

脉冲式 SBR 处理垃圾渗滤液短程深度脱氮工艺特性

孙洪伟^{1,2*}, 尤永军¹, 彭永臻², 王淑莹¹ (1.兰州交通大学环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070; 2.北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124)

摘要:以城市垃圾渗滤液为研究对象,采用脉冲式 SBR 工艺进行短程深度脱氮试验研究.基于理论分析,建立了进水次数对脉冲式 SBR 法脱氮效率的影响公式,同时应用过程控制优化工艺运行.结果表明,脉冲式 SBR 工艺通过短程生物脱氮途径, NH_4^+ -N 和 TN 的去除率分别达到 95.8%和 90.0%以上,最终出水 NH_4^+ -N 和 TN 分别低于 5.0,15.0mg/L.精准的过程控制是脉冲式 SBR 工艺短程生物脱氮实现及稳定的主要因素.随着进水次数的增加,外碳源投加量明显减少.因此,采用脉冲式 SBR 处理垃圾渗滤液,可实现深度脱氮和节省运行费用双重目的.

关键词:脉冲式 SBR 工艺;分段进水;垃圾渗滤液;短程生物脱氮;过程控制

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:1000-6923(2014)05-1139-06

The process characteristics of the pulsed-SBR for advanced nitrogen removal via nitrite pathway from landfill leachate. SUN Hong-wei^{1,2*}, YOU Yong-jun¹, PENG Yong-zhen², WANG Shu-ying² (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2.Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2014,34(5): 1139~1144

Abstract: The pulsed-SBR process was used to achieve the advanced nitrogen removal via nitrite pathway from landfill leachate. The effect of feed frequency on the process characteristic of pulse-SBR was discussed theoretically and nitrogen removal efficiency formula was established. The operation of the SBR under alternating aerobic-anoxic conditions was optimized by process control. The experimental results showed that up to 95.8% NH_4^+ -N and 90.0% TN were eliminated via nitrite from leachate in the pulsed-SBR and advanced nitrogen removal was successfully obtained. The accurate on-line process control was main factor of the achievement and stabilization of partial biological nitrogen removal. With increasing feed frequency, the external carbon source dosage decreased obviously. Therefore, the objectives of saving external carbon source dosage and achieving advanced nitrogen removal were obtained when pulsed-SBR was used to treat landfill leachate.

Key words: pulsed-SBR; step-feed; landfill leachate; partial biological nitrogen removal; process control

脉冲式 SBR 是在传统 SBR 基础上对其运行方式改进后的一种新型污水处理工艺,该工艺通过分多段进水的运行方式,充分利用原水中有有机物作为反硝化碳源,节省曝气量和外碳源投加量.目前,国内外对交替好氧/缺氧 SBR 工艺的研究进水阶段仅有 1 个,未能充分利用原水中有有机物实现脱氮^[1-3].杨庆^[4]和杨岸明等^[5]利用过程控制值参数(pH 值,DO,ORP)建立了脉冲式 SBR 处理城市污水的过程控制策略,提高了系统的稳定性.此外,Yang 等^[6]和 Guo 等^[7]采用脉冲式 SBR 处理城市生活污水,获得稳定的脱氮性能.

脉冲式 SBR 的工作原理:原水进入 SBR 反应器,好氧曝气去除有机物和硝化反应.硝化完全后,投加适量原水,利用原水中有有机物作为反硝化碳源,进行缺氧反应.反硝化完成后进行再曝气,使投加原水而带入的氨氮转化为亚硝态氮,重复投加适量原水进行反硝化和后曝气的过程,在最后一

收稿日期:2013-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51168028);甘肃省青年基金计划项目(1107RJYA279);兰州交通大学“大学生创新性实验计划”项目(20140042)

* 责任作者,副教授,shw@emails.bjut.edu.cn

个反硝化阶段投加外碳源,实现深度脱氮。

城市垃圾渗滤液是典型的高氨氮废水,尤其晚期渗滤液,低碳氮比(C/N)是实现深度脱氮的主要难题之一^[8]。短程生物脱氮由于在节约能源和碳源方面具有明显优势^[9-11],近年来被广泛研究。基于上述分析,如将短程生物脱氮技术和脉冲式 SBR 工艺进行结合,可最大限度的利用原水中有有机物实现生物脱氮,从而获得最少的外碳源投量。本研究基于脉冲式 SBR 工艺生物脱氮的理论分析,考察了脉冲式 SBR 处理垃圾渗滤液的脱氮效果和工艺稳定性,以实现深度脱氮和节能双重目标。

1 材料与方法

1.1 试验装置

SBR 反应器由有机玻璃制成,高度 500mm,直径 160mm,总有效容积为 9L。在反应器壁上的垂直方向设置一排间距 100mm 的取样口,用以取样和排水;底部设有排泥管;以黏砂块作为微孔曝气器,采用鼓风曝气,转子流量计调节曝气量。机械搅拌由转速可调的机械搅拌器完成。

1.2 试验水质及分析方法

试验用水为经上流式厌氧污泥床(UASB)预处理的城市垃圾渗滤液。UASB 实现了有机物的去除,SBR 通过硝化-反硝化作用实现氮的去除^[9]。SBR 进水水质:TN 90~180mg/L, NH_4^+ -N 85~170mg/L, COD 58~1035mg/L, NO_x^- -N<1.0mg/L, C/N 为 3~8。在试验开始前,SBR 系统已适应 2.5 个月,获得了良好短程生物脱氮后开始进行跟踪测定^[12-13]。

水样分析项目: NH_4^+ -N, NO_3^- -N, NO_2^- -N, COD 均采用国家标准方法进行测定^[14]。TN 通过 TN/TOC 分析仪(Multi N/C3000,德国 耶拿)测定。采用 WTW 测定仪(WTWpH/Oxi 340i,德国)及相应探针监测液相内 DO, ORP 和 pH 值。

1.3 试验方法

SBR 采用 3 种模式运行,如图 1 所示。在模式 I, II 和 III 中,污水分别按 1 次、2 次和 3 次等量投配至反应器。脉冲 SBR 好氧和缺氧时间由实时控制策略控制。进水方式为瞬间进水,沉淀和排水时间分别为 30, 5min。

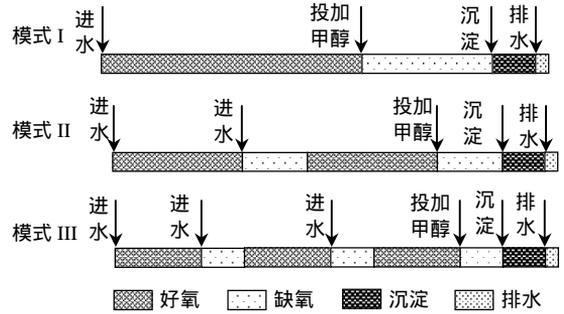


图 1 SBR 工艺的运行模式

Fig. 1 Operational modes of the SBR process

2 结果与讨论

2.1 脉冲式 SBR 工艺短程生物脱氮的理论分析

对于短程反硝化,欲去除 1g NO_2^- -N,理论上需提供 $1.71/(1-1.42Y_n)$ g 的 COD 才能满足反硝化过程对碳源的要求, Y_n 为微生物净产率系数^[15]。为便于讨论,定义 $k=1.71/(1-1.42Y_n)$,其理论临界值为 2.3^[16]。

对于脉冲式 SBR 工艺深度脱氮,假设全部 NH_4^+ -N 在硝化段转化为 NO_2^- -N,而生成的 NO_2^- -N 在反硝化段转化为 N_2 ,并忽略细胞同化作用去除的氨氮。假定原水投加次数为 n ,进水 COD/TN 为 x ,进水 TN 量为 a ,利用进水中携带的有机物获得的 TN 去除率为 η 。

(1) 当 $x > k$ 时, η 与 n 的关系为:

$$\eta = \frac{(n-1) \cdot a}{na} = 1 - \frac{1}{n} \quad (1)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,有 $\eta \rightarrow 1$

(2) 当 $x \leq k$ 时,若进水的 TN 量为 a ,则进水中的 COD 为 ax ,那么反硝化菌利用这些 COD 进行反硝化而去除的 TN 量为: $\frac{ax}{k}$,所以这种情况下, η 与 n 的关系为:

$$\eta = \frac{(n-1) \cdot \frac{ax}{k}}{na} = \frac{x}{k} \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (2)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时,

$$\eta = \frac{x}{k} \quad (3)$$

分多次进水的脉冲式操作模式是有效的脱氮模式,影响反硝化脱氮效率主要因素是投加原

水次数、进水量和进水的 COD/TN 值.随着投加原水次数的增加,总氮去除效率不断提高.同时,外加碳源量随之减少.

2.2 进水次数对脉冲 SBR 工艺短程脱氮的影响

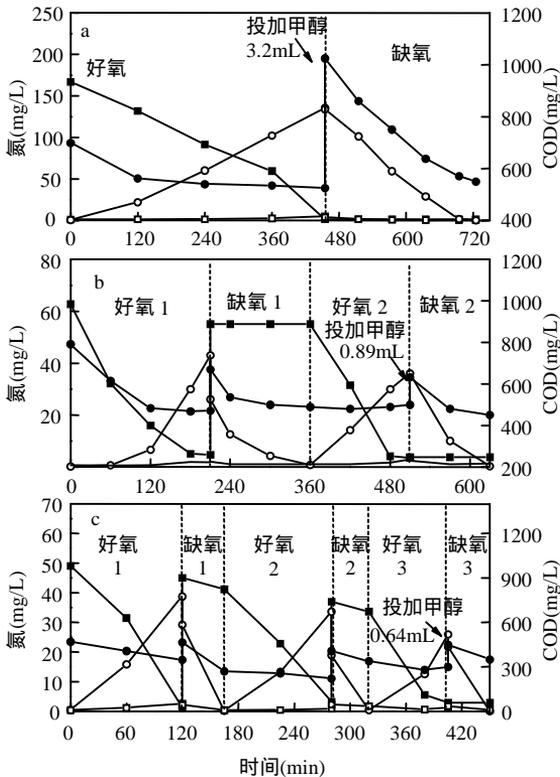


图 2 3 种进水条件下, SBR 反应过程 COD 和氮的转化
Fig.2 Variations of COD and nitrogen under three feeding modes

—■—NH₄⁺-N —○—NO₂⁻-N —□—NO₃⁻-N —●—COD

3 种模式下的进水量分别为 4,2,1.3L.由图 2 可看出,每个硝化阶段的硝化很完全,硝化结束时,NH₄⁺-N 低于 4.0mg/L,平均去除率达到 95.8% 以上.硝化过程中,NH₄⁺-N 几乎全部转化成 NO₂⁻-N, NO₂⁻-N 成为硝化过程的主要产物,而 NO₃⁻-N 浓度始终低于 1.5mg/L,表明系统处于稳定的短程硝化过程.反硝化进行也很彻底,出水 NO₂⁻-N 浓度始终在 0.5mg/L 以下.最后一个反硝化阶段分别投加 3.2,0.89,0.64mL 的甲醇,可使最后出水 TN 低于 15.0mg/L,实现深度脱氮.需要说明的,在运行模式 III 中,缺氧 1 段和 2 段条件下,

NH₄⁺-N 浓度分别降低了 3.4,3.8mg/L,由于系统中存在 NO₂⁻-N,可能是由于厌氧氨氧化途径引起的.

由图 2b 可以看出,2 次进水条件下,好氧 2 段比好氧 1 段的时间短,原因在于:(1)第 2 次进水中可生物降解的 COD 被第 1 次硝化反应产生的 NO₂⁻-N 作为电子供体全部利用,避免高浓度有机物对硝化反应的抑制,同时减少了好氧 2 段有机物的降解时间;(2)相对于第 1 次进水,第 2 次进水后,由于反应器混合液体积的增大,导致稀释比从 3 增加至 4,因此初始 NH₄⁺-N 降低.同样在图 2c 中,3 个好氧段的时间也逐渐减少.对于 2 次和 3 次进水条件下反硝化过程,利用原水中的有机物作为碳源进行反硝化.图 2b 中缺氧 1 段用了 2.5h,系统中的 NO₂⁻-N 从 43.0mg/L 降低至 0.8mg/L.图 2c 中缺氧 1 段和 2 段分别经过 0.75,0.6h,系统中的 NO₂⁻-N 降至 0.4mg/L 以下.由此可见,试验中原水 C/N 可以满足反硝化反应对碳源的要求.

2.3 进水次数和进水量对脉冲 SBR 工艺运行效率的影响

由表 1 可见,随着进水次数的增加,硝化结束时 NO₂⁻-N 逐渐降低.因此,最后一次反硝化段投加的外碳源甲醇量也依次递减,尤其是 1 次进水时甲醇投加量是 2 次和 3 次进水时的 3.5 和 5.0 倍.此外,硝化反应时间随进水次数增加减少,因此硝化效率逐渐提高,在反应器处理容量一定的条件下,处理量也将增加.不同运行模式下,亚硝化速率并未出现明显差异,维持在 0.28~ 0.36mgNH₄⁺-N/(L·min)之间.此外,投加甲醇为碳源时的反硝化速率明显高利用原水中有有机物作为碳源时反硝化速率.原因在于:(1)本研究前期试验,始终以甲醇作为反硝化碳源,微生物具有较好的适应性^[11];(2)异养菌进行反硝化时,优先利用易生物降解的有机物作为电子供体.本试验 SBR 进水为经 UASB 预处理的渗滤液,大部分易生物降解有机物通过产甲烷作用在 UASB 反应器内去除,所以进入 SBR 中的有机物较难于被生物反硝化利用^[11].理论上进水次数越多,总氮去除率越高.表 1 可看出,3 种进水模式下,利用原水中有有机物反硝化对 TN 去除的贡献率分别为 0,40.3%和 56.8%,验证了上述理论的正确.但进水次数的增加意味着系统

运行复杂,因此,分段次数过多在实际中不够实用. 杨庆等^[4]研究表明:当分段数大于 4 之后,总氮去除率上升程度不是非常明显.此外,表 1 中给出的反应速率高于郭等^[17]报道值(硝化速率和反硝化

速率分别为 $0.27\text{mgNH}_4^+-\text{N}/(\text{L}\cdot\text{min})$ 和 $0.32\text{gNO}_x^--\text{N}/(\text{L}\cdot\text{min})$,主要是由于采用在线实时控制硝化和反硝化,准确把握反应终点,未出现延时曝气或搅拌时间过长.

表 1 3 种运行模式条件下,脉冲式 SBR 工艺的运行效率
Table 1 Performance of pulsed-SBR under three operational modes

项目	模式 I	模式 II	模式 III
进水次数	1	2	3
每次进水量(L)	4	2	1.3
投加甲醇量(mL)	3.2	0.89	0.64
硝化结束时 NO_2^--N (mg/L)	135.5	43(好氧 1),36(好氧 2),38.7(好氧 1)	33.6(好氧 2),21.7(好氧 3)
硝化反应时间(min)	455	360	300
亚硝化速率 [$\text{mgNH}_4^+-\text{N}/(\text{L}\cdot\text{min})$]	0.36	0.28(好氧 1),0.34(好氧 2),0.39(好氧 1)	0.33(好氧 2),0.36(好氧 3)
反硝化速率 [$\text{mgNO}_2^--\text{N}/(\text{L}\cdot\text{min})$]	0.56	0.25(缺氧 1),0.42(缺氧 2),0.36(缺氧 1)	0.46(缺氧 2),0.57(缺氧 3)
利用原水中有有机物去除 TN 贡献率(%)	0	40.3	56.8

2.4 过程控制在脉冲式 SBR 工艺短程生物脱氮 中的应用

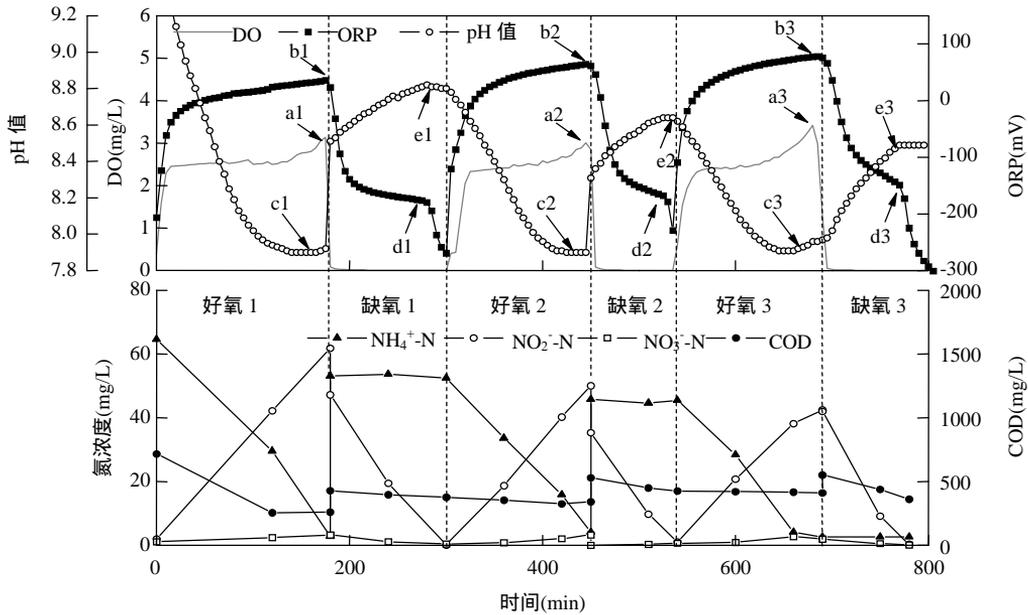


图 3 3 次进水条件下,SBR 工艺内氮、有机物和过程控制参数变化规律

Fig.3 Variations of COD, nitrogen, DO, pH and ORP under three feeding modes

图 3 为 3 次进水条件下,SBR 工艺内氮,有机物和过程控制参数的变化规律.在生物脱氮过程中,DO,ORP 和 pH 值曲线上共出现 5 个特征点,分别是亚硝化结束时 DO 曲线上的突跃点(a 点),

ORP 曲线上的突跃点(b 点),pH 值曲线上的“ NH_4^+-N 谷”(c 点),反硝化结束时 ORP 曲线上的“ NO_2^--N 膝”(d 点),pH 值曲线上的“ NO_2^--N 肘”的

这些特征点与反应过程中“三氮”的转化有非常好的相关性.在硝化过程中,pH 值出现“ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 谷”后氨氮浓度接近为零.反硝化过程中,pH 值曲线“ $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 肘”和 ORP 曲线“ $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 膝”出现后,反应器内的亚硝态氮接近零,最后投加外碳源进行反硝化.因此,DO,ORP 和 pH 值曲线特征点可准确判断硝化、反硝化终点.DO, pH 值和 ORP 作为脉冲式 SBR 处理渗滤液短程生物脱氮过程的控制参数,准确把握曝气和搅拌时间,节省曝气和运行费用.此外,还可有效解决脉冲式 SBR 由于进水量次数增多导致的运行复杂等问题.

2.5 DO, ORP 和 pH 值的导数图形分析

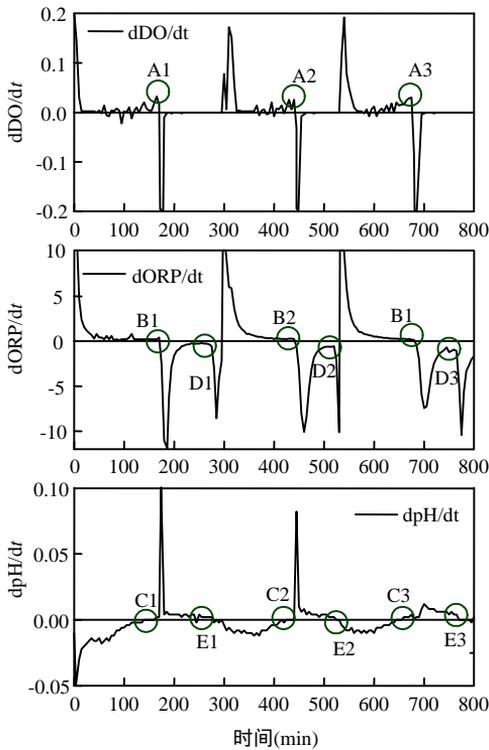


图 4 DO, ORP 和 pH 值的导数与时间曲线图

Fig.4 The relationships of first derivative of DO, ORP and pH with time

图 4 为对应图 3 给出上述典型过程中 DO, ORP 和 pH 值的导数图形.dDO/dt 图形中对应着硝化反应的结束可见明显的突跃点(A1,A2,A3),指示硝化反应结束.此外,对应硝化反应结束,dORP/dt 曲线上出现突跃点(B1,B2,B3).在反

硝化过程中,反硝化结束的时间可由 ORP 导数绝对值的突然增加(D1,D2,D3) 来判断.对于 dpH/dt 的变化规律,开始硝化对应着的 pH 导数由负变正(C1,C2,C3).当反硝化的结束时,分别对应着 pH 导数由正变负(E1,E2,E3).通过对这 3 个参数导数的分析,可知由 ORP, DO, pH 值的特征点可实现脉冲式 SBR 短程生物脱氮的过程控制.需要说明的是,DO 和 OPR 导数图形中的跳跃点是停止曝气、开始搅拌,反应器中 DO 浓度迅速减少所致.pH 导数图形中突跃点是由于硝化结束时,停止曝气,加入原水或碳源导致的.高景峰等^[18]采用 SBR 处理生活污水过程中,在一次进水条件下,也获得了相类似的试验结果.

2.6 脉冲式 SBR 工艺短程脱氮的稳定性

图 5 为脉冲式 SBR 系统稳定 236 个周期的结果.每个运行周期采用过程控制进行硝化、反硝化终点控制.根据进水基质浓度调节好氧和缺氧段的反应时间,准确把握反应进程,确保出水水质.试验过程中,即使进水 TN 浓度出现一定程度的波动,介于 87.4~171.2mg/L 范围内,但出水维持在 6.0~22.0mg/L 之间,平均去除率为 90.9%,表明脉冲 SBR 工艺不仅能够深度脱氮,而且具有较强的稳定性和抗冲击能力.

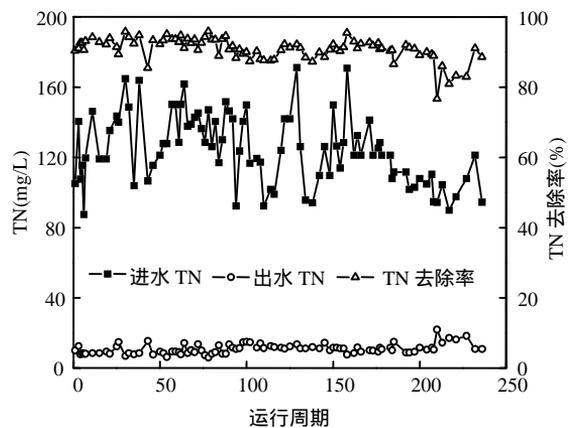


图 5 脉冲式 SBR 短程生物脱氮的长期稳定性

Fig.5 The stabilization of nitrogen removal via nitrite in three feed-step SBR process

3 结论

3.1 采用脉冲式 SBR 工艺处理垃圾渗滤液.采

取交替好氧/缺氧分段进水运行方式,基于稳定短程生物脱氮途径,最终出水 TN 和 NH_4^+-N 分别低于 15.0 和 5.0mg/L,实现了深度脱氮.

3.2 进水次数是影响外碳源投加量的重要因素,进水次数增加,外碳源投量明显减少.但进水次数的增加意味着系统运行更加复杂.对于脉冲式 SBR 工艺,建议采用 2~3 次等量进水,可节省碳源投加量,降低运行费用.

3.3 基于过程控制,可准确把握脉冲式 SBR 工艺的曝气和搅拌时间,避免过曝气,并解决该工艺由于进水次数增多导致的运行复杂等问题.

参考文献:

- [1] Lemaire R, Marcelino M, Yuan Z G. Achieving the nitrite pathway using aeration phase length control and step-feed in an SBR removing nutrients from abattoir wastewater [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008,100(6):1228-1236.
- [2] Gu S B, Wang S Y, Yang Q, et al. Start up partial nitrification at low temperature with a real-time control strategy based on blower frequency and pH [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 112(5):34-41.
- [3] Guo J H, Wang S Y, Huang H J, et al. Efficient and integrated start-up strategy for partial nitrification to nitrite treating low C/N domestic wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 60(12):3243-3251.
- [4] 杨 庆,王淑莹,杨岸明,等.城市污水 SBR 法短程生物脱氮的中试研究 [J]. *中国环境科学*, 2007,27(2):150-154.
- [5] 杨岸明,王淑莹,杨 庆,等.以 pH 和 ORP 作为脉冲 SBR 工艺的实时控制参数 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006,7(12):32-35.
- [6] Yang Q, Peng Y Z, Liu X H, et al. Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007,41(23):8159-8164.
- [7] Guo J H, Yang Q, Peng Y Z, et al. Biological nitrogen removal with real-time control using step-feed SBR technology [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007,40(6):1564-1569.
- [8] 李 娜,李小明,杨 麒,等.微波/活性炭强化过硫酸盐氧化处理垃圾渗滤液研究 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(1):91-96.
- [9] 孙洪伟,郭 英,彭永臻,等.实际垃圾渗滤液短程生物脱氮的常温实现及低温维持 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(11):1972-1977.
- [10] Kim D J, Kim S H. Effect of nitrite concentration on the distribution and competition of nitrite oxidizing bacteria in nitrification reactor systems and their kinetic characteristics [J]. *Water Research*, 2006,40(5):887-894.
- [11] 孙洪伟,彭永臻,时晓宁,等.高氮渗滤液缺氧/厌氧 UASB-SBR 工艺深度脱氮 [J]. *中国环境科学*, 2009,29(2):207-212.
- [12] Sun H W, Yang Q, Dong G R, et al. Achieving the nitrite pathway using FA inhibition and process control in UASB-SBR system removing nitrogen from landfill leachate [J]. *Science China: Chemistry*, 2010,53(5):1210-1216.
- [13] 孙洪伟,王淑莹,张树军,等.高氮渗滤液短程深度脱氮及反硝化动力学 [J]. *环境科学*, 2010,31(1):129-133.
- [14] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [15] Henze M, Harremoës P, Jansen J L C, et al. *Wastewater Treatment Biological and Chemical Processes* [M]. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
- [16] Tchobanoglous G, Burton F B, Stensel H D. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* [M]. fourth Ed. Metcalf and Eddy, Inc., USA, 2003.
- [17] 郭建华,彭永臻,杨 庆,等.脉冲 SBR 处理城市污水深度脱氮的工艺特性 [J]. *中国环境科学*, 2007,27(1):62-66.
- [18] 高景峰,彭永臻,王淑莹,等.以 DO、ORP、pH 控制 SBR 法的脱氮过程 [J]. *中国给水排水*, 2001,17(4):6-11.

作者简介:孙洪伟(1976-),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士,主要从事高氨氮污水生物处理研究.发表论文 40 余篇.