

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

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 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

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

程继辉^{1,2}, 吴鹏^{1,2}, 程朝阳^{1,2}, 沈耀良^{1,2,3*}

(1. 苏州科技学院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. 苏州科技学院江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 挥发性脂肪酸(VFA)是反硝化除磷过程可以利用的优质碳源,为此本研究结合厌氧折流板反应器(ABR)微生物相分离和膜生物反应器(MBR)出水水质优良的特性,构建了CAMBR复合工艺,并通过优化ABR水力停留时间(HRT)等运行条件以提供优质碳源,实现高效反硝化除磷。研究表明,当ABR的HRT为4.8 h时,可获得充足的VFA作为优质碳源,并实现消耗VFA的量为 $56.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的同时获得 $10.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的释磷,即释放1 mg磷需要的VFA量为5.38 mg,同时实现 $12.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的吸磷,而MBR池的吸磷为 $1.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。短程硝化除磷过程中,缺氧消耗1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 需要0.62 mg的 $\text{NO}_x^- \text{-N}$,吸收1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 所需 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的量为1.67~2.04 mg。系统出水水质稳定,COD、TN和溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率分别为91%、84%和93%,出水平均浓度分别为30、7.15和 $0.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明CAMBR复合工艺在处理生活污水过程中可获得稳定高效的反硝化除磷效果。

关键词: CAMBR复合工艺; 短程反硝化除磷; VFA; HRT; 释磷量; 吸磷量

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4539-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.12.028

Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR

CHENG Ji-hui^{1,2}, WU Peng^{1,2}, CHENG Chao-yang^{1,2}, SHEN Yao-liang^{1,2,3*}

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

Abstract: The volatile fatty acids (VFAs) are high-quality carbon source which can be utilized in the process of denitrifying phosphorus removal. Therefore, a combined process of anaerobic baffled reactor (ABR) with microbial phase separation and membrane bioreactor (MBR), i. e. CAMBR, with high-quality effluent was investigated in this experiment for highly efficient denitrifying phosphorus removal through providing high-quality carbon source by optimizing operational conditions such as hydraulic retention time (HRT) in the ABR. The results indicated that sufficient high-quality carbon source VFA could be acquired when the HRT of ABR was 4.8 h. The consumption of VFA was $56.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ while the release of phosphorus was $10.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ showing that 5.38 mg of VFA was required to release 1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. Meanwhile, the uptake of phosphorus was $12.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, while the uptake of phosphorus of MBR tank was $1.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. In the process of shortcut nitrification, 0.62 mg $\text{NO}_x^- \text{-N}$ was needed when 1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was taken up, and 1.67 to 2.04 mg $\text{NO}_2^- \text{-N}$ was required when 1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was taken up, and the combined system achieved stable effluent quality. The average removal rates of COD, TN and soluble $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were 91%, 84% and 93%, respectively, correspondingly the average effluent concentrations were 30, 7.15 and $0.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The results stated that the CAMBR achieved stable and highly efficient denitrifying phosphorus removal in domestic sewage treatment.

Key words: combined anaerobic baffled reactor and membrane bioreactor compound technology; shortcut denitrifying phosphorus removal; VFA; HRT; release of phosphorus; uptake of phosphorus

传统脱氮除磷工艺中脱氮和除磷对碳源竞争、对污泥龄要求不同等矛盾,使其难以达到稳定有效的脱氮除磷^[1]。反硝化除磷利用硝酸盐、亚硝酸盐作为电子受体,在完成反硝化脱氮的同时完成过量除磷,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”节省碳源的目的^[2-4]。此外,反硝化除磷还可降低运转费及污泥产量(50%)^[5-9]。

充足的优质碳源是厌氧释磷的重要保障。挥发性脂肪酸(VFA)已经被发现是聚磷的主要基质^[10],在厌氧阶段除磷菌(PAOs)只能吸收利用生活污水

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-07-22

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA610002); 苏州市环保科技项目(B20130502); 国家自然科学基金项目(51578353)

作者简介: 程继辉(1989~),男,硕士研究生,主要研究方向为废水处理理论与技术,E-mail:18112545610@163.com

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

中的 VFA^[11]. 利用厌氧折流板反应器 (ABR) 具有的微生物相分离的功能^[12~14], 有利于聚磷菌和硝化菌在不同隔室生长富集, 可解决泥龄不同的矛盾^[15, 16]. 本课题组开展相关脱氮除磷性能研究^[17~19], 获得较好的效果. 本研究将 ABR 和 MBR 有机组合为 CAMBR 复合工艺, 利用 ABR 提供优质碳源和膜生物反应器 (MBR) 短程硝化并强化反硝化除磷及同步硝化反硝化等作用^[20~22], 并通过调控运行条件, 以期反硝化除磷提供充足的优质碳源, 从而实现高效的脱氮除磷.

1 材料与方法

1.1 试验装置与水质

试验所用 CAMBR 反应器是由 6 隔室 ABR 反应器和好氧 MBR 池组成 (见图 1), 均采用有机玻璃制成, 总有效容积为 12 L, ABR 反应器和好氧 MBR 池的有效容积分别为 7.2 L 和 4.8 L. 好氧 MBR 池底部设有微孔曝气头, 通过转子流量计控制曝气量为活性污泥供氧, 实现厌氧、缺氧和好氧分离. 控制 ABR 第 5 隔室、好氧 MBR 的溶解氧 (DO) 分别为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.8 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

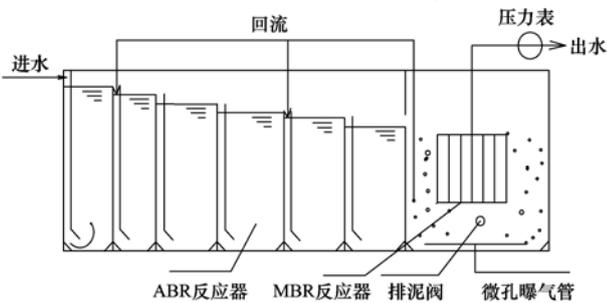


图 1 CAMBR 反应器

Fig. 1 Schematic diagram of CAMBR

CAMBR 复合工艺为实现反硝化除磷设置两个回流 (R_1 和 R_2), R_1 (100%) 回流至 ABR 第 2 隔室, 实现厌氧短程反硝化脱氮及厌氧释磷; R_2 (50%) 回流至 ABR 第 5 隔室, 创造缺氧环境, 实现缺氧吸磷. 通过控制 ABR 上向隔室中上升流速, 实现活性污泥在系统中循环流动, 通过排泥来实现除磷. 整个装置采用可编程逻辑控制器 (PLC) 进行水位恒定和出水泵的启闭调控. MBR 反应器间歇抽吸出水, 抽吸周期为 10 min (包括 8 min 抽吸和 2 min 停歇). 膜组件选用 PVDF 帘式中空纤维膜, 膜孔径为 $0.2 \mu\text{m}$, 过滤面积为 0.2 m^2 , 采用真空压力表测跨膜压差 (TMP) 来反映膜的污染状况, 当 TMP 增至 30 kPa 时对膜组件进行化学清洗. 控制好氧 MBR

池的 pH 在 8.0 ~ 8.2 之间, 控制反应器内温度为 $(27 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ ^[23, 24]. 本试验用水为某高校生活污水, 其水质见表 1.

表 1 生活污水水质指标

Table 1 Quality index of domestic sewage

水质指标	COD /mg·L ⁻¹	VFA /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹
数值范围	281 ~ 396	20.6 ~ 28.6	36.07 ~ 52.43	4.90 ~ 11.54

1.2 污泥培养驯化与试验方案

接种污泥取自苏州市污水处理厂. 控制泥龄在 20 d 左右, 连续培养 45 d、系统稳定运行 15 d 后进行正式试验.

研究期间保持进水条件不变, 考察 HRT 对整个系统中反硝化除磷的影响. 控制 ABR 的 HRT 分别为 7.2、6.0、4.8 和 3.6 h, 4 个阶段的运行时间均为两周左右.

1.3 分析项目及方法

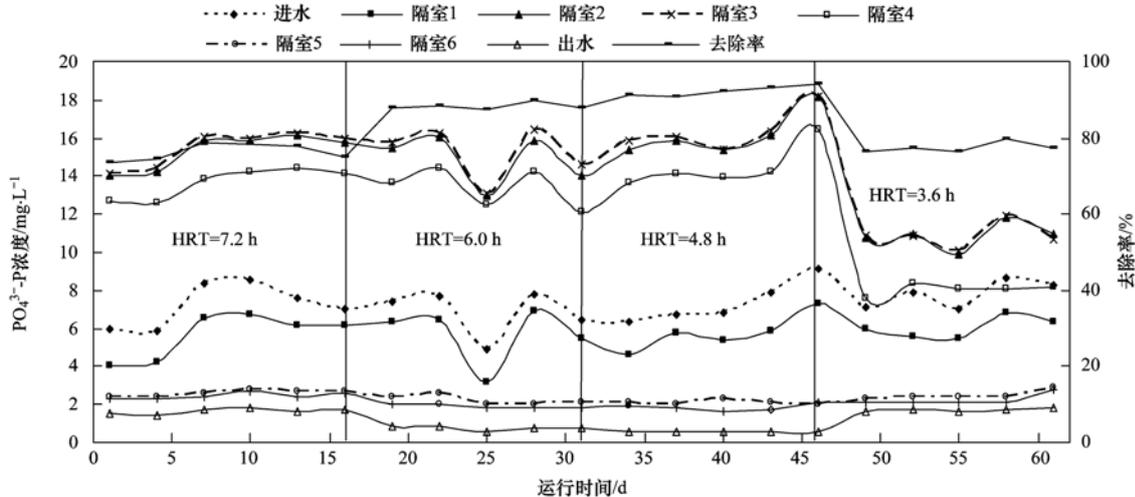
研究中各常规分析指标均按国家标准方法测定^[25], COD 采用快速消解法; 溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼锑抗分光光度法; TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 采用紫外分光光度法; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 采用紫外分光光度法; MLSS 采用烘干称重法; VFA 采用分光光度法^[26].

2 结果与讨论

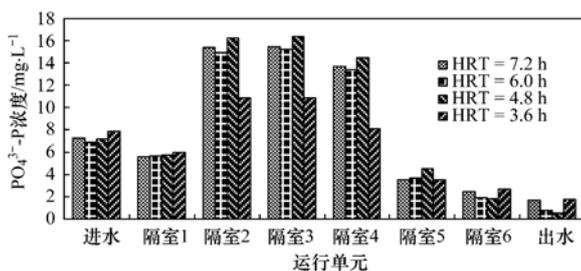
2.1 反硝化除磷条件的优化

2.1.1 HRT 对 ABR 厌氧释磷量的影响

HRT 是影响 ABR 水解酸化的重要因素. 图 2 为不同 HRT 时溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在各个隔室的变化情况. 从中可知, ABR 第 2 隔室出水溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变大, 发生了厌氧释磷. 细菌死亡后会向水体中释放磷, 但细菌死亡释磷占的比例较小, 主要以 DPB 厌氧释磷为主. 当 HRT 为 7.2 h 时, ABR 第 2 隔室的平均释磷量为 $9.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统对磷的平均去除率为 76%; 当 HRT 为 6.0 h 和 4.8 h 时, ABR 第 2 隔室的平均释磷量分别为 $9.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷的平均去除率分别为 88% 和 91%. HRT 缩短至 6.0 h 后, ABR 第 2 隔室释磷量有所下降, 但磷的总去除率则有提高. 由于聚磷菌无论以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 为电子受体进行缺氧吸磷还是以 O_2 作为电子受体进行好氧吸磷, 都需要氧化细胞内储存的 PHB 作为电子供体, 而无效释磷对于 DPB 合成 PHB 没有贡献, 无效释磷的出现影响缺氧

图2 不同 HRT 时对溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除Fig. 2 Removal of soluble $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at different HRT

吸磷,因此磷的去除率反而比较低. HRT 为 3.6 h 时,ABR 第 2 隔室的平均释磷量 $4.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,磷去除率为 76%,这是因停留时间过短,DPB 不足以完全利用 VFA 并转化为 PHB 储存在细胞内并进行厌氧释磷之故. Wang 等^[27] 研究表明,HRT 过短会导致聚磷菌体内合成 PHB 的减少. 由此可知,HRT 过短则影响 VFA 作为优质碳源的充分利用. 系统出水溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 随着释磷量的增加而减少,而溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率则随着释磷量的增加而升高^[28]. 由图 3 可知,HRT 为 4.8 h 时,系统出水的溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度最低. 根据释磷情况可知第 4 隔室厌氧释磷量很小,对于碳氮的去除贡献也较小,考虑优化去除第 4 隔室.

图3 不同 HRT 各隔室溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的变化Fig. 3 Change of soluble $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in various compartments at different HRT

2.1.2 HRT 对 ABR 缺氧吸磷量的影响

在 CAMBR 复合工艺中,ABR 第 5 隔室碳源不足,DPB 利用在 ABR 第 2 隔室合成的 PHB 作为电子供体,以 MBR 回流液(R_2)中的 $\text{NO}_x^- \text{-N}$ ($\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$)作为电子受体,进行缺氧反硝化吸磷. ABR 第 5 隔室中缺氧吸磷量的多少与 ABR 第 2 隔室中

厌氧吸磷量密切相关. ABR 第 5 隔室存在明显的溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 下降的现象,表明其污泥中存在着 DPB.

结果表明:当 HRT 为 7.2 h 时,ABR 第 2 隔室平均释磷量为 $9.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,ABR 第 5 隔室平均吸磷量为 $11.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 而 HRT 为 6.0、4.8 和 3.6 h 时,ABR 第 2 隔室平均释磷量为 9.23、10.43 和 $4.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,ABR 第 5 隔室平均吸磷量为 11.23、12.35 和 $5.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,系统对溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率 76%、88%、91% 和 77%. 当 HRT 为 7.2 h 时,ABR 第 5 隔室缺氧吸磷量并没有因为 ABR 第 2 隔室厌氧释磷量的增加而增加,此时对磷的去除率较 HRT 为 6.0 h 时低. 这是因 HRT 的延长,ABR 第 2 隔室中的 VFA 被消耗完后,虽然 DPB 吸收 VFA 合成 PHB 储存在细胞内的过程已经基本停止,但微生物为维持基本生命活动,仍需不断水解细胞内聚磷酸盐以提供能量,发生了无效释磷. 因此,随着 HRT 的增长,虽然释磷总量增加,但单位释磷量所产生的吸磷能力将随着无效释磷的产生而降低. 当 HRT 为 3.6 h 时,ABR 第 5 隔室缺氧吸磷量明显下降,这时因 HRT 过短,DPB 不足以完全吸收 VFA 并合成 PHB 储存,因而导致 ABR 后续隔室缺氧段 DPB 无足够 PHB 作为电子受体. 当 ABR 第 2 隔室释磷量减少时,ABR 第 5 隔室吸磷量相应减少. 而当 HRT 为 4.8 h 时,吸磷量最大,除磷效果较好,此时好氧 MBR 吸磷量为 $1.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

ABR 的 HRT 为 4.8 h 时,系统 HRT 为 8.0 h,系统中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 两种电子受体共存 [$c(\text{NO}_3^- \text{-N}): c(\text{NO}_2^- \text{-N}) = 1:1.9$],缺氧吸磷量为

12.35 mg·L⁻¹. 而唐旭光等^[29]研究中 HRT 为 6 h, 利用 NO₂⁻-N 缺氧吸磷量为 9.1 mg·L⁻¹; 彭永臻等^[30]研究中 HRT 为 5.5 h, 利用 NO₂⁻-N 缺氧吸磷量为 3.59 mg·L⁻¹; 张捍民等^[31]研究中 HRT 为 18 h, 利用 NO₃⁻-N 缺氧吸磷量为 6.45 mg·L⁻¹. HRT 的不同影响厌氧释磷量, 而缺氧吸磷量与厌氧释磷量有着比较好的线性关系, 缺氧吸磷量的不同还与厌氧释磷有关, 各系统中的反硝化聚磷菌的不同也可能导致吸磷量的不同. 本研究中缺氧吸磷量较上述研究高, 这与 Lee 等^[32]和解丽英等^[33]的研究结果一致, 即反硝化聚磷菌对 NO₂⁻-N 的利用速率高于 NO₃⁻-N. 另有研究表明^[8], NO₃⁻-N 较 NO₂⁻-N 是一种更容易利用的电子受体, 因为一部分反硝化聚磷菌可以利用 NO₃⁻-N 作为电子受体, 但不能利用 NO₂⁻-N. 但本研究并没有体现这一点, DPB 经过长期驯化对缺氧段初始 NO₂⁻-N (12 mg·L⁻¹ 左右) 的条件有了很好的适应.

自研究开始, 系统的总吸磷量 P_吸 总是大于总释磷量 P_释, 并且随着 P_释 增加而增大. 释磷总量越大, 说明 ABR 第 1 隔室为 DPB 提供充足优质碳源, 在 ABR 第 2 隔室合成越多 PHB, 释磷越充分, ABR 第 5 隔室的反硝化除磷效果越好. P_吸/P_释 值总大于 1, 说明 DPB 的吸磷量随着释磷量的增加而增大, 并能够过量吸磷, 从而实现磷由溶解态向固态的转化, 达到除磷的目的.

2.1.3 HRT 对水解酸化的影响

图 4 为 HRT 为 7.2、6.0、4.8 和 3.6 h 时, 在 ABR 中 VFA 的变化情况. 从中可知, 进水 VFA 浓度在 20.6 ~ 28.6 mg·L⁻¹, ABR 第 1 隔室碳源充足, 有机物水解酸化产生 VFA, 而当加入回流泥水混合液 (R₁) 后, ABR 第 2 隔室进水 VFA 平均浓度为 28.3、37.3、56.7 和 67.7 mg·L⁻¹, ABR 第 2 隔室出水 VFA 浓度急剧降低, 并趋于至 0, 这与 VFA 作为优质碳源被 DPB 利用合成 PHB 储存在细胞内而急剧减少有关. 此阶段 DPB 积累 PHB 的能量来源是聚磷酸盐的释放, 溶液中 PO₄³⁻-P 浓度不断升高. ABR 第 5 隔室碳源不足, DPB 降解细胞内的 PHB 获得能量, 用于反硝化吸磷所需, 此阶段生物膜中的 PHB 含量以及溶液中 PO₄³⁻-P、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 浓度都不断减少.

由图 4 可知, 当 HRT 为 7.2、6.0、4.8 和 3.6 h 时, ABR 第 2 隔室消耗的 VFA 分别为 27.9、36.8、56.1 和 66.9 mg·L⁻¹. ABR 第 2 隔室平均释磷量为 9.76、9.23、10.43 和 4.81 mg·L⁻¹. 吸收 1 mg 磷需

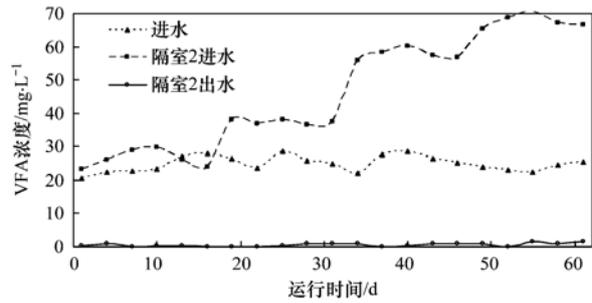


图 4 不同 HRT 隔室 VFA 的变化

Fig. 4 Change of VFA at different HRT

要的 VFA 量分别为 2.86、3.99、5.38 和 13.91 mg. 当 HRT 为 7.2 h, 存在无效释磷, 利用 VFA 合成 PHB 释放的磷并没有 9.76 mg·L⁻¹; 当 HRT 为 4.8 h 时, ABR 第 2 隔室释磷量为 10.43 mg·L⁻¹, ABR 第 5 隔室吸磷量为 12.35 mg·L⁻¹, 吸磷量最大, 反硝化除磷效果最好. 说明在 HRT 为 4.8 h 时, DPB 利用 VFA 合成 PHB 的量最大, 因此在 ABR 第 5 隔室段吸磷量最大; 当 HRT 为 3.6 h 时, 吸收 1 mg 磷需要的 VFA 量为 14.07 mg, 这是因 HRT 过短, DPB 不足以完全吸收 VFA 并合成 PHB, 存产甲烷菌、反硝化菌等消耗 VFA, 使得 VFA 在第 2 隔室出水趋于 0, 导致吸收 1 mg 磷需要的 VFA 量升高. 当 HRT 为 4.8 h 时, 实际生活污水中每释放 1 mg 磷需要利用 5.38 mg VFA, 而在以往的研究中此值在 1.401 ~ 4.76 mg 不等. Hesselmann 等^[34]的研究中此值为 3.03 mg; McMahon 等^[35]的研究中为 1.52 mg; Saito 等^[36]和 Pijuan 等^[37]以乙酸为碳源的研究中此值分别为 4.76 mg 和 3.45 mg. 本研究以实际生活污水作为处理对象, 因而基质的不同对生物除磷影响有所不同. 如唐旭光等^[11]以实际生活污水中每释放 1 mg 磷需要利用 1.401 mg VFA. ABR 第 2 隔室存产甲烷菌、反硝化菌等利用 VFA 进行产甲烷反应、反硝化作用, 使得本研究结果明显高于其它研究成果.

2.2 生活污水的短程硝化反硝化除磷

当进水 COD、PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 浓度分别为 360、6.00 和 37 mg·L⁻¹ 左右时, 在最佳 HRT 为 4.8 h, MBR 的 HRT 为 3.2 h 的条件下, CAMBR 复合工艺 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-P 以及 NH₄⁺-N 的浓度变化如图 5 所示.

由图 5 可知, 该工艺中 ABR 出水 PO₄³⁻-P 含量为 1.67 mg·L⁻¹ 左右, COD 降为 52 mg·L⁻¹ 左右, NH₄⁺-N 浓度为 19.36 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 主要由于稀释作用减少; 经过在好氧 MBR 硝化后, NH₄⁺-N 浓度降

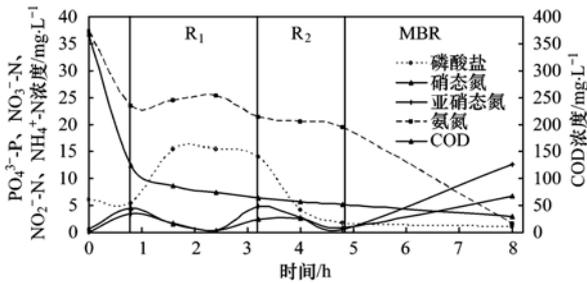


图5 CAMBR 复合工艺中短程硝化反硝化除磷效果

Fig. 5 Shortcut nitrification-denitrifying phosphorus removal in CAMBR

低到 $1.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 分别为 $6.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P 浓度有少量降低, COD 降到 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 好氧 MBR 中 COD 降幅较少, 主要用于维持好氧异养菌的新陈代谢^[38]. 短程硝化液回流 (R_2) 到 ABR 第 5 隔室进水, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 由缺氧初期的 $2.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 经过 ABR 第 5 隔室的缺氧环境后, 基本趋于 0, 说明硝化反应产生的 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 作为电子受体进行了反硝化除磷. 缺氧初期 NO_x^- -N 为 $7.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ABR 第 5 隔室吸磷量为 $11.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 每吸收 1 mg PO_4^{3-} -P 需要 0.62 mg NO_x^- -N. 刘建广等^[39] 研究中缺氧段消耗 1 mg NO_x^- -N 可吸收 1 mg PO_4^{3-} -P; 李志勇等^[40] 得到的单位 NO_3^- -N 反硝化吸磷的比例为 $0.80 \text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$; 而邹华等^[41] 得到的缺氧 PO_4^{3-} -P 吸收量与 NO_3^- -N 消耗量的比值是 1.51. 由此, 据单位 NO_3^- -N 反硝化吸磷为 $0.80 \sim 1.51 \text{ mg PO}_4^{3-}$ -P 计算可得, 本研究中利用硝酸盐吸磷量为 $2.00 \sim 3.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 利用亚硝酸盐吸磷量为 $7.91 \sim 9.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 每吸收 1 mg PO_4^{3-} -P 需要 $1.67 \sim 2.04 \text{ mg NO}_2^-$ -N. 刘晖等^[42] 研究利用亚硝酸盐的反硝化除磷菌及影响因素得出最佳 N/P 为 4; 张少辉等^[43] 得到缺氧段消耗单位亚硝酸盐的吸磷量为 1.39 mg . 本试验单位 NO_2^- -N 反硝化吸磷量与以往研究不同, 这与上述文献的硝化液为单一的 NO_2^- -N 或 NO_3^- -N 为主, 而本研究硝化液为 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的混合液 [$c(\text{NO}_3^-$ -N) : $c(\text{NO}_2^-$ -N) = 1 : 1.9], 并且可能与本研究中反硝化菌与反硝化除磷菌的比例不同以及发生外加碳源反硝化有关.

2.3 CAMBR 复合工艺处理生活污水的脱氮除磷效果

进水 COD 为 $300 \sim 400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P 为 $4 \sim 12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 为 $33 \sim 59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, NO_3^- -N 为 $0.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 当 ABR

的 HRT 为 4.8 h , MBR 的 HRT 为 3.2 h 时, 经 1 个月的运行, 其结果如图 6 所示. 其中: 出水 COD 浓度平均为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 91%; 出水溶解性 PO_4^{3-} -P 浓度平均为 $0.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 93%; 出水 TN 浓度平均为 $7.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率为 84%. 综上所述, 应用 CAMBR 复合工艺可获得稳定高效的反硝化除磷效果.

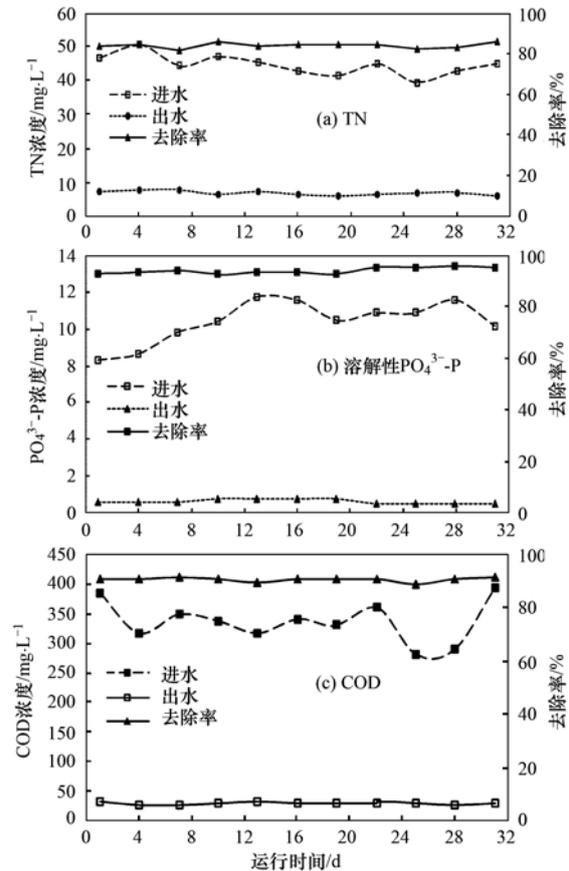


图6 TN、溶解性 PO_4^{3-} -P 和 COD 去除效果

Fig. 6 Removal effect of TN, soluble PO_4^{3-} -P and COD

3 结论

(1) 当 ABR 的 HRT 为 4.8 h , 有机 COD 负荷为 $0.9 \sim 1.2 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 时, CAMBR 工艺中 ABR 可提供足够的优质碳源, 而获得较好的反硝化除磷效果.

(2) 在 ABR 最优 HRT 时, 其第 2 隔室内减少的 VFA 全部转化为 PHB, 消耗 VFA 的量为 $56.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其相应的释磷量为 $10.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 释放 1 mg PO_4^{3-} -P 所需 VFA 的量为 5.38 mg . 短程硝化除磷过程中, 吸收 1 mg PO_4^{3-} -P 所需 NO_x^- -N 的量为 0.62 mg , 吸收 1 mg PO_4^{3-} -P 所需 NO_2^- -N 的量为 $1.67 \sim 2.04 \text{ mg}$.

(3) CAMBR 复合工艺处理实际生活污水不仅可获得高效的反硝化除磷效果,且其最终出水 COD、TN 和溶解性 PO_4^{3-} -P 平均浓度分别稳定在 30、7.15 和 $0.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率分别为 91%、84% 和 93%。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zeng W, Li B X, Wang X D, *et al.* Integration of denitrifying phosphorus removal via nitrite pathway, simultaneous nitrification-denitrification and anammox treating carbon-limited municipal sewage[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **172**: 356-364.
- [3] Bassin J P, Kleerebezem R, Dezotti M, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphate removal in aerobic granular sludge reactors operated at different temperatures[J]. *Water Research*, 2012, **46**(12): 3805-3816.
- [4] 田淑媛, 王景峰, 杨睿, 等. 厌氧下的 PHB 和聚磷酸盐及其生化机理研究[J]. *中国给水排水*, 2000, **16**(7): 5-7.
- [5] Baker P S, Dold P L. Denitrification behaviour in biological excess phosphorus removal activated sludge systems[J]. *Water Research*, 1996, **30**(4): 769-780.
- [6] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Brandse F A, *et al.* Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 1997, **31**(4): 777-786.
- [7] Kuba T, 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.
- [8] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, *et al.* A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors[J]. *Water Research*, 2003, **37**(14): 3463-3471.
- [9] 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.
- [10] Wentzel M C, Ekanma G A, Marais G V R. Kinetics of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems—A Review[J]. *Water Science & Technology*, 1990, **23**(4-6): 555-565.
- [11] 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.
- [12] Wang J L, Huang Y H, Zhao X. Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2004, **93**(2): 205-208.
- [13] Zhu G F, Li J Z, Wu P, *et al.* The performance and phase separated characteristics of an anaerobic baffled reactor treating soybean protein processing wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(17): 8027-8033.
- [14] She Z L, Zheng X L, Yang B R, *et al.* Granule development and performance in sucrose fed anaerobic baffled reactors[J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, **122**(2): 198-208.
- [15] 刘洪波, 李卓, 缪强强, 等. 传统生物除磷脱氮工艺和反硝化除磷工艺对比[J]. *工业用水与废水*, 2006, **37**(6): 4-7.
- [16] 李雪飞, 严冰, 李明. 反硝化除磷过程中影响因素的研究进展[J]. *工业水处理*, 2014, **34**(4): 10-13.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 吴鹏, 计小明, 沈耀良. ABR/MBR 复合反应器处理城市污水的启动研究[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(11): 18-21.
- [20] 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.
- [21] Hu X M, Chen Y W, Liao Y G, *et al.* High NH_4^+ -N concentration wastewater treatment by shortcut nitrification-denitrification using a system of A/O inner loop fluidized bed biofilm reactors [J]. *Water Science & Technology*, 2013, **67**(5): 1083-1091.
- [22] 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.
- [23] Gu S B, Wang S Y, Yang Q, *et al.* Start up partial nitrification at low temperature with a real-time control strategy based on blower frequency and pH [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **112**: 34-41.
- [24] Park S, Bae W, Rittmann B E. Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH, and free ammonia and free nitrous acid inhibition [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(1): 335-342.
- [25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [26] 中国科学院成都生物研究所本书编写组编. 沼气发酵常规分析[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1984.
- [27] Wang Y Y, Geng J J, Ren Z J, *et al.* Effect of anaerobic reaction time on denitrifying phosphorus removal and N_2O production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(10): 5674-5684.
- [28] 王晓玲, 尹军, 高尚. 利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 175-180.
- [29] 唐旭光, 王淑莹, 张婧倩. 短程反硝化除磷系统的驯化及除磷特性研究[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(23): 29-33.
- [30] 彭永臻, 张婧倩, 唐旭光, 等. 以亚硝酸盐为电子受体的反硝化除磷性能研究[J]. *北京工业大学学报*, 2011, **37**(11):

- 1749-1755.
- [31] 张捍民, 张杰, 肖景霓, 等. A²O-MBR 工艺反硝化脱氮除磷研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, **48**(4): 490-495.
- [32] 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.
- [33] 解英丽, 池福强, 龙韬. 亚硝酸盐反硝化与硝酸盐反硝化对比研究[J]. 工业安全与环保, 2009, **35**(2): 11-13.
- [34] Hesselmann R P X, Werlen C, Hahn D, *et al.* Enrichment, phylogenetic analysis and detection of a bacterium that performs enhanced biological phosphate removal in activated sludge [J]. Systematic and Applied Microbiology, 1999, **22**(3): 454-465.
- [35] McMahon K D, Dojka M A, Pace N R, *et al.* Polyphosphate kinase from activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(10): 4971-4978.
- [36] Saito T, Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms [J]. Water Research, 2004, **38**(17): 3760-3768.
- [37] Pijuan M, Guisasola A, Baeza J A, *et al.* Net P-removal deterioration in enriched PAO sludge subjected to permanent aerobic conditions [J]. Journal of Biotechnology, 2006, **123**(1): 117-126.
- [38] Chen Y Z, Peng C Y, Wang J H, *et al.* Effect of nitrate recycling ratio on simultaneous biological nutrient removal in a novel anaerobic/anoxic/oxic (A₂/O)-biological aerated filter (BAF) system [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(10): 5722-5727.
- [39] 刘建广, 付昆明, 杨义飞, 等. 不同电子受体对反硝化除磷菌缺氧吸磷的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1472-1476.
- [40] 李勇智, 王淑滢, 吴凡松, 等. 强化生物除磷体系中反硝化聚磷菌的选择与富集 [J]. 环境科学学报, 2004, **24**(1): 45-49.
- [41] 邹华, 阮文权, 陈坚. 硝酸盐作为生物除磷电子受体的研究 [J]. 环境科学研究, 2002, **15**(3): 38-41.
- [42] 刘晖, 周康群, 刘开启, 等. 利用亚硝酸盐的反硝化除磷菌及影响因素 [J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(7): 14-16, 41.
- [43] 张少辉, 黄毅. 短程反硝化除磷工艺的可行性研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2009, **31**(24): 34-37.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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

国内外公开发行人