

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



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷

赵智超¹, 黄剑明¹, 李健¹, 张为堂², 张力航¹, 吴雪晴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. 北控水务(中国)投资有限公司, 北京 100124)

摘要: 采用连续流反应器处理生活污水, 保持厌氧段格室为3格, 将缺氧段格室从2格减少至0格, 好氧段格室由5格逐渐增加至7格, Run1 时对好氧段格室采用连续曝气, Run2 ~ Run4 时采用间歇曝气. 曝/停比分别为: 40 min/20 min、40 min/30 min、40 min/40 min, 硝化液回流比从150%逐渐减少至0%. Run4 时, 平均进水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 259.34、60.26、64.42、6.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别为 26.40、1.03、5.84、0.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 反应器对氮素的去除量从 Run1 时的 192.30 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$ 逐渐增加至 Run4 时的 244.00 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$, 相应地去除率从 65.40% 逐渐增大至 95.30%; 从 Run1 ~ Run4, 反硝化聚磷菌和聚磷菌的活性分别从 36.05% 和 38.20% 增大至 140.50% 和 133.40%; 通过间歇曝气在连续流反应器中实现了同步硝化反硝化除磷脱氮, 为污水处理厂提标改造提供参考.

关键词: 连续流反应器; 间歇曝气; 反硝化聚磷菌; 同步硝化反硝化除磷; 生活污水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0799-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201807093

Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration

ZHAO Zhi-chao¹, HUANG Jian-ming¹, LI Jian¹, ZHANG Wei-tang², ZHANG Li-hang¹, WU Xue-qing¹, CHEN Yong-zhi^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Beijing Enterprises Water Group (China) Investment Limited, Beijing 100124, China)

Abstract: A continuous flow reactor (TCFR) with 10 compartments was used to treat domestic sewage. The anaerobic compartments of TCFR were kept at 3. The anoxic compartments of TCFR were reduced from 2 to 0. Therefore, the aerobic compartments of TCFR were increased gradually from 5 to 7. The aerobic compartments were set to continual aeration in Run1 and intermittent aeration from Run2 to Run4. The aeration/non-aeration ratios were 40 min/20 min, 40 min/30 min, and 40 min/40 min, respectively. The nitrification liquid reflux ratios were reduced gradually from 150% to 0%. When the average influent concentrations of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were 259.34, 60.26, 64.42, and 6.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, the corresponding effluent concentrations were 26.40, 1.03, 5.84, and 0.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively in Run4. The nitrogen removal amounts increased gradually from 192.30 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$ in Run1 to 244.00 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$ in Run4, and the corresponding removal rates increased from 65.40% to 95.30%. The activity of denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs) and phosphorus accumulating organisms (PAOs) increased from 36.05% and 38.20% in Run1 to 140.50% and 133.40% in Run4, respectively. Simultaneous nitrification and denitrifying phosphorus removal was achieved in TCFR by adopting intermittent aeration, which provided a reference for the reformation of sewage treatment plants.

Key words: continuous flow reactor; intermittent aeration; denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs); simultaneous nitrification and denitrifying phosphorus removal; domestic sewage

AAO 工艺是我国城市污水处理厂主体工艺^[1], 该工艺具有运行经验成熟、适用范围广、以及水力停留时间较短等优点, 但从实际运行情况看, 由于回流污泥将一部分硝态氮和溶解氧带入厌氧段, 抑制聚磷菌厌氧释磷, 使得除磷效果不稳定^[2~5]; UCT 工艺通过改变 AAO 工艺的污泥回流机制, 将污泥回流到缺氧段而非厌氧段, 污泥中的硝酸盐在缺氧段反硝化脱氮后部分回流至厌氧段, 减少了硝酸盐在厌氧段对释磷的不利影响, 但是增加了能耗和运行费用^[6~8].

同步硝化反硝化除磷工艺是指在硝化菌和反硝化聚磷菌作用下, 在同一反应器中同时完成硝化、反硝化和除磷. 该工艺不仅减少反应池体积, 而且实现了“一碳两用”, 节约碳源, 减少污泥产量^[9].

林金銮等^[10]通过在厌氧/好氧 SBR 中控制较低的溶解氧浓度实现了同步硝化反硝化除磷. 阳素攀等^[11]采用厌氧/好氧和厌氧/缺氧/好氧两种运行模式, 在单一反应器中实现了硝化菌和反硝化聚磷菌的共存. 方茜等^[12]采用模拟废水和厌氧/间歇曝气模式, 成功实现了同步硝化反硝化除磷. 但是以上研究均采用 SBR 反应器, 对于在连续流反应器中实现同步硝化反硝化除磷还鲜见报道. 本文将间歇曝气应用于传统 AAO 工艺中, 通过逐渐取消硝化液

收稿日期: 2018-07-13; 修订日期: 2018-08-14

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-环境工程(101004); 兰州交通大学大学生创新实验项目(2018110)

作者简介: 赵智超(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: 1606944231@qq.com

* 通信作者, E-mail: 476411589@qq.com

回流和缺氧段,实现了同步硝化反硝化除磷,同时考察了该过程中污染物去除特性,并采用物料衡算方法分析了无机氮去除途径以及反硝化聚磷菌和聚磷菌活性,以期在传统脱氮除磷工艺升级改造提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验装置如图 1 所示. 反应器材质均为有机玻璃, AAO 的有效容积 60 L, 共分 10 格室, 依次设置厌氧段、缺氧段和好氧段, 初始体积比为 3:2:5;

生活污水经蠕动泵进入 AAO 厌氧段, 同时进入厌氧段的还有从沉淀池回流的污泥, 聚磷菌在此完成厌氧释磷及 COD 的部分去除; 厌氧段泥水混合液进入缺氧段, 同时进入缺氧段的还有好氧段回流的硝化液, 在此进行异养脱氮和反硝化除磷; 混合液接着进入好氧段完成硝化作用和同步硝化反硝化聚磷脱氮, 最后进入沉淀池完成泥水分离. 好氧段设有曝气头, 采用鼓风曝气, 转子流量计调节流量, 二沉池采用竖流式, 有效容积为 28 L, 系统进水量、污泥回流量、硝化液回流量采用蠕动泵控制, 曝/停比采用定时器控制.

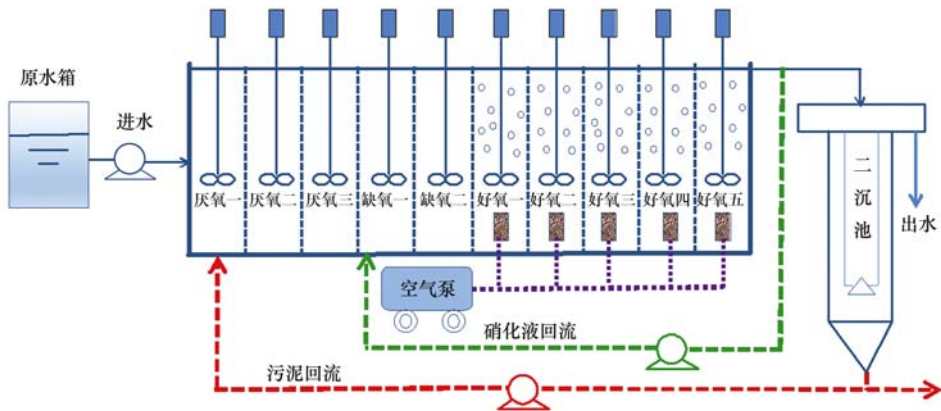


图 1 连续流反应器装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of the continuous flow reactor

本实验用水温度为 20 ~ 27℃, 污泥龄控制在 12 d 左右, 污泥回流比 100%, MLSS 为 3 000 ~ 3 500 mg·L⁻¹.

1.2 实验用水及检测方法

实验用水采用兰州交通大学生活区污水, 具体水质见表 1.

表 1 实验用水水质/mg·L ⁻¹		
Table 1 Quality of raw wastewater/mg·L ⁻¹		
项目	范围	均值
COD	130.33 ~ 388.36	269.34
NH ₄ ⁺ -N	44.53 ~ 82.70	63.61
NO ₂ ⁻ -N	0.00 ~ 0.93	0.22
NO ₃ ⁻ -N	0.17 ~ 1.14	0.59
PO ₄ ³⁻ -P	2.90 ~ 9.30	6.10
TN	44.75 ~ 83.84	64.42

COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P、TN 根据国家标准方法^[13]测定. MLSS、MLVSS 采用滤纸重量法测定. DO 和温度由德国 Multi-3420 测定仪测定.

1.3 实验方案

各工况下实验运行参数见表 2.

1.4 无机氮去除物料衡算方法

图 2 为反应器中无机氮去除物料衡算. 无机氮等于 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 三者之和, 由于反应器内 NO₂⁻-N 浓度小于 0.50 mg·L⁻¹, 且变化很小, 因此忽略不计. 为研究不同工况下反应器对无机氮的总去除量, 以及各功能段对应的无机氮去除量, 采用物料衡算方法分析了无机氮的去除途径. 无机氮在厌氧段被去除主要是通过异养反硝化作用, 在缺氧段通过反硝化聚磷作用和异养反硝化作用, 在好氧段通过同步硝化反硝化聚磷作用.

表 2 实验运行方案
Table 2 Experimental operation scheme

工况	运行时间/d	V _{厌氧} : V _{缺氧} : V _{好氧}	曝/停比/min	曝气方式	硝化液回流比/%	HRT/h
Run1	0 ~ 20	3:2:5	-	连续曝气	150	10
Run2	21 ~ 36	3:1:6	40/20	间歇曝气	100	10
Run3	37 ~ 51	3:1:6	40/30	间歇曝气	50	15
Run4	52 ~ 66	3:0:7	40/40	间歇曝气	0	15

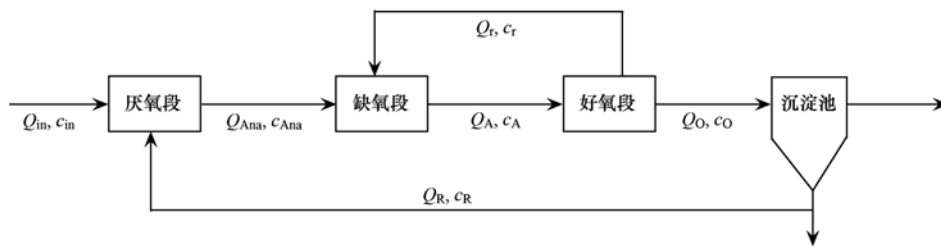


图2 反应器内无机氮物料衡算

Fig. 2 Schematic diagram of the balance analysis of inorganic nitrogen in the reactor

厌氧段去除的无机氮:

$$M_{Ana} = \left(\frac{Q_{in} c_{in} (\text{NO}_3^- - \text{N}) + Q_R c_R (\text{NO}_3^- - \text{N})}{Q_{in} + Q_R} - c_{Ana} (\text{NO}_3^- - \text{N}) \right) Q_{Ana} \quad (1)$$

缺氧段去除的无机氮:

$$M_A = \left(\frac{Q_{Ana} c_{Ana} (\text{NO}_3^- - \text{N}) + Q_r c_r (\text{NO}_3^- - \text{N})}{Q_{Ana} + Q_r} - c_A (\text{NO}_3^- - \text{N}) \right) Q_A \quad (2)$$

好氧段去除的无机氮:

$$M_O = [c_A (\text{NO}_3^- - \text{N}) - c'_O (\text{NO}_3^- - \text{N}) - c_O (\text{NO}_3^- - \text{N})] Q_O \quad (3)$$

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被氧化后生成的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$:

$$c'_O (\text{NO}_3^- - \text{N}) = [c_A (\text{NH}_4^+ - \text{N}) - c_O (\text{NH}_4^+ - \text{N})] f_1 \quad (4)$$

式中, Q_{in} 为进水流量, Q_{Ana} 、 Q_A 和 Q_O 分别为厌氧段、缺氧段和好氧段出水流量, Q_r 为硝化液回流量, Q_R 为污泥回流量, 单位均为 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$; $c_{in} (\text{NO}_3^- - \text{N})$ 、 $c_{Ana} (\text{NO}_3^- - \text{N})$ 、 $c_A (\text{NO}_3^- - \text{N})$ 、 $c_O (\text{NO}_3^- - \text{N})$ 、 $c_R (\text{NO}_3^- - \text{N})$ 和 $c_r (\text{NO}_3^- - \text{N})$ 分别为进水、厌氧段出水、缺氧段出水、好氧段出水、回流污泥和回流硝化液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度, 单位均为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $c_A (\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 和 $c_O (\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 分别为缺氧段和好氧段出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, 单位均为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; f_1 为每氧化 1 $\text{mg} \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 生成的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 根据反应器实际情况, $f_1 = 1.00$.

1.5 聚磷菌(PAOs)和反硝化聚磷菌(DPAOs)活性计算

PAOs 和 DPAOs 的活性分别用以下公式计算:

$$\eta_{\text{PAOs活性}} = \frac{\text{PUR}_{On}}{\text{PUR}_{OM}} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{DPAOs活性}} = \frac{\text{PUR}_{ann}}{\text{PUR}_{anM}} \quad (6)$$

式中, PUR_{On} 和 PUR_{ann} 分别为第 n 时的总吸磷速率和反硝化聚磷速率, PUR_{OM} 和 PUR_{anM} 分别为整个试验阶段的总吸磷速率平均值和反硝化聚磷速率平均

值, 均以 $\text{PO}_4^{3-} / \text{VSS}$ 计, $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.

$$\text{PUR}_O = \frac{\Delta \text{PO}_4^{3-} \text{总}}{\text{MLSS} \times \text{HRT}_{\text{缺+好}}} \quad (7)$$

$$\text{PUR}_{an} = \frac{\Delta \text{PO}_4^{3-} \text{缺} + \Delta \text{PO}_4^{3-} \text{同}}{\text{MLSS} \times \text{HRT}_{\text{缺+好}}} \quad (8)$$

$$\Delta \text{PO}_4^{3-} \text{缺} = c_{Ana} (\text{PO}_4^{3-}) \frac{Q_{Ana}}{Q_{Ana} + Q_r} - c_A (\text{PO}_4^{3-}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{PO}_4^{3-} \text{同} &= \Delta \text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{同}} \times f_2 \\ &= [c_A (\text{NH}_4^+ - \text{N}) - c_O (\text{NH}_4^+ - \text{N})] f_1 + \\ &\quad c_A (\text{NO}_3^- - \text{N}) - c_O (\text{NO}_3^- - \text{N}) \quad (10) \end{aligned}$$

$$\Delta \text{PO}_4^{3-} \text{总} = \frac{Q_{Ana}}{Q_{Ana} + Q_r} c_{Ana} (\text{PO}_4^{3-}) - c_O (\text{PO}_4^{3-}) \quad (11)$$

式中, $\Delta \text{PO}_4^{3-} \text{缺}$ 为缺氧段吸磷量, $\Delta \text{PO}_4^{3-} \text{同}$ 为好氧段同步硝化反硝化吸磷量, $\Delta \text{PO}_4^{3-} \text{总}$ 为缺氧段和好氧段吸磷量之和, 单位均为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; MLSS 为反应器内污泥浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{HRT}_{\text{缺+好}}$ 为反应器缺氧段和好氧段水力停留时间之和, h; $c_{Ana} (\text{PO}_4^{3-})$ 、 $c_A (\text{PO}_4^{3-})$ 和 $c_O (\text{PO}_4^{3-})$ 分别为厌氧段、缺氧段和好氧段出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度, 单位均为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\Delta \text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{同}}$ 为好氧段同步硝化反硝化聚磷作用脱氮量, 间歇曝气时好氧段 COD 浓度几乎无变化, 因此异养反硝化脱氮量不计. f_2 为反硝化聚磷过程中的 $\Delta \text{PO}_4^{3-} / \Delta \text{NO}_3^-$, 其值为 0.80 ~ 1.40. 其它参数见 1.4 节.

2 结果与讨论

2.1 启动过程中反应器对污染物的去除特性

在整个实验过程中, 系统平均进水 COD 浓度为 $269.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 COD 浓度低于 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 3(a)]. 这是因为生活污水中的 COD 大部分为易降解有机物, 很容易得到去除. 系统平均进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $63.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均低于 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率均高于 95.00%. 系统平均进水 TN 浓度为 $63.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Run1 时出水 TN 浓度为 $14.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Run2 ~ Run4, 出水 TN 浓度低于 $6.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去

除率高于 90.00% [图 3(b)]. 这是因为 Run1 时采用连续曝气, 好氧段无同步硝化反硝化作用, 因此出水 TN 较高; 而 Run2 ~ Run4 采用间歇曝气, 创造了好氧/缺氧交替环境, 有利于硝化菌的增殖, 为同步硝化反硝化聚磷提供有利条件, 所

以出水 TN 较低^[14, 15]; 系统平均进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为 $6.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水平均 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均不大于 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率均大于 86.00% [图 3(c)]. 可见, 不管采用连续曝气还是间歇曝气, 均取得较好的除磷效果.

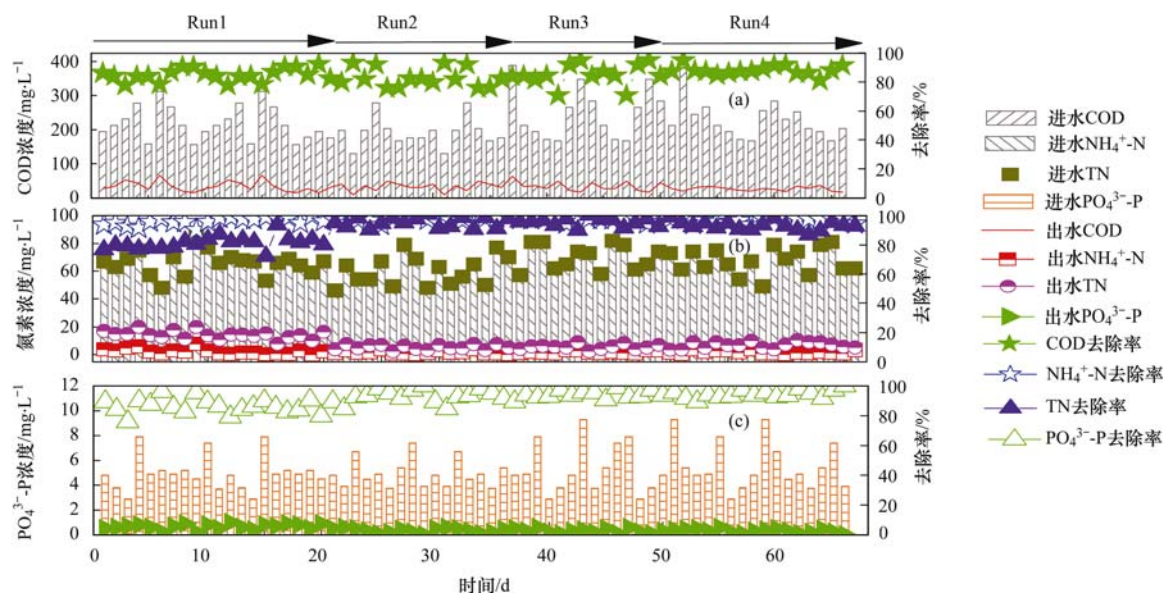


图3 不同工况下系统对污染物的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of pollutants by the system under different operating conditions

2.2 不同工况下污染物的沿程变化

在整个实验过程中, 平均进水 COD 浓度为 $259.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 COD 浓度均小于 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4). 分析认为: 聚磷菌在厌氧段释磷均需要消耗 COD^[16], 同时, 由于 Run1 是按传统 AAO 运行, 其回流污泥中携带的硝态氮导致厌氧段存在异养反硝化作用去除了部分 COD^[17]; COD 在缺氧段减少是反硝化菌利用有机物完成异养脱氮作用; COD 在好氧段的降低主要是被好氧异养菌用于自身生长和繁殖. Run2 和 Run3 是在间歇曝气模式下运行的, 缺氧段出水 COD 浓度基本接近最终出水浓度; Run4 在无硝化液回流条件下运行, 厌氧段出水 COD 浓度基本接近出水 COD 浓度.

4 种工况下, 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在 $65.00 \sim 75.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 在厌氧段由于回流污泥的稀释作用使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均降低. 通过好氧段的氧化作用, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均在 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下. $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 沿程浓度均低于 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4). Run1 时, 由于连续曝气, 系统中同步硝化反硝化聚磷作用较弱, 导致出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度高达 $14.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从 Run2 至 Run4, 由于间歇曝气, 系统中同步硝化反硝化聚磷作用较强, 出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均低于 $5.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 回流污泥仅携带少量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 厌氧段硝氮浓度几乎没有增加. 拟合硝氮曲线是根据 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被氧化后理

论上生成的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度绘制的曲线, 计算方法参考 1.4 节中的式 (4), 其与实际硝氮曲线的差值近似为同步硝化反硝化聚磷作用的脱氮量.

4 种工况下, 由于聚磷菌的厌氧释磷作用导致 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在厌氧段大量增加, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在厌氧结束时分别达到 9.12、19.81、23.84 和 23.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 释磷量逐渐增加. Run1 至 Run3 回流的硝化液为其缺氧段提供电子受体, 实现了反硝化除磷; 4 种工况下 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在好氧段分别降低了 1.00、12.14、19.84 和 22.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其出水浓度均不大于 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到一级 A 标准.

从 Run1 ~ Run4, 随着硝化液回流从 150% 逐渐降低至 0%, 进入好氧段的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负荷不断增加, 但是出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度仍然小于 $2.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在好氧段分别减少了 13.5、14.88、24.10 和 30.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这是因为 HRT 从 Run1 和 Run2 时的 10h 增加至 Run3 和 Run4 时的 15h; Run1 采用连续曝气, 其好氧段仅存在硝化作用, 几乎没有同步硝化反硝化聚磷作用; 而 Run2 ~ Run4 时, 由于间歇曝气使其好氧段存在同步硝化反硝化聚磷作用, 导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在好氧段不断减少, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别仅增加了 3.40、3.76 和 4.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 同时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在大幅下降; 因为异养反硝化菌几乎没有可利用的碳源, 且反硝化菌利用

内碳源的速率又远低于反硝化聚磷菌的速率^[18], 所以 NO_3^- -N 主要通过同步硝化反硝化聚磷作用去除。

间歇曝气创造出好氧/缺氧交替环境, 曝气时, 硝化菌将 NH_4^+ -N 氧化成 NO_3^- -N; 停曝时, 反硝化聚磷菌以 NO_3^- -N 为电子受体吸收污水中的 PO_4^{3-} -P, 实现同步硝化反硝化除磷; 聚磷菌厌氧释磷量越大, 合成的 PHB 越多, 为同步硝化反硝化聚磷提供足

够的碳源驱动力^[11]。方茜等^[12]采用厌氧/好氧 SBR 处理模拟生活污水, 在间歇曝气模式下对污泥进行驯化, 成功实现了同步硝化反硝化除磷(SNDPR)。阳素攀^[19]发现吸收 1.00 mg PO_4^{3-} -P 同时反硝化脱氮量为 0.79 mg, 而本实验中吸收 1.00 mg PO_4^{3-} -P 同时反硝化脱氮量为 1.40 mg, 这可能是因为在外界条件变化时反硝化聚磷菌同时去除氮磷的比例并非定值^[20]。

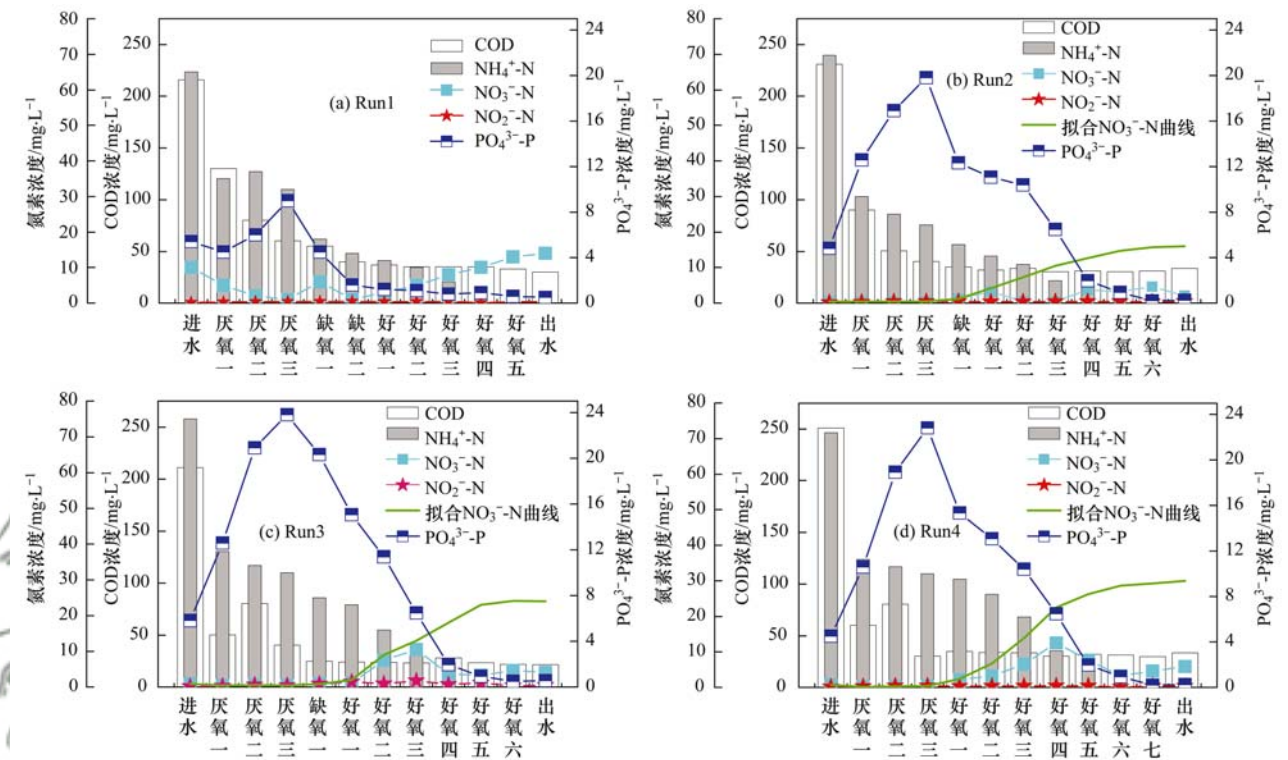


图 4 不同工况时污染物浓度历程变化

Fig. 4 Concentrations of pollutants in different stages under different operating conditions

2.3 不同工况下无机氮去除途径物料衡算

在 4 种工况下, 无机氮去除途径物料衡算见表 3。当系统由连续曝气转变为间歇曝气的过程中, 随着曝/停比的减少, 好氧段对无机氮的去除量由 Run1 时的 10.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 持续增加至 Run4 时的 240.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而厌氧段和缺氧段对无机氮的去除量均随着曝/停比减少而降低。分析原因: ①当

采用间歇曝气后, 好氧段处于好氧/缺氧交替状态, 硝化和反硝化同步进行, 因此无机氮去除量增加。②当缺氧格数从 Run1 的 2 减少至 Run4 的 0 时, 导致缺氧段 HRT 减少, 其无机氮去除量减少。③随着曝/停比减少, 回流污泥中携带的硝氮量减少, 厌氧段去除的无机氮也随之降低。④当 HRT 延长, 无机氮总去除量和去除率也增加。

表 3 无机氮去除物料衡算/ $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$

Table 3 Material balance of inorganic nitrogen removal/ $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$						
工况	进水氮素量	厌氧段去除量	缺氧段去除量	好氧段去除量	总去除量	总去除率/%
Run1	294.00	60.00	121.80	10.50	192.30	65.40
Run2	306.00	9.00	18.80	180.00	207.80	67.60
Run3	250.00	6.00	4.20	200.00	210.20	84.00
Run4	256.00	4.00	0.00	240.00	244.00	95.30

2.4 PAOs 和 DPAOs 活性变化

PAOs 和 DPAOs 的活性、 PUR_0 以及 PUR_{an} 均随着间歇曝/停比的减小而增加 (见图 5)。在 Run1

时, PAOs 和 DPAOs 的活性分别为 38.20% 和 36.05%, PUR_0 和 PUR_{an} 仅为 0.19 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 0.17 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 这是因为反应器在连续曝气模

式下运行,对 PAOs 和 DPAOs 厌氧释磷不利,两者活性均受抑制;Run2 时,PAOs 和 DPAOs 的活性分别为 105.27% 和 105.12%,增加幅度分别高达 67.07% 和 69.07%。分析原因,反应器由连续曝气改为间歇曝气时,好氧段发生的同步硝化反硝化聚磷作用显著降低了回流污泥中的硝氮和氧气浓度,为 PAOs 和 DPAOs 厌氧释磷提供有利条件,使其能够优势生长。从 Run2 至 Run4 时,PAOs 和 DPAOs 的活性

继续增加,但增加幅度分别为 28.13% 和 35.41%,Run4 时 PUR_o 和 PUR_{an} 分别达到 $0.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.65 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,这是因为一方面停曝时间越长,缺氧时间越长,越利于 DPAOs 的优势生长^[21];另一方面,硝化液回流比减少,进入好氧段的氨氮浓度提高,使得 DPAOs 有较多的硝氮作为电子受体;PAOs 活性呈现出与 DPAOs 相似的增长趋势,说明聚磷菌中反硝化聚磷菌的比例较大^[22,23]。

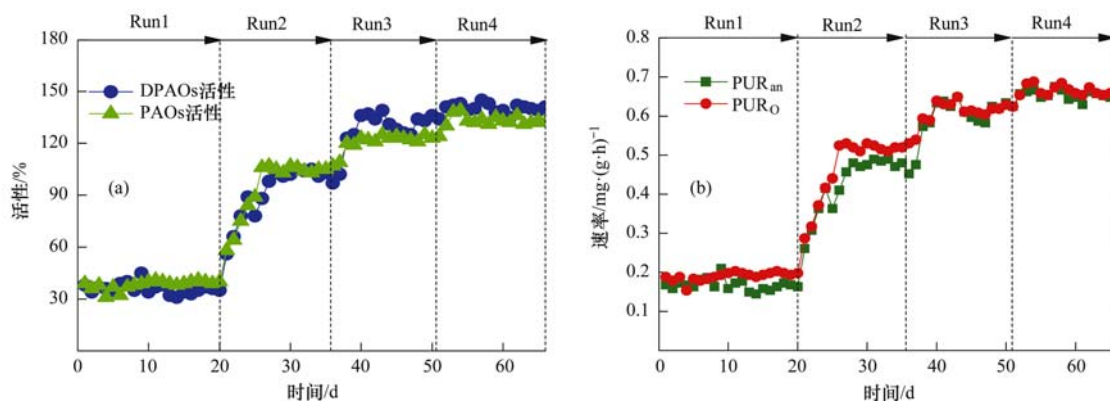


图5 各工况下的 PAOs 和 DPAOs 活性以及 PUR_{an} 和 PUR_o

Fig. 5 Activity of PAOs and DPAOs, PUR_{an} and PUR_o under different operational conditions

2.5 不同工况下典型周期内出水污染物浓度变化

不同工况下典型周期内出水污染物浓度变化见图 6。Run1 时,出水 COD、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度相对恒定,其平均值分别为 36.16 、 1.05 、 0.35 、 13.26 和 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;从 Run2 ~ Run4,在曝气阶段,出水 NH_4^+-N 浓度降低,出水 NO_3^--N 浓度升高;在停曝阶段,出水 NH_4^+-N 浓度升高,出水 NO_3^--N 浓度降低;其中 Run2 时出水

NH_4^+-N 浓度在曝气时从 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,又在停曝后升高至 $1.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;出水 NO_3^--N 浓度在曝气时从 $4.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $4.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,又在停曝后降低至 $3.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。且随着曝/停比减少,出水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度的波动幅度不断增加,但出水 TN 均低于 $10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;方茜等^[24]的研究发现,随着停曝时间增加,硝化和反硝化不易平衡,导致出水氮素浓度波动较大;而出

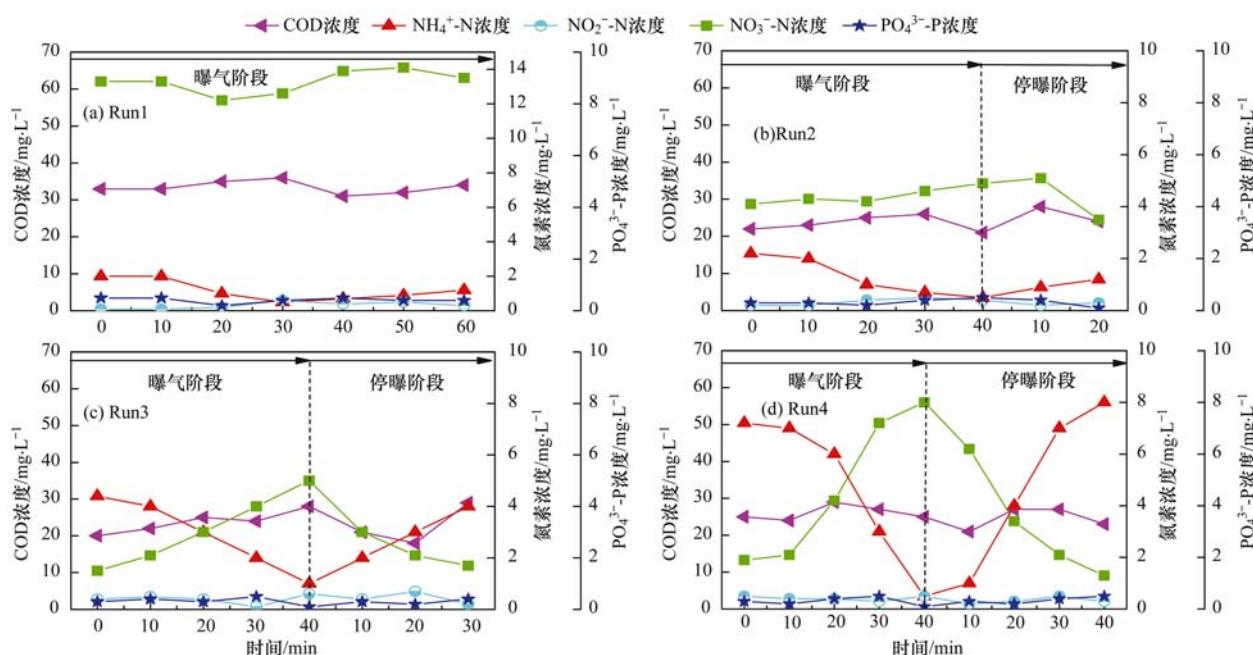


图6 不同工况下典型周期内出水污染物浓度变化

Fig. 6 Variation of effluent pollutant concentrations in a typical cycle under different operating conditions

水 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化不大, 分析认为, COD 基本在厌氧段被 PAOs 和 DPAOs 用于释磷过程, 而聚磷菌在好氧和缺氧状态下均可以吸收水中磷酸盐^[25,26]; Run2 ~ Run4 的平均出水 COD、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别低于 25.00、5.00 和 0.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 优于 Run1 时; 相比 Run4, Run2 和 Run3 的出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度更加稳定; 从 Run1 ~ Run4, 硝化液回流比是逐渐降低的; 从出水水质和节能降耗的角度, Run3 较优。

2.6 不同工况下典型周期内好氧段溶解氧浓度变化

不同工况下好氧段典型周期内溶解氧浓度的变

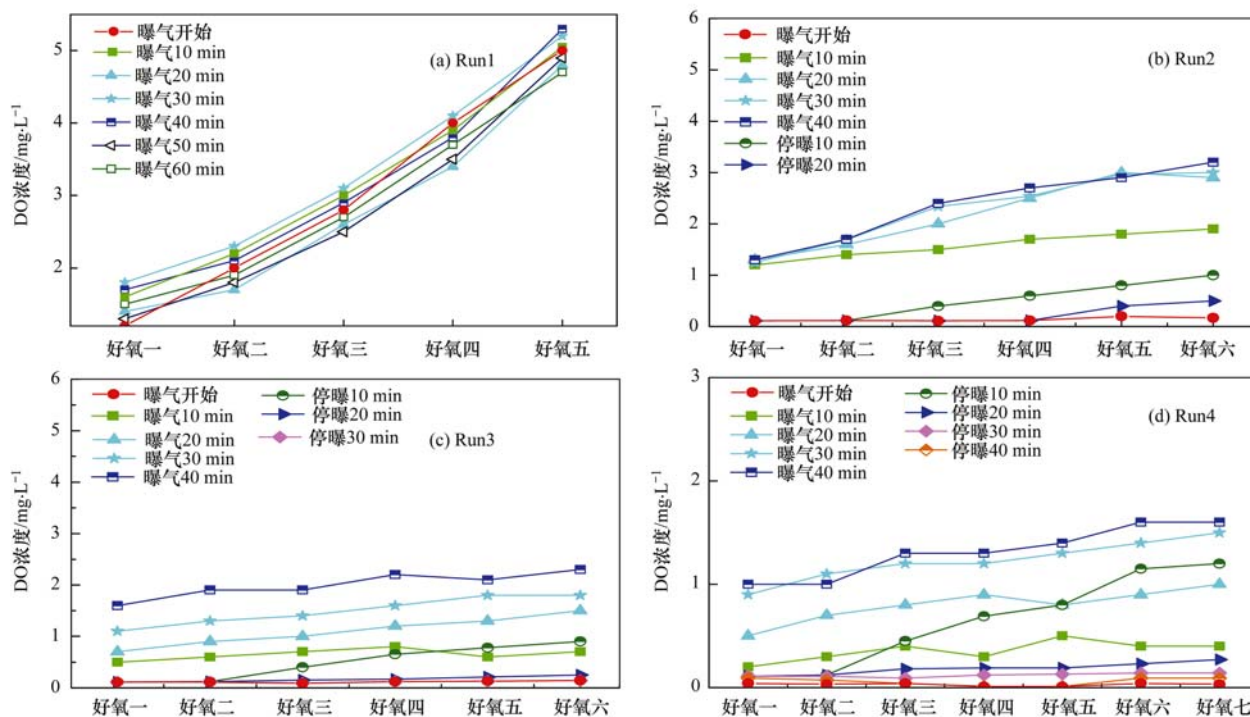


图7 不同工况下典型周期内好氧段溶解氧浓度变化

Fig. 7 Variations of dissolved oxygen concentrations in the aerobic section of a typical cycle under different operating conditions

3 结论

(1) 间歇曝气连续流反应器省去了传统 AAO 的硝化液回流和缺氧段, 当进水 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 259.34、60.26、64.42 和 6.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 在曝/停比为 40 min/40 min (Run4) 时, 其出水浓度分别为 26.40、1.03、5.84 和 0.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水水质达到一级 A 标准。

(2) 间歇曝气有利于同步硝化反硝化除磷, 使回流污泥中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和溶解氧浓度均较低, 为厌氧段聚磷菌充分释磷创造条件, 为其在好氧和缺氧条件下的吸磷提供了充足的碳源驱动力; 好氧段将 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的硝化与反硝化聚磷有机结合, 完成同步脱氮除磷。从 Run2 至 Run4, 好氧格室最大溶解氧浓

化见图 7。Run1 为连续曝气, 其溶解氧浓度从好氧一至好氧五不断增加, 好氧五溶解氧浓度为 5.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Run2 ~ Run4 为间歇曝气, 在曝气阶段, 溶解氧浓度随好氧格室数增加而提高, 但比连续曝气模式增加幅度较小, 而且最大溶解氧浓度逐渐降低, 分别为 3.20、2.30 和 1.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 使得好氧吸磷反应不断减弱^[27,28]; 在停曝期间, Run2 ~ Run4 好氧格室内溶解氧浓度均不断降低, 其中 Run4 中全部好氧格室内溶解氧浓度在停曝 20 min 内能迅速降低至 0.30 ~ 0.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 该工况下停曝时间最长, 因此缺氧状态保持时间较长, 为反硝化聚磷创造有利条件。

度分别为 3.20、2.30 和 1.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度均小于 5.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 在厌氧段, 释磷量均在 20.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。在好氧段, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度分别减少了 14.88、24.10 和 30.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别降低了 12.14、19.84 和 22.61 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度分别仅增加了 3.40、3.76 和 4.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(3) 间歇曝气有利于反硝化聚磷菌和聚磷菌的优势生长, 使二者的活性从连续曝气 (Run1) 时的 36.05% 和 38.20% 分别增大至曝/停比为 40 min/40 min (Run4) 的 140.50%、133.40%。当曝/停比减少时, 厌氧段和缺氧段去除的无机氮减少, 而好氧段去除的无机氮提高, 系统对无机氮的总去除量增加。

(4) 间歇曝气连续流反应器在单周期内出水 COD 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度保持稳定, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度出现周期性浮动, 但出水 TN 浓度均小于 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

参考文献:

- [1] 丁晓倩, 赵剑强, 陈钰, 等. 传统和氧化沟型 A^2/O 工艺脱氮除磷性能对比[J]. 环境工程学报, 2018, **12**(5): 1480-1489.
Ding X Q, Zhao J Q, Chen Y, *et al.* Comparison of nitrogen and phosphorus removal performances for traditional and modified A^2/O process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, **12**(5): 1480-1489.
- [2] 郭玉梅, 吴毅辉, 郭昉, 等. 某污水厂 A^2O 和倒置 A^2O 工艺脱氮除磷性能分析[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(5): 2185-2190.
Guo Y M, Wu Y H, Guo F, *et al.* Analysis of nitrogen and phosphorus removal in A^2O and inverted A^2O processes in a wastewater treatment plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(5): 2185-2190.
- [3] 赵卫兵, 陈天虎, 张强, 等. 溶解氧对 Biolac 型 A^2O 工艺脱氮除磷性能的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(11): 2754-2758.
Zhao W B, Chen T F, Zhang Q, *et al.* Effect of dissolved oxygen on removal of nitrogen and phosphorus in Biolac/ A^2O process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(11): 2754-2758.
- [4] 王伟, 彭永臻, 殷芳芳, 等. 改进分段进水 A/O 生物脱氮工艺强化生物除磷[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2968-2974.
Wang W, Peng Y Z, Yin F F, *et al.* Modified Step-feed A/O biological nitrogen removal process for enhanced phosphorus removal[J]. Environmental Science, 2009, **30**(10): 2968-2974.
- [5] 李瞳, 郝瑞霞, 刘峰, 等. $\text{A}/\text{A}/\text{O}$ 工艺脱氮除磷运行效果分析[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(8): 1729-1734.
Li T, Hao R X, Liu F, *et al.* Analysis on running effect for biological nitrogen and phosphorus removal of $\text{A}/\text{A}/\text{O}$ technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(8): 1729-1734.
- [6] 乔宏儒, 孙力平, 吴振华, 等. 倒置 A^2/O 工艺和 UCT 工艺脱氮除磷效能比较[J]. 水处理技术, 2015, **41**(12): 118-121.
Qiao H R, Sun L P, Wu Z H, *et al.* The comparison of nitrogen and phosphorus removal between inverted A^2/O process and UCT process[J]. Technology of Water Treatment, 2015, **41**(12): 118-121.
- [7] 王慰, 王淑莹, 张琼, 等. 后置缺氧 UCT 分段进水工艺处理低 C/N 城市污水[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 1997-2005.
Wang W, Wang S Y, Zhang Q, *et al.* Post-anoxic UCT step-feed process in treating municipal wastewater with low C/N ratios[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 1997-2005.
- [8] 沈连峰, 胡宗泰, 王婷, 等. 两种脱氮除磷污水处理工艺的效果分析[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(12): 99-101.
Shen L F, Hu Z T, Wang T, *et al.* Efficiency analysis of two sewage treatment processes for nitrogen and phosphorus removal[J]. China Water & Wastewater, 2011, **27**(12): 99-101.
- [9] 余鸿婷, 李敏. 反硝化聚磷菌的脱氮除磷机制及其在废水处理中的应用[J]. 微生物学报, 2015, **55**(3): 264-272.
Yu H T, Li M. Denitrifying and phosphorus accumulating mechanisms of denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs) for wastewater treatment-a review[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2015, **55**(3): 264-272.
- [10] 林金奎, 张可方, 方茜, 等. 碳源浓度对同步硝化反硝化协同除磷影响研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(9): 5-8.
Lin J L, Zhang K F, Fang Q, *et al.* Effect of carbon concentration on simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in SBR[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(9): 5-8.
- [11] 阳素攀, 方茜, 林曼婷, 等. 同时硝化/反硝化除磷工艺的脱氮除磷效能[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(6): 106-109.
Yang S P, Fang Q, Lin M T, *et al.* Performance of simultaneous nitrification/denitrifying phosphorus removal process[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(6): 106-109.
- [12] 方茜, 张朝升, 杜馨, 等. 同时硝化/反硝化除磷过程的控制策略研究[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(11): 59-62.
Fang Q, Zhang C S, Du X, *et al.* Control strategy for simultaneous nitrification/denitrifying phosphorus removal process[J]. China Water & Wastewater, 2009, **25**(11): 59-62.
- [13] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.) [M]. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- [14] Fan J L, Zhang J, Guo W S, *et al.* Enhanced long-term organics and nitrogen removal and associated microbial community in intermittently aerated subsurface flow constructed wetlands[J]. Bioresource Technology, 2016, **214**: 871-875.
- [15] Pan J, Fei H X, Song S Y, *et al.* Effects of intermittent aeration on pollutants removal in subsurface wastewater infiltration system[J]. Bioresource Technology, 2015, **191**: 327-331.
- [16] 张玲, 彭党聪, 常蝶. 温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2429-2434.
Zhang L, Peng D C, Chang D. Effect of temperature on PAO activity and substrate competition[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2429-2434.
- [17] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. 内循环对 A^2/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, *et al.* Effect of internal recycle ratio on nitrogen and phosphorus removal characteristics in A^2/O -BAF process[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 193-198.
- [18] 罗亚红, 李冬, 鲍林林, 等. 长泥龄改良 A^2/O 工艺的短程硝化反硝化除磷[J]. 化工学报, 2014, **65**(12): 4985-4996.
Luo Y H, Li D, Bao L L, *et al.* Shortcut nitrification and denitrifying phosphorus removal in improved A^2/O technique with long SRT[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(12): 4985-4996.
- [19] 阳素攀. 同时硝化/反硝化除磷系统处理低碳城市污水的过程控制及机理研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
- [20] 黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 等. 低温下 A^2/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 of A^2/O -BAF at low temperature[J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4621-4627.
- [21] 刘立, 汤兵, 黄绍松, 等. 反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2869-2875.
Liu L, Tang B, Huang S S, *et al.* Rapid enrichment and cultivation of denitrifying phosphate-removal bacteria and its identification by fluorescence *in situ* hybridization technology[J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2869-2875.
- [22] 樊晓梅. 反硝化聚磷菌吸磷能力和生长特性研究[J]. 沈阳

- 建筑大学学报(自然科学版), 2017, **33**(1): 119-126.
- Fan X M. Research on the phosphorus absorption ability and growth characteristics of denitrifying phosphorus-accumulating organisms[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, **33**(1): 119-126.
- [23] 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 J, 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.
- [24] 方茜, 张朝升, 杜馨. 间歇曝气模式对同步硝化反硝化稳定性的影响[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(7): 1411-1418.
- Fang Q, Zhang C S, Du X. Influence of intermittent aeration on the stability of simultaneous nitrification and denitrification[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(7): 1411-1418.
- [25] 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.
- [26] 范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 等. 温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 2012-2020.
- Fan J H, Hao R X, Zhu X X, *et al.* Effects of temperature on the characteristics of nitrogen and phosphorus removal and microbial community in SCSC-S/Fe[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 2012-2020.
- [27] 肖剑波, 卢培利, 曾善文, 等. 基于氧利用速率表征好氧吸磷过程特性[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(10): 5479-5484.
- Xiao J B, Lu P L, Zeng S W, *et al.* Characteristic of aerobic phosphorus uptake process based on OUR[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(10): 5479-5484.
- [28] 马娟, 宋璐, 俞小军, 等. 超低溶解氧条件下的 EBPR 系统除磷性能[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 3128-3134.
- Ma J, Song L, Yu X J, *et al.* Phosphorus removal performance in EBPR system under extra-low dissolved oxygen condition[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 3128-3134.



CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Heath Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)