

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康	(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松	(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅	(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经	(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成	(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝	(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠	(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇	(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹	(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪	(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏	(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗	(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹	(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽	(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙	(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远	(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚	(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春	(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海	(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏	(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺	(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪	(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏	(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明	(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽	(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静	(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼	(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳	(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪	(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强	(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强	(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博	(1374)
枯草芽孢杆菌对土霉素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用	(1379)
嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英	(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建	(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉	(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东	(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰	(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先	(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰	(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春	(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月	(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提	(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞	(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银	(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云	(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐	(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新	(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁	(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭	(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮	(1507)
《环境科学》征订启事		(1216)
《环境科学》征稿简则		(1248)
信息		(1163,1194,1248,1424)

2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析

程念亮¹, 李云婷¹, 张大伟^{1*}, 聂滕², 邱启鸿¹, 徐文帅¹

(1. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048; 2. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要: 采用数值模式与观测资料相结合的方式, 对北京市 2013 年 1 月 9 日至 15 日一次空气重污染过程的大气环境背景、气象条件和形成原因进行了初步分析. 结果表明, 重污染过程期间 10 日至 14 日 $\text{PM}_{2.5}$ 平均值为 $323 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 重污染过程与当地气象条件密切相关, 稳定的大气环流形势为污染的持续提供了大气环流背景, 风速较小、湿度较大、边界层较低、持续逆温是造成重污染的主要原因; 重污染过程中区域输送对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率在 53% ~ 69% 之间且存在明显的二次转化, 区域输送起着更为重要的作用; 气象条件对持续性重污染的形成和破坏起到了关键性的作用, 因此需要加强对重污染预警预报研究, 以有效预防和控制空气重污染.

关键词: 重污染; $\text{PM}_{2.5}$; WRF; 逆温; 北京市

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1154-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.003

Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing

CHENG Nian-liang¹, LI Yun-ting¹, ZHANG Da-wei^{1*}, NIE Teng², QIU Qi-hong¹, XU Wen-shuai¹

(1. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: The weather conditions, atmospheric environmental background and formation mechanism of a heavy air pollution episode in Beijing City from January 9th to 15th, 2013 was preliminarily investigated by combining observed data and the WRF meteorology model. The results showed that the average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ was $323 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ from January 10th to 14th; the heavy pollution episode was closely related to the local meteorological conditions; the stable atmospheric circulation pattern provided favorable environmental field for the lasting of this heavy air pollution; small wind speed, high humidity, low PBL, and lasting temperature inversion were the main reasons for this heavy air pollution incident; further analysis showed that contributions of regional transmission to the receptor sites in Beijing were between 53% ~ 69% and there were obvious secondary conversions and transformations; overall regional transportation played a more important role during this serious air pollution incident; the meteorological conditions played a key role in the formation and destruction of the heavy air pollution, therefore we need to strengthen the study on early warning of heavy air pollution, in order to prevent and control the air heavy pollution effectively.

Key words: heavy pollution; $\text{PM}_{2.5}$; WRF; temperature inversion; Beijing

近年来,我国中东部地区重污染过程频发,大气污染防治形势日益严峻^[1]. 以 $\text{PM}_{2.5}$ 为主导因素的灰霾现象日趋严重,对公众健康和城市景观构成巨大威胁^[2,3]. 2013 年 1 月我国中东部、西南 10 省区市约 100 万 km^2 区域出现持续严重灰霾污染天气,京津冀地区特别是北京地区在 1 月遭受了严重的空气污染^[4,5]. 1 月北京发生 4 次连续重污染过程 ($\text{AQI} > 200$ 连续 2 d 及以上),其中以 1 月中旬初(9 日至 15 日)重污染过程最为严重,引发国内外学者广泛关注.

国内外已有很多研究,分析不同地区空气重污染现状及其影响因素, Davis 等^[6]指出短时间内大尺度环流形势和局地气象条件对重污染过程起着决定作用; Flocas 等^[7]分析了 4 类大气环流形势和 5 类局地环流对污染状况的影响; 苏福庆等^[8]指出边界层中气象因子梯度分布影响着污染物的汇聚、输送和扩散; 任阵海等^[9]发现持续的逆温层和干结的暖

空气盖是造成污染的重要原因; 陈朝晖等^[10]对北京地区天气型与 PM_{10} 的质量浓度的关系进行了研究,发现 PM_{10} 质量浓度在上升、峰值和下降阶段对应的天气形势分别为大陆弱高压场、相继出现的弱低压场和高气压梯度场; 王莉莉等^[11]研究北京 2010 年一次污染特征发现重污染过程中大气边界层在 91% 的时段低于 500 m,连续静稳的天气形势和区域污染是导致此次霾发生和持续的主要原因; 周敏等^[12]研究 2013 年 1 月中国中东部大气重污染期间上海颗粒物的污染特征,发现能见度小于 10 km 的累计时间长达 284 h, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的生成效

收稿日期: 2014-10-09; 修订日期: 2014-11-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B03); 北京市科技计划项目(Z131100005613046, Z131100006113009); 环境保护公益性行业科研专项(201409005)

作者简介: 程念亮(1987~),男,硕士,工程师,主要研究方向为大气环境模拟及空气质量预报, E-mail: cnl88@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangdawei@bjmemc.com.cn

率较高,灰霾期间机动车的污染较明显;余纬等^[13]以珠江三角洲地区(珠三角)2009 年 11 月 23 日至 29 日一次重空气污染过程为例,研究发现前期高压脊带来的稳定层结和静小风条件使得大气污染物逐日累积,难以扩散.这些研究多基于日均值或单站点研究污染现状、特征及其与气象的关系,对数值模拟技术应用到重污染研究外来源输送的影响较少.

数值模拟技术作为一种有效的手段被广泛应用到大气边界层和空气污染输送扩散的研究中^[14,15],空气质量数值模型在国内外 $PM_{2.5}$ 预测预报及污染研究中得到了广泛应用,尤其是第 3 代区域空气质量模式 Model-3^[16,17].现采用污染物监测资料和地面、高空观测气象资料与数值模拟相结合的方法,分析北京市 2013 年 1 月 9 日至 15 日的一次典型空气重污染过程,以揭示该次过程的污染特征及其成因并定量评估不同大气物理和化学过程特别是外来源输送对北京 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响,以期今后这一地区空气质量改善提供科学依据.

1 材料与方法

2013 年 1 月 9 日至 15 日北京出现了一次典型 $PM_{2.5}$ 重污染过程,采用观测资料和空气质量、轨迹模式对 9 日至 15 日的污染变化过程、成因及其影响因素开展研究.

1.1 模式系统简介

1.1.1 Models-3 模式设置

研究采用的 Models-3 (third-generation air quality modeling system)^[18] 模式系统由中尺度气象模式 WRF、源排放模式 SMOKE 和空气质量模式 CMAQ (community multiscale air quality modeling system) 三部分组成.空气质量模式 CMAQ 中心网格点坐标设置为 $35^{\circ}N$ 、 $110^{\circ}E$,采用双向嵌套技术,水平分辨率为 36 km 及 12 km,第一层网格数为 200×160 个,模拟区域覆盖整个东亚地区(包括了中国、日本、韩国、朝鲜等国);第二层网格数 120×102 ,覆盖华北地区(包括京津冀、山东、河南等地),使用兰博托地图投影,标准纬线为 $24^{\circ}N$ 和 $46^{\circ}N$.垂直方向均分为不等距 20 层粗网格,其中 8 层分布于 1 km 以下,分辨率较高以便更好地描述大气边界层结构,地面层高度约 35 m.模拟时间为 2013 年 1 月,第一次运行时模拟 5 d 初始场,后续模式初始场采用前一时次的模拟输出,以保证污染源排放的累积效果及消除初始条件的影响.

采用 ARW-WRF3.2^[19] 模拟气象场,WRF 模式

的中心点坐标设为 $35^{\circ}N$ 、 $110^{\circ}E$,双向嵌套,水平网格距为 36 km 及 12 km,与 CMAQ 模式对应;垂直层次均为 35 层,外层嵌套为内层提供边界条件;气象背景场和边界资料为 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 和 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 的再分析逐日资料,GFS 分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间分辨率是 6 h;地形和下垫面输入资料分别来自 USGS 30 s 全球地形和 MODIS 下垫面分类资料;使用气象化学界面处理模块 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) WRF 的输出结果插值到 CMAQ 模型区域和网格上并转为 CMAQ 可识别接收的格式.运用陆地生态系统估算模型 MEGAN^[20] 处理天然源,人为源数据则来自 2006 年 INTEX-B $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的污染源清单^[21,22] 和北京市大气污染物排放清单,物种包括 NO_x 、VOCs、CO、 SO_2 、 PM_{10} 和 NH_3 ,将处理好的天然源、人为源共同输入 SMOKE 排放源模型中,生成系统的排放源文件.

1.1.2 HYSPLIT 轨迹模式

研究采用轨迹模式 HYSPLIT 进行后推气流轨迹模拟,版本为 4.9 (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>),是由美国国家海洋大气中心 (NOAA) Draxler 等^[23] 开发的供质点轨迹、扩散及沉降分析用的综合模式系统.气象数据来自 GDAS 数据库 (<ftp://arlftp.arl.noaa.gov/pub/archives/gdas1>),分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,每次的后向延伸时间为 36 h,轨迹模拟起始高度设定为 0、500、1 500 m.

1.2 观测资料与模式验证

$PM_{2.5}$ 观测数据为北京市环境保护监测中心发布的 11 站点逐时平均浓度数据;气象资料为与 $PM_{2.5}$ 相对应的北京市观象台地面观测资料、探空资料. $PM_{2.5}$ 组分数据则为北京市环境保护监测中心综合观测实验平台分析的结果,采用大气 $PM_{2.5}$ 水溶性离子在线测量仪 (URG-9000B) 对水溶性离子 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 进行在线观测,其化学成分分析系统主要为两台离子色谱仪,均为美国 DIONEX 公司的 Dionex ICS-90 型离子色谱仪,在线观测的时间分辨率为 15 min,为便于分析,将 15 min 数据平均成小时均值;使用在线 OC/EC 分析仪分析 $PM_{2.5}$ 中子有机碳元素碳浓度,时间分辨率为 60 min;组分观测结果对进一步了解北京大气细颗粒物污染过程具有重要作用.观测站点位置及分类如图 1.

为了检验模式预报性能,采用散点图和计算模

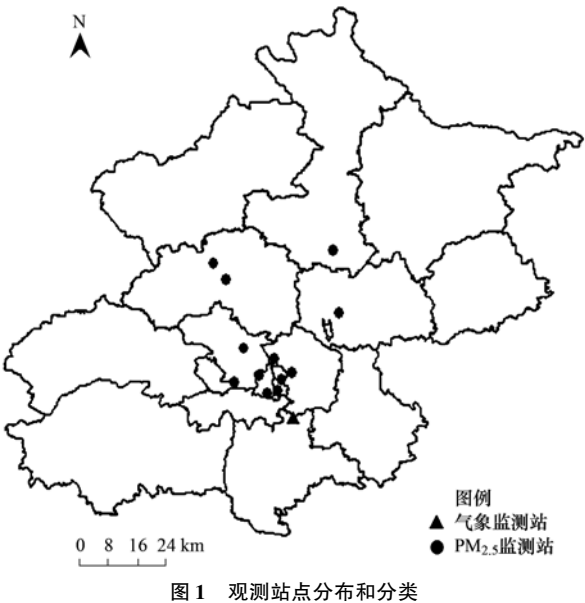


图 1 观测站点分布和分类

拟值与监测值相关系数的方法^[24]验证 CMAQ 模型的模拟值(见图 2),计算标准化平均偏差(NMB)、标准化平均误差(NME)、均方根误差(RMSE)^[25,26]以评估模拟结果与实测值的吻合程度。

1.3 情景分析方法

研究采用情景模拟分析的方法计算区域源排放对同一受体点的污染贡献率,计算公式如下:

$$P_{\text{contrib}} = \frac{C_{\text{base}} - C}{C_{\text{base}}} \times 100\%$$

式中, P_{contrib} 、 C_{base} 、 C 分别为外来源对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的百分比贡献率、基准情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟浓度值

和北京周边零排放情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟浓度值.即将某一区域的人为源排放“关闭”后进行模拟计算,基准情景与计算结果的差值即为这一区域的浓度贡献,这一方法在一系列研究^[27~29]工作中得到广泛应用并证明是有效的,可以很好地计算 $\text{PM}_{2.5}$ 、硫酸盐、硝酸盐及其前体物 SO_2 、 NO_x 的源分担率。

2 结果与讨论

2.1 模拟值验证

在进行 WRF 输出结果验证时,由于缺乏气象站点观测数据,本研究只选取了北京市观象台发布的小时数据进行模拟验证,表 1 为 2013 年 1 月 9 日至 15 日地面 10 m 风速、2 m 温度、海平面气压、相对湿度模拟值与实测值比对,并计算了观测及模拟的平均值、相关系数、标准平均偏差(NMB)和均方根误差(RMSE)来评估模拟结果与实测值的吻合程度.可以看出模拟的地面风速比实测值略高,其它三变量略低,相关系数在 0.59~0.94 之间,地面气压相关系数最高,达 0.94;统计的 RMSE 均在 15 以下表明模拟值与实测值吻合度较高;Zhang 等^[30]运用 MM5 在中国地区的模拟结果温度的 NMB 和 R 分别为 -34%~-3%和 0.6~0.9、风速的 NMB 和 R 分别为 40%~156.2%和 0.4~0.6;Wu 等^[31]运用 MM5 在美国北卡罗来纳州的模拟结果为风速的均方根误差介于 1.8~2.0 之间;本研究模拟结果与 Zhang 等、Wu 等基本一致,模式模拟的误差可能与模式分辨率及地形、下垫面资料有关。

表 1 气象参数的观测值和模拟值的统计参数

Table 1 Statistical parameters for the observed and simulated values of meteorological variables

项目	样本量/个	模拟值	实测值	R	NMB/%	RMSE
地面风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	160	1.68	1.64	0.65	5.01	1.06
气压/hPa	160	1 020.37	1 021.20	0.94	-2.12	1.13
相对湿度/%	160	73.82	74.56	0.59	-1.36	14.07
温度/ $^{\circ}\text{C}$	160	-4.89	-4.45	0.71	-13.25	2.01

图 2 为 2013 年 1 月 9 日至 15 日 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 模拟值与监测值的时间序列,可以看出模拟值与监测值有良好的时间变化趋势;模拟值整体上略偏低,这可能与模式分辨率及所采用的源清单有关,模式垂直分辨率难以反映污染物的精细空间结构,排放源清单有待更新。

在时间序列图分析的基础上,与 WRF 输出结果验证类似,进一步统计了观测及 CMAQ 模拟值的标准平均偏差(NMB)、标准平均误差(NME)、平均相对偏差(MFB)、平均相对误差(MFE)和相关系数

R ,结果见表 2.经计算 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 模拟值与监测值的相关系数分别为 0.78、0.85,MFB 分别为 -20.32%、-21.58%,MFE 分别为 35.02%、28.83%,与 Boylan 等^[32]设定的模拟颗粒物结果较好的标准($\text{MFB} \leq \pm 60\%$ 和 $\text{MFE} \leq 75\%$)较一致,同时与 EPA 推荐的评价标准^[33]较一致,模拟结果误差在可接受范围内,保证了 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征与形成过程分析结果的可靠性.进一步的模拟结果验证^[34]表明模拟值符合模式与源空间分辨率特征,模拟结果基本反映了重污染过程及持续态势;可以满足研

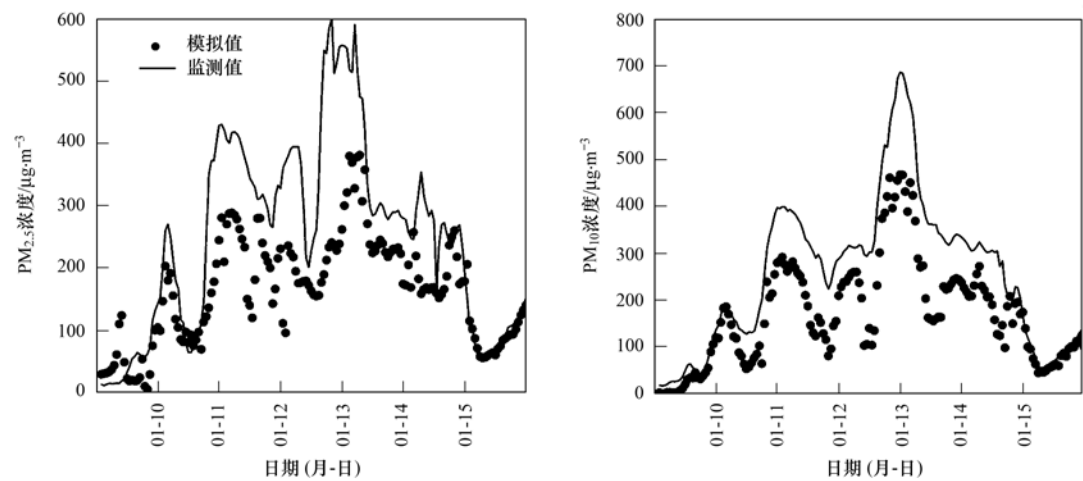


图 2 模拟值与监测值的对比

Fig. 2 Comparison between observed and simulated data

表 2 CMAQ 模拟值与监测值的统计结果

Table 2 Statistical results of observed and simulated data of CMAQ						
项目	样本量/个	R	NMB/%	NME/%	MFB/%	MFE/%
$\rho(\text{PM}_{10})$	165	0.85	-9.39	22.24	-21.58	28.83
$\rho(\text{PM}_{2.5})$	162	0.78	-11.25	25.67	-20.32	35.02

究需要.

2.2 重污染过程气象成因分析

2.2.1 气象要素与污染物浓度变化

北京市 2013 年 1 月 9 日至 15 日的一次典型空气重污染过程逐日 AQI 与实测天气状况变化见表 3. 从中可见,空气质量从 9 日的二级跳至 10 日五级重度污染,11 日至 13 日空气质量连续 3 d 严重污染,14 日降为重度污染,15 日转为轻度污染,至此重污染过程结束. 此次重污染过程 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $323 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,11 日至 13 日空气污染最为严重,12 日

$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 达到了 $459 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这 3 天也是风速较低、相对湿度较高的时期,低风速不利于污染物扩散,高相对湿度有利于气态污染物向颗粒物的二次转化,污染会进一步加重^[25,26]. 期间 500 hPa 高度场 3 次浅槽过境,高空以偏南、偏西气流为主,地面天气形势以均压、低压、高压底部为主,少云无明显降水,高空云量较少,整体来说这种不利于污染物扩散的高低空天气形势的配合会导致区域性连续静稳天气出现,抑制了污染物的快速消散,从而为大气污染的形成及维持提供了稳定的大气环境背景^[35~37].

表 3 9 日至 15 日 AQI 与逐日天气状况

项目	Table 3 Variation of AQI and weather condition during January 9th-15th in 2013						
	时间(月-日)						
	01-09	01-10	01-11	01-12	01-13	01-14	01-15
AQI	80	267	376	473	419	287	133
$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	59	216	325	459	378	237	101
地面气压场	高压	均压转低压	低压转均压	高压底部	均压	高压底转低压	低压转高压前
500 hPa 高度场	槽后	浅槽	偏西气流	浅槽	偏西北气流	浅槽	偏西北气流
地面平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.02	1.39	1.64	1.46	1.44	1.41	1.86
平均相对湿度/%	35	68	69	82	73	76	73
24 h 降雨量/mm	0	0	0	0	0	0	0.1

重污染过程 10 日至 15 日北京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 及相应时间段的气象要素的日变化见图 3. 从中可见,10 日至 14 日 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 基本在 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,12 日夜间至 13 日凌晨最高,最高值约 $600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高值正好发生在风向转换的时候,在污染

物浓度的较高阶段,均出现了风向的“南转东北”及“西南转东北”的现象,与其他研究结果一致^[38,39]; 11 日与 13 日凌晨正好对应地面天气形势为均压场控制,近地层低风速、高湿度配合低空风向转换有利于污染长时间持续. 计算重污染过程期间平均风

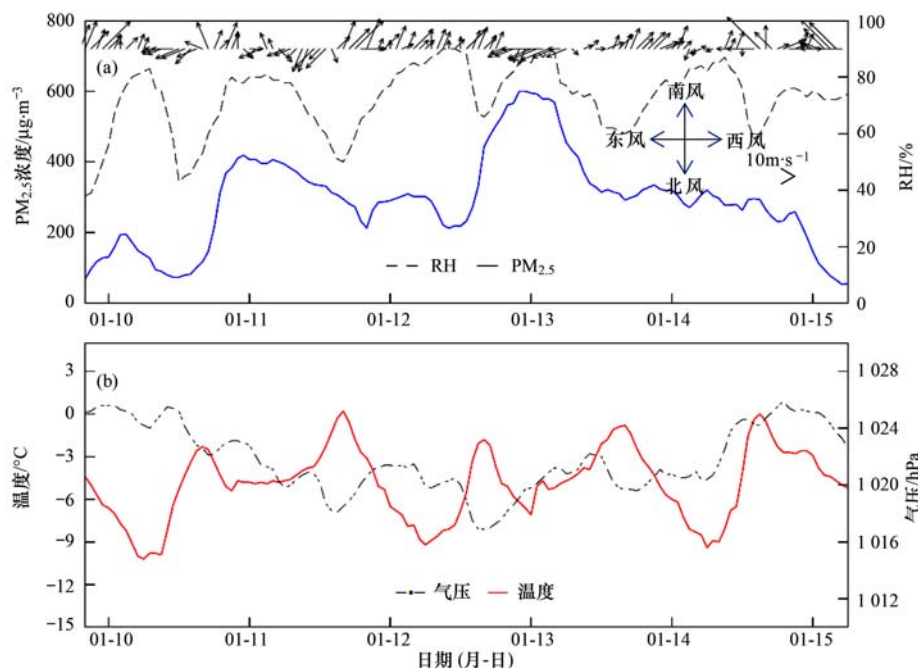


图3 实测污染物浓度与气象条件的变化

Fig. 3 Variation of the measured pollutant concentrations and meteorological conditions

速为 $1.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相对湿度较大, 平均为 73.6%; 地面气压变化较为平稳, 平均为 1021.5 hPa, 24 h 平均变压为 $-3.65 \sim 2.63 \text{ hPa}$, 平均为 -0.71 hPa , 负变压导致周边污染物的汇聚; 地面温度平均温度为 -4.88°C , 24 h 变温基本为 $-2.72 \sim 2.68^\circ\text{C}$, 平均为 0.15°C , 为弱正变温。

重污染过程期间以偏南风 and 偏东风为主, 两者风频之和约占 80%, 西南风引起的周边高浓度污染物传输到北京上空后, 由于北京特殊的地理位置, 北面山脉阻挡, 污染气团在城市上空移速减慢, 污染物主要积聚在山前无法疏散, 一段时间后风向突然间转为东北风, 由于弱的偏东北气流输送对

污染物没有明显清除作用反而会带来足够的水汽和引起高浓度污染物回流, 加重了空气污染。经计算相对湿度与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 正相关系数最大为 0.4; 地面气压与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 负相关系数最小, 为 -0.55 ; 温度与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 没有明显的相关关系, 但温度呈现明显的日变化, 白天温度较高, 夜间地表辐射冷却, 这样的温度日变化有利于维持边界层稳定的结构^[5,40]。

2.2.2 大气温度层结时空变化特征

图4为实测10日至14日探空观测的北京市观象台08:00和20:00温廓线。从中可见, 此次重污染期间出现了明显的逆温现象, 11日20:00为贴地逆

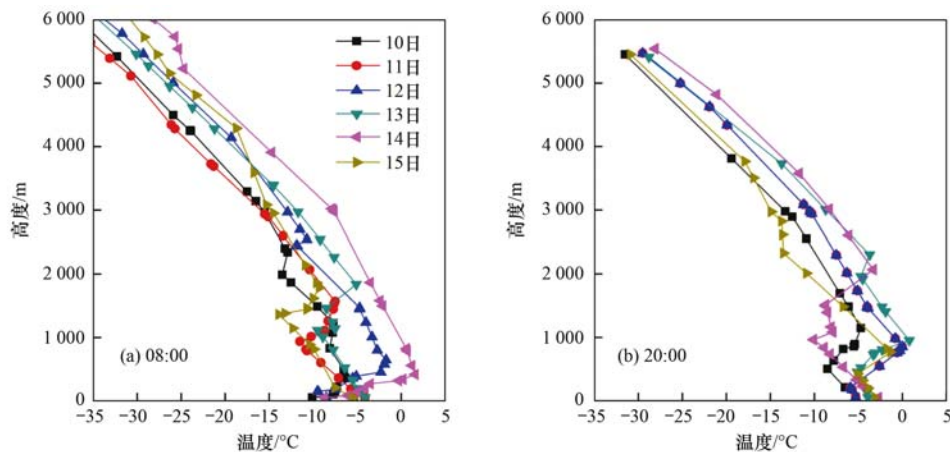


图4 10日至15日20:00观象台实测温度廓线

Fig. 4 Temperature profile at Guanxiangtai during January 10th-15th

温, 逆温强度约 $2.8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 其他 4 d 20:00 均为高空逆温, 平均逆温强度 $0.89^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 1 000 m 以下 12 日 20:00 逆温强度最大, 大气层结较稳定, 逆温厚度将近 800 m, 结合图 3, 该时间段正好对应 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 上升阶段. 1 月 14 日, 近地层逆温逐渐减弱, 高空逆温仍然存在, 污染物浓度下降缓慢; 15 日受冷空气过境影响, 大气边界层遭到破坏, 逆温类型为锋面逆温.

图 5 为 WRF 模拟的 12 日至 13 日观象台风场、RH 及 PBL 垂直分布, 可以看出模拟的边界层高度均在 800 m 以下, 最低仅 100 m, 较低的边界层高度限制了污染物的有效扩散. 与图 1 及表 2 相结合可以看出 10 日北京及周边污染物浓度逐步积累; 11 日凌晨至午后北京处于弱低压、均压控制, 细颗粒物在低空汇聚, 在偏南风作用下, 保定-石家庄-邢台一线高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 逐步输送到北京, 浓度逐步上升;

傍晚至夜间北京北部山区出现非常弱的小高压, 20:00 地面风场转为弱东北风, 浓度略微有些降低; 12 日北京地面仍为偏南风, 高空偏西-西南气流, 京津冀整片区域为重度污染, 白天 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度维持在 $200\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 夜间逆温强度增大(图 4), 污染物在太行山前地区积聚的同时, 通过物理、化学过程转化, 浓度会进一步升高, 在偏南风输送下, 浓度爆发性增长; 12 日夜间偏东气流导致污染回流, 浓度逐渐到达高值, 持续的弱东北气流导致污染浓度逐渐下降, 14 日起浓度缓慢下降. 在此过程中西南气流一方面增加了市区上空的污染物浓度, 另一方面又将西南暖而湿的空气带入北京上空, 与低空相对冷气团形成逆温, 且模拟的结果显示地面湿度较大, 1 000 m 以上相对湿度逐渐减小, 这样形成中层干暖低层湿冷的干暖盖结构, 这是重污染日形成的典型大气垂直结构^[4,41].

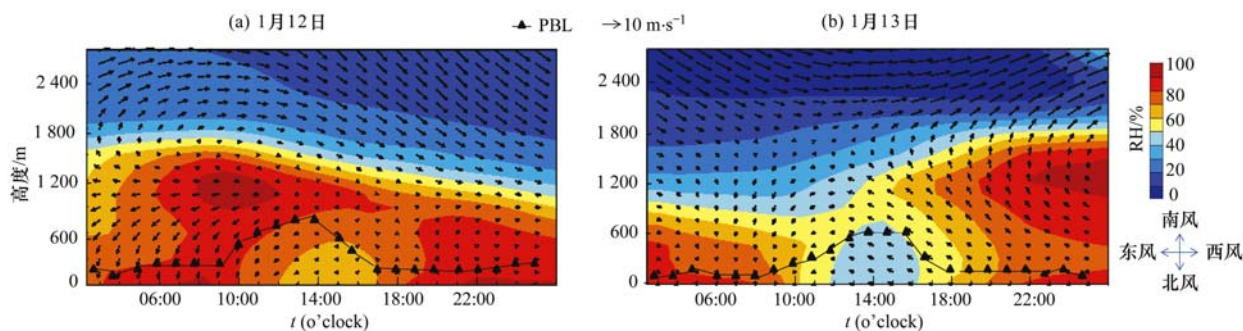


图 5 12 日至 13 日观象台风场、RH 及 PBL 垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of wind field, RH and PBL at Guanxiangtai during January 12th-13th

一般来说北京山区山体海拔多在 800 m 左右, 当夜间平原发生逆温时, 其逆温层的顶部往往和山高处在同一高度, 由于逆温污染作用使逆温层底部升温较慢, 而白天山体加热使逆温层顶的温度进一步升高, 这样出现高空气温比低空气温更高, 白天逆温层不仅不易破坏还有可能加强. 持续逆温引起的上暖下冷的温度层结不利于污染物的垂直扩散, 从而使水汽和污染物在低层堆积^[5]. 逆温层的持续存在是此次重污染维持的主要因素^[42], 近地层的逆温有利于灰霾的形成.

2.3 重污染过程后向轨迹分析

图 6 为此次重污染过程前后观象台站点不同时刻不同高度 36 h 后向轨迹及区域 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟结果. 结合图 3 可以看出, 10 日观象台站点低空 10 m、500 m 高度气团来自站点偏南方向, 1 500 m 高度气团为偏西气流; 随着污染的加剧, 3 个高度 36 h 后向轨迹均为偏南方向, 来自河北、山东西部、

河南北部的污染气团进入北京; 15 日高压系统影响北京后, 来自西北方向高空清洁气团进入北京, 低空则为偏东北气团, 受高压反气旋影响, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐渐下降. 后向轨迹路径基本反映重污染过程期间北京周边污染物输送作用对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响.

2.4 重污染 $\text{PM}_{2.5}$ 外来源贡献分析

由于气团轨迹不能充分反映污染物的输送、转化及清除规律, 研究采用情景模拟分析的方法计算外来源排放对北京不同时间的贡献浓度, 见图 7. 从中可知, 重污染过程期间外来源对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献浓度呈现明显的时空变化. 重污染前期, 10 日北京受周边污染影响较小, 周边污染源对北京贡献浓度大部分在 $20\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下, 随着重污染过程的持续, 外来源对北京的贡献浓度由南至北呈现出明显的增长趋势, 最大的南部大兴通州等地区贡献浓度可达 $120\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 北部的延庆、密云等大部分地区也在 $60\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上; 15

日凌晨随着西北高压东移南伸,污染物快速迁移扩散,外来源对北京的贡献浓度快速下降。

统计结果显示(表4)重污染过程10日至14日期间,外来源对北京11站点贡献浓度达到72.66~126.50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对11站点贡献率为53%~69%,平均为59%,表明此次重污染过程区域输送对于北京 $\text{PM}_{2.5}$ 起着更为重要的作用。

此次重污染过程外来源对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率统

计结果与其他研究结果(表5)具有一定的可比性,其他学者研究结果显示外来源对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率在22%~70%之间。由于缺乏不同地域、长时间序列 $\text{PM}_{2.5}$ 及其主要组分的跨区域输送规律研究,且模式的空间分辨率、排放源清单、模型参数的设置及计算方法的不同都会导致模拟结果的差异,是造成该研究中北京外来源贡献率与其他研究中存在差异的主要原因。

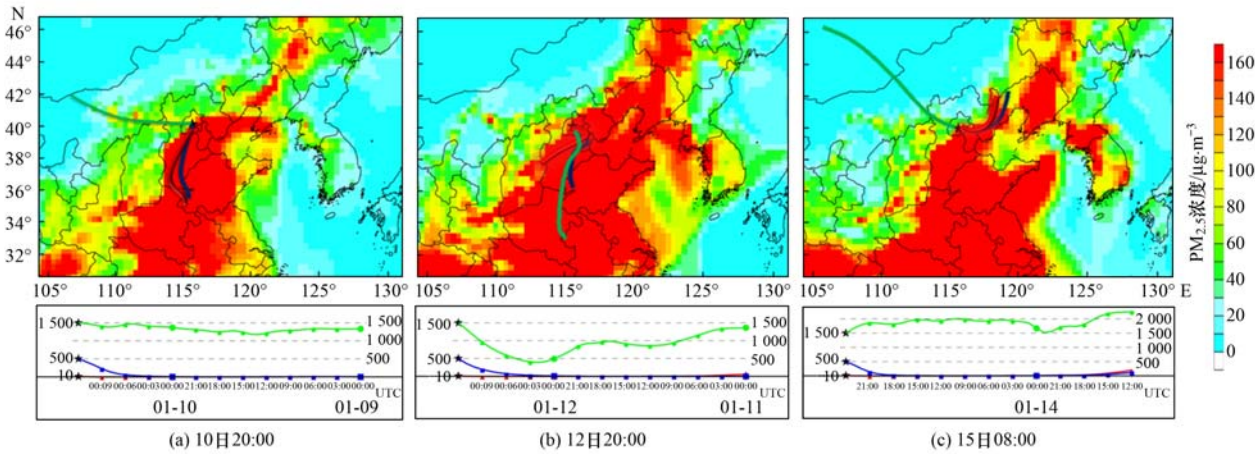


图6 观象台不同时刻、不同高度36 h后向轨迹

Fig. 6 Backward trajectories (36 h) of Guanxiangtai at different time and height

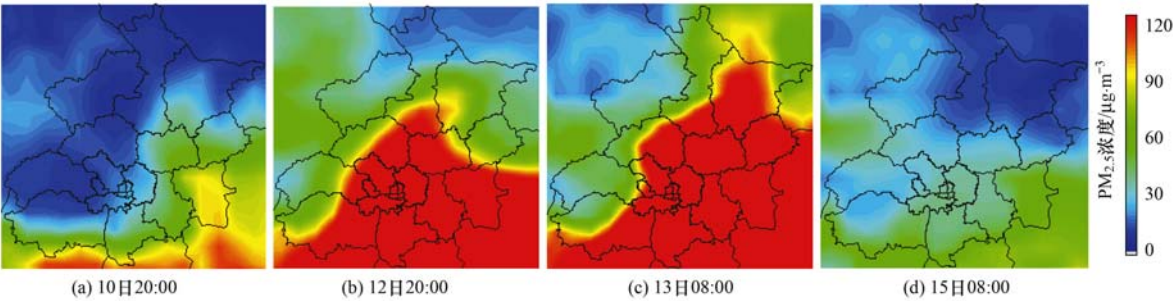


图7 外来源贡献浓度的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of external source contributions

表4 重污染过程期间外来传输对不同站点 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献

Table 4 Contributions of external transmission to different sites during the heavy pollution											
项目	定陵	东四	天坛	官园	万寿西宫	奥体中心	农展馆	万柳	顺义新城	昌平镇	怀柔镇
贡献浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	72.66	115.71	117.00	113.91	112.36	102.40	126.50	105.73	99.69	73.25	74.14
贡献率/%	65.00	56.00	55.00	54.00	53.00	56.00	61.00	52.00	62.00	65.00	69.00

表5 外来源对不同地区贡献率比较

Table 5 Contributions of external transmission to different districts				
模拟时间	模型	地区	贡献率/%	文献
2013 年全年	CAMx	京津冀	22	[43]
2013 年 1 月	NAQPMS	京津冀	20~35	[44]
2008 年 8 月	CMAQ	北京	50~70	[27]
2007 年 12 月	CMAQ	石家庄	65	[45]
2010 年 11 月	CAMx	上海	50	[46]
2012 年 12 月	CAMx	广州市	69	[47]
2013 年春季	CMAQ	青岛	30	[48]

2.5 $\text{PM}_{2.5}$ 二次转化分析

笔者进一步分析了污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成及转化特征,见图8。观测结果显示此次污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 主要组分 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 质量浓度分别为 (17.17 ± 10.08) 、 (64.37 ± 19.27) 、 $(25.45 \pm 11.33) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,3种无机组分离子主要由气态前体物的二次反应生成,3种无机组分之和约占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的62%, SO_4^{2-} 占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高为

39%, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 平均约为 26%, 较低的 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值表明固定源污染较机动车更显著^[49], 而 SO_4^{2-} 占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高表明冬季区域采暖燃煤量较大, SO_2 大量转化为 SO_4^{2-} ; 为了评价 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的生成速率, 研究采用硫转化率 $\text{SOR} = [\text{SO}_4^{2-}]/([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{SO}_2])$ 和氮转化率 $\text{NOR} = [\text{NO}_3^-]/([\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2])$ 来表征^[50], 其中各物质单位采用 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 污染过程期间, SOR 、 NOR

分别为 0.27 ± 0.061 、 0.089 ± 0.036 . 相对较低的 NOR 和较高的 SOR 表明 $\text{PM}_{2.5}$ 中存在明显的二次污染且二次粒子特别是 SO_4^{2-} 的贡献较大, 这可能与污染期间大气湿度较高, 有利于多相生成及区域传输引起的二次生成有关, 区域输送到北京的一次污染气体在大气颗粒物表面通过非均相反应转化生成硫酸盐和硝酸盐等二次气溶胶, 对重污染形成起到了促进作用^[51].

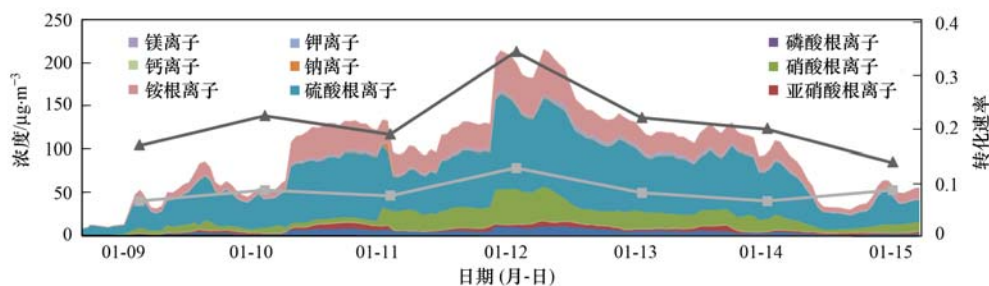


图 8 污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成及转化特征

Fig. 8 Transformation characteristics and chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ during the heavy pollution

3 结论

(1) 此次重污染过程空气质量从 9 日的二级跳至 10 日五级重度污染, 11 日至 13 日空气质量维持连续 3 d 严重污染, 14 日降为重度污染, 15 日转为轻度污染, 重污染过程结束; 10 日至 14 日重污染过程期间细颗粒物平均浓度为 $323 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均风速为 $1.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均相对湿度为 73.6%; 24 h 变温基本为 $-2.72 \sim 2.68^\circ\text{C}$, 24 h 平均变压为 $-3.65 \sim 2.63 \text{ hPa}$.

(2) 此次重污染过程与当地气象条件密切相关, 稳定的大气环流形势为污染提供了持续稳定的大气环境背景, 风速较小、湿度较大、边界层较低、持续逆温是造成重污染的主要原因。

(3) 进一步的分析表明区域传输对北京地区受体点 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献率在 53% ~ 69% 之间且存在明显的二次转化, 总体看来此次重污染过程区域输送起着更为重要的作用。

(4) 气象条件对持续性重污染的形成和破坏起到了关键性的作用, 因此需要加强对重污染预警预报研究, 以有效预防和控制空气重污染。

参考文献:

[1] 任阵海, 万本太, 苏福庆, 等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 1-6.
[2] 王冰, 张承中. 大气可吸入颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 研究进展[J]. 环境污染及防治, 2009, (8): 25-26.

[3] 王玮, 汤大钢, 刘红杰, 等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(1): 1-5.
[4] 王丛梅, 杨永胜, 李永占, 等. 2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7): 695-700.
[5] 马小会, 甘璐, 张爱英, 等. 北京 2013 年 1 月持续雾霾天气成因分析[J]. 环境保护前沿, 2013, (3): 29-33.
[6] Davis R E, Kalkstein L S. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations[J]. Physical Geography, 1990, 11(4): 320-342.
[7] Flocas H, Kelessis A, Helmis C, et al. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 95(3-4): 265-277.
[8] 苏福庆, 杨明珍, 钟继红, 等. 华北地区天气型对区域大气污染的影响[J]. 环境科学研究, 2004, 17(3): 16-20.
[9] 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.
[10] 陈朝晖, 程水源, 苏福庆, 等. 北京地区一次重污染过程的大尺度天气型分析[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 99-105.
[11] 王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(7): 924-930.
[12] 周敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季典型大气高污染过程中颗粒物的化学组成变化特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 81-92.
[13] 余纬, 罗栩羽, 范绍佳, 等. 珠三角一次重空气污染过程特

- 征分析及数值模拟[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(6): 643-650.
- [14] 王自发, 庞成明, 朱江, 等. 大气环境数值模拟研究新进展[J]. 大气科学, 2008, **32**(4): 987-995.
- [15] 房小怡, 蒋维楣, 吴润, 等. 城市空气质量数值预报模式系统及其应用[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(1): 111-115.
- [16] 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展和应用[J]. 大气科学, 2006, **30**(5): 778-790.
- [17] 佟彦超. 中国重点城市空气污染预报及其进展[J]. 中国环境监测, 2006, **22**(2): 69-71.
- [18] CEMPD, UNC. Operational guidance for the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system [EB/OL]. http://www.cmascenter.org/help/model_docs/cmaq/4.7.1/CMAQ_4.7.1_OGD_28june10.pdf, 2014-09-01.
- [19] MMD, NCAR. Weather Research and Forecast ARW Version 3 Modeling Systems User's Guide [EB/OL]. <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user-guide-V3/ARWUsers-GuideV3.pdf>, 2014-09-01.
- [20] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2006, **6**: 3181-3210.
- [21] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**: 5131-5153.
- [22] 张强, Klimont Z, Streets D G, 等. 中国人为源颗粒物排放模型及2001年排放清单估算[J]. 自然科学进展, 2006, **16**(2): 223-231.
- [23] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition [J]. Process in Materials Science, 1998, **47**: 295-308.
- [24] Wang L T, Jang C, Zhang Y, *et al.* Assessment of air quality benefits from national air pollution control policies in China: Part II. Evaluation of air quality predictions and air quality benefits assessment [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(28): 3449-3457.
- [25] Smyth S C, Jiang W M, Roth H, *et al.* A comparative performance evaluation of the AURAMS and CMAQ air-quality modelling systems [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(5): 1059-1070.
- [26] Eder B, Yu S C. A performance evaluation of the 2004 release of Models-3 CMAQ [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(26): 4811-4824.
- [27] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(3): 480-492.
- [28] Wang L T, Hao J M, He K B, *et al.* A modeling study of coarse particulate matter pollution in Beijing: regional source contributions and control implications for the Summer Olympics [J]. Journal of Air and Waste Management Association, 2008, **58**(8): 1057-1069.
- [29] Xing J, Zhang Y, Wang S X, *et al.* Modeling study on the air quality impacts from emission reductions and a typical meteorological conditions during the 2008 Beijing Olympics [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(10): 1786-1798.
- [30] Zhang Y, Cheng S H, Chen Y S, *et al.* Application of MM5 in China: Model evaluation, seasonal variations, and sensitivity to horizontal grid resolutions [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(20): 3454-3465.
- [31] Wu S Y, Krishnan S, Zhang Y, *et al.* Modeling atmospheric transport and fate of ammonia in North Carolina-Part I: Evaluation of meteorological and chemical predictions [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(14): 3419-3436.
- [32] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals and criteria for three-dimensional air quality models [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [33] US EPA. Guidance on the use of models and other analyses in attainment demonstrations for the 8-hour ozone NAAQS [M/OL]. <http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/8-hour-o3-guidance-final-version.pdf>, 2014-09-01.
- [34] 程念亮, 孟凡, 徐俊, 等. 中国东部春季一次强冷锋活动空气污染输送过程分析[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(1): 34-42.
- [35] 董芬, 王喜全, 王自发, 等. 北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象[J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(1): 63-70.
- [36] 王艳, 柴发合, 刘厚凤, 等. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 22-29.
- [37] 马锋敏, 高庆先, 周锁铨, 等. 北京及周边地区一次典型大气污染过程的模拟分析[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 30-36.
- [38] 王喜全, 齐彦斌, 王自发, 等. 造成北京 PM₁₀ 重污染的二类典型天气形势[J]. 气候与环境研究, 2007, **12**(1): 81-86.
- [39] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用[J]. 热带气象学报, 2005, **21**(3): 286-292.
- [40] 陈静, 郭卫红, 王素丽. 石家庄市空气污染预警天气背景分析及模型的建立[J]. 气象与环境学报, 2007, **23**(6): 63-68.
- [41] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 京津冀区域霾天气特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 31-36.
- [42] 任阵海, 苏福庆, 高庆先, 等. 边界层内大气排放物形成重污染背景解析[J]. 大气科学, 2005, **29**(1): 57-61.
- [43] 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.
- [44] 王自发, 李丽娜, 吴其重, 等. 区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究[J]. 自然杂志, 2008, **30**(4): 194-248.
- [45] 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.
- [46] Wu D W, Fung J C H, Yao T, *et al.* A study of control policy in the Pearl River Delta region by using the particulate matter source

apportionment method [J]. Atmospheric Environment, 2013, **76**: 147-161.

[47] 赵秀娟, 姜华, 王丽涛, 等. 应用 CMAQ 模型解析河北南部城市的霾污染来源 [J]. 环境科学学报, 2012, **32** (10): 2559-2567.

[48] 程念亮, 徐峻, 何友江, 等. 我国东部沿海春季主要大气污染物垂直分布及来源模拟研究 [J]. 环境工程技术学报, 2013, **3** (4): 323-330.

[49] 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.

[50] Sun Y L, Zhang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40** (10): 3148-3155.

[51] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36** (26): 4223-4234.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2014 年 9 月 26 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 13 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行