

活性污泥微型动物种群动态与水质净化效能的关系^{*}

陈声贵^① 许木启^{①**} 曹 宏^① 周可新^① 徐 军^① 杨向平^②
甘一萍^② 翟家骥^② 刘伟岩^② 邵永怡^②

(^① 中国科学院动物研究所, 北京 100080) (^② 北京城市排水公司, 北京 100022)

摘 要 2001~2002 年, 系统地研究了高碑店污水厂四系列曝气池活性污泥中的微型动物种群动态与水质变化的相互关系。在该污水处理系统的四系列曝气池内所发现的 122 种原生动物中, 褶皱枝虫 (*Epistylis plicatilis*)、沟钟虫 (*Vorticella convallaria*)、有肋纤虫 (*Aspidisca costata*) 和半圆表壳虫 (*Arcella hemisphaerica*) 是经常大量出现的原生动物种类。冬季褶皱枝虫占绝对优势。5 月和 6 月, 有肋纤虫为活性污泥动物群落的优势种群。纤毛虫和后口动物总数越多, 污水净化效能越强, 污泥的沉降性越好。游泳类纤毛虫总数与出水 BOD₅ 值呈正相关, 固着类纤毛虫的多样性值与出水的总氮呈正相关, 爬行类纤毛虫的多样性值与出水的硝态氮和出水总磷都呈正相关, 与厌氧段总磷呈负相关。研究结果表明, 微型动物种群动态规律与污水处理效果关系密切, 该厂污水处理系统中四系列的硝化和反硝化显著, 活性污泥的运转效能良好, 各种主要污染物得到有效净化 [动物学报 49 (6): 775~786, 2003]。

关键词 污水处理 活性污泥 原生动物 微型动物 水质

Relationship between the dynamics of mixed liquor fauna and the efficiency of wastewater purification

CHEN Sheng-Gui^① XU Mu-Qi^{①**} CAO Hong^① ZHOU Ke-Xin^① XU Jun^①
YANG Xiang-Ping^② GAN Yi-Ping^② ZHAI Jia-Ji^② LIU Wei-Yan^② SHAO Yong-Yi^②

(^① Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(^② Beijing Municipal Drainage Corporation, Beijing 100022, China)

Abstract In Series Four of Beijing Gaobeidian Wastewater Treatment Plant, the largest wastewater treatment plant in China with the treatment capacity of 1 000 000 tons of wastewater each day, 124 samples were taken during a period of one year and 122 species were identified. *Epistylis plicatilis* was the most frequently occurring protozoan species and usually appeared in large numbers. Rotifers occurred frequently and in moderate numbers. Other metazoa occurred on occasion and only in small numbers. The statistical analysis of Pearson Correlation was applied to the study of fauna and physico-chemical variables in the activated-sludge wastewater treatment plant. The diversity index showed negative association with the density of *Epistylis plicatilis* and *Aspidisca costata*. In winter, the diversity index was low since *Epistylis plicatilis* dominated the fauna structure. From May to June, the index was also low because high density of *Aspidisca costata*. The metazoa density showed strict positive association with fine sludge settlement. The swimming ciliate density showed positive association with effluent BOD₅ values. The fauna diversity index showed negative association with SS values, and showed strict positive association with nitrate values in the anaerobic part of the tank. The metazoa diversity index showed strict negative association with ammonia values in the effluent, and showed strict positive association with the total nitrogen values in the anaerobic part of the tank. The crawling ciliate diversity index showed strict positive association with nitrate values in the effluent, showed positive association with the total phosphorus values in the effluent, and

2003-04-20 收稿, 2003-08-15 修回
^{*} 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KSCX2-SW-102)、国家自然科学基金 (No. 30170159)、中国科学院知识创新工程领域前沿 (KSCX3-IOZ-02) 和院长择优支持基金资助 [This research was funded by the Key Innovation Program Projects of the Chinese Academy of Sciences (No. KSCX2-SW-102), the National Natural Science Foundation of China (No. 30170159), the National “863” Project (No. 2002AA601160) and the Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KSCX3-IOZ-02)]

^{**} 通讯作者 (Corresponding author). E-mail: xumq@panda.iaz.ac.cn
第一作者简介 陈声贵, 男, 26 岁, 硕士。研究方向: 环境生物学。

showed negative association with the total phosphorus values in the anaerobic part of the tank. The attacked ciliate diversity index showed strict positive association with the total nitrogen values in the effluent. [*Acta Zoologica Sinica* 49 (6): 775–786, 2003].

Key words Wastewater treatment, Activated sludge, Protozoa, Metazoa, Effluent quality

自从 1913 年英国人 Ardern 和 Lockett 在曼彻斯特建立了世界上第一座活性污泥试验工厂以来, 现在活性污泥法已经成为世界各国广泛采用的污水处理方法。在我国城市污水处理厂中, 采用此方法的占 85% 以上。活性污泥是由细菌、原生动物、后生动物、藻类等生物和氢氧化物组成的胶泥絮状结构物, 其中的原生动物在形态上和数量上是最引人注目的生物, 在废水处理系统中与细菌的关系密切, 具有特殊的功能作用, 这是因为原生动物是活性污泥系统中的最主要捕食者, 通过捕食活性污泥中的细菌, 防止其种群老化, 从而增强了污水净化效能。另一方面, 原生动物受活性污泥系统中的理化因子影响, 其种群动态客观地反映出曝气池这一半封闭系统的水质状况, 并对活性污泥的良性运转起着重要作用, 被广泛用作活性污泥形成过程或净化效果的指示生物, 因而不少学者进行了深入细致的研究 (Curds *et al.*, 1966, 1970a, b)。又由于原生动物具有种类多、分布广、生命周期短、取材方便等优点, 因此成为对活性污泥运转效能进行生物监测的首选类群 (Curds, 1976; Barker, 1988; Shahwani *et al.*, 1991; Esteban *et al.*, 1991; Salavado *et al.*, 1993; Fried *et al.*, 2000)。

通过周年的现场连续采样分析, 我们系统地研究了北京高碑店污水厂活性污泥微型动物种群动态与水质净化效能的关系, 为我国城市大型污水处理厂运转效能及水质变化趋势的预测预报提供生物监测的理论依据和研究方法。

1 材料与方法

1.1 研究对象概况

北京高碑店污水厂位于北京市东郊高碑店村, 包括两个分厂, 其一系列和二系列属于一分厂, 三系列和四系列属于二分厂。其污水系统的总流域面积为 97 km², 其中居住区 76 km², 工业区 11 km², 日处理能力分别为 100 万 m³, 是目前中国最大的污水处理厂。高碑店污水处理厂采用二级生物处理工艺, 一级处理通过曝气沉砂池和矩形平流初次沉淀池完成, 二级处理采用空气曝气形成活性污泥, 然后流入二次沉淀池沉淀。高碑店污水厂第四系列增加了内循环的脱氮工艺, 但一、二、三系列都没

有增强的脱氮功能。本实验以高碑店污水厂四系列作为重点研究对象。

1.2 采样

从 2001 年 2 月至 2002 年 3 月, 对四系列每周一、三、五各采样一次; 每天 09:00 定时从曝气池末端用采样勺取水样, 并同时测量水温。

1.3 物种鉴定及计数

样品迅速带回实验室, 摇匀后将部分水样倒入 100 ml 的量筒, 静置 30 min 后, 读出沉淀后的污泥体积, 即为沉降比 (SV%)。与此同时, 用吸管吸取摇匀后的活性污泥混合液, 在载玻片上均匀地滴上 5 滴, 加盖玻片, 于显微镜下观察计数。死亡个体不计, 对于累枝虫 (Epistylidae)、盖虫 (Operculariidae) 及聚缩虫 (Zoothamnidae) 等群体原生动物, 对群体内的每个个体分别计数。上述步骤重复 3 次, 即可统计出 1 ml 水样中每种微型生物的数量 (Zhang *et al.*, 1989)。鉴定时参照沈韞芬等 (1990)、Kudo (1966) 和 Patterson (1996) 等种类鉴定检索书和图谱。原生动物尽量鉴定到种, 后生动物仅统计每一类群的总数。

1.4 水质的理化分析

北京市城市排水集团水质化验室对各污水厂的总进水、初次沉淀池进水、出水、曝气池厌氧段和好氧段及二次沉淀池出水进行了逐日的水质理化分析。常规理化指标包括五日生物需氧量 (Biological Oxygen Demand, BOD₅, mg/L)、化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)、固体悬浮物 (Suspended Solid, SS, mg/L)、氨态氮 (N-NH₄⁺, mg/L)、硝态氮 (N-NO₃⁻, mg/L)、总氮 (Total Nitrogen, TN, mg/L) 和总磷 (Total Phosphorus, TP, mg/L) 等。测定方法依据 APHA (1985) 的方法。

1.5 数据分析

水质的数据处理方法采用 Statistica for Windows 5.0 版统计软件包, 涉及的方法包括相关分析、时间序列分析等。

2 结果

2.1 活性污泥微型动物种类组成和个体数量

通过对高碑店污水厂四系列曝气池中的动物进

行的周年研究,共发现各类微型动物 122 种,其中主要为原生动物种类(附表 1)。纤毛虫出现在所有水样中,其中包括全毛虫类(Holotrichs) 38 种,缘毛类(Peritrichs) 32 种,异毛类(Heterotrichs) 1 种,下毛类(Hypotrichs) 9 种,吸管虫类(Suctorians) 10 种。绝大多数水样中有肉足虫(Sarcodina),其中变形虫类(Amoebae) 7 种,有壳根足虫类(Testacea) 13 种。鞭毛虫类(Mastigophora) 共发现 12 种。褶累枝虫(*Epistylis plicatilis*)、沟钟虫(*Vorticella convallaria*)、有肋纤虫(*Aspidisca costata*)和半圆表壳虫(*Arceella hemisphaerica*)是经常大量出现的原生动物。轮虫(Rotifer)经常出现,但数量不多。线虫(Nematode)、腹毛虫(Gastrotrich)、熊虫(Tardigrades)和红斑虫(*Aeolosoma hemprichii*)偶尔出现,且数量稀少。褶累枝虫、熊虫、尾草履虫(*Paramecium caudatum*)和彩盖虫(*Opercularia phryganeae*)主要出现在冬天。球核甲变形虫(*Thecamoeba sphaeronucleolus*)、袋扉门虫(*Thuracicola folliculata*)、水虱伪独缩虫(*Pseudocarchesium aselli*)、腹毛虫和线虫主要出现在夏季。

在活性污泥系统中的所有动物种类中,褶累枝虫的周年平均密度最高,达 595 个/ml,2001 年 3 月 7 日记录到它的最高密度为 3 043 个/ml。沟钟虫为最常见的钟虫,它较耐污,当进水的 BOD₅ 和 COD 浓度较高时的,仍可大量存在,但对水中氧浓度敏感,活性污泥静置半小时后大多数虫体呈不活跃的收缩状态。沟钟虫在该厂中出现的适宜水温为 10℃左右。纤虫爬行在活性污泥表面,几个密度高峰均出现在水温波动剧烈的时段,对水温的变化表现出较高的耐受性。5 月底和 6 月中旬由降雨引起的温度的两次降低都对应着有肋纤虫的密度高峰。由于有肋纤虫可以爬行在活性污泥表面捕食细菌,当活性污泥在二沉池沉淀时,绝大部分有肋纤虫夹杂在活性污泥中并随之沉淀下来。由于有肋纤虫对缺氧不敏感,夹杂在回流污泥中的有肋纤虫仍可以存活下来,从而使有肋纤虫的密度在几天内就可以上升到每毫升数千个。

轮虫是活性污泥中最常见的后生动物,全年出现在活性污泥系统中。高碑店污水处理厂四系列记录到的轮虫有懒轮虫(*Rotatoria tardigrada*)、红眼旋轮虫(*Philodina erythrophthalma*)、粗壮猪吻轮虫(*Dicranophorus robustus*)、盘状鞍甲轮虫(*Lepadella patella*)和四角平甲轮虫(*Platytias*

quadricornis)等,其中懒轮虫最为常见。轮虫常与褶累枝虫、沟钟虫、袋扉门虫同时出现。

5~8 月是腹毛虫大量出现的时期,腹毛虫常常伴随着球核甲变形虫、螳状独缩虫和红斑体虫一起出现。红斑体虫 9 月至次年 1 月的密度最高,可达 48 个/ml。红斑体虫时常伴随着柱头虫、小毛板壳虫和锐利纤虫一同出现。北京高碑店污水处理厂四系列活性污泥系统中的线虫主要出现在 8 月和 9 月,最高密度为 28 个/ml。

2.2 微型动物多样性变化和种群动态与水质净化的关系

根据活性污泥系统中各种微型生物的生态类群,计算出活性污泥中的固着类纤毛虫、游泳类纤毛虫、爬行类纤毛虫、后生动物、肉足虫、鞭毛虫、纤毛虫及总动物数量,并把上述各类群动物的数量与水质的各种理化参数进行 Pearson 相关分析(表 1)。

在活性污泥中,固着类纤毛虫中的缘毛目纤毛虫是组成活性污泥动物群落的主要类群(表 1),它主要包括褶累枝虫、沟钟虫、水虱伪独缩虫和圆筒盖虫等。缘毛目纤毛虫的密度与水温的变化关系密切,冬季的密度最大,夏季的密度最小。游泳类纤毛虫的出现的主要种类为卑怯管叶虫、肋状裂口虫、钝漫游虫和单核斜叶虫等,其个体丰度与出水的 BOD₅ 浓度呈正显著相关。在曝气池中出现的爬行类纤毛虫包括肋纤虫、凹缝纤虫和钩刺斜管虫等。爬行类纤毛虫的种类数和丰度的变化对活性污泥的硝化功能的指示作用非常明显(表 1)。肉足虫的优势种群是半圆表壳虫和球核甲变形虫等,其种类数和丰度与出水的总磷呈正相关。出现的鞭毛虫主要有葡萄异鞭虫、三角袋鞭虫等。鞭毛虫与纤毛虫总数和活性污泥动物总数都呈负相关。

四系列活性污泥系统中的动物数量一年内出现三次较大的波动,分别发生在冬、春、秋三季(图 1)。动物总数夏季最低,冬季最高。

缘毛目纤毛虫数量在一年内形成数个高峰(图 2),它们在秋冬两季都占绝对优势。其中累枝虫、钟虫和盖虫是缘毛目纤毛虫的优势种类。相关分析显示缘毛目纤毛虫的密度和游离细菌密度呈显著负相关($r=-0.489$, $P<0.01$)(图 3)。

为了进一步反映活性污泥动物群落结构与污水厂的运行效能间的关系,计算出各种类群的动物的多样性的辛普森(Simpson)值,并将它们与各种水质参数进行相关分析(表 2)。

从表 2 可以看出,后生动物的多样性值与曝气



表 1 各动物类群总数与出水理化参数间的 Pearson 相关分析

Table 1 The Pearson correlation coefficients among total number of some fauna taxa and effluent physico-chemical variables

类群名称 Name of group	后生动物 Metazoa	固着类 Sessile	游泳类 Swimming	爬行类 Creeping	肉足虫 Sarcodine	鞭毛虫 Flagellate	纤毛虫 Ciliate	动物总数 Total number of animals
后生动物 (Metazoa)	1.000	0.464 *	0.243 *	0.165	-0.068	-0.198 *	0.394 *	0.445 *
固着类 (Sessile)		1.000	0.133 *	-0.216 *	-0.190 *	-0.320 *	0.897 *	0.909 *
游泳类 (Swimming)			1.000	-0.123	-0.098	-0.029	0.091	0.109
爬行类 (Creeping)				1.000	0.106	-0.017	0.225 *	0.203 *
肉足虫 (Sarcodine)					1.000	-0.047	-0.047	-0.101
鞭毛虫 (Flagellate)						1.000	-0.310 *	-0.311 *
纤毛虫 (Ciliate)							1.000	0.997 *
动物总数 (Total number of fauna)	0.445 *	0.909 *	0.109	0.203 *	-0.101	-0.311 *	0.997 *	1.000
生物耗氧量 (BOD)	-0.013	0.046	0.380 *	-0.006	0.091	0.103	0.060	0.055
固体悬浮物 (SS)	0.046	0.204	0.058	-0.052	-0.071	-0.049	0.094	0.102
氨态氮 ($N-NH_4^+$)	0.204	0.137	-0.001	0.191	0.113	0.071	0.279 *	0.285 *
氨态氮 1 ($N_1-NH_4^+$)	0.213	0.127	-0.037	0.223	-0.019	-0.167	0.274	0.292 *
硝态氮 ($N-NO_3^-$)	0.038	0.101	0.120	-0.408 *	-0.190	0.046	-0.299 *	-0.286 *
硝态氮 1 ($N_1-NO_3^-$)	0.028	0.077	-0.151	-0.381 *	-0.001	0.002	-0.278 *	-0.280 *
总氮 (TN)	0.025	0.078	0.088	-0.340 *	-0.029	-0.244 *	-0.251 *	-0.256 *
总氮 1 (TN1)	-0.150	-0.302 *	-0.027	0.031	-0.022	-0.021	-0.202	-0.216
总磷 (TP)	0.214	0.103	0.251 *	-0.250 *	0.319 *	-0.048	-0.088	-0.106
总磷 1 (TP1)	-0.040	-0.098	0.131	0.516 *	0.092	-0.136	0.386 *	0.382 *
污泥体积 (SV%)	-0.425 *	-0.154	-0.001	0.256 *	-0.145	-0.071	0.082	0.067
温度 (Temperature)	0.086	-0.528 *	-0.114	0.081	0.042	0.225	-0.305 *	-0.309 *

样本数 (Sample size) = 70 *: $P < 0.05$

TNF: 动物总数 (Total number of fauna) BOD: 生物耗氧量 (Biological oxygen demand) SS: 固体悬浮物 (Solid suspension) TN: 总氮 (Total nitrogen) TN1: 总氮 1 (厌氧池) (Total nitrogen in the anaerobic pond) TP: 总磷 (Total phosphorus) TP1: 总磷 1 (厌氧池) (Total phosphorus in the anaerobic pond) SV%: 污泥体积 (Sewage volume%)

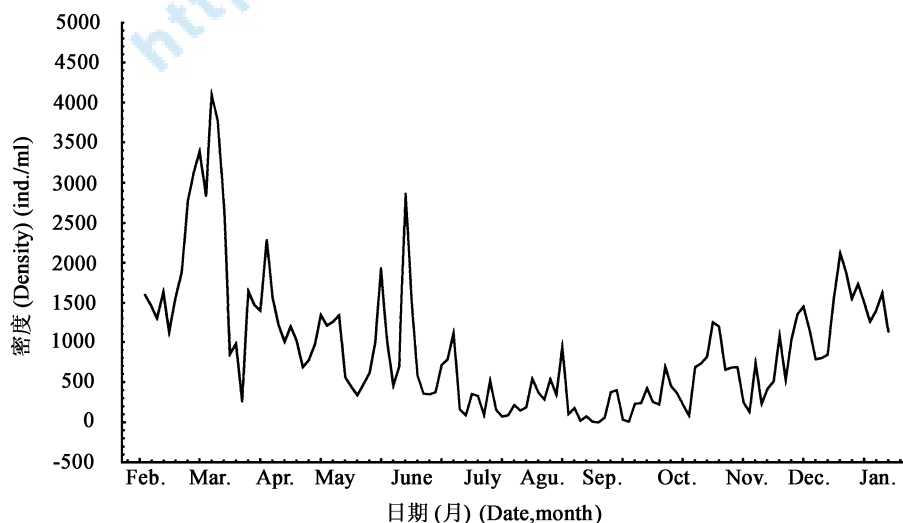


图 1 北京高碑店污水处理厂四系列活性污泥中微型动物个体物数量的周年变化

Fig. 1 The annual variations of microbiota density in Plant G4 of Beijing Gaobeidian Sewage Treatment Plant

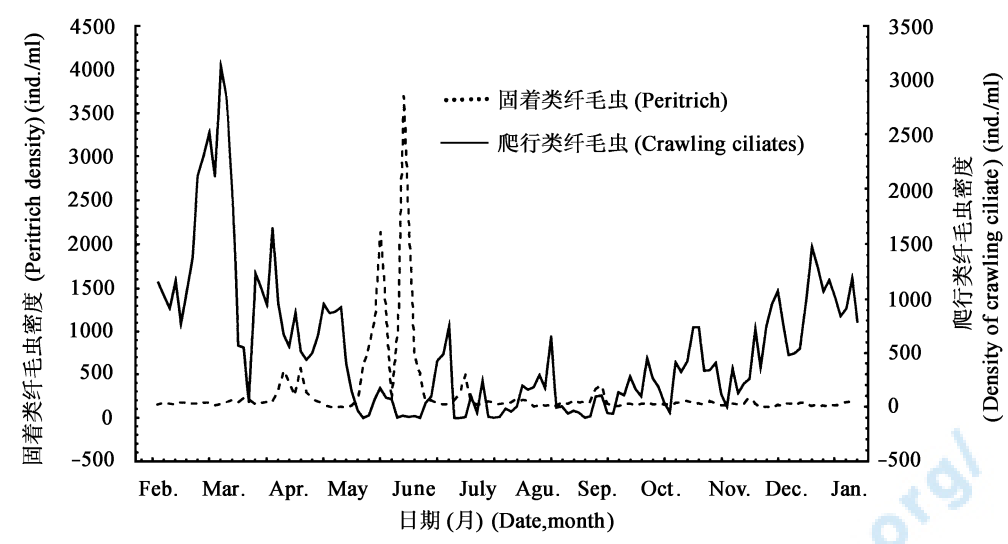


图 2 固着类和爬行类纤毛虫密度的周年变化

Fig. 2 The annual variations of density of the attached and crawling ciliates in Plant G4 of Beijing Gaobeidian Sewage Treatment Plant

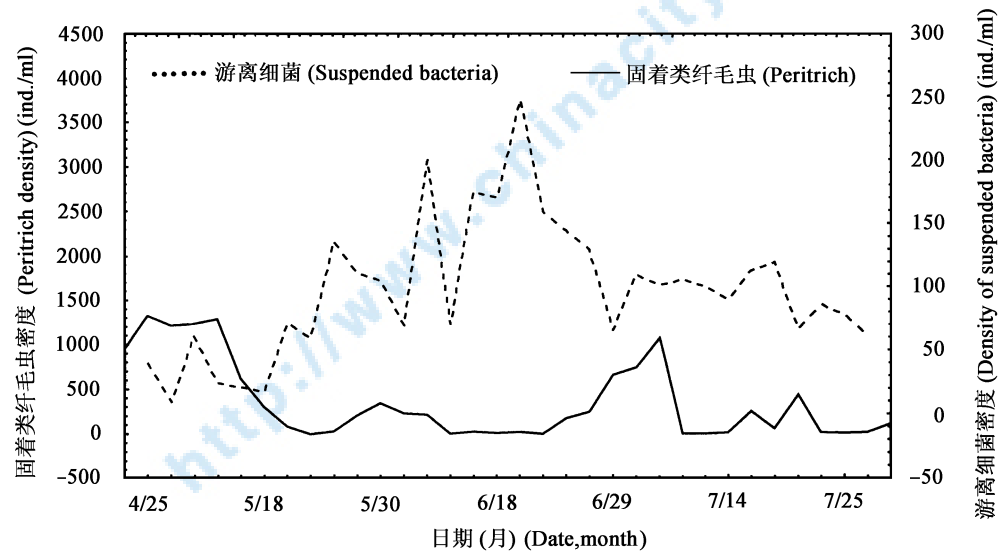


图 3 游离细菌的相对密度和固着类纤毛虫密度变化

Fig. 3 The variations of the relative density of suspended bacteria and the density of attached ciliates

池厌氧段和出水的氨氮都呈负相关，与曝气池厌氧段和出水的硝态氮都呈正相关，与厌氧段和出水的总氮也呈正相关。固着类纤毛虫的多样性值与出水的氨氮呈负相关，与厌氧段的硝态氮、出水的硝态氮、出水的总氮都呈正相关。游泳类纤毛虫的多样性值与污泥的沉降性呈负相关。爬行类纤毛虫的多样性值与厌氧段的氨氮和出水的氨氮都呈负相关，与厌氧段和出水的硝态氮都呈正相关，与厌氧段的总磷呈显著正相关。纤毛虫的多样性与厌氧段的硝

态氮呈正相关，与厌氧段的总磷呈负相关。肉足虫与水温显著正相关。鞭毛虫的多样性与厌氧段和出水的氨氮都呈正相关，与厌氧段和出水的硝态氮都呈负相关。活性污泥动物多样性指数值与厌氧段和出水的氨氮都呈负相关，与厌氧段和出水的硝态氮呈正相关，与出水的总氮呈正相关，与厌氧段的总磷负相关，与水温正相关。

在高碑店污水厂四系列活性污泥系统中，在 2001 年 2 月至 4 月和 2001 年 12 月至 2002 年 1 月



表2 各类群动物的辛普森多样性指数值与水质的各种理化参数间的皮尔逊相关分析

Table 2 The Pearson correlation coefficients between Simpson diversity index and effluent physico-chemical variables

类群名称 Name of groups	后生动物 Metazoa	固着纤毛虫 Sessile	游泳纤毛虫 Swimming	爬行纤毛虫 Creeping	纤毛虫 Ciliate	肉足虫 Sarcodine	鞭毛虫 Flagellate	活性污泥动物 Fauna
后生动物 (Metazoa)	1.000	0.218 *	-0.346 *	0.084	0.310 *	0.148	0.120	0.366 *
固着纤毛虫 (Sessile)		1.000	0.005	0.242 *	0.404 **	0.206 *	-0.020	0.629 *
游泳纤毛虫 (Swimming)			1.000	0.029	-0.164	-0.165	-0.180 *	-0.09
爬行纤毛虫 (Creeping)				1.000	0.375 **	0.210 *	-0.053	0.404 *
纤毛虫 (Ciliate)					1.000	0.390 *	0.278 *	0.681 *
肉足虫 (Sarcodine)						1.000	0.123	0.289 *
鞭毛虫 (Flagellate)							1.000	0.179 *
生物耗氧量 (BOD)	-0.079	-0.283 *	0.057	-0.038	-0.106	-0.141	0.214	-0.050
固体悬浮物 (SS)	0.083	-0.160	-0.052	0.025	-0.109	-0.087	-0.143	-0.239 *
氨态氮 (N-NH ₄ ⁺)	-0.461 *	-0.347 *	0.002	-0.399 *	-0.246	0.042	0.357 *	-0.0339 *
氨态氮 I (N _I -NH ₄ ⁺)	-0.422 *	-0.230	0.094	-0.273 *	-0.195	0.013	0.321 *	-0.350 *
硝态氮 (N-NO ₃ ⁻)	0.316 *	0.386 *	0.119	0.518 *	0.224	-0.102	-0.339 *	0.429 *
硝态氮 I (N _I -NO ₃ ⁻)	0.327 *	0.386 *	-0.086	0.367 *	0.332 *	0.114	-0.271 *	0.445 *
总氮 (TN)	0.288 *	0.404 *	-0.078	0.223	0.220	-0.124	-0.177	0.385 *
总氮 I (TN _I)	0.305 *	-0.017	-0.239	-0.131	-0.003	0.212	0.064	0.062
总磷 (TP)	-0.097	-0.035	0.059	0.272 *	0.106	-0.215	0.025	0.234 *
总磷 I (TP _I)	-0.171	-0.050	0.087	-0.539 *	-0.284 *	-0.127	0.305 *	-0.307 *
污泥体积比 (SV%)	0.172	-0.050	-0.286 *	-0.115	-0.075	0.028	0.086	-0.114
温度 (Temperature)	-0.018	-0.023	-0.093	-0.136	0.199	0.693 *	0.043	0.262 *

样本数 (Sample size) = 70 * $P_2 < 0.05$ 缩写字母含义同表1 (The abbreviative letters have the same meaning as those in the Table 1)

两个时段内, 由于褶皱枝虫占绝对优势, 动物多样性的辛普森指数值与褶皱枝虫数表现出了显著负相关 ($r = -0.663$, $P < 0.001$), 这两个时段多样性低, 优势度高 (图4)。5月和6月, 凹缝纤毛虫对氨氮的适应性强而迅速增殖, 一度成为活性污泥动物群落的优势种类, 因而它与动物多样性指数呈现出显著负相关 ($r = -0.296$, $P < 0.001$)。水温的剧烈波动导致活性污泥细菌的大量死亡, 原有的多数动物种类无法耐受氨氮的浓度上升而死亡, 7月至11月没有明显的优势种, 优势度低, 动物多样性高, 动物多样性与纵长板壳虫呈显著正相关 ($r = 0.405$, $P < 0.001$), 这与纵长板壳虫主要出现在夏季的事实相符。夏季, 由于水温高, 生物的生长繁殖速度快, 若活性污泥在曝气池中停留相同时间, 活性污泥细菌的实际污泥龄夏季要比冬季高。又由于夏季水温波动不大, 活性污泥运行稳定, 动物群落得以演替到较高的等级, 具体表现为线虫、柱头虫、瓢体虫的数量在夏季显著增加。总之, 活性污泥中微型动物群落多样性的变化和种群动态规

律较客观地反映了污水处理系统水质的净化效能和变化趋势。

3 讨论

在城市污水处理净化过程中, 有几种生物处理方法, 其中使用最普遍的是活性污泥法。由于原生动物与细菌之间存在相互依赖的功能关系, 如果直接观察原生动物的种类组成和生长状态, 就能直接或间接地评价废水处理效果, 起到了指示生物的作用。不少学者试图用原生动物作为活性污泥性能或出水质量的指示生物 (Salavado *et al.*, 1993; Curds *et al.*, 1970a; Shahwani *et al.*, 1991)。他们提出活性污泥中的原生动物群落结构同净化状态的关系如下: 1) 不良条件下的群落中, 鞭毛虫、变形虫的数量多于纤毛虫的数量; 2) 不稳定时群落由鞭毛虫类、根足虫类组成; 3) 稳定时的群落包括鞭毛虫类、根足虫类、自由生活的纤毛虫类、缘毛虫类; 4) 在净化状态良好时的群落中, 缘毛虫类数量大于鞭毛虫类和根足虫类。根据以上原生

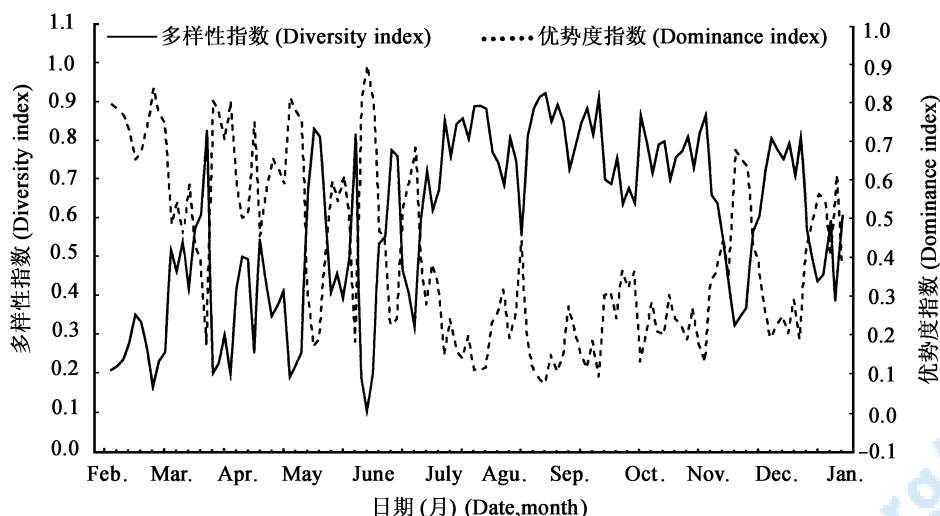


图 4 北京高碑店污水处理厂四系列活性污泥微型动物多样性和优势度的周年变化

Fig. 4 Annual variations of microbiota diversity and dominance in Plant G4 of Beijing Gaobeidian Sewage Treatment Plant

动物群落结构特征就能判断活性污泥所处的状态。Curds *et al.* (1970b)、Curds (1988) 根据活性污泥中原生动物和活性污泥净化状况的关系, 总结出了非活性污泥性、中间性、活性污泥性三类纤毛虫。非活性污泥性为游泳性纤毛虫如豆形虫属、草履虫和右发虫属等; 中间性活性污泥的纤毛虫类为游泳性和匍匐性纤毛虫, 如漫游虫属、斜管虫属、尖毛虫属等; 活性污泥纤毛虫类为着生和匍匐性纤毛虫, 如钟虫、累枝虫属、纤虫属、旋毛虫属等。指出了活性污泥的净化效率同独缩虫、钟虫和累枝虫的相关性。Reynoldson (1942) 研究了钟虫个体数量与处理水质的关系, 根据钟虫的个体丰度可以用统计学方法表示出处理水 COD、BOD 的实际值。Esteban *et al.* (1991) 根据活性污泥纤毛虫的体积比提出了净化指标。Curds *et al.* (1970a, 1970b, 1971) 调查了全英国 93 个污水处理厂的原生动物, 共记录了 79 种纤毛虫, 其中在活性污泥中出现频率最大, 数量也较多的指示种类依次排列为有肋纤虫、沟钟虫、小口钟虫、白钟虫、法帽钟虫、螳状独缩虫、节盖虫、多污游仆虫等。Schofield (1971) 在英国 Leicester 城市的一个处理生活污水与工业废水的活性污泥中进行了一年的连续观察, 提出了 6 种固有原生动物种类, 它们分别为沟钟虫、小口钟虫、累枝虫、有肋纤虫、半眉虫和螺足虫。这 6 种全年出现率均在 95% 以上。关于活性污泥中的原生动物, 有的学者考虑以各种作为指示生物去衡量净化能力和水质; 有的考虑根

据群落状态去衡量净化效果。Holubar *et al.* (2000) 对各种活性污泥中的原生动物作了实际调查并得出结论, 根据出现的频率、在群落中的优势程度或分布等方面, 纤毛虫类缘毛目原生动物能够确切地指示活性污泥的净化能力或水质状况并且及时预报污水处理厂运转条件是否适宜, 以便做出相应调整。

比较北京高碑店污水处理厂微型动物的各类群总数和多样性指数对水质的指示效果, 得出原生动物的纤毛虫和后生动物总数对污泥的沉降性指示效果较好, 纤毛虫和后生动物越多, 污泥的沉降性越好。游泳类纤毛虫总数对出水 BOD₅ 的指示效果最好, 动物多样性值对固体悬浮物的指示效果较优。后生动物的多样性指数值对厌氧段的氨氮和出水的氨氮都有较好的指示作用。爬行类纤毛虫的多样性值对出水的硝态氮指示效果最强。动物多样性值对厌氧段的硝态氮指示效果较好。固着类纤毛虫的多样性值与出水的总氮呈正相关。后生动物的多样性值能较好地指示出厌氧段的总氮的变化。爬行类纤毛虫的多样性值对污水处理厂中的总磷和总氮的变化具有较强的指示作用。水温的变化对活性污泥的运转效果和出水质量有着密切关系。夏季, 由于水温较高, 生物的生长繁殖速度快, 若活性污泥在曝气池中的停留相同时间, 活性污泥细菌的实际污泥龄夏季要比冬季高。又由于夏季水温波动不大, 活性污泥运行稳定, 动物群落得以演替到较高的等级, 具体表现为纤毛虫、线虫、柱头虫、瓢体虫的

数量在夏季显著增加。活性污泥的稳定运行使污水中的主要污染物的净化作用得以顺利进行,从而降低了出水中氮、磷、化学耗氧量和生物耗氧量的浓度,改善了出水水质。有关污水处理厂活性污泥中后生动物的群落结构变化与污水处理效能相互关系的研究,国外的工作很少,国内无文献报道。北京高碑店污水处理厂活性污泥中原生动物群落结构特征对该污水处理系统的运转效能和水质的变化趋势的指示作用和预测预报效果与国外的相关研究结果基本一致。

从以上研究的结果可以看出,污水厂活性污泥中出现频次高且数量较多的微型动物种类的变化是有一定规律的。如果不常见的种类突然发生密度急剧上升现象,就应该及时检查运行或者进水水质是否出现问题。从理论上讲,在进水水质、污水处理工艺和运行参数值固定的情况下,每个污水处理系统对应着一种生物群落结构,这种结构对污水的处理效果最好。通过广泛地观察和分析微型生物群落和出水水质,可以找出这种群落结构。污水处理厂的目标之一就是调整各种运行参数值,保持这种生物群落结构的优势状态,从而获得最佳的出水水质。因此,镜检活性污泥系统中的原生动物和后生动物是监测污水处理厂运行状况的一种简易快速的方法和手段。另外,污水处理厂的活性污泥中原生动物种类组成和数量丰度时常也处于变动状态。污水的流速、成分和浓度有时在一天内都有很大的变化,不可能像反应器那样处在一个稳定的状态。因此需要建立活性污泥和生物滤池中生物与非生物、生物与非生物因子之间的相互作用的数学模型,再纳入到计算机中,以便随时对各废水处理厂进行及时的质量预报,这是科学管理废水生物处理的途径,这方面还有许多工作需要进行更加深入的探索。

参考文献 (References)

APHA 1985 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, D. C.: American Public Health Association.

Barker A. N. 1988 The ecology and function of protozoa in sewage purification. *Ann. Appl. Biol.* **33**: 314~325.

Curds C. R. and J. M. Vandyke 1966 The feeding habits and growth rates of some free-water ciliates found in activated-sludge

plants. *J. Appl. Ecol.* **3**: 127~137.

Curds C. R. and A. Cockburn 1970a Protozoa in biological sewage treatment process-I—a survey of the protozoan fauna of British percolating filters and activated sludge plants. *Water Research* **4**: 225~236.

Curds C. R. and A. Cockburn 1970b Protozoa in biological sewage treatment process II: protozoa as indicators in the activated sludge process. *Water Research* **4**: 237~249.

Curds C. R. 1976 The feeding habits and growth rates of some freshwater ciliates found in activated sludge plants. *J. Appl. Ecol.* **3**: 127~137.

Curds C. R. 1988 Protozoa in biological sewage treatment processes. *Water Research* **14** (3): 225~236.

Curds C. R. 1971 A computer stimulation of microbial population dynamics in the activated-sludge process. *Water Research* **5**: 1 049~1 065.

Esteban, G., C. Tellez and L. M. Bautista 1991 Dynamics of ciliated protozoa communities in activated-sludge process. *Water Research* **25**: 967~972.

Fried, M. G. and H. Berger 2000 Monitoring protozoa and metazoa biofilm communities for assessing wastewater quality impact and reactor up-scaling effect. *Wat. Sci. Tech.* **41**: 309~316.

Holubar, P. and T. Grudke 2000 Effects of ciliated protozoa on degradation efficiency of a petrochemical activated sludge process. *Water Research* **34** (7): 2 051~2 060.

Kudo, R. R. 1966 Protozoology. Springfield: Charles C. Thomas Publisher.

Patterson, D. J. 1996 Free-living Freshwater Protozoa. London: Manson Publishing Ltd.

Reynoldson, T. B. 1942 Vorticella as an indicator organism for activated sludge. *Nature* **149**: 608~609.

Salavado, H. and M. P. Gracia 1993 Determination of organic loading rate of activated sludge plants based on protozoan analysis. *Water Research* **27**: 891~895.

Schofield, T. 1971 Some biological aspects of Leicester. *Wat. Pollut. Contr.* **70**: 32~47.

Shahwani, S. M. and N. J. Horan 1991 The use of protozoa to indicate changes in the performance of activated sludge plants. *Water Research* **25** (6): 633~638.

Shen Y. F. and Z. S. Zhang 1990 Modern Biomonitoring Techniques Using Freshwater Microbiota. Beijing: China Architecture & Building Press. [沈韞芬, 章宗涉 1990 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社.]

Zhang, Z. S. and X. F. Huang 1989 Research Methods for Freshwater Plankton. Beijing: China Science Press. 336~338. [章宗涉, 黄祥飞 1989 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社. 336~338.]



附表 1 高碑店污水处理厂活性污泥系统中微型动物种类组成和密度 (个/毫升)

Appendix 1 The composition of protozoan species in the activated sludge and density (ind./ml)

种类 Taxa	出现频次 Frequency in sampling	最大密度 Density	124 个水样的密度总和 Total number of 124 samples
纤毛虫 (Ciliates)			
细颈颈毛虫 (<i>Trachelocerca tenuicollis</i>)	2	6	8
柱纤口虫 (<i>Chaenea teres</i>)	3	12	20
长蓝环虫 (<i>Cyrtolophosis elongata</i>)	1	2	2
肾状肾形虫 (<i>Colpoda reniformis</i>)	2	2	4
卑怯管叶虫 (<i>Trachelophyllum pusillum</i>)	52	42	372
鼻斜毛虫 (<i>Plagiopyla nasuta</i>)	3	4	10
楔形双膜虫 (<i>Dichilum cuneiforme</i>)	2	4	6
梨形四膜虫 (<i>Tetrahymena pyriformis</i>)	1	2	2
弯豆形虫 (<i>Colpidium campylum</i>)	2	2	4
肋状半眉虫 (<i>Hemiophrys pleurosigma</i>)	50	34	437
纺锤半眉虫 (<i>Hemiophrys fusidens</i>)	9	3	17
栉状半眉虫 (<i>Hemiophrys pectinata</i>)	4	6	18
猎半眉虫 (<i>Hemiophrys meleagris</i>)	5	2	7
直半眉虫 (<i>Hemiophrys proæra</i>)	1	1	1
敏捷半眉虫 (<i>Hemiophrys agilis</i>)	5	12	28
点滴半眉虫 (<i>Hemiophrys punctata</i>)	1	2	2
单核斜叶虫 (<i>Loxophyllum uninucleatum</i>)	20	10	83
片状漫游虫 (<i>Litonotus fasciola</i>)	4	20	30
钝漫游虫 (<i>Litonotus obtusus</i>)	36	30	267
龙骨漫游虫 (<i>Litonotus carinatus</i>)	29	64	237
薄片漫游虫 (<i>Litonotus lamella</i>)	3	6	10
双小核草履虫 (<i>Paramecium aurelia</i>)	4	2	8
尾核草履虫 (<i>Paramecium caudatum</i>)	20	12	84
沟刺斜管虫 (<i>Chilodonella uncinata</i>)	25	16	102
非游斜管虫 (<i>Chilodonella applanata</i>)	15	14	64
食藻斜管虫 (<i>Chilodonella algivora</i>)	1	6	6
帽斜管虫 (<i>Chilodonella capucina</i>)	2	4	6
多变斜板虫 (<i>Plagioampa mutabilis</i>)	10	36	54
黑斜板虫 (<i>Plagioampa atra</i>)	1	4	4
大口瞬目虫 (<i>Glaucoma macrostoma</i>)	5	8	20
闪瞬目虫 (<i>Glaucoma scintillans</i>)	3	16	36
凹扁前口虫 (<i>Frontonia depressa</i>)	2	10	16
克氏裂口虫 (<i>Amphileptus clapedei</i>)	14	10	49
高山长颈虫 (<i>Dileptus alpinus</i>)	1	8	8
小毛板壳虫 (<i>Coleps hirtus minor</i>)	44	34	491
纵长板壳虫 (<i>Coleps elongatus</i>)	90	52	951
毛板壳虫 (<i>Coleps hirtus</i>)	68	30	494



续附表 (Continued)

种类 Taxa	出现频次 Frequency in sampling	最大密度 Density	124 个水样的密度总和 Total number of 124 samples
双刺板壳虫 (Coleps bicuspis)	7	32	98
沟钟虫 (Vorticella convallaria)	53	700	5 017
点钟虫 (Vorticella picta)	12	16	91
似钟虫 (Vorticella similis)	2	1	2
钟形钟虫 (Vorticella campanula)	1	4	4
杯钟虫 (Vorticella cupifera)	3	2	4
领钟虫 (Vorticella aequilata)	4	8	13
扩张钟虫 (Vorticella extensa)	1	2	2
污钟虫 (Vorticella putrina)	14	12	50
条纹钟虫 (Vorticella striata)	43	18	242
小口钟虫 (Vorticella microstoma)	36	32	240
八钟虫 (Vorticella octava)	6	6	16
长钟虫 (Vorticella elongata)	2	2	4
弯钟虫 (Vorticella hamata)	12	187	397
白钟虫 (Vorticella alba)	1	2	2
法帽钟虫 (Vorticella fromenteli)	1	2	2
念珠伪钟虫 (Pseudovorticella monilata)	1	1	1
螳状独缩虫 (Carchesium polypinum)	29	108	803
水虱伪独缩虫 (Pseudocarchesium aselli)	47	274	3 098
水虱伪间隙虫 (Intranstylum asellicola)	2	12	14
褶累枝虫 (Epistylis plicatilis)	93	3 043	73 839
瓶累枝虫 (Epistylis urceolata)	21	870	3 025
湖累枝虫 (Epistylis lacustris)	61	694	6 390
微盘盖虫 (Opercularia microdiscum)	13	268	434
彩盖虫 (Opercularia phryganeae)	21	318	1 635
圆筒盖虫 (Opercularia cylindrata)	22	120	570
长盖虫 (Opercularia elongata)	1	12	12
春盖果虫 (Propyxidium vernale)	1	2	2
曲柄盖虫 (Opercularia curvicaule)	3	20	36
长圆靴纤虫 (Cothurnia oblonga)	25	26	210
袋扉门虫 (Thuricola folliculata)	35	85	771
华丽单柄虫 (Haplocaulus elegans)	1	2	2
金鱼藻鞘居虫 (Vaginicola crystallina)	1	1	1
天蓝喇叭虫 (Stentor coeruleus)	3	2	6
膜状急纤虫 (Tachysoma pellionella)	12	16	76
齿 纤虫 (Aspidisca dentate)	1	2	2
锐利 纤虫 (Aspidisca lynæus)	26	356	3 501
凹缝 纤虫 (Aspidisca sulcata)	23	74	342

续附表（Continued）

种类 Taxa	出现频次 Frequency in sampling	最大密度 Density	124 个水样的密度总和 Total number of 124 samples
有肋 纤虫 (<i>Aspidisca costata</i>)	53	2 854	11 330
盘状游仆虫 (<i>Euplotes patella</i>)	26	16	144
阔口游仆虫 (<i>Euplotes eury stomus</i>)	3	2	6
粘游仆虫 (<i>Euplotes muscicola</i>)	17	8	55
近亲游仆虫 (<i>Euplotes affinis</i>)	7	22	54
四分锤吸管虫 (<i>Tokophrya quadripartite</i>)	10	14	47
浮萍锤吸管虫 (<i>Tokophrya lem narum</i>)	10	9	36
结节壳吸管虫 (<i>Acineta tuberosæ</i>)	6	26	52
单叉吸管虫 (<i>Tokophrya cyclopum</i>)	31	8	101
三叉吸管虫 (<i>Discophrya elongata</i>)	3	2	5
多叉吸管虫 (<i>Multifasciculatum elegans</i>)	3	5	10
固着足吸管虫 (<i>Podophrya fixa</i>)	6	2	12
太阳球吸管虫 (<i>Sphaerophrya soliformis</i>)	1	2	2
吸管虫 sp (<i>Tokophrya</i> sp.)	5	14	30
针棘刺胞虫 (<i>Acanthocystis aculeata</i>)	1	2	2
后湖马氏虫 (<i>Mayorella hohuensis</i>)	34	14	148
柏马氏虫 (<i>Mayorella cypressa</i>)	7	8	24
近蛞蝓卡变虫 (<i>Cashia limacoides</i>)	5	8	18
珊瑚囊变形虫 (<i>Saccamoeba gongornia</i>)	3	8	10
双角马氏虫 (<i>Mayorella bicornifrons</i>)	4	8	14
双核匀变虫 (<i>Sappinia diploidea</i>)	2	12	14
球核甲变形虫 (<i>Thecamoeba sphaeronucleolus</i>)	69	68	1008
奇怪蒲变虫 (<i>Vannella miroides</i>)	1	2	2
平足蒲变虫 (<i>Vannella platypodia</i>)	1	12	12
条纹条变形虫 (<i>Striamoeba striata</i>)	4	74	88
太阳晶盘虫 (<i>Hyalodiscus actinophorus</i>)	2	2	4
奇观盖氏虫 (<i>Glaeseria mira</i>)	2	2	4
剑桥哈氏虫 (<i>Hartmanella cantabrigiensis</i>)	4	10	24
透明螺足虫 (<i>Cochliopodium bilimbosum</i>)	1	2	2
结节鳞壳虫 (<i>Euglypha tuberculata</i>)	90	38	895
有棘鳞壳虫 (<i>Euglypha acanthophora</i>)	5	12	34
叉口砂壳虫 (<i>Diffflugia gramen</i>)	1	1	1
球形沙壳虫 (<i>Quadrullella globulosa</i>)	1	4	4
半圆表壳虫 (<i>Arcella hemisphaerica</i>)	120	194	4 559
弯凸表壳虫 (<i>Arcella gibbosa mitriformis</i>)	2	6	7
鞭毛虫 (<i>Metastigophora</i>)			
右旋异鞭虫 (<i>Anisonema dextotaxum</i>)	3	32	50

续附表（Continued）

种类 Taxa	出现频次 Frequency in sampling	最大密度 Density	124 个水样的密度总和 Total number of 124 samples
葡萄异鞭虫（ <i>Anisonema acinus</i> ）	30	186	490
广卵异鞭虫（ <i>Anisonema prosgobium</i> ）	1	2	2
三角袋鞭虫（ <i>Peranema trichophorum</i> ）	75	58	790
内卷沟滴虫（ <i>Petalomonas involuta</i> ）	4	10	14
聚屋滴虫（ <i>Oikomonas socialis</i> ）	2	1	2
气球屋滴虫（ <i>Oikomonas termo</i> ）	1	2	2
滴虫 sp.（ <i>Monas</i> sp.）	6	4	10
帕许壶行虫（ <i>Urceolus pasccheri</i> ）	1	1	1
球形波豆虫（ <i>Bodo globosus</i> ）	3	14	18
波豆虫 sp.（ <i>Bodo</i> sp.）	1	1	1
丛叠领鞭虫（ <i>Polyoeca dumosa</i> ）	2	1	2
后生动物（Metazoa）			
轮虫（ <i>Rotifers</i> ）	122	216	8 823
线虫（ <i>Nematodes</i> ）	37	28	225
腹毛虫 sp.（ <i>Gastrotrichs</i> sp.）	68	40	549
水熊（ <i>Tardigrades</i> ）	41	24	253
红斑 体虫（ <i>Aeolosoma hemprichii</i> ）	47	48	310