

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

京津冀区域重污染期间 $PM_{2.5}$ 垂直分布及输送

肖致美¹, 徐虹¹, 李鹏¹, 唐邈¹, 陈魁^{1*}, 杨宁¹, 郑乃源¹, 杨文², 邓小文^{1*}

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 2016年12月17~19日重污染期间, 在天津市武清区高村开展车载系留气球颗粒物浓度垂直观测, 并以观测数据为基础, 计算了区域内 $PM_{2.5}$ 传输通量。结果表明重污染过程期间, 大气混合层较低, 约200 m左右, $PM_{2.5}$ 浓度垂直分布特征与混合层高度密切相关, 混合层以下, $PM_{2.5}$ 浓度较高, 垂直变化特征不显著, 形成明显的污染层, 混合层以上, $PM_{2.5}$ 浓度迅速降低并维持在降低水平。观测期间, 粒径小于1.0 μm 颗粒物浓度较高, 粒径大于2.2 μm 颗粒物浓度较低, 近地层粒径为0.777 μm 颗粒物浓度最高。颗粒物浓度粒径谱分布与相对湿度和混合层高度相关, 高湿度和低混合层下颗粒物浓度粒径谱分布较宽泛。观测期间, $PM_{2.5}$ 在西南方向上的传输通量最高, 占总传输通量的63.3%, 其中46~156 m和156~296 m高度之间 $PM_{2.5}$ 传输通量最高。近地面300 m内 $PM_{2.5}$ 传输主要以西南方向传输为主, 300 m以上传输方向较分散。

关键词: 京津冀; 重污染; $PM_{2.5}$; 垂直分布; 输送

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4303-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903111

Vertical Distribution and Transport of $PM_{2.5}$ During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region

XIAO Zhi-mei¹, XU Hong¹, LI Peng¹, TANG Miao¹, CHEN Kui^{1*}, YANG Ning¹, ZHENG Nai-yuan¹, YANG Wen², DENG Xiao-wen^{1*}

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on vehicle-borne tethered balloon measurements, the vertical distribution of particulate matter (PM) concentrations were observed in Gaocun in the Wuqing District of Tianjin from December 17 to 19, 2016, during a period of heavy pollution. Using observational data, the transport flux of $PM_{2.5}$ in the Jing-Jin-Ji region was calculated. The results showed that the mixed layer was low at only 200 m during the heavy pollution period. The vertical distribution of $PM_{2.5}$ concentrations was closely associated with the heights of mixed layer whereby, below the mixed layer, $PM_{2.5}$ concentrations were higher. Vertical variation was insignificant, forming a district pollution layer. Above the mixed layer, $PM_{2.5}$ concentrations rapidly decreased and stabilized at low levels. During the observation period, higher concentrations of PM were found with particle sizes of less than 1.0 μm , and lower concentrations were observed for particle sizes larger than 2.2 μm . The size profiles of PM tallied with relative humidity and the height of the mixed layer. The size distribution was wider during periods of high humidity and with a lower mixed layer height. The greatest $PM_{2.5}$ transport flux was from the southwest, accounting for 63.3% of the total flux; the highest fluxes occurred at the heights of 46-156 m and 156-296 m. The dominant transport direction was southwest below 300 m, while the dominant transport direction was dispersed over 300 m.

Key words: Jing-Jin-Ji Region; heavy pollution; $PM_{2.5}$; vertical distribution; transport flux

颗粒物是影响中国城市环境空气质量的首要污染物^[1], 颗粒物在大气中的行为和环境效应不仅与颗粒物的水平浓度有关^[2~4], 还与颗粒物垂直分布密切相关^[5~9], 并且表现出明显的区域分布特征^[10~13]。目前颗粒物的垂直分布的观测主要依托城市高层建筑物^[14~16]、气象塔^[17~19]、气球设备^[20~24]、飞机^[25~30]和雷达^[31~33]等进行, 研究高度从几十 m 至1 000 m以上; 颗粒物的相互影响方面, 主要应用空气质量数值模型开展跨区域传输影响研究^[34~38], 缺少以实际观测数据为基础的传输通量核算。京津冀区域是我国大气污染防治的重点区域之一, 近年来, 以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的区域重污染天气频发, 引发社会强烈关注, 研究京津冀区域重污染期间 $PM_{2.5}$ 垂直分布及相互影

响, 不仅可以为城市重污染应急方案的制定提供科学依据, 还可为京津冀区域大气污染联防联控提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 观测场地

观测场地选择在天津市武清区高村(39.647°N, 116.888°E), 位于天津市西北偏中区域, 与北京市通州区及河北省廊坊市相邻(图

收稿日期: 2019-03-13; 修订日期: 2019-04-18

基金项目: 天津市科技计划项目(18ZXSZSF00160); 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B01); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208500)

作者简介: 肖致美(1972~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: xiaozhimei01@163.com

* 通信作者, E-mail: kuichen@126.com; dxwpp@163.com

1), 是连接天津市、北京市和河北省的枢纽, 观测场地周边为农田及绿地, 无大型烟囱, 5 km 范围内无工业污染源, 为理想的京津冀区域传输观测场地.

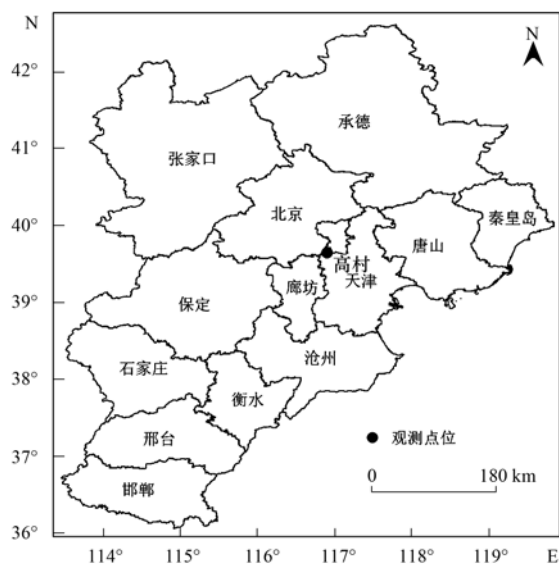


图1 观测点位示意

Fig. 1 Location of the observation station

1.2 观测仪器及观测时间

本研究使用中国电子科技集团公司第三十八研究所车载系留气球开展垂直观测. 根据搭载仪器设备的外形尺寸、采样要求和供电要求等设计系留气球挂件, 观测仪器搭载在系留气球挂件上, 搭载仪器安装震动和缓冲层, 防止仪器因空中气流而震动过于激烈. 本研究在系留气球挂件搭载颗粒物观测仪器为 APS-3321 监测仪; 采用激光云高仪 (芬兰 Vaisala CL31) 观测混合层高度, Vaisala CL31 激光云高仪采用脉冲二级管激光雷达技术, 垂直或倾斜向大气发射短而集中的激光脉冲, 脉冲经过云、降水或其他目标如气溶胶的散射后采集, 混合高度是根据后散射廓线, 基于梯度方法计算得到的, 梯度方法挑选出后散射系数负梯度的最大值作为混合层层顶; 地面环境空气质量数据来自武清区环境空气质量监测数据; 气象数据来自天津市武清区观测站 (台站编号: 54523), 观测时间为 2016 年 12 月 17、18 和 19 日.

1.3 质量控制

仪器使用前使用质量流量计对其流量进行校准, 为保证仪器升空和下降过程的稳定性, 升空前使用压力可调环境模拟射流风洞 (中国环境科学研究院) 对 APS-3321 的流量随压力的变化进行校准, 在升压降压的过程中, APS-3321 的流量均随压力的变化而平稳变化 (图 2), 说明仪器在监测过程中状态稳定, 监测数据可信.

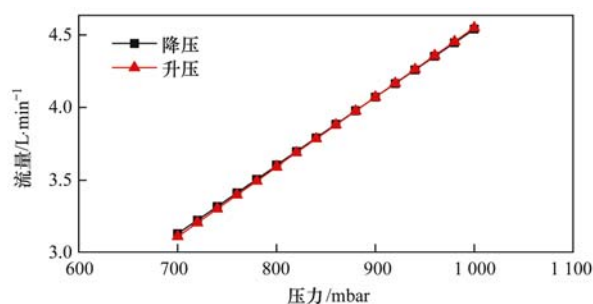


图2 APS 3321 流量-压力测试

Fig. 2 Flow-pressure test of APS 3321

2 结果与讨论

2.1 环境空气质量状况及气象因素

2016 年 12 月 16 ~ 21 日, 天津市出现连续重污染天气过程, 12 月 15 日开始, 武清区空气质量开始转差, 12 月 16 ~ 21 日出现连续重污染天气过程 (图 3), 12 月 18 ~ 19 日为严重污染天气, 环境空气质量指数 (AQI) 达 300 以上, 12 月 22 日空气质量好转, 重污染过程结束. 本次观测选择了整个污染过程中污染最为严重的 12 月 17 日、18 日和 19 日, 观测期间, 武清区天气系统较稳定, 平均相对湿度为 92%, 多数时段高达 99%, 地面平均风速为 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4), 整体以西南风为主, 最低混合层高度低于 100 m (图 5), 垂直扩散条件极差, 不利于污染物扩散.

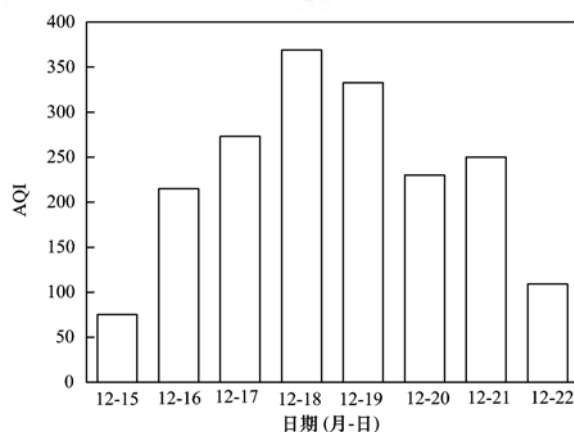


图3 2016 年 12 月 15 ~ 22 日武清区环境空气质量

Fig. 3 Ambient air quality for the Wuqing District from December 15 to 22, 2016

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直分布

观测期间, 云高仪监测结果显示: 12 月 17 ~ 18 日中午, 大气混合层分为两层结构, 12 月 18 日午后至 19 日, 大气混合层为一层结构 (图 5). 上升期间, 从垂直分布上看 (图 6), 近地层 200 m 以下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直分布均匀, 平均浓度高达 $537 \sim 543 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 200 m 以上, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直分布呈现不同特征: 12 月 17 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现明显两次降低过

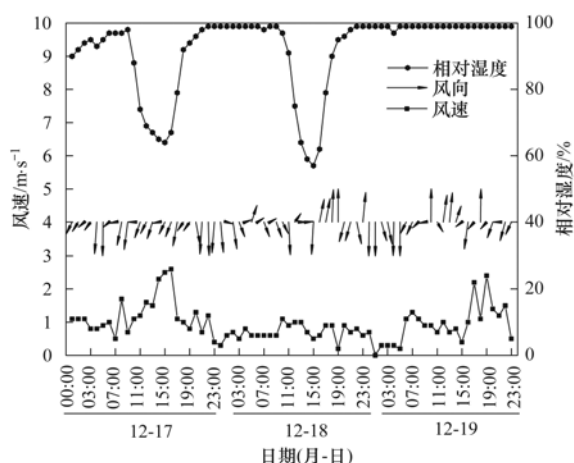


图4 观测期间武清区地面气象数据

Fig. 4 Meteorological data for the Wuqing District during the observation period

程, 在 300 ~ 400 m 左右, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度的升高而降低, 由 $530 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $320 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 高度 400 ~ 600 m, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度的升高基本保持稳定, 浓度在 $320 \sim 345 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 波动; 650 ~ 750 m, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度的升高迅速降低, 由 $345 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 800 m 以上, $\text{PM}_{2.5}$ 在 $24 \sim 15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 波动, 基本维持稳定. 12 月 18 日、19 日观测过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直分布相似, 200 ~ 400 m 高度处均出现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速降低, 400 m 以上, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低并保持基本稳定. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直分布特征与大气混合层分布密切相关, 12 月 17 日观测期间, 近地层混合层高度为 200 m 左右, 第二层大气混合层高度为 200 ~ 650 m, 对应不同的混合层高度, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现明显两次降低过程. 200 m 以内为第一层混合层高度, 400 ~ 600 m 接近第二层混合层高度, 这两种高度处 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度保持稳定; 300 ~ 400 m 第一

层和第二层混合层的连接高度, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度的升高而降低; 650 m 以上 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速降低. 12 月 18 日、19 日观测过程均出现一层混合层, 高度在 200 m 以下, 所以 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 200 ~ 400 m 高度处出现明显的降低过程, 之后保持基本稳定. 下降期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直分布与上升期间基本相似, 随着大气混合层高度发生变化, 混合层以上, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低并基本保持平稳, 进入混合层以内, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速增加并在混合层底部保持稳定.

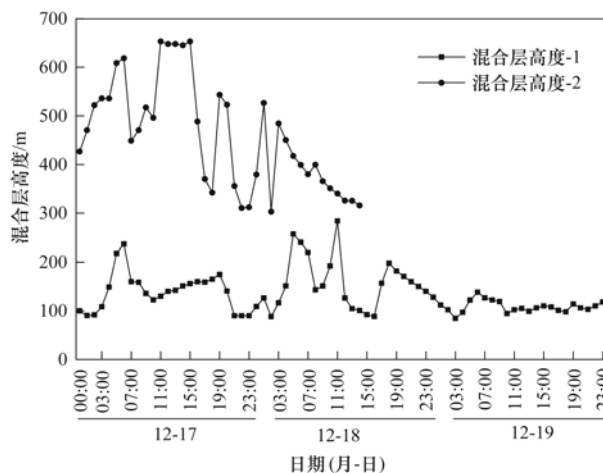


图5 观测期间混合层高度分布

Fig. 5 Vertical distribution of the mixed layer during the observation period

2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度粒径谱垂直分布

观测期间, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度粒径谱分布如图 7 所示, 粒径小于 $1.0 \mu\text{m}$ 颗粒物浓度较高, 粒径大于 $2.2 \mu\text{m}$ 颗粒物浓度较低. 从垂直分布上看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度粒径谱分布与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布相似, 与大气混合层分布相关. 12 月 17 日存在明显的分层分布, 300 m 以下, 粒径为 $0.835 \mu\text{m}$ 以下的颗粒物浓度较高,

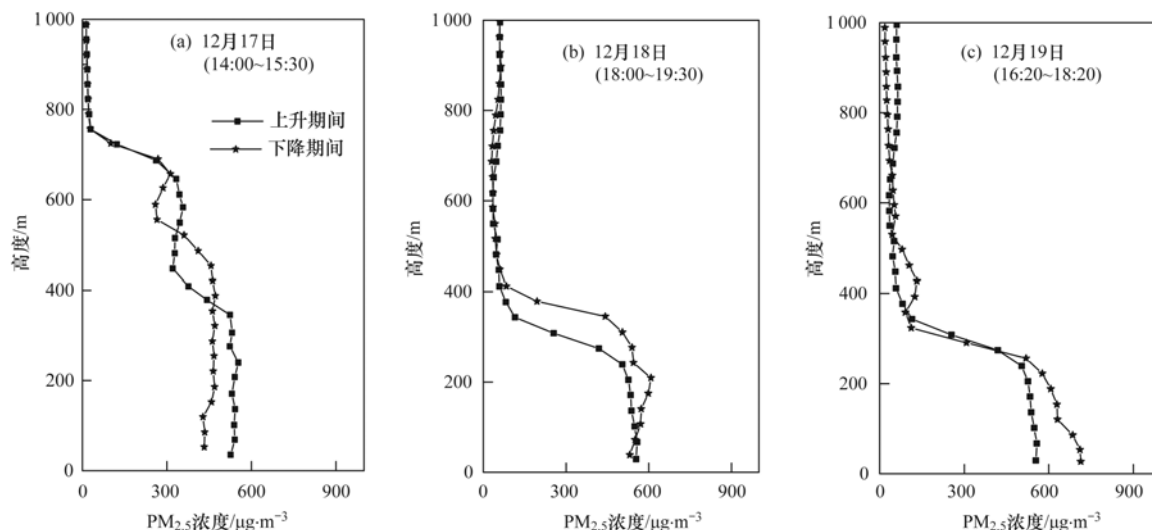
图6 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations during the observation period

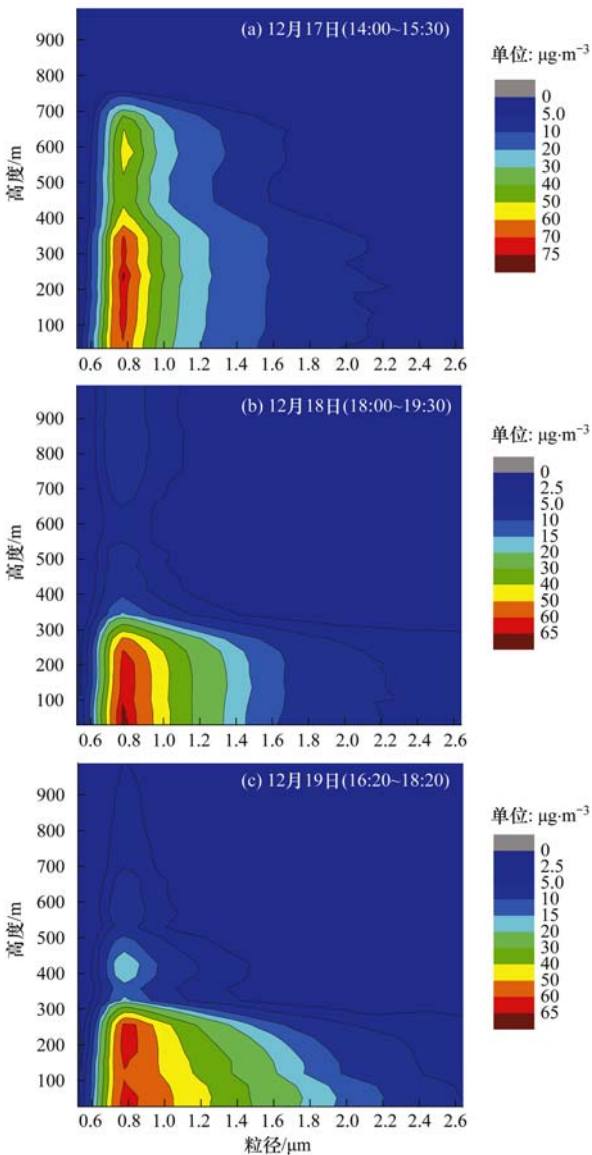


图7 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度粒径谱垂直分布
Fig. 7 Vertical distribution of the $\text{PM}_{2.5}$ size profile during the observation period

其中粒径为 $0.777\ \mu\text{m}$ 颗粒物浓度最高, 为 $72\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $600\ \text{m}$ 左右, 粒径为 $0.777\ \mu\text{m}$ 的颗粒物浓度出现第二个峰值, 为 $52\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 12月18日, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主要集中在近地层 $300\ \text{m}$ 以下, 粒径为 $0.777\ \mu\text{m}$ 颗粒物浓度在 $100\ \text{m}$ 以下最高, 达 $66\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 12月19日, 粒径为 $0.777\ \mu\text{m}$ 颗粒物浓度在 $250\ \text{m}$ 以下最高, 为 $62\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度粒径谱分布上看, 12月17日粒径谱分布较集中, 主要在 $1.2\ \mu\text{m}$ 以下; 12月18日、19日粒径谱分布较宽泛, 分别集中在 $1.4\ \mu\text{m}$ 、 $2.0\ \mu\text{m}$ 以下, 这可能与颗粒物的吸湿增长及相互碰撞有关. 12月17日观测期间, 近地层相对湿度为 65% , 12月18日、19日观测期间, 近地层相对湿度高达 99% , 小粒径颗粒物通过吸湿增长变为粒径较大的颗粒物; 同时, 与12月17日相比, 12月18日、19日观测

期间混合层高度更低, 近地层颗粒物间碰撞更为明显, 小粒径颗粒物通过碰撞变为粒径较大的颗粒物.

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 传输影响

$\text{PM}_{2.5}$ 传输通量为单位时间内通过某一垂直截面上 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量^[39], 单位为 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$, 计算公式如下:

$$S = \int_0^H LCVdz$$

式中, C 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 本研究为不同高度处 $\text{PM}_{2.5}$ 观测浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); V 为该高度边界网格内水平风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 来自 WRF 模型输出数据); L 为武清区与北京、河北的边界长度 (km), dz 为垂直高度微单元 (m). 本研究的传输通量(图8)指不同方向上通过边界向观测地区的输送量, 未考虑观测地区

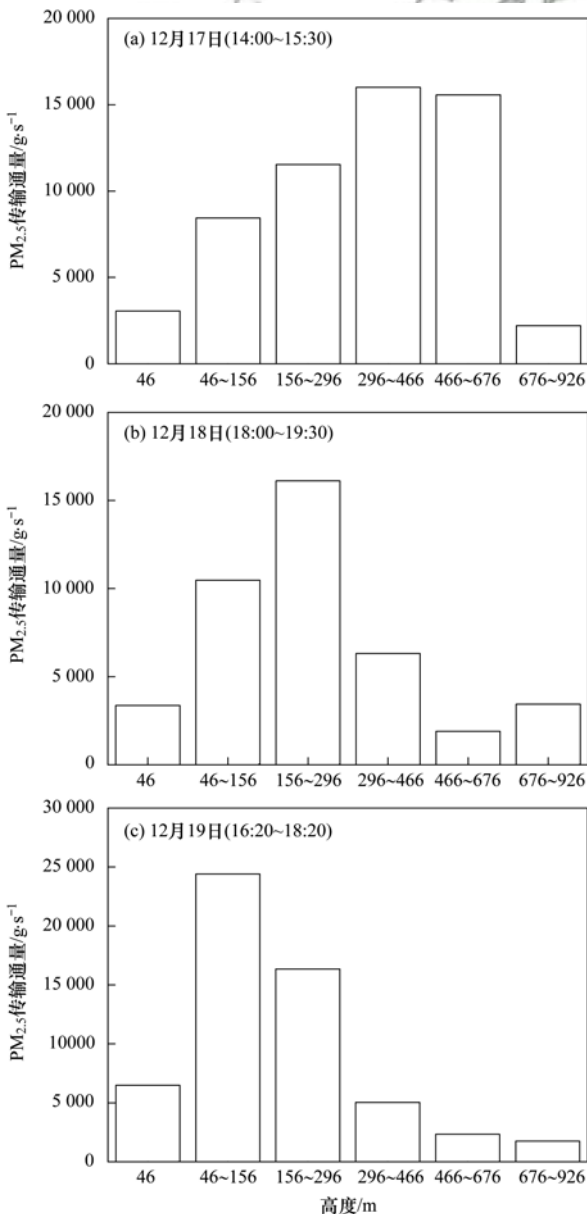


图8 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量

Fig. 8 $\text{PM}_{2.5}$ transmitted flux during the observation period

通过边界向外的输出量. 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量如图 8 所示. 从传输总量上看, 12 月 17 日 296 ~ 466 m 和 466 ~ 676 m 高度之间传输通量基本相当, 分别为 $16\,006.2\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $15\,564.6\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$; 12 月 18 日 156 ~ 296 m 高度之间传输通量最高, 为 $16\,104.7\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$; 12 月 19 日 46 ~ 156 m、156 ~ 296 m 高度处传输通量较高, 分别为 $24\,404.3\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $16\,360.0\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$.

整个观测期间, 不同方向上 $\text{PM}_{2.5}$ 传输如图 9 所示, 西南方向上传输通量最高, 为 $97\,980.1\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 占总传输量的 63.3%; 其次东北方向, 为 $40\,794.5\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 占总传输通量的 26.4%; 东南方向传输通量为 $16\,006.2\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 占总传输量的 10.3%, 重污染观测期间未发现来自西北方向上的传输.

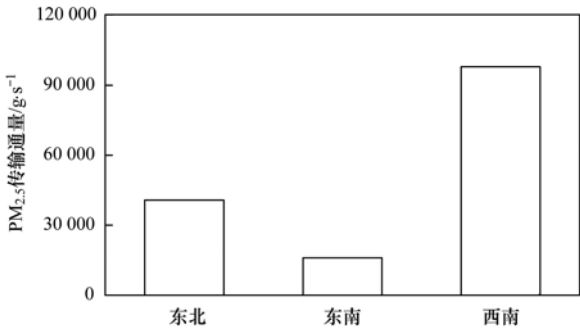


图 9 观测期间不同方向 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量

Fig. 9 $\text{PM}_{2.5}$ transmitted flux from different directions during the observation period

不同高度之间 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量存在差异 (图 10), 46 ~ 156 m 高度之间和 156 ~ 296 m 高度之间 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量最高, 分别为 $43\,318.6\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $43\,998.6\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 分别占总传输通量的 28.0% 和

28.4%; 其次是 296 ~ 466 m 和 466 ~ 676 m 高度之间, 传输通量分别为 $27\,359.1\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $19\,800.5\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 分别占总传输通量的 17.7% 和 12.8%; 地面 46 m 高度下的传输通量较低, 为 $12\,913.0\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 占总传输通量的 8.3%; 高空 676 ~ 926 m 高度处的传输通量最低, 为 $7\,391.0\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 仅占总传输通量的 4.8%.

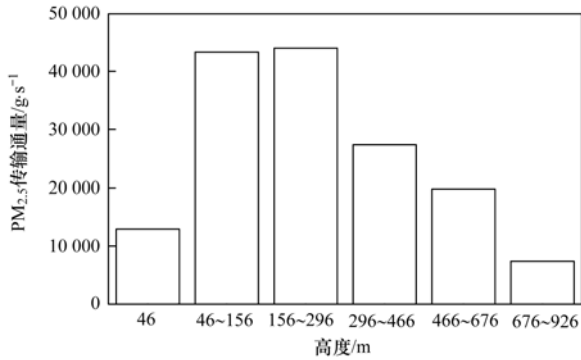


图 10 观测期间不同高度 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量

Fig. 10 $\text{PM}_{2.5}$ transmitted flux from different heights the during the observation period

从不同高度各方向 $\text{PM}_{2.5}$ 的传输通量看 (图 11), 46 m、46 ~ 156 m 和 156 ~ 296 m 高度之间 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量在西南方向上最高, 其次是东北方向; 296 ~ 466 m 高度之间东南方向上 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量最高; 466 ~ 676 m 高度之间东北方向上 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量最高; 高空 676 ~ 926 m 高度之间西南方向上 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量最高. 总之, 观测期间近地面 300 m 内 $\text{PM}_{2.5}$ 传输主要以西南方向传输为主, 约占 300 m 总传输通量的 64.8%, 300 m 以上传输方向较分散.

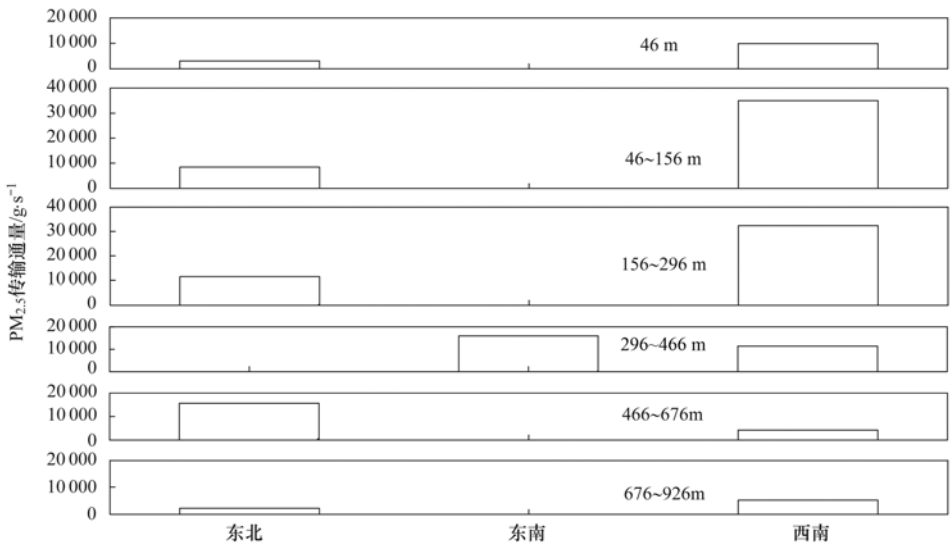


图 11 观测期间不同高度不同方向 $\text{PM}_{2.5}$ 传输通量

Fig. 11 $\text{PM}_{2.5}$ transmitted flux from different heights and directions during the observation period

3 结论

(1)重污染过程期间,大气混合层较低,约200 m左右,PM_{2.5}浓度垂直分布与混合层高度相关,混合层以下,PM_{2.5}浓度较高,垂直变化特征不显著,形成明显的污染层,混合层以上,PM_{2.5}浓度迅速降低并维持在降低水平。

(2)从颗粒物浓度粒径谱分布上看,观测期间,粒径小于1.0 μm 颗粒物浓度较高,粒径大于2.2 μm 颗粒物浓度较低,近地层粒径为0.777 μm 颗粒物浓度最高。颗粒物浓度粒径谱分布与相对湿度和混合层高度相关,高湿度和低混合层下颗粒物浓度粒径谱分布较宽泛。

(3)PM_{2.5}传输通量存在显著的风向分布特征,观测期间西南方向传输通量最高,占总传输通量的63.3%,其次是东北方向,占总传输通量的26.4%。

(4)不同高度处颗粒物传输通量存在差异,46~156 m 高度之间和156~296 m 高度之间PM_{2.5}传输通量最高,分别占总传输通量的28.0%和28.4%,其次是296~466 m 和466~676 m 高度之间,分别占总传输通量的17.7%和12.8%。

(5)不同高度颗粒物传输通量的风向分布存在差异,近地面300 m 内PM_{2.5}传输主要以西南方向传输为主,占300 m 总传输通量的64.8%,300 m 以上传输方向较分散。

参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 1990-2016 年中国环境状况公报[EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/qwjs/>? DOCTITLE = 中国环境状况公报.
- [2] Wang Y H, Liu Z R, Zhang J K, *et al.* Aerosol physicochemical properties and implications for visibility during an intense haze episode during winter in Beijing[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 3205-3215.
- [3] Yang L X, Zhou X H, Wang Z, *et al.* Airborne fine particulate pollution in Jinan, China: concentrations, chemical compositions and influence on visibility impairment [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 506-514.
- [4] Wang P, Cao J J, Shen Z X, *et al.* Spatial and seasonal variations of PM_{2.5} mass and species during 2010 in Xi'an, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **508**: 477-487.
- [5] 曹聪,王格慧,吴灿,等. 华山地区PM_{2.5}中无机离子垂直分布特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1473-1483.
Cao C, Wang G H, Wu C, *et al.* Vertical distributional characteristics of inorganic ions of PM_{2.5} at Mt. Huashan, Inland China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1473-1483.
- [6] 徐宏辉,王跃思,温天雪,等. 北京秋季大气气溶胶质量浓度的垂直分布[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(1): 2-6.
Xu H H, Wang Y S, Wen T X, *et al.* Vertical distributions of atmospheric aerosol mass concentrations in autumn, Beijing City [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(1): 2-6.
- [7] Wu H, Zhang Y F, Han S Q, *et al.* Vertical characteristics of PM_{2.5} during the heating season in Tianjin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **523**: 152-160.
- [8] Zhang Y F, Xu H, Tian Y Z, *et al.* The study on vertical variability of PM₁₀ and the possible sources on a 220 m tower, in Tianjin, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6133-6140.
- [9] Sun X, Yin Y, Sun Y W, *et al.* Seasonal and vertical variations in aerosol distribution over Shijiazhuang, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 245-252.
- [10] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4631-4644.
- [11] Li B, Zhang J, Zhao Y, *et al.* Seasonal variation of urban carbonaceous aerosols in a typical city Nanjing in Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 223-231.
- [12] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* PM_{2.5} in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [13] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} at urban and suburban areas of the Pearl River Delta region, south China-with emphasis on ship emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **574**: 1559-1570.
- [14] 郭斌,任爱玲,李良玉,等. 石家庄秋季可吸入颗粒物的垂直分布特征[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, **24**(5): 714-719.
Guo B, Ren A L, Li L Y, *et al.* The vertical distribution characteristics of respirable particles in autumn of Shijiazhuang [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2007, **24**(5): 714-719.
- [15] 穆珍珍,赵景波,徐娜,等. 西安市雁塔区冬季可吸入颗粒物时空变化研究[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(7): 1509-1516.
Mu Z Z, Zhao J B, Xu N, *et al.* Vertical and temporal variation of PM₁₀ in Yanta District, Xi'an during winter [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(7): 1509-1516.
- [16] Wu Y, Hao J M, Fu L X, *et al.* Vertical and horizontal profiles of airborne particulate matter near major roads in Macao, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(31): 4907-4918.
- [17] 丁国安,陈尊裕,高志球,等. 北京城区低层大气PM₁₀和PM_{2.5}垂直结构及其动力特征[J]. *中国科学D辑 地球科学*, 2005, **35**(S1): 31-44.
- [18] Sun Y, Song T, Tang G Q, *et al.* The vertical distribution of PM_{2.5} and boundary-layer structure during summer haze in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **74**: 413-421.
- [19] Deng X J, Li F, Li Y H, *et al.* Vertical distribution characteristics of PM in the surface layer of Guangzhou [J]. *Particuology*, 2015, **20**: 3-9.
- [20] Xu L, Shi G Y, Zhou J, *et al.* Vertical distribution of atmospheric aerosol concentration at Xianghe [J]. *China Particuology*, 2004, **2**(6): 256-260.
- [21] 石广玉,许黎,郭建东,等. 大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测[J]. *大气科学*, 1996, **20**(4): 401-407.
Shi G Y, Xu L, Guo J D, *et al.* Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1996, **20**(4): 401-407.
- [22] Greenberg J P, Guenther A B, Turnipseed A. Tethered balloon-based soundings of ozone, aerosols, and solar radiation near Mexico City during MIRAGE-MEX [J]. *Atmospheric*

- Environment, 2009, **43**(16): 2672-2677.
- [23] Maletto A, McKendry I G, Strawbridge K B. Profiles of particulate matter size distributions using a balloon-borne lightweight aerosol spectrometer in the planetary boundary layer [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(5): 661-670.
- [24] McKendry I G, Sturman A P, Vergeiner J. Vertical profiles of particulate matter size distributions during winter domestic burning in Christchurch, New Zealand [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(29): 4805-4813.
- [25] Wang W, Ma J Z, Hatakeyama S, *et al.* Aircraft measurements of vertical ultrafine particles profiles over Northern China coastal areas during dust storms in 2006 [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(22): 5715-5720.
- [26] 孙玉稳, 孙霞, 银燕, 等. 华北平原中西部地区秋季(10月)气溶胶观测研究[J]. 高原气象, 2013, **32**(5): 1308-1320.
- Sun Y W, Sun X, Yin Y, *et al.* Observation study of aerosol over Mid-Western North China Plain in autumn (October) [J]. Plateau Meteorology, 2013, **32**(5): 1308-1320.
- [27] 张瑜, 银燕, 石立新, 等. 华北地区典型污染天大气气溶胶飞机探测个例分析[J]. 高原气象, 2012, **31**(5): 1432-1438.
- Zhang Y, Yin Y, Shi L X, *et al.* An observational study of aerosol property under typical polluted weather condition [J]. Plateau Meteorology, 2012, **31**(5): 1432-1438.
- [28] 孙玉稳, 孙霞, 银燕, 等. 华北地区气溶胶数浓度和尺度分布的航测研究——以石家庄为例[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(10): 1736-1743.
- Sun Y W, Sun X, Yin Y, *et al.* Aerosol distribution in North China Plain under different weather conditions [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(10): 1736-1743.
- [29] 孙霞, 银燕, 孙玉稳, 等. 石家庄地区春季晴、霾天气气溶胶观测研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(5): 705-713.
- Sun X, Yin Y, Sun Y W, *et al.* An observational study of aerosol particles using aircraft over Shijiazhuang Area in clean and hazy days during spring [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(5): 705-713.
- [30] 范焯, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区2004年8、9月间大气气溶胶分布特征观测分析[J]. 气候与环境研究, 2007, **12**(1): 49-62.
- Fan Y, Guo X L, Fu D H, *et al.* Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas [J]. Climatic and Environmental Research, 2007, **12**(1): 49-62.
- [31] 潘鹄, 耿福海, 陈勇航, 等. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2164-2173.
- Pan H, Geng F H, Chen Y H, *et al.* Analysis of a haze event by micro-pulse light laser detection and ranging measurements in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(11): 2164-2173.
- [32] 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 等. 环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2165-2171.
- Xu T T, Qin Y, Geng F H, *et al.* Seasonal variations in the vertical distribution of aerosols during dry haze periods in regions around Shanghai [J]. Environmental Science, 2012, **33**(7): 2165-2171.
- [33] 秦艳, 章阮, 籍裴希, 等. 华北地区霾期间对流层中低层气溶胶垂直分布[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(6): 1665-1671.
- Qin Y, Zhang R, Ji P X, *et al.* Vertical distribution of aerosols in middle and low troposphere in Northern China during haze periods [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(6): 1665-1671.
- [34] Koo B, Wilson G M, Morris R E, *et al.* Comparison of source apportionment and sensitivity analysis in a particulate matter air quality model [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(17): 6669-6675.
- [35] Skyllakou K, Murphy B N, Megaritis A G, *et al.* Contributions of local and regional sources to fine PM in the megacity of Paris [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(5): 2343-2352.
- [36] Wang Y J, Li L, Chen C H, *et al.* Source apportionment of fine particulate matter during autumn haze episodes in Shanghai, China [J]. Journal of Geophysical Research, 2014, **119**(4): 1903-1914.
- [37] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国PM_{2.5}跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in China [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- [38] 刘旭艳. 京津冀PM_{2.5}区域传输模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Liu X Y. Modeling research on the regional transport of PM_{2.5} over Jing-Jin-Ji region [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [39] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Assessment of inter-city transport of particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(7): 4843-4858.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)