

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

**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

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 ..... 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 ..... 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征及其对大气能见度的影响 ..... 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM<sub>10</sub> 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 ..... 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 ..... 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 ..... 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 ..... 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 ..... 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 ..... 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 ..... 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 ..... 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 ..... 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 ..... 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 ..... 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 ..... 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 ..... 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 ..... 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 ..... 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 ..... 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 ..... 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 ..... 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 ..... 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 的制备及其太阳光下降解土霉素 ..... 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 ..... 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 ..... 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 ..... 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 ..... 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 ..... 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 ..... 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 ..... 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 ..... 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物<sup>15</sup>N自然丰度对长期氮施加的响应 ..... 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 ..... 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 ..... 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 ..... 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 ..... 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 ..... 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 ..... 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe<sup>3+</sup> 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 ..... 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 ..... 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 ..... 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 ..... 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 ..... 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 ..... 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 ..... 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 ..... 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 ..... 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 ..... 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO<sub>2</sub> 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 ..... 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 ..... 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

# ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究

吴鹏<sup>1,2</sup>, 陆爽君<sup>1</sup>, 徐乐中<sup>1,2</sup>, 刘捷<sup>1</sup>, 沈耀良<sup>1,2,3\*</sup>

(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. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

**摘要:** 能耗高和膜污染是限制膜生物反应器(MBR)广泛应用的重要因素。为降低工艺运行能耗和延缓膜污染, 以厌氧折流板反应器(ABR)-MBR 工艺处理生活污水为例, 对工艺结构和脱氮除磷运行条件进行优化。结果表明, 通过优化 ABR-MBR 工艺结构, 可降低 43% 的运行能耗, 同时可保持较高的 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 去除效果, 平均去除率分别为 91%、85%、76% 和 86%。另外, 添加颗粒填料可有效延缓膜污染, 不过也改变了膜污染的形成过程, 膜内部污染物含量显著增多, 碳水化合物含量增加, 而蛋白质含量减少, 碳水化合物/蛋白质比明显增大。最终, 增强了 MBR 反应器的实际应用性能。

**关键词:** 厌氧折流板反应器; 膜生物反应器; 生活污水; 脱氮除磷; 节能降耗

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2934-05 DOI: 10.13227/j.hjkk.2015.08.028

## Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process

WU Peng<sup>1,2</sup>, LU Shuang-jun<sup>1</sup>, XU Yue-zhong<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, SHEN Yao-liang<sup>1,2,3\*</sup>

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

**Abstract:** High energy consumption and membrane fouling are important factors that limit the wide use of membrane bioreactor (MBR). In order to reduce energy consumption and delay the process of membrane fouling, the process of anaerobic baffled reactor (ABR)-MBR was used to treat domestic sewage. The structure of the process and conditions of nitrogen and phosphorus removal were optimized in this study. The results showed that energy consumption was reduced by 43% through optimizing the structure of ABR-MBR process. Meanwhile, the process achieved a high level of COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN and TP removal, with the average removal efficiencies of 91%, 85%, 76% and 86%, respectively. In addition, the added particulate media could effectively delay membrane fouling, while the formation process of membrane fouling was changed. The extracted amount of carbohydrates increased while the amount of proteins decreased. Finally, the potential was enhanced for the practical application of MBR.

**Key words:** anaerobic baffled reactor; membrane bioreactor; domestic sewage; nitrogen and phosphorus removal; energy saving and consumption reducing

目前全国每年产生农村生活污水约 80 多亿 t, 其中 96% 的农村生活污水未经处理直接排放, 成为我国水体污染的主要污染源之一<sup>[1]</sup>。为此, 废水脱氮除磷工艺的开发备受关注。笔者结合 ABR 反应器能有效去除有机污染物和悬浮物、能耗低<sup>[2]</sup>与 MBR 反应器出水水质好、占地面积小、实现了水力停留时间(HRT)和污泥龄(SRT)的完全分离等优点<sup>[3]</sup>, 将 ABR 反应器和 MBR 反应器进行优化组合用于废水的脱氮除磷, 并获得了较好的处理效果<sup>[4,5]</sup>, 但存在能耗较高的问题。由于充氧曝气的能耗高达工艺总体能耗的 60%~70%<sup>[6]</sup>, 为此, 降低 MBR 反应器曝气量, 工艺由全程硝化反硝化转换为短程硝化反硝化, 并取得了较好的处理效果, 同时大幅节省了能耗<sup>[7]</sup>。然而曝气量的大幅减小加剧了膜污染, 影响工艺的实际运行性能。而在 MBR 反应器内添加颗粒填料能增其与膜表面的摩擦作用, 有利

于延缓膜污染<sup>[8,9]</sup>。另外, 污泥回流的能耗高达工艺总体能耗的 10%~20%<sup>[10,11]</sup>。

为此, 本试验在前期研究基础上, 研究如何通过工艺结构的优化, 实现工艺能耗的进一步降低。另外, 在 MBR 反应器内添加颗粒填料, 研究颗粒填料对膜污染的影响, 比较添加颗粒填料前后工艺处理效能的变化, 分析了颗粒填料对膜表面污染物成分的影响, 以期工艺的节能优化提供借鉴, 拓展延缓膜污染的措施, 进一步提高 MBR 反应器的实际应用性能。

收稿日期: 2015-01-25; 修订日期: 2015-03-08

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA610002); 苏州市环境保护科技项目(B20130502); 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

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

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

## 1 材料与方法

### 1.1 试验水质

工艺进水为某高校生活污水,其水质为 COD 232 ~ 459  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  20 ~ 46  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TN 25 ~ 56  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , TP 1 ~ 7  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### 1.2 接种污泥与颗粒填料

接种污泥取自苏州市某城市污水处理厂重力浓缩池. 污泥静置 1 周后,加入适量葡萄糖,再静置 2 d,然后均匀移入 ABR 各隔室,总接种泥量约为各隔室有效体积的 3/5. 用配制的生活污水填满各隔室,闲置 1 d 后开始连续进水. 启动时, ABR 反应器各隔室 MLSS 约为 28  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 将取自苏州某污水处理厂氧化沟的活性污泥注入好氧池,投入量占好氧池有效体积的 1/2, MLSS 约为 7.5  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

颗粒填料呈球形,粒径为 4.0 ~ 4.4 mm,相对密度 1.01 ~ 1.04,材质主体为聚乙二醇含水凝胶载体(改性聚氨酯凝胶占 16%、水占 84%). 其在好氧池投加的体积占好氧池体积的 5%.

### 1.3 ABR-MBR 一体化中试工艺

本试验所采用的小型中试装置由 3 隔室 ABR 反应器和 2 个好氧池组合而成,为及时和定性观察反应器内的运行情况,反应器均由透明有机玻璃加工制作. ABR 反应器、好氧池 1 和好氧池 2 的有效容积分别为 60、20、40 L,在好氧池 2 放入膜组件,构建 MBR 反应器. 试验装置如图 1 所示.

好氧池底部布设穿孔曝气管,曝气量可由空气流量计调节. 通过调节曝气量,在好氧池实现全程硝化或短程硝化,在 ABR 内实现(短程)反硝化及

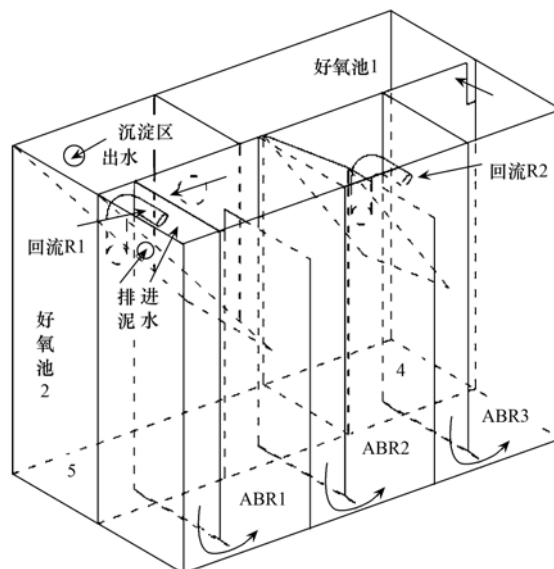


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental reactor

反硝化除磷脱氮,同时基于厌氧反硝化除磷以及厌氧释磷、好氧吸磷等特性,最终通过沉淀区排泥来实现磷的去除. 部分污泥由沉淀区下方的斜板回流至好氧区. MBR 由自吸泵间歇抽吸出水,抽吸周期为 12 min(包括 10 min 抽吸和 2 min 反冲洗). 整个系统采用可编程逻辑控制器(PLC)进行恒定水位、出水泵和反冲洗泵启闭的自动控制. 通过在线监测仪实时监控 ABR 和好氧池的 DO、pH 值. 试验选用的膜组件为 PVDF 帘式中空纤维微滤膜,膜孔径为 0.1  $\mu\text{m}$ ,过滤面积为 1.2  $\text{m}^2$ ,采用真空压力表监测跨膜压差(TMP)变化,观察膜的污染状况,当 TMP 增至 40 kPa 时对膜组件进行化学清洗.

工艺运行条件如表 1 所示,每个工况至少稳定运行两个月.

表 1 试验运行条件

Table 1 Operation conditions of the process

工况	颗粒填料	HRT/h			SRT/d	R1/%	R2/%	好氧池溶解氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$
		ABR	MBR	合计					
1	无	4.5	3	7.5	20	200	50	3	25
2	无	4.5	3	7.5	20	200	50	1	25
3	有	4.5	3	7.5	20	200	50	1	25

### 1.4 膜污染物的提取和监测方法

对每个工况膜清洗时,进行膜污染物的提取. 在膜污染物提取前,先采用物理清洗去除膜表面的泥饼层. 然后将剪取的污染膜浸泡于 30 $^{\circ}\text{C}$ 、pH 为 12 的氢氧化钠溶液 24 h,提取膜污染物<sup>[12,13]</sup>.

本试验 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP、MLSS、MLVSS 均采用国家标准方法进行测定<sup>[14]</sup>. 污染物 TOC 采用

Analytikjena 3100C 型 TOC 分析仪测定;碳水化合物采用苯酚硫酸法<sup>[15]</sup>;蛋白质采用 Lowry 试剂法<sup>[16]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 ABR-MBR 工艺降耗措施优化情况

前期研究<sup>[4]</sup>只是将 ABR 反应器和 MBR 反应器进行简单的组合,通过两个混合液回流泵实现泥水

的回流,能耗较高.为此,笔者在前期研究基础上对工艺结构和运行条件进行优化,其措施如表2所示.在好氧池1和好氧池2分别增加两块隔板,构建两个集气室,利用收集曝气气体的提升作用取代了两个混合液回流泵(即气升回流)<sup>[17]</sup>,将泥水混合液提升至厌氧区,实现泥水混合液的自动回流,节省了投资成本,降低了动力能耗(从 $0.85 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $0.59 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ).工况2大幅降低曝气量,能耗得

到进一步降低(从 $0.59 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $0.48 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ).工况3,MBR池内添加了颗粒填料,由以下分析可知,添加颗粒填料可减少膜清洗频率.这样,工况3增加的颗粒填料成本可由减少的膜清洗费用抵消,而能耗不变.最终,工艺能耗为 $0.48 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ,与Choo等<sup>[18]</sup>和Iaconi等<sup>[19]</sup>的研究结果( $0.39 \sim 1.04 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ )相比,本工艺能耗亦比较低.

表2 工艺降耗措施

Table 2 Measures of energy saving

工况	措施	成本	能耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$
1	构建两个集气室	节省两个泥水回流泵	从 $0.85$ 降至 $0.59$
2	大幅降低曝气量(溶解氧从 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	曝气机型号更小	从 $0.59$ 降至 $0.48$
3	添加颗粒填料	填料成本可由减少的膜清洗成本抵消	$0.48$

## 2.2 优化过程污染物的去除变化情况

在工艺优化过程中污染物的去除变化如表3所示,可知整个优化过程中,工艺对COD的去除差别不大,去除效果很好,出水COD平均浓度低于 $38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均去除率高于88%.工况1溶解氧浓度较高,工艺全程硝化能力强,平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 获得了积累,浓度达 $8.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,TN浓度为 $12.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其去除率达72%;平均出水TP浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率达89%.工况2溶解氧大幅降低,工艺转为短程硝化模式,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平

均为 $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 获得了积累,浓度达 $4.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,TN浓度为 $9.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,其去除率为75%;平均出水TP浓度为 $0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率降低了9个百分点,这与溶解氧降低影响聚磷菌释磷和吸磷能力有关<sup>[20]</sup>.相比工况2,工况3添加了颗粒填料,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN浓度变化不大,TN去除率变化不大,与颗粒填料能显著提高硝化效果的结论有所不同<sup>[21]</sup>;然而TP去除率增大了6个百分点,这可能与填料能吸附磷有关.综上所述,工艺优化过程中降低了大量能耗,同时污染物去除效果仍保持在较高水平.

表3 工艺进出水水质

Table 3 Water quality of the influent and effluent

项目	进水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				出水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						去除率/%		
	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TN	TP	COD	TN	TP	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	COD	TN	TP
工况1	336	30	45	5	38	12.1	0.5	0.7	0.2	8.6	88	72	89
工况2	412	28	38	4	25	9.5	0.7	4.0	4.1	0.5	93	75	80
工况3	374	31	44	5	32	10.6	0.7	4.6	3.5	0.7	91	76	86

## 2.3 优化过程TMP的变化情况

不同工况条件下TMP变化情况如图2所示,化学药洗基本能保证TMP恢复至初始值( $15 \text{ kPa}$ ).工况1化学清洗后,膜组件基本能够正常稳定运行30 d.而当工况2大幅降低曝气量时,膜污染加剧,只能维持正常稳定运行15 d左右,说明曝气量是影响膜污染的重要因素之一<sup>[22]</sup>.工况3,膜组件化学清洗后运行12 d,TMP上升至 $26 \text{ kPa}$ ,随即向工艺内添加了颗粒填料,发现TMP大幅降低至 $18 \text{ kPa}$ ,此后TMP缓慢上升,膜组件能正常稳定运行40 d左右,显著提高了膜组件的清洗周期,从而可有效减少膜清洗频率,降低膜清洗的成本,极大地增强了MBR反应器的实际应用性能.

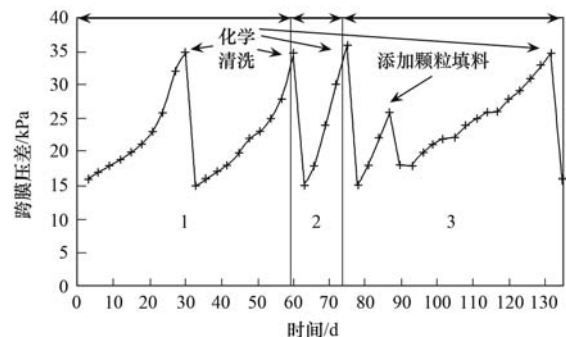


图2 不同运行工况跨膜压差的变化

Fig. 2 Change of TMP under different operation conditions

## 2.4 膜表面污染物成分分析

工艺内未添加颗粒填料,膜表面会形成厚厚的



泥饼层,而且比较松软,而在工艺内添加颗粒填料后,泥饼层很难形成,这与在曝气作用下颗粒填料形成流化状态对膜表面的冲刷、撞击作用促成膜表面污泥颗粒反向扩散及沉积层脱落有关<sup>[23]</sup>;当 TMP 达 35 kPa 时,泥饼层仍很薄,但比较致密。试验发现未添加颗粒填料和添加颗粒填料两种运行模式下 TMP 均达到 35 kPa 时,膜表面的泥饼层厚度相差很大。添加了颗粒填料,泥饼层很薄,为何膜污染依然很严重?为此,对膜组件进行物理清洗,清除了膜表面的泥饼层后继续运行。随即发现未添加颗粒填料时的膜组件 TMP 恢复至 24 kPa,而添加颗粒填料时的膜组件 TMP 只能恢复至 30 kPa。由此可知添加颗粒填料改变了膜污染的形成过程,不仅附着于膜

表面的泥饼层发生了变化,而且经物理清洗后仍黏附在膜表面的污染物也发生了变化。因此,有必要对经物理清洗仍黏附在膜表面的污染物成分进行分析,以此说明膜污染的成因。

膜表面污染物的成分如表 4 所示,可知添加颗粒填料前后膜表面污染物的成分发生了明显变化。添加颗粒填料后,单位膜面积的膜污染物显著增多,其中碳水化合物增加 23%,而蛋白质减少 6%,碳水化合物/蛋白质比则由 0.42 增加到 0.55,表明碳水化合物是引起膜污染的重要影响因素<sup>[24,25]</sup>。虽然膜污染物成分不同,但经化学清洗后, TMP 仍能恢复至初始值,说明添加颗粒填料不影响膜通量的恢复,不影响膜组件的继续使用性能。

表 4 膜表面污染物的成分

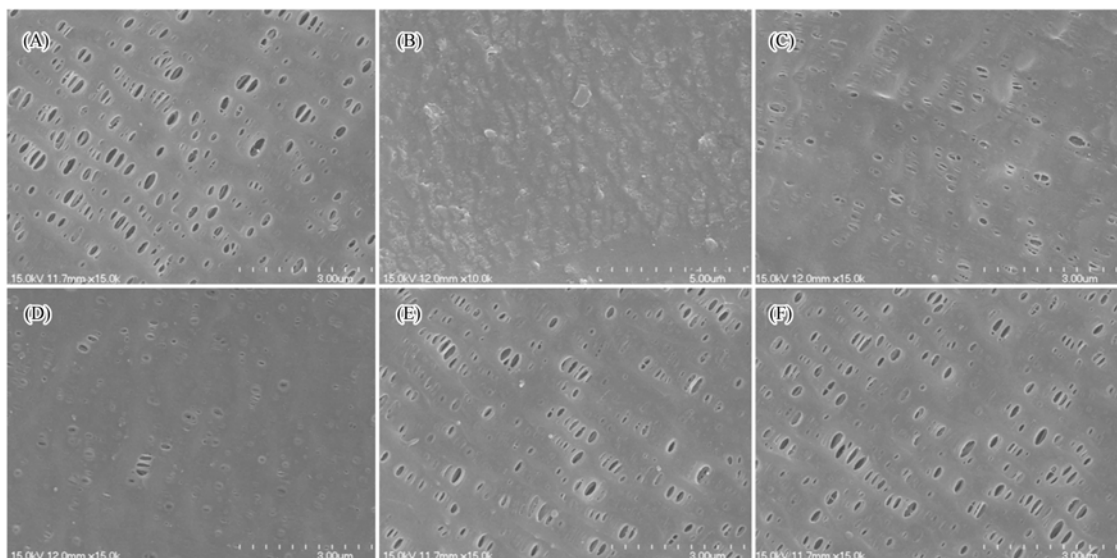
Table 4 Amounts of organic components of the membrane foulants

项目	TOC/mg·m <sup>-2</sup>	碳水化合物/mg·m <sup>-2</sup>	蛋白质/mg·m <sup>-2</sup>	碳水化合物/蛋白质
未添加颗粒填料的膜表面污染物	103	101	241	0.42
添加颗粒填料的膜表面污染物	136	124	226	0.55

## 2.5 膜污染扫描电镜分析

为更好地分析颗粒填料对膜污染形成过程的影响,故采用 SEM 对工艺膜污染现象进行观察。图 3 是各个过程膜表面的 SEM 照片。由图 3A 可见新膜膜孔非常清晰,分布也比较均匀。膜被严重污染后(图 3B),膜表面被滤饼层覆盖,膜孔被全部堵塞。未添加颗粒填料阶段,严重污染的膜经物理清洗后

(图 3C)泥饼层被清除,部分膜孔清晰可见,但膜污染还是比较严重。添加颗粒填料阶段,严重污染的膜经物理清理后(图 3D)泥饼层被清除,清晰可见的膜孔相对未添加颗粒填料阶段更少,膜污染更加严重。这与未添加颗粒填料时的膜组件 TMP 可恢复至 24 kPa,而添加颗粒填料时的膜组件 TMP 只能恢复至 30 kPa 的结果是一致的。然而无论是未添加



A. 新膜; B. 膜污染后期; C. 未添加颗粒填料,污染膜物理清洗后; D. 添加颗粒填料,污染膜物理清洗后;  
E. 未添加颗粒填料,污染膜化学清洗后; F. 添加颗粒填料,污染膜化学清洗后

图 3 膜污染扫描电镜图片

Fig. 3 SEM images of the membrane surface

颗粒填料阶段还是添加颗粒填料阶段的污染膜经化学清洗后,膜孔均清洗可见(图 3E 和 3F),膜通量基本能得到恢复. 另外,工艺添加颗粒填料后运行了两个多月,膜表面(图 3F)与新膜(图 3A)相比没有任何损伤. 说明添加颗粒填料后,其与膜表面的摩擦作用不会对膜造成危害.

### 3 结论

(1)构建了 ABR-MBR 一体化工艺,通过气升回流作用不但节省了工艺成本,而且降低了工艺运行能耗,同时工艺对污染物的去除效果仍保持在较高水平,对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的平均去除率分别为 91%、85%、76% 和 86%.

(2)添加颗粒填料可有效延缓膜污染,减少工艺运行过程中膜组件的清洗频率,同时不会对膜组件本身构成危害,增强了 MBR 反应器的实际应用性能.

(3)添加颗粒填料改变了膜污染的形成过程,膜表面泥饼层变硬变薄,膜内部污染物含量显著增多,碳水化合物/蛋白质比明显增大.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王志强,李黎,罗海霞,等. 农村生活污水处理技术研究[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(5): 2957-2959.
- [ 2 ] 沈耀良,王宝贞. 废水生物处理新技术[M]. (第 2 版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [ 3 ] 黄菲,梅晓洁,王志伟,等. 冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1002-1008.
- [ 4 ] 吴鹏,刘捷,计小明,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.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Kraume M, Drews A. Membrane bioreactors in waste water treatment-status and trends [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2010, **33**(8): 1251-1259.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Siembida B, Cornel P, Krause S, *et al.* Effect of mechanical cleaning with granular material on the permeability of submerged membranes in the MBR process[J]. *Water Research*, 2010, **44**(14): 4037-4046.
- [ 9 ] Jin L, Ong S L, Ng H Y. Fouling control mechanism by suspended biofilm carriers addition in submerged ceramic membrane bioreactors[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, **427**: 250-258.
- [ 10 ] Fatone F, Battistoni P, Pavan P, *et al.* Operation and maintenance of full-scale municipal membrane biological reactors: a detailed overview on a case study[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, **46**(21): 6688-6695.
- [ 11 ] Gil J A, Túa L, Rueda A, *et al.* Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR[J]. *Desalination*, 2010, **250**(3): 997-1001.
- [ 12 ] Lee H, Amy G, Cho J, *et al.* Cleaning strategies for flux recovery of an ultrafiltration membrane fouled by natural organic matter[J]. *Water Research*, 2001, **35**(14): 3301-3308.
- [ 13 ] Hong S, Aryal R, Vigneswaran S, *et al.* Influence of hydraulic retention time on the nature of foulant organics in a high rate membrane bioreactor[J]. *Desalination*, 2012, **287**: 116-122.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Liu H, Fang H H. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of Sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [ 16 ] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the Folin phenol reagent[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1951, **193**: 265-275.
- [ 17 ] 郭海燕,陈建冬,李芸. 不同 C/N 对气升式内循环膜反应器的脱氮除磷的影响[J]. 水处理技术, 2013, **39**(3): 61-65.
- [ 18 ] Choo K H, Cornel P, Lazarova V. Water-energy Interactions in water reuse[M]. London: IWA Publishing, 2012.
- [ 19 ] Iaconi C D, Sanctis M D, Lopez A. A single-stage biological process for municipal sewage treatment in tourist areas. *Journal of Environmental Management*, 2014, **144**: 34-41.
- [ 20 ] 刘小英,林慧,马兆瑞,等. 同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 214-220.
- [ 21 ] 乔春光,曹春秋,陈莉,等. 颗粒填料强化  $\text{A}^2\text{O}$ -MBR 工艺脱氮研究[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(15): 118-121.
- [ 22 ] 陈焯,汤兵,张姿,等. 曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3031-3037.
- [ 23 ] 赵丽娜,舒波,青鹏,等. 投加颗粒填料对减缓 MBR 膜污染的影响研究[J]. 水处理技术, 2011, **37**(7): 52-56.
- [ 24 ] Zhou J, Yang F L, Meng F G, *et al.* Comparison of membrane fouling during short-term filtration of aerobic granular sludge and activated sludge[J]. *Journal of Environmental Science*, 2007, **19**(11): 1281-1286.
- [ 25 ] Kimura K, Yamato N, Yamamura H, *et al.* Membrane fouling in pilot-scale membrane bioreactors (MBRs) treating municipal wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(16): 6293-6299.

## CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method .....	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing .....	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants .....	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM <sub>2.5</sub> and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China .....	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM <sub>10</sub> .....	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data .....	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin .....	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications .....	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River" .....	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City .....	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River .....	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau .....	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China .....	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory .....	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang .....	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region .....	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment .....	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ , $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China .....	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth .....	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application .....	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope .....	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment .....	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation .....	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline .....	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal .....	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems .....	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor .....	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone .....	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China .....	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China .....	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant $^{15}\text{N}$ Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China .....	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau .....	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere .....	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus .....	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation .....	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil .....	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag .....	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism .....	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation .....	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L. ....	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L. ....	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil .....	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable .....	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms .....	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation .....	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature .....	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure .....	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO <sub>2</sub> Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit .....	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs .....	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)



# 《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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