

# 原生动物群落多样性变化与汉沽稳定塘水质净化效能相互关系的研究

许木启<sup>1</sup>, 曹 宏<sup>1</sup> 王玉龙<sup>2</sup>

(1. 中国科学院动物研究所, 北京 100080; 2. 天津汉沽环境保护监测站, 天津 300480)

**摘要:** 天津汉沽生物稳定塘是近年建成并投入运行的多级污水净化系统和示范工程。论文报道了汉沽稳定塘各塘主要污染物的去除效果, 重点论述了原生动物群落多样性变化及其结构和功能特征与水质净化的相互关系。研究表明, 5 个采样站原生动物群落结构与功能参数的变化与各级塘中污染物的浓度关系密切。进水口(1 号站)由于各种污染物含量很高, 原生动物种类数、个体数量、多样性指数  $d$  值和 PFU 原生动物的群集速度(功能参数)都为零。随流程延长, 水质逐塘得以改善, 生物逐渐恢复。至出水口(5 号生态塘), 几种主要污染物浓度急剧下降, 原生动物的各项监测指标均明显上升。结构和功能参数均较准确地反映出汉沽稳定塘的净化过程。

**关键词:** 汉沽稳定塘; 原生动物; 污染物; 净化

## The purification efficiency of the Hangu Stabilization Ponds and its relationship with biodiversity of protozoan community

XU Mu-Qi<sup>1</sup>, CAO Hong<sup>1</sup>, WANG Yu-Long<sup>2</sup> (1. Institute of Zoology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 10080, China; 2. Hangu Environmental Monitoring Station, Tianjin 300480, China)

**Abstract:** The Hangu multiple-cell stabilization ponds with the daily treatment capability of 50 000 tons of wastewater was constructed in 1993 and put into operation in 1995. Establishment of this system is important for controlling the red tide and improving water environment in the Bohai Sea. The investigations on the relationship between self-purification efficiency and variation in biodiversity of protozoan community in various levels of ponds were carried out. The results indicated that the main pollutants were removed in high rate and that variations in protozoan community's structure and function were strongly related to water quality in ponds with different purification grade. Five sampling stations from the input pond to the output pond were distinguishable in differences in species richness, individual abundance, diversity index and PFU colonizing rate during 1~3 day. In the first pond with the highest concentrations of COD, BOD, N and P the species richness, individual abundance and PFU colonization rate were zero. Water quality in the last pond was greatly improved and this situation could be reflected by dramatic increase in the species richness, the high PFU colonization rate and high diversity index  $d$  value, along with the reduction of pollutants. The number of protozoan species colonising on PFU after exposure of 1 to 3 days was found to give a clear comparative indications of the water quality at the five stations.

**Key words:** Hangu Stabilization Pond; protozoa, pollutants; purification

文章编号: 1000-0933(2000)02-0283-05 中图分类号: X17 文献标识码: A

原生动物群落多样性及其结构与功能特征是客观存在的。许多研究结果已经证实, 无论是由重金属或者严重有机污染引起的环境条件的变化, 还是其它环境因子的急剧变化都会改变原生动物群落的结构与

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(39730070), 中国科学院“九五”重点资助项目(6-152111-06)的部分内容。

收稿日期: 1998-08-24; 修订日期: 1999-02-20

功能特征<sup>[1~3]</sup>。原生动动物群落对环境因素变化的反应符合许多高等生物反应所发展的模型<sup>[4]</sup>。在污染物毒性的实验室生物测试(bioassay)和野外水体污染的生物监测(biomonitoring)研究中,人们习惯于把鱼类、大型底栖动物和浮游甲壳动物等作为试验材料和指示生物,而往往忽视原生动动物在污染评价中的作用。比较而言,较高等动物的应用不论在实验室的设备选择,还是在野外的样品采集方面都存在很大的局限性。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的理想指示生物<sup>[5]</sup>。Liebmann 指出,一种生物的结构越简单、个体越小、相对的表面积就越大、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<sup>[6]</sup>。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。因此,在反映评价水质的瞬时变化(如瞬时排污)和长期的连续变化(周期效应)方面,原生动动物作为监测生物具有不可替代的作用<sup>[7,8]</sup>。

位于天津渤海湾之滨的汉沽生物稳定塘是按照本课题组近十年来野外调查和室内模拟试验所提供的的基础数据和设计参数于 1993 年建成并于 1995 年正式投入运行的多级污水净化系统和示范工程。污水通过近 30km 的地下水管道,经 5 座梯级泵站输送进稳定塘。它占地 80hm<sup>2</sup>,设计日处理 5 万 t 含盐化工废水和城市生活污染。该稳定塘的建立对于改善渤海湾的水质发挥了十分重要的作用。近两年来,作者在系统调查分析汉沽生物稳定塘各级塘中主要污染物去除率的基础上,重点研究了原生动动物群落多样性变化及其结构和功能特征与水质净化的相互关系,以评价该系统的污水净化效果并分析其影响因素,为实现沿海含盐化工废水的生物净化和综合利用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

**1.1 采样点设置** 汉沽生物稳定塘为两组(套)平行的净化系统(现仅一组投入运行),其工艺流程为:原污水→预处理塘(2 级)→厌气塘(2 级)→兼性塘(6 级)→生态塘。试验期间在稳定塘设置 5 个采样站(图 1)。①号采样站设在靠近原污水排入的 1 级预处理塘;②号采样站设在第 2 级厌气塘的出口;③号站设在第 4 级兼性塘的进水口;④号站设在第 6 级兼性塘的出水口;⑤号站设在生态塘的出水处。

**1.2 PFU 样品的挂放与采集** 利用 PFU(Polyurethane Foam Unit-聚氨酯泡沫塑料块)作为人工基质采集原生动动物。PFU 的规格为 5cm 厚度,孔径为 100~150μm,使用时将其制作成 5×6.5×7.5cm<sup>3</sup> 的小块。在各采样站水下约 20cm 处悬挂 4 块 PFU,浸泡 1d 和 3d 后采集样品。样品带回到汉沽环境监测站实验室,在显微镜下进行活体种类观察鉴定。

**1.3 定量样品采样与计算** 各站定量样品取表层 1L 水样,现场用鲁哥试液固定。样品在实验室沉淀 40h 浓缩定容至 30ml,然后用定量吸管吸取 0.1ml 注入 0.1ml 的计数框中,在 10×20 的放大倍数下计数 3 片样品,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:

$$N = (Vs \times n) / (V \times Va)$$

式中, $N$  为 1L 水中原生动动物的个体数(个/L); $V$  为采样体积(L); $Vs$  为沉淀体积(ml); $Va$  为计算体积(ml); $n$  为计算时所得的个体数。

**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<sup>[9]</sup>:

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

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 理化指标测定** 为了与原生动动物资料进行比较,几个主要的水质参数 SS、BOD、COD、N、P 和 DO 含量及其在各级塘中的变化按常规方法进行连续测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 5 个采样站水质变化

汉沽生物稳定塘 5 个采样站水体中溶解氧(DO)变化及几种主要污染物的去除率和去除量见表 1 和表 2。从表 1 可以看出,入水口①号采样站 DO 值很低,仅为 0.5mg/L,随着站位的延长而呈逐级上升的趋势,至末级⑤号采样站 DO 值上升到 7.4ml/L。①号塘 5 种主要污染物浓度很高,其中 BOD<sub>5</sub> 为 546mg/L, COD<sub>cr</sub> 为 966ml/L。从预处理塘开始随流程的延长各类污染物均得到有效的去除,其中 SS 在末级塘去除

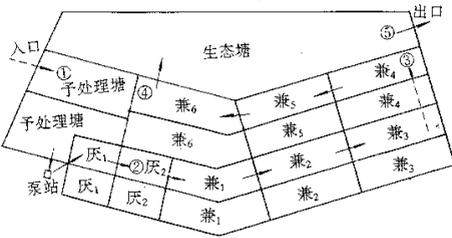


图 1 汉沽稳定塘 PFU 原生动动物采样站示意图

Fig. 1 Map of the Hangu Stabilization Pond showing PFU protozoan sampling station

率为 75%, BOD<sub>5</sub> 去除率 86%, COD<sub>cr</sub> 88%, NH<sub>3</sub>-N 86%, PO<sub>4</sub>-P 去除率为 67% (表 1)。

按照目前实际日进污水 25 000m<sup>3</sup> 计算, 运行期间汉沽生物稳定塘中 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P 和 SS 5 种主要污染物每年的去除总量是相当可观的。其中 BOD<sub>5</sub> 去除了 4298t/a, COD<sub>cr</sub> 去除了 82t/a, SS 去除 1408t/a (表 2)。以上结果表明, 汉沽生物稳定塘具有明显的净化效能。

### 2.2 原生动物的种类组成

通过 1~3d 的 PFU 群集试验, 共发现原生动动物 62 种, 其中鞭毛虫 14 种, 占总种类数的 23%; 肉足虫 13 种, 占 21%; 纤毛虫 35 种, 占 57%。从预处理塘原污水排放口至生态塘出水口 5 个采样站的 PFU 原生动动物群落中检出的种类数依次为 0、3、18、42 和 58 种。从种类数的变化可以看出, 距污水排放源越近, 种类越少, 随着流程的延长, 污水得到自然净化, 原生动动物种类逐渐增多, 其梯度变化比较明显。从各站原生动动物种类组成特征来看也存在一定的差异。②号采样站所发现的 3 种均为耐污很强的鞭毛虫类, 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为主; ④号和⑤号两个采样站种类结构发生了变化, 种类组成纤毛虫种类占据优势。

表 1 汉沽生物稳定塘主要污染物浓度变化 (mg/L) 和去除率 (%) (1996~1997, 9 次平均值)

Table 1 Mean values of the main pollutant contents (mg/L) and removal rates (%) in the Hangu Stabilization Ponds during 1996~1997

参数 Parameters	入水口 Input	预处理塘 Pretreatment pond	厌氧塘 2 号 Anaerobic pond 2	兼性塘 4 号 Facultative pond 4	兼性塘 6 号 Facultative pond 6	生态塘 Ecological pond	去除率 Removal rate (%)
SS	204.4	181.4	173.3	101.9	68.8	50.0	75.5
BOD <sub>5</sub>	546.4	450.9	339.2	207.0	185.6	75.6	86.6
COD <sub>cr</sub>	966.1	786.3	707.3	409.6	288.5	116.8	87.9
NH <sub>3</sub> -N	28.13	24.96	22.67	15.56	11.18	4.04	85.6
PO <sub>4</sub> -P	13.31	9.02	8.52	8.33	7.33	4.32	67.5
DO	0.5	1.3	1.0	2.9	6.5	7.4	

表 2 汉沽生物稳定塘主要污染物输入量和去除量 (t/a)

Table 2 The total amounts of input and removal of main pollutants in the Hangu Stabilization Pond

参数 Parameters	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>cr</sub>	NH <sub>3</sub> -H	PO <sub>4</sub> -P	SS
输入量 Amount of input	4985.9	8815.7	256.4	121.4	1865.5
去除量 Amount of removal	4297.8	7749.0	219.5	81.9	1408.5

### 2.3 PFU 原生动动物的群集速率 (Colonization rate)

从两次试验的结果来看, PFU 上原生动动物的群集速率 (作为功能参数) 能够较好地反映出汉沽稳定塘的净化过程 (图 2)。

①号采样站紧靠原污水排放的入水处, 污染物浓度很高, 其中 BOD<sub>5</sub> 超过 500mg/L, COD<sub>cr</sub> 近 1000mg/L。两次 (第 1 天、第 3 天) 均没有发现任何种类的原生动动物, 表明该站毒物的毒性很强, 抑制了原生动动物的生长。至②站, 毒物浓度略有下降, 但是仍然不宜于原生动动物的生存, 两次群集试验仅看到 3 种高度耐污的鞭毛虫类。与①和②两个采样站比较, ③和④号两个采样站的净化活动加强, 毒物浓度下降明显, PFU 原生动动物群集速率明显高于①和②两个采样站。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。生态塘的⑤号采样站, 毒物浓度大幅度下降, 水质得到

进一步改善,PFU 原生动物的群集速度继续上升,第 1 天群集了 48 种,第 3 天群集了 56 种,其群集曲线在其它 4 个采样站之上,表明该采样站的水质状况好于其它各站的水质。

一般来讲,随着 PFU 挂放时间的延长,原生动物群落的群集速率还会上升。在静水水体通常在 2 周时间内 PFU 原生动物种类数达到平衡状态(迁入与迁出机率相等)<sup>[1,5]</sup>。然而在野外实际生物监测中,PFU 1~3d 的群集速率就足以反映了测试水体的水质状况及其变化趋势,这也体现了 PFU 原生动物群落快速监测的一大优点<sup>[1,2]</sup>。

汉沽生物稳定塘基本上是在原汉沽污水库的基础上重新改建而成的污水净化系统。作者曾在 10a 前利用 PFU 方法研究了汉沽污水库的自净效果<sup>[10]</sup>。比较这次的试验结果而提出了这样一个值得讨论的问题,即:尽管稳定塘的各级出水,特别是生态塘出水的 BOD、COD 浓度仍稍高于或接近于原污水库各采样站特别是出水口的含量,而稳定塘不论是所发现的原生动物总的种类数,还是每个池号采样站 PFU 的群集速度却都稍高于污水库。分析其原因,这主要是由以下 2 个因素造成的差异:(1)污水库采样调查时,水体中除了较高浓度的 BOD、COD 污染物外,还存在着更具对原生动物有抑制作用的较高浓度汞、666 和石油含量,而稳定塘的主要污染物为 BOD、COD,其它以上毒物的测试含量几乎可以忽略不计,因此对原生动物的综合压迫作用减轻;(2)以前污水库原生动物的鉴定大多数在属的水平,而稳定塘系统的种类鉴定大多数到种的水平。

另外,从水质净化效果来看,改建后的稳定塘出水口水质指标与原污水库出水水质指标比较没有明显差别,这是因为现在稳定塘所接纳废水污染物的浓度远远超过原污水库接纳废水污染物的浓度。其中稳定塘原污水 BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>cr</sub> 是污水库污水含量的 2 至 3 倍。这表明虽然两种净化系统出水口水质指标没有多少差异,但目前稳定塘的净化效能大大高于原污水库的净化效果。

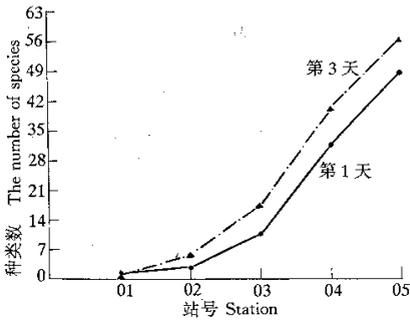


图 2 汉沽生物稳定塘 PFU 原生动物群集曲线

Fig. 2 Colonization curves of PFU protozoa at five sampling sites in the Hangu Stabilization Pond

## 2.4 个体数量和多样性 $d$ 值变化

汉沽氧化塘各采样站原生动物的个体数量和多样性指数  $d$  值的高低同样客观地反映了水质的变化趋势(图 3)。

①号站两次采样既没有发现定性种类分布,定量结果也为 0,  $d$  值同样为 0, 指示出该站毒物的毒性太强, 不宜于原生动物的生存。

②号站水中仅有 2000 个/L, 且计数时仅看到的是眼虫, 多样性指示  $d$  值很低, 为 0.26, 表示该站的污染压迫仍相当严重。兼性 4 号塘(③号站)流程较长, 已远离污染源冲击, 有毒物质得到较有效的降解, 为原生动物提供了生长、繁殖的基本条件。该站的个体数量为 10800 个/L, 但眼虫、隐藻和衣藻鞭毛虫类仍为优势种群。该站多样性指数  $d$  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, 进而刺激了原生动物的生长与繁殖。该站原生动物的多样性指数  $d$  值上升到 5.4, 是 5 个采样站中最高的。该站原生动物个体数量也是 5 个站中最高的, 为 34000 个/L, 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。

目前汉沽稳定塘末级生态塘出水水质的几个主要指标仍然偏高, 其中 COD<sub>cr</sub> 超过 100mg/L, BOD<sub>5</sub> 平均为 75mg/L, N 和 P 均在 4mg/L 以上(表 1)。原生动物耐污种群的个体数量达到 34000 个/L(图 3)。根据这种特点分析, 汉沽污水水质仍属高度富营养化类型。这种状况表明汉沽生物稳定塘尽管目前具有较强的净化效能, 但是其净化程度有限, 这主要与稳定塘超负荷运行有关。目前稳定塘所接纳的原污水中几种主

要污染物的含量均超过设计排放浓度的 2 至 3 倍甚至更高。尤其是汉沽造纸厂的废水排入给稳定塘的净化功能带来潜在的威胁。因此,采取相应的管理与技术措施,加强厂内处理,控制污水排放浓度,强化生物及其它方法的处理效果,对于提高汉沽稳定塘净化能力,进一步改善出水质量,防止渤海湾赤潮发生是完全必要和十分紧迫的工作。

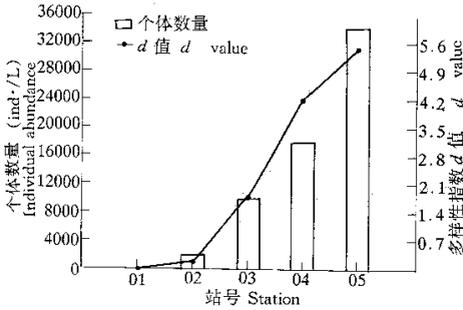


图 3 稳定塘各级塘原生动物个体数量和  $d$  值变化

Fig. 3 Variations of protozoan individual abundance and  $d$  value at five sampling sites in the Hangu Stabilization Pond

果表明,随着净化活动加强,水质得到改善,原生动物群落的结构与功能参数逐步得到恢复,明显的反应是种类数增多,PFU 群集速度加快,多样性指数  $d$  值上升。其中 PFU 原生动物第 1 天和第 3 天的快速监测结果就足够较好地指示了汉沽稳定塘的净化过程。

3.3 本项研究结果进一步证实了 PFU 原生动物群落在水污染生物监测方面显示了简便易行和快速准确的优点。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 许木启. 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.
- [3] Bick H. Population dynamics of protozoa associated with the decay of organic materials in fresh water. *Amer. Zool.*, 1973, 13(1):149~160.
- [4] Cairns J JR. The relationship of freshwater protozoan communities to the MacArthur-Wilson equilibrium model. *Amer. Nat.*, 1969, 103:439~454
- [5] Cairns J JR and Schalie W H. Review paper biological monitoring part I -Early warning systems. *Water Res.*, 1980, 14:1179~1196.
- [6] Liebman H. Handbuch der Frishwasser und Abwasser-Biologie I. 1 Aufl. Verlay Oldenbourg, Mü nchen, 1951.
- [7] Bick H. The potentialities of ciliated protozoa in the biological assessment of water pollution levels. In "Proceedings of the International Symposium on Identification and Measurement of Environmental Pollutants" Ottawa, Canada, 1971, 305~309.
- [8] Hutner S H. Protozoa as toxicological tools. *J. Protol.*, 1964, 11(1):1~6.
- [9] Margalef D R. Information theory in ecology. *Men. Real. Acal. 3rd Ser Barcelona*, 1957, 32:374~449.
- [10] 许木启. 利用 PFU 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.

## 3 结论

3.1 天津汉沽生物稳定塘具有较强的净化功能。从水质测定的综合参数来分析,几种主要污染物在各级塘中呈逐级衰减的趋势。进水口与出水口比较,SS 去除了 75%、BOD<sub>5</sub> 去除了 86%、COD<sub>Cr</sub> 去除了 87%、NH<sub>3</sub>-N 去除率为 85%、PO<sub>4</sub>-P 去除率达 67%。经计算,以上 5 种污染物每年的去除总量分别是:1408t、4298t、7749t、219t 和 82t。这些污染物在生物稳定塘中得到有效的消除,明显地减缓了渤海湾的污染负荷和压力,因此,汉沽生物稳定塘的建成对于保护和改善渤海湾水质,避免污染事故发生,促进海产品养殖业的发展等方面发挥了十分重要的作用。

3.2 稳定塘中原生动物群落多样性及其结构和功能特征的变化与水质的变化之间相互关系密切。试验结果