

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

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(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表面污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第 37 卷(2016 年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物

邢奕^{1,2}, 王聪¹, 路培^{1,2*}, 李子宜¹, 刘应书¹, 于晗¹

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学工业典型污染物资源化处理北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 多孔材料过滤去除环境纳米颗粒物 (nanoparticles, NPs) 是空气净化治理的重要方法之一. 本文采用介孔分子筛 (MCM-41、SBA-15) 和有序介孔碳 (CMK-3) 这 3 种典型介孔材料对 2 ~ 20 nm 的 NPs 进行过滤脱除研究, 旨在探索介孔材料在 NPs 过滤方面的应用可行性与相关理论基础. 基于 3 种介孔材料的物理化学性质表征结果, 通过本实验发现介孔材料孔道的最可几孔径以及一定量的介孔孔容是吸附 NPs 的关键, 而微孔分布对去除 NPs 贡献不大. 进一步对 SBA-15 在不同流量及不同颗粒床厚度下对 NPs 的去除进行了分析, 发现纳米颗粒物的最易穿透粒径 (most penetrating particle size, MPPS) 随着流量的增大而减小, 同时 MPPS 颗粒物的去除效率随之降低, 且 MPPS 基本不受颗粒床厚度变化的影响. 本研究为介孔材料过滤脱除 NPs 提供了技术依据.

关键词: 纳米颗粒物; 介孔材料; CMK-3; SBA-15; MCM-41; 过滤脱除

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4538-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201606079

Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure

XING Yi^{1,2}, WANG Cong¹, LU Pei^{1,2*}, LI Zi-yi¹, LIU Ying-shu¹, YU Han¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Resource-oriented Treatment of Industrial Pollutants, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The usage of porous materials to remove Nano Particles (Nanoparticles, NPs) is one of the critical ways to purify the air. The present study employed three typical mesoporous structures, CMK-3, SBA-15 and MCM-41 to conduct removal experiments, in which NPs were generated, ranging from 2 nm to 20 nm, aiming at exploring the practical feasibility and relative theory foundation about the filtration of mesoporous structures towards NPs. Based on the physical and chemical characterization of the three mesoporous structures above, coupled with the adsorption experiments, the results acquired indicated that the most probable pore size of mesoporous structures coupled with certain mesoporous capacity of a mesoporous structure are the key to remove NPs. However, the distribution of micropore contributed hardly to the removal of NPs. Based on this, exploration was made to observe the effect that different flow rates and thicknesses had on the efficiency of NPs removal. The consequences showed that most penetrating particle size (MPPS) of NPs decreased with the increase of flow rates. Meanwhile, the corresponding removal efficiency of MPPS decreased. Furthermore, MPPS did not change with the change of thicknesses. This study provided technical evidence for the removal of NPs on mesoporous structures.

Key words: nano particles; mesoporous structure; CMK-3; SBA-15; MCM-41; filtration removal

当前, 大气颗粒污染物已成为主要环境污染物之一, 其中近 86% 的颗粒源于纳米颗粒物 (nanoparticles, NPs, $d < 100$ nm) 聚合而成^[1]. NPs 不仅能严重降低大气能见度、影响气候变化, 而且对人类的身体健康也有极大的威胁^[2,3]. NPs 的来源极其广泛, 与人为的气体排放来源息息相关^[4], 如汽车尾气排放 (占 40%)、工业排放 (占 33%)、非道路柴油机排放 (占 16%)、道路柴油机排放 (占 10%) 以及用料的燃烧和粉尘 (占 1%), 可见, 汽车尾气是引起 NPs 产生的主要污染源^[5-8]. 同时, 由于 NPs 的粒径极小、比表面积大, 因此很容易携带被吸附的有害物质随着气管进入肺泡中并沉积, 甚至会穿透血液循环系统^[9-12], 危害巨大.

因此, NPs 已对环境和人类健康产生严重危害, 急需有效去除.

目前, 对 $PM_{2.5}$ (环境空气中空气动力学当量直径小于等于 $2.5 \mu m$ 的颗粒物) 去除的研究较少, 主要集中于纤维过滤方式及颗粒床过滤方式^[13,14]. 与纤维过滤不同, 颗粒床过滤主要利用耐高温高压、耐腐蚀的材料对 NPs 进行脱除, 如陶瓷、玻璃珠和

收稿日期: 2016-06-13; 修订日期: 2016-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1560110); 科技北京百名领军人才培养工程项目 (lj201620); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 邢奕 (1976 ~), 男, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为工业烟气治理、城镇与工业固体废弃物处置与资源化、高浓度难降解有机废水深度处理与回用, E-mail: xingyi@ustb.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lupei@ustb.edu.cn

活性炭等,效果显著^[15~17]。陶瓷、玻璃珠及活性炭的孔结构均以微孔结构为主^[18~20]。根据国际纯粹与应用化学协会(IUPAC)的定义,孔径小于2 nm的孔称为微孔,2~50 nm的孔称为介孔^[21]。Soo等^[22]使用混合纤维(孔径分别为0.45、0.8、1.2和5 μm)、聚四氟乙烯(孔径分别为0.45、1、2和5 μm)及聚氯乙烯(孔径分别为0.8 μm 和5 μm)作为过滤介质,可去除90%以上10~400 nm的NaCl颗粒;文献[23]采用合成的陶瓷纳米线包裹的碳化硅颗粒作为过滤介质,对10~300 nm的NaCl粒子进行过滤,其各级粒子过滤效率先随纳米颗粒粒径的增大而减小,在100~150 nm达到最易穿透粒径(most penetrating particle size, MPPS),之后的过滤效率又随颗粒粒径的增大而上升。目前,利用介孔吸附剂孔道对NPs进行去除的研究尚不多见。

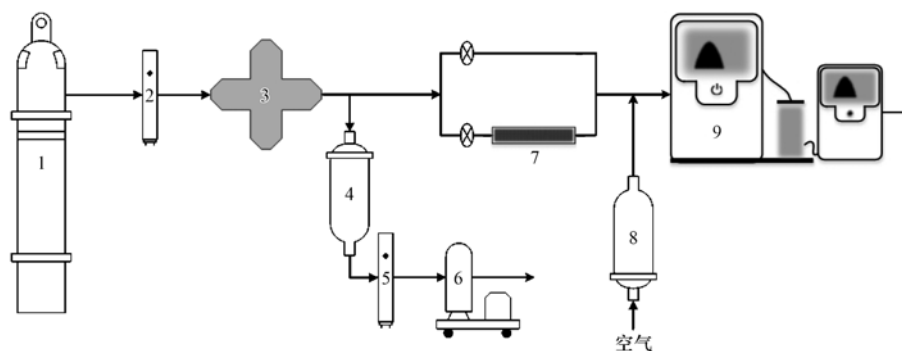
在众多多孔材料中,介孔材料是重要的一类,由于其具备与NPs尺寸相当的介孔结构(2~50 nm)及较大的孔容及比表面积,对协助去除NPs、丰富NPs滤料的选择应具备一定潜力,同时针对介孔材料捕集NPs,材料孔道及材质特性与NPs间的交互作用规律与机制的研究亦具有一定的科学意义。然而,目前尚未见相关报道。本研究采用3种典型介

孔材料(CMK-3、SBA-15及MCM-41)对NPs进行捕集,对比各材料的捕集效率并探索不同条件对去除作用的影响,基于多种材料表征技术对捕集作用机制进行了分析。

1 材料与方法

1.1 实验系统与过程

实验系统主要由气路控制系统、NPs发生系统、颗粒床系统和检测系统组成,如图1所示。气路控制系统由氮气瓶提供 N_2 ;并通过质量流量计1控制其流速为 $1.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$;氮原子进入NPs发生器中,在13.81 A、1.89 V的条件下对0.5 mm的钨丝通入直流电,产生钨原子,并与氮原子结合成为NPs;携带NPs的气流首先经过颗粒床系统上路(即空白组),探索并稳定NPs的生成条件;在相同的NPs生成条件下,气流经过颗粒床过滤器($\Phi 10 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,吸附剂质量均为20 mg),进行吸附实验,通过检测系统检测其分级过滤效率;利用超效过滤器1、质量流量计2及真空泵控制颗粒床系统中不同的流量;由于扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪(SMPS 3938型,TSI, USA)需抽取气流 $1.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,因此额外的洁净空气由超效过滤器2提供。



1. 氮气瓶; 2. 质量流量计1; 3. 纳米颗粒物发生器; 4. 超效过滤器1; 5. 质量流量计2; 6. 真空泵;
7. 吸附剂颗粒床过滤器; 8. 超效过滤器2; 9. 扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪(SMPS)

图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

1.2 实验材料与方法

本实验采用有序介孔碳CMK-3、有序介孔材料MCM-41及介孔分子筛SBA-15作为吸附剂;其中,CMK-3的孔径为9.5 nm;MCM-41的孔径为4.4 nm;SBA-15的孔径为9.9 nm;以上3种吸附剂均购于南京吉仓纳米科技有限公司。本研究的所有实验均是在室温条件下进行;首先,对3种吸附剂进

行空性分析(型号Autosorb-1,美国康塔仪器公司)、XRD(型号D/max-2500,日本理学株式会社)、SEM(型号Helios NanoLab 600i,美国FEI)及TEM(型号JEM-2100F,日本电子株式会社)表征;其次,进行3种吸附剂的吸附对比实验;之后,针对SBA-15在不同的流量(0.1 、 0.3 、 0.5 、 0.7 、 $1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)及不同的颗粒床长度(10、15、20、25 mm)条件下,进行吸

附对比实验.

1.3 分析方法

NPs 的分级过滤效率 η 是指由 SMPS 所测得的各级颗粒粒径的过滤效率,其计算公式如下:

$$\eta = \frac{c_0 - c}{c_0} \times 100\%$$

式中, c_0 为 NPs 的初始数量浓度 (个 $\cdot$ cm $^{-3}$); c 为通过吸附床之后的 NPs 数量浓度 (个 $\cdot$ cm $^{-3}$).

2 结果与分析

2.1 NPs 的生成与 TEM 表征

N₂ 流量为 1.5 L $\cdot$ min $^{-1}$, 对 0.5 mm 的钨丝通入 13.81 A、1.89 V 的直流电产生钨原子, 并与氮原子聚合为 NPs, 得到的粒径分布图谱如图 2 所示. 从中可知, 所产生的 NPs 主要集中于 2~20 nm, 且 20 nm 以内的 NPs 所占比例为 98.49%; 这部分粒子性质相似, 因此都将作为 NPs 用于此吸附实验. NPs 稳定生成后, 在 0.3 L $\cdot$ min $^{-1}$ 流量下, 采用超薄碳膜对 NPs 进行密封采集, 采集时间为 20 min, 之后立即进行 TEM 表征, 放大倍数为 50 nm, 表征结果如图 3 所示; 从中可知, 颗粒成不规则形状, 且大都居于 2~20 nm 之间, 一些较大颗粒是由于颗粒的堆叠所产生.

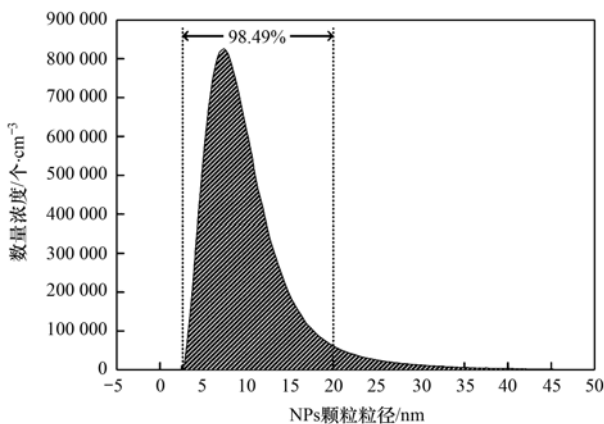


图 2 NPs 粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of NPs

2.2 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 的理化性质

2.2.1 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 的空性分析、XRD 及 TEM 表征

MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 在 77K 下的 N₂ 吸附-脱附曲线及空性分析结果如图 4 及表 1 所示. 从中可知, 3 种吸附剂的比表面积由大到小依次为 CMK-3、MCM-41、SBA-15, CMK-3 的比表面积为 1 575.9 m² $\cdot$ g $^{-1}$, 远大于 MCM-41 和 SBA-15 的比表

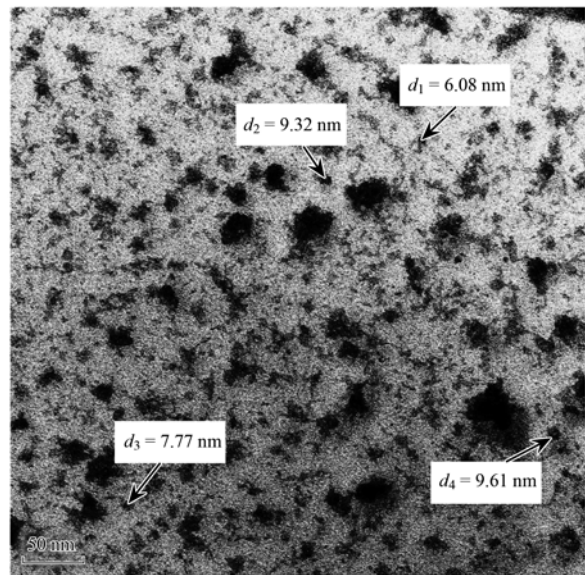


图 3 NPs 的 TEM 表征

Fig. 3 TEM image of NPs

面积; 此外, CMK-3 的微孔孔容为 0.29 cm³ $\cdot$ g $^{-1}$, 远大于 MCM-41 和 SBA-15 的微孔孔容, 因此, CMK-3 较大的比表面积主要是因为其具有丰富的微孔结构; 而且 SBA-15 和 CMK-3 均具有微孔和介孔, 而 MCM-41 不具有微孔, 只具有介孔; SBA-15 的最可几孔径为 7.31 nm, 比 MCM-41 和 CMK-3 的最可几孔径均要大.

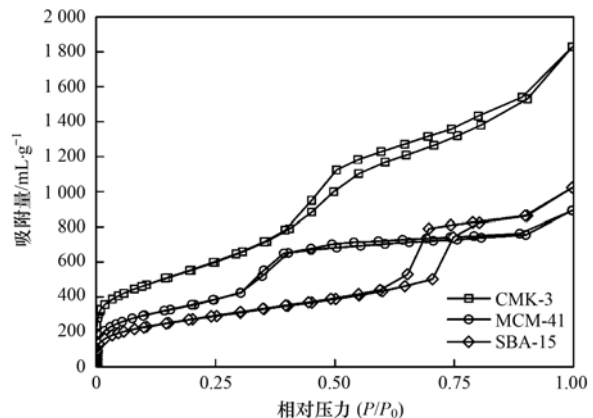


图 4 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 在 77K 下的 N₂ 吸附-脱附曲线

Fig. 4 77 K nitrogen adsorption/desorption isotherms of MCM-41, SBA-15 and CMK-3 at 77K

MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 XRD 和 TEM 的表征结果如图 5 及图 6 所示. 从中可知, 3 种材料各具有 3 个明显的特征峰, 分别检索为 (100)、(110)、(200), 表明其孔为平面六边形介孔^[24]; 由布拉格方程 $n\lambda = 2d_{110} \cdot \sin 2\theta$, $n = 1$ 及 CuK α X 射线波长为 0.154 1 nm (即 $\lambda = 0.154$ 1 nm) 可知, MCM-41、

表 1 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 的空性分析参数

Table 1 Textural parameters of MCM-41, SBA-15 and CMK-3							
吸附剂	比表面积 / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	总孔容 / $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	微孔孔容 / $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	介孔孔容 / $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	最可几孔径 /nm	晶面间距 /nm	孔壁厚度 /nm
MCM-41	961.5	0.91	0.001	0.91	3.06	4.45	1.39
SBA-15	876.5	1.01	0.038	0.97	7.31	9.99	2.68
CMK-3	1575.9	1.91	0.29	1.62	3.79	9.52	5.73

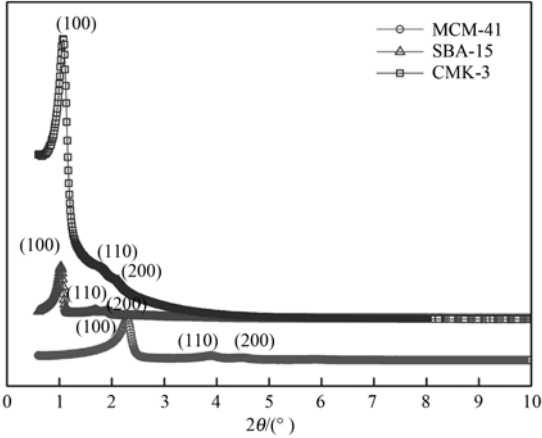


图 5 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 的 XRD 图谱
Fig. 5 Powder X-ray diffraction patterns of MCM-41, SBA-15 and CMK-3

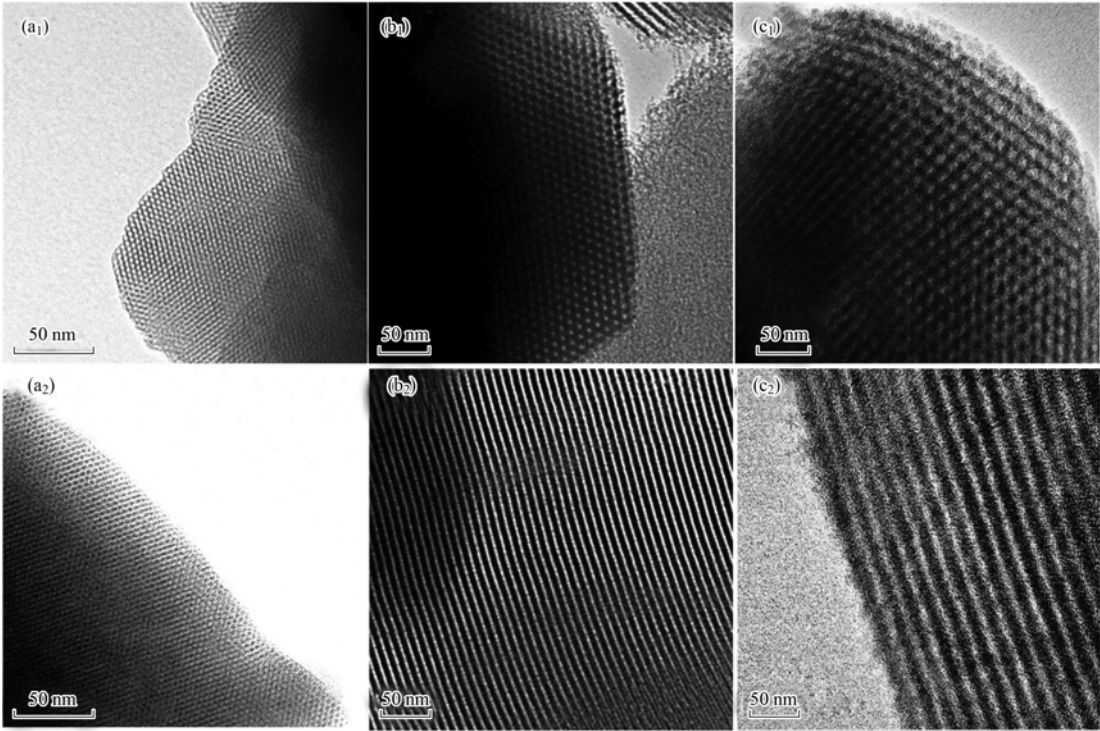
SBA-15 及 CMK-3 在 (100) 处的晶面间距分别为 3.85、8.65 及 8.24 nm；由于 MCM-41 的六边形晶胞尺寸 ($a_0 = 2d_{110}/\sqrt{3}$) 小于 CMK-3 和 SBA-15 的晶

胞尺寸,所以 MCM-41 的 3 个特征峰右移,3 种材料的 TEM 表征(如图 6)也证实此论点；由于 CMK-3 以 SBA-15 为模板制成^[25],因此两者表现出相似的峰衍射角；在 (100) 特征峰处,CMK-3 的强度大于 SBA-15 及 MCM-41,表明 CMK-3 中的介孔更加规则有序。

对 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 进行 TEM 表征,放大倍数为 50 nm；图 6 中(a₁)、(b₁)、(c₁)为垂直于孔道拍摄,(a₂)、(b₂)、(c₂)为平行于孔道拍摄；进一步证明了 3 种材料均为有序介孔材料,且 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 的孔径分别为 4.4、9.9 及 9.5 nm；其中 SBA-15 的孔径最大,为 9.9 nm。

2.2.2 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 的 SEM 表征

对 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 进行 SEM 表征,结果如图 7 所示；从中可知,MCM-41[图 7(a)]呈现出片状晶粒的结构,其介孔存在于片状晶粒内部；SBA-15[图 7(b)]呈现出蠕虫状形态,可观察到

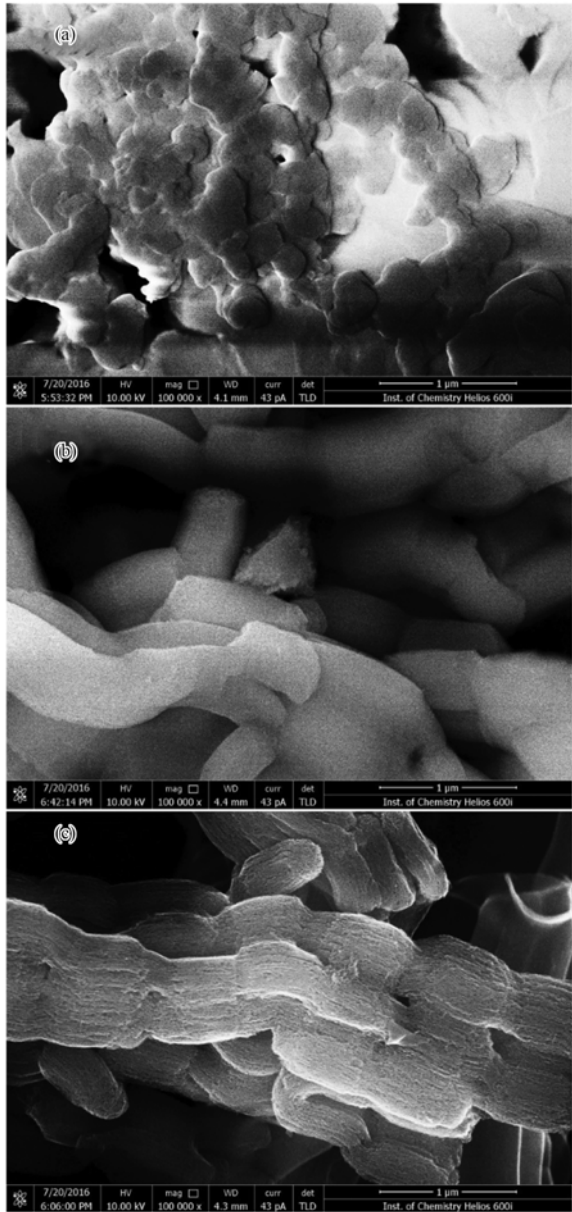


(a) MCM-41、(b) SBA-15 及 (c) CMK-3

图 6 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 的 TEM 图谱

Fig. 6 TEM images of MCM-41, SBA-15 and CMK-3

孔道; 由于 CMK-3[图 7(c)]以 SBA-15 为模板制成, 因此其形态与 SBA-15 基本一致, 呈蠕虫状, 表面较光滑, 晶体形态较一致, 颗粒尺寸均匀。



(a) MCM-41、(b) SBA-15 及 (c) CMK-3

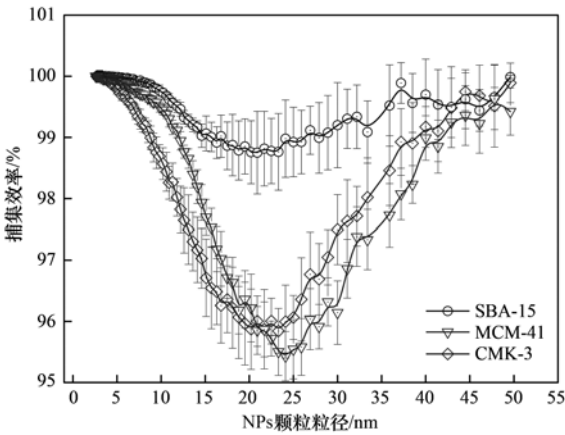
图 7 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 的 SEM 图谱

Fig. 7 SEM images of MCM-41, SBA-15 and CMK-3

2.3 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 对 NPs 的去除效率对比

在流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、吸附床长度为 10 mm、吸附剂质量均为 20 mg 的条件下, 对比 3 种具有不同孔径的介孔材料, 即 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 对 NPs 的分级吸附过滤效率, 其结果如图 8 所示。

为了进一步分析 NPs 在介孔材料中的吸附过滤特性, 下面将主要针对不同条件下 SBA-15 的 NPs 去除效率进行对比分析。



流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 吸附床长度为 10 mm

图 8 MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 对 NPs 分级过滤效率对比

Fig. 8 Contrast of NPs collection efficiency of MCM-41, SBA-15 and CMK-3

2.4 SBA-15 在不同流量下对分级吸附过滤效率的影响

在相同的 NPs 产生条件(如图 2)及相同的吸附床程长度($H = 10 \text{ mm}$)下, 探究 SBA-15 在不同流量, 即在 0.1 、 0.3 、 0.5 、 0.7 和 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 下对 NPs 分级吸附过滤效率的影响, 实验结果如图 9 所示。

根据图 9 可知, 在以上 5 种流量中, SBA-15 对各分级过滤效率的趋势相似, 都呈先下降后上升的趋势, 且每种流量下的曲线都出现一个相对最低点, 即 MPPS; Xu 等^[26]和 Jung 等^[27]认为 MPPS 随着流量风速的增大而减小, 同时 MPPS 所对应的去除效率随之降低; 此理论与本实验相吻合。

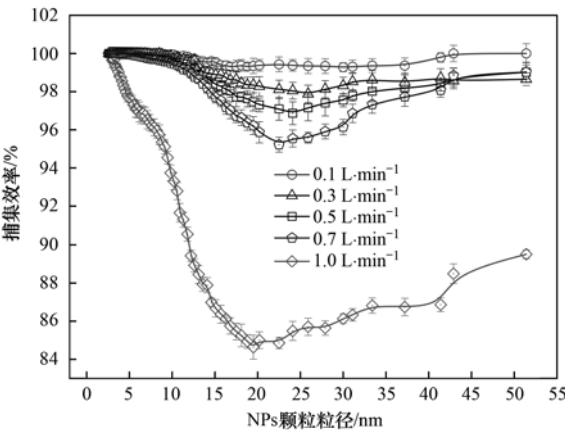


图 9 SBA-15 在 5 种过滤流量下对 NPs 分级吸附过滤效率的影响

Fig. 9 Influence of sampling flow rate on NPs collection efficiency of SBA-15

2.5 SBA-15 在不同吸附床长度下对吸附过滤效率的影响

在相同的 NPs 产生条件(如图 2)及相同的流量

($1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) 下, 探究 SBA-15 在不同的吸附床长度, 即 10、15、20 及 25 mm 对 NPs 分级吸附过滤效率的影响, 结果如图 10 所示。

根据图 10 可知, 当吸附床长度从 10 mm 增加到 25 mm 时, 其总体趋势相似, NPs 的各级去除效率随着床程长度的增加而提高; 此外, NPs 的各级去除效率随着 SBA-15 吸附床长度的增加而增加, 但是 MPSS 却没有改变, 这与文献[23]的研究结果相一致。

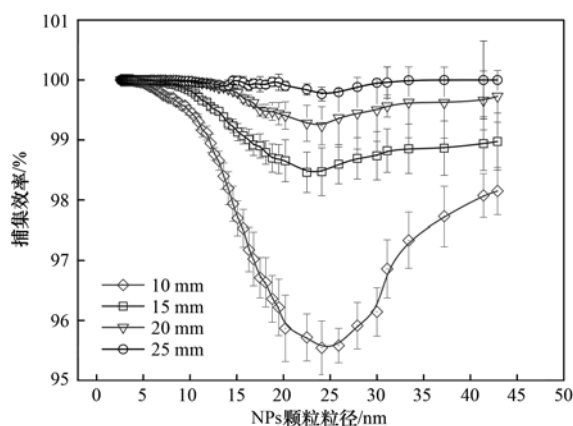


图 10 SBA-15 在 4 种吸附床长度下对 NPs 分级吸附过滤效率的影响

Fig. 10 Influence of sampling thicknesses on NPs collection efficiency of SBA-15

3 讨论

3.1 影响 NPs 去除效率的主要影响因子

根据图 8 及通过空性分析、SEM 及 TEM 可知, MCM-41、SBA-15 及 CMK-3 具有不同的孔径分布、比表面积、孔容及孔结构。CMK-3 与 MCM-41 具有相似的最可几孔径, 但前者有着较大比表面积与微孔分布, 但二者具备相似的去除效果, 说明微孔对 NPs 的去除贡献不大; 而 SBA-15 与 MCM-41 具备相近的比表面积和介孔孔容, 但前者的最可几孔径较大 (7.31 nm), 其对 NPs 的去除效率远高于 CMK-3 和 MCM-41。

在传统气体吸附概念中, 通常孔道的孔径越小, 与气体分子尺寸越接近, 吸附势越大; 而在本研究中, NPs 不同于气体分子, 其尺寸较大, 还应考虑到其能进入吸附剂孔径所对应的最小孔道尺寸。在本研究中, 孔道孔径与待吸附的 NPs 的平均尺寸有一个最佳匹配, 该匹配在 SBA-15 材料上体现较佳, 即其最可几孔径 7.31 nm 与 NPs 的峰值粒径 (即 7.5 nm) 相近, NPs 既能进入到孔道, 同时, 孔道亦能提供较大的吸附势; 而对于 MCM-41 与 CMK-3 (最可

几孔径分别为 3.06 nm 及 3.79 nm), 大部分 NPs 无法进入吸附剂主孔道中, 因此过滤效果较低。通过以上分析可见, 介孔材料的最可几孔径大小是去除 NPs 的关键, 在此基础上还需具备一定的介孔孔容, 而微孔比表面积与 NPs 的去除无直接关系, 微孔分布对其去除贡献不大, 而正是由于孔道差异性, 3 种材料对同样的 NPs 的分级去除效率及 MPSS 的位置具有一定差异性。

3.2 SBA-15 在不同流量下 MPSS 的差异

根据图 9 可知, 在以上 5 种流量中, MPSS 随着流量风速的增大而减小, 同时 MPSS 所对应的去除效率随之降低; 该现象是因为当风速越大时, 颗粒的动能越大, 惯性也随之增大, MPSS 所对应的颗粒粒径就越小; 当风速越小时, 颗粒的动能就越小, 惯性也随之降低, 颗粒要想穿透吸附剂就需要具有相对大的质量, 因此 MPSS 所对应的颗粒粒径就相对较大。当流量为 $0.1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, SBA-15 对 NPs 各分级粒径的吸附过滤效率最高, 并没有出现明显的 MPSS, 因此可知, 可以通过减小流量来提升 MPSS 的吸附过滤效率, 从而提升 NPs 的整体去除效率; 当流量为 $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, SBA-15 对 NPs 的各分级粒径的吸附过滤效率最低, 此时的 MPSS 最为明显, 进一步验证了风速对 MPSS 具有重要的影响; 另一方面, 随着流量的增大, 各分级粒径的吸附过滤效率逐渐下降。这是因为, 随着流量的增大, 颗粒的扩散和拦截作用被削弱, 而且 NPs 在颗粒床中的停留时间缩短, 因此不利于 NPs 进入 SBA-15 的孔道而被去除。

3.3 SBA-15 在不同吸附床长度下 MPSS 的差异

根据图 10 可知, 当吸附床长度为 10 mm 时, 其 MPSS 最为明显, 而随着床程长度的增加, SBA-15 对 NPs 的分级去除效率愈来愈接近线性的结果, 因此总吸附过滤效率也呈幂指数增加; 这是因为随着床程长度的增加, 增大了 NPs 与吸附剂表面的碰撞次数, 一部分通过拦截作用被截留下来停留在吸附剂表面, 另一部分通过颗粒的布朗运动扩散到吸附剂孔道中, 在此双重机制下去除 NPs, 从而提高去除效率; 另一方面, 由图 10 可知, NPs 的各级去除效率随着 SBA-15 吸附床长度的增加而增加, 但 MPSS 却没有改变。

4 结论

(1) 使用介孔材料 CMK-3、SBA-15 及 MCM-41 去除 NPs 时, 介孔材料的最可几孔径是去除 NPs 的

关键,介孔孔容对 NPs 的脱除也有一定的影响,而微孔分布对 NPs 的去除贡献不大。

(2)SBA-15 脱除 NPs 时,MPPS 随着流量的增大而减小,MPPS 范围内的 NPs 去除效率随之降低。

(3)随着过滤层长度的增加,SBA-15 对 NPs 的去除效率愈来愈接近线性的结果,但 NPs 脱除过程中 MPPS 基本不受颗粒床厚度变化的影响。

参考文献:

- [1] Salma I, Borsós T, Németh Z, *et al.* Comparative study of ultrafine atmospheric aerosol within a city [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 154-161.
- [2] Kumar P, Morawska L, Birmili W, *et al.* Ultrafine particles in cities[J]. *Environment International*, 2014, **66**: 1-10.
- [3] Bustos D J, Temelso B, Shields G C. Hydration of the sulfuric acid-methylamine complex and implications for aerosol formation [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2014, **118**(35): 7430-7441.
- [4] Pražnikar Z, Pražnikar J. The effects of particulate matter air pollution on respiratory health and on the cardiovascular system [J]. *Slovenian Journal of Public Health*, 2012, **51**(3): 190-199.
- [5] Posner L N, Pandis S N. Sources of ultrafine particles in the Eastern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **111**: 103-112.
- [6] Friend A J, Ayoko G A, Jäger D, *et al.* Sources of ultrafine particles and chemical species along a traffic corridor: comparison of the results from two receptor models [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **10**(1): 54-63.
- [7] Saffari A, Hasheminassab S, Wang D B, *et al.* Impact of primary and secondary organic sources on the oxidative potential of quasi-ultrafine particles (PM_{0.25}) at three contrasting locations in the Los Angeles Basin [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **120**: 286-296.
- [8] Fountoukis C, Riipinen I, van de Gon H D, *et al.* Simulating ultrafine particle formation in Europe using a regional CTM: contribution of primary emissions versus secondary formation to aerosol number concentrations[A]. In: Helmis C G, Nastos P T (ed.). *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2013. 951-957.
- [9] Su W C, Cheng Y S. Estimation of carbon nanotubes deposition in a human respiratory tract replica [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2014, **79**: 72-85.
- [10] Pope C A III, Turner M C, Burnett R T, *et al.* Relationships between fine particulate air pollution, cardiometabolic disorders, and cardiovascular mortality [J]. *Circulation Research*, 2015, **116**: 108-115.
- [11] Martinelli N, Olivieri O, Girelli D. Air particulate matter and cardiovascular disease: a narrative review[J]. *European Journal of Internal Medicine*, 2013, **24**(4): 295-302.
- [12] Mannucci P M, Harari S, Martinelli I, *et al.* Effects on health of air pollution: a narrative review [J]. *Internal and Emergency Medicine*, 2015, **10**(6): 657-662.
- [13] Ekberg L E, Trüschel A, Gustén J, *et al.* Influence of filter fiber material on removal of ultrafine and submicron particles using carbon fiber ionizer-assisted intermediate air filters [J]. *Ashrae Transactions*, 2012, **118**(1): 602-611.
- [14] 刘晓培, 郑琰, 邱乾胜, 等. 常用过滤材料对微细颗粒过滤性能的研究[J]. *中国环保产业*, 2013, (8): 41-43.
- Liu X P, Zheng Y, Qiu Q S, *et al.* Study of filtering materials most in use on filtering performance of minute particulate [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2013, (8): 41-43.
- [15] 李彩亭, 张巍, 魏先勋, 等. 微米颗粒在多孔陶瓷上的扩散实验及模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2010, **20**(12): 2358-2365.
- Li C T, Zhang W, Wei X X, *et al.* Experiment and simulation of diffusion of micron-particle in porous ceramic vessel [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, **20**(12): 2358-2365.
- [16] Balthazard-Accou K, Fifi U, Agnamey P, *et al.* Influence of ionic strength and soil characteristics on the behavior of *Cryptosporidium* oocysts in saturated porous media [J]. *Chemosphere*, 2014, **103**: 114-120.
- [17] Nandi S, de Luna P, Daff T D, *et al.* A single-ligand ultra-microporous MOF for precombustion CO₂ capture and hydrogen purification[J]. *Science Advances*, 2015, **1**(11): e1500421.
- [18] Schitco C, Bazarjani M S, Riedel R, *et al.* Ultramicroporous silicon nitride ceramics for CO₂ capture[J]. *Journal of Materials Research*, 2015, **30**(19): 2958-2966.
- [19] 柳静献, 谢越, 常德强, 等. 除尘滤料对微细颗粒捕集性能的研究[J]. *过滤与分离*, 2012, **22**(4): 21-25.
- Liu J X, Xie Y, Chang D Q, *et al.* Research on fine particle capture of Baghouse filter media [J]. *Journal of Filtration & Separation*, 2012, **22**(4): 21-25.
- [20] Janvier F, Tuduri L, Cossement D, *et al.* Micropore characterization of activated carbons of respirator cartridges with argon, carbon dioxide, and organic vapors of different vapor pressures[J]. *Carbon*, 2015, **94**: 781-791.
- [21] Phillips K R, England G T, Sunny S, *et al.* A colloidoscope of colloid-based porous materials and their uses [J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, **45**(2): 281-322.
- [22] Soo J C, Monaghan K, Lee T, *et al.* Air sampling filtration media: collection efficiency for respirable size-selective sampling [J]. *Aerosol Science and Technology: the Journal of the American Association for Aerosol Research*, 2016, **50**(1): 76-87.
- [23] De Mello Innocentini M D, Coury J R, Fukushima M, *et al.* High-efficiency aerosol filters based on silicon carbide foams coated with ceramic nanowires[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, **152**: 180-191.
- [24] Wu Y, Liu D F, Wu Y B, *et al.* Effect of electrostatic properties of IRMOFs on VOCs adsorption: a density functional theory study [J]. *Adsorption*, 2014, **20**(5-6): 777-788.
- [25] Bahamon D, Vega L F. Systematic evaluation of materials for post-combustion CO₂ capture in a Temperature Swing Adsorption process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **284**: 438-447.
- [26] Xu B, Liu J J, Ren S X, *et al.* Investigation of the performance of airliner cabin air filters throughout lifetime usage[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(5): 1544-1551.
- [27] Jung C H, Park H S, Kim Y P. Theoretical study for the most penetrating particle size of dust-loaded fiber filters [J]. *Separation & Purification Technology*, 2013, **116**: 248-252.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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