

微压内循环反应器与序批式反应器的污染物去除及污泥特性比较*

边德军^{1,2,3} 王喜超^{1,2} 艾胜书^{1,2,4} 王帆^{1,2} 刘松林^{1,2} 朱遂一^{1,3}

(1.吉林省城市污水处理重点实验室,吉林 长春 130012;2.长春工程学院水利与环境工程学院,吉林 长春 130012;

3.东北师范大学吉林省城市污水处理与水质保障科技创新中心,吉林 长春 130117;

4.吉林大学环境与资源学院,吉林 长春 130021)

摘要 微压内循环反应器(MPSR)是在序批式反应器(SBR)基础上研制的一种新型污水处理装置。重点从污泥特性方面对两个反应器进行了比较。结果表明,MPSR 稳定运行时对水中 COD、TP 和 TN 的平均去除率分别为 93.99%、98.72%、75.79%,SBR 稳定运行时对水中 COD、TP 和 TN 的平均去除率分别为 91.93%、95.92%、66.28%,说明 MPSR 对碳、氮、磷的去除能力强于 SBR,主要是 MPSR 的反硝化能力强于 SBR。MPSR 的总胞外聚合物(EPS)含量比 SBR 高,其中蛋白质与多糖的质量比也大于 SBR,因而 MPSR 的污泥沉淀脱水性能更强,除磷效果更好。MPSR 污泥粒径总体小于 SBR,有利于提高 MPSR 污泥的吸附能力。MPSR 和 SBR 的硝化能力基本相当,但反硝化能力 MPSR 大于 SBR。

关键词 微压内循环反应器 序批式反应器 污泥粒径 胞外聚合物 硝化 反硝化

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.11.001

Comparison of pollutants removal and sludge characteristics between micro-pressure swirl reactor and sequencing batch reactor BIAN Dejun^{1,2,3}, WANG Xichao^{1,2}, AI Shengshu^{1,2,4}, WANG Fan^{1,2}, LIU Songlin^{1,2}, ZHU Suoyi^{1,3}. (1.Key Laboratory of Urban Sewage Treatment of Jilin Province, Changchun Jilin 130012; 2.School of Water Conservancy & Environment Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130012; 3.Science and Technology Innovation Center for Municipal Wastewater Treatment and Water Quality Protection, Northeast Normal University, Changchun Jilin 130117; 4. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun Jilin 130021)

Abstract: Micro-pressure swirl reactor (MPSR) is a new type of sewage treatment device developed from sequencing batch reactor (SBR). The differences between the two reactors in terms of sludge characteristics were compared particularly. Results showed that the average removal rates of COD, TP and TN in the stable operation effluent of MPSR were 93.99%, 98.72% and 75.79%, respectively. The average removal rates of COD, TP and TN in the stable operation effluent of SBR were 91.93%, 95.92% and 66.28%, respectively. Therefore, MPSR had higher removal capacity for carbon, nitrogen and phosphorus, since denitrification of MPSR was stronger than SBR. Extracellular polymeric substances (EPS) content of MPSR was also higher than that of SBR, in which the mass ratio of protein to polysaccharide had the same pattern, indicating that MPSR had stronger water and phosphorus removal capacity. The particle size of MPSR sludge was generally smaller than that of SBR, so the former had stronger adsorption capacity. The nitrification rates of MPSR and SBR were equivalent, but the denitrification rates of MPSR was higher.

Keywords: micro-pressure swirl reactor; sequencing batch reactor; sludge particle size; extracellular polymeric substances; nitrification; denitrification

微压内循环反应器(MPSR)是在序批式反应器(SBR)基础上研制的一种新型污水处理装置。MPSR 通过增加反应器出口水位高度以产生微小压力来提高氧的传质效率,并使溶解氧(DO)在反应器内存在空间差异,形成厌氧、缺氧、好氧 3 种环

境,有利于污染物的去除。边德军^[1]利用智能流速仪和示踪粒子图像法研究分析 MPSR 内流速、DO 浓度分布显示,MPSR 内流速由外向内逐渐减小,外环流速高达 36 mm/s,而内环流速低于 3 mm/s; DO 浓度也呈现明显的由外向内的梯度变化,外环

第一作者:边德军,男,1967 年生,博士,教授,主要从事污水处理研究。

* 国家自然科学基金资助项目(No.51878067);吉林省科技发展计划项目(No.20180201020SF、No.20180101316JC);吉林省生态环境厅科研项目(No.2018-01)。

DO质量浓度达到2.02 mg/L,内环DO质量浓度低于0.05 mg/L。万立国等^[2]的研究结果显示,采用同一接种污泥,MPSR和SBR平行运行91个周期后,两个反应器内微生物种群数有明显差异。这可能是因为MPSR和SBR内部不同的DO环境及流态影响了微生物生长繁殖和代谢,进而影响污泥特性^[3-5]。

本研究在MPSR和SBR中接种同一污泥,通过对比研究MPSR和SBR在相同运行条件下的COD、TP、氨氮和TN去除效果,并对污泥胞外聚合物(EPS)、脱氢酶活性(DHA)、粒径以及硝化和反硝化速率等特性进行分析,重点尝试从污泥特性角度阐明两种反应器的区别。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行条件

实验装置见图1,两个反应器设计有效容积均为36 L。SBR尺寸为300 mm×300 mm×500 mm;MPSR主反应区直径900 mm,高度90 mm,微压力形成区130 mm×90 mm×400 mm。MPSR污泥样品为图1中9个点位的混合液样品,SBR污泥样品在反应器中液面下200 mm左右处取样。接种污泥取自长春市某污水处理厂曝气池,初始混合液悬浮固体(MLSS)质量浓度为2 000 mg/L。两个反应器每日均运行两个周期,每个周期12 h,采用非限制性曝气方式在进水开始的同时进行曝气(曝气量为1.5 L/min),进水共5 min,曝气共8 h,然后沉淀3 h,排水10 min,闲置50 min,污泥龄(SRT)为22 d,排水比为0.5,运行温度为(20±1)℃。

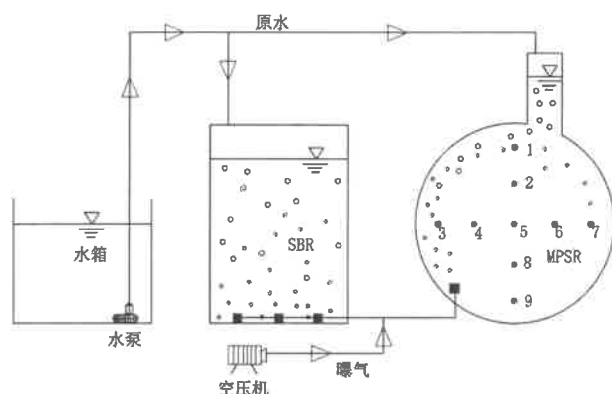


图1 实验装置示意图

Fig.1 Diagram of the experimental devices

1.2 污水水质

实验所用污水通过人工模拟配制,1 L污水中含淀粉0.13 g、牛肉膏0.02 g、蛋白胨0.02 g、乙酸钠

0.46 g、 NH_4Cl 0.13 g、 KH_2PO_4 0.015 g、 NaHCO_3 0.15 g、 MgSO_4 0.006 g、 CaCl_2 0.012 5 g、 FeSO_4 0.012 5 g、微量元素溶液1 mL。其中微量元素溶液组成为1 L溶液中含 ZnCl_2 0.05 g、 CuSO_4 0.02 g、 MnSO_4 0.027 g、 AlCl_3 0.05 g、 CoCl_2 0.023 g。

1.3 检测方法

出水水样中COD、TP、氨氮和TN均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准后,开始正式检测进出水污染物指标浓度,每两天检测一次,共检测27 d。水样经中性定性滤纸过滤后检测。同时,取污泥样品检测EPS、DHA、粒径、硝化和反硝化速率。

COD采用重铬酸钾法测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;TP采用钼酸铵分光光度法测定;硝态氮、亚硝态氮采用瑞士万通885离子色谱仪测定;MLSS采用重量法测定;EPS采用热提取法提取,其中的多糖采用蒽酮比色法测定,蛋白质采用Folin酚试剂法测定,均以单位质量MLSS中的EPS质量计;DHA采用2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定;粒径采用荷兰艾米德EyeTech激光粒度粒型分析仪测定;硝化与反硝化速率采用文献^[6]的方法测定。

2 结果与讨论

2.1 污染物去除效果

图2是两个反应器稳定运行期间的COD去除曲线。两个反应器进水COD平均质量浓度均为349.4 mg/L,SBR出水COD平均质量浓度为28.2 mg/L,平均去除率为91.93%;MPSR出水COD平均质量浓度为21.0 mg/L,平均去除率为93.99%。

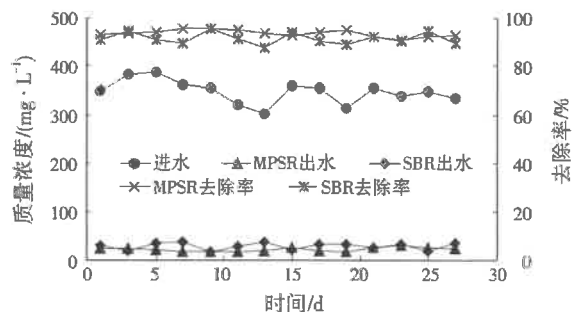


图2 COD去除曲线

Fig.2 Removal curve of COD

图3是两个反应器稳定运行期间的TP去除曲线。两个反应器进水TP平均质量浓度均为3.92 mg/L,SBR出水TP平均质量浓度为0.16 mg/L,

平均去除率为 95.92%；MPSR 出水 TP 平均质量浓度为 0.05 mg/L，平均去除率为 98.72%。

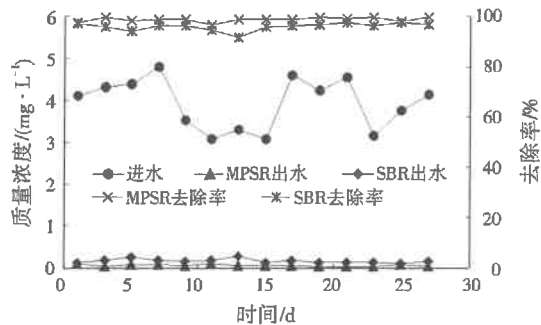


图 3 TP 去除曲线
Fig.3 Removal curve of TP

图 4 为两个反应器稳定运行期间的氮去除曲线。由图 4(a)可见，两个反应器进水 TN 平均质量浓度均为 34.7 mg/L，SBR 出水 TN 平均质量浓度为 11.7 mg/L，平均去除率为 66.28%；MPSR 出水 TN 平均质量浓度为 8.4 mg/L，平均去除率为 75.79%，MPSR 对 TN 的去除率比 SBR 高出 9.51 百分点。由图 4(b)可见，两个反应器进水氨氮平均质量浓度为 32.70 mg/L，SBR 出水氨氮平均质量浓度为 0.38 mg/L，平均去除率为 98.84%；MPSR 出水氨氮平均质量浓度为 0.40 mg/L，平均去除率为 98.78%，两反应器氨氮去除效果基本相同。由于 TN 去除率存在差异，而氨氮去除率几乎无差异，因此进一步检测两个反应器出水的亚硝态氮和硝态氮，发现没有亚硝态氮检出，MPSR 出水硝态氮平均质量浓度为 7.9 mg/L，SBR 为 10.3 mg/L。由此可见，MPSR 主要是反硝化脱氮能力强于 SBR。

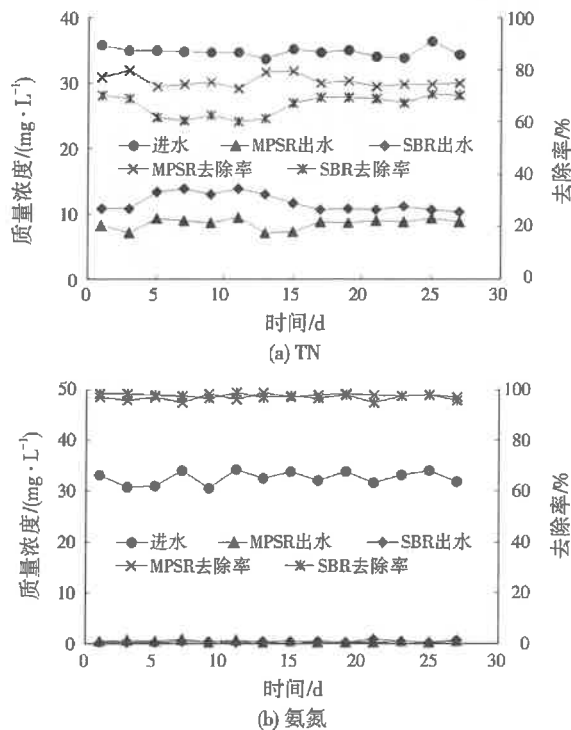


图 4 氮去除曲线
Fig.4 Removal curve of nitrogen

度为 0.38 mg/L，平均去除率为 98.84%；MPSR 出水氨氮平均质量浓度为 0.40 mg/L，平均去除率为 98.78%，两反应器氨氮去除效果基本相同。由于 TN 去除率存在差异，而氨氮去除率几乎无差异，因此进一步检测两个反应器出水的亚硝态氮和硝态氮，发现没有亚硝态氮检出，MPSR 出水硝态氮平均质量浓度为 7.9 mg/L，SBR 为 10.3 mg/L。由此可见，MPSR 主要是反硝化脱氮能力强于 SBR。

总体而言，MPSR 对碳、氮、磷的去除能力均强于 SBR，主要是由于 MPSR 的反硝化能力强于 SBR，原因可能是：(1)MPSR 中反硝化菌比例高于 SBR；(2)受内循环流态影响，MPSR 污泥絮体粒径小于 SBR，DO 更易透过絮体因而利用率更高，同时吸附污染物的能力也更强；(3)MPSR 在曝气阶段存在 DO 浓度不同的区域，有利于进行同步硝化反硝化(SND)。

2.2 污泥 EPS、DHA

两个反应器中污泥 EPS 比较如表 1 所示。MPSR 和 SBR 的总 EPS 分别为 27.79、22.40 mg/g。MPSR 和 SBR 中均没有检测到松散层多糖，而紧密层多糖分别为 19.21、16.82 mg/g；MPSR 和 SBR 中松散层蛋白质分别为 0.47、0.22 mg/g，紧密层蛋白质分别为 8.11、5.36 mg/g。污泥 EPS 中的多糖具有黏性，在污泥絮体对有机污染物初期物理吸附过程中有非常重要的作用，具有很高的 COD 去除效果。蛋白质与多糖的比值能反应污泥的亲疏水性^[7]。MPSR 污泥 EPS 中蛋白质与多糖质量比为 0.447，大于 SBR 的 0.332，表明 MPSR 的污泥疏水性比 SBR 好，因而 MPSR 的污泥沉淀脱水性能更强。周健等^[8]研究证明，EPS 还具有一定的除磷能力。

MPSR 和 SBR 的 DHA 分别为 68.5、115.9 mg/(g·h)，相比于 MPSR，SBR 中的 DHA 处于较高的状态。王建辉等^[9]研究发现，一个周期内的曝气阶段 DHA 随氨氮浓度的减小而降低。由于 SBR 的硝化过程没有 MPSR 快，因而会影响其反硝化过程。本研究中，曝气阶段氨氮的降解过程如图 5 所示，可以看出 SBR 的硝化过程没有 MPSR 快。当进水氨氮浓度相同时，MPSR 曝气 5 h，氨氮质量浓度就可以降至 0.82 mg/L，而 SBR 则需要将近 6 h。

表 1 MPSR 和 SBR 污泥中的 EPS
Table 1 EPS of MPSR and SBR sludge

反应器	总 EPS	松散层蛋白质	紧密层蛋白质	松散层多糖	紧密层多糖
MPSR	27.79	0.47	8.11	0	19.21
SBR	22.40	0.22	5.36	0	16.82

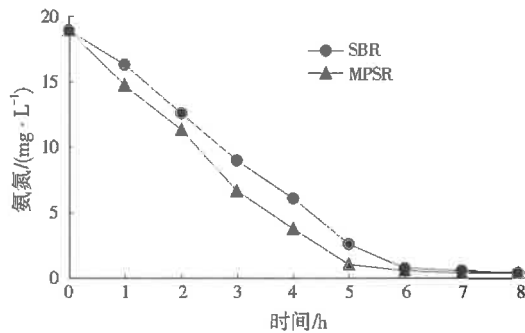


图 5 曝气阶段 MPSR 和 SBR 内氨氮降解过程
 Fig.5 Ammonia nitrogen degradation process of MPSR and SBR in aeration stage

2.3 污泥粒径分布

MPSR 和 SBR 中的污泥粒径体积分数如图 6 所示。MPSR 中 106.28 μm 的污泥体积分数最大，SBR 中 146.41 μm 的污泥体积分数最大。SBR 中粒径大于 106.28 μm 的污泥累积体积分数有 81.65%，而 MPSR 中只有 59.13%。总体而言，MPSR 的污泥粒径比 SBR 小，因此 MPSR 的污泥吸附能力更强。KLANGDUEN 等^[10]研究认为，适当粒径(50~110 μm)的污泥有利于 SND 的进行。从本研究的测定结果来看，MPSR 中更有可能存在有利于 SND 进行的微环境。SBR 污泥粒径大于 MPSR 的主要原因可能是水力条件不同，在 SBR 中有较大的涡流区，更多的污泥易受涡流二次流影响，容易发生剪切凝聚；MPSR 虽然在中心有较大的涡流结构^[11]，但由于污泥重力、气体推动力及混合液黏滞力的相对平衡，实际上在反应器中心并不会形成涡流。

2.4 污泥硝化与反硝化速率

硝化速率与反硝化速率测定结果如表 2 所示。MPSR 污泥硝化速率及比硝化速率分别为 4.26 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 和 1.47 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ，SBR 污泥硝化速率及比硝化速率分别为 3.59 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 和 1.50 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。两个反应器比硝化速率几乎没有差别，说明 MPSR 和 SBR 的硝化能力基本相当。

两个反应器的反硝化过程都有明显的 3 个变化阶段。MPSR 在第 1、2、3 段的反硝化速率分别为 17.23、3.84、2.12 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ ，比反硝化速率分别为

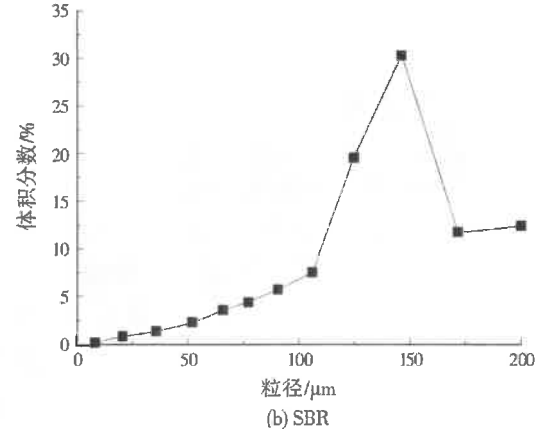
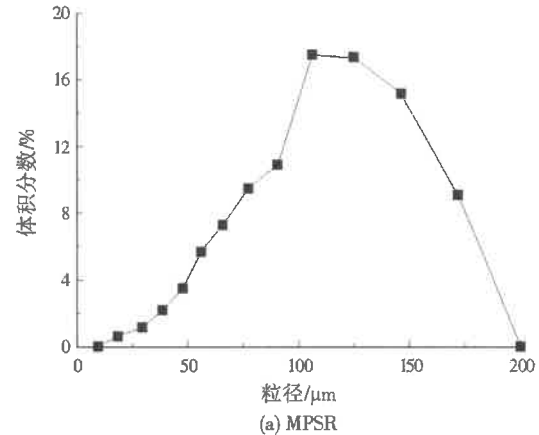


图 6 污泥粒径体积分数
 Fig.6 Sludge particle size volume percentage

7.53、1.68、0.93 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ，平均比反硝化速率为 3.38 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。SBR 在第 1、2、3 段的反硝化速率分别为 11.65、4.51、1.57 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$ ，比反硝化速率分别为 5.83、2.26、0.79 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ，平均比反硝化速率为 2.96 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。第 1 段比反硝化速率最大，此阶段微生物和菌胶团大量吸附硝态氮，反硝化菌充分利用易生物降解的有机物进行脱氮，水中硝态氮下降较快，在反应 20 min 左右时，MPSR 中硝态氮质量浓度下降了 6.6 mg/L ，而 SBR 中硝态氮质量浓度仅下降了 4.2 mg/L ，MPSR 的比反硝化速率要比 SBR 大 1.82 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。两个反应器反硝化过程的第 2 段相比第 1 段比反硝化速率都明显变小，因为此阶段水中快速可生物降解有机物已几乎消失殆尽，反硝化菌通过中慢速可生物降解有机物获得电子还原含氮化合物。在第 3 段，反硝化菌通

表 2 污泥硝化与反硝化速率测定结果
 Table 2 Results of nitrification and denitrification rates of sludge

反应器	硝化速率 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	比硝化速率 $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	反硝化速率/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$			比反硝化速率/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$		
			第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 1 段	第 2 段	第 3 段
MPSR	4.26	1.47	17.23	3.84	2.12	7.53	1.68	0.93
SBR	3.59	1.50	11.65	4.51	1.57	5.83	2.26	0.79

(下转第 1344 页)