

基于数学模型的倒置 AAO 系统阶跃响应特性分析

陈 广¹, 安 莹², 周 振²

(1. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203; 2. 上海电力学院 环境与化学工程学院, 上海 200090)

摘 要: 采用活性污泥数学模型和阶跃响应分析方法从幅度(相对灵敏度)和动力学(响应时间)两方面开展了缺氧/厌氧/好氧(倒置 AAO)工艺的特性分析,以筛选灵敏度高、响应速度快的操作变量,用以指导工艺运行优化。结果表明,进水流量(Q_f)、剩余污泥排放量(WAS)、污泥回流比(RAS)和混合液回流比(MLR)对出水水质的灵敏度较高。硝化作用对 WAS 和 RAS 变化最为敏感;溶解氧(DO)浓度则适合于出水氨氮浓度的快速调整;RAS、MLR 和 WAS 对出水总氮和总磷浓度均有显著影响;而进水分配比对出水污染物浓度和功能性微生物含量影响不大。

关键词: 缺氧/厌氧/好氧工艺; 数学模型; 污水处理; 阶跃响应; 灵敏度分析

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0088-06

Step Response Analysis of Anoxic/Anaerobic/Aerobic Process Characteristics Based on Mathematical Model

CHEN Guang¹, AN Ying², ZHOU Zhen²

(1. Shanghai Chengtong Wastewater Treatment Co. Ltd., Shanghai 201203, China; 2. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Characteristics of the anoxic/anaerobic/aerobic (reversed AAO) process were analyzed from two aspects including amplitude (relative sensitivity) and kinetics (response time) by using activated sludge mathematical model and step response method, so as to select the operating variables with high sensitivity and fast response to guide the process optimization. The results indicated that pollutants concentrations of the effluent were highly sensitive to influent flow rate (Q_f), waste activated sludge (WAS), returned activated sludge (RAS) and mixed liquor recirculation (MLR). The nitrification process was most sensitive to WAS and RAS, while the DO was suitable for short-term adjustment of the effluent ammonia nitrogen. RAS, MLR and WAS were all had significant effects on total nitrogen and total phosphorus of the effluent. However, the step feeding ratio had an insignificant effect on the effluent pollutants concentrations and functional biomass in the reversed AAO process.

Key words: anoxic/anaerobic/aerobic process; mathematical model; wastewater treatment; step response; sensitivity analysis

厌氧/缺氧/好氧(正置 AAO)工艺是最早开发的脱氮除磷生物处理工艺^[1],已在世界范围内得到

广泛应用。缺氧/厌氧/好氧(倒置 AAO)工艺由张波等^[2]于 1996 年提出,该工艺通过改变混合液回流

(MLR)点将 AAO 工艺的厌氧段和缺氧段倒置而实现。倒置 AAO 工艺的支持者认为其具有如下优点^[3-6]:①通过前置反硝化强化系统脱氮能力;②所有活性污泥均经历完整的厌氧和好氧阶段,系统中聚磷菌(X_{PAO})的“群体效应”会强化除磷,污泥含磷量更高;③在缺氧段还原 MLR 以及污泥回流(RAS)夹带的溶解氧(DO)和硝酸盐氮(S_{NO}),避免电子受体干扰厌氧释磷;④聚磷菌厌氧释磷后直接进入吸磷效率较高的好氧环境,厌氧合成的聚 β -羟基烷酸(PHA)能够更为有效地被利用。近年来,倒置 AAO 工艺的工程应用逐渐增多,已在国内外 100 余家污水处理厂新建或改造工程中得到了应用,总规模超过 $700 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

随着实际应用的增多,倒置 AAO 工艺的研究逐渐从早期的污染物去除效率分析和运行特性研究转向工艺参数调控分析与运行优化^[7-8],但倒置 AAO 工艺各操作变量的影响尚有待更为系统的定量评价。笔者以上海某污水处理厂倒置 AAO 工艺的进水流量(Q_f)、进水分配比例(SF)、DO、MLR、RAS 和剩余污泥排放量(WAS)这 6 个操作变量为研究对象,通过引入阶跃输入变化,从灵敏度和响应速度两方面分析其瞬变响应特性,揭示变量在调控时系统各功能改变的情况,以期为倒置 AAO 工艺的运行控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 工艺模型

上海某污水处理厂多模式 AAO 系统的处理水量为 $160 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要采用倒置 AAO 工艺,其选择区、缺氧区、厌氧区 and 好氧区的水力停留时间(HRT)分别为 0.3、1.3、2.3 和 8.1 h,二沉池采用平流式。在模拟过程中,倒置 AAO 工艺的运行工况如下:进水分配比例为 50%,污泥回流比为 50%,混合液回流比为 50%,污泥龄(SRT)为 15 d,好氧区 DO 为 2.0 mg/L ,温度为 20°C 。工艺流程详细信息、进水水质划分和浓度参见文献[9]和[10]。采用 WEST 3.7.5 软件构建模型,工艺模型由 ASM2dTemp 生化反应模型和 Takács 二沉池模型构成。模型及其参数校正参见文献[6]和[9]。

1.2 阶跃响应试验

在过程控制中,描述被控对象动态特性最常用的方式是阶跃响应^[11]。本研究选定变化幅度为被调量 10% 的阶跃输入作为扰动信号。测试前系统

首先模拟至稳定状态,测试时除输入信号外其他环境条件和操作变量保持不变,测试在正向和反向扰动下重复进行,以求全面掌握系统的动态特性。

1.3 阶跃响应曲线分析

为了明确操作变量的有效性,阶跃响应曲线将从幅度和动力学两方面进行分析^[12]。幅度反映了操作变量影响系统变量的程度,采用系统变量对操作变量(目标变量)的相对灵敏度(RS)描述^[11,13]:

$$RS_{ij} = \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \frac{u_j}{y_i} = \frac{u_j}{\Delta u_j} \frac{\Delta y_i}{y_i} \quad (1)$$

按照 Lenhart 等人^[14]的灵敏度分级, $|RS| \geq 1$ 为超高灵敏参数; $0.2 \leq |RS| < 1$ 为高灵敏参数; $0.05 \leq |RS| < 0.2$ 为中灵敏参数; $|RS| < 0.05$ 为低灵敏参数。

动力学则是指操作变量发生作用所需的时间,可引入调节时间 t_s 定量表征^[11]。 t_s 是指从一个稳态(C_0)到另一个稳态(C_s)所需的时间,可根据如下准则判定:对于设定值 δ ,如果在时刻 t_n 被控变量值 C_n 满足 $|C_s - C_n|/C_s \leq \delta$,则 t_n 可视为 t_s ,即被控变量处于 $(1 \pm \delta)C_s$ 的区间内。取 δ 为 0.01,并假定 $C_s \leq 0.04 \text{ d}$ 为快速响应, $0.04 \text{ d} < C_s \leq 0.2 \text{ d}$ 为中速响应, $C_s > 0.2 \text{ d}$ 为慢速响应。

2 结果与讨论

2.1 出水水质的阶跃响应分析

倒置 AAO 工艺中 Q_f 、SF、DO、MLR、RAS 和 WAS 这 6 个操作变量对出水水质的灵敏度分析如图 1 所示。由图 1(a)和(b)的灵敏度分析可知,在 6 个操作变量中 Q_f 对 COD 和 BOD_5 浓度的影响最为显著,而 DO、SF 和 MLR 的变化对出水 COD 和 BOD_5 浓度的影响则很小。在对 BOD_5 浓度有明显影响的 3 个变量 Q_f 、RAS 和 WAS 中,控制变量对 Q_f 的阶跃响应最快(见表 1)。变量 Q_f 的波动会引起生物处理系统和二沉池 HRT 的变化,其对有机污染物浓度的显著性影响主要是由于二沉池水力负荷波动造成出水悬浮物(X_e)变化所致^[12]。由图 1(d)可知,反应区内部操作变量 DO、SF 和 MLR 的降低均会造成出水氨氮(S_{NH})升高,且出水 S_{NH} 对操作变量响应迅速(见表 1),但 SF 和 MLR 的相对灵敏度较低;而出水 S_{NH} 对 RAS 和 WAS 响应缓慢但相对灵敏度高。从幅度和动力学两方面来看,DO 适合于出水 S_{NH} 的短期调整,而 WAS 则适于 S_{NH} 的长期运行工况优化。由图 1(e)可知,DO 浓度的增加有利于

硝化但会干扰反硝化。结合表1可知,出水TN对内部变量DO、SF和MLR的阶跃变化响应迅速,而外部变量除 Q_f 和RAS外对TN的扰动需要较长时

间才能趋于稳定。在6个操作变量中, Q_f 、MLR和RAS对TN浓度变化具有显著性影响,这也说明控制回流比是调整出水TN浓度的有效措施^[1]。

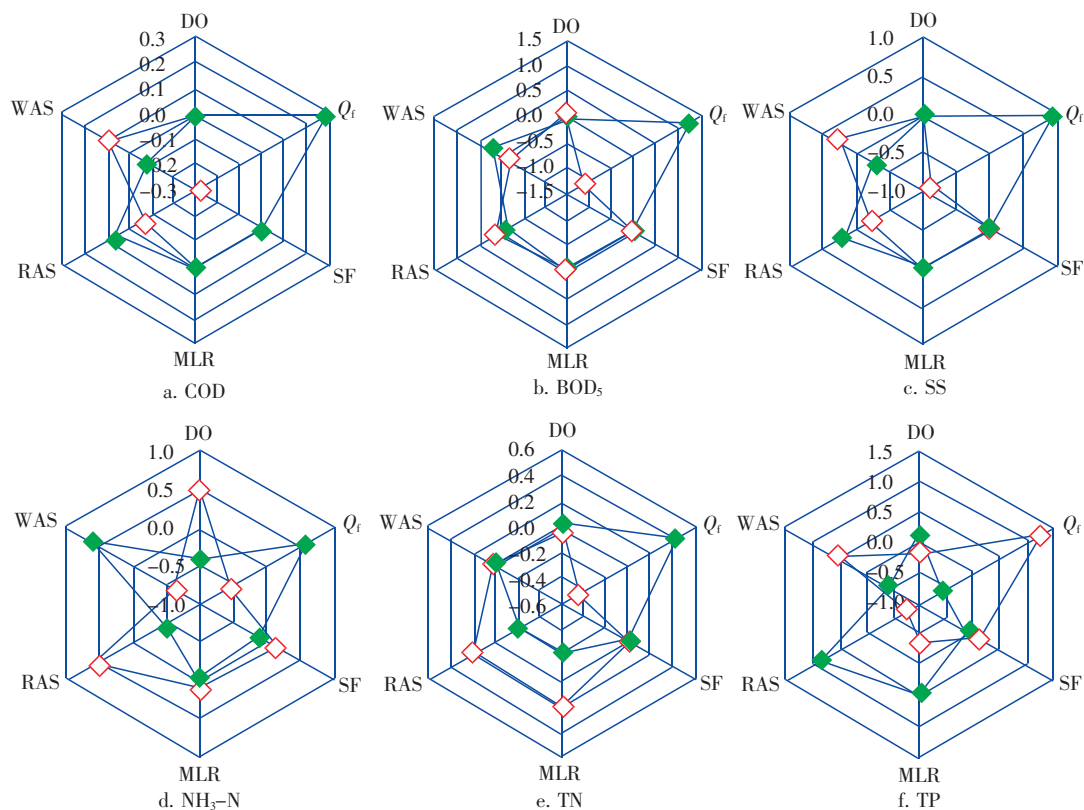


图1 倒置AAO工艺中操作变量对出水水质的灵敏度(◆为正向扰动,◇为负向扰动,下同)

Fig. 1 Sensitivity analysis of operating variables on effluent quality in the reversed AAO system

表1 倒置AAO工艺中出水水质阶跃响应的调节时间

Tab. 1 Adjusting time in step response of effluent quality in the reversed AAO system

操作变量	COD	BOD ₅	TN	TP	TSS	S_{NH}
DO	0.010	0.01	0.010	0.920	0.010	0.035
Q_f	0.015	5.60	0.625	6.125	5.535	0.010
SF	0.010	0.01	0.010	0.040	0.010	0.015
MLR	0.010	0.01	0.205	3.505	0.010	0.175
RAS	0.010	11.40	0.205	16.950	7.450	10.350
WAS	0.010	20.15	0.010	29.700	17.050	15.700

由图1(f)和表1可知,TP对所有操作变量的阶跃响应曲线均需要较长时间才能稳定,且所有操作变量的相对灵敏度均比较高。比较而言,出水TP对RAS的相对灵敏度最高,而灵敏变量中MLR的调控速度最快。值得注意的是,进水流量突增时会出现TP先升高后降低的现象。

2.2 功能性微生物的阶跃响应分析

Q_f 、SF、DO、MLR、RAS和WAS这6个操作变量

对好氧段微生物和MLSS的灵敏度分析如图2所示。由图2(a)可知,内部变量DO、SF和MLR对好氧段MLSS的影响较小,DO增加会强化内源呼吸而使MLSS略有降低。在外部变量中, Q_f 波动会造成进水负荷的变化进而引起好氧段MLSS的变化,MLSS对 Q_f 的RS值约为0.42。RAS影响着反应区和二沉池之间的污泥浓度分布^[11-12],提高RAS会使污泥由二沉池向反应区迁移造成好氧段MLSS增加;WAS变化则会影响反应系统的污泥总量和SRT,WAS增加会降低SRT导致好氧池MLSS降低。好氧池MLSS的调控主要通过RAS和WAS实现,WAS调控的灵敏度高但过渡时间较长,而RAS调控的灵敏度略低于WAS但响应速度较快(见表2)。

由图2(b)和表2可知,好氧池中异养菌(X_H)浓度对内部变量DO和SF的相对灵敏度很低,而对MLR的灵敏度则较高。这表明在基本运行模式下DO不是 X_H 增长的限制性因素,而MLR的增加会

提高 X_H 的缺氧增长量,从而引起 X_H 浓度的显著性增加。外部变量 RAS 的正向干扰不仅会通过缺氧生长增加 X_H 浓度,而且 X_H 会从二沉池向反应池迁移而提高好氧池的 X_H 浓度,因此 X_H 对 RAS 的灵敏

度高于 MLR。 Q_f 的正向干扰会增加倒置 AAO 系统的碳源供给从而增加好氧池的 X_H 浓度。在 6 个操作变量中, X_H 对 Q_f 的灵敏度最高,但 RAS 更能兼顾幅度和速度两个方面。

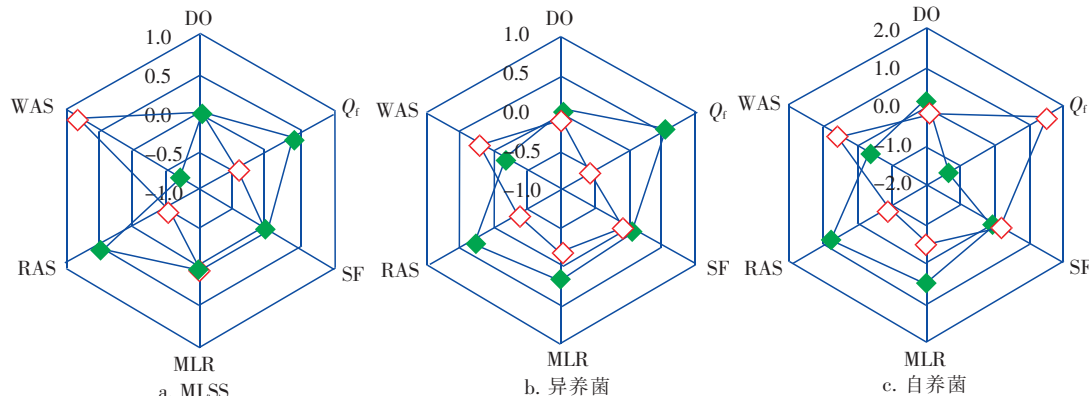


图 2 倒置 AAO 工艺中操作变量对好氧段微生物和 MLSS 的灵敏度

Fig. 2 Sensitivity analysis of operating variables on functional biomass and MLSS in the reversed AAO system

表 2 倒置 AAO 工艺中功能性微生物阶跃响应的调节时间
Tab. 2 Adjusting time in step response of functional biomass in the reversed AAO system

操作变量	MLSS	X_H	X_{AUT}	X_{PAO}	X_{PHA}/X_{PAO}	X_{PP}/X_{PAO}
DO	0.02	13.10	0.02	0.02	7.42	0.02
Q_f	36.80	47.40	26.10	65.80	18.90	0.03
SF	0.02	0.15	0.02	0.02	2.58	0.02
MLR	0.02	25.90	0.02	24.70	13.80	0.08
RAS	47.00	13.40	9.84	40.30	39.90	0.12
WAS	66.20	35.20	19.00	70.40	63.20	16.20

由图 2(c) 和表 2 可知,好氧池中自养菌(X_{AUT})浓度对内部变量的相对灵敏度都很小,因此 X_{AUT} 的调控应主要通过外部变量来实现。 Q_f 的正向阶跃会显著增加好氧池中的 X_{AUT} 浓度,这主要通过提升系统的氨氮负荷实现。 X_{AUT} 浓度会随着 RAS 的增加而增加,正向和负向干扰的响应曲线关于基准线对称。WAS 的响应对于 X_{AUT} 浓度的影响是通过改变 SRT 实现的,其灵敏度较高,但过渡时间较长。

2.3 倒置 AAO 系统中聚磷菌胞内物质的变化

ASM2d 对聚磷菌(X_{PAO})胞内储存物质进行了详细描述,系统除磷效果和聚磷菌生长受胞内储存物质的影响很大。图 3 为聚磷菌胞内储存物聚磷酸盐(X_{PP})和聚 β -羟基烷酸(X_{PHA})含量在倒置 AAO 系统各反应区的变化情况。可知,在由选择区进入厌氧区时,聚磷菌胞内的 X_{PP} 含量略有升高,而 X_{PHA} 含量降低,这说明在缺氧区发生了明显的反硝化吸磷过程。在由缺氧区经厌氧区到交替区的过程中,

聚磷菌胞内 X_{PP} 含量持续降低而 X_{PHA} 含量升高,这表明厌氧区和交替区(未曝气)中均发生了厌氧释磷现象,交替区可视为第 2 个厌氧区。在好氧池中, X_{PAO} 利用胞内储存的 X_{PHA} 提供动力实现了好氧吸磷,其胞内 X_{PHA} 含量降低而 X_{PP} 含量升高。由以上分析可知,交替区 X_{PHA}/X_{PAO} 可用于表征倒置 AAO 系统中聚磷菌的吸磷潜力和生长能力。

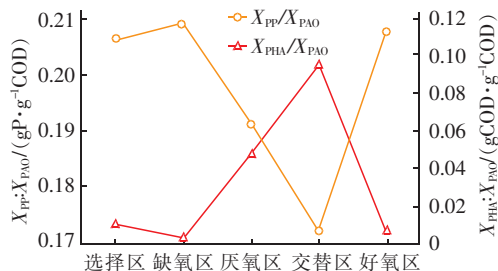


图 3 基本运行模式下聚磷菌胞内储存物含量在倒置 AAO 系统各反应段中的变化

Fig. 3 Variation of cellular storage contents of PAO in each stage of the reversed AAO system

2.4 聚磷菌及其胞内物质的阶跃响应变化分析

倒置 AAO 工艺中操作变量对聚磷菌及其胞内物质的灵敏度分析如图 4 所示,除 SF 对聚磷菌影响较小外,聚磷菌对其他 5 个操作变量的 RS 值均高于 0.25,这也说明聚磷菌对工况条件十分敏感。DO 正向扰动会降低好氧池的聚磷菌浓度,因此 DO 设定值较低更利于聚磷菌生长^[15]。 Q_f 波动对聚磷菌浓度的影响最为显著,这是因为在不调整其他操作

变量的情况下,提高 Q_f 意味着内外回流比的降低和厌氧吸磷所需碳源的增加,从而促进聚磷菌增长。回流量 MLR 和 RAS 的增加均会增加缺氧段的硝酸盐氮浓度,而反硝化在与释磷过程争夺碳源时处于优势地位^[16],因此回流比的增加会大幅度降低聚磷

菌浓度。WAS 正向扰动会降低系统的聚磷菌浓度,表面看来这与增加排泥量有利于生物除磷的观点相矛盾,但深入分析可知,聚磷菌浓度降低主要是由于 MLSS 降低所致,实际上增加排泥量后聚磷菌与 MLSS 之比由 0.074 增加至 0.075 左右。

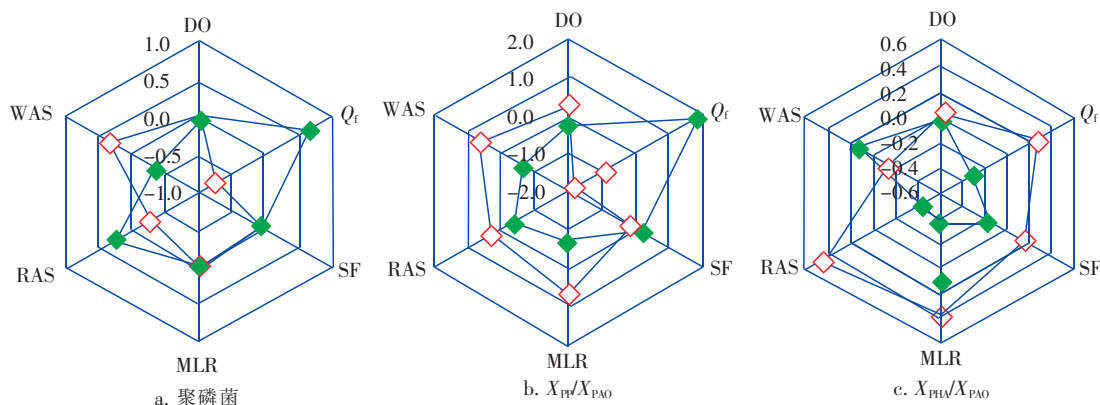


图4 倒置 AAO 工艺中操作变量对聚磷菌及其胞内物质的灵敏度

Fig. 4 Sensitivity analysis of operating variables on PAO and its cellular storage in the reversed AAO system

DO 的正向扰动会提高好氧吸磷的程度,增加聚磷菌胞内的 X_{pp} 含量,但过量的电子受体回流至上游的工艺阶段后会干扰厌氧释磷,因此厌氧段聚磷菌中 X_{PHA} 含量会有所降低,这也是 DO 增加对聚磷菌生长不利的重要原因^[15]。分段进水量 SF 对两者的影响并不显著,增加缺氧段进水量会降低厌氧段的 X_{PHA}/X_{PAO} 值。回流量 MLR 和 RAS 的增加都会降低厌氧段的 X_{PHA}/X_{PAO} 值,这主要是由于反硝化的碳源消耗会降低 PHA 合成量^[16]。WAS 升高会引起厌氧段聚磷菌中 X_{PHA} 含量的增加。从灵敏度分析结果来看,对厌氧段聚磷菌中 X_{PHA} 含量影响较大的变量依次是 Q_f 、RAS 和 MLR。

3 结论

① 出水水质对进水流量的变化最为敏感。在进水流量恒定时,剩余污泥排放量和污泥回流比对有机物去除影响较大;硝化作用对污泥回流比、混合液回流比和 DO 浓度的变化比较敏感,对出水氨氮浓度响应最快的是好氧池 DO 浓度;对反硝化有显著影响的变量是污泥回流比和混合液回流比;出水 TP 对操作变量的 RS 值大小依次为污泥回流比 > 剩余污泥排放量 > 混合液回流比 > DO 浓度 > 进水分分配比例,其中进水分分配比例、DO 浓度和混合液回流比的响应速度较快。

② 倒置 AAO 系统中功能性菌群受进水流量

影响很大。除进水流量外,对好氧池异养菌浓度影响较大的变量依次是污泥回流比、剩余污泥排放量和混合液回流比;对好氧池自养菌浓度影响较大的变量则是剩余污泥排放量和污泥回流比;好氧池聚磷菌浓度对操作变量的 RS 值大小顺序为混合液回流比 > 剩余污泥排放量 > 污泥回流比 > DO 浓度 > 进水分分配比例。

③ 本研究的系统阶跃响应分析主要针对设计基准条件开展,在实际工艺分析中需要充分考虑基准值问题,特别是非线性变化的变量,如 DO 浓度由于受到半饱和系数的影响,在低 DO 区域属于敏感变量,但高 DO 区域则影响较小。

参考文献:

- [1] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- [2] 张波,高廷耀. 生物脱氮除磷工艺厌氧/缺氧环境倒置效应[J]. 中国给水排水, 1997, 13(3): 7-10.
Zhang Bo, Gao Tingyao. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal by reversal of anaerobic and anoxic zones sequence [J]. China Water & Wastewater, 1997, 13(3): 7-10 (in Chinese).
- [3] 毕学军,张波. 倒置 A²/O 工艺生物脱氮除磷原理及其生产应用[J]. 环境工程, 2006, 24(3): 29-30.
Bi Xuejun, Zhang Bo. The principal and full-scale

- application of reversed A^2/O process for removing nitrogen and phosphorus [J]. Environmental Engineering, 2006, 24(3): 29–30 (in Chinese).
- [4] 李鹏, 毕学军, 王军, 等. 常规和倒置 A^2/O 工艺活性污泥微生物群落结构的比较 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1137–1145.
- Li Peng, Bi Xuejun, Wang Jun, *et al.* Microbial diversity in activated sludges of conventional and reversed A^2/O processes [J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 1137–1145 (in Chinese).
- [5] 张静, 唐贤春, 陈洪斌. 倒置 AAO – MBR 处理黑水 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3657–3663.
- Zhang Jing, Tang Xianchun, Chen Hongbin. Black water treatment with process of reversed AAO-MBR [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3657–3663 (in Chinese).
- [6] Zhou Z, Wu Z C, Wang Z W, *et al.* Simulation and performance evaluation of the anoxic/anaerobic/aerobic process for biological nutrient removal [J]. Korean J Chem E, 2011, 28(5): 1233–1240.
- [7] 郭玉梅, 吴毅辉, 郭昉, 等. 某污水厂 A^2/O 和倒置 A^2/O 工艺脱氮除磷性能分析 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2185–2190.
- Guo Yumei, Wu Yihui, Guo Fang, *et al.* Analysis of nitrogen and phosphorus removal in A^2/O and inverted A^2/O processes in a wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5): 2185–2190 (in Chinese).
- [8] Xu S, Bernards M, Hu Z. Evaluation of anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O) and reverse A^2/O processes in biological nutrient removal [J]. Water Environ Res, 2014, 86(11): 2186–2193.
- [9] 周振, 吴志超, 王志伟, 等. 多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 [J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1442–1447.
- Zhou Zhen, Wu Zhichao, Wang Zhiwei, *et al.* Modeling and dynamic simulation of the multimode anaerobic/anoxic/aerobic wastewater treatment process [J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1442–1447 (in Chinese).
- [10] 周振, 胡大龙, 吴志超, 等. 基于数学模型的多模式 AAO 系统运行优化研究 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(7): 1734–1739.
- Zhou Zhen, Hu Dalong, Wu Zhichao, *et al.* Model-based optimization of the multimode anaerobic/anoxic/aerobic system [J]. China Environmental Science, 2014, 34(7): 1734–1739 (in Chinese).
- [11] 周振, 乔卫敏, 蒋路漫, 等. 基于数学模型的 AAO 系统阶跃响应特性分析 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 442–447.
- Zhou Zhen, Qiao Weimin, Jiang Luman, *et al.* Model-based analysis for step response characteristics of the anaerobic/anoxic/aerobic process [J]. China Environmental Science, 2015, 35(2): 442–447 (in Chinese).
- [12] Olsson G, Newell R B. Wastewater Treatment Systems: Modelling, Diagnosis and Control [M]. London: IWA Publishing, 1999.
- [13] Cosenza A, Mannina G, Vanrolleghem P A, *et al.* Variance-based sensitivity analysis for wastewater treatment plant modelling [J]. Sci Total Environ, 2014, 470/471: 1068–1077.
- [14] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, *et al.* Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. Phys Chem Earth, 2002, 27(9/10): 645–654.
- [15] Gernaey K V, Jørgensen S B. Benchmarking combined biological phosphorus and nitrogen removal wastewater treatment processes [J]. Control Eng Pract, 2004, 12(3): 357–373.
- [16] Kuba T, Wachtmeister A, van Loosdrecht M C M. Effect of nitrate on phosphorus release in biological phosphorus removal systems [J]. Water Sci Technol, 1994, 30(6): 263–269.



作者简介: 陈广 (1980 –), 男, 江苏江都人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为城镇污水和污泥的处理与处置。

E-mail: chenguang@shwwt.com

收稿日期: 2018-09-29