

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,杨复沫,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 CO₂ 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,王骢,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观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 SiO₂ 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 N₂H₄ 下 SBR 中硝化微生物特性 肖芄颖,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 CO₂ 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,慕仲锋,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)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估

罗李娜¹, 程真^{1*}, 朱雯斐¹, 张强², 楼晟荣³, 乔利平³, 晏乃强¹

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 北京科领奈尔环境科技有限公司, 北京 100083; 3. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 细颗粒物(PM_{2.5})理化性质测量是研究大气 PM_{2.5} 污染来源及成因的重要手段之一, 最大限度降低细颗粒物在采样输送过程中的损失对提高测量结果的准确性至关重要. 为了评估常规测量体系中采样管路内 PM_{2.5} 的输送损失情况, 并在此基础上探究合适的采样管路布置方案, 本研究采用数值计算方法分析了管径、管长及弯管数目这 3 个主要参数在不同变化范围内对 PM_{2.5} 输送效率的影响. 结果表明, 流量为 20.0 L·min⁻¹ 时, 管径 4 mm、管长 1.0 m 的竖直接管内 PM_{2.5} 质量浓度输送效率为 89.6%, 管径增至 14 mm 时输送效率升至 98.3%. 流量为 1.0 L·min⁻¹ 时, 管径 4 mm、管长 10.0 m 的水平管路内 PM_{2.5} 质量浓度输送效率仅为 86.7%, 管长降至 0.5 m 时输送效率提高至 99.2%. 弯管弧度为 90° 时, 流量 20.0 L·min⁻¹、管径 4 mm 的湍流态弯管处, PM_{2.5} 质量浓度输送效率低至 85.2%. 流量(L·min⁻¹)与管径(mm)之比小于 1.4 使管内流态为层流时有利于降低颗粒物输送损失. 为保证 PM_{2.5} 输送效率在 97% 以上, 2.5、5.0 和 10.0 L·min⁻¹ 仪器建议选择管长在 6.0 m 以内的竖直采样管; 流量为 16.7 L·min⁻¹ 和 20.0 L·min⁻¹ 仪器建议选择管径在 12 mm 以上的竖直采样管; 水平管路管长由流量与管径之比确定; 在湍流流态下, 建议减少弯管的使用数量.

关键词: 细颗粒物; 采样管路; 传输损失; 输送效率; 在线测量

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4457-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605070

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation

LUO Li-na¹, CHENG Zhen^{1*}, ZHU Wen-fei¹, ZHANG Qiang², LOU Sheng-rong³, QIAO Li-ping³, YAN Nai-qiang¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Beijing Clean Air Environmental Technologies Co., Ltd., Beijing 100083, China; 3. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: In-situ measurement of PM_{2.5} physical and chemical properties is a substantial approach for the mechanism investigation of PM_{2.5} pollution. Minimizing PM_{2.5} transport loss in sampling tube is essential for ensuring the accuracy of the measurement result. In order to estimate the integrated PM_{2.5} transport efficiency in sampling tube and optimize tube designs, the effects of different tube factors (length, bore size and bend number) on the PM_{2.5} transport were analyzed based on numerical computation. The results showed that PM_{2.5} mass concentration transport efficiency of vertical tube with flow rate at 20.0 L·min⁻¹, bore size at 4 mm, length at 1.0 m was 89.6%. However, the transport efficiency increased to 98.3% when the bore size increased to 14 mm. PM_{2.5} mass concentration transport efficiency of horizontal tube with flow rate at 1.0 L·min⁻¹, bore size at 4 mm, length at 10.0 m was 86.7%, and increased to 99.2% with length at 0.5 m. Low transport efficiency of 85.2% for PM_{2.5} mass concentration was estimated in bend with flow rate at 20.0 L·min⁻¹, bore size at 4 mm, curvature angle at 90°. Laminar flow of air in tube through keeping the ratio of flow rate (L·min⁻¹) and bore size (mm) below 1.4 was beneficial to decrease the PM_{2.5} transport loss. For the target of PM_{2.5} transport efficiency higher than 97%, it was advised to use vertical sampling tubes with length less than 6.0 m for the flow rates of 2.5, 5.0, 10.0 L·min⁻¹ and bore size larger than 12 mm for the flow rates of 16.7 or 20.0 L·min⁻¹. For horizontal sampling tubes, tube length was decided by the ratio of flow rate and bore size. Meanwhile, it was suggested to decrease the amount of the bends in tube of turbulent flow.

Key words: fine particulate matter; sampling tube; transport loss; transport efficiency; on-line measurement

高浓度大气细颗粒物(PM_{2.5}, 空气动力学当量直径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物)污染易导致能见度下降、影响气候变化并威胁人体健康, 是我国当前最为严重并亟待解决的环境问题之一^[1~7]. 应用在线监测仪器如微量振荡天平法颗粒物分析仪 TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)

1450F、扫描电迁移率颗粒物粒径谱仪 SMPS

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期: 2016-07-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC22B01); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208700)

作者简介: 罗李娜(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为细颗粒物污染, E-mail: luolina@sjtu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: chengz88@sjtu.edu.cn

(Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometers) 和在线气溶胶及气体检测系统 MARGA (Monitor for AeRosols and Gases in ambient Air) 等开展 PM_{2.5} 质量浓度、数浓度及化学组分等理化性质监测, 是研究 PM_{2.5} 污染特征及成因、来源的主要途径^[8-12]. 通常, PM_{2.5} 经由采样管从采样口输送至监测仪器, 理想采样过程应保证 PM_{2.5} 质量浓度、数浓度和化学组分等性质在采样管中不发生改变. 然而, 受重力沉降、扩散沉降和湍流惯性沉降等机制影响, 颗粒物在采样管中不可避免发生损失, 将直接或间接影响仪器测量结果^[8,13-20]. 在环境保护部 2013 年发布的《环境空气颗粒物 (PM₁₀ 和 PM_{2.5}) 连续自动监测系统技术要求及检测方法》(HJ 653-2013) 中, 明确要求采样管内颗粒物输送效率应大于或等于 97%^[21]. 因此, 在布置 PM_{2.5} 在线监测仪器采样管时应应对管路内输送损失情况进行评估, 以免损失程度过大导致测量结果不能真实反映大气颗粒物的理化性质.

采样管内颗粒物输送损失量可通过实验测量或数值计算两种方式进行评估^[8,20,22,23]. 实验测量方式一般应用气溶胶发生装置及气溶胶浓度在线检测仪器, 通过测量采样管进、出口颗粒物浓度得出管路内颗粒物损失量^[8,20]. 实验测量方法准确度高, 但灵活性较差, 且对实验仪器精确度要求较为苛刻. 数值计算方式主要应用经过实验验证且准确度较高的理论或经验公式估算颗粒物损失量. 与实验测量相比, 数值计算虽然存在可接受范围内的误差^[8,22,23], 但可在设计阶段对不同的管路参数变化做出快速响应. 从应用角度出发, 数值计算比实验测量方式更适用于测量仪器采样管路设计, 因此本研究基于数值计算方式估算采样管内 PM_{2.5} 输送效率.

目前, 研究者针对颗粒物输送效率数值计算方法开展了不少研究, 基于实验测量或理论分析, Heyder 等^[15] 和 Schwendiman 等^[16] 分别提出了层流、湍流态倾斜管路内颗粒物在重力沉降下的输送效率计算公式; Gormley 等^[17] 给出了受扩散沉降机制作用的颗粒物损失计算公式; Lee 等^[18] 探究了湍流惯性沉降机制作用下的颗粒物输送效率计算公式; Pui 等^[19] 基于实验测量结果给出了与雷诺数无关的弯管处颗粒物输送效率计算方法. 在此基础上, AeroCalc^[6]、Particle Loss Calculator^[22] 和核设施取样管路颗粒物损失计算软件^[23] 等工具的开发实现了管路内颗粒物全程输送损失快速分析的功能,

但其计算结果仅针对单粒径颗粒物, 无法对 PM_{2.5} 整体损失进行分析. 从大气颗粒物测量角度出发, 笔者更关注 PM_{2.5} 整体质量浓度、数浓度等在采样管中的传输损失量. 因此, 本研究基于单粒径颗粒物输送效率经典计算公式, 结合典型城市大气颗粒物粒径谱分布, 对常规在线 PM_{2.5} 监测仪器采样管在不同管径、管长和弯管条件下的 PM_{2.5} 输送效率进行数值计算, 并根据计算结果对采样管路布置提出建议, 以期对大气颗粒物在线测量的管路布置提供参考.

1 数值计算方法

本研究采用 PM_{2.5} 输送效率 η_{trans} 这一指标评价颗粒物在采样管中的输送损失情况. η_{trans} 即为通过采样管到达监测仪器与采样管入口的 PM_{2.5} 数浓度或质量浓度之比, 该定义与文献^[21] 一致. 在计算中, 采样管内单粒径颗粒物全程输送效率为颗粒物在各输送管段、各沉降机制下的输送效率之积 [式 (1)]^[8]. PM_{2.5} 全程输送效率运用加权平均法求解, 加权因子为单粒径颗粒物输送效率, 权重为该粒径颗粒物数浓度或质量浓度在 PM_{2.5} 整体中的占比. 其中, 颗粒物输送效率计算部分选取文献^[15-19] 中总结的经典计算公式, 颗粒物数浓度分布选用 Hobbs^[24] 提出的城市颗粒物浓度谱.

$$\eta_{\text{trans}}(d_p) = \prod_{\text{tube sections}} \left[\prod_{\text{mechanisms}} \eta_{\text{tube section, mechanism}}(d_p) \right] \quad (1)$$

$$\eta_{\text{trans, number concentration}} = \sum_{0.001}^{2.5} \left[\eta_{\text{trans}}(d_p) \times \frac{n^0(d_p)}{\sum_{0.001}^{2.5} n^0(d_p)} \right] \quad (2)$$

$$\eta_{\text{trans, mass concentration}} = \sum_{0.001}^{2.5} \left[\eta_{\text{trans}}(d_p) \times \frac{m^0(d_p)}{\sum_{0.001}^{2.5} m^0(d_p)} \right] \quad (3)$$

$$m^0 = n^0 \cdot \rho^0 \cdot \frac{1}{6} \pi (d_p)^3 \quad (4)$$

式中, d_p 为颗粒物空气动力学当量直径, 单位为 μm ; n^0 为某粒径颗粒物数浓度, 单位为 $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$; m^0 为某粒径颗粒物质量浓度, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $\eta_{\text{tube section, mechanism}}$ 为某管段某机制下某粒径颗粒物输送效率; η_{trans} 为单粒径颗粒物全程输送效率; $\eta_{\text{trans, number concentration}}$ 为 PM_{2.5} 全程数浓度输送效率; $\eta_{\text{trans, mass concentration}}$ 为 PM_{2.5} 全程质量浓度输送效率; ρ^0

为颗粒物密度,取 $1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.1 单粒径颗粒物输送效率

采样管某管段内颗粒物输送效率由各沉降机制下输送效率之积决定. 本研究选取重力沉降^[15, 16]、扩散沉降^[17]、湍流惯性沉降^[18]和弯管惯性沉降^[19]这4种影响颗粒物输送效率的主要机制为分析对象. 同一沉降机制下颗粒物输送效率计算公式的选取与管内气流流态有关,流态划分由管路内气流雷诺数 Re 决定, Re 计算式选取文献[8]中推荐的经典公式. 当 Re 小于2 000时流态为层流,当 Re 大于4 000时为湍流,其余为过渡态. 假定环境大气处于标准状态,雷诺数判别式可简化为式(5). 其中 Q 为仪器流量,单位为 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; D 为管路内径,单位为 mm. 因此, $Q/D < 1.433$ 时,气流为层流状态;当 $Q/D > 2.866$ 时,气流为湍流状态.

$$Re = 1\ 395.8 \frac{Q}{D} \quad (5)$$

由于各沉降机制下颗粒物输送效率计算方法不是本研究关注重点,故对此不做详细展开,具体计算公式可参见文献[15~19]中对此部分的详细叙述. 其中,重力沉降计算公式适用于粒子沉降速度轴向分量低于管中流速的情况. 对于流态处于过渡区的颗粒物沉降现象,由于其情况较为复杂并无可借鉴公式,因此本研究不涉及过渡区内颗粒物输送效率的分析. 在实际采样过程中,应尽量避免采样管路内气流处于过渡区,颗粒物在此流态下损失情况较为复杂不易估计. 此外,本研究涉及管路均指不锈钢管,管径均指管路内径.

1.2 城市颗粒物浓度谱

选用 Hobbs^[24] 提出的城市颗粒物三模态分布[式(6)]作为本研究 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度谱. 其中,模态 I 中参数 N 为 9.93×10^4 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, d_p 为 $0.013\ \mu\text{m}$, $\lg\sigma$ 为 0.245 ; 模态 II 中 N 为 1.11×10^3 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, d_p 为 $0.014\ \mu\text{m}$, $\lg\sigma$ 为 0.666 ; 模态 III 中 N 为 3.64×10^4 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, d_p 为 $0.05\ \mu\text{m}$, $\lg\sigma$ 为 0.337 . 由于 $0.001\ \mu\text{m}$ 以下颗粒物主要以气体分子存在,故选取 $0.001 \sim 2.5\ \mu\text{m}$ 粒径段作为研究范围^[1, 8].

$$n^0(\lg d_p) = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} \lg\sigma_i} \cdot \exp\left(-\frac{(\lg d_p - \lg \bar{d}_{pi})^2}{2 \lg^2 \sigma_i}\right) \quad (6)$$

1.3 参数设置

常见 $\text{PM}_{2.5}$ 在线监测仪器如 TEOM 和 MARGA 等采样流量为 $16.7\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 部分在线仪器如 SMPS 流量为 $0.2 \sim 5.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, ELPI (Electrical Low

Pressure Impactor, 静电低压撞击器) 流量为 $10.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ^[8~12]. 综合考虑在线仪器流量大小和其分布范围,选取如表1所示的6组不等间距流量作为分析对象. 为了保证本研究分析管路条件具有代表性且覆盖范围广,根据对实际测量仪器采样管入口管径及管长的调研情况,选取 $4 \sim 14\ \text{mm}$ 管径、 $0.5 \sim 10.0\ \text{m}$ 管长作为数值计算参数,具体分布如表1所示. $\text{PM}_{2.5}$ 粒径计算范围根据测量仪器可监测范围选取 $0.001 \sim 2.5\ \mu\text{m}$, 以 $0.001\ \mu\text{m}$ 为粒径分布间隔,共计2 499组粒径区间.

表1 采样管输送效率计算参数

Table 1 Numerical computation parameters for transportation efficiency of sampling tube

类型	参数设置
流量 $Q/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	20.0、16.7、10.0、5.0、2.5、1.0
管长 L/m	0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0
管径 D/mm	4、6、8、10、12、14

2 结果与讨论

2.1 管径对细颗粒物输送效率的影响

管径对于 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响主要体现在其对管路内气流流态的影响. $\text{PM}_{2.5}$ 在线监测仪器采样流量一般为固定值,因此流态判别指标雷诺数 Re [式(5)]大小主要取决于管径. 当管内为层流时,主要沉降机制为重力沉降和扩散沉降;管内为湍流时,主要沉降机制为重力沉降、扩散沉降和湍流惯性沉降. 气流流态转变时,管路内颗粒物沉降机制类型及数量发生改变,结合颗粒物全程输送效率计算公式[式(1)]可知,当沉降机制数量增加时,由于乘积效应, $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率易大幅度降低. 因此,本节从流态类别出发,分析管径变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响程度.

为了探究常见在线监测仪器采样管内气流流态分布情况,选取不同流量及管径组合条件,结合雷诺数判别式[式(5)],进一步分析了管路内流态变化趋势(图1). 由图1可知,当仪器流量低于 $5.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,采样管内流态均为层流;当流量大于 $5.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 且小于 $10.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,管路内流态在管径低于 $7\ \text{mm}$ 时易处于过渡区, $7\ \text{mm}$ 以上均为层流;当流量大于 $10.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,管路内3种流态均易存在,且随流量增大湍流态及过渡态比例逐渐增加;当流量为 $20.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,仅当管径为 $14\ \text{mm}$ 时管路内流态为层流,管径小于 $7\ \text{mm}$ 为湍流,其余条件下管路内流态处于过渡区. 由此可见,采样管内气流流态以层流居多,且呈现出随流量增大

及管径降低由层流过渡区转变为湍流的趋势。

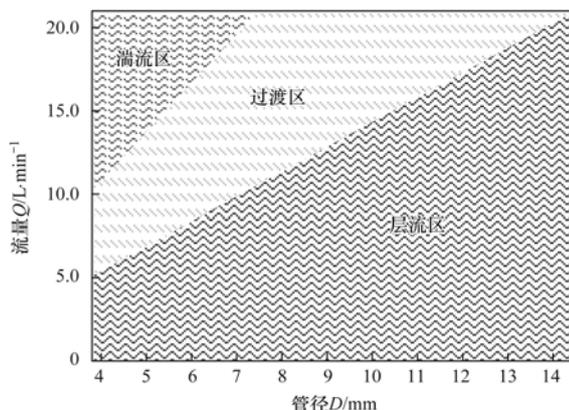


图1 流量及管径对气流流态的影响

Fig. 1 Impact of flow rate and tube bore size on flow types of airflow

《环境空气颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})连续自动监测系统安装和验收技术规范》(HJ 655-2013)中建议采样管竖直安装^[25],故此部分选取长度为1.0 m的竖直采样管进行分析。图2为PM_{2.5}数浓度和质量浓度输送效率随流态变化情况。从中可知,层流态采样管内PM_{2.5}数浓度输送效率随采样流量增大而升高,除流量为1.0 L·min⁻¹外,其余流量条件下输送效率均在97%以上,且当流量大于10.0 L·min⁻¹时输送效率高于99%,符合文献[21]要求。图2中仅有流量16.7 L·min⁻¹、管径4 mm,流量20.0 L·min⁻¹、管径4 mm和流量20.0 L·min⁻¹、管径6 mm 3组管路条件下管内流态处于湍流。其中,流量16.7 L·min⁻¹、管径4 mm和流量20.0 L·min⁻¹、管径4 mm管路内PM_{2.5}数浓度输送效率分别为96.60%和96.52%,不仅低于同流量下层流态管路内PM_{2.5}输送效率(>99%),同时超出文献[21]要

求。流态对于PM_{2.5}质量浓度输送效率的影响程度与数浓度有所不同。层流态管路内PM_{2.5}质量浓度输送情况受管径及流量变化影响小,输送效率均高于99%,但湍流态下输送效率受管径影响大,采样管内流量为20.0 L·min⁻¹时,管径由6 mm降至4 mm,PM_{2.5}质量浓度输送效率由99.14%降至89.59%,不仅高于文献[21]要求,而且低于同流量下管内为层流态时PM_{2.5}质量浓度输送效率。

图2中流量20.0 L·min⁻¹、管径4 mm管路内PM_{2.5}数浓度和质量浓度输送效率均为最低值,且质量浓度输送效率低于90%,因此对该管路条件下颗粒物在各沉降机制下的输送效率变化情况进一步展开分析(图3)。由图3可知,重力沉降下颗粒物输送效率为100%,扩散沉降主要影响粒径 $d_p < 0.01 \mu\text{m}$ 颗粒物,湍流惯性沉降主要影响粒径 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 颗粒物。由于全程输送效率为各机制下输送效率之积,因此扩散沉降和湍流惯性沉降为影响颗粒物沉降的主要机制。PM_{2.5}中 $d_p < 0.01 \mu\text{m}$ 颗粒物数浓度占比为6.73%,质量浓度占比低于0.001%,而 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 颗粒物数浓度占比为0.16%,质量浓度占比为49.39%,故 $d_p < 0.01 \mu\text{m}$ 颗粒物对数浓度输送情况影响大,而 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 颗粒物对质量浓度输送情况影响大。根据两种机制所影响颗粒物粒径范围可知,数浓度输送效率主要受扩散沉降机制影响,质量浓度输送效率则主要受湍流惯性沉降机制影响。由此可见,流量20.0 L·min⁻¹、管径4 mm管路内PM_{2.5}质量浓度输送效率低主要是管内流态为湍流所导致。因此,层流态较湍流态更有利于采样管内PM_{2.5}输送。

对层流态竖直采样管进一步分析可知,该方向采样管内颗粒物重力沉降比例为0,仅有扩散沉降

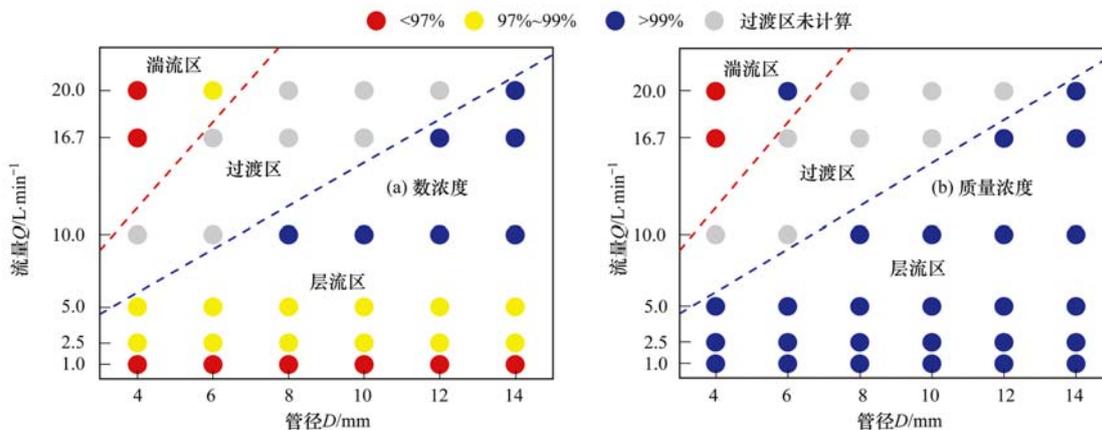


图2 流态对竖直管路(L=1 m)PM_{2.5}输送效率的影响

Fig. 2 Impact of flow type on PM_{2.5} transport efficiency in vertical tube (L=1 m)

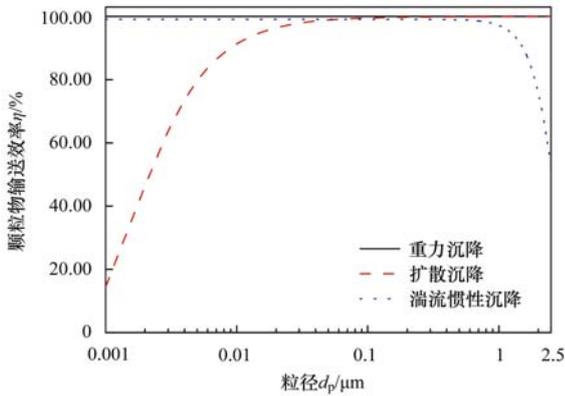


图3 $Q=20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L=1.0\text{ m}$, $D=4\text{ mm}$ 条件下垂直管路颗粒物输送效率

Fig. 3 Transport efficiency of particulate matter in vertical tube ($Q=20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L=1.0\text{ m}$ and $D=4\text{ mm}$)

作用于颗粒物,由文献[16,17]中扩散沉降机制计算公式可知,受扩散沉降作用导致的颗粒物损失量大小与管径无关,因此同一流量条件不同管径采样管内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度沉降比例相同. 由图3分析结果可知,扩散沉降主要作用于粒径小于 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒物, $\text{PM}_{2.5}$ 中此范围内颗粒物数浓度占比(6.73%)远高于质量浓度占比(低于 0.001%),因此层流态下垂直管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率随管径及流量变化的程度大于质量浓度. 颗粒物在输送过程中不可避免发生损失,但可通过优化管路参数包括摆放角度、长度等尽量降低各沉降机制对颗粒物的影响. 采样管垂直摆放可最大限度降低重力沉降机制的影响,从而通过减少沉降机制数量的方式达到降低 $\text{PM}_{2.5}$ 全程输送损失的目的,且对于层流态采样管路而言,管径可选范围大.

综合分析图2和图3可知,与湍流态相比,采样管内流态为层流时, $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效

率均易达到文献[21]中的要求. 以文献[21]中 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率推荐值为下限即采样管内 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率应大于或等于 97% ,对于流量为 2.5 、 5.0 和 $10.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 仪器的垂直采样管,管径为 $4\sim 14\text{ mm}$ 均符合要求;流量为 $16.7\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 仪器建议选择管径大于 12 mm 的垂直采样管;流量为 $1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 且与颗粒物数浓度性质相关的监测仪器,即使采样管内处于层流态 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率仍低于 97% ,实际应用中此类仪器应对采样管路进行调整或校准.

2.2 管长及倾角对细颗粒物输送效率的影响

常见 $\text{PM}_{2.5}$ 采样体系中采样管连接采样口与仪器进样口主要有两种方式:①单一连接,即不涉及弯管颗粒物由垂直管路直接输送至仪器;②组合连接,即颗粒物经过由弯管连接的多段管路输送至仪器,一般为垂直管路、弧度为 90° 弯管与水平管路组合. 基于管径部分分析结果,选取表1中处于层流条件的流量和管径组合分别对垂直管路及水平管路管长对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响进行分析.

图4为管长 $0.5\sim 10.0\text{ m}$ 垂直采样管内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效率变化情况. 从中可知, $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率随管长增加而降低,且降低程度随流量降低而增大. 流量为 $20.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,管长由 0.5 m 增加至 10.0 m , $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率仅降低 1.96% ,且各长度下输送效率均高于 97% ,符合文献[21]要求;流量为 $1\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,随管长增加 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率降低比例增至 11.37% ,且仅有管长为 0.50 m 时输送效率高于 97% . $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率变化趋势与数浓度相似,输送效率随管长增加而降低,但降低幅度存在显著差异, $0.5\sim 10.0\text{ m}$ 管路内6组流量(1.0 、 2.5 、 5.0 、 10.0 、

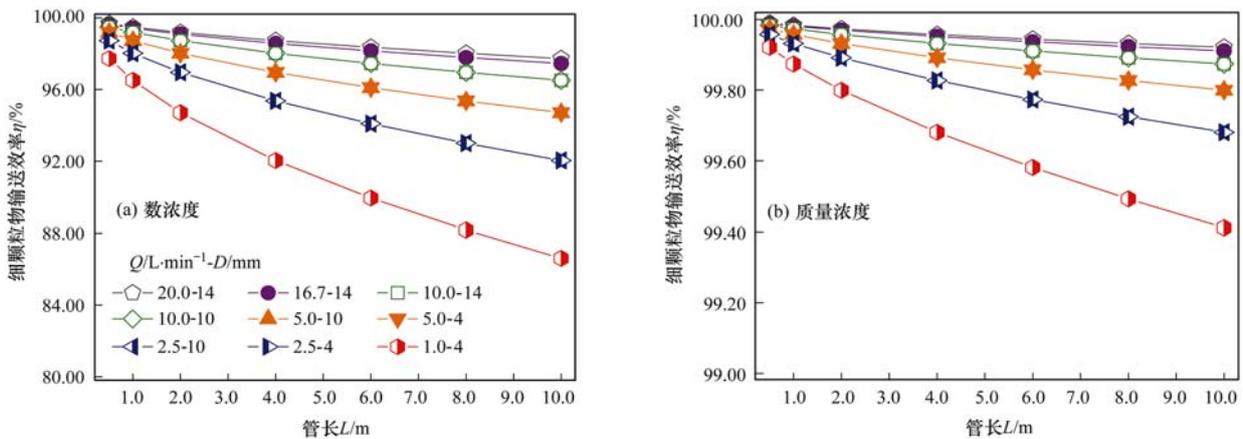


图4 垂直管路管长对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响

Fig. 4 Impact of vertical tube length on $\text{PM}_{2.5}$ transport efficiency

16.7、20.0 L·min⁻¹)条件下 PM_{2.5}质量浓度输送效率均高于99%,随管长增加输送效率降低比例低于0.1%。由此可见,竖直采样管的管路长短主要影响PM_{2.5}数浓度输送效率。

上述计算结果中,流量 1.0 L·min⁻¹、管径 4 mm、管长 10.0 m 管路条件下 PM_{2.5}数浓度输送效率最低。对该条件下颗粒物输送效率变化情况进一步分析(图 5)可知,竖直管路内导致颗粒物损失的机制为扩散沉降,主要影响粒径 $d_p < 0.1 \mu\text{m}$ 颗粒物,此范围内颗粒物数浓度占 PM_{2.5} 整体的 71.99%,质量浓度则占 PM_{2.5} 整体的 0.89%,故数浓度输送效率受管长影响的程度高于质量浓度,且扩散沉降量随流量降低呈指数增加。因此,仪器流量越小,PM_{2.5}数浓度输送效率随竖直管路管长增加而降低的趋势越明显。

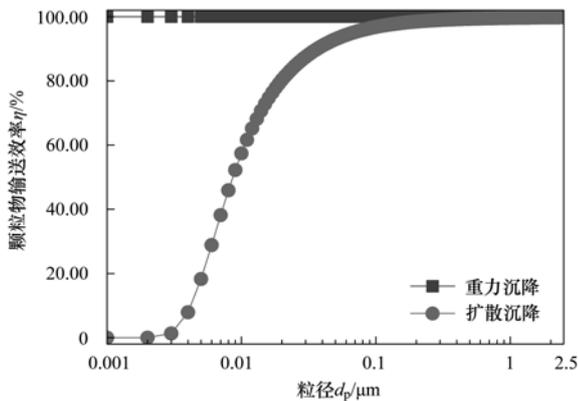
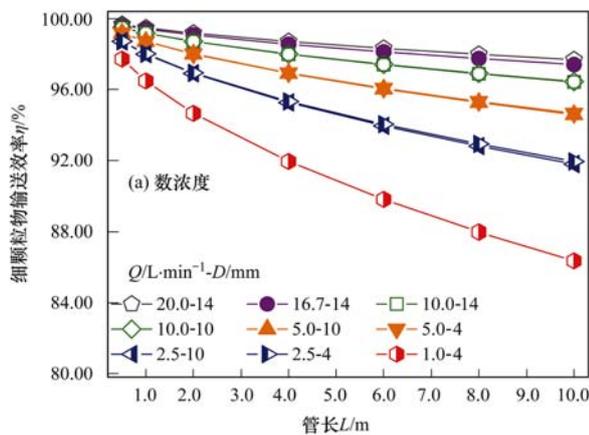


图 5 $Q=1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L=10.0 \text{ m}$, $D=4 \text{ mm}$ 条件下竖直管路颗粒物输送效率

Fig. 5 Transport efficiency of particulate matter in vertical tube ($Q=1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L=10.0 \text{ m}$ and $D=4 \text{ mm}$)

图 6 为管长 0.5 ~ 10.0 m 水平采样管内 PM_{2.5}数浓度和质量浓度输送效率变化情况。从中可知,



水平管路内 PM_{2.5}数浓度输送效率随管长增加而降低,整体变化趋势与竖直管路(图 4)基本相同,即流量越小 PM_{2.5}输送效率随管长降低的程度越显著。同一流量、管径及管长条件下水平管路内 PM_{2.5}数浓度输送效率均略低于竖直管路,降低量在 0.31% 以内,这一现象说明改变管路方向为水平或竖直对 PM_{2.5}数浓度输送效率影响较小。对于 PM_{2.5}质量浓度,同一流量条件下输送效率随管长增加而降低,降低程度受流量与管径共同影响,流量与管径比值越小降低程度越显著。流量 20.0 L·min⁻¹、管径 14 mm 管路条件下 Q/D 值最大,管长由 0.5 m 增加至 10.0 m 时,PM_{2.5}质量浓度输送效率降低 2.33%; 流量 1.0 L·min⁻¹、管径 4 mm 管路条件下 Q/D 值最小,质量浓度输送效率降低高达 12.59%。从应用角度来说,管路 Q/D 值越大,质量浓度输送效率随管长增加而降低的比例越小,越有利于灵活改变管路设计方案。

与竖直管路计算结果一致,流量 1.0 L·min⁻¹、管径 4 mm、管长 10.0 m 管路条件下 PM_{2.5}输送效率最低,对此条件下颗粒物输送效率变化情况进一步分析(图 7)可知, $d_p < 0.1 \mu\text{m}$ 和 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 为颗粒物主要损失区域,依据前述此范围内颗粒物质量浓度和数浓度在 PM_{2.5}占比情况, $d_p < 0.1 \mu\text{m}$ 主要影响数浓度输送效率, $d_p > 1 \mu\text{m}$ 主要影响质量浓度输送效率。其中, $d_p > 1 \mu\text{m}$ 范围内颗粒物发生损失由重力沉降导致,依据文献[15]中重力沉降计算公式,颗粒物输送效率与 Q/D 值呈正相关,因此质量浓度输送效率随管长增加的降低程度与管径和流量有关。

竖直管路与水平管路内颗粒物受扩散沉降影响程度相同,唯一区别在于重力沉降仅影响水平管路

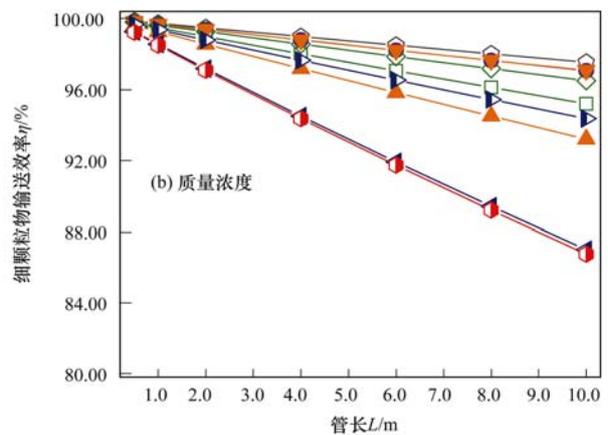


图 6 水平管路管长对 PM_{2.5}输送效率的影响

Fig. 6 Impact of horizontal tube length on PM_{2.5} transport efficiency

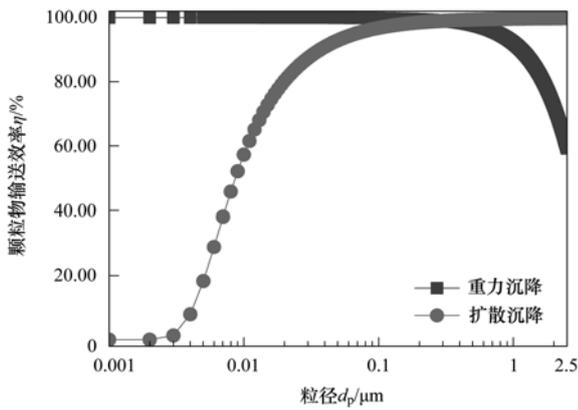


图7 $Q=1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L=10.0 \text{ m}$, $D=4 \text{ mm}$ 条件下水平管路颗粒物输送效率

Fig. 7 Transport efficiency of particulate matter in horizontal tube ($Q=1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, $L=10.0 \text{ m}$ and $D=4 \text{ mm}$)

内颗粒物输送。对比垂直管路(图5)和水平管路(图7)内颗粒物输送效率可知,水平管路较垂直管路增加 $d_p > 1 \mu\text{m}$ 这一损失范围,该范围颗粒物质量占比大,因此水平管路内质量浓度输送效率明显低于垂直管路;另一损失区域 $d_p < 0.1 \mu\text{m}$ 主要受扩散沉降影响,扩散沉降机制与管路倾角无关,且该区域颗粒物数浓度占比大,因此垂直管路和水平管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率基本相同。

整体来说,同一流量、管径条件下垂直管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率高于水平管路,减小管长可以提高 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率。若以文献[21]中所要求颗粒物输送效率应在 97% 及以上为限,与 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度有关的采样仪器,无论是垂直管路还是水平管路,流量为 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $16.7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,管长范围为 $0.5 \sim 10.0 \text{ m}$ 时均符合要求;流量为 2.5 、 5.0 和 $10.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,建议管长不超过 6.0 m ; 流量为 $1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,管长应不超过 0.5 m 。与质量浓度有关

的采样仪器,若采用垂直管路,管长范围为 $0.5 \sim 10.0 \text{ m}$ 时均符合要求,若采用水平管路,则应根据 Q/D 值大小来选择,当 $Q/D > 1.0$ 时,管长范围为 $0.5 \sim 10.0 \text{ m}$ 均符合要求; $0.5 < Q/D < 1.0$ 时,建议管长不超过 5.0 m ; $Q/D < 0.5$ 时,建议管长不超过 2.0 m 。

2.3 弯管对细颗粒物输送效率的影响

弯管一般用于连接两段不同方向的采样管路,在 $\text{PM}_{2.5}$ 采样体系中一般采用弧度为 90° 的弯管连接水平采样管段和垂直采样管段。弯管处气流方向发生改变,由于惯性作用,颗粒物会在弯管处发生沉积。图8为层流态弯管内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效率随弯管数目变化情况。从中可知,弯管内为层流时, $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率和质量浓度输送效率在不同流量及管径条件下均在 99% 以上,且随弯管数目增加输送效率降低比例低于 1%。图9为湍流态弯管内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度和质量浓度输送效率变化情况。从中可知,湍流态弯管内 $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率均在 99% 以上,符合文献[21]要求。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率变化情况则与数浓度存在明显差异,流量 $16.7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 、流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 、流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 6 mm 这 3 组条件下弯管内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率均在 97% 以下,其中流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 、流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 6 mm 弯管内输送效率分别为 85.21% 和 87.33%,且随着弯管数目增加,输送效率显著降低,弯管数为 4 时,流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 弯管内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率低至 55%。

流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm 弯管内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率最低,但数浓度输送效率高达 99%,因此对该条件下弯管内颗粒物输送效率变化情况进一步展开分析(图10)。由图10可知,颗粒

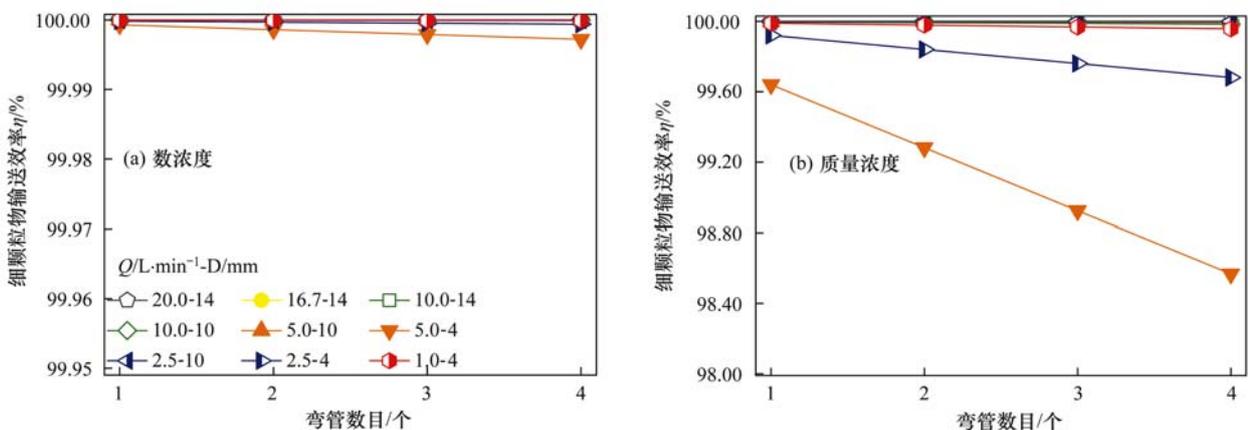
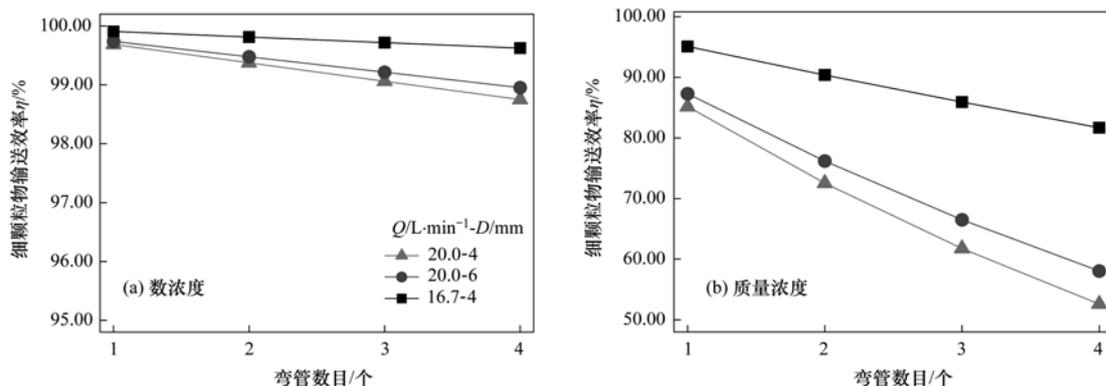
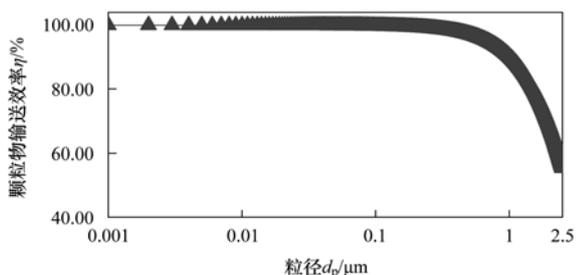


图8 层流态条件下弯管对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响

Fig. 8 Impact of bend in laminar flow on $\text{PM}_{2.5}$ transport efficiency

图 9 湍流态条件下弯管对 $PM_{2.5}$ 输送效率的影响Fig. 9 Impact of bend in turbulent flow on $PM_{2.5}$ transport efficiency

物损失主要集中于 $d_p > 0.3 \mu\text{m}$ 范围,该粒径范围内颗粒物质量浓度占比为 87.30%,数量浓度占比为 4.15%,因此弯管湍流惯性沉降机制主要影响颗粒物质量浓度输送,导致湍流态弯管内 $PM_{2.5}$ 质量浓度损失明显,但数浓度基本无变化。

图 10 $Q = 20.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, $D = 4 \text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$ 条件下弯管颗粒物输送效率Fig. 10 Transport efficiency of particulate matter at bend of tube ($Q = 20.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, $D = 4 \text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$)

尽管从数值分析角度考虑,弯管仅对湍流状态下 $PM_{2.5}$ 质量浓度输送效率有较大影响,其余情况下输送效率可高于 97%。但 Von 等^[22] 发现弯管处 $PM_{2.5}$ 损失量计算结果小于实际测量结果,这一偏差可能是由于在弯管内颗粒物流态不仅由雷诺数决定,还与弯管形状例如曲率半径等因素有关。此外,颗粒物全程输送效率为弯管输送效率与其他管段输送效率之积,增设弯管不可避免会降低整体输送效率。基于以上分析,为提高采样管路内 $PM_{2.5}$ 输送效率,在管路内流态为湍流时,应尽量减少弯管的使用数量。

2.4 其他影响因素

颗粒物在采样管路内输送,除受重力沉降、扩散沉降等主要机制影响外,还会发生静电沉降和热迁移沉降。静电沉降是由于带电颗粒物在采样管内

受库仑力或镜像力作用而发生沉降,由于采样管路内电场分布情况无法估计,因此较难对静电沉降损失进行定量计算。目前,颗粒物静电沉降的研究主要针对单极荷电颗粒物,如 Liu 等^[26,27] 发现 $0.03 \mu\text{m}$ 氯化钠气溶胶荷电量为 1 时,在流量 $1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、管长 3.0 m、管径 7.94 mm 聚氯乙烯材质管路内静电输送效率低至 88%,当采用导电采样管如铜管、不锈钢管时可以降低静电沉降影响。若采用绝缘管路输送单极荷电粒子,其静电沉降量可能高于其他沉降机制。尽管大气颗粒物带电量较低,电荷分布总体处于玻尔兹曼平衡状态,但仍应在实际采样体系中通过采用导电材质管路,尽量降低静电损失。热迁移沉降是由于采样管路内存在温度梯度,例如采样管管壁温度低于管内温度,导致颗粒物由高温处向低温处移动产生沉降^[28,29]。Von 等^[22] 研究表明,对于大气颗粒物采样,采样管管壁与管内温度差在 40°C 以内时,热迁移损失量可忽略不计。此外,当采样管管路突然收缩或扩张时,颗粒物也会由于惯性作用产生沉降,但考虑到 $PM_{2.5}$ 输送管路一般不会涉及此情况且相关计算公式适用范围过窄,因此本研究未对此进行分析。

3 结论

(1) 管径选取应以保证管内气流处于层流流态为原则。与湍流态相比,采样管内流态为层流时易满足 HJ 653-2013 中 $PM_{2.5}$ 输送效率应大于或等于 97% 的要求。仪器流量为 $20.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 且采样管内为层流时, $PM_{2.5}$ 输送效率高于 99%, 而湍流时低至 90%。对于流量为 2.5、5.0 和 $10.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 仪器的竖直采样管路,管径为 4 ~ 14 mm 时均符合 HJ 653-2013 要求; $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $20.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 仪器建议

选择管径大于 12 mm 的竖直采样管; 流量为 $1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 且与颗粒物数浓度性质相关的监测仪器, 即使采样管内处于层流流态, $\text{PM}_{2.5}$ 数浓度输送效率仍低于 97%, 实际应用中此类仪器应对采样管路进行调整或校准。

(2) 管长对 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率的影响程度与监测仪器类别和管路摆放倾角有关。同一流量、管径条件下竖直管路内 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率高于水平管路, 减小管长可以提高 $\text{PM}_{2.5}$ 输送效率。与数浓度有关的采样仪器, 无论是竖直管路还是水平管路, 流量为 $1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 建议选择管长不超过 0.5 m 的采样管; 流量为 2.5、5.0 和 $10.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 建议选择管长不超过 6.0 m 的采样管; 流量为 $16.7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 管长为 0.5 ~ 10.0 m 时均符合 HJ 653-2013 要求。与质量浓度有关的采样仪器, 若采用竖直管路, 管长为 0.5 ~ 10.0 m 时均符合 HJ 653-2013 要求; 若采用水平管路, 则应根据 Q/D 值大小来选择, 当 $Q/D > 1.0$ 时, 管长为 0.5 ~ 10.0 m 时均符合要求; $0.5 < Q/D < 1.0$ 时, 管长应不超过 5.0 m; $Q/D < 0.5$ 时, 管长应不超过 2.0 m。

(3) 弯管内气流为湍流态时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率较低。弯管弧度为 90° 时, 流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 4 mm, 流量 $20.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、管径 6 mm 的湍流态弯管处, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度输送效率分别为 85.21% 和 87.33%。从提高 $\text{PM}_{2.5}$ 全程输送效率的角度考虑, 管路内为湍流时, 建议减少弯管的使用数量。

参考文献:

- [1] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change (2nd ed.) [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. 350-393.
- [2] Szopa S, Balkanski Y, Schulz M, *et al.* Aerosol and ozone changes as forcing for climate evolution between 1850 and 2100 [J]. *Climate Dynamics*, 2013, **40**(9-10): 2223-2250.
- [3] Kan H D, Chen R J, Tong S L. Ambient air pollution, climate change, and population health in China [J]. *Environment International*, 2012, **42**: 10-19.
- [4] Madrigano J, Kloog I, Goldberg R, *et al.* Long-term exposure to $\text{PM}_{2.5}$ and incidence of acute myocardial infarction [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, **121**(2): 192-196.
- [5] Cheng Z, Luo L N, Wang S X, *et al.* Status and characteristics of ambient $\text{PM}_{2.5}$ pollution in global megacities [J]. *Environment International*, 2016, **89-90**: 212-221.
- [6] Kulkarni P S, Baron P A, Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications (3rd ed.) [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 69-103.
- [7] Sioutas C. Evaluation of the measurement performance of the scanning mobility particle sizer and aerodynamic particle sizer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1999, **30**(1): 84-92.
- [8] Charron A, Harrison R M, Moorcroft S, *et al.* Quantitative interpretation of divergence between PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ mass measurement by TEOM and gravimetric (Partisol) instruments [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(3): 415-423.
- [9] Maricq M M, Podsiadlik D H, Chase R E. Size distributions of motor vehicle exhaust PM: a comparison between ELPI and SMPS measurements [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000, **33**(3): 239-260.
- [10] 程萌田, 潘月鹏, 王辉, 等. 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子在线观测技术的应用研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2943-2949.
Cheng M T, Pan Y P, Wang H, *et al.* On-line measurement of water-soluble composition of particulate matter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 2943-2949.
- [11] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Formation mechanism of a serious pollution event in January 2013 in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [12] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013 ~ 2014 年北京大气重污染特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 27-35.
Li L J, Wang Z S, Zhang D W, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013 ~ 2014 [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 27-35.
- [13] Chang K N, Chen Y K, Huang S H, *et al.* Penetration of charged particles through metallic tubes [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2012, **48**: 10-17.
- [14] Kumar P, Fennell P, Symonds J, *et al.* Treatment of losses of ultrafine aerosol particles in long sampling tubes during ambient measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(38): 8819-8826.
- [15] Heyder J, Gebhart J. Gravitational deposition of particles from laminar aerosol flow through inclined circular tubes [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1977, **8**(4): 289-295.
- [16] Schwendiman L C, Stegen G E, Glissmeyer J A. Report BNWL-SA-5138 [R]. Richland: Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1975. 1-5.
- [17] Gormley P G, Kennedy M. Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube [A]. In: *Proceedings of the Royal Irish Academy. Section A: Mathematical and Physical Sciences* [C]. Dublin: Royal Irish Academy, 1949. 163-169.
- [18] Lee K W, Gieseke J A. Deposition of particles in turbulent pipe flows [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1994, **25**(4): 699-709.
- [19] Pui D Y H, Romay-Novas F, Liu B Y H. Experimental study of particle deposition in bends of circular cross section [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1987, **7**(3): 301-315.
- [20] 何启梅, 王启燕, 高鸿恩, 等. 气溶胶在采样管中的沉积特性研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(6): 119-121, 140.
He Q M, Wang Q Y, Gao H E, *et al.* Deposition of aerosol particles in sampling pipe [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(6): 119-121, 140.
- [21] HJ 653-2013, 环境空气颗粒物 (PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$) 连续自动监测系统技术要求及检测方法 [S].
- [22] Von Der Weiden S L, Drewnick F, Borrmann S. Particle loss calculator-a new software tool for the assessment of the performance of aerosol inlet systems [J]. *Atmospheric*

- Measurement Techniques, 2009, 2(2): 479-494.
- [23] 卢正永, 张志龙, 李爱武, 等. 气溶胶取样管道粒子损失的计算软件[A]. 见: 中国核学会辐射防护学会、中国环境学会核安全与辐射环境专业委员会. 全国放射性流出物和环境监测与评价研讨会论文汇编[C]. 杭州: 中国核学会辐射防护学会、中国环境学会核安全与辐射环境专业委员会, 2003. 261-270.
- [24] Hobbs P V. Aerosol-cloud-climate interactions[M]. San Diego: Academic Press, 1993. 1-31.
- [25] HJ 655-2013, 环境空气颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5})连续自动监测系统安装和验收技术规范[S].
- [26] Liu B Y, Pui D Y H, Rubow K L, *et al.* Electrostatic effects in aerosol sampling and filtration [J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 1985, 29(2): 251-269.
- [27] Liu B Y H, Pui D Y H. Electrical neutralization of aerosols[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1974, 5(5): 465-472.
- [28] Romay F J, Takagaki S S, Pui D Y H, *et al.* Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent pipe flow[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, 29(8): 943-959.
- [29] Montassier N, Boulaud D, Renoux A. Experimental study of thermophoretic particle deposition in laminar tube flow [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1991, 22(5): 677-687.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjcx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@reecs.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

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 Fluvo-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 MSW 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