

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0032

胡小兵, 饶强, 钟梅英, 等. 2016. SBR 工艺活性污泥驯化过程中微型动物群落物种多样性及其稳定性研究[J]. 环境科学学报, 36(9): 3177-3186  
Hu X B, Rao Q, Zhong M Y, et al. 2016. Microbial community diversity and stability of microfauna during the activated sludge acclimation in sequencing batch reactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(9): 3177-3186

# SBR 工艺活性污泥驯化过程中微型动物群落物种多样性及其稳定性研究

胡小兵<sup>1,3,\*</sup>, 饶强<sup>1</sup>, 钟梅英<sup>1</sup>, 叶星<sup>2</sup>, 朱荣芳<sup>1</sup>, 张新喜<sup>1,3</sup>

1. 安徽工业大学建筑工程学院, 马鞍山 243032
2. 安徽工业大学能源与环境学院, 马鞍山 243032
3. 生物膜法水质净化及利用技术教育部工程研究中心, 马鞍山 243032

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2016-01-29 录用日期: 2016-02-05

**摘要:**以 SBR 反应器培养驯化阶段的活性污泥微型动物群落为研究对象, 系统考察了活性污泥驯化过程中微型动物群落结构与优势种群变化规律, 同时探讨了微型动物群落物种多样性及其稳定性。结果表明, ①活性污泥培养驯化是微型动物群落类群和种属增多后趋于稳定的过程: 污泥培养驯化过程中微型动物群落, 由驯化初期以鞭毛虫为单一优势类群向鞭毛虫、匍匐型纤毛虫、固着型纤毛虫、肉食性纤毛虫等 4 个共优势类群演变, 优势种属也由单一的波豆虫属(*Bodo* sp.) 逐步向波豆虫属(*Bodo* sp.)、钟虫属(*Vorticella* sp.)、累枝虫属(*Epistylis* sp.)、楯纤虫属(*Aspidisca* sp.)、斜管虫属(*Chilodonella* sp.)、半眉虫属(*Hemiphrys* sp.) 等 6 个共优势种属演变; ②活性污泥培养驯化是微型动物群落物种多样性水平增高后趋于稳定的过程: Shannon-Wiener 多样性指数  $H'$  在培养驯化过程中先急剧增大后小幅降低直至相对稳定, 较培养驯化前增大大约 75%; ③活性污泥培养驯化是微型动物群落趋于稳定的过程: 驯化初期到中期微型动物群落稳定性略有减小, 驯化中期到后期有较大的增加并趋于稳定, 这是微型动物群落总多度、物种数均先增大后逐渐趋于稳定的结果; ④微型动物群落稳定滞后于其污泥成熟与污水处理效能稳定。

**关键词:** 污泥驯化; 微型动物; 群落结构; 多样性; 稳定性

文章编号: 0253-2468(2016)09-3177-10 中图分类号: X172 文献标识码: A

## Microbial community diversity and stability of microfauna during the activated sludge acclimation in sequencing batch reactor

HU Xiaobing<sup>1,3,\*</sup>, RAO Qiang<sup>1</sup>, ZHONG Meiyang<sup>1</sup>, YE Xing<sup>2</sup>, ZHU Rongfang<sup>1</sup>, ZHANG Xinxi<sup>1,3</sup>

1. College of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032
2. College of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032
3. Engineering Research Center of Water Purification and Utilization Technology based on Biofilm Process, Ministry of Education, Ma'anshan 243032

Received 28 October 2015; received in revised form 29 January 2016; accepted 5 February 2016

**Abstract:** The microfauna community structure and the diversity mechanism of dominant population during the activated sludge acclimation was investigated. The results show that 1) both type and genera of the microfauna community increased during the entire process and finally reach to a stable state. In the microfauna community, only one key type (flagellates) was observed in the initial stage, but then gradually developed into 4 co-dominant types (flagellates, crawling ciliates, sessile ciliates, and carnivorous ciliates). The dominant genus of microfauna community also increased from one single genus (*Bodo* sp.) to 6 genera (*Bodo* sp., *Vorticella* sp., *Epistylis* sp., *Aspidisca* sp., *Chilodonella* sp., *Hemiphrys* sp.). 2) Shannon-Wiener's diversity index  $H'$  of microfauna community dramatically increased in the first stage, later slightly dropped down, and eventually reached a stable level. It implies that the final species diversity in the microfauna community should stay at a constant level, even though it would increase in the early stage. Compared to the  $H'$  index value before acclimation, the final  $H'$  value increased about 75%. 3) Due to the fact that both species and genera in the microfauna community increased initially and later reached a stable level, the number of species and genera increased largely. They also tended towards stability in the middle and later periods of activated sludge acclimation, in other words, the stability increased it progressed through each period. 4) The stability state of the microfauna community lacked the stability of mature activated sludge and the performance of sewage treatment.

**基金项目:** 安徽省高校省级自然科学基金项目 (No. KJ2013A059)

**Supported by** the Science Research Project of Colleges and Universities in Anhui Province (No. KJ2013A059)

**作者简介:** 胡小兵 (1966—), 男, 副教授 (博士), E-mail: hxb1612@ahut.edu.cn; \* 通讯作者 (责任作者)

**Biography:** HU Xiaobing (1966—), male, associate prof. (Ph.D.), E-mail: hxb1612@ahut.edu.cn; \* Corresponding author

**Keywords:** sludge domestication; microfauna; community structure; diversity; stability

## 1 引言( Introduction)

活性污泥法( Activated Sludge Process)用于城市生活污水和工业废水处理已有一百多年历史,是最广泛应用的废水生物处理工艺,其核心是活性污泥中存在的微生物(细菌类、真菌类、原生动物和微型后生动物等)及其群体所组成的微生态降解系统(张自杰等, 2000).活性污泥培养驯化是活性污泥系统启动和运行的关键环节,通过驯化条件(原污泥、废水水质、处理工艺等)对微生物的选择作用(于凤庆等, 2012; 朱铁群等, 2008),构建适用于不同水质和运行条件下的活性污泥微生态系统.然而,对活性污泥的培养驯化机理并不是十分了解,只是推测在此过程中可能涉及到微生物群落正向自发突变的积累(于凤庆等, 2012).

微型动物在活性污泥微生态系统中发挥着重要作用:一方面,微型动物( Microfauna)(包括原生动物( Protozoa)和微型后生动物( Micro-metazoa))通过捕食细菌,保持细菌群落活力,从而维持活性污泥微生态系统稳定( Madoni, 1994; 2011; 李探微等, 2001);另一方面,产生的溶解性有机物质( DOM)代谢产物可作为细菌的矿物营养,促进细菌生长繁殖等(李探微等, 2001).更重要的是,活性污泥微型动物与污水厂运行状况之间存在着密切的关系,可作为活性污泥污水处理性能的指示生物( Canals *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004; Dos Santos *et al.*, 2014; Ntougias *et al.*, 2011; Papadimitriou *et al.*, 2011),从而反映活性污泥系统运行状态.

生物群落物种多样性可以反映群落的结构和功能,多样性高低可通过量化指数来衡量(马克平, 1994a; 1994b).在一定时期内物种多度保持不变的群落称为“稳定群落”,而把另外一些物种多度表现出很大变化的群落称为“不稳定群落”(张立敏等, 2010).有研究者基于物种数与群落总多度之比定义的稳定性指数以及群落物种多样性值的变异系数的动态变化探讨群落稳定性问题(蒋杰贤等, 2011).然而,目前对于活性污泥培养驯化过程中微型动物群落结构演变的研究,仅进行了粗略的描述( Curds, 1971; Madoni, 1994),对活性污泥微型动物群落物种多样性、稳定性等缺乏系统的研究.

本研究以废水生物处理中广泛使用的序批式

活性污泥工艺( Sequencing batch reactor, SBR)为平台,对培养驯化过程中活性污泥微型动物群落结构、物种多样性及稳定性情况进行考察.对污泥驯化过程中微型动物生态学研究,可从微生态层面揭示污水处理间歇曝气活性污泥驯化中微型动物群落结构特征、物种多样性和稳定性变化规律,以揭示缺氧/好氧交替环境下活性污泥培养驯化微观机理,阐明微型动物群落与污泥特性及污水处理效果之间的相互关系,为活性污泥培养驯化启动和系统调试运行操作提供技术基础支撑.

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 反应器运行控制

试验采用序批式反应器( SBR),反应器主体由高 85 cm、内径 7.5 cm 的有机玻璃柱制成,有效容积为 3.2 L.空气压缩机通过置于反应器底部的微孔曝气头提供系统所需氧气,同时为泥、水的混匀与环流提供动力.通过调节空气流量计控制曝气强度(  $0.2 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ),维持水中稳定的溶解氧(  $(5.42 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).反应器在室温(  $20 \pm 2.1$  ) °C 下运行.

接种污泥取自马鞍山市某污水处理厂好氧池回流污泥,清洗 3 遍后投加至 SBR 反应器闷曝, 2 d 后混合液悬浮固体浓度( MLSS)为  $1100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,污泥沉降比( SV)为 32%.运行 16 d, MLSS 达到  $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时,通过每日排泥的方式维持稳定的 MLSS,并控制污泥龄  $\theta$  为 20 d 左右.

污泥培养驯化原水由自来水配制而成,水中投加一定量的  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ (微量元素来自于试验用水),使碳、氮、磷之比接近 100:5:1.用  $\text{NaHCO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$ 缓冲体系(  $\text{pH} = 9.25$ )调节进水 pH 至  $7.50 \pm 0.05$ .整个试验过程中,进水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 为  $(1695.28 \pm 139.50) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、氨氮为  $(40.71 \pm 7.83) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、总磷为  $(8.25 \pm 0.17) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,污泥负荷约为  $0.3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ .

SBR 反应器每天运行 2 个周期,每个周期 12 h,分成 2 个阶段:①反应器进水曝气阶段,时间 10 h;②沉淀排水阶段,曝气完成后自然沉淀时间 2 h,然后将反应器中上清液通过出水口排出,排水比(进水体积与反应池总有效体积之比)为 1/3.2,然后补入新鲜原水至原水位,重新进入下一个周期运行,如此循环往复.通过系统中活性污泥微型动物群落物种多样性及出水水质等指标判定( Nicolau *et al.*,

2005), 运行约 1 个月, 活性污泥微型动物群落达初步稳定, 驯化完成。

## 2.2 微型动物采样、鉴别计数与分类统计

从反应器启动后第 4 d 开始取样, 每 1~2 d 在曝气阶段结束前 30 min 内, 通过虹吸管在反应器垂直方向上等距离 (距离反应器底部 10 cm、40 cm、70 cm 处) 采集 3 个一定量污泥混合液平行样用于微型动物鉴别计数。另外, 取一定量的混合液做污泥特性常规项检测, 沉淀结束前取上清液做水质常规项检测。

使用微量移液器 (DRAGON 大龙) 移取 25  $\mu\text{L}$  摇匀后的污泥混合液置于光学显微镜 (PH50 系列) ( $\times 100$  或  $\times 400$ ) 下对微型动物进行鉴别、计数。根据形态学和行为学特征并依照图谱、文献 (马放等, 2010; 沈韞芬等, 1990) 将微型动物按需要鉴定到种或类群。原生动物均鉴定到种, 轮虫 (rotifers)、线虫 (nematodes) 等微型后生动物鉴定到类群 (Madoni, 1994)。鉴定工作在 5 h (最长不超过 8 h) 内完成, 以避免微型动物群落物种多度和丰富程度

在鉴别过程中改变 (Dubber *et al.*, 2009; Madoni, 1994)。将微型动物群落中常见的纤毛虫类原生动物分为菌食性纤毛虫 (Bacterivorous ciliates) 和肉食性纤毛虫 (Carnivorous ciliates), 其中菌食性纤毛虫又分为匍匐型纤毛虫 (Crawling ciliates)、固着型纤毛虫 (Sessile ciliates) 和游泳型纤毛虫 (Swimming ciliates) 等三大类群 (Madoni, 1994), 将微型动物数量所得数据折算成个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ 。

## 2.3 微型动物优势种群及群落物种多样性与稳定性分析

确定优势种的优势度计算公式:  $Y = (n_i/N) \times f_i$ , 其中,  $n_i$  表示第  $i$  个种的多度 (单位体积混合液中微型动物群落所有物种的个体总数),  $N$  表示微型动物群落所有物种的总多度,  $f_i$  为第  $i$  个种在样品中出现的频率。优势度  $Y \geq 0.02$  的种为优势种 (王丽卿等, 2011; 张冬融等, 2014), 优势种属和优势类群参考同样方法确定。活性污泥微型动物群落物种多样性指数计算方法如表 1 所示。

表 1 微型动物群落物种多样性指数的计算及意义

Table 1 The calculation and significance of microfauna community diversity indices

生物群落物种多样性特征指数	作用	公式	备注
Margalef 指数	评价生物群落的物种丰富程度	$R = (S-1)/\ln N$	$S$ 表示物种数 $N, n_i$ 同上
Pielou 指数	评价生物群落的物种均匀程度	$E = H'/\ln S$	
Simpson 指数	评价生物群落物种中某些最常见种的集中程度	$D = \sum_{i=1}^s n_i(n_i - 1)/N(N - 1)$	
Shannon-Wiener 指数	综合评价生物群落的物种丰富程度和均匀程度, 表征群落物种多样性	$H' = -\sum_{i=1}^s (p_i \ln p_i)$	$P_i$ 表示第 $i$ 个种的个体数占所有物种总数的比例

采用物种稳定指数  $W_s$  和多样性稳定指数  $W_H$  表征活性污泥培养驯化过程中微型动物群落稳定性。物种稳定指数  $W_s = S/N$ , 其中  $S, N$  同上; 多样性稳定指数  $W_H = d_s/d_m$ , 其中,  $d_s$  为不同驯化阶段的多样性值标准差,  $d_m$  不同驯化阶段的多样性值的平均值 (蒋杰贤等, 2011)。以上两个指数的值越小, 群落越稳定。

## 2.4 理化与运行参数测定

化学需氧量 (COD)、氨氮 ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、总磷 (TP) 按照标准方法 (国家环保总局, 2002) 测定; 污泥沉降比 (SV) 采用 30 min 沉降直接读数法测定; 混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 采用重量法测定; 溶解氧 (DO) 和水温 ( $T$ ) 采用便携式溶解氧测定仪 (雷磁

JPBJ-608) 测定; pH 值采用数显 pH 计 (雷磁 PHS-25) 测定。

## 2.5 数据处理与分析

所有试验数据 (除另有注明外) 均取 3 个平行样的平均值进行分析。统计分析采用软件 SPSS 19.0 进行 Spearman 秩相关性和  $t$  检验分析, 采用 Origin 9.0 和 Excel 2007 完成相关图表制作。

## 3 结果 (Results)

### 3.1 活性污泥培养驯化阶段的划分

污泥特性、污染物降解效能、生物特性等方面是评价活性污泥系统性能的重要依据 (胡小兵等, 2015), 故本研究根据污泥浓度 (MLSS) 和污泥沉降

性能(SVI)、出水水质(COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、活性污泥微生物群落结构特征划分污泥培养驯化阶段。

反应器运行 10 d 时, MLSS 达 2800 mg·L<sup>-1</sup> (适宜范围为 2000~4000 mg·L<sup>-1</sup>), SVI 值由启动时的 250 mL·g<sup>-1</sup> 降为 70 mL·g<sup>-1</sup> (适宜范围为 50~150 mL·g<sup>-1</sup>) (图 1a); COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率分别达 94.19% 和 100%, 此后变化不大(两者标准差 SD 分别为 2.50% 和 2.45%) (图 1b). 运行 1~14 d, 其平均相对多度(物种个体数量占有所有物种总数的百分比)高达 95.27%. 运行 20 d 后, 鞭毛虫平均相对多度才降低至 40% 以下(36.14%). 运行 23 d 后降至 10% 以下(2.49%), 此后一直维持在 10% 以下(4.52% ± 3.57%). 指示活性污泥驯化成熟的微型后生动物轮虫(马放等, 2010) 在反应器运行 23 d 后才开始出现, 综合考虑后续微型动物群落结构的变化情况及其稳定性将污泥成熟起始时间定为第 26 d. 因此, 可将整个培养驯化过程划分为初期(污泥性能达标期)、中期(鞭毛虫消减期)和后期(污泥成熟期) 3 个阶段, 各阶段分别为 1~10 d、11~25 d、26~31 d.

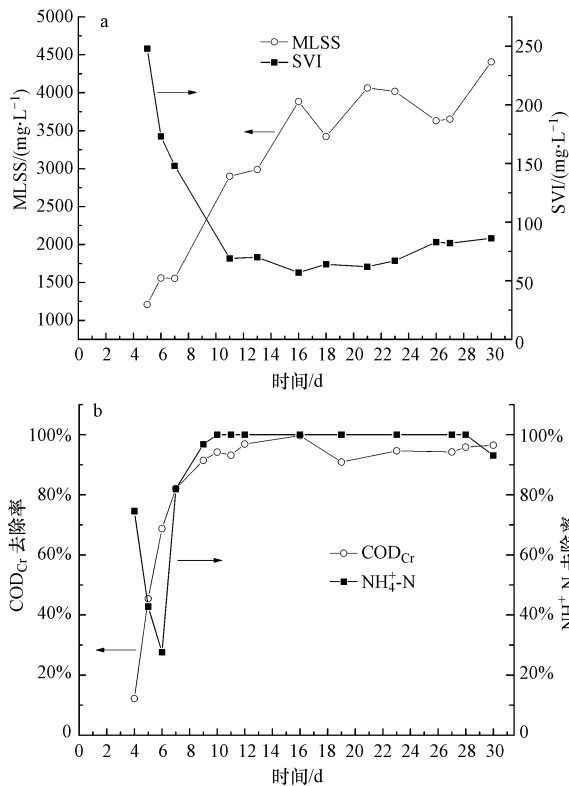


图 1 培养驯化过程中污泥特性 (a) 和污水处理效果 (b) 动态变化

Fig.1 Dynamics of the sludge characteristics (a) and efficiency of wastewater treatment (b) during the cultivation and domestication process

3.2 污泥驯化过程中微型动物群落结构动态与物种多样性变化

3.2.1 驯化过程中微型动物优势种群变化 由活性污泥微型动物优势种群对应的优势度可知(表 2), 活性污泥培养驯化初期鞭毛虫为唯一优势类群 ( $Y \geq 0.02$ ), 其优势度高达 0.989. 到驯化中期, 鞭毛虫优势度下降至 0.509, 比培养驯化初期降低了 48.5%, 匍匐型纤毛虫和固着型纤毛虫成为优势类群, 优势度分别达 0.133 和 0.322. 驯化后期, 微型动物群落优势类群达到 4 个, 分别是匍匐型纤毛虫 ( $Y=0.144$ )、固着型纤毛虫 ( $Y=0.275$ )、肉食性纤毛虫 ( $Y=0.533$ ) 和鞭毛虫 ( $Y=0.044$ ).

表 2 污泥不同驯化阶段微型动物优势种群组成及优势度  $Y$

Table 2 The dominant microfauna populations and their dominance ( $Y$ ) in the different stages of the domestication process

优势类群或优势属(种)	培养驯化初期 (1~10 d)	培养驯化中期 (11~25 d)	培养驯化后期 (26~31 d)
匍匐型纤毛虫 <i>Crawling ciliates</i>	—	0.133	0.144
斜管虫属 <i>Chilodonella</i> sp.	—	0.020	0.039
尾斜管虫 <i>Chilodonella caudata</i>	—	—	0.039
楯纤虫属 <i>Aspidisca</i> sp.	—	0.032	0.104
有肋楯纤虫 <i>Aspidisca costata</i>	—	0.027	0.103
固着型纤毛虫 <i>Sessile ciliates</i>	—	0.322	0.275
钟虫属 <i>Vorticella</i> sp.	—	0.216	0.247
沟钟虫 <i>Vorticella convallaria</i>	—	0.024	—
小口钟虫 <i>Vorticella microstoma</i>	—	0.135	0.229
累枝虫属 <i>Epistylis</i> sp.	—	0.071	0.027
湖累枝虫 <i>Epistylis lacustris</i>	—	0.061	0.027
肉食性纤毛虫 <i>Carnivorous ciliates</i>	—	—	0.533
半眉虫属 <i>Hemiophrys</i> sp.	—	—	0.524
敏捷半眉虫 <i>Hemiophrys agilis</i>	—	—	0.524
鞭毛虫 <i>Flagellates</i>	0.989	0.509	0.044
波豆虫属 <i>Bodo</i> sp.	0.989	0.503	0.025
尾波豆虫 <i>Bodo caudatus</i>	0.160	0.080	—
阿氏波豆虫 <i>Bodo alexeieffii</i>	0.021	—	—
球波豆虫 <i>Bodo globosus</i>	0.112	0.072	—
小波豆虫 <i>Bodo minimus</i>	0.643	0.216	—

注: “—”表示  $Y < 0.020$ .

驯化初期, 波豆虫属 (*Bodo* sp.) 为唯一优势属 ( $Y=0.989$ ), 包括 4 个低等的鞭毛虫优势种: 尾波豆虫 (*B. caudatus*) ( $Y=0.160$ )、阿氏波豆虫 (*B. alexeieffii*) ( $Y=0.021$ )、球波豆虫 (*B. globosus*) ( $Y=0.112$ )、小波豆虫 (*B. minimus*) ( $Y=0.643$ ). 驯化中期优势种属增至 5 个, 分别为斜管虫属

(*Chilodonella* sp.) ( $Y=0.020$ )、楯纤虫属 (*Aspidisca* sp.) ( $Y=0.032$ )、钟虫属 (*Vorticella* sp.) ( $Y=0.216$ )、累枝虫属 (*Epistylis* sp.) ( $Y=0.071$ ) 和波豆虫属 (*Bodo* sp.) ( $Y=0.503$ ), 含有 7 个优势种, 分别是有肋楯纤虫 (*A. costata*) ( $Y=0.027$ )、沟钟虫 (*V. convallaria*) ( $Y=0.024$ )、小口钟虫 (*V. microstoma*) ( $Y=0.135$ )、湖累枝虫 (*E. lacustris*) ( $Y=0.061$ )、尾波豆虫 (*B. caudatus*) ( $Y=0.080$ )、球波豆虫 (*B. globosus*) ( $Y=0.072$ ) 和小波豆虫 (*B. minimus*) ( $Y=0.216$ ), 增加了 4 个较高等级的固着型和匍匐型纤毛虫, 减少了 1 个较低等级的鞭毛虫。驯化后期, 除波豆虫属 (*Bodo* sp.) 优势度降至较低水平 ( $Y=0.025$ ) 外, 其他优势属的优势度均有所提高。此外, 半眉虫属 (*Hemiophrys* sp.) 在后期也成为优势种属, 其优势度高达 0.524, 此阶段优势种有 5 个, 均为较高等级的原生动物, 已不存在较低等的鞭毛虫类优势种 ( $Y<0.02$ )。

**3.2.2 污泥驯化过程中微型动物群落结构动态**  
活性污泥驯化初期, 鞭毛虫为单一优势类群 (表 2), 其相对多度高达  $99.0\% \pm 1.6\%$  (图 2b, 下同), 物种数为 4 种 (图 3, 下同), 占有物种数的  $73.3\% \pm 17.4\%$ 。驯化中期, 鞭毛虫多度变化较大, 在中期的 14 d 达到峰值 ( $19587 \pm 792$ ) 个  $\cdot \text{mL}^{-1}$  (图 2a, 下同), 其相对多度达 96.1%, 随后逐渐减小至驯化后期的  $5.3\% \pm 3.6\%$ , 种数减至 1~2 种, 运行 20 d 鞭毛虫优势被固着型纤毛虫取代。

进入驯化中期后, 固着型纤毛虫开始大量繁殖, 至 21 d 固着型纤毛虫多度达到峰值 ( $9289 \pm 51$ ) 个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ , 其相对多度达 66.6%。运行 15 d, 固着型纤毛虫种数开始增多, 至第 20 d 达最大值 (7 种), 占物种总数的 58.3%, 此后所占比例保持相对稳定 ( $\text{SD}: \pm 9.8\%$ )。匍匐型纤毛虫在反应器运行 12 d 后才出现, 至运行第 21 d, 占物种总数的  $25.2\% \pm 7.9\%$ , 后逐渐增长至第 25 d 的最大值 ( $10911 \pm 533$ ) 个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ , 相对多度也达最大值 71.7%。肉食性纤毛虫在运行初期偶有出现, 运行 25 d 后才开始大量繁殖, 其后期尽管种类不多 (1~3 种), 占物种总数约 30%, 但多度保持在较高水平 (约 4500 个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ ), 相对多度约 63%。30 d 时, 肉食性纤毛多度达到最大值 ( $6933 \pm 617$ ) 个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ , 其相对多度也达到最大值 67.2%。整个试验过程中, 有壳变形虫和裸变形虫种类少, 只观察到了 1~2 种。有壳变形虫在试验初期偶有出现, 裸变形虫在试验后期少量出现, 它们多

度均小于 100 个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ , 相对多度均在 1% 上下波动。

微型后生动物轮虫在反应器运行 23 d 后出现, 且多度较小 (约 50 个  $\cdot \text{mL}^{-1}$ ), 说明活性污泥开始逐渐趋于成熟 (马放等, 2010)。在整个试验过程中, 未观察到菌食性游泳型纤毛虫, 这与早期的研究结论 (Curds 1971; Madoni, 1994) 有所不同, 可能是因为该系统污泥负荷相对较低 ( $0.3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 而在高负荷 ( $0.6 \sim 0.9 \text{ kg BOD} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{MLSS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 活性污泥系统中游泳型纤毛虫才会成为优势类群 (Curds *et al.*, 1970b)。

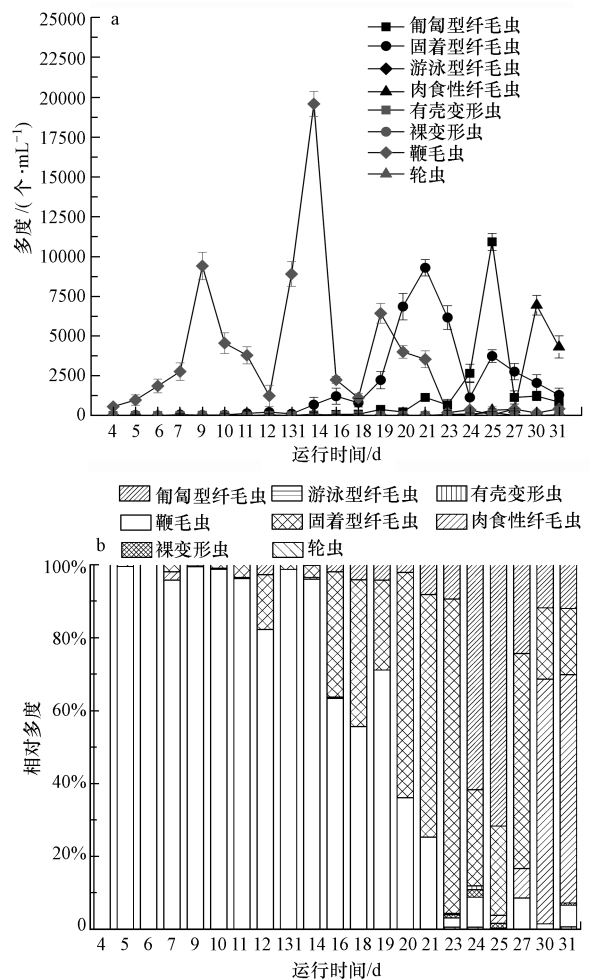


图 2 驯化过程中活性污泥微型动物群落结构演变 (图 a 数据为均值平均值+标准差)

Fig. 2 Microfauna community structure shifted in the SBR during the domestication process (Fig. a Values are presented as mean  $\pm$  SD)

因此, SBR 工艺活性污泥培养驯化过程中, 活性污泥微型动物类群演替顺序为: 鞭毛虫  $\rightarrow$  固着型纤毛虫  $\rightarrow$  匍匐型纤毛虫 + 固着型纤毛虫  $\rightarrow$  匍匐型纤

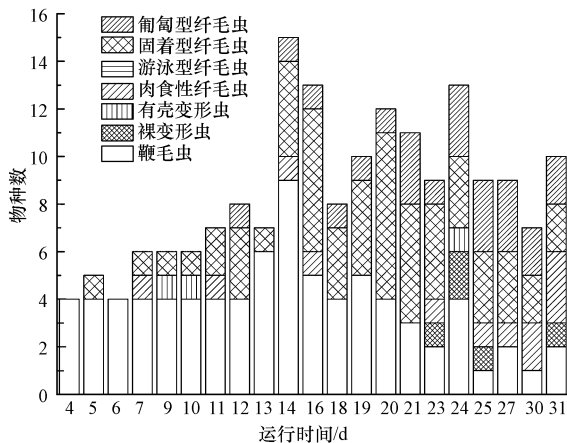


图3 驯化过程中原生动物群落不同类群物种的分布变化

Fig.3 The change of species distribution of different groups of protozoa community in the SBR during the domestication process

毛虫+固着型纤毛虫+肉食性纤毛虫→匍匐型纤毛虫+固着型纤毛虫+肉食性纤毛虫+微型后生动物;数量上占较大优势的类群其包含的优势种属和优势种也多。

污泥培养驯化过程中,活性污泥微型动物群落类群出现上述演替规律的原因可能是:反应器启动初期,细菌活力弱,其对污泥絮体的凝聚能力低,污泥絮体松散粒径小(Leong *et al.*, 2011),因而不利于爬行或附着于污泥絮体表面捕食细菌的匍匐型和固着型纤毛虫(Zhou *et al.*, 2008)生长繁殖,而有利于游离在细小絮体表面活动的鞭毛虫存活;此外,相对于体型较大的纤毛虫原生动物,鞭毛虫(尤其是异养型鞭毛虫(HNAN))对游离细菌的捕食效率更高(Johanna *et al.*, 1999),更有竞争力而得以快速繁殖。随着培养驯化的进行,细菌活力得到增强,其凝聚力增加,污泥絮体粒径增大,爬行或附着于污泥絮体表面捕食细菌的匍匐型和固着型纤毛虫数逐渐成为共优势类群(Madoni, 1994)。随着污泥培养驯化的进一步强化,数量巨大的匍匐型和固着型纤毛虫为肉食性纤毛虫提供了食物,肉食性纤毛虫大量繁殖成为优势类群,鞭毛虫、纤毛虫又为大型的微型后生动物提供了丰富的食物,使得微型后生动物出现,形成了稳定的食物链与微生态系统。

3.2.3 污泥驯化过程中微型动物群落物种多样性变化 污泥驯化过程中微型动物群落物种多样性变化如图4所示。培养驯化初期,微型动物群落物种 Shannon-Wiener 指数  $H'$  呈现“先增后减”变化。运行 4 d 时,  $H'$  为  $0.63 \pm 0.09$ , 6 d 达初期最大值的

$1.24 \pm 0.00$ , 较启动时增大约 96.8%, 后降低至第 10 d 的  $0.96 \pm 0.06$ 。驯化初期的 Shannon-Wiener 指数  $H'$  与 Simpson 指数  $D$  显著负相关( $r = -0.829$ ,  $p < 0.05$ ) (表 3, 下同), 说明群落最常见种集中性程度“先减小后增大”是造成群落物种多样性“先增后减”的主要原因。进入驯化中期后, Shannon-Wiener 指数  $H'$  呈现逐步增大的趋势。运行至第 19 d 时  $H'$  达最大值 ( $1.87 \pm 0.18$ ), 比驯化开始时增大约 1.97 倍。20 d 后  $H'$  有小幅降低, 直到这一阶段结束前的  $1.33 \pm 0.00$ 。在这一阶段(驯化中期), 活性污泥微型动物群落物种 Shannon-Wiener 指数  $H'$  与其 Margalef 指数  $R$ 、Pielou 指数  $E$  和 Simpson 指数  $D$  均显著相关( $p < 0.05$ ), 说明活性污泥培养驯化中期微型动物群落物种丰富程度、均匀性和集中性程度均是影响群落物种多样性变化趋势的重要因素。驯化后期, 微型动物群落物种 Shannon-Wiener 指数比驯化中期有所下降, 但稳定在 1.10 左右, 较驯化前增大约 75%。朱铁群等(2008)的研究也有类似的结论, 即随着驯化条件不断强化, 活性污泥微生物的多样性表现出递减趋势。

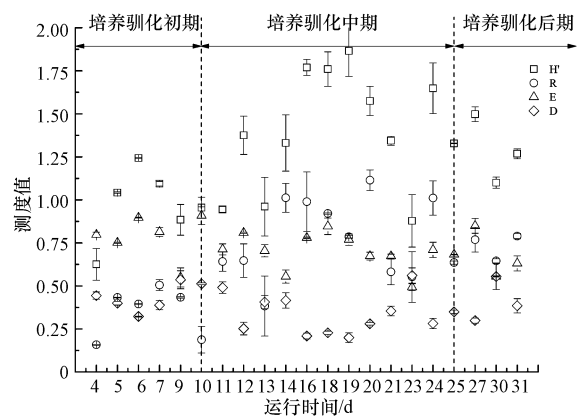


图4 培养驯化过程中微型动物群落物种多样性指数随时间的变化(数据分别为均值 $\pm 3$ 个重复的标准差)

Fig.4 The variation of community diversity indices at different stages of the cultivation and domestication process (Values are presented as mean $\pm$ SD)

对试验数据进行  $t$  检验分析可知, 培养驯化初期与中期相比群落物种 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数均存在显著性差异( $p < 0.05$ ), 而 Pielou 指数和 Simpson 指数差异性不显著( $p > 0.05$ ); 培养驯化中期和后期相比, 这些生物特性指数差异性均不显著( $p > 0.05$ ), 说明活性污泥驯化中后期群落物种多样性趋于稳定。

表 3 微型动物群落物种多样性指数间的相关性

Table 3 Spearman correlation ( $r$ ) between the different indexes of microfauna community

	驯化初期 ( $m=6$ )			驯化中期 ( $m=12$ )			驯化后期 ( $m=3$ )		
	$H'$	$R$	$E$	$H'$	$R$	$E$	$H'$	$R$	$E$
$R$	0.429			0.615 *			0.500		
$E$	0.429	-0.371		0.601 *	0.175		1.000 **	0.500	
$D$	-0.829 *	-0.143	-0.371	-0.937 **	-0.448	-0.720 **	-1.000 **	-0.500	-1.000 **

注:  $m$  为样本平均数量; \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ .

### 3.3 活性污泥驯化过程中微型动物群落稳定性

活性污泥培养驯化过程中,物种稳定指数和多样性稳定指数随运行时间的变化如图 5 所示.物种稳定指数呈“急剧变小→逐步增大→降低趋稳”的变化规律.具体地,反应器启动时,物种稳定指数  $W_s$  高达  $7.14 \times 10^{-3}$ ,驯化初期结束前的第 9 d 即迅速降至  $0.5 \times 10^{-3}$ ,说明活性污泥培养驯化初期是微型动物群落物种稳定指数急剧降低的过程,也即该阶段是活性污泥微型动物群落稳定性急剧增强的过程.进入驯化中期后,  $W_s$  表现出剧烈的波动(方差为  $2.386 \times 10^{-3}$ ),说明活性污泥驯化中期微型动物群落仍不稳定.驯化后期,  $W_s$  值的波动幅度与中期相比较小(方差为  $0.303 \times 10^{-3}$ ),说明该阶段群落趋于稳定;从多样性稳定指数来看,也可得出同样的结论,即驯化中期多样性稳定指数(0.226)略大于驯化初期多样性稳定指数(0.216),而驯化后期多样性稳定指数(0.155)为整个培养驯化过程中的最低值,较驯化初期降低 28.2%,说明 SBR 工艺活性污泥培养驯化过程中微型动物群落稳定性大小顺序为驯化中期略小于初期,而驯化后期明显大于初期和中期,即培养驯化

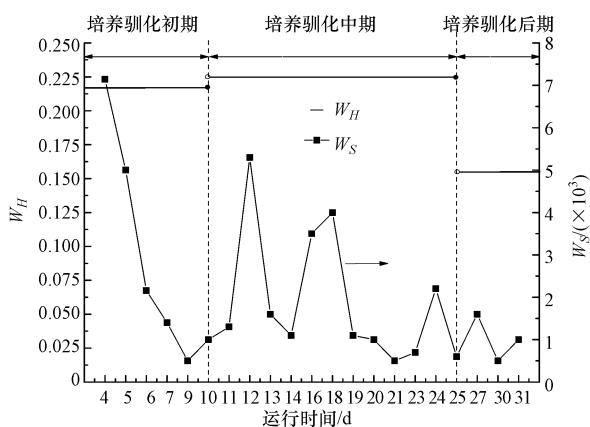


图 5 驯化过程中群落物种稳定性指数与物种多样性稳定指数的动态变化

Fig.5 Dynamic change of species stability index and bio-diversity stability index of microfauna community during the domestication process

后期活性污泥微型动物群落达初步稳定.

群落的容纳能力即群落物种多度是决定群落稳定性的关键因素,且物种多样性的增加是增强群落稳定性的重要因素(张立敏等,2010),而物种稳定指数和多样性稳定指数正是基于群落物种多度、物种数和物种多样性指数建立的群落稳定性特征值.由活性污泥驯化过程中微型动物群落多度与物种数随运行时间变化的最小二乘法(The least square method)拟合曲线可知(图 6),系统运行初期和中期,微型动物多度和物种数均增长较快,培养驯化至后期两者均趋于稳定.此外, $t$  检验结果表明:驯化初期和中期,群落多度和物种数均存在显著差异( $p < 0.05$ ),而中期和后期相比,群落多度和物种数差异性均不显著( $p > 0.05$ ),说明驯化中期和后期微型动物群落在多度、物种数上已逐步趋于相近.由此可知,活性污泥培养驯化过程中,群落物种多度和物种数逐渐趋于稳定是微型动物群落趋于稳定的原因.

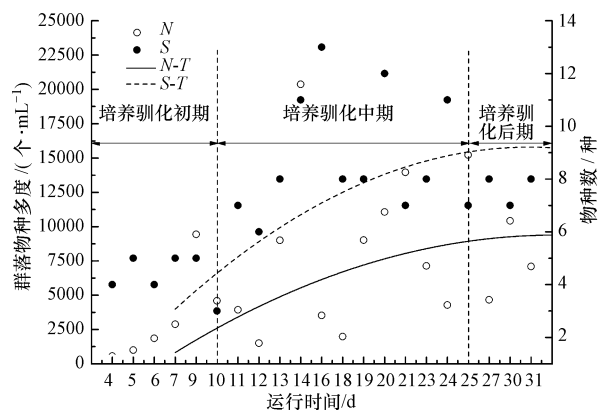


图 6 活性污泥驯化过程中微型动物群落多度与物种数随运行时间变化

Fig.6 The variation of the species number and richness of microfauna community relative to time in the process of domestication

## 4 结论 (Discussion)

### 4.1 SBR 工艺活性污泥微型动物优势种群不同于

### 传统活性污泥工艺

传统活性污泥系统 (Conventional activated sludge system, CAS) 中, 尽管微型动物群落结构随周年动态变化 (Hu *et al.*, 2013a; 2013b), 但一般以纤毛虫类原生动物为主 (Curds *et al.*, 1970a), 而其中出现频度最高 (>50%) 和最有代表性的原生动物是缘毛类固着型纤毛虫和寡毛类匍匐型纤毛虫 (Madoni *et al.*, 1981), 两者为共优势类群 (Madoni, 1994; Zhou *et al.*, 2006; 2008), 尤其是固着型纤毛虫, 其多度最大 (Martin-Cereceda *et al.*, 1996), 在同一个污水厂中固着型纤毛虫的 Shannon-Wiener 多样性指数也最高 (周可新等, 2007). 从原生动物种类看, 有肋盾纤虫 (*A. costata*)、凹缝楯纤虫 (*A. sulcata*)、游仆虫 (*E. affinis*)、沟钟虫 (*V. convallaria*)、褶累枝虫 (*E. plicatilis*) 和半圆表壳虫 (*A. hemisphaerica*) 出现频率较大, 有时经常大量出现, 为原生动物优势种 (Madoni *et al.*, 1981; Chen *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2006; 2008); 轮虫经常出现, 数量维持中等水平, 为优势后生动物 (Chen *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2013a; 2013b). 然而本研究结果显示, 驯化中期小口钟虫 (*V. microstoma*) 和沟钟虫 (*V. convallaria*) 均为优势种 ( $Y \geq 0.02$ ), 到驯化后期沟钟虫 (*V. convallaria*) 已不占优势 ( $Y < 0.02$ ), 而小口钟虫 (*V. microstoma*) 优势却得到进一步增强 (表 2), 可能是 SBR 活性污泥工艺存在阶段性缺氧环境 (沉淀排水阶段), 而小口钟虫 (*V. microstoma*) 是一种腐生种, 它对低溶解氧环境条件有很强的耐受力 (Madoni, 1994; Drzewicki *et al.*, 2011; Dos Santos *et al.*, 2014). 本研究中 SBR 活性污泥工艺中微型动物群落优势类群、优势种不同于传统活性污泥, 如在传统活性污泥系统中不占优势的肉食性纤毛虫、小口钟虫 (*V. microstoma*) 等在该系统中成为优势类群或优势种, 说明不同的工艺类型其微型动物群落结构具有明显的差异, 这与前人研究结论相一致 (Chen *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2008).

### 4.2 活性污泥微型动物群落稳定滞后于其水处理性能稳定

由试验结果可知, SVI 由运行第 5 d 的  $248 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$  逐渐降低到 11 d 的  $69 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ , 在运行 12~31 d 内, 保持在适宜范围内 ( $50 \sim 150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ) (杨庆等, 2010; 张自杰等 2000), 变化较小 ( $\text{SD}: \pm 10.3 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ) (图 1a), 污泥的沉降比 SV  $26.1\% \pm 5.8\%$  也维持在适宜范围内 ( $15\% \sim 30\%$ ) (杨庆等, 2010),

说明微型动物群落达到稳定所需时间大于污泥成熟时间; 从污水处理效能来看, 反应器运行 10 d 后,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率分别达 94.2% 和 100%, 且直到试验结束去除率 ( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 保持了相对稳定, 分别为  $95.12\% \pm 2.50\%$ 、 $99.23\% \pm 2.31\%$  (图 1b), 即活性污泥污染物降解性能达稳定的初期阶段只需 10 d 左右时间, 而培养驯化后期 (运行 25 d 后) 活性污泥微型动物群落才渐趋于稳定 (图 5), 由此可知, 活性污泥微型动物群落达到稳定所需时间也大于处理效能达稳定所需时间.

活性污泥培养驯化过程中, 微型动物群落稳定滞后于污泥成熟、水处理性能稳定. 其原因可能是活性污泥微生态系统中有低营养级细菌、高营养级的微型动物、有机物、无机物质等, 它们由细菌分泌的有粘性的胞外聚合物 (Extracellular polymeric substance, EPS) 凝聚成污泥絮体 (Nwyenys *et al.*, 2004). 而细菌类原核微生物生长快、繁殖快, 产生大量的胞外聚合物是污泥发生生物絮凝降低 SVI, 使得污泥成熟时间短. 细菌容易发生变异, 能很快地适应废水环境, 产生了很高的活性, 能快速、高效地的分解废水中污染物质, 使得污水处理效果稳定所需时间短; 而处于微生态食物链顶端的微型动物的生长繁殖速度低于细菌, 在污泥培养驯化过程中, 发生从低等到高等的优势种群演替变化 (3.2.1 节), 才能达到群落的稳定, 因此, 微型动物群落稳定所需时间较长.

## 5 结论 (Conclusions)

1) 在 SBR 工艺活性污泥驯化过程中, 优势种属由以波豆虫属 (*Bodo* sp.) 为单一种属向钟虫属 (*Vorticella* sp.)、累枝虫属 (*Epistylis* sp.)、楯纤虫属 (*Aspidisca* sp.)、斜管虫属 (*Chilodonella* sp.)、半眉虫属 (*Hemiophrys* sp.) 等多个优势种属发展; 微型动物群落由以鞭毛虫为单一优势类群逐渐向匍匐型纤毛虫、固着型纤毛虫、肉食性纤毛虫等多个优势类群演变.

2) 培养驯化过程中, 微型动物群落物种多样性先急剧增大后小幅回落直至相对稳定, 但总体上呈先增大后趋于稳定的趋势, 其中 Shannon-Wiener 多样性指数比刚启动时增大约 75.

3) SBR 工艺活性污泥培养驯化过程中, 微型动物群落稳定性变化规律: 驯化初期到中期, 略有减小; 驯化中期到后期, 有较大的增加并趋于稳定, 这



是微型动物群落总多度和物种数逐渐趋于稳定的结果。

4) 与传统活性污泥工艺相比, SBR 工艺活性污泥微型动物群落中部分优势类群和优势种存在差异。

5) 对微型动物群落结构与活性污泥性能及群落物种多样性、稳定性之间的关系进行分析表明, 群落稳定滞后于驯化污泥成熟与污水处理效能稳定。

**责任作者简介:** 胡小兵 (1966—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事污水生物处理教学科研工作。主编省级规划教材 1 部, 在国内外重要期刊上发表学术论文 20 余篇, 其中 SCI 收录 3 篇。

#### 参考文献 (References):

- Curds C R, Cockburn A. 1970a. Protozoa in biological sewage-treatment processes—I. a survey of the protozoan fauna of British percolating filters and activated-sludge plants [J]. *Water Research*, 4 (3): 225-236
- Curds C R, Cockburn A. 1970b. Protozoa in biological sewage-treatment processes—II. protozoa as indicators in the activated-sludge process [J]. *Water Research*, 4 (3): 237-249
- Curds C R. 1971. Computer simulations of microbial population dynamics in the activated sludge process [J]. *Water Research*, 5 (11): 1049-1066
- Canals O, Salvado H, Auset M, *et al.* 2013. Microfauna communities as performance indicators for an A/O Shortcut Biological Nitrogen Removal moving-bed biofilm reactor [J]. *Water Research*, 47 (9): 3141-3150
- Chen S, Xu M, Cao H, *et al.* 2004. The activated-sludge fauna and performance of five sewage treatment plants in Beijing, China [J]. *European Journal of Protistology*, 40 (2): 147-152
- Dubber D, Gray N F. 2009. Enumeration of protozoan ciliates in activated sludge: determination of replicate number using probability [J]. *Water Research*, 43 (14): 3443-3452
- Drzewicki A, Kulikowska D. 2011. Limitation of sludge biotic index application for control of a wastewater treatment plant working with shock organic and ammonium loadings [J]. *European Journal of Protistology*, 47 (4): 287-294
- Dos Santos L A, Ferreira V, Pereira M O, *et al.* 2014. Relationship between protozoan and metazoan communities and operation and performance parameters in a textile sewage activated sludge system [J]. *European Journal of Protistology*, 50 (4): 319-328
- 国家环保总局. 2002. 水和废水分析检测方法 (第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 1-800
- Hu B, Qi R, An W, *et al.* 2013a. Dynamics of the microfauna community in a full-scale municipal wastewater treatment plant experiencing sludge bulking [J]. *European Journal of Protistology*, 49 (4): 491-499
- Hu B, Qi R, Yang M. 2013b. Systematic analysis of microfauna indicator values for treatment performance in a full-scale municipal wastewater treatment plant [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 25 (7): 1379-1385
- 胡小兵, 饶强, 叶星, 等. 2015. 焦化废水活性污泥法处理中微型动物群落及其与处理性能之间的关系 [J]. *环境科学学报*, 35 (9): 2780-2789
- 蒋杰贤, 万年峰, 季香云, 等. 2011. 桃园生草对桃树节肢动物群落多样性与稳定性的影响 [J]. *应用生态学报*, 22 (9): 2303-2308
- Johanna L P, Janelle B, Pamela R. 1999. The role of flagellated and ciliated protozoa in lagoon and grass filter sewage treatment systems [J]. *Water Research*, 33 (13): 2971-2977
- 李探微, 彭永臻, 朱晓. 2001. 活性污泥中原生动物的特征和作用 [J]. *给水排水*, 4: 24-28
- Lee S, Basu S, Tyler C W, *et al.* 2004. Ciliate populations as bio-indicators at Deer Island Treatment Plant [J]. *Advances in Environmental Research*, 8 (3/4): 371-378
- Liu J, Yang M, Qi R, *et al.* 2008. Comparative study of protozoan communities in full-scale MWTPs in Beijing related to treatment processes [J]. *Water Research*, 42 (8/9): 1907-1918
- Leong M L, Lee K M, Lai S O, *et al.* 2011. Sludge characteristics and performances of the sequencing batch reactor at different influent phenol concentrations [J]. *Desalination*, 270 (1/3): 181-187
- 马放, 扬基先, 魏利, 等. 2010. 环境微生物图谱 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 1-345
- 马克平. 1994a. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法 (上) [J]. *生物多样性*, 2 (3): 162-168
- 马克平. 1994b. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法 (下) [J]. *生物多样性*, 2 (4): 231-239
- Madoni P, Ghetti P F. 1981. The structure of Ciliated Protozoa communities in biological sewage-treatment plants [J]. *Hydrobiologia*, 83 (2): 207-215
- Madoni P. 1994. A sludge biotic index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis [J]. *Water Research*, 28 (1): 67-75
- Martin-Cereceda M, Serrano S, Guinea A. 1996. A comparative study of ciliated protozoa communities in activated-sludge plants [J]. *PEMS Microbiology Ecology*, 21 (4): 267-276
- Madoni P. 2011. Protozoa in wastewater treatment processes: A minireview [J]. *Italian Journal of Zoology*, 78 (1): 3-11
- Nwiyens E, Baeyens J, Dewil R, *et al.* 2004. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 106 (2/3): 83-92
- Nicolau A, Martins M J, Mota M, *et al.* 2005. Effect of copper in the protistan community of activated sludge [J]. *Chemosphere*, 58 (5): 605-614
- Ntougias S, Tanasidis S, Melidis P. 2011. Microfaunal indicators, Ciliophora phylogeny and protozoan population shifts in an intermittently aerated and fed bioreactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 186 (2/3): 1862-1869
- Papadimitriou C A, Samaras P, Zouboulis A I, *et al.* 2011. Effects of

- influent composition on activated sludge protozoa [J]. *Desalination and Water Treatment*, 33(1/3):132-139
- 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等. 1990. 微生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.1-524
- 杨庆,彭永臻. 2010. 序批式活性污泥法原理与应用[M]. 北京:科学出版社. 414-415
- 王丽卿,施荣,季高华,等. 2011. 淀山湖浮游植物群落特征及其演替规律[J]. *生物多样性*, 19(1): 48 - 56
- 于凤庆,孙宝盛,陈谊,等. 2012. MBR 活性污泥培养驯化过程中生物多样性研究[J]. *环境科学学报*, 32(9):2084-2090
- Zhou K X, Xu M Q, Dai J, *et al.* 2006. The microfauna communities and operational monitoring of an activated sludge plant in China [J]. *European Journal of Protistology*, 42(4):291-295
- 周可新,许木启,曹宏,等. 2007. 活性污泥系统原生动物的多样性动态及其与运转效能的关系[J]. *应用与环境生物学报*, 13(6): 840-842
- Zhou K X, Xu M Q, Liu B, *et al.* 2008. Characteristics of microfauna and their relationships with the performance of an activated sludge plant in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 20(4):482-486
- 张立敏,陈斌,李正跃. 2010. 应用中生理论分析局域群落中的物种多样性及稳定性[J]. *生态学报*, 30(6):1556-1563
- 张自杰,林荣忱,金儒林,等. 2000. 排水工程(下册)(第4版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社.94-113
- 朱铁群,李凯慧,张杰. 2008. 活性污泥驯化的微生物生态学原理 [J]. *微生物学通报*, 35(6):939-943
- 张冬融,徐佳奕,徐兆礼,等. 2014. 杭州湾南岸海域春秋季节浮游动物分布特征与主要环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 33(8): 2115-2123