

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/NH_4^+-N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干草耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响

吕亮^{1,2}, 尤雯^{1,2}, 张敏^{1,2}, 吴鹏^{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: 基于 ABR 工艺与 MBR 工艺的耦合联动, 以低 C/N 比生活污水为研究对象, 构建生物相分离、液相循环和功能联动的 ABR-MBR 新型组合工艺, 以实现稳定、高效、节能的多功能生物除污(去碳-脱氮-除磷)为目标, 通过优化水力停留时间(HRT)以获得 ABR 优质碳源提供与 MBR 短程硝化实现的最佳组合, 并进行了硝化液回流比为 100%、200%、300% 和 400% 时对反硝化除磷的影响研究. ABR-MBR 耦合工艺在不同条件下的运行研究结果表明, 将溶解氧(DO)维持在低浓度(0.3 ~ 1.0 mg·L⁻¹)下及 HRT 维持在较短(HRT_{MBR} = 3 h)情况下在 MBR 中实现了短程硝化, 亚硝酸盐积累率达到 60% 以上; 随着硝化液回流比的增大, ABR 中反硝化除磷效能先升高后下降, 以 300% 时反硝化除磷效果为最佳, 此时亦处于 MBR 短程硝化阶段, 实现了短程反硝化除磷(主要以 NO₂⁻ 作为电子受体的反硝化除磷), 且短程反硝化除磷在系统除磷中占据了主导作用.

关键词: ABR-MBR 工艺; 短程硝化; 反硝化除磷; 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(2018)03-1309-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201707197

Effect of NO_x⁻-N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process

LÜ Liang^{1,2}, YOU Wen^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, WU Peng^{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: Based on the coupling of the ABR process and the MBR process, a novel combined ABR-MBR process, including biophase separation, liquid circulation, and functional linkage, was developed to achieve simultaneous carbon, nutrient, and phosphorus removal when treating domestic wastewater with low carbon/nitrogen ratio and to obtain the best combination of ABR, providing a quality carbon source, and MBR, achieving shortcut nitrification by optimizing hydraulic retention time (HRT). The influence of NO_x⁻-N recycling ratio on nitrogen and phosphorus removal was investigated at NO_x⁻-N recycling ratios of 100%, 200%, 300%, and 400%, respectively. The experimental results under different conditions showed that the efficiency of denitrifying phosphorus removal in the ABR was found to increase with increasing NO_x⁻-N recycling ratio from 100% to 300% but decreased when the NO_x⁻-N recycling ratio was 400%. Shortcut nitrification was achieved by controlling the low dissolved oxygen (DO) concentration ranges from 0.3 to 1.0 mg·L⁻¹ with the short HRT of 3 h in the MBR reactor. The nitrite accumulation ratio was above 60%, when the NO_x⁻-N recycling ratio was 300%. Meanwhile, shortcut denitrifying phosphorus removal (where NO₂⁻-N mainly acted as the electron acceptor for denitrifying phosphorus removal) was achieved and played the dominant role in phosphorus removal.

Key words: ABR-MBR combined process; shortcut nitrification; denitrifying phosphorus removal; NO_x⁻-N recycling ratio

由氮和磷引起的水体富营养化已成为全世界急需解决的问题之一^[1]. 在传统生物脱氮除磷工艺中, 氮和磷的去除均需要有机底物, 导致反硝化菌和聚磷菌相互竞争碳源, 而生活污水在无外加碳源的情况下其浓度远远不够, 从而限制了传统脱氮除磷工艺的去除效率^[2,3]. 反硝化除磷菌(DPBs)的发现为这一矛盾提供了一条解决之道^[4]. 与聚磷菌(PAOs)的不同之处在于 DPBs 在缺氧环境下能利用 NO₃⁻/NO₂⁻ 而非 O₂ 作为电子受体进行吸磷^[5~7]. 因此, 可在碳源有限的条件下实现“一碳两用”^[8~10]. 短程反硝化除磷则是在短程硝化的基础

上实现反硝化除磷, 即以 NO₂⁻ 为主要电子受体进行缺氧吸磷, 这将进一步减少碳源需求和曝气能耗.

厌氧折流板反应器 (ABR) 多应用于高浓度污水的处理, 但有研究表明, ABR 反应器与其它好氧

收稿日期: 2017-07-23; 修订日期: 2017-08-29

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); 江苏省高校自然科学基金项目(16KJB610013); 苏州科技大学科研基金青年项目(XKQ201504)

作者简介: 吕亮(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: lvliangniu@outlook.com

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

反应器联合处理低浓度生活污水也能取得较好的处理效果^[11]. ABR 反应器在厌氧条件下运行可实现微生物相分离, 利用 ABR 反应器不同隔室内不同优势微生物种群在厌氧低耗的条件下实现对底物的不同阶段和不同程度的转化^[12], 为短程反硝化除磷提供优质碳源. 短程反硝化除磷需要一个好氧阶段来实现短程硝化以提供 NO_2^- 作为缺氧吸磷的电子受体. 近年来, 膜生物反应器(MBR)凭借其高效的生物截留作用及泥龄(SRT)与水力停留时间(HRT)完全分离的优势, 并随着制膜成本和运转费用的下降而被日趋广泛地得到应用^[13].

目前国内外报道的基于短程硝化的反硝化除磷处理低 C/N 生活污水的研究甚少, 短程反硝化除磷工艺能否真正运用于工程实际仍有待探索. 本文以生活污水为研究对象, 采用前期研究构建并取得良好脱氮除磷效果^[3,14,15]的 ABR-MBR 协同组合工艺, 在 MBR 实现短程硝化的基础上采用与前期研究不同的回流方式在前端 ABR 中实现短程反硝化除磷, 以期为低碳源城市污水的连续流处理系统提供一种运行方式, 并取得稳定的脱氮除磷效果.

1 材料与方法

1.1 试验装置

ABR-MBR 工艺试验装置如图 1. 本研究采用的 ABR-MBR 一体化反应器由 4 隔室 ABR 反应器和好氧 MBR 反应器组成, 均采用有机玻璃制成, 总有效容积为 10.8 L, ABR 反应器和好氧 MBR 反应器的有效容积分别为 7.2 L 和 3.6 L. ABR 第 1、2 隔室为厌氧区, 第 3、4 隔室为缺氧区, MBR 为好氧区. MBR 反应器采用间歇抽吸出水, 抽吸周期为 10 min(8 min 出水/2 min 反冲洗), 底部采用微孔曝气供氧. 膜组件采用 PVDF 柱状式中空纤维膜, 膜孔径为 0.2 μm , 采用真空压力表测定跨膜压差(TMP)以反映膜的污染情况, 一旦 $\text{TMP} \geq 30 \text{ kPa}$, 则对膜组件进行化学清洗.

试验用污水全部进入厌氧区. 为实现短程反硝化除磷, 设置两个回流. 一是污泥回流 R_1 : 将 ABR 第 4 隔室污泥回流至 ABR 第 2 隔室, 旨在利用优质碳源释磷; 二是硝化液回流 R_2 : 将 MBR 硝化液回流至 ABR 第 3 隔室, 使其处于缺氧环境而实现反硝化除磷. 采用蠕动泵控制进、出水和 R_1 、 R_2 , 并采用可编程逻辑控制器(PLC)控制水位的恒定并实现出水、冲洗等运行过程的自动控制.

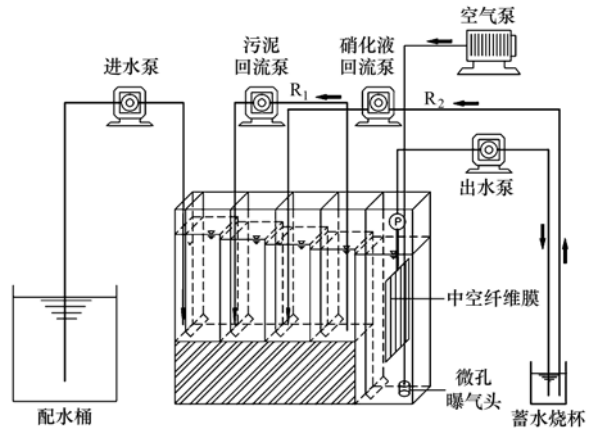


图 1 ABR-MBR 工艺试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the ABR-MBR process

1.2 试验用水和污泥

试验用水为: 生活污水: 人工配水 = 1: 1 的模拟生活污水, 模拟废水各项进水水质指标见表 1, 采用葡萄糖、淀粉和蛋白胨(浓度比为 9: 1: 1)及氯化铵、磷酸二氢钾适当补充、调节碳源和氮、磷. 生活污水取自苏州市某高校实际生活污水, 接种污泥取自苏州市某污水处理厂的二沉池及 A^2/O 好氧池污泥, 二沉池污泥中几乎不含亚硝酸盐及硝酸盐, 且有较好的脱氮除磷性能, 好氧池污泥属全程硝化污泥, 硝化性能良好. ABR 反应器各隔室接种污泥 MLSS 约为 $28\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MBR 反应器内接种污泥 MLSS 约为 $4\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 1 原水水质

Table 1 Characteristics of the raw wastewater

水质指标	范围	均值
$\text{COD}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	292.4 ~ 431.8	377.8
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	47.3 ~ 59.5	54.5
$\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0 ~ 0.01	0.004
$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.05 ~ 1.2	0.5
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6.7 ~ 9.4	8.1
pH	7.1 ~ 7.3	7.2

1.3 分析测定方法

水样经 0.45 μm 中性滤纸过滤后按照标准方法^[16]测定 COD 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$. 试验中检测项目及其分析方法详见表 2. 为方便数据分析, 定义亚硝酸盐积累率(nitrite accumulation rate, NAR)如下:

$$\text{NAR} = \frac{c(\text{NO}_2^- - \text{N})}{c(\text{NO}_2^- - \text{N}) + c(\text{NO}_3^- - \text{N})} \times 100\%$$

式中, $c(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 和 $c(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 是 MBR 反应器出水的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度, 单位 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 2 检测项目分析方法

Table 2 Testing equipment and analytical methods for water quality

检测项目	分析方法	检测项目	分析方法
COD	快速消解法	MLSS	重量法
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂光度法	SV%	30 min 沉降法
NO ₂ ⁻ -N	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法	pH	便携式 pH 计
NO ₃ ⁻ -N	紫外分光光度法	DO	便携式 DO 测定仪
PO ₄ ³⁻ -P	钼锑抗分光光度法	温度	温度计

1.4 试验方案

试验共分为 6 个阶段，第 1 阶段为启动阶段，中间 4 个阶段为改变硝化液回流比，第 6 阶段为在最优回流比条件下改变 MBR 水力停留时间来实现短程硝化，每个阶段均在系统稳定运行后进行采样分析。整个试验过程对反应器进行水浴加热，但冬季反应器内水温由于室温较低维持在 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，夏季反应器内水温则维持较高温度 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。好氧区采用低氧曝气方式运行，试验期间 DO 稳定控制在 $0.3 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同硝化液回流比对 COD 去除效能的影响

不同硝化液回流比条件下 COD 的去除效能见图 2。从中可知，当硝化液回流比从 100% 增至 400% 时，尽管进水 COD 浓度上下波动幅度颇大，但 ABR-MBR 系统对 COD 的去除效果一直很稳定，即 COD 的去除受 R_2 的影响不大。4 个硝化液回流比下，平均进水 COD 浓度为 382.96 、 376.31 、 387.57 和 $362.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，ABR 平均出水 COD 浓度分别为 48.34 、 54.6 、 53.57 和 $56.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，系统平均出水 COD 浓度分别为 30.71 、 35.03 、 37.27 和 $40.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，去除率分别为 92%、90.7%、90.4% 和 88.7%。COD 在 ABR 厌氧段降幅最大，主要是因为 ABR 第 1 隔室充分进行厌氧水解产生反硝化除磷菌 (DPB) 可利用的优质碳源 (VFA)，DPB 随即在 ABR 第 2 隔室利用其合成胞内碳源聚- β -羟基丁酸盐 (PHB) 颗粒，并以能量的形式贮存与 DPB 体内。ABR 第 2 隔室出水 COD 浓度维持在 $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上下，较低的浓度既为后续缺氧段吸磷提供了保障，也为 MBR 中自养型亚硝化菌的富集创造了有利条件^[17]；缺氧段 COD 降幅次之，反硝化菌优先以剩余 COD 为电子供体， NO_2^- -N/ NO_3^- -N 为电子受体进行反硝化作用，当可生物降解 COD 耗尽后，DPB 利用 PHB 进行同步反硝化脱氮除磷；好氧段 COD 降幅最小，主要用于维持好氧异养菌的新

陈代谢，另外，膜对 COD 具有一定的过滤截留作用^[18]。

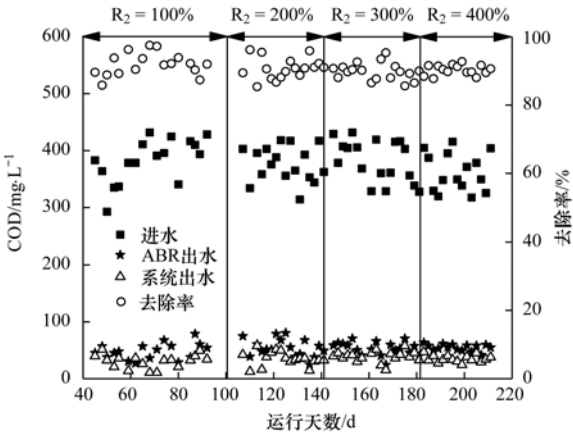


图 2 不同硝化液回流比下 COD 的去除效能

Fig. 2 Removal efficiency of COD with different NO_x^- -N recycling ratios

2.2 不同硝化液回流比对氮去除效能的影响

不同硝化液回流比下 TN 的去除效能如图 3 所示。从中可以看出，当硝化液回流比分别为 100%、200%、300% 和 400% 时，进水 TN 平均质量浓度维持在 $55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上下，出水 TN 平均质量浓度分别为 29.67 、 19.25 、 14.78 和 $11.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，TN 平均去除率分别为 46%、65%、72% 和 78%。在此过程中，TN 去除率呈逐渐增大的趋势，但增幅却呈递减规律。这与陈永志等^[19]关于 A^2/O -BAF 系统对 TN 去除率随内回流比增大而增加的结果相一致。氮在 ABR-MBR 系统缺氧段内的去除主要由两部分作用引起：①DPB 以胞内碳源 PHB 为电子供体，以 NO_x^- -N 为电子受体发生反硝化除磷而去除；②反硝化菌以外碳源 COD 为电子供体，以 NO_x^- -N 为电子受体发生反硝化脱氮而去除。前者引起的脱氮将在后续章节进行分析。当硝化液回流比较高时 (400%)，势必使得缺氧区 HRT 变短，导致只有一小部分反硝化菌能利用 COD 进行反硝化作用；其次，由于进水 C/N 比较低，缺氧段可利用的有机碳源有限，因此，碳源不足也影响了反硝化的进行；

再者,随着回流比的增大,硝化液中会携带大量DO,从而破坏缺氧环境,致使反硝化能力受到削弱.上述便是TN去除率增幅呈递减趋势的原因.

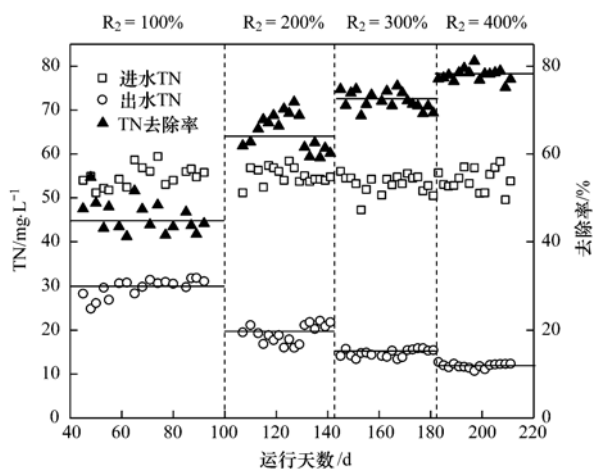


图3 不同硝化液回流比下TN的去除效能

Fig. 3 Removal efficiency of TN with different $\text{NO}_x\text{-N}$ recycling ratios

图4为不同硝化液回流比下氨氮,亚硝氮和硝氮的沿程转化规律.从中可见,系统ABR段对氨氮的去除占比很小,这一部分表现为被微生物利用进行细胞合成,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度出现降低主要是由于回

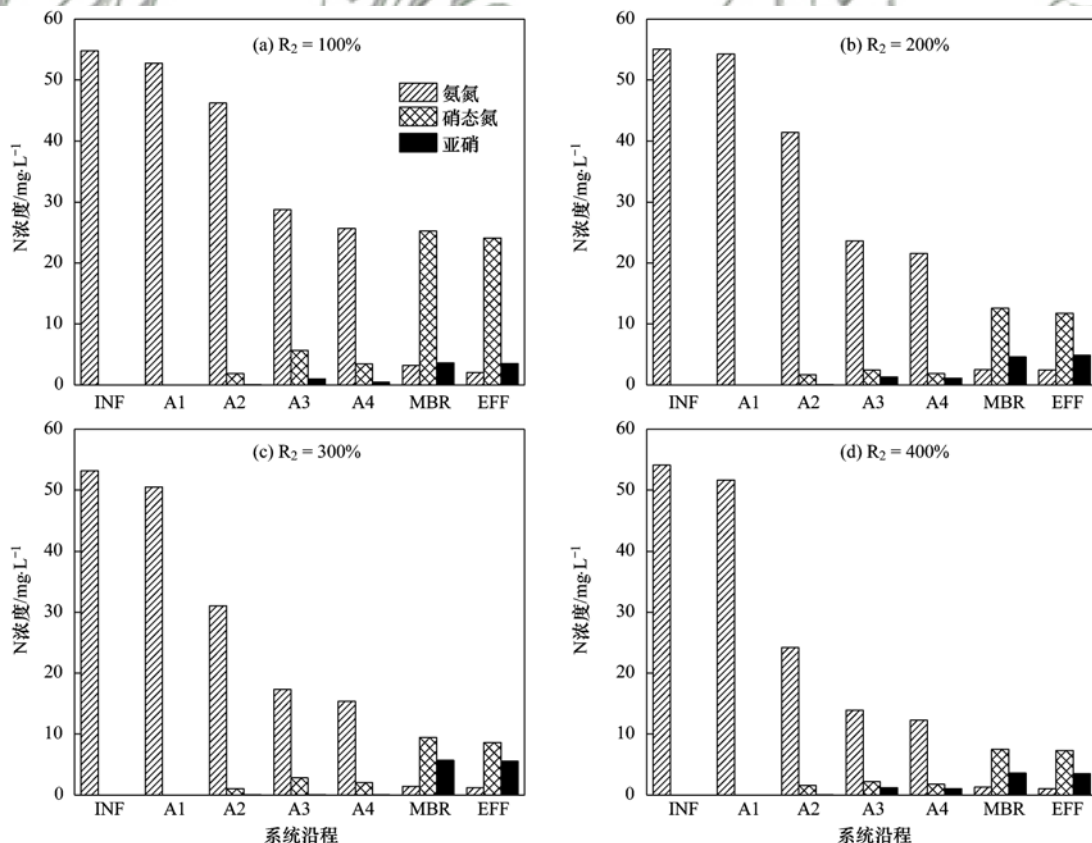


图4 不同硝化液回流比下氨氮,亚硝氮和硝氮的沿程转化规律

Fig. 4 Regularity of nitrogen transformation with different $\text{NO}_x\text{-N}$ recycling ratios

流液的稀释作用. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化主要发生在MBR中,MBR出水中的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 经过回流进入ABR缺氧段为反硝化除磷提供电子受体.

2.3 不同硝化液回流比对磷去除效能的影响

不同硝化液回流比下P的去除效能及其沿程变化规律见图5.从中可见,当硝化液回流比分别为100%、200%、300%和400%时,进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均质量浓度分别为7.98、8.41、8.18和7.92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,ABR出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均质量浓度分别为2.56、1.55、0.57和3.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,系统出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均质量浓度分别为1.80、1.09、0.45和2.14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,缺氧反硝化除磷率分别为67.9%、81.6%、93%和61.4%,系统除磷率分别为77.4%、87%、94.5%和72.9%,反硝化除磷量占系统除磷量的比例分别为87.7%、93.8%、98.4%和84.2%,呈先增大后减小的趋势,当硝化液回流比为300%时,系统除磷效果达到最佳,且反硝化除磷占比达到最大.

图6中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 系统沿程变化更加直观地表达了不同硝化液回流比对除磷性能地影响.首先,随着硝化液回流比增加(100%~300%),系统厌氧段(ABR第2隔室)释磷量从3.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升为7.7

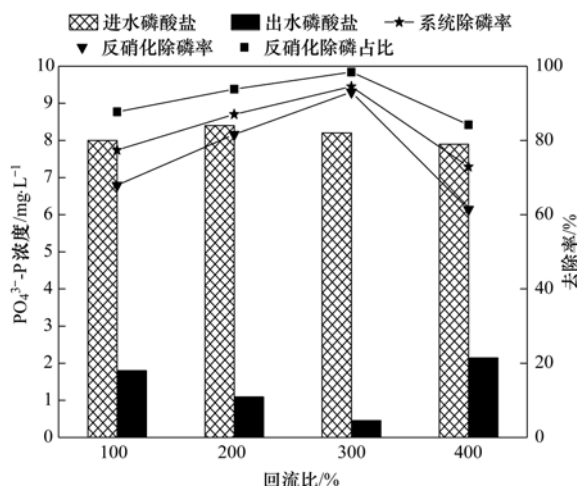


图5 不同硝化液回流比下P的去除效能

Fig. 5 Removal efficiency of P with different NO_x^- -N recycling ratios

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 缺氧吸磷量从 $8.96\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 $14.75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明在硝化液回流比较低的情况下, NO_x^- -N 是反硝化除磷的限制条件之一, NO_x^- -N 浓度的增加强化了 DPB 的代谢活性。其次, 当硝化液回流比继续增大到 400% 时, 厌氧释磷量亦继续增大, 达到了 $8.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这与王聪等^[20] A^2O -BCO 系统在硝化液回流比为 400% 时, 厌氧段释磷量减少, 但反硝化除磷量提高的结果相反, 主要是因为回流方式不同, 本研究的 ABR-MBR 系统中厌氧段受回流污泥中 NO_x^- -N 的影响不大, 且由于厌氧段碳源充足, 因此释磷量不减反增。但是由于缺氧段 NO_x^- -N 负荷过高, 大部分 NO_x^- -N 未经缺氧区反硝化除磷环节直接随水流走, 造成 NO_x^- -N 的“未脱先离”现象^[21], 导致吸磷量减少; 另外, 回流比的增大导致缺氧段的实际水力停留时间缩短, 大部分污泥无法经历完整的厌氧释磷和缺氧吸磷过程, 因此, 大部分 DPB 无法形成较高的吸磷动力, 使 DPB 的缺氧吸磷能力受到一定的影响^[22]; 除此之外, 回流比过大会将大量 DO 带入缺氧段, 从而破坏缺氧环境, 同样会抑制 DPB 的缺氧吸磷能力。上述原因最终导致了反硝化除磷效果在这个阶段并未像硝化液回流比较低时的几个阶段一样逐步上升, 而是有所下降。

2.4 硝化液回流比为 300% 时系统同步去碳脱氮除磷的效能分析

综上所述, 在硝化液回流比为 300% 的情况下, 反硝化除磷效果最佳。因此对这个条件进行深入分析, 通过改变 MBR 的 HRT 将其分为 3 个阶段。当硝化液回流比为 300% 时, 厌氧段平均释磷量为 $7.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 用于供给 DPB 释磷过程的 COD 平均

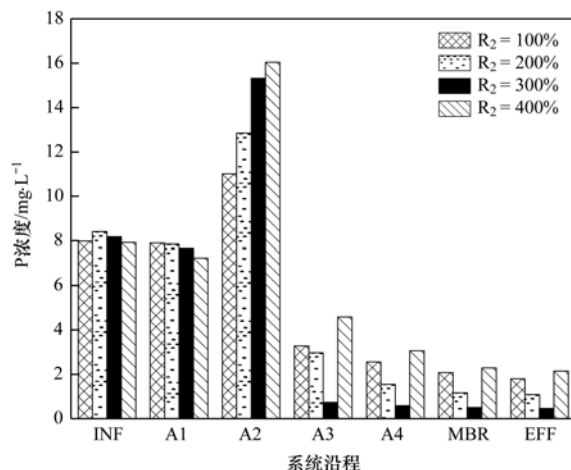


图6 不同硝化液回流比下P的沿程变化规律

Fig. 6 Evolution of P in the ABR-MBR system with different NO_x^- -N recycling ratios

值为 $137.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 占进水 COD 的比例最大, 说明有机物充足, 在厌氧段 DPB 可利用外碳源充分释磷, 系统释磷性能良好。由图 7(a) 可知, 当 $\text{HRT}_{\text{MBR}} = 3\text{ h}$ 时, MBR 中实现了短程硝化, 亚硝酸盐积累率达到 60%, 缺氧段出水 NO_2^- -N 浓度平均值低于 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而缺氧段出水 NO_3^- -N 在 $0.1 \sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 缺氧段出水 PO_4^{3-} -P 浓度平均值为 $0.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 系统出水 PO_4^{3-} -P 浓度平均值为 $0.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由此可见, 这个阶段的除磷主要是通过以 NO_2^- -N 为电子受体的反硝化除磷完成。Zeng 等认为^[23], 原水中 COD 含量较低及厌氧区亚硝酸盐的存在是导致 A^2O 工艺除磷效果恶化的主要原因之一, 本研究中短程硝化阶段厌氧释磷段 COD 含量较高且厌氧区几乎不存在亚硝酸盐, 因此获得了较高的短程反硝化除磷效果。由图 7(b) 和 7(c) 可知, 当 HRT_{MBR} 逐渐增大到 4 h、5 h 后, MBR 中短程硝化被破坏, 出水以 NO_3^- -N 为主, 这是因为随着 HRT_{MBR} 的增大, 硝化菌有足够的时间来完成对氨氮的硝化过程。厌氧段由于 COD 浓度变化不大, DPB 依旧能充分释磷, 但是缺氧段吸磷效果却逐渐下降, 导致出水 PO_4^{3-} -P 浓度有所上升。造成此种现象的原因除了缺氧的环境条件下吸磷效率原本就低, 主要还是 DPB 在第一阶段已被驯化成主要以 NO_2^- -N 为电子受体来实现反硝化除磷的菌种, 因此, NO_2^- -N 向 NO_3^- -N 的转化影响了 DPB 的缺氧吸磷能力; 除此之外, 碳源过剩也是原因之一, 过剩的有机物(尤其是 VFA)在缺氧段很容易被反硝化菌优先利用进行反硝化脱氮, 而消耗了本应用于 DPB 缺氧吸磷的电子受体, 从而降低缺氧吸磷量^[24]。

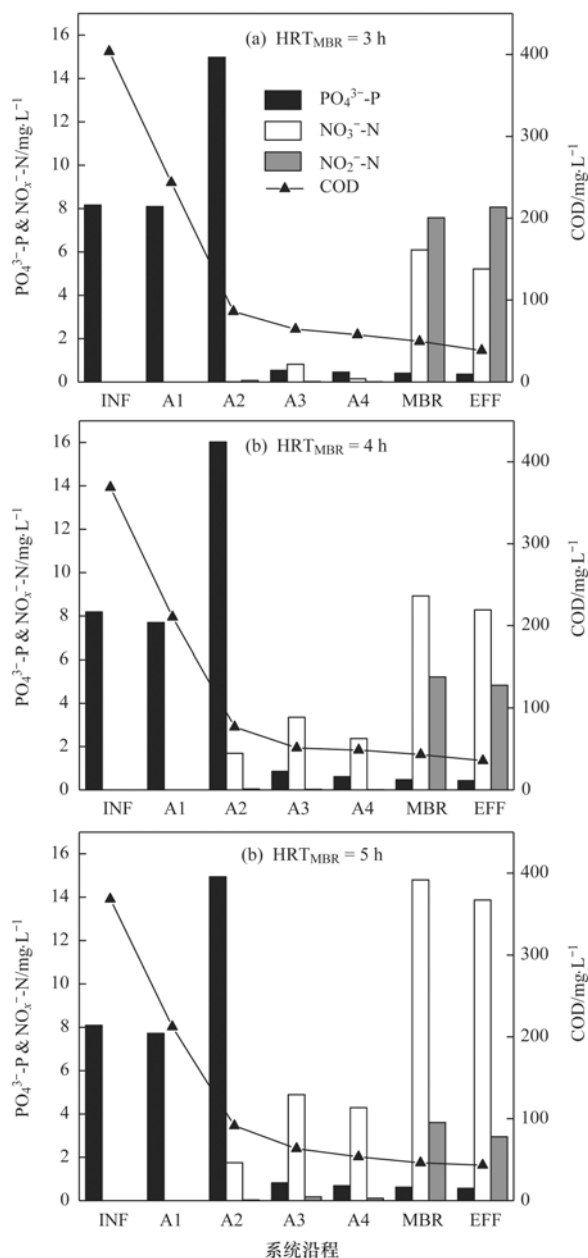


图7 在不同 HRT_{MBR} 下 PO_4^{3-} -P、 NO_x -N 和 COD 同步去除效能分析

Fig. 7 Removal efficiency of PO_4^{3-} -P, NO_x -N, and COD with different HRTs in the MBR process

3 结论

(1) 本研究构建的 ABR-MBR 组合工艺实现了对生活污水稳定的 COD、 NH_4^+ -N 去除效果。试验期间, 系统在不同硝化液回流比下出水 COD 浓度均低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 NH_4^+ -N 浓度均在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 去除率均达到了 90% 以上。随着硝化液回流比从 100% 增加到 400%, 出水 TN 平均质量浓度分别为 29.67、19.25、14.78 和 $11.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 平均去除率分别为 46%、65%、72% 和 78%。

(2) 系统实现了低 C/N 比条件下的反硝化除磷, 反硝化除磷量占系统除磷量的比例分别为 87.7%、93.8%、98.4% 和 84.2%, 反硝化除磷效果随硝化液回流比从 100% 增加到 400% 先升高后下降, 在 300% 时取得最优效果。

(3) 系统在硝化液回流比为 300%, $HRT_{MBR} = 3 \text{ h}$ 时, MBR 中实现了短程硝化, 亚硝酸盐积累率达到 60%, 缺氧段出水 PO_4^{3-} -P 浓度平均值为 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统出水 PO_4^{3-} -P 浓度平均值为 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这个阶段的除磷主要是通过以 NO_2^- -N 为电子受体的反硝化除磷完成。因此, 在处理低 C/N 比生活污水, 以 NO_2^- -N 为电子受体的反硝化除磷对有限碳源的利用率更高, 短程硝化更有利于磷的去除。

参考文献:

- [1] Xu X Y, Liu G, Zhu L. Enhanced denitrifying phosphorus removal in a novel anaerobic/aerobic/anoxic (AOA) process with the diversion of internal carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(22): 10340-10345.
- [2] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Improving the nitrogen removal efficiency of an A²/O based WWTP by using an on-line knowledge based expert system [J]. *Water Research*, 2002, **36**(8): 2109-2123.
- [3] Wu P, Ji X M, Song X K, et al. Nutrient removal from municipal wastewater and microbial community analysis of a combined ABR-MBR (CAMBR) process [J]. *CLEAN-Soil Air Water*, 2014, **42**(6): 753-759.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Hu Z R, Wentzel M C, Ekama G A. Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems [J]. *Water Research*, 2002, **36**(19): 4927-4937.
- [7] 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.
- [8] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. *Water Research*, 2001, **35**(16): 3968-3976.
- [9] Merzouki M, Bernet N, Delgenès J P, et al. Effect of prefermentation on denitrifying phosphorus removal in slaughterhouse wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(12): 1317-1322.
- [10] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, et al. Simultaneous nitrogen

- and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **27**(3): 191-196.
- [11] 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.
- [12] 沈耀良, 吴鹏, 王建芳, 等. 厌氧折流板反应器处理低浓度污水的研究与应用现状[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2015, **28**(2): 1-10.
- Shen Y L, Wu P, Wang J F, *et al.* State-of-the-art of anaerobic baffled reactor treating low-strength sewage [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology)*, 2015, **28**(2): 1-10.
- [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] 刘捷, 吴鹏, 沈耀良. CAB-MBR 复合反应器实现亚硝化-脱氮除磷的启动研究[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(8): 3247-3252.
- Liu J, Wu P, Shen Y L. Start-up of CAB-MBR nitrification-nitrogen and phosphorus removal [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(8): 3247-3252.
- [15] 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.
- [16] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater (17th ed.) [M]. Washington, DC: American Public Health Association, 1989.
- [17] 王亚宜. 反硝化除磷脱氮机理及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- Wang Y Y. The mechanism and processes study on denitrifying phosphorus removal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.
- [18] 刘鹏霄, 张捍民, 王晓琳, 等. MUCT-MBR 工艺反硝化除磷脱氮研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 1995-2000.
- Liu P X, Zhang H M, Wang X L, *et al.* Denitrifying phosphorus removal in MUCT-MBR [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(7): 1995-2000.
- [19] 陈永志, 彭永臻, 王建华, 等. 内循环对 A²/O-曝气生物滤池工艺脱氮除磷特性影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 193-198.
- Chen Y Z, Peng Y Z, Wang J H, *et al.* Effect of internal recycle ratio on nitrogen and phosphorus removal characteristics in A²/O-BAF process [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 193-198.
- [20] 王聪, 王淑莹, 张森, 等. 硝化液回流比对 A²/O-BCO 工艺反硝化除磷特性的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(11): 2844-2850.
- Wang C, Wang S Y, Zhang M, *et al.* Effect of nitrate recycling ratio on denitrifying phosphorus removal characteristics in A²O-BCO process [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(11): 2844-2850.
- [21] 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.
- [22] 徐伟锋, 顾国维, 张芳. 混合液回流比对 A/A/O 工艺反硝化除磷的影响[J]. 化工学报, 2007, **58**(10): 2619-2623.
- Xu W F, Gu G W, Zhang F. Effect of internal return ratio on denitrifying phosphorus removal in A/A/O process [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2007, **58**(10): 2619-2623.
- [23] Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Denitrifying phosphorus removal and impact of nitrite accumulation on phosphorus removal in a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A²/O) process treating domestic wastewater [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2011, **48**(2): 134-142.
- [24] 张为堂, 薛晓飞, 庞洪涛, 等. 碳氮比对 AAO-BAF 工艺运行性能的影响[J]. 化工学报, 2015, **66**(5): 1925-1930.
- Zhang W T, Xue X F, Pang H T, *et al.* Effect of C/N on performance of AAO-BAF process [J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(5): 1925-1930.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)