



喷射环流反应器处理垃圾渗滤液的硝化特性研究

张雄军, 张保山

(长沙中联重科环境产业有限公司, 湖南长沙 410221)

[摘要] 采用喷射环流反应器处理实际垃圾渗滤液, 重点研究了系统的氨氮硝化性能, 分别考察了游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)对氨氧化菌(AOB)和亚硝态氮氧化菌(NO₂-B)活性的影响。结果表明, AOB 菌群活性在 FA 质量浓度 < 6.5 mg/L、FNA 质量浓度 < 0.1 mg/L 时不受影响; 在 FNA 质量浓度 > 0.1 mg/L 时受到一定抑制但仍有较大活性。NO₂-B 菌群活性在 FA 质量浓度 < 3 mg/L 且 FNA 质量浓度 < 0.01 mg/L 时基本不受影响; 在 FA 质量浓度 > 3 mg/L 或 FNA 质量浓度 > 0.01 mg/L 时受到明显抑制, 且抑制作用随 FA、FNA 浓度升高呈增大趋势。碱度(碱度/氨氮需 > 7 g/g)对 AOB 有较大影响, 而对 NO₂-B 基本无影响。喷射环流反应器的氧转移效率可达 45%, 硝化速率可达 0.06 g/(g·d), 相较于传统 MBR 硝化单元具有氧转移效率高、硝化效率高、水力停留时间短、占地面积小、能耗低的优点。

[关键词] 喷射环流反应器; 游离氨; 游离亚硝酸; 氧转移效率; 硝化速率

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)02-0154-07

Characteristics of nitrification in jet loop reactor system for landfill leachate treatment

ZHANG Xiongjun, ZHANG Baoshan

(Changsha Zoomlion Environmental Industry Co., Ltd., Changsha 410221, China)

Abstract: The biological system of jet loop reactor was used to treat the actual landfill leachate. The ammonia nitrogen nitrification performance of the system was emphatically studied. The effects of free ammonia (FA) and free nitrite (FNA) on the activity of ammonia oxidizing bacteria (AOB) and nitrite oxidizing bacteria (NO₂-B) were investigated respectively. The results indicated that the activity of AOB flora was not affected when FA mass concentration was less than 6.5 mg/L and FNA mass concentration was less than 0.1 mg/L. When the mass concentration of FNA was greater than 0.1 mg/L, it was inhibited to some extent but still had greater activity. The activity of NO₂-B flora was not affected when FA mass concentration was less than 3 mg/L and FNA mass concentration was less than 0.01 mg/L. When FA mass concentration was more than 3 mg/L or FNA mass concentration was more than 0.01 mg/L, its activity was significantly inhibited, and the inhibition increased with the increase of FA and FNA concentration. Alkalinity (alkalinity/ammonia nitrogen should be more than 7 g/g) had a great influence on AOB, but had little influence on NO₂-B. The oxygen transfer efficiency of the jet loop reactor could reach 45%, and the nitrification rate could reach 0.06 g/(g·d). Compared with the traditional MBR nitrification unit, the jet loop reactor had the advantages of high oxygen transfer efficiency and nitrification efficiency, short hydraulic retention time, small floor area and low energy consumption.

Key words: jet loop reactor; free ammonia; free nitrite; oxygen transfer efficiency; nitrification rate

垃圾渗滤液是一种有机物、氨氮和无机盐含量高的特种废水^[1-3]。其中, 氨氮含量随着垃圾填埋年数增加而增大^[4], 若直接排入水体将对环境造成严重危害。当前渗滤液处理方法主要有物化和生化方法, 如碟管式反渗透(DTRO)膜技术^[5]、生化接触氧

化工艺^[6]、SBR 工艺^[7]等。由于反渗透膜对分子态的游离氨基本无拦截作用, 膜技术极易导致出水氮超标; 而生化脱氮技术因渗滤液可利用碳源少, 反硝化过程困难。

氨氮通过硝化过程转换为硝态氮后由膜系统拦

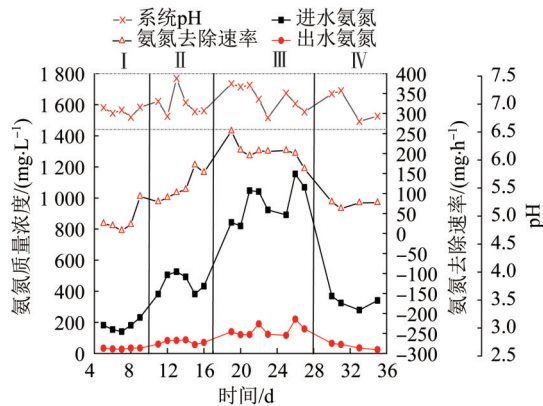


图2 不同阶段喷射环流反应系统硝化特性

Fig. 2 Nitration characteristics of jet loop reactor system at different stages

运行过程中,每天对系统pH进行一次监测,pH在6.5~7.5之间波动(图2)。从图2的氨氮去除速率看,第I阶段为启动阶段,氨氮去除速率较低,第5天至第8天基本维持在20 mg/h左右,第9天上升至92.5 mg/h。第II阶段为驯化培养阶段,此阶段氨氮去除速率逐步上升,由开始时的79.5 mg/h升至171.4 mg/h。第III阶段为稳定运行阶段,氨氮去除速率稳定在200 mg/h以上,最大达到256.3 mg/h;在该阶段末,氨氮去除速率出现较明显的下降,与亚硝酸盐积累产生的抑制作用有关。第IV阶段为硝化反应受到影响阶段,氨氮去除速率明显下降,由第III阶段末的131.8 mg/h下降至62.56 mg/h。

综上可知,系统在稳定运行时具有较强的氨氮硝化能力,但易受到外界因素的影响。

2.2 喷射环流反应系统硝化影响因素

生物脱氮的硝化过程先由氨氧化菌(AOB)将氨氮氧化为亚硝态氮,再由亚硝态氮氧化菌(NO₂)将亚硝态氮氧化为硝态氮。AOB和NOB菌群活性和竞争的影响因素有pH^[10]、温度^[11]、DO^[12]、FA^[13]、FNA^[14-15]等。根据张宇坤等^[16]对硝化菌群活性影响的研究,FA、FNA为主要影响因素。

AOB和NOB活性分别采用比氨氧化速率、比硝态氮生成速率表示,计算公式^[13]见式(3)和式(4)。

$$SAOR = \frac{([NH_4^+-N]_{\text{硝化开始}} - [NH_4^+-N]_{\text{硝化结束}}) \times 24}{MLVSS \times t_N} \quad (3)$$

$$SNaPR = \frac{([NO_3^--N]_{\text{硝化结束}} - [NO_3^--N]_{\text{硝化开始}}) \times 24}{MLVSS \times t_N} \quad (4)$$

式中:SAOR——比氨氧化速率,g/(g·d);

SNaPR——比硝态氮生成速率,g/(g·d);

$[NH_4^+-N]_{\text{硝化开始}}$ 、 $[NO_3^--N]_{\text{硝化开始}}$ ——硝化开始时氨氮和硝态氮质量浓度,mg/L;
 $[NH_4^+-N]_{\text{硝化结束}}$ 、 $[NO_3^--N]_{\text{硝化结束}}$ ——硝化结束时氨氮和硝态氮质量浓度,mg/L;
 MLVSS——污泥质量浓度,mg/L;
 t_N ——硝化反应时间,h。

2.2.1 硝化过程FA、FNA及反应速率的变化

不同进水阶段硝态氮、亚硝态氮、FA、FNA和反应速率的变化见图3。

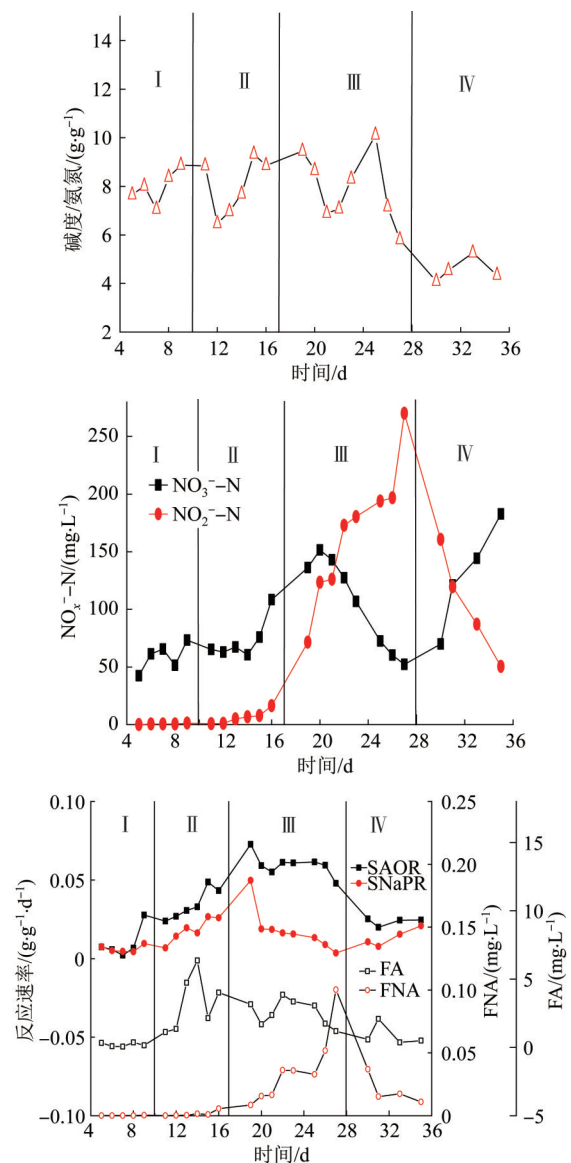
图3 碱度/氨氮、NO_x-N、FA、FNA和反应速率的变化

Fig. 3 The change of alkalinity/ammonia nitrogen, NO_x-N, FA, FNA and reaction rate

由图3可知,阶段I和II,硝态氮是主要硝化产物,质量浓度基本维持在60 mg/L左右,SAOR和SNaPR均呈稳定上升趋势;阶段II中SAOR较SNaPR稍高,表明AOB活性稍强于NOB活性,亚硝态氮出现积累,与亚硝态氮浓度逐渐上升相吻合。

阶段III,亚硝态氮是主要硝化产物,其质量浓度由71.5 mg/L升至270.19 mg/L,而硝态氮质量浓度则由151.6 mg/L降至52.36 mg/L。此阶段SAOR明显高于SNaPR,且SAOR维持在较高水平而SNaPR呈下降趋势,表明此阶段AOB活性远强于NOB活性。由于亚硝态氮大量积累,FNA浓度明显增大,成为抑制NOB活性的主要因素。

阶段IV,硝态氮再次成为主要硝化产物,质量浓度由70.05 mg/L升至182.74 mg/L,而亚硝态氮质量

浓度则降至50.55 mg/L。在该阶段,SNaPR呈上升趋势而SAOR则处于全周期的较低水平,表明AOB活性降低而NOB活性呈上升趋势。AOB活性下降的主要原因为碱度不足。从图3可以看出,该阶段碱度/氨氮均在6 g/g以下,而I、II、III阶段碱度/氨氮大多在7 g/g以上;硝化过程中每氧化1 g氨氮需消耗7.14 g碱度(以 CaCO_3 计)^[17]。

2.2.2 FA对硝化过程的影响

根据A. C. ANTHONISEN等^[18]的研究,FA对AOB产生抑制作用的质量浓度为10~150 mg/L,FA对NOB产生抑制作用的质量浓度为0.1~1.0 mg/L;V. M. VADIVELU等^[19]的研究表明,当FA达到6 mg/L时几乎可完全抑制NOB生长。图4为FA质量浓度对AOB及NOB活性的影响。

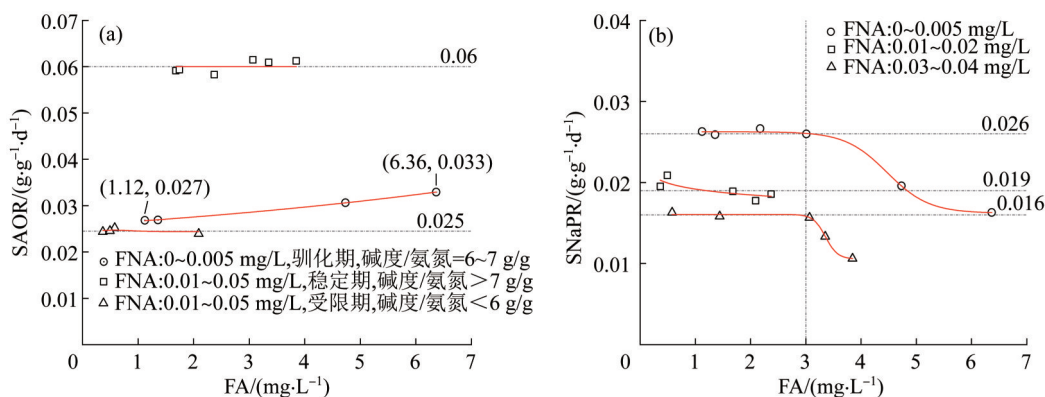


图4 不同阶段FA质量浓度对SAOR和SNaPR的影响

Fig. 4 The effect of FA mass concentration on SAOR and SNaPR at different stages

对于AOB,第I阶段系统处于启动适应状态,菌群活性低;第II阶段系统处于驯化增长状态,菌群活性逐步上升;第III阶段系统处于稳定运行状态,菌群活性达到最大;第IV阶段系统受限于碱度不足的影响,菌群活性下降。从图4(a)可以看出,FNA质量浓度在0~0.005 mg/L、碱度/氨氮在6~7 g/g的驯化期,当FA质量浓度从1.12 mg/L增至6.36 mg/L时,SAOR从0.027 g/(g·d)上升至0.033 mg/L;FNA质量浓度在0.01~0.05 mg/L、碱度/氨氮>7 g/g的稳定期,当FA质量浓度从1.68 mg/L增至3.85 mg/L时,SAOR稳定在0.06 g/(g·d)左右;FNA质量浓度在0.01~0.05 mg/L、碱度/氨氮<6 g/g的受限期,在FA质量浓度从0.15 mg/L增至2.15 mg/L时,SAOR稳定在0.025 g/(g·d)左右。在0~6.5 mg/L范围内,各进水阶段FA浓度对AOB活性无显著影响,但碱度不足对AOB活性有明显抑制作用。

对于NOB,第I阶段系统处于启动状态,菌群活性低;第II阶段系统处于低底物(NO_2^-)浓度状态,菌群活性高;第III阶段和第IV阶段系统处于高底物(NO_2^-)浓度状态,菌群活性受游离亚硝酸抑制而降低。从图4(b)可以看出,在低底物浓度(FNA质量浓度<0.005 mg/L)和2种高底物浓度(FNA质量浓度分别为0.01~0.02 mg/L、0.03~0.04 mg/L)状态下,FA质量浓度<3 mg/L时,SNaPR分别稳定在0.026、0.019、0.016 g/(g·d);而FA质量浓度>3 mg/L时,SNaPR均随FA质量浓度增大而明显下降,表明FA质量浓度在<3 mg/L时对NOB活性无明显影响,FA质量浓度在>3 mg/L时对NOB活性产生较明显抑制作用,且随FA质量浓度增大,抑制作用呈增大趋势。

2.2.3 FNA对硝化过程的影响

V. M. VADIVELU等^[20]的研究表明,FNA质量浓度

为 0.011 mg/L 时可对 NOB 代谢过程产生较明显抑制, 0.023 mg/L 时几乎可完全抑制 NOB 活性; 而当 FNA 质

量浓度达到约 0.50 mg/L 时, AOB 仍具有较高的生物活性。图 5 为 FNA 质量浓度对 AOB 及 NOB 活性的影响。

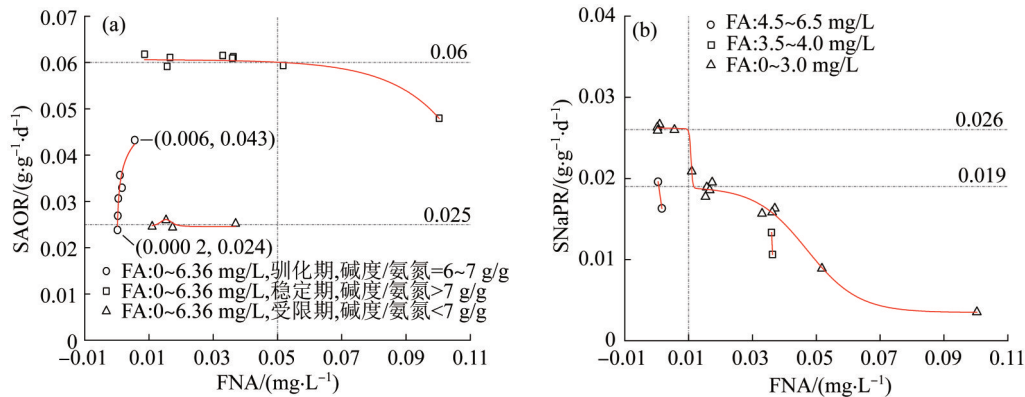


图 5 不同阶段 FNA 质量浓度对 SAOR 和 SNaPR 的影响

Fig. 5 The effect FNA mass concentration on SAOR and SNaPR at different stages

对于 AOB, 第 I 和第 II 阶段均为污泥驯化培养期, AOB 菌群处于增长阶段; 第 IV 阶段因碱度不足, AOB 活性处于较低水平。从图 5(a) 可以看出, 驯化期在 FNA 质量浓度 < 0.01 mg/L 时, SAOR 从 0.024 g/(g·d) 上升至 0.043 g/(g·d)。在稳定期和受限期, FNA 质量浓度 < 0.05 mg/L 对 AOB 活性基本无明显影响, 且 SAOR 分别稳定在 0.06 g/(g·d) 和 0.025 g/(g·d); FNA 质量浓度 > 0.1 mg/L 对 AOB 活性有一定的抑制作用, 但 AOB 仍具有较强的活性。

对于 NOB, 第 I 阶段处于启动适应期, 菌群活性低。在 II、III、IV 阶段, 在 FA 质量浓度 < 3 mg/L 时, FNA 对 NOB 活性的影响明显, FNA 质量浓度 < 0.01 mg/L 对 NOB 活性无明显影响, SNaPR 稳定在 0.026 g/(g·d); FNA 质量浓度达到 0.01 mg/L 对 NOB 活性抑制大幅增大, SNaPR 降至 0.019 g/(g·d); FNA 质量浓度 > 0.01 mg/L 后, 其对 NOB 活性的抑制作用随 FNA 质量浓度升高而逐步增加。由此可看出, FNA 质量浓度为 0.01 mg/L 是影响 NOB 活性的拐点。

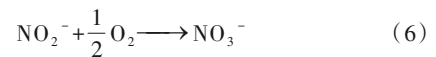
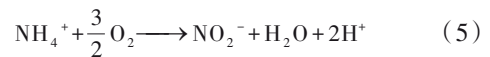
综上可知, FNA 质量浓度 > 0.1 mg/L 对 AOB 活性具有一定抑制作用; 而 FNA 质量浓度 > 0.01 mg/L 即对 NOB 活性产生明显抑制作用; 随 FNA 浓度增大, FNA 对两者的抑制作用均呈增大趋势。

2.3 喷射环流反应器设计参数

2.3.1 氧转移效率分析

硝化反应^[17]的第一步反应[式(5)]通过 AOB 菌群实现, 由 SAOR 可计算此阶段耗氧量; 第二步反应[式(6)]通过 NOB 菌群实现, 由 SNaPR 可计算此阶

段耗氧量。



通过实验过程中空气泵供气量及耗氧量计算氧转移效率 E_A [式(7)]。各阶段 E_A 变化见图 6。

$$E_A = \frac{R_0}{C_0 G} \quad (7)$$

式中: E_A ——氧转移效率, %;

R_0 ——耗氧量, kg/h;

G ——供气量, m³/h;

C_0 ——标准状况下空气中氧气的质量浓度, kg/m³, 本研究 C_0 取 0.28 kg/m³。

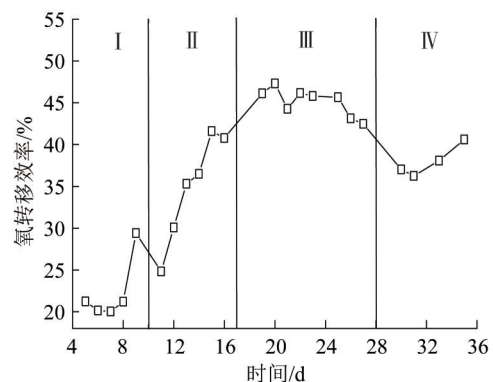


图 6 不同阶段氧转移效率变化

Fig. 6 Changes of oxygen transfer efficiency at different stages

第 I 阶段 AOB 和 NOB 菌群数量及活性处于较低水平, 因此氧转移效率较低; 第 II 阶段 AOB 和 NOB 菌群大量繁殖增长且活性增加, 氧转移效率显

著上升;第Ⅲ阶段AOB活性达到最佳状态,NOB受FNA抑制,活性逐渐减低,氧转移效率达到最大后逐渐下降;第Ⅳ阶段受碱度不足影响,AOB活性受到抑制,NOB活性受FNA抑制减小,活性有所上升,氧转移效率在降低后上升。

由此可知,氧转移效率 E_A 与AOB、NOB菌群活性呈正相关性,当AOB和NOB均有较强活性时,氧转移效率最大达到47.31%;稳定运行时氧转移效率平均在45%。

2.3.2 关键设计参数对比及分析

通过对实验过程SAOR的分析可知,喷射环流反应器稳定运行时硝化速率平均在0.06 g/(g·d);而传统MBR硝化单元的硝化速率在0.04 g/(g·d)左右,氧转移效率在20%左右^[21]。在反应器构型设计中,喷射环流反应器的两相喷嘴对空气进行初级和二次分散作用,使气泡更细、接触面积更大;同时曝气不受水头压力限制,可设计更大的有效水深。以100 m³/d处理规模设计喷射环流反应器和MBR硝化单元,两者关键设计参数对比见表2。

表2 喷射环流反应器和MBR硝化单元设计参数对比

Table 2 Comparison of design parameters between jet loop reactor and MBR nitrification unit

设计参数	喷射环流反应器	MBR硝化单元
氧转移效率/%	45	20
硝化速率/(g·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.06	0.04
水力停留时间/d	4.75	7.11
占地面积/m ²	39.6	88.9
有效水深/m	12	8
供气量/(m ³ ·min ⁻¹)	11.33	25.45
风机扬程/m	6	8
风机总功率/kW	22	55
射流泵流量/(m ³ ·h ⁻¹)	400	300
射流泵扬程/m	22	15
射流泵总功率/kW	36.8	22
合计功率/kW	58.8	77

在同等处理规模和条件下,喷射环流反应器相较于传统MBR硝化单元氧转移效率提升125%,硝化速率提升50%,水力停留时间缩短33.2%,占地面积减少55.4%,能耗减少23.6%。喷射环流反应器具有氧转移效率和硝化效率高、水力停留时间短、占地面积小、能耗低的优点。

3 结论

(1)采用喷射环流反应器对垃圾渗滤液进行高效硝化处理是可行的。但由于渗滤液氨氮高的特

性,NOB菌更易受抑制并在运行过程中产生亚硝酸盐积累,导致以短程硝化为主的运行状态。

(2)FA及FNA对NOB活性具有较强的抑制作用,是运行过程中产生短程硝化的主要原因。AOB菌群在FA质量浓度<6.5 mg/L、FNA质量浓度<0.1 mg/L时活性不受影响;在FNA质量浓度>0.1 mg/L时,虽受一定抑制但其活性仍较大。NOB菌群在FA质量浓度<3 mg/L且FNA质量浓度<0.01 mg/L时活性基本不受影响;在FA质量浓度>3 mg/L或FNA质量浓度>0.01 mg/L时其活性受到抑制;随FA、FNA浓度升高,NOB菌群受到的抑制作用增大,FNA质量浓度在0.01 mg/L时抑制作用大幅增大,0.01 mg/L为NOB活性抑制的拐点浓度。

(3)碱度对AOB菌群活性有较大影响,而对NOB菌群活性基本无影响。保持硝化过程稳定进行的进水碱度/氨氮需在7 g/g以上。

(4)喷射环流反应器稳定运行时,平均氧转移效率为45%,平均硝化速率为0.06 g/(g·d)。相较于传统MBR硝化单元,喷射环流反应器具有氧转移效率和硝化效率高、水力停留时间短、占地面积小、能耗低的优点。

参考文献

[1] 王凯,王淑莹,朱如龙,等.改进SBR处理垃圾渗滤液深度脱氮的启动与实现[J].东南大学学报:自然科学版,2013,43(2):386-391.
WANG Kai, WANG Shuying, ZHU Rulong, et al. Startup and realization of advanced nitrogen removal of landfill leachate by modified SBR[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(2): 386-391.

[2] RENOU S, GIVAUDAN J G, POULAIN S, et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(3): 468-493.

[3] 王宝贞,王琳.城市固体废物渗滤液处理与处置[M].北京:化学工业出版社,2005:3-19.
WANG Baozhen, WANG Lin. Treatment and disposal of municipal solid waste leachate[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 3-19.

[4] HE P J, SHAO L M, GUO H D, et al. Nitrogen removal from recycled landfill leachate by ex situ nitrification and in situ denitrification[J]. Waste Management, 2006, 26(8): 838-845.

[5] 左俊芳,宋延冬,王晶.碟管式反渗透(DTRO)技术在垃圾渗滤液处理中的应用[J].膜科学与技术,2011,31(2):110-115.
ZUO Junfang, SONG Yandong, WANG Jing. Application of DTRO technology in the treatment of landfill leachate[J]. Membrane Science and Technology, 2011, 31(2): 110-115.

[6] 杨丽琴,王存政,代晓娟,等.ABR-生物接触氧化工艺处理城市

- 生活垃圾渗滤液[J]. 环境工程, 2012, 30(2): 41-43.
- YANG Liqin, WANG Cunzheng, DAI Xiaojuan, et al. Treatment of municipal landfill leachate by ABR-biological contact oxidation[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(2): 41-43.
- [7] 孙艳波, 周少奇, 李伙生, 等. SBR工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮特性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 357-362.
- SUN Yanbo, ZHOU Shaoqi, LI Huosheng, et al. Characteristics of nitrogen removal in SBR for the mature landfill leachate treatment[J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 357-362.
- [8] 温沁雪, 陈志强, 吕炳南, 等. 喷射环流反应器传质性能及应用研究[J]. 高技术通讯, 2004, 14(8): 102-105.
- WEN Qinxue, CHEN Zhiqiang, LÜ Bingnan, et al. High mass transfer efficiency in jet loop reactor and its application[J]. High Technology Letters, 2004, 14(8): 102-105.
- [9] FORD D L, CHURCHWELL R L, KACHTICK J W. Comprehensive analysis of nitrification of chemical processing wastewaters[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1980, 52(11): 2726-2746.
- [10] 魏琛, 罗固源. FA和pH值对低C/N污水生物亚硝化的影响[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(3): 124-127.
- WEI Chen, LUO Guyuan. Effects of free ammonium and pH on partial nitrification process[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(3): 124-127.
- [11] GUO Jianhua, PENG Yongzhen, HUANG Huijun, et al. Short- and long-term effects of temperature on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179(1/2/3): 471-479.
- [12] GUO Jianhua, PENG Yongzhen, WANG Shuying, et al. Long-term effect of dissolved oxygen on partial nitrification performance and microbial community structure[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(11): 2796-2802.
- [13] 孙洪伟, 尤永军, 赵华南, 等. 游离氨对硝化菌活性的抑制及可逆性影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 95-100.
- SUN Hongwei, YOU Yongjun, ZHAO Huanan, et al. Inhibitory effect of free ammonia on the activity of nitrifying bacteria and recoverability[J]. China Environmental Science, 2015, 35(1): 95-100.
- [14] 傅金祥, 汪洋, 杨勇. FA与FNA对A/O工艺短程硝化处理垃圾渗滤液的影响[J]. 工业水处理, 2012, 32(5): 48-51.
- FU Jinxiang, WANG Yang, YANG Yong. Effect of FA and FNA on the short-cut nitrification of landfill leachate in an A/O system[J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32(5): 48-51.
- [15] 韩晓宇, 张树军, 甘一萍, 等. 以FA与FNA为控制因子的短程硝化启动与维持[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 809-814.
- HAN Xiaoyu, ZHANG Shujun, GAN Yiping, et al. Start up and maintain of nitrification by the inhibition of FA and FNA[J]. Environmental Science, 2009, 30(3): 809-814.
- [16] 张宇坤, 王淑莹, 董怡君, 等. 游离氨和游离亚硝酸对亚硝态氮氧化菌活性的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1242-1247.
- ZHANG Yukun, WANG Shuying, DONG Yijun, et al. Effect of FA and FNA on activity of nitrite-oxidising bacteria[J]. China Environmental Science, 2014, 34(5): 1242-1247.
- [17] 彭永臻. SBR法污水生物脱氮除磷及过程控制[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 51-54.
- PENG Yongzhen. Biological nitrogen and phosphorus removal and process control of wastewater by SBR[M]. Beijing: Science Press, 2011: 51-54.
- [18] ANTHONISEN A C, LOEHR R C, PRAKASAM T B, et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Journal-Water Pollution Control Federation, 1976, 48(5): 835-852.
- [19] VADIVELU V M, KELLER J, YUAN Zhiguo. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched nitro-bacter culture[J]. Water Research, 2007, 41(4): 826-834.
- [20] VADIVELU V M, YUAN Zhiguo, FUX C, et al. The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched nitrobacter culture[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(14): 4442-4448.
- [21] 韩颖, 浦燕新, 方辉, 等. CJMBR与MBR工艺处理含氮高浓有机废水对比[J]. 水处理技术, 2018, 44(10): 110-113.
- HAN Ying, PU Yanxin, FANG Hui, et al. Nitrogen containing high concentration organic wastewater by CJMBR and MBR process[J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(10): 110-113.

[作者简介] 张雄军(1990—), 硕士, 中级工程师。电话: 13677482640, E-mail: zhang_xj_1990@126.com。

[收稿日期] 2022-11-30(修改稿)