

Biofilm Characteristics and Sludge Minimization in a Sequencing Biofilm Batch Reactor*

Longqiang Ma, Zhiqiang Su, Jinte Zhou, Yongjiong Ni, Jun Li[#]

Department of Municipal Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou
Email: [#]tanweilijun@zjut.edu.cn

Received: Jan. 20th, 2013; revised: Feb. 26th, 2013; accepted: Mar. 4th, 2013

Copyright © 2013 Longqiang Ma et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: A sequencing batch biofilm reactor (SBBR) packed with ceramsite treated domestic wastewater had operated about two years. The mean removal efficiencies of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and turbidity were 92%, 95%, 80% and 97%, respectively. This system had never residual sludge discharged and clogged. It performed outstanding effect of sludge minimization. Microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and the X-Ray Fluorescence (XRF) used to analyze the characteristics and inorganic component of biofilm. The stable structure of biofilm and rich species of microfauna were found. The endogenous respiration of microbial, microfauna feeding bacteria and partially mineralization of biofilm achieved the main cause of sludge minimization. Vorticella, worm and aeolosoma hemprichi in this SBBR played very important role in reducing production of residual sludge.

Keywords: SBBR; Biofilm; Microfauna; Sludge Minimization

SBBR 中生物膜特征及污泥减量*

马龙强, 苏志强, 邹金特, 倪永炯, 李 军[#]

浙江工业大学建筑工程学院, 杭州
Email: [#]tanweilijun@zjut.edu.cn

收稿日期: 2013 年 1 月 20 日; 修回日期: 2013 年 2 月 26 日; 录用日期: 2013 年 3 月 4 日

摘要: 采用以陶粒为填料的 SBBR, 处理实际生活污水。COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 及浊度的平均去除率分别达到 92%、95%、80%和 97%。反应器正常运行近两年, 未进行主动排泥、反冲洗, 没有出现堵塞现象, 表现出良好的污泥减量效果。通过光学显微镜和扫描电镜(SEM)观察, 采用 X 射线荧光光谱(XRF)对生物膜的无机成分进行分析。发现生物膜结构致密, 生物种群较为丰富, 微生物的内源呼吸、同步硝化反硝化、生物膜的部分矿化和微型生物的摄食作用是实现污泥减量的主要原因。反应器中发挥主要摄食作用的微型生物包括钟虫、线虫、红斑体虫等。

关键词: SBBR; 生物膜; 微型生物; 污泥减量

1. 引言

序批式生物膜反应器(Sequencing Batch Biofilm

Reactor, SBBR)最早由 Wilderer^[1]提出, 即通过向反应器中添加填料以培养生物膜, 而运行过程仍按照 SBR 的序批式方式进行的污水处理工艺^[2,3]。SBBR 兼有 SBR 序批式操作和生物膜生物量大的优点, 具有构

*基金项目: 浙江省建设科技项目。

[#]通讯作者。

构筑物少、运行管理简单, 容积负荷大, 污泥产量少, 脱氮除磷效果好等优点^[2,4]。

污泥减量是指通过物理、化学和生物等方法降低污泥的最终产量。污泥减量常用的物理化学方法如臭氧处理、超声波处理、高温、投加解偶联等往往能耗大或化学物质用量过多。近年来利用微型动物对污泥进行减量的研究越来越深入, 如纤毛虫、线虫和寡毛纲的白斑颤体虫^[5]与颤蚓^[6]等微型生物通过新陈代谢作用实现污泥减量, 与传统方法相比, 存在成本低、能耗低、无二次污染等明显优势^[7,8]。

过去关于 SBBR 的试验多集中于研究填料和去除效果, 而对于 SBBR 中生物特征研究的报道较少, 因此本试验通过建立一套以陶粒为填料的 SBBR 系统进行长期运行, 并对生物膜特征和污泥减量进行分析研究。

2. 材料与方法

2.1. 反应器的建立与运行

本试验建立一个以有机玻璃为材质的 SBBR 系统, 该反应器总容积约为 72 L, 其中有效容积约为 28.5 L, 尺寸为 25 cm × 40 cm × 80 cm, 换容比为 0.45。反应器内部装有表面粗糙陶粒填料。上部设两个进水口, 底部出水, 并设有两组曝气头提供有氧环境。

试验用水则取自某大楼化粪池的实际生活污水, 通过可溶性淀粉的添加和自来水的稀释调节进水 COD_{Cr} 和 C/N。试验过程中各进水水质指标控制如下: COD_{Cr} 为 371.7~613.1 mg/L, NH₄⁺-N 为 26.6~97.7 mg/L, TN 为 30.5~109.2 mg/L。

反应器每天运行 2 个周期, 每个周期 12 个小时。通过微电脑时间控制器控制整个运行过程, 每个周期采用的操作程序为: 进水、曝气、出水、闲置。其中进水 30 分钟, 曝气 600 分钟, 排水 30 分钟, 闲置 60 分钟。

本试验在运行近 480 天的基础上继续运行, 最终运行近两年, 并对生物膜的特性、水质处理效果和污泥减量进行研究。

2.2. 分析测试方法

MLSS、MLVSS、COD_{Cr}、NH₄⁺-N 和 TN 等均采用标准分析方法检测^[9]。

溶解氧(DO)和浊度分别采用型号为 WTW Muti 350i 和 HACH 2100P 的仪器检测。通过光学显微镜和扫描电镜(SEM)观察生物膜结构和其生物相, 采用 X 射线荧光光谱(XRF)检测生物膜的组成。滤速是指在各运行周期中的出水期所测得的平均滤速, 平均滤速的计算采用过滤床的高度除以过滤的总时间。

3. 结果与讨论

3.1. 污染物处理效果

经过一段时间的挂膜过程后, 反应器进入稳定运行阶段, 对于污染物的去除水平也开始趋于稳定。COD、NH₄⁺-N 和浊度去除率分别为 92%、95%和 97%, TN 的去除效果也可达到 80%以上。

选取一个典型周期以充分了解反应过程的变化。COD 在反应初期迅速下降, 在反应 1.5 小时后达到一个低值, 并保持缓慢下降直至 7 小时达到稳定(图 1)。在反应开始阶段 NH₄⁺-N 迅速下降, 总氮也随反应时间的进行不断降低(图 1), 曝气结束后 TN 的去除率接近 86%, 表明反应器具有同步硝化反硝化效果。而反应器过长的停留时间, 也可以确保反应器内的微生物在很长一段时间内会处于内源呼吸状态。内源呼吸作用抑制了细菌的生长, 有利于减少污泥量。

3.2. 生物膜的特性

3.2.1. 生物膜的表现特性

反应器运行一段时间后, 在陶粒表面逐渐形成厚度在 190~450 μm 之间的生物膜(图 2)。生物膜外表面结构不平滑、不规则, 存在多层结构, 大量的球菌和杆状菌、丝状体和杂质交织在一起, 形成了表面凹凸

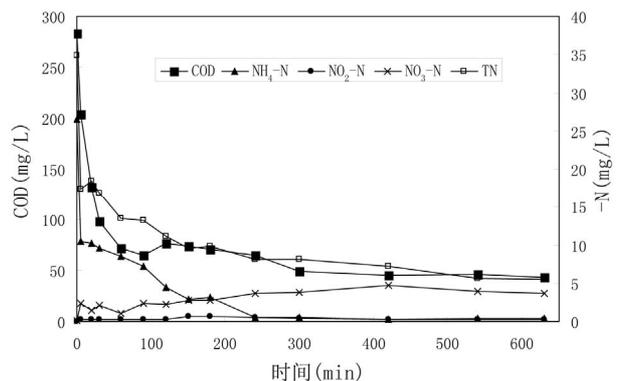


Figure 1. Changes of COD and N in a typical cycle
图 1. 周期运行过程中 COD 和氮元素的变化



Figure 2. Ceramsite before biofilm culturing and after
图 2. 挂膜前后陶粒间的对比

不平、空隙深入内部的结构(图 3)。此结构由于细菌和丝状菌的连接缠绕,比较稳固,可以抵抗曝气产生的水流剪切力,防止生物膜脱落造成大量污泥流失或沉积。

陶粒的粒径为 6~8 mm,比表面积约为 6.4 cm²/g,较高的比表面积和空隙率为微生物提供了生存活动的场所,进而形成了复杂的生物链,对于实现污泥减量有明显的作用。反应器中生物膜已形成了由细菌、原生动物(纤毛虫)、线虫类、寡毛虫(红斑颞体虫)等(图 4)组成的完整的生物链。钟虫属于群体生活的一种原生动物,常依靠柄附着于生物膜上,能够大量捕食游离细菌;线虫属于后生动物,主要以细菌、藻类、轮虫和其他线虫为食;红斑颞体虫也是一种后生动物,处于此生物链的顶端,具有很强的摄食悬浮污泥的能力。

3.2.2. 污泥的部分矿化

对生物膜的 XRF 图谱进行分析,发现 Ca、Fe、Si、P 在生物膜中均存在一定程度的沉积(图 5),说明了生物膜呈现出一定程度的无机化,此外,测得 VSS/SS 为 0.838,生物膜存在部分矿化。首先,反应器长期不排泥,污水中大量无机物沉积在生物膜中;其次,长期的内源呼吸和长的食物链引起生物膜部分矿化现象;最后,生物膜会越来越厚令其内部无法获得基质而导致矿化,滤料间的生物膜则会形成厌氧环境使之减量。

3.3. 污泥减量分析

3.3.1 污泥减量的效果

反应器一个周期运行结束后,对反应器中不同深度的污泥分布情况进行对比观察。先后将反应器挖去 1/3 陶粒和 2/3 陶粒,观察发现反应器内陶粒挂膜较为

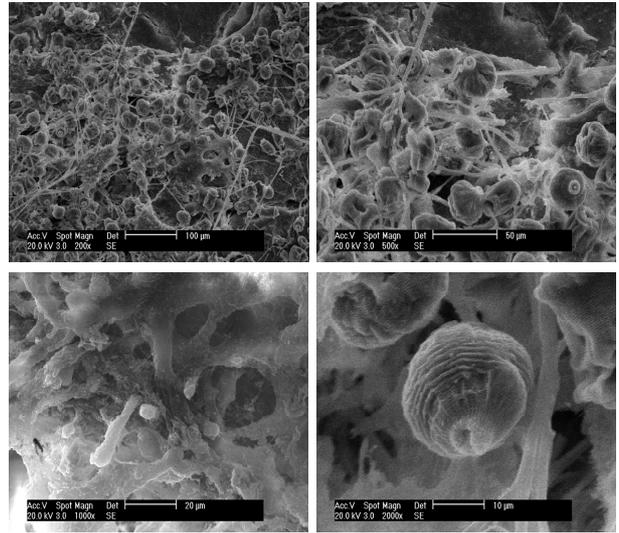


Figure 3. Morphology characteristics of the biofilm
图 3. 陶粒表面生物膜的形态特征

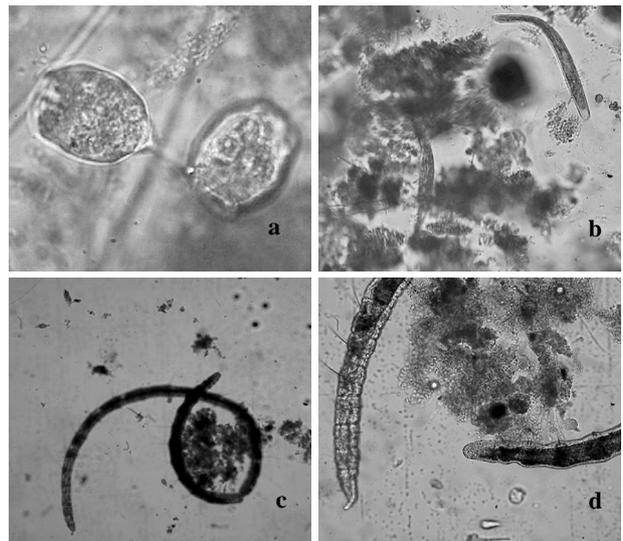


Figure 4. Microbial species dominated in the biofilm ((a) Vorticella; (b) Worm; (c), (d) Aelosoma hemprichi)
图 4. 生物膜中出现的主要生物种类((a) 钟虫; (b) 线虫; (c), (d) 红斑颞体虫)

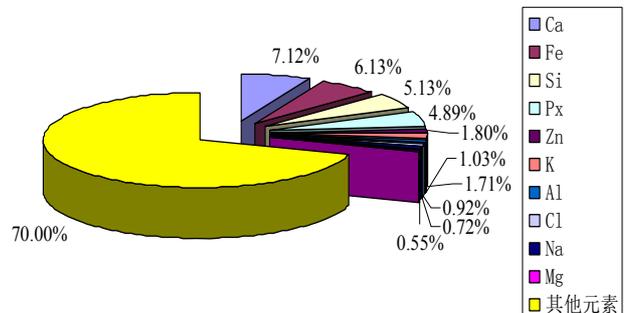


Figure 5. XRF analysis of the biofilm
图 5. 生物膜 XRF 分析结果

均匀,反应器内陶粒间空隙较大,存在少量的浮泥结成小团或松散覆盖在陶粒表面,整体上不存在堵塞情况。由于 SBBR 的序批运行方式,是变水头过滤,因此采用平均滤速来反映滤料的堵塞程度。结果发现,运行 600 多天,反应器各周期出水期间所测得的平均滤速较为稳定,基本在 0.23~0.33 m/h 之间(图 6)。

事实上,反应器最终运行近两年,未堵塞也未主动排泥,这些现象说明了反应器存在相当明显的污泥减量效果。同步硝化反硝化和较长的停留时间所造成的微生物内源呼吸、生物膜中丰富的微型生物种群的摄食作用和生物膜的部分矿化必然会造成污泥的减量。

3.3.2. 生物的摄食作用

SBBR 中存在大量的原生动物和后生动物,这些微型生物于污泥减量主要有三方面的作用。

首先,能量从细菌向原生动物和后生动物的传递过程中发生损失,食物链越长,能量损失越大,用来合成生物体的能量越少,最终形成的总的生物量也就越少。反应器中形成了复杂的食物链的关系,从细菌到纤毛虫再到红斑瓢体虫等生物转化过程中,遵循 5%~30%的规律^[10],即捕食过程下一级只有 5%~30%的生物质转化为上一级的生物质,其余都是以能量的方式散失。这种捕食关系是污泥减量的主要原因。

其次,微型动物对污泥的直接摄食和消化也是污泥减量的重要原因。纤毛虫、线虫、红斑瓢体虫等均有较强的摄食悬浮性固体的能力,甚至能够直接吞食较大的絮状活性污泥或生物膜。国内外已有部分学者对红斑瓢体虫对污泥减量机理进行了研究,表明红斑瓢体虫对污泥减量的效果可达到 50%左右,且对出水指标没有明显的干扰^[11]。

红斑瓢体虫和线虫等还能直接吞食活体细菌和死亡细菌。死亡细菌是污泥中的重要惰性成分,细菌被吞食消化后,将细胞质释放到水中,被重新利用于微生物代谢,转化为呼吸产物,从系统中排出,从而减少污泥产量。

4. 结论

以陶粒为填料的 SBBR 中形成了分布均匀、结构致密、种群丰富的生物膜。长期运行结果显示:对

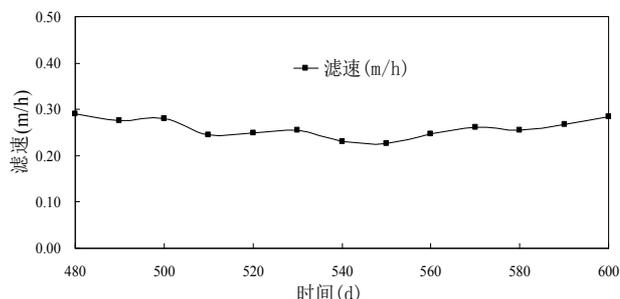


Figure 6. Changes of filtering velocity in the reactor during effluent withdrawal phase
图 6. 反应器出水滤速变化图

COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和浊度具有出色的去除效果;未出现污泥堵塞、滤速降低现象,无需进行反冲洗。同步硝化反硝化对碳源的利用,微生物长时间处于内源呼吸状态和生物膜的部分矿化,钟虫、线虫和红斑瓢体虫等的生物摄食作用等均对污泥有明显的减量作用。

5. 致谢

本研究得到浙江省建设科技项目资助。

参考文献 (References)

- [1] A. P. Wilderer. Technology of membrane bilfilm reactors operated under periodically changing process condition. *Water Science and Technology*, 1995, 31(1): 173-183.
- [2] R. Woolard. The advantages of periodically operated biofilm reactor for the treatment of highly variable wastewater. *Water Science and Technology*, 1997, 35(1): 199-206.
- [3] 李军, 彭永臻, 顾国维等. SBBR 同步硝化反硝化处理生活污水的影响因素[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(5): 728-733.
- [4] 万金保, 邓香平, 吴永明. SBBR 工艺研究进展[J]. *工业水处理*, 2008, 28(9): 5-9.
- [5] 艾翠玲, 蔡丽云. 红斑瓢体虫的污泥减量效果[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(6): 2082-2086.
- [6] 魏源送, 刘俊新. 利用寡毛类蠕虫反应器处理剩余污泥的研究[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(6): 803-808.
- [7] N. M. Lee, T. Welander. Reduction sludge production in aerobic wastewater treatment through manipulation of the ecosystem. *Water Research*, 1996, 30(8): 1781-1790.
- [8] 张恒, 吉芳英, 喻小花. 微型后生动物污泥减量技术研究[J]. *市政技术*, 2008, 26(1): 39-42.
- [9] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th edition). Washington DC: American Public Health Association, 1998.
- [10] 盛连喜. 环境生态学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 117-118.
- [11] 梁鹏, 黄霞, 钱易. 利用红斑瓢体虫减少剩余污泥产量的研究[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(1): 13-17.