

环境科学

(HUANJING KEXUE)

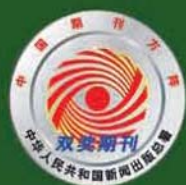
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

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

2015 年北京市两次红色预警期间 PM _{2.5} 浓度特征	
..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)	
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM _{2.5} 变化特征对气象因素的响应	张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析	李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)
南京北郊冬季 PM _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞, 马嫣, 仝鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响	孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 李秀镇 (2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价	杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)
重庆地区大气场降水氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系	温艳茹, 王建力 (2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析	
..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)	
河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍山为例	
..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)	
亚热带典型岩溶流水气界面 CO ₂ 交换通量变化过程及其环境影响	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)	
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 荧光光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)	
华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价	
..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)	
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平	张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险	昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征	何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)
岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性	孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)
降水对泃河水质和水体微生物的影响	卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应	王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究	景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邵义萍, 樊静静 (2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响	蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)
活性炭负载 Co ₃ O ₄ 活化过一硫酸盐降解金橙 G	王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙 G 过程及动力学	张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素	邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中 AOX、色度和 TOC 的去除效果研究	
..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)	
Fenton 氧化去除制药企业活性污泥中 AOX 的效果研究	陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估	刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)
基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究	鲍林林, 陈婉秋 (2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究	李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)
基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析	
..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)	
NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究	汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)
葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合	程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)
拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性	颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX ₂ 的筛选及脱氮特性	成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)
焦化废水活性污泥中降解硫化物细菌种群多样性分析	徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应	戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)
磷脂脂肪酸 (PLFA) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构	左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应	赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)
三峡库区消落带 N ₂ O 排放及其影响因素	李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N ₂ O 排放研究	高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征	易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀兰, 木志坚 (2738)
藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析	罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析	宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响	丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)
减磷施肥有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律	
..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)	
组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较	
..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)	
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制	商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ-Fe ₂ O ₃ 及其 NH ₃ -SCR 活性探究	徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)
《环境科学》征订启事 (2569) 《环境科学》征稿简则 (2576) 信息 (2744, 2769, 2790)	

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 $\text{PM}_{2.5}$ 变化特征对气象因素的响应

张南^{1,3}, 熊黑钢^{2,3*}, 葛秀秀¹, 段鹏程¹, 毛先如¹, 王亚龙¹

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 北京联合大学应用文理学院, 北京 100083; 3. 新疆大学教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 依据实测北京冬季人体呼吸高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度、湿度、风速、风向、温度数据, 利用相关性分析、非线性回归分析、统计分析, 分别探讨轻中度空气污染天、一次重污染过程, 气象因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度生成、变化的影响。结果表明: ①轻中度污染天, 若温度较低、日平均风速较小, 湿度大时, 湿度是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的决定性因素; 而温度、风速、湿度均较大时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化受三者共同作用; 当风速、湿度、温度均较小时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化主要受前两者影响。这反映出, 人体呼吸高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化对气象因子微小变化响应极为敏感。②一次空气质量从良到重度污染的过程中, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度积累主要是由于空气湍流较弱、加之湿度大导致的, 此外白天西北风、东北风较大, 但持续时间短, 而夜间东南风、西南风风速较小, 持续时间长, 也有利于污染物的累积。③短时微小量降雪使温度降低、空气湿度增加, 不仅不能降低 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, 反而使其上升了 72%, 造成颗粒物浓度的跃升现象。④短时风速较大, 风速达到 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 持续 2 h, 虽然在一定程度上降低局地 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, 但并不能彻底改变空气质量状况。只有当风速大于 $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且持续 4 h 以上, 才能够迅速地扩散空气中的细颗粒物, 空气质量由重度污染转变为优。

关键词: 北京; 人体呼吸高度; $\text{PM}_{2.5}$; 污染天; 气象因素

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2419-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.002

Response of Human Respiratory Height $\text{PM}_{2.5}$ Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing

ZHANG Nan^{1,3}, XIONG Hei-gang^{2,3*}, GE Xiu-xiu¹, DUAN Peng-cheng¹, MAO Xian-ru¹, WANG Ya-long¹

(1. College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. College of Art and Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology (Ministry of Education), Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: In order to investigate the influence of meteorological factors on the variation characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing. According to the survey of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in height of human respiration, humidity, the direction of the wind, wind speed and temperature. Using the methods of correlation analysis and nonlinear regression analysis, the effects of meteorological factors on the formation and variation of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in light and moderate air pollution days and heavy pollution were discussed respectively. The results showed that: ①On mild to moderate pollution days, if the temperature was low, the daily average wind speed was low, the humidity was high, then the humidity was the decisive influencing factor of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration; if the temperature, wind speed and humidity were all high, then the variation of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration was influenced by the combined action of these three; when the temperature, humidity and wind speed were all low, then the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration was mainly affected by the first two factors. This suggested that changes in the height of the human respiration $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations were extremely sensitive to small changes in meteorological factors; ②During the process of air quality turning from good to heavily polluted, the accumulation of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration was mainly due to the weak air turbulence, coupled with the high humidity, in addition, the northwest wind and northeast wind were larger during the daytime but the duration was shorter, while the southeast and southwest wind speed at night was lower with longer duration, which was conducive to pollutant accumulation; ③Short-term low amount of snow decreased the temperature and increased the air humidity, which not only could not reduce the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration, but rather increased it by 72%, resulting in the jump phenomenon of particle concentration; ④When the wind speed reached up to $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and lasted for two hours, the local $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations could be reduced to some extent, but it could not completely change the air quality situation. Only when the wind speed was greater than $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and lasted for more than 4 hours, the fine particulate matter in the air could be quickly diffused and the air quality was changed from heavy pollution to excellent.

Key words: Beijing; human respiratory height; $\text{PM}_{2.5}$; polluted days; meteorological factors

收稿日期: 2015-09-07; 修订日期: 2016-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271185); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20130322)

作者简介: 张南(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境与气象, E-mail: 847483536@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xhg1956@sohu.com

大气颗粒物是城市大气中主要的污染物之一,尤其细颗粒物是其中最重要组成部分.城市大气中细粒子 $PM_{2.5}$ 对人体健康的危害已经被国内外大量研究所证实^[1-6].大气中颗粒物浓度的高低主要受污染源和大气对颗粒物的扩散作用决定.污染源在一定的地理环境和时间上是相对稳定的,而大气对颗粒物的扩散和稀释能力则是变化较大的.因此研究城市气象条件对细颗粒物的影响,对于改善城市空气质量有重要的意义.国内外学者已开展了相关研究.意大利米兰颗粒物浓度的年际变化中,冬季其浓度最高^[7];空气中的细颗粒物已经成为首要污染物^[8,9],而北京属于污染比较严重地区^[10-12];北京重污染日,区域输送是其 $PM_{2.5}$ 污染的主要来源之一^[13];北京市城市森林大风天气下 $PM_{2.5}$ 质量浓度波动较小,在东北风和西南风影响下, $PM_{2.5}$ 质量浓度较高,东南风影响下较低^[14,15];北京城区林带内气温升高大气垂直对流加剧,有利于 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 扩散^[16];北京冬季易引发大气中细颗粒物的爆发性增长^[17].气温升高、空气湿度和风速降低是雾和霾出现频率变化的主要原因^[18].水汽与颗粒物浓度呈正相关,风速与颗粒物浓度呈负相关^[19].不同季节、不同气象要素变化的组合对 $PM_{2.5}$ 浓度有直接影响,而逆温,地面风速较小,能见度低,天气条件静稳,是造成持续性重污染的最重要原因^[20-24].2013年北京市交通站点 $PM_{2.5}$ 的日变化规律呈单峰型分布,其他站点呈双峰型分布,并且 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量浓度存在明显的日变化、时变化规律和随温度变化的规律^[26-28].京津冀区域稳定的气象条件是形成北京空气重污染的主要原因^[29,30].上述研究成果为认识北京市细颗粒物的分布、形成条件以及影响因素奠定了基础.目前的研究大都取自各地环境保护局监测站数据,而对北京市地面人体呼吸高度 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的研究较少.本研究利用相关分析、统计分析、非线性拟合分析等方法,分析气象因素和人体呼吸高度 $PM_{2.5}$ 质量浓度之间的关系,试图归纳总结出在轻中度污染天、一次重污染过程中人体呼吸高度 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化对气象因子响应,以期通过气象参数的预测来预报空气质量提供依据.

1 材料与方法

1.1 监测时间和监测地点

监测时间为2015年1月31日18:00时到2月10日08:00时,全天监测.监测点位于北京市朝阳区

区前韦沟村东南侧的草地上,草地面积较大,地势较为平坦、宽阔,不受局地建筑物、树林、人类活动影响.该监测点能够充分代表本区域内大气环境污染状况的变化趋势.

1.2 仪器和设备安装

$PM_{2.5}$ 浓度监测设备采用美国 Met one 公司生产的 E-BAM-9800 颗粒物监测仪.该设备由 PM_{10} 采样头、 $PM_{2.5}$ 切割器、样品动态加热系统、采样泵和仪器主机组成.量程为 $0.005 \sim 65.530 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($5 \sim 65.530 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),数据分辨率为 $1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,流速为 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.与颗粒物监测仪配套的环境检测设备为:美国 Met one 公司生产的 EX-034B-9800 风速、风向传感器,以及 083E-9800 相对湿度、温度传感器.风速传感器测量范围 $0 \sim 75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、精度 $\pm 1\%$;风向传感器测量范围 $0 \sim 360^\circ$,精度 $\pm 4^\circ$,两者在 $-30 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内可正常运行;相对湿度传感器测量范围 $0 \sim 100\%$,精度为 $\pm 2\%$,温度传感器测量范围为 $-50 \sim 50^\circ\text{C}$,精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

颗粒物监测仪安装于三脚架上,采样头高度为2 m,并安装 $PM_{2.5}$ 切割头.该高度基本为人体呼吸高度.风速、风向、温度、湿度传感器高度均为1.7 m,风力传感器远离 E-BAM 单元,以确保叶片灵活转动而不会撞击到任何异物,温度传感器也尽量远离 E-BAM 单元,以避免采样泵发热而影响测量结果.

1.3 数据选取和处理

选取监测期间雾霾天的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为研究对象(2月1、2、3、6、9日 $PM_{2.5}$ 质量浓度数据均达到不同程度污染水平,均属于雾霾天),分析气象因素对北京冬季人体呼吸高度 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响.人体呼吸高度的 $PM_{2.5}$ 颗粒物浓度采用 E-BAM-9800 监测仪监测的小时浓度数据;气象数据为 E-BAM-9800 监测仪配备的风速、风向、温度、湿度传感器数据,其每小时输出4组实时平均数据,取其算术平均值作为小时气象数据.运用 DPS6.85 统计软件对监测数据进行相关性分析、统计分析.

2 结果与分析

本研究分别讨论不同气象条件下轻中度污染天 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征,以及由轻度污染转为重污染过程细颗粒物质量浓度积累特点与气象条件关系.

2.1 轻中度污染天 $PM_{2.5}$ 质量浓度与气象因素的关系

2.1.1 轻中度污染天气象因素对 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化的影响

监测期2月1、6、9日 $PM_{2.5}$ 日平均值在 $90 \sim$

$130\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,属于轻中度污染. 风速、温度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈极显著负相关,湿度与其呈极显著正相关(表 1),即温度和风速增大,湿度减小,颗粒物质量浓度降低.

从图 1 中可以看出,轻中度污染天 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度、湿度、温度、风速均有明显的日变化特征,其中湿度与人体呼吸高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化趋势较为一致,风速和温度与其变化趋势相反. 09:00 时之前,太阳辐射较弱,空气温度较低,平均值分别为 -10.4 、 -6.2 、 $-9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,大气较为稳定,风速较小,平均风速分别为 0.5 、 0.4 、 $0.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,且湿度较大,平均值分别为 62.9% 、 73.2% 、 62.4% , $\text{PM}_{2.5}$ 浓度处于一天中较高水平,为 $150\sim 200\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,空气污染严重. 此时段温度尚未升高,大气运动较弱,小时平均风速较小,单位时间内 $\text{PM}_{2.5}$ 不能被迅速的输送和迁移,加之湿度较高,最大可达到 80% 左右,有利于污染物的聚集和二次污染的生成,从而导致严重的空气污染. 09:00~18:00 时,太阳辐射加热地面,近地面的空气温度升高,相比 09:00 时之前平均温度上升了 $12\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$,使得大气处于

不稳定状态,平均风速增大,分别为 1.3 、 1.5 、 $1.3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,同时湿度也处于 1 d 中的低值,从之前的平均 $62\%\sim 73\%$ 减小到 $21\%\sim 24\%$,3 个条件均有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散和稀释, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度值较低;午后 2 h 左右,气温达到一天中最高值 (4.7 、 12.7 、 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),而湿度为一天中最小 (18.5% 、 16.5% 、 16.3%),风速也处于一天中的较大时段,空气湍流尤为强烈,使细颗粒物逐渐被分散、稀释, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度比日出前有明显的降低,且在 12:00~16:00 时达到最小,仅为 $30\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,空气质量状况属优;18:00 时后,太阳辐射减弱,地面温度迅速降低,空气中温度降低速度相对较慢,形成逆温,夜间大气趋于稳定状态,风速也从白天的 $1.3\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右减小到 $0.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,湿度平均值从白天的 $21\%\sim 24\%$ 增大到夜间的 $51.3\%\sim 67.5\%$,增强空气中污染物凝结核的形成,加剧大气污染,使得 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度也随之上升,又恢复到 $150\sim 200\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 这就是轻中度污染天 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随着气象因素变化而呈现的数值日变化特征.

表 1 气象因素其与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关性¹⁾

Table 1 Correlation between $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and meteorological parameters				
日期	类型	WS & $\text{PM}_{2.5}$	AT & $\text{PM}_{2.5}$	RHx & $\text{PM}_{2.5}$
2 月 1 日	轻度污染天	-0.78 **	-0.74 **	0.92 **
2 月 6 日	轻度污染天	-0.77 **	-0.68 **	0.69 **
2 月 9 日	中度污染天	-0.85 **	-0.47 *	0.73 **
2 月 1~3 日	一次重污染过程	-0.60 **	-0.38 *	0.86 **

1) * 为 $P<0.05$, ** 为 $P<0.01$; AT 为温度, RHx 为湿度, WS 为风速

2.1.2 轻中度污染天风对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的影响

除温度、风速、湿度外,风向也是影响人体呼吸高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的主要因素. 将 2 月 1、6、9 日的风向数据与各个风向对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的平均值制成风向玫瑰图(图 2). 北京冬季轻中度雾霾天人体呼吸高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度高值主要集中在 $120^{\circ}\sim 270^{\circ}$ (东南风、西南风、南风)之间,且在西南风、东南风影响下 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高,平均浓度值达到 $150\sim 200\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,而在西北风的影响下 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度值较低,仅为 $50\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右. 造成细颗粒物浓度变化对风向的响应较好的原因是,除当地污染外,一方面是监测点位于北京市的东北方向,在偏南风影响下,市区、工业区的污染物从南边输送到北边,使得 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度值增大. 另一方面,受北京市周边城市的影响,在南风(西南风、东南风)的控制下,将石家庄,保定等南侧地区的污染

物输送到北京. 从局地小范围的人体呼吸高度 $\text{PM}_{2.5}$ 实测数据证明,东南风、西南风也是造成北京冬季轻中度污染的重要因素.

风速呈现早晚小,白天大的特点. 早晚风速多为 $0.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,且以南风(西南风、东南风)为主,持续时间长,一般超过 16h;而白天风速较大,但不超过 $2.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,以北风(东北风、西北风)为主,但持续时间多为 $5\sim 6\text{h}$ (图 3). 轻~中度污染天主导风向为西南风和东南风,其风速一般较小,是造成污染的重要原因.

2.1.3 轻中度污染天对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化起关键作用的因子分析

为了进一步了解轻中度污染天各气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的影响,通过对轻中度污染天的气象数据与颗粒物浓度数据进行非线性回归分析和统计分析,寻找在不同气象条件下对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化

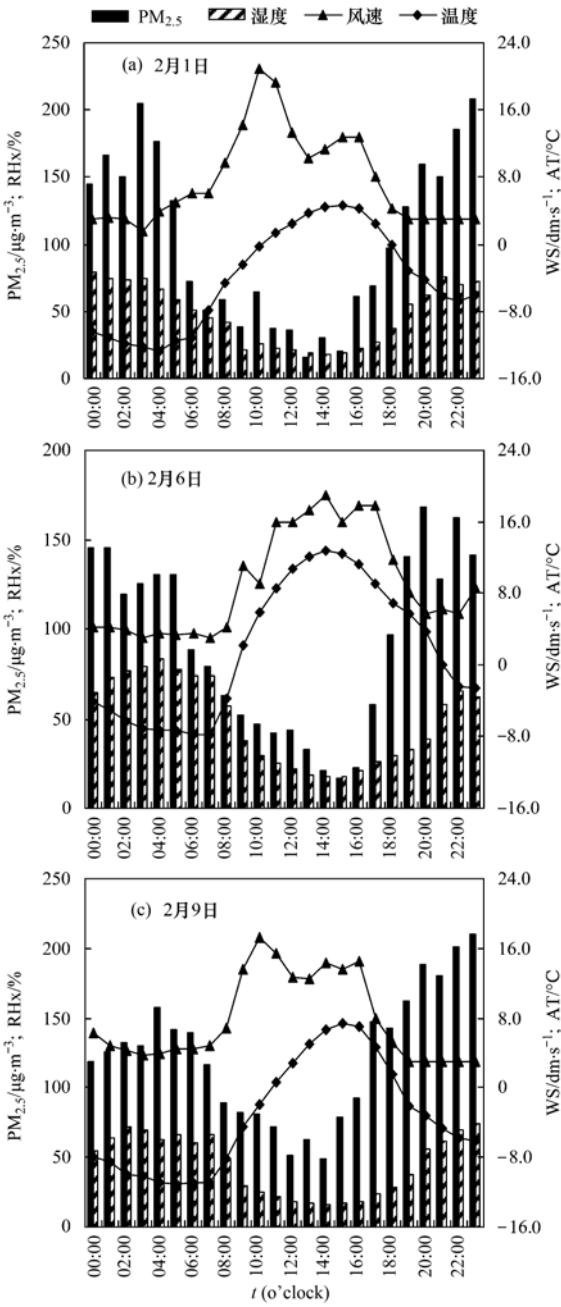


图1 轻中度污染天风速、温度、湿度与PM_{2.5}质量浓度的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of PM_{2.5} mass concentration and wind speed, temperature, humidity on mild to moderate pollution days

起关键作用的因子. 在各种一元非线性回归分析中,气象因素与PM_{2.5}质量浓度的多项式拟合效果最好,因此本研究选取多项式拟合. 从拟合结果看,2月1日相对湿度与PM_{2.5}质量浓度拟合结果最优, P 值为0.000 1,达到极显著水平,决定系数在3个因子中最大为0.938 3,其次是风速和温度(表2). 与6、9日相比,2月1日温度最低(最大值、最小值均最低)、风速最小,湿度较大,其中有14 h大于40%

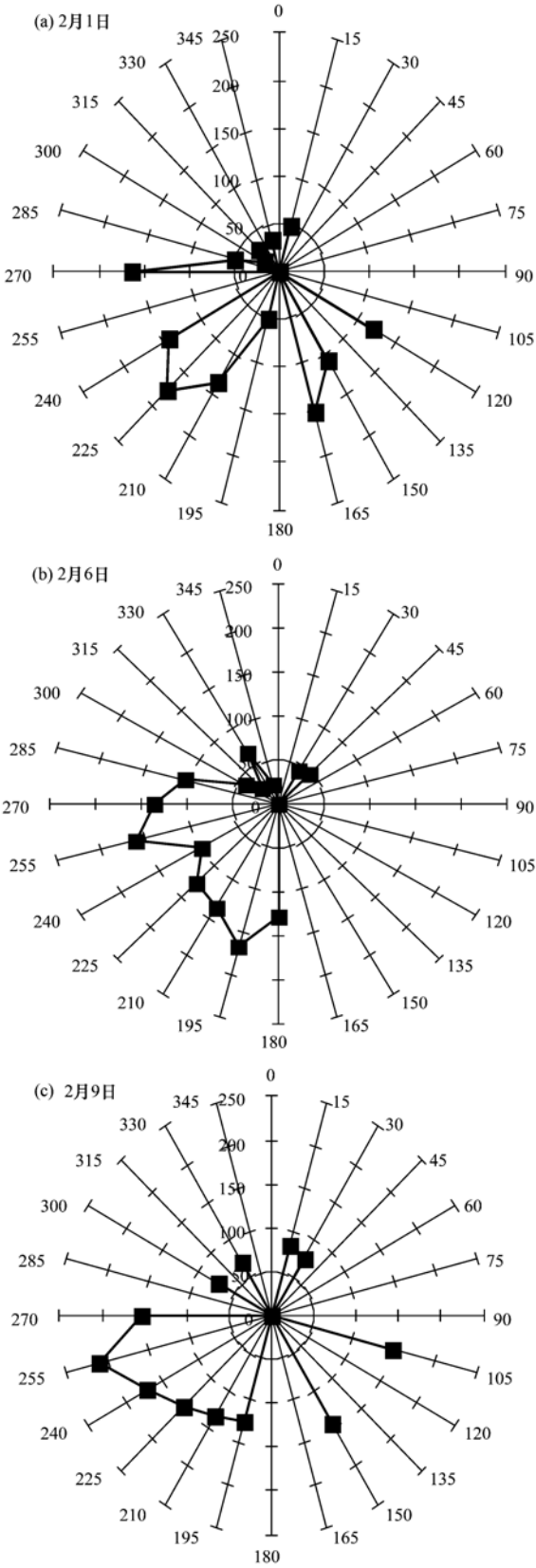


图2 轻中度污染天PM_{2.5}质量浓度日变化和风向玫瑰图

Fig. 2 PM_{2.5} mass concentration variation and wind rose diagram on mild to moderate pollution days

且最大值达到79.5%(表3). 由此表明:北京冬季

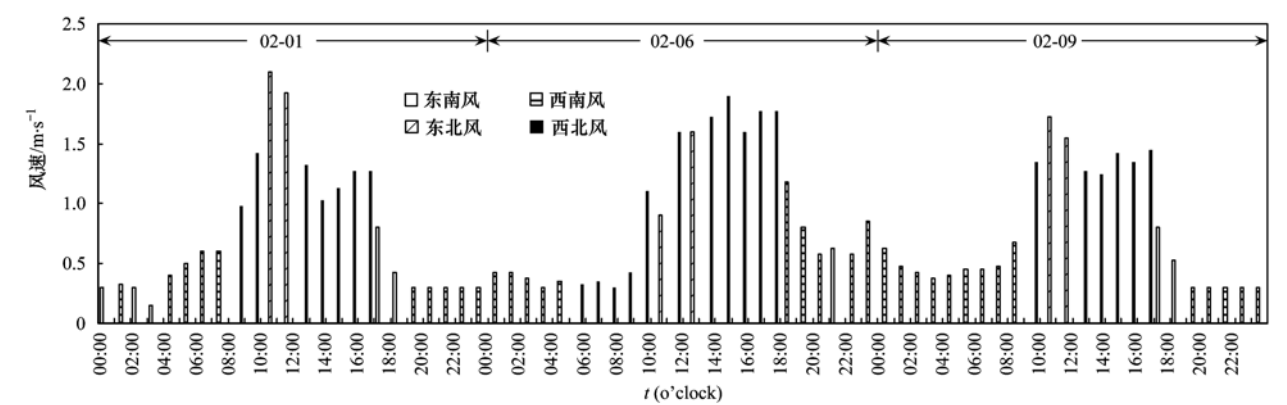


图3 轻中度污染天风速、风向变化

Fig. 3 Wind speed variation and wind rose diagram on mild to moderate pollution days

轻中度雾霾天温度低、风速小,湿度较大时,后者是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的决定性因素.

2月6日,风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度拟合结果最好,但其仅比温度、湿度拟合的决定系数大0.0716、0.0364,即三因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的影响相当(表2).与2月1、9日相比,2月6日温度最高,白天有10 h 温度大于 5°C ,其中5 h 大于 10°C ,且日平均风速最大(表3).反映出北京冬季温度高、湿度大、

日平均风速小于 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化更多受三因子综合作用的影响.

2月9日,风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度拟合结果最好,湿度其次,温度最差(表2).与2月1、6日湿度相比最小,其最小值为16.3%,且有5 h 小于20%,同时风速小,温度较低,仅有4 h 大于 5°C (表3).因此,北京冬季,风速、湿度、温度均较小时,风速和湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的影响更强一些.

表2 轻中度污染天各气象因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的非线性多项式拟合结果

Table 2 Nonlinear polynomial fitting results of meteorological factors and the mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$ on mild to moderate pollution days					
日期	气象因子	残差标准误差	F 统计量	决定系数	P
2月1日	WS	22.363 7	26.177 9	0.879 1	0.000 1
	AT	39.623 6	5.885 8	0.620 5	0.002 2
	RHx	15.982 2	54.705 6	0.938 3	0.000 1
2月6日	WS	27.105 8	8.992 5	0.714 1	0.000 2
	AT	30.312 8	6.468 9	0.642 5	0.001 3
	RHx	30.516 1	6.335 2	0.637 7	0.001 5
2月9日	WS	17.481 8	11.106 2	0.760 4	0.000 3
	AT	26.096 6	3.054 6	0.466	0.052 8
	RHx	20.997 6	6.624 5	0.654 3	0.003 3

表3 轻中度污染天各气象因素的数据统计

Table 3 Data of the meteorological factors on mild to moderate pollution days											
日期	WS(平均值) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	AT(平均值) $^{\circ}\text{C}$	RHx(平均值) $\%$	AT				RHx			
				Max	Min	$>5^{\circ}\text{C}$	$>10^{\circ}\text{C}$	Max	Min	$<20\%$	$>40\%$
2月1日	0.76	-4.14	47.92	4.7	-12.8	0 h	0 h	79.5	18.5	3 h	14 h
2月6日	0.91	1.66	48.3	12.7	-7.7	10 h	5 h	83.3	17.5	3 h	12 h
2月9日	0.77	-3.38	44.92	7.7	-11.1	4 h	0 h	74.2	16.3	5 h	13 h

2.2 一次重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 累积与气象因子的关系分析

2.2.1 一次重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 累积特点

2月1~3日是一次 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染过程(图4),其气象因子与人体呼吸高度的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关性分析表明,颗粒物浓度与湿度呈极显著正相关,且相关性在各因素中最高,与温度未达到极显著相关

(表1).由于污染期间日平均风速小于 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,空气相对较稳定,湍流较弱,对颗粒物的扩散作用不明显.此次污染中,湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的聚集具有决定性作用.2月1日有9 h 湿度值大于70%,一方面湿度大不利于细颗粒物的扩散,使得其浓度值居高不下.另一方面,在日平均风速小于 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、温度较低的气象条件下,颗粒物浓度的白天

下降速率远远小于夜间上升速率,2月1、2、3日下降速率分别为 -0.068 、 -0.071 、 -0.028 ,2月1、2日的上升速率为 1.200 、 0.220 ,使得2月2、3日 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度聚积,污染逐渐加重,最高值由 $208 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 $305 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最后达到 $366 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;最低值从空气质量优质的 $16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 提高到轻度污染的 $78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,直至重度污染的 $205 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;平均值的变化则为 $102 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升高到 $184 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最后增至 $289 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这就是其 $\text{PM}_{2.5}$ 积累的数值特征。

其中2月2日21:00时~2月3日01:00时的短时微小量降雪,并未能迅速降低空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度,相反温度由 2.4°C 降到零下 1.9°C ,湿度从 56.8% 上升至 98.3% , $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度则从 $175 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 跃升至 $301 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图4),因此2月3日12:00时之前细颗粒物污染处于重度~严重污染水平。这是由于短时微小量降雪不仅增加了空气湿度这一颗粒物聚集的重要因子,并且使得地面迅速冷却,而同期大气的温度则较高,形成明显的逆温现象,造成细颗粒物浓度迅速升高。

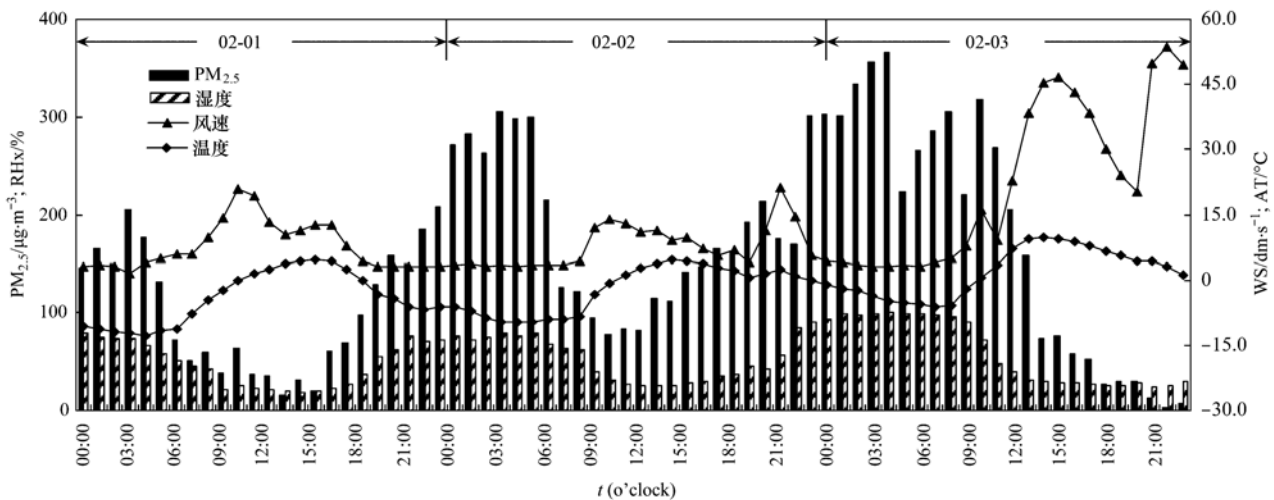


图4 一次重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与温度、湿度、风速变化

Fig. 4 Variations of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and wind speed, temperature, humidity in a heavy pollution process

2.2.2 一次重污染过程风对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的影响

风向是导致这次重污染形成的重要因素。2月1~3日在西南风、东南风的控制下,空气污染逐渐加重。在西南风、东南风方向上的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高值从第一天的 $170 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右上升到了 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最后攀升到 $350 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图5)。这是由于偏南风把污染物从南部工业区输送到污染浓度低的北部地区,同时东南风则带来暖湿气流,空气湿度增加,加剧空气中污染物凝结核的形成,使得空气污染逐渐加重。但在2月3日12:00时后西北持续大风的影响下, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度又迅速地回落,空气质量由重度严重污染转变为优(图4)。由此表明,北京冬季西南、东南弱风是形成重污染的重要因素,而西北风持续大风则能促使 $\text{PM}_{2.5}$ 迅速地扩散和稀释。

此次重污染过程风速出现过两次高峰,2月2日19:00时,小时平均风速由 $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 升至20:00时的 $1.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,以及21:00时 $2.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,22:00时

$1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最后回落到 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图6)。但是由于其持续时间较短,细颗粒物从 $214 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 $169 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,之后又回升至 $301 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。3日12:00时风速迅速增大,为 $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此后4 h大于 $3.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图6),促使空气中细颗粒物快速扩散和稀释,其浓度迅速降低,18:00时后颗粒物质量浓度达到一级水平,空气质量由重度、严重污染转变为优质(图4)。由此反映出:一般风速不大于 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,持续时间不超过2 h的短时小风不能彻底改变细颗粒物浓度。而平均风速大于 $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且持续4 h, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度可迅速从严重污染降低为16:00时的优。

通过以上分析可知,在2015年2月1~3日这次重污染过程中,湿度是造成颗粒物聚集的主要因素,而微弱的西南风、东南风则加重了污染。2月2日21:00时~2月3日01:00的短时微小量降雪不能够迅速降低空气中的细颗粒物,反而使得其浓度迅速升高,2月3日12:00时的大风则才是细颗粒物迅速扩散、稀释的主要因素。

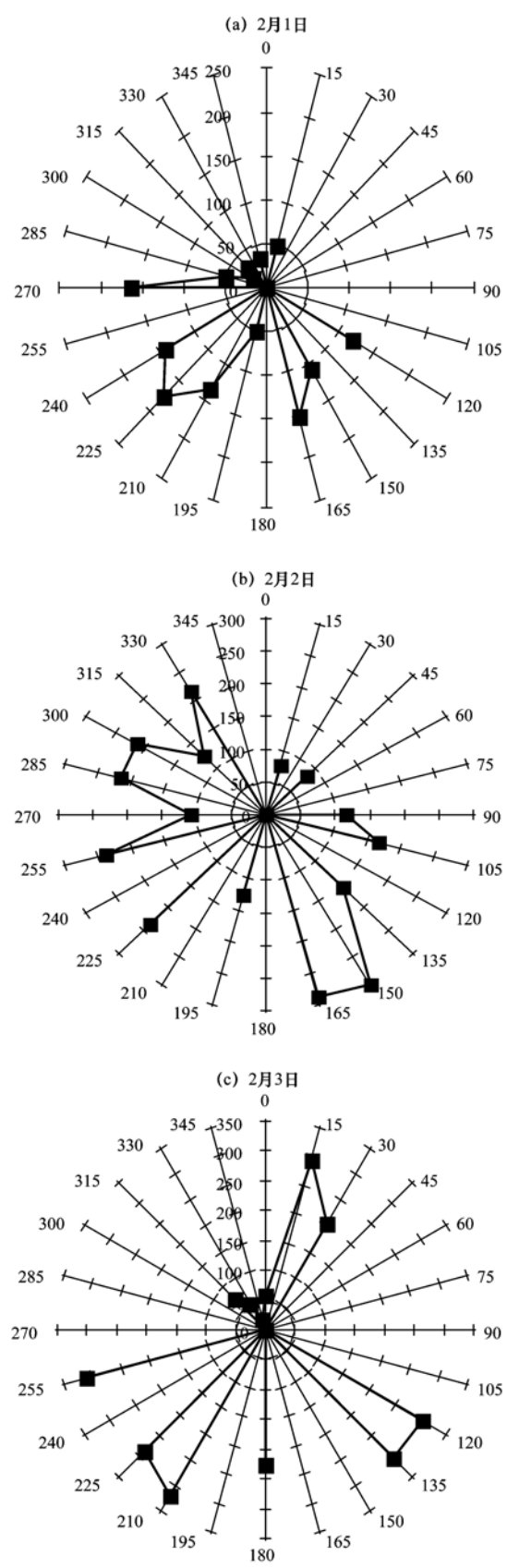


图 5 一次重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度日变化和风向玫瑰图

Fig. 5 $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration variation and wind rose diagram during a heavy pollution process

2.2.3 一次重污染过程对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度积累起关键作用的气象因子分析

相关性分析结果表明,这次重度污染的形成,人体呼吸高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度主要受近地面湿度的控制,其次受风速和温度作用的影响(表 1). 为更好地印证所得结论. 将污染物积累过程中各气象因素与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度做非线性拟合分析(表 4). 从拟合结果看,相对湿度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度拟合结果最优, P 值为 0.000 1,达到极显著水平,决定系数最大,为 0.730 1,即在这次颗粒物的积累过程中湿度对其作用最大,其次是风速和温度.

表 4 一次重污染过程中各气象因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的多项式拟合结果

Table 4 Nonlinear polynomial fitting results of meteorological factors and the mass concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in a heavy pollution process				
气象因素	残差标准误差	F 统计量	决定系数	P
WS	76.193 1	4.033 7	0.378 4	0.000 8
AT	85.286	1.882 1	0.221 2	0.082 4
RHx	50.204	17.925 4	0.730 1	0.000 1

3 结论

(1)在轻中度污染天,人体呼吸高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化对气象因素的微小差异极为敏感. 在温度较低、风速小,湿度较大时,后者是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的关键因素;而温度高、湿度大、风速较大时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化则受三因子综合作用的影响;温度、风速、湿度均较小时,后两者对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化作用更大.

(2)一般情况下,南风(西南、东南)多出现在早晚,风力小(多 $<0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),时间长($>16 \text{ h}$),有利于污染物的累积. 北风(西北、东北)主要出现在白天,风力均为全天最大值($1.1 \sim 1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),在湿度和温度的配合下,虽然可短时降低 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度,但持续时间短($5 \sim 6 \text{ h}$),因此,在风速较小的西南风、东南风主导下, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度处于一天中的高值,短时较小的偏北风并不能使颗粒物迅速地扩散.

(3)由轻度到重度污染过程, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的积累对湿度的响应最好,其次为风速、温度. 湿度较大不利于颗粒物的扩散,其上升速率远远大于下降速率,浓度的日平均值呈现逐日上升的特征,从 2 月 1 日的 $102 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升至 $184 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在 2 月 3 日达到 $289 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 空气质量状况由良叠加至重度、严重污染. 此外前期微弱的西南风、东南风也

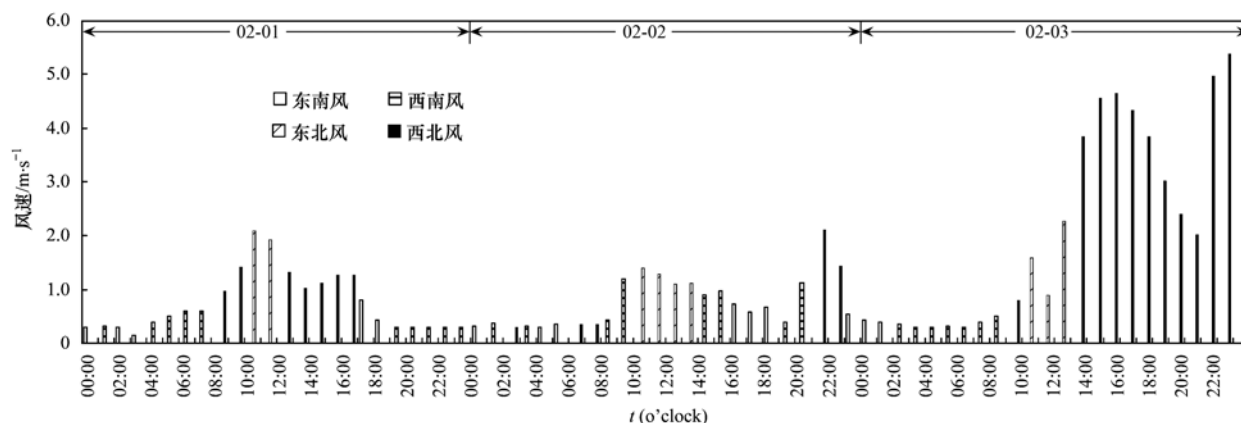


图6 一次重污染过程风速、风向变化图

Fig. 6 Variations of wind speed and wind direction in a heavy pollution process

是导致这次重污染形成的重要因素,持续的西北大风则是驱散细颗粒物的关键因子。

(4) 冬季短时微小量降雪不仅不能降低 $PM_{2.5}$ 质量浓度,反而因地面温度快速降低,形成逆温,抑制了空气对流。同时大幅度增加了空气湿度,使得 $PM_{2.5}$ 质量浓度上升了 $130 \mu g \cdot m^{-3}$ 。短时风速超过 $2.0 m \cdot s^{-1}$ 能使得细颗粒物浓度降低,但若持续时间小于 2 h,其浓度又会回升。而当平均风速大于 $3.5 m \cdot s^{-1}$,且持续时间 4 h 以上, $PM_{2.5}$ 质量浓度从 $268 \mu g \cdot m^{-3}$ 降至 $27 \mu g \cdot m^{-3}$,空气质量从重度、严重污染转为优质。

参考文献:

- [1] Pope C A, Dockery D W, Schwartz J. Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution [J]. *Inhalation Toxicology: International Forum for Respiratory Research*, 1995, **7**(1): 1-18.
- [2] Pope III C A. Review: epidemiological basis for particulate air pollution health standards[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000, **32**(1): 4-14.
- [3] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *JAMA: the Journal of the American Medical Association*, 2002, **287**(9): 1132-1141.
- [4] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(14): 2375-2377.
- [5] Cao J J, Xu H M, Xu Q, *et al.* Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, **120**(3): 373-378.
- [6] Kan H D, London S J, Chen G H, *et al.* Season, sex, age, and education as modifiers of the effects of outdoor air pollution on daily mortality in Shanghai, China: the public health and air pollution in Asia (PAPA) study [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2008, **116**(9): 1183-1188.
- [7] Marazzan G M, Vaccaro S, Valli G, *et al.* Characterisation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particulate matter in the ambient air of Milan (Italy) [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(27): 4639-4650.
- [8] Wang X H, Bi X H, Sheng G Y, *et al.* Chemical composition and sources of PM_{10} and $PM_{2.5}$ aerosols in Guangzhou, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **119**(1-3): 425-439.
- [9] Mohammed M O A, SONG W W, MA W L, *et al.* Potential toxicological and cardiopulmonary effects of $PM_{2.5}$ exposure and related mortality: findings of recent studies published during 2003-2013 [J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2016, **29**(1): 66-79.
- [10] 戴永立, 陶俊, 林泽健, 等. 2006~2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2925-2932.
- [11] 刘大锰, 马永胜, 高少鹏, 等. 北京市区春季燃烧源大气颗粒物的污染水平和影响因素 [J]. *现代地质*, 2005, **19**(4): 627-633.
- [12] 李云婷, 程念亮, 张大伟, 等. 2013 年北京市不同方位 $PM_{2.5}$ 背景浓度研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4331-4339.
- [13] 陈波, 鲁绍伟, 李少宁. 北京城市森林不同天气状况下 $PM_{2.5}$ 浓度动态分析 [J]. *生态学报*, 2016, **36**(5): 1-9.
- [14] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市 $PM_{2.5}$ 区域来源解析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- [15] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 416-423.
- [16] 刘旭辉, 余新晓, 张振明, 等. 林带内 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 污染特征及其与气象条件的关系 [J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(7): 1715-1721.
- [17] 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 北京冬季 $PM_{2.5}$ 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析 [J]. *气候与环境研究*, 2014, **19**(2): 173-184.
- [18] 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析 [J]. *地理学报*, 2010, **65**(5): 533-542.

- [19] 王勇,刘严萍,李江波,等. 水汽和风速对雾霾中 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 变化的影响[J]. 灾害学, 2015, **30**(1): 5-7.
- [20] 王宏,陈晓秋,余永江,等. 福州市 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 分布特征及与气象条件关系的初步分析[J]. 热带气象学报, 2014, **30**(2): 387-391.
- [21] 王静,施润和,李龙,等. 上海市一次重雾霾过程的天气特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1537-1546.
- [22] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2013 年 1 月北京一次空气重污染成因分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [23] 任阵海,万本太,虞统,等. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 7-13.
- [24] 康娜,辛金元,蔺永耀,等. 北京山前典型细粒子污染过程的气象条件分析[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(9): 1013-1020.
- [25] 王占山,李云婷,陈添,等. 2013 年北京市 $PM_{2.5}$ 的时空分布[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 110-120.
- [26] 王占山,李云婷,张大伟,等. 2014 年 APEC 会议期间北京市空气质量分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 675-683.
- [27] 刘大锰,黄杰,高少鹏,等. 北京市区春季交通源大气颗粒物污染水平及其影响因素[J]. 地学前缘, 2006, **13**(2): 228-233.
- [28] 于淑秋,林学椿,徐祥德. 北京市区大气污染的时空特征[J]. 应用气象学报, 2002, **13**(S): 92-99.
- [29] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(2): 163-170.
- [30] 廖晓农,孙兆彬,何娜,等. 边界层低空急流导致北京 $PM_{2.5}$ 迅速下降及其形成机制的个例分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 51-59.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrochemical Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sarI01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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