

# 应用原生动物群落评价石油废水 对燕山区水系的影响

沈韫芬 顾曼如 白庆笙

(中国科学院水生生物研究所, 武汉)

## 提 要

北京燕山地区的水系——周口店河、东沙河、丁家洼河、西沙河、大石河中游受到石油废水和生活污水的影响。作者在5条河流同步采用载玻片法、PFU (Polyurethane Foam Unit) 法和传统的浮游生物沉淀法收集原生动物群落。对群落的种类组成、多样性指数、群集过程 ( $S_{eq}$ 、 $G$ 、 $T_{90\%}$ ) 等参数进行了测定。3种方法都能监测出周口店河有严重的毒性效应，载玻片法和PFU法能监测出含石油的废水在东沙河逐渐净化的过程，PFU法能最终判断出西沙河的有机污染比丁家洼河大。因此这5条河流的污染程度是依大石河、丁家洼河、西沙河、东沙河、周口店河的次序而递增。周口店河上游站因含强酸、强碱的废水引起的毒性已迫使原生动物无法生存。由于东沙河的汇入，大石河的中游地段优势种出现以自养性向异养性转化、丰度增加、多样性指数下降的富营养化现象，对北拒马河亦有潜在的压迫。

**关键词** 生物监测, PFU 法, 周丛原生动物, 群集过程, 相似系数

探索水污染的生物监测方法已引起国内外的重视。国际标准化组织 (ISO) 所公布的生物监测方法中，除对大肠杆菌的数量进行测定以外，只有大型溞 *Daphnia magna* 和鲦鱼的半致死浓度 ( $LC_{50}$ ) 毒性试验了。为保证水生态系的健康，进入水体中的废水浓度不能超过水体本身的同化容量，这个安全浓度决不是依某个种类的  $LC_{50}$  所能解决的。Cairns (1985)<sup>[9]</sup> 提出在一个理想的生物监测方法中，受试生物应当是世界性分布的，可以在较短的时间内提供定量的种类，且交流信息方便，设备易制，费用低廉。应用原生动物群落监测化学污染物，基本具备有上述条件，有关作者已在美国、南极洲、中国等地用PFU微型生物群落进行监测获得成功<sup>[3, 6, 7, 12-14]</sup>。现澳大利亚、巴西、英国和其它欧洲国家都有人用此项方法进行试验<sup>[9]</sup>。本文将评价石油废水对生态系的影响。北京燕山区是以北京燕山石油化学公司为主体的一个市辖区，人口十余万。该公司生产各种油类和化学产品 170 余种。已建立数个废水处理厂处理各种废水。但由于工业生产过程中废水排放量时高时低，居民生活污水也未经处理直接排放，致使燕山区的4条河流——周口店河、东沙河、丁家洼河、西沙河受到不同程度的污染。中国科学院水生生物研究所承担了“燕山

1986年8月29日收到。

冯伟松同志协助野外采样和镜检工作，郑英同志为本文绘图复墨，特表谢意。

082695

生态小区评价”的研究课题,其中部分内容是以原生动物群落评价上述 4 条河流的污染程度,为燕山区的水污染防治提供科学依据。目前国际上提出要建立标准的群落级和生态系级的生物监测方法的呼声很高,本文也对此方法进行探索。还对 PFU 法、载玻片法和经典的浮游生物沉淀法等 3 种方法进行比较,为生物监测标准化途径提供信息。

## 工 作 方 法

### (一) 采样站的设置

1985 年 4—6 月中国科学院水生生物研究所的科研人员在燕山地区进行了化学、细菌、微型生物、底栖动物的同步生态调查,在大石河、东沙河、周口店河、丁家洼河、西沙河的上、中、下游共设 12 个站(图 1)。

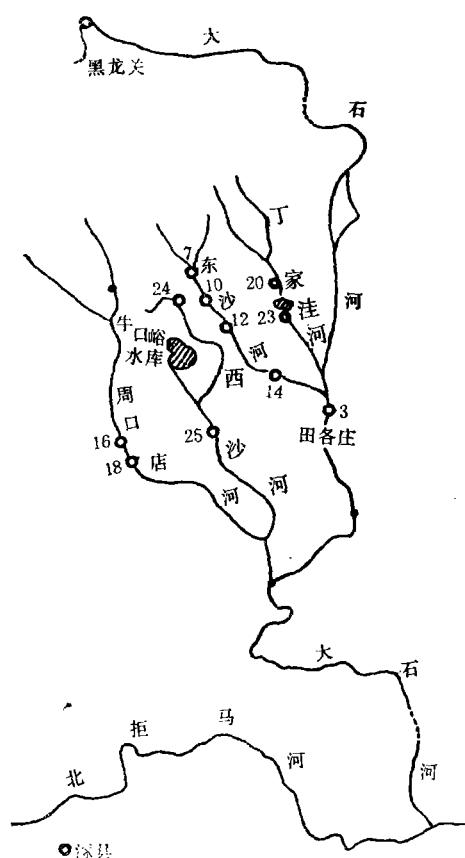


图 1 北京市燕山区水系采样站分布

Fig. 1 Location of sampling stations in the water system of Yanshan region, Beijing. Numbers indicate sampling stations

较,根据我所王继忠同志设计的公式:  $S = \frac{a + b}{c}$  (其中 S 为相似性系数, a 为两个比较站都出现过的种类数, b 为两个比较站都未出现的种类数, c 为 12 个站收集到的总种类数)求得各站之间的相似性系数。再根据相似性系数作出聚类图(图 4)。

**2. 载玻片法** 把夹紧的载玻片悬挂在各采样站。因生物丰度大,故曝露时间定为 3

### (二) 实验步骤

**1. PFU 法** 把切割成  $5 \times 6.5 \times 7.5$  厘米的聚氨脂泡沫塑料块(即 PFU)悬挂在各采样站的水中,曝露天数为 1、3、6、10、15 天,能收集 85% 原生动物种类。定性观察方法详见沈韫芬等(1985)用 PFU 原生动物群落进行生物监测的研究<sup>[3]</sup>。定量方法是吸 0.1 毫升 PFU 挤出液,在计数框内活体计数。原始数据按 MacArthur-Wilson 的生物地理平衡模型

$$S_i = S_{eq}(1 - e^{-GT}),$$

用计算机求得原生动物群集过程中的 3 个功能参数:  $S_{eq}$ —平衡时的种数, G—群集速度,  $T_{90\%}$ —达到 90%,  $S_{eq}$  所需的时间。并用 F 法检验是否符合 MacArthur-Wilson 的模型<sup>[4,5]</sup>。多样性指数采用 Margalef 的公式

$$d = \frac{S - 1}{\log_2 N},$$

其中 S 为种类数, N 为个体数。此外还对原生动物群落进行定性聚类分析,将 12 个采样站上看到的原生动物种类进行每两站之间的交叉比

较,根据我所王继忠同志设计的公式:  $S = \frac{a + b}{c}$  (其中 S 为相似性系数, a 为两个比较站都出现过的种类数, b 为两个比较站都未出现的种类数, c 为 12 个站收集到的总种类数)求得各站之间的相似性系数。再根据相似性系数作出聚类图(图 4)。

天, 收集的主要是一些周丛生物。每次采样时随机取样3—4片, 置于周丛生物皿内带回实验室进行原生动物定性和定量的活体观察。在 $2.2 \times 2.2$ 厘米盖玻片下计数原生动物个体数, 再换算成每平方厘米的个体数。

**3. 浮游生物沉淀法** 在表层采5升水样, 置于试剂瓶中, 立即用碘液(又称鲁哥氏液Lugol's solution)固定。1天后用虹吸法吸掉上清液, 约留1升沉淀液冲洗至分液漏斗中, 进行第二次沉淀。又1天后, 复用虹吸法移去其上清液。将沉淀液冲洗到30毫升标记的定量瓶中。均匀摇动该定量瓶, 边摇边吸出0.1毫升溶液于容量为0.1毫升的计数框内进行原生动物计数。每瓶标本至少计数二片, 要求二片数据之差小于10%。

## 实验结果

### (一) 河流的水化学概况

大石河上游1站(黑龙关)为对照站, 油、酚、有机物、芳烃化合物的含量均很低(表1)。

表1 4条河流的水质化学分析(毫克/升)

Tab. 1 Chemical analysis of water quality of four rivers\* (pollutants in mg/l)

河名 Name of rivers	站号-地名 Number of stations	油 Oil	酚 Phe-nol	硫 Sulfide	COD	BOD	苯 Benzene	甲苯 Methyl benzene	异甲苯 Isopropyl benzene
大石河 Dashi	1——黑龙关	1.00	0.5	0.07	5.1	0.43	0.0003	0.002	0.000
	3——东沙河汇入处	14.55	14.0	0.365	16.97	3.601	0.0012	0.004	0.844
周口店河 Zhoukou-dian	16——胜利污水厂西墙外	14.56	606.2	0.25	165.47	22.01	0.000	0.002	0.068
	18——长沟峪漫水桥	12.40	18.4	0.19	26.01	34.00	0.000	0.002	0.52
东沙河 Dongsha	7——影剧院前会合点	1020	23.4	0.255	94.69	1.87	1.72	5.484	1.65
	10——前进厂单身楼房桥南	353.2	24.8	0.37	61.79	10.404	0.006+	2.328	0.032
	12——漫水桥跃水下	856.6	130.2	0.62	49.90	40.47	0.010	0.050	0.348
	14——东沙河闸上	178.0	51	0.865	36.061	4.182	0.036	0.024	55.08
丁家洼河 Dingjiawa	20——前朱各庄西漫水桥	3.03	8.8	0.115	12.11	1.495	0.566	0.380	0.072
	23——丁家洼水库出口	1.8	8.0	0.29	13.71	1.284			

\* 数据系由北京市环境保护科学研究所、燕山石油化学总公司环境监测站、中国科学院环境化学研究所提供

大石河的中游3站由于丁家洼河和东沙河的汇入, 上述化学物浓度有所提高。从表1可见化学物浓度最高的是东沙河(7、10、12、14站)及周口店河(16站)。其中最关键的污染物质是油及酸、碱。东沙河各站的含油量均比其它河流高出很多。与PFU采样日期同步测定了5条河流的pH及电导率(表2)。周口店河16站的pH值波动极大, 在15天内最低值为2.1, 最高值为12, 而且隔一天就可以从强酸变为强碱, 反映出该地区工厂的工艺系统中排放的废水已达到严重污染的程度(表2)。周口店河的电导率也较对照站(1站)高得多。化学分析资料也反映出西沙河和丁家洼河有一定程度的污染。

### (二) 原生动物群落的结构与功能分析

**1. 种类组成** 在这5条河流中共观察到原生动物351种, 其中植鞭毛虫84种、动鞭

表 2 1985 年 4—6 月在五条河流采样站测得的电导率和 pH 值  
Tab. 2 Conductivity and pH in five rivers (April-June, 1985)

河 名 Name of rivers	站号 No. of stations	电 导 率 Conductivity ( $\mu\text{V}/\text{cm} \cdot 20^\circ\text{C}$ )					pH				
		PFU 曝露天数 PFU exposure time (days)					PFU 曝露天数 PFU exposure time (days)				
		1	3	6	10	15	1	3	6	10	15
大石河 Dashi	1	340	335	315	330		7.7	7.8	8.6	7.5	
	3	820	865	785	795	1130	8.1	8.5	8.9	7.9	8.7
东沙河 Dongsha	7			800	773	755				7.6	7.7
	10			750	885	735				7.8	7.8
	12			795	885	645				7.7	7.9
	14			785	735	680				7.6	7.8
周口店河 Zhoukoudian	16	3000	2520	640	1110	3800	3.0	12	7.5	9.7	2.1
	18	1410	2000	1085	1465	1000	7.5	6	4.5	8.2	7.2
丁家洼河 Dingjiawa	20	890	930	920	910	675	7.9	7.4	7.3	7.3	7.3
	23	905	900		880	845	8.8	8.4		8.1	8.5
西沙河 Xisha	24	1020	1020	950	920	970	8.1	8.3	8.9	8.8	8.6
	25	1050	1000	1105	1200	1120	7.8	7.8	7.9	7.8	7.5

毛虫 34 种、肉足虫 54 种、纤毛虫 179 种(表 3)。如果将其中 4 条河流的上游站(7、16、20、24 站)的原生动物种数与大石河上游站(1 站)的种数相比,周口店河明显受到污染的压迫,只观察到 9 种,而对照站(1 站)却有 120 种。东沙河的种数也有明显的减少,降为 90 种。但西沙河和丁家洼河的种数与对照站差别不大(下文将用其它参数加以判别)。至于每条河流的下游种类比上游种类为多,原因是多方面的。有的是因为水中有机物含量提高,饵料增多,适合原生动物的生长,故而增加了种类(如 3 站),有的是因为污染压迫得到了缓解(如 18、14 站)。

表 3 5 条河流中原生动物种数的分布 (PFU 法和载玻片法)

Tab. 3 Distribution of number of protozoan species in five rivers (PFU and slide methods)

河 名 Name of rivers	大石河 Dashi		丁家洼河 Dingjiawa		西沙河 Xisha		东 沙 河 Dongsha				周口店河 Zhoukoudian	
站 号 Number of stations	1	3	20	23	24	25	7	10	12	14	16	18
种 数 Number of species	120	163	102	124	112	134	90	94	98	104	9	58
总 种 数 Total number of species	351											

**2. 载玻片法** 此法从原生动物种数、丰度、多样性指数及优势种等进行分析(表 4)。1 站是对照站,明显地表示出它的种类最多,达 36 种,以自养性的植鞭毛虫——蓝隐藻虫(*Chroomonas* sp.)为优势。在流经石油化工区时,受到东沙河汇入的有机物影响,在 3 站减为 32 种,优势种类从自养性为主转化为以异养性——缘毛类纤毛虫、螅状独缩虫

表4 5条河流中用载玻片法测得的原生动物种类和数量分布

Tab. 4 Distribution of protozoan number of species and abundance in five rivers (slide method)

河名 Name of rivers	站号 Number of stations	种数 Number of species	丰度 Abundance ind./cm <sup>2</sup>	多样性指数 Margalef diversity index	优势种 Predominant species	
					种名 Species	占总数的百分比 Abundance (in percentage of total number)
大石河 Dashi	1	36	124.65	7.75	蓝隐藻虫 ( <i>Chroomonas</i> sp.) 卵形隐藻虫 ( <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr.)	52.92 7.89
	3	32	1442.71	4.26	螅状独缩虫 ( <i>Carchesium polypinum</i> Linne)	53.91
					衣藻虫 ( <i>Chlamydomonas</i> sp.)	14.68
					褶累枝虫 ( <i>Epistyliis plicatilis</i> Ehr.)	11.67
					逗点衣藻虫 ( <i>Chlamydomonas komma</i> Skuja)	7.22
	7	18	126.24	3.51	尾草履虫 ( <i>Paramecium caudatum</i> Ehr.)	80.20
	10	18	41.94	4.55	螅状独缩虫 ( <i>C. polypinum</i> Linne)	26.11
					集盖虫 ( <i>Opercularia coarctata</i> C. u. L.)	14.78
					吸管虫 ( <i>Suctoria</i> sp.)	13.79
					湖累枝虫 ( <i>E. lacustris</i> Imhoff)	12.81
					尾波豆虫 ( <i>Bodo caudatus</i> Dujardin)	12.81
东沙河 Dongsha	12	27	109.00	5.54	尾草履虫 ( <i>P. caudatum</i> Ehr.)	36.63
					双核草履虫 ( <i>P. aurelia</i> complex)	16.67
					珍珠映毛虫 ( <i>Cinetochilum margaritaceum</i> Perty)	7.99
					球波豆虫 ( <i>B. globosus</i> Stein)	7.64
	14	26	18.39	8.59	尾波豆虫 ( <i>B. caudatus</i> Dujardin)	25.84
					中型眼虫 ( <i>Euglena intermedia</i> (Klebs) Schmitz)	10.11
					海洋尾丝虫 ( <i>Uronema marinum</i> Dujardin)	7.87
					逗点衣藻虫 ( <i>Chlamydomonas komma</i> Ehr.)	4.49
					斜内管虫 ( <i>Entosiphon obliquum</i> Klebs)	4.49
					中纵沟滴虫 ( <i>Petalomonas mediocanellata</i> Stein)	4.49
周口店河 Zhoukoudian	16	1	0.21	0.00	弯豆形虫 ( <i>Colpidium campylum</i> (Stokes) Bresslau)	4.49
					娇旋口虫 ( <i>Spirostomum teres</i> C. u. L.)	4.49
					计数不到 none	
丁家洼河 Dingjiawa	18	8	11.26	2.89	衣藻虫 ( <i>Chlamydomonas</i> spp.)	36.70
					尾波豆虫 ( <i>B. caudatus</i> Dujardin)	29.35
					小波豆虫 ( <i>B. minimus</i> Klebs)	23.85
	20	11	672.00	1.54	尾波豆虫 ( <i>B. caudatus</i> Dujardin)	69.44
					珠花虫 ( <i>Anthophysa vegetans</i> Stein)	20.83
西沙河 Xisha	23	24	1184.90	3.25	球波豆虫 ( <i>B. globosus</i> Stein)	8.90
					钟形钟虫 ( <i>Vorticella campanula</i> Ehr.)	75.97
					卵形隐藻虫 ( <i>Cryptomonas ovata</i> Ehr.)	5.64
	24	36	89.66	7.78	缪氏喇叭虫 ( <i>Stentor milleri</i> (Bory))	5.35
					四鞭藻虫 ( <i>Casteria</i> sp.)	32.03
	25	32	518.80	4.96	尾波豆虫 ( <i>B. caudatus</i> Dujardin)	15.44
					绿色眼虫 ( <i>Euglena viridis</i> Ehr.)	9.68
					螅状独缩虫 ( <i>C. polypinum</i> Linne)	70.13
					尾草履虫 ( <i>P. caudatum</i> Ehr.)	8.88

(*Carchesium polypinum*) 为主, 而且个体数量增加 10 倍, 导致多样性指数从 7.75 降为 4.26。东沙河从上游(7 站)到下游(14 站)原生动物种类明显地比对照站(1 站)为少, 只在 20 种上下。上游 7 站以尾草履虫 (*Paramecium caudatum*) 占优势, 多样性指数在此河中最低, 反映出该站的污染程度相当严重。到 10 站时, 优势种变为以着生纤毛虫为主, 如蝎状独缩虫、小盖虫 (*Opercularia minima*)、湖累枝虫 (*Epistylis lacustris*)、吸管虫 (*Suctorria*) 等, 表明这一河段生物自净作用活跃。东沙河 12、14 站原生动物种类数增加, 优势种也起了变化, 不再以着生纤毛虫为优势, 而是分散在草履虫属、波豆虫 (*Bodo spp.*)、珍珠映毛虫 (*Cinetochilum margaritaceum*)、海洋尾丝虫 (*Uronema marinum*)、中型眼虫 (*Euglena intermedia*) 等几个优势种, 于是导致多样性指数的上升, 从 3.51 升到 8.59, 表明该河下游 14 站水质已有改善。丁家洼河上游 20 站受石油废水和生活污水的影响, 原生动物只有 11 种, 以嗜污种类——尾波豆虫 (*Bodo caudatus*) 占优势。其下游 23 站(丁家洼水库出口处)的原生动物种类数增加到 24 种, 多样性指数从 1.54 上升为 3.25, 以钟形钟虫 (*Vorticella campanula*) 占优势, 反映自净作用活跃, 污染压迫有减轻。西沙河主要是受生活污水的影响, 故种类多, 多样性指数也较高。其下游站(25 站)转为以着生种类 *Carchesium polypinum* 占优势, 显示自净作用活跃。最为严重的是周口店河的 16 站, 原生动物几乎绝迹, 说明此站有足以致死的毒物, 出现强酸和强碱。到下游 18 站时 pH 值有所中和, 生命正在恢复, 出现了 8 种原生动物, 以植鞭毛虫——衣藻虫 (*Chlamydomonas sp.*) 占优势, 但是多样性指数还是很低的, 只有 2.89。根据上述分析周口店河毒物污染最严重, 东沙河次之。西沙河和丁家洼河都属富营养的有机污染。

**3. PFU 法** 此法比载玻片法多了功能参数——群集过程。比较 5 条河流的群集曲线(图 2、3), 以大石河的最高, 周口店河的最低, 其它河流居中。大石河 1 站河水清澈, 流速缓慢, 电导率是 5 条河流中最低的, pH 值也适宜于原生动物的生长(表 2)。根据 MacArthur-Wilson 的模式求得 3 个参数  $S_{eq}$ 、G、 $T_{90\%}$  分别为 44.68、0.32、7.10(表 5)。美国密执安州未被污染的 Douglas 湖, 在 1979 年的 3 个参数分别为 42.58、0.26、8.85

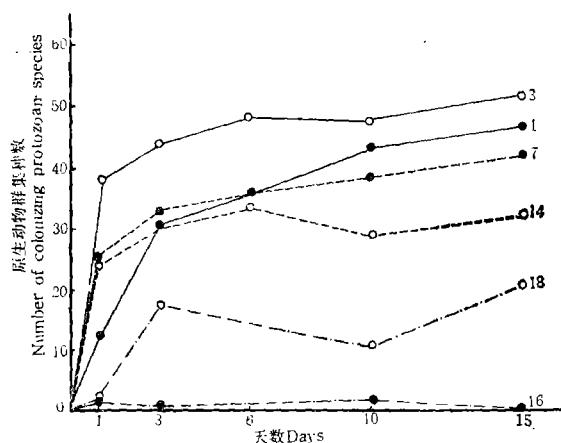


图 2 大石河(1, 3 站), 东沙河(7, 14 站)和周口店河(16, 18 站)  
原生动物在 PFU 内的群集过程

Fig. 2 Protozoan colonization of PFU in Dashí river (station 1, 3), Dongsha river (Station 7, 14) and Zhoukoudian river (station 16, 18)

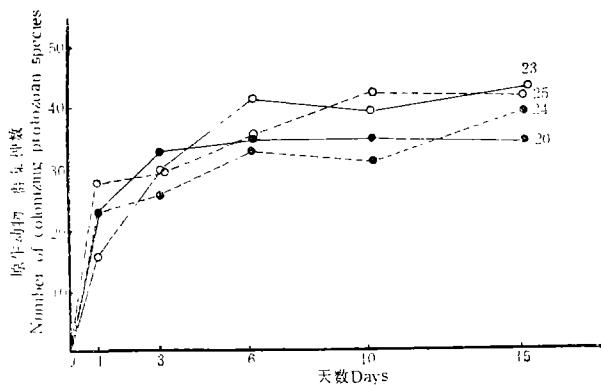


图3 丁家洼河(20、23站)和西沙河(24、25站)原生动物在PFU内的群集过程

Fig. 3 Protozoan colonization of PFU in Dingjiawa river (Station 20, 23) and Xisha river (station 24, 25)

表5 5条河流中PFU群集过程的参数,与 MacArthur-Wilson 平衡模式  $S = S_{eq}(1 - e^{-GT})$  的符合度

Tab. 5 Colonization parameters for PFU colonized in five rivers. and fit ness of MacArthur-Wilson equilibrium model  $S_t = S_{eq}(1 - e^{-GT})$

河 名 Name of rivers	站号 Number of station	$S_{eq}$	G	$t_{90\%}$ (days)	F	$F_{(0.05)}(3,5) = 5.41$
大石河 Dashi	1	44.67	0.32	7.10	2.44	符合模型 Fit
	3	47.62	1.49	1.53	3.41	符合模型 Fit
	7	37.91	0.99	2.30	5.30	符合模型 Fit
东沙河 Dongsha	10	38.13	2.11	1.09	0.53	符合模型 Fit
	12	32.88	2.42	0.94	1.72	符合模型 Fit
	14	30.58	1.53	1.50	0.62	符合模型 Fit
周口店河 Zhoukoudian	16	1.00	16.19	0.14	1.00	符合模型 Fit
	18	15.82	0.53	4.29	42.84	不符合模型 Lack of fit
丁家洼河 Dingjiawa	20	34.29	1.15	2.00	4.44	符合模型 Fit
	23	42.18	0.44	5.19	2.46	符合模型 Fit
西沙河 Xisha	24	32.90	0.98	2.34	15.47	不符合模型 Lack of fit
	25	37.94	1.05	2.18	3.21	符合模型 Fit

$S_{eq}$ —Equilibrium species number

G—Colonization rate constant

$T_{90\%}$ —Time to 90% of equilibrium species number

(Pratt 等, 1985b)<sup>[16]</sup>。两组参数比较接近。因此把大石河 1 站视为洁净的对照站是合理的。特别要指出周口店河的 16 站, 15 天内的群集曲线一直接近底线, 说明水中的原生动物几乎绝迹, 反映出水质毒性强。同步测得的电导率在 5 条河流中最高, pH 值的极化远非生命所能忍受, 必须引起密切注意(表 2)。群集曲线居中的东沙河、丁家洼河和西沙河, 反映出工业废水与生活污水相混合的结果。一般认为生活污水能对含毒废水产生拮抗的效果, 例如含油废水浓度较高的东沙河 7 站到下游 14 站时已有缓解(表 1)。由于生活污水中含有氮、磷等营养盐类, 使水中细菌、藻类、植物性鞭毛虫等大量繁殖, 异养性原

生动物也因有丰富的饵料而生长快，导致东沙河、丁家洼河、西沙河 3 条群集曲线比较接近。除西沙河外，自养性的鞭毛虫到下游站均有显著增加，东沙河从 7 种增至 16 种，丁家洼河从 7 种增至 15 种，反映出水质好转。表 5 反映出 5 条河流的平衡模型参数，Gairns (1969) 等<sup>[4]</sup>应用此平衡模型于野外 PFU 群集过程时，是在未污染或轻度污染的水体中。象本文所调查的 5 条河流，其营养类型差异甚大，但用 F 法检验时，除 18、24 两站不符合模型 ( $p = 0.05$ ) 外，其余大部分采集站均符合模型，说明 MacArthur-Wilson 平衡模型有广泛的生态意义。从平衡种数  $S_{eq}$  分析，达到 40 种以上的有大石河 1、3 站和丁家洼河下游的 23 站，无疑这些站水质较好，但还必须考虑群集速度 G 的因素，G 与  $T_{90\%}$  成反比，分析了 G 的情况就毋须再分析  $T_{90\%}$ 。影响 G 值主要因素一是流速，其次是微型生物库地的丰度。水的流速快、丰度大，则微型生物群集速度加快，G 值就大。东沙河 4 个站 (7、10、12、14 站)，西沙河的两个站 (24、25 站) 以及丁家洼河 20 站的  $S_{eq}$  都在 30 种以上，但从 G 值来比较，东沙河的 G 值较大，与排入大量的生活污水造成原生动物丰度较高有关。周口店河 16 站  $S_{eq}$  只有 1 种，反映出水中的毒性不能容忍原生动物的生存。在这种情况下出现 G 值很高，显然是受到数学模型的约束造成不合理的演算结果。流向 18 站时， $S_{eq}$  增至 15 种，反映水中毒性已有下降，当然仍比不上其它河流。PFU 法能采集到水体中 85% 的库存种类。基于在水质相似的水体中，种类的重复度要高些。对观察到的种类进行聚类分析的结果表明 5 条河流中的种类基本上是各自聚类在一起，而洁净的大石河和毒性严重的周口店河却在聚类图的两端(图 4)。在 PFU 法中，我们首次应用定量分析，测定了多样性指数(表 6)。在 5 条河流中，PFU 群落的多样性指数大体上是随曝露的天数而增高。如以第 3、6、15 天的平均数来统计，大石河中原生动物多样性指数最高，为 9.39，反映水质最佳。其次是丁家洼河和西沙河，东沙河更次，最低是周口店河。其多样性指数依次为 9.39、8.34、7.50、7.26、3.92。在 PFU 法中，通过上述原生动物群集过程和多样性指数的分析，我们认为水质从优到劣的次序排列应为大石河、丁家洼河、西沙河、

表 6 5 条河流中 PFU 原生动物群落的多样性指数

Tab. 6 Margalef diversity index of PFU protozoan communities colonized in five rivers

河 名 Name of rivers	站号 Number of station	PFU 曝露天数 PFU exposure time (days)					3, 6, 15 天的 平均值 Average value for 3,6,15 days	河流的平均值 Average value for the river
		1	3	6	10	15		
大石河 Dashi	1	3.39	6.52	7.57	10.17	10.93	8.34	9.39
	3	8.69	9.60	10.15	11.56	11.60	10.45	
东沙河 Dongsha	7	—	7.25	6.89	—	9.25	7.79	7.26
	14	—	6.98	7.46	—	5.80	6.74	
周口店河 Zhoukoudian	16	—	1.21	1.54	0	0	0.91	3.92
	18	—	5.39	7.65	7.05	7.75	6.93	
丁家洼河 Dingjiawa	20	—	8.08	6.86	7.70	7.71	7.55	8.34
	23	—	6.98	10.31	9.04	10.13	9.14	
西沙河 Xisha	24	4.88	4.95	7.43	7.03	8.83	7.07	7.50
	25	5.66	6.10	9.14	9.29	8.57	7.93	

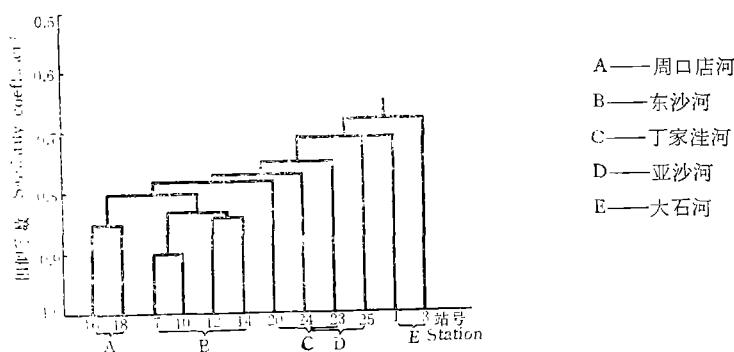


图4 在5条河流中PFU原生动物群落内种类相似系数聚类分析

Fig. 4 Dendrogram from cluster analysis by the coefficients showing species similarities among the PFU protozoan communities in the five rivers

东沙河、周口店河。

**4. 浮游生物沉淀法** 我们于5月24日从12个采样站各采取5升水同步沉淀。这个方法是从50年代起常用的一个经典方法。计算的结果见表7。大石河1站原生动物数量为2160个/升(包括植鞭毛虫)，低于60年代我们在东湖湖中心的年平均数量(4270个/升，未包括植鞭毛虫)<sup>[2]</sup>，因此把1站作为对照站是合理的。除周口店河外，其它各条河流的原生动物数量比对照站高1—2个数量级，说明有机营养物质十分丰富。但要对这几条河流进一步作出评价，靠一次性的瞬时数据是难以确认的。

表7 5条河流中原生动物数量的分布(1985年5月24日，浮游生物沉淀法)

Tab. 7 Distribution of protozoan abundance in five rivers (24 May, 1985, with method of planktonic settling)

河名 Name of rivers	大石河 Dashi		周口店河 Zhoukoudian		东沙河 Dongsha				西沙河 Xisha		丁家洼河 Dingjiahe	
站号 Number of station	1	3	16	18	7	10	12	14	24	25	20	23
数量(个/升) Abundance (ind./l)	2160	28320	390	5070	4680	26790	60528	22020	44913	32280	147480	992610

## 讨 论

1. 北京燕山石油化学公司生产过程中排放的废水，经废水处理厂处理后，排入接受系统的水中仍含有油类、酚、酸、碱、有机化合物、芳烃类等化学物质(表1, 2)。此外还有大量的生活污水排入水系。这些综合污染物的环境归趋以及它对水生生物的影响是错综复杂的。要评价污染物对5条河流的生态效应，只有从群落级的水平进行研究，才能获得比较接近客观现实的结果。我们用载玻片、PFU、浮游生物沉淀3种方法进行了比较。传统的浮游生物沉淀法只是瞬时间的采样，所得的参数是静态的(表7)，难以全面反映河流污染情况。载玻片法和PFU法的结果都比较成功地监测和评价了5条河流的污染程度。因为这两种方法都是在水中曝露了几天后采得的群落，它反映了3—15天内污染物连续

冲击的效应,所得的参数是动态的。载玻片法虽能判断周口店河及东沙河水的毒性,但无法区别西沙河和丁家洼河有机污染程度(表 4)。PFU 法除了提供结构参数外,还提供了群落的功能参数,而功能参数能反映群落的生命活动。即 PFU 法最终判断了西沙河和丁家洼河的污染程度的差别(图 2、3; 表 5, 6)。

2. 上文提到用载玻片法和 PFU 法的结构参数(种类组成、多样性指数)和功能参数(群集过程)对 5 条河流进行监测,认为污染程度依大石河、丁家洼河、西沙河、东沙河、周口店河而递增。周口店河 16 站的监测表明水体毒性很大,原生动物群落临于濒危,其下游的 18 站略有好转,但反映水质仍差劣。东沙河中微型生物群落显示出正常结构已被破坏,种类组成单调而个体数量多,反映出除毒物影响外,还有生活污水的影响,东沙河的下游(14 站)自养性种类增多,水质已有所好转。西沙河和丁家洼河上游原生动物群落的情况与东沙河接近,但丁家洼河下游(23 站)原生动物结构渐趋正常化,和大石河 3 站接近。大石河中游(3 站)和丁家洼水库(23 站)的原生动物群落无论在结构上,还是功能上与清水型的原生动物群落(大石河上游 1 站)比较尚有相当差距,仍然是一种富营养型的群落。而大石河最终是要流入北拒马河的,如果不及时采取治理燕山地区水污染的措施,对北拒马河是一个潜在的威胁。因此这次综合考察报告已引起燕山石油化学公司领导的重视,正在改善生产工艺程序,综合治理燕山小区的水系。

3. 在鸭儿湖氧化塘应用 PFU 法进行对有机磷农药废水的生物监测,效果良好<sup>[3]</sup>。因为它的化学毒物和地理、地貌都比较简单。而燕山地区污染物具有综合性、冲击性、多源性的特点,再加上复杂的地貌,用 PFU 法同时监测 5 条河流,还属首次尝试。在美国已有用 PFU 法监测污染河流的报告,如 Henebry 等(1980)<sup>[13]</sup> 监测城市污水、Pratt 等(1985)<sup>[14]</sup> 监测矿山废水、中美合作研究监测重金属污染的河流(Shen 等, 1986<sup>[17]</sup>)等。在室内用 PFU 法进行群落级测试的有铜(Cairns 等, 1980<sup>[8]</sup>)、氯化物(Cairns 等, 1975<sup>[9]</sup>)、镉(Niederlechner 等, 1985<sup>[14]</sup>)等毒性试验。但未见到对石油废水监测的报道。目前国际上十分强调生物监测的重要意义,因为环境保护的目的毕竟是要保护包括人类在内的生物。如果生物监测能够与理化监测结合起来,人们就能作出更加科学的判断。我们认为只要能达到迅速、正确、经济地监测和预报的目的,无论用哪种生物监测方法都具有同等重要性。我们还认为半致死浓度  $LC_{50}$  决不能取代安全浓度。毒性试验也要建立在复合种类和微生态级别的水平上,才能获得正确的判断(Cairns 等 1985、1986)<sup>[10, 11]</sup>。如果能找到某类生物,它是世界性分布的,不受地区和季节变化的限制,这样测试的数据对比度大,将是很理想的监测生物。微型生物就属于这类生物。本试验结果证实了用 PFU 原生动物群落的结构和功能在监测石油废水、有机磷农药废水、矿山废水和重金属废水均同样有效。这说明了群落级水平的监测方法符合生态学的基本规律,现实性较大。我们期望在全国各地更广泛地试验,在方法上不断地完善,为最后建立一个新的、标准化的生物监测方法而努力。

#### 参 考 文 献

- [1] 王继忠、袁育才、沈韫芬, 1985。用 PFU 法研究微型生物群集过程中数据的处理。水生生物学报, 9(4): 343—350。
- [2] 沈韫芬、顾曼如, 1965。武昌东湖原生动物生态初步研究。水生生物学集刊, 5(2): 146—182。

- [3] 沈韫芬、龚循矩、顾曼如, 1985。用 PFU 原生动物群落进行生物监测的研究。水生生物学报, 9(4): 299—308。
- [4] Cairns, J. Jr., Dahlberg, M. L., Dickson, K. L., Smith, N. and Waller, W. T., 1969. The relationship of freshwater protozoan communities to the MacArthur-Wilson equilibrium model. *Amer. Nat.*, 103: 439—454.
- [5] Cairns, J. Jr., Heath, A. G. and Parker B. C., 1975. Response of protozoan communities exposed to chlorine stress. *Arch. Protistenk.*, 117: 47—53.
- [6] Cairns, J., Jr., 1979. A strategy for use of protozoans in the evaluation of hazardous substances, pp. 61—67 in James A. and L. Evison, eds. *Biological Indicators of Water Quality*.
- [7] Cairns, J., Jr., Kuhn, D. L. and Platkin, J. L., 1979. Protozoan colonization of artificial substrates, pages 39—57 in R. L. Weitzel, ed. *Methods and Measurements of Attached Microcommunities. A. Review*.
- [8] Cairns, J., Jr., Hart, K. M. and Henebry, M. S., 1980. The effects of a sublethal dose of copper sulfate on the colonization rate of freshwater protozoan communities. *Am. Midl. Nat.*, 104: 93—101.
- [9] Cairns, J. Jr., 1985. Evaluating the options for water quality management. *Water Resour. Bull.*, 21(1): 1—6.
- [10] Cairns, J. Jr., Pratt, J. R. and Niederlehner, B. R., 1985. A provisional multispecies toxicity test using indigenous organisms. *J. Test. Eval.*, 13(4): 316—319.
- [11] Cairns, J. and Jr., 1986. Multispecies toxicity testing: A new information base for hazard evaluation. *Curr. Pract. Environ. Sci. Eng.*, 2: 37—49.
- [12] Cathey, D. D., Simmons, G. M., Jr., Parker, B. C. and Yongue, W. H. Jr., 1982. Protozoan colonization of artificial substrates in two Antarctic lakes. *Trans. Amer. Mic. Soc.*, 101(4): 353—367.
- [13] Henebry, M. S. and Cairns, J. Jr., 1980. Monitoring of stream pollution using protozoan communities on artificial substrates. *Trans. Am. Micro. Soc.*, 99(2): 151—160.
- [14] Niederlehner, B. R., Pratt, J. R., Buikema, A. L. Jr., and Cairns, J. Jr., 1985. Laboratory tests evaluating effects of cadmium on freshwater protozoan communities. *Environ. Toxicol. Chem.*, 4: 155—165.
- [15] Pratt, J. R., Cairns, J. Jr., and Stewart, P. M. 1985 Development of microbial communities in mined lands. in P. P. Brooks D. E. Samuel, and J. B. Hill, eds. *Wetlands and Water management of mined lands*, pp. 239—259.
- [16] Pratt, J. R., Cairns, J. Jr., and Meier, K., 1985. Migration of species during early colonization *Amer. Midl. Nat.*, 113(1): 91—101.
- [17] Shen, Y. F., Buikema, A. L. Jr., Yongue, W. H. Jr., Pratt, J. R. and Cairns, J. Jr., 1986. Use of protozoan communities to predict environmental effects of pollutants. *J. Protozool.* 32(2): 146—151.

## ON THE EVALUATION OF THE EFFECT OF PETROLEUM WASTES ON WATER SYSTEM IN YANSHAN REGION BY USING PROTOZOAN COMMUNITIES

Shen Yunfen, Gu Manru and Bei Qingsheng

(Institute of Hydrobiology, Academia Sinica, Wuhan)

### Abstract

The water system in the Yanshan region, Beijing, including Zhoukoudian River (St. 16, 18), Dongsha River (St. 7, 10, 12, 14), Dingjiawa River (St. 20, 23), Xisha River (St. 24, 25) and the middle reaches of Dashi River (St. 1, 3), was polluted by industrial wastewater and municipal sewage from the Yanshan Petrochemical Company (Fig. 1, Tab. 1, 2). The most harmful contaminants were oil, phenol, and strongly acid or alkaline effluents. The present study aims at an evaluation on the ecological effects of these pollutants based on the protozoan communities. From April to June of 1985, protozoan communities were collected from the

mentioned five rivers simultaneously with three methods: (1) slide method for periphytic protozoans, (2) PFU method for protozoan colonization, (3) classical method of planktonic settling. The upstream Dashi River (St. 1) was used as the control station for the assessment of water quality. 351 protozoan species (84 for Phytomastigophora, 34 for Zoomastigophora, 54 for Sarcodina, 179 for Ciliata) were found in the rivers. Compared with the result of the control station, the number of protozoan species in Zhoukoudian and Dongsha rivers decreased dramatically (Tab. 3). It was found that all of the three methods are effective for monitoring the deterioration of water quality in the upper reaches of the Zhoukoudian River (St. 16), where protozoans were practically wiped out due to the sharp and alternative change of acid and alkaline effluents (Tab. 4—7, Fig. 2). In Dongsha River, polluted by the petroleum refinery and municipal effluents, the results of slide method and PFU method both indicated a gradual selfpurification process. The species diversity index of this river increased gradually toward downstream reaches (St. 12, 14) where water quality became recovered and the attached ciliates (Peritrichida) were predominant in station 10 (Tab. 4). The slide method was incapable of evaluating the difference of pollution between Xisha River and Dingjiawa River. The PFU method has the ability of examining the structural and functional processes at community level, such as species diversity, cluster analysis of similarity coefficients (Fig. 4), and colonization (Fig. 2, 3, Tab. 5). Based on the structural and functional parameters, the PFU method could differentiate the nature of Xisha and Dingjiawa rivers. To compare the quality of the rivers, results indicate that the toxic stress increased in sequence as Dashi River→Dingjiawa River→Xisha River→Dongsha River→Zhoukoudian River. Because of receiving waste discharges from the other four rivers, the middle reaches of Dashi River (St. 3) exhibited eutrophic phenomena, such as the presence of heterotrophs and lower indices of species diversity, as compared with the producer-dominated and higher diversity indices in the upper reaches of that river (St. 1). Therefore, the potential pollution of Dashi River is threatening the North Juma River, one of the important water resources of Hebei Province. Pollution control of the water system in Yanshan region is becoming an urgent problem.

**Key words** Biological monitoring, PFU method, Colonization, Periphytic protozoans, Similarity coefficient