WATER & WASTEWATER ENGINEERING

O_3—BAF深度处理城市二级出水中BAF系统生物量及生物膜特性

王树涛[1]　孙兴滨[2]　马　军[1]　刘惠玲[1]

(1 哈尔滨工业大学市政环境工程学院,哈尔滨　150090; 2 东北林业大学环境科学系,哈尔滨　150040)

摘要　对臭氧预氧化—曝气生物滤池(O_3—BAF)联合工艺深度处理城市污水二级处理出水中BAF系统的生物量及生物膜特性进行了研究。结果表明,在经过臭氧预氧化后的二级出水的COD_{Cr}仅有40~60 mg/L的低有机底物情况下,BAF系统内生物相仍十分丰富,系统内活跃着细菌、真菌、藻类、原生动物和后生动物等。沿BAF生物柱水流方向,不同填料层高度处微生物种群特征各有特点。沿水流方向不同填料层高度处,生物量和生物活性的变化趋势存在一定差异:生物量呈递减趋势,0.6 m范围内更加明显,之后趋于缓慢;生物活性在0.6 m范围内呈现一定的增加趋势,0.6 m以上则呈递减趋势。

关键词　臭氧预氧化　曝气生物滤池　深度处理　二级出水　生物膜

0　前言

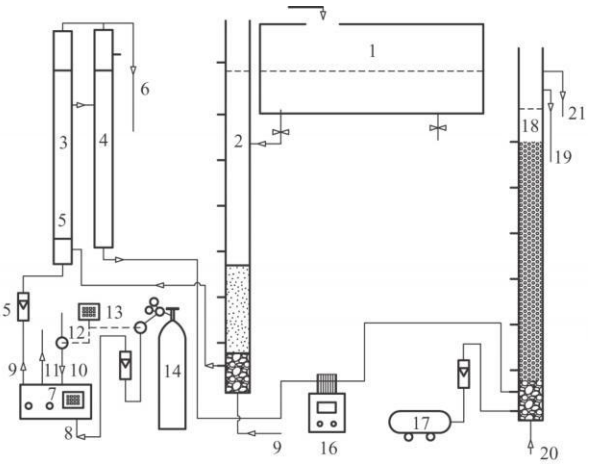
臭氧预氧化能够有效改善二级出水的可生化性,提高后续曝气生物滤池(Biological Aerated Filter, BAF)工艺的有机物去除效率[1,2]。BAF中生物膜种群特性、数量、活性,及其空间分布等对于BAF净化有机物的效能起着至关重要的作用。BAF中生物膜由分布于填料之间的悬浮态生物膜和附着于填料表面的附着态生物膜组成。充足的生物量和良好的生物活性是发挥曝气生物滤池净化效能的基本条件。对生物反应器的生物量和生物膜活性研究是生物膜增长动力学研究的重要内容。生物膜增长动力学研究通常通过建立数学模型来描述污染物增长及代谢活性的动态变化过程。速率方程是目前生物膜增长动力学研究中最常用的方法之一。目前建立的生物膜增长速率方程是以非结构系统为基本前提的,即系统内的生命体是由质量及细胞数组成,并假设细胞组成在整个试验过程中保持恒定,如指数增长模型、逻辑方程、Monod方程等都是建立在非结构系统的基本前提之上的。由于生物反应器的结构和运行特性不同,要保证反应器系统内生物膜细胞组成在运行过程中稳定不变是十分困难的,例如曝气生物滤池的反冲洗过程就对系统内的生物量带来一定程度的改变。所以必须对生物量和生物膜活性的分布特征进行系统研究,以便为进一步的动力学研究提供基础资料。

教育部科技创新重大项目培育基金(705013);城市水资源与水环境国家重点实验室开发研究项目(QA200812)。

1　试验部分

1.1　试验装置及过程

本研究的工艺流程如图1所示。原水经砂滤柱(滤料为∅1~3的石英砂,滤料柱高0.3 m)过滤,再经过预氧化后由蠕动泵送入BAF生物柱。



1 原水储水箱　2 砂滤柱　3 臭氧反应柱　4 臭氧缓解柱　5 砂芯曝气板　6 臭氧尾气外排口　7 臭氧发生器　8 氧气入口　9 臭氧出口　10 冷却水入口　11 冷却水出口　12 电磁阀　13 自动控制器　14 氧气瓶　15 气体流量计　16 臭氧尾气外排口　17 蠕动泵　18 BAF柱　19 BAF柱出水口　20 反冲洗进水口　21 反冲洗出水口

图1　O_3—BAF污水深度处理工艺流程示意

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

BAF 生物柱为内径 40 mm、高 2 400 mm 的有机玻璃柱, 填料为 ∅2 ~ 4 的轻质陶粒, 填料层高 1 600 mm。BAF 生物柱采用上向流, 设计流量为 1 L/h, 空床停留时间为 0. 8 h。

臭氧发生器以氧气为气源。臭氧接触反应柱为外径 40 mm, 长 1 600 mm 的玻璃柱, 曝气板为 5 mm厚的 G- 3 砂芯滤板。臭氧发生器每间隔 36 min工作 4 min(根据设计流量确定, 由自动控制器控制), 同时两电磁阀开启接通冷却水和氧气源。所产生的臭氧经流量计计量并通过砂芯滤板曝入臭氧反应柱, 臭氧与砂滤后的污水二级处理出水接触、反应, 出水经缓解柱停留后(以保证其中无残余臭氧), 进入 BAF 生物粒。臭氧尾气经碱液吸收后外排到大气中。

1. 2 分析指标及方法

1. 2 1 常规测定项目

本研究中的常规测定项目和方法如下: COD、BOD 采用重铬酸钾法和接种培养法测定[3]; TOC、TN 分别采用 Shimadou TOC- 5 000 Analyzer 和 Shimadou TN- 5 000 Analyzer 测定; NH_3—N 采用纳氏试剂光度比色法测定; DO 采用 YSI 溶解氧测定仪测定; UV_{254} 采用 Shimadou UV - 2 550 Analyzer 测定。

1. 2 2 生物膜生物量的测定

生物量采用磷脂法测定[4]。步骤如下: 从反应器不同高度取适量填料并置于 100 mL 具塞三角瓶中, 加入氯仿、甲醇和水的萃取混合液(1∶ 2∶ 0. 8) 19 mL, 振摇 10 min 后, 静置 12 h。向三角瓶中加入氯仿和水各 5 mL, 静置 12 h 后取出含有脂类组分的下层氯仿相 5 mL 并转移至 10 mL 具塞刻度试管中, 水浴蒸干。向试管中加入 0. 8 mL 5% 过硫酸钾溶液, 并加水至 10 mL 刻度, 在高压蒸汽灭菌锅内 121 ℃消解 30 min 后测定消解液中的磷酸盐浓度(首先绘制标准曲线), 以 nmol P/ g 填料, 1 nmol P 约相当于大肠杆菌大小的细胞 10^8 个。

1. 2 3 生物膜生物活性的测定

生物活性采用耗氧速率法测定, 具体操作步骤如下: 取 1~ 8 g 填料并准确称重, 然后将其放入经高温灭菌的 DO 瓶中并加满灭菌后的蒸馏水。用 DO 测定仪测定 DO; 加入营养盐、有机底物, 填满灭菌蒸馏水并加塞。将 DO 瓶放于摇床中 20 ℃下振荡 5 h 后, 再次测定 DO, 根据前后两次测定的 DO 值计算生物活性(mgO_2/ g 生物膜 h) 。

1. 3 试验用水水质

试验用水为哈尔滨某城市污水处理厂 A^2/ O 工艺的二级生化处理出水。该工艺基本流程为: 城市污水→格栅→沉砂池→初沉池→ A^2/ O 池→二沉池→出水。为避免 SS 对试验的影响, 原水进入系统前, 先经过 0. 3 m 高的砂滤柱(滤料当量直径为 1~ 3 mm) 过滤, 砂滤后的主要水质指标见表 1。

表 1 砂滤后的原水水质

指标	COD_{Cr} / mg/ L	BOD_5 / mg/ L	NH_3—N / mg/ L	TN / mg/ L	TOC / mg/ L	UV_{254} / cm^{-1}	pH
数值	40~ 60 (50)	8~ 15 (11. 5)	9~ 16 (12. 5)	20~ 25 (22. 5)	9~ 13 (11)	0. 18~ 0 24 (0 21)	6 9~ 7. 9 (7. 4)

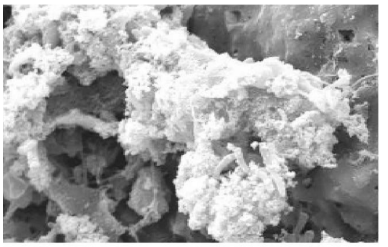
注: 括号内为平均值。

2 试验结果与讨论

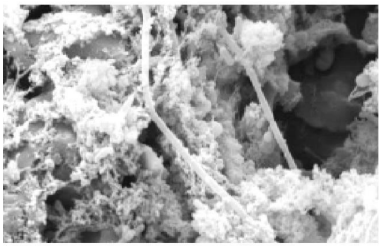
2 1 生物膜形态和微生物组成

长期运行结果表明[1,2], 在 10 mg/ L 的臭氧投加量下, 臭氧预氧化可以显著改善二级出水的可生化性, 进而提高后续 BAF 对有机物的去除效率, 使 COD_{Cr} 的去除率达到 59% ~ 63% (出水 COD_{Cr} 15~ 20 mg/ L), 高于单独的臭氧氧化和单独的 BAF 去除率之和。而 BAF 系统中良好的生物膜特性是实现其高效稳定运行的关键。研究中对进水端、中间段和出水端占优势的菌胶团以及丝状菌、藻类、原生及后生动物进行了长期的观察和分析。图 2 所示为生物膜的扫描电镜图, 表 2 则为不同层高处生物膜的表观形态和微生物组成。可以看到, 沿水流方向不同填料层高度处, 微生物种群组成特征各有特点。通过观察填料表面, 随着滤层的加深, 生物膜逐渐变薄, 颜色逐渐变浅, 同时微生物组成差异也较大。此外, 异养菌、自养菌的分布特性与沿层有机物降解和硝化作用规律是一致的。进水端自养菌占优势, 曝气生物滤池的推流式特点使得反应器内的有机底物浓度、营养物浓度、DO 浓度等沿水流方向呈现梯度变化的趋势, 使得在水流方向上逐层形成基于上述条件的不同代谢类型的微生物优势种群。

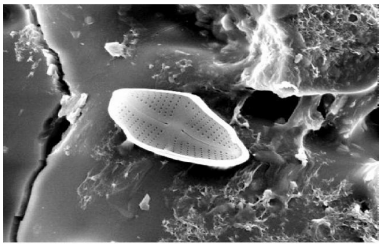
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



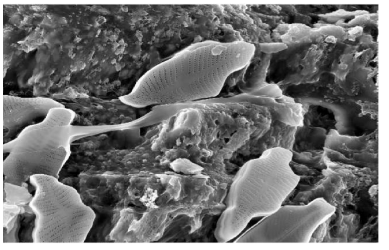
a 菌胶团和杆菌(进水端, 2 600倍)



b 丝状菌(3 000倍)



c 隐藻(5 000倍)



d 硅藻(5 000倍)

图 2　曝气生物滤池中的生物膜 SEM 照片

表 2　不同层高处生物膜的形态特征和微生物组成特征

取样高度/ m	生物膜形态和微生物组成	
	外观特征	微生物组成
0. 2	密实且生物膜较厚, 深褐色	丝状菌、草履虫、变形虫、豆形虫属、钟虫、尖毛虫属、隐藻
0. 6	较薄, 比较密实, 浅褐色	丝状菌、草履虫、变形虫、豆形虫属、尖毛虫属、旋轮虫、钟虫、隐藻
1. 2	很薄, 浅褐色	草履虫、轮虫、豆形虫属、尖毛虫属、旋轮虫、钟虫、硅藻

2. 2　BAF 内微生物种属特性

通过显微镜观察并结合 SEM 分析, 对滤层内不同深度处填料表面的生物膜种属特性进行了分析, 结果见表 3。可以看到, BAF 系统内生物相十分丰富, 包括细菌、真菌、藻类、原生动物和后生动物。生物膜工艺的优点是生物膜中的微生物种群丰富, 其中有细菌、真菌、藻类、原生(后生)动物等。生物膜作为一个功能有机体, 其微生物种群分布是按照系统的各种功能需求而优化组成的, 生物膜中微生物的种群分布不是种群的简单组合, 而是依据生物整体代谢功能最优化原则有机组成配置的。

表 3　曝气生物滤池的微生物种属

类别	微生物种属
细菌	假单胞菌属(*Pseudomonas sp.*)
	球衣菌属(*Sphaeratilus natans sp.*)
	黄杆菌属(*Flacobaterium sp.*)
	微球菌属(*Micrococuus sp.*)
	诺卡氏菌属(*Mocardia sp.*)
	大肠菌属(*Colifor m sp.*)
	亚硝化草胞菌(*Nitrosomonas sp.*)
	亚硝化球菌属(*Nitrosocuccus sp.*)
	硝化杆菌属(*Nitribacter sp.*)
真菌	青霉菌(*Penicillium sp.*)
	地霉菌(*Geotrichum sp.*)
藻类	隐藻(*Cryptophyta*)
	硅藻(*Diatom*)
	尖毛虫属(*Oxytricha sp.*)
	变形虫属(*Amoeba sp.*)
原生动物	豆形虫(*Colpidium sp.*)
	尾草履虫(*Paramecium bursaria*)
	钟形钟虫(*Vorticella campamlic*)
后生动物	轮虫(*Rotaria sp.*)
	旋转虫属(*Philodina sp.*)

2. 3　生物量与生物膜活性

充足的生物量和良好的生物活性是发挥 BAF 净化效能的首要条件。对生物反应器的生物量和生物膜活性研究是生物膜增长动力学研究的基础。BAF 中生物量及生物膜活性状况也可以反映反冲洗的效果[5, 6], 而且在一定程度上可以作为反冲洗强度的确定依据。在进水 COD_{Cr} 46. 7 mg/ L, 温度19~ 24 ℃, 滤速 1 m/ h 时, 对 BAF 反应器中具有代表性的滤层高度处的生物量和生物膜活性进行了测定和分析, 结果见图 3。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

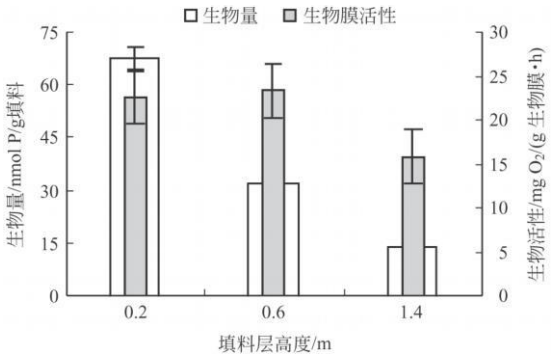


图 3　不同填料层高度处的生物量和生物膜活性

由图 3 可见, 生物反应器内沿水流方向生物量成明显的递减趋势, 特别是在 0.6 m 范围内更加明显, 之后趋于缓慢。而在 0.6 m 范围内生物活性略有增加, 0.6 m 以上则明显降低。分析认为, 沿水流方向连续的生物降解作用使水中的底物浓度逐渐降低。由于进水端的有机底物浓度最大, 有利于异养菌的大量生长、繁殖; 也由于填料的过滤截留作用, 反应器的进水端的填料会吸附一定的悬浮物, 除部分被降解外, 其余将成为生物膜的一部分(其中包括一定的非活性物质), 所以进水端的生物量最大, 之后逐渐减少。由于进水端的生物膜中含有一定的非活性物质, 随着滤层加深, 填料吸附的悬浮物质逐渐减少而使其比例也随之减少, 所以长期运行后 0.6 m处生物膜活性略有增加。0.6 m 之后, 由于生物量逐渐减少而使生物活性亦迅速降低。

上述生物量和生物膜活性的变化情况也可以从不同填料层高度范围的 COD_{Cr} 去除率中得到体现。由图 4(进水 COD_{Cr} 46.7 mg/L, 温度 19~24 ℃, 滤速 1 m/h) 可以看到, 层高在 0~0.2 m 范围与 0.4~0.6 m 范围相比, 虽然 COD_{Cr} 的去除率下降, 但并不十分明显。这可以解释为, 对有机底物的降解是生物量和

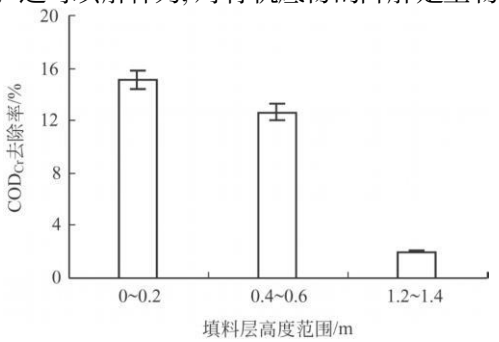


图 4　不同层高范围的 COD_{Cr} 的去除率

和生物膜活性二者综合作用的结果, 进水端虽然生物膜较厚、生物量较大, 但具有代谢活性的只是其中的部分活性生物量, 而且由于生物膜较厚, 底物、DO 的扩散亦受到影响; 中间段生物膜较薄, 但活性生物量比例较高, 因此同样具有较高的有机物净化能力。

3　结论

本文研究了 O_3—BAF 联合工艺深度处理城市污水二级出水 BAF 系统的生物量及生物膜特性。结果表明, 在二级出水的低有机底物(COD_{Cr} 40~60 mg/L) 情况下, BAF 系统内生物相仍十分丰富, 系统内活跃着细菌、真菌、藻类、原生动物和后生动物等微生物种群。沿水流方向不同填料层高度处, 微生物种群组成各有特点。异养菌、自养菌的分布特性与沿层有机物降解和硝化作用规律一致。进水端自养菌占优势, 曝气生物滤池的推流式特点使得反应器内的有机底物浓度、营养物浓度、DO 浓度等沿水流方向呈现梯度变化的趋势, 使得在水流方向上逐层形成基于上述条件的不同代谢类型的微生物优势种群。随着填料滤层加深, 生物膜的生物量呈递减趋势, 0~0.6 m 范围内更显著, 之后趋于缓慢; 生物膜的生物活性在 0.6 m范围内略有增加, 0.6 m 以上则明显递减。

参考文献

1　Wang S T, Ma J, Liu B C, et al. Degradation characteristics of secondary effluent of domestic wastewater by combined process of ozonation and biofiltration. J. of Hazardous Materials, 2008, 150 (1): 109~114

2　王树涛, 马军, 田海, 等. 臭氧预氧化/曝气生物滤池污水深度处理特性研究. 现代化工, 2006, 26(11): 32~36

3　国家环保局. 水和废水分析方法. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002

4　于鑫, 张晓建, 王占生. 饮用水生物处理中生物量的磷脂法测定. 给水排水, 2002, 28 (5): 1~4

5　白羽, 张杰, 陈淑芳. 生物滤池反冲洗过程中生物量和生物活性分析. 化工学报, 2004, 55 (10): 1690~1695

6　乔铁军, 张晓健. 原位基质摄取速率法检测微生物活性. 中国给水排水, 2003, 19 (13): 77~80

& 通讯处: 150090 哈尔滨工业大学 2 学区市政环境工程学院 2603 信箱　王树涛
电话: (0451) 86283010
E-mail: wshutao@yahoo.com.cn
收稿日期: 2008-12-10

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net