扩展流好氧滤池的复合脱氮特性

陈秀荣[1]， 冀滨弘[2]， 张 杰[3]
(1. 同济大学 环境科学与工程学院，上海 200092; 2. 深圳市水务局，广东 深圳 518030;
3. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院，黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 为实现高效低耗脱氮，对扩展流好氧滤池的除碳、脱氮特性进行了研究，结果表明滤层内存在复合脱氮过程，相应的系统环境条件：DO为 1.5～2.5 mg/L、运行周期为 10 d左右、滤层内 COD≤25 mg/L、生物膜结构稳定，此时脱氮过程以异养反硝化和厌氧氨氧化为主，且两种作用在竞争中达到平衡。

关键词: 扩展流好氧滤池; 复合脱氮; 厌氧氨氧化
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-4602(2005)03-0017-05

Characteristics of Combined Removal of Nitrogen by Expanding Flow Aerobic Filter

CHEN Xiu-rong[1], JI Bin-hong[2], ZHANG Jie[3]
(1. *School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*; 2. *Shenzhen Water Resource Bureau, Shenzhen* 518030, *China*; 3. *School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150090, *China*)

Abstract: In order to realize efficient removal of nitrogen with low energy, the characteristics of carbon and nitrogen removal in expanding flow aerobic filter were studied. The result shows that there exists combined removal of nitrogen in filter layer, and the environmental conditions in the system are determined as follows: DO level is 1.5-2.5 mg/L, operation period is around 10 d, COD in filter layer is≤25 mg/L, and biofilm structure is stable. Here, the nitrogen removal is dominated by heterotrophic denitrification and anaerobic ammonia oxidation, and the both reactions are balanced by competition.

Key words: expanding flow aerobic filter; combined removal of nitrogen; anaerobic ammonia oxidation

1 试验设计及方法

1.1 原水水质

原水取自滨河污水厂二级出水，原水及处理水水质见表 1。

表 1 主要水质指标

Tab. 1 Water quality indexes

项目	COD / (mg·L^{-1})	BOD_5 / (mg·L^{-1})	pH	NH_4^+-N / (mg·L^{-1})	NO_2^--N / (mg·L^{-1})	NO_3^--N / (mg·L^{-1})	有机氮 / (mg·L^{-1})	TN / (mg·L^{-1})
原水水质	35～50	11～20	7～7.5	15～25	0.5～1.5	1～2	<1	20～30
处理水质	<20	<5	6～8	6～8	0.1	6～8	<1	12～16

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目(GOOC1808201)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2 设计参数

滤池的滤料选择多孔陶粒填料,平均粒径为 4.71 mm(形状系数为 0.63),滤床空隙率为 43%,真实密度为 1.51 g/cm^3,堆积密度为 0.86 g/cm^3。图 1为扩展流好氧滤池的结构简图。

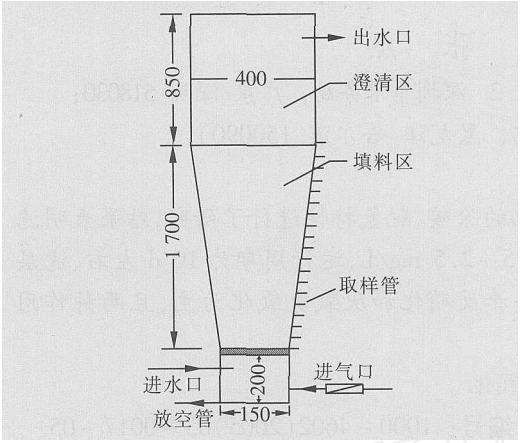

图 1 扩展流好氧滤池结构简图

Fig 1 Sketch of expanding flow aerobic filter

可以看出,扩展流好氧滤池是进口为 150 mm、出口为 400 mm、高为 1 700 mm的倒置圆台体,采用气、水同向流的升流式过滤和反冲洗。扩展流滤床结构的优点主要体现在:一方面,正常过滤时滤床内由下到上沿水流方向底物浓度逐步降低,使得滤床下部菌群活性高、数量多、生物膜厚、除污速率快,而上部菌群活性差、数量少、生物膜薄、除污速率慢,但滤床沿程截面扩展的结构使得上部滤层内水力停留时间沿程增加,在一定程度上弥补了除污速率慢导致的效率降低;另一方面,在反冲洗过程中整个滤床上下不同截面和同一截面内的流速分布是变化的,即上部流速小,下部流速大,中间流速大,周边流速小。流速分布的差异使滤层形成了从中间向边壁的循环置位运动,不仅加剧了滤料颗粒的碰撞摩擦,而且气/水扫洗和滤料运动携带作用联合使脱落的生物膜加速脱离滤床,改善了反冲洗效果。在适当强度下滤层的循环运动使下段附着丰富活性菌群的滤料与上段菌群含量少且活性差的滤料发生置位,使滤床下部被剧烈冲脱的活性生物膜在上段适当蓄积,从而在反冲后只需短暂的稳定,上段滤床的除污能力便立即发挥出来,维持着下段生物膜再次成熟前稳定的出水水质,体现为反冲后滤床效能恢复较快。正常过滤和反冲洗过程的多次交替后,扩展流滤床内沿程菌群及生物膜分布逐步均匀,提高了整体滤床的利用率,除污效率也得以提高。

2 试验结果及分析

试验历时 9个月,扩展流好氧滤池的适宜滤速为 8～10 m/h,以下着重分析 DO和运行周期对滤池内氮转化过程的影响。

2.1 DO对氮转化效能的影响

扩展流好氧滤池的滤速为 10 m/h,对应出水区不同 DO水平时,不同厚度滤层对 TN转化效能的影响如图 2所示。

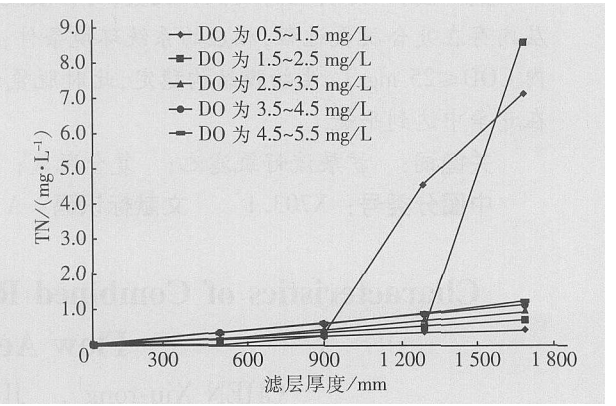

图 2 不同 DO水平下各滤层的 TN损失量

Fig 2 TN removal at various DO levels

由图 2可知,DO > 2.5 mg/L时滤层沿程 TN缓慢、均匀地降低,整个滤池内 ΔTN($TN_{进水}$ - $TN_{出水}$)为 1.00 mg/L左右,可判断 TN损失是由生物同化作用引起的;DO为 1.5～2.5 mg/L时,ΔTN最大值达 8.58 mg/L,且集中于出水段 400 mm滤层处;DO < 1.5 mg/L时,900～1 300 mm滤层处 ΔTN增至 4.58 mg/L,1 300～1 700 mm滤层处 ΔTN则降为 2.57 mg/L。

经对比可知,最适 DO为 1.5～2.5 mg/L,DO过高或过低对 TN去除效果都有影响。DO过高时生物膜内部处于完全好氧状态,生物膜内只存在硝化、同化过程,因此氮去除量很少;DO降低到一定水平时,生物膜内层出现厌氧或缺氧区,外层生物膜仍为好氧状态,生物膜内菌群种类丰富,发生了复合生化过程,其结果是 TN损失显著;而 DO过低时,生物膜内原有的菌群平衡将被打破,使脱氮效率降低。

2.2 运行周期对氮转化效能的影响

选择滤速为 10 m/h、DO为 1.5～2.5 mg/L,分别以 1、3…15 d为运行周期,考察周期末出水氨氮、硝酸盐氮和 TN的变化,结果如图 3所示。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

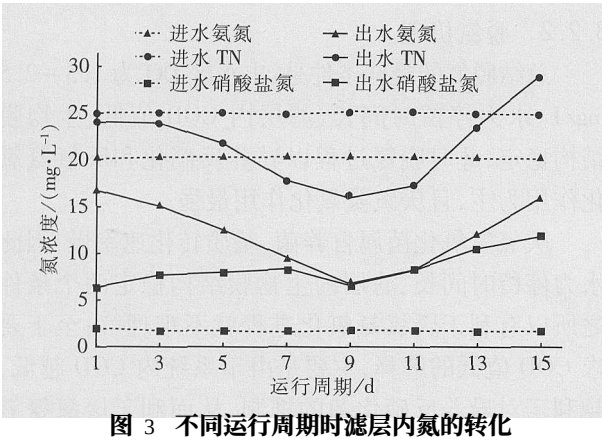

图 3　不同运行周期时滤层内氮的转化

Fig 3　Nitrogen variation at various operating periods

由图 3可知,随运行周期的延长,出水 TN、硝酸盐氮和氨氮浓度皆经历了先降低、后升高的变化过程,谷值出现在运行周期为 7～11 d时脱氮效果显著,对应出水 TN的最低值为 16 mg/L,出水氨氮和硝酸盐氮浓度皆为 7. 5～8. 0 mg/L。

3　对脱氮过程的分析

3. 1　脱氮过程

现控制出水区滤层处于最佳的脱氮条件 (运行周期为 10 d、DO <2. 5 mg/L),对滤层内的反应过程作简要的推断:

① 由于滤层中外碳源较少 (BOD_5 <5 mg/L),当 DO >1. 5 mg/L时,可判断生物膜外层会发生硝化反应;

② 生物膜厚度 >0. 1 mm时,内部即存在厌氧微环境[1],而在试验中发现只有运行周期的中后期即生物膜厚度较大时,才有 TN大量损失,因此脱氮时存在反硝化;

③ 由 BOD_5 ∶TKN <0. 25可知,反硝化外碳源不足,因此存在以生物膜为碳源的内源反硝化;

④ DO <1 mg/L时硝化过程会被抑制在亚硝化阶段[2]。生物膜较厚时,氧的传递阻力较大,因此出水区 DO <2. 5 mg/L时认为膜内部 DO已降低到只能满足亚硝化过程的程度。由于无亚硝酸盐氮积累,故认为亚硝酸盐氮直接参与了反硝化过程。

综上所述,初步判断脱氮滤层内同时存在自氧氨氧化、同化、自养亚硝化、传统异养反硝化 (含内源反硝化)过程。

实践证明,在众多的氨氧化途径中,以亚硝酸盐氮为电子受体、氨氮为电子供体的氨氧化发生率 >99%[3]。故以氨氮与亚硝酸盐氮反应生成氮气的反应为氨氧化的主导反应。

综上认为滤层内的脱氮过程为:DO受限时,部分氨氮被亚硝化菌氧化为亚硝酸盐氮,同时生物膜内部厌氧层中的异养反硝化菌将系统中的硝酸盐氮还原为亚硝酸盐氮。以上两种途径产生的亚硝酸盐氮可进一步经过两种生化途径被还原为氮气:其一是厌氧氨氧化菌以系统中的氨氮为电子供体,将亚硝酸盐氮还原为氮气,其二是异养反硝化菌以水中 COD和生物膜体为电子受体,继续将亚硝酸盐氮还原为氮气。

3. 2　特性分析

3. 2. 1　脱氮过程核算

已知脱氮滤层内发生了复合生化过程,为了透析其中的硝化过程,需要根据已知硝化曲线族,通过近似回归的方法进行预测。将各态氮和有机物好氧降解的预测值与实测值复合后,可得到异养、自养脱氮过程中各指标的转化,从而判断异养、自养脱氮发生的比例。低 DO时出水段滤层的氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、TN、COD的实测值与预测值见表 2。

表 2　低 DO水平下出水段滤层各指标变化

Tab. 2　Variation of effluent indexes in expanding filter upside layer at low DO levels

DO:	滤层	COD/(mg·L⁻¹)			氨氮/(mg·L⁻¹)			亚硝酸盐氮/(mg·L⁻¹)			硝酸盐氮/(mg·L⁻¹)			ΔTN/(mg·L⁻¹)		
	/mm	实测	预测	x	实测	预测	y	实测	预测	m	实测	预测	z	实测	预测	w
0. 5～1. 5 mg/L	1 300	20. 81	27. 21	6. 4	14. 63	15. 23	0. 6	0. 30	-	1. 4	2. 95	5. 15	2. 2	4. 58	0. 38	4. 2
	1 700	29. 86	19. 36	-10. 5	15. 32	13. 39	-1. 93	0. 28	-	1. 13	0. 38	3. 88	3. 5	2. 57	0. 07	2. 5
DO:	滤层	COD/(mg·L⁻¹)			氨氮/(mg·L⁻¹)			亚硝酸盐氮/(mg·L⁻¹)			硝酸盐氮/(mg·L⁻¹)			ΔTN/(mg·L⁻¹)		
	/mm	实测	预测	x	实测	预测	y	实测	预测	m	实测	预测	z	实测	预测	w
1. 5～2. 5 mg/L	1 300	24. 05	-	-	12. 24	-	-	0. 16	-	-	9. 77	-	-	0. 60	-	-
	1 700	12. 01	20. 89	8. 88	7. 46	9. 86	2. 4	0. 11	-	2. 23	6. 87	10. 1	3. 2	8. 58	0. 75	7. 83

注:① 表中预测硝化掉的氨氮与反硝化消耗掉的亚硝酸盐氮相当;
② 表中数值已考虑微量氨氮同化、进水中亚硝酸盐氮及有机氮硝化的影响。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由表 2可知,当 DO为 0.5～1.5 mg/L时,滤柱出水段 400 mm滤层处 COD实测值 >预测值,而且 1 700 mm高度出水 COD > 1 300 mm高度出水 COD,说明此时出水段 400 mm滤层内发生了膜溶解过程,可以根据膜溶解时内源反硝化的物质量对应关系求得生成的氨氮量。

根据预测及实测指标,经过计算整理得到各过程的脱氮量。

DO为 0.5～1.5 mg/L时

① 900～1 300 mm: x =6.4 mg/L、y =0.6 mg/L、z =2.2 mg/L、m =1.4 mg/L、w =4.2 mg/L;异养反硝化产氮气 2.90 mg/L;厌氧氨氧化产氮气 1.40 mg/L;内源反硝化产氨氮 0.10 mg/L。

② 1 300～1 700 mm: x = -10.5 mg/L、y = -1.93 mg/L、z =3.5 mg/L、m =1.13 mg/L、w =2.5 mg/L;异养反硝化产氮气 4.61 mg/L;厌氧氨氧化产氮气 0.06 mg/L;内源反硝化产氨氮 ≤0.60 mg/L;内源反硝化和膜溶解产氨氮之和为 2.17 mg/L。

DO为 1.5～2.5 mg/L时

③ 1 300～1 700 mm: x =8.88 mg/L、y =2.4 mg/L、z =3.2 mg/L、m =2.23 mg/L、w =7.83 mg/L;异养反硝化产氮气 3.02 mg/L;厌氧氨氧化产氮气 4.80 mg/L;内源反硝化产氨氮 0.005 mg/L。

将以上数据所反映的滤柱中异养反硝化和自养反硝化脱氮量用图 4表示。

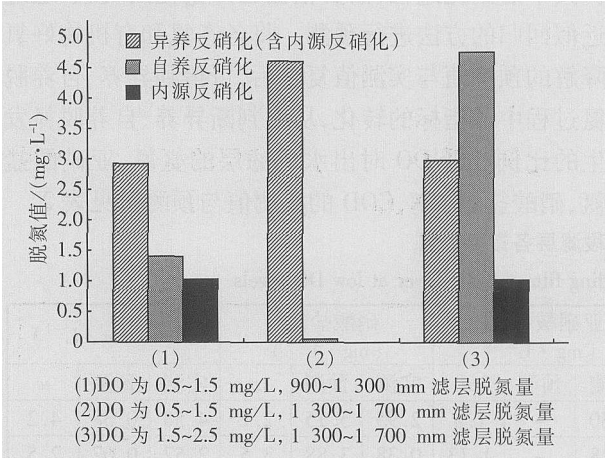

图 4　不同 DO水平时脱氮效果对照

Fig 4　Efficiencies of different nitrogen removal ways

由图 4可知,①中三种脱氮作用较均衡,②与 ③中各脱氮作用相差悬殊,③中脱氮效果最好,此时脱氮过程以异养反硝化和厌氧氨氧化作用为主,且厌氧氨氧化作用达到最强。

3.2.2　脱氮机理

总结脱氮的最佳条件是:出水区 DO为 1.5～2.5 mg/L、水力停留时间长、滤层内 COD值低、生物膜结构稳定,此时脱氮过程以异养反硝化和厌氧氨氧化作用为主,且厌氧氨氧化作用最强。

厌氧氨氧化菌属自养菌,基质转化速率慢,因此水力停留时间长、滤层内生物膜结构稳定两个条件之所以有利于厌氧氨氧化进程就不难理解;至于要求 COD值低的解释,主要是由于系统内 COD越低,越利于对异养反硝化菌的抑制,从而利于厌氧氨氧化菌的活动。

传统观点认为:生物膜在生长过程中,随厚度的增加膜内氧的传质阻力越来越大,内部逐步形成缺氧、厌氧层,因而稳定的生物膜结构为内层厌氧、外层好氧;同时,相同的环境条件下,利用同种底物的自养菌生长速率远小于异养菌,因此异养菌生长迅速并不断覆盖自养菌层,形成大部分外层异养、内层自养的生物膜结构。

以上分析可概括为:DO升高时,一部分 DO可传入缺氧、厌氧生物膜区,从而压缩异养缺/厌氧生物膜层,使其变薄,其中的菌群则会受到 DO的抑制而活性减弱;对于兼氧的异养反硝化菌来讲,进入该膜层的 DO还会同硝酸根、亚硝酸根竞争电子受体,此双重抑制使异养反硝化菌的反硝化能力减弱。在 DO升高到尚未大量进入自养厌氧层之前,自养厌氧层不但可保持完好的厌氧环境 (内部菌群活性高),而且异养厌氧层厚度的减小也增强了系统向自养厌氧层的传质过程,同时 C/N较低时,由于硝酸盐氮较亚硝酸盐氮更容易还原[4],此时活性受抑制的异养反硝化膜层的大部分产物是亚硝酸盐氮,这不仅为内层自养氨氧化菌群提供了电子受体,而且自养反硝化菌也为异养反硝化菌消除了代谢抑制,形成两者的互生关系。以上综合作用不仅促进了厌氧氨氧化的进程,也均衡了异养反硝化菌和自养反硝化菌的竞争,促进了整体脱氮效率的提高,此时脱氮效能最佳,对应的 DO为 1.5～2.5 mg/L。

当 DO继续升高时,DO在生物膜内的传质效率也随之增加,当部分 DO传入自养厌氧层时,由于厌氧氨氧化菌对 DO敏感,极易受到抑制而失去活性[5],而此时异养厌氧层中 DO浓度更高,异养反硝化过程由于 DO的抑制而基本终止,此时的生物膜基本丧失了反硝化能力。从试验结果来看,当出水

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

区 DO >2.5 mg/L时滤层无明显的脱氮效果,因此抑制生物膜脱氮的 DO上限值为 2.5 mg/L。

当系统 DO值大大降低,使其在满足好氧层消耗后所剩无几,此时好氧菌活性受抑制,好氧层厚度减小,因而从系统传入异养反硝化层的底物浓度增加,促进了异养反硝化效率的提高;同时由于异养厌氧层中 DO抑制的消除导致菌群活性增强,异养厌氧层增厚。在异养反硝化菌与自养氨氧化菌争夺底物 (亚硝酸盐氮)的过程中,不仅由于其自身基质转化能力高而处于优势,而且厚度增大的异养厌氧层严重阻碍了底物向内部自养厌氧层的传质,因而自养氨氧化菌活性减弱,体现为两种脱氮作用比例失调。当碳源浓度低而不能满足异养反硝化菌需求时,异养反硝化菌将以生物膜体为碳源发生内源反硝化,由于内源反硝化伴随着氨氮的释放,不仅效率低,而且还会严重破坏生物膜结构,造成生物膜大量解体、出水 COD骤然升高。以上分析与 DO为 0.5～1.5 mg/L时,出水段 1 300～1 700 mm滤层处的脱氮现象接近,此时扩展流滤层通过膜溶解和内源反硝化向系统释放氨氮量达 2.17 mg/L,占总脱氮量 (4.67 mg/L)的 46%,相当于使实际脱氮效率降低到 54%。

通过分析可知,保证高效脱氮的关键是:适当降低异养反硝化效率,提高自养反硝化效率,使二者比重均衡,形成两种菌群在反硝化中的互生关系。

4　结论

① 复合脱氮过程发生的适宜条件为:滤速为 8～10 m/h、DO为 1.5～2.5 mg/L、运行周期为 10 d左右、滤层内 COD≤25 mg/L、滤层内生物膜结构相对稳定。此时出水段 400 mm滤层处氨氮、硝酸盐氮和 TN损失量分别为 4.78、2.9和 7.98 mg/L。

② 复合脱氮过程包括同化、自养亚硝化、传统异养反硝化 (包括内源反硝化)和厌氧氨氧化过程。具体为:系统内部分氨氮被亚硝化菌氧化为亚硝酸盐氮,同时生物膜内部厌氧层中的异养反硝化菌将系统中的硝酸盐氮还原为亚硝酸盐氮;以上两种途径产生的亚硝酸盐氮可进一步经过两种生化途径被还原为氮气,其一是厌氧氨氧化菌以系统中的氨氮为电子供体,将亚硝酸盐氮还原为氮气,其二是异养反硝化菌以水中 COD和生物膜体为电子受体,继续将亚硝酸盐氮还原为氮气。

③ 保证滤层高效脱氮的关键是适当降低异养反硝化效率,增强自养反硝化效率,并使二者比重较均衡,以维系两种菌群在反硝化中稳定的互生关系。

参考文献:

[1] 谢曙光,张晓健,王占生. 地表水处理中的好氧反硝化[J]. 中国给水排水, 2002, 18(3): 7-9.

[2] Laanbroek H J, Gerards S. Competition for limiting amounts of oxygen between nitrosomanas europaea and nitrobacteria winogradskyi grown in mixed continuous cultures[J]. Arch Microbiology, 1993, 159: 453-459.

[3] Graaf A A. Metabolic pathway of anaerobic ammonium oxidation on the basis of ^{15}N studies in a fluidized bed reactor[J]. Microbiology, 1997, 143: 2415-2421.

[4] Hiroki Itokawa, Keisuke Hanaki, Tomonori Matsuo. Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low COD/N ratio condition[J]. Wat Res, 2001, 35(3): 657-664.

[5] Graaf A A. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. Microbiology, 1996, 142: 2187-2196.

作者简介:陈秀荣 (1975-　), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士后, 研究方向为水处理技术。

电话: (027) 85613136

E-mail: chenxiurong@vip.sina.com

收稿日期: 2004-11-08

·工程信息·

北京北苑污水处理 (一期)工程

处理规模: 4×10^4 m^3/d,投资总额: 5 900万元,关键设备:刮泥机、离心机、浓缩机、格栅、曝气机、过滤池、沉淀池,建设周期: 2005年—2006年,进展阶段:正在报批可研。建设单位: 北京威立雅污水处理有限公司,设计单位:天津市市政工程设计研究院。

(BHI中国拟在建项目网)

咨询电话: 010-68571248/0891

http://www.bhi.com.cn

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net