

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.010

# 基于 OUR 曝气控制系统在污水厂中的应用

布吉红

(金风环保有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 将基于耗氧速率(OUR)气量计算模型和基于进水氨氮负荷 DO 预测模型相结合的曝气控制系统应用于武汉某污水厂,通过现场应用考察了曝气控制系统运行的稳定性和节能效果。实际运行结果表明,曝气控制系统可以根据进水氨氮负荷合理设定 DO 值,并根据 OUR 和 DO 值计算好氧池的最佳需氧量,将实际 DO 值控制在设定值  $\pm 0.315$  mg/L 范围内;同时曝气控制系统可以保证出水 COD 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 要求;曝气控制系统可以将鼓风机处理单位体积水的电耗降低 21.9%。

**关键词:** 耗氧速率; 曝气控制系统; DO; 节能; 污水厂

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0058-05

## Application of Oxygen Uptake Rate Aeration Control System in Wastewater Treatment Plant

BU Ji-hong

(Goldwind Environmental Protection Co. Ltd., Beijing 100176, China)

**Abstract:** An aeration control system combining aeration calculation model based on oxygen uptake rate (OUR) and DO prediction model based on ammonia nitrogen load was applied to a wastewater treatment plant in Wuhan, and operational stability and energy saving performance of the aeration control system were investigated. The aeration control system could reasonably set the DO value according to the influent ammonia nitrogen load, calculate the optimal oxygen demand of the aerobic tank according to the OUR and DO values, and control the actual DO value within the range of (set value  $\pm 0.315$ ) mg/L. At the same time, the aeration control system could ensure that COD and  $\text{NH}_3 - \text{N}$  in the effluent meeting the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant*, which reduced power consumption of the blower by 21.9% per unit volume of wastewater.

**Key words:** oxygen uptake rate (OUR); aeration control system; DO; energy conservation; wastewater treatment plant

随着我国污水处理行业发展的市场化,减少能耗、降低成本已成为提升企业管理水平和提高利润的关键措施。生物处理过程被认为是处理污水最经济的方法,但是生物处理过程也消耗着大量的能源<sup>[1]</sup>。在污水运营成本中,电费占 70%,其中曝气系统的电耗占全厂电耗的 50%~60%<sup>[1-4]</sup>。

目前对曝气系统的控制通常采用基于后馈的方

式,即利用安装在好氧池末端的 DO 仪或氨氮仪来调节曝气系统<sup>[5]</sup>,该种控制方式的弊端是存在滞后性。一般来说,传统脱氮除磷工艺中硝化过程是消耗 DO 最多的过程,控制曝气系统的最佳方式是根据进水氨氮负荷调整 DO 设定值<sup>[6]</sup>。近年来的研究证明,基于进水氨氮负荷设定 DO 值的控制方式可以有效提高氨氮的去除效果,同时降低曝气系统能

耗<sup>[7-9]</sup>。但上述研究大部分停留在仿真或小试阶段,并没有在实际工程进行应用验证。

目前对好氧池需氧量的计算大部分基于设计手册,好氧池需氧量由生化需氧量(BOD)、硝化需氧量、内源呼吸需氧量等组成<sup>[10]</sup>。设计手册中大部分参数基于实际经验,并且 BOD 不能实时测量,导致好氧池需氧量计算存在较大误差,不能按需供氧。耗氧速率(OUR)可有效表征微生物生长和底物消耗的关系<sup>[11-12]</sup>,近年来 OUR 测量技术得到了广泛研究,OUR 已被应用于实际污水处理厂的运行管理中<sup>[13]</sup>。利用 OUR 进行好氧池需氧量计算,可提高好氧池需氧量的计算准确性,做到按需供氧。

笔者在实际工程中采用 OUR 计算好氧池需氧量,使鼓风机能够按需供氧,提高氧利用效率;同时结合进水氨氮负荷合理设定好氧池的 DO 值。在保证出水水质达标的前提下,一定程度降低鼓风机能耗,实现污水处理厂节能降耗的目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 污水厂概况

武汉某污水厂于 2017 年 3 月正式投产。污水厂采用 A<sup>2</sup>O 处理工艺,设计水量为  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,由 2 组平行的系统组成,每个系统包括 1 个厌氧池、1 个缺氧池和 1 个好氧池,停留时间分别为 1.97、2.97、10.22 h。生化系统的流程如图 1 所示。该系统采用多点进水方式,其中 70% 进水进入缺氧池为反硝化提供碳源,其余进水直接进入厌氧池。由 3 台空悬鼓风机对好氧池进行供气(2 用 1 备),鼓风机额定流量为  $87 \text{ m}^3/\text{min}$ ,风压为 70 kPa。鼓风机采用恒负载率方式运行,负载率设定值为 75% (可调范围为 55% ~ 100%)。

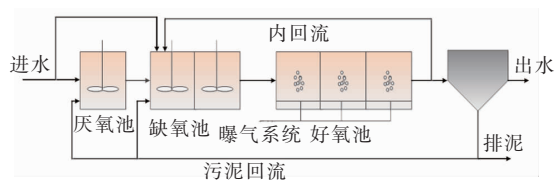


图 1 生化系统的流程

Fig. 1 Flow chart of biochemical system

### 1.2 模型算法

#### 1.2.1 基于进水氨氮负荷的 DO 值预测

在好氧池进水口和出水口安装在线氨氮分析仪,分析仪的测量传感器为离子选择电极,利用标准添加法进行仪器校准。本研究根据 ASM2D 活性污

泥模型建立基于进水氨氮负荷的 DO 预测模型:

$$\frac{dS_{NH}}{dt} = \frac{Q(S_{NH,0} - S_{NH})}{V} - \frac{\mu_{A,m} X_{B,A}}{Y_A} \times \frac{S_{NH}}{S_{NH} + K_{NH}} \times \frac{S_O}{S_O + K_{DO}} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为好氧池进水流量(包括进水量和回流量),  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $V$  为好氧池总体积,  $\text{m}^3$ ;  $S_{NH,0}$  为好氧池入口氨氮浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $S_{NH}$  为好氧池出口氨氮浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $X_{B,A}$  为好氧池自养菌浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $\mu_{A,m}$  为自养菌最大比增长速率,  $\text{d}^{-1}$ ;  $Y_A$  为自养菌产率系数,  $\text{g}(\text{细胞 COD})/\text{g}(\text{氧化 N})$ ;  $K_{NH}$  和  $K_{DO}$  分别为氨氮和 DO 半饱和系数,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $S_O$  为好氧池 DO 浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ 。当式(1)达到稳态时,可得到式(2)。

$$S_{O,set} = \frac{K_{DO}}{\frac{X_{B,A} V S_{NH,set} \mu_{A,m}}{Q(S_{NH,0} - S_{NH,set})(S_{NH,set} + K_{NH})} - 1} \quad (2)$$

式中:  $S_{NH,set}$  为期望出水氨氮浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ 。

式(2)中自养菌浓度不能通过仪表在线测量。通过实验室测量自养菌含量与污泥浓度的比值,认为污泥组分变化较缓慢,通过在线采集的污泥浓度值换算成自养菌浓度。

#### 1.2.2 基于 OUR 的气量计算

好氧池的需气量按式(3)计算:

$$Q_{air} = \left( \text{OUR} - \frac{Q_{in} \text{DO}_M - Q_{out} \text{DO}_0}{V} \right) \times \frac{1}{C_{\infty} - \text{DO}_0} \times A \quad (3)$$

式中:  $C_{\infty}$  为好氧池饱和溶解氧浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $\text{DO}_0$  为好氧池实际溶解氧浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $\text{DO}_M$  为好氧池进水溶解氧浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $Q_{in}$  为好氧池进水流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_{out}$  为好氧池出水流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $V$  为好氧池总体积,  $\text{m}^3$ ;  $\text{OUR}$  为好氧池耗氧速率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $Q_{air}$  为好氧池需气量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $A$  为好氧池表面积,  $\text{m}^2$ 。

### 1.3 检测项目及方法

污水厂出水 COD、氨氮和 TP 采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行测定。MLSS 采用重量法测定。好氧池 DO 采用在线 DO 仪测定。每台鼓风机加装电流互感器计量鼓风机用电量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 气量计算

首先验证基于 OUR 气量计算模型的准确性。

DO 目标值设置为 1.5 mg/L,通过考察目标值的波动情况说明气量计算模型的精度。OUR 气量计算模型以 15 min 为一个周期,根据进水流量、好氧池 DO 变化和 DO 目标值来计算当前好氧池的需氧量,系统共计运行 17 d。图 2 为鼓风机负载率和好氧池 DO 的变化。可以看出,基于 OUR 气量计算模型投运后,系统每 15 min 对鼓风机负载率进行一次调节,与先前恒负载率运行差别较大。系统运行期间好氧池实际 DO 最小值为 1.46 mg/L,最大值为 2.47 mg/L,均值为 1.68 mg/L,标准差为  $\pm 0.315$  mg/L。系统运行期间,部分时间 DO 值偏离设定值较大,是因为该段时间内鼓风机负载率达到下限(55%)。通过系统运行期间 DO 波动情况可以看出,基于 OUR 的气量计算模型可以准确计算出好氧池的实际需氧量,做到按需供氧,为好氧池提供稳定的 DO 环境。DO 稳定可以为微生物提供有利的生长环境,使系统处于良好的运行状态<sup>[2]</sup>。

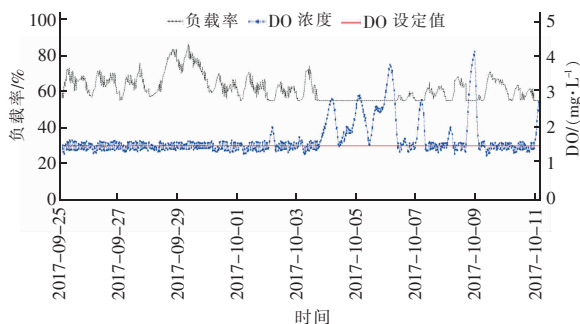


图 2 鼓风机负载率与好氧池 DO 的变化

Fig. 2 Change of load ratio of blower and dissolved oxygen of aerobic tank

## 2.2 DO 值预测

基于进水氨氮负荷 DO 值预测模型,可通过考察 DO 预测值与进水氨氮负荷的跟随性说明模型的准确性。该模型以 60 min 为一个周期对 DO 值进行预测。DO 值较小时会抑制系统中的硝化反应,同时还会引起曝气池中丝状菌繁殖,导致污泥膨胀<sup>[2]</sup>,因为对 DO 预测模型进行了 DO 值下限设定,系统中设定 DO 值最小为 0.5 mg/L。基于进水氨氮负荷 DO 值预测模型共计运行 14 d。图 3 为进水流量、进水氨氮浓度与 DO 设定值的变化。

随着进水氨氮负荷的增加,模型设定的 DO 值呈现升高趋势。研究表明,当 DO 值  $< 2.0$  mg/L 时,随着 DO 的升高硝化菌的硝化速率也随之增大<sup>[2]</sup>。从系统运行结果可以看出,基于进水氨氮负

荷 DO 预测模型,可以根据进水氨氮负荷的升高,自动调节 DO 设定值,保证系统处于最优运行状态。

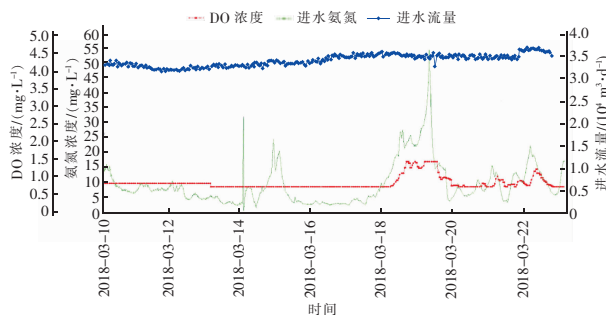


图 3 进水流量、氨氮负荷与 DO 设定值的变化

Fig. 3 Change of influent flow, ammonia nitrogen load and DO set value

## 2.3 污染物去除效果

### 2.3.1 对 COD 的去除效果

应用曝气控制系统的前提条件是保证出水水质达标。该污水厂执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级 A 排放标准。应用曝气控制系统前后,污水厂出水 COD 情况见图 4。未应用曝气控制系统运行阶段称为手动运行;基于 OUR 气量计算模型,手动设定 DO 值运行期间称为恒 DO 运行;基于 OUR 气量计算模型和基于进水氨氮负荷设定 DO 值运行期间称为动 DO 运行。

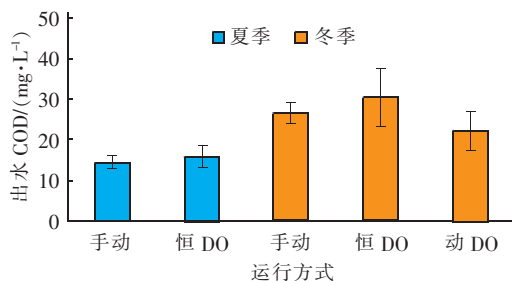


图 4 应用曝气控制系统前后出水 COD 的变化

Fig. 4 Change of effluent COD based on different control strategies

从图 4 可以看出,应用曝气控制系统后出水 COD 满足排放标准。考虑到水温对微生物活性的影响,故而将相同季节出水 COD 进行对比。夏季手动运行期间出水 COD 为  $(14.69 \pm 1.79)$  mg/L,恒 DO 运行期间出水 COD 为  $(16.03 \pm 2.75)$  mg/L。夏季应用精确曝气控制系统后,出水 COD 与应用前相比无明显差别。冬季手动运行期间出水 COD 为  $(26.90 \pm 2.68)$  mg/L,恒 DO 运行期间出水 COD 为  $(30.75 \pm 7.09)$  mg/L,动 DO 运行期间出水 COD 为

( $22.43 \pm 4.88$ )  $\text{mg/L}$ 。冬季应用精确曝气控制系统后,出水 COD 与应用前相比无明显差别。综上,曝气控制系统应用后可以保证污水厂出水水质满足排放标准,与未应用系统前出水 COD 差别不大。

### 2.3.2 对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果

根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准,夏季氨氮排放限值为  $5 \text{ mg/L}$ ,冬季氨氮排放限值为  $8 \text{ mg/L}$ 。硝化菌是中温生长菌,其适宜的温度范围为  $20 \sim 30^\circ\text{C}$ 。温度低于  $10^\circ\text{C}$  时,硝化菌的生长及硝化作用显著减慢。污水厂在应用曝气控制系统前后出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  情况如图 5 所示。可以看出,应用曝气控制系统前后出水氨氮均满足排放标准。夏季手动运行期间出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 ( $0.25 \pm 0.12$ )  $\text{mg/L}$ ,恒 DO 运行的出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 ( $0.38 \pm 0.002$ )  $\text{mg/L}$ 。夏季应用精确曝气控制系统后,出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  与应用前相比无明显差别。冬季手动运行时出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 ( $1.36 \pm 0.23$ )  $\text{mg/L}$ ,恒 DO 运行时出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 ( $1.21 \pm 0.27$ )  $\text{mg/L}$ ,动 DO 运行时出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  为 ( $1.12 \pm 0.27$ )  $\text{mg/L}$ 。冬季应用曝气控制系统后,出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  与应用前相比有所降低。这是由于冬季水温低,DO 成为硝化菌硝化作用的限制因素。应用曝气控制系统前鼓风机采用恒负载率运行模式,好氧池 DO 波动较大,有时会出现 DO 低于  $0.5 \text{ mg/L}$  的情况,导致出水氨氮升高。而曝气控制系统根据进水氨氮负荷的变化时刻保证 DO 处于最佳设定值,保证了出水氨氮的稳定。综上,曝气控制系统应用后可以保证污水厂出水水质满足排放标准,冬季出水氨氮略有降低。

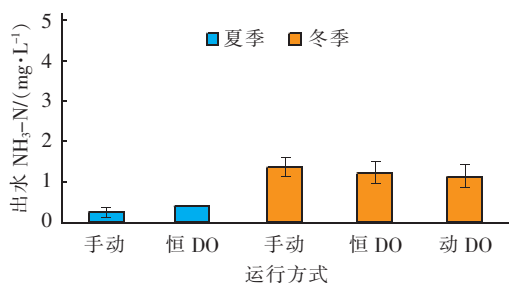


图 5 应用曝气控制系统前后出水  $\text{NH}_3 - \text{N}$  的变化

Fig. 5 Change of effluent  $\text{NH}_3 - \text{N}$  based on different control strategies

### 2.4 节能效果分析

曝气控制系统应用的目的是在保证出水达标的基础上,降低鼓风机运行能耗。考虑到夏季与冬季好氧池污泥浓度和水温不同,都会对鼓风机能耗产

生影响,因此分别考察了夏季与冬季鼓风机处理单位体积水的电耗。该污水厂应用曝气控制系统前后鼓风机处理单位体积水的电耗如图 6 所示。可以看出,无论是夏季还是冬季,应用曝气控制系统后鼓风机处理单位体积水的电耗较之前均有大幅度下降。夏季手动运行期间,鼓风机处理单位体积水的电耗平均值为 ( $0.04672 \pm 0.00569$ )  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,恒 DO 运行期间为 ( $0.03446 \pm 0.00477$ )  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,较手动运行下降了 26.24%。冬季手动运行期间,鼓风机电耗平均值为 ( $0.04562 \pm 0.00336$ )  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,恒 DO 运行期间为 ( $0.03918 \pm 0.00623$ )  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,动 DO 运行期间为 ( $0.03527 \pm 0.00432$ )  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,恒 DO 运行较手动运行下降了 14.1%,动 DO 运行较手动运行下降了 22.69%,动 DO 运行较恒 DO 运行下降了 9.98%。曝气控制系统应用后冬季节能量较夏季有所降低,究其原因冬季好氧池污泥浓度较夏季高,冬季需要较高的污泥龄来确保出水氨氮达标。综上,曝气控制系统应用后可以显著降低鼓风机处理单位水的电耗,曝气控制系统夏季和冬季鼓风机处理单位体积水的电耗降低 21.9%。

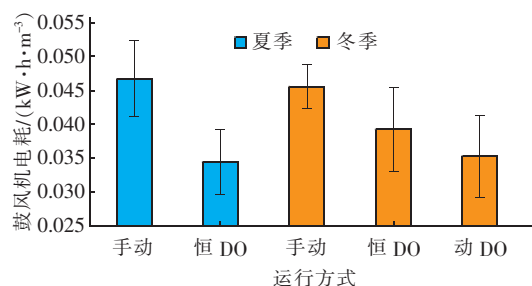


图 6 鼓风机处理单位体积水的电耗

Fig. 6 Power consumption per unit volume of water processed by blower

图 7 为曝气控制系统应用前后鼓风机电耗与处理水量之间的关系。

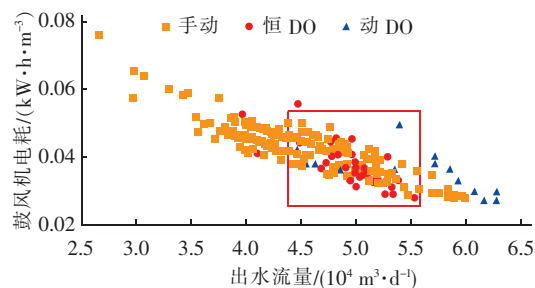


图 7 鼓风机电耗与水量的关系

Fig. 7 Relationship between blower power consumption and sewage volume



随着处理水量的增加,鼓风机处理单位体积水的电耗呈现下降趋势。在水量相差不大的情况下,应用曝气控制系统后鼓风机处理单位水的电耗较手动运行低。

### 3 结论

基于 OUR 气量计算模型可以保证好氧池 DO 目标值在  $\pm 0.315$  mg/L 范围内波动,大大提高了好氧池需氧量计算的准确度。基于进水氨氮负荷的 DO 预测模型可以依据进水氨氮负荷变化准确预测 DO 值。基于 OUR 气量计算模型和基于进水氨氮负荷 DO 预测模型相结合的曝气控制系统可以保证出水 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  满足排放标准,并且可以使鼓风机处理单位体积水的电耗降低 21.9%。曝气控制系统可以显著降低鼓风机的运行能耗,然而曝气控制系统运行时间较短,系统稳定性和节能量仍需长时间运行进行验证。

### 参考文献:

- [1] ZHU Z Y, WANG R Y, LI Y M. Evaluation of the control strategy for aeration energy reduction in a nutrient removing wastewater treatment plant based on the coupling of ASM1 to an aeration model[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 124: 44–53.
- [2] AMAND L, OLSSON G, CARLSSON B. Aeration control—a review[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(11): 2374–2398.
- [3] DARKO V, NADJA H, ALJAZ S. Improvement of ammonia removal in activated sludge process with feedforward-feedback aeration controllers[J]. *Water Science & Technology*, 2006, 53(4/5): 125–132.
- [4] RIEGER L, TAKACS I, SIEGRIST H. Improving nutrient removal while reducing energy use at three Swiss WWTPs using advanced control[J]. *Water Environment Research*, 2012, 84(2): 170–188.
- [5] SUESCUN J, OSTOLAZA X, GARCIA-SANZ M. Real-time control strategies for predenitrification-nitrification activated sludge plants biodegradation control[J]. *Water Science & Technology*, 2001, 43(1): 209–216.
- [6] EKMAN M, BJORLENIUS B, ANDERSSON M. Control of the aeration volume in an activated sludge process using supervisory control strategies[J]. *Water Research*, 2006, 40(8): 1668–1676.
- [7] INGILDSEN P, JEPSSON U, OLSSON G. Dissolved oxygen controller based on on-line measurements of ammonium combining feed-forward and feedback[J]. *Water Science & Technology*, 2002, 45(4/5): 453–460.
- [8] KRAUSE K, BOCKER K, LONDONG J. Simulation of a nitrification control concept considering influent ammonium load[J]. *Water Science & Technology*, 2002, 45(4/5): 413–420.
- [9] MEYER U, POPEL H J. Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in WWT-plants with pre-denitrification[J]. *Water Science & Technology*, 2003, 47(11): 69–76.
- [10] ZHAN J X, IKEHATA M, MAYUZUMI M, *et al.* An aeration control strategy for oxidation ditch processes based on online oxygen requirement estimation[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 68(1): 76–82.
- [11] 卢培利, 张代钧, 曹海彬, 等. 废水生物处理中的呼吸测量技术进展[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(10): 128–132.
- LU Peili, ZHANG Daijun, CAO Haibin, *et al.* Progress of respirometry in wastewater biological treatment[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(10): 128–132 (in Chinese).
- [12] 卢培利, 张代钧, 张欣, 等. 自动混合呼吸测量仪的开发与验证[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(5): 118–123.
- LU Peili, ZHANG Daijun, ZHANG Xin, *et al.* Development and validation of automated hybrid respirometer[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(5): 118–123 (in Chinese).
- [13] 杨瓯蒙, 胡湛波, 王瑾, 等. 新型智能化曝气控制系统在生活污水 A/O 处理工艺中的应用[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(11): 6255–6260.
- YANG Oumeng, HU Zhanbo, WANG Cui, *et al.* Domestic wastewater treatment by A/O process with an intelligent aeration control system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(11): 6255–6260 (in Chinese).

作者简介: 布吉红(1988–), 男, 吉林磐石人, 硕士, 工程师, 主要从事水污染治理、水厂运营及数字化等研究工作。

E-mail: 15117984109@126.com

收稿日期: 2019-07-23

修回日期: 2019-08-31

(编辑: 任莹莹)