

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙,彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤,李金香,杨妍研,程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅,李洁,肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崴,徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚,朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎,孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡,毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明,崔丽娟,李伟,雷苗茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161)	《环境科学》征订启事 (4365)
信息 (4123,4132,4409)	

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究

程朝阳^{1,2}, 赵诗惠^{1,2}, 吕亮^{1,2}, 吴鹏^{1,2}, 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-MBR 一体化反应器, 以低 C/N 比生活污水为研究对象, 结合厌氧折流板反应器 (ABR) 微生物相分离的特性, 通过优化与 ABR 优质供碳和脱氮除磷相耦合的膜生物反应器 (MBR) 硝化液回流比以实现高效反硝化除磷, 并对 ABR-MBR 污泥回流比进行优化. 结果表明, 在 ABR 段有机负荷为 $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、系统的水力停留时间 (HRT) 为 9 h、泥龄 (SRT) 为 15 d, 系统获得最优的处理效果时的硝化液回流比和污泥回流比分别为 300% 和 100%. 其中 TN 和溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均去除率分别达 84% 和 94%, ABR 中反硝化除磷量可达系统总去除量的 87%, 平均出水 TN 和溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为 $12.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

关键词: ABR-MBR 组合工艺; 反硝化除磷; 硝化液回流比; 污泥回流比; 生活污水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4282-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201605222

Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process

CHENG Chao-yang^{1,2}, ZHAO Shi-hui^{1,2}, LÜ Liang^{1,2}, WU Peng^{1,2}, 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: An integrated process based on combination of the anaerobic baffled reactor (ABR)-membrane bioreactor (MBR) was adopted to treat domestic sewage with low C/N ratio. In order to realize the function of highly efficient denitrifying phosphorus removal, nitrate recycling ratio and sludge recycle ratio were optimized in this study. The results indicated that the optimized denitrifying phosphorus removal efficiency was achieved under the conditions of organic loading rate of $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ in ABR, total hydraulic retention time (HRT) of ABR-MBR at 9 h, the SRT at 15 d, sludge reflux ratio of 100%, and nitrate recycling ratios set to 300%. The average removal rates of TN and soluble $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were 84% and 94%, the amount of phosphorus removed by denitrifying accounted for 87% of the total phosphorus removed, and the average effluent concentration for TN and soluble phosphorus were $12.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $0.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively.

Key words: ABR-MBR combined process; denitrifying phosphorus removal; nitrate recycling ratio; sludge reflux ratio; domestic sewage

反硝化除磷工艺处理低 C/N 比污水时较传统脱氮除磷工艺具有较大的优势, 其解决了反硝化菌与聚磷菌竞争碳源的矛盾, 并实现“一碳两用”而节省碳源的目的, 同时降低了剩余污泥产量^[1~4]. 然而如何有效实现“一碳两用”, 以实现更稳定、更有效的去碳和反硝化除磷效果, 尚值得进一步研究.

本课题组前期将 ABR 反应器和 MBR 反应器进行优化组合后开展了大量关于去碳和反硝化除磷的研究, 并且获得了较好效果^[5~7]. 有研究表明, 连续流反硝化除磷工艺中, 厌氧段释磷与缺氧段吸磷均受硝化液回流比及污泥回流比影响, 而恰当的硝化液回流比及污泥回流比对反硝化除磷工艺处理低 C/N 比污水突出“一碳两用”优势至关重要. 为此, 本研究构建了 ABR-MBR 组合协同工艺, 利用 ABR

在低耗并实现有效去碳的同时, 提供反硝化除磷所需优质碳源, 并以 MBR 硝化液提供电子受体以强化反硝化除磷作用^[8,9], 同时基于 ABR 反应器微生物相分离的特性^[10,11], 通过调控硝化液回流比及污泥回流比, 以期实现高效反硝化除磷, 为基于反硝化除磷特性的 ABR-MBR 组合工艺实际应用奠定基础.

收稿日期: 2016-05-24; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578353); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (12KJA610002); 江苏高校优势学科建设工程项目; 环境工程江苏省重点专业类项目; 江苏省 2015 年度普通高校研究生实践创新计划项目 (SJLX15_0636); 苏州科技学院研究生科研创新计划项目 (SKCX15_032); 苏州科技学院科研基金青年项目 (XKQ201504); 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)

作者简介: 程朝阳 (1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: 13584804542@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ylshen@mail.usts.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究装置与方案

本研究采用自行设计的 ABR-MBR 一体化反应器(见图 1),由 5 隔室 ABR 反应器和好氧 MBR 反应器组成,ABR 反应器和 MBR 反应器的有效容积之比为 2:1,总有效容积为 12 L. 研究过程中,MBR 内溶解氧(DO)控制为 2~3 mg·L⁻¹,反应器内温度控制在(30±1)℃. MBR 反应器间歇抽吸出水,抽吸周期为 10 min(8 min 抽吸出水和 2 min 反冲洗). 系统采用可编程逻辑控制器(PLC)对水位恒定、出水泵和反冲洗泵的启闭自动控制. 研究用膜组件为 PVDF 帘式中空纤维膜,膜孔径为 0.2 μm,过滤面积为 0.2 m²,采用真空压力表测跨膜压差(TMP)来反映膜的污染状况,当 TMP 增至 30 kPa 时对膜组件进行化学清洗.

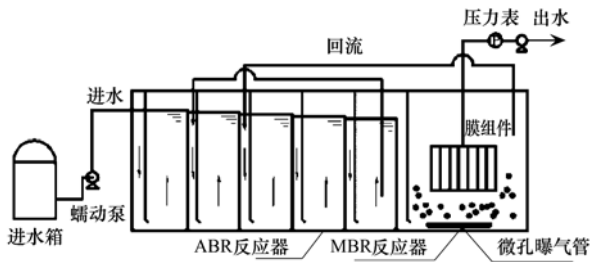


图 1 ABR-MBR 反应器

Fig. 1 Schematic diagram of ABR-MBR reactor

将 MBR 硝化液回流至 ABR 第 3 隔室,其回流比(R_1)分别设置为 100%、200%、300% 和 350%;设置 ABR 第 5 隔室污泥回流至 ABR 第 2 隔室,其污泥回流比(R_2)为 100%. 本研究在对 R_1 优化后,在最优 R_1 条件下对 R_2 进行优化,设置 3 个不同 R_2 ,分别为 80%、100% 和 120%. 研究期间 ABR-MBR 组合工艺总 HRT 为 9 h,控制泥龄为 15 d.

1.2 试验污水与污泥

为减小水质波动对本研究的影响,试验进水为模拟生活污水(生活污水:人工配水为1:1),表 1 所示为进水水质,主要碳源和氮源分别采用淀粉和氯化铵,污水所含营养盐及其浓度: H_3BO_3 30 mg·L⁻¹、 $ZnCl_2$ 25 mg·L⁻¹、 $CaCl_2$ 30 mg·L⁻¹、 $AlCl_3$ 25 mg·L⁻¹、 $CuCl_2$ 25 mg·L⁻¹、 $NiCl_2$ 25 mg·L⁻¹ 和 EDTA 40 mg·L⁻¹;微量元素: $Na_2SeO_3 \cdot 5H_2O$ 25 mg·L⁻¹、 $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ 25 mg·L⁻¹、 $FeCl_2 \cdot 6H_2O$ 25 mg·L⁻¹、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 30 mg·L⁻¹、 $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 25 mg·L⁻¹、 $MnSO_4 \cdot H_2O$ 25 mg·L⁻¹ 和 $NaMoO_4 \cdot 2H_2O$

25 mg·L⁻¹. ABR 及 MBR 接种污泥均取自苏州市某城市污水处理厂,研究开始前 ABR 各隔室 MLSS 约为 22 000 mg·L⁻¹,MBR 池内 MLSS 约为 4 000 mg·L⁻¹.

表 1 进水水质/mg·L⁻¹

Table 1 Water quality of influent/mg·L ⁻¹				
种类	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
浓度	463~525	70~76	75~86	6.5~7.5
平均浓度	495	75	83	6.6

1.3 分析方法

本研究中,各常规分析指标均按国家标准方法测定^[12],COD 采用快速消解法;溶解性 PO_4^{3-} -P 采用钼锑抗分光光度法;TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; NO_3^- -N: 紫外分光光度法; NH_4^+ -N 采用纳氏试剂分光光度法; NO_2^- -N 采用紫外分光光度法;MLSS 采用烘干称重法;VFA 采用分光光度法.

2 结果与讨论

2.1 优化 R_1 过程 COD 去除效能分析

ABR 段 HRT 为 6 h,ABR 段有机负荷为 2.0 kg·(m³·d)⁻¹左右,在不同 R_1 条件下,ABR-MBR 组合工艺对 COD 去除效果如图 2 所示,进水稳定在 500 mg·L⁻¹左右,ABR 出水稳定在 80 mg·L⁻¹以下,最终出水 COD 稳定在 50 mg·L⁻¹左右,去除率稳定在 90% 左右. 这表明有机物在 ABR 段得到充分利用. 本研究对 COD 的去除效果较文献[13]中 A²/O-MBR 工艺有明显提高,这可能是由于本研究前期在 ABR 前端隔室驯化有成熟的厌氧颗粒污泥,从而进一步巩固了 COD 的去除效果. 与传统脱氮除磷工艺对 COD 去除途径的不同之处在于,本研究中 ABR 第 2 隔室富集的反硝化除磷菌(DPB)充分利用经 ABR 第 1 隔室充分水解产生的优质碳源合成胞内多聚物(PHB)来实现 COD 的利用,PHB 在缺氧段作为反硝化除磷菌的电子供体,实现一碳两用. 在本研究中,前置 ABR 在改善碳源质量以供厌氧释磷所需,又能够有效降低厌氧出水 COD 浓度,利于后续 MBR 内进行充分的硝化反应.

2.2 优化 R_1 过程反硝化除磷效能分析

2.2.1 厌氧释磷情况分析

厌氧段能否充分释磷是决定反硝化除磷效果的关键因素之一^[14]. VFA 是可供反硝化除磷菌利用的唯一碳源,其他有机碳源只有经过水解酸化为 VFA 才能被利用. 本研究在 ABR 第 2 隔室为 DPB

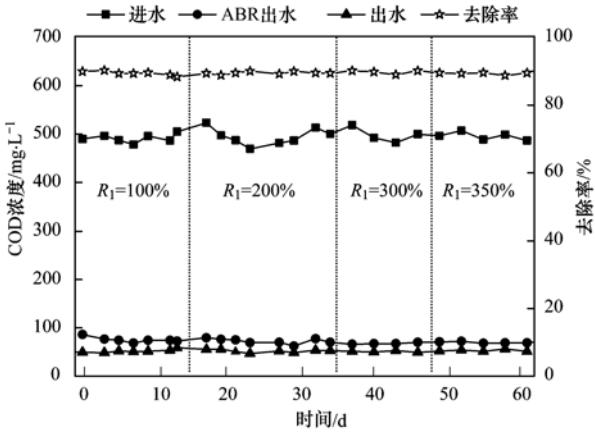


图2 不同硝化液回流比下 COD 的去除情况
Fig. 2 Removal characteristics of COD under different nitrate recycling ratios

创造适宜条件,充分吸收经 ABR 第 1 隔室水解产生的优质碳源合成 PHB 并完成磷的释放. 而 R_1 过大会影响厌氧段释磷量,为获得不影响厌氧段释磷的最优回流比,对不同 R_1 条件下 ABR 第 2 隔室释磷情况进行了研究.

图 3 为不同 R_1 下各隔室溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 变化情况,ABR 第 2 隔室出水溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度明显升高,可见 ABR 第 2 隔室发生了厌氧释磷. 在前期研究基础之上,基于优质碳源提供^[15],本研究中 ABR 段 HRT 为 6 h,ABR 第 1 隔室出水 VFA 浓度稳定在 $58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,ABR 第 1 隔室改善碳源质量后供 DPB 释磷所需. 由图 4 知当 R_1 为 100% 和 200% 时,ABR 第 2 隔室平均释磷量分别为 $9.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $9.83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R_1 的增大未影响厌氧段释磷过程. ABR 第 3 隔室出水 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度几乎为 0,从 MBR 池回流至 ABR 第 3 隔室的硝态氮在第 3 隔室基本消耗殆尽,在 ABR 第 2 隔室无反硝化菌与 DPB 竞争碳源. 但当 R_1 为 300% 时,ABR 平均出水 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度为 $1.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,ABR 第 2 隔室平均释磷量降为 $7.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 当 R_1 增大为 350% 时,平均释磷量降

为 $3.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,ABR 平均出水 $\text{NO}_x\text{-N}$ 浓度达 $6.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. ABR 第 2 隔室释磷量在 R_1 为 300% 和 350% 时大幅减少,这是由于在此回流比下 ABR 第 5 隔室大量未利用完的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 随污泥回流至 ABR 第 2 隔室与 DPB 竞争 VFA,且进入 ABR 第 2 隔室硝态氮量随着 R_1 增大而增大,而厌氧段存在 $\text{NO}_x\text{-N}$,反硝化菌会与 DPB 争夺优质碳源,优先进行反硝化,使得 ABR 第 2 隔室可供 DPB 进行厌氧释磷的 VFA 量减少; 另一方面,由表 2 知在 R_1 为 100%、200%、300% 和 350% 时,释放 1 mg 磷需要 VFA 的量分别为 5.88、5.55、7.14 和 20 mg,由于在 R_1 为 300% 和 350% 时进入第 2 隔室的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 优先利用 VFA 进行反硝化,使得 R_1 为 300% 和 350% 时释放 1 mg 磷需要 VFA 的量大幅升高. 唐旭光等^[16]以 SBR 反应器研究实际生活污水发现每释放 1 mg 磷需耗 1.401 mg VFA,由于本研究中 ABR 第 2 隔室存在产甲烷菌、反硝化菌等利用 VFA 进行产甲烷、反硝化作用,使得本研究中此值明显高于其他研究. 可见本研究中, R_1 设置为 200% 以下时,厌氧段释磷才能有效进行.

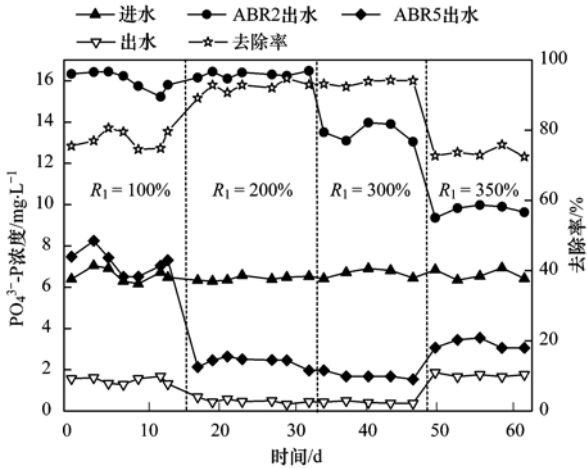


图3 不同硝化液回流比下磷的去除情况
Fig. 3 Removal characteristics of P under different nitrate recycling ratios

表 2 不同硝化液回流比下释放单位磷所需 VFA 量

Table 2 Phosphorus released per VFA utilized under different nitrate recycling ratios

阶段	项目	$R_1 = 100\%$	$R_1 = 200\%$	$R_1 = 300\%$	$R_1 = 350\%$
ABR2	释放单位磷所需 VFA 量/ $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$	5.88	5.55	7.14	20

2.2.2 缺氧吸磷情况分析

连续流反硝化除磷工艺中,DPB 在缺氧段利用厌氧段吸收 VFA 合成的 PHB 作为电子供体,以硝化段提供的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 作为电子受体,进行同时反硝化

吸磷反应. 在不影响厌氧释磷情况下,缺氧段反硝化吸磷量的多少与缺氧段硝酸盐负荷紧密相关^[17].

本研究中,ABR 第 3 隔室及其后续隔室利用 MBR 回流硝化液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 作为电子受体进行缺氧

吸磷. 溶解性 PO_4^{3-} -P浓度在 ABR 第 2 隔室达到最高值,在 ABR 第 3 隔室明显减少,一方面是回流液稀释作用,更主要的是在 ABR 第 3 隔室发生了缺氧吸磷. 由图 4 可见,在 R_1 为 100%、200%、300% 和 350% 时,ABR 第 2 隔室平均释磷量依次为 9.41、9.83、7.03 和 3.18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,ABR 平均缺氧吸磷量依次为 8.8、13.9、11.79 和 6.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,ABR 缺氧吸磷量随 R_1 的增加先增加而后减少. 在 R_1 为 100% 时,ABR 缺氧段吸磷量较小,平均出水溶解性 PO_4^{3-} -P浓度为 1.49 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反硝化除磷量仅占除总磷量的 55%,此时 ABR 第 3 隔室出水 NO_3^- -N浓度几乎为 0,可见 R_1 过小使 ABR 第 3 隔室无充足 NO_3^- -N供 DPB 利用,影响了对磷的去除. 在已完成充分释磷的情况下,缺氧吸磷彻底程度取决于缺氧段 NO_3^- -N浓度^[18]. 当 R_1 为 200% 时,ABR 缺氧段吸磷量上升明显,平均出水溶解性 PO_4^{3-} -P浓度为 0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反硝化除磷量占总除磷量的 85%. 当 R_1 为 300% 时,ABR 第 2 隔室释磷量与 ABR 缺氧吸磷量均有所减少,ABR 平均出水 NO_3^- -N浓度达 1.54 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均出水溶解性 PO_4^{3-} -P浓度降至 0.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反硝化除磷量达总除磷量的 87%.

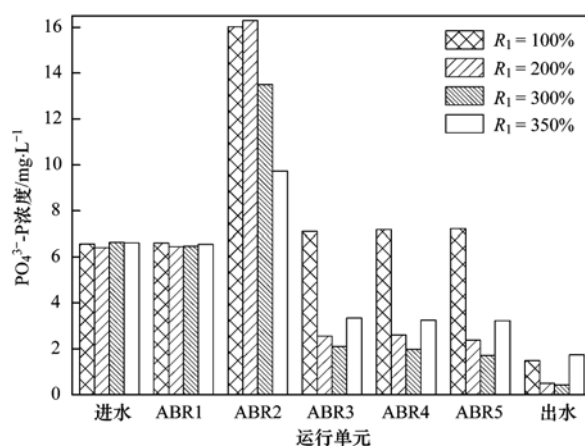


图 4 不同硝化液回流比下各隔室溶解性 PO_4^{3-} -P的变化

Fig. 4 Change of soluble PO_4^{3-} -P in various compartments under different nitrate recycling ratios

王晓莲等^[19]认为当缺氧区出水 NO_3^- -N浓度控制在 1 ~ 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时反硝化除磷效果好; Kuba 等^[20]认为适当增加 NO_3^- -N浓度有利于 DPB 的生长. 可见 MBR 段为 ABR 第 2 隔室提供适量电子受体尤为重要. 在 R_1 较低时, NO_3^- -N不足会成为反硝化除磷的限制因素,此时进入 ABR 第 3 隔室 NO_3^- -N随着 R_1 增大而增多,反硝化除磷比例会随之增大.

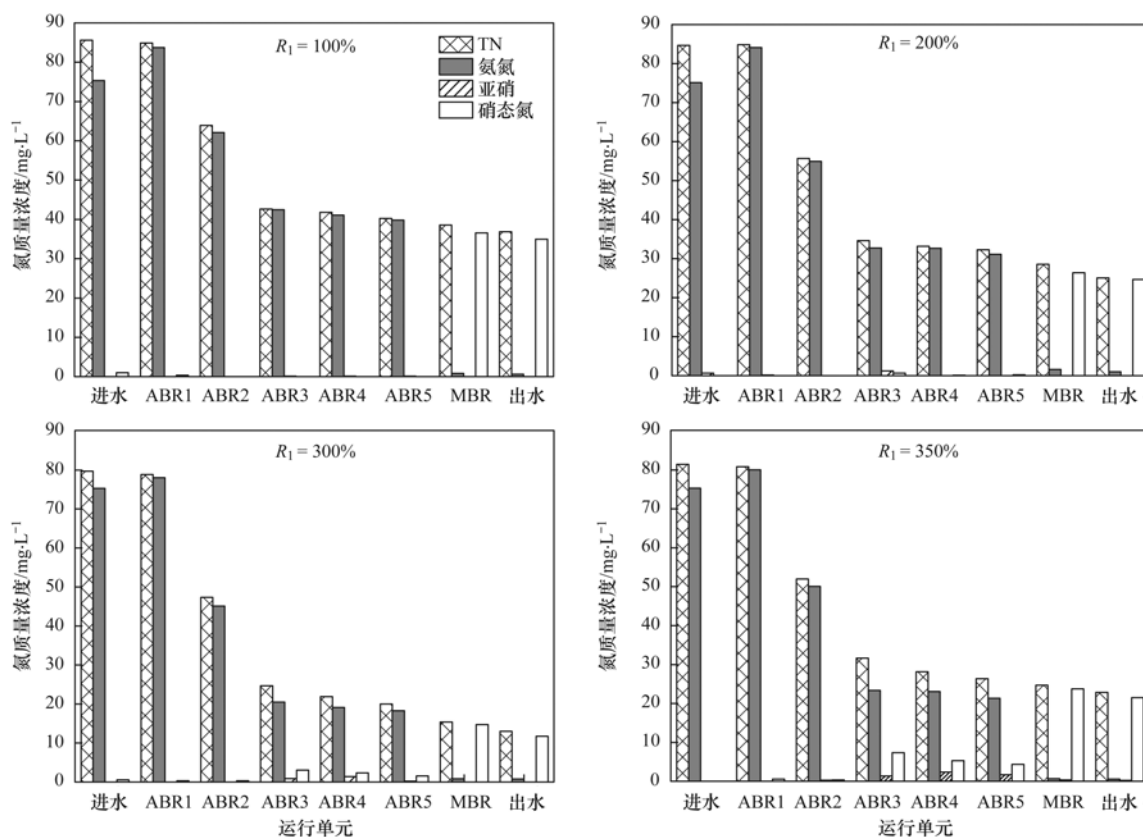


图 5 不同硝化液回流比下氮的转化规律

Fig. 5 Profile of nitrogen transformation under different nitrate recycling ratios

但当 R_1 增至 350% 时, ABR 平均缺氧段吸磷量反而减少至 $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均出水溶解性 $\text{PO}_4^{3-} \cdot \text{P}$ 浓度为 $1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这是由于大量 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 随污泥回流至 ABR 第 2 隔室, 影响了厌氧释磷, 导致 DPB 未储存足够多的 PHB 在 ABR 第 3 隔室来完成过程吸磷, 大部分的 DPB 无法形成较高的吸磷动力, 从而影响 DPB 反硝化除磷能力. 本研究表明, R_1 设置为 200% 以上时, 缺氧段才有足够的电子受体完成反硝化除磷.

2.3 优化 R_1 过程同步脱氮除磷效能分析

反硝化除磷工艺主要是通过 DPB 在缺氧段利用 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 作为电子受体进行缺氧吸磷来完成对 TN 的去除; 对磷去除主要是通过 DPB 缺氧段利用硝态氮氧化污泥体内 PHB, 并过量吸收溶解性 $\text{PO}_4^{3-} \cdot \text{P}$ 合成体内聚磷来实现.

图 5 为不同硝化液回流比下氮的转化规律, 进水 TN 主要以 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ 为主, 在 ABR 第 2 隔室 TN 和 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ 浓度降低主要由稀释作用, ABR 第 3 隔室及后续隔室利用回流硝化液中 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 作为电子受体进行反硝化除磷, 脱氮效率由反硝化除磷情况决定. 在 R_1 分别为 100%、200%、300% 和 350% 时, 平均 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ 去除率稳定在 95% 以上, 平均出水 TN 浓度分别为 36.82、25.06、12.98 和 22.82 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 去除率分别为 57%、70%、84% 和 71%, R_1 从 100% 增至 300% 过程中, TN 去除率呈升高趋势. 可见 R_1 较低时, 硝酸盐成为反硝化的限制因子. 但 R_1 增至 350% 时, TN 去除率却降至 71%, 由于回流到缺氧段的硝酸盐负荷近于饱和, 而缺氧段可利用的有机碳源有限, 因此, 碳源不足成为影响反硝化效果的主要原因, 造成硝酸盐的“穿透现象”^[21], 从而导致反硝化除磷对脱氮贡献较小, 影响了本研究中 TN 的去除.

本研究中获得工艺最佳同步反硝化除磷效果时的 R_1 为 300%, 此时平均出水 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ 、TN 和溶解性 $\text{PO}_4^{3-} \cdot \text{P}$ 分别稳定在 0.73、12.98 和 0.43 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. R_1 过低使 ABR 第 3 隔室中 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 负荷过低, 即无充足电子受体供 DPB 利用, 从而影响除磷效果; 另一方面, 大部分 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 未经缺氧区反硝化除磷环节直接随出水流出, 这种“未脱先离”的现象致使 TN 去除率不高. 而 R_1 过大使 ABR 第 3 隔室及后续隔室 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 过剩, 反硝化菌会大量消耗 ABR 第二隔室的 VFA, 导致释磷不充分, 从而影响工艺的反硝化除磷效果; 另一方面, 硝化液携带的 DO 随 R_1 增大

而增多, 破坏了缺氧环境, 反硝化能力被削弱, 致使 TN 去除率不高^[22].

2.4 优化 R_2 过程去碳脱氮除磷效能分析

在最优 R_1 为 300% 下, 设定 3 个不同 R_2 : 80%、100% 和 120%, 图 6 为不同 R_2 下各污染物的去除情况, 出水 COD 浓度稳定在 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, R_2 变化未影响本工艺对 COD 的去除. 在 R_2 为 80%、100% 和 120% 时, 出水 TN 分别为 13.46、12.98 和 11.68 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着 R_2 的增大, 出水 TN 浓度呈下降趋势. 随着 R_2 的增大, 更多 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 在 ABR

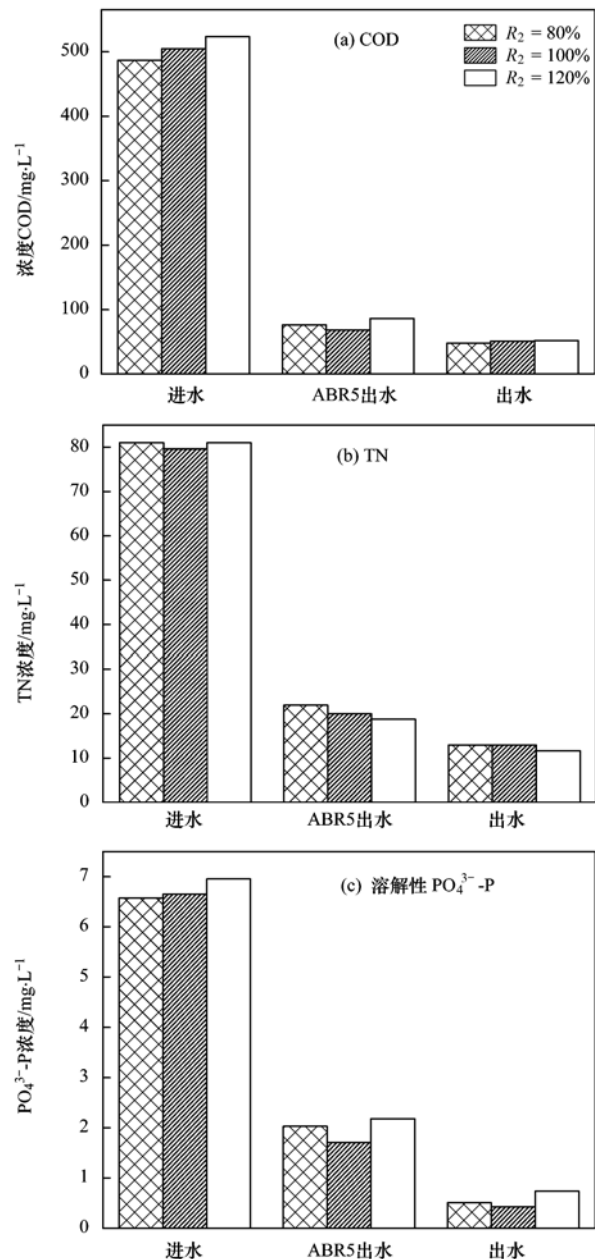


图 6 不同污泥回流比下 COD、TN 和溶解性 $\text{PO}_4^{3-} \cdot \text{P}$ 去除情况

Fig. 6 Removal of COD, TN and soluble $\text{PO}_4^{3-} \cdot \text{P}$ under different sludge recycle ratios

第 2 隔室进行反硝化,故在 R_1 保持不变时,出水 TN 浓度随 R_2 增大而减小。污泥回流是导致厌氧段反硝化菌与 DPB 产生碳源竞争矛盾的主要原因, R_2 的大小直接影响 ABR 第 2 隔室中释磷量从而影响反硝化除磷效果。当增大 R_2 至 120% 时,ABR 出水溶解性 PO_4^{3-} -P 浓度升高至 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这可能是由于随 R_2 增大,更多的 NO_3^- -N 回流至 ABR 第 2 隔室优先进行反硝化,使 DPB 内储存的内碳源的量较少,导致缺氧吸磷减弱,从而造成除磷效果下降。较大的 R_2 必然会对除磷造成负面影响,在保证 TN 有效去除的前提下,无需维持较大的 R_2 。因此,本研究中 R_2 为 100% 时获得最佳反硝化除磷效果。

3 结论

(1) 本研究构建的 ABR-MBR 一体化反应器,基于 ABR 优质供碳与 MBR 硝化液回流比相耦合,实现了稳定有效的反硝化除磷效果。该工艺在优化的硝化液回流比和污泥回流比条件下,可实现对生活污水 COD、 NH_4^+ -N 的稳定有效去除,系统出水 COD 和 NH_4^+ -N 浓度分别在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

(2) 在污泥回流比为 100%, 硝化液回流比从 100% 增大至 350% 时,ABR 第 2 隔室释放 1 mg 磷需要 VFA 的量分别为 5.88、5.55、7.14 和 20 mg, ABR 为厌氧释磷提供了足够的优质碳源。

(3) 在污泥回流比为 100%, 硝化液回流比从 100% 增大至 350% 时,ABR 缺氧吸磷量随硝化液回流比的增大先增加后减少,平均缺氧吸磷量依次为 8.8、13.9、11.79 和 $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均出水溶解性 PO_4^{3-} -P 浓度分别为 1.49、0.5、0.43 和 $1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(4) 在 ABR 段有机负荷为 $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、系统的 HRT 为 9 h、SRT 为 15 d,硝化液回流比和污泥回流比分别为 300% 和 100% 时,ABR-MBR 组合工艺获得工艺最佳反硝化除磷效果,TN 和溶解性 PO_4^{3-} -P 平均去除率分别达 84% 和 94%,反硝化除磷量达磷总去除量的 87%,平均出水 TN 和溶解性 PO_4^{3-} -P 浓度分别为 $12.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Zhou Y, Pijuan M, Yuan Z G. Development of a 2-sludge, 3-stage system for nitrogen and phosphorous removal from nutrient-rich wastewater using granular sludge and biofilms[J]. *Water Research*, 2008, **42**(12): 3207-3217.
- [4] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z G, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **84**(2): 170-178.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Liu J, Wu P, Shen Y L. Start-up of CAB-MBR nitrosation-nitrogen and phosphorus removal [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(8): 3247-3252.
- [8] 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 等. 温度对 ABR-MBR 复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3466-3472.
- [9] Wu P, Lu S J, Xu Y Z, *et al.* Effects of temperature on combined process of ABR and MBR for domestic sewage treatment and analysis of microbial community [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3466-3472.
- [10] Wang Y Y, Zhou S, Ye L, *et al.* Nitrite survival and nitrous oxide production of denitrifying phosphorus removal sludges in long-term nitrite/nitrate-fed sequencing batch reactors[J]. *Water Research*, 2014, **67**: 33-45.
- [11] Wang Y Y, Guo G, Wang H, *et al.* Long-term impact of anaerobic reaction time on the performance and granular characteristics of granular denitrifying biological phosphorus removal systems[J]. *Water Research*, 2013, **47** (14): 5326-5337.
- [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(英文)[J]. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, 2015, **28**(2): 1-10.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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] 王荣昌, 欧阳琛, 司书鹏. 改良型 A^2/O -MBR 工艺的反硝化除磷性能研究[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(2): 401-407.
- [17] Wang R C, Ouyang C, Si S P. Performance of denitrifying phosphorus removal in modified A^2/O -MBR process[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(2): 401-407.
- [18] 令云芳, 王淑莹, 王伟, 等. 厌氧段 HRT 对 A_2N 工艺反硝化除磷脱氮效果的影响[J]. *水处理技术*, 2006, **32**(10): 44-47.
- [19] Ling Y F, Wang S Y, Wang W, *et al.* Effect of anaerobic HRT on A_2N denitrifying phosphorous removal process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2006, **32**(10): 44-47.

- [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 nitrosation-denitrifying phosphorus removal based on high-quality carbon source in combined process of CAMBR [J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4539-4545.
- [16] 唐旭光, 王淑莹, 张婧倩. VFAs、TOC 及 COD 作为生物除磷能力指标的探讨[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(1): 41-45.
Tang X G, Wang S Y, Zhang J Q. Comparative study on COD, TOC, VFAs as biological phosphorus removal index[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(1): 41-45.
- [17] Meinhold J, Filipe C D M, Daigger G T, *et al.* Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal [J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(1): 31-42.
- [18] 王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 等. 利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2617-2625.
Wang X L, Song T H, Yin B Y, *et al.* ORP in the main anoxic stage as the control parameter for nitrogen and phosphorus removal in the single sludge system with a continuous flow[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2617-2625.
- [19] 王晓莲, 王淑莹, 王亚宜, 等. 强化 A²/O 工艺反硝化除磷性能的运行控制策略[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 722-727.
Wang X L, Wang S Y, Wang Y Y, *et al.* Control strategies of enhancing denitrifying phosphorus removal performance of the conventional Anaerobic-Anoxic-Oxic process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(5): 722-727.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Tan T W, Ng H Y. Influence of mixed liquor recycle ratio and dissolved oxygen on performance of pre-denitrification submerged membrane bioreactors[J]. Water Research, 2008, **42**(4-5): 1122-1132.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行