

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859)	
《环境科学》征订启事(3952)	
信息(3644, 3688, 3768)	

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制

吴鹏^{1,2}, 程朝阳^{1,2}, 沈耀良^{1,2,3}, 赵诗惠^{1,2}, 吕亮^{1,2}

(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: 基于厌氧折流板反应器 (ABR) 微生物相分离及膜生物反应器 (MBR) 高效截留的特性, 通过加设硝化液回流与污泥回流实现了 ABR-MBR 一体化反应器的循环联动, 对连续流条件下调控进水 COD 浓度及 COD/TN 比条件下的反硝化除磷影响机制展开了研究. 结果表明在 5 个不同进水 C/N 比下, ABR-MBR 组合工艺最终出水溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均浓度分别为 0.22、0.34、0.39、0.42 和 2.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 低 C/N 比可获得更好的除磷效果, 而 C/N 为 4.8~6.0 时, 工艺对 COD、TN 和溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率分别在 87%、76% 和 93% 以上. 此外, 在 C/N 为 3.6~6.0 时, ABR 缺氧吸磷量与工艺对 TN 去除量呈良好的线性关系, 提高进水 C/N 比有助于系统对 TN 的去除. 最终获得进水 C/N 比为 6 时最有利于氮和磷的同步去除.

关键词: ABR-MBR 组合工艺; 反硝化除磷; C/N 比; 影响因素

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3781-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703079

Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process

WU Peng^{1,2}, CHENG Chao-yang^{1,2}, SHEN Yao-liang^{1,2,3}, ZHAO Shi-hui^{1,2}, LÜ Liang^{1,2}

(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 ABR-MBR integrated reactor based on a combination of the anaerobic baffled reactor (ABR) with the microbial phase separation and membrane bioreactor (MBR) with high-effect entrapment was constructed and the circulation and interactivity of the combined process were examined by adding nitrate recycling and sludge reflux. By increasing the influent COD to adjust the COD/TN ratio, the influence of the mechanism on the denitrifying phosphorus removal performance under the condition of continuous-flow was investigated. The results showed that the average effluent concentration of soluble phosphorus under different influent C/N conditions were 0.22, 0.34, 0.39, 0.42, and 2.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and the low influent C/N ratio was beneficial to phosphate removal. When the influent C/N was 4.8~6.0, the average removal rates of COD, TN, and soluble $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were more than 87%, 76%, and 93%. In addition, when the influent C/N ratio was 3.6~6.0, the removal of TN was proportional to the anoxic phosphorus uptake of ABR and conducive to the removal of TN after increasing the influent COD concentration. Higher C/N ratios of the influent improved the removal of TN at this stage. Finally, the C/N ratio of 6 was suggested to achieve the simultaneous removal of nitrogen and phosphorus.

Key words: ABR-MBR combined process; denitrifying phosphorus removal; C/N ratio; impact factor

传统同步脱氮除磷工艺所存在的不同微生物菌种对碳源竞争的矛盾导致了难以实现对氮磷同步去除^[1,2], 而反硝化除磷工艺则为解决上述问题提供了新的途径, 并在实现“一碳两用”的同时能够降低污泥产量^[3]. 厌氧段有充足的优质的碳源且缺氧段无剩余碳源是实现高效反硝化除磷的重要前提, 在缺氧段外碳源和硝酸盐不在同一时间内共存有利于获得良好的反硝化除磷效果^[4]. 污水中氮、磷的去除均需消耗碳源, 微生物对碳源的竞争从而影响系统的脱氮除磷性能^[5]. 在反硝化除磷过程中, 厌氧段充足的挥发性有机酸 (VFA) 是反硝化除磷菌 (DPB) 充分释磷的关键, 而进水有机物浓度的高低

决定了厌氧段 VFA 的多少^[6]. 进水有机物浓度过低, 可供 DPB 利用的 VFA 含量则不足, 导致 DPB 在厌氧段无法充分释磷; 反之, 若进水有机物浓度过高, 则会影响反硝化除磷效果, 厌氧段剩余的有机底

收稿日期: 2017-03-09; 修订日期: 2017-04-11

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研究重大项目 (12KJA610002); 江苏省高校自然科学基金项目 (16KJB610013); 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; 苏州科技学院科研基金青年项目 (XKQ201504); 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)

作者简介: 吴鹏 (1985~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为废水生物处理, E-mail: wupengniu@126.com

物将被优先用于常规的反硝化脱氮,从而将减少反硝化吸磷的电子受体.

现有的 C/N 对反硝化除磷性能影响的研究主要集中在 SBR 反应器,而对连续流反硝化除磷工艺的研究鲜见报道,在本研究基于硝化液与污泥“双回流”的 ABR-MBR 组合连续流反硝化除磷工艺中,磷的去除主要通过反硝化除磷来实现,除磷效果受到进水有机物的影响. 由于两种工艺原理不同,使得进水 C/N 比对本工艺反硝化除磷性能的影响机制值得进一步研究. 本课题组前期已对反硝化除磷条件进行了部分优化^[7~9],本研究通过深入考察进水 C/N 比对 ABR-MBR 组合工艺反硝化除磷性能的影响机制,以期为其实际应用奠定基础.

1 材料与方法

1.1 试验装置

研究装置采用自行设计的 ABR-MBR 一体化反应器(图 1). 研究装置为由 5 个隔室 ABR 和好氧 MBR 组成的一体化系统,其中 ABR 和 MBR 的有效容积之比为 2:1,总有效容积为 12 L. 研究运行过程

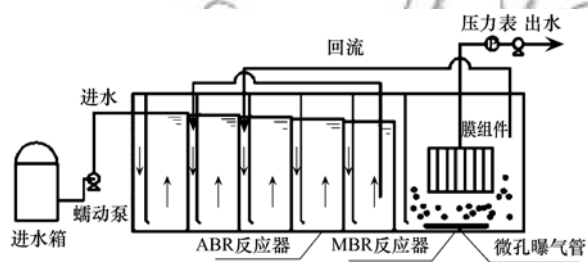


图 1 ABR-MBR 反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of the combined ABR-MBR process

中,MBR 内溶解氧(DO)控制为 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,反应器内温度控制在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$. MBR 间歇抽吸出水的周期为 10 min(8 min 抽吸出水,2 min 反冲洗).

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. MBR 所用膜组件为 PVDF 帘式中空纤维膜,膜孔径为 $0.2 \text{ }\mu\text{m}$,过滤面积为 0.2 m^2 ,采用真空压力表测跨膜压差(TMP)来表征膜的污染状况,当 TMP 增至 30 kPa 时对膜组件进行化学清洗. 研究运行过程中,将 MBR 硝化液回流至 ABR 第 3 隔室,其回流比(R_1)为 300%;将 ABR 第 5 隔室污泥回流至其第 2 隔室,其污泥回流比(R_2)为 100%. 整个运行期间,ABR-MBR 组合工艺的总 HRT 为 9 h,控制泥龄为 15 d.

1.2 进水与污泥

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),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为: H_3BO_3 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 ZnCl_2 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 CaCl_2 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 AlCl_3 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 CuCl_2 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NiCl_2 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 EDTA $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;微量元素: $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 运行期间通过向进水中投加适量淀粉来调控进水 COD,从而调控进水 C/N 比. 试验进水水质见表 1. ABR 各隔室的初始 MLSS 浓度约为 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,MBR 的 MLSS 约为 $4.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 1 进水水质

Table 1 Water quality of the influent

运行阶段	运行时间 /d	进水 COD / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	C/N 比	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
I	1 ~ 19	300	3.6	70 ~ 76	75 ~ 86	6.5 ~ 7.5
II	20 ~ 39	350	4.2	70 ~ 76	75 ~ 86	6.5 ~ 7.5
III	40 ~ 62	400	4.8	70 ~ 76	75 ~ 86	6.5 ~ 7.5
IV	63 ~ 79	500	6.0	70 ~ 76	75 ~ 86	6.5 ~ 7.5
V	81 ~ 101	600	7.2	70 ~ 76	75 ~ 86	6.5 ~ 7.5

1.3 分析方法

各常规分析指标均按国家标准方法测定^[10]. 其中 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; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: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.

2 结果与讨论

2.1 COD 去除分析

图 2 所示为 ABR 的 HRT 为 6 h,在不同的进水有机物浓度下的 ABR-MBR 组合工艺对 COD 的去除效果. 在 5 个不同的进水 C/N 比条件下,进水 COD 浓度由 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步增加至 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,组

合工艺的平均出水 COD 浓度分别为 45.56、50.89、51.22、51.43 和 84.33 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率分别为 84.85%、85.51%、87.31%、89.74% 和 86.02%。在前 4 个阶段组合工艺对 COD 去除率随着进水 COD 浓度的增加略有提高, 而当进水 COD 增加至 600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 此时 C/N 比为 7.2, 组合工艺对 COD 的去除略有下降, 平均去除率仅为 86.02%。

本研究中 ABR 第 2 隔室是优质碳源被 DPB 吸收的重要场所, 碳源在厌氧段的有效利用是厌氧充分释磷的关键。在 5 个不同进水 C/N 比(见表 1)工况下, 该工艺的平均 COD 去除率分别维持在 85% 以上, 且 COD 主要由 ABR 去除, 这说明本工艺中有有机物在 ABR 中得到了充分转化和利用。ABR 对碳源的优质转化而利于厌氧释磷, 同时为 DPB 提供了足够的能源储备, 而足够的内碳源储备是 DPB 在缺氧阶段完成自身增殖以及过量吸磷的关键。与此同时, 前置 ABR 对有机物的高效去除也保证了 ABR 出水的低 COD 浓度, 从而利于 MBR 内硝化的有效进行。

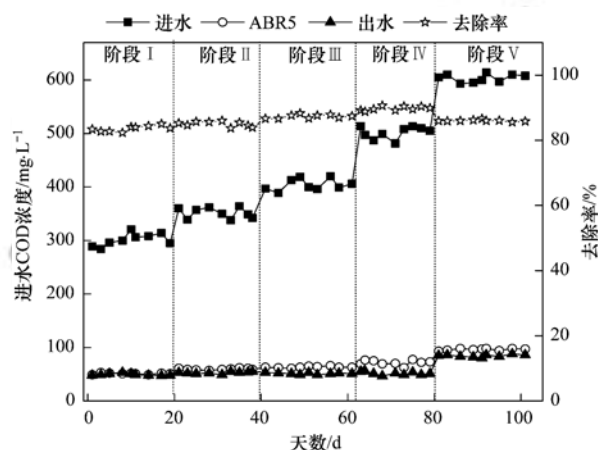


图2 不同 C/N 比下 COD 去除情况分析

Fig. 2 Removal profiles of COD under different C/N ratios

2.2 反硝化除磷效能分析

2.2.1 厌氧释磷

充足的优质碳源是厌氧段充分释磷的关键。王亚宜等^[11]研究表明, 污水中可供 DPB 利用的优质碳源量越充足, 越有利于厌氧段的充分释磷。而也有研究表明^[12], 过高的有机物浓度会抑制厌氧释磷。与此同时, 缺氧段及好氧段吸磷情况也影响着厌氧释磷。基于前期对其它运行条件进行优化^[13], 本研究对不同进水 C/N 比条件下 ABR-MBR 组合工艺的厌氧释磷情况进行了分析, 图 3 所示为组合工艺对磷去除情况。

溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在 ABR 第 2 隔室出现了明

显的升高, 由此可见, 厌氧释磷主要发生在 ABR 第 2 隔室。在 C/N 比从 3.6 增加至 6.0 时 4 个不同 C/N 比时, ABR 第 2 隔室的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度依次为 8.37、9.65、11.41 和 13.44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其释磷量随着 C/N 的增大而增大。这是由于随着进水 COD 浓度的不断升高, ABR 对有机底物的产酸过程所产生的优质碳源(VFA 等)为厌氧释磷提供了良好保障。此外, 随着 C/N 比的提高, 厌氧出水硝酸盐的浓度随之下降, 从而减轻了回流污泥中硝酸盐对释磷的影响。与此同时, 缺氧段良好的吸磷效果有效保证了 DPB 在厌氧/缺氧交替循环下发挥其正常的代谢性能^[14]。但当 C/N 比增大至 7.2 时, ABR 第 2 隔室的释磷量反而出现了下降, 说明较高的有机物浓度不利于正常释磷^[12]。

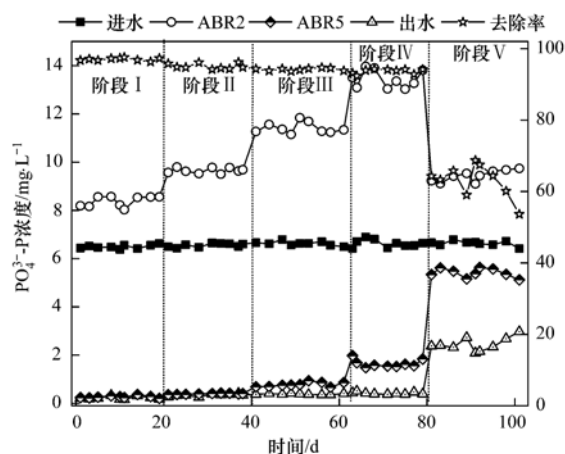


图3 不同 C/N 比下磷的去除情况

Fig. 3 Removal profiles of P under different C/N ratios

2.2.2 缺氧吸磷

连续流反硝化除磷工艺中, 缺氧段是 DPB 利用硝态氮作为电子受体进行反硝化吸磷的重要场所。在电子受体供给充足的条件下, 若缺氧段存在有机物, 反硝化菌会优先利用硝酸盐氮进行常规反硝化。因此, 反硝化除磷工艺中厌氧段与缺氧段对有机物存在与否的矛盾^[15], 使得寻求一个不影响厌氧释磷且缺氧段无较多剩余碳源的进水有机物浓度显得至关重要。

图 4 所示为不同 C/N 比条件下各运行单元的溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的变化情况。从中可见, 溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在 ABR 后段出现了明显的下降, 这是由于 DPB 在 ABR 第 3 隔室及后续隔室发生了以硝酸盐为电子受体的缺氧吸磷, 其中 ABR 第 3 隔室是缺氧吸磷的主要场所。当 C/N 比由 3.6 增加至 6.0 时, 缺氧吸磷量分别为 8.1、9.26、10.63 和 11.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反硝化除磷占总除磷量的比重依次为

96%、95%、93% 和 87%, 磷主要通过反硝化除磷去除. 这一过程中, 厌氧释磷量随着 C/N 比的增大而增加, 缺氧吸磷量也随之增加, 这是由于 MBR 提供了充足的电子供反硝化除磷所需, 电子受体未成为反硝化除磷效果的限制因素. 在 C/N 比为 6.0 时, ABR 出水的溶解性 PO_4^{3-} -P 浓度为 $1.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经好氧 MBR 后最终出水仅为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MBR 进一步强化了工艺对磷的去除. 当继续提高 C/N 比至 7.2 时, ABR 出水的溶解性 PO_4^{3-} -P 浓度达 $5.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这时的缺氧吸磷量仅为 $4.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反硝化除磷效果严重恶化. 一方面是厌氧释磷量的减少导致了吸磷量的不足, 另一方面是由于 MBR 中硝化效果的恶化而致使回流硝态氮的不足限制了缺氧段吸磷. 张园等^[16]在 UCT 工艺中发现随着 C/N 比的升高反硝化除磷现象逐渐减弱, COD 过高亦会抑制厌氧段释磷, 这与本研究中的结果相一致.

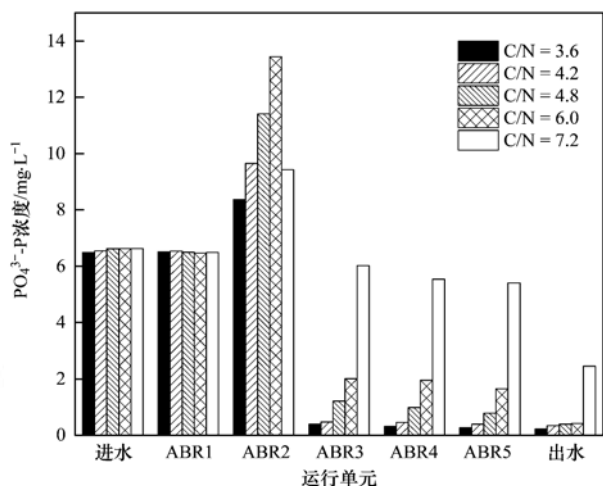


图4 不同 C/N 比下各隔室溶解性 PO_4^{3-} -P 的变化

Fig. 4 Various compartment profiles of soluble PO_4^{3-} -P under different C/N ratios

在 5 个不同进水 C/N 比条件下, ABR-MBR 组合工艺对溶解性 PO_4^{3-} -P 的平均去除率分别为 97.01%、95.07%、94.19%、93.64% 和 62.97%. 当 C/N 从 3.6 提高至 6.0 时, 工艺最终出水 PO_4^{3-} -P 平均浓度分别为 0.22、0.34、0.39 和 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解性 PO_4^{3-} -P 去除率随 C/N 的提高逐渐下降, 表明低 C/N 条件有利于本工艺对磷的去除, 也更加凸显了反硝化除磷工艺“一碳两用”的特性. C/N 增至 7.2 时, 最终出水溶解性 PO_4^{3-} -P 平均浓度达 $2.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 一方面, 过高的 COD 浓度抑制了厌氧释磷, 导致厌氧段释磷量减少. 王晓莲等^[17]研究发现, 过高的 COD 浓度会促进聚糖菌的生长, 而聚糖菌不具备除磷功能. 另一方面, 厌氧段出水

COD 浓度高达 $95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 严重影响了 MBR 段硝化效果, 从而导致可供 DPB 缺氧吸磷利用的电子受体不足. 与此同时, 若有机物与硝酸盐在缺氧段同时存在时, 碳源会优先进行反硝化, 进一步抢夺了 DPB 有限的电子受体. 这几方面的原因导致了这阶段除磷效果的恶化.

在本研究构筑的反硝化除磷工艺中, 碳源被优先供反硝化除磷所需, 消除了传统脱氮除磷工艺中反硝化菌与聚磷菌之间碳源竞争的矛盾, 磷在 ABR 段便可得到较好的去除, 后置好氧 MBR 进一步强化了工艺对磷的去除.

2.3 脱氮效能分析

图 5 所示为不同 C/N 比条件下氮去除情况. 从中可见, 随 C/N 的提高, TN 的去除率呈现出由高而低的变化趋势. 当 C/N 由 3.6 提高至 6.0 时, 最终出水 NH_4^+ -N 浓度稳定在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 良好的硝化效果保证了工艺对 TN 的去除. 在前 4 个 C/N 比条件下, 工艺最终出水 TN 平均浓度分别为 27.64、23.49、19.67 和 $12.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率分别为 66%、72%、76% 和 84%, 进水 COD 浓度增加 (C/N 的提高) 明显增强了工艺对 TN 的去除效果. 孙洪伟等^[18]对 SBR 的研究发现, 提高 C/N 比有利于提高脱氮性能并增强反硝化微生物反硝化速率. 与此同时, 较低的进水 COD 浓度会影响厌氧段释磷量, 释磷量的不足导致可供 DPB 吸收的 PO_4^{3-} -P 有限. 而相关研究表明^[19~21], 缺氧段吸磷量与硝态氮消耗呈现出良好的线性关系, 因此在 MBR 提供充足电子受体的条件下, 释磷量的不足限制了反硝化除磷对 TN 的去除.

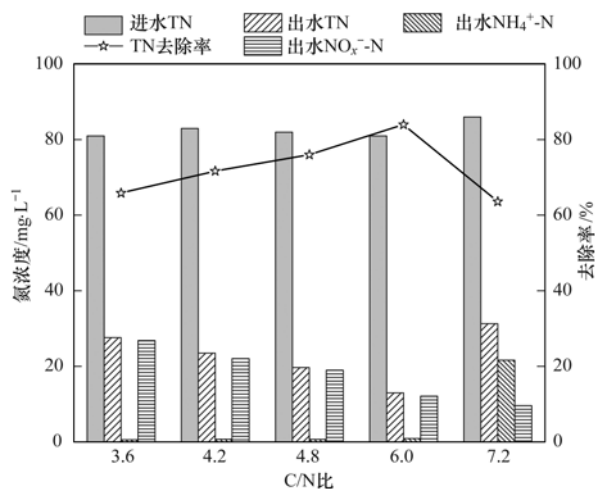


图5 不同 C/N 比下氮去除情况

Fig. 5 Removal characteristics of N under different C/N ratios

但当 C/N 比增大至 7.2 时, TN 去除率则明显

下降,平均去除率仅为 63%,工艺出水 TN 平均浓度高达 $31.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。ABR 出水过高的 COD 浓度严重影响了 MBR 内的有效硝化,导致 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除效果不佳,工艺出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均浓度达 $21.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 NO_x^- 平均浓度仅为 $9.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,电子受体的不足导致了 TN 去除效果的不佳。值得一提的是,此阶段反硝化吸磷量出现减少,这也影响了 TN 的去除。

2.4 同步脱氮除磷效能分析

当 C/N 分别为 3.6、4.2、4.8 和 6.0 时,对 4 个 C/N 比条件下的平均缺氧段吸磷量与平均 TN 去除量进行了线性回归。如图 6 所示,ABR 缺氧吸磷量与工艺对 TN 去除量有着良好的线性关系,关系式如下:

$$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}_{\text{缺氧吸磷量}} = 3.7821 \text{ TN}_{\text{去除量}} + 21.579$$

$$(R^2 = 0.9835)$$

由此可见,在本研究 ABR-MBR 组合反硝化除磷工艺中,TN 的去除效果依赖于工艺缺氧段对磷的吸收。但当 C/N 继续提高到 7.2 时,工艺对 TN 的去除量与缺氧吸磷量反而没有体现出较强的线性关系,这可能是由于过高的进水 COD 浓度严重破坏了工艺的反硝化除磷体系,故这种良好的线性关系也是建立在反硝化除磷工艺正常运转的基础之上。

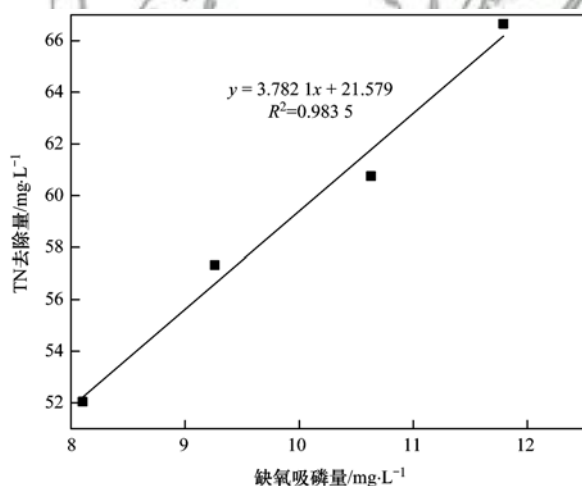


图 6 TN 去除量与缺氧段吸磷量相关性分析

Fig. 6 Correlation of TN removal with the amount of anoxic phosphorous uptake

由此可见,C/N 比与氮、磷的去除存在较好的响应机制。一方面,充足的优质碳源是实现高效反硝化除磷的关键^[22],在进水有机物不影响缺氧吸磷的条件下,提高进水有机物浓度强化了工艺的反硝化除磷,也有助于工艺氮、磷的去除^[23];另一方面,过高的有机物浓度会严重影响缺氧段吸磷以及

MBR 的有效硝化,反硝化除磷会受到电子受体不足而导致氮磷的去除效果不佳,故良好的硝化效果是实现高效反硝化除磷的重要前提。

3 结论

(1)在进水 C/N 比分别为 3.6、4.2、4.8、6.0 和 7.2 时,ABR 第 2 隔室的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度依次为 8.37、9.65、11.41、13.44 和 $4.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,提高进水 C/N 比有利于厌氧释磷,但 C/N 比为 7.2 时对厌氧段释磷产生抑制。

(2)不同进水 C/N 比下,ABR-MBR 组合工艺最终出水溶解性 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均浓度分别为 0.22、0.34、0.39、0.42 和 $2.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,低 C/N 条件有利于本工艺对磷的去除。

(3)进水 C/N 比大于 6.0 时,反硝化除磷会因 MBR 内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除效果的严重恶化而崩溃,其去除率由 93.64% 降低到 62.97%,良好的硝化效果是反硝化除磷的前提。

(4)在进水 C/N 比分别为 3.6、4.2、4.8 和 6.0 时,ABR 缺氧吸磷量与工艺对 TN 去除量有着良好的线性关系,提高进水 C/N 比有助于系统对氮磷的去除。

参考文献:

- [1] Carvalho C, 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] 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] Seviour R J, Mino T, Onuki M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, **27**(1): 99-127.
- [4] 郭海娟, 马放, 沈耀良. C/N 比对反硝化除磷效果的影响[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(3): 367-371.
Guo H J, Ma F, Shen Y L. Effect of C/N ration on denitrifying dephosphatation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25** (3): 367-371.
- [5] 谢继慈, 陈洪波, 李小明, 等. 混合碳源浓度对单级好氧生物脱氮除磷的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33** (10): 1771-1778.
Xie J C, Chen H B, Li X M, *et al.* Effect of mixed carbon source concentration on biological nitrogen and phosphorus removal in oxic/extended-idle process[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(10): 1771-1778.
- [6] 张建华, 彭永臻, 张森, 等. 不同电子受体配比对反硝化除磷特性及内碳源转化利用的影响[J]. *化工学报*, 2015, **66** (12): 5045-5053.
Zhang J H, Peng Y Z, Zhang M, *et al.* Effect of different

- electron acceptor ratios on removal of nitrogen and phosphorus and conversion and utilization of internal carbon source [J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(12): 5045-5053.
- [7] 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.
- [8] 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 等. ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2934-2938.
- Wu P, Lu S J, Xu L Z, *et al.* Optimization of energy saving measures with ABR-MBR integrated process[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2934-2938.
- [9] Wu P, Ji X M, Song X K, *et al.* Nutrient removal performance and microbial community analysis of a combined ABR-MBR (CAMBR) process[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **232**: 273-279.
- [10] 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.
- [11] 王亚宜, 王淑莹, 彭永臻, 等. 污水有机碳源特征及温度对反硝化聚磷的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 186-192.
- Wang Y Y, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* The influence of carbon source and temperature on the denitrifying dephosphorus removal in wastewater treatment process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(2): 186-192.
- [12] Jun H B, Shin H S. Substrates transformation in a biological excess phosphorus removal system[J]. *Water Research*, 1997, **31**(4): 893-899.
- [13] 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, Lv L, *et al.* Optimization of denitrifying phosphorus removal performance based on ABR-MBR combined process[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4282-4288.
- [14] 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.
- [15] 王亚宜, 彭永臻, 李探微, 等. A2N 连续流双泥系统反硝化除磷脱氮试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, **36**(8): 1046-1049.
- Wang Y Y, Peng Y Z, Li T W, *et al.* Denitrifying dephosphorus removal in A2N two-sludge process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, **36**(8): 1046-1049.
- [16] 张园, 罗固源, 许晓毅, 等. UCT 工艺进水 COD 浓度与 C/N 对除磷效果的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1846-1850.
- Zhang Y, Luo G Y, Xu X Y, *et al.* Effect of the influent COD and C/N ratio on phosphorus removal of UCT system [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1846-1850.
- [17] 王晓莲, 王淑莹, 彭永臻. 进水 C/P 比对 A²/O 工艺性能的影响[J]. *化工学报*, 2005, **56**(9): 1765-1770.
- Wang X L, Wang S Y, Peng Y Z. Effects of feed water C/P ratio on performance of anaerobic-anoxic-oxic process[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2005, **56**(9): 1765-1770.
- [18] 孙洪伟, 郭英, 尤永军, 等. 不同碳氮比(C/N)条件下驯化微生物的反硝化特性[J]. *环境化学*, 2014, **33**(5): 770-775.
- Sun H W, Guo Y, You Y J, *et al.* Denitrification characteristic of microbial population tamed at different C/N ratios [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(5): 770-775.
- [19] 李勇智, 彭永臻, 张艳萍, 等. 硝酸盐浓度及投加方式对反硝化除磷的影响[J]. *环境污染与防治*, 2003, **25**(6): 323-325.
- Li Y Z, Peng Y Z, Zhang Y P, *et al.* Effect of nitrate on denitrifying dephosphatation [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2003, **25**(6): 323-325.
- [20] 史静, 吕锡武. 厌氧释磷量和温度对反硝化聚磷的影响[J]. *化工学报*, 2010, **61**(1): 166-171.
- Shi J, Lv X W. Effects of phosphorus release amount and temperature on denitrifying phosphorus removal in a two-sludge system[J]. *CIESC Journal*, 2010, **61**(1): 166-171.
- [21] 王辉, 沈耀良. 硝酸盐对反硝化除磷过程的影响分析[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(6): 977-980.
- Wang H, Shen Y L. Impact analysis of nitrate on denitrifying dephosphatation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, **3**(6): 977-980.
- [22] 韩芸, 许松, 董涛, 等. 碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 590-596.
- Han Y, Xu S, Dong T, *et al.* Effects of carbon sources, temperature and electron acceptors on biological phosphorus removal[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 590-596.
- [23] Shuai Y, Yang F L, Fu Z M, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal by a novel sequencing batch moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 551-557.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3451)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)