

污泥膨胀状态下原生动物群落结构分析

刘娟¹ 杨敏^{1*} 齐嵘¹ 许木启²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院动物研究所, 北京 100080)

摘要 系统研究了丝状菌膨胀与非丝状菌膨胀 2 种典型污泥状态下原生动物的群落结构特征及其演变规律。伴随丝状菌的大量增殖, 原生动物总量相应减少, 匍匐型纤毛虫及有壳类肉足虫数量迅速上升, 占据明显的优势地位, 典型原生动物为斜管虫 (*Chilodonella* sp.)、小轮毛虫 (*Trochilia minuta*) 以及匣壳虫 (*Centropyxis* sp.); 非丝状菌污泥膨胀对原生动物总量及种群结构影响较小, 伴随粘性菌胶团的大量出现, 各功能类群的比例变化较小, 但原生动物总量持续增加, 其中菌食性纤毛虫呈线性增加, 典型原生动物为钟虫 (*Vorticella* sp.)。

关键词 活性污泥膨胀 丝状菌膨胀 非丝状菌膨胀 原生动物

中图分类号 X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2009)02-0229-05

Study on protozoan community structures during activated sludge bulking

Liu Juan¹ Yang Min¹ Qi Rong¹ Xu Muqi²

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085; 2. Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Protozoan community structures and their population dynamics during activated sludge bulking in terms of filamentous bulking and non-filamentous bulking were evaluated. With the excessive growth of filamentous bacteria, a sharp decrease of protozoan abundance occurred, while crawling ciliates and testate amoebae, representatively *Chilodonella* sp., *Trochilia minuta* and *Centropyxis* sp. appeared as the dominant populations. On the other hand, protozoan community structure during non-filamentous bulking was less affected by the overgrowth of zoogloea. The total population, particularly, bacterivorous ciliates, showed an increasing trend. *Vorticella* sp. was the dominant species.

Key words activated sludge bulking; filamentous bulking; non-filamentous bulking; protozoa

原生动物在污水生物处理系统中与细菌等微生物之间存在相互依存的生态关系, 并作为顶级生物影响着微生物生态过程^[1]。认识原生动物的群落特征及其演变规律, 掌握原生动物与污水处理系统之间的关联性, 对于系统优化和运行管理改善具有重要意义。长期以来, 人们针对原生动物的指示性功能开展了大量研究, 取得了重要的进展。例如, Salvad^[2]通过考察 3 个正常运行的污水处理厂, 建立了原生动物与出水水质状况之间的相互关系。Shenggu^[3]通过对 5 个污水处理厂的日常监测, 研究了原生动物与系统运行的操作及水质条件之间的相关关系。但是, 以往研究大多以正常运行的污水处理系统为对象。对于非正常状态, 如污泥膨胀时处理系统中的原生动物群落结构的动态过程则缺乏系统的认识^[4]。

活性污泥膨胀主要分为 2 种类型, 即丝状菌污泥膨胀 (filamentous bulking) 和非丝状菌污泥膨胀

(non-filamentous bulking)。其中, 大约 95% 的污泥膨胀是由于丝状菌的过量繁殖引发的, 而非丝状菌膨胀则较为罕见, 通常与菌胶团细菌和高含水率的粘性物质的大量累积有关, 因而又被称为粘性膨胀 (viscous bulking) 或菌胶团膨胀 (zoogloea bulking)^[5,6]。

本研究的 2 个模拟系统在对比运行过程中分别出现了丝状菌膨胀和非丝状菌膨胀 2 种典型的污泥膨胀。在跟踪考察其原生动物群落结构演变过程的基础上, 系统研究了 2 种污泥膨胀状态下原生动物的群落特征, 并进而对典型原生动物及其生态功能

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目 (20521140076); 科技部国际科技合作项目 (2006DFA91870)

收稿日期: 2008-06-10; **修订日期:** 2008-07-09

作者简介: 刘娟 (1977~), 女, 博士, 主要研究方向: 环境微生物技术。

*通讯联系人, E-mail: yangmin@mail.jcees.ac.cn

进行了讨论。

1 方法和材料

1.1 实验装置与流程

本研究工艺流程如图1所示,生物处理单元为2个传统活性污泥系统 (conventional activated sludge system, CAS),分别标识为系统a和系统b。2系统均由完全混合曝气池、污泥沉淀池2部分组成。曝气池的有效容积为13 L,二次沉淀池的容积为6 L。控制出水流速以维持恒定的8 h水力停留时间。pH值7.5~8.0,恒温(20±1)℃。

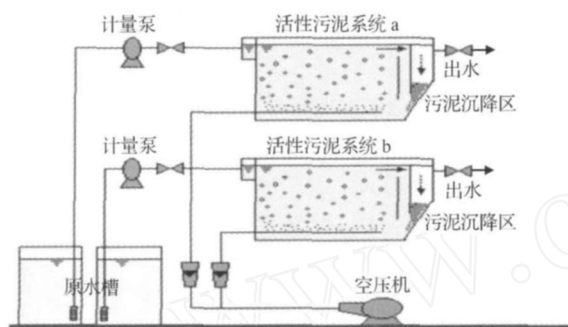


图1 实验装置与流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bench-scale system

1.2 实验用水及种污泥来源

实验原水为人工配制的生活污水,其中含有蛋白胨 160 mg/L,酵母浸粉 110 mg/L,尿素 30 mg/L, K_2HPO_4 28 mg/L, KH_2PO_4 8 mg/L, NaCl 9 mg/L, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 4 mg/L, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 2 mg/L, $NaHCO_3$ 98 mg/L。接种污泥取自北京某城市污水处理厂。

1.3 分析项目和方法

本实验中污泥浓度 (MLSS)采用减重法测定,以污泥容积指数 (SVI)表征污泥沉降性能,并进行污泥生物相观察。

原生动物样品取自曝气池活性污泥,置显微镜 (Axioskop2 mot plus, Carl Zeiss, Germany)下,在明场或微分干涉视野中,于低倍 (×100)或高倍 (×400)镜头下,直接进行活体跟踪观察与计数。每个样品重复上述操作,镜检计数3次,并取平均值,以每毫升个体数 (ind/mL)为最终统计结果。种类鉴定参照相关物种形态的描述与图绘,并结合相应的运动与生活习性^[8]。上述活体物种统计在取样后5 h内完成,以充分保证统计物种的新鲜与完整。

2 结果与讨论

2.1 两实验系统运行状况

实验系统a在保证了充足的供氧条件 (溶氧维持在5~6.5 mg/L左右),以及进水中合理的碳氮、碳磷比的前提下,出现了由于丝状菌的大量繁殖而产生的污泥膨胀现象 (图2a)。这可能主要是由于配水营养成分中可溶性物质比例较高造成的。相关研究已经表明^[7],系统中出现大量可溶性营养物质时,细菌容易向污泥絮体以外的空间伸展,以捕捉游离的营养,丝状菌丝由此大量形成,并进而导致污泥的丝状菌膨胀。

系统b在运行过程中维持较低的溶氧水平,最低不足0.6 mg/L。系统很快出现污泥粘性增高的现象,且由于粘性多聚物的大量累积,致使曝气装置易被堵塞,进而加剧了系统溶氧不足的状况。污泥跟踪镜检发现,大量呈放射分布的指状菌胶团 (图2b)的出现表明,该污泥状态属于典型的非丝状菌污泥膨胀。

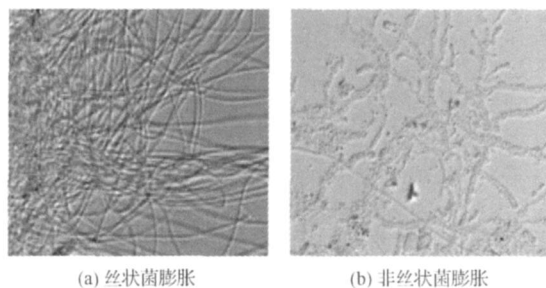


图2 污泥丝状菌膨胀与非丝状菌膨胀的光学显微镜微分干涉观察 (×400)

Fig. 2 Microphotographs of filamentous and non-filamentous bulking in terms of differential interference contrast (×400)

2.2 系统a丝状菌污泥膨胀

2.2.1 原生动物群落特征及其演变规律

图3显示的是系统a中污泥丝状菌膨胀时原生动物总量的演变趋势。从图3中可以看出,在开始阶段 ($50 \text{ mL/g} < \text{SVI} < 150 \text{ mL/g}$),体系中的生物量随之增加,原生动物因为可以获得更多的食物而相应增多;随着丝状菌的大量繁殖 ($150 \text{ mL/g} < \text{SVI} < 250 \text{ mL/g}$),系统污泥大量流失,原生动物也随之骤减,之后虽然丝状菌仍在继续繁殖,导致污泥更加疏松 ($250 \text{ mL/g} < \text{SVI} < 450 \text{ mL/g}$),但是由于体系中的污泥量已经趋于稳定 (MLSS 500 mg/L左右),原

生动物的量出现了缓慢回升。初步推测,可能此时系统中出现了可以捕食丝状菌的原生动物。

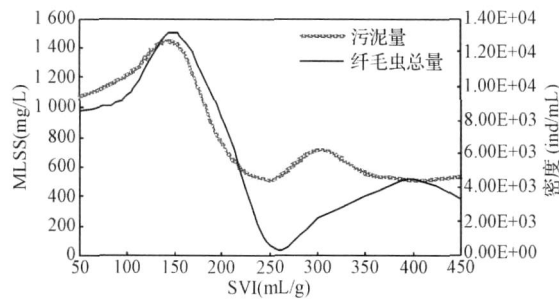


图 3 污泥丝状菌膨胀时纤毛虫总量及其演变规律

Fig. 3 Population dynamics of total ciliates during filamentous bulking

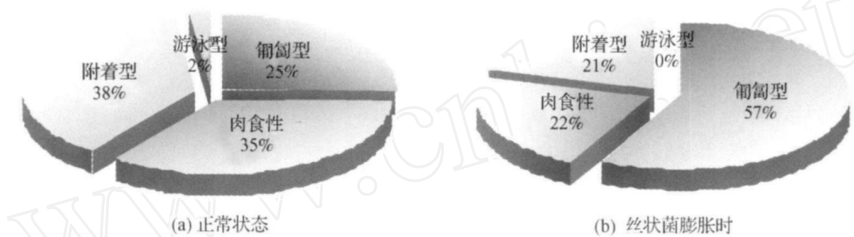


图 4 污泥正常状态与丝状菌膨胀时原生动物群落结构特征

Fig. 4 Protozoan community structures during normal conditions and filamentous bulking

加而迅速繁殖,之后 ($150\text{ mL/g} < \text{SVI} < 250\text{ mL/g}$) 伴随系统中污泥的大量流失 (如图 3 所示) 而相应减少,并在丝状菌膨胀后期 ($250\text{ mL/g} < \text{SVI} < 450\text{ mL/g}$) 维持在一个较高的密度水平 $1\,000\text{ ind/mL}$ 左右。这一演变过程中其密度的阶段性减少很大程度上可能是活性污泥流失导致的。

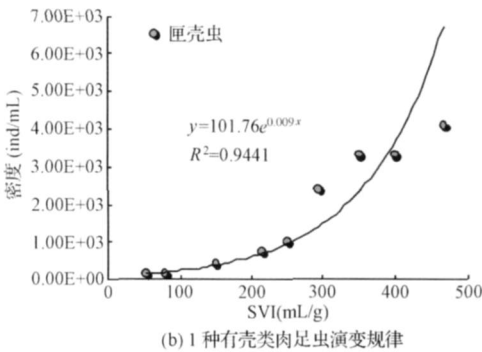
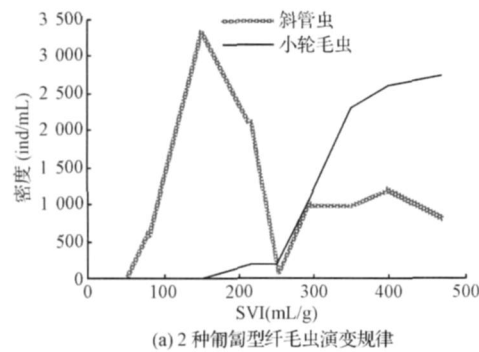


图 5 污泥丝状菌膨胀时典型原生动物演变规律

Fig. 5 Population dynamics of typical protozoa during filamentous bulking

此外,系统 a 中另一类功能类群的原生动物——有壳类肉足虫中的匣壳虫 (*Centropyxis* sp.) 也表现出了相当突出的种群优势 (图 5b)。分析其

图 4 显示的分别是系统 a 正常运行状态下与污泥丝状菌膨胀时原生动物的群落结构组成。结果表明,丝状菌膨胀时,原生动物的群落结构特征的确发生了明显变化,即匍匐型纤毛虫的比例显著上升,由之前的 25% 大幅增加到 57%,成为系统中优势的原生动物功能类群。

2.2.2 典型原生动物的演变规律

进一步分析系统 a 中污泥丝状菌膨胀时的典型原生动物发现,2 种匍匐型纤毛虫分别在丝状菌膨胀的不同阶段大量出现,并成为系统中绝对优势的原生动物 (图 5a)。

其中,斜管虫 (*Chilodonella* sp.) 在丝状菌膨胀前期 ($50\text{ mL/g} < \text{SVI} < 150\text{ mL/g}$) 随着丝状菌的增

系统中另一种匍匐型纤毛虫——小轮毛虫 (*Trochilium inuta*),在丝状菌膨胀后期 ($250\text{ mL/g} < \text{SVI} < 450\text{ mL/g}$) 随着丝状菌的继续大量繁殖而大量出现,并在本实验范围内 ($\text{SVI} < 450\text{ mL/g}$) 达到其最大密度 $2\,800\text{ ind/mL}$,成为污泥膨胀后期系统 a 中占绝对优势的原生动物。

与污泥体积指数之间的相关关系发现,匣壳虫随着丝状菌的大量繁殖呈指数增长,且相关性非常显著 ($R^2 = 0.94$)。

图 6 分别显示的是系统 a 丝状菌膨胀过程中出现的 2 种典型原生动物的扫描电镜 (SEM) 图像,其

中图 6a 所示为大量丝状菌包围中的 2 个小轮毛虫 ($\times 3\,000$),图 6b 则为匣壳虫 ($\times 1\,000$)。

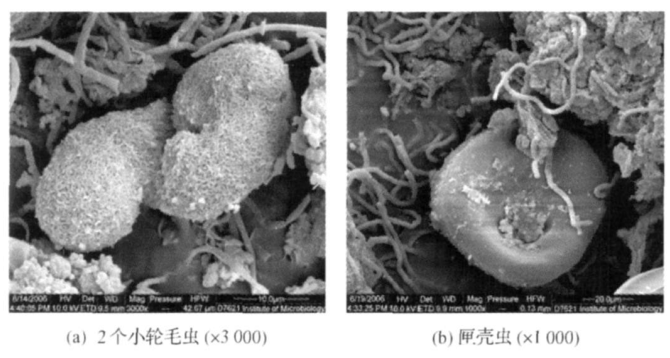


图 6 污泥丝状菌膨胀体系中典型原生动物扫描电镜 (SEM) 观察
Fig. 6 SEM of typical protozoa during filamentous bulking

综合上述实验结果,从食物链的角度进行分析,可以推测,污泥丝状菌膨胀时系统中大量出现的 3 种典型原生动物均与丝状菌存在着极为密切的生态关系。根据捕食与竞争的关系理论,在食物来源上占据优势也同时意味着在生存与竞争中获得相应的优势^[9]。由此可知,与丝状菌同时出现并形成种群优势的这 3 种典型原生动物,正是由于其对丝状菌具有某种捕食上的优势,从而在与其他原生动物的相互竞争中可以获得更加充足的营养来源,进而大量繁殖并最终形成密度优势。

2.3 系统 b 非丝状菌污泥膨胀

2.3.1 原生动物群落特征及其演变规律

图 7 显示的是系统 b 中非丝状菌污泥膨胀时原生动物总量的演变趋势。随着粘性菌胶团的大量生长 ($100\text{ mL/g} < \text{SVI} < 200\text{ mL/g}$),体系中的生物量随之增加,原生动物因为可以获取更多的食物来源而相应增多;随着高含水粘性物质的持续累积 ($200\text{ mL/g} < \text{SVI} < 500\text{ mL/g}$),系统污泥大量流

失 (MLSS 最终在 $1\,000\text{ mg/L}$ 以下),原生动物却并未随之相应减少,而是继续增加。这可能是比较松散的菌胶团状态导致其更容易成为原生动物的食物。

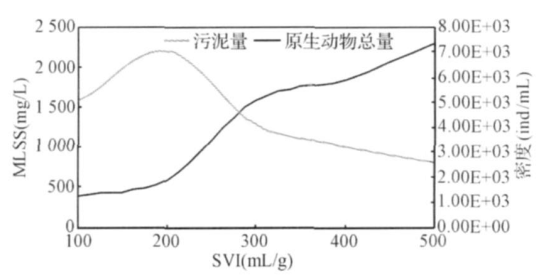


图 7 污泥非丝状菌膨胀时原生动物总量及其演变规律
Fig. 7 Population dynamics of total protozoa during non-filamentous bulking

进一步考察发现,较之正常的污泥状态,原生动物的群落结构在非丝状菌膨胀时确实并未发生明显变化,系统中各功能类群的比例基本相似 (图 8)。

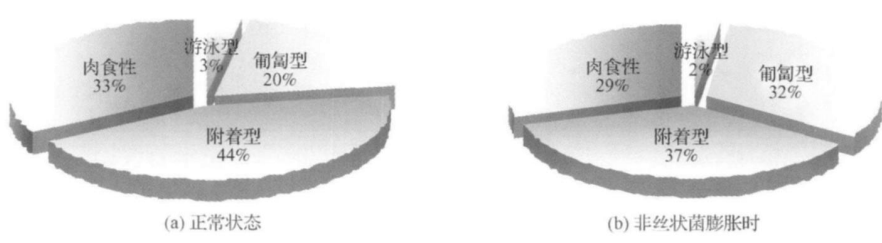


图 8 污泥正常状态与非丝状菌膨胀时原生动物群落结构特征
Fig. 8 Protozoan community structures during normal conditions and non-filamentous bulking

2.3.2 典型原生动物的演变规律

进一步分析发现 (图 9),菌食性纤毛虫随粘性菌胶团的增加而线性增殖 ($R^2 = 0.86$)。其中,附着

型纤毛虫与污泥体积指数 (SVI) 之间的相关性稍高 ($R^2 = 0.77$),匍匐型纤毛虫次之 ($R^2 = 0.68$)。其中,典型的附着型纤毛虫为一种钟虫 (Vorti

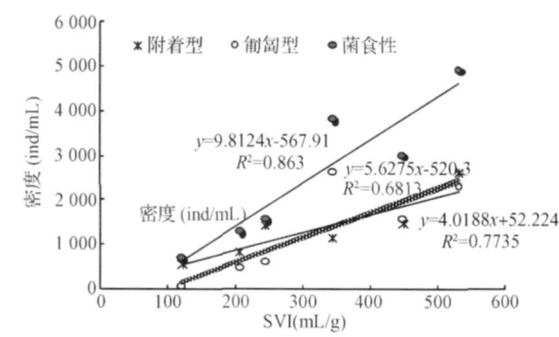


图 9 污泥非丝状菌膨胀时菌食性纤毛虫的演变规律
Fig. 9 Population dynamics of bacterivorous ciliates during non-filamentous bulking

cella sp.),其随污泥体积指数 (SVI)增加的变化规律及光学显微镜微分干涉观察如图 10所示。结果表明,该钟虫随粘性菌胶团的增加呈指数增长,且相关显著 ($R^2 = 0.86$)。分析原因,污泥非丝状菌膨胀时,系统 b中凝胶状粘性物质大量出现,有利于该附着型纤毛虫以柄着生,从而为其生长及繁殖提供了更多的空间和机会。

3 结 论

污泥丝状菌膨胀对原生动物总量及其群落结构影响明显:伴随丝状菌的大量增殖,原生动物总量相

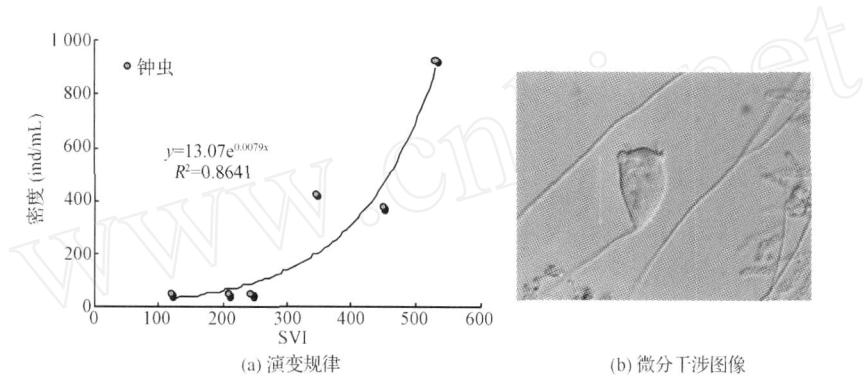


图 10 污泥非丝状菌膨胀时典型原生动物演变规律及其微分干涉观察 (×400)

Fig. 10 Population dynamics of typical protozoa and its microphotograph (×400) during non-filamentous bulking

应减少,匍匐型纤毛虫及有壳类肉足虫优势明显;其典型原生动物为斜管虫 (*Chilodonella* sp.)、小轮毛虫 (*Trochilia m inuta*)以及匣壳虫 (*Centropyxis* sp.)。

污泥非丝状菌膨胀对原生动物总量及其群落结构影响较小:伴随粘性菌胶团的大量增殖,各功能类群的比例基本未变,原生动物总量持续增加,其中菌食性纤毛虫呈线性增加,其典型原生动物为钟虫 (*Vorticella* sp.)。

参 考 文 献

[1] Curds C. R. , Cockbum A. Protozoa in biological sewage-treatment processes: (II) Protozoa as indicators in the activated-sludge process Water Res ,1982, 4: 237~249
[2] Salvad ÓH. , Gracia M. P. , Amig ÓI. M. Capability of ciliated protozoa as indicators of effluent quality in activated sludge plants Water Res , 1995, 29: 1041~1050
[3] Shenggui Chen, Muqi Xu, Hong Cao, et al The activated-sludge fauna and performance of five sewage treatment plants in Beijing, China European Journal of Protistology,

2004, 40: 147~152

[4] Madoni P. , Davoli D. , Chierici E. Comparative analysis of the activated sludge microfauna in several sewage treatment works Water Res , 1993, 27: 1485~1491
[5] Antonio M. P. Martins, Krishna Pagilla, Joseph J. Heijnen Mark C. M. van Loosdrecht Filamentous bulking sludge-a critical review. Water Res , 2004, 38: 793~817
[6] 高春娣, 彭永臻, 王淑莹,等. 氮缺乏引起的非丝状菌活性污泥膨胀. 环境科学, 2001, 22(6): 61~65
[7] Jaume Puigagut, Humbert Salvado, Xavier Tarrats, et al Effects of particulate and soluble substrates on microfauna populations and treatment efficiency in activated sludge systems Water Res , 2007, 41: 3168~3176
[8] Shen Y. F. , Zhang Z. Modern biomonitoring techniques using freshwater microbiota China Architecture & Building Press, Beijing, 1990
[9] Hahn M. W. , Höfle M. G. Grazing of protozoa and its effect on populations of aquatic bacteria FEMS Microb Ecol , 2001, 35: 113~121