

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)

北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)

上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印 (1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪 (1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)

1株 *Arthrobacter arilaitensis* 菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)

海洋菌株 γ 3 的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)

《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究

黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山*

(中山大学环境科学与工程学院, 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275)

摘要: 采用溶胶-凝胶法以聚砜 (PSF) 中空纤维膜为载体制备了 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜, 以此构建新型复合催化膜生物反应器 (HCMBR), 实现膜催化与硝化反硝化耦合烟气脱硝, 进一步提高 NO 去除能力. 采用 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器 (HCMBR) 处理一氧化氮废气, 实现了 180 d 长时间高效稳定运行, NO 去除效率可达 93.2%, 去除能力可达 167.1 g·(m³·h)⁻¹. 适宜运行条件为: 气体停留时间 9 s, 自然光光照强度 670 lx, pH 为 6.8~7.2, nC/nN=3.7. Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜加入, 复合催化膜生物反应器去除 NO 的效率比膜生物反应器提高了 1.4%~13%, 在 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜附着稳定的生物膜后, 复合催化膜生物反应器去除 NO 的效率比湿式膜催化反应器提高了 59.5%~66%.

关键词: 复合催化膜生物反应器; 生物降解; 光催化; 一氧化氮; 硝化反硝化

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0847-07 DOI: 10.13227/j.hjx.2016.03.008

Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO₂/PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor

LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, ZHANG Zai-li, FAN Qing-juan, WEI Zai-shan*

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The Fe-doped titanium dioxide (Fe-TiO₂) was prepared by the sol-gel method and was loaded on polysulfone (PSF) hollow fiber membrane. A novel Fe-TiO₂/PSF hybrid catalytic membrane biofilm reactor (HCMBR) was investigated for nitric oxide removal, to further improve the elimination capacity. HCMBR exhibited a good stability in the 180-day operation period, the NO removal efficiency was up to 93.2% and the maximum elimination capacity reached 167.1 g·(m³·h)⁻¹. The additional use of the biofilm to wet Fe-TiO₂/PSF membrane catalysis reactor led to the enhancement of NO removal efficiency from 59.5% to 66%. The NO removal efficiency in the intimate coupling of Fe-TiO₂/PSF hybrid catalytic membrane and biofilm reactor (HCMBR) increased from 1.4% to 13% as compared to that of the membrane biofilm reactor (MBR) only. The optimal illumination intensity, gas residence time, pH and nC/nN were 670 lx, 9 s, 6.8-7.2 and 3.7, respectively.

Key words: hybrid catalytic membrane biofilm reactor; biodegradation; photocatalytic oxidation; NO; nitrification/denitrification

氮氧化物是形成酸雨、光化学烟雾污染和城市灰霾天气等环境问题的主要污染物. 2014 年我国氮氧化物排放总量已高达 2 078 万 t. 我国东部地区二氧化氮浓度增加量明显高于世界其他地区, 已经成为全球对流层二氧化氮污染最严重的地区之一. 国家《“十二五”环保规划》和《重点区域大气污染防治“十二五”规划》提出氮氧化物排放总量削减 10% 以上的约束性指标^[1]. 现有的烟气脱硝技术中选择性催化还原 (SCR) 法所使用的复合催化膜价格昂贵、运行费用高, 而生物法具有运行费用低、无二次污染及易于管理等优点已成为研究热点^[2]. 因此, 研究新型膜生物反应器烟气脱硝技术及机制具有重要的科学意义和现实意义.

生物法脱硝可分为硝化烟气脱硝作用、反硝化烟气脱硝作用. 采用生物过滤器和生物滴滤器硝化氧化一氧化氮^[3,4]. 利用脱氮菌在厌氧或缺氧的条件下, 将 NO_x 还原为无害的 N₂^[5], 用反硝化去除烟

气中 NO^[6]. 在有氧条件下采用生物滤池、生物滴滤塔等好氧反硝化菌脱除 NO_x 气体^[7]. 在 50℃ ± 1℃ 高温生物滴滤塔好氧反硝化处理氮氧化物^[8]. NO 去除过程属传质控制, 限制了生物降解速率, 为强化气液 NO 传质, 采用化学络合吸收耦合生物还原法去除氮氧化物^[9], 但络合物再生困难. 膜生物反应器是目前最具发展潜力的废气处理方法之一, 膜材料能提高一氧化氮气体传质速率, 提供较大的比表面积作为生物降解的传质界面. 采用中空纤维膜生物反应器处理一氧化氮, 硝化/反硝化高效去除 NO^[10,11]. 采用负载型 TiO₂ 光复合催化膜进行同时脱硫脱硝的实验研究^[12]. 虽然已有开展基于中空

收稿日期: 2015-07-25; 修订日期: 2015-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21371171); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 黎宝仁 (1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生物法废气处理新技术, E-mail: 444091170@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: wzs89@126.com

纤维膜的光催化降解废水中污染物^[13]和膜生物反应器处理 NO 废气的研究,但未见复合催化膜生物反应器处理氮氧化物废气报道. 本研究的复合催化膜生物反应器 (hybrid catalytic membrane biofilm reactor, HCMBfR) 烟气脱硝是利用复合膜催化和膜生物反应器厌氧好氧条件,实现膜催化与硝化反硝化耦合烟气脱硝,进一步提高 NO 去除能力. 本研究构建 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器,进行 HCMBfR 处理一氧化氮废气,考察其长时间运行稳定性、研究影响因素,进一步提高 NO 去除能力,以期复合催化膜生物反应器净化氮氧化物废气技术的应用奠定基础.

1 材料与方 法

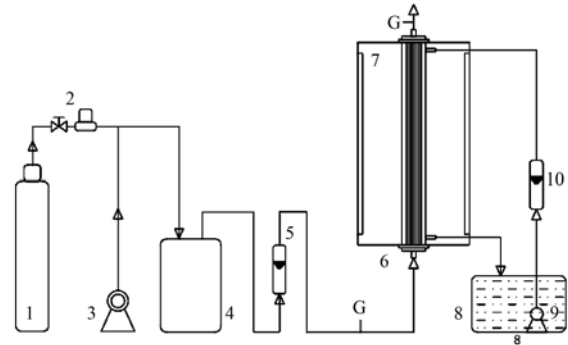
1.1 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜的制备

以聚砜中空纤维膜 (PSF) 为载体,溶胶-凝胶法制备的 Fe-TiO₂ 溶胶,采用浸渍法制备 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜. 采用溶胶-凝胶法制备 TiO₂,即以钛酸丁酯 [Ti(OC₄H₉)₄] 作为钛源,使用无水乙醇为溶剂,冰醋酸为反应抑制剂,并以 Fe 过渡金属元素为 TiO₂ 表面改性的掺杂离子;取 50 mL 钛酸丁酯溶于 350 mL 无水乙醇,加入 20 mL 冰乙酸,用磁力搅拌器搅拌 45 min,得溶液 A;取 30 mL 浓度为 0.1% 的 Fe(NO₃)₃ 溶液溶于 150 mL 无水乙醇,加入 20 mL 冰乙酸,得溶液 B;在 2 h 的时间内,一边用磁力搅拌器搅拌,一边将 B 溶液逐滴加入 A 溶液中;最后在室温下用磁力搅拌器搅拌 24 h,使其形成 Fe-TiO₂ 溶胶. 采用浸渍法使 Fe-TiO₂ 溶胶与聚砜中空纤维膜充分接触,使其匀称地负载在膜丝外表面,然后将中空纤维膜置于 60℃ 的恒温烘箱中干燥 5 h 后,即可得到 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜.

1.2 实验装置与方法

Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气的流程如图 1 所示. 复合催化膜生物反应器为自制的 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜,外壁为透明有机玻璃管,聚砜 (PSF) 中空纤维膜组件平均膜孔径 0.15 μm,膜纤维内/外径 0.38 mm/0.52 mm,纤维膜根数 2 400 根,膜孔隙率 60%,单根纤维膜有效长度 300 mm. NO 废气采用动态法配制,NO 气体与电磁式空气压缩机空气混合后从器底进入复合催化膜生物反应器,在上升的过程中 NO/空气混合气体由中空纤维膜内扩散传质至膜外的 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜、生物膜表面,与催化膜、湿润生物膜接触被微生物降解,净化后的气体从器顶排出. 实验

在常温 (16 ~ 35℃) 下进行,采用逆流操作,循环液体从复合催化膜生物反应器顶向下喷淋,在中空纤维膜外自上向下流动,由底排出至循环液储槽,再由循环潜水泵抽回复合催化膜生物反应器顶,定期向循环液贮存器投加氮磷营养液,维持微生物的生长繁殖活动.



1. NO 气瓶; 2. 质量流量计; 3. 空气压缩机; 4. 气体混合瓶; 5. 转子流量计; 6. 中空纤维膜组件; 7. 光源; 8. 混合液循环池; 9. 潜水泵; 10. 玻璃转子液体流量计; G. 采样口

图 1 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器

处理 NO 废气流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of Fe-TiO₂/PSF HCMBfR for NO removal

1.3 分析方法

NO 气体浓度采用德国 TESTO Pro-350 烟气分析仪进行测定,测量范围为 0 ~ 1 000 × 10⁻⁶; 气体流量用 LZB 型玻璃转子流量计测定,测量范围为 0.1 ~ 2.0 L·min⁻¹. 紫外光的照射强度由香港希玛 AR823 型分体式照度计测量,测量范围为 1 ~ 10 000 lx.

2 结果与分析

2.1 复合催化膜生物反应器运行稳定性

在 NO 进气负荷为 23.3 ~ 200 g·(m³·h)⁻¹, 自然光光照强度为 620 ~ 700 lx, 喷淋密度为 42.4 ~ 84.7 mL·(m²·min)⁻¹, pH 为 6.8 ~ 7.2, C/N 摩尔比为 2.5 ~ 4.0 的条件下, Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气的长时间运行稳定性如图 2 所示. 长时间运行主要分为 I、II、III 这 3 个阶段. I 阶段为挂膜阶段 (第 1 ~ 20 d), NO 进气负荷设置为较低的 40 g·(m³·h)⁻¹, 喷淋密度设置为 42.4 mL·(m²·min)⁻¹, 第 1 d NO 去除效率为 50% 左右, 这主要是中空纤维膜分离和 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜去除 NO 的作用; 随着时间的推移, 中空纤维膜上附着硝化菌反硝化菌, 生物降解 NO 作用稳步上升, 第 11 d NO 去除效率可达 81.4%, 第 17

~20 d,生物膜进入稳定期,NO 去除效率可达 84%. II 阶段为微生物驯化及生物膜强化阶段(第 21~112 d),第 21~39 d 进气负荷下调到了 $25 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,使反应器平稳运行,NO 去除效率为 83.6%~90.2%;第 40~55 d 进气负荷提高到 $60 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,NO 去除效率上升至 85.7%~93.2%,最大可达 93.2%;第 56~72 d 进气负荷提升至 $100 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,NO 去除效率略有下降,稳定在 84.9%~90.7%.第 73~92 d 进气负荷增加至 $125 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,NO 去除效率明显下降至 81.1%,第 75 d NO 去除率有所回升至 84.1%,最高可达 88.1%.第 93~112 d 进气负荷继续增加至 $150 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,NO 净化效率从 77.9% 逐渐提升至 85.7%,去除负荷可达 $130.8 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$.通过进气负荷的逐步提高,微生物成功驯化,在 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜表面已形成具有一定抗冲击负荷的生物膜,实现了生物降解与膜催化耦合去除 NO 废气作用. III 阶段为高负荷运行阶段(第 113~180 d),考察反应器在受到高进气负荷的冲击时长时间运行稳定性.第 113 d NO 进气负荷提升至 $200 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,NO 去除效率由 83.9% 下降至 75.1%,然后稳定在 77% 左右.当进气负荷为

$214.3 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 时,NO 去除效率为 78%,去除负荷可达 $167.1 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$.与一般的光催化、中空纤维膜生物反应器处理 NO 的方法^[10,11,14]相比,使用 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器能够提高 NO 去除能力,具有更好的工业应用前景.

复合催化膜生物反应器的烟气脱硝是利用膜传质、复合膜催化和膜生物反应器,实现膜催化与硝化反硝化耦合烟气脱硝.首先是 NO 和氧气与 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜接触,气体产生的浓度梯度使气体在中空纤维膜中向前扩散,NO 和氧气由膜的另一侧脱附出去至 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜,光催化产生羟基自由基和超氧负离子,NO 气体被羟基自由基和超氧负离子氧化成易生物降解的 NO₂ 和 HNO₃;然后光催化产生的物质与未反应的 NO 进入生物膜;氧气进入复合膜生物反应器中的生物膜中依次形成好氧区、缺氧区或厌氧区发生同时硝化反硝化;在好氧区 NO 被亚硝化细菌氧化成 NO₂⁻,进而被硝化细菌氧化成 NO₃⁻;在缺氧区或厌氧区,反硝化细菌的同化反硝化还原成有机氮化物,成为菌体的一部分,异化反硝化转化为 N₂;硝化产物可作为反硝化的底物,硝化与反硝化在生物膜相完成,实现膜催化与同时硝化反硝化耦合烟气脱硝.

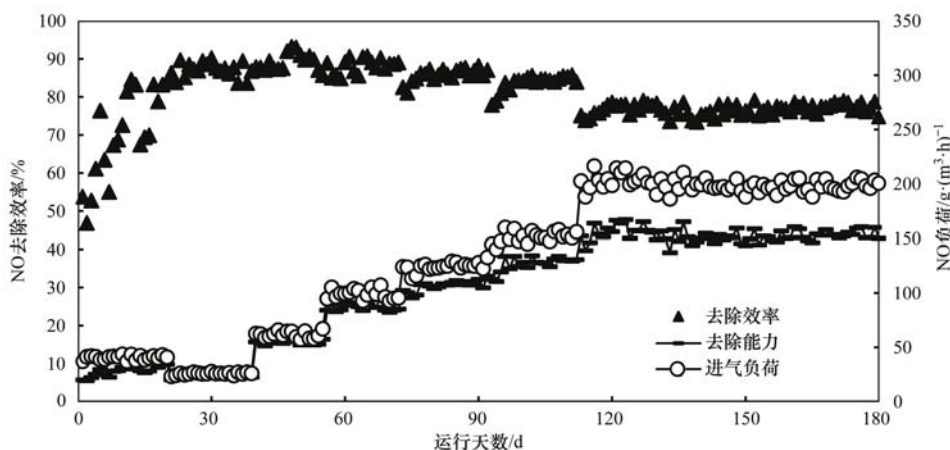


图2 复合催化膜生物反应器长时间运行曲线

Fig. 2 Long-term operation curves of the HCMBR

2.2 进气负荷对 NO 去除效率的影响

在气体停留时间为 9.0 s,自然光光照强度为 620~700 lx,喷淋密度为 $84.7 \text{ mL}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{min})^{-1}$,pH 为 6.8~7.2 的条件下,进气负荷对 NO 去除效率的影响如图 3 所示.在复合催化膜生物反应器内,较低的进气负荷为 $27.5\sim 95.7 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 时,NO 去除效率变化小,为 89.3%~88.8%,去除负荷从 $24.6 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 提升到 $85.2 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$;但当进气负荷从 $128.2 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 到 $193.3 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$

时,NO 去除效率逐渐降低,去除负荷从 $111.4 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 提升到 $160.8 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,提高了 $49.4 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$.当进气负荷为 $193.3 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 时,NO 去除效率为 78%.随着 NO 进口负荷的增加,HCMBfR、聚砜中空纤维膜生物反应器(MBfR)、湿式 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜(WMCR)对 NO 去除效率都逐渐下降.当 NO 的进气负荷 $27.5 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,WMCR 对 NO 去除效率只有 25.7%,MBfR 对 NO 去除效率为 87.9%,

HCMBfR 对 NO 去除效率为 89.3%。当 NO 的进气负荷增加至 $193.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, WMCR 对 NO 去除效率只有 18.5%, MBfR 对 NO 去除效率为 65%, HCMBfR 对 NO 去除效率为 78%。Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜加入,复合催化膜生物反应器去除 NO 的效率比膜生物反应器提高了 1.4% ~ 13%。在 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜附着稳定的生物膜后,复合催化膜生物反应器去除 NO 的效率比湿式膜催化反应器提高了 59.5% ~ 66%,催化降解脱硝量高 13.6%。复合催化膜生物反应器的湿式膜催化和生物的耦合作用能提高对 NO 去除能力。

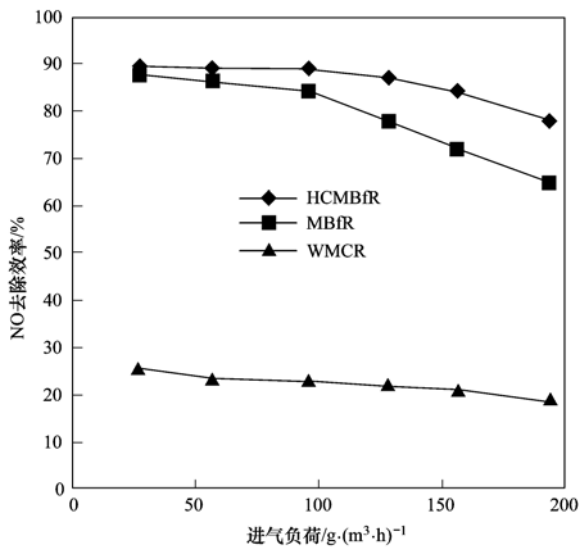


图3 进气负荷对 NO 去除效率的影响

Fig. 3 Influence of the inlet load on NO removal

2.3 气体停留时间对 NO 去除效率的影响

复合催化膜生物反应器的停留时间以膜的容积即参与反应的膜的容积计算^[15],以膜的容积计算 NO 气体停留时间,进气速率为 $0.32 \sim 0.8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,相应的气体停留时间为 $6.7 \sim 16.8 \text{ s}$ 。在 NO 进气负荷为 $83.8 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,自然光光照强度为 $620 \sim 700 \text{ lx}$,喷淋密度为 $84.7 \text{ mL} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$,pH 为 $6.8 \sim 7.2$,C/N 摩尔比为 $2.5 \sim 4.0$ 的条件下,气体停留时间对 NO 去除效率影响如图 4 所示。当气体停留时间为 $6.5 \sim 10.7 \text{ s}$ 时,NO 去除效率随气体停留时间的增加而升高,在 6.5 s 时为 76.6% ,在 10.7 s 时为 87.7% ;当气体停留时间从 10.7 s 增加到 16.8 s ,NO 去除效率仅提高了约 2% 。中空纤维膜虽能提高 NO 的传质速率,但气体停留时间较短会影响在纤维膜层、催化层和生物膜层之间的 NO 传质、催化转化和生物降解效果;气体停留时间越长就越有利于 HCMBfR 对 NO 催化和生物降

解。Devahasdin 等^[16]和 Wang 等^[17]研究表明,光催化处理 NO 时转化速率随气体停留时间增加而增加的变化规律会在气体停留时间为 $12 \sim 15 \text{ s}$ 的时候停止,这是因为催化反应达到了动态平衡^[18,19]。而这个动态平衡在 HCMBfR 中更短的停留时间内 ($9 \sim 12 \text{ s}$),催化反应和生物降解达到了动态平衡,湿式催化与生物降解耦合作用实现 NO 的高效转化。

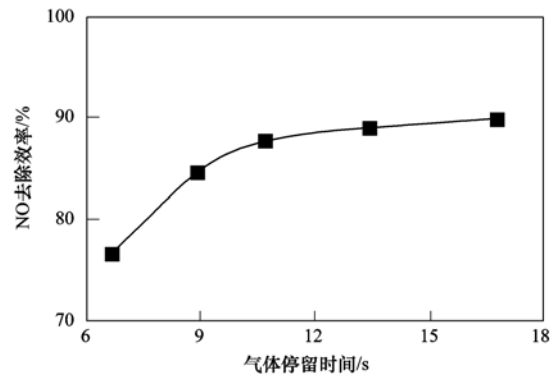


图4 气体停留时间对 NO 去除效率的影响

Fig. 4 Influence of gas residence time on NO removal

2.4 光源对 NO 去除效率的影响

在气体停留时间为 9.0 s ,光照强度为 $620 \sim 700 \text{ lx}$,喷淋密度为 $84.7 \text{ mL} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$,pH 为 $6.8 \sim 7.2$,C/N 摩尔比为 $2.5 \sim 4.0$ 的条件下,进行了自然光(VL)、紫外光(UV)照射下以及黑暗(Dark)运行情况下 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气的实验,考察光源对 NO 去除效率的影响如图 5 所示。在进气负荷为 $26.1 \sim 193.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 范围内,紫外光照射下复合催化膜生物反应器 NO 去除效率略高于自然光照射下复合催化膜生物反应器 NO 去除效率,约为 $2.6\% \sim 6.1\%$ 。当 NO 进气负荷为 $95.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 时,自然光湿式膜催化 NO 的效率为 23% ,非光条件下湿式膜催化 NO 的效率为 16% ;膜生物反应器非光照、自然光光照下 NO 去除效率分别为 78% 、 84.1% ;复合催化膜生物反应器非光照、自然光和紫外光光照下 NO 去除效率分别为 81.4% 、 89% 、 91.1% ;因此在非光照条件下,复合催化膜生物反应器去除 NO 的效率比膜生物反应器提高了 3.4% ,这说明 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜加入,非光照光催化 NO 效率为零,但 Fe-TiO₂ 仍有一定的催化作用。自然光波长在 $400 \sim 780 \text{ nm}$ 之间,紫外光波长在 $10 \sim 400 \text{ nm}$ 之间,物体吸收入射光的效率与光波波长呈反相关关系^[20]。短波照射在复合催化膜吸附 NO 后能激发更高能量的电子-空穴对,增强电子的还原性和空穴的

氧化性,更易于在 Fe-TiO₂ 复合催化膜表面产生活性基团,使 HCMBfR 的催化步骤更快达到动态平衡的状态. 紫外线虽对微生物有一定的杀菌作用,但若控制好其光照强度 (620 ~ 700 lx),再加上 HCMBfR 的循环液回流系统,生物膜更新速度快,并不会对生物相造成太大的冲击.

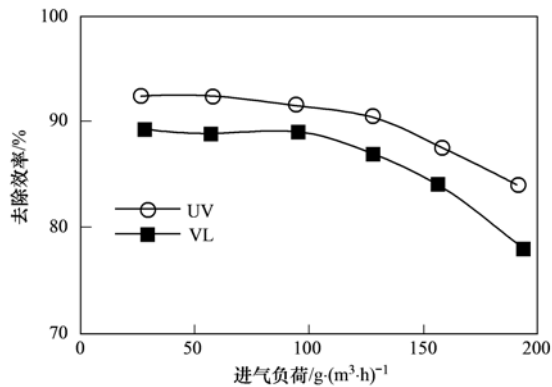


图 5 不同光源对 NO 去除效率的影响

Fig. 5 Influence of different light sources on NO removal

2.5 光照强度对 NO 去除效率的影响

光照强度改变时,单位时间和单位面积内中空纤维膜复合催化膜表面接受的光能量不同,因此会影响 Fe-TiO₂/PSF 膜催化速率,进而影响到复合催化膜生物反应器处理 NO 的效果. 在气体停留时间为 9.0s,喷淋密度为 84.7 mL·(m²·min)⁻¹,pH 为 6.8 ~ 7.2,C/N 摩尔比为 2.5 ~ 4.0 的条件下,自然光光照强度对 NO 去除效率影响如图 6 所示. 随着进气负荷增加,NO 去除效率逐渐下降;在进气负荷为 25.1 ~ 189.7 g·(m³·h)⁻¹ 范围内,自然光光照强度由 320 lx 增大到 5 430 lx,NO 去除效率升高;当进气负荷一定时,自然光光照强度由 320 lx 增大到 670 lx (即增大 1.1 倍),NO 去除效率提高了 1.9% ~ 5.7%;自然光光照强度由 320 lx 增大到 5 430 lx (即增大 17 倍),NO 去除效率提高了 4.4% ~

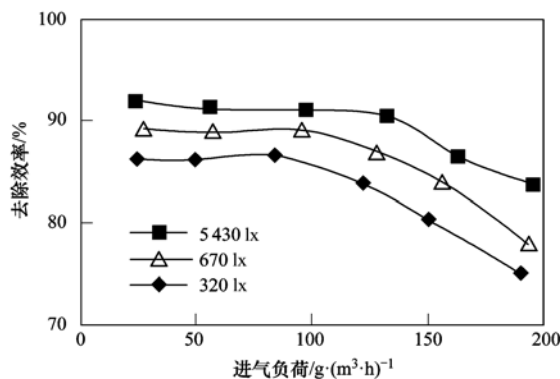


图 6 光照强度对 NO 去除效率的影响

Fig. 6 Influence of illumination intensity on NO removal

8.5%,提高的幅度较小. 光照强度对 HCMBfR 的影响主要体现在对 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜相的影响,光照强度越高能够提供更多数量的电子-空穴对,强化 NO 的催化氧化步骤^[21],与生物降解协同作用,提高 NO 转化率.

2.6 pH 值对 NO 去除效率的影响

循环液 pH 值对复合催化膜生物反应器 NO 去除效率有重要影响,会对硝化反硝化菌的生物活性产生影响,从而对 NO-生物膜和 NO-液相两者的传质过程都会产生影响. 在 NO 进气负荷为 83.8 g·(m³·h)⁻¹,气体停留时间为 9.0 s,自然光光照强度为 620 ~ 700 lx,喷淋密度为 84.7 mL·(m²·min)⁻¹,C/N 摩尔比为 2.5 ~ 4.0 的条件下,pH 值对 NO 去除效率的影响如图 7 所示. 随着循环液的 pH 值升高,NO 去除效率先升高后下降;当循环液中性偏酸 pH 值为 6.86 时,NO 去除效率最高,可达到 84.1%. 循环液 pH 偏低和偏高均会对系统产生影响,如 pH 较低 (2.95) 时,NO 去除效率为 68.7%,pH 较高 (9.06) 时,NO 去除效率为 80.1%. pH 对 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器的生物相产生影响,有研究表明^[22,23],反硝化菌活性最高,生长适宜 pH 范围为偏碱 7 ~ 9,而生物相降解 NO 主要依靠生物膜中的硝化菌和反硝化菌的共同作用,硝化菌生长适宜 pH 范围为 5 ~ 8. 为使生物膜能充分实现同时硝化反硝化的作用,必须同时满足硝化菌与反硝化菌对 pH 的要求,则满足系统运行的 pH 值应控制为 6.8 ~ 7.2,若循环液 pH 超过这个范围,将抑制硝化菌和反硝化菌的活性和新陈代谢,不利于同时硝化反硝化过程,进而影响到复合催化膜生物反应器对 NO 的处理效果.

2.7 C/N 摩尔比 (nC/nN) 对 NO 去除效率的影响

在 NO 进气负荷为 83.8 g·(m³·h)⁻¹,气体停留时间为 9.0 s,自然光光照强度为 620 ~ 700 lx,pH 为 6.8 ~ 7.2,喷淋密度为 84.7 mL·(m²·min)⁻¹ 的条件

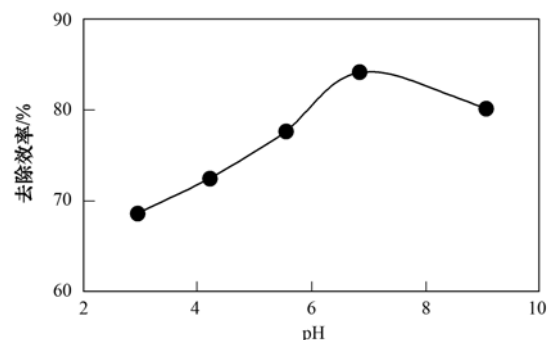


图 7 pH 值对 NO 去除效率的影响

Fig. 7 Influence of pH on NO removal

下, nC/nN 对 NO 去除效率的影响如图 8 所示. nC/nN 为 COD/TN 摩尔比. 随着 nC/nN 的增加, NO 去除效率先升高后下降, 当 nC/nN 为 3.7 时, NO 去除效率最高为 85.3%, 过高和过低的 nC/nN 比均不利于复合催化膜生物反应器生物降解 NO. 在复合催化膜生物反应器烟气脱硝系统内, 反硝化菌为异养菌, 碳源不足会造成反硝化菌脱氮性能下降, 因此循环液必须保持一定的有机碳源. 在有机碳源保持一定量 (nC/nN 为 0.8 ~ 2.3) 的条件下, 硝化菌的硝化能力不会受到异养菌的影响, 硝化速率随着碳源的增加而增加, NO 去除效率升高, 这是由于一定的碳源保证了硝化细菌繁殖所需的营养物质; 但有机碳源含量过高 (nC/nN 为 5.2 以上) 时, NO 去除效率开始下降, 这是由于碳源的过量造成异养菌的大量繁殖, 从而抑制了硝化细菌的正常代谢, 导致硝化细菌的硝化速率下降. 因此 HCMBfR 系统循环液应保持合适的 nC/nN 比 (2.5 ~ 4.0).

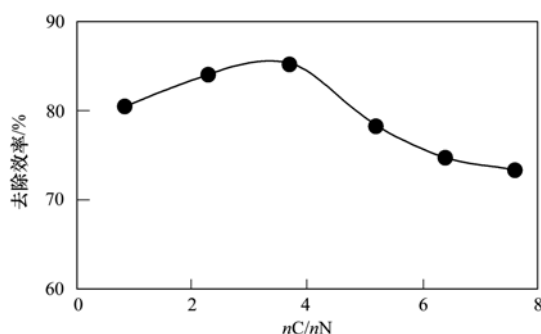


图 8 nC/nN 对 NO 去除效率的影响

Fig. 8 Influence of nC/nN on NO removal

3 结论

(1) 采用溶胶-凝胶法以聚砜 (PSF) 中空纤维膜为载体制备了 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜, 以此构建新型复合催化膜生物反应器 (HCMBfR), 实现膜催化与硝化反硝化耦合烟气脱硝.

(2) 采用 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气, 实现了 180 d 长时间高效稳定运行, NO 去除效率可达 93.2%, 去除能力可达 167.1 g·(m³·h)⁻¹. 适宜运行条件为: 气体停留时间 9 s、自然光光照强度 670 lx, pH 为 6.8 ~ 7.2, nC/nN 为 3.7.

(3) Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜加入, 复合催化膜生物反应器去除 NO 的效率比膜生物反应器提高了 1.4% ~ 13%, 在 Fe-TiO₂/PSF 复合催化膜附着稳定的生物膜后, 复合催化膜生物反应器去除 NO 的效率比湿式膜催化反应器提高了 59.5% ~ 66%.

参考文献:

- [1] 朱奕谚. 氮氧化物治理技术的研究进展[J]. 轻工科技, 2015, (6): 100-101, 103.
- [2] Skalska K, Miller J S, Ledakowicz S. Trends in NO_x abatement: a review[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408** (19): 3976-3989.
- [3] 陈建孟, Hershman L, 陈浚, 等. 自养型生物过滤器硝化氧化一氧化氮[J]. 环境科学, 2003, **24**(2): 1-6.
- [4] Chou M S, Lin J H. Biotrickling filtration of nitric oxide[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, **50** (4): 502-508.
- [5] 蒋文举, 毕列锋, 李旭东. 生物法废气脱硝研究[J]. 环境科学, 1999, **20**(3): 34-37.
- [6] Chen J, Jiang Y F, Chen J M, et al. Dynamic model for nitric oxide removal by a rotating drum biofilter[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **168**(2-3): 1047-1052.
- [7] 张卫江, 吴彬, 徐姣. 微生物法脱除锅炉废气中氮氧化物的研究[J]. 现代化工, 2015, **35**(3): 81-83.
- [8] Yang Y L, Huang S B, Liang W, et al. Microbial removal of NO_x at high temperature by a novel aerobic strain *Chelatococcus daeguensis* TAD1 in a biotrickling filter[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **203-204** (1): 326-332.
- [9] Zhang S H, Cai L L, Mi X H, et al. NO_x Removal from simulated flue gas by chemical absorption-biological reduction integrated approach in a biofilter[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(10): 3814-3820.
- [10] Min K N, Ergas S J, Harrison J M. Hollow-fiber membrane bioreactor for nitric oxide removal[J]. Environmental Engineering Science, 2002, **19**(6): 575-583.
- [11] Zhang X Y, Jin R F, Liu G F, et al. Removal of nitric oxide from simulated flue gas via denitrification in a hollow-fiber membrane bioreactor[J]. Journal of Environmental Science, 2013, **25**(11): 2239-2246.
- [12] 赵毅, 赵莉, 韩静, 等. TiO₂ 光催化烟气同时脱硫脱硝方法及其机理研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, **38** (5): 755-763.
- [13] Zhang X W, Wang D K, Lopez D R S, et al. Fabrication of nanostructured TiO₂ hollow fiber photocatalytic membrane and application for wastewater treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **236**: 314-322.
- [14] Su C Y, Ran X, Hu J L, et al. Photocatalytic process of simultaneous desulfurization and denitrification of flue gas by TiO₂-polyacrylonitrile nanofibers[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(20): 11562-11568.
- [15] Zhao Y, Liu Z J, Liu F X, et al. Cometabolic degradation of trichloroethylene in a hollow fiber membrane reactor with toluene as a substrate[J]. Journal of Membrane Science, 2011, **372**(1-2): 322-330.
- [16] Devahasdin S, Fan C Jr, Li K Y, et al. TiO₂ photocatalytic oxidation of nitric oxide: transient behavior and reaction kinetics[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2003, **156**(1-3): 161-170.

- [17] Wang H Q, Wu Z B, Zhao W R, *et al.* Photocatalytic oxidation of nitrogen oxides using TiO₂ loading on woven glass fabric[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(1): 185-190.
- [18] Zhang J L, Wu Y M, Xing M Y, *et al.* Development of modified N doped TiO₂ photocatalyst with metals, nonmetals and metal oxides[J]. *Energy Environmental Science*, 2010, **3**(6): 715-726.
- [19] Soylu A M, Polat M, Erdogan D A, *et al.* TiO₂-Al₂O₃ binary mixed oxide surfaces for photocatalytic NO_x abatement [J]. *Applied Surface Science*, 2014, **318**: 142-149.
- [20] Parnis J M, Oldham K B. Beyond the Beer-Lambert law; the dependence of absorbance on time in photochemistry[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2013, **267**: 6-10.
- [21] Melo J V S, Trichês G. Evaluation of the influence of environmental conditions on the efficiency of photocatalytic coatings in the degradation of nitrogen oxides (NO_x) [J]. *Building and Environment*, 2012, **49**: 117-123.
- [22] Lee K C, Rittmann B E. Effects of pH and precipitation on autohydrogenotrophic denitrification using the hollow-fiber membrane-biofilm reactor[J]. *Water Research*, 2003, **37**(7): 1551-1556.
- [23] Ghafari S, Hasan M, Aroua M K. Improvement of autohydrogenotrophic nitrite reduction rate through optimization of pH and sodium bicarbonate dose in batch experiments[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2009, **107**(3): 275-280.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2015年10月21日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续14次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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