

PFU 原生动物群落生物监测的生态学原理与应用

许木启, 曹 宏

(中国科学院动物研究所, 北京 100080)

摘要:原生动物是水生生态系统食物链中重要环节,发挥着十分重要的生态功能作用。在水环境质量变化评价与发展趋势预测中,与其它较高等生物类群比较,PFU 原生动物群落在水质监测应用方面显示了诸多优点。系统地阐述了原生动物在水生生态系统中的地位与作用,重点介绍了原生动物评价水体污染的生态学基础及其优点和 PFU 原生动物群落特征及其在水质监测应用中的优势。通过对国内外不同水质类型 PFU 原生动物群落生物监测的典型案例研究,进一步论证了 PFU 原生动物群落生物监测的生态学原理与应用优势。

关键词:PFU 原生动物群落;水质;生物监测

Ecological basis and application of PFU protozoan community in bio-monitoring with relation to water quality

XU Mu-Qi, CAO Hong (Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (7): 1540~1547.

Abstract: Protozoa is an important component in food webs in the aquatic ecosystem, and exhibits many of the characteristics of structure and function of entire aquatic ecosystems. PFU protozoan communities play the substantial role and show the clear advantage in bio-monitoring with relation to water quality. This paper makes a systematic exposition on the aspects of ecological basis and application of PFU protozoan community. The case studies of the different types of water quality in China and other countries, carried out by authors, show PFU method's advantage in the bio-assessment.

Key words: PFU protozoan community; water quality; bio-monitoring

文章编号: 1000-0933(2004)07-1540-08 中图分类号: Q143 文献标识码: A

原生动物出现在广泛的环境范围,组成了自然水域重要的生态类群,它们所形成的复杂的种类聚合体组成了水生生态系统中完整的生态单元,显示了整个水生生态系统结构和功能的许多特征,如群落的稳定性及对环境变化的反应等等^[1~3]。由于原生动物种类多、数量大并因理化环境与食物等生态因子和营养类型的差异而占据有不同的生态位,因而它们群落的明显改变在很大程度上可以影响到食物网的组成,因此直接或间接地影响其它较低和较高生物类群的分布和丰度^[2~4]。在水生生态系统中,作为捕食者(或初级消费者)和被捕食者的原生动物在物质循环和能量流动过程中扮演了十分重要的角色。一方面,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,使较复杂的物质转化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转换。另一方面,从种类的多样性、结构上的特殊性及分布特点来看,原生动物可作为污染评价理想的指示生物^[5~7]。

美国弗吉尼亚工程学院及州立大学环境研究中心的 Cairns 等于 1969 年创建了聚氨酯泡沫塑料块(Polyurethane Foam Unit,简称 PFU)方法测定微型生物的群集速度^[8]。中国科学院水生生物研究所沈韞芬在 20 世纪 80 年代初引进此种新技术并

基金项目:中国科学院重大创新资助项目(KZCX1-SW-12);国家自然科学基金资助项目(30370224,30170159);中国科学院知识创新工程重要方向性资助项目(KSCW2-SW-102);中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目(KSCX3-IOZ-02)

收稿日期:2003-12-15;修订日期:2004-02-12

作者简介:许木启(1950~),男,博士,研究员,主要从事淡水生态学研究。E-mail: xumq@panda.ioz.ac.cn

Foundation item: The Key Projects of Chinese Academy of Sciences(No. KZCX1-SW-12), the National Natural Science Foundation of China(No. 30370224,30170159), and the Innovation Program of Chinese Academy of Sciences(No. KSCX2-SW-102, KSCX3-IOZ-02)

Received date: 2003-12-15; **Accepted date:** 2004-02-12

Biography: XU Mu-Qi, Ph. D., Professor, mainly engaged in freshwater ecology. E-mail: xumq@panda.ioz.ac.cn

加以改进与完善,用以测试水体污染的生态效应水平,使之发展成为我国水质微型生物群落监测的国家标准^[9,10]。过去 20 多年来,许多学者应用 PFU 方法研究原生动动物结构与功能的特征,监测评价不同污染类型水体的水质状况及其发展趋势,取得了很好的效果^[9,11~22]。实践证明,与传统的生物监测比较,应用 PFU 人工基质采集并分析原生动动物群落在该类基质上的群集过程,能够获得更多更准确的环境信息,显示了快速、可靠和简便易行的诸多优点^[7,23,24]。

本文系统地阐述了原生动动物在水生生态系统中的地位与作用,重点介绍了原生动动物评价污染的生态学基础及其优点和 PFU 原生动动物群落特征及其在水质监测应用中的优势。作者通过自己在国内外不同水质类型 PFU 原生动动物群落生物监测的典型案例分析,较为深入地论证了 PFU 原生动动物群落生物监测的生态学原理与应用优势。

1 原生动动物评价污染的生态学基础及其优点

1.1 原生动动物群落作为水质评价的生态学基础

国内外的研究已经证实,原生动动物群落对环境因素的改变反应符合许多高等生物反应所发展的模型^[7,8,25]。大量的研究结果表明,急剧的环境条件变化,无论这种变化是由重金属污染还是有机污染引起的,都会改变原生动动物结构与功能特征^[7,9,21,25]。在一个自然的水域生态系统中,虽然种类有时可能相互替代,但功能之间的关系能够保持相对稳定。如果出现污染冲击或压迫,群落的稳定性就会破坏,种类会减少,种类的多样性指数会下降,随之各种结构与功能参数都会发生改变。如果污染是不严重的和非持久性的,在受损的水域生态系统中原生动动物群落会进行自我调节,最后有可能恢复到接近于原有的正常平衡状态。不论是野外的生态实验还是室内的毒性试验均表明,原生动动物群落的稳定性及其对环境变化的反应特征符合生态学的一般规律^[7,8,25]。

1.2 原生动动物作为环境监测指示生物的优点

在污染物毒性的实验室生物测试(Bioassay)和在野外水污染生物监测研究中,鱼类、大型底栖无脊椎动物,大型浮游动物、藻类等被作为主要试验材料和指示生物,原生动动物在污染评价中的作用而往往受到忽视。比较而言,较高等动物不论在实验室的设备选择,还是在野外采集样品都有很大的局限性。从种类的多样性,结构上的特殊性及分布特点来看,原生动动物可作为污染评价理想的指示生物。一般来讲,一种生物的结构越简单、个体越小、相对的表面积越大、对周围介质的化学作用的体表保护性就越不完善,对环境变化就越敏感。与较高等生物比较,单细胞的原生动动物更密切地与它们所生存的环境直接接触,因而对环境变化(如水体污染)具有更短、更迅速的反应时间。由于原生动动物生长繁殖速度快,能够在较短的时间里测试出毒物对其在几个世代水平上生长、繁殖、代谢及其它生理生化特性的影响,而这种结果对高等试验动物来讲则需数天、数月甚至数年以上的时间才能获得,而且后者在实验设备和采样工具及步骤比前者复杂昂贵得多。原生动动物和其它微型生物一起组成了许多水生系统生物量的主要部分。按照单位面积或体积计数种类和计算其重量,原生动动物和其它微型生物在水生生态系统中处于优势地位,所以鱼类及其它高等生物不论在实验室还是在自然状况下对污染的忍受限度与反应方式不可能代表整个水生群落的忍受与反应水平^[7,26]。原生动动物另一显著特点表现为:绝大多数原生动动物种类为世界性分布,不受季节和地区差异的限制。作者在英国 Lough Neagh 湖鉴定的 108 种和在德国 Stechlin 湖记录的 128 种原生动动物在我国的淡水环境中均可发现。这些相同的种类作为水质评价的指示生物,使数据的可靠性和可比性程度大大提高,因此是很理想的指示生物。总之,由于原生动动物结构简单,生命周期短,对污染反应迅速,水体环境的突然变化能及时从原生动动物群落的变化上反映出来。因此在监测评价水质的瞬时变化(如瞬时排污)和长期内的连续变化(长期效应)方面,原生动动物作为理想的监测生物具有不可替代的作用。

2 PFU 原生动动物群落特征及其在水质监测应用中的优势

2.1 PFU 原生动动物的群落特征

MacArthur-Wilson 在 1963 年提出了岛屿生物地理学理论^[27]。按照该理论的推断,如果物种要从别的生境迁入到一个相对地理区域隔离的“荒岛”岛屿上,在静态方面就会与岛屿面积的大小有关,在动态方面与物种的迁入或迁出有关,这就是群集过程(Colonization)。在岛屿环境没有受到任何干扰条件下,岛屿群集过程的最初阶段,物种之间没有相互作用,群集速度只受拓殖物种的扩散能力和消失潜能的影响。当种类的群集速度与消失速度(迁入与迁出)相当时,种类数就达到了平衡,这时群落内才产生相互作用,如竞争、掠食等。这种相互作用决定岛屿的生物组成,显示出群落能够维持一定程度的自主性统一性和稳定性的特点,这就是 MacArthur-Wilson 岛屿生物地理平衡模型,其表达公式为: $S_t = S_{eq}(1 - e^{-Gt})$ 。Cairns 将这一生态学理论应用到 PFU 原生动动物群落的群集过程及其对环境条件变化的反应上并且提出了 3 个功能参数: S_{eq} 为平衡时的种数, G 为群集曲线的斜率(也可称群集速度常数), $T_{90\%}$ 为达到 90% S_{eq} 所需要的时间。如果环境受到污染压迫,原来的平衡就会遭到破坏,3 个功能参数均会发生变化。Cairns 等认为:凡是在相同的生境中有孤立的、相当荒芜的、有机体难以逾越的小生境,都可以称之为“岛屿”^[8]。对原生动动物来说,悬挂在水体中的 PFU 就是一个小岛屿,应用 PFU 采集的微型生物群落能模拟天然水体中的微型生物群落。原生动动物群落上群集过程符合 MacArthur-Wilson 平衡模型^[7~9,13]。PFU 原生动动物群集速度随种类的增加而下降,其交叉点即是种数的平衡点。不同的环境条件有不同的平衡期,水体中理化因子的剧变,毒物的污染都可以影响 PFU 原生动动物的

群集过程而破坏其中平衡。因为污染压迫破坏了原来平衡状态中群落间相互作用的竞争机制,又回复到无相互作用的群集阶段,并由新的群集过程决定新的平衡种数^[7]。因为 PFU 群落的建立在初期阶段基本上没有相互作用的过程,只受种类库地 (species pool) 的影响。如果有机体扩散的能力都均等,那么任何种类能否群集到 PFU 上决定于它的种类丰度和个体密度。种类的丰度和个体密度越高,群集到 PFU 上的可能性也就越大。PFU 中增加的新的迁入种类是从密度低的种类中拓殖来的。如果延长 PFU 在污染水体中的曝露时间(t_3)时,新见种类会越来越,达到回降点(Point of diminishing return)的速度会越来越快^[7~9]。污染压迫水体中 PFU 原生动物达到回降点的速度要比正常水体快得多。因为在正常水体中种类多而个体密度低,而污染水体(特别是有机污染)是种类少而密度高,故当污染水体中 PFU 达到回降点时,正常水体中的 PFU 种类还在上升。因此,PFU 上原生动物的群集过程直接反映出周围天然原生动物群落特点及其对污染压迫的反应^[7,28]。

2.2 PFU 方法在水质评价应用中的优点

在水污染生物监测中,底栖动物被公认为是一种较好的指示生物,但采样工具笨重,在流速过快或底质坚硬的深水河流中采样尤为困难。用浮游生物网采集原生动物,由于目前国内采用的 25 号浮游生物网,网孔为 $64 \mu\text{m}$,大多数原生动物种类都可以从网孔漏出。传统的挂载玻片的方法收集观察周丛生物除原生动物外,还有轮虫、枝角类、桡足类、介形类、线虫、蠕虫及昆虫幼虫等。这些较高等的动物均可掠食原生动物而破坏其群落的结构与功能。用 PFU 法采集原生动物可避免上述各种方法的缺点。首先,PFU 悬浮在水面下,方法简单,易于操作,不受水深、底质和流速的影响。即使在污染十分严重的地区中没有底栖生物时也能采到特别耐污的原生动物种类(主要是些动鞭毛虫)。其次,由于 PFU 孔径小($100\sim 150 \mu\text{m}$),大型的浮游动物和其它无脊椎动物无法入侵到 PFU 内,因此可以采集到水体中绝大多数原生动物种类^[7,29]。另外,其它的生物监测方法都是瞬时采样,缺乏连续监测的意义,而 PFU 方法可按照实际需要挂放于水体中一段相应的时间因而克服了瞬时采样的缺陷。PFU 方法可利用于快速污染监测目的,通常挂放 1~3d 的数据就可测试出受纳系统对压迫的反应。由于 PFU 是在原位上(*in situ*)研究环境压迫的生态效应过程,且它所群集的原生动物代表了食物链上的几个营养级,可以模拟天然群落,并且是在最高级—群落级水平上作出对环境压迫的反应,所以其监测结果具有可靠性强、重复性好、对比度大的等诸方面优点^[7,8,19,21,29]。美国密执安大学原生动物学家在对 Douglas 湖原生动物生态学研究中,通过对各种类型基质采集原生动物的重复性试验比较中,认为 PFU 人工基质是最好的一种收集原生动物的方法^[23]。作者通过对英国 Lough Neagh 湖和德国 Stechlin 湖原生动物分类和生态的研究结果也同样证实了 PFU 方法与其它方法的比较具有明显的优势作用^[3,19,30]。

3 原生动物群落特征在水质生物监测中的应用——案例研究

3.1 利用 PFU 原生动物群落特征监测北京长河——排污河水质的变化

北京长河是北京市主要的饮用水和景观用水河道。位于长河下游的北京排污河是北京市一条主要的污水排放河道。北京市每天排放的大约 250 万 t 的工业废水和生活污水经市区的通惠河、凉水河、清河、坝河等河道汇集于排污河,流经河北、天津境地,最后注入渤海湾,全长 90 km。野外生态实验期间,从市区污染源排放的通惠河双桥到下游入海口的东安子河段,设置 5 个 PFU 站,同时在上游长河的京密引水渠比较清洁的六郎庄断面设一对照采样站。

野外连续 14 d 的实验结果表明^[13],6 个采样站的水体污染主要指标 BOD_5 和 COD_{Cr} 的变化与 PFU 原生动物群集速度关系密切。在这两种污染物含量较高的采样站如双桥,PFU 的群集速度缓慢。随着河流的延长,自然净化功能作用加强, BOD_5 和 COD_{Cr} 逐站递减,PFU 原生动物的群集速度呈上升趋势(图 1)。清洁对照采样站六郎庄河水来自作为北京市市民饮用水源的密云水库,属寡营养型水体,原生动物的种类丰度和个体密度均较低,故 PFU 的群集速度低于排污河下游的东安子采样站。

根据 MacArthur-Wilson 岛屿生物地理理论模型公式,利用北京长河——排污河 6 个采样站 PFU 原生动物野外实验数据获得群集过程的 3 个功能参数——平衡时的种类数 S_{eq} 、群集曲线的斜率 G 和达到 90% 平衡种类数所需要的时间 $t_{90\%}$ (表 1)^[13]。假设,在污染严重的水体中 S_{eq} 少、 G 低、 $t_{90\%}$ 长,在干净水体中 S_{eq} 多、 G 高、 $t_{90\%}$ 短。从表 1 可以看出这 3 个功能参数基本上符合上述假设,能够反映出北京长河和排污河不同采样断面水质由清洁—污染—自净的变化过程。

3.2 国内外不同营养类湖泊原生动物群落结构与功能参数比较

3.2.1 国内外几个不同营养类型湖泊水质和原生动物多样性指数比较 原生动物群落特征的变化能够较客观地反映不同类型的湖泊的营养水平^[32~34]。为了分析原生动物的个体数量与湖泊

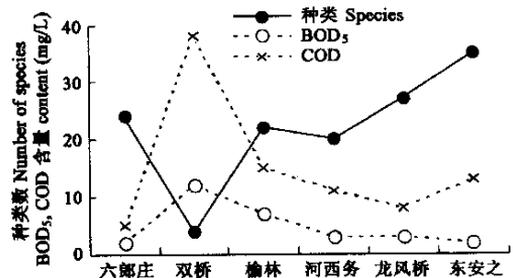


图 1 北京排污河不同站点 PFU 原生动物群集(第 14 天)与河水中 BOD_5 , COD 含量关系^[13]

Fig. 1 The relationship between the PFU protozoan colonization (14th day) and the BOD_5 , COD at 6 sampling sites of the Beijing Wastewater Canal^[13]

富营养化的关系,比较了国内外几个有名淡水湖泊水体营养成分含量和原生动动物个体数量和多样性指数 d 值^[3,15,19,30,31](表 2, 表 3)。在所比较的 5 个湖泊中,除武昌东湖外,德国 Stechlin 湖、英国 Lough Neagh 湖、中国河北白洋淀和安徽巢湖的原生动动物群落结构特征和种群动态规律与湖泊水体质量的相互关系,笔者均进行了较为系统研究。德国的 Stechlin 湖属典型寡营养型湖泊,具体表征为水体中低的总磷和总氮浓度、低的原生动动物个体数量和高的多样性指数 d 值。英国的 Lough Neagh 湖为中富营养型湖泊,与德国的 Stechlin 湖比较,水体中营养成分的含量和原生动动物的个体数量都较高,而多样性指数 d 值降低。从表 2 和表 3 可以看出,与以上国外的两个湖泊比较,国内的白洋淀、东湖和巢湖 3 个淡水湖泊都表明了相同的特征,即含有高浓度的氮磷、高个体数量的原生动动物和较低的多样性指数 d 值,为典型的富营养型湖泊的特征。而安徽巢湖原生动动物的个体数量是 5 个湖泊中最高的。

表 1 北京排污河 PFU 野外生态试验过程中原生动动物群集的 3 个功能参数^[13]

Table 1 Protozoan colonization parameters in PFU experiments for the 6 sampling stations in the Beijing Wastewater Canal

参数 Parameters	采样站 Sampling sites					
	六郎庄	双桥	榆林	河西务	龙凤桥	东安子
S_{eq}	19.80	4.04	19.63	20.11	24.53	31.49
G	142.88	0.25	0.41	0.67	0.69	0.45
$t_{90\%}$	0.6	8.39	5.59	3.40	3.32	5.09

表 2 国内外几个不同营养类型湖泊的化学指标比较(mg/L)^[3,15,19,30,31]

Table 2 The comparison of chemical data for different trophic lakes^[3,15,19,30,31]

湖泊名称 Lakes	溶解氧 DO	酸碱度 pH	磷酸盐 PO ₄ -P	硝态氮 NO ₃ -N	铵氮 NH ₄ -N	总磷 TP	总氮 TN
德国 Stechlin Lake	12.5	7.3	0.0025	0.052	0.035	0.0032	0.098
英国 L. Neagh Lake	10.2	8.3	0.06	0.15	0.63	0.088	0.98
武昌东湖 Donghu Lake	8.7	7.5	0.096	0.53	0.24	0.12	1.45
河北白洋淀 Baiyangdian	7.3	7.8	0.098	0.64	0.87	0.14	1.51
安徽巢湖 Chaohu ^①	7.80	7.77	0.24	0.78	0.89	0.21	2.25

* 全湖平均 Mean of lake

表 3 国内外几个不同营养类型湖泊原生动动物个体数量(个/升)和多样性指数(d)比较^[3,15,19,30,31]

Table 3 The comparison of abundance(ind./L)and diversity index (d)of protozoa for different trophic lakes^[3,15,19,30,31]

湖泊名称 Lakes	种类数 Number of species	个体数量(个/升) Abundance(ind./L)	多样性指数 Diversity index(d)	
			Menhinick index ($d = S/\sqrt{N}$)	Margalef index ($d = S - 1/\ln N$)
德国 Stechlin lake	128	312	7.19	22.12
英国 L. Neag lake	108	6520	1.34	12.18
武昌东湖 Donghu	89	9873	0.89	9.57
白洋淀 Baiyangdian	63	14123	0.53	6.49
安徽巢湖 Chaohu ^①	114	20200	0.80	11.40

3.2.2 国内外几个不同水质湖泊采样站 PFU 群集速度比较

国内外文献表明:水体中原生动动物群落在 PFU 中的群集过程受到多种因素的影响,最主要的因素就是原生动动物群落结构组成的复杂程度和原生动动物的丰度^[8,9,18~23]。一般说来,这种影响是通过导致 PFU 原生动动物群落群集过程中群集到 PFU 中的种类数以及达到群落种类数出现最大种类数的时间来反映的。而水体中原生动动物的种类数和个体丰度又受到不同水质状况的影响。因此,原生动动物群落在 PFU 上的群集过程也就可以反映水体环境质量(图 2)^[3,19,30]①。从图 2 可以看出,不同营养类型湖泊的不同采样站的 PFU 群集速度存在明显差异。图 2 中的英国 Lough Neagh 湖的采样站(第 1 站)设置在紧靠 Flush 河的入湖处。该河接纳来自上游几个食品加工厂和城镇居民所产生的高

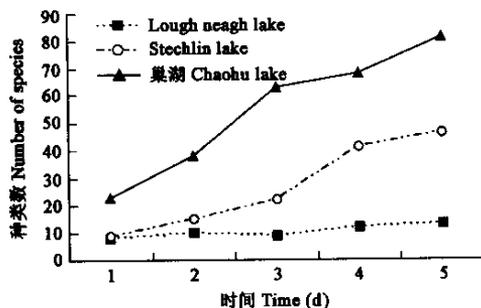


图 2 3 个不同水质湖泊采样站 PFU 群集速度^[3,19,30]

Fig. 2 The comparison of PFU colonization rates of 3 lakes^[3,19,30]

浓度生活污水,是造成 Lough Neagh 湖富营养化的主要污染物来源。水质分析数据表明,这个采样站的污染程度较高,具体的表征为高浓度的 BOD₅、COD_{cr}(55.95 mg/L)和氮、磷(13,0.5 mg/L)含量、低的溶解氧(3.0 mg/L)水平及低的原生动物群落多样性。由于很低的原生动物多样性,直接影响到 PFU 人工基质的群集速度,导致每次采样时间内的 PFU 群集速度都较低(图 2)。德国的 Stechlin 湖是典型的寡营养型湖泊,尽管原生动物种类较多,但种类库地(species pool)的密度(个体数量)很低(表 3),低的种类个体数量减少了群集到 PFU 上的机率,从而导致每次采样时间内的 PFU 群集速度均较为缓慢。安徽巢湖忠庙采样站,尽管属于富营养化水体,但是由于湖水中原生动物种类库地的密度很高,相对而言,群集到 PFU 上的机率加大,所以每次采样时间内的 PFU 群集速度较快。

3.2.3 PFU 人工基质与自然基质采集原生动物种类数的比较 连续采样实验表明,德国 Stechlin 湖同一采样地点(3 号采样站)不同基质类型收集到的原生动物种类数存在明显差异(表 4)^[30]。11 月 7 日和 12 月 8 日两次同步采样,PFU 人工基质采集的原生动物种类数少于从相同生境的自然基质上所采集到的种类数,这主要是因为 PFU 挂放该站时间较短的缘故(第 1 周和第 4 周)。到了第 7 周(12 月 28 日)和第 8 周(1 月 5 日)时,PFU 人工基质采集到的原生动物种类数明显高于从相同生境的天然基质上所采集到的种类数。当实验结束时(第 8 周),在 PFU 人工基质上发现了 101 种原生动物,而在各种自然基质上总共鉴定到原生动物 78 种。Cairns 等通过对美国的 Douglas 湖原生动物研究时发现,与其它 8 种类型的天然基质(沉水植物、水下石头等)和其它类型的人工基质(载玻片、塑料盘等)比较,利用 PFU 方法能够从水体中采集到更多的原生动物种类^[35]。这主要是因为几乎所有的天然基质和其它类型的人工基质都具有平面、开放型的表面积,着生在上面的周丛生物(包括原生动物)容易遭受到较高等生物如轮虫、枝角类、桡足类、介形类、线虫、蠕虫及昆虫幼虫的掠食,而这种掠食作用直接导致了原生动物群落多样性的降低。PFU 人工基质具有立体多维空间结构,其 100~150 μm 的孔径基本上排斥了大多数较高等动物进入的可能性而为原生动物种类的群集和群落的发展提供了适宜的空间。巢湖原生动物的研究^①进一步证实了 PFU 可以收集到水体中绝大多数微型生物种类,这与国内外学者相同类型的研究及作者本人在英国的 Lough Neagh 湖用同样的研究方法所取得的结果基本一致^[3,23,35]。

3.3 污水净化效能与原生动物群落变化的相互关系

关于原生动物在废水处理系统中的功效及其在预报污水净化效能中的指示作用,国内外均有较多的文献报道。概括起来主要包括如下几个方面:(1)原生动物与藻类和细菌存在着密切的功能关系,调整、利用和强化这种关系,可以促进水质的净化;(2)原生动物能够吞食藻类、细菌和碎屑,降低其密度,改善出水水质;(3)原生动物的群落结构随水质的变化而发生改变,通过观察分析其变化规律能够预报废水处理的效能^[2,5,7,9,11~17]。

3.3.1 利用原生动物群落特征评价天津汉沽生物稳定塘废水净化效能 汉沽是天津市的远郊区,地处蓟运河口,滨临渤海湾,海盐化工业较为发达。20 世纪 70~90 年代初,该地区日产近 5 万吨高浓度的化工废水和城市生活污水排入渤海湾,对渤海湾的水环境造成严重污染。1995 年天津市政府和作者课题组利用海边滩涂荒地建成了面积 80 hm² 日处理污水 5 × 10⁴ m³ 的生物稳定塘^[14]。稳定塘系统主要由预处理塘、厌氧塘、好气塘、兼性塘和生态塘 5 系列组成,设计出水水质达到二级排放标准。近年来,在系统调查分析汉沽生物稳定塘中主要污染物去除效果的基础上,重点研究了稳定塘各系列原生动物群落变化特征。

通过 1996~1997 两年水质指标的连续采样分析,结果显示,汉沽生物稳定塘各级系列的主要污染物呈逐级衰减、水中溶解氧(DO)逐塘上升的趋势(图 3)^[14]。几种主要污染物得到有效降解,其中 NH₃-N 和 PO₄-P 的去除率分别达到 80.5%和 67.0%,BOD₅ 和 COD_{cr} 的去除率分别达到 86.6%和 87.9%,表明汉沽生物稳定塘具有较强的净化效果。生物稳定塘 5 个级别系列中原生动物的群落结构特征与各级塘的水质变化关系十分密切。采样期间共发现 62 种原生动物,其中鞭毛虫 14 种,肉足虫 13 种,

表 4 德国 Stechlin 不同基质类型采集原生动物种类数比较^[30]

Table 4 The comparison of protozoan species richness on artificial and natural substrates of Stechlin Lake in Germany^[30]

采样日期 sampling date	PFU 人工基质 PFU artificial substrate	自然基质 Natural substrate
1994-11-07	22	76
1994-12-08	59	78
1994-12-28	92	72
1995-01-05	101	78

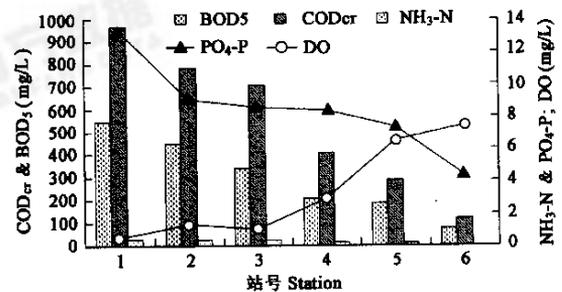


图 3 汉沽生物稳定塘主要污染物浓度变化(mg/L)^[14]

Fig. 3 Variation of contents of main pollutant (mg/L) in the Hangu Stabilization Pond during 1996~1997^[14]

纤毛虫 35 种,分别占总种类数的 23%、21%和 57%。从预处理塘原污水排放口(1 号采样站)至生态塘出水口(5 号采样站)的 5 个采样站所鉴定出的种类数依次为 0、3、18、42 和 58 种。从种类的变化可以看出,距污水排放点越近,种类越少,随着流程延长,自净作用加强,原生动动物群落多样性逐渐升高,其梯度变化十分明显。从各采样站原生动动物种类组成特征来看也存在较大差异:1 号采样站种类数为 0,表明该站污水毒性很强,抑制了原生动动物的生存;2 号采样站所发现的 3 中均为耐污型的鞭毛虫种类,如波豆虫、眼虫和滴虫;3 号采样站仍以耐污的鞭毛虫和肉足虫种类为主;4 号和 5 号站种类结构发生了较大变化,纤毛虫种类占据优势。

两次 PFU 快速监测(第 1 天和第 3 天)的数据表明,PFU 原生动动物群集速度能够较好地反映稳定塘的净化过程(图 4)^[14]。1 号采样站紧靠原污水排放的入水口,污染物浓度很高,其中 BOD 为 500 mg/L, COD 达 1000~1500 mg/L,该采样站两次实验均没有群集到任何种类的原生动动物。至 2 号采样站,毒物浓度略有下降,但是仍不适于原生动动物的生存,实验期间分别仅群集到 3 种耐污种类。与 1、2 号采样站比较,3 号和 4 号两个采样站的净化功能加强,毒物浓度下降明显(图 3)^[14]。这两个采样站 PFU 原生动动物群集速度上升很快,其中 3 号站第 1 天群集了 10 种,第 3 天群集了 18 种,4 号站第 1 天群集了 33 种,第 3 天群集了 40 种。生态塘出水口的 5 号采样站毒物浓度大幅度降低,水质得到进一步改善,PFU 原生动动物的群集速度继续上升,第 1 天和第 3 天分别群集了 48 和 56 种,其群集曲线在其它 4 个采样站之上(图 4)。

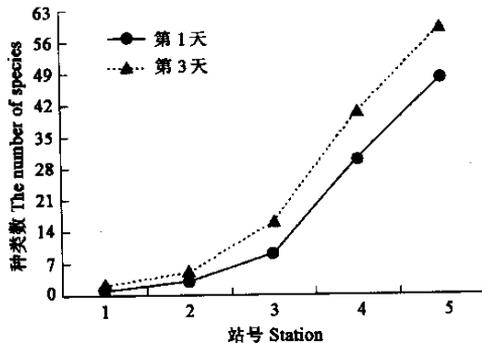


图 4 汉沽生物稳定塘 PFU 原生动动物群集曲线^[14]

Fig. 4 PFU protozoan colonization rate of the Hangu Stabilization Pond^[14]

5 个采样站原生动动物的个体数量和多样性指数 d 值的差异同样客观地反映了生物稳定塘水质的变化趋势(图 5)^[14]。1 号站定量数据为 0, d 值同样也为 0, 指示出该站污染物含量太高, 不宜于原生动动物的生存。2 号站每升水中仅有 2000 个个体, 多样性指数 d 值很低, 为 0.26, 表明该站的污染压迫仍相当严重。3 号站流程较长, 已远离污染源冲击, 有毒物质得到有效的降解, 这为原生动动物提供了生长、繁殖的基本条件。该站的个体数量为每升水中 10800 个个体, 眼虫、隐藻和衣藻鞭毛虫类为优势种群, 多样性指数 d 值上升到 1.85。4 号采样站净化活动强烈, 水质状况进一步好转, 典型的特征是多样性指数 d 值上升到 4.18, 个体数量增至 18000 个/L, 除耐污的鞭毛虫类仍为优势种群外, 大量的纤毛虫数量也可发现。5 号采样站污染压迫减轻, 有毒物质的分解为藻类的生长提供了丰富的 N 和 P 营养物质, 进而也刺激了以藻类为食的原生动动物的生长与繁殖。该站原生动动物的多样性指数 d 值上升到 5.4, 是 5 个采样站中最高的。该站的原生动动物个体数量也是 5 个站中最高的, 每升水中为 34000 个个体, 纤毛虫的数量百分比高于鞭毛虫的百分比。在活体样品观察时, 膜袋虫、斜管虫、珍珠映毛虫、钟虫等种类的相对数量都在 3 个十号或 4 个十号。该站的细菌和大肠杆菌的数量是所有采样站中最低的, 这表明除了稳定塘自身的净化作用外, 高密度的纤毛虫对细菌及大肠杆菌的牧压作用同样是一个重要的因素。同时, 该站如此之高的原生动动物个体数量指示了稳定塘的生态塘出水属于高度富营养化水质, 因此, 采取进一步的强化措施, 进一步提高氧化塘的净化效果、降低末级出水的富营养化程度, 这对于减轻渤海湾污染压力是非常必要的。总之, 原生动动物群落结构与功能的综合参数较好地反映了天津汉沽生物稳定塘系统的净化效果。

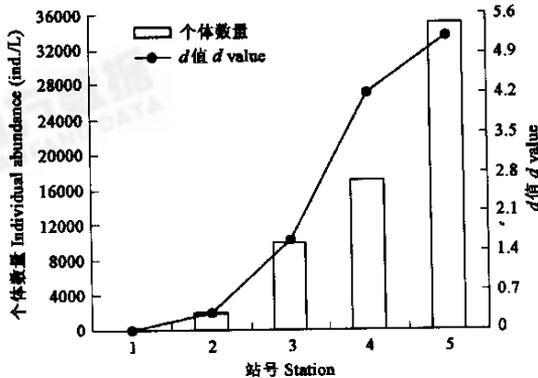


图 5 稳定塘各级原生动动物个体数量和 d 值变化^[14]

Fig. 5 Variations of protozoan individual abundance and d value at five sampling sites in the Hangu Stabilization Pond^[14]

4 结论

本项研究根据生态学的基本理论与方法, 以水污染生物监测和评价为主要目的, 利用 PFU 原生动动物群落结构与功能参数的变化, 较深入地探讨典型污染河流的生态效应过程、富营养化湖泊的表征及发展趋势和污水处理系统——生物稳定塘的净化效能, 得出如下结论:

(1) 典型受城市废水污染严重的河流(如北京排污河)原生动动物群落结构与功能特征与河流的污染程度和水质的变化趋势

密切相关。野外实验结果表明,PFU 原生动物的群集过程符合生态学的基本原理即 MacArthur-Wilson 岛屿生物地理平衡模型。根据模型 3 个功能参数的变化,能够较好地反映河流各个采样站水体的污染压迫状况和自然净化过程。

(2) 通过分析国内外不同营养类型湖泊(寡营养型、中营养型、富营养型)原生动物种类组成、个体丰度、多样性指数(结构参数)和 PFU 群集速度(功能参数)的差异,显示原生动物群落结构和功能特征与湖泊的营养水平关系密切。氮和磷浓度是影响湖泊原生动物群落变化的重要因子,在高度富营养化湖泊中的原生动物群落对此产生明显的响应,即既可改变群落结构,也可改变其功能特征。

(3) 原生动物在受污水体中通过捕食、消化和分解有机物质——细菌、藻类和碎屑而促进水体中物质循环和能量流动,使水质得以澄清。原生动物群落结构和功能的特征能够客观地反映废水处理效能,通过直接观察分析原生动物群落变化,能够预报废水处理系统的运转效果,因此可以作为污水净化过程的指示生物。

(4) PFU 方法能够采集到自然水域中 85% 以上的微型生物种类。与传统的生物监测方法比较,PFU 方法显示了快速、准确和简便易行等诸多优点。说它是快速的,因为通过 1 d 或 3 d 的试验结果就能够预测预报受纳系统(如河流、湖泊等)环境质量状况及其变化趋势。说它是准确的,因为它在原位(*in situ*)研究的基础上系统地反映了生物组建水平的最高级——群落级层次上对环境压迫的生态效应,具有环境的真实性。操作简便、价格便宜、可重复使用,体现了 PFU 方法的另一特点。

References:

- [1] Laybourn-Parry J. Protozoan Plankton Ecology. Chapman & Hall, 1992. 1~231.
- [2] Finlay B J, Esteban G F. Freshwater Protozoa: biodiversity and ecological function. *Biodiversity and Conservation*, 1998, **7**: 1163~1186.
- [3] Xu M Q and Brian Wood. Preliminary Study Of Protozoa Of Lough Neage, Northern Ireland. *Biology and Environment*. 1999, **99B**, (No. 2):103~108.
- [4] Beaver J R Crisman T L. The role of ciliated protozoa in pelagic freshwater ecosystem. *Microbial Ecology*, 1989, **17**:111~136.
- [5] Foissner W. A user-friendly guide to the ciliates (Protozoa, Ciliophora) commonly used by hydrobiologists as bioindicators in rivers, lakes, and waste waters, with notes on their ecology. *Freshwater Biology*, 1996, **35**:375~482.
- [6] Burbanck W D and Spoon D M. The use of sessile ciliates collected in plastic Petri dishes for rapid assessment of water pollution. *J. Protozool.*, 1967, **14**(4):737~744.
- [7] Shen Y F, Zhang Z S. *Modern biomonitoring techniques using freshwater protozoa*. China Architecture & Building Press, Beijing, 1990.
- [8] Cairns J Jr, Dahlberg M L, Dickson K L, et al. The relationship of freshwater protozoan communities to the MacArthur -Wilson equilibrium model. *Amer. Nat.*, 1969, **103**:439~454.
- [9] Shen Y F, Gong X J, Gu M R. Studies of biological Monitoring by using PFU protozoan community. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1985, **9**(4):299~307.
- [10] National Standard of People Republic of China——Water Quality-Microbial Community Biomonitoring——PFU Method, China Standard Press, Beijing, 1991. GB/T 12990-91: 1~154.
- [11] Shen Y F, Gu M R, Feng W S. Using microbial communities to assess waterquality of Changde City. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1991, **2**(2):168~173.
- [12] Chen J, Shen Y F. Discrimination of water quality based on PFU microbial communities and changing pattern of microbial parameters. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, **20**(2):156~161.
- [13] Xu M Q. A study on applying PFU protozoan community to monitor the self-purificial effectiveness of the Beijing Wastewater Canal. *Acta Ecologica Sinica*, 1991, **11**(1):80~85.
- [14] Xu M Q. Biological monitoring of PFU method for purificial efficiency in Hangu Sewage Lagoon. *Chinese Journal of Environmental Sciences*, **11**(4):398~403.
- [15] Xu M Q, Zhu J, Cao H. The Relationship Between The Protozoan Community Diversity And The Water Quality In The Baiyangdian Lake. *Acat Ecologica Sinica*, 2001, **21**(7):1114~1120.
- [16] Xu M Q, Zhai J J, Shao Y Y. Water quality in Beijing Tonghui River, using PFU protozoan communities as indicators. *Chinese Journal of Zoology*, 1998, **33**(4): 1~6.
- [17] Xu R L, Sun Y X, Yang C S, et al. PFU protozoan communities and their colonization in a treatment system of Pb-Zn mine tailing water. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 1999, **5**(4):357~361.
- [18] Xu R L, Bai Q S, Xie R W. PF unit protozoan community characteristics and the relation with the water quality in the Guangzhou reach of the Pearl River. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(4):479~485.
- [19] Xu M Q and Wood. Water quality in Kinnego Bay, Lough Neagh, demonstrated by protozoan communities colonizing on polyurethane foam artificial substrate. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 1994. Vol. 94B.

- [20] Cairns J Jr. Review paper biological monitoring part ; I-early warning system. *Water Res.* ,1981,**14**:1179~1196.
- [21] Henebry M S, and Cairns J Jr. Monitoring of stream pollution using prtotozoan communities on artificial substrates. *Trans. Am. Micro. Soc.* , 1980,**99** (2):151~160.
- [22] Chung P R, Cho K S,*et al.* Biological evaluation of running waters in Korea, with special reference to bioassessment using the PFU system. *Hydrobio.* 1999,**390**: 107~115.
- [23] Pratt J R, Cairns J Jr. Long-term patterns of protozoan colonization in Douglas Lake, Michigan. *J. Protozool.* , 1985,**32**:95~99.
- [24] Shen Y F, Buikema A L Jr, Yongue W H. Use of protozoan communities to predict environmental effects of pollutants. *J. Protozool.* , 1986,**32**:146~151.
- [25] Cairns J Jr, Plafkin J L, Kaesler R L, *et al.* Early colonization patterns of diatoms and protozoa in fourteen freshwater lakes. *J. Protozool.* , 1983,**31**(1):47~51.
- [26] Cairns J Jr. Are single species toxicity tests alone adequate for estimating environmental hazard? *Hydrobiologia*,1983,**100**:47~57.
- [27] MacArthur R H and Wilson E O. An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution*,1963,**17**(4):373~384.
- [28] Cairns J Jr. A strategy for use of protozoans in the evaluation of hazzrdours substances. In: S. James ed. Biological Indicators of Water Quality. University of Newcastle, Upon Tyne, UK. ,1979. 6~17.
- [29] Yongue W H, and Cairns J Jr. Colonisation and succession of freshwater protozoans in polyurethane foam suspended in a small pond in North Carolina. *Acad. Nat. Sci. Philadelphia*,1971,**443**:1~13.
- [30] Xu M Q. Petter Kasprzar. preliminary study of community diversity of stechlin Lakein Berlin, Germany. *Journal of Lake Sciences*,2001, 13(4):322~330.
- [31] Gong X J. The development of eutrophication in Lake Donghu, Wuhan, during thelast two decades based on the investigation of protozoan changes. *Acta Hydrbiologica Sinica*, 1986,**10**(4):340~352.
- [32] Laybourn-Parry, Judith Olver and Sian Ress. The hypolimnetic protozoan plankton of a eutrophic lake. *Hydrobiol.* ,1990,**203**:111~119.
- [33] Laybourn-Parry,JOlver J, Rogerson A, *et al.* The temporal and spatial patterns of protozooplankton abundance in a eutrophic temperate lake. *Hydrobiol.* ,1990,**203**: 99~110.
- [34] Beaver J R Crisman T L. Analysis of the community structure of planktonic ciliated protozoa relative to trophic state in Florida lakes. *Hydrobiol.* ,1989,**174**:177~184.
- [35] Cairns J Jr, William H Y and Herman B J. The protozoan colonization of polyurethane foam units anchored in the area of Douglas Lake, Michigan. *Transactions of the American Microscopical Society*, 1973,**92**(4):648~656.

参考文献:

- [7] 沈韞芬,章宗涉.微型生物监测新技术.北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [9] 沈韞芬,龚循矩,顾曼如.用 PFU 原生动动物群落进行生物监测的研究.水生生物学报,1985,**9**(4): 299~307.
- [10] 中华人民共和国国家标准.GB/T 12990-91;水质——微型生物群落监测——PFU 法.北京:中国标准出版社,1991,1~154.
- [11] 沈韞芬,顾曼如,冯伟松.用微型生物群落评价常德市水系的研究.应用生态学报,1991,**2**(2):168~173.
- [12] 陈建,沈韞芬. PFU 微型生物群落水质鉴别及群落参数变化模式的研究.环境科学学报,2000,**20**(2):156~161.
- [13] 许木启.利用 PFU 原生动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.
- [14] 许木启.利用 PFU 方法快速监测汉沽污水库净化效能的研究.环境科学学报,1991,**11**(4):398~403.
- [15] 许木启,曹宏,朱江.白洋淀原生动动物群落多样性变化与水质关系.生态学报,2001,**21**(7):1114~1120.
- [16] 许木启,翟家骥,邵永怡.利用原生动动物群落多样性快速监测北京通惠河水水质.动物学杂志,1998,**33**(4): 1~6.
- [17] 徐润林,孙逸湘,阳承胜.铅锌尾矿废水处理系统中 PFU 原生动动物群落变化特征及其与水质净化的关系.应用与环境生物学报,1999,**5** (4): 357~361.
- [18] 徐润林,白庆笙,谢瑞文.珠江广州段 PFU 原生动动物群落特征及其与水质的关系.生态学报,2002,**22**(4):479~485.
- [30] 许木启,Petter Kasprzar.德国柏林市 Stechlin 湖原生动动物群落多样性特征的初步研究.湖泊科学,2001,**13**(4):322~330.
- [31] 龚循矩.从原生动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.