

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析

廖志恒¹, 范绍佳^{1*}, 黄娟^{1,2}, 孙家仁^{1,3}

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 湘潭市气象局, 湘潭 411100; 3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 2013年10月21~31日长株潭城市群经历了一次持续性空气污染过程。利用地面空气质量监测资料、地面气象资料及探空资料综合分析了此次污染过程与大气环流、边界层气象条件之间的相互关系, 并利用卫星遥感火点监测资料和HYSPLIT4模式, 分析了此次过程大气污染物的来源及输送路径。结果表明, 过程前期(21~26日), 污染物缓慢积累, 过程后期(27~31日), $PM_{2.5}$ 、CO、 NO_2 等焚烧特征污染物浓度急剧升高, 秸秆焚烧污染物的长距离输送是后期空气污染加重的主要原因。火点监测和后向轨迹分析表明, 过程前期气流主要流经长株潭城市群东北方向的安徽、湖北等地, 流经地区火点分布较少, 后期气流主要流经长株潭城市群东南方向的江西等地, 流经地区火点分布较多。高压均压场背景环流导致的稳定大气层结、南北冷暖气流对峙造成的地面静小风, 是长株潭城市群污染过程发展、维持和加强的重要条件, 污染物长距离输送对长株潭城市群区域空气质量有重要影响。

关键词: 空气污染过程; 稳定层结; 秸秆焚烧; 长距离输送; 长株潭城市群

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4061-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.004

Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013

LIAO Zhi-heng¹, FAN Shao-jia¹, HUANG Juan^{1,2}, SUN Jia-ren^{1,3}

(1. School of Environmental Science and Engineer, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Xiangtan Meteorological Bureau, Xiangtan 411100, China; 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area experienced a typical multi-day pollution event in October 2013. Based on the air pollution index, conventional pollutants observations, surface meteorological observations and sounding data, the relationships of air pollution, large-scale circumfluence and boundary layer meteorology of this event were comprehensively analyzed. Additionally, the sources and transport paths of pollutions were investigated by application of satellite remote sensing data and HYSPLIT4 model. The results showed that pollutants gradually accumulated in the earlier stage of the event (October 21th to 26th), while in the later stage (October 27th to 31th) the characteristic pollutants of crop residue burning ($PM_{2.5}$, CO, NO_2) sharply increased. The deterioration of air quality in the later stage was mainly related to the remote transport of pollutants caused by straw burning. Analysis of simulations of HYSPLIT4 model and fire spots showed that the currents mainly came from Anhui and Hubei Province in the earlier stage, while in the later stage they were mainly from Jiangxi Province where fire spots were intensively located. Stable atmospheric stratification caused by steady uniform high-pressure field and slight wind due to the confrontation of cold and warm currents greatly contributed to the development, maintainability and reinforcement of the pollution event. The remote transport of pollutants had a significant impact on ambient air quality of Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area.

Key words: air pollution event; stable atmospheric stratification; straw burning; remote transport; Chang-Zhu-Tan Metropolitan

随着经济规模迅速扩大、城市化进程的快速发展、耗煤量和机动车拥有量等不断增加,我国部分城市地区空气污染正从单一的煤烟型污染转向复合型污染,以细粒子、臭氧污染为主要特征的区域性、复合型大气污染问题突出^[1~6]。京津冀、长三角、珠三角等城市群地区气溶胶污染日趋严重,灰霾天气增多^[7~12],灰霾问题已引起政府、公众及学者的广泛关注。

现有不同地区空气污染特征、不同灰霾污染过

程与形成机制等的研究表明:空气污染与能见度、相对湿度、气温、日照时数、降水量、地面风向和风速、近地层逆温等诸多气象因子密切相关^[13~19];灰霾污染过程气溶胶组成复杂,气溶胶水溶性离子

收稿日期: 2014-04-13; 修订日期: 2014-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275017); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306042); 中央高校基本科研业务费专项(13lgjc09)

作者简介: 廖志恒(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境, E-mail: lzhiheng118@163.com

* 通讯联系人, E-mail: eesfsj@mail.sysu.edu.cn

成分在灰霾形成中起到重要作用^[20~25]；部分城市和区域不仅受局地源的影响,还很大程度上受沙尘暴、秸秆焚烧等污染物长距离输送的影响^[26~28]。

长株潭城市群位于湖南省中东部,包括长沙、株洲、湘潭这3座城市,是我国中部新崛起的城市群之一。3城市呈“品”字形分布于罗霄山脉与雪峰山脉之间的湘江谷地,为气流交汇地区,易形成3城市间大气污染的相互迭加,导致区域性的空气污染。

2013年10月21~31日,长株潭城市群经历了一次严重的持续性空气污染过程。本研究利用地面空气质量监测资料、地面气象资料、探空资料、卫星遥感火点监测资料、HYSPLIT4后向轨迹分析等对这次空气污染过程进行分析,探讨了长株潭城市群持续性污染过程的形成机制及污染物长距离输送的影响。

1 材料与方法

本研究所使用的资料包括2013年10月长沙、株洲、湘潭这3市逐日的API数据和逐时的空气质量监测数据,数据分别源自湖南省环境保护厅网站(<http://www.hbt.hunan.gov.cn/>)和湖南空气质量实时发布系统网站(<http://222.247.51.155:8025/>)。湖南空气质量实时发布系统实时发布长株潭城市群24个监测子站的空气质量监测数据,本研究主要摘录了其中4个监测子站监测资料(包括 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO、 O_3 、 NO_2 、 SO_2 浓度),分别为长沙市沙坪站(S1)、长沙市雨花区站(S2)、株洲市监测站(S3)和湘潭市监测站(S4),其中沙坪站位于长沙市北部郊区,雨花区站位于长沙市城区南部,株洲市监测站位于株洲市中心城区,湘潭市监测站位于湘潭市城区南部,4站点位置具体分布情况见图1。

气象资料主要包括2013年10月湘潭地面站(S5)气象观测资料和长沙探空站(S6)观测资料(站点分布见图1),资料分别来自湘潭市气象局和相关网站(<http://weather.uwyo.edu/>),其中地面资料主要包括逐时的温度、风速、风向、湿度、能见度等气象参数,探空资料包括每日08:00和20:00的风速、风向、温度资料。此外,卫星遥感火点监测资料来自国家卫星气象中心网站(<http://nsmc.cma.gov.cn/>);驱动HYSPLIT4模式的气象数据选用GDAS数据库(全球数据同化系统,Global Data Assimilation System)中的相关资料,数据水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,时间分辨率为6 h。

HYSPLIT4模式为欧拉和拉格朗日混合型轨迹

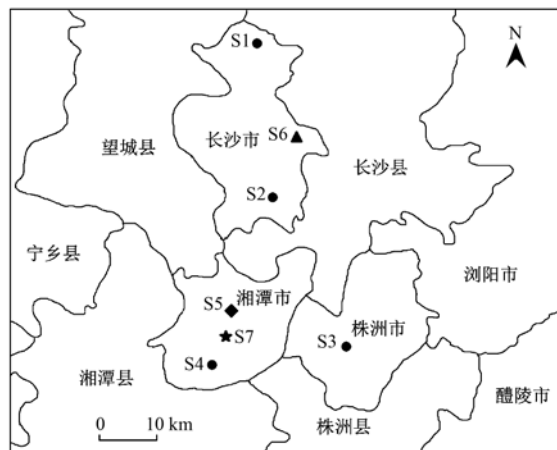


图1 长株潭城市群监测站点分布示意

Fig. 1 Map of Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area and observation sites

模式,可进行气流后向轨迹模拟。该模式有多种气象输入场、物理过程和不同类型排放源,拥有较完整的输送、扩散和沉降过程,被广泛应用于大气输送研究及污染过程分析。本模拟过程轨迹终点设为湘潭(S7, $N 27^\circ 49'$, $E 112^\circ 56'$,位置见图1),预设100 m、500 m和1 000 m这3个终点高度。

2 结果与分析

2.1 污染过程与污染物浓度变化特征

2013年10月21~31日长株潭城市群经历了一次严重的持续性空气污染过程,首要污染物为颗粒物(PM),单站 $PM_{2.5}$ 小时浓度最高达 $1\,267\ \mu g \cdot m^{-3}$ 。长株潭3市的空气污染指数(API)自21日开始接近或超过100,基本达到污染状态,此后维持在100以上,直到30日上午出现冷锋降水(总降水量约8 mm),受冷空气和降水冲刷影响,3市API才逐渐回落,污染过程趋向结束。图2给出21~31日长沙沙坪站、长沙雨花区站、株洲市监测站、湘潭市监测站这4个站点的 $PM_{2.5}$ 浓度变化,以及湘潭市监测站的气态污染物(CO、 O_3 、 NO_2 和 SO_2)浓度变化。

由图2(a)可看出,污染过程前期(21~26日),4站点 $PM_{2.5}$ 浓度基本均在 $150\ \mu g \cdot m^{-3}$ 附近同步小幅波动,呈缓慢积累趋势;过程后期(27~31日),4站点 $PM_{2.5}$ 浓度在27、29、30日的夜间急剧飙升,呈3次显著峰值,且各站峰值浓度存在明显差异。27、29日凌晨峰值段,沙坪站、湘潭市监测站浓度明显比雨花区站、株洲市监测站浓度高,而30日凌晨峰值段,各站浓度基本达同一水平,造成这一差异的原

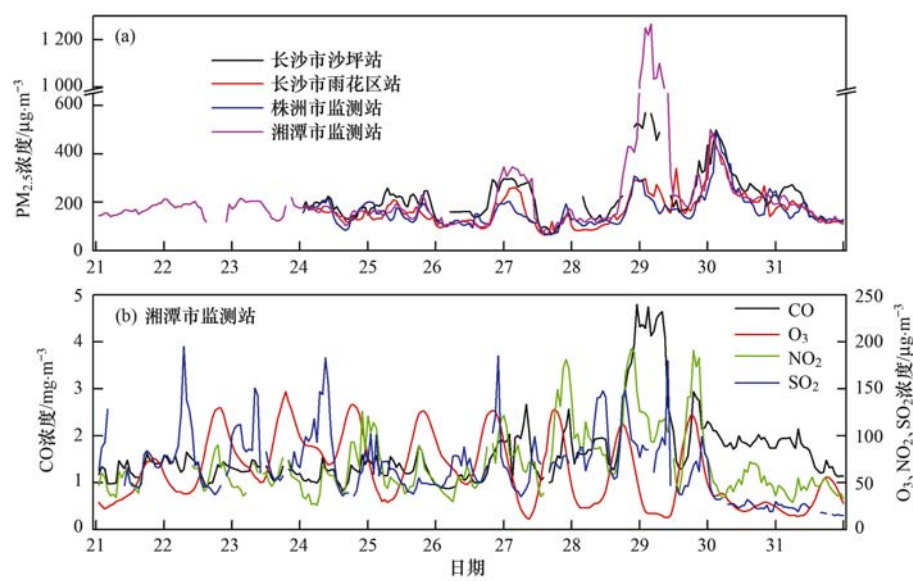


图 2 2013 年 10 月 21 ~ 31 日长株潭城市群部分测站污染物浓度变化

Fig. 2 Variations of the concentration of air pollutants during October 21th to 31th in selected observation sites

因在后文有详细探讨. 过程前、后期各站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异较大,表 1 给出了前、后期各站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的对比. 从中可知,污染过程前、后期 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大值均出现在湘潭市监测站,最高浓度均值则分别出现在长沙市沙坪站和湘潭市监测站;整个区域前期 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值为 $161\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,后期为 $228\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

由图 2(b)可看出,各气态污染物变化趋势差异较大. CO 浓度变化与 $\text{PM}_{2.5}$ 比较一致,过程最大峰

值出现在 28 日 22:00,峰值浓度为 $4.79\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; NO_2 浓度变化与 $\text{PM}_{2.5}$ 也具有较好的正相关性,但浓度峰值出现较 $\text{PM}_{2.5}$ 早 3 ~ 5 h,分别在 27 日 21:00、28 日 20:00、29 日 18:00 达到峰值,浓度均在 $180\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上; O_3 是光化学产物,其浓度呈明显的日变化,29 日后,由于天气转阴 O_3 浓度迅速下降并维持低值; SO_2 浓度呈无明显规律的波动,29 日后,由于降水的冲刷,浓度也迅速下降.

表 1 各站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Comparison of the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in selected observation sites/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

站点	前期最大值	后期最大值	前期均值	后期均值
长沙市沙坪站	299	570	190	250
长沙市雨花区站	214	485	146	188
株洲市监测站	218	489	147	177
湘潭市监测站	346	1 267	162	295
区域	346	1 267	161	228

2.2 污染物来源解析

杨晴等^[29]对长株潭城市群大气颗粒物的监测研究表明,作为背景点的沙坪站,其颗粒物浓度基本是城中站浓度的 1/2 ~ 2/3. 而此次污染过程沙坪站颗粒物浓度明显较城中站高,表明此次过程污染物主要来源可能并非只有城市源. 此次污染过程污染时段在 10 月下旬,正值长江中下游地区水稻秋收时节,水稻秸秆产生后的就地焚烧会释放大量的大气污染物,城市群周边地区秸秆焚烧产生的污染物输送,可能是造成此次污染的重要原因.

一定时期内,城市源对大气颗粒物、气态污染

物的贡献比例相对稳定. 对城市大气污染源来说, PM 、 CO 与 SO_2 排放有较大相似性,其浓度存在明显正相关^[30,31]. 而秸秆焚烧产生的大气污染物却存在明显差异,水稻秸秆焚烧 PM 和 CO 排放因子分别为 $6.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $72.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, SO_2 排放因子仅为 $0.147\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[32]. 由于 CO 与 SO_2 排放量对秸秆焚烧敏感性的巨大差异,可以用 CO/SO_2 比值来反映稻秸焚烧污染的污染过程及剧烈程度,当 CO/SO_2 比值上升时,说明稻秸焚烧污染输送在加强,反之则被弱化^[31]. 图 3 给出 16 ~ 31 日湘潭市监测站 CO/SO_2 比值和 $\text{PM}_{2.5}/\text{SO}_2$ 比值变化.

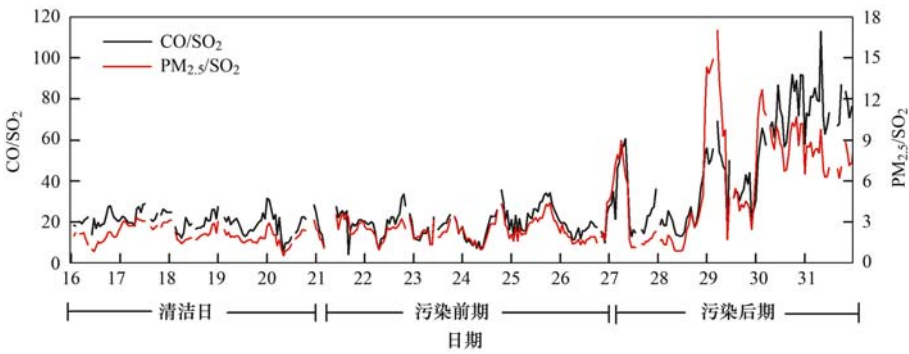


图3 2013年10月16~31日湘潭市监测站 CO/SO₂ 比值和 PM_{2.5}/SO₂ 比值变化

Fig. 3 Variations of the CO/SO₂ ratio and PM_{2.5}/SO₂ ratio during October 16th to 31th in Xiangtan observation sites

从图3可见,PM_{2.5}/SO₂ 比值变化和 CO/SO₂ 比值变化十分类似. 从 CO/SO₂ 比值变化曲线来看,清洁日期间(16~20日)CO/SO₂ 比值在20附近变化较小,可判定污染物主要来自城市源;污染过程前期(21~26日)CO/SO₂ 比值仍在20附近波动,与清洁日期间无明显差异,表明此时段污染物浓度的升高主要是由于城市局地污染物的积累所致;污染过程后期(27~31日),CO/SO₂ 比值大幅度上升,27日00:00的CO/SO₂ 比值仅为28,至07:00飚升至60,是清洁日和污染前期CO/SO₂ 比值均值的3倍,29日04:00的CO/SO₂ 比值出现峰值为69,达清洁日和污染前期CO/SO₂ 比值均值的3.5倍,30日后CO/SO₂ 比值维持60以上的高值,主要受稻秸焚烧污染贡献影响;此外,30日后CO/SO₂ 比值持续高值还与降水有关,30~31日,长株潭城市群及外围大范围区域均有阵性小雨,一方面城市群局地SO₂

溶于雨水被清除掉,另一方面小雨造成外围地区秸秆的不完全燃烧释放更多的CO,向城市群区域输送. 根据CO/SO₂ 比值和PM_{2.5}/SO₂ 比值在清洁日和污染过程前、后期的显著差异,结合CO、SO₂ 和PM_{2.5}浓度变化情况,参考李令军等^[31]的方法,量化污染过程后期稻秸焚烧污染物的输送贡献可知:27~29日稻秸焚烧排放的CO、PM_{2.5}输送量可达城市群地排放量的近2~3倍,折算成浓度,29日凌晨污染峰值时段污染物输送对湘潭市大气CO、PM_{2.5}浓度贡献分别约为1.48 mg·m⁻³和800 μg·m⁻³.

图4给出利用后向轨迹模式HYSPLIT4,结合GDAS数据库中的相关资料,计算25日08:00和29日08:00湘潭市上空气流的72 h后向输送轨迹.

从图4气流的后向输送轨迹可以确定污染过程前、后期污染气流的来源:污染过程前期[图4(a)],100 m高度气流自淮北地区朝西南方向流向

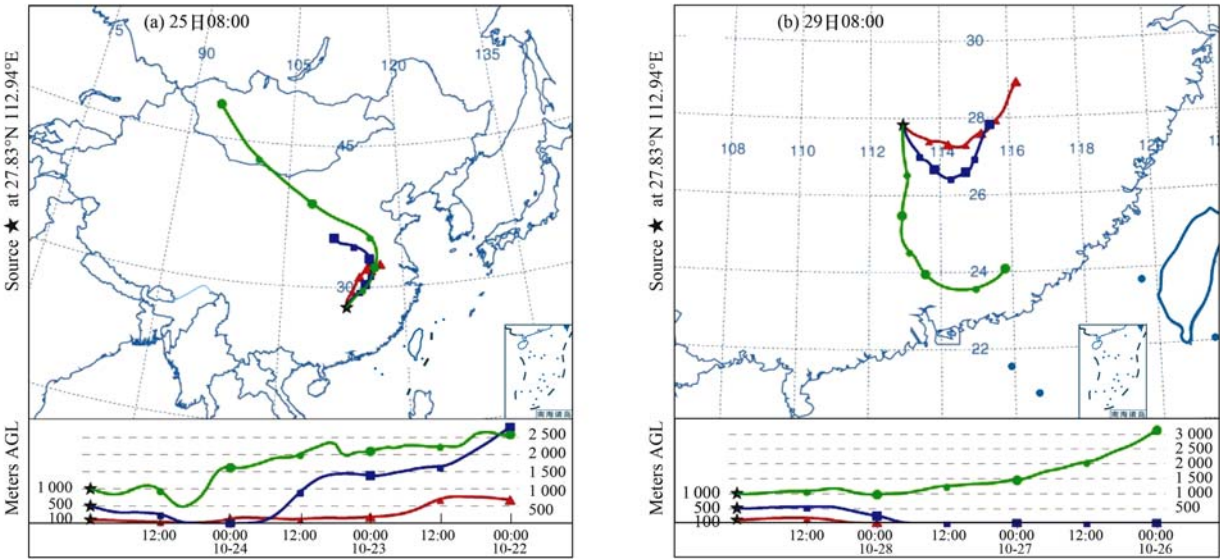


图4 湘潭市上空气流的72 h气流后向输送轨迹

Fig. 4 Currents backward trajectories of Xiangtan

长株潭城市群, 500 m 高度气流自关中地带出发, 向东南移动到淮北地区后折向西南, 缓慢流向长株潭地区, 1 000 m 高度气流源自蒙古西部的高层大气, 快速移动到淮北地区后, 转向西南, 流向长株潭城市群上空; 污染过程后期[图 4(b)], 不同高度的气流后向轨迹路径差别较大, 100 m 和 500 m 高度的气

流路径较为接近, 气流均自江西东北部低层出发, 先西南向流动到江西省中南部地区, 再折为西北向缓慢移至长株潭城市群上空; 1 000 m 气流自广东高层出发, 越过南岭向北进入长株潭城市群上空。

图 5 给出 21 ~ 31 日 FY-3 卫星遥感监测的火点分布。

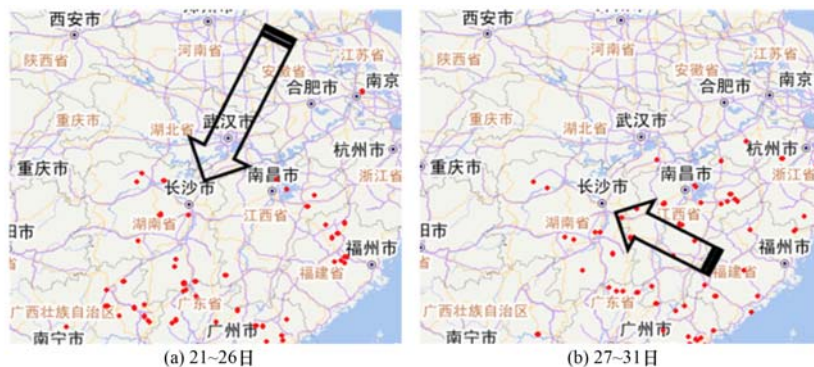


图 5 FY-3 卫星遥感监测的火点分布

Fig. 5 FY-3 satellite image of fire spots

结合图 4 和图 5 可见, 过程前期气流流经地区(安徽、湖北)火点较少, 表明过程前期秸秆焚烧污染物的长距离输送量较小; 过程后期气流流经地区(江西、湖南东部)火点明显增多, 作物秸秆焚烧释放大量的污染物被流经气流裹挟输送到长株潭城市群, 与局地污染物相汇聚, 在不利扩散的气象条件下快速积累, 造成污染物浓度的急剧飙升。

从过程前、后期长株潭城市群污染物浓度变化及气流输送路径可知, 污染物长距离输送对长株潭城市群区域空气质量有重要影响。值得注意的是, 由于后向轨迹模式 HYSPLIT4 的局限性以及 GDAS 数据较低时间分辨率的原因, 所模拟的气流后向轨迹存在一定的不确定性。HYSPLIT4 对平坦地区的气流轨迹模拟较好, 而长株潭城市群处于湘江河谷, 周围地区以丘陵地形为主, 因此低层(100 m)气流轨迹的模拟可能存在偏差; 过程后期, 研究地区处于南北冷暖空气对峙、风向转变频繁阶段, 采用 6 h 分辨率的数据计算后向轨迹可能带来较大误差。这些不确定性可能在一定程度上影响分析结果, 因此有必要在以后的工作中作进一步的研究。

2.3 污染气象条件分析

污染物的高浓度积累除了跟局地源和污染长距离输送有关外, 还与天气系统及气象条件密切相关, 天气稳定的均压场是形成我国中尺度乃至大尺度重污染的主要天气系统^[33~35]。

图 6 给出此次污染过程中 22、25、28、31 日

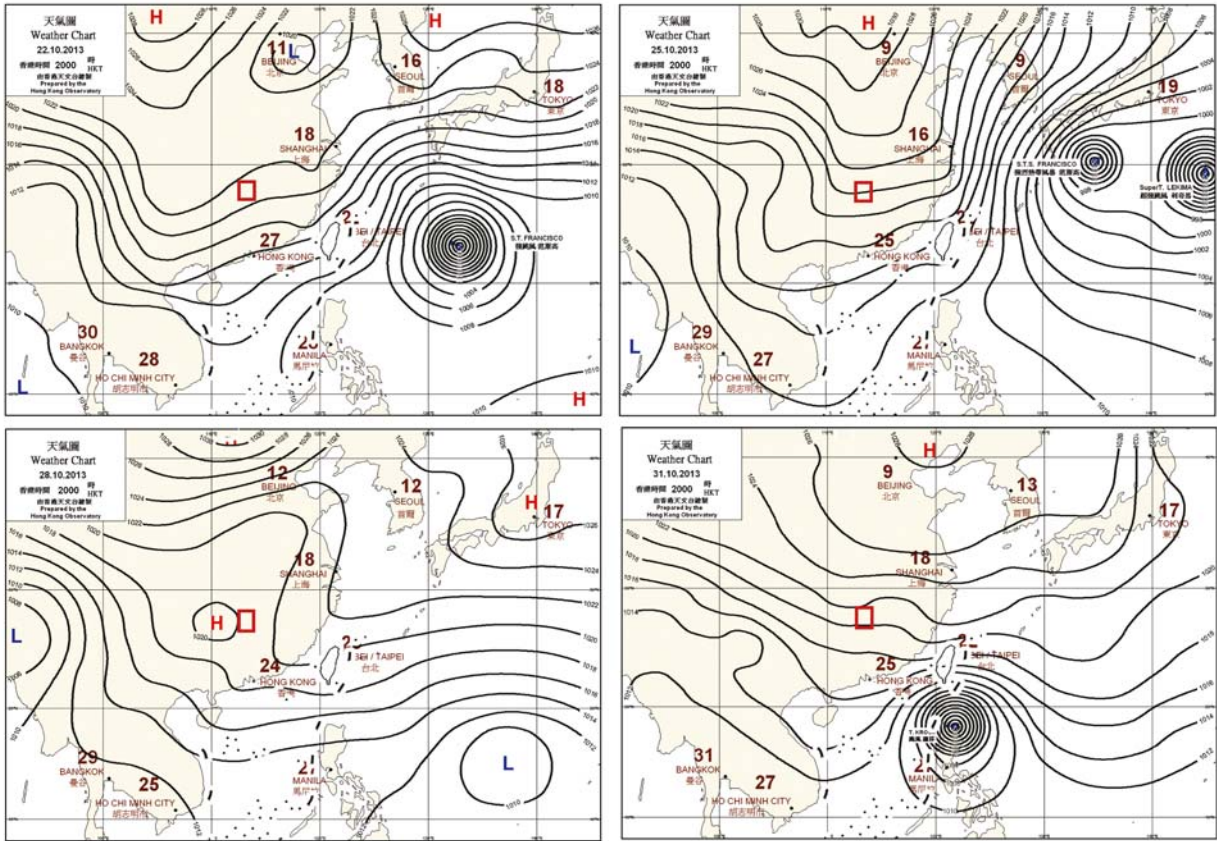
20:00 的东亚地面天气。

从图 6 的地面天气图变化可见: 过程前期, 长株潭城市群受高压脊控制; 过程后期, 随着高压脊东移变性和北方弱冷空气的补充, 在长株潭附近地区形成弱高压中心, 长株潭城市群地面等压线稀疏, 为持续稳定的均压场, 直到过程末期冷锋到达后均压场遭破坏, 伴随的降水和大风天气使污染过程结束。

整个污染过程长株潭城市群持续受高压控制, 稳定的高压均压场是此次污染过程发展、维持与加强的重要条件。特别是后期弱高压控制的下沉气流易形成近地层下沉逆温, 抑制混合层的发展, 使污染物在近地层积聚。同时由于高压强度较弱, 周边地区等压线分布稀疏, 气压梯度力较小, 不易形成足够大的地面风速, 因此污染物的水平稀释扩散能力较弱, 造成污染物大量累积。

在气象条件中, 静小风是造成污染物高浓度的最重要条件之一。图 7 给出了 21 ~ 31 日湘潭 $PM_{2.5}$ 浓度与地面风速、风向的变化。

从图 7 可见: 过程前期, 湘潭地面风速除午后稍大外, 其它时刻基本小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 与风速相对应, $PM_{2.5}$ 浓度在风速较大的午后时刻降低, 在风速较小的夜间增加, 总体呈缓慢累积态势; 过程后期, 地面风速进一步减小, 静小风出现频率增加, 风向转换频繁, 在静小风条件出现时, $PM_{2.5}$ 浓度急剧飙升, 出现污染峰值。



红色方框部分为长株潭城市群所在区域

图 6 东亚地面天气

Fig. 6 Surface weather patterns over the eastern Asia

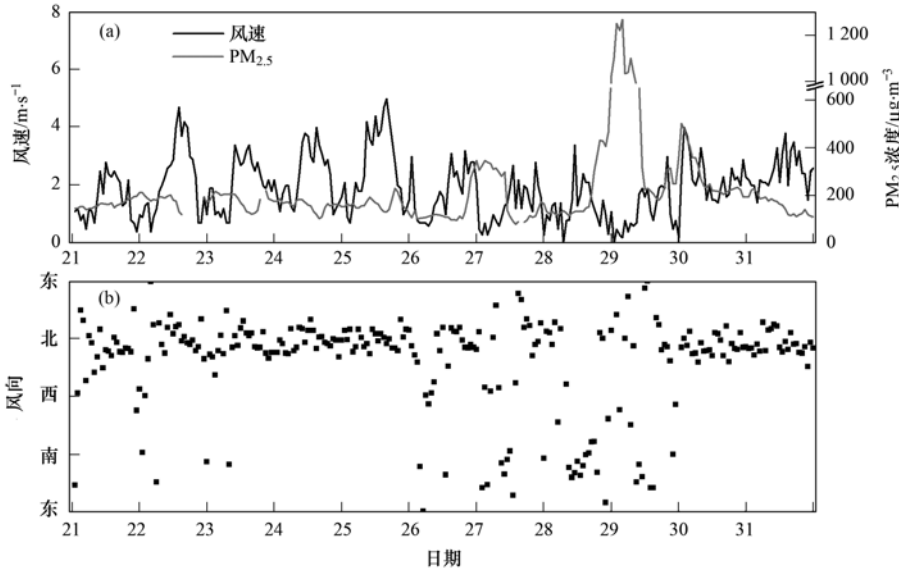


图 7 2013 年 10 月 21 ~ 31 日湘潭 $PM_{2.5}$ 浓度与地面风速、风向的变化

Fig. 7 Variations of the concentration of $PM_{2.5}$, surface wind speed and wind direction during October 21th to 31th for Xiangtan

前文分析指出污染峰值段各站 $PM_{2.5}$ 浓度呈现较大差异,这可能与静小风条件下局地影响显著有关;27~29 日,地面风速基本维持静小风,由于受周

围地区稻秸焚烧污染物输送影响,城市群外围监测站(沙坪站和湘潭市监测站)受污染物输送影响可能更大,所以监测到的峰值浓度更高;30 日受地面

风速增大的影响, 秸秆焚烧污染物输送的局地差异性减小, 因此各站峰值浓度比较接近。

图 8 给出了 21 ~ 31 日长沙探空站每日 08:00、20:00 的风廓线变化。

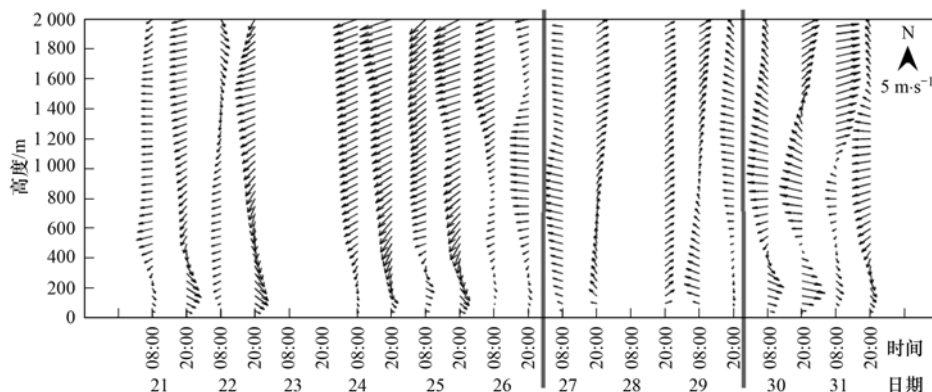


图 8 2013 年 10 月 21 ~ 31 日长沙风廓线

Fig. 8 Variations of wind profile during October 21th to 31th in Changsha

从图 8 可见, 过程前期 (21 ~ 26 日), 受高压脊控制, 天气稳定, 风速垂直变化较小, 在 300 m 左右存在明显的风切变; 高层以东北风为主, 风速无明显昼夜变化, 低层以西北风为主, 白天风速较小, 夜间风速增大, 并在 200 m 高度出现低空急流。自 27 日起, 风速风向开始出现明显的变化, 27 日 08:00, 整层转为东南风, 经过自上而下的调整后, 到 28 日 20:00, 整层转为西南风。30 日, 冷锋到达, 低层由西南风转为西北风, 高层由西南风转为东南风, 至 31 日 20:00 整层基本重新调整为偏北风。显而易见, 27 ~ 29 日风向转变频繁, 这是南北冷暖气流交锋对峙的结果。

有关研究表明^[36~38]: 气流对峙过程中, 会造成整层风速减小, 近地层出现静小风频率增高, 致使污染物的水平扩散能力减弱, 污染物扩散不开而造成高浓度的累积。从长沙风廓线上可以清晰地看到, 受气流对峙影响, 27 ~ 29 日整层风速明显减小, 特别是 29 日 20:00 的 600 m 以下风速极小, 长株潭城市群在 29 日夜间也达到了污染峰值。

近地层出现逆温不利于污染物的垂直扩散。逆温层的持续时间、强度和厚度对污染物垂直扩散有直接影响。图 9 给出 2013 年 10 月 21 ~ 31 日长沙探空站的温度廓线变化。

从图 9 可见, 污染过程期间近地层逆温出现频

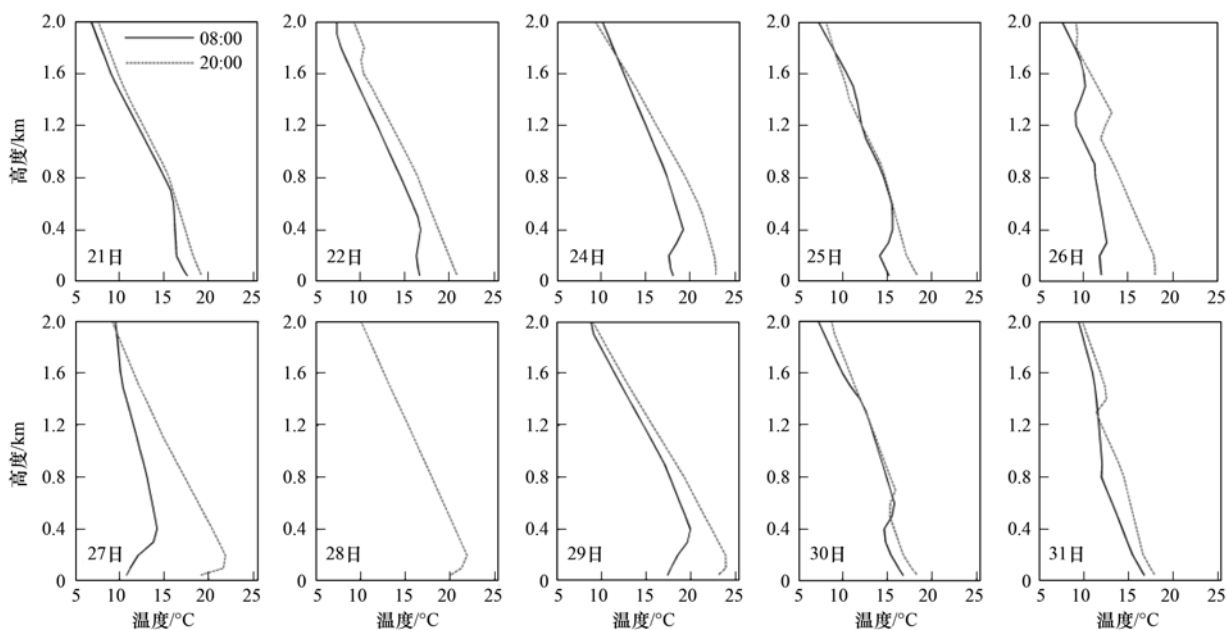


图 9 2013 年 10 月 21 ~ 31 日长沙温度廓线

Fig. 9 Variations of temperature profile during October 21th to 31th in Changsha

繁,层结稳定. 21 日 08:00,近地面虽未观测到贴地逆温,但 200~700 m 高度间为等温层. 22~24 日 08:00,近地层 200~400 m 间存在明显的逆温,夜间贴地逆温高度可达 400 m,但逆温强度不大,持续时间不长. 25~26 日,受弱冷空气的影响,长沙近地层温度下降,夜间近地层仍出现 300~400 m 高的贴地逆温. 26 日后,随着气温的回升,夜间贴地逆温愈加强盛,27~29 日持续出现贴地逆温,逆温层顶在 350 m 左右,地面和逆温层顶温差达 4℃,逆温强度大. 与 21~26 日相比,27~29 日的贴地逆温持续时间更长、强度更大,更不利于污染物在垂直方向的扩散. 30 日起,受冷空气和降水影响,贴地逆温消失,但 400~600 m 间有残留逆温存在,31 日低层逆温消失,高层出现锋面逆温.

3 结论

(1)该污染过程的主要特点是过程前期城市排放污染物缓慢积累,过程后期秸秆焚烧特征污染物 PM_{2.5}、CO、NO₂ 等浓度急剧升高.

(2)高压均压场背景环流导致的稳定大气层结、南北冷暖气流对峙造成的地面静小风,是长株潭城市群污染过程维持和加强的重要气象条件.

(3)秸秆焚烧污染物的长距离输送是过程后期空气污染加重的直接原因. 过程前期气流主要流经长株潭城市群东北方向的安徽、湖北等地,流经地区火点分布较少,后期气流主要流经长株潭城市群偏东南方向的江西等地,流经地区火点分布较多.

(4)污染物长距离输送对长株潭城市群区域空气质量有重要影响.

参考文献:

- [1] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [2] Li L, Huang C, Huang H Y, *et al.* An integrated process rate analysis of a regional fine particulate matter episode over Yangtze River Delta in 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **91**: 60-70.
- [3] Wang L T, Wei Z, Yang J, *et al.* The 2013 severe haze over southern Hebei, China: model evaluation, source apportionment, and policy implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**: 3151-3173.
- [4] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 1-11.
- [5] Gao J, Chai F H, Wang T, *et al.* Particle number size distribution and new particle formation (NPF) in Lanzhou, Western China [J]. *Particuology*, 2011, **9**(6): 611-618.
- [6] Gao J, Chai F H, Wang T, *et al.* Particle number size distribution and new particle formation: New characteristics during the special pollution control period in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(1): 14-21.
- [7] Xu J, Zhang Y H, Fu J S, *et al.* Process analysis of typical summertime ozone episodes over the Beijing area [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **399**(1-3): 147-157.
- [8] An X, Zhu T, Wang Z, *et al.* A modeling analysis of a heavy air pollution episode occurred in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**: 3103-3114.
- [9] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. *热带气象学报*, 2007, **23**(1): 1-6.
- [10] 高健, 张岳翀, 王淑兰, 等. 北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(11): 1201-1207.
- [11] 朱佳雷, 王体健, 邢莉, 等. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(12): 1943-1950.
- [12] 马井会, 张国珽, 耿福海, 等. 上海地区一次典型连续浮尘天气过程分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 584-593.
- [13] Li Y L, Deng J J, Mu C, *et al.* Vertical distribution of CO₂ in the atmospheric boundary layer: Characteristics and impact of meteorological variables [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **91**: 110-117.
- [14] Ji D S, Wang Y S, Wang L L, *et al.* Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 338-348.
- [15] Wu M, Wu D, Fan Q, *et al.* Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the Pearl River Delta in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**: 10755-10766.
- [16] Fu Q Y, Zhuang G S, Wang J, *et al.* Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(9): 2023-2036.
- [17] 王飞, 朱彬, 康汉清, 等. 影响南京地区的两次典型空气污染过程分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3647-3655.
- [18] 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): 695-702.
- [19] 刘淑梅, 杨泓, 傅朝, 等. 兰州市冬春两季 PM₁₀ 重度污染的气象条件分析研究[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(5): 80-83.
- [20] Zhang J K, Sun Y, Liu Z R, *et al.* Characterization of submicron aerosols during a month of serious pollution in Beijing, 2013 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**: 2887-2903.
- [21] Lin Z J, Tao J, Chai F H, *et al.* Impact of relative humidity and particles number size distribution on aerosol light extinction in the urban area of Guangzhou [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**: 1115-1128.

- [22] Yue D L, Hu M, Wu Z J, *et al.* Variation of particle number size distributions and chemical compositions at the urban and downwind regional sites in the Pearl River Delta during summertime pollution episodes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**: 9431-9439.
- [23] 胡敏, 赵云良, 何凌燕, 等. 北京冬、夏季颗粒物及其离子成分质量浓度谱分布[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 1-6.
- [24] 洪也, 马雁军, 韩文霞, 等. 沈阳市冬季大气颗粒物元素浓度及富集因子的粒径分布[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(11): 2336-2346.
- [25] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京大气 PM_{2.5} 中微量元素的浓度变化特征与来源[J]. *环境科学*, 2003, **24**(6): 33-37.
- [26] Fu X, Wang S X, Cheng Z, *et al.* Source, transport and impacts of a heavy dust event in the Yangtze River Delta, China, in 2011 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**: 1239-1254.
- [27] 朱彬, 苏继锋, 韩志伟, 等. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(5): 585-592.
- [28] 洪也, 马雁军, 王喜全, 等. 辽宁中部城市群灰霾天气的外来影响——个案分析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(8): 2115-2122.
- [29] 杨晴, 张凯, 柴发合, 等. 长株潭城市群秋季大气颗粒物及其重金属元素污染特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(6): 590-597.
- [30] 王英, 金军, 李令军, 等. 北京市基于 PM₁₀/CO 关系的可吸入颗粒物自然源解析[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1203-1208.
- [31] 李令军, 王英, 张强, 等. 麦秸焚烧对北京市空气质量影响探讨[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2008, **38**(2): 232-242.
- [32] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. *科学通报*, 2007, **52**(15): 1826-1831.
- [33] Wu D, Tie X X, Li C C, *et al.* An extremely low visibility event over the Guangzhou region: a case study [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(35): 6568-6577.
- [34] 李颖敏, 范绍佳, 张人文. 2008 年秋季珠江三角洲污染气象条件分析[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(10): 1585-1591.
- [35] 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.
- [36] Fan S J, Wang B M, Tesche M, *et al.* Meteorological conditions and structures of atmospheric boundary layer in October 2004 over Pearl River Delta area [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6174-6186.
- [37] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(增刊): 4-6.
- [38] 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.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryIAc Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行