

利用PFU原生动物群落监测 北京排污河净化效能的研究*

许木启

(中国科学院动物研究所, 北京)

摘 要

应用PFU方法采集微型生物群落, 监测北京排污河不同河段污染压迫和净化效能。五次野外生态群落试验, 共采集到80种原生动物。6个采样站微型生物种类组成和数量分布存在明显的时空差异。原生动物对不同河段水质变化的反映, 可用群集速度来表示。无论野外生态群落试验和室内原污水的毒性试验, 还是群集过程中 S_e 、 G 、 $t_{90}\%$ 三个功能参数的分析, 及其与水质化验数据比较, 其结果均基本一致。PFU方法较准确地反映了北京排污河水体的生态效应和净化过程。

关键词: PFU方法, 微型生物群落, 群集速度。

微型生物群落是水生生态系统中重要的组成部分。近年来的研究结果表明, 原生动物群落结构特征与较高等有机体群落结构特征相类似, 如果环境受到外界条件的严重干扰, 群落的平衡被破坏, 其结构特征也随之发生变化^[1,2]。凯恩斯(J. Cairns, Jr)等人在开展水体污染早期和长期预测预报系统研究中, 注重群落级的野外生态试验和室内毒性试验^[3-7]。

国内中国科学院水生生物研究所沈韞芬教授首次引进并使用PFU法监测湖北鸭儿湖生物氧化塘系统的净化过程, 取得了满意的结果^[8]。作者于1984年8月利用PFU方法对北京排污河原生动物的种类组成和结构特征进行野外生态群落试验和原污水的毒性试验, 以此来评价河流的污染压迫和净化效能, 为排污河污水排放管理提供科学依据。

一、材料与方 法

北京排污河为北京市一条主要污水排放河道。北京市每天排放的大约250吨工业废水和生活污水经通惠河、凉水河等几条市区小河道均汇集于排污河, 流经河北、天津境地, 最后注入渤海, 全长90公里。从排污河上游污染源双桥至下游入海口的东安子地段, 共设置5个PFU采样站, 同时在上游京密引水渠比较清洁的六郎庄段面设一对照采样站(图1)。

试验用的PFU系用北京泡沫塑料厂的产品, 规格为5厘米厚, 其孔径为100—150微米。使用时将其制作成5×6.5×7.5厘米的小块。在各采样站水下约10厘米处悬挂14块PFU。随后分别于第1、3、6、9、14天各站随机采摘两块样品。样品用塑料袋包装携带回实验室进行活体鉴定。

*本研究得到沈韞芬教授、顾曼如副教授的热情指导; 水生生物研究所王继忠同志协助数据处理; 高玉荣同志鉴定植物性鞭毛虫; 北京监测中心赵慧志、赵幼一同志负责水质分析; 本文经黄玉瑾、赵忠宪同志审阅并提出宝贵意见, 在此一并致谢。

本文于1989年10月31日收到。

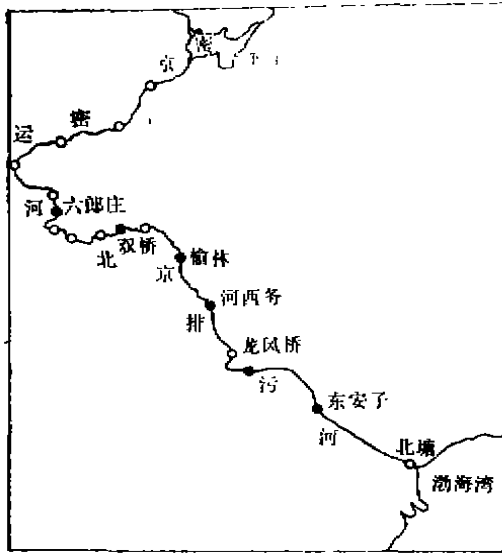


图1 北京排污河PFU采样站示意图

Fig.1 Sketch showing PFU's sampling stations in the Beijing Wastewater Canal

采样观察。采样时每盘随机摘取两块PFU, 以此获得两组平行数据, 便于分析处理。

野外最后一次采样(第14天)同时采集各站水样, 分析 COD、BOD₅、TP、TN、NH₄-N。数据处理根据MacArthur-Wilson岛屿生物地理区系平衡模型 $S_t = S_{eq}(1 - e^{-Gt})$, 获得原生动物群集(colonization)过程中的三个功能参数 S_{eq} 、 G 、 $t_{90\%}$, 以此进行比较。

二、结果与分析

野外PFU试验过程中5次采样共发现60种原生动物。其中植物性鞭毛虫22种, 占其总数的37%; 动物性鞭毛虫6种, 占10%; 纤毛虫23种, 占38%; 肉足虫9种, 占15%(表1)。

试验结果表明, 北京排污河原生动物的种类组成在时间和空间上都存在非常显著的差异。PFU微型生物群落的群集速度与各采样站的水体质量关系密切(图2)。

上游的清洁对照站六郎庄, 试验期间5次PFU采样共发现原生动物31种。其中第一天就群集了14种, 第14天群集了24种。指示出在干净水体中, 微型生物没有受到污染压迫, 种类较多, 群集到PFU上的速度较快。从种类组成的特点看, 该站出现了为数较多的清洁型种类, 如鹅长颈虫(*Dileptus anser*)、卵圆前管虫(*Prorodon ovum*)、砂壳虫(*Diffugia sp.*)、植物性鞭毛虫的单鞭金藻(*Chromulina*)、变形棕鞭藻(*Ochrolmonas mutabilis*) (表1)。

排污河污染源的双桥站, 由于接纳了来自通慧河大量废水, 水质异常恶化, 河水又黑又粘, 河面泡沫飞溅。水中所有较高等的水生生物消失。原生动物五次仅采到5种, 而且均为耐污性很强的种类, 如滴虫、波豆虫、衣藻等。它们的活动也不敏捷, 处于半垂死状态。

榆林和河西务采样站, 原生动物种类恢复较多, 试验期间榆林共发现24种, 河西务27种。PFU的群集速度逐渐增高, 第1和第3天榆林站分别群集了9和13种, 河西务站分别为10和17种。第14天这两个采样站已分别群集了21和22种微型生物, 其各次的群集曲线均高于双桥

室内毒性试验用双桥站的原污水配制成50%(用冷却后的白开水稀释)和100%两个浓度组并设一个对照组。受试废水经过滤(用25号浮游植物网)去除其中生物和悬浮物。对照组配备的水样为冷却后的白开水。随后各试验组在装有试验水样(8升)的塑料盘中(40×35×6)的两端各系7块空白PFU(均作过开水消毒处理)。盘子中间挂放采自事先已浸泡在干净对照站六郎庄14天成熟的PFU作为种源(epicenter)(有的学者认为, 未成熟的种源对环境压迫比成熟的种源更为敏感^[8,9], 作者采用成熟种源的主要意图仍是进一步探索它在预报毒物压迫中的敏感程度)。盘子两端空白PFU与种源PFU之间距离相等。毒性试验过程均在人工模拟实验室内进行。其光照与温度条件基本与野外相似。此后分别于第1、3、6、9、14天

表 1 北京排污河原生动物的种类分布及其相对数量*

Table 1 The distribution of protozoan species and their relative quantity in Beijing Wastewater Canal

种类	采样站	北京排污河						种类	采样站	北京排污河					
		京密引水渠	六郎庄	双桥	榆林	河西务	龙凤桥			东安子	京密引水渠	六郎庄	双桥	榆林	河西务
鹅长颈虫 <i>Dileptus anser</i>	+							+	瞬目虫 <i>Glaucoma</i> sp.				+		+
卵圆前管虫 <i>Prorodon ovum</i>	+							+	小口钟虫 <i>Vorticella microstoma</i>				+	+	+
砂壳虫 <i>Diffugia</i> sp.	+						+	+	半盾虫 <i>Hemiofhyrs</i> sp.					+	
光裸甲藻 <i>Glenodinium gymnodinium</i>							+	+	梨形四膜虫 <i>Tetrahymena pyriformis</i>					+	+
枝藻 <i>Chlorogonium</i>	+								盘藻 <i>Gonium</i> sp.				+		+
单眼金藻 <i>Chromulina</i> sp.	+								实球藻 <i>Pandorina morum</i>				+	+	+
变形棕眼藻 <i>Ochrolmonas mutabilis</i>	+								空球藻 <i>Eudorina elegans</i>				+	+	+
珍珠映毛虫 <i>Cinetochilum margaritaceum</i>	+				+++	+++		+	匣壳虫 <i>Centropyxis</i> sp.						+
小球衣藻 <i>Chlamydomonas microsphealla</i>	+		++	++	+	+		+	瓣胞藻 <i>Petalomonas modiocanollate</i>					+	+
裸藻 <i>Euglena</i> sp.	+		+		+	+		+	肾形虫 <i>Colpda</i> sp.				+		+
波豆虫 <i>Bodo</i> sp.	+		++++	++++	++	++		+	豆形虫 <i>Colpidium</i> sp.					+	+
聚星滴虫 <i>Oikomonas socialis</i>	+					+++	++	+	尖毛虫 <i>Oxytricha</i> sp.						+
滴虫 <i>Monas</i> sp.1	+		+++	++++	+++	++		+	尖毛衣藻 <i>Chlamydomonas mutabilis</i>					+	+
滴虫 <i>Monas</i> sp.2	+			++	+++			+	草履虫 <i>Paramecium</i> sp.1				+		+
盾纤虫 <i>Aspidisca</i> sp.	+			++	+	+			草履虫 <i>Paramecium</i> sp.2						+
尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	+			+	+	+			罗氏虫 <i>Rosculusinium</i> sp.						+
卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>	+				+	+			多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.						+
阿米巴 <i>Amoeba</i> sp.	+		+	+	+	+		+	杯钟虫 <i>Verticella cupifera</i>					+	+
斜管虫 <i>Chilodonella</i> sp.	+					+			薄片膜醉虫 <i>Litonotus fasciola</i>						+
尾藻 <i>Euglena caudata</i>	+			+	+	+			囊藻 <i>Trachelomonas</i> sp.	+		+			+
梨形扁藻 <i>Phacus pyrum</i>	+			+	+	+		+	吸管虫 <i>Podophrya</i> sp.						+
膜袋虫 <i>Cyclidium</i> sp.	+			+	+	+		+	沙粒壶藻 <i>Urceolus pascher</i>						+
刺胞虫 <i>Acanthocystis</i> sp.	+			+	+	+		+	绿眼虫 <i>Euglena viridis</i>						+
太阳虫 <i>Actinophrys</i> sp.	+			+	+	+		+	葡萄异鞭虫 <i>Anisone-ma acinus</i>	+					+
哈氏虫 <i>Hartmannella</i> sp.	+				+			+	板壳虫 <i>Coleps</i> sp.						+
筒变虫 <i>Vahlkampfia</i> sp.	+							+	磷壳虫 <i>Euglypha</i> sp.						+
壳衣藻 <i>Phacotus</i> sp.	+														
隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.						+									
粗袋藻 <i>Peranema trichophorum</i>	+				+	+		+							
弹跳虫 <i>Halteria</i> sp.	+				+										
龙骨膜醉虫 <i>Litonotus carinatus</i>	+			+	+	+		+							
纤细桑椹藻 <i>Pyrobotrys gracilis</i>					+			+							
极小桑椹藻 <i>Pyrobotrys minima</i>					+			+							
棘尾虫 <i>Stylonychia</i> sp.					+	+	+	+							
									合计种类数	31	5	24	27	34	40

* 1) 表中种类数为 6 次观察到的种类。

2) + 示有, ++ 示多, +++ 示很多, ++++ 示很多。

站。这种变化主要是由于该两河段已远离市区, 没有受到新的污染源冲击, 形成一个缓冲地带。而且随着流程延长, 河水得到自然净化, 水质得以相应改善。从原生动物种类组成特征来分析, 分布在这两个采样站的种类均以耐污种类为主。它们的个体数量占绝对优势(表1)。

龙凤桥采样站是排污河净化过程最为活跃的河段。原生动物上升到34种, 每次试验PFU的群集速度均高于以上各站。该采样站河面较宽(60米, 最宽处100多米), 河水较深(约3—6米), 加之水流缓慢, 实际上形成一个天然生物氧化塘系统。水质状况进一步改善, 黑色消退, 水呈绿色。生态功能得以恢复。河面水鸟戏水, 河中鱼儿游荡, 河蚌等大型水生无脊椎动物相继出现, 水浮莲、芦苇等其它水生植物生长繁茂。

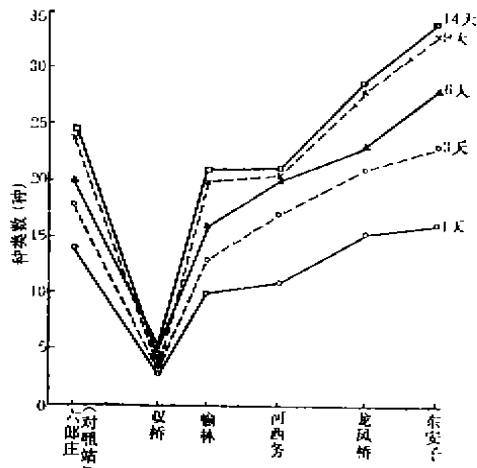


图2 北京排污河PFU原生动物不同站位群集速度
Fig 2 The colonization curves for the 6 PFU's sampling stations in the Beijing Wastewater Canal

至东安子站, 净化效果更为明显, 水质进一步好转, 水呈淡绿色(有时呈浅褐色)。原生动物种类繁多, 达40种, 是6个采样站中最多的。种类虽多, 但没有在数量上占优势的种类, 相对地显示出种类多样性上升。此外, 该站还出现了不少比较清洁型种类, 如鹅长颈虫、卵圆前管虫、砂壳虫、光薄甲藻等, 其中鹅长颈虫被认为可以作为寡污带的指示种类^[10]。龙凤桥、东安子两站原生动物总的种类数以及每次试验群集到PFU上的种类数均比对照站六郎庄高。其原因, 可能是由于水体经自然净化后, 毒物的毒性降低, 氮、磷等营养盐类升高(表2), 为原生动物提供了相当丰富的饵料——细菌和藻类, 致使种类库地(species pool)的密度增加, 原生动物种类

表2 北京排污河几种营养盐类含量(毫克/升)

Table 2 The concentrations of T P, T N, and $\text{NH}_4\text{-N}$ in different sampling stations of the Beijing Wastewater Canal (mg/l)

项目名称	采样站	六郎庄	双桥	榆林	河西务	龙凤桥	东安子
总磷(TP)		0.04	1.30	2.04	1.31	1.46	0.63
总氮(TN)		0.14	16.09	23.52	15.43	16.27	3.27
氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)		0.10	15.49	19.94	14.61	17.71	3.05

增多, PFU群集速度加快。

水质分析资料还可反映出: 6个采样站的 BOD_5 、COD的变化与PFU原生动物的群集速度关系密切。在这两种污染物含量较高的采样站, PFU的群集速度缓慢。随着河流的延长, 自净作用加强, BOD_5 、COD逐站递减, 原生动物群集速度上升(图3)。东安子站COD略有升高, 这主要是该站离河口不远, 受海潮影响, 河水氯离子干扰有关。

根据 MacArthur-Wilson 岛屿生物地理学理论^[11], 岛屿的种数是消失(extinction)和迁入(immigration)之间动态平衡的结果。对任何一个特定的岛屿来说, 随着种类的逐渐增加, 消失速度会上升, 而迁入速度会下降。从理论上说, 当两种速度相等时, 种类就达

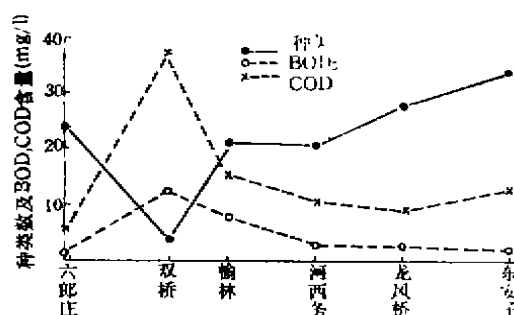


图3 北京排污河不同站位PFU原生动物群集速度(第14天)与河水BOD₅、COD含量的关系

Fig.3 The relationship between the colonization rate of microbial community and the concentrations of BOD₅, COD at various sections of the Beijing Wastewater Canal

到了平衡。除非环境受到严重干扰,种类数基本上是稳定的。这种趋势可用平衡模型公式 $S_t = S_{e.g}(1 - e^{-Gt})$ 来表示,其中 S_t 是 t 时的种数, $S_{e.g}$ 是平衡时的种数, G 是群集曲线的斜率。PFU可看作为一个荒芜的“小岛”,微型生物不断地迁入到PFU内,当种类数上升到一定程度时就达到了平衡^[1,8]。根据平衡模型公式,利用排污河PFU野外生态试验数据(包括各试验组数、PFU暴露天数、各组总种数 S , 各组每次试验新见种数 N 和复见种数 R) 进行计算机处理,用最小二乘法(此种方法已在计算机上实现了Basic计算程序^[1,2])获得群集过程中的3个功能参

数——平衡时的种数 $S_{e.g}$ 、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3)。假设,在污染严重的水体中 $S_{e.g}$ 少、 G 低、 $t_{90\%}$ 长,在干净水体中 $S_{e.g}$ 多、 G 高、 $t_{90\%}$ 短。从表3可以看出这三个功能参数基本上符合上述假设,能够反映出北京排污河的净化过程。

表3 北京排污河PFU野外生态试验过程中原生动物群集的三个功能参数

Table 3 Protozoan colonization parameters in PFU experiments for the 6 sampling stations in the Beijing Wastewater Canal

功能参数	采样站	六郎庄	双桥	榆林	河西务	龙凤桥	东安子
$S_{e.g}$		19.89	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

总之,PFU原生动物群落结构特征、微型生物的群集速度、水质化验指标,平衡模型三个功能参数的分析均一致较好地反映了北京排污河不同河段的污染状况和净化效能。这种自净作用缓解了渤海湾的污染压力,在一定程度上保护了渤海湾的生态环境。但是河流的自净作用是有一定限度的,如果超过其容量负荷,河流生态系统的结构与功能就会遭到破坏,自净作用衰减甚至消失。

参 考 文 献

- [1] Cairns, J. Jr., et al, 1969, The relationship of freshwater protozoan communities to the MacArthur-Wilson equilibrium model. *Amer. Nat.*, 103:439-454.
- [2] Cairns, J. Jr., et al, 1979, Protozoan colonization of artificial substrates, In Weitzel, R. L. ed. *Methods and measurements of attached microcommunities*, PP. 39-57.
- [3] Cairns, J. Jr., 1980, Estimating hazard, *Bio. Science*, 30(2):101-107.
- [4] Cairns, J. Jr., Yongue, W.H. Jr., and N. Smith, 1974-1976, The effects of substrate quality upon colonization by freshwater protozoan, *Revista de Biology*, 10(1-4):13-20.
- [5] Henebry, M. S., et al, 1980, Monitoring of stream pollution using protozoan communities on artificial substrates, *Trans. Am. Micro. Soc.*, 99(2):151-180.
- [6] Buikema, A. L. Jr., Niederlehner, B. R. and J. Cairns, Jr., 1982, Biological monitoring part II—Toxicity testing. *Water Res.*, 16:295-292.
- [7] Yongue, W. H. Jr., et al, 1971, Colonization and succession of freshwater protozoan in polyurethane

- foam suspended in a small pond in North Carolina. *Acad. Nat. Sci. Phila.* 443: 1—13.
- [8] 沈福芬等, 1986, 用PFU原动物群落进行生物监测的研究, *水生生物学报* 9(4): 299—306.
- [9] Henebry, M. S., et al, 1980, The effects of island size, distance and epicenter maturity on the colonization process in freshwater protozoan community. *Am. Midl. Nat.* 104: 80—92.
- [10] 沈福芬等, 1979, 从浮游动物评价水体自然净化的效能, *海洋与湖沼* 10(2): 161—163.
- [11] MacArthur, R. H. et al, 1963, An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution*, 17(4): 373—384.
- [12] 王继忠等, 1985, 用PFU法研究微型生物群落过程的数据处理, *水生生物学报* 9(4): 343—349.

A STUDY ON APPLYING PFU PROTOZOAN COMMUNITY TO MONITOR THE SELF-PURIFICATION EFFECTIVENESS OF THE BEIJING WASTEWATER CANAL

Xu Mu-Qi

(Institute of Zoology, Academia Sinica, Beijing)

The Beijing Wastewater Canal is a main one for discharge of wastewater from Beijing city. It receives a great deal of domestic sewage and industrial wastewater from urban districts.

To monitor the toxic stress of the wastewater and the effectiveness of self-purification at various sections of the water body, the artificial substrate, polyurethane foam unit (PFU) method developed by Cairns (1969) was taken for colonizing microbial community in August, 1984. Examination of the PFU samples revealed a total of 60 protozoan species in 6 sampling stations. Field and laboratory experiments of wastewater effects on the protozoan colonization rate were carried out for five times and the contents of T P, T N, $\text{NH}_4\text{-N}$, BOD_5 and COD were analysed as well. According to the MacArthur-Wilson equilibrium model, three function parameters (S_e , G , $t_{90\%}$) were brought forward in the field ecological tests.

The results from above investigation were found to be coincident with the degrees of pollution and the process of self-purification in the canal. An analysis of the structural and function parameters on the PFU protozoan community indicated that the self-purification of the Beijing Wastewater Canal was effectual. At the upstream sampling stations where were heavily polluted, the colonization rates of the protozoan community are lower than at the downstream sampling stations where the process of self-purification speeds up. Therefore, it is a good method to predict the effects of discharge of wastewater on the aquatic ecosystem with the PFU protozoan community tests.

Key words: PFU method, microbial community, colonization rate.