

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM₁₀中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM_{2.5}中硫酸盐来源 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM_{2.5}和PM_{2.5-10}中水溶性无机离子特征 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe₂O₃表面HNO₃的光解 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 李静,李文英(1385)

Fe³⁺对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N₂O释放的影响 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD₅/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钨交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性

孙在, 陈秋方, 蔡志良, 杨文俊, 汪晗

(中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: 采用实验和数值模拟方法研究室外颗粒物通过建筑狭缝进入室内的渗透传输特性及其影响因素. 利用快速迁移率粒径谱仪 (fast mobility particle sizer, FMPS) 测量两个实验舱的颗粒数量浓度从而得到颗粒穿透率, 控制不同的狭缝尺寸及压差研究其对渗透过程的影响. 数值模拟计算与实验结果进行了比较, 趋势基本吻合. 实验与模拟计算结果表明, 当缝高为 1 mm, 小粒径颗粒穿透率较小, 其主导影响因素为布朗扩散运动, 随着颗粒粒径的增加, 穿透率呈增加趋势. 缝长越长, 压差越小, 颗粒穿透率就越小. 模拟计算结果显示, 缝高越小, 颗粒穿透率就越小, 其缝高占主导影响因素. 当缝高为 1 mm, 粒径大于 30 nm 的颗粒其穿透率接近于 1, 而当缝高减小到 0.25 mm 时, 粒径在 300 nm 附近颗粒穿透率达到最高 0.93, 随粒径继续增加, 颗粒穿透率呈减小趋势, 重力沉降开始占主导因素. 当缝高变化时, 不同粒径颗粒沉降到壁面的主导因素随之变化. 实验结果显示: 在较低浓度一定范围内, 颗粒数浓度对穿透率的影响较小. 室内外颗粒数浓度 I/O 比值范围为 0.69 ~ 0.73, 相关系数 R^2 为 0.99, 其线性相关性显著. 狭缝直通道颗粒穿透率明显大于有拐角的通道.

关键词: 室内; 超细颗粒; 建筑狭缝结构; 穿透率; 传输机制

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1227-07 DOI: 10.13227/j.hjx.2015.04.012

Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes

SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, YANG Wen-jun, WANG Han

(College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Penetration and transmission characteristics of outdoor particulate matter through building envelope structure into indoor and its influencing factors were studied by experimental and numerical simulation methods. With the aid of fast mobility particle spectrometer (fast mobility particle sizer, FMPS), particle number concentrations were measured and particle penetration rates were obtained. The effects of slit size and flow pressure on the infiltration process were studied. Compared with numerical simulation and experimental results, the trend was consistent. Experiment and simulation results showed that when the slit was 1 mm high, the penetration rate of particulates with small particle size was small. Its leading influence factor was Brownian diffusion movement, with the increase of particle size, the penetration rate increased. Particle penetration rate was enhanced with the increase of inlet pressure and particle size, but decreased with the increase of slit length. Simulation results showed that the particle penetration rate was enhanced with the increase of slit height. Among all the factors, slit height was the dominant one. When the particle size was more than 30 nm, the penetration rate was close to 1. When the slit height was reduced to 0.25 mm, the penetration rate of particles with size of near 300 nm reached the maximum of 0.93. With the increase of the particle size, particle penetration rate showed a trend of decrease, and gravity settling began to dominate. The experiment result showed that when the slit height changed, the dominant factors of particles subsidence to the wall were changed. At low concentration in a certain range, the particle number concentration had little effect on the penetration rate. The range of particle number concentration of inside and outside I/O ratio was 0.69-0.73. The correlation coefficient R^2 was 0.99. The linear correlation was obvious. The particle penetration rate in slit straight way was significantly greater than that at the corner of the channel.

Key words: indoor; ultrafine particles; building envelope structure; penetration rate; transporting mechanism

统计显示, 长期 $PM_{2.5}$ 污染暴露每立方米增加 $10 \mu\text{g}$ 心脑血管引起的死亡风险增加 76%^[1]. 有研究显示, 人类大约有 86.9% 的时间是在室内度过^[2], 人体大部分时间暴露在室内污染物中. 室外颗粒对室内的影响因素有颗粒向室内的传输, 沉降过程以及通风方式的影响等.

室内污染与室外环境有着很大的关联性. 在室内无明显污染源的情况下, 室外颗粒物的渗透是室内颗粒物的主要来源^[3]. 亢燕铭等^[4]研究两种空调房间内 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度变化, 研究结果显示

$PM_{2.5}$ 的室内外颗粒浓度比值 I/O 均大于 PM_{10} 的 I/O 值, 表明细颗粒比粗颗粒的穿透性强, 更容易通过缝隙进入室内, 从而成为室内 $PM_{2.5}$ 的一个不可忽视的外部源. 张振江等^[5]采集天津市某社区室内和室外可吸入颗粒物 (PM_{10}) 样品, 非采暖季和采暖季 PM_{10}

收稿日期: 2014-09-26; 修订日期: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10972209); 国家自然科学基金重点项目 (11132008); 浙江省自然科学基金项目 (Y6090607)

作者简介: 孙在 (1971 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染传输与控制、超细微粒动力学及环境流体力学, E-mail: sunzai@cjlu.edu.cn

的室内外浓度比(I/O 比值)平均值分别为 0.88 和 0.96, 室内外相关系数 R^2 分别为 0.32 和 0.46. 特别在炎热的夏季和寒冷的冬季, 尽管门和窗都关着, 室外颗粒还是会通过建筑狭缝的缝隙结构如墙缝、门缝、窗口细缝以及机械通风系统管道渗透进入室内.

目前国内关于建筑狭缝结构的颗粒渗透传输作用研究还比较少. 近年来研究超细颗粒物渗透传输及其分布方法主要有建立颗粒渗透数学模型分析^[6-8]、半经验模型^[9-11]、数值模拟^[12, 13]、实验舱模型研究^[14, 15]和真实建筑环境测量方法^[16, 17]. Chen 等^[18]对近年来室内外颗粒浓度相关性做了综述分析, 由于颗粒渗透过程中影响因素较多, 很多前人研究的结果会有一定差距, 且前人多采用中和处理不带电的超细颗粒研究其经过狭缝的渗透情况, 对于真实情况各种颗粒经过狭缝的渗透效应研究较少, 自然界各种颗粒都带有一定电荷, 经过狭缝会产生静电摩擦效应, 为了评估室内人体污染物暴露风险, 有效减少大气颗粒物污染对人体健康的危害, 本文结合前人的研究, 采用实验方法和数值模拟方法进一步研究室内超细颗粒经过建筑围护的影响因素及渗透传输机制.

1 材料与方 法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 由实验舱、狭缝装置、抽气泵和气体采样仪器 FMPS 等设备组成. 实验舱和狭缝装置均采用有机玻璃制成, 实验舱 1 尺寸为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, 实验舱 2 尺寸为 $270\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, 中间由狭缝装置连接, 实验舱 1 连接过滤器和颗粒入口, 模拟室外环境, 实验舱 2 模拟室内环境, 左边连接流量计和抽气泵, 通过抽气泵使舱内气体产生流动. 实验舱 1 顶部安装风扇用以混合舱内颗粒. 舱 1 和舱 2 通过三通阀连接快速粒径谱仪 (FMPS) 用以交替测量两舱内的颗粒数浓度变化. 实验假设狭缝两端温度相同, 忽略温度梯度带来的热迁移及热泳效应.

狭缝装置如图 2 所示, 是由两块光滑矩形有机玻璃中间两侧各夹 1 mm 厚的有机玻璃制成的矩形管道, 连接处采用专用有机玻璃胶粘贴密封. 缝长 z 为平行空气流动方向颗粒所经过的距离, 缝高 d 为狭缝高度, 缝宽 w 为狭缝宽度, 缝宽相对于缝高和缝长来说很大, 可以忽略其对颗粒穿透率的影响. 颗粒物在狭缝中沉积的主要机制有布朗扩散、重力

沉积、凝并碰撞等作用, 其单位时间内布朗运动距离和重力沉降速率与狭缝的尺寸形态有很大关联. 有调查显示, 室外空气渗透进入室内, 其经过的狭缝高度小于 2.5 mm ^[19], 另有研究表明, 建筑围护结构其狭缝高度在 $0.5 \sim 7.5\text{ mm}$ 之间^[20]. 为了方便与其他研究者的结果进行比较, 实验选取典型狭缝的尺寸和压差^[21], 狭缝高度取 1 mm , 缝长选取 $43, 94\text{ mm}$, 缝宽选取 250 mm , 压差分别取 $4, 10\text{ Pa}$. 实验所用超细颗粒选取蚊香燃烧颗粒.

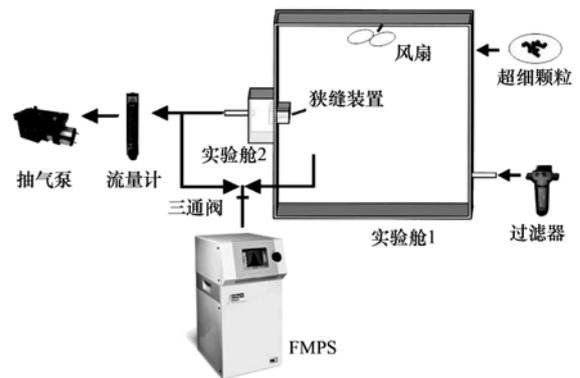


图 1 狭缝渗透实验装置示意

Fig. 1 Schematic of experimental setup for slit penetration

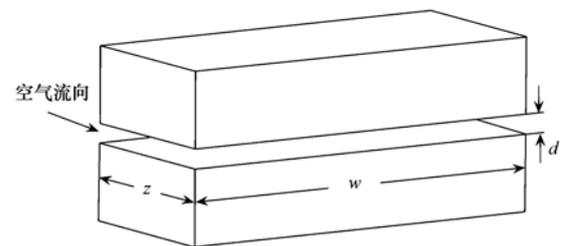


图 2 狭缝结构

Fig. 2 Slit structure

狭缝流动可由风速、室内外温差、压差等驱动, 当其由压差驱动时, Baker 等^[20]给出流经狭缝时空气流量 Q 和压力梯度 ∇p 的关系, 可用方程 (1) 表示:

$$\nabla p = \frac{12\mu z}{wd^3}Q + \frac{\rho C}{2d^2w^2}Q^2 \quad (1)$$

式中, μ 是空气动力黏度, ρ 是空气密度, $C = 1.5 + n_b$, n_b 为狭缝的直角弯曲数量, z 为裂缝长度, d 为裂缝高度, w 为裂缝宽度.

1.2 实验方法

开启实验舱 1 内的风扇, 用以加速气体混合均匀, 开启抽气泵, 采用流量计控制一定气流量, 将蚊香燃烧颗粒直接注入实验舱 1, 采用 FMPS 测量其浓度 C_1 , 混合均匀数浓度达到 10^6 cm^{-3} 量级后停止注

入,利用三通阀连接 FMPS 间隔 20 s 交替测量两实验舱内浓度变化,实验舱 2 内浓度为 C_2 . 穿透率 P 由实验舱 2 与实验舱 1 的数浓度比值得到,每个狭缝尺寸装置重复测量 3 次,每次实验取 10 组交替测量数值做平均.

1.3 实验仪器

采样分析仪器采用美国 TSI 公司生产的快速迁移率粒径谱仪 (fast mobility particle sizer Spectrometer, FMPS), FMPS 是基于 EAA (electrical aerosol analyzer) 原理的细微颗粒物粒径谱仪,粒径大于 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒经过旋风分离器去除,并可在 1 s 内达成微粒尺寸分布的分析,即 1 s 获得一个测量数据,FMPS 分 32 个粒径测量通道涵盖了超细颗粒粒径范围,粒径计数范围为 $5.6 \sim 560 \text{ nm}$,数浓度范围为 $1 \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$,采样流量为 $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. 每次测量前采用 HEAP 进行清零标定.

2 数值模拟计算

2.1 计算模型建立

前人对狭缝的渗透效应研究多采用实验和理论模型研究,数值模拟计算采用 Fluent 软件进行研究,由于颗粒相在空气中所占体积比例很小,因此采用分散相模型 (discrete phase model, DPM) 模拟,通过对大量质点的运动方程进行积分运算获得其运动轨迹及沉积位置. 渗透传输过程流体处于层流状态,颗粒在运动过程中受到多种力的作用,考虑其主要

因素如颗粒的重力沉降作用、布朗扩散过程、Saffman 升力的影响. 颗粒采用稳态粒子跟踪方法,由于分散相所占体积分数较小,只考虑颗粒在已确定连续相流场中的运动,即采用单向耦合求解.

2.2 计算工况及相关算法设置

数值模拟计算工况基于上述实验的相关数据,采用三维模型模拟不同狭缝尺寸、压差对穿透率的影响. 数值模拟将扩展研究不同缝高及狭缝形状对穿透率的影响,如图 3 所示: 矩形截面直管道、L 型管道和 U 型管道. 相关参数如表 1 所示.

模拟过程对颗粒相做以下假设: ①颗粒相为球形光滑颗粒 (spherical); ②颗粒均不带电,颗粒间不发生静电摩擦、碰撞凝并、化学反应; ③对于很多燃烧的气溶胶颗粒如汽车尾气、工业排放废气等都具有一定黏性,当遇到壁面时会牢固地黏附在表面上,因此设置颗粒遇壁面不反弹,即被捕捉 (trap). 分散相颗粒为惰性颗粒 (inert-particle),密度取 $1550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,颗粒分布采用对数正态分布,粒径范围为对应实验仪器测量范围 $6 \sim 523 \text{ nm}$,分 32 个粒径段,其质量中位径为 200 nm ,数浓度取 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$. 狭缝两端热力因素按照实验设置,狭缝入口设置为速度入口,出口设置为压强出口,壁面边界采用默认的无滑移条件,内表面颗粒遇到壁面不反弹,即将壁面设置成捕捉类型 (trap),出口设置为逃逸类型 (escape). 计算跟踪颗粒相对稳定后,穿透率 P 可由式(2)计算得到.

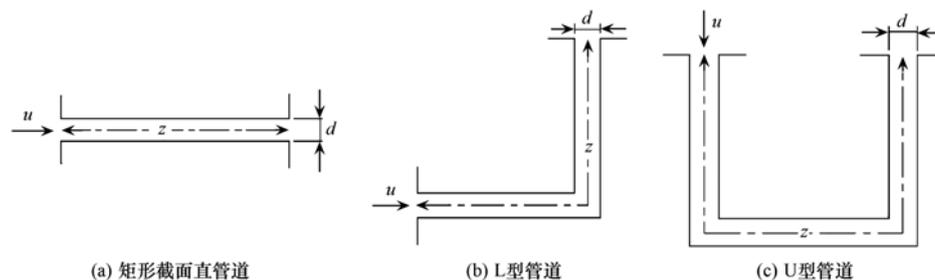


图 3 不同形状狭缝管道

Fig. 3 Different shapes of slit pipelines

表 1 实验相关参数

Table 1 Experimentrelevant parameters

型号	缝长 z/mm	缝宽 w/mm	缝高 d/mm	$C = 1.5 + n_b$	压差 p/Pa	流量 $Q/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
直管道	43	250	1	1.5	4	6.2
直管道	43	250	1	1.5	10	14.8
直管道	94	250	1	1.5	4	3.0
直管道	43	250	0.25	1.5	4	0.1
L 型	43	250	1	2.5	4	6.1
U 型	43	250	1	3.5	4	6.0

$$P = \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (2)$$

式中, N_{out} 为狭缝出口处逃离的颗粒质量流量, N_{in} 为进入狭缝入口的颗粒质量流量.

3 结果与讨论

3.1 狭缝尺寸对穿透率的影响

图 4 给出在压差为 4 Pa, 缝高为 1 mm 情况下, 不同狭缝缝长下各粒径段颗粒的穿透率. 比较实验和数值模拟结果显示, 在仪器测量粒径范围内, 随着粒径的增加, 穿透率呈增加趋势, 其影响主导因素为布朗扩散运动, 颗粒粒径越小, 其扩散系数越大. 模拟结果显示, 当粒径大于 30 nm, 其穿透率接近于 1, 实验结果小于模拟结果, 粒径在 10 nm 和 250 nm 附近的颗粒穿透率变化较剧烈, 主要是由于 10 nm 附近的超细颗粒极不稳定, 在短暂时间内迅速碰撞变成较大粒径颗粒, 250 nm 附近颗粒数量较少, 误差较大. 缝长越长, 颗粒穿透率越小, 这是因为缝长增加则增加了颗粒在狭缝内的停留时间^[22], 从而增加了颗粒与壁面的碰撞几率. 实验结果相比模拟结果其整体趋势相近似, 但实验结果偏小, 这可能是因为自然界各种颗粒都带有一定电荷, 经过狭缝会产生静电摩擦效应, 从而对颗粒穿透有一定影响, 同时颗粒在气体管道输送过程中也会有一定的损失. 由于所选颗粒为真实环境燃烧的蚊香颗粒, 未对颗粒进行中和处理, 结果与 Liu^[21] 研究结果相比略小, 但趋势基本吻合.

由于实验装置加工及仪器测量范围有一定的限制, 借助数值模拟方法扩展研究缝高对穿透率 P 的影响, 结果如图 5(a) 所示, 在重力与布朗运动扩散、Saffman 升力的综合作用下, 缝高越小, 增加了颗粒与壁面的碰撞几率, 从而穿透率越小. 随着粒径增

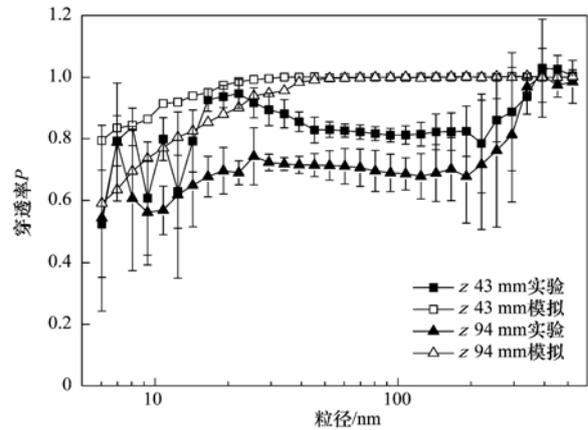


图 4 不同缝长下各粒径段颗粒的穿透率
Fig. 4 Penetration rates of particles with different sizes at different slit lengths

大, 穿透率呈增加趋势, 而当缝高减小到 0.25 mm 时, 粒径在 300 nm 附近颗粒穿透率达到最高 0.93, 随粒径继续增加, 穿透率出现拐点, 颗粒穿透率呈减小趋势. 去除重力的作用, 如图 5(b) 所示, 在缝高为 0.25 mm 时, 穿透率未出现拐点, 而是随粒径增加呈增加趋势, 结果表明, 当粒径大于 300 nm 时, 重力沉降开始起主导作用, 在重力沉降和布朗运动的双重作用下颗粒穿透率开始降低. 当缝高变化时, 不同粒径颗粒沉降到壁面的主导因素随之变化, 这与单位密度球体单位时间内由布朗运动和重力引起的净位移有关^[23], 当缝高减小时, 逐渐接近颗粒净位移, 颗粒更容易碰到壁面被捕捉, 如表 2 给出部分粒径颗粒单位密度球体 1 s 内布朗运动和重力引起的净位移. 在粒径为 10 nm 时, 布朗运动均方根位移与重力沉降位移比值 x_{BM}/x_{grav} 达 4.88×10^3 , 以布朗运动为主, 随粒径增大, 其位移比值 x_{BM}/x_{grav} 降低, 重力开始起主导作用, 当颗粒粒径为 1 μm 时, 位移比值 x_{BM}/x_{grav} 只有 0.21. 狭缝尺寸中缝高对穿

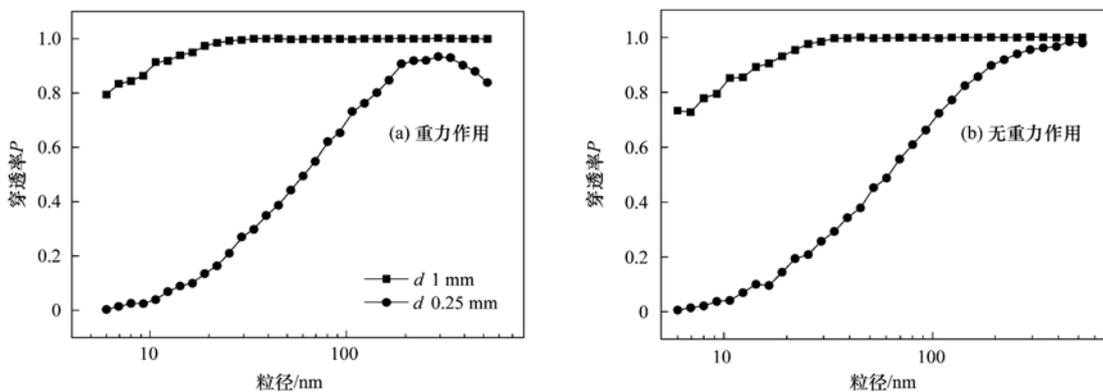


图 5 不同缝高下颗粒的穿透率的模拟结果

Fig. 5 Simulation results of particle penetration rates at different slit heights

表 2 单位密度球体 1 s 内布朗运动和重力沉降净位移

Table 2 Brownian motion within 1 s and gravity settling net displacement of unit density sphere

颗粒直径/nm	布朗运动均方根位移 x_{BM}/m	重力沉降位移 x_{grav}/m	x_{BM}/x_{grav}
10	3.31E-04	6.79E-08	4 880
100	3.76E-05	8.74E-07	43
300	1.60E-05	4.27E-06	3.74
500	1.14E-05	1.01E-05	1.13
1 000	7.55E-06	3.53E-05	0.21

透率影响最大,占主导影响因素。

3.2 压强及狭缝形状对穿透率的影响

图 6 给出缝长为 43 mm、缝高为 1 mm 的狭缝装置在压差分别为 4、10 Pa 下的颗粒穿透率,将实验结果与数值模拟结果进行比较,模拟结果均略大于实验结果,数值模拟结果显示粒径小于 30 nm 的颗粒穿透率随压强增大而增大,当粒径大于 30 nm,穿透率均接近于 1. 实验结果显示,不同压差结果无明显区别,在一定范围内,较小压差对颗粒穿透率影响较小。

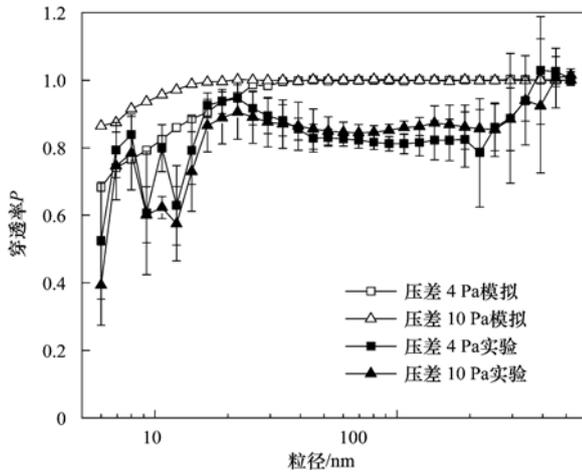


图 6 不同压差下颗粒穿透率

Fig. 6 Particle penetration rates under different inlet pressures

数值模拟方法扩展研究不同狭缝形状对穿透率 P 的影响,狭缝缝长均为 43 mm,缝高 1 mm,压差 4 Pa,结果如图 7 所示,不同狭缝形状对粒径小于 35 nm 的颗粒穿透率影响较大,L 型和 U 型穿透率接近,均小于矩形直通道。

3.3 颗粒物数浓度分布及穿透率变化

图 8 为实验所测实验舱 1(室外)和实验舱 2(室内)的颗粒数浓度和穿透率随时间的变化,其狭缝缝长为 43 mm,缝高为 1 mm,压差为 4 Pa. 结果显示,颗粒粒径为 45.3 ~ 294.3 nm 的颗粒数浓度随时间衰减迅速,其中粒径为 107.5 nm 的颗粒衰减最快. 其穿透率 P 随时间变化波动较小,穿透率 P 随

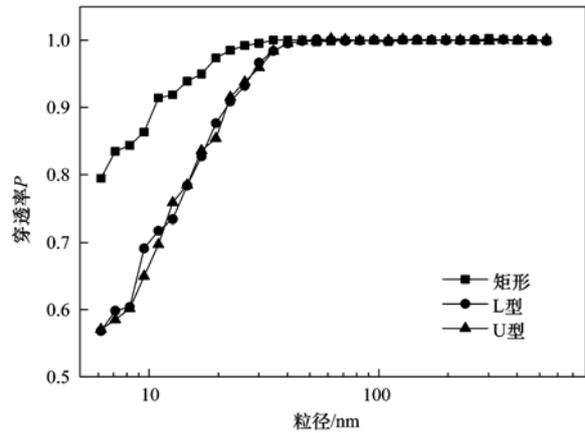


图 7 不同狭缝形状下颗粒穿透率的模拟结果

Fig. 7 Simulation results of particle penetration rates in slit with different shapes

粒径增大,有增加趋势. 在较低浓度一定范围内,颗粒数浓度对穿透率的影响较小,与其粒径有关,根据室外空气各粒径段颗粒数浓度可以大概估算室内空气质量品质. 图 9 给出室内外颗粒随时间的粒径谱分布,颗粒粒径主要分布在 100 nm 附近,该粒径段颗粒数浓度变化最明显. 随时间变化,颗粒数量中心粒径(CMD)向小粒径转移.

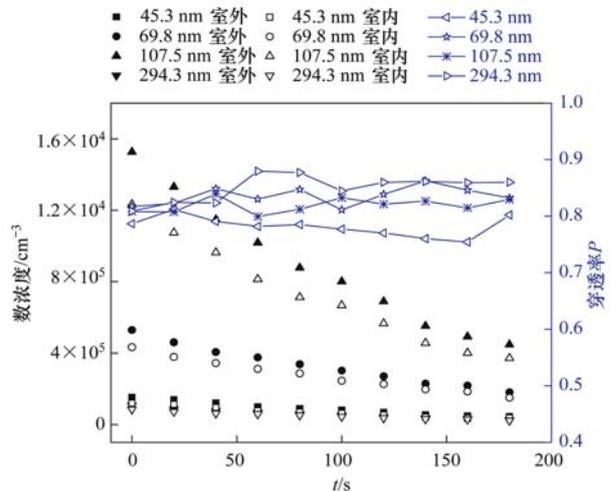


图 8 室内外不同粒径颗粒数浓度和穿透率 P 随时间变化趋势

Fig. 8 Trends of indoor and outdoor numerical concentration of particles with different sizes and penetration rate P over time

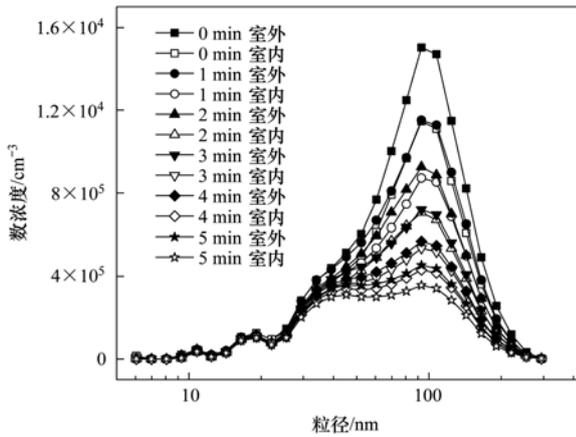


图9 室内外颗粒粒径谱随时间分布

Fig. 9 Distribution of indoor and outdoor particle size spectra over time

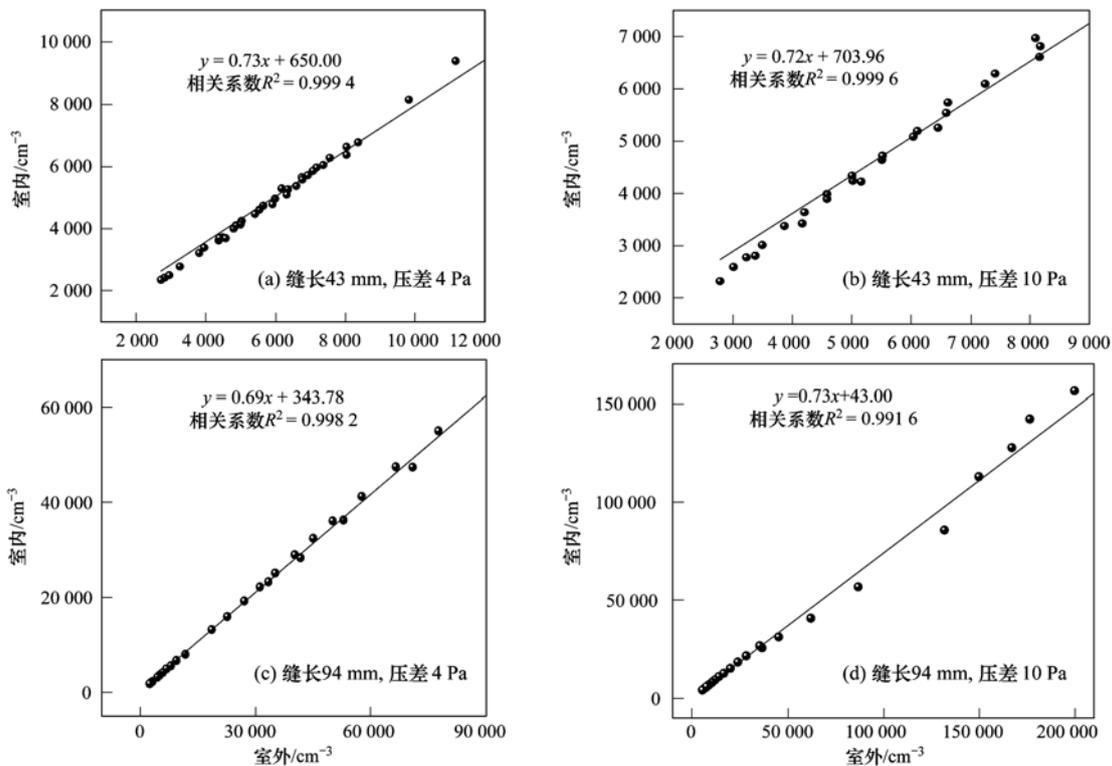


图10 室内外颗粒数浓度相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis of indoor and outdoor particle numerical concentrations

4 结论

(1) 在仪器测量粒径范围内, 实验和数值模拟结果显示, 当缝高为 1 mm, 随着颗粒粒径的增加, 穿透率呈增加趋势, 缝长越长, 缝高越小, 颗粒穿透率就越小. 模拟计算结果表明当粒径大于 30 nm, 其穿透率接近于 1, 而当缝高减小到 0.25 mm 时, 粒径在 300 nm 附近颗粒穿透率达到最高 0.93, 随粒径继续

增加, 颗粒穿透率呈减小趋势, 重力沉降开始逐渐占主导因素. 当缝高变化时, 不同粒径颗粒沉降到壁面的主导因素随之变化, 这与单位密度颗粒单位时间净位移有关. 实验结果显示, 粒径在 10 nm 和 250 nm 附近的颗粒穿透率变化较剧烈, 小粒径颗粒穿透率较小, 其影响主导因素为布朗扩散运动. 实验结果相比模拟结果偏小, 但其整体趋势相一致.

如图 10 为不同狭缝尺寸及压差下实验所测舱 1(室外)和舱 2(室内)颗粒数浓度, 其狭缝高度均为 1 mm, 结果显示室内外颗粒数浓度呈线性相关性, 超细微粒 I/O 比值为 0.69 ~ 0.73, 这与 Tippayawong 等^[24]在学校区域得到的超细微粒 I/O 比值 0.69 ~ 0.8 相近, Massey 等^[25]也给出了路边、乡村和城市的室内外颗粒质量浓度回归曲线, $PM_{0.5}$ 斜率分别为 0.98、0.47 和 0.74. 相关系数 R^2 能很好地表征室内外颗粒的关联程度^[26], 相关系数 R^2 均到达 0.99 以上, 表明室内颗粒物浓度很大程度上与室外颗粒的渗透有关. 在实际应用环境中人们可以根据室外颗粒浓度来预测室内颗粒浓度, 从而评估室内人体污染物暴露风险, 有效减少大气颗粒物污染对人体健康的危害.

(2) 缝长为 43 mm、缝高为 1 mm 的狭缝装置在

不同压差下其模拟结果均略大于实验结果,数值模拟结果显示粒径小于 30 nm 的颗粒穿透率随压强增大而增大,当粒径大于 30 nm,穿透率接近于 1. 实验结果显示,在一定范围内,压差对颗粒穿透率影响较小. 狭缝形状只对粒径小于 35 nm 的颗粒有影响,其直通道颗粒穿透率大于有拐角的通道穿透率. 狭缝颗粒的渗透传输机制与过滤器的过滤机制相类似,该结论可以为过滤器和空气净化器的研究提供一定参考价值.

(3) 颗粒数浓度随时间衰减迅速,而其穿透率 P 随时间变化波动较小. 在一定范围内,颗粒数浓度对穿透率的影响较小. 室内外颗粒数浓度 I/O 比值范围为 0.69 ~ 0.73, 相关系数 R^2 达 0.99, 线性相关性显著.

参考文献:

- [1] Miller K A, Siscovick D S, Sheppard L, *et al.* Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2007, **356** (5): 447-458.
- [2] Klepeis N E, Nelson W C, Ott W R, *et al.* The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants[J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2001, **11** (3): 231-252.
- [3] 程鸿, 胡敏, 张利文, 等. 北京秋季室内外 $PM_{2.5}$ 污染水平及其相关性[J]. *环境与健康杂志*, 2009, **26**(9): 787-789.
- [4] 亢燕铭, 钟珂, 柴士君. 上海地区空调房间夏季室内外颗粒物浓度变化特征[J]. *过程工程学报*, 2006, **6**(22): 46-50.
- [5] 张振江, 赵若杰, 曹文文, 等. 天津市可吸入颗粒物及元素室内外相关性[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 357-364.
- [6] Liu D L, Nazaroff W W. Modeling pollutant penetration across building envelopes [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (26): 4451-4462.
- [7] 田利伟. 室内环境颗粒物浓度预测模型及污染控制策略研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009. 44-55.
- [8] Tian L W, Zhang G Q, Lin Y L, *et al.* Mathematical model of particle penetration through smooth/rough building envelop leakages[J]. *Building and Environment*, 2009, **44**(6): 1144-1149.
- [9] Jeng C J, Kindzierski W B, Smith D W. Particle penetration through inclined and L-shaped cracks [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, **133**(3): 331-339.
- [10] Lai A C K. Modeling indoor coarse particle deposition onto smooth and rough vertical surfaces [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3823-3830.
- [11] Wood N B. A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1981, **12**(3): 275-290.
- [12] Zhang Z, Chen Q. Comparison of the eulerian and lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(25): 5236-5248.
- [13] 张帆. 大气悬浮颗粒物对建筑围护结构穿透机理的数值模拟 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007. 37-49.
- [14] Mosley R B, Greenwell D J, Sparks L E, *et al.* Penetration of ambient fine particles into the indoor environment [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **34**(1): 127-136.
- [15] Liu D L, Nazaroff W. Particle penetration through building cracks[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2003, **37**(7): 565-573.
- [16] Tung T C W, Chao C Y H, Burnett J. A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(6): 881-893.
- [17] Chao C Y H, Wan M P, Cheng E C K. Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(30): 4233-4241.
- [18] Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(2): 275-288.
- [19] Thomas D A, Dick B A. Air infiltration through gaps around windows[J]. *Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers*, 1953, **21**: 85-97.
- [20] Baker P H, Sharples S, Ward I C. Air flow through cracks[J]. *Building and Environment*, 1987, **22**(4): 293-304.
- [21] Liu D L. Air pollutant penetration through airflow leaks into buildings[D]. Berkeley: University of California, 2002. 66-71.
- [22] Xu B, Liu S S, Zhu Y F. Ultrafine particle penetration through idealized vehicle cracks[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2010, **41**(9): 859-868.
- [23] Hinds W C. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles* [M]. (2nd ed.). United States of America: John Wiley & Sons Inc, 1999. 156-160.
- [24] Tippayawong N, Khuntong P, Nitatwicht C, *et al.* Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments [J]. *Building and Environment*, 2009, **44**(1): 188-197.
- [25] Massey D, Masih J, Kulshrestha A, *et al.* Indoor/outdoor relationship of fine particles less than 2.5 μm ($PM_{2.5}$) in residential homes locations in central Indian region[J]. *Building and Environment*, 2009, **44**(10): 2037-2045.
- [26] Colome S D, Kado N Y, Jaques P, *et al.* Indoor-outdoor air pollution relations: particulate matter less than 10 μm in aerodynamic diameter (PM_{10}) in homes of asthmatics [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26** (12): 2173-2178.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行