

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)	

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行

韦佳敏^{1,2}, 蒋志云^{1,2}, 程诚^{1,2}, 朱琳^{1,2}, 刘文如^{1,2,3}, 沈耀良^{1,2,3*}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 以低 C/N 值生活污水为处理对象, 重点考察了以厌氧/缺氧(A/A)运行的 ABR 耦合好氧 MBR 系统启动过程中脱氮除磷特性及系统长期运行的稳定性。结果表明, 控制 ABR 容积负荷(VLR)为 $0.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 污泥回流比为 80%, 硝化液回流比从 150% 逐步提升稳定至 300%, 反硝化除磷功能区污泥停留时间(sludge retention time, SRT)为 25 d, MBR 溶解氧(DO)为 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度为 $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 于 46 d 成功富集了反硝化聚磷菌(denitrifying phosphorus bacteria, DPBs), 净释磷量为 $20.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 净吸磷量达到 $27.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 批次实验表明约 84.8% 的聚磷菌(PAOs)能够利用 NO_3^- -N 作为电子受体进行反硝化除磷。启动成功后稳定运行 50 d, 对 COD、 NH_4^+ -N、TN 和 PO_4^{3-} -P 的平均去除率分别为 91.8%、99.0%、71.5% 和 94.2%, 系统缺氧反硝化除磷去除 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PO_4^{3-} -P, 同步消耗约 $0.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_3^- -N, 满足同步脱氮除磷的要求。

关键词: 反硝化除磷; 启动; 生活污水; 污泥停留时间; 硝化液回流比

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0808-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201807181

Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process

WEI Jia-min^{1,2}, JIANG Zhi-yun^{1,2}, CHENG Cheng^{1,2}, ZHU Lin^{1,2}, LIU Wen-ru^{1,2,3}, SHEN Yao-liang^{1,2,3*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China; 3. Key Laboratory of Environmental Science and Engineering of Jiangsu Province, Suzhou 215009, China)

Abstract: The nitrogen and phosphorus removal characteristics during the start-up and the long-term operational stability of an anaerobic/anoxic (A/A) ABR coupled aerobic MBR system treating low C/N domestic wastewater were investigated. The results showed that the denitrifying phosphorus bacteria (DPBs) were successfully enriched within 46 d by controlling the nitrate recycling ratio (increasing from 150% to 300%), with a temperature of $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, volume loading rate of $0.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and sludge reflux ratio of 80% in the ABR, sludge retention time (SRT) in the denitrifying phosphorus removal functional area of 25 d, and the dissolved oxygen (DO) of $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the MBR. The net phosphorus release and phosphorus uptake of DPBs reached $20.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $27.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Batch tests demonstrated that about 84.8% of phosphorus-accumulating organisms (PAOs) could use NO_3^- -N as an electron acceptor for denitrifying phosphorus removal. After 50 d of stable operation after the successful system start-up, the average removal rates of COD, NH_4^+ -N, TN, and PO_4^{3-} -P were 91.8%, 99.0%, 71.5%, and 94.2%, respectively. The results also suggested that $0.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$ -N was consumed per $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{PO}_4^{3-}$ -P removed during the denitrifying phosphorus removal, indicating that the simultaneous nitrogen and phosphorus removal was achieved in the ABR-MBR system.

Key words: denitrifying phosphorus removal; start-up; domestic wastewater; sludge retention time; nitrate recycling ratio

20 世纪 90 年代, Kuba 等^[1]提出了反硝化除磷的概念, 反硝化聚磷菌(DPBs)与传统聚磷菌(PAOs)具有相似的代谢机制^[2], 在厌氧条件下 DPBs 通过聚磷(Poly-P)的分解及糖原(Gly)的酵解获得能量, 吸收挥发性脂肪酸(VFA)以聚- β -羟基链烷酸酯(PHA)的形式存储在胞内, 在缺氧条件下, DPBs 利用 NO_3^- -N 作为电子受体将厌氧段合成的 PHA 氢化, 产生的能量实现磷的过量吸收, 并伴随着糖原的再生及细胞的增值^[3,4]。DPBs 因其采用 NO_2^- -N/ NO_3^- -N 代替 O_2 作为电子受体而能够同时实现氮、磷的去除, 解决了传统脱氮除磷工艺关于碳源及泥龄上的矛盾, 节省了 30% 的曝气能耗、50% 的碳源需求及污泥产量^[5~8]。

目前启动反硝化除磷多采用序批式(SBR)工

艺, 以厌氧/好氧(A/O)交替运行方式, 富集 PAO; 之后以厌氧/缺氧交替(A/A)运行方式, 驯化 DPBs。然而 SBR 较高的运行费用、复杂的控制条件使得其成为工业化的难题, 并且有研究^[3,9~11]采用此启动方式, 当去除好氧段时, 系统除磷性能逐渐恶化, 甚至出现了崩溃现象, 引起这种情况的原因尚无定论。现阶段, 国内外对在连续流条件下, 以 A/A 运行方式能否稳定启动反硝化除磷的研究鲜有报道。厌氧折流板反应器(ABR)具有微生物相分

收稿日期: 2018-07-22; 修订日期: 2018-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578353); 江苏省自然科学基金项目(BK20160356)

作者简介: 韦佳敏(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与理论, E-mail: 478223661@qq.com

* 通信作者, E-mail: ylshen@mail.usts.edu.cn

离的功能^[12], 有利于在不同隔室形成优势微生物种群, 膜生物反应器(MBR)因其占地面积小、容积负荷高、高效的生物截留效果, 并随着运行费用的下降而被广泛应用^[13]. 有研究表明^[12], ABR 结合好氧反应器具有深度脱氮除磷的优势. 因此本研究采用 ABR-MBR 耦合工艺, 以 A/A 运行方式启动反硝化除磷, 重点考察了 DPBs 的驯化培养特性及 ABR-MBR 系统去碳-脱氮-除磷特性, 以期为该工艺的快速启动及工程应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

ABR-MBR 工艺实验装置及处理流程如图 1 所示, 其由 7 隔室 ABR 反应器及好氧 MBR 反应器组成. 反应器总有效容积为 11.4 L, 其中 ABR 有效容积为 7.6 L, A1 ~ A4 为厌氧区, A5 ~ A7 为缺氧区, MBR 设有沉淀区进行硝化液回流, 有效容积为 3.8 L, 采用间歇抽吸出水, 抽吸周期为 10 min (8 min 抽吸出水 and 2 min 反冲洗), 研究所用膜组件为 PVDF 帘式中空纤维膜, 膜孔径为 0.2 μm , 过滤面积为 0.2 m^2 , 采用真空压力表测跨膜压差(TMP)来反映膜的污染状况, 定期对膜组件进行清洗, 当 TMP 达到 30 kPa 时对膜组件进行化学清洗.

为保证良好的推流式完全混合反应条件, A2、A5、A6 设有搅拌. ABR-MBR 工艺为实现反硝化除磷设有 3 个回流 R1、R2、R3. 污泥回流 R1: 污泥从 A7 $\rightarrow$ A2, 旨在为 DPB 提供优质碳源; 污泥回流 R2: 污泥从 A3 $\rightarrow$ A5, 消除传统反硝化菌对 DPB 的竞争; 硝化液回流 R3 从 MBR 沉淀区回流至 A5, 为 DPB 提供电子受体. 本实验用生活污水通过蠕动泵进入 A1 进行水解发酵产生优质碳源, A2、A3 进行厌氧释磷, A4 实现对剩余 COD 的进一步去除, A5 ~ A7 通过 MBR 提供的硝化液进行缺氧吸磷, 通过排出剩余污泥实现磷的有效去除.

在系统启动及运行过程中, 按照理想的除磷理论, 碳源和硝酸盐不能同时出现, 否则存在常规反硝化菌与反硝化除磷菌之间对电子供体及电子受体的竞争, 不利于反硝化除磷菌的富集^[14], 因此逐步提升硝化液回流比, 使得 A7 剩余 NO_3^- -N 控制在 1 ~ 2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 防止 A7 过剩的硝酸盐随着污泥回流 R1 进入 A2 隔室, 破坏 DPBs 最佳的富集条件, R3 最后稳定在 300%, R1 及 R2 取 80%. 反应器内温度控制在 $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, MBR 溶解氧为 1 ~ 2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反硝化除磷功能区 (A2、A3、A5 ~ A7) 污泥龄 (SRT) 为 25 d, ABR 反应器 HRT 为 12 h, MBR 反应器 HRT 为 6 h.

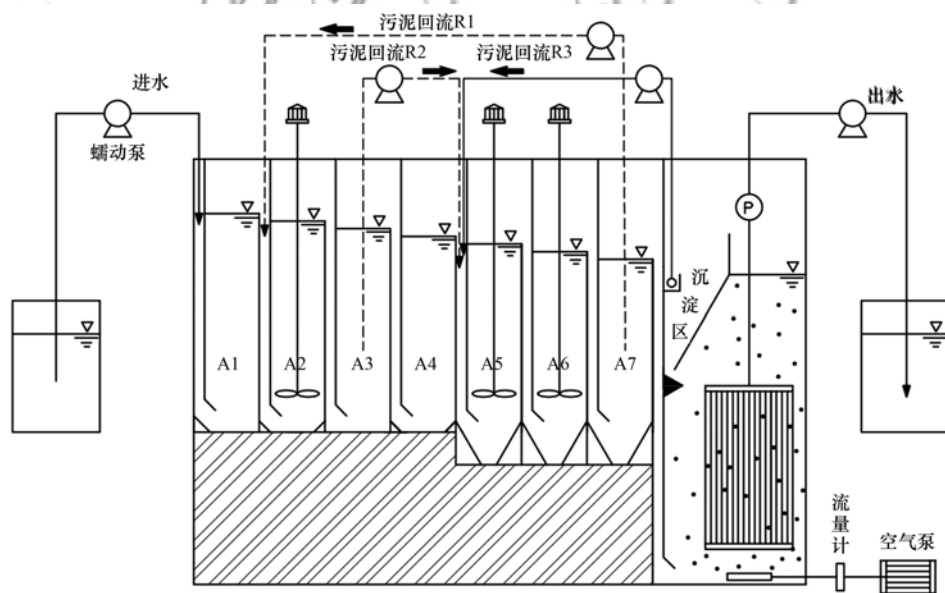


图1 ABR-MBR 工艺实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of ABR-MBR setup

1.2 实验用水和接种污泥

本实验用水为苏州某高校生活污水, 采用葡萄糖、淀粉、蛋白胨及碳酸氢铵、磷酸二氢钾适当补充碳源、氮、磷(表1). A1 及 A4 隔室接种具有良好除碳性能的污泥. MLSS 为 $7\,800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 为 $85 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. MBR 及除磷功能区 (A2、A3、A5 ~ A7)

污泥接种于苏州市某污水处理厂 A²/O 工艺的二沉池, 具有良好的硝化能力及除磷能力. MLSS 分别为 $3\,200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4\,020 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 分别为 $80 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $75 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 污泥沉降性能良好.

1.3 分析方法

COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、TN

等指标采用标准方法^[15]测定,水样采用 0.45 μm 中速滤纸过滤,以去除悬浮物的影响,其中 COD 采用快速消解法; NH_4^+ -N 采用纳氏试剂光度法测定; NO_2^- -N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; NO_3^- -N 采用紫外分光光度法; PO_4^{3-} -P 采用钼锑抗分光; TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; MLSS 采用滤纸称重法测定. 胞内多聚磷酸盐的测定参照文献^[16]中的方法, Gly 采用蒽酮比色法^[17]测定, VFA 采用分光光度法测定, pH 及 DO 采用便携式测定仪进行测定.

表 1 进水水质

Table 1 Characteristics of the raw wastewater

分析指标	范围	均值
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	322.77 ~ 440.55	379.83
NH_4^+ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	47.32 ~ 65.33	59.48
NO_2^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0 ~ 0.21	0.11
NO_3^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0 ~ 0.45	0.22
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	50.11 ~ 67.78	60.59
PO_4^{3-} -P/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.25 ~ 8.65	7.68
pH	7.13 ~ 7.39	7.21

批次实验根据文献^[18]中的方法确定 DPBs 占 PAOs 的比例,具体方法是从缺氧区中取 2 L 混合液,用蒸馏水清洗两遍,以去除残余的 NO_3^- -N 及其他物质的影响,并定容至 2 L 密闭的 SBR 反应器中,放在磁力搅拌器上,加入丙酸钠,使得初始 COD 为 $170 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 为 7.5 ± 0.1 ,进行 90 min 的厌氧反应;反应结束后,将混合液均分为 2 份,其中一份进行好氧曝气,控制 DO 在 $1.5 \sim 2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,另一份适量加入 KNO_3 ,缺氧搅拌,反应时间均为 90 min. 缺氧最大吸磷速率与好氧最大吸磷速率的比值 ($K_{\text{ano}}/K_{\text{aer}}$) 可粗略地反映出系统中 DPBs 占 PAOs 的比例.

$$K_{\text{ano}} = \frac{(P_{a,t1} - P_{a,t2})}{[(t_2 - t_1) \times \text{MLVSS}]}$$

$$K_{\text{aer}} = \frac{(P_{o,t1} - P_{o,t2})}{[(t_2 - t_1) \times \text{MLVSS}]}$$

式中, $P_{a,t1}$ 、 $P_{a,t2}$ 、 $P_{o,t1}$ 、 $P_{o,t2}$ 分别为在 t_1 、 t_2 时间下,在缺氧及好氧条件下 PO_4^{3-} -P 的质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

根据物料平衡,计算系统中缺氧吸磷量、缺氧脱氮量,计算公式为:

$$\text{缺氧吸磷量}(P_{\text{an}}) = \frac{c_a \times (1 + r_1) + c_b \times r_3}{1 + r_1 + r_3} - c_e$$

$$\text{缺氧脱氮量}(N_{\text{an}}) = \frac{c_e \times (1 + r_1) + c_d \times r_3}{1 + r_1 + r_3} - c_f$$

式中, r_1 为污泥回流比; r_3 为硝化液回流比; c_a 为厌氧末 PO_4^{3-} -P 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_b 为 MBR 反

器内 PO_4^{3-} -P 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_e 为缺氧末 PO_4^{3-} -P 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_d 为 MBR 反应器内 NO_x^- -N 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_e 为厌氧末 NO_x^- -N 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_f 为缺氧末 NO_x^- -N 质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 ABR-MBR 系统对污染物的去除特性

2.1.1 系统对 COD 的去除特性

COD 在 ABR-MBR 系统中的去除由 5 部分组成: ①一定数量在水解产酸阶段 (A1) 中转化为 CO_2 , 产酸菌亦利用部分基质合成新的细胞物质^[12]; ②大部分在厌氧段 (A2、A3) 被 DPBs 合成内碳源 (PHA) 存储于胞内的同时进行释磷; ③产甲烷阶段 (A4) 将部分剩余 COD 转化为 CH_4 ; ④少量在缺氧段 (A5 ~ A7) 作为反硝化脱氮的碳源; ⑤最后一部分用于维持 MBR 内好氧异养菌的生长.

ABR-MBR 启动过程中对 COD 去除规律如图 2 所示,从中可知,系统进水 COD 质量浓度为 $322.77 \sim 440.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $379.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. ABR 反应器在厌氧条件下运行可实现微生物相分离,利用 A1 隔室进行水解酸化,将复杂的有机物分解成简单的有机物,并在产酸菌的作用下生成 VFA,从而为 DPBs 提供优质碳源. A1 隔室产生了大量 VFA,对系统 COD 的去除贡献率为 29.98%,出水 COD 为 $275.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 经历释磷阶段,出水平均 COD 仅剩 $101.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 50.2% 的 COD 在此阶段被 DPBs 利用形成 PHA 存储于胞内,为后续的缺氧吸磷提供电子供体,实现一碳两用^[19]. 本实验基于前期研究的基础上^[20, 21],通过 A4 隔室消除厌氧释磷过程中未被吸收转化的残余 COD 对缺氧吸磷的影响,保证反硝化聚磷菌处于最佳的富集条件,有利于 DPBs 淘汰普通反硝化菌成为优势菌群,其中 12.53% 的 COD 在 A4 隔室降解,平均出水 COD 为 $57.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 大部分 COD 已在缺氧前端去除,从而避免了碳源与硝态氮同时存在的情形,仅有 5.19% 的 COD 用于同步反硝化脱氮吸磷,并不会对 DPBs 的富集产生影响,缺氧末出水 COD 为 $39.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. MBR 内存在除了有自氧硝化菌之外还存在好氧异养菌, COD 主要用维持好氧异养菌的生长,其对 COD 的去除贡献率为 2.1%,系统平均出水 COD 为 $32.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.1.2 系统对氮的去除特性

在 ABR-MBR 系统中, TN 的去除有 4 个途径: ①缺氧段 DPB 内源性反硝化吸磷快速脱氮; ②反硝化菌利用有限的外碳源少量脱氮; ③合成新的微

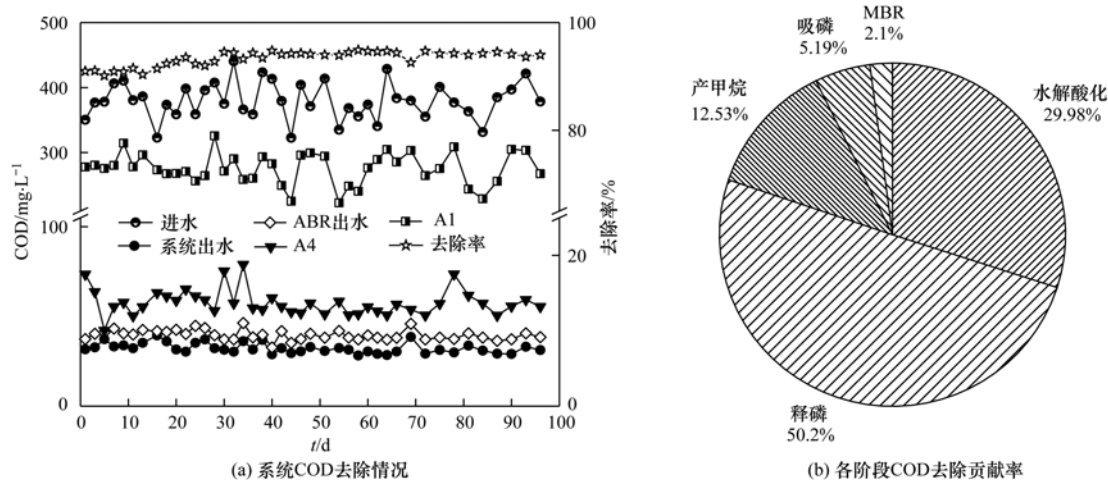


图2 ABR-MBR 系统中 COD 的去除特性

Fig. 2 Removal characteristics of COD in the ABR-MBR system

生物,通过排泥脱氮^[22];④MBR 反应器内存在 DO 浓度梯度,通过同步硝化反硝化,使得 TN 进一步去除。

图3为运行期间系统对氮的去除情况。在 MBR 中外碳源存在时,会刺激异养菌大量增殖,削弱生长速率较低的自养型硝化菌的竞争能力,对硝化性能的稳定极其不利^[23],因此 ABR 的高效去碳为 MBR 实现氨氮完全转化提供了保障。从中可知,接种前期 MBR 对 NH_4^+-N 转化率较低,但是 7 d 后出水氨氮仅剩余 $2.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后氨氮转化率一直稳定在 98.3% 左右,出水 TN 基本以 NO_3^--N 的形式存在。系统进水 TN 质量浓度为 $50.11 \sim 67.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 $60.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,启动成功后,出水 TN 从 $30.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至 $17.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。系统启动开始即进行硝化液回流,为 DPBs 提供电子受体。由于启动前期 DPBs 较少,利用 NO_3^--N 进行除磷的能力较弱,且 COD 经过 A4 的进一步降解,所以能通过常规反硝化菌去除的 NO_3^--N 较少,导致缺氧末端剩余 NO_3^--N 较多。根据 Comeau 等^[24] 的研究,

NO_3^--N 的质量浓度大于 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 即可抑制磷反释的现象,因此,控制缺氧末 NO_3^--N 在 $1 \sim 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,通过采用硝化液回流比逐步提升的方式,从启动时的 150% 逐步提升稳定至 300%。本研究发现即使缺氧末端 NO_3^--N 小于 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,也并未出现磷反释,而当 A6 隔室 NO_3^--N 消耗殆尽的时候, A7 隔室出现了明显的磷反释现象。从接种第 1 d 至第 46 d,出水 TN 明显降低,去除率从 41.4% 升至 70.2%,表现出了明显的脱氮现象,熊付娟等^[25] 的研究表明没有磷酸盐存在的情况下微生物较难利用内碳源进行反硝化,因此 TN 的去除率的升高与反硝化除磷率的上升相吻合,为典型的反硝化除磷现象。

2.1.3 系统对磷的去除特性

ABR-MBR 系统对磷的去除特性如图 4 所示,从中可知,系统进水 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 质量浓度为 $6.25 \sim 8.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 $7.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在反应器运行第 3 d,净释磷量达到 $16.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,吸磷量为 $13.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,具有一定的缺氧吸磷能力,说明该接种污泥中含有大量 PAO,且其中含有一定数量的 DPBs,但是去除率为 -34.8%,且在第 1、7 d 磷酸盐的去除率皆为负值,说明了系统占主导地位的仍是 PAOs,其释磷效果依然存在,但是在缺氧条件下能利用 NO_3^--N 进行吸磷的能力较差,DPBs 较少。随着运行时间的增加,虽然净释磷量在前期存在波动,但是净吸磷量仍然呈上升趋势,净吸磷量从第 13 d 的 $10.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到第 24 d 的 $11.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第 34 d 的净吸磷量达到 $15.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,磷酸盐的去除率逐渐出现好转,达到 64.1%,同时可以看到随着系统的运行,除磷效率一直处于上升的趋势,至第 46 d 驯化结束时,净释磷量为 $20.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,净吸磷量升至 $27.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,磷的去除率为 92.8%,启动成功后稳定运行 50 d,去除率也一直

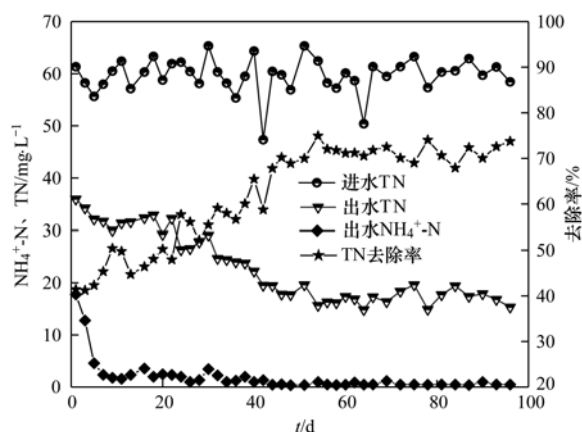


图3 ABR-MBR 系统中氮的去除特性

Fig. 3 Removal characteristics of nitrogen in the ABR-MBR system

稳定在 90% 以上, 出水平均 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明以 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的反硝化聚磷菌已经成为优势菌属, 系统表现出稳定高效的除磷能力. Zafiriadis 等^[26] 的研究表明采用双污泥 DEPHANOX 工艺以厌氧/缺氧的运行方式处理生活污水连续稳定运行 80 d, 反硝化除磷效率并未出现下降趋势. DPBs 能够在 A/A 运行条件下富集, 是因为: ①硝化菌在 A/A 条件下已被淘汰, 而 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 在 A7 隔室

控制在 $1 \sim 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随回流污泥进入 A2 的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 更低, 为前端提供严格厌氧条件的同时削弱了 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 对释磷的影响; ②DPBs 相比于其他的异养菌, 可以适应特殊的生长条件, 在厌氧条件下优于其他非除磷菌吸收 VFA, 在体内转化为 PHA, 在缺氧段将 PHA 分解进行生长繁殖, 而其他非除磷菌不适应长期处于这种交替环境, 缺少可利用的有机物逐渐被淘汰^[27].

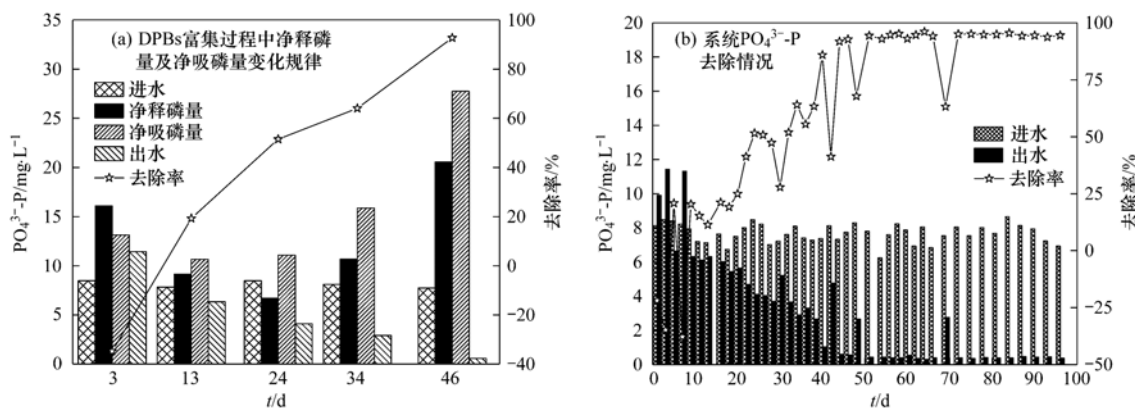


图4 ABR-MBR 系统中磷的去除特性

Fig. 4 Removal characteristics of phosphorus in the ABR-MBR system

2.2 ABR-MBR 工艺中各污染物沿程转化规律

经过 46 d 左右的驯化, 系统脱氮除磷性能较为稳定, 综合图 2~4 可知 COD、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率稳定在 91.8%、71.5%、94.2%。图 5 给出系统稳定运行后具有代表性的各项水质参数沿程变化情况。

由图 5(a)可知, 进水 VFA 较低, 而 DPBs 可吸收的碳源只有 VFA, 其他形式的有机碳源必须经水解酸化成 VFA 后才能用于反硝化除磷^[28]。原水经过 A1 隔室水解酸化而产生大量 VFA, VFA 达到 $179.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 部分 COD 在此隔室降解, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 无明显变化; 经过释磷阶段, DPBs 充分利用优质碳源 VFA 进行释磷, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 从 $7.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升到 $35.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 也降低至 $85.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 剩余少量

VFA; A4 隔室经过产甲烷菌的作用, 进一步降解 COD 至 $51.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 缺氧段, DPBs 利用硝化液回流提供的硝态氮进行脱氮除磷, 缺氧末 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 降至 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 仅为 $1.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MBR 内的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 为 $19.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 COD 为 $30.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 为 $18.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。MBR 反应器对磷酸盐的去除贡献率几乎为 0, 所以该系统反硝化除磷对磷的去除占主导地位。根据物料平衡计算可知, 缺氧初 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 及 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 分别为 $13.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $11.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而缺氧末 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 及 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 分别为 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 因此本研究中缺氧脱氮量/缺氧吸磷量 = 0.83, 即吸收 1 mg 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 大约需要 0.83 mg 的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$, 与 Zhou 等^[29] 的研究采用 A/O-SBR 吸收 1

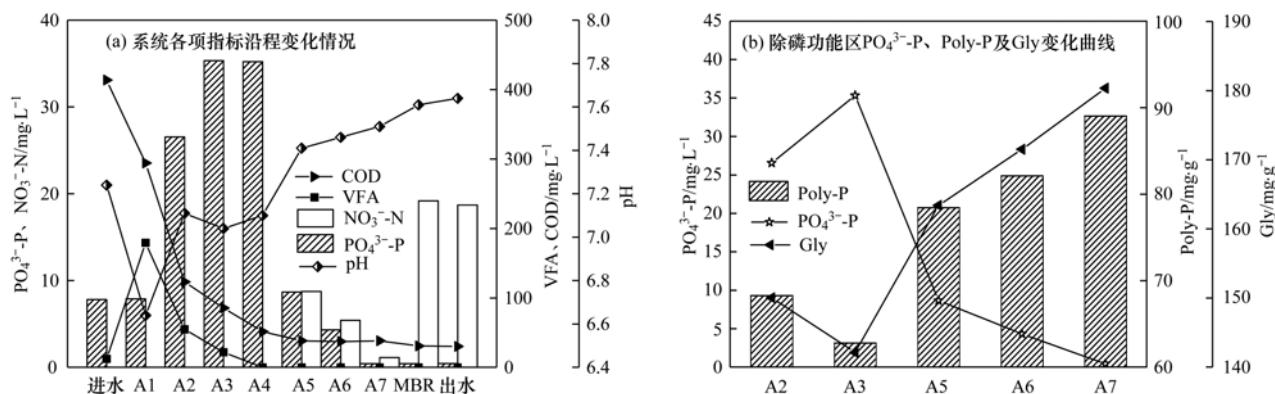


图5 ABR-MBR 系统内各参数沿程变化情况

Fig. 5 Variation of parameters along the path of the ABR-MBR system

mg 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 需要 0.89 mg 的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 大致相符, 系统表现出了明显的缺氧吸磷。

pH 值从进水到 A1 隔室快速地下降, 因为在 A1 隔室水解酸化产生了大量的 VFA, 伴随着 VFA 的吸收, A2 隔室的 pH 值有明显的上升, 随着 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的进一步释放, pH 值降低, 在缺氧段由于 DPBs 对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的摄取及硝化液回流的稀释, pH 快速升高, 与 Wang 等^[30] 通过在线 pH 控制反硝化除磷的研究一致。

从图 5(b) 可以看出, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的变化趋势为典型的强化生物除磷现象。厌氧条件下, DPBs 水解胞内聚磷进行释磷、合成 PHA 的同时进行 Gly 的降解, 厌氧末 Poly-P 含量降为 $62.78 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, Gly 也降至 $142.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 混合液中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 则升至 $35.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在缺氧条件下 DPBs 消耗 PHA 吸磷并合成 Gly, Gly 还原至 $180.31 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 混合液中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 急剧下降为 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其多聚磷酸盐的吸收量远远超过细胞所需的磷, Poly-P 含量高达 $89.02 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 并且这部分聚磷随富磷污泥一同排出体系从而达到除磷的目的。

2.3 反硝化除磷菌活性特性研究

为了进一步了解 ABR-MBR 反硝化聚磷菌的相对代谢活性特性, 采用批次实验进行验证。图 6 为 PAOs 与 DPBs 的相对代谢活性实验, 比较了缺氧最大吸磷速率与好氧最大吸磷速率。缺氧最大吸磷速率 K_{ano} (以 P/VSS 计) 为 $13.63 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 好氧最大吸磷速率 K_{aer} (以 P/VSS 计) 为 $16.08 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, $K_{\text{ano}}/K_{\text{aer}}$ 为 84.8%, 因此该系统约 84.8% 的 PAOs 能够利用 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 作为电子受体进行反硝化除磷, 较以往启动或运行存在好氧吸磷^[9, 31, 32] 的比例要高。推测为较长的污泥龄有利于 DPBs 大量增殖^[33], 而该系统中 DPBs 长期处于厌氧/缺氧的运行条件下, 可能存在一部分只能利用

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 而不能利用 O_2 的 DPBs^[34], DPBs 相对较高的代谢活性提高了系统缺氧区同步脱氮除磷的能力, 进一步降低了需氧量, 节省了污水处理费用。

3 结论

(1) 采用低 C/N 值生活污水为处理对象, 考察以厌氧/缺氧运行的 ABR 耦合好氧 MBR 系统的脱氮除磷特性及长期运行的稳定性。控制 ABR 段容积负荷为 $0.8 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 污泥回流比为 80%, 硝化液回流比从 150% 逐步提升至 300%, 除磷功能区 SRT 为 25 d, 温度为 $30^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, MBR 溶解氧为 $1 \sim 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 46 d 成功启动反硝化除磷, 且启动成功后稳定运行 50 d。

(2) 稳定运行阶段, 各项出水指标 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均值分别为 32.32、0.56、17.17 和 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 相应地去除率分别为 91.8%、99.0%、71.5% 和 94.2%。系统缺氧反硝化除磷去除 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 同步消耗约 $0.83 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 具有良好的同步脱氮除磷效果。

(3) 缺氧最大吸磷速率 K_{ano} 为 $13.63 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 好氧最大吸磷速率 K_{aer} 为 $16.08 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, $K_{\text{ano}}/K_{\text{aer}}$ 为 84.8%, 因此该系统约 84.8% 的 PAOs 能够利用 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 作为电子受体进行反硝化除磷, 较以往启动或运行中存在好氧吸磷的比例要高。

参考文献:

- [1] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, *et al.* Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. Water Science and Technology, 1993, 27(5-6): 241-252.
- [2] Wang Y Y, Geng J J, Ren Z J, *et al.* Effect of anaerobic reaction time on denitrifying phosphorus removal and N_2O production[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 5674-5684.
- [3] Carvalho G, Lemos P C, Oehmen A, *et al.* Denitrifying phosphorus removal: linking the process performance with the microbial community structure[J]. Water Research, 2007, 41(19): 4383-4396.
- [4] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale[J]. Water Research, 2007, 41(11): 2271-2300.
- [5] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Improving the nitrogen removal efficiency of an A^2/O based WWTP by using an on-line knowledge based expert system[J]. Water Research, 2002, 36(8): 2109-2123.
- [6] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Brandse F A, *et al.* Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants[J]. Water Research, 1997, 31(4): 777-786.
- [7] Kuba T, Murnleitner E, van Loosdrecht M C M, *et al.* A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1996, 52

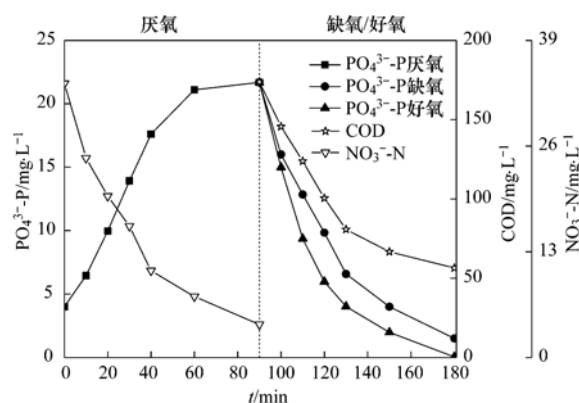


图 6 厌氧释磷和缺氧/好氧吸磷序批实验结果

Fig. 6 Phosphorus release and uptake under anaerobic-anoxic/oxic conditions

- (6): 685-695.
- [8] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system[J]. *Water Research*, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [9] 王梅香, 赵伟华, 王淑莹, 等. A_2N_2 双污泥系统反硝化除磷工艺的启动与稳定[J]. *化工学报*, 2016, **67**(7): 2987-2997.
- Wang M X, Zhao W H, Wang S Y, *et al.* Startup and stability of A_2N_2 double sludge system denitrifying phosphorus removal process[J]. *CISEC Journal*, 2016, **67**(7): 2987-2997.
- [10] 李观元. 以丙酸为碳源的反硝化除磷工艺运行特性及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Li G Y. Operation characteristics and affecting factors of denitrifying phosphatation process fed with propionic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [11] 张为堂, 侯锋, 刘青松, 等. AA-BAF 连续流反硝化除磷系统的运行性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, **45**(11): 4087-4092.
- Zhang W T, Hou F, Liu Q S, *et al.* Performance of a continuous denitrifying phosphorous removal system: anaerobic/anoxic process integrated with BAF (AA-BAF)[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, **45**(11): 4087-4092.
- [12] 沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术: 理论与应用[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- Shen Y L, Wang B Z. New technologies for biological wastewater treatment: theory and application (2nd ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [13] Brown P, Ong S K, Lee Y W. Influence of anoxic and anaerobic hydraulic retention time on biological nitrogen and phosphorus removal in a membrane bioreactor[J]. *Desalination*, 2011, **270**(1-3): 227-232.
- [14] Ng W J, Ong S L, Hu J Y. Denitrifying phosphorus removal by anaerobic/anoxic sequencing batch reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(3): 139-146.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 由阳, 彭永臻, 王淑莹, 等. 强化生物除磷系统胞内聚合物测定方法优化[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, **42**(2): 207-211.
- You Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Optimization of intracellular polymer analysis for enhanced biological phosphorous removal system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, **42**(2): 207-211.
- [17] Liu Y, Chen Y G, Zhou Q. Effect of initial pH control on enhanced biological phosphorus removal from wastewater containing acetic and propionic acids[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(1): 123-129.
- [18] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge[J]. *Water Research*, 1997, **31**(3): 471-478.
- [19] Dai H L, Lu X W, Peng L H, *et al.* Enrichment culture of denitrifying phosphorus removal sludge and its microbial community analysis[J]. *Environmental Technology*, 2017, **38**(22): 2800-2810.
- [20] 程继辉, 吴鹏, 程朝阳, 等. 基于优质碳源提供的 CAMBR 复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4539-4545.
- Cheng J H, Wu P, Cheng C Y, *et al.* Shortcut nitrification-denitrifying phosphorus removal based on high-quality carbon source in combined process of CAMBR [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4539-4545.
- [21] 吕亮, 尤雯, 张敏, 等. 硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1309-1315.
- Li L, You W, Zhang M, *et al.* Effect of NO_3^- -N recycling ratio on denitrifying phosphorus removal efficiency in the ABR-MBR combined process[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1309-1315.
- [22] 王梅香, 赵伟华, 王淑莹, 等. A_2N_2 系统反硝化除磷性能的优化及稳定运行[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(11): 3311-3320.
- Wang M X, Zhao W H, Wang S Y, *et al.* Denitrifying phosphorus removal performance optimization and stable operation of A_2N_2 system[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3311-3320.
- [23] 张森, 彭永臻, 张建华, 等. 进水 C/N 对 A^2/O -BCO 工艺反硝化除磷特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1366-1375.
- Zhang M, Peng Y Z, Zhang J H, *et al.* Effect of influent C/N ratios on denitrifying phosphorus removal characteristics in the A^2/O -BCO process[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1366-1375.
- [24] Comeau Y, Hall K J, Hancock R E W, *et al.* Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Research*, 1986, **20**(12): 1511-1521.
- [25] 熊付娟. 反硝化除磷污泥除磷脱氮特性及菌群结构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Xiong F J. Denitrifying phosphorus removal characteristics and microbial community structure of denitrifying phosphorus removal sludge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [26] Zafiriadis I, Ntougias S, Nikolaidis C, *et al.* Denitrifying polyphosphate accumulating organisms population and nitrite reductase gene diversity shift in a DEPHANOX-type activated sludge system fed with municipal wastewater[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2011, **111**(2): 185-192.
- [27] Chen 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 (BAF) system[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(10): 5722-5727.
- [28] 乔卫敏, 周振, 王罗春, 等. 反硝化聚磷菌应用现状及其影响因素分析[J]. *水处理技术*, 2013, **39**(9): 6-9.
- Qiao W M, Zhou Z, Wang L C, *et al.* Application status and influencing factors analysis of the denitrifying phosphorus accumulating bacteria [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, **39**(9): 6-9.
- [29] Zhou S Q, Zhang X J, Feng L Y. Effect of different types of electron acceptors on the anoxic phosphorus uptake activity of denitrifying phosphorus removing bacteria [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(6): 1603-1610.
- [30] Wang Y Y, Peng Y Z, Stephenson T. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3506-3512.
- [31] Zhang M, Peng Y Z, Wang C, *et al.* Optimization denitrifying phosphorus removal at different hydraulic retention times in a novel anaerobic anoxic oxic-biological contact oxidation process [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **106**: 26-36.

- [32] 张建华, 王淑莹, 张森, 等. 不同反应时间内碳源转化对反硝化除磷的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 989-997.
Zhang J H, Wang S Y, Zhang M, *et al.* Effect of conversion of internal carbon source on denitrifying phosphorus removal under different reaction time[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(3): 989-997.
- [33] 杨杰, 李冬, 罗亚红, 等. SBR 后置缺氧反硝化除磷的启动及去除性能[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(5): 1376-1383.
Yang J, Li D, Luo Y H, *et al.* The start-up and performance of denitrifying phosphorus removal process in a post-anoxic SBR system[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(5): 1376-1383.
- [34] 蒋轶锋. 短程反硝化除磷工艺特征及运行效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
Jiang Y F. Study on characteristics and performance of short-cut denitrifying dephosphatation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

环境科学

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 Nitrification 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)