

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O₃ 浓度变化 王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)

南京北郊黑碳气溶胶的来源解析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何镓祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)

电镀厂周边大气 PM₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价 赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)

广西玉林市大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)

青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征 张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)

大气环境分区管理: 以广东省为例 杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)

基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例 温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁潇蕾, 苗松 (57)

基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ¹⁵N 和 δ¹⁸O 模拟 王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)

程河流域非点源污染负荷估算及其控制对策 陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)

陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)

天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价 张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)

西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响 王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌, 肖 (109)

以 HKUST-1 为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)

黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险 姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征 周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)

磷酸盐对铁锰复合氧化物膜去除地表水中氨氮的影响 卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)

K₂S₂O₈ 强化 g-C₃N₄ 薄膜光电催化降解 Cu(CN)₂ 并同步回收 Cu 党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)

以 HKUST-1 为模板制备铜电极物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B 蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)

氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能 马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)

铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除 曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)

水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态 马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)

阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响 任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)

典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征 赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)

水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响 许雯佳, 戚小英 (202)

环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性 戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)

AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟 曹特特, 王林, 李咏梅 (219)

磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)

碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)

容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响 吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)

DNBF-O₃-GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物 钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)

交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响 周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)

高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用 韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)

浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析 刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)

去除城市生活污水中有机络合态金属强化其厌氧生物制气 卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)

污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价 王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)

初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH₄ 和 N₂O 通量日变化特征 杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)

3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响 武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)

有机替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N₂O 排放的影响 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)

拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³C-CO₂ 脉冲标记 陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)

陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征 兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)

不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)

秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)

县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估 李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)

基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测 曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春锋, 金志丰, 朱雁 (371)

沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)

磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化模拟铅镉污染土壤 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响 封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)

典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异 李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)

松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征 张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)

硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响 代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)

长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响 王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)

海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较 张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈焯, 付璐璐, 王勋功 (438)

鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系 袁丽娟, 廖且根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)

畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征 张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)

烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧飞灰性质的影响 章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

《环境科学》征稿简则(17) 《环境科学》征订启事(26) 信息(160, 255, 338)

AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟

曹特特, 王林, 李咏梅*

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 利用厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺探讨了在好氧池低溶解氧(DO)浓度条件下的水质指标变化情况. 结果表明, 当好氧池 DO 浓度从 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 系统仍然具有良好的除磷脱氮效果, 出水水质指标均满足我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级 A 标准. 在此基础上, 基于 BioWin 4.1 软件建立了 AAO 工艺的活性污泥模型, 对模型参数进行了灵敏度分析, 并利用动态模拟对模型参数中的聚磷菌吸收乙酸或丙酸的聚羟基烷酸(PHA)产率系数($Y_{P/PHA, \text{seq}}$)、聚磷菌好氧化 PHA 的储磷率($Y_{P/PHA, \text{aerobic}}$)、氨氧化菌的最大单位生长速率($\mu_{\text{max}, A}$)和亚硝酸盐氧化菌的最大单位生长速率($\mu_{\text{max}, N}$)进行了校验. 此外, 对系统的曝气能耗进行了模拟评估, 结果表明, 与好氧池 DO 浓度为 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时相比, 好氧池 DO 浓度为 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的空气流量可分别节省 23.8% 和 38.1%, 氧转移效率可分别提高 7.2% 和 11.7%.

关键词: AAO 工艺; 溶解氧浓度; 除磷脱氮; 模拟; 曝气能耗

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0219-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201704132

Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation

CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The anaerobic-anoxic-oxic (AAO) process was used to investigate the variation of the parameters of water quality when the dissolved oxygen (DO) in the aerobic tank was controlled at a low concentration. The results indicated the system still had good phosphorus and nitrogen removal efficiencies when the DO concentration in the aerobic tank was decreased from $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the effluent indexes could meet the first class A standard for the “discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant” (GB18918-2002) of China. The activated sludge model of the AAO process was developed by BioWin 4.1 software. The sensitivities of the model parameters were analyzed, and the model parameters, such as amount of polyhydroxyalkanoate (PHA) stored per unit of acetate or the propionate sequestered by phosphorus accumulating bacteria ($Y_{P/PHA, \text{seq}}$), the amount of phosphorus stored per unit of PHA oxidized in aerobic conditions by phosphorus accumulating bacteria ($Y_{P/PHA, \text{aerobic}}$), the maximum specific growth rate of ammonia oxidizing bacteria ($\mu_{\text{max}, A}$), and the maximum specific growth rate of nitrite oxidizing bacteria ($\mu_{\text{max}, N}$), were calibrated and validated by the dynamic simulation. In addition, the energy consumption of the aeration was simulated and evaluated. The results showed that when the DO concentration in the aerobic tank was decreased from $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the air flow could be reduced by 23.8% and 38.1%, and the oxygen transfer efficiency could be increased by 7.2% and 11.7%, respectively.

Key words: AAO process; DO concentration; phosphorus and nitrogen removal; simulation; energy consumption of aeration

随着城市化进程的加快,城市居民产生的生活污水量也日益增加. 由于生活污水中的氮磷物质会造成水体富营养化,破坏水环境生态系统,故需要对生活污水进行除磷脱氮处理. 然而,现有的城市污水处理厂存在着氮磷物质去除效率较低、污水处理能耗较高等缺点,如美国污水处理能耗约占国家总能耗的 0.8%,其中一半以上用于曝气过程^[1],而我国污水处理能耗占国家总能耗的百分比将随着污水处理率的提高而越来越大^[2].

目前,污水处理厂的节能降耗研究主要集中在曝气系统. 曝气池溶解氧(DO)浓度是影响处理效

果和运行成本的关键参数^[3-7]. 一般认为曝气池 DO 浓度为 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 可维持微生物的活性,然而一些污水处理厂的实践表明,DO 浓度低于 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时也能达到较好的处理效果. Liu 等^[8]考察了活性污泥在 DO 浓度低于 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下的硝化行为,发现长期低氧以及较长的污泥龄有利于氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的富集,可达到较好的

收稿日期: 2017-04-13; 修订日期: 2017-07-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX0730300307)

作者简介: 曹特特(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为污水处理及其资源化, E-mail: 519638139@qq.com

* 通信作者, E-mail: liyongmei@tongji.edu.cn

硝化行为. 与 DO 浓度为 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 相比, DO 浓度为 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下可提高氧转移效率 16.0%, 减少 10.0% 的能耗. 因此研究低氧条件下活性污泥法的运行对于污水厂节能降耗具有重要意义.

除磷脱氮污水处理厂的处理工艺流程复杂, 进水的的水质水量变化大, 在出水水质和节约能耗之间很难达到同步最佳, 而利用活性污泥模型及污水处理模拟软件可以很好地解决这一问题^[9~13]. 活性污泥模型已被广泛应用于污水处理过程的研究、设计和运行优化当中, 如朱政豫等^[14]利用 WEST 软件将活性污泥 1 号模型与曝气模型耦合可使某污水处理厂(规模 $5.0 \text{ 万 m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)的曝气能耗减少 10.0%; Gabarrón 等^[15]利用 WEST 软件和活性污泥 2 d 模型使某膜生物反应器系统(规模 $1.5 \text{ 万 m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)的曝气能耗节省了 7.0%; Sun 等^[16]利用 BioWin 软件和活性污泥 2d 模型使某膜生物反应器系统(规模 $5.0 \text{ 万 m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)的曝气量减少了 20.0%. 因此, 试验研

究与模型拟合相结合是实现污水厂工艺优化与节能降耗的有效手段.

本研究以常用的厌氧-缺氧-好氧(AAO)除磷脱氮工艺探讨了在好氧池低 DO 浓度条件下的水质指标变化情况, 并利用 BioWin 4.1 软件对 AAO 工艺的除磷脱氮效果和曝气能耗进行了评估, 以期实现 AAO 工艺生物除磷脱氮效率最优及节能降耗的双重目的, 并为 AAO 工艺在实际应用中节能降耗提供理论依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 试验用水及种泥来源

试验用水为上海市曲阳污水处理厂的沉砂池出水, 具体水质指标如表 1 所示, 接种污泥为上海市曲阳污水处理厂的二沉池回流污泥. 由于实际污水中的碳源不足, 故在整个试验过程中, 外加碳源 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (乙酸钠配置), 使 AAO 小试反应器的进水平均 COD/TN 从 5 增加到 8 左右.

表 1 实际污水的水质指标

Table 1 Characteristics of the wastewater

指标	COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
范围	93~241	1.6~3.7	2.5~5.0	21.4~37.6	0.0~0.4	0.0~0.7	21.6~44.8	7.0~8.1

1.2 试验装置与运行

AAO 小试反应器为有机玻璃制成的长方体反应器, 利用隔板分隔为厌氧池、缺氧池和好氧池, 其中厌氧池和缺氧池的有效容积分别为 2.0 L 和 3.3 L, 均采用磁力搅拌; 好氧池的有效容积为 10.0 L, 采用机械搅拌和微孔曝气器充氧. 二沉池为竖流式沉淀池, 有效容积为 4.0 L. 污水处理量为 $20.0 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$, 污泥回流比为 100%, 混合液回流比为 300%, 污泥龄为 15 d, 总水力停留时间为 18.4 h, 其中厌氧池、缺氧池和好氧池的水力停留时间分别是 2.4 h、4.0 h 和 12.0 h. 整个试验过程可根据好氧池 DO 浓度划分为 3 个阶段, 其中 1~36 d 为第 I 阶段, 好氧池 DO 浓度为 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 37~76 d 为第 II 阶段, 好氧池 DO 浓度为 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 77~111 d 为第 III 阶段, 好氧池 DO 浓度为 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在整个试验过程中, 厌氧池和缺氧池的 DO 浓度分别在 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下.

1.3 AAO 工艺模拟

BioWin 4.1 软件是加拿大 EnviroSim 环境咨询

公司开发的单一矩阵全污水处理厂仿真模拟软件, 包含了活性污泥系列模型及污泥厌氧消化模型等, 不仅可以对活性污泥生物处理过程进行模拟, 还可以对各个工艺单元进行模拟^[17~19]. 因此, 本研究基于 BioWin 4.1 软件对 AAO 小试反应器的除磷脱氮过程进行了模拟, 所建立的 AAO 工艺流程示意及相应的活性污泥模型输入数据如图 1 和表 2 所示.

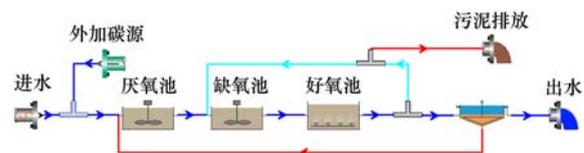


图 1 基于 BioWin 4.1 软件建立的 AAO 工艺流程示意

Fig. 1 Schematic flow diagram of the AAO process

based on BioWin 4.1 software

1.4 模型参数灵敏度分析

一般来说, 当一个活性污泥模型建立好之后, 需要对模型参数进行校正, 但要所有的模型参数进行校正是费时费力的, 也是没有必要的, 故可利用灵敏度分析法^[19,20]筛选出灵敏参数后, 再对灵敏参数

表 2 AAO 小试反应器的活性污泥模型输入数据

Table 2 Input data for the activated sludge model for the lab-scale AAO reactor

参数	含义	单位	默认值	实际采用值
F_{hs}	快速可生物降解 COD	(以 COD/总 COD 计) $g \cdot g^{-1}$	0.160 0	0.399 1
F_{ac}	醋酸	(以 COD/快速可生物降解 COD 计) $g \cdot g^{-1}$	0.150 0	0.345 5
F_{xsp}	颗粒性 COD	(以 COD/慢速可生物降解 COD 计) $g \cdot g^{-1}$	0.750 0	0.429 0
F_{us}	溶解性不可生物降解 COD	(以 COD/总 COD 计) $g \cdot g^{-1}$	0.050 0	0.090 6
F_{up}	颗粒性不可生物降解 COD	(以 COD/总 COD 计) $g \cdot g^{-1}$	0.130 0	— ¹⁾
F_{na}	氨氮	(以氨氮/总凯氏氮计) $g \cdot g^{-1}$	0.660 0	0.859 8
F_{nox}	颗粒有机氮	(以氨氮/有机氮计) $g \cdot g^{-1}$	0.500 0	—
F_{upN}	颗粒性不可生物降解 COD 中氮的含量	(以氮/COD 计) $g \cdot g^{-1}$	0.035 0	—
F_{pod}	磷酸盐	(以磷/总磷计) $g \cdot g^{-1}$	0.500 0	0.663 0
F_{upP}	颗粒性不可生物降解 COD 中磷的含量	(以磷/COD 计) $g \cdot g^{-1}$	0.011 0	—
F_{ev}	颗粒性基质的 COD/VSS 比例	(以 COD/VSS 计) $g \cdot g^{-1}$	1.600 0	1.505 5

1) 实际采用值为根据试验测定值利用 BioWin 4.1 软件中的“*Influent Specifier*”程序作进一步处理后的数值,其中“—”处的数值与默认值保持一致

进行校正即可.

相对灵敏度(RS)的计算公式如下:

$$RS = \frac{\frac{Y' - Y_0}{Y_0}}{\frac{P' - P_0}{P_0}} \quad (1)$$

式中, Y_0 为初始变量值, Y' 为变化后变量值, P_0 为初始参数值, P' 为变化后参数值(取初始参数值 P_0 的 10%).

相对灵敏度(RS)的评判等级为: $|RS| \leq 0.25$, 影响程度很小; $0.25 < |RS| \leq 1.00$, 影响程度一般; $1.00 < |RS| \leq 2.00$, 影响程度显著; $|RS| > 2.00$: 影响程度极大.

本研究根据 AAO 小试反应器在好氧池 DO 浓度为 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下的运行情况,采用稳态模拟和灵敏度分析法评估了所有模型参数(110 个动力学参数和 88 个化学计量学参数)对出水水质指标的影响.

1.5 模型参数校正及验证

为使模型对 AAO 工艺的模拟结果更加准确,需要对模型参数中的灵敏参数进行校正.因此,本研究先采用 DO 浓度为 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下的出水水质指标的实测值及相应的动态模拟值对灵敏参数进行校正,然后采用 DO 浓度为 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下的出水水质指标的实测值及相应的动态模拟值对校正后的灵敏参数进行验证,最后利用希尔不等系数(TIC)对动态模拟结果进行定量评价,当 TIC 值小于 0.30 时,表明实测值与动态模拟值之间具有较好的拟合度^[7,14],其计算公式为:

$$TIC = \frac{\sqrt{\sum (Y_i - Y_{i,m})^2}}{\left(\sqrt{\sum Y_i^2} + \sqrt{\sum Y_{i,m}^2} \right)} \quad (2)$$

式中, Y_i 为模拟值, $Y_{i,m}$ 为实测值.

2 结果与讨论

2.1 不同好氧池 DO 浓度条件下的水质指标变化情况

2.1.1 COD 的变化

AAO 小试反应器在不同好氧池 DO 浓度条件下的 COD 变化情况如图 2 所示.当好氧池 DO 浓度从 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统的 COD 去除率从 88.7% 降低到 83.5% 和 81.4%,这主要与进水 COD 浓度从 $307 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $266 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $253 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 有关.在 AAO 工艺中,由于 COD 主要在厌氧池和缺氧池得到去除,故降低好氧池 DO 浓度不会对系统的 COD 去除效果产生显著影响,出水 COD 浓度小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,满足我

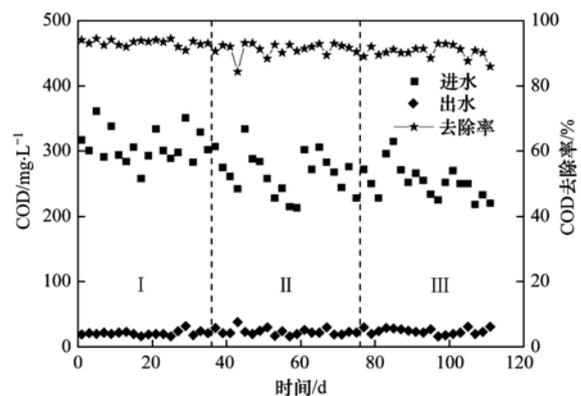


图 2 COD 随运行时间的变化

Fig. 2 Variation of COD over the run-time

国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级 A 标准(一级 A 排放标准)。

2.1.2 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 的变化

AAO 小试反应器在不同好氧池 DO 浓度条件下的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 变化情况如图 3 所示. 当好氧池 DO 浓度从 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 系统不仅可以保持良好的生物除磷效果, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 浓度一直小于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 满足一级 A 排放标准, 还降低了曝气能耗. 根据生物除磷机理, 降低好氧池 DO 浓度可能会影响聚磷菌的好氧吸

磷速率, 但只要保持足够的好氧反应时间(本系统的好氧池水力停留时间为 12.0 h)就不会严重影响最终除磷效果^[21-23]. 即使在不同好氧池 DO 浓度条件下, 只要聚磷菌可以保持良好的厌氧释磷效果, 则聚磷菌在好氧条件下就可以快速氧化胞内储存的聚羟基烷酸(PHA), 使胞内质子浓度显著增加, 为了维持胞内质子平衡, 聚磷菌就会快速吸收水中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ^[24]. 在本系统中, 由于外加碳源使得聚磷菌在厌氧池具有良好的释磷效果, 故当好氧池 DO 浓度降低以后, 系统依然可以保持良好的除磷效果.

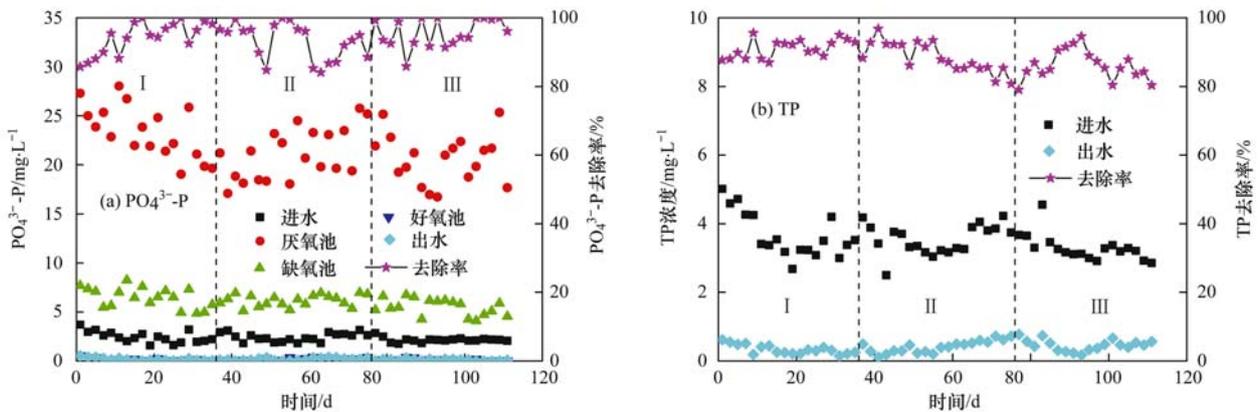


图 3 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 随运行时间的变化

Fig. 3 Variation of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and TP over the run-time

2.1.3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的变化

AAO 小试反应器在不同好氧池 DO 浓度条件下的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 变化情况如图 4 所示. 在整个试验过程中, 系统的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率一直保持在 90.0% 以上, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度小于 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 4(a)], 满足一级 A 排放标准. 此外, 系统的出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度也一直处于较低水平 [图 4(b)], 可忽略不计. 由于本系统的好氧池水力停留时间较长(12.0 h), 这使得氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌可在好氧池 DO 浓度为 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下满足自身对氧气的需求. 尽管氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率随好氧池 DO 浓度的降低而降低(表 3), 但系统的好氧硝化性能并未受到显著影响. 由

于亚硝酸盐氧化速率均比相应的氨氧化速率大, 表明氨氧化速率是系统好氧硝化反应的限速步骤, 这和 Liu 等^[1]的结论是一致的.

由图 4(c)和图 4(d)可知, 系统的出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 浓度一直小于 $15.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 满足一级 A 排放标准, 这说明系统在低氧条件下的好氧硝化性能并未受到严重影响, 保证了好氧池回流到缺氧池的混合液中具有足够的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 用以反硝化脱氮. Liu 等^[8]的研究结果表明当好氧池 DO 浓度分别为 $0.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥龄分别为 10 d 和 40 d 时, 仍然可以达到完全硝化. 因此, 降低好氧池 DO 浓度不会对系统的 TN 去除效果造成不利影响.

表 3 不同好氧池 DO 浓度条件下活性污泥的氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率

Table 3 Ammonia oxidation rate and nitrite oxidation rate of the active sludge under different DO concentration conditions in the aerobic tank

阶段	好氧池 DO 浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	氨氧化速率(以 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{VSS}$ 计) $/\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	亚硝酸盐氧化速率(以 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{VSS}$ 计) $/\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$
I	2.00	2.28	4.64
II	1.00	1.24	3.06
III	0.50	1.09	1.48

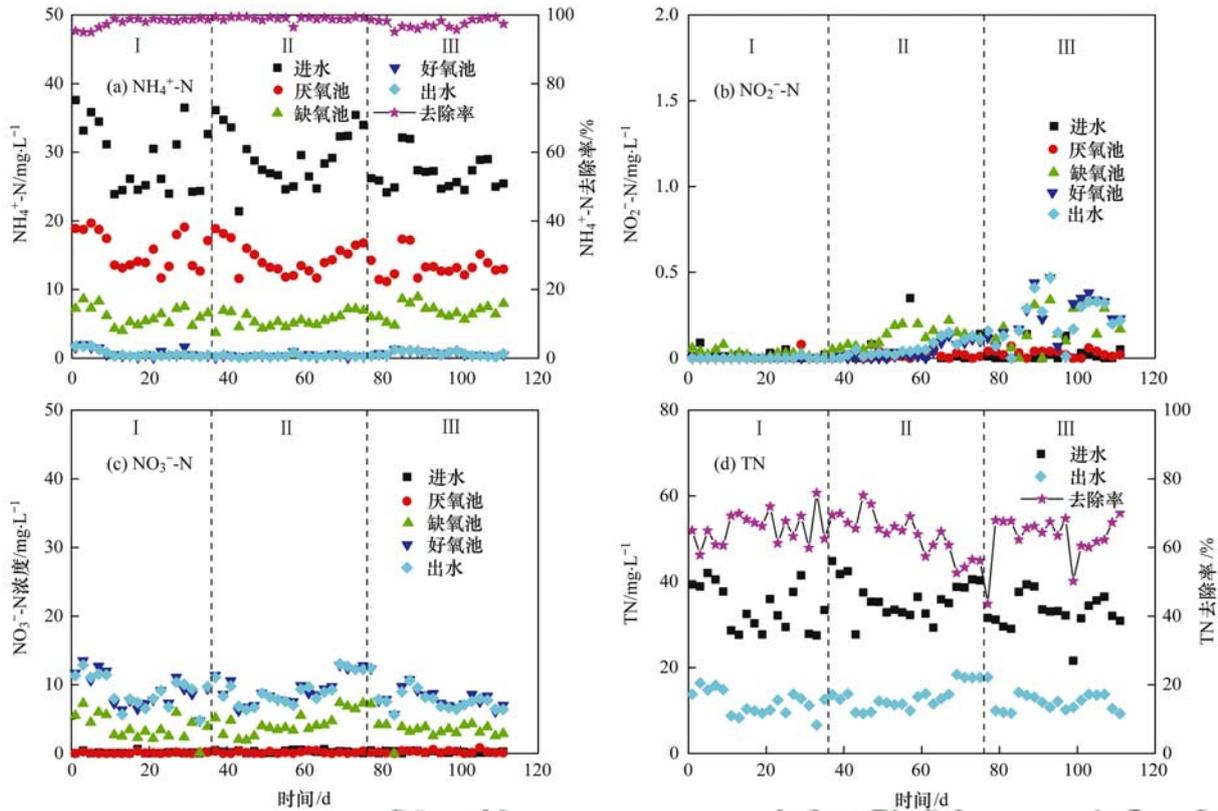


图4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TN随运行时间的变化

Fig. 4 Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and TN over the run-time

2.2 模型参数灵敏度分析

灵敏度分析结果表明,对出水水质指标有影响的模型参数都来自于氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌、普通异养菌、聚磷菌、pH、开关函数和酸化菌,这和 Liwarska-Bizukoje 等^[19]的报道是一致的。

对出水 COD 有影响的模型参数一共有 7 个,包括 6 个一般影响参数,1 个极大影响参数,即厌氧消化的水解速率常数($k_{h, \text{anaerobic digestion}}$);对出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 有影响的模型参数一共有 19 个,包括 15 个一般影响参数,4 个极大影响参数,即聚磷菌以可释放聚磷形式的磷储存率(Y_{lowPP})、聚磷菌以 PHA 形式吸收乙酸的释磷率($Y_{\text{P/acetate}}$)、聚磷菌好氧化 PHA 的储磷率($Y_{\text{P/PHA, aerobic}}$)、聚磷菌吸收乙酸或丙酸的 PHA 产率系数($Y_{\text{P/PHA, seq}}$)。

对出水 TP 有影响的模型参数一共有 11 个,包括 7 个一般影响参数,2 个显著影响参数,即以 PHA 形式吸收乙酸的释磷率($Y_{\text{P/acetate}}$)、聚磷菌以可释放聚磷形式的磷储存率(Y_{lowPP}),2 个极大影响参数,即聚磷菌好氧化 PHA 的储磷率($Y_{\text{P/PHA, aerobic}}$)、聚磷菌吸收乙酸或丙酸的 PHA 产率系数($Y_{\text{P/PHA, seq}}$);对出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有影响的模型参数一共有 4 个,包括 2

个一般影响参数,2 个显著影响参数,即氨氧化菌的基质(氨)半饱和系数(K_{NH_4})、氨氧化菌的最大单位生长速率($\mu_{\text{max,A}}$);对出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 有影响的模型参数一共有 5 个,包括 2 个一般影响参数,2 个显著影响参数,即亚硝酸盐氧化菌的基质(亚硝酸盐)半饱和系数(K_{NO_2})、亚硝酸盐氧化菌的好氧衰减速率($b_{\text{aerobic,N}}$),1 个极大影响参数,即亚硝酸盐氧化菌的最大单位生长速率($\mu_{\text{max,N}}$);对出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 只有两个影响程度一般的模型参数;对出水 TN 只有一个影响程度一般的模型参数。

2.3 模型参数校正与验证

利用动态模拟对 4 个主要的灵敏参数进行了校正和验证(表 4),其中聚磷菌吸收乙酸或丙酸的 PHA 产率系数($Y_{\text{P/PHA, seq}}$)和聚磷菌好氧化 PHA 的储磷率($Y_{\text{P/PHA, aerobic}}$)属于化学计量学参数,氨氧化菌的最大单位生长速率($\mu_{\text{max,A}}$)和亚硝酸盐氧化菌的最大单位生长速率($\mu_{\text{max,N}}$)属于动力学参数。

2.4 动态模拟

由图 5 可知,AAO 小试反应器在不同好氧池 DO 浓度条件下的好氧池 MLSS 及出水水质指标的实测值与动态模拟值之间均具有良好的拟合趋势,

表 4 灵敏参数的校正

Table 4 Calibration of the sensitive parameters

参数	含义	单位	默认值	默认范围	校正值
$Y_{P/PHA,seq}$	聚磷菌吸收乙酸或丙酸的 PHA 产率系数	(以磷/COD 计) $mg \cdot mg^{-1}$	0.889	0~1.000	0.950
$Y_{P/PHA,aerobic}$	聚磷菌好氧化 PHA 的储磷率	(以磷/COD 计) $mg \cdot mg^{-1}$	0.930	0~50.000	0.970
$\mu_{max,A}$	氨氧化菌的最大单位生长速率	d^{-1}	0.900	0~10.000	0.730
$\mu_{max,N}$	亚硝酸盐氧化菌的最大单位生长速率	d^{-1}	0.700	0~10.000	0.750

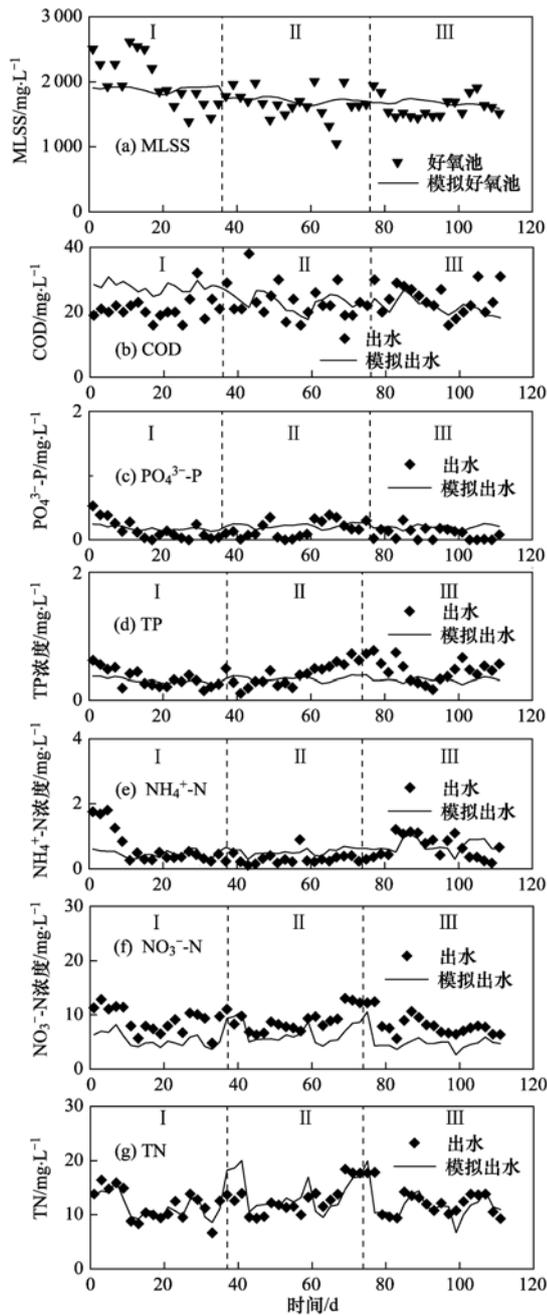


图 5 好氧池 MLSS 及出水 COD、 $PO_4^{3-}-P$ 、TP、 NH_4^+-N 、 $NO_3^- -N$ 和 TN 的实测值与动态模拟值随运行时间的变化

Fig. 5 Variation of the measured values and the dynamic simulated values of MLSS in the aerobic tank and effluent COD, $PO_4^{3-}-P$, TP, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$, and TN over the run-time

这初步表明,基于 BioWin 4.1 软件建立的 AAO 工艺的活性污泥模型是可靠有效的。

此外,通过计算实测值与动态模拟值间的 TIC 值对动态模拟结果进行了定量评价(表 5),除好氧池 DO 浓度为 $0.50 mg \cdot L^{-1}$ 条件下的出水 $PO_4^{3-}-P$ 和 NH_4^+-N 的 TIC 值大于 0.30 以外,其余的 TIC 值均小于 0.30。由于通过校验模型参数使实测值与动态模拟值绝对拟合是不可能的,或为了某一特定参数得到绝对拟合而忽略其他参数的拟合也是不可行的。因此,根据好氧池 MLSS 及出水水质指标的 TIC 值,进一步表明,本研究基于 BioWin 4.1 软件建立的 AAO 工艺的活性污泥模型是可靠有效的。

2.5 空气流量与氧转移效率

利用 BioWin 4.1 软件对 AAO 小试反应器在不同好氧池 DO 浓度条件下的空气流量和氧转移效率进行了模拟评估。由表 6 和图 6 可知,随着好氧池 DO 浓度的降低,系统的空气流量呈下降趋势,而氧转移效率呈上升趋势。与好氧池 DO 浓度为 $2.00 mg \cdot L^{-1}$ 时相比,好氧池 DO 浓度为 $1.00 mg \cdot L^{-1}$ 和 $0.50 mg \cdot L^{-1}$ 时的空气流量可节省 23.8% 和 38.1%,氧转移效率可提高 7.2% 和 11.7%。

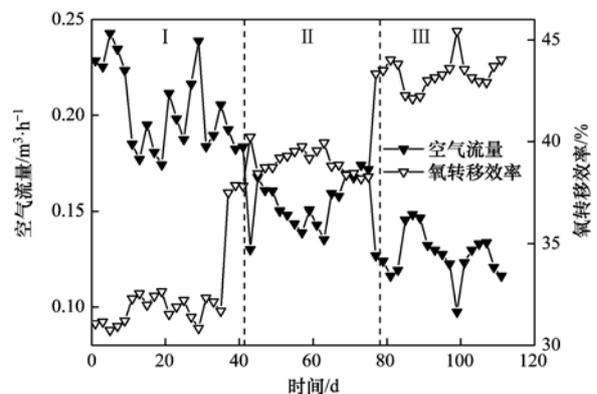


图 6 好氧池空气流量和氧转移效率随运行时间的变化
Fig. 6 Variation of air flow and oxygen transfer efficiency in the aerobic tank over the run-time

表 5 好氧池 MLSS 及出水水质指标在不同好氧池 DO 浓度条件下的 TIC 值

Table 5 TIC of MLSS in the aerobic tank and effluent parameters under different DO concentration conditions

阶段	好氧池 DO 浓度 /mg·L ⁻¹	TIC						
		MLSS	COD	PO ₄ ³⁻ -P	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN
I	2.00	0.10	0.16	0.27	0.23	0.28	0.26	0.21
II	1.00	0.07	0.11	0.27	0.17	0.27	0.18	0.18
III	0.50	0.06	0.10	0.48	0.19	0.34	0.28	0.23

表 6 不同好氧池 DO 浓度条件下的空气流量和氧转移效率

Table 6 Air flow and oxygen transfer efficiency in the aerobic tank under different DO concentration conditions

阶段	好氧池 DO 浓度 /mg·L ⁻¹	空气流量/m ³ ·h ⁻¹		氧转移效率/%	
		范围	平均值	范围	平均值
I	2.00	0.17~0.24	0.21	30.8~32.6	31.7
II	1.00	0.14~0.19	0.16	37.5~40.2	38.9
III	0.50	0.10~0.15	0.13	42.2~45.4	43.4

3 结论

(1) 当好氧池 DO 浓度从 2.00 mg·L⁻¹ 降低到 1.00 mg·L⁻¹ 和 0.50 mg·L⁻¹ 时, 系统仍然具有良好的除磷脱氮效果, 出水水质指标均能满足我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中的一级 A 标准。

(2) 基于 BioWin 4.1 软件建立了 AAO 工艺的活性污泥模型, 对出水水质指标有影响的模型参数都来自于氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌、普通异养菌、聚磷菌、pH、开关函数和酸化菌, 对聚磷菌吸收乙酸或丙酸的 PHA 产率系数 ($Y_{P/PHA,seq}$)、聚磷菌好氧氧化 PHA 的储磷率 ($Y_{P/PHA,aerobic}$)、氨氧化菌的最大单位生长速率 ($\mu_{max,A}$) 和亚硝酸盐氧化菌的最大单位生长速率 ($\mu_{max,N}$) 进行了校正, 校正后的模型可有效模拟 AAO 小试反应器的好氧池 MLSS 及出水水质指标的变化。

(3) 与好氧池 DO 浓度为 2.00 mg·L⁻¹ 时相比, 好氧池 DO 浓度为 1.00 mg·L⁻¹ 和 0.50 mg·L⁻¹ 时的空气流量可节省 23.8% 和 38.1%, 氧转移效率可提高 7.2% 和 11.7%。

参考文献:

- [1] Liu G Q, Wang J M. Quantifying the chronic effect of low DO on the nitrification process[J]. Chemosphere, 2015, **141**: 19-25.
- [2] 刘洁岭, 蒋文举. 城市污水处理厂能耗分析及节能措施[J]. 绿色科技, 2012, (11): 136-137.
Liu J L, Jiang W J. Analysis of energy consumption of municipal sewage plant and measures of energy saving[J]. Journal of Green Science and Technology, 2012, (11): 136-137.
- [3] Liu G Q, Wang J M. Modeling effects of DO and SRT on activated sludge decay and production[J]. Water Research, 2015, **80**: 169-178.
- [4] Regmi P, Miller M W, Holgate B, et al. Control of aeration, aerobic SRT and COD input for mainstream nitrification/denitrification[J]. Water Research, 2014, **57**: 162-171.
- [5] Liang W H, Yu C, Ren H Q, et al. Minimization of nitrous oxide emission from CASS process treating low carbon source domestic wastewater: Effect of feeding strategy and aeration rate[J]. Bioresource Technology, 2015, **198**: 172-180.
- [6] Singh V, Pandey N D. A comparison of performance of ADM1 and monod model treating low strength wastewater[J]. Materials Today: Proceedings, 2016, **3**(10): 4157-4162.
- [7] 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.
- [8] Liu G Q, Wang J M. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(10): 5109-5117.
- [9] 王文英, 黄勇, 顾晓丹, 等. 活性污泥数学模型在污水处理中的研究进展[J]. 工业水处理, 2014, **34**(7): 1-4.
Wang W Y, Huang Y, Gu X D, et al. Research progress in the application of mathematical model of activated sludge to wastewater treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2014, **34**(7): 1-4.
- [10] Wu X H, Yang Y, Wu G M, et al. Simulation and optimization of a coking wastewater biological treatment process by activated sludge models (ASM) [J]. Journal of Environmental Management, 2016, **165**: 235-242.
- [11] Gao F, Nan J, Zhang X H. Simulating a cyclic activated sludge system by employing a modified ASM3 model for wastewater treatment[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2017, **40**(6): 877-890.
- [12] Yang S S, Guo W Q, Chen Y D, et al. Simultaneous in-situ sludge reduction and nutrient removal in an A² MO-M system: performances, mechanisms, and modeling with an extended ASM2d model[J]. Water Research, 2016, **88**: 524-537.
- [13] 曹特特, 朱政豫, 李咏梅. 数学模型在污水处理节能降耗中的研究与应用进展[J]. 四川环境, 2016, **35**(6): 150-153.
Cao T T, Zhu Z Y, Li Y M. Research and application progress of mathematical models for energy saving and consumption reduction in wastewater treatment[J]. Sichuan Environment, 2016, **35**(6): 150-153.

- [14] 朱政豫, 王如意, 李咏梅. ASMI 耦合曝气模型对污水处理厂的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1629-1636.
Zhu Z Y, Wang R Y, Li Y M. Aeration model coupled with ASMI: case study for wastewater treatment plant [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(6): 1629-1636.
- [15] Gabarrón S, Dalmau M, Porro J, *et al.* Optimization of full-scale membrane bioreactors for wastewater treatment through a model-based approach[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **267**: 34-42.
- [16] Sun J Y, Liang P, Yan X X, *et al.* Reducing aeration energy consumption in a large-scale membrane bioreactor: process simulation and engineering application [J]. Water Research, 2016, **93**: 205-213.
- [17] Oleyiblo O J, Cao J S, Feng Q, *et al.* Evaluation and improvement of wastewater treatment plant performance using BioWin[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, **33**(2): 468-476.
- [18] Vitanza R, Colussi I, Cortesi A, *et al.* Implementing a respirometry-based model into BioWin software to simulate wastewater treatment plant operations [J]. Journal of Water Process Engineering, 2016, **9**: 267-275.
- [19] Liwarska-Bizukoje E, Biernacki R. Identification of the most sensitive parameters in the activated sludge model implemented in BioWin software[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(19): 7278-7285.
- [20] 邹宗森, 施汉昌, 李鑫玮. 反硝化滤池的数值模拟与模型校正[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2505-2512.
Zou Z S, Shi H C, Li X W. Simulation and model calibration of denitrification biological filter[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(10): 2505-2512.
- [21] 胡玉琴. 低溶解氧环境 A/O 工艺和 SBR 工艺生物脱氮除磷试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
Hu Y Q. Study on biological nitrogen and phosphorus removal by the A/O process and SBR process under low DO condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [22] 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 等. 低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2259-2265.
Xin X, Guan L, Yao Y D, *et al.* Long-term performance and bacterial community composition analysis of AGS-SBR treating the low COD/N sewage at low DO concentration condition [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2259-2265.
- [23] 吉芳英, 金展, 郭倩, 等. 溶解氧对低碳源污水一体化处理工艺脱氮除磷的影响[J]. 给水排水, 2014, **40**(5): 129-133.
Ji F Y, Jin Z, Guo Q, *et al.* Influence of dissolved oxygen on nitrogen and phosphorus removal in integration treatment process of low-carbon source sewage [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, **40**(5): 129-133.
- [24] 李亚静, 孙力平, 李计元. SBR 法处理低碳源城市污水除磷脱氮效果及规律研究[J]. 天津城建学院学报, 2006, **12**(2): 112-115.
Li Y J, Sun L P, Li J Y. Study on law and effect of phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater with low carbon source by sequencing batch reactor (SBR) [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2006, **12**(2): 112-115.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorus Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNBf-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapigou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)