

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

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

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(Ⅲ) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17β-雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

低温下 A²/O-BAF 反硝化除磷脱氮特性

黄剑明¹, 赵智超¹, 郑隆举², 邵兆伟¹, 安芳娇¹, 陈永志^{1*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州城市学院培黎机械工程学院, 兰州 730070)

摘要: 在 11~14℃ 低温下, 采用 A²/O-BAF 系统处理低 C/N 生活污水, 研究了污染物去除特性、反硝化除磷过程中除磷脱氮比例($\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N)以及 BAF 中曝气量和有效填料高度对硝化反应的影响。结果表明, 在 COD、 NH_4^+ -N、TN 和 PO_4^{3-} 的平均进水浓度分别为 193.1、58.6、60.3 和 5.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 平均出水浓度分别为 46.3、2.5、13.4 和 0.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到国家城镇污水处理厂污染物排放标准一级 A 标准。对 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 进行线性拟合, 比值分布在 0.47~1.75 之间; 运用正态分布对 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 进行数理统计, 其均值为 1.20, 标准差 0.29。BAF 中曝气量为 60 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 100 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, 出水 NH_4^+ -N 浓度小于 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时所需填料高度分别为 1.8 m 和 1.0 m; 继续增大 BAF 中曝气量为 120 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 气水流冲击导致生物膜脱落, 造成出水 NH_4^+ -N 大于 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

关键词: 低温; 低 C/N; 曝气量; 有效填料高度; 反硝化除磷脱氮比例($\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N); 曝气生物滤池

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4621-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802127

Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A²/O-BAF at Low Temperatures

HUANG Jian-ming¹, ZHAO Zhi-chao¹, ZHENG Long-ju², SHAO Zhao-wei¹, AN Fang-jiao¹, CHEN Yong-zhi^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Bailei Mechanical Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Low C/N domestic sewage was treated by an A²/O-biological aerated filter (BAF) system at low temperatures (11~14℃). The characteristics of pollutant removal, the ratio of denitrifying phosphorus to nitrogen ($\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N) and effects of aeration flow and effective packing height on nitrification in BAF were studied. The results showed that when the average influent concentrations of COD, NH_4^+ -N, TN and PO_4^{3-} were 193.1, 58.6, 60.3 and 5.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively, their effluent concentrations were 46.3, 2.5, 13.4 and 0.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively, which met the first level A criteria specified in the discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant (GB 18918-2002). The linear fitting of $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N was between 0.47 and 1.75. The normal distribution of mathematical statistics was applied and the average standard deviation for $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N were 1.20 and 0.29 respectively. When the aeration flows were 60 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ and 100 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, the effluent concentration of NH_4^+ -N was less than 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, corresponding to the effective packing heights in the BAF of 1.8 m and 1.0 m respectively. However, when the aeration flow was increased to 120 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, the air-water flow led to biofilm detachment, which caused the effluent concentration of NH_4^+ -N to increase beyond 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Key words: low temperature; low C/N; aeration flow; effective packing height; ratio of denitrifying phosphorus to nitrogen ($\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N); biological aerated filter (BAF)

我国北方地区冬季低温时间较长,是导致污水厂出水不达标的重要原因^[1,2]。Termier 等^[3]认为低温下微生物体内酶活性降低,对基质的利用速率减小,使生物活性降低。贲岳等^[4]的研究发现低温下微生物的吸附能力和代谢能力均会受到较大影响,造成污水处理效果降低。端正花等^[5]通过细菌相对丰度检测发现低温下微生物优势种群发生改变,污泥沉降性能降低。因此,如何在低温条件下提高污水处理效果,改善出水水质是我国北方低温地区亟需解决的一大难题。

A²/O-BAF 双污泥系统可在节省能耗的前提下对低 C/N 生活污水实现氮磷的深度去除,因此研

究者将其视为污水处理的良好工艺之一^[6,7]。有研究发现常温下 A²/O-BAF 对低 C/N 的生活污水有较好的处理效果^[8],张勇等^[9]和王建华等^[10]分别通过中试和小试对低温下 A²/O-BAF 中污染物去除特性、污泥沉降性能及 pH 和 ORP 的指示功能进行了研究。然而,对低温下 A²/O-BAF 系统中反硝化除磷脱氮比例($\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N)及 BAF 中有效填料高度和曝气量对 BAF 硝化性能的影响研究鲜见。

收稿日期: 2018-02-24; 修订日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668033); 甘肃省高等学校特色专业项目(101004)

作者简介: 黄剑明(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为污水脱氮除磷, E-mail: 595303540@qq.com

* 通信作者, E-mail: 476411589@qq.com

本研究通过对低温下 A²/O-BAF 系统缺氧段氮磷的物料衡算探究了 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的变化规律,同时考察了不同曝气量和有效填料高度对 BAF 硝化性能的影响,建立了低温下反硝化除磷过程中 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的线性拟合方程区间,确定了 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 变化范围,得出了 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 正态分布概率密度函数和硝化型 BAF 高效低耗的运行参数,以期 A²/O-BAF 工艺的推广应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置

系统装置如图 1 所示,材质均为有机玻璃. A²/O 有效容积 60.0L,共分 10 格室,依次设置厌氧区、缺氧区和好氧区, $V_{\text{厌氧}}:V_{\text{缺氧}}:V_{\text{好氧}}=2:6:2$; BAF 直径 0.1 m,高 2.4 m,填料层高度 1.8 m,有效容积为 18.8 L,填料由改性聚乙烯制成,填充率为

75.0%. 生活污水经蠕动泵进入 A²/O 厌氧区,同时进入厌氧区的还有沉淀池的回流污泥,聚磷菌 (PAOs) 在此完成厌氧释磷及 COD 的部分去除;厌氧区泥水混合液进入缺氧区,同时进入缺氧区的还有 BAF 回流的硝化液,反硝化聚磷菌 (DPAOs) 完成反硝化除磷,去除 PO_4^{3-} 和 $\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$;混合液接着进入好氧区完成 PO_4^{3-} 的进一步去除和氮气吹脱;好氧区混合液进入沉淀池完成泥水分离,上清液经中间水箱通过蠕动泵以上流形式进入 BAF 反应器,完成硝化反应;BAF 出水大部分回流到 A²/O 缺氧区,少量外排. 沉淀池污泥经重力沉淀,大部分回流到 A²/O 厌氧区,少量排出. 空气泵为 A²/O 好氧区和 BAF 提供溶解氧,由转子流量计控制气体流量.

1.2 试验用水及检测方法

试验用水采用兰州交通大学家属区实际生活污水,具体水质见表 1.

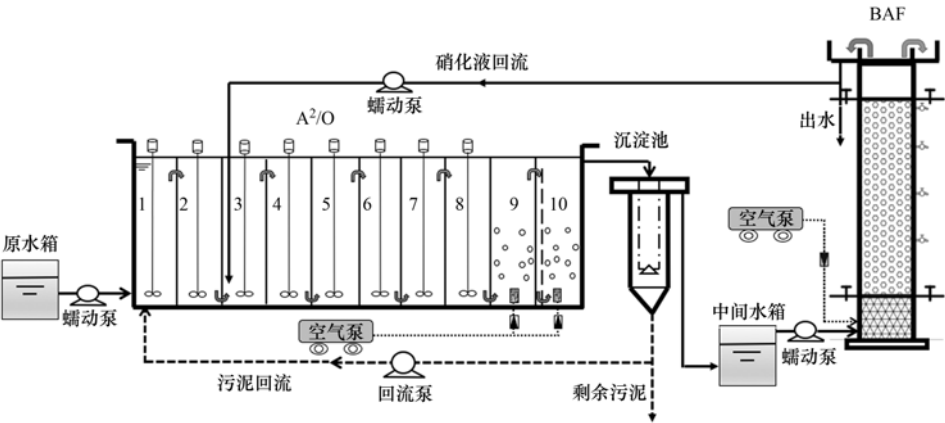


图 1 A²/O-BAF 装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of A²/O-BAF biological system

表 1 试验用水水质

Table 1 Characteristics of raw wastewater

项目	COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ /mg·L ⁻¹	C/N	t/℃
范围	126 ~ 280	46.2 ~ 82.2	48.6 ~ 87.4	2.8 ~ 9.5	2.3 ~ 4.1	11 ~ 14
均值	193.1	58.6	60.3	5.1	2.8	13

水样经 0.45 μm 滤纸过滤后根据 APHA 标准方法^[11]测定 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 PO₄³⁻. DO 和温度采用 WTW pH/DO 3420(德国)仪器在线监测. MLSS 采用差量法计算.

1.3 试验方案

(1)低温下污染物去除特性试验温度为 11 ~ 14℃,控制 A²/O 的 HRT 为 9.0 h,硝化液回流比(*r*)为 200%,污泥回流比(*R*)为 100%,MLSS 为 3 300 ~ 3 500 mg·L⁻¹,研究了 A²/O-BAF 中 COD、NH₄⁺-N、TN 和 PO₄³⁻ 的去除情况.

(2)低温下缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 通过低温下缺氧段氮磷及 COD 的物料衡算得出 ΔPO_4^{3-} 及 $\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}$,两者比值即为 DPAOs 同步去除的磷与硝氮.

(3)低温下曝气量和有效填料高度对 BAF 硝化性能的影响沿 BAF 从下到上依次设置了 4 个取样的口,其对应的有效填料高度分别为 0.6、1.0、1.4 和 1.8 m,记为 H1、H2、H3 和 H4;改变曝气量分别为 60、80、100 和 120 L·h⁻¹,记为 Run1、Run2、Run3 和 Run4,研究了不同曝气量时各填料高度下

的 NH₄⁺-N 去除效果。

1.4 反硝化除磷污泥特性

在 A²/O-BAF 系统稳定运行期间, 试验进行释磷、吸磷小试, 根据相邻两次所测 PO₄³⁻ 浓度差值计算厌氧释磷速率 (R_{an})、缺氧吸磷速率 (PUR_{an}) 及好氧吸磷速率 (PUR_o), 计算公式如下^[12]:

$$R_{an} = \frac{\text{相邻两次厌氧释磷量差值}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})}{\text{MLSS}(\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) \cdot \text{反应时间}(\text{h})} \quad (1)$$

$$PUR_{an} = \frac{\text{相邻两次缺氧吸磷量差值}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})}{\text{MLSS}(\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) \cdot \text{反应时间}(\text{h})} \quad (2)$$

$$PUR_o = \frac{\text{相邻两次好氧吸磷量差值}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})}{\text{MLSS}(\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) \cdot \text{反应时间}(\text{h})} \quad (3)$$

通过式 (1) ~ (3) 可计算 R_{an} 、 PUR_{an} 和 PUR_o , 得出污泥的最大厌氧释磷速率 (R_{anmax})、最大缺氧吸磷速率 (PUR_{anmax}) 及最大好氧吸磷速率 (PUR_{omax}), PUR_{anmax} 与 PUR_{omax} 的比值即为污泥中 DPAOs/PAOs。

1.5 缺氧段物料衡算

为研究低温下 A²/O-BAF 缺氧段同步除磷脱氮情况, 采用物料衡算方式进行缺氧段氮磷及 COD 平衡分析, 得出缺氧段 PO₄³⁻ 和 NO₃⁻-N 去除量, 物料平衡分析见图 2。根据缺氧段 PO₄³⁻、NO₃⁻-N 和

COD 的变化量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 可得出缺氧段同步除磷脱氮比例 ($\Delta\text{PO}_4^{3-}/\text{NO}_3^{-}\text{-N}$):

$$\Delta\text{PO}_4^{3-} = c_{Ana}(\text{PO}_4^{3-}) \cdot \frac{Q_{Ana} + Q_R}{Q_{Ana} + Q_R + Q_r} - c_A(\text{PO}_4^{3-}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N} = & c_{eff}(\text{NO}_3^{-}\text{-N}) \cdot \frac{Q_r}{Q_{in} + Q_R + Q_r} + \\ & c_{Ana}(\text{NO}_3^{-}\text{-N}) \cdot \frac{Q_{Ana}}{Q_{in} + Q_R + Q_r} - \\ & c_A(\text{NO}_3^{-}\text{-N}) - \Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}_{\text{COD}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta\text{COD} = c_{Ana}(\text{COD}) \cdot \frac{Q_{Ana}}{Q_{Ana} + Q_R + Q_r} - c_A(\text{COD}) \quad (6)$$

$$\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}_{\text{COD}} = \Delta\text{COD}/2.86 \quad (7)$$

式中, Q_{in} 为进水流量, Q_{Ana} 为厌氧出水流量, Q_r 为硝化液回流量, Q_R 为污泥回流量, 均为 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$; $c_{Ana}(\text{PO}_4^{3-})$ 、 $c_{Ana}(\text{NO}_3^{-}\text{-N})$ 和 $c_{Ana}(\text{COD})$ 分别为厌氧段出水 PO₄³⁻、NO₃⁻-N 和 COD 浓度, $c_A(\text{PO}_4^{3-})$ 、 $c_A(\text{NO}_3^{-}\text{-N})$ 和 $c_A(\text{COD})$ 分别为缺氧段出水 PO₄³⁻、NO₃⁻-N 和 COD 浓度, $c_{eff}(\text{NO}_3^{-}\text{-N})$ 为 BAF 出水 NO₃⁻-N 浓度, 均为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\Delta\text{NO}_3^{-}\text{-N}_{\text{COD}}$ 是缺氧段 COD 去除造成的 NO₃⁻-N 变化量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (异养反硝化 1 g NO₃⁻-N 需 COD 的理论值为 2.86 g)。

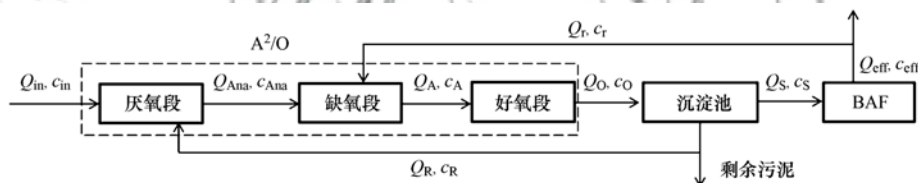


图2 A²/O-BAF 系统缺氧段平衡分析

Fig. 2 Mass balance of A²/O-BAF biological system

2 结果与讨论

2.1 A²/O-BAF 系统污染物变化特征

A²/O-BAF 系统污染物去除情况见图 3, 运行周期内 COD 的去除情况如图 3(a), 在平均进水 COD 浓度为 193.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 平均出水 COD 稳定在 46.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 平均去除率保持在 80.6%。可见低温并未对 COD 的去除产生影响, 这与许多低温对污染物去除效果的研究报道一致^[13]。图 3(b) 为系统运行过程中氮素的变化趋势, 进水氮素以 NH₄⁺-N 为主, NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 占比很小; 进水 TN 浓度均值为 60.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均出水 TN 浓度为 13.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率为 78.3%。出水氮素以 NO₃⁻-N 为

主, NH₄⁺-N 浓度稳定在 2.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, NO₂⁻-N 浓度小于 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这是因为本系统的硝化菌以生物膜的形式存在于 BAF 反应器中, 挂膜稳定后其活性较高, 故 BAF 在 HRT 仅为 1.0 h、填料容积仅为 18.8 L 即可实现氨氮的高效、稳定去除。Trapani 等^[14] 通过对比添加填料后形成的生物膜系统与原有的活性污泥系统的硝化速率, 发现 11℃ 时生物膜系统的硝化速率是活性污泥系统的 2.2 倍; 宋旭升等^[15] 发现低温下生物膜系统比活性污泥系统的脱氮能力高 16.6%。张勇等^[9] 发现低温下 A²/O-BAF 在经过短暂的适应期后, 氨氮去除率稳定为 90.0% 以上, 而 A²/O 的氨氮去除率却不足 50.0%, 说明低温生物膜法对氨氮的去除效果优于活性污泥法。

进出水 PO_4^{3-} 的变化情况见图 3(c), 试验期间进水 PO_4^{3-} 在 $2.8 \sim 9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动, 但平均出水 PO_4^{3-} 稳定在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 93.2%, 说明低温和进水 PO_4^{3-} 的波动并未影响本系统对 PO_4^{3-} 的去除效果. Winkler 等^[16] 的研究认为, PAOs 的温度系数较低, 其活性受温度影响较小, 故低温不会造成 PO_4^{3-} 去除效果骤减.

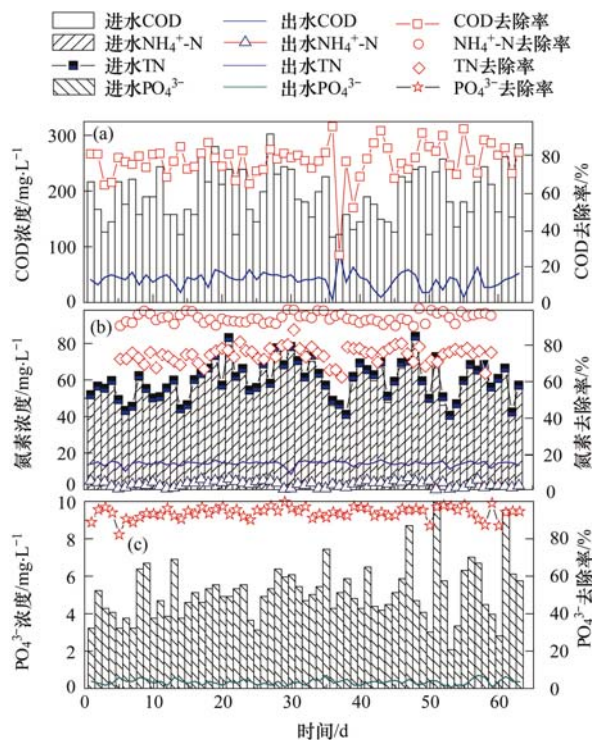


图 3 A^2/O -BAF 系统污染物去除情况

Fig. 3 Pollutant removal efficiencies of A^2/O -BAF system

2.2 COD、氨氮、硝态氮和磷的沿程变化规律

图 4 为 A^2/O -BAF 系统污染物的沿程变化. COD 在厌氧段从 $193.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减小到 $85.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这是因为, 低温下 PAOs 大量利用水中 VFA(挥发性脂肪酸)^[17], 故在较短时间内将水中 COD 进行去除, 同时污泥回流的稀释也造成厌氧段 COD 有所降低. 缺氧段出水 COD 浓度为 $46.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是因为异养反硝化菌利用水中剩余可降解 COD 进行反硝化作用, 对 COD 实现了进一步去除, 但缺氧段 COD 降低的主要原因是硝化液回流的稀释. 厌氧段和缺氧段的 HRT 较长, 污水中大量的可降解有机物被聚磷菌和反硝化菌充分利用, 使好氧段 COD 仅降低了 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这是因为进入好氧段的 COD 大多为难降解有机物, 很难被好氧异养菌利用. BAF 平均出水 COD 小幅上升至 $46.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 原因是 BAF 内老化的生物膜脱落导致

COD 少量增加^[18].

进水 NH_4^+-N 在 A^2/O 的厌氧段和缺氧段的降低主要是因为污泥回流和硝化液回流作用导致的, NH_4^+-N 在 BAF 中完成硝化, 实现 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化. 本工艺的特点是将硝化菌从 A^2/O 分离, 在 BAF 中完成硝化^[19], 所以 NH_4^+-N 在 A^2/O 中几乎不降解.

PO_4^{3-} 在 A^2/O 厌氧段大量增加, 在缺氧段伴随 NO_3^--N 浓度的减小而减小, 在好氧段进一步降低至 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 在 BAF 中 PO_4^{3-} 浓度未发生变化. 分析认为, PAOs 在 A^2/O 厌氧段利用 VFA 合成 PHA, 将体内的 Poly-P(聚磷)转化为 PO_4^{3-} 释放到水体中, 导致 PO_4^{3-} 的浓度升高^[20]; 缺氧段 DPAOs 同时利用 PO_4^{3-} 和 NO_3^--N 完成反硝化除磷. 在好氧段 PAOs 利用 O_2 作为电子受体对 PO_4^{3-} 进一步去除, 使出水浓度小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. BAF 内几乎不含 PAOs, 故 PO_4^{3-} 在 BAF 内几乎没有减少. 为进一步研究系统中 DPAOs 占 PAOs 比例, 通过小试试验发现系统的 R_{anmax} 为 $160.75 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, $\text{PUR}_{\text{anmax}}$ 为 $573.38 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, PUR_{omax} 为 $597.72 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 即 $\text{DPAOs}/\text{PAOs} = 95.9\%$, 说明系统内反硝化除磷占优势. 何理等^[21] 和陈永志^[22] 均发现 DPAOs 比例越高, 缺氧除磷量越多, 减少好氧对除磷的依赖, 可以节省曝气量.

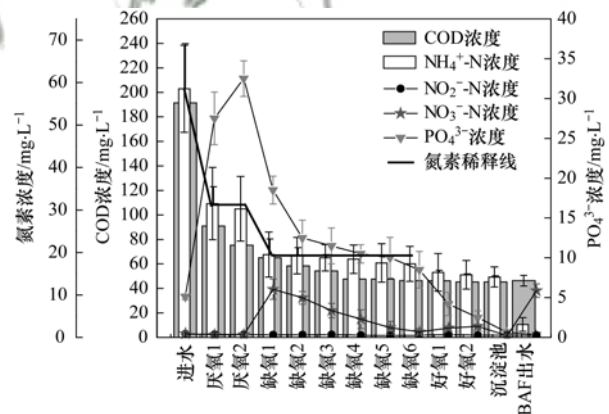


图 4 A^2/O -BAF 系统污染物沿程变化

Fig. 4 Pollutant concentrations in different stage of A^2/O -BAF system

2.3 A^2/O -BAF 系统缺氧段反硝化除磷特性

图 5 为缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^--\text{N}$ 线性拟合情况, 其中 ΔPO_4^{3-} 和 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}$ 分别为反硝化除磷过程中 PO_4^{3-} 和 NO_3^--N 的变化量. 可知, ΔPO_4^{3-} 和 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}$ 分别在 $4.5 \sim 7.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.5 \sim 7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动, $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^--\text{N}$ 在直线 $y = 0.47x + 4.80$ 和 y

$= 1.75x + 4.07$ 之间. 这可能是因为低温下 DPAOs 优先利用氮磷的次序及大小不同, 造成 PO_4^{3-} 与 NO_3^- -N 的变化量处于一个较大范围内, 导致 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\text{NO}_3^-$ -N 不能用一条直线进行拟合.

鲍林林^[23]通过研究 3 ~ 30℃ 时缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N, 发现 DPAOs 去除的氮磷数量和比例并非定值, 在外界条件变化较大时可能产生较大波动, 该结论与本试验一致. 吕冬梅等^[24]在常温下通过 PHA 的测定进行了缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 的研究, 发现两者有良好的线性关系 $y = (1.014 \pm 0.014)x$, $R^2 > 0.99$, 但由于 PHA 的来源较广, 故将 PHA 的变化量作为缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 的计算参数之一是 不太准确的, 而作为污水处理研究基础的物料衡算更具有科学性, 已得到普遍认可. 汪林的研究认为^[25], 常温下缺氧段每去除 0.20 mol PO_4^{3-} 需要提供 0.96 mol NO_3^- -N, 即 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 为 1.40, 但该值是通过缺氧条件下 DPAOs 的反应方程式计算得出的, 不一定适用于低温下波动较大的生活污水中缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 的计算. 本试验采用物料衡算的方法确定 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N, 可以更准确地控制缺氧时间的长短, 对实际工程的应用具有指导意义.

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^[26], 见图 6. 可知缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 主要分布在 0.80 ~ 1.40 之间, 累计频率高达 78.5%, 概率密度函数为:

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

其中, 缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 均值为 1.20, 标准差为 0.29. $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N = 1.20 占比最高, 其累计频率为 27.5%. 对 ΔPO_4^{3-} 与 ΔNO_3^- -N 进行协方差^[27]计算, 发现 $\text{Cov}(\Delta\text{PO}_4^{3-}, \Delta\text{NO}_3^- \text{-N}) = 0.03$, 即低温下 ΔPO_4^{3-} 与 ΔNO_3^- -N 的线性关系系数较小, 难以用单一直线对两者进行线性拟合. 将线性拟合结合正态分布, 可将缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 确定在一个较小的范围内, 更具有合理性.

2.4 曝气量和有效填料高度对 BAF 氨氮去除的影响

不同曝气量和有效填料高度下 NH_4^+ -N 浓度变化见图 7. 影响氨氮去除的主要因素有曝气量和有效填料高度, 曝气量控制着 BAF 内的溶解氧 (DO) 含量, 根据 Monod 方程^[28], 可知硝化反应过程中 DO 是 NH_4^+ -N 去除的主要限制性底物, 对硝化菌的比增殖速率有显著影响. 有效填料高度与 HRT 和硝化菌含量呈正相关, 与氨氮容积负荷 (N_v)^[29]呈

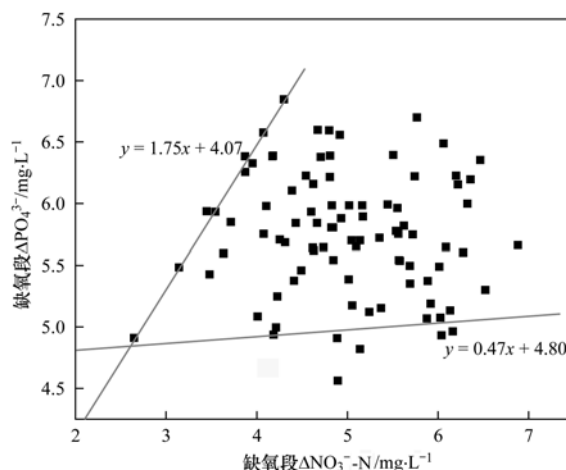


图5 缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 线性拟合区间

Fig. 5 Range of linear fitting on anoxic $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N

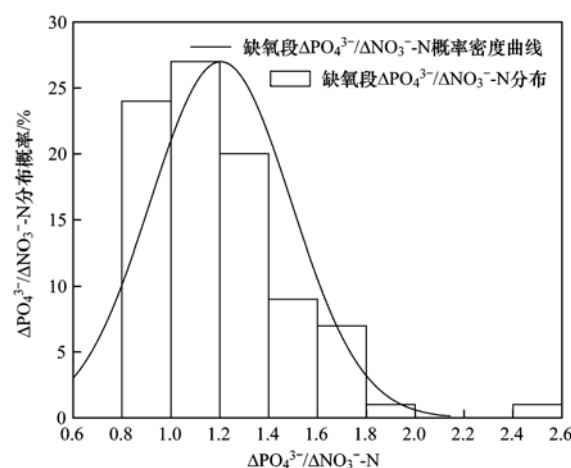


图6 缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 正态分布统计

Fig. 6 Normal distribution statistics of anoxic zone of $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N

负相关, 即填料有效高度越高, HRT 越长, 硝化菌含量越高, 其 N_v 越低, 去除单位 NH_4^+ -N 所需时间越短.

控制曝气量为 $60 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 将填料有效高度从 H1 提高到 H4 时, BAF 中 HRT 从 0.3 h 增加到 1.0 h, N_v 从 $1.10 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 降低到 $0.37 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 出水 NH_4^+ -N 浓度从 $11.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这是因为填料高度为 H1 时 HRT 较短, N_v 较大, 单位硝化菌需氧化的 NH_4^+ -N 浓度较高, 使硝化菌处于高负荷运行状态, 造成硝化菌的活性逐渐降低, 长此以往可能造成硝化菌的生长繁殖受到抑制, 导致硝化效果变差. 李东等^[30]发现提高 N_v 会抑制硝化菌活性, 造成 NH_4^+ -N 去除效果恶化.

随着曝气量从 $60 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $100 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, BAF 内溶解氧含量从 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高到 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

BAF 出水 NH_4^+-N 浓度从 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 浓度小于 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 所需填料高度从 1.8 m 减小到 1.0 m , 所需的 HRT 从 1.0 h 减小到 0.6 h . 这是因为, 一定范围内 DO 含量与硝化菌比增殖速率呈正相关, 通过提高曝气量来增加水中 DO 浓度可提高硝化菌活性, 使其在较高 N_v 和较短的 HRT 的条件下依然能保证 NH_4^+-N 的完全去除^[31].

当曝气量为 $120 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 在填料高度为 H4, HRT 为 1.0 h 也不能实现出水 NH_4^+-N 浓度小于 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这是因为过大的曝气量对生物膜的气水流冲击作用加剧, 造成大量生物膜的脱落, 使生物膜上的硝化菌含量减少, 造成 N_v 提高, 使 NH_4^+-N 去除效果变差^[32]. 可见, 要减小低温下 BAF 的运行能耗, 需提高有效填料高度来减小 N_v 实现 NH_4^+-N 的去除, 但会造成前期基建费用提高; 要减小前期 BAF 的基建投资费用, 需提高曝气量来保证 NH_4^+-N 的去除, 但会导致运行能耗费用的提高. 同时进行有效填料高度的缩减和曝气量的提高, 可同步降低前期基建投资费用和后期曝气能耗.

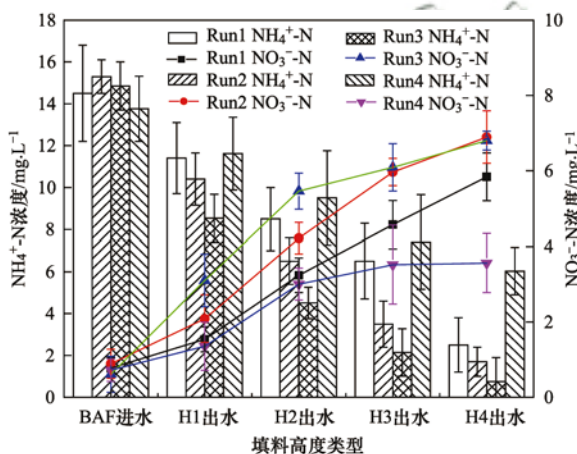


图7 不同曝气量和有效填料高度下 BAF 硝化情况

Fig. 7 BAF nitrification under different aeration and effective packing heights

3 结论

(1) 在 $11 \sim 14^\circ\text{C}$, 平均进水 COD、 NH_4^+-N 、TN 和 PO_4^{3-} 浓度为 193.1 、 58.6 、 60.3 和 $5.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, A^2/O -BAF 出水 COD、 NH_4^+-N 、TN 和 PO_4^{3-} 平均浓度分别为 46.3 、 2.5 、 13.4 和 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB18918-2002 一级 A 标准.

(2) 通过低温下缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 进行物料衡算, $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 在 $0.47 \sim 1.75$ 之间波动. 采用数理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, $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 的均值为 1.20 , 标准差为 0.29 , 概率密度函数为:

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

$\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 主要分布在 $0.80 \sim 1.40$ 之间. 说明采用正态分布对缺氧段 $\Delta\text{PO}_4^{3-}/\Delta\text{NO}_3^-$ -N 进行数学分析更为精确.

(3) BAF 中曝气量从 $60 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 增大到 $100 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, 出水 NH_4^+-N 浓度小于 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 所需有效填料高度从 1.8 m 降至 1.0 m , 曝气量为 $120 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 会造成 BAF 出水 NH_4^+-N 浓度超标. 增加填料高度可降低硝化所需曝气量, 从而减少能耗; 提高曝气量可节省所需填料高度, 实现基建费用的降低.

参考文献:

- [1] 李斯亮. A^2/O 工艺处理东北小城镇污水的优化运行及效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. 18-19.
Li S L. Study on optimized operation and performance of A^2/O wastewater treatment processes in northeast small towns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. 18-19.
- [2] 张自杰. 排水工程下册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 308-311.
Zhang Z J. Drainage engineering part II [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. 308-311.
- [3] Tremier A, de Guardia A, Massiani C, et al. A respirometric method for characterizing the organic composition and biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agent to be co-composted[J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(2): 169-180.
- [4] 贲岳, 陈忠林, 徐贞贞, 等. 低温生活污水处理系统中耐冷菌的筛选及动力学研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3189-3193.
Ben Y, Chen Z L, Xu Z Z, et al. Selection and kinetic mechanism of psychrotrophs in low temperature wastewater treatment[J]. Environmental Science, 2008, **29**(11): 3189-3193.
- [5] 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 等. 低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1070-1074.
Duan Z H, Pan L M, Chen X O, et al. Change of microbial community structure in activated sludge bulking at low temperature[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1070-1074.
- [6] Cheng Y Z, Peng C Y, Wang J H, et al. Effect of nitrate recycling ratio on simultaneous biological nutrient removal in a novel anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O)-Biological aerated filter [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(10): 5722-5727.
- [7] Chen Y Z, Li B K, Ye L, et al. The combined effects of COD/N ratio and nitrate recycling ratio on nitrogen and phosphorus removal in anaerobic/anoxic/aerobic (A^2/O)-biological aerated filter (BAF) systems [J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, **93**: 235-242.
- [8] 张为堂, 薛晓飞, 庞洪涛, 等. 碳氮比对 AAO-BAF 工艺运行性能的影响[J]. 化工学报, 2015, **66**(5): 1925-1930.
Zhang W T, Xu X F, Pang H T, et al. Effect of C/N on performance of AAO-BAF process[J]. CIESC Journal, 2015, **66**

- (5): 1925-1930.
- [9] 张勇, 王淑莹, 赵伟华, 等. 低温对中试 AAO-BAF 双污泥脱氮除磷系统的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 56-65.
Zhang Y, Wang S Y, Zhao W H, *et al.* Effect of low temperature on pilot-scale AAO-BAF two-sludge system [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 56-65.
- [10] 王建华, 陈永志, 彭永臻. 低碳氮比实际生活污水 A²/O-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 A²/O-BAF system at low temperature [J]. China Environmental Science, 2010, **30**(9): 1195-1200.
- [11] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed) [M]. Washington, DC: American Public Health Association, 2007.
- [12] 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 two sludge A²/O-BAF system [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1704-1712.
- [13] 金羽. 温度对 A²/O 系统的影响特征及脱氮除磷强化技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Jin Y. Effect of temperature on the performance of an A²/O process and enhancement of nitrogen and phosphorus removal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] Trapani D D, Mannina G, Torregrossa M, *et al.* Comparison between hybrid moving bed biofilm reactor and activated sludge system: a pilot plant experiment [J]. Water Science and Technology, 2010, **61**(4): 891-902.
- [15] 宋旭升, 毕学军, 吴涛. 悬浮填料强化活性污泥系统硝化功能的试验研究[J]. 工业水处理, 2011, **31**(4): 19-22.
Song X S, Bi X J, Wu T. Study on the nitrification function of enhancing the activated sludge system with suspended fillers [J]. Industrial Water Treatment, 2011, **31**(4): 19-22.
- [16] Winkler M, Coats E R, Brinkman C K. Advancing post-anoxic denitrification for biological nutrient removal [J]. Water Research, 2011, **45**(18): 6119-6130.
- [17] 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 A²/O-BAF system [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, **38**(4): 590-595.
- [18] Zhang W T, Peng Y Z, Ren N Q, *et al.* Improvement of nutrient removal by optimizing the volume ratio of anoxic to aerobic zone in AAO-BAF system [J]. Chemosphere, 2013, **93**(11): 2859-2863.
- [19] 陈永志, 彭永臻, 王建华. 内循环对 A²/O-曝气生物滤池工艺脱氮除磷特性影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 193-198.
Chen Y Z, Peng Y Z, Wang J H. Effect of internal recycle ratio on nitrogen and phosphorus removal characteristics in A²/O-BAF Process [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 193-198.
- [20] 彭永臻, 吕冬梅, 王淑莹. 进水 COD 及投加方式对 A²/O-BAF 工艺反硝化聚磷的影响[J]. 北京工业大学学报, 2016, **42**(9): 1406-1413.
Peng Y Z, Lv D M, Wang S Y. Effects of feed water COD and different adding ways of COD on denitrifying phosphorus removal of A²/O-BAF Process [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, **42**(9): 1406-1413.
- [21] 何理, 高大文. 基于反硝化聚磷菌的颗粒污泥的培养[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 383-389.
He L, Gao D W. Cultivate of granular sludge based on denitrifying phosphate accumulating bacteria [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(2): 383-389.
- [22] 陈永志. A²/O-BAF 系统深度脱氮除磷[D]. 北京: 北京工业大学, 2012. 13-14.
Chen Y Z. Enhance removal of nitrogen and phosphorus by A²/O-BAF system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. 13-14.
- [23] 鲍林林. 反硝化聚磷菌特性与反硝化除磷工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 73-76.
Bao L L. Study on the microbiological characteristics and processes of denitrifying phosphorus removal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. 73-76.
- [24] 吕冬梅, 彭永臻, 赵伟华, 等. A²/O-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.
Lv D M, Peng Y Z, Zhao W H, *et al.* Factors influencing the denitrifying phosphorus removal efficiency of A²/O-BAF process [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(11): 3266-3274.
- [25] 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.
- [26] 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.
Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y. Probability and mathematical statistics (3rd ed) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 96.
- [27] 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]. Mathematical Statistics and Management, 2004, **23**(3): 33-36.
- [28] 姚汝华, 周世水. 微生物工程工艺原理[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005. 149-152.
Yao R H, Zhou S S. Process principle of microbial engineering [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2005. 149-152.
- [29] 孙锦宜. 含氮废水处理技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
Sun J Y. Nitrogenous wastewater treatment technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [30] 李东, 赵世勋, 关宏伟, 等. 常温低氨氮 CANON 工艺稳定性研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 102-107.
Li D, Zhao S X, Guan H W, *et al.* Stable operation of CANON process at normal temperature and low ammonia concentration [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(1): 102-107.
- [31] Farabegoli G, Chiavola A, Rolle E. The biological aerated filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage. Optimization of plant performance [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **171**(1-3): 1126-1132.
- [32] Pujol R. Process improvements for upflow submerged biofilters [J]. Water Science and Technology, 2002, **32**(1): 25-29.

CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)