

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王玮,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升苹,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素去除及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛亿达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)

HRT 对改良式 A²/O-BAF 反硝化除磷脱氮的影响

赵凯亮^{1,2}, 刘安迪^{1,2}, 南彦斌^{1,2}, 梁利民^{1,2}, 王云霞^{1,2}, 陈永志^{1,2*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省污水处理行业技术中心, 兰州 730070)

摘要: 研究 HRT(水力停留时间)对改良式 A²/O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响. 进水 COD、NH₄⁺-N 和 TP 分别为 189.6、60.4 和 5.1 mg·L⁻¹, HRT 分别为 9、8、7 和 6 h 时, COD 出水平均浓度均小于 42 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 出水平均浓度分别为 2.4、2.8、3.3 和 6.5 mg·L⁻¹, TP 出水平均浓度分别为 0.3、0.4、0.7 和 0.8 mg·L⁻¹; 系统缺氧段反硝化聚磷菌占聚磷菌的比例(DPAOs/PAOs)从 76.8% 递减到 48.8%; HRT 为 8 h 时, 通过数理统计方法得出反硝化除磷脱氮比(ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N)的概率密度高达 37.5%, 缺氧段 ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N 为 1.24 (理论值 1.41), 此时反硝化脱氮除磷效果最佳; 在整个试验过程中 SVI 值均低于 100 mL·g⁻¹, 而 MLVSS/MLSS 从 0.74 逐渐下降到 0.63, 表明污泥活性逐渐降低.

关键词: 水力停留时间(HRT); 反硝化除磷概率密度; ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N; 污泥活性; COD 物料守恒

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2771-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201907167

Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A²/O-BAF

ZHAO Kai-liang^{1,2}, LIU An-di^{1,2}, NAN Yan-bin^{1,2}, LIANG Li-min^{1,2}, WANG Yun-xia^{1,2}, CHEN Yong-zhi^{1,2*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Technical Center of Sewage Treatment Industry in Gansu, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The effect of hydraulic retention time (HRT) on denitrifying phosphorus and nitrogen removal in a modified two sludge A²/O-BAF system was studied. The influent COD, NH₄⁺-N, and TP were 189.6, 60.4, and 5.1 mg·L⁻¹, respectively. When HRT was 9, 8, 7, and 6 h, the average effluent COD was less than 42 mg·L⁻¹. The average effluent NH₄⁺-N levels were 2.4, 2.8, 3.3, and 6.5 mg·L⁻¹, respectively. The average effluent TP values were 0.3, 0.4, 0.7, and 0.8 mg·L⁻¹, respectively. The ratio of the denitrifying phosphorus accumulation organisms (DPAOs/PAOs) in the system of anoxic zone was reduced from 76.8% to 48.8%. When HRT was 8 h, the ratio of denitrifying phosphorus to nitrogen (ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N) was increased by 37.5% by a mathematical statistics method. The ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N in the anoxic zone was 1.24 (the theoretical value is 1.41). At this time, the effect of denitrifying phosphorus to nitrogen was the best. The SVI value was lower than 100 mL·g⁻¹ throughout the experiment, and the MLVSS/MLSS gradually decreased from 0.74 to 0.63, indicating that the sludge activity was reduced.

Key words: hydraulic retention time(HRT); denitrifying phosphorus removal probability density; ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N; sludge activity; formula of material balance for COD

影响污水处理工艺的主要因素有:水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)、溶解氧(DO)、C/N、硝化液回流比和曝气量等. 目前对于 A²/O 反应器在 HRT 方面的研究较多, 吴昌永等^[1]的研究发现 HRT 为 8 h 时, 碳源对该系统脱氮除磷的影响较大, Wang 等^[2]控制 HRT 为 8.5 h 时, 缺氧区发生明显的反硝化除磷现象, 脱氮除磷效果良好, 潘欣语等^[3]的研究也发现 HRT 过大会造成除磷效果不佳, 在 HRT 为 8 h 时系统整体水处理效果最佳.

A²/O-BAF 系统是由 A²/O 和曝气生物滤池(BAF)组成, 该系统可以分离短泥龄的异养反硝化菌和聚磷菌以及长泥龄的自养硝化菌, 在 A²/O 中进行反硝化脱氮除磷及 COD 的去除, 而在 BAF 中进行 NH₄⁺-N 的氧化反应, 从而达到更好地同步脱氮除磷效果. 陈永志等^[4]改变硝化液回流比来提高反硝化除磷效果; 彭永臻等^[5]用 A²/O-BAF 工艺处理低 C/N 生活污水, 研究得出污水中碳源被充分

利用, 出水效果稳定良好; 黄剑明等^[6]的研究发现在低温条件下 HRT 为 9 h 时, A²/O-BAF 的脱氮除磷效果较佳^[7]. 本研究对 A²/O-BAF 进行了改良, 在 A²/O 前端增加了预缺氧段, 旨在提高厌氧释磷效率. HRT 对改良式 A²/O-BAF 双污泥系统中反硝化除磷脱氮影响较大, 但该方面的研究还鲜见报道.

本文以实际低 C/N 生活污水为研究对象, 探究改良式 A²/O-BAF 双污泥系统下不同 HRT 时污染物去除性能、反硝化聚磷菌占聚磷菌的比例、缺氧段反硝化除磷脱氮(ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N)正态分布概率密

收稿日期: 2019-07-19; 修订日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668033); 甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA126); 甘肃省高等学校特色专业-环境工程项目(101004); 兰州交通大学大学生创新创业训练计划项目(2019121)

作者简介: 赵凯亮(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水脱氮除磷工艺, E-mail: 1297798061@qq.com

* 通信作者, E-mail: 476411589@qq.com

度及累计频率,以期为该工艺的实际应用提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行程序

改良式 A²/O-BAF 双污泥系统是由进水水箱、A²/O 反应器、二沉池、中间水箱和 BAF 组成,进水水箱总有效容积为 400 L. A²/O 反应器总容积 60 L,由有机玻璃制成,均分 10 个格室,各格室依次为

预缺氧、厌氧段、缺氧段和好氧段,其比例为 1:2:5:2;每格室之间水流孔存在水位差,以蠕动泵推流式进水. A²/O 反应器设搅拌装置,好氧段安装有微孔曝气头,由鼓风机进行曝气,转子流量计调节曝气量. 二沉池为竖流式,有效容积为 28 L. BAF 由圆柱形有机玻璃柱制成,高度 3 000 mm,内径为 100 mm,有效容积 23.5 L,内置鲍尔环填料,其高度占总高的 3/4,进水方式为上流式,采用鼓风曝气,转子流量计控制曝气量,具体装置见图 1.

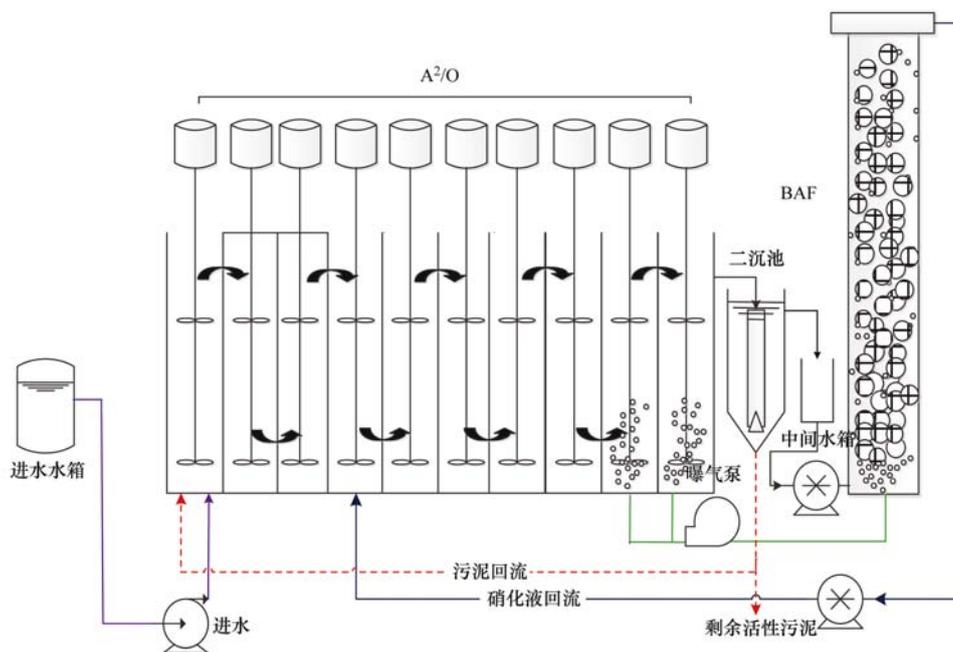


图 1 改良式 A²/O-BAF 双污泥系统示意

Fig. 1 Modification of the two sludge A²/O-BAF system

改良式 A²/O-BAF 双污泥系统在室温 (18 ~ 20℃) 的条件下运行, HRT 为 9、8、7 和 6 h 时, 预缺氧、厌氧、缺氧和好氧 DO 分别为 0.11、0.08、0.12 和 2.0 mg·L⁻¹ 左右, BAF (曝气生物滤池) 中 DO 为 6 ~ 8 mg·L⁻¹, 污泥回流比和硝化液回流比分别为 100% 和 200%, SRT 为 15 d, 其他具体运行参数见

表 1.

1.2 试验用水及检测方法

以兰州交通大学住宅区及学生公寓产生的生活污水为研究用水, 具体水质见表 2.

水样经 0.45 μm 滤纸过滤后根据 APHA 标准方法^[8]测定 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻.

表 1 试验运行方案

Table 1 Operational schemes for experiment

HRT-1/h	改良 A ² /O 段				进水流量/L·h ⁻¹	BAF	
	预缺氧段	厌氧段	缺氧段	好氧段		HRT-2/h	进水流量/L·h ⁻¹
9 (run1)	0.9	1.8	4.5	1.8	6.67	1.18	20
8 (run2)	0.8	1.6	4	1.6	7.5	1.04	22.5
7 (run3)	0.7	1.4	3.5	1.4	8.58	0.91	25.7
6 (run4)	0.6	1.2	3	1.2	10	0.79	30

表 2 试验原水水质

Table 2 Experimental characteristics of influent wastewater

项目	COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	pH
范围	99.3 ~ 275.4	41.8 ~ 76.7	0.2 ~ 1.1	48.2 ~ 88.5	2.9 ~ 8.7	7.4 ~ 7.7
均值	184.7	60.4	0.6	69.1	5.1	7.5

MLSS 和 MLVSS 采用滤纸重量法测定, SVI 通过 30 min 沉降法测定。

1.3 COD 物料衡算分析

生化系统中碳平衡指标通常用 COD 间接表示, 其质量变化情况可以研究碳的物料平衡及利用率, 根据碳平衡计算方法^[9]可得反应过程中 COD 的变化情况。

1.4 反硝化聚磷菌占比

根据文献^[10, 11]计算得出不同 HRT 下厌氧释磷速率 R_{am} 、缺氧吸磷速率 PUR_{am} 和好氧吸磷速率 PUR_o 及反硝化聚磷菌占聚磷菌的比例 (DPAOs/PAOs)。

1.5 缺氧段物料衡算

根据缺氧段 PO_4^{3-} 和 NO_3^- -N 去除量^[6]可得缺氧段反硝化除磷脱氮比例 ($\Delta PO_4^{3-}/\Delta NO_3^-$ -N)。

1.6 污泥产率

将改良式 A²/O-BAF 反应装置运行参数和测量数据代入式(1), 计算可得实际污泥产量 ΔX , 代入式(2)计算出实际污泥产率系数 Y 。

$$\Delta X = [Q_{out} \cdot X + (Q_{in} - Q_{out}) \cdot \Delta X_e] / 1000 \quad (1)$$

式中, ΔX 为实际污泥产量 ($mg \cdot d^{-1}$); Q_{out} 为实际剩余污泥排放量 ($m^3 \cdot d^{-1}$); Q_{in} 为实际进水量 ($m^3 \cdot d^{-1}$); ΔX_e 为二沉池出水悬浮固体浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); X 为剩余污泥浓度 ($mg \cdot L^{-1}$)。

$$\Delta X = Y \cdot Q_{in} (BOD_i - BOD_e) \quad (2)$$

式中, Y 为污泥产率系数 (SS/BOD); BOD_i 为进水 BOD_5 浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); BOD_e 为二沉池出水 BOD_5 浓度 ($mg \cdot L^{-1}$)。

2 结果与讨论

2.1 HRT 对系统 COD 去除性能的影响

当总 HRT 为 9、8、7 和 6 h 时, 系统对有机物的去除情况见图 2。当 COD 平均进水浓度为 $189.6 mg \cdot L^{-1}$ 时, 出水 COD 的平均浓度分别为 38.6、40.2、41.5 和 $40.7 mg \cdot L^{-1}$, 去除率基本维持在 77% 左右, 出水 COD 均已达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准, 说明 HRT 对 COD 的去除影响较小。当 HRT 缩短时, 虽然 A²/O 中污泥浓度降低, 但是 BAF 中的填料上的生物膜能对 COD 进一步降解, 从而保证了系统去除有机物的稳定性^[12, 13]。

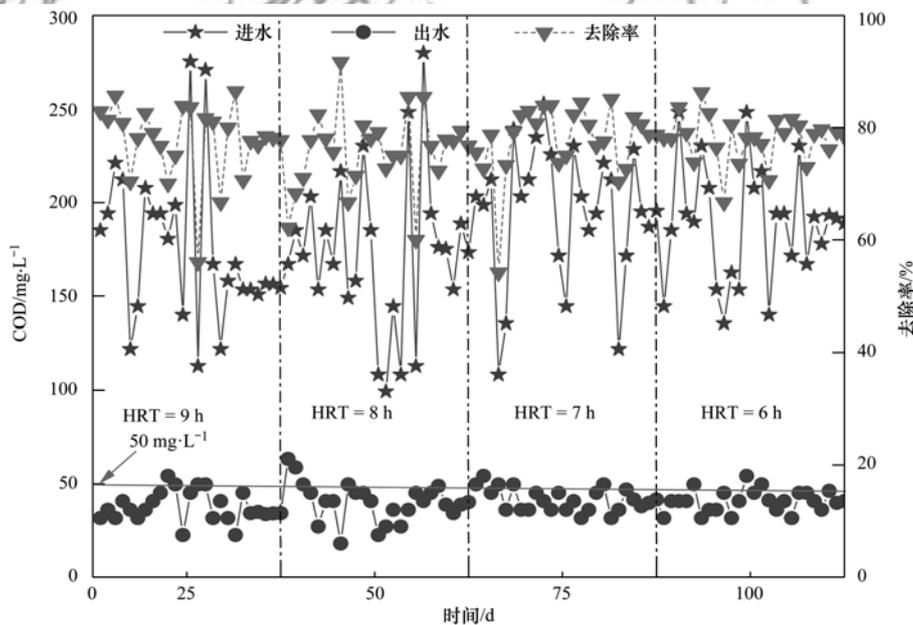


图 2 不同 HRT 条件下 A²/O-BAF 系统去除 COD 特性

Fig. 2 COD removal performance of A²/O-BAF system under different HRT

2.2 HRT 对系统氮素去除性能的影响

HRT 的变化对系统 NH_4^+ -N 的去除效果的影响见图 3。进水平均 NH_4^+ -N 浓度为 $60.4 mg \cdot L^{-1}$ 时, 不同 HRT 下 NH_4^+ -N 的平均出水浓度均低于 $5 mg \cdot L^{-1}$, 去除率从 96.2% 下降到 92.3%, NH_4^+ -N 整体出水效果保持较好, 计算得出组合工艺中 A²/O 反应器和 BAF 对 NH_4^+ -N 的去除贡献率分别为 15%

和 80% 左右, 表明 BAF 中以硝化细菌为主的生物膜对 NH_4^+ -N 有较强的抗冲击能力^[14]。

进水 TN 浓度在 $70.0 mg \cdot L^{-1}$ 左右, 各 HRT 下水 TN 平均浓度分别为 10.5、13.4、15.9 和 $16.5 mg \cdot L^{-1}$, 平均去除率分别为 85.0%、80.2%、75.1% 和 74.4%。通过 COD 物料衡算发现, 随着 HRT 的缩短, 进入缺氧段的碳源的有效利用率根据表 3 计算

分别是 49.6%、46.5%、42.3% 和 39.7%，因此 TN 去除率降低。出水 NO_3^- -N 的平均浓度从 $8.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $12.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，出水 NO_3^- -N 占 TN 的比值基本

维持在 70% 以上，这是因为 HRT 减少导致反硝化不彻底，出水 TN 恶化，这与李茂侨等^[15]的研究结果一致。

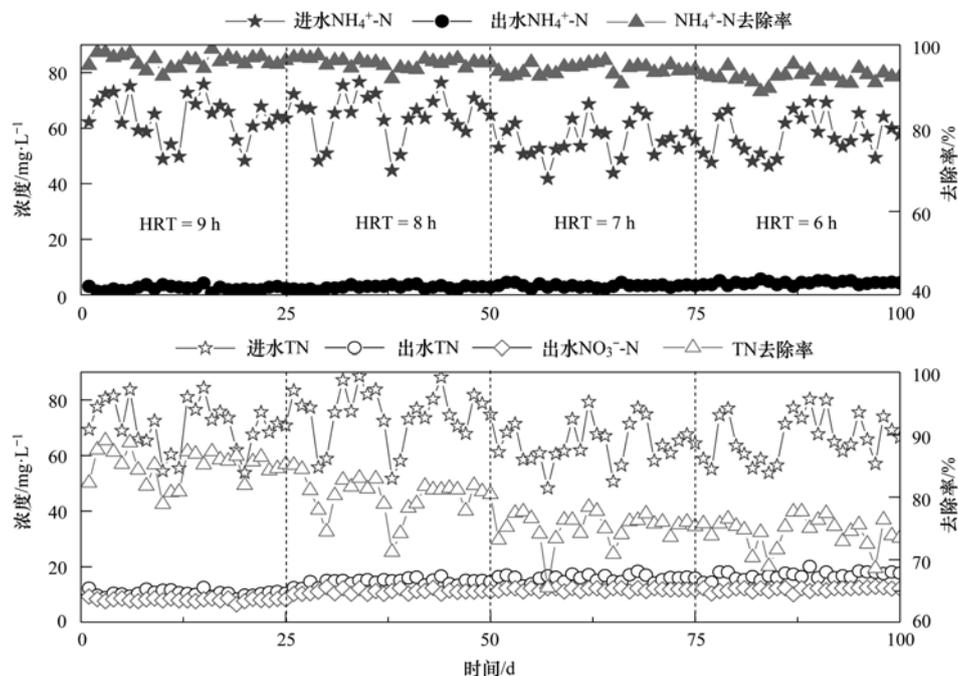


图 3 不同 HRT 对氮去除的影响

Fig. 3 Nitrogen removal efficiency at different HRT

表 3 COD 的物料衡算¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$

Table 3 Formula of material balance for COD/ $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$

HRT/h	$M_{\text{inf. COD}}$	$M_{\text{eff. COD}}$	$M_{\text{PAN. COD}}$	$M_{\text{ANA. COD}}$	$M_{(\text{Anl-S}). \text{COD}}$	$M_{(\text{s-eff}). \text{COD}}$	$M_{\text{W. COD}}$
9	28 983.3	6 477.8	4 876.2	1 738.6	9 502.7	-4 801.1	2 781.5
8	31 208.1	7 596.1	4 976	1 641.6	9 535.8	-4 935.7	2 727.8
7	29 836.9	6 662.6	4 327.1	1 302.9	8 302.1	-4 731.1	2 755.4
6	25 487.6	5 632.8	3 517.5	1 249.1	6 597	-3 310.3	2 577.2

1) $M_{\text{inf. COD}}$ 为进水 COD 总量; $M_{\text{eff. COD}}$ 为出水 COD 的量; $M_{\text{PAN. COD}}$ 为预缺氧段利用 COD 的量; $M_{\text{ANA. COD}}$ 为厌氧段利用 COD 的量; $M_{(\text{Anl-S}). \text{COD}}$ 为缺氧段利用 COD 的量; $M_{(\text{s-eff}). \text{COD}}$ 为 BAF 中利用 COD 的量; $M_{\text{W. COD}}$ 为剩余污泥中 COD 的量

2.3 HRT 对系统磷去除性能的影响

图 4 为不同 HRT 条件下系统 TP 的去除特性。进水 TP 的浓度波动范围为 $2.9 \sim 6.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，当 HRT 从 9 h 缩短到 6 h 时，出水 TP 平均浓度由 0.33 升高到 $0.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、去除率由 92.0% 下降到 84.4%，HRT 为 7 h 和 6 h 时出水 TP 出现不达标的情况。

分析得出：HRT 为 9 h 和 8 h 时，回流污泥中 NO_3^- -N 浓度较低，预缺氧段反硝化消耗掉的有机物较少，在厌氧段聚磷菌可以充分吸收有机物并合成内碳源 PHB，厌氧释磷充分，为聚磷菌超量吸磷提供驱动力。黄紫龙等^[16]的研究发现，随着 HRT 的缩短，厌氧段聚磷菌 PHB 合成量逐渐减少，而且回流污泥中较高的硝酸盐含量也会抑制其厌氧释磷^[17]。

2.4 HRT 对聚磷菌特性的影响

为了证实不同 HRT 时反硝化聚磷菌占聚磷菌的比例，在不同试验阶段进行小试试验^[10, 11]。从图 5 可以看出，不同 HRT 下的最大释磷速率分别为 175.6 、 160.4 、 110.2 和 $51.9 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ，最大缺氧吸磷速率分别为 458.6 、 343.3 、 213.6 和 $67.8 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ，反硝化聚磷菌 (DPAOs) 占聚磷菌 (PAOs) 的比例分别为 76.8%、71.7%、56.0% 和 48.8%。可见本系统中 HRT 的减少对反硝化除磷不利。彭永臻等^[5]的研究也发现 HRT 越大，除磷效果越好。有研究显示^[18~20]，反硝化除磷速率和 PAOs 储存内碳源 PHB 之间存在线性相关性，又因为 HRT 与内碳源 PHB 密切相关^[21]，以 PHB 作为胞内碳源可以促进缺氧段吸磷。HRT 较长促进了 DPAOs 的新陈代谢，使 DPAOs 占 PAOs 的比例提高并占主体地

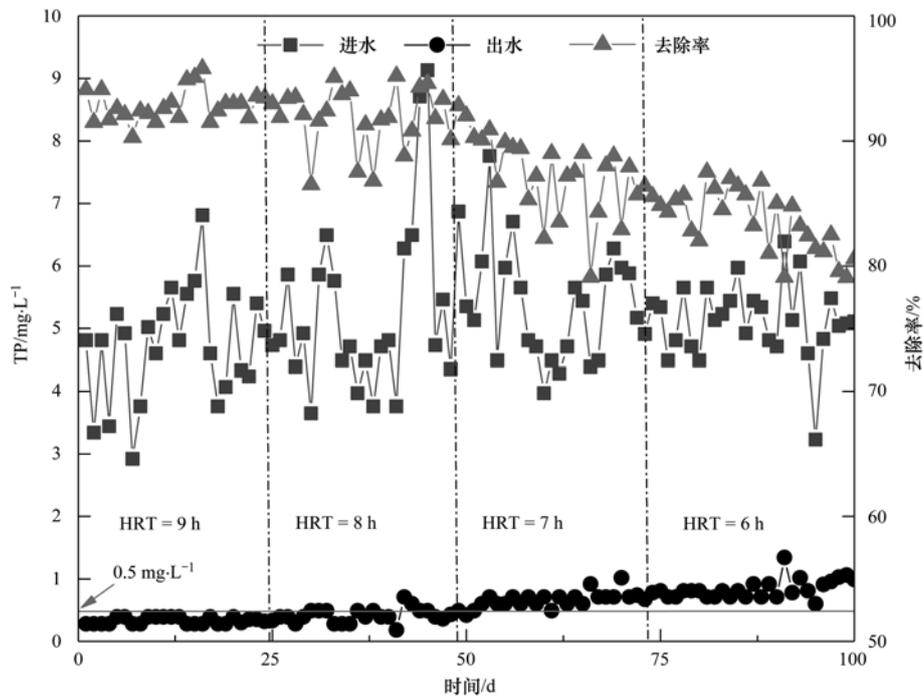


图4 不同 HRT 对 TP 去除的影响

Fig. 4 TP removal efficiency at different HRT

位,提高了系统的除磷效率。

对缺氧段反硝化除磷过程中 ΔPO_4^{3-} 和 ΔNO_3^- -N 变化量进行线性拟合(图 6),可以看出不同 HRT 下, ΔPO_4^{3-} 和 ΔNO_3^- -N 分别波动在 $1.1 \sim 6.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.6 \sim 7.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,对 ΔPO_4^{3-} 与 ΔNO_3^- -N 的线性关系进行拟合后发现, R^2 值均低于 0.5,说明采用单一直线难以对 ΔPO_4^{3-} 与 ΔNO_3^- -N 进行线性拟合.因此考虑用概率统计的方法对缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 进行正态分布分析^[22],不同 HRT 缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 线性拟合后比值分别分布在 1.35 ~ 1.85、1.14 ~ 1.33、1.04 ~ 1.13 和 0.82 ~ 0.95 之间,将 ΔPO_4^{3-} 与 ΔNO_3^- -N 进行协方差^[23], $\text{Cov}(\Delta\text{PO}_4^{3-}, \Delta\text{NO}_3^-$ -N) 分别等于 0.19、0.08、0.09 和 0.16,说明不同 HRT 下 ΔPO_4^{3-} 与 ΔNO_3^- -N 之间线性关系系数较小,故将缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 线性拟合结合正态分布,概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-1.20)^2}{2 \times 0.29^2}}$$

得出不同 HRT 下缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 分别为 1.56、1.24、1.09 和 0.89 时占比最高,累计频率分别为 30%、37.5%、33.8% 和 26%,由不同 HRT 下缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 线性拟合后比值分布,可知缺氧段下 ΔNO_3^- -N 和 ΔPO_4^{3-} 的变化情况对反硝化除磷量影响较大,根据缺氧段反硝化

聚磷原理,每 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ -N 可去除 PO_4^{3-} 为 $1.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[24],且当 HRT 为 8 h 时, $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 为 1.24 时,反硝化除磷效果较好,正态分布累计频率更高,缩小比例范围后更接近理论值.说明实际工艺结合数理方法能更有效地调控工艺参数。

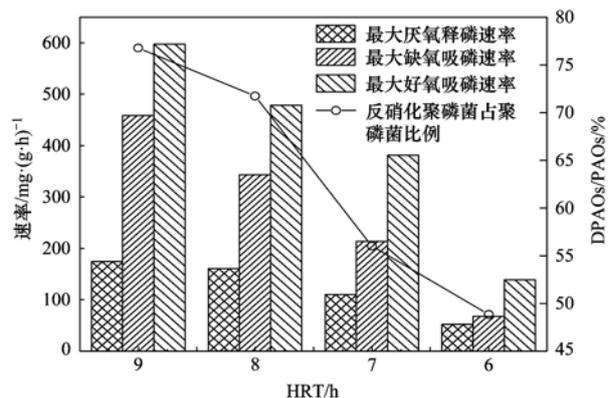


图5 不同工况下厌氧释磷速率、缺氧/好氧吸磷速率及反硝化聚磷菌占聚磷菌的比值

Fig. 5 The R_{anmax} , $\text{PUR}_{\text{anmax}}$, PUR_{omax} , and DPAOs/PAOs under different operational conditions

2.5 HRT 对系统污泥特性的影响

不同 HRT 下 A²/O 反应器中污泥特性的变化情况见图 7(a),当系统 HRT 从 9 h 缩短到 8 h 时, MLSS 和 MLVSS 基本稳定在 $2800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右;当继续降低 HRT 为 7 h 和 6 h 时, MLSS 分别下降为 $2640 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2492 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS 分别下降为 $1875 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1429 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

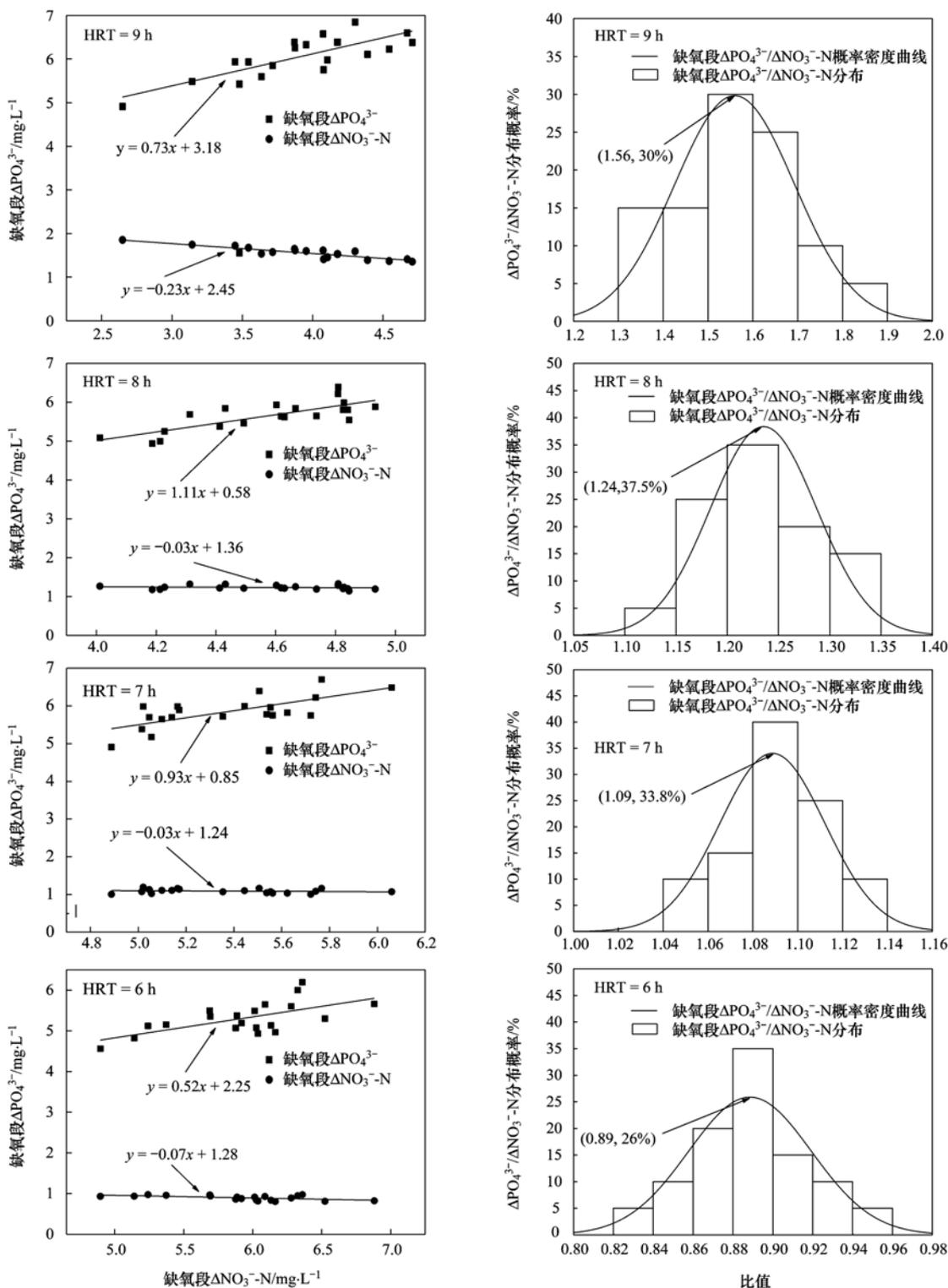


图 6 缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 线性拟合关系和正态分布统计

Fig. 6 Linear fitting relationship and normal distribution statistics of $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ in anoxic section

在整个试验过程中, $f(\text{MLVSS}/\text{MLSS})$ 从 0.74 下降到 0.63 左右, SVI 值从 87.1 mL·g⁻¹ 逐渐下降到 61.6 mL·g⁻¹. HRT 减小导致进水流量和水力剪切力均增大, 引起污泥絮体破碎, 使得 MLVSS/MLSS 下降. 杨忠林等^[25] 的研究也认为 HRT 减小, 进水负荷增大, 微生物的生长受到抑制而衰亡, 导致污泥浓

度和活性下降, 潘欣语等^[3] 的研究也有类似的结果. 王娜等^[26] 的研究发现 HRT 减小不会影响污泥沉降性能. 实际污泥产量持续上升至 13 000 mg·d⁻¹, 剩余污泥产率系数 Y 值则从 0.46 下降到 0.34 见图 7(b), 表明合理的 HRT 下较高的污泥活性能有效降低污泥的产率^[27].

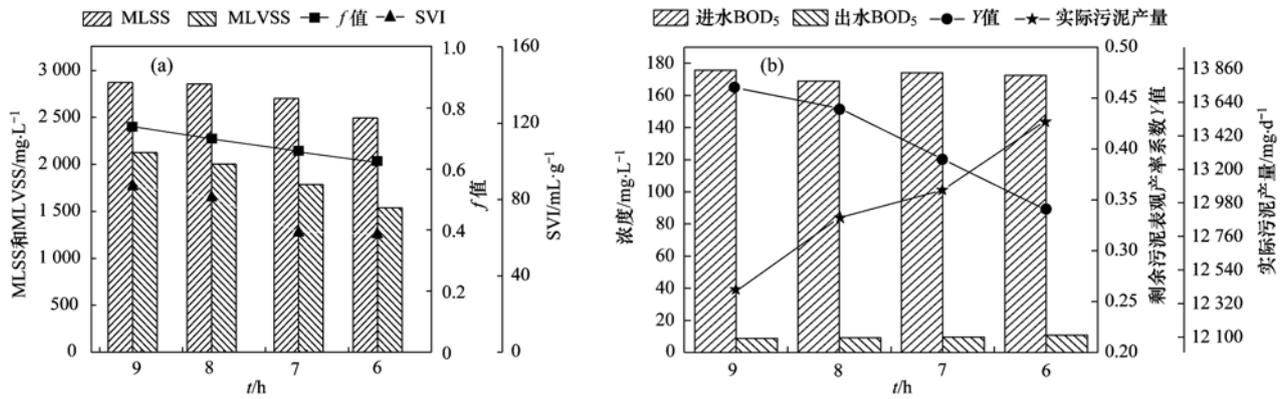


图7 HRT对污泥特性的影响

Fig. 7 Effect of HRT on sludge characteristics

3 结论

(1) HRT的减少导致NH₄⁺-N、TN和TP的去除率下降,但对COD的去除影响较小,出水COD均低于42 mg·L⁻¹;HRT为9 h和8 h时,NH₄⁺-N、TP、TN的出水均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A标准。

(2) 当HRT从9 h降低到6 h时,最大厌氧释磷速率从175.6降低到51.87 mg·(g·h)⁻¹,最大缺氧吸磷速率从589.62降低到127.76 mg·(g·h)⁻¹,反硝化聚磷菌(DPAOs)占聚磷菌(PAOs)的比例从76.8%降低到48.8%。

(3) 当HRT从9 h降低到6 h时,缺氧段ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-1.20)^2}{2 \times 0.29^2}}$$

当HRT为8 h时ΔPO₄³⁻/ΔNO₃⁻-N为1.24时,累计频率高达37.5%,更接近理论值1.41。

(4) A²/O反应器中HRT的减小对活性污泥的性能影响较大, f (MLVSS/MLSS)从0.74逐渐降低到0.63,剩余污泥产率从0.46下降到0.34,污泥产量减少。

参考文献:

[1] 吴昌永, 彭永臻, 彭轶, 等. 碳源类型对A²O系统脱氮除磷的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 798-802.
Wu C Y, Peng Y Z, Peng Y, et al. Influence of carbon source on biological nutrient removal in A²O process[J]. Environmental Science, 2009, 30(3): 798-802.

[2] Wang X L, Wang S Y, Peng Y Z, et al. Anoxic biological phosphorus uptake in A²O process[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2005, 13(4): 516-521.

[3] 潘欣语, 杨建宇, 李永峰, 等. 水力停留时间对A²/O工艺脱氮除磷效率的作用[J]. 黑龙江科学, 2011, 2(4): 1-4, 24.
Pan X Y, Yang J Y, Li Y F, et al. Effects on nitrogen and phosphorus removal in A²/O process by HRT[J]. Heilongjiang Science, 2011, 2(4): 1-4, 24.

[4] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. A²/O-曝气生物滤池工艺反硝

化除磷[J]. 化工学报, 2011, 62(3): 797-804.

Chen Y Z, Peng Y Z, Wang J H, et al. Denitrifying phosphorus removal in A²/O-BAF process[J]. CIESC Journal, 2011, 62(3): 797-804.

[5] 彭永臻, 王建华, 陈永志. A²/O-BAF联合工艺处理低碳氮比生活污水[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(4): 590-595.

Peng Y Z, Wang J H, Chen Y Z. Treating low carbon and nitrogen ratio sewage with an A²O-BAF system[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(4): 590-595.

[6] 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 等. 低温下A²/O-BAF反硝化除磷脱氮特性[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4621-4627.

Huang J M, Zhao Z C, Zheng L J, et al. Characteristics of denitrifying phosphorus removal by A²/O-BAF at low temperatures[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4621-4627.

[7] 王建华, 陈永志, 彭永臻. 低碳氮比实际生活污水A²O-BAF工艺低温脱氮除磷[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1195-1200.

Wang J H, Chen Y Z, Peng Y Z. Biological nutrients removal from domestic wastewater with low carbon-to-nitrogen ratio in A²O-BAF system at low temperature[J]. China Environmental Science, 2010, 30(9): 1195-1200.

[8] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 21st ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.

[9] 杜接弟, 王毅力, 李炯, 等. HRT对ABR处理低浓度废水的效果和颗粒污泥特征的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(7): 2022-2029.

Du J D, Wang Y L, Li J, et al. Impact of Hydraulic Retention Time (HRT) in ABR on its operation performance and granular sludge characteristics when treating low-strength wastewater[J]. Environmental Science, 2009, 30(7): 2022-2029.

[10] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (A²/O) wastewater treatment plant (WWTP) [J]. Process Biochemistry, 2004, 39(11): 1615-1624.

[11] 吕冬梅, 彭永臻, 赵伟华, 等. A²O-BAF工艺反硝化聚磷效果的影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3266-3274.

Lü D M, Peng Y Z, Zhao W H, et al. Factors influencing the denitrifying phosphorus removal efficiency of A²O-BAF process [J]. China Environmental Science, 2015, 35(11): 3266-3274.

[12] 陈杰云, 余薇薇, 杜邦昊, 等. HRT对多级A/O+悬浮填料

- 组合工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2017, **33**(9): 31-34.
- Chen J Y, Yu W W, Du B H, *et al.* Effect of hydraulic retention time on nitrogen and phosphorus removal in multistage A/O + suspended carrier combined process [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, **33**(9): 31-34.
- [13] 刘春, 年永嘉, 张静, 等. 微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2230-2235.
- Liu C, Nian Y J, Zhang J, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification in a microbubble-aerated biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2230-2235.
- [14] 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 等. 进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 816-822.
- Du Y Q, Yu D S, Zhen J Y, *et al.* Effect of influent C/N ratio on the nutrient removal characteristics of SNEDPR systems [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 816-822.
- [15] 李茂侨, 陈志强, 温沁雪. 延长缺氧水力停留时间对 A-AAO 工艺氮磷去除影响的研究[J]. 环境科学与管理, 2018, **43**(1): 102-107.
- Li M Q, Chen Z Q, Wen Q X. Effects of extending hydraulic retention time on nitrogen and phosphorus removal with A-AAO process [J]. *Environmental Science and Management*, 2018, **43**(1): 102-107.
- [16] 黄紫龙, 方茜, 徐诗燕, 等. 连续流中亚硝化反硝化除磷同步发生的调控因子[J]. 水处理技术, 2018, **44**(10): 94-98.
- Huang Z L, Fang Q, Xu S Y, *et al.* Regulatory factors of simultaneous Nitrosification and denitrifying phosphorus removal in continuous flow [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, **44**(10): 94-98.
- [17] Huang L, Chen Z Q, Wen Q X, *et al.* Enhanced polyhydroxyalkanoate production by mixed microbial culture with extended cultivation strategy [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **241**: 802-811.
- [18] 李桂荣, 王立军, 杜春山, 等. UCT 工艺处理低 C/N 值城市污水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(9): 101-104.
- Li G R, Wang L J, Du C S, *et al.* Experimental research on treatment of municipal wastewater with low C/N ratio by UCT process [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(9): 101-104.
- [19] 丁彩娟, 吉芳英, 高小平, 等. A/ASBR 中 PHB 转化与反硝化吸磷的关系研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, **27**(3): 80-84.
- Ding C J, Ji F Y, Gao X P, *et al.* Study of the correlation between the transformation of PHB and denitrifying phosphorus absorption in A/ASBR [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2005, **27**(3): 80-84.
- [20] 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 等. 分段进水对改良 A²/O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1704-1712.
- Nan Y B, Peng Y Z, Zeng L Y, *et al.* Effect of step feed on denitrifying phosphorus and nitrate removal in a modification of the two sludge A²/O-BAF system [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1704-1712.
- [21] 刘钢. 新型后置反硝化工艺处理低 C/N(C/P) 比城镇污水性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Liu G. Nutrient removal performance of novel post-anoxic process treating municipal wastewater with low C/N and C/P ratios [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [22] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2001. 96.
- [23] 谢明文. 关于协方差、相关系数与相关性的关系[J]. 数理统计与管理, 2004, **23**(3): 33-36.
- Xie M W. The relation of covariance, correlation coefficient and correlation [J]. *Application of Statistics and Management*, 2004, **23**(3): 33-36.
- [24] 汪林. 反硝化同步除磷动力学原理及其在改善 MSBR 性能中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- Wang L. The dynamic principles of denitrifying simultaneous phosphorus removal and application to improving the performance of MSBR operation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [25] 杨忠林, 钟中, 韩萍芳, 等. HRT 及 EPS 对 ABR 中污泥性能的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2012, **34**(4): 22-26.
- Yang Z L, Zhong Z, Han P F, *et al.* Effects of HRT and EPS on characteristics of sludge in anaerobic baffled reactor [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, **34**(4): 22-26.
- [26] 王娜, 彭党聪. 基于性能改善的厌氧颗粒污泥调控机理研究[J]. 水处理技术, 2018, **44**(1): 21-25.
- Wang N, Peng D C. Study on the regulation mechanism of anaerobic granular sludge based on performance improvement [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, **44**(1): 21-25.
- [27] 张彦平, 李凌冲, 路广平, 等. 高铁酸盐氧化-A/O 工艺污泥减量及强化脱氮[J]. 环境工程学报, 2019, **13**(12): 2870-2877.
- Zhang Y P, Li L C, Lu G P, *et al.* Sludge reduction and enhanced nitrogen removal in ferrate oxidation-A/O process [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2019, **13**(12): 2870-2877.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Han, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)