

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.012

强化脱氮 MBBR 中活性生物量的测定及其分布

陈珊珊¹, 王晓东¹, 周小琳¹, 樊星¹, 孙贤鹏², 毕学军¹,
哈沙·拉特纳维拉¹

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛市排水运营服务中心, 山东 青岛 266000)

摘要: 设计开发了强化脱氮移动床生物膜反应器(MBBR)中试系统,采用耗氧呼吸速率法研究了各反应单元中的活性生物量分布情况,并分析了不同进水负荷对各单元中活性生物量的影响。研究发现,各反应单元生物膜中的异养活性生物量占比均在60%以上。缺氧单元每个填料上的异养活性生物量平均为0.56~0.86 mg/L(以COD计,下同),好氧单元的自养活性生物量占比可达到37.6%。此外,当SCOD负荷增加0.80~9.70 g/(m²·d)时,异养活性生物量可增加0.19~0.53 mg/L;当氨氮负荷增加0~1.15 g/(m²·d)时,自养活性生物量可增加0~0.11 mg/L。

关键词: 移动床生物膜反应器; 耗氧呼吸速率; 自养活性生物量; 异养活性生物量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0073-05

Determination of Active Biomass and Its Distribution in Enhanced Denitrification MBBR

CHEN Shan-shan¹, WANG Xiao-dong¹, ZHOU Xiao-lin¹, FAN Xing¹,
SUN Xian-peng², BI Xue-jun¹, HARSHA Ratnaweera¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. Qingdao Drainage Operation Service Centre, Qingdao 266000, China)

Abstract: A pilot-scale enhanced denitrification MBBR was developed. The distribution of the active biomass in each unit was investigated by oxygen uptake rate method, and the effects of different influent loads on the active biomass in each unit were analyzed. The proportion of heterotrophic active biomass in biofilm of each unit was more than 60%. The average heterotrophic active biomass of each filler in anoxic unit was between 0.56~0.86 mg/L, and the proportion of autotrophic active biomass in aerobic units accounted for 37.6%. When SCOD load increased by 0.80~9.70 g/(m²·d), heterotrophic active biomass increased by 0.19~0.53 mg/L. When ammonia nitrogen load increased by 0~1.15 g/(m²·d), autotrophic active biomass increased by 0~0.11 mg/L.

Key words: MBBR; oxygen uptake rate; autotrophic active biomass; heterotrophic active biomass

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908303); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101-002)

通信作者: 王晓东 E-mail: wangxiaodong@qut.edu.cn

移动床生物膜反应器(MBBR)凭借其紧凑的结构、较高的活性生物量和稳定的去除效果等诸多优点,被广泛用于污水处理厂的新建及升级改造项目中^[1-2]。MBBR系统中的微生物以生物膜的形式在填料上附着生长,生物膜的活性生物量是影响系统处理效果的重要因素^[3]。生物膜中的微生物可分为自养型和异养型两类,自养微生物的活性和数量直接影响氨氮的去除效果,异养微生物的活性生物量则与COD的去除以及反硝化过程密切相关。由于同一个MBBR系统中各个独立的反应区对悬浮填料的拦截,在环境选择作用下各反应区形成了不同的微生物分布。Ochoa等人利用耗氧呼吸速率(OUR)法对混合生物反应器中生物膜和活性污泥系统的生物量分布进行了测定^[4];Wang等人研究了缺氧/好氧/好氧三段式纯生物膜MBBR系统中各单元的微生物群落结构,并采用OUR法测定了异养微生物与自养微生物的活性生物量^[5]。而目前对更加复杂的强化脱氮MBBR系统中各单元的活性生物量及其分布情况的研究尚不充分。鉴于此,笔者采用OUR法测定强化脱氮MBBR中试系统中各反应单元的自养和异养活性生物量,分析其在各反应单元的分布情况,并进一步研究了不同进水负荷条件下各反应单元的活性生物量变化,以期为MBBR系统的优化设计、运行与控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 MBBR中试系统

MBBR中试系统工艺流程如图1所示。系统进水为青岛市某污水处理厂预处理阶段的高效沉淀池出水,经调节池进入MBBR中试系统。该系统由8个相同规格的有机玻璃圆柱形反应器串联组成,单个反应器高度为1.7 m,设计水深为1.4 m,直径为

0.8 m,有效容积为0.7 m³;各反应器分别在缺氧(A1)、缺氧(A2)、好氧(O3)、好氧(O4)、好氧(O5)、缺氧(A6)、缺氧(A7)、好氧(O8)条件下运行。试验用填料为青岛市某污水处理厂好氧MBBR区已挂膜的悬浮填料,填料密度为0.97 g/cm³,有效比表面积为500 m²/m³,好氧区填充率为50%,缺氧区填充率为40%,各反应器出水管为圆柱形筛网,孔径为15 mm,小于填料直径,以确保上游反应器的填料不会流到下游反应器。为保证各反应单元良好的流化状态,通过剪切力维持良好的有效生物膜厚度,缺氧单元采用机械搅拌,搅拌转速约为100 r/min,将溶解氧浓度控制在0.2~0.6 mg/L;好氧单元采用单侧穿孔曝气,控制溶解氧浓度始终高于6 mg/L,保证适当的氧传质效率。通过调节进水换热装置和室内温度来实现对中试系统温度的调控。硝化液由O5回流到A1,回流比为100%,A6中投加适量乙酸钠作为碳源进行后置反硝化。本研究设置两个工况,工况I的进水流量为12 m³/d、总水力停留时间(HRT)为11.2 h,工况II的进水流量为14.4 m³/d、总HRT为9.3 h。

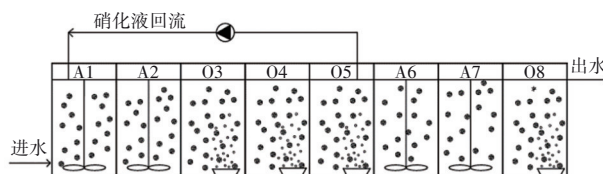


图1 MBBR中试系统工艺流程

Fig.1 Diagram of pilot-scale MBBR system

1.2 水质检测

每天收集系统进水及各反应单元出水进行水质检测,各水质指标均采用国家标准方法测定,结果如表1所示。

表1 MBBR系统进水及各反应单元出水水质

Tab.1 Quality of influent and effluent in MBBR system

mg·L⁻¹

项目	进水	A1出水	A2出水	O3出水	O4出水	O5出水	A6出水	A7出水	O8出水
SCOD	77~187	20~43	25~42	8~27	6~24	0~24	28~86	3~45	0~24
NH ₄ ⁺ -N	33.65~46.35	16.50~22.80	12.05~17.10	6.00~16.55	0~6.20	0~3.05	0~2.55	0~7.85	0~4.05
NO ₂ ⁻ -N	0	0~0.05	0~0.70	0.05~0.45	0~0.25	0~0.15	0.25~0.55	0~0.85	0~0.75
NO ₃ ⁻ -N	0~2.60	0~8.10	0~6.60	0.10~11.90	10.85~19.60	8.75~22.25	0.50~12.95	0~4.55	0~9.10

1.3 耗氧呼吸速率测试和活性生物量测定

本研究通过耗氧呼吸速率测试来量化异养微生物和自养微生物的活性生物量。试验采用密闭式测量方法,用便携式溶解氧仪实时记录溶解氧浓

度,用温度计记录温度。

① 从MBBR中试系统各个反应单元中定量取出填料,用自来水冲洗3~5次。

② 将填料置于5 L的容器中,活性微生物的

耗氧活动可分为三个阶段。第一阶段:开启曝气,当溶解氧浓度上升到9 mg/L以上时停止曝气,同时开启搅拌装置,不投加药剂,记录温度并实时记录溶解氧浓度,待浓度下降到0.2 mg/L时停止记录,此阶段为活性微生物的内源呼吸作用。第二阶段:开启曝气,当溶解氧浓度上升到9 mg/L以上时停止曝气,开启搅拌装置,投加20 mg/L的氯化铵溶液,实时记录溶解氧浓度,待溶解氧浓度降到0.2 mg/L时停止记录,此阶段主要进行自养型微生物的代谢活动及异养型微生物的内源呼吸活动。第三阶段:开启曝气,当溶解氧浓度上升到9 mg/L以上时停止曝气,开启搅拌装置,投加20 mg/L的氯化铵溶液、250 mg/L的碳源(以COD计)和20 mg/L的硝化抑制剂ATU(以N计),实时记录溶解氧浓度,待溶解氧浓度下降到0.2 mg/L时停止记录,因为加入了足量的硝化抑制剂抑制了自养型微生物的代谢活动,所以本阶段全部为异养型微生物的代谢活动。则有:内源呼吸速率 $OUR_{en}=OUR_1$;自养菌耗氧速率 $OUR_A=OUR_2-OUR_1$;异养菌耗氧速率 $OUR_H=OUR_3$ 。

③ 采用活性污泥模型ASM1中的公式[见式(1)和式(2)]计算异养和自养活性生物量。由于试验过程中COD和氨氮的量是充足的,因此可将式(1)和式(2)进一步简化得到式(3)和式(4),由此计算得出异养和自养活性生物量。

$$\frac{dS_0}{dt} = \mu_{H,Max} \cdot \frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot \frac{S_s}{K_s + S_s} \cdot \frac{S_0}{K_{O,H} + S_0} \cdot X_H \quad (1)$$

$$\frac{dS_0}{dt} = \mu_{A,Max} \cdot \frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_0}{K_{O,A} + S_0} \cdot X_A \quad (2)$$

$$X_H = \frac{1}{\mu_{H,Max}} \cdot \frac{Y_H}{1 - Y_H} \cdot OUR_{H,Max} \quad (3)$$

$$X_A = \frac{1}{\mu_{A,Max}} \cdot \frac{Y_A}{4.57 - Y_A} \cdot OUR_{A,Max} \quad (4)$$

式中: S_0 为溶解氧浓度,mg/L; $\mu_{H,Max}$ 为异养菌的最大比增长速率, d^{-1} ; $\mu_{A,Max}$ 为自养菌的最大比增长速率, d^{-1} ; Y_H 为异养菌的产率系数,gCOD/gCOD; Y_A 为自养菌的产率系数,gCOD/gN; S_s 为易生物降解COD浓度,mg/L; S_{NH} 为氨氮浓度,mg/L; K_s 为异养菌的COD半饱和系数,mg/L; K_{NH} 为自养菌的氨氮半饱

和系数,mg/L; $K_{O,H}$ 为异养菌的氧气半饱和系数,mg/L; $K_{O,A}$ 为自养菌的氧气半饱和系数,mg/L; X_H 为异养活性生物量,mg/L(以COD计,下同); X_A 为自养活性生物量,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 呼吸速率测试

MBBR中试系统中各反应单元的耗氧呼吸速率测定结果如图2所示。

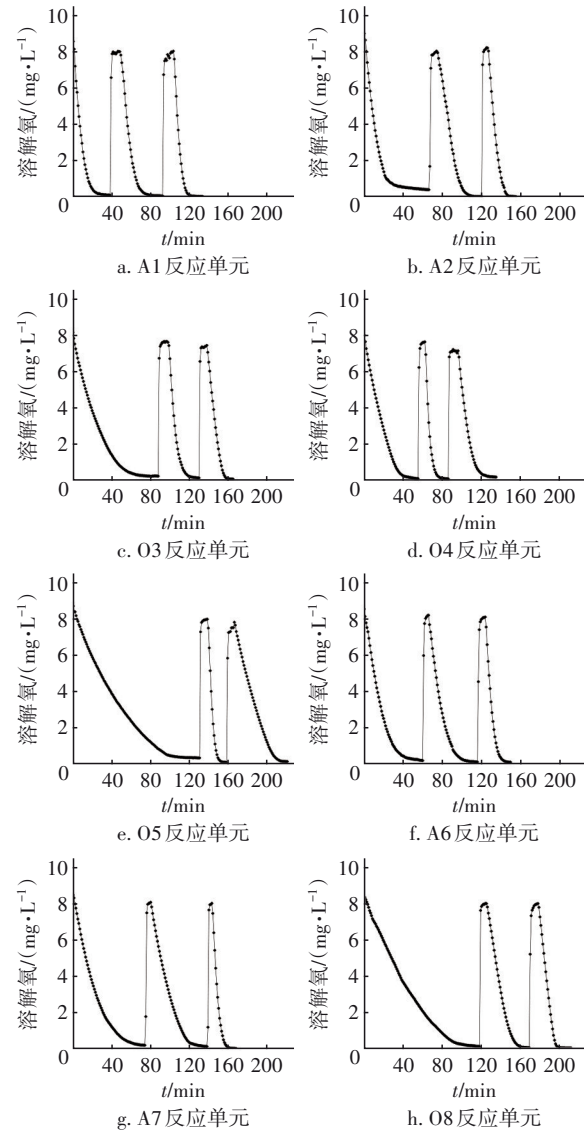


图2 MBBR中试系统中各反应单元的耗氧呼吸速率

Fig.2 Oxygen uptake rate of each unit in MBBR pilot system

由图2(a)、(b)、(f)、(g)第三阶段溶解氧浓度急剧下降的趋势可知,A1、A2、A6、A7四个缺氧反应单元的填料上附着生长着大量的异养微生物,而图2(c)、(d)、(e)、(h)中第二阶段溶解氧浓度下降速度

较快,说明O3、O4、O5、O8四个好氧反应单元的填料上有一些自养微生物附着生长。

在本研究中,当溶解氧浓度为4~8.07 mg/L时,溶解氧浓度与时间呈线性关系,故选取该区间部分计算稳态OUR,结果如表2所示。各反应单元中的 OUR_H 均大于0,说明各反应单元中的填料上均有异养微生物附着生长。在四个缺氧反应单元中,A1、A2和A7的 OUR_A 均为0,可知这三个反应器中不存在自养微生物,反应单元A6中的自养活性生物量所占比例较小(OUR_A 远小于 OUR_H),四个反应单元中都有大量异养微生物(如反硝化菌)进行反硝化作用,其中A1的 OUR_H 最大,为59.70 $mgO_2/(L \cdot h)$ 。而四个好氧反应单元中的 OUR_A 均较高,说明这四个反应单元中均有自养微生物,其中O4的 OUR_A 最大,为57.26 $mgO_2/(L \cdot h)$,说明O4的自养活性生物量最多。

表2 各反应单元中自养活性微生物和异养活性微生物的OUR

Tab.2 OUR of autotrophic and heterotrophic biomass in each unit $mgO_2 \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$

项目	A1	A2	O3	O4	O5	A6	A7	O8
OUR_H	59.70	29.58	30.11	27.71	12.90	49.03	54.47	30.35
OUR_A	0	0	30.36	57.26	54.61	5.26	0	13.12

2.2 自养与异养微生物的活性生物量及分布

采用式(3)和(4)计算各反应单元中的自养与异养活性生物量,因本试验的环境温度并非ASM1的标准温度(20℃),故需要对最大比增长速率进行温度校正,如式(5)和式(6)所示,温度系数采用ASM2的建议值($a_H=1.07$, $a_A=1.12$)。其余参数使用ASM1的默认值: $Y_H=0.67$ gCOD/gCOD, $Y_A=$

0.24 gCOD/gN, $\mu_{H,Max,20}=6 d^{-1}$, $\mu_{A,Max,20}=0.8 d^{-1}$ 。

$$\mu_{H,Max} = \mu_{H,Max,20} \cdot a_H^{T-20} \quad (5)$$

$$\mu_{A,Max} = \mu_{A,Max,20} \cdot a_A^{T-20} \quad (6)$$

各反应单元中每个填料上的自养与异养微生物的活性生物量和比例如表3所示。各反应单元中的微生物均以异养活性微生物为主,占比均在60%以上;A1中的活性生物总量最高,为0.86 mg/L,且全部为异养活性微生物,这是因为A1位于整个系统的最前端,其中有足量的可生物降解COD,为异养活性微生物的生长提供了充足的营养物质。O4、O5中的自养活性生物量最高,为0.11 mg/L,这是因为MBBR系统对填料的截留作用使得各反应单元保持了较高的微生物停留时间,为一些慢速生长的微生物(如硝化细菌)提供了很好的生长条件^[6],此外,低C/N的环境也有助于自养活性微生物的生长^[7]。而O3中填料上的自养活性生物量较低,原因是主要的硝化反应发生在O4和O5中,O3虽处于好氧条件下,但依旧进行着一部分异养代谢活动,因此异养活性微生物仍占优势。绝大部分的COD、氨氮等基本在前五个反应单元中被去除完毕,A6、A7和O8作为保障单元运行,由于在A6投加了乙酸钠碳源,A6、A7的活性生物总量有所增加,分别为0.57、0.60 mg/L。A6中的填料上有少部分的自养活性微生物附着,分析是由于污水流入A6时,携带了部分溶解氧进入,为自养微生物的生长创造了条件,但其自养活性微生物比例较低(1.5%),可忽略不计。O5、O8中的活性生物总量较低,原因是绝大部分的可生物降解有机物在A1、A2及A6和A7中被去除,可生物降解COD成为这两个反应单元中微生物生长的限制条件。

表3 自养型与异养型微生物的活性生物量及比例

Tab.3 Active autotrophic and heterotrophic biomass and their proportions

项目	A1	A2	O3	O4	O5	A6	A7	O8
异养活性生物量/($mg \cdot L^{-1}$)	0.86	0.57	0.42	0.39	0.18	0.56	0.60	0.33
自养活性生物量/($mg \cdot L^{-1}$)	0.00	0.00	0.06	0.11	0.11	0.01	0.00	0.02
异养微生物比例/%	100	100	87.4	77.3	62.4	98.5	100	94.31
自养微生物比例/%	0	0	12.6	22.7	37.6	1.5	0	5.69

2.3 进水负荷对活性生物量的影响

在不同进水负荷工况下,各反应单元的SCOD和氨氮负荷见表4,自养与异养活性生物量如图3所示。可知,当进水SCOD和氨氮负荷增加时,各反应单元的活性生物总量均有所增加。在各缺氧单元

中,随着SCOD负荷的增加,异养活性生物量均有不同程度的增加,SCOD负荷增加0.80~9.70 $g/(m^2 \cdot d)$ 时,异养活性生物量可增加0.19~0.53 mg/L。在各好氧单元中,自养活性生物量随着氨氮负荷的增加而增加,氨氮负荷每增加0~1.15 $g/(m^2 \cdot d)$,自养活

性生物量可增加0~0.11 mg/L。

表4 不同工况下各反应单元的SCOD和氨氮负荷

Tab.4 SCOD loading and ammonia nitrogen loading of each unit under different operation conditions

项目	SCOD负荷				氨氮负荷			
	A1	A2	A6	A7	O3	O4	O5	O8
工况 I	14.71	10.24	2.13	5.94	2.43	2.23	1.00	0.49
工况 II	24.40	13.07	2.93	6.24	3.58	2.56	1.62	0.26

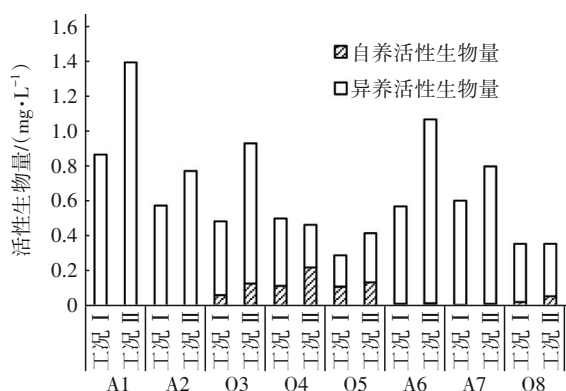


图3 不同工况下各反应单元的活性生物量

Fig.3 Biomass in each unit under different operation conditions

3 结论

① 强化MBBR中试系统中各反应单元的微生物均以异养微生物为主,占比均在60%以上;在缺氧单元(A1、A2、A6、A7)中,仅A6的填料上存在0.01 mg/L的自养微生物,其余全部为异养微生物,每个填料上的异养活性生物量分别为0.86、0.57、0.56和0.60 mg/L;各好氧单元(O3、O4、O5、O8)中均有不同含量的自养微生物存在,每个填料上的自养活性生物量分别为0.06、0.11、0.11和0.02 mg/L,其中O5中的自养微生物比例最大,为37.6%。

② 不同进水负荷工况下,在各缺氧单元,当SCOD负荷增加0.80~9.70 g/(m²·d)时,异养活性生物量可增加0.19~0.53 mg/L;而在各好氧单元,每增加0~1.15 g/(m²·d)的氨氮负荷,自养活性生物量可增加0~0.11 mg/L。

参考文献:

- [1] ØDEGAARD H. A road-map for energy-neutral wastewater treatment plants of the future based on compact technologies (including MBBR) [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, 10(4): 7-23.
- [2] DI BIASE A, KOWALSKI M S, DEVLIN T R, *et al.* Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 247: 849-866.
- [3] BISWAS K, TAYLOR M W, TURNER S J. Successional development of biofilms in moving bed biofilm reactor (MBBR) systems treating municipal wastewater [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, 98(3): 1429-1440.
- [4] OCHOA J C, COLPRIM J, PALACIOS B, *et al.* Active heterotrophic and autotrophic biomass distribution between fixed and suspended systems in a hybrid biological reactor [J]. *Water Science and Technology*, 2002, 46(1/2): 397-404.
- [5] WANG X D, BI X J, HEM L J, *et al.* Microbial community composition of a multi-stage moving bed biofilm reactor and its interaction with kinetic model parameters estimation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 218: 340-347.
- [6] HUANG C, SHI Y, XUE J, *et al.* Comparison of biomass from integrated fixed-film activated sludge (IFAS), moving bed biofilm reactor (MBBR) and membrane bioreactor (MBR) treating recalcitrant organics: importance of attached biomass [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 326: 120-129.
- [7] KUMAR M, LEE P Y, FUKUSHIMA T, *et al.* Effect of supplementary carbon addition in the treatment of low C/N high-technology industrial wastewater by MBR [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 113: 148-153.

作者简介:陈珊珊(1994-),女,山东济南人,本科,主要研究方向为污水生物处理建模及控制。

E-mail:3299168414@qq.com

收稿日期:2020-09-15

修回日期:2020-12-10

(编辑:刘贵春)