

# 膜生物反应器系统中原生动物的群落特征

郑祥<sup>1,2</sup>, 刘俊新<sup>2</sup>

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:**与常规生物处理工艺相比, 膜生物反应器(MBR)系统由于污泥停留时间长、污泥浓度高等特点, 因此反应器内微生物种群结构呈现不同的特点. 通过对 MBR 系统中原生动物的群落结构进行为期近 2 年连续的监测结果表明, 过长的污泥龄对系统中原生动物的种类与数量均有负面的影响. 研究发现: ①在长期不排泥的 MBR 系统中, 当环境温度从 11℃ 上升到 25℃, 原生动物的多样性呈显著上升趋势; ②当污泥龄从 350 d 下降到 30 d, MBR 系统中原生动物的种类与数量明显增加. 特别在较低的环境温度条件下, 系统中原生动物的种类与数量随着污泥龄的缩短呈显著的上升趋势; ③与相同污泥龄(SRT=30d)的氧化沟(TOD)系统相比, MBR 的污泥中原生动物的种类与数量均低于 TOD.

**关键词:**膜生物反应器; 种群结构; 原生动物; 污泥龄

中图分类号: X174; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2635-06

## Protozoan Community Diversity in Membrane Bioreactor

ZHENG Xiang<sup>1,2</sup>, LIU Jun-xin<sup>2</sup>

(1. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Continuous monitoring on the microbial character was performed in the sludge in MBR compared with traditional active sludge process. It was found that the sludge retention time (SRT) and temperature were the dominant factors that control protozoan diversity. The extra-long SRT exhibited a negative effect on the activity of protozoa. When SRT decreased from 350 d to 30 d, protozoan diversity increased significantly. Subsequently, the structure of protozoa community in the MBR was found to be quite sensitive to environment temperature, and protozoan diversity continuously increased with the increasing temperature from 11 to 25℃. The dominant population was alternate and in some order: running *Ciliata*, *Epistylis* and *Oscularia*, *Rotifers*, then *Aedosomatidae*. Further analysis showed that MBR reactor harbored a lower detectable microbial diversity compared with the TOD reactor at the same temperature and SRT.

**Key words:** membrane bioreactor; microbial community structure; protozoa; sludge retention time(SRT)

原生动物是活性污泥中最主要的捕食者, 通过捕食活性污泥中细菌, 使细菌保持在对数生长期, 维持了细菌降解污染物的活性. 原生动物所具有的个体小、繁殖快、世代周期短等单细胞微生物的特性, 使得原生动物能密切地与它们所生存的环境直接接触, 从而能直接、迅速地反映环境变化<sup>[1-3]</sup>. 在常规活性污泥法中, 较长的污泥龄有助于原生和后生动物的生存. 与常规活性污泥法相比, 膜生物反应器的污泥龄长且污泥负荷低<sup>[4]</sup>, 理论上 MBR 系统更有利于原生和后生动物的生存. 在过去的十多年间, 对 MBR 系统中原生动物群落结构的研究结果表明: 分体式 MBR 系统中很少或没有原后生动物出现, 对此现象研究者较为一致的看法是较高的循环流速在膜表面产生的剪切力影响 MBR 微生物群落的结构<sup>[5]</sup>. 但对于浸没式 MBR 系统, 不同实验条件下的研究结果存在较大差别: 大部分 MBR 系统中很少或没有原后生动物出现<sup>[6-8]</sup>; 但也有研究发现 MBR 系统中微型动物的种群动态呈现一定的规律性变化, 并与系统内活性污泥浓度和状态具有较强的相关性<sup>[9,10]</sup>.

本研究通过近 2 年的连续监测, 考察环境温度与污泥龄对 MBR 系统原生动物群落结构及其生态演替的影响, 以期为系统的合理控制提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

本试验采用重力出流式 MBR, 通过生物反应器的液位水头重力驱动连续出流, 试验系统如图 1 所示<sup>[11]</sup>. 生物反应器最大容积为 18L, 有效容积根据需要调整. 膜单元采用中空纤维微滤膜, 材料为聚偏氟乙烯(PVDF), 孔径为 0.22 μm, 总面积 0.18 m<sup>2</sup>.

MBR 系统的试验废水取自北京某家属区的集水井. MBR 系统按 350、100、30 d 这 3 个不同的污泥龄分别运行 190、94、65 d, 各阶段的试验条件详见表 1.

收稿日期: 2008-10-21; 修订日期: 2009-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50708111); 环境水质学国家重点实验室开放基金项目(200601); 北京科技新星项目(2008A110)

作者简介: 郑祥(1978~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: zhengxiang7825@hotmail.com

通讯联系人: E-mail: xliu@rces.ac.cn

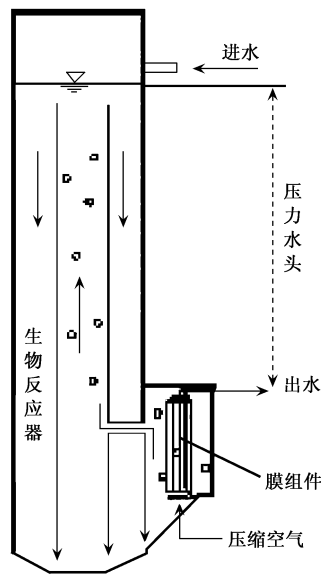


图 1 试验系统示意

Fig. 1 Flow sheet of the experimental MBR setup

1.2 样品的采集及镜检

取 0.05 mL 活性污泥于载玻片上, 采用低倍显微镜观察原生动物的形态和生理特征, 将观察到的原生动物与标准图进行对照<sup>[12]</sup>. 通过原生动物的形态来确认其种类, 记录所有原生动物, 并重复 3 次.

1.3 结构参数

Simpson 指数、Shannon-Weaver 指数、Gleason 和 Margalef 多样性指数等指标被用来比较各个污泥样品的原、后生物多样性. 计算方法如下.

Simpson 指数:  $D = 1 / \sum P_i^2$

Shannon-Weaver 指数:  $H = - \sum [P_i \cdot (\log P_i)]$

Gleason 和 Margalef 多样性指数:

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

均匀度指数:  $EH = H / \lg S$

其中,  $P_i = N_i / N$ ,  $N_i$  为样本中  $i$  类生物的样本数量;  $N$  为样本中总的样本数量,  $S$  为物种数.

表 1 MBR 系统中 3 个运行阶段的有关参数  
Table 1 Characteristics of the experimental MBR system

| 阶段  | 运行天数 d | SRT/d  | t/℃    | MLSS/ g·L <sup>-1</sup> | 粘度/mPa·s <sup>-1</sup> |
|-----|--------|--------|--------|-------------------------|------------------------|
| I   | 190    | 350±50 | 11~ 25 | 3.0~ 18.7               | 2.2~ 660               |
| II  | 94     | 100    | 12~ 25 | 3.8~ 6.0                | 4.8~ 5.6               |
| III | 65     | 30     | 13~ 15 | 2.4~ 10.0               | 3.0~ 136               |

2 结果与分析

2.1 温度对原生动物多样性的影响

在 MBR 系统运行的阶段 I, 系统不排泥连续运行 190 d, 如果把取样所排出的混合液作为排泥计入污泥龄, 则实际的污泥龄在 (350±50) d. 在系统运行的前 100 d, 生物反应器的温度均低于 18℃, 生物

反应器中只有豆形虫以及非常少量处于半死亡状态的钟虫, 污泥的结构较为松散并有大量丝状菌生长. 当温度的逐步升高 20℃ 以上, MBR 系统开始出现较多的原生动物; 系统中污泥结构有明显的改观, 污泥絮粒中细菌排列紧密、絮粒边缘与外部悬液界限清晰且游离细菌数量少(图 2). 当温度高于 25℃ 后, 逐步形成以钟虫与轮虫为优势种的微生物群落.

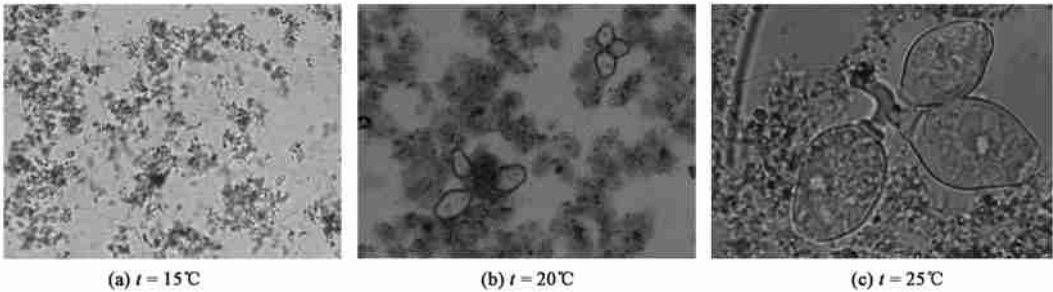


图 2 MBR 系统中污泥结构  
Fig. 2 Change of sludge grains in MBR

在阶段 II, 将 MBR 系统的污泥龄降低到 100 d. 在系统运行的前 50 d, 生物反应器的温度均低于

15℃(图 3). MBR 系统中原生动物的种类随着运行时间的延长急剧减少: 当系统运行 44 d, MBR 系统

只检出少量的盖虫与线虫, 并且原生动物的活性较差. 随着温度逐步回升到 18℃, MBR 系统出现与常规生物系统相类似的生态演替现象. 首先掠食性强的纤毛虫(*Ciliata*) 开始出现, 如漫游虫(*Lionotus*)、钟虫(*Vorticella*) 等, 它们不仅掠食细菌, 而且还能掠食小型的纤毛虫等原生动物. 随着环境温度进一步上升到 20℃, 更多种类的原、后生动物出现于生物反应器内; 附着生长的纤毛虫也开始在活性污泥凝聚体表面和周围出现, 如累枝虫(*Epistylis*)、盖虫(*Opercularia*) 等. 这些附着型纤毛虫凭借其长柄, 伸展到凝聚体周围的空间, 并不停地吞食细菌和固体食物颗粒. 随着原、后生动物的逐渐丰富, 系统运行 87 d 出现了轮虫(*Rotifers*), 通常轮虫的出现反映系统中有机质含量较低, 出水水质较好. 系统运行到 92 d, 轮虫、弯棘尾虫、盾纤虫的数量分别达到 1 800、800、1 500 个/mL. 阶段 II 运行过程中的原、后生动物种类的变化详见表 2.

表 2 MBR 系统(SRT= 100d)中的原、后生动物<sup>1)</sup>

Table 2 Microbiota population change in MBR

| 运行时间/d | 物种                                    |
|--------|---------------------------------------|
| 44     | 盖虫; 线虫                                |
| 65     | 钟虫; 累枝虫; 盾纤虫; 盖虫; 棘尾虫; 游仆虫            |
| 87     | 钟虫; 累枝虫; 盖虫; 弯棘尾虫; 轮虫; 漫游虫            |
| 92     | 轮虫; 弯棘尾虫; 伪尖毛虫; 钟虫; 累枝虫; 盖虫; 漫游虫; 盾纤虫 |

1) 原生动物鉴定到属, 下同

MBR 系统运行的阶段 III, 按 30 d 的污泥龄运行, 将温度控制在(14±1)℃这一较低的环境温度下运行(图 3). 与阶段 I 在同样温度运行阶段相比, 阶段 II 出现较多的原、后生动物. 在活性污泥培养初期, 污泥中可见大量的各种形态的小型鞭毛虫. 随着细菌增殖, 开始出现以细菌为食的纤毛虫类原生动物. 首先是小型的游泳型纤毛虫如豆形虫

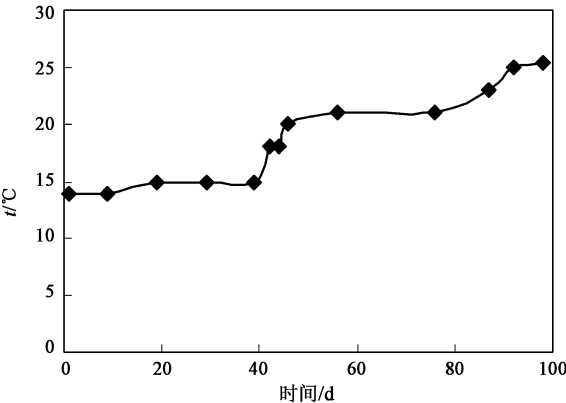


图 3 生物反应器温度的变化

Fig. 3. Temperature change in MBR

(*Colpidium*)、肾形虫(*Colpoda*) 等开始出现, 小型的游泳纤毛虫类出现之后, 在系统运行 14 d 后便出现了吸管虫(*Suctorina*), 游动的纤毛虫为固着生长的吸管虫提供了食料(表 3). 继而出现固着型纤毛虫, 它们以尾柄固着在其它物体上生活. 在固着型纤毛虫出现的同时, 匍匐型纤毛虫如盾纤虫(*Aspidisca*) 等也出现于污泥间, 它们以有机残渣和死的生物体为食. 随着活性污泥的成熟, 系统运行 27 d 后也出现了少量红斑瓢体虫(*Aeolosomatidae*).

表 3 MBR 系统中的原、后生动物(阶段 III, SRT= 30 d, 14℃±1℃)

Table 3 Microbiota population change in MBR

| 运行时间/d | 物种                                |
|--------|-----------------------------------|
| 6      | 小型鞭毛虫; 梨形四膜虫                      |
| 14     | 吸管虫; 盖虫; 累枝虫; 盾纤虫; 草履虫; 线虫        |
| 27     | 吸管虫; 盖虫; 累枝虫; 红斑瓢体虫               |
| 63     | 差异瘦尾虫; 伪尖毛虫; 漫游虫; 盖虫; 累枝虫; 钟虫; 线虫 |

2.2 MBR 系统污泥结构的变化

在低温运行的 MBR 系统中, 随着运行时间的延长, MBR 系统的污泥结构存在明显的差别. 图 4 反应了阶段 III 中 MBR 系统的污泥结构随时间的变化. 在系统运行的第 6d, 基本没有丝状菌出现, 菌胶团结合较为紧密, 此阶段为系统的启动阶段, 可认为污泥还保持着普通活性污泥法曝气池中的污泥生物相的特征. 当系统运行到第 27 d, 通过显微镜观察[图 4(c)], 运行活性污泥中有大量的丝状菌繁殖生长, 絮体内外都布满了丝状菌, 絮体结构松散. 当系统运行到第 50 d, 菌胶团破碎, 污泥絮粒边缘与外部悬液界限模糊, 游离细菌很多.

2.3 MBR 系统原生动物的多样性

为了比较相同污泥龄(SRT= 30 d)并处理同一生活污水的 MBR 与 TOD 系统中原生动物的多样性, 对 2 个系统中的污泥取样进行镜检计数. 在 MBR 系统中, MBR 系统中较常见的原生动物和后生动物有: 钟虫、盖虫、累枝虫、轮虫、豆形虫、变形虫、草履虫等. 在 TOD 系统, 可以经常观测到线虫、红斑瓢体虫等高级后生动物. 表 4 为 MBR 和 TOD 系统中污泥镜检结果的对比. 与 TOD 系统相比, MBR 的污泥中原、后生动物的种类大大低于 TOD.

表 5 为 MBR 系统和 TOD 系统中原、后生动物的定量对比结果. TOD 系统中检出原、后生动物 19 种 12 属, 同时存在附着生长和悬浮生长的原、后生动物. 悬浮生长主要有半眉虫、斜叶虫和漫游虫等游泳型原生动物; 附着生长的主要有钟虫、累枝虫、盖虫、

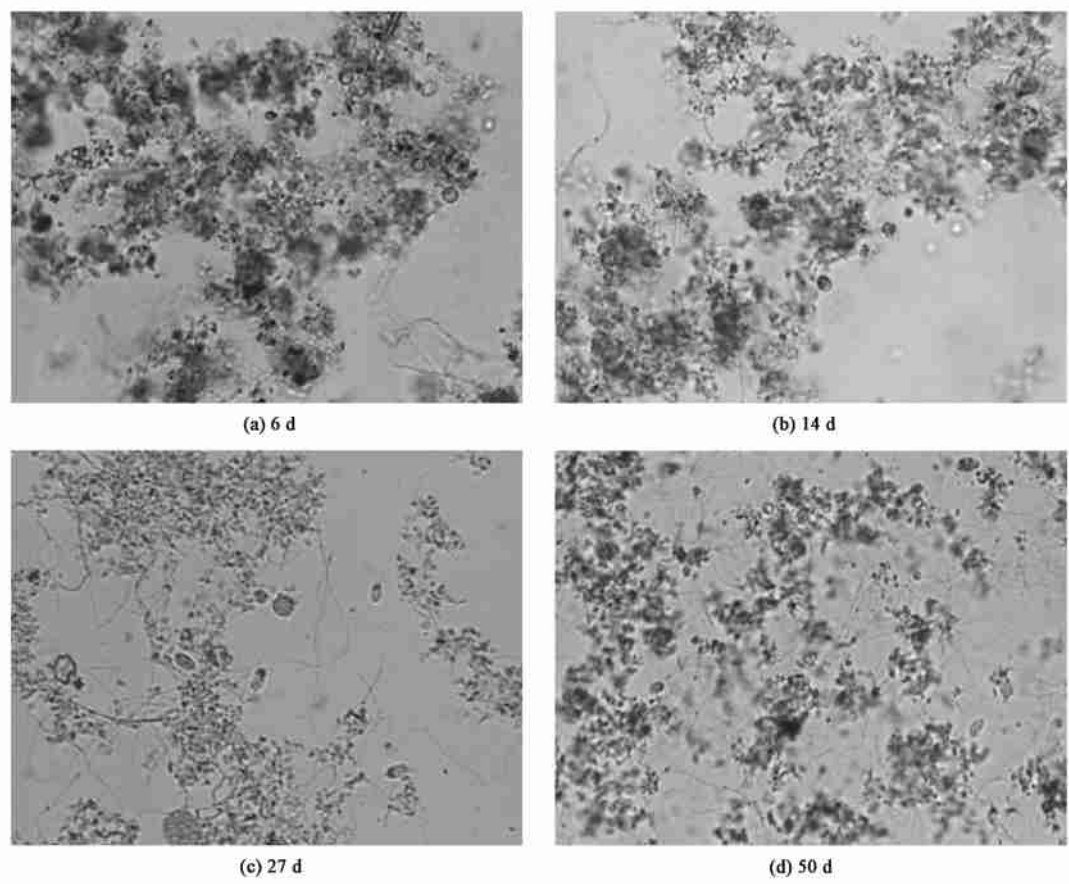


图 4 MBR 系统中污泥结构的变化  
Fig. 4 Change of sludge grains in MBR

表 4 MBR 与 TOD 系统生物相的定性比较(SRT= 30 d, t= 15℃)  
Table 4 Diversity and abundance of the protozoa and small metazoa in the MBR and TOD system

| 阶段 III运行时间/ d | 物种                                                               |                                   |
|---------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|               | TOD                                                              | MBR                               |
| 6             | 钟虫; 盾纤虫; 盖虫; 线虫; 轮虫; 红斑瓢体虫                                       | 梨形四膜虫; 鞭毛虫                        |
| 50            | 钟虫; 累枝虫; 漫游虫; 急游虫; 线虫                                            | 草履虫; 钟虫                           |
| 63            | 盖虫; 钟虫; 累枝虫; 伪尖毛虫; 盾纤虫; 差异瘦尾虫; 近亲殖口虫; 纺锤全列虫; 漫游虫; 半盾虫; 单核斜叶虫; 线虫 | 差异瘦尾虫; 伪尖毛虫; 漫游虫; 盖虫; 累枝虫; 钟虫; 线虫 |

线虫、盾纤虫等, 而且 8 种附着型纤毛虫的数量占原、后生动物总数的 90. 9%. MBR 系统中检出原、后生动物 11 种 7 属, 其中 6 种附着型纤毛虫与 2 种游动型纤毛虫的数量分别占原、后生动物总数的 47% 与 46%. 集盖虫与湖累枝虫是 TOD 系统的优势种, 而钝漫游虫为 MBR 系统的优势种.

3 讨论

Salvado 等<sup>[13, 14]</sup>发现城市活性污泥污水厂有机负荷的变化会导致原生动物的结构和数量变化, 尤其是纤毛虫属. 他们采用 Shannon-Weaver 指数来计算活性污泥中纤毛类的多样性指数, 通过观察微生物

物的组成和数量, 就能估计污水厂运行的有机负荷. 本研究分别采用 Simpson 指数、Shannon-Weaver 指数、Gleason-Margalef 多样性指数等指标来比较表 5 中 MBR 与 TOD 系统原、后生动物的多样性, 计算结果见表 6. 结果表明, 不论采用 Simpson 指数还是 Shannon-Weaver 指数进行多样性的计算, 阶段 III 中 TOD 系统的物种多样性均大于 MBR 系统. 这一结果与现实显然是不相符: 因为 TOD 系统中原、后生动物的种类与数量均高于 MBR 系统, 并且 TOD 系统中个体数排名前 11 位物种的数量均高于相应的 MBR 系统.

出现上述情况的主要原因是 Simpson 指数与

表 5 MBR 与 TOD 系统生物相的比较<sup>1)</sup> (SRT= 30 d, t= 15℃)  
Table 5 Diversity and abundance of the protozoa and small metazoa in the MBR and TOD system

| 原、后生动物 | 种名                                     | TOD/ 个·mL <sup>-1</sup> | MBR/ 个·mL <sup>-1</sup> |
|--------|----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 匍匐型纤毛虫 | 伪尖毛虫 ( <i>Oxytricha fallax</i> )       | 800                     | 80                      |
|        | 差异瘦尾虫 ( <i>Uroleptus dispar</i> )      | 320                     | 40                      |
|        | 纺锤全列虫 ( <i>Holosticha kessleri</i> )   | 180                     |                         |
|        | 有肋盾纤虫 ( <i>Aspidisca costata</i> )     | 80                      |                         |
|        | 近亲殖口虫 ( <i>Gonostomum affine</i> )     | 40                      |                         |
| 游动型纤毛虫 | 钝漫游虫( <i>Litonotus obtusus</i> )       | 560                     | 1 760                   |
|        | 龙骨漫游虫( <i>Litonotus carinatus</i> )    | 40                      | 100                     |
|        | 纺锤半眉虫( <i>Hemiophrys fusidens</i> )    | 80                      |                         |
|        | 猎半眉虫 ( <i>Hemiophrys melaugris</i> )   | 100                     |                         |
|        | 单核斜叶虫( <i>Loxophyllum uninudatum</i> ) | 40                      |                         |
| 附着型纤毛虫 | 集盖虫 ( <i>Opercularia coarctata</i> )   | 9 560                   | 480                     |
|        | 彩盖虫 ( <i>Opercularia phryganeae</i> )  | 480                     |                         |
|        | 微盘盖虫 ( <i>Opercularia micralisum</i> ) | 400                     |                         |
|        | 点钟虫 ( <i>Vorticella picta</i> )        | 80                      |                         |
|        | 弯钟虫 ( <i>Vorticella hamata</i> )       | 80                      |                         |
|        | 似钟虫 ( <i>Vorticella similis</i> )      |                         | 160                     |
|        | 钟形钟虫 ( <i>Vorticella campanula</i> )   |                         | 160                     |
|        | 沟钟虫 ( <i>Vorticella nebulifera</i> )   |                         | 100                     |
|        | 湖累枝虫 ( <i>Epistylis lacustris</i> )    | 11 280                  | 820                     |
|        | 瓶累枝虫 ( <i>Epistylis urceolata</i> )    | 720                     | 160                     |
|        | 褶累枝虫 ( <i>Epistylis plicatilis</i> )   | 320                     |                         |
| 后生动物   | 线虫                                     | 40                      | 160                     |

1) 原生动物鉴定到种

表 6 阶段 III 中 MBR 与 TOD 系统原、后生动物的多样性  
Table 6 Diversity index of the protozoa and small metazoa in the MBR and TOD system in phase III

| 项目                   | TOD   | MBR    |
|----------------------|-------|--------|
| Simpson 指数           | 2. 88 | 3. 912 |
| Shannon- Weaver 指数   | 2. 09 | 2. 54  |
| Gleason- Margalef 指数 | 1. 78 | 1. 20  |
| 物种数 S                | 19    | 11     |
| 均匀度指数 E              | 0. 71 | 1. 06  |

Shannon-Weaver 指数所涉及的各项因子均没有考虑群落中各种群在个体数量上的绝对差异, 忽略了种群大小在维持生物多样性中的贡献, 因而并不能完全客观地反映群落生物多样性的现状. 因此, 要科学地量化物种多样性, 势必应将群落中各种群在个体数量上的绝对差异考虑进去. 相应地, 物种多样性指数计算公式应能同时满足以下 3 个条件: ①对种数一定的总体, 各种间数量分布越均匀时, 多样性越高; ②个物种个体数量分布均匀的总体, 物种数目越多, 多样性越高; ③在物种数一定, 且各种间数量分布均匀时, 群落总的个体数量越多, 多样性越高. Simpson 指数与 Shannon-Weaver 指数仅能满足前 2 个条件. Gleason-Margalef 指数能更好地反映种群大小对维持生物多样性的贡献.

4 结论

长期不排泥是 MBR 系统原生动物群落多样性较低的重要原因; 随着污泥龄的缩短, 系统中原生动物的种类与数量呈上升趋势. 与相同污泥龄的 TOD 系统相比, MBR 系统中的生物相有明显不同, MBR 系统中原生动物的种类、数量均低于 TOD. 与 Simpson 指数与 Shannon-Weaver 指数相比, Gleason-Margalef 指数能更好地反映种群大小对维持生物多样性的贡献.

参考文献:

[ 1 ] Nicolau A, Dias N, Mota M, *et al.* Trends in the use of protozoa in the assessment of wastewater treatment [ J ]. Res Microbiol, 2001, **152**: 621-630

[ 2 ] Zhou K X, Xu M Q, Dai J Y, *et al.* The microfauna communities and operational monitoring of an activated sludge plant in China [ J ]. Eur J Protistol, 2006, **42**: 291-295.

[ 3 ] Jiang J G, Wu S G, Shen Y F. Effects of seasonal succession and water pollution on the protozoan community structure in an eutrophic lake [ J ]. Chemosphere, 2007, **66**: 523-532

[ 4 ] 郑祥, 刘俊新. 影响 MBR 脱氮效率的因素研究[ J ]. 环境科学学报, 2005, **25** ( 10 ): 1325-1329.

[ 5 ] 邢传宏, 钱易, 孟耀武, 等. 错流式膜-生物反应器处理生活污水及其生物学研究[ J ]. 环境科学, 1997, **18** ( 6 ): 23-26.

[ 6 ] Luxmy B S, Nakajima F, Yamamoto K. Analysis of bacterial

community in membrane-separation bioreactors by fluorescent *in situ* hybridization ( FISH ) and denaturing gradient gel electrophoresis ( DGGE ) techniques [ J ] . Water Science Technology, 2000, **41** ( 10-11 ) : 259-268.

[ 7 ] Rosenberger S, Kruger U, Witzig R, *et al.* Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal wastewater [ J ] . Water Research, 2002, **36**: 413-420.

[ 8 ] Witzig R, Manz W, Rosenberger S, *et al.* Microbiological aspects of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal wastewater [ J ] . Water Research, 2002, **36**: 394-402.

[ 9 ] 王勇,孙寓姣,黄霞. 膜-生物反应器中微型动物变化与活性污泥状态相关性研究[ J ] . 环境科学研究, 2004, **17**(5) : 48-51.

[ 10 ] 张军. 复合膜生物反应器的生物学研究[ J ] . 中国给水排水, 2002, **18**( 2 ) : 53-55.

[ 11 ] 郑祥,刘俊新. 重力出流式 MBR 污泥浓度的优化控制[ J ] . 过程工程学报,2006, **6**( 4 ) : 592-597.

[ 12 ] 沈韞芬,章宗涉. 微型生物监测新技术[ M ] . 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.

[ 13 ] Salvado H. Effect of mean cellular retention time on ciliated protozoan populations in urban wastewater plants based on a proposed model [ J ] . Water Research, 1994, **28**: 1315-1321.

[ 14 ] Salvado H, Gracia M P, Amigo J M. Capability of ciliated protozoa as indicators of effluent quality in activated sludge plants [ J ] . Water Research, 1995, **29**: 1044-1050.

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2008 年 12 月 9 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2007 年“百种中国杰出学术期刊”评选结果. 《环境科学》再次荣获“百种中国杰出学术期刊”的称号, 这也是《环境科学》连续 7 次获此殊荣.

“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.