

活性污泥系统动态比耗氧速率的检测与可行性验证

李凌云, 李 论, 彭永臻, 吴 蕾

(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: 为了考察活性污泥系统动态比耗氧速率(R_{SOUR})的变化规律以及作为硝化反应过程控制参数的可行性,提出了一种在线检测、同时反馈 SBR 工艺活性污泥 SOUR 的方法. 采用 SBR1 和 SBR2 两个反应器,分别接种亚硝酸盐氧化菌(NO_B)和氨氧化菌(AOB)占优势的活性污泥,试验结果表明,SBR1 系统反应到第 290 min 时,氨氧化结束 R_{SOUR} 大幅下降,每克 MLSS 每分钟耗氧从 0.074 mg 降到 0.013 mg; SBR2 系统反应到第 206 min 时,氨氧化结束 R_{SOUR} 大幅下降,每克 MLSS 每分钟从 0.01 mg 降到 0.004 mg. R_{SOUR} 的骤降为硝化反应结束的特征点,此时应停止曝气. 通过考察 R_{SOUR} 曲线的变化规律,捕捉曲线上的特征点,可实现控制硝化反应进程,为以 R_{SOUR} 为参数进行实时控制奠定理论基础.

关键词: 序批式活性污泥法; 比耗氧速率; 自动控制; 溶解氧; 在线检测

中图分类号: X 703.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2011)09-1430-05

活性污泥的比耗氧速率(R_{SOUR})是表征污泥生物活性的重要参数之一,从微生物呼吸速率角度反映了活性污泥生理状态和基质代谢状况^[1-2]. 在活性污泥法应用初期^[3-4],好氧微生物的呼吸速率就被用来考察微生物量和底物利用率,近年来, R_{SOUR} 作为检测污泥生物活性的参数,在分析、评价和预测系统运行状况以及处理能力上受到国内外专家的普遍重视^[5]. 研究和应用污水生物处理系统的比耗氧速率检测技术,对于促进污水生物处理技术的发展、强化和提高污水生物处理系统的运行控制,具有十分重要的意义^[6-7].

传统测量 R_{SOUR} 的方法是离线测量,有滞后性,不能在线检测、在线反馈. 许多测量方法要添加抑制剂,影响活性污泥系统的稳定运行,不能将其作为系统长期运行的一个指示参数. 随着自动控制设备(可编程控制器 PLC)和在线检测仪表(溶解氧仪、pH 仪等)的问世和成功应用,为实现动态连续测量活性污泥系统的比耗氧速率创造了有利条件.

随着鼓风机变频技术在污水处理厂中的应用,活性污泥系统一般在溶解氧质量浓度 ρ_{DO} 稳定的状态下去除有机物和脱氮. 若能准确把握硝化反应的终点,防止过量曝气,节能降耗,具有较强的实际意义,因此本文建立了一套在线监控、同时反馈 SBR 工艺活性污泥比耗氧速率的方法,通过考察恒定溶解氧条件下活性污泥 R_{SOUR} 的变化规律,尝试以 R_{SOUR} 为参数来控制硝化反应的进程,达到快速启动与维持短程硝化的目的.

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

本研究采用的反应装置由反应器系统、计量系统和自动控制系统组成(见图 1).

生活污水引至水箱,由水泵提升,进入 SBR 反应器(sequencing batch reactor, SBR). 缺氧和厌氧的混

收稿日期: 2009-06-18.

基金项目: 北京市高校人才强教深化计划高层次人才资助项目(PHR20090502); “城市水资源与水环境国家重点实验室”开放基金项目(QAK200802); 北京工业大学博士研究生创新计划项目(bcx-2009-044).

作者简介: 李凌云(1980—),男,山东潍坊人,博士研究生; 彭永臻(1949—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师.

合由搅拌器完成, 充氧由鼓风机完成, 反硝化所需碳源由加药泵投加, 排水通过电动阀完成。

将计量瓶密封放在搅拌器上, 转子不断搅拌使污泥始终处于悬浮状态, 回流泵控制污泥回流的流量。数据采集装置(德国 WTW Multi 340i) 分别采集溶解氧探头的数值传输给控制器和计算机。

用2个平行的 SBR 反应器 1 号、2 号(型号规格与设备连接都相同) 接种 NOB 和 AOB 占优势的活性污泥, 考察反应过程中 R_{SOUR} 测量方法的可靠性与稳定性以及 R_{SOUR} 的变化规律。

1.2 试验用水水质

试验用水为北京工业大学家属区生活污水。原水 ρ_{COD} 为 127.8 ~ 279.7 mg/L; $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为 44 ~ 65 mg/L; ρ_{BOD_5} 为 105 ~ 150 mg/L; $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 为 0.04 ~ 0.42 mg/L; $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 0.06 ~ 0.15 mg/L; pH 值为 7.8 ~ 8.07。

1.3 分析方法

ρ_{COD} 、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 、总碱度、 ρ_{MLSS} 等指标均采用国家规定的标准方法测定; ρ_{TN} 采用 multiN/C3000 分析仪, 在水样离心后测定; ρ_{DO} 测定采用 WTW-level2 溶解氧在线仪; pH 值测定采用 WTW-pH/Oxi340i 在线测定仪。

2 试验结果分析与讨论

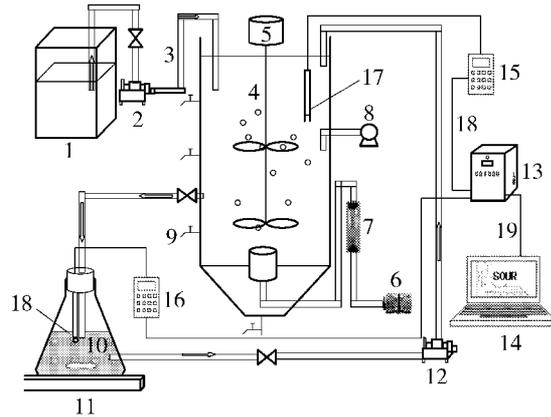
2.1 活性污泥系统动态比耗氧速率测量原理

在反应器进水结束后, 开启鼓风机对系统进行曝气, 通过 PLC 控制污水中 ρ_{DO} 为某一定值(本研究中 $\rho_{\text{DO}} = 1.0 \text{ mg/L}$) 采用曝气开关控制, 当水中 ρ_{DO} 低于 1.0 mg/L 电磁阀开启; 当 ρ_{DO} 高于 1.0 mg/L 电磁阀关闭。在好氧初始阶段, 通过异养菌的作用去除水中有机物, 之后在氨氧化细菌的作用下将水中氨氮氧化, 曝气过程中产生的气泡使得污水和活性污泥充分接触, 起到搅拌混合的作用。2 个 DO 传感器每隔 10 s 采集 1 个数值, 同时采集 DO 值的电流信号经变送器输入模拟数字转换器 A/D, 转换成数字信号, 再由数据采集装置实时将所获得的数据信息通过数据线传输到 SOUR 控制器进行滤波和比较运算。由于主体 SBR 反应器与计量瓶连通, 携带一定溶解氧的污泥在计量瓶中停留一定时间 t (t 为计量瓶的体积 V_2 除以回流泵的流速 q) 因此, 同时测量的 2 个溶解氧值会出现差值, 该差值为污泥在计量瓶中停留 t 时间的消耗值, 则计量瓶中污泥的比好氧速率的计算公式为 $R_{\text{SOUR}} = (\rho_{\text{DO1}} - \rho_{\text{DO2}}) / (\rho_{\text{MLSS}} \cdot t)$ ($t = V_2 / q$ (其中 ρ_{DO1} 为 SBR 反应器中溶解氧质量浓度; ρ_{DO2} 为计量瓶中溶解氧质量浓度; ρ_{MLSS} 指计量瓶中污泥质量浓度)。

本研究中计量瓶体积 V_2 为 1.5 L, 蠕动泵流速 q 为 0.811 L/min, 则污泥在计量瓶停留的时间 t 为 1.85 min。水样在检测瓶中的停留时间(1.85 min) 相对于 1 个反应周期 3 ~ 5 h 来讲很短, 可以忽略生物量即 MLSS 在检测瓶停留时间内的变化。

2.2 全程硝化过程中 R_{SOUR} 的变化规律与指示作用

反应器 SBR1 在氨氮氧化过程中没有 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累, 为完全全程硝化: 瞬时进水, 固定曝气时间 365



1. 水箱 2. 水泵 3. 进水管 4. SBR 反应器 5. 搅拌器 6. 鼓风机 7. 流量计 8. 加药泵 9. 电动阀 10. 计量瓶 11. 搅拌器 12. 回流泵 13. 控制器 14. 计算机 15、16. DO 数据采集装置 17、18. 溶解氧探头

图 1 动态 SOUR 检测装置

Fig. 1 Schematic diagram of on-line determination of specific oxygen uptake rate

min, 恒定 $\rho_{DO} = 1.0 \text{ mg/L}$, $\rho_{MLSS} = 2900 \sim 3000 \text{ mg/L}$. 在线数据采集装置 15、16 分别采集 SBR 反应器与量瓶中的溶解氧数值, 经过信号转换传输到 PLC 进行运算, 得到此刻 SOUR 的数值, 每个周期连续测量与运算得到 R_{SOUR} 曲线, 每个周期 R_{SOUR} 的变化趋势基本相似, 选取其中 1 个周期的数据说明反应的过程, 如图 2 所示.

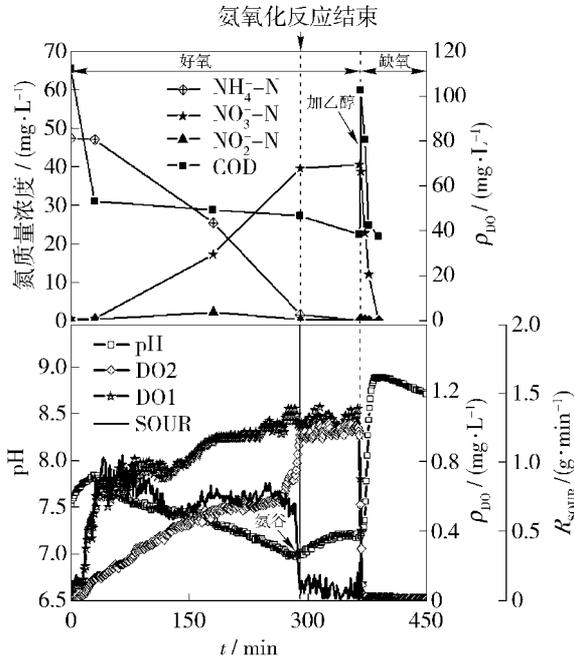


图2 SBR1 中 COD 与 3 种形态氮质量浓度变化以及 pH、 ρ_{DO} 与 SOUR 的变化规律

Fig. 2 Variations of pH, ρ_{DO} , and SOUR value and concentrations of COD, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ during nitrification and denitrification in the SBR1

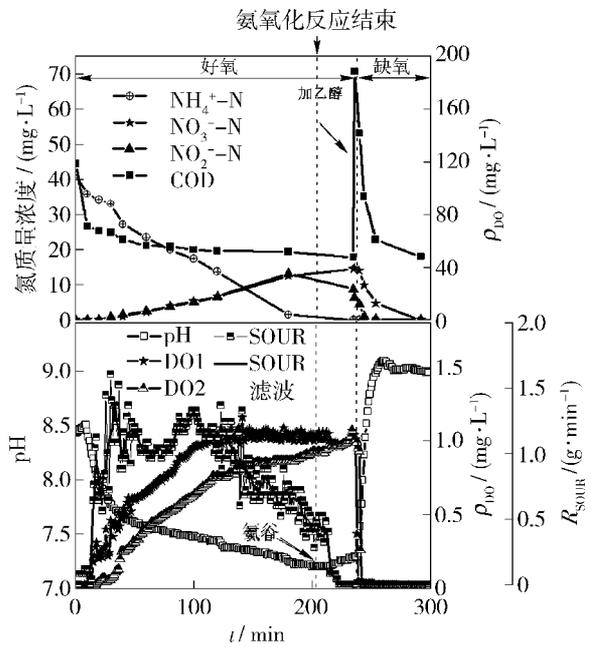


图3 SBR2 中 COD 与 3 种形态氮质量浓度变化以及 pH、 ρ_{DO} 与 SOUR 的变化规律

Fig. 3 Variations of pH, ρ_{DO} , and SOUR value and concentrations of COD, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ during nitrification and denitrification in the SBR2

生活污水中有机物多数可生化性较好, 曝气开始, 异养菌利用水中的溶解氧大量繁殖, 水中溶解氧一直处于较低水平说明, 曝气向反应系统的传递氧速率与耗氧速率大致相等, 异养菌以最大速率降解 COD, 在好氧反应的前 35 min, 异养菌的比耗氧速率一直处于较高值, 每克 MLSS 耗氧 0.1 mg/min. 当达到难降解阶段, 异养菌的好氧速率大量降低, 氨氧化菌开始耗氧, 将氨氮转化为亚硝态氮, 进而由亚硝酸盐氧化菌氧化为硝态氮. 氨氮的氧化过程主要是自养菌新陈代谢, 其比增长速率较小、耗氧速率较小, 氨氧化速率在本反应系统中受氨氮质量浓度和溶解氧质量浓度影响较小, 在比耗氧速率曲线上表现为 R_{SOUR} 由每克 MLSS 0.1 mg/min 逐渐降低, 之后维持稳定在 0.074 mg/min 左右, 当氨氧化结束时, 耗氧速率大幅下降, 为硝化反应结束的特征点(图 2 中的“氨谷”), 此时应及时停止曝气. 在图 2 中, 反应到第 290 min 就应该立刻停止曝气, 第 290—365 min 为延时曝气阶段. 当检测到特征点时, 及时停止曝气可以节约电耗、减少运行费用, 同时防止污泥膨胀.

2.3 部分短程硝化过程中 R_{SOUR} 的变化规律与指示作用

反应器 SBR2 启动时有部分 NO_2^- 积累: 瞬时进水, 固定曝气时间 235 min, 恒定 $\rho_{DO} = 1.0 \text{ mg/L}$, $\rho_{MLSS} = 1300 \sim 1450 \text{ mg/L}$. 选取试验过程中重现性较好的一个周期的数据来说明反应的过程, 如图 3 所示.

传统生物脱氮理论认为氨氮氧化是借助硝化细菌和反硝化菌 2 种不同的菌种将水中的氨转化为氮气而去除的, 首先, 氨氧化菌 (AOB) 将氨氮转化为 NO_2^- , 亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 将 NO_2^- 转化为 NO_3^- , 之后反硝化细菌利用各种有机基质(碳源)作为电子供体, 以硝态氮或亚硝态氮作为电子受体, 进行缺氧呼吸. 本好氧过程与全程硝化反应过程中 R_{SOUR} 的变化规律基本相同, 曝气前 15 min 为有机物降解阶段, 活性污

泥 R_{SOUR} 较高,氨氧化阶段 R_{SOUR} 缓慢下降,之后维持在每克 MLSS 每分钟 0.01 mg O_2 左右,到第 205 min 时 R_{SOUR} 已降低到 0.004 mg O_2 ,此时系统中氨氮基本转化完全,亚硝态氮质量浓度最高,继续曝气,会使得 NOB 利用 NO_2^- 大量增殖,生成 NO_3^- ,在 SOUR 曲线上表现为明显的下降,此时停曝气,防止 NO_2^- 进一步氧化为 NO_3^- ,保证亚硝态氮积累.因此根据 SOUR 曲线的变化趋势,能准确控制反应进程,将氨氧化控制在 NO_2^- 阶段,接着进行反硝化,可以提高反应效率,节约电耗和碳源.从优化硝化种群结构角度讲,控制氨氧化在 NO_2^- 阶段,及时停曝气,不给 NOB 过多的增殖时间,又由于 NOB 的时代时间比 AOB 长,控制系统污泥龄在 AOB 与 NOB 的污泥龄(最大水力停留时间)之间,通过在曝气结束后排出定量的污泥,达到富集 AOB,逐渐淘汰 NOB 的目的.

研究表明 NOB 比 AOB 对环境因素变化更敏感^[8-9],本研究中硝化反应的起始 pH 值和游离氨(FA)质量浓度较高,对 NOB 活性有一定的抑制作用.在本研究中(如图 3 所示),氨氧化起始 pH 值为 8.5, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 41.3 mg/L, ρ_{FA} 为 6.2 mg $\text{NH}_3-\text{N}/\text{L}$,对 NOB 有一定的抑制作用,使得 NO_2^- 有一定的积累,随着氨氧化反应的进行,FA 的抑制作用逐渐消除,到氨氧化反应后期,NOB 逐渐恢复活性,有大量的 NO_3^- 生成,此时停曝气,可以减少 NOB 的增殖时间,有效调控硝化细菌的种群结构,实现和维持稳定的短程硝化反硝化效果.

另外,在 SBR1 与 SBR2 中,对比发现,当氨氮氧化结束时,SOUR 下降的幅度存在差异,分析其原因是污泥中硝化细菌种群结构不同导致氨氮氧化的产物(NO_2^- 和 NO_3^-)质量分布不同.SBR1 中为完全全程硝化,氨氮氧化为 NO_2^- 的同时被氧化为 NO_3^- ,没有亚硝态氮积累,硝化反应结束时,活性污泥由 AOB 与 NOB 同时耗氧变为内源呼吸;而在 SBR2 中,氨氮氧化结束时有一定量的亚硝态氮积累,硝化反应结束时,AOB 已不再耗氧,活性污泥则是由 NOB 耗氧变为内源呼吸,表现在 SOUR 曲线上是 SBR2 的活性污泥在硝化结束时下降幅度较小.

3 结论

1) 本方法的检测结果具有较好的重现性,系统的响应性良好,反应灵敏,通过 SOUR 曲线的变化规律,可以判断系统不同时刻的反应状态.

2) 活性污泥 R_{SOUR} 骤降,对于完全全程硝化反硝化系统,表明硝化反应结束,此时停曝气可以节约电耗,防止污泥膨胀;对于部分短程硝化反硝化系统,表明氨氧化结束,此时停曝气可以保证亚硝态氮积累,维持稳定的短程硝化反硝化效果.

3) 捕捉 SOUR 曲线上的特征点,通过控制器反馈给终端执行器,可以实现在线控制,为以 R_{SOUR} 为参数实时控制硝化反应进程奠定理论基础.

参考文献:

- [1] 高春娣,彭永臻,高凯,等. SBR 法中耗氧速率的在线检测及误差分析[J]. 工业用水与废水,2001,32(2): 4-7.
GAO Chun-di, PENG Yong-zhen, GAO Kai, et al. On-line detection of oxygen uptake rate in SBR process and error analysis [J]. Industrial Water and Wastewater, 2001, 32(2): 4-7. (in Chinese)
- [2] 王建龙,吴立波,齐星,等. 用氧吸收速率(OUR)表征活性污泥硝化活性的研究[J]. 环境科学学报,1999,19(3): 225-229.
WANG Jian-long, WU Li-bo, QI Xing, et al. Characterization of nitrification activity of activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(3): 225-229. (in Chinese)
- [3] SURMACZ-GORSKA J, GERNAEY K, DEMUYNCK C, et al. Nitrification monitoring in activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) measurements [J]. Water Research, 1996, 30(5): 1228-1236.
- [4] GUWY A J, BUCKLAND H, HAWKES F R, et al. Active biomass in activated sludge: Comparison of respirometry with catalase activity measured using an on-line monitor [J]. Water Research, 1998, 32(12): 3705-3709.
- [5] PAMBRUN V, PAUL E, SPERANDIO M. Control and modelling of partial nitrification of effluents with high ammonia concentrations in sequencing batch reactor [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(3):

323-329.

- [6] JUBANY I , LAFUENTE J , BAEZA J A , et al. Total and stable washout of nitrite oxidizing bacteria from a nitrifying continuous activated sludge system using automatic control based on Oxygen Uptake Rate measurements [J]. *Water Research* , 2009 , 43(11) : 2761-2772.
- [7] HAO X , WANG Q , ZHANG X , et al. Experimental evaluation of decrease in bacterial activity due to cell death and activity decay in activated sludge [J]. *Water Research* , 2009 , 43(14) : 3604-3612.
- [8] VADIVELU V M , KELLER J , YUAN Zhi-guo. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture [J]. *Water Research* , 2007 , 41(4) : 826-834.
- [9] JUBANY I , BAEZA J A , CARRERA J , et al. Respirometric calibration and validation of a biological nitrite oxidation model including biomass growth and substrate inhibition [J]. *Water Research* , 2005 , 39(18) : 4574-4584.

On-line Determination of Specific Oxygen Uptake Rate in Activated Sludge System: Demonstration in SBR Process

LI Ling-yun , LI Lun , PENG Yong-zhen , WU Lei

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering , Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China)

Abstract: In order to investigate the variations of specific oxygen uptake rate (R_{SOUR}) and its feasibility during nitrification as a control parameter in activated sludge system , a method was presented realizing on-line determination and feedback in SBR process. Two SBRs were seeded with activated sludge of nitrite-oxidizing bacteria (NOB) and nitrite-oxidizing bacteria (AOB) as the dominant bacteria , respectively. The variations of SOUR under constant dissolved oxygen concentration were studied and results showed R_{SOUR} of SBR1 decreased dramatically from 0. 01 to 0. 004 mg O_2 per gram and minute , after 290 min aerobic reaction time , while that of SBR2 declined from 0. 074 to 0. 013 mg O_2 per gram and minute , after 206 min aerobic reaction time at the completion of ammonium oxidation. The sharp decline of R_{SOUR} indicated the completion of nitrification , then aeration should be terminated. R_{SOUR} curve can exactly reflect the process of nitrification , all of which may well lay a theoretical foundation for application of SOUR as on-line control parameters.

Key words: sequencing batch reactor; specific oxygen uptake rate; automatic control; DO; on-line determination

(责任编辑 苗艳玲)