.29。湖区II的6、7、8号3个采样站 d 值较为接近,均在8.54~8.98之间波动。9号站的 d 值略有下降,为7.25,原因如前述。总的比较起来,湖区II的多样性指数 d 值明显高于湖区I的 d 值,表明湖区II的水质好于湖区I的水质。

2.5 个体数量和生物量 水体中原生动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。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。白洋淀9个采样站原生动动物个体数量和生物量的变化较好地反映了两个湖区水质的差异(图4)。湖区I的1、2、和3号采样站具有很高的个体数量和生物量。1站每升水中平均有24800 ind./L,生物量为1.1mg/L,2站有28200 ind./L,生物量为1.4mg/L;3号站的个体数量和生物量是所有采样站中最高的,其个体数量分别为34500 ind./L(7月份)和37500 ind./L(10月份),生物量平均为1.86mg/L。分析3号采样站原生动动物个体数量和生物量较高的原因可能是该湖段净化活动强烈,有毒物质得以有效的降解,为藻类及以食藻类为主的原生动动物提供了丰富的营养来源。皮站藻类和浮游动物的个体数量和生物量的分布反映了与原生动动物相同的趋势^[17,18]。随着水质的改善,湖区I其它2个采样站(4号和5号)原生动动物的个体数量和生物量明显下降。湖区II的4个采样站原生动动物的个体数量均在3800~6800 ind./L之间,生物量在0.38~0.5mg/L之间波动,9号站(韩村)稍高一些,但均远远低于湖区I的平均水平。这种状况同样指

2.3 PFU原生动动物的群集速度 白洋淀9个采样站PFU原生动动物的群集速度与水质关系比较见图2。湖区I的1和2号两个采样站受府河污水排放的影响,PFU原生动动物的群集速度缓慢,两次实验1站分别群集了11和14种,2站群集了23和25种;3、4、5号采样站由于离开污染源较远,加之湖水的稀释和自净作用,水质得以改善,PFU原生动动物的群集速度明显上升。湖区II的水质较好,两次PFU原生动动物的群集曲线均高于湖区I的几个采样站。一般来说,在环境压迫(如污染)条件下的水生生物群落,其种类多样性或种类丰度均呈减少的趋势,而健康群落的发展依赖于水质的改善^[11~16]。

2.4 多样性指数 d 值 白洋淀9个采样站原生动动物多样性指数 d 值的变化同样与水质状况密切相关

表 2 白洋淀各采样站原生动物种类分布

Table 2 Distribution of protozoan species at sampling stations in the Baiyangdian Lake

种类名录		采样站 Sampling stations								
Name of species		1	2	3	4	5	6	7	8	9
鞭毛虫	Flagellates									
黄藻	<i>Uroglena</i> sp.				+	+	+	+	+	+
毛团藻	<i>Synura</i> sp.			+						
单鞭藻	<i>Gonium</i> sp.									
金藻	<i>Chromulina</i> sp.									
许金藻	<i>Urceolus parscheri</i>			+	+					
卵形单鞭藻	<i>Monosiga ovata</i>									
蛤蚧形单鞭藻	<i>Mastigamoeba limax</i>					+				
聚卵形单鞭藻	<i>Oikomonas socialis</i>	+	+	+						
眼形单鞭藻	<i>Salpingoeca</i> sp.									
眼形单鞭藻	<i>Petalomonas mediocanellata</i>									
眼形单鞭藻	<i>Euglena</i> sp.	+	+							
眼形单鞭藻	<i>E. Acus</i>									
眼形单鞭藻	<i>Peranema trichophorum</i>	+	+							
眼形单鞭藻	<i>Monas</i> sp.	+	+							
眼形单鞭藻	<i>Bodo</i> sp.	+	+							
眼形单鞭藻	<i>Anisonema acinus</i>	+	+							
眼形单鞭藻	<i>Cryptomonas ovata</i>	+	+			+				
眼形单鞭藻	<i>C. Aeuta</i>									
眼形单鞭藻	<i>C. Erosa</i>									
眼形单鞭藻	<i>Phacus</i> sp.									
眼形单鞭藻	<i>P. Pyrum</i>	+	+							
眼形单鞭藻	<i>P. Tortus</i>									
眼形单鞭藻	<i>Pandorina morum</i>			+						
眼形单鞭藻	<i>Eudorina morum</i>									
眼形单鞭藻	<i>Peridinium</i> sp.									
眼形单鞭藻	<i>Chlamydomonas</i> sp.	+	+							
眼形单鞭藻	<i>C. microsphaera</i>		+							
衣藻	Sarcodines									
阿米巴	<i>Amoeba</i> sp.	+	+							
阿米巴	<i>Arcella</i> sp.									
阿米巴	<i>Diffugia</i> sp.					+	+			
阿米巴	<i>Centropyxis</i> sp.									
阿米巴	<i>Actinophrys sol</i>	+	+							
阿米巴	<i>Acanthocystis</i> sp.			+						
阿米巴	<i>Raphidiophrys</i> sp.									
阿米巴	<i>Actinosphaerium eichhorni</i>									
阿米巴	<i>Polychaos dubium</i>					+	+			
阿米巴	<i>Mayorella</i> sp.									
阿米巴	<i>Vahlkampfia</i> sp.									
阿米巴	<i>Saccamoeba limax</i>									
阿米巴	<i>Cyphoderia ampulla</i>									
纤毛虫	Ciliates									
纤毛虫	<i>Coleps hirtus</i>				+	+	+	+	+	+
纤毛虫	<i>Urocentrum turbo</i>									
纤毛虫	<i>Spirostomum minus</i>									
纤毛虫	<i>Opercularia coarctata</i>									
纤毛虫	<i>Epistylis</i> sp.									
纤毛虫	<i>Euploes eurystomus</i>				+	+				
纤毛虫	<i>E. Attinis</i>									
纤毛虫	<i>Trochilia minuta</i>									
纤毛虫	<i>Nassula aurea</i>									
纤毛虫	<i>Cinetochilum margaritaceum</i>									
纤毛虫	<i>Stentor roeseli</i>									
纤毛虫	<i>S. Coeruleus</i>									
纤毛虫	<i>Paramecium caudatum</i>	+	+							
纤毛虫	<i>Vorticella microstoma</i>			+						
纤毛虫	<i>V. Convallaria</i>									
纤毛虫	<i>V. Cupifera</i>									
纤毛虫	<i>Aspidisca costata</i>									
纤毛虫	<i>A. Lynceus</i>	+	+							
纤毛虫	<i>Tachysoma pellionella</i>									
纤毛虫	<i>Strongylidium crassum</i>									
纤毛虫	<i>Halteria grandinella</i>			+						
纤毛虫	<i>Tetrahymena pyriformis</i>									
纤毛虫	<i>Litonotus cygnus</i>									
纤毛虫	<i>L. Carinatus</i>									
纤毛虫	<i>L. Obtusus</i>									
纤毛虫	<i>L. Lamella</i>									
纤毛虫	<i>Lembadion</i>									
纤毛虫	<i>Lacrymaria olor</i>									
纤毛虫	<i>Cyclidium citrullus</i>									
纤毛虫	<i>Stylonychia mytilus</i>									
纤毛虫	<i>S. Notophora</i>									
纤毛虫	<i>Chilodonella uncinata</i>	+	+							
纤毛虫	<i>C. Aplana</i>									
纤毛虫	<i>Uroleptus caudatus</i>									
纤毛虫	<i>Paruroleptus musculus</i>									
纤毛虫	<i>Oxytricha saprobia</i>									
纤毛虫	<i>O. Soma cienkowskii</i>									
总种数	Total numbers of species	15	25	41	48	59	74	72	75	62

2.6 白洋淀富营养化的发展趋势 尽管白洋淀湖区Ⅱ水面开阔,不直接受到府河污水排放的影响,但是湖区内存在的内源性污染因素也不能忽视。这些影响因素主要包括如下两个方面:(1)湖区内几个大的村庄生活污水和乡镇企业废水排放。湖区Ⅱ内3个大的村庄如端村、圈头和采蒲台,每个村庄自成一体,各有人口超过1万人之多,而且村村都有乡办企业,所有的生活污水和工业废水均直接排入湖区内;(2)水产养殖污染。该湖区内为数众多的高密度网箱养鱼的过度投饵是造成加速湖区富营养化进程的一个重要因素。

通过50年代和90年代以及与武汉东湖原生动动物个体数量的比较,不难看出整个白洋淀湖泊富营养化

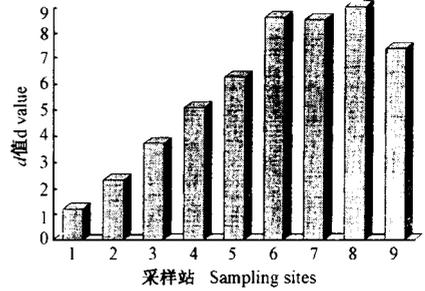


图3 白尖淀各采样站原生动动物多样性 d 值的变化
Fig. 3 Variations in d value of Protozoan community at 9 sampling sttions in the Baiyangdian Lake

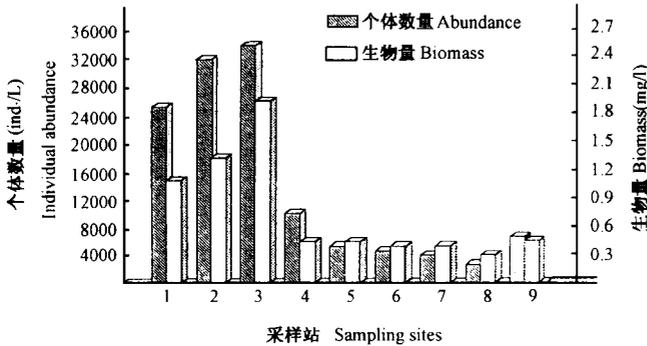


图4 白洋淀各采样站原生动动物个体数量和生物量的变化

Fig. 4 Variations of abundance and biomass of protozoa at 9 sampling sites in Baiyangdian Lake

程度及其发展趋势(图5)。在50年代,也是通过相同的9个采样站的定量调查,发现平均每升水中有原生动动物3227ind./L^[12]。然而90年代平均上升到13642ind./L,40a来增加了4.23倍。武汉东湖是有名的富营养化型湖泊,它的原生动动物平均个体数量为9873ind./L^[3],而白洋淀却超出了东湖每升水中近4000个体,表明白洋淀的富营养化程度大于武汉东湖。

3 结论

3.1 水质分析资料指出,白洋淀两个湖区9个采样站水体中的溶解氧(DO)和几种主要污染物(SS、COD_{mn}、NH₄-N、T-P)的浓度分布存在十分显著的差异。湖区Ⅰ靠近府河污染源排放的3个采样站(1、2、3)水质较差,明显的特征是具低的溶解氧和高浓度的污染物质。随着采样站的延长,自净功能的加强,水质得到改善,4号和5号站的溶解氧上升,污染物浓度下降。与湖区Ⅰ比较,湖区Ⅱ4个采样站有高的溶解氧和低的污染物浓度,指示了湖区Ⅱ的水质优于湖区Ⅰ的水质。

3.2 白洋淀湖区Ⅱ的原生动物总的种类数、PFU的群集速度和多样性指数 d 值均高于湖区Ⅰ,而原生动动物的个体数量和生物量则低湖区Ⅰ。通过原生动动物群落结构和功能的比较,显示出白洋淀湖区Ⅰ的污染程

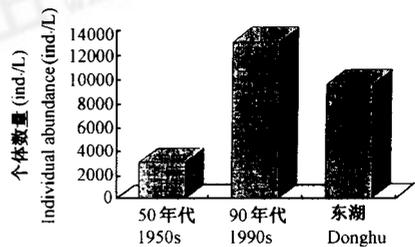


图5 白洋淀原生动动物个体数量不同年代及与武汉东湖的比较
Fig. 5 Comparison of individual abundance of protozoa in Baiyangdian Lake over time and Donghu Lake in Wuhan

度明显大于湖区Ⅱ,换言之,湖区Ⅱ的水质好于湖区Ⅰ的水质。

3.3 调查结果表明白洋淀 90 年代原生动个体数量与 50 年代比较增加了 4.2 倍,与武汉东湖比较,其个体数量超过东湖,这种状况表明,白洋淀的富营养化程度呈加剧的趋势。

参考文献

- [1] 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. *Freshwater Biology*, 1980, **10**: 15~34.
- [2] Bark A W. The temporal and spatial distribution of planktonic and benthic protozoan communities in a small productive lake. *Hydrobiol.*, 1981, **85**(3): 239~255.
- [3] 龚循矩. 从原生动物变化看武汉东湖富营养化的发展. *水生生物学报*, 1986, **10**(4): 340~352.
- [4] 宋微波, 成效吉, 等. 青岛小西湖春季原生动物生态的初步研究. *青岛海洋大学学报*, 1993, **23**(3): 99~106.
- [5] Cairns J Jr. Estimating hazard. *Biological Science*, 1980, **30**(2): 101~107.
- [6] Hennebry M S and Cairns J Jr. Monitoring of stream pollution using protozoan communities on artificial substrates. *Transactions of the American Microscopical Society*, 1980, **99**(2): 151~160.
- [7] 沈韞芬, 章宗涉, 等. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 1~524.
- [8] 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. *生态学报*, 1991, **11**(1): 80~85.
- [9] 许木启, 翟家骥, 等. 利用 PFU 原生动物群落多样性快速监测北京通惠河水质. *动物学杂志*, 1998, **33**(4): 1~6.
- [10] 黄玉瑶. 白洋淀水域生态系统的退化与修复. 见: 章申, 等主编. 白洋淀区域水污染控制研究. 北京: 科学出版社, 1995. 229~235.
- [11] Xu Muqi, Zhu Jiang, *et al.* The Ecological Degradation and Restoration of Baiyangdian Lake, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 1998, **13**(4): 433~446.
- [12] 中国科学院动物研究所白洋淀工作站. 白洋淀生物资源及其综合利用初步调查研究. 北京: 科学出版社, 1958. 1~68.
- [13] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游动物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991. 358~382.
- [14] Odum E P. Perturbation theory and the subside-stress gradient. *Biosence*, 1979, **29**: 349~352.
- [15] Wetzel R G. *Limnology*. Sauders College Press, 1983. 1~754.
- [16] Margalfer D R. Information theory in ecology. *Memorias de la Real Academica de ciencias y artes de Barcelona*, 1957, **32**: 374~559.
- [17] 高玉荣, 许木启. 白洋淀浮游植物群落结构特征与水体营养水平关系的研究. 见: 章申主编. 白洋淀区域水污染控制研究. 北京: 科学出版社, 1994. 154~164.
- [18] 许木启. 从浮游动物群落结构与功能的变化看府河-白洋淀水体的自净效果. *水生生物学报*, 1996, **20**(3): 212~218.