

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 ..... 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 ..... 陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)

气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 ..... 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)

龙凤山本底站大气 CO<sub>2</sub> 数据筛分及浓度特征研究 ..... 栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)

区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 ..... 苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)

天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 ..... 张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 ..... 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)

KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 ..... 沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)

污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 ..... 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 ..... 白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)

1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 ..... 张柏发, 陈丁江 (2911)

南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 ..... 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 ..... 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)

岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)

亚热带典型岩溶区地表流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 ..... 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 ..... 肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)

广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 ..... 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究 ..... 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 ..... 王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)

酸性条件下Ti(IV)催化 O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解邻苯二甲酸二甲酯 ..... 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)

无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响 ..... 施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)

羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 ..... 方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)

不锈钢201、304和316L在模拟污水管道反应器中的腐蚀 ..... 鲍国栋, 左剑丞, 王雅娇, 于里 (3002)

微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 ..... 王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)

不同类型LDHs对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 ..... 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)

SPG膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 ..... 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)

SPG膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 ..... 张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)

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 ..... 陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)

限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 ..... 刘文如, 阴方芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)

UASBB厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 ..... 李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)

开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用 ..... 陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)

北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 ..... 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)

珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 ..... 朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 ..... 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 ..... 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)

低分子有机酸对土壤中Cu化学形态的影响 ..... 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)

EDTA与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究 ..... 尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和N<sub>2</sub>O排放的关系 ..... 陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)

黄河口不同恢复阶段湿地土壤N<sub>2</sub>O产生的不同过程及贡献 ..... 孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)

猪粪化肥配施对双季稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放及其全球增温潜势的影响 ..... 王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)

我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 ..... 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)

丛枝菌根影响纳米ZnO对玉米的生物效应 ..... 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 ..... 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 ..... 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)

重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 ..... 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)

维生素B<sub>12</sub>对脱氮功能蓝藻降解2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究 ..... 刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 ..... 徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)

多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 ..... 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)

稀有鮐鮓 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 ..... 邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)

藻细胞和高岭土的存在对病毒MS2存活的影响 ..... 何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)

多胺功能化介孔炭对Pb(II)的吸附动力学与机制 ..... 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 ..... 崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)

经济结构调整的污染减排效应:以COD减排为例 ..... 李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)

中国铅流改变原因分析 ..... 马兰, 毛建素 (3219)

放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 ..... 汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)

中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 ..... 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)

《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882,2927,3059,3218)

# SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究

张磊<sup>1,2</sup>, 张明<sup>2</sup>, 刘春<sup>2</sup>, 张静<sup>2</sup>, 刘俊良<sup>1\*</sup>

(1. 河北农业大学城乡建设学院, 保定 071001; 2. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

**摘要:** SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器是微气泡曝气与废水好氧生物处理结合的可行方式。本研究采用 SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器处理模拟生活废水, 探讨运行条件、SPG 膜污染及膜孔结构变化等因素对系统运行性能的影响。结果表明, 空气通量、进水有机负荷、填料类型及床层孔隙率对 COD 去除性能影响较小, 各运行条件下 COD 平均去除率保持在 80% ~ 90%。随着空气通量降低或进水有机负荷提高, 溶解氧(DO)浓度显著下降, 造成氨氮去除性能恶化, 其平均去除率可由 80% ~ 90% 降至 20% ~ 30%; 同步硝化反硝化过程受此影响, 总氮(TN)平均去除率也由 30% ~ 40% 降至 20% 左右。此外, 采用环形填料并提高床层孔隙率, 有助于改善污染物去除性能。低空气通量或高进水负荷条件下, 微气泡曝气的氧利用率接近 100%。长期运行中, SPG 膜表面生物膜生长及有机物累积会造成 SPG 膜污染, 而在线清洗中碱性 NaClO 溶液侵蚀 SPG 膜孔结构, 使 SPG 膜的平均孔径及孔隙率显著增大, 从而影响 SPG 膜空气通透性。

**关键词:** 微气泡曝气; SPG 膜; 生物膜反应器; 运行性能; 影响因素

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3024-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.08.027

## Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming<sup>2</sup>, LIU Chun<sup>2</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>, LIU Jun-liang<sup>1</sup>

(1. Institute of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 2. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** The microbubble-aerated biofilm reactor provides a feasibility to apply microbubble aeration in aerobic wastewater treatment processes. In this study, Shirasu porous glass (SPG) membranes were used for microbubble aeration in a fixed bed biofilm reactor treating synthetic municipal wastewater. The influencing factors for operational performance of the bioreactor were investigated, including operating parameters, SPG membrane fouling and its structural changes. The results indicated that there was no significant influences of air flux, organic loading rate and packed bed on COD removal and an average COD removal efficiency of 80% -90% could be achieved under different operating conditions. On the other hand, the dissolved oxygen (DO) concentrations decreased significantly along with reducing air flux or increasing organic loading rate. As a result, the ammonia removal deteriorated gradually and the average ammonia removal efficiency decreased from 80% -90% to 20% -30%. At the same time, the total nitrogen (TN) removal achieved in the simultaneous nitrification and denitrification process was also reduced from 30% -40% to about 20%, due to nitrification inhibition. Higher available porosity could be obtained when ring packing was used in the fixed bed, resulting in improvement of contaminant removal performance. An oxygen utilization efficiency of close to 100% could be achieved at low air fluxes or high organic loading rates during microbubble aeration. Both biofilm growth and organic foulant accumulation on SPG membrane surface contributed to membrane fouling after long-term operation. The average pore size and porosity of SPG membrane increased significantly due to the chemical corrosion caused by alkali NaClO solution used for online cleaning. Then the air permeation of SPG membrane was affected by membrane fouling and destroyed pore structure.

**Key words:** microbubble aeration; SPG membrane; biofilm reactor; operational performance; influencing factor

微气泡通常是指直径为 10 ~ 50  $\mu\text{m}$  的微气泡, 具有比表面积大、上升速率小、气-水接触时间长、接触面积大等优良特性, 有助于提高气-水传质速率<sup>[1, 2]</sup>, 因而在废水处理领域逐渐受到关注<sup>[3]</sup>。已有研究证实微气泡曝气对氧传质的强化作用<sup>[4, 5]</sup>。目前, 两种常用的微气泡产生方法为气-水

旋流法<sup>[6~8]</sup>和气体压缩法<sup>[9, 10]</sup>。此外, 一种采用 SPG (shirasu porous glass) 膜作为气-液分散介质的

收稿日期: 2013-12-06; 修订日期: 2014-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008111); 河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(11966726D)

作者简介: 张磊(1983~), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为废水生物处理技术, E-mail: zhlaza@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: hb-ljl@163.com

微气泡产生方法得到发展<sup>[11-13]</sup>。

SPG 膜是一种经过相分离及酸沥过程而制成的多孔玻璃膜<sup>[14]</sup>,具有孔径分布均匀、膜孔尺寸易控制、产生的微气泡大小一致等优势,已经作为一种分散介质广泛应用于气体扩散工艺中。在气体扩散工艺中,一定压力的压缩空气从 SPG 膜外侧通过膜孔压入膜内侧的循环液体中,产生微气泡<sup>[11]</sup>。

好氧生物处理是废水处理的主要工艺,氧传质过程对污染物去除效能影响显著,较高的溶解氧(DO)浓度有利于有机污染物的去除<sup>[15,16]</sup>。微气泡曝气对氧传质的强化作用有助于提高好氧生物处理的运行效能。已有研究尝试将微气泡曝气技术应用于好氧生物处理<sup>[9,17]</sup>。其中,SPG 膜微气泡曝气技术已在生物膜反应器中获得成功应用<sup>[18]</sup>。研究表明,基于 SPG 膜微气泡曝气的固定床生物膜反应器能够实现长期连续稳定运行,且具有氧利用率高等优势<sup>[19]</sup>。

采用 SPG 膜系统进行微气泡曝气,空气流量、有机负荷、填料床层是影响反应器运行性能的重要参数,因此,合理调整运行参数,能够有效改善 SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器的运行条件,有利于污染物的去除。同时,SPG 膜污染是影响其应用的重要问题,因此,在应用过程中控制膜污染值得关注,但目前相关研究仍然较少。

本研究在固定床生物膜反应器中采用 SPG 膜进行微气泡曝气,处理模拟生活废水,并采用在线方式进行膜清洗。考察了长期连续运行过程中空气流量、有机负荷及填料床层特性对处理系统的运行性能的影响,并对此过程中 SPG 膜污染状况、膜表面及膜孔结构变化进行了研究,分析了其对空气通透性的影响,以期 SPG 膜微气泡曝气在好氧生物处理中的应用提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验装置

SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器如图 1 所示,采用亲水性管式 SPG 膜(SPG 技术有限公司,日本),平均膜孔径为  $0.62\ \mu\text{m}$ ,膜面积为  $1.57 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$ 。采用屏蔽泵作为液体循环泵,以反应器混合液作为循环液体,控制 SPG 膜管内液体流速为  $1.11 \sim 1.65\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。利用空气压缩机提供  $0.6 \sim 0.8\ \text{MPa}$  的压缩空气,通过调节跨膜压差(膜外侧气压与内侧液压之差)控制空气流量。

生物膜反应器高 600 mm,内径 250 mm,有效容

积 15 L。将多孔填料(或环形填料)置于直径为 80 mm 的聚丙烯球形填料内填充于反应器中,填充率为 11%,通过调整床层高度改变床层孔隙率。

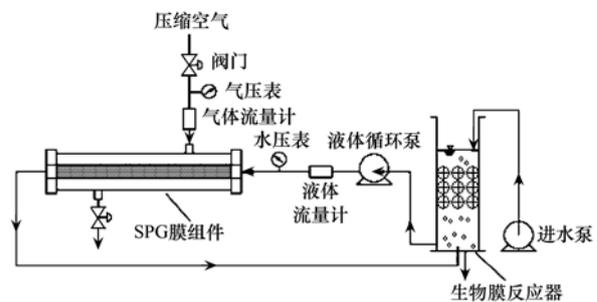


图 1 SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of microbubble-aerated biofilm reactor using SPG membrane

### 1.2 实验过程

向反应器中接种城市污水处理厂二沉池回流污泥,接种初始污泥浓度(MLSS)约为  $0.5\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,以促进填料上生物膜的形成。向反应器中曝气,不控制污泥流失,待反应器内平均污泥浓度达到  $1.1\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,挂膜过程完成。

挂膜过程及后续运行过程均采用 SPG 膜系统进行微气泡曝气,实验用水均采用模拟生活废水<sup>[20]</sup>,其平均 COD 为  $335.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 99.7\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮为  $30.3\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 8.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TN 为  $39.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 9.8\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在床层孔隙率(多孔填料)为 69.2% 条件下,考察不同空气流量和进水有机负荷(改变 HRT)对反应器运行性能的影响;通过改变床层孔隙率和填料类型,考察填料床层特性对反应器运行性能的影响。各运行条件下的稳定运行时间为 30~40 d,实验温度控制在 30~35℃。

反应器连续运行过程中,采用在线方式对 SPG 膜进行清洗,以控制 SPG 膜污染。在线清洗过程为:①  $1.3\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{NaClO}$  溶液 1 h;②  $0.5\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{HCl}$  溶液 10 min;③ 清水 15 min;清洗频率为每 2 d 1 次。反应器运行结束后,对 SPG 膜样品污染状况进行观察;而后采用热处理( $550\ ^\circ\text{C}$ , 3 h)和酸浸处理( $0.5\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{HCl}$  溶液, 24 h)去除 SPG 膜表面污染层,观察不同处理方法对污染层的清除效果,以及污染层清除后 SPG 膜孔结构变化。

### 1.3 分析方法

空气压力与循环液体压力采用压力表测定,空气流量与循环液体流量采用流量计测定。溶解氧通过溶解氧测定仪(WTW cellOx 325,德国)测定。COD、氨氮、硝酸盐氮采用国标方法测定,TN 采用

TOC 分析仪 (TOC-V<sub>C<sub>PN</sub></sub>, 日本) 测定. SPG 膜污染状况及表面结构采用扫描电镜 (SEM) (S-4800-I, Hitachi, 日本) 观察, 膜孔径及孔隙率采用压汞仪 (Poresizer 9320, Micromeritics, 美国) 测定.

#### 1.4 统计分析

本研究使用 SPSS statistics 19 软件进行相关性分析, 确定实验系统运行过程中参数之间的关系. Pearson 相关系数是描述变量间的线性关系程度和方向的统计量, 用  $R$  来描述.  $R$  值始终在  $-1$  和  $1$  之间.  $P$  值表示相关性系数检验的统计量显著性概率,  $P < 0.05$  时, 说明两个变量间相关性显著; 当  $P < 0.01$  时, 说明两个变量间相关性非常显著.

## 2 结果与讨论

### 2.1 空气通量的影响

在平均进水有机负荷为  $0.67 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  条件下, 考察了空气通量分别为  $31.95$ 、 $21.99$  及  $13.44 \text{ L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^2)^{-1}$  时, 污染物的平均去除率和氧利用率、污染物去除负荷, 结果如图 2、图 3 所示.

空气通量减小时, 系统的氧供给能力下降, 反应器中平均 DO 浓度由  $3.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降至  $0.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 在此过程中, COD 去除效果没有显著变化, 平均去除率及去除负荷分别为  $(82.0 \pm 12.2)\%$  ~  $(92.2 \pm 4.4)\%$  及  $(0.55 \pm 0.11)$  ~  $(0.59 \pm 0.21) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ .

氨氮去除效果随着空气通量降低显著变差, 平均去除率由  $(91.9 \pm 11.3)\%$  降至  $(21.2 \pm 19.8)\%$ , 去除负荷由  $(0.047 \pm 0.011) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  降至  $(0.015 \pm 0.013) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 这是由于硝化作用对 DO 浓度变化敏感, DO 浓度的降低抑制了硝化作用. 反应器中的 DO 浓度与氨氮的去除负荷之间存在显著的正相关关系 ( $R = 0.401, P < 0.01$ ), 证实了 DO 是影响硝化过程的重要参数<sup>[21]</sup>.

生物膜反应器运行过程中, 由于生物膜内 DO 扩散的限制, 使得生物膜内形成缺氧环境, 出现同步硝化反硝化现象<sup>[22]</sup>, 可以实现 TN 去除. 当空气通量为  $31.95 \text{ L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^2)^{-1}$  时, TN 的平均去除率及去除负荷分别为  $(46.6 \pm 20.9)\%$  及  $(0.030 \pm 0.014) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 显著小于氨氮去除效果; 同时, 硝酸盐氮积累现象显著, 出水平均硝酸盐氮浓度为  $10.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 可见, 此时由于反应器中 DO 浓度较高, 不利于反硝化过程进行, 因此反硝化速率显著低于硝化速率, 是同步硝化反硝化的限制步骤. 当空气通量降至  $21.99 \text{ L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^2)^{-1}$  和  $13.44$

$\text{L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^2)^{-1}$  时, 随着 DO 浓度降低, 反硝化速率加快, 硝酸盐氮积累现象消失, TN 的平均去除率分别为  $(36.8 \pm 17.7)\%$ 、 $(24.8 \pm 15.2)\%$ , 平均去除负荷分别为  $(0.034 \pm 0.020) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $(0.024 \pm 0.015) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 与氨氮去除效果相当, 此时低 DO 浓度对硝化过程的抑制成为同步硝化反硝化的限制步骤. 可见, 控制适当的反应器运行状态, 如 DO 浓度、生物膜内的物质扩散速率等, 以协调硝化和反硝化速率, 有助于进一步提高 TN 去除率<sup>[23, 24]</sup>.

采用基于各阶段去除 COD (排除反硝化过程对 COD 的消耗) 和氨氮所消耗的 DO 及微气泡曝气系统理论上提供的氧量, 估算实验系统的氧利用率. 结果表明, 3 个空气通量水平下的平均氧利用率分别为  $(53.5 \pm 19.3)\%$ 、 $(75.3 \pm 26.9)\%$ 、 $(110.8 \pm 32.5)\%$ , 显著高于传统气泡曝气方式 (氧利用率为  $10\% \sim 25\%$ <sup>[25]</sup>). 氧利用率主要受到氧传质效率和污染物好氧降解的影响. 随着空气通量的降低, 产生微气泡尺寸减小, 氧传质效率增加<sup>[5]</sup>, 使得氧利用率随之提高. 其中, 当空气通量为  $13.44 \text{ L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^2)^{-1}$  时, 氧利用率高于  $100\%$ , 表明基于污染物去除的氧利用率估算存在正偏差, 其原因可能为除了好氧代谢作用外, 存在其他污染物去除过程, 比如细胞的同化作用、微型动物吞噬作用等.

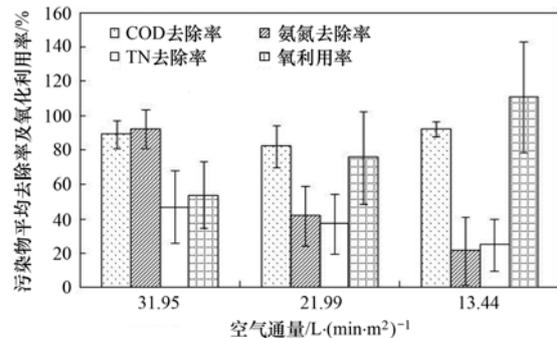


图 2 不同空气通量条件下污染物去除率及氧利用率

Fig. 2 Contaminants removal and oxygen utilization efficiencies at different air fluxes

### 2.2 有机负荷的影响

在空气通量为  $21.99 \text{ L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^2)^{-1}$  条件下, 考察了进水有机负荷分别为  $0.34$ 、 $0.59$ 、 $0.79$ 、 $1.06 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  时, 污染物的平均去除率和氧利用率、污染物去除负荷, 结果如图 4、图 5 所示.

反应器内 DO 浓度随着有机负荷的提高而降低, 其平均值依次为  $5.16$ 、 $3.72$ 、 $2.60$  和  $0.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 在有机负荷不高于  $0.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  时,

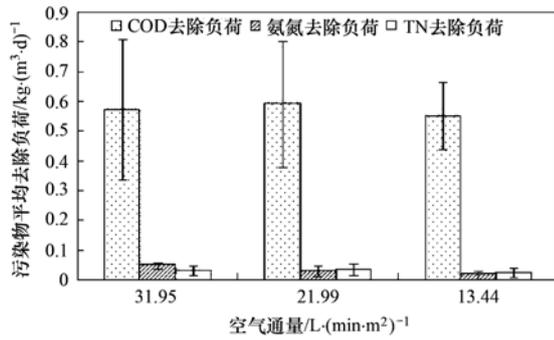


图3 不同空气通量条件下污染物去除负荷

Fig. 3 Contaminants removal load at different air fluxes

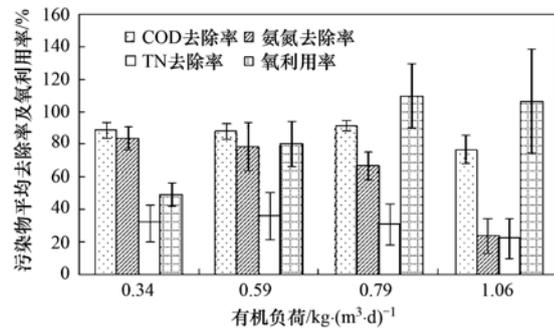


图4 不同有机负荷条件下污染物去除率及氧利用率

Fig. 4 Contaminants removal and oxygen utilization efficiencies at different organic loading rates

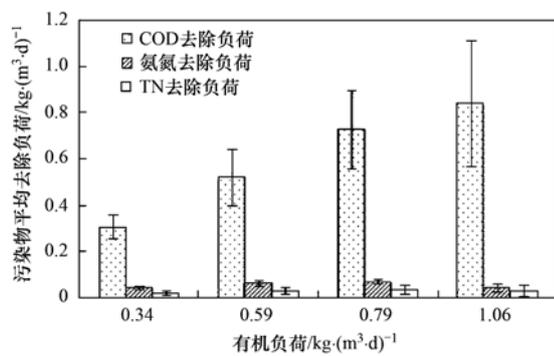


图5 不同有机负荷条件下污染物去除负荷

Fig. 5 Contaminants removal load at different organic loading rates

系统具有较好的 COD 去除效果,平均去除率保持在 90% 左右,去除负荷由  $(0.31 \pm 0.05) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  增至  $(0.73 \pm 0.17) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ; 在有机负荷达到  $1.06 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  时,反应器内 DO 浓度迅速降低,成为污染物好氧降解的限制因素,COD 去除效果变差,平均去除率仅为  $(77.0 \pm 8.7)\%$ ,平均去除负荷为  $(0.84 \pm 0.27) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

氨氮平均去除率随着有机负荷的升高逐渐降低,分别为  $(84.1 \pm 6.9)\%$ 、 $(79.1 \pm 14.9)\%$ 、

$(67.1 \pm 8.5)\%$ ,特别是有机负荷达到  $1.06 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  时,氨氮去除效果严重恶化,平均去除率降至  $(24.2 \pm 10.7)\%$ ,此过程中 DO 浓度变化是影响氨氮去除主要因素。

在有机负荷不高于  $0.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  时,DO 浓度较高,反硝化速率小于硝化速率,TN 去除效率低于氨氮去除效率,各阶段 TN 平均去除率为  $(31.3 \pm 12.4)\% \sim (36.6 \pm 14.4)\%$ ,去除负荷为  $(0.022 \pm 0.010) \sim (0.034 \pm 0.020) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。有机负荷为  $1.06 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  时,DO 浓度降至  $0.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,TN 平均去除率及去除负荷分别为  $(22.5 \pm 12.1)\%$  和  $(0.031 \pm 0.024) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ,与氨氮去除效果接近。可见,TN 去除效果在高 DO 浓度下主要受反硝化作用影响,在低 DO 浓度下主要受硝化作用影响。

4 个有机负荷水平下的平均氧利用率分别为  $(49.8 \pm 7.2)\%$ 、 $(80.7 \pm 13.9)\%$ 、 $(110.0 \pm 19.6)\%$ 、 $(106.9 \pm 32.2)\%$ 。可见,提高反应器的处理负荷有助于获得较高的氧利用率。

### 2.3 填料床层特性的影响

在空气通量为  $21.99 \text{ L} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ,进水有机负荷为  $0.67 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  条件下,考察了使用多孔填料及环形填料且填料床层孔隙率分别为  $69.22\%$ 、 $81.34\%$  时,污染物的平均去除率和氧利用率、污染物去除负荷,结果如图 6、图 7 所示。

多孔填料床层孔隙率为  $69.22\%$ 、 $81.34\%$ ,环形填料床层孔隙率为  $81.34\%$  时,平均 DO 浓度分别为  $2.0$ 、 $2.4$ 、 $1.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。使用多孔填料时,增加床层孔隙率,污染物去除效果没有显著变化,COD 平均去除率为  $(82.0 \pm 12.2)\%$  和  $(85.0 \pm 6.5)\%$ ,平均去除负荷均为  $0.59 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  左右;氨氮平均去除率为  $(41.5 \pm 17.3)\%$  和  $(44.3 \pm 15.4)\%$ ,平均去除负荷均为  $0.028 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  左右;TN 平均去

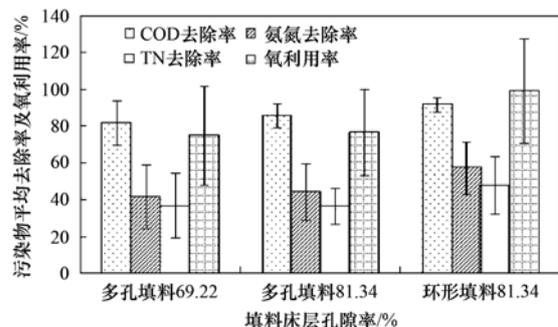


图6 不同填料床层条件下污染物去除率及氧利用率

Fig. 6 Contaminants removal and oxygen utilization efficiencies with different packed beds

除率为  $(36.8 \pm 17.7)\%$  和  $(36.6 \pm 9.8)\%$ , 平均去除负荷均为  $0.030 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  左右. 表明填料类型相同时, 填料床层孔隙率变化对污染物去除效果影响不大.

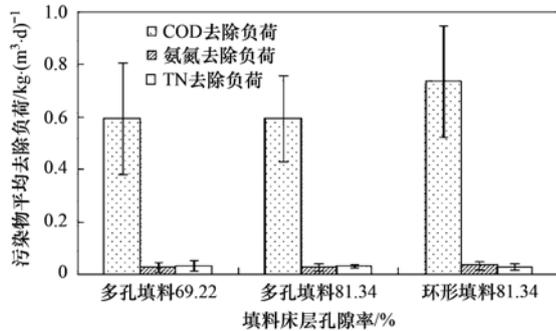


图7 不同填料床层条件下污染物去除负荷

Fig. 7 Contaminants removal load with different packed beds

使用环形填料且床层孔隙率为 81.34% 时, 污染物去除效果均有明显改善, COD、氨氮、TN 平均去除率和去除负荷分别为  $(91.9 \pm 3.9)\%$ 、 $(57.4 \pm 14.3)\%$ 、 $(48.0 \pm 15.4)\%$  和  $(0.74 \pm 0.21)$ 、 $(0.035 \pm 0.016)$ 、 $(0.029 \pm 0.012) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 可见, 填料本身有效孔隙率对污染物去除效果的影响比填料床层孔隙率更为显著. 多孔填料本身的孔隙率(约 99%)虽然高于环形填料(约 90%), 但其孔隙较小且结构复杂, 表面被生物膜覆盖后其内部孔隙不能被有效利用, 造成有效孔隙率减小; 而环形填料孔隙结构简单, 其内部孔隙能够被有效利用, 有利于生物膜生长及氧传质的进行, 处理效果较好.

3 个条件下的平均氧利用率分别为  $(77.2 \pm 27.0)\%$ 、 $(77.0 \pm 23.5)\%$ 、 $(99.4 \pm 28.6)\%$ . 使用环形填料床层可以获得更好的污染物去除效果, 是氧利用率提高的主要原因.

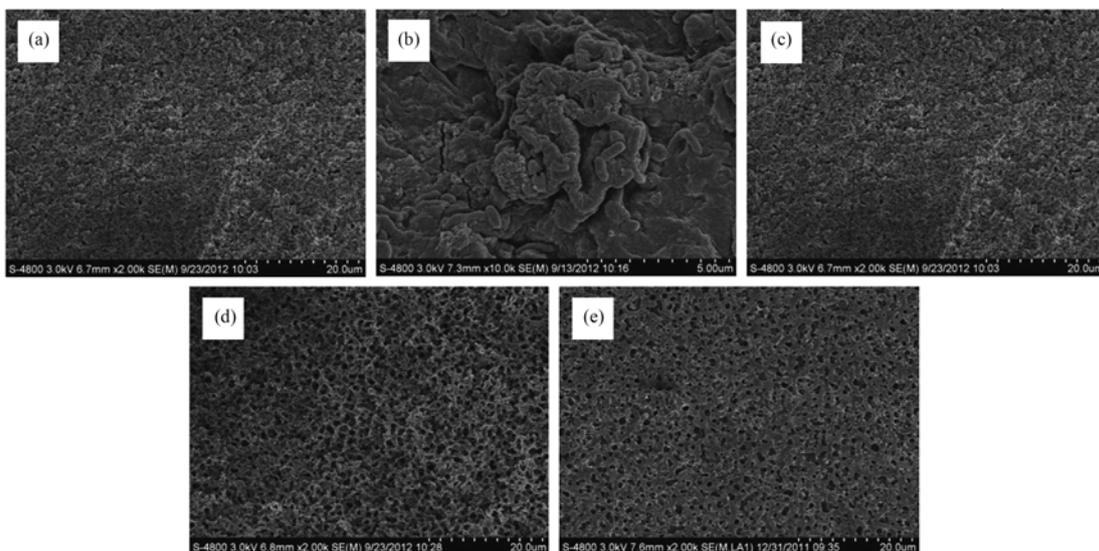
#### 2.4 SPG 膜污染

长期使用后的 SPG 膜内表面存在污染层[图 8(a)], 说明在线清洗只能控制膜污染的发展速度, 并不能彻底控制膜污染. 经电镜观察, SPG 膜内污染层含有大量微生物[图 8(b)], 表明 SPG 膜内表面生物膜的生长是膜污染的重要原因. 对污染 SPG 膜进行酸浸处理后, 只有少量污染物被去除[图 8(c)], 而经过热处理与酸浸处理后, 污染物几乎被全部去除[图 8(d)]. 这些结果表明, SPG 膜内表面污染以有机污染为主, 热处理能够有效去除 SPG 膜内表面的有机污染物. SPG 膜污染主要对微气泡产生过程和氧传质过程造成不利影响, 从而降低反应器运行性能<sup>[26]</sup>.

#### 2.5 SPG 膜孔结构变化

长期使用后的 SPG 膜表面膜孔结构与新膜[图 8(e)]相比发生了显著变化. 可以看出, 新膜的膜孔呈较规则圆柱型, 且分布均匀, 膜孔之间构成连通的立体网络. 长期使用后的 SPG 膜膜孔显著增大, 膜孔之间的网络结构破坏严重, 具有明显侵蚀现象[图 8(d)].

对长期使用后的 SPG 膜孔径分布与累积膜孔体积变化进行检测, 结果如图 9 所示. 可以看出, 与新膜相比, 长期使用后的 SPG 膜孔径显著



(a) 长期使用后; (b) 污染物层中的微生物; (c) 酸浸处理后; (d) 高温与酸浸处理后; (e) 新膜

图8 SPG 膜的结构特性 SEM 图像

Fig. 8 SEM observation of surface microstructure of SPG membrane

增大,平均孔径由  $0.62 \mu\text{m}$  增至  $0.80 \mu\text{m}$  [图 9 (a)], 累积膜孔体积显著增加,由  $0.5284 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  增大至  $2.0609 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  [图 9 (b)]. 同时,SPG 膜的孔隙率由  $54.8\%$  变化为  $81.9\%$ . 可见,长期使用后,SPG 膜内部也发生严重腐蚀,使得内部膜孔结构受到严重破坏. 在线清洗过程中,酸性(HCl 溶液)或碱性(NaClO 溶液)清洗剂对膜材料具有腐蚀作用,是造成膜孔结构破坏的主要原因. 从 SPG 膜的制作过程来看,酸性溶液只能改变膜的孔径大小,对孔隙率几乎没有影响<sup>[11]</sup>,而本研究中孔隙率显著增加,可见碱性 NaClO 溶液在清洗过程中对 SPG 膜的膜孔结构破坏起到了主要作用<sup>[27]</sup>.

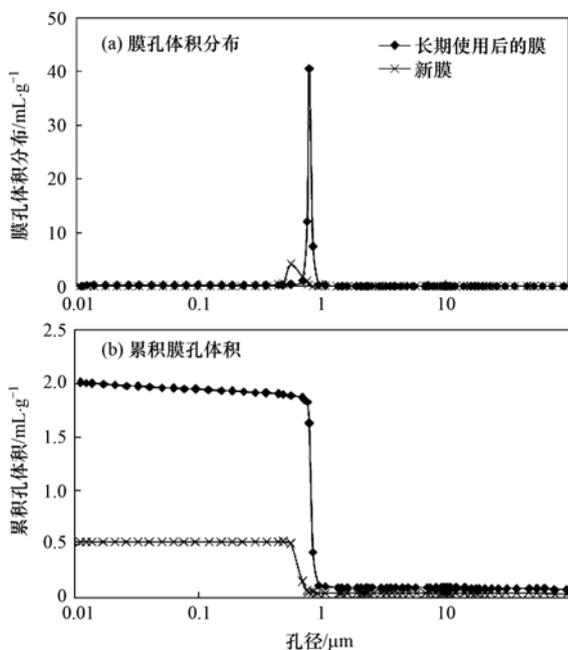


图 9 SPG 膜孔体积分布与累积膜孔体积对比

Fig. 9 Comparison of pore size distribution and cumulative pore volume between SPG membrane after long-term operation and new membrane

SPG 膜孔结构变化对其空气通透性产生显著影响. 在反应器长期运行过程中,空气流量基本稳定时,跨膜压差平均值从  $128.82 \text{ kPa}$  降低为  $76.14 \text{ kPa}$ ,表明 SPG 膜的空气通透性逐渐增强,此时 SPG 膜的膜孔结构变化(孔径及孔隙率增大)是影响空气通透性的主要因素. 碱性 NaClO 溶液对 SPG 膜膜孔结构的破坏会改变微气泡产生特性,并缩短 SPG 膜的使用寿命,因此在长期使用过程中应选择适宜的在线清洗方式,以便有效控制 SPG 膜污染,并避免膜孔结构破坏.

### 3 结论

(1)降低 SPG 膜微气泡曝气空气流量或提高进水有机负荷均会造成 DO 浓度降低,从而影响污染物去除效果,其中,COD 去除效果基本稳定,氨氮去除效果显著变差. 由于同步硝化反硝化作用使得 TN 得以去除,其在高 DO 浓度下主要受反硝化作用限制,在低 DO 浓度下主要受硝化作用限制. 填料本身的有效孔隙率对污染物去除影响显著,采用环形填料床层时,可以提高污染物去除效果.

(2)采用微气泡曝气时,各运行条件下的氧利用率值均显著高于传统气泡曝气,污染物去除效果影响氧利用率,在适宜的运行条件下,其值可以接近  $100\%$ .

(3)生物膜生长及有机物累积是造成 SPG 膜污染的主要原因. 使用碱性 NaClO 溶液进行在线清洗会对 SPG 膜孔结构造成破坏,使 SPG 膜的平均孔径及孔隙率显著增大.

#### 参考文献:

- [1] Hasegawa H, Nagasaka Y, Kataoka H. Electrical potential of microbubble generated by shear flow in pipe with slits [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2008, **40**(7-8): 554-564.
- [2] Shin W T, Mirmiran A, Yiacoumi S, *et al.* Ozonation using microbubbles formed by electric fields [J]. *Separation and Purification Technology*, 1999, **15**(3): 271-282.
- [3] Agarwal A, Ng W J, Liu Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment [J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(9): 1175-1180.
- [4] Chu L B, Xing X H, Yu A F, *et al.* Enhanced treatment of practical textile wastewater by microbubble ozonation [J]. *Process Safety and Environment Protection*, 2008, **86**(5): 389-393.
- [5] 刘春, 张磊, 杨景亮, 等. 微气泡曝气中氧传质特性研究 [J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(3): 585-589.
- [6] Takahashi M, Kawamura T, Yamamoto Y, *et al.* Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2003, **107**(10): 2171-2173.
- [7] Takahashi M.  $\xi$  Potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas-water interface [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, **109**(46): 21858-21864.
- [8] Chu L B, Yan S T, Xing X H, *et al.* Enhanced sludge solubilization by microbubble ozonation [J]. *Chemosphere*, 2008, **72**(2): 205-212.
- [9] Terasaka K, Hirabayashi A, Nishino T, *et al.* Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, **66**(14): 3172-3179.
- [10] Burns S E, Yiacoumi S, Tsouris C. Microbubble generation for environmental and industrial separations [J]. *Separation and*

- Purification Technology, 1997, **11**(3): 221-232.
- [11] Kukizaki M, Goto M. Size control of nanobubbles generated from Shirasu-porous-glass (SPG) membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2006, **281**(1-2): 386-396.
- [12] Kukizaki M, Wada T. Effect of the membrane wettability on the size and size distribution of microbubbles formed from Shirasu-porous-glass (SPG) membranes [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, **317**(1-3): 146-154.
- [13] Kukizaki M, Fujimoto K, Kai S, *et al.* Ozone mass transfer in an ozone-water contacting process with Shirasu porous glass (SPG) membranes-A comparative study of hydrophilic and hydrophobic membranes [J]. Separation and Purification Technology, 2010, **72**(3): 347-356.
- [14] Kukizaki M, Goto M. Preparation and characterization of a new asymmetric type of Shirasu porous glass (SPG) membrane used for membrane emulsification [J]. Journal of Membrane Science, 2007, **299**(1-2): 190-199.
- [15] Travers S M, Lovett D A. Activated sludge treatment of abattoir wastewater-II: Influence of dissolved oxygen concentration [J]. Water Research, 1984, **18**(4): 435-439.
- [16] Liu F, Zhao C C, Zhao D F, *et al.* Tertiary treatment of textile wastewater with combined media biological aerated filter (CMBAF) at different hydraulic loadings and dissolved oxygen concentrations [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **160**(1): 161-167.
- [17] Liu S, Wang Q H, Ma H Z, *et al.* Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2010, **71**(3): 337-346.
- [18] 张磊, 刘平, 马锦, 等. 基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 [J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2277-2282.
- [19] Liu C, Tanaka H, Zhang J, *et al.* Successful application of Shirasu porous glass (SPG) membrane system for microbubble aeration in a biofilm reactor treating synthetic wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2013, **103**: 53-59.
- [20] Huang X, Liu R, Qian Y. Behavior of soluble microbial products in a membrane bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2000, **36**(5): 401-406.
- [21] 杨帅, 杨凤林, 付志敏. 移动床膜生物反应器同步硝化反硝化特性 [J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 804-808.
- [22] Meng Q J, Yang F L, Liu L F, *et al.* Effects of COD/N ratio and DO concentration on simultaneous nitrification and denitrification in an airlift internal circulation membrane bioreactor [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(8): 933-939.
- [23] 田森, 张永祥, 张黎, 等. DO 与 MBBR 反应器同步硝化反硝化脱氮关系研究 [J]. 中国水运, 2010, **10**(5): 124-126.
- [24] 张可方, 凌忠勇, 荣宏伟, 等. SBBR 中 DO 对亚硝酸型同步硝化反硝化的影响 [J]. 广州大学学报, 2008, **7**(6): 54-58.
- [25] 何群彪, 刘坤, 屈计宁. 三种曝气器在染料化工废水中充氧能力的比较 [J]. 同济大学学报, 2003, **31**(8): 982-985.
- [26] Liu C, Tanaka H, Zhang L, *et al.* Fouling and structural changes of Shirasu porous glass (SPG) membrane used in aerobic wastewater treatment process for microbubble aeration [J]. Journal of Membrane Science, 2012, **421-422**: 225-231.
- [27] Kukizaki M. Large-scale production of alkali-resistant Shirasu porous glass (SPG) membranes: Influence of ZrO<sub>2</sub> addition on crystallization and phase separation in Na<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glasses and alkali durability and pore morphology of the membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2010, **360**(1-2): 426-435.

## CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM <sub>10</sub> ) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China .....	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou .....	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou .....	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO <sub>2</sub> Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China .....	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China .....	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin .....	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter .....	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency .....	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management .....	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period .....	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing .....	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain .....	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin .....	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI JIAN, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet .....	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China .....	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China .....	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures .....	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Under Acidic Conditions .....	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron .....	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zelite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution .....	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor .....	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration .....	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies .....	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor .....	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane .....	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling .....	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular .....	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB .....	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application .....	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing .....	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks .....	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China .....	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil .....	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil .....	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil .....	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N <sub>2</sub> O Emission .....	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N <sub>2</sub> O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China .....	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping .....	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China .....	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize .....	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings .....	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice .....	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI) .....	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B <sub>12</sub> on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2 .....	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp. ....	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake .....	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol .....	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2 .....	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon .....	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment .....	CUI Yan-ni, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD .....	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China .....	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH <sub>4</sub> Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak .....	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China .....	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-ru, <i>et al.</i> (3230)

# 《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行