

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征

程诚¹, 朱琳¹, 郭凯成¹, 汪倩¹, 宋家俊¹, 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: 采用效果检测、粒径分布与电镜扫描等方法, 研究厌氧折流板反应器 (ABR) 在不同水力停留时间 (HRT) 下污水中有机物 (COD) 的转化过程及污泥形态变化特征。结果表明, HRT 从 15 h 到 4 h 的各运行阶段, COD 去除率稳定在 90.0% 以上。沿程分析表明, 当 HRT 为 10、7.5、5 和 4 h 时, ABR 第一隔室分别承担约 90%、78.56%、74.18% 及 58.91% 的去碳比重, 且承担 COD 去除的主要功能隔室由第一隔室过渡到第一、二隔室。随着 HRT 缩短, ABR 第一隔室中挥发性脂肪酸 (VFAs) 总量显著上升。组成分析知, 乙酸在总 VFAs 的比重由 51.36% 逐渐升高至 58.77%, 丁酸、丙酸含量相对较少, 变化较小。随着运行时间推移, ABR 中污泥形态发生显著变化, 到 111 d 时, 基本实现颗粒化; 同时, 沿水流方向颗粒化程度呈递减趋势。扫描电镜 (SEM) 观察显示, ABR 一定程度上存在生物相分离现象, 各隔室分别以丝状菌、甲烷多球菌、单球菌和杆菌为主。

关键词: 厌氧折流板反应器 (ABR); 生活污水; 水力停留时间 (HRT); 挥发性脂肪酸 (VFAs); 污泥形态

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1808-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910197

Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs

CHENG Cheng¹, ZHU Lin¹, GUO Kai-cheng¹, WANG Qian¹, SONG Jia-jun¹, 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 characteristics of organics transformation and sludge morphology of in an ABR (anaerobic baffled reactor) for sewage treatment with different HRTs were investigated based on reactor performance, particle size distribution, and scanning electron microscopy (SEM). Results showed that the COD removal rate was stably maintained above 90.0% when the HRT decreased from 15 h to 4 h. However, the first compartment of ABR contributed to 90%, 78.56%, 74.18%, and 58.91% of the total COD removal when the HRT was 10, 7.5, 5, and 4 h, respectively. When the HRT was reduced, the total amount of volatile fatty acids (VFAs) in the first compartment of ABR significantly increased, and the abundance of acetic acid, being the major constituent of VFAs, gradually increased from 51.36% to 58.77%; the concentrations of butyric acid and propionic acid were maintained and constituted a minority of the VFAs. The sludge morphology in ABR significantly changed in the wake of run time. On day 111, granulation of sludge was achieved. Additionally, the degree of sludge granulation showed a decreasing trend with the direction of water flow. SEM observations of granular sludge showed that the separation of biomass did occur in the ABR. Along the direction of water flow, filamentous bacteria, *M. methane*, monococci, and bacilli were the dominant microbes in each compartment of the ABR.

Key words: anaerobic baffled reactor (ABR); sewage; hydraulic residence time (HRT); volatile fatty acids (VFAs); sludge morphology

厌氧折流板反应器 (anaerobic baffled reactor, ABR) 工艺的主要运行参数包括: 水力停留时间 (hydraulic residence time, HRT)、温度、有机负荷 (OLR)、F/M 和 MLSS 等。其中, HRT 是影响 ABR 内水体流态及泥水接触的关键参数, 并决定整个反应器的处理效能^[1]。首先, HRT 影响容积负荷。一般情况下, HRT 的设定主要取决于进水基质组成及浓度^[2]。当处理高强度废水时, 较长的 HRT 以保证系统在适宜负荷范围内, 水解酸化、产甲烷等一系列反应有序进行^[3]。当处理低强度废水时, 较短的 HRT 足以供应降解过程需求, 提升容积负荷利用率。其

次, HRT 会通过影响局部泥水接触及传质速率来改变 ABR 的水力条件。HRT 过长, 易形成生物死区; HRT 过短, 会增加水力死区^[4,5]。因此, HRT 参数调整需根据 ABR 构造特征及实际处理对象及效能而定。

值得一提的是, 单独使用的 ABR 只具有高效除

收稿日期: 2019-10-27; 修订日期: 2019-11-18

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: 程诚 (1994 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与理论, E-mail: 896375932@qq.com

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

碳作用,不具备脱氮除磷功能. 为合理利用 ABR,可将 ABR 同好氧膜生物反应器(MBR)组合以打造出同步脱氮除磷的耦合工艺,实现“一碳两用”^[6]. 据相关研究表明,反硝化除磷菌(denitrifying phosphorus bacteria,DPBs)在厌氧释磷时会吸收环境中的碳源,尤其是短链脂肪酸(volatile fatty acids,VFAs)储存为内碳源,为缺氧吸磷过程提供电子供体^[7]. 而在 ABR-MBR 耦合工艺中,ABR 前端通过水解酸化可为 DPBs 提供 VFAs^[8],实现废水中碳源合理利用. 因此,研究 ABR 部分沿程有机物的转化,对不同工况下 MBR 中硝化液回流位置起到参考作用.

现阶段,对以低负荷污水为处理对象的 ABR 工艺研究较少,尤其针对低负荷 ABR 工艺中基质和污泥转化过程的综合性研究鲜见报道. 本研究重点考察 ABR 中有机物的沿程转化、污泥特征及微生物分布,对不同 HRT 下低负荷 ABR 的运行规律进行了深入研究,通过揭示低负荷 ABR 的优势及不足,旨在为 ABR-MBR 反硝化除磷耦合工艺实现优质碳源的有效利用以及优化设计和运行提供理论依据.

表1 设计运行工况						
Table 1 Design operating conditions						
阶段	运行天数/d	OLR(以 COD 计) /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	HRT/h	Q/L·d ⁻¹	q 表面水力负荷
启动	1~34	0.80	500.00	15.00	16.98	0.09
	35~51	1.00	500.00	12.00	21.22	0.11
阶段1	52~66	1.20	500.00	10.00	25.46	0.13
阶段2	67~80	1.60	500.00	7.50	33.95	0.17
阶段3	81~103	2.40	500.00	5.00	50.93	0.26
阶段4	104~111	3.00	500.00	4.00	63.66	0.32

1.2 实验材料

本研究中的反应器进水取自苏州某污水处理厂,其原水水质如表 2 所列. 为保证研究阶段进 waters 的均等稳定,添加适量葡萄糖、淀粉和微量元素等加以必要的调节. 其中,添加少量的 NH₄Cl 和 KH₂PO₄ 补充氮和磷,维持 COD:N:P≈300:50:7;用 NaHCO₃ 和 KHCO₃ 等补充碱度,防止反应器酸化.

表2 原水水质		
Table 2 Characteristics of the raw wastewater		
分析指标	范围	均值
COD/mg·L ⁻¹	173.77~421.63	306.38
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	45.27~73.53	51.56
PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	6.36~8.97	7.34
VFAs/mg·L ⁻¹	15.76~63.11	34.67
pH	6.95~8.03	7.42

接种污泥取自苏州某污水处理厂二沉池的浓缩污泥,其 MLVSS/MLSS 为 0.74. 采集的污泥经 150 目的筛网筛分后平均接种到 5 个隔室,使 ABR 各隔

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

本实验的 ABR 由有机玻璃板制成(见图 1),总有效体积为 10.6 L,分 5 个隔室,单隔室的上流区与下流区其宽度比为 9:1. 整个装置放置于恒温水浴缸(31±1)℃. 采用固定进水基质浓度,缩短水力停留时间的方式启动反应器. 启动初期 HRT 为 15 h,OLR 为 0.7 kg·(m³·d)⁻¹,为微生物提供低水力负荷条件,减少污泥洗脱冲刷量,利于生长繁殖^[9,10]. 反应器成功启动后,各阶段设计运行工况如表 1.

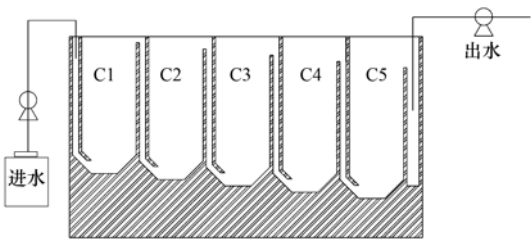


图1 ABR 工艺实验装置
Fig. 1 Schematic diagram of ABR setup

表1 设计运行工况						
Table 1 Design operating conditions						
阶段	运行天数/d	OLR(以 COD 计) /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	HRT/h	Q/L·d ⁻¹	q 表面水力负荷
启动	1~34	0.80	500.00	15.00	16.98	0.09
	35~51	1.00	500.00	12.00	21.22	0.11
阶段1	52~66	1.20	500.00	10.00	25.46	0.13
阶段2	67~80	1.60	500.00	7.50	33.95	0.17
阶段3	81~103	2.40	500.00	5.00	50.93	0.26
阶段4	104~111	3.00	500.00	4.00	63.66	0.32

室接种量约 28 g·L⁻¹ MLSS.

1.3 分析方法

主要测定指标有 COD、pH、VFAs、MLSS 和 MLVSS 等. 其中 COD 采用快速消解法;MLSS 和 MLVSS 采用重量法;pH 由雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计测定;VFAs 总量采用分光光度法.

VFAs 组分使用气相色谱(安捷伦 7820)测定^[11]. 样品预处理过程:取反应器中 10 mL 上清液,4 500 r·min⁻¹离心 5 min,经 0.45 μm 滤膜过滤后,取 0.3 mL 样品于 2 mL 色谱小瓶中,加入 0.1 mL 饱和 KHSO₄ 溶液酸化盐析,1 mL 萃取剂碳酸二甲酯(DMC),在高速冷冻离心机中离心 5 min,上机抽取离心上清液测定. 气相色谱条件为:色谱柱型号为极性较强的 DB-FFAP(30 m×0.25 mm×0.25 μm)毛细管柱;前检测器为氢离子火焰检测器(FID),设定温度为 250℃;进样口气化温度为 220℃,采用分流比 2:1 的模式进样,载气为氢气(载气流量为 45 mL·min⁻¹). 程序升温,起始炉温为 100℃保持

1 min, 以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 120°C , 保持 1 min, 再以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 220°C , 保持 2 min. 整个上机实验过程持续 13.5 min. 标准曲线及工作曲线由 sigma 混合标准品配置制作.

污泥的微生物形态结构由扫描电镜法 (SEM) 测定^[12]. 所取样本经灭菌磷酸缓冲液冲洗后, 用 2.5% 戊二醛覆盖污泥在 4°C 下固定 12 h, 弃去上清液用浓度逐级递增的乙醇溶液梯度脱水. 最后将样品置于滤纸上自然风干, 喷金检测. 污泥形态通过 OLYMPUS CX41 型显微镜观察, 粒径分布采用筛分法.

2 结果与分析

2.1 ABR 整体效能

本研究用 COD 浓度代表溶解性有机物含量, 在 OLR 为 $0.7\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 的条件下驯化接种污泥. 从图 2(a) 可知, 启动前 9 d, COD 去除率由 75.56% 升至 91.97%, 最终稳定在 87% 左右. 第二阶段缩短 HRT 至 12 h, COD 去除率提高并稳定在 90% 以上, 出水 COD 低于 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 2(b)], 标志着 ABR 启动成功. 通过各阶段运行对比可知, 每提升一次负荷, COD 去除率均会呈现先小幅下降后缓慢回升并稳定在 90% 左右的趋势, 可见该反应器在低负荷下

抗冲击负荷性能良好.

图 2(b) 展现了 ABR 进出水波动及出水 VFAs 的量. 在启动前 34 d, 出水 VFAs 值均高于其它阶段. 相较于水解酸化菌, 产甲烷菌的世代周期长^[13], 在缩短 HRT 时, 水解酸化产生的 VFAs 未能被产甲烷菌及时消耗, 导致 VFAs 的累积, 出水 VFAs 同 COD 浓度均会暂时性升高, 一旦产甲烷菌适应恢复活性后, VFAs 去除效果会缓慢提升^[14]. 相较于 Krishna 等^[15] 用 ABR 处理低负荷废水 (进水 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD), 本研究在调换各工况阶段时, 反应器能更快达到稳态. 一方面可能是 Krishna 的实验用水是由蔗糖、蛋白胨等人工配制, 较为纯净, 而本实验进水是过滤后的生活污水, 少量微生物会进入反应器, 帮助维持系统的稳定. 二是 Krishna 的试验温度为 $23\sim 31^{\circ}\text{C}$, 而本实验始终保持在 $(31\pm 1)^{\circ}\text{C}$, 较高的温度更利于维稳^[16].

2.2 不同 HRT 条件下 ABR 沿程特性

2.2.1 COD 沿程变化

本研究期间, 系统整体去碳特性较为稳定. 图 3 数据表明, 启动初期, 各隔室对碳的去除均有一定贡献. 当 HRT 为 12 h 时, C1 隔室去碳比重占总比重的 89%, 成为 ABR 的主要除碳功能区. 继续缩短 HRT 至 7.5、5 和 4 h 时, C1 隔室去碳比重分别下降至 78.56%、74.18% 及 58.91%, C1 和 C2 成为主要功能区. 分析得出, 当 HRT 大于 7.5 h 时, 大部分有机物被截留吸附在 C1, 使得该区养料丰富, 且泥水接触时间充足, 故生物活性高, 有机物消耗快, COD 去除效率高. 后四隔室由于处于饥饿环境, 微生物活性远低于预期值, 有机物去除比重低于总体的 10%. 逐步缩短 HRT 至 5 h 和 4 h 时, 容积负荷直线上升, 水力冲刷作用增大, C1 隔室污泥和有机物接触时间缩短, 未截留的有机物和少量污泥流入后续隔室,

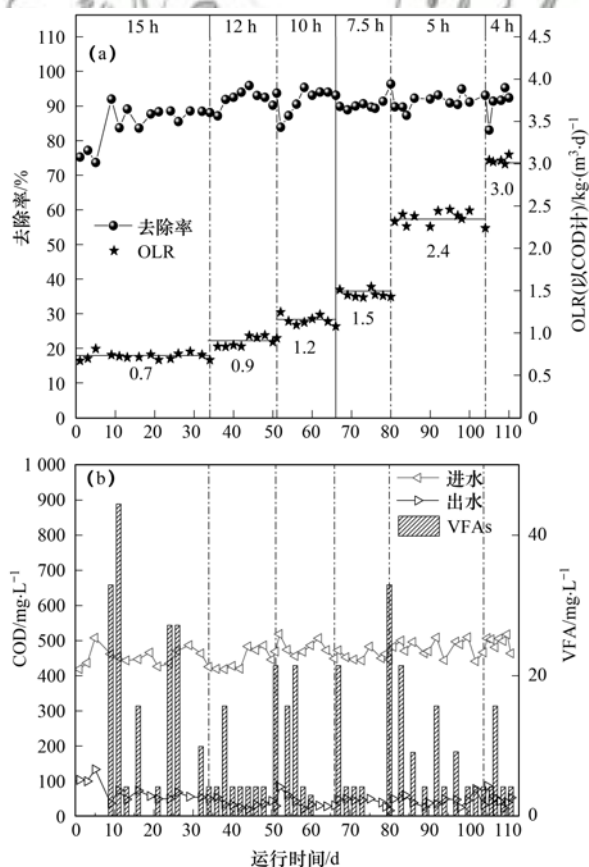


图2 ABR 除碳性能

Fig. 2 Removal characteristics of COD in ABR

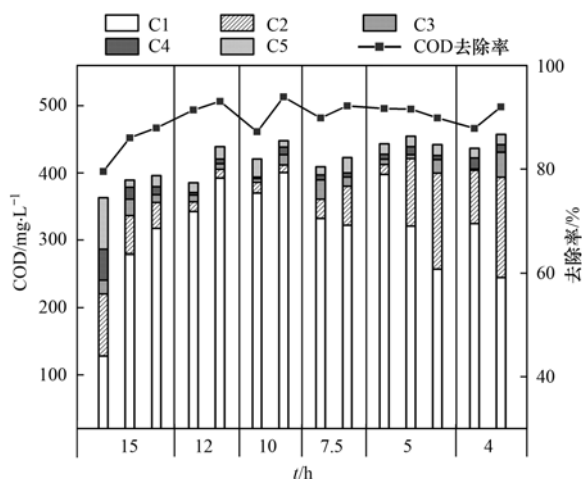


图3 不同 HRT 条件下各隔室 COD 平均去除贡献量

Fig. 3 Average COD removal contribution in different compartments under different HRT conditions

C2 功能被激活,开始承担更多有机物的去除.后三隔室去碳比重变化较小,使系统碳去除稳定在 90% 左右.因此,高生物量会弥补生物活性低的缺陷,增强系统稳定性,而非提高 COD 的去除^[9].ABR 在低负荷条件运行时,前端主要负责去碳^[17],后端负责稳定出水水质.

2.2.2 不同 HRT 下 ABR 沿程 COD、VFAs 和 pH 趋势

根据有机物厌氧生物转化理论可知,大分子复杂有机质在 ABR 前端经水解酸化分解为脂肪酸,经过渡隔区产乙酸作用将其分解为乙酸,在后端隔室则被产甲烷作用慢慢消耗.相应地,在沿程 ABR 中, COD 应先缓慢降低后急剧减少, pH 则表现出先降低后回升的趋势.

从图 4(a)~4(c) 观察得知, COD 与 VFAs 值同步变化,表现出沿水流方向逐渐递减的趋势. pH 值和 VFAs 值呈负相关,在反应过程中表现出逐级递增的趋势.在 HRT 为 7.5 h 时, C1 中 VFAs 量虽不是 ABR 沿程最高点,但已成为 pH 值沿程最低点 [图 4(d)].当再次缩短 HRT 为 5 h 和 4 h 后, VFAs 峰值点位显著移至 C1 [图 4(e) 和 4(f)].首先,提升负荷过程利于水解酸化作用,生长缓慢的产甲烷菌对突增的脂肪酸代谢滞后,故缩短 HRT 过程或短

HRT 时脂肪酸积累.其次,生活污水含有微生物,使进水酸化 VFAs 含量高于 ABR 沿程,故半天换一次水来降低进水酸化程度.此外,减少简单生物物质葡萄糖等的投加,并提高碱度同样抑制进水酸化问题.这也是在研究期间出水 pH 值偏碱性的原因之一.最后,进水长链脂肪酸在产氢产乙酸作用下变短链 VFAs 也会导致 C1 有机酸增多^[18].

为说明低 HRT 对 VFAs 种类的影响,本实验采用气相色谱法对沿程 VFAs 组成进行了测定.从图 5 可知,反应器总 VFAs 主要包含乙酸、丙酸和丁酸,乙酸含量在总 VFAs 的比重始终占据首位.当 HRT 从 7.5 缩至 5 h 和 4 h 时,乙酸产量由 25.78 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 56.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 73.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;丙酸、丁酸含量也略微升高,但总比重由 41.74% 先降低至 25.93% 再升高至 31.94%.一方面,太多物质水解时,主要产物是葡萄糖,而葡萄糖酸化的主要中间产物是乙酸^[19].另一方面,水力停留时间的缩短会增加有机酸的积累,回馈于环境,降低水体 pH,为产氢产乙酸菌创造最佳 pH 生态位条件^[20],从而加速产氢产乙酸过程,使乙酸含量升高,丙酸、丁酸等含量降低.由此可见,在低负荷运行条件下,ABR 的产酸和产乙酸作用在 C1 中同步

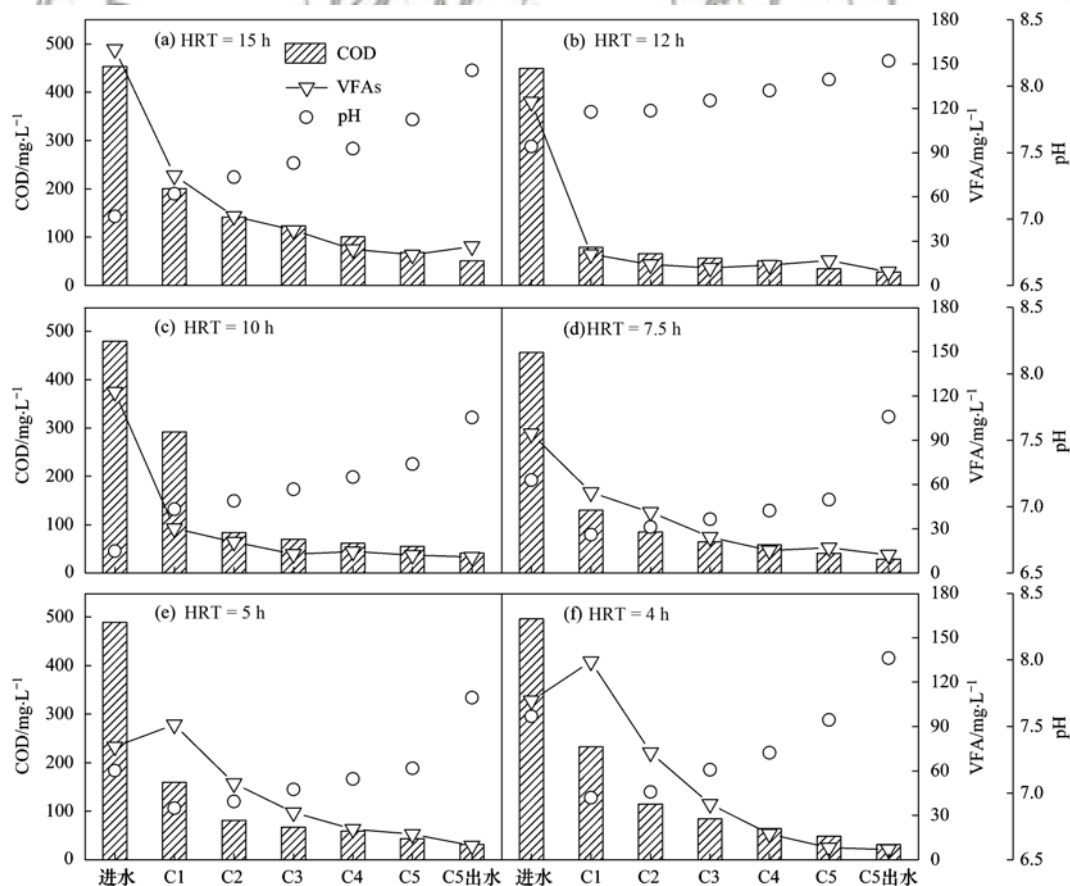


图 4 不同 HRT 条件下 ABR 沿程 COD、VFAs 和 pH 的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of COD, VFAs, and pH along the ABR under different HRT conditions

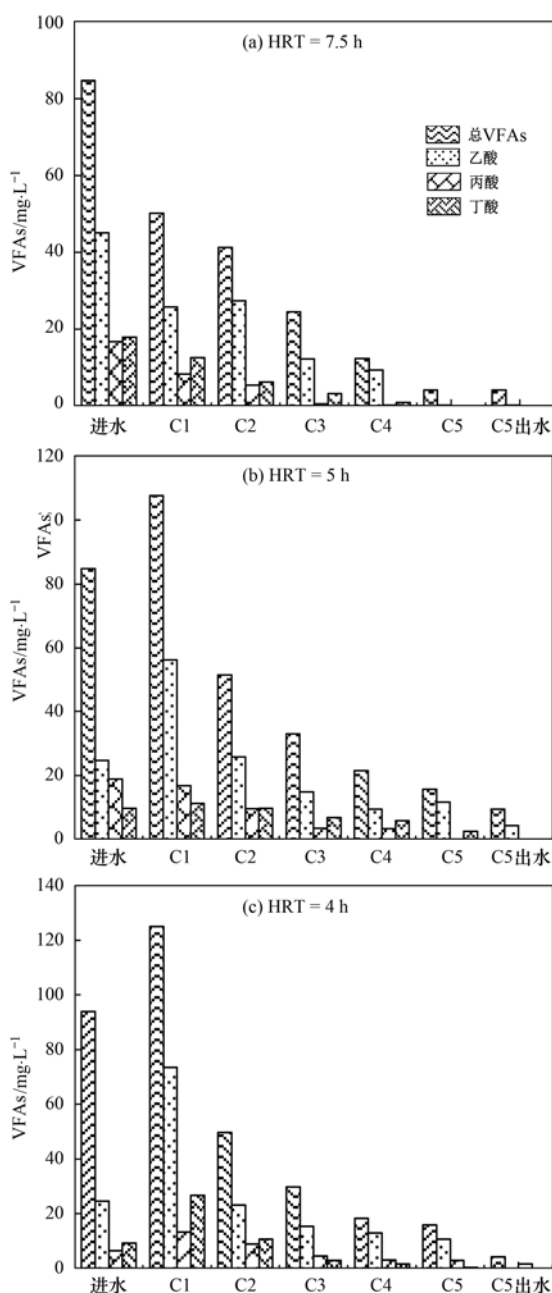


图5 不同 HRT 条件下 ABR 沿程 VFAs 种类变化趋势

Fig. 5 Variation of VFAs along the ABR under different HRT conditions

进行^[21].在后面隔室中总 VFAs 和乙酸浓度均呈梯度骤减,丙酸,丁酸则平缓递减,即均被产乙酸菌和产甲烷菌协同去除^[22].

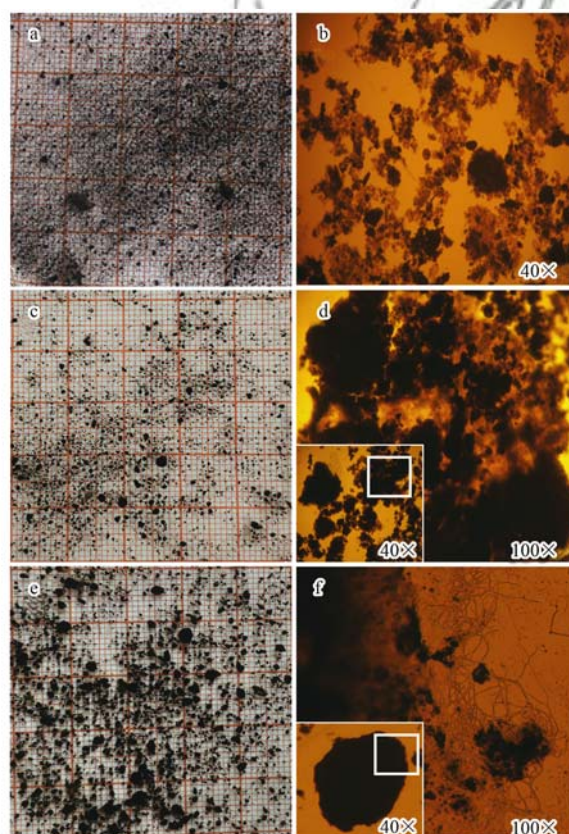
2.3 污泥特征变化

2.3.1 污泥形态及粒径分布

反应器中 C1 隔室颗粒污泥经历了微粒形成、颗粒固定、颗粒污泥成熟 3 阶段,如图 6 所示,与沈耀良^[23]的研究结果一致.就污泥形态而言,启动到第 35 d 时,在营养充足的环境中,大部分沉降性能良好的污泥稳定发育,絮体之间逐渐紧密[图 6(b)],形成颗粒污泥的前身.第 71 d 时,随着负荷提升增大了水流速度,在气体搅动双重作用下,增加了污泥

之间的碰撞摩擦^[24],絮体微粒间相互粘连,聚集成团[图 6(d)].第 105 d 时,已长成形状规则,边界清晰,表面光滑,结构密实的大颗粒.在 100 倍显微镜下观察[图 6(f)],可知厌氧颗粒污泥是由丝状微生物缠绕、包裹着的生物聚集体组成.

整个实验过程,颗粒污泥的粒径发生了显著变化,表 3 所列为 3 个时段沿程污泥粒径分布情况.由表可看,随着运行时间推移和负荷提升,反应器颗粒污泥粒径总体呈增大趋势,粒径沿反应器长度呈递减趋势.前 3 隔室平均粒径在 1 ~ 1.5 mm 之间,C1 颗粒化程度最高,大于 2 mm 的粒径占比为 8.67%,而后两隔室颗粒化程度较低.主要是因为 ABR 前端底物充足,微生物活性高,水流及产气双重搅动作用强,利于形成颗粒.后续隔室承载底物贫乏,颗粒化主要靠水力剪切作用,故颗粒化程度低.



图中污泥取自 C1,(a) ~ (b) 为第 35 d;(c) ~ (d) 为第 71 d;
(e) ~ (f) 为第 105 d;标尺纸刻度单位为 0.1 mm,
显微镜图标注为放大倍数

图6 污泥粒形态变化

Fig. 6 Changes in the sludge color and morphology

2.3.2 微生物形态

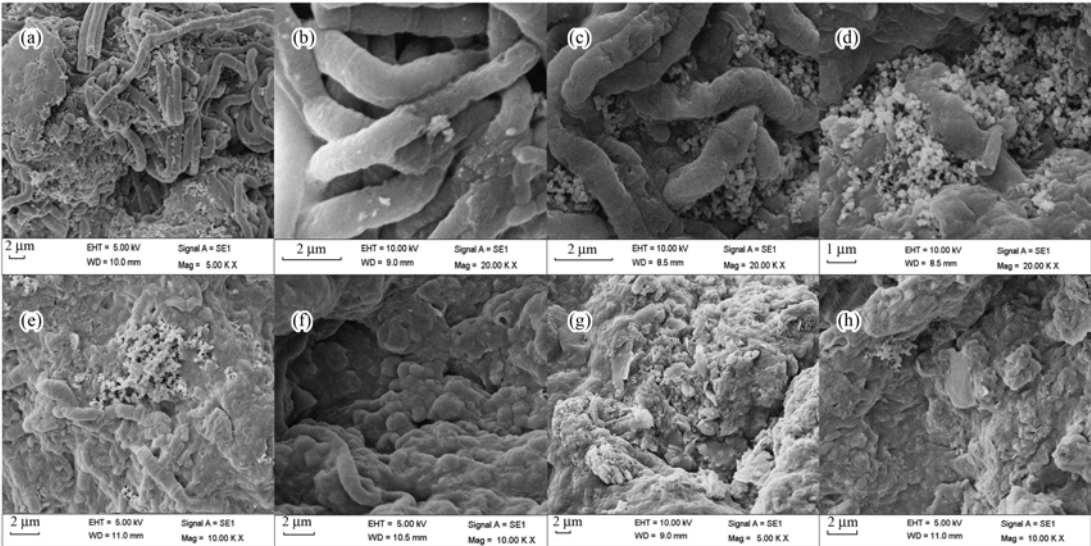
运行到 108 d,反应器不同隔室已出现微生物形态分化(图 7).SEM 图中可看出,C1 隔室污泥表面缠绕着大量丝状微生物[图 7(a)和 7(b)],相互交织构成了颗粒污泥的骨架.经分析,C1 隔室生化反应主要涉及到水解酸化及厌氧产气,故推测其为具

有水解酸化功能的丝状菌,周围分布的少量小球菌可能是产甲烷菌^[15, 25]. C2 主要以分散生长的多球菌为主[图 7(c)和 7(d)],C3 则以单球菌为主[图 7(e)和 7(f)],多球菌为辅.推测两种球菌可能为甲烷球菌和甲烷八叠球菌,起到清除有机酸的作

用^[10].此外,C2 存在大量丝状菌可能是产酸反应后推的结果.由于 ABR 后端长期处于物料短缺状态,C4 和 C5 隔室微生物少而单一[图 7(g)和 7(h)],分别出现了分散均匀的短杆菌和成团的多球菌,起到净化水质的作用.

表 3 各隔室颗粒污泥粒径分布

粒径分布 /mm	占污泥干重的质量分数/%														
	第 35 d					第 71 d					第 105 d				
	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5
<0.5	52.27	65	71.32	74.21	83.87	49.05	55.24	58.66	65.62	68.78	12.63	28.26	50	50.13	44.13
0.5~1	43.18	30	27.85	24.04	16.13	34.28	37.14	30.59	28.91	28.19	23.41	51.13	29.44	37.91	46.48
1~1.5	4.55	5	0.83	1.75	0	12.86	7.62	10.78	4.11	3.03	36.43	14.67	13.89	9.43	8.24
1.5~2	0	0	0	0	0	2.38	0	0	1.36	0	18.86	4.35	2.22	1.9	1.18
>2	0	0	0	0	0	1.43	0	0	0	0	8.67	1.59	4.44	0.63	0



(a)和(b)为 C1; (c)和(d)为 C2; (e)和(f)为 C3; g 为 C4; h 为 C5

图 7 第 108 d 不同隔室的微生物形态

Fig. 7 Microbial morphology of different compartments on day 108

3 讨论

有研究表明,HRT 是影响厌氧处理效果的重要运行参数,对于低负荷运行条件下的 ABR 尤为重要.合适的 HRT 可减少 ABR 中水力死区^[4],增大生物量与底物的接触几率,提高传质速率,整体提升反应器的运行效率^[26].因此在设计反应器时需注意平衡污泥负荷和反应器构造之间的关系.本实验 ABR 前 3 个隔室和后两个隔室物料不均衡现象比较明显,前端格室营养过度集中,污泥负荷适于生物繁殖,后端格室有机物匮乏,污泥活性不高,致使整体效率偏低,且占据空间大,给运行操作带来不便.因此在处理低负荷城市废水时,应当将工况调整至较短的 HRT,在减少 ABR 闲置区域的同时实现高效工艺.

ABR 具有抗冲击负荷能力强、各隔室生态位相

对稳定的特征.低负荷下 ABR 需要长期运行才能实现生态位分离^[15],短期内还无法将厌氧产酸区和产甲烷区完全分离.通常情况下,降解长链脂肪酸的产氢产乙酸反应不能自发进行,需要同产甲烷菌等耗氢菌协同互营生长^[27],而且 ABR 实现污泥颗粒化是必然趋势.因此,完整的颗粒内部以产甲烷菌为优势菌,外部以产酸菌为优势微生物,在胞外聚合物的包裹下形成内外互通的微生态系统^[28].前端隔室有机酸含量丰富,利于耗酸产氢产甲烷,产得的气泡滞留或黏附在颗粒上,较小的水力剪切作用无法将气泡及时脱离,加上颗粒化过程团聚体不够成熟密实,会有被气泡夹带浮在水面的可能.所以低负荷运行的反应器总体性能十分稳定,但存在污泥流失风险.

碳源是影响反硝化除磷过程的关键因素之一.不同碳源对 DPBs 的释磷速率与 PHA 合成种类有明显的差别,其中短链挥发性有机酸最佳^[29].据报道,

每去除 1 mg P 需要消耗 6 ~ 9 mg 的短链脂肪酸 (short chain fatty acid, SCFAs)^[30], 然而生活污水中不一定存在 SCFAs. 因此需要通过水解酸化作用将废水中复杂有机质降解转化, 为反硝化除磷提供优质碳源. 从本研究的沿程碳源转化趋势可知, 只有在 HRT 低于 7.5 h 时, VFAs 最低点位才移至 C1, C2 中 VFAs 含量足以供应 DPBs 处理生活污水中磷的基本代谢需求. 所以, ABR-MBR 反硝化除磷耦合工艺中, 硝化液的在各工况下最佳回流点位应设置在第二隔室.

4 结论

(1) 以生活污水为研究底物, 通过两步提升负荷的方式在 51 d 内成功启动 ABR. 在 HRT 为 10、7.5、5 和 4 h 时, 系统 COD 去除率一直稳定在 89% 以上, 出水 COD 低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 沿程分析知, C1 隔室在各阶段去碳贡献比重分别为 89%、78.56%、74.18% 及 58.91%, C2 去碳比重逐渐上升. 系统去碳主要功能区在前两隔室.

(2) 随着 HRT 缩短至 5 h, VFAs 最高点位同 pH 最低点位同步移至 C1. 组分分析知, 乙酸始终是 VFAs 的主要成分. 随着 HRT 从 7.5 h 缩至 4 h, 乙酸含量由 $25.78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $73.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占比由 51.37% 提升到 58.8%; 丙酸和丁酸总占比由 41.74% 降低到 31.94%.

(3) ABR 污泥颗粒化程度沿水流方向降低, 随运行时间延长而升高. 其中 C1 污泥颗粒化经历了微粒形成、颗粒固定、颗粒污泥成熟 3 阶段. 经 105 d 驯化培养, ABR 前 3 隔室颗粒粒径主要分布在 0.5 ~ 1.5 mm 之间, 后两隔室粒径平均约为 0.5 mm.

(4) 至 108 d, ABR 沿程实现一定程度的生物相分离. C1 以产酸丝状菌为主, 产甲烷菌为辅, C2 和 C3 分别以甲烷多球菌和单球菌为主, C4 以短杆菌为主, C5 无明显优势菌.

参考文献:

- [1] Barber W P, Stuckey D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review [J]. *Water Research*, 1999, **33**(7): 1559-1578.
- [2] Langenhoff A A M, Intrachandra, Stuckey D C. Treatment of dilute soluble and colloidal wastewater using an anaerobic baffled reactor: influence of hydraulic retention time [J]. *Water Research*, 2000, **34**(4): 1307-1317.
- [3] Manariotis L D, Grigoropoulos S G. Low-strength wastewater treatment using an anaerobic baffled reactor [J]. *Water Environment Research*, 2002, **74**(2): 170-176.
- [4] Li S N, Nan J, Gao F. Hydraulic characteristics and performance modeling of a Modified Anaerobic Baffled Reactor (MABR) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **284**: 85-92.
- [5] Khalekuzzaman M, Hasan M, Haque R, *et al.* Hydrodynamic performance of a hybrid anaerobic baffled reactor (HABR): effects of number of chambers, hydraulic retention time, and influent temperature [J]. *Water Science and Technology*, 2018, **78**(4): 968-981.
- [6] 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 等. ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 808-815.
Wei J M, Jiang Z Y, Cheng C, *et al.* Start-up and stable operation of ABR-MBR denitrifying phosphorus removal process [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 808-815.
- [7] 程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 等. 基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4282-4288.
Cheng C Y, Zhao S H, Lü L, *et al.* Optimization of denitrifying phosphorus removal performance based on ABR-MBR combined process [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4282-4288.
- [8] 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.
- [9] Nachaiyasit S, Stuckey D C. The effect of shock loads on the performance of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR). 1. Step changes in feed concentration at constant retention time [J]. *Water Research*, 1997, **31**(11): 2737-2746.
- [10] Barber W P, Stuckey D C. The influence of start-up strategies on the performance of an anaerobic baffled reactor [J]. *Environmental Technology*, 1998, **19**(5): 489-501.
- [11] Ghidotti M, Fabbri D, Torri C, *et al.* Determination of volatile fatty acids in digestate by solvent extraction with dimethyl carbonate and gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, **1034**: 92-101.
- [12] 赵诗惠. 基于短程反硝化除磷的 ABR-MBR 工艺处理生活污水微生物种群分析 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [13] 李军, 张帅, 甘一萍, 等. 停留时间对 ABR 污泥水解酸化系统影响研究 [J]. *北京工业大学学报*, 2011, **37**(12): 1856-1861.
- [14] 董凌霄, 秦宁. 厌氧折流板反应器 (ABR) 的启动研究 [J]. *陕西科技大学学报*, 2010, **28**(4): 56-60.
- [15] Krishna G V T G, Kumar P, Kumar P. Treatment of low-strength soluble wastewater using an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 166-176.
- [16] 宫小燕, 宋瑞平, 李国学, 等. 不同温度下有机负荷对厌氧折流板反应器污泥颗粒化的影响 [J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(5): 839-843.
Gong X Y, Song R P, Li G X, *et al.* Effect of organic load on sludge granulation in anaerobic baffled reactors at different temperatures [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, **3**(5): 839-843.
- [17] 龚浩. ABR 反应器处理生活污水的启动及颗粒污泥特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [18] Ahamed A, Chen C L, Rajagopal R, *et al.* Multi-phased anaerobic baffled reactor treating food waste [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **182**: 239-244.
- [19] Wang J L, Huang Y H, Zhao X. Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2004, **93**(2): 205-208.
- [20] 王祥锬, 闵祥发, 李建政, 等. 产氢产乙酸和产甲烷反应对

- 厌氧消化的限速作用[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 2997-3002.
- Wang X K, Min X F, Li J Z, *et al.* Rate-limiting of hydrogen-producing acetogenesis to anaerobic digestion compared with methanogenesis[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(10): 2997-3002.
- [21] Peng J F, Song Y H, Wang Y L, *et al.* Spatial succession and metabolic properties of functional microbial communities in an anaerobic baffled reactor [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, **80**: 60-65.
- [22] Gulhane M, Pandit P, Khardenavis A, *et al.* Study of microbial community plasticity for anaerobic digestion of vegetable waste in Anaerobic Baffled Reactor[J]. Renewable Energy, 2017, **101**: 59-66.
- [23] 沈耀良. ABR 反应器中颗粒污泥的微生态特性[J]. 中国沼气, 2005, **23**(1): 13-16.
- Shen Y L. Micro-ecological characteristics of granule sludge in Anaerobic Baffled Reactor (ABR) [J]. China Biogas, 2005, **23**(1): 13-16.
- [24] 李文哲, 鞠文聪, 刘爽, 等. 料液上升流速对厌氧产氢颗粒污泥的影响[J]. 东北农业大学学报, 2019, **50**(8): 78-86.
- Li W Z, Ju W C, Liu S, *et al.* Effect of liquid upflow velocity on the anaerobic hydrogen-producing granular sludge[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, **50**(8): 78-86.
- [25] Hassan S R, Dahlan I. Anaerobic wastewater treatment using anaerobic baffled bioreactor: a review [J]. Central European Journal of Engineering, 2013, **3**(3): 389-399.
- [26] Feng H J, Hu L F, Shan D, *et al.* Effects of operational factors on soluble microbial products in a carrier anaerobic baffled reactor treating dilute wastewater [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(6): 690-695.
- [27] Morgan-Sagastume F, Pratt S, Karlsson A, *et al.* Production of volatile fatty acids by fermentation of waste activated sludge pretreated in full-scale thermal hydrolysis plants [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3089-3097.
- [28] Baloch M I, Akunna J C, Kierans M, *et al.* Structural analysis of anaerobic granules in a phase separated reactor by electron microscopy [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(5): 922-929.
- [29] Lv X M, Shao M F, Li C L, *et al.* Bacterial diversity and community structure of denitrifying phosphorus removal sludge in strict anaerobic/anoxic systems operated with different carbon sources[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2014, **89**(12): 1842-1849.
- [30] Yuan H Y, Chen Y G, Zhang H X, *et al.* Improved bioproduction of Short-Chain Fatty Acids (SCFAs) from excess sludge under alkaline conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(6): 2025-2029.



CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)