

南京北郊冬季典型灰霾天气气象成因及来源分析

张园园^{1,2} 刘寿东^{1,2} 曹芳^{1,2*} 张雯淇^{1,2} 刘晓妍^{1,2} 鲍孟盈^{1,2} 章炎麟^{1,2}

(南京信息工程大学气候与环境变化国际合作联合实验室大气环境中心¹ 南京 210044;

南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室² 南京 210044)

摘要 2015年1月14~28日南京发生了入冬以来最为严重的持续性霾污染事件。利用地面气象资料、后向轨迹分析和污染物浓度数据,结合加强观测实验所获得的3 h高频次PM_{2.5}中有机碳(OC)和元素碳(EC)的数据,分析了此次霾过程的成因和污染物来源。结果表明高压系统和静稳的均压场是观测期间霾过程形成的天气背景。后向轨迹和气态前体物的分析结果显示第一次霾过程的形成受到山西河北境内高污染气团区域传输的影响。第二次霾过程是一次短时局地污染事件,主要是由于低风速和极低的边界层高度等不利的扩散条件导致污染物在近地层的堆积。OC/EC计算结果(7.66)结合卫星火点资料和轨迹分析进一步说明第三次霾过程受到南方生物质燃烧的影响。高相对湿度有利于二次污染物的生成,因而加剧了第四次霾过程的污染程度。CO、SO₂、NO₂与颗粒物浓度显著相关,OC/EC比值范围2.54~11.61,表明化石燃料和生物质燃烧以及汽车尾气排放是此次观测期间霾形成的主要污染源。

关键词 霾 成因分析 PM_{2.5} 气体污染物 碳组分

中图分类号 X513; 文献标志码 B

近年来,由于我国经济规模的不断扩大,人类活动排放的大量颗粒污染物进入大气,造成严重的大气污染,灰霾天气频发。气象学上将霾定义为水平能见度小于10 km、相对湿度小于90%的天气现象^[1]。灰霾天气的发生不仅对大气环境^[2,3]、农业生产^[4]和交通安全^[5]等造成不利影响,更严重威胁人类健康^[6,7],造成重大经济损失^[8,9]。空气中细颗粒物(PM_{2.5},空气动力学直径小于2.5 μm)浓度的日益增加是灰霾天气出现的主要原因^[10]。

不利的天气条件和污染物排放是影响大气污染物浓度上升的两大要素。在污染源一定的情况下,气象条件是决定大气污染物浓度短时变化的主要因

素^[11,12]。Zhang等^[13]对2013年1月中国东部发生的极端大气污染事件的天气特征进行了分析,结果表明弱的冬季风和对流层中层强逆温层的存在导致城市颗粒物的大量堆积。Xu等^[14]分析了中国北方气态污染物与气象条件之间的关系,结果表明污染气体浓度与地面风速呈较强的相关性。Quan等^[15]利用基于微脉冲雷达观测研究发现行星边界层结构的变化与气溶胶质量浓度之间存在负相关关系。SO₂和NO₂是PM_{2.5}中主要水溶性离子SO₄²⁻和NO₃⁻的重要气态前体物,朱彤等^[16]的研究结果表明SO₂和NO₂等一次排放的污染气体在大气颗粒物表面的非均相反应与颗粒物的粒径、质量浓度以及吸湿特性呈正反馈机制,而O₃在这一过程中可以作为重要的氧化剂,促进SO₂向颗粒态的转化。SO₂主要产生于化石燃料的燃烧过程;NO₂主要产生于汽车尾气排放和石油等化石燃料的燃烧;CO主要产生于煤炭的不完全燃烧和机动车尾气排放,可以作为一次排放源的重要参考物。因此通过分析气态前体物与颗粒物的相关性可大致了解污染物的来源。

碳质气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分,其主要组分有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC)之和占PM_{2.5}质量的20%~50%,部分地区甚至达到80%^[17,18]。OC主要来自污染源的一次排放和气态有机物经过光化学反应的二次生成^[19];而EC主要来自于化石燃料和生物质的不完全燃烧,

2016年12月29日收到 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91644103)和江苏省自然科学基金青年基金(BK20150895)资助
第一作者简介:张园园(1990—),女,硕士研究生。研究方向:城市气象。E-mail: 20141212275@nuist.edu.cn。

*通信作者简介:曹芳(1984—),女,博士,教授。研究方向:大气降水中黑碳颗粒物的来源和季节变化特征。E-mail: caofang@163.com。

引用格式:张园园,刘寿东,曹芳,等. 南京北郊冬季典型灰霾天气气象成因及来源分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(21): 136—144

Zhang Yuanyuan, Liu Shoudong, Cao Fang, et al. The meteorological causes and source analysis of typical haze event during wintertime in Nanjing northern suburb[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(21): 136—144

常用来作为一次人为气溶胶来源的示踪物^[20],OC/EC 比值可用于评估有二次污染源的贡献^[21]。

南京作为长江三角洲中心城市之一,经济发达,人口众多,机动车尾气、工业废气和建筑工地扬尘等各种排放源的增多造成了严重的大气污染问题且成因较为复杂。2015年1月14~28日南京出现了入冬以来持续时间最长污染最为严重的霾污染过程,AQI 指数连续3 d 达到重度污染级别,为了解此次霾过程的形成原因,利用地面气象资料以及南京市环境监测站逐小时污染物数据,并结合对此期间加强观测实验所获得的3 h 高频次 PM_{2.5}及 PM_{2.5}样品中的 OC 和 EC 组分浓度数据,对此次霾过程大气颗粒物来源和成因进行初步探讨,以期揭示灰霾形成的机理并为制定应对措施提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 采样点

此次 PM_{2.5}采样点设在南京信息工程大学农业气象试验站实验楼前的开阔平地(32°12′ E,118°42′ N) 平均海拔约30 m,周围500 m 范围内以农田和学生宿舍为主,地势平坦开阔。南京信息工程大学位于南京市北郊浦口区,观测点以西区域主要为农田,南方约1.5 km 处为龙王山,海拔约100 m。东部为城市和工业混合区,东北10 km 至东南3 km 处汇集了扬子石化、南化集团、南钢集团等重污染企业。因此,本站点代表了南京北郊工业混合区污染状况。

1.2 样品采集

大气颗粒物 PM_{2.5}样品采用国产大流量采样器(KC-1000,青岛崂山)采集,采样流量为1.05 m³/min,样品被采集到石英滤膜(PALL,8×10 IN)上,共采集有105个样品。2015年1月14日13:00~26日13:00,每个样品连续采集3 h;1月26日13:00~28日12:00,每个样品采集时间为6 h。为减少采样过程误差,采样期间进行1次野外空白试验。石英滤膜在采样前置于马弗炉中450℃高温灼烧6 h,待冷却后恒温恒湿条件下平衡48 h,在恒定的温度(20~23℃)和相对湿度(40%~60%)下用电子天平(万级,BS124S,SARTURIUS)进行称重,称重后放入冰箱-24℃保存。

1.3 OC、EC 浓度分析

PM_{2.5}样品中的 OC、EC 浓度采用有机碳元素碳分析仪(Model-4,Sunset Laboratory,美国)进行测定。该仪器采用热光吸收法,分析条件采用 Noish5040 方法,分析原理详见文献[22]。为保证数据质量,每次样品分析前用甲烷注射法检验和标定仪器的内标甲烷峰,并定时检查内标峰面积的变

化,确保其变化系数<5%。同时每周用标准蔗糖溶液(42.07 μg/μL)进行外标,采用内外标联合校正以确保测量结果的准确性。每天分析样品前进行空白测定确保去除炉腔残留杂质,直至 TC 浓度小于1 μg/m³开始正式测样,每10个样品和分析结束时进行重复分析,确保两次 OC 和 EC 分析结果的相对偏差分别小于8%和15%。

1.4 气象数据及气体污染数据

气象数据来自采样点旁大气观测场地面自动气象站,数据包括气温(*T*)、气压(*P*)、相对湿度(*f*_{RH})、风速(*S*_w)、风向(*D*_w)、能见度(*V*_{IS})等。后向气流轨迹分析所用数据下载自美国国家海洋和大气管理局网站 <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>;行星边界层高度(PBLH)为MeteoInfo软件利用下载的同一数据计算得出。地面气压图使用韩国地面天气分析图,来源 <http://222.195.136.24/>。气体污染物数据来自中国空气质量在线监测分析平台 <http://www.aqistudy.cn/>。

2 结果与讨论

2.1 霾过程描述及大气颗粒物变化特征分析

图1为观测期间能见度、相对湿度、PM_{2.5}和 PM₁₀质量浓度逐小时变化曲线。整个观测期间相对湿度小于90%;其中14日和25日为降雨过程,总降雨量分别为11.8 mm 和1.0 mm,1月26~28日受强冷空气影响经历了一次大风降雪过程,降雪量为4.9 mm;1月14~17日和1月24~25日观测场能见度数据缺失,同时参考了南京禄口机场3 h 平均能见度数据。根据霾的定义^[1]除1月14日由于降水造成能见度降低和1月27~28日由于湿沉降作用大气清洁无霾,霾发生的时刻超过整个观测时间的73%,其中1月21~26日 PM_{2.5}浓度连续6 d 超过国家二级标准。

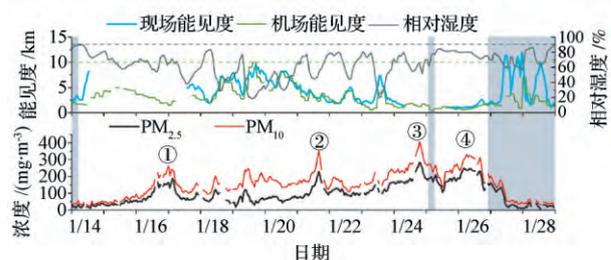


图1 2015年1月14~28日能见度、相对湿度和颗粒物质量浓度时间序列(灰色阴影区表示降水/降雪过程)

Fig. 1 Time series of visibility, relative humidity, and the mass concentration of particles from 14 to 28 January, 2015 (The gray shaded area represents the precipitation process)

由 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征不难发现,观测期间主要经历了4次霾的生消过程,大致划分为:①1月15日~1月17日12:00的第一次霾污染过程, $PM_{2.5}$ 的浓度从14日的最低值 $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 经过缓慢积累,17日3:00达到峰值浓度 $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$,之后快速下降,此次污染过程峰值浓度在4次霾污染阶段中最低;②1月20~22日的第二次霾污染过程, $PM_{2.5}$ 浓度于21日16:00时出现峰值 $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 后迅速

下降,持续时间在四次污染过程中最短;③1月22~25日12:00第三次霾过程,在1月24日19:00 $PM_{2.5}$ 浓度达到整个观测期间的最高值 $284 \mu\text{g}/\text{m}^3$,且持续时间最长;④1月25日12:00~1月27日12:00第四次霾过程, $PM_{2.5}$ 浓度在25日降水过后迅速上升,直至27日冷空气过境快速下降至低值, $PM_{2.5}$ 平均浓度在四次污染过程中最高。颗粒物的其他统计数据见表1。

表1 4次霾污染过程颗粒物数据统计

Table 1 Statistical analysis of particulate matter in 4 haze events

过程	时间	$PM_{2.5}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$				$PM_{10}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$			
		平均值 \pm S. D	最大值	最小值	污染时长占比/%	平均值 \pm S. D	最大值	最小值	污染时长占比/%
①	1.15~1.17	79 \pm 47	190	27	39	116 \pm 65	263	38	28
②	1.20~1.22	99 \pm 38	230	46	69	178 \pm 44	351	125	79
③	1.22~1.25	153 \pm 49	284	84	100	217 \pm 68	407	110	83
④	1.25~1.27	172 \pm 55	250	25	96	225 \pm 71	330	51	85

2.2 霾过程的成因分析

2.2.1 稳定的气压场

通过分析气压场的变化可知,在四次霾过程的发展阶段南京都不同程度的受到高压系统的影响。第一次[图2(a)]和第四次(图略)霾过程较为相似,全国大部分地区受蒙古高压的影响,南京处在冷高压底部的均压场中,等压线稀疏,近地面风力微弱,为近地面颗粒物的堆积提供了有利的天气背景。第二次霾过程(图略)前期华东地区受弱低压影响,500 hPa高空处于西风带大槽前端,气流有较强的辐合上升,扩散条件较好;21日11:00之后逐渐受到北方高压的影响,垂直扩散条件下降,此时污染物浓度快速上升;但随后受高压系统向南挤压等压线变密集,风力加大,扩散条件改善,这可能是第二次霾污染过程持续时间最短的原因。第三次霾过程[图2(b)]前期南京处于高压中心,天气条件稳定,不利于扩散,24日开始受700 hPa高空槽东移影响,且等温线落后于等高线,地面存在逆时针环流,利于高空辐合,对流发展,25日凌晨有弱降水过程发生,颗粒物浓度下降。

2.2.2 气象要素

具体分析各气象要素和 $PM_{2.5}$ 浓度的变化关系(图3)。第一次霾过程中南京处于稳定的均压场中,海平面气压、相对湿度和温度等气象要素变化平稳,10 m高度平均风速 0.7 m/s ,水平扩散条件较差。16日12:00随着边界层抬升,风速加大,扩散条件有所改善,颗粒物浓度没有继续上升。第二次霾过程,在21日上午污染物开始积累的阶段,地面风速接近于 0 m/s ,相对湿度达到70%以上,边界层高度维持在500 m以下。21日午后,随着温度的上升,湍流作用加强,大气边界层高度快速抬升至约

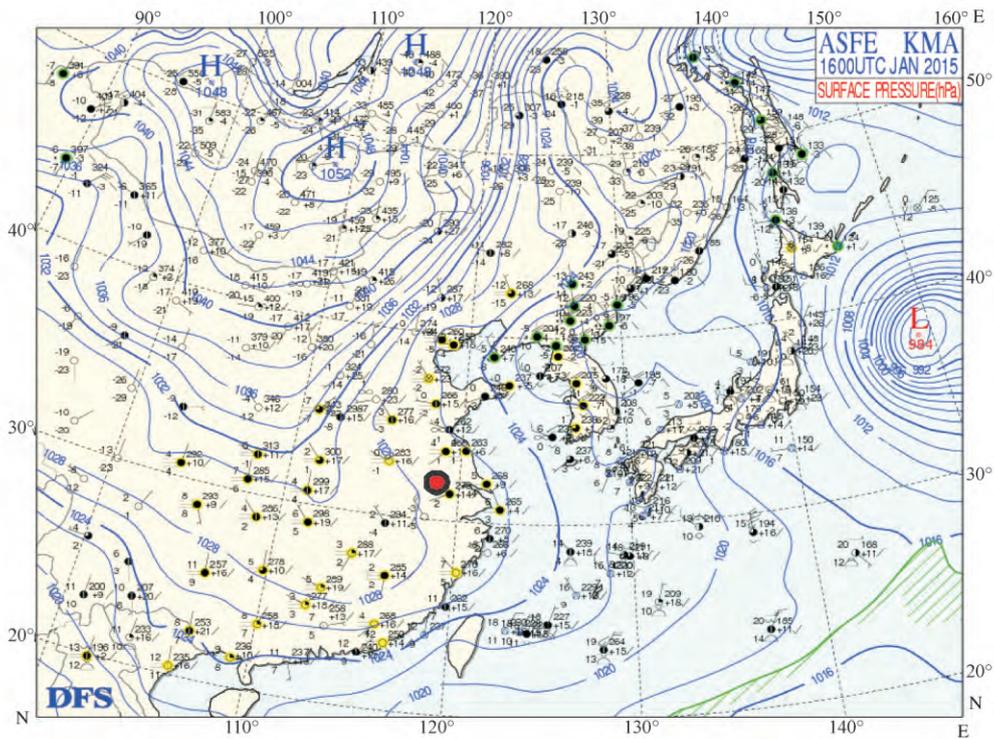
1346 m高度,近地面风速增大(15:00瞬时风速 5.3 m/s),扩散作用的明显改善使颗粒物浓度快速下降。第三次霾过程中,边界层高度一直维持在较低水平,24日最大边界层高度只有374 m,同时温度升高,相对湿度保持在50%以上,极低的大气边界层高度加之有利于二次生成的温湿度条件共同促进了污染物的快速积累。第四次霾过程虽经历了25日的降水过程,但由于降水量较小不足以完全清除大气颗粒物,却为颗粒物的增长提供了有利的高湿环境(平均相对湿度80%)。

综合分析四次霾过程的气象条件可知,在霾形成过程中,静风和极低的边界层高度是颗粒物积累的重要天气条件,较高的相对湿度有利于颗粒物的吸湿性增长和气态前体物的二次转化进一步加重霾的污染水平。

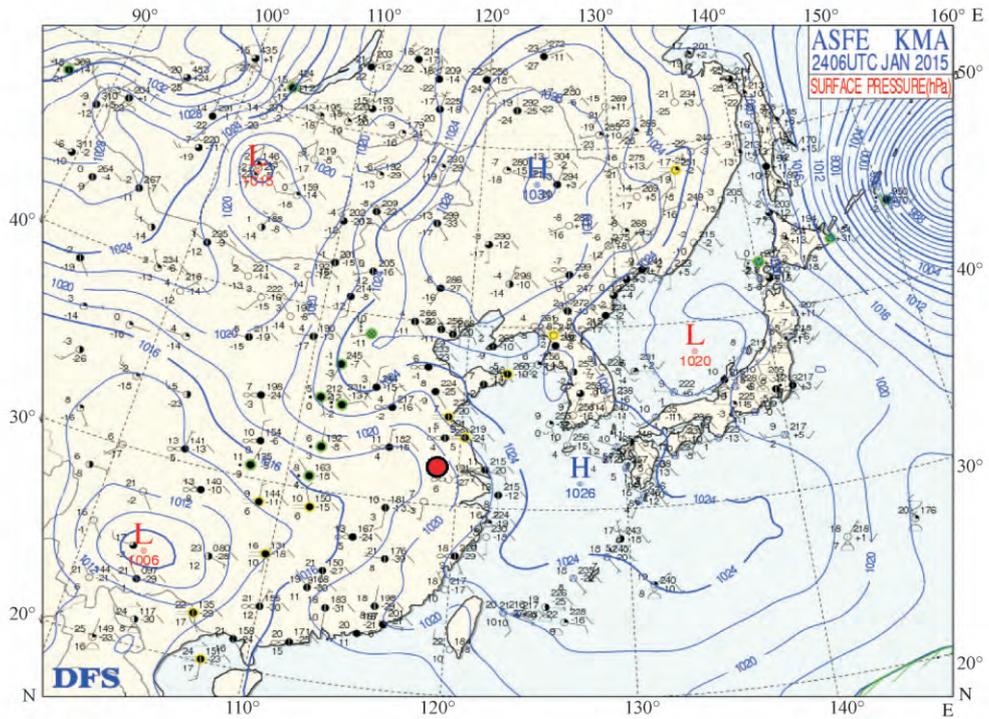
2.2.3 区域传输

在污染物局地排放量短时间内变化较小的情况下,区域传输对空气质量的影响不应被忽略。本文选取了四次霾过程 $PM_{2.5}$ 达到峰值浓度的时刻,利用TrajStat模拟100 m、500 m和1000 m三个高度过去48 h的气团轨迹,结果如图4。图5为后推时段内全国空气质量监测结果(图片来源 <http://www.aqistudy.cn/>)。

第一次霾过程中[图4(a)],高层气团主要来自西北方向污染严重的山西河北境内。第二次霾过程[图4(b)]三个不同高度气流均来自南京周边,所经区域空气质量良好,监测结果显示只有南京本地出现污染天气,表明此次过程是不利的扩散条件导致的局地霾污染事件。第三次霾过程[图4(c)]中,低层大气主要来自污染程度相当的浙江,高层气



(a) 2015 年 1 月 16 日 8:00



(b) 2015 年 1 月 24 日 14:00

图 2 近地面气压场 (红色点为观测点位置)

Fig. 2 Pressure distributions (The red dot represents the observation location)

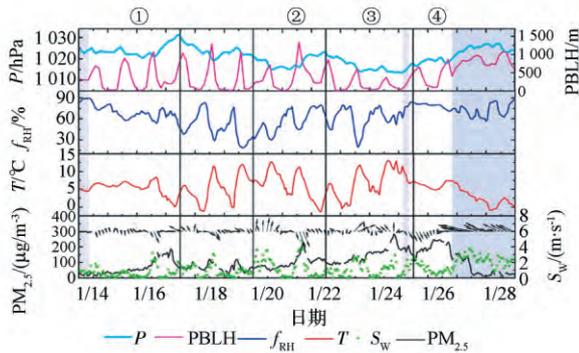


图3 2015年1月14~28日气象因子和PM_{2.5}质量浓度时间变化序列

Fig. 3 Time series of meteorological factors and PM_{2.5} mass concentrations from the January 14 to 28, 2015

团自广东进入南京,所经区域空气质量良好,但卫星火点监测结果显示,此时华南地区出现密集的火点分布,大量的生物质燃烧产物可能随气流进入南京上空影响空气质量。1月26日受静稳天气控制,华中华东地区已经出现了大面积的重污染天气,气流移动缓慢,主要来自江苏境内。

2.3 化学组分分析

2.3.1 气态前体物的转化分析

由观测期间污染物相关性分析结果(表2)可

知 SO₂、NO₂和 CO 与颗粒物 PM_{2.5}、PM₁₀都具有较高的相关性。其中 CO 与 PM_{2.5}、PM₁₀的相关性最好,相关系数分别为 0.79 和 0.87,反应了燃烧源对颗粒物的重要贡献。SO₂、NO₂和 CO 与 PM₁₀的相关系数明显高于与 PM_{2.5}的相关系数,与朱彤^[16]和 Pan^[23]的研究结果一致。

具体分析不同霾污染过程污染物浓度变化趋势(图6)。第一次霾过程,NO₂浓度一直处于较低水平,SO₂浓度短时间内增长了10倍之多,考虑到南京本地的排放源主要分布在观测点东南和东北方向,在主导风向为西北风的情况下,结合气流轨迹分析结果,山西陕西等地重污染气团的输入可能是16日污染过程形成的重要原因。第二次霾过程,SO₂浓度变化平稳,气流轨迹显示无明显区域输送影响,NO₂在1月19~20日夜间出现高值,可能是受到夜间扩散条件下降的影响,而随后浓度的下降应是随着湿度的升高NO₂更多地向颗粒态转化^[16]。第三次霾过程中除O₃外,各污染物变化趋势一致,积累上升过程明显。降水过后CO浓度与颗粒物浓度继续保持一致,SO₂和NO₂浓度迅速下降,除降水的清除作用外,SO₂和NO₂在高湿条件下向颗粒态的转化可能是两者持续低值的原因之一^[16]。

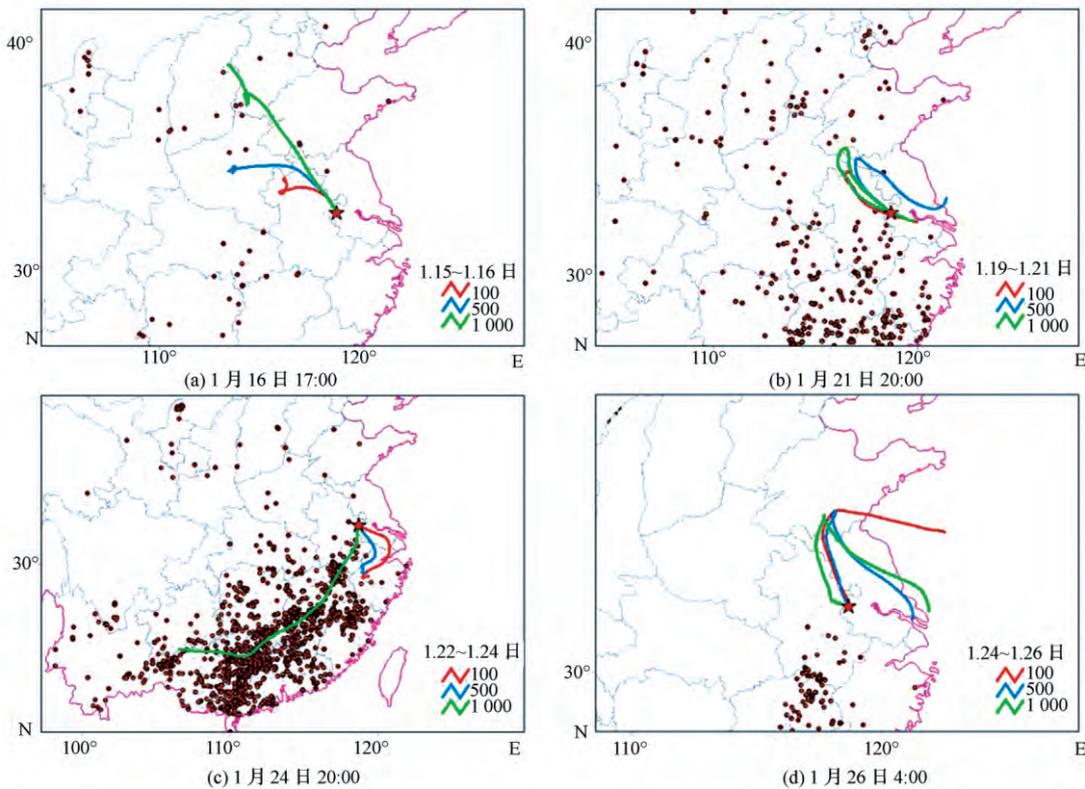


图4 观测期间南京后向轨迹分析

Fig. 4 Backward trajectory analysis of the air mass of Nanjing during the campaign

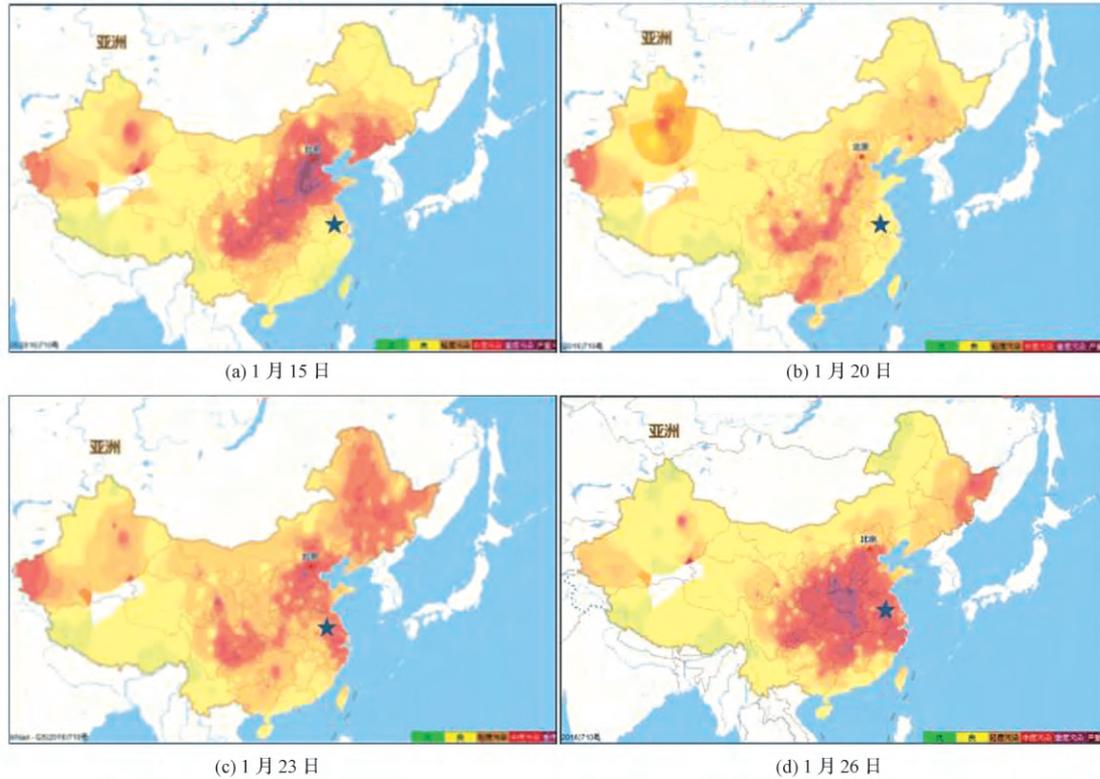


图 5 观测期间不同时段全国 AQI 空间分布(五角星位置为南京)

Fig. 5 Spatial distribution of AQI throughout China during campaign (black star: the location of Nanjing)

表 2 颗粒物与污染气体相关性分析

Table 2 Correlation analysis between particles and contaminated gases

	PM _{2.5}	PM ₁₀	CO	NO ₂	O ₃	SO ₂
PM _{2.5}	1	0.93 **	0.79 **	0.49 **	0.37 **	0.53 **
PM ₁₀		1	0.87 **	0.65 **	0.42 **	0.68 **
CO			1	0.71 **	0.39 **	0.79 **
NO ₂				1	0.63 **	0.73 **
O ₃					1	-0.28 **
SO ₂						1

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

2.3.2 OC 和 EC 分析

图 7 为观测期间 PM_{2.5} 样品中有机碳元素碳分析结果。OC 平均浓度为 19.41 μg/m³, EC 平均浓度为 3.13 μg/m³, OC 与 EC 变化趋势较为一致, EC 质量浓度变化幅度总体较小, 而 OC 浓度随着污染程度的加剧而显著增大。

OC 和 EC 的比值大小可以用来判断碳质颗粒物的来源^[24], 此次观测期间 OC/EC 比值范围 2.54 ~ 11.61, 对比 OC/EC 比值对应的主要排放源(表 3 和表 4) 4 次污染过程主要受到燃煤排放和汽车尾气的影响, 其次为生物质燃烧以及家庭燃气。值得注意的是第三次霾过程 OC/EC 比值 7.66, 与

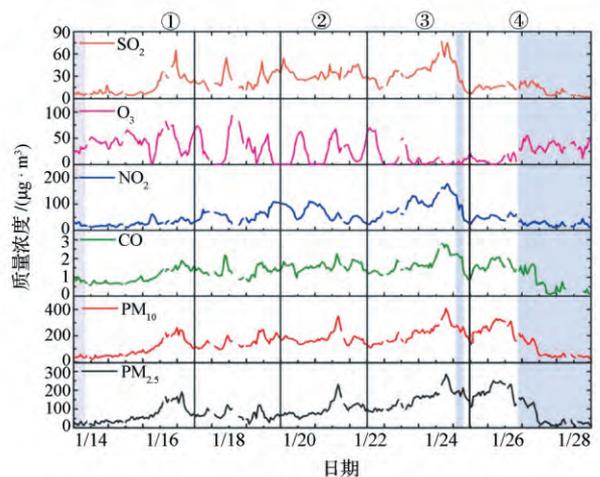


图 6 观测期间大气颗粒物及污染气体质量浓度时间变化序列

Fig. 6 Time series of the mass concentrations of air particles and gas pollutants

Zhang^[25] 同样方法计算秸秆燃烧得到的 OC/EC 比值接近, 进一步说明第三次霾过程受到华南地区生物质燃烧的影响。

一般以 OC/EC > 2 作为二次污染存在的判断依据^[21-22]。根据表 3 的统计结果, 4 次霾污染过程

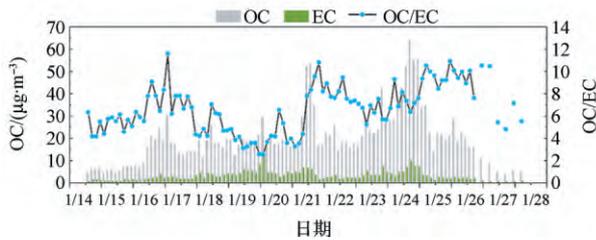


图7 2015年1月14~28日12时PM_{2.5}中OC、EC质量浓度及比值的变化

Fig. 7 Variation of EC and OC mass concentrations of PM_{2.5} and their ratio from January 14 to 28, 2015

OC/EC 均大于 6, 表明 4 次霾过程二次污染显著且第 4 次霾过程最为明显。二次有机碳 (SOC, 计算方法见文献 [26]) 与 OC 的比值在第四次霾过程中最大, 进一步反应出在此阶段有更大比例的二次气溶胶生成。

表3 4次霾污染过程OC、EC及相关数据统计
Table 3 Statistical analysis of OC, EC and SOC in four haze events

过程	OC/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	EC/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	OC/ EC	SOC/ OC
①	14.37 ± 7.11	1.66 ± 0.76	6.69 ± 1.68	0.60 ± 0.09
②	24.66 ± 10.09	4.00 ± 2.13	6.28 ± 2.48	0.54 ± 0.18
③	30.28 ± 12.35	3.77 ± 1.96	7.66 ± 1.33	0.66 ± 0.06
④	23.18 ± 4.92	2.22 ± 0.60	9.25 ± 1.41	0.72 ± 0.06

表4 OC/EC 比值与对应排放源清单
Table 4 List of OC/EC ratios and corresponding emission sources

OC/EC	排放源
1.0 ~ 4.2	柴油和汽油车尾气排放 ^[27, 28]
2.5 ~ 10.5	燃煤排放 ^[29]
7.7	秸秆燃烧 ^[25]
12.7	家庭天然气排放 ^[25]
13.1	地面扬尘排放 ^[25]
16.8 ~ 40.0	木材燃烧 ^[30]
32.9 ~ 81.6	烹饪排放 ^[31]

3 结论

2015年1月14~28日, 南京发生了入冬以来最为严重的持续性霾污染事件, PM_{2.5}日均浓度最高208 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 连续6 d 超过国家二级标准。观测期间主要发生了4次霾的生消过程, 针对不同霾污染过程分别从气象条件、区域传输和化学组分转化方面进行了分析和探讨。

(1) 高压系统和静稳的均压场是观测期间霾过程形成的背景条件, 低风速和极低的边界层高度等

及其不利的扩散条件使局地污染物快速积累, 是第二次霾过程短时形成的主要原因; 高相对湿度有利于二次污染物的生成进而加剧了第四次霾过程的污染程度。

(2) 除不利的气象条件外, 四次霾过程不同程度受到污染物区域传输的影响, 后向轨迹结合气态前体物的分析结果显示山西河北境内高污染气团的输入可能是第一次霾过程形成的重要原因, OC/EC 计算结果(7.66) 结合卫星火点资料和轨迹分析进一步说明第三次霾过程受到华南地区生物质燃烧的影响。

(3) CO、SO₂、NO₂与颗粒物以及OC与EC之间均显著相关, OC/EC 比值范围2.54~11.61, 表明煤等化石燃料的燃烧和汽车尾气排放以及生物质燃烧是此次观测期间霾形成的主要污染源。

参考文献

- 1 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究. 应用气象学报, 2008; 19(1): 1—9
Wu Dui, Liao Guolian, Deng Xuejiao, et al. Transport condition of surface layer under haze weather over the pearl river delta. Journal of Applied Meteorological Science, 2008; 19(1): 1—9
- 2 Tao J, Zhang L, Ho K, et al. Impact of PM_{2.5} chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou—the largest megacity in South China. Atmos Res 135—136. Atmospheric Research, 2014; (S): 135—136(1): 48—58
- 3 Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. Nature, 2001; 409(6821): 695—697
- 4 Chameides W L, Yu H, Liu S C, et al. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: an opportunity to enhance crop yields in China through emission controls. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999; 96(24): 13626—13633
- 5 Mukherjee P, Viswanathan S. Contributions to CO concentrations from biomass burning and traffic during haze episodes in Singapore. Atmospheric Environment, 2001; 35(4): 715—725
- 6 Weber S A, Insa T Z, Hall E S, et al. Assessing the impact of fine particulate matter (PM_{2.5}) on respiratory-cardiovascular chronic diseases in the New York City metropolitan area using hierarchical bayesian model estimates. Environmental Research, 2016; 151: 399—409
- 7 Li H, Wang Q, Min S, et al. Fractionation of airborne particulate-bound elements in haze-fog episode and associated health risks in a megacity of southeast China. Environmental Pollution, 2015; 208(Pt B): 655—662
- 8 Zhou Y, Wu Y, Yang L, et al. The impact of transportation control measures on emission reductions during the 2008 Olympic Games in Beijing, China. Atmospheric Environment, 2010; 44(3): 285—293
- 9 穆泉, 张世秋. 2013年1月中国大面积雾霾事件直接社会经济损失评估. 中国环境科学, 2013; 33(11): 2087—2094
Mu Quan, Zhang Shiqiu. An evaluation of the economic loss due to the

- heavy haze during January 2013 in China. *China Environmental Science*, 2013; 33(11): 2087—2094
- 10 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. *科学通报*, 2013; (13): 1178—1187
Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China. *Chinese Science Bulletin*, 2013; (13): 1178—1187
- 11 Zhao T L, Gong S L, Huang P, *et al.* Hemispheric transport and influence of meteorology on global aerosol climatology. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2012; 12(16): 7609—7624
- 12 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. *环境科学研究*, 2012; 25(11): 1201—1207
Gao Jian, Zhang Yuechong, Wang Shulan, *et al.* Study on the characteristics and formation of a multi-day haze in October 2011 in Beijing. *Research of Environment Sciences*, 2012; 25(11): 1201—1207
- 13 Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013. *Science China Earth Sciences*, 2014; 57(1): 26—35
- 14 Xu W Y, Zhao C S, Ran L, *et al.* Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2011; 11(9): 4353—4369
- 15 Quan J, Gao Y, Zhang Q, *et al.* Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations. *Particuology*, 2013; 11(1): 34—40
- 16 朱 彤, 尚 静, 赵德峰. 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用. *中国科学: 化学*, 2010; 40(12): 1731—1740
Zhu Tong, Shang Jing, Zhao Defeng. The roles of heterogeneous chemical processes in the formation of an air pollution complex and gray haze. *Scientia Sinica Chimica*, 2010; 40(12): 1731—1740
- 17 Nunes T V, Pio C A. Carbonaceous aerosols in industrial and coastal atmospheres. *Atmospheric Environment Part A General Topics*, 1993; 27(8): 1339—1346
- 18 Putaud J P, Raes F, Dingenen R V, *et al.* A European aerosol phenomenology—1: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmospheric Environment*, 2004; 38(16): 2561—2577
- 19 段凤魁, 贺克斌, 刘咸德, 等. 含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳. *环境工程学报*, 2007; 1(8): 1—8
Duan Fengkui, He Kebin, Liu Xiande, *et al.* Review of carbonaceous aerosol studies: organic carbon and elemental carbon. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007; 1(8): 1—8
- 20 曹 芳, 章炎麟. 碳质气溶胶的放射性碳同位素(^{14}C)源解析: 原理、方法和研究进展. *地球科学进展*, 2015; 30(4): 425—432
Cao Fang, Zhang Yanlin. Principle, method development and application of radiocarbon (^{14}C)—Based source apportionment of carbonaceous aerosols: a review. *Advances in Earth Science*, 2015; 30(4): 425—432
- 21 Chow J C, Watson J G, Lu Z, *et al.* Descriptive analysis of $\text{PM}_{2.5}$, and PM_{10} , at regionally representative locations during SJAQS/AUSPEX. *Atmospheric Environment*, 1996; 30(12): 2079—2112
- 22 周 敏, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征. *环境科学学报*, 2013; 33(1): 181—188
Zhou Min, Chen Changhong, Wang Hongli, *et al.* The variation characteristics of organic and element carbon during air pollution episodes in autumn in Shanghai, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013; 33(1): 181—188
- 23 Pan Y, Wang Y, Zhang J, *et al.* Redefining the importance of nitrate during haze pollution to help optimize an emission control strategy. *Atmospheric Environment*, 2016; 141: 197—202
- 24 Turpin B J, Cary R A, Huntzicker J J. An in situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon. *Aerosol Science and Technology*, 1990; 12(1): 161—171
- 25 Zhang Y X, Shao M, Zhang Y H, *et al.* Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings. *Journal of Environmental Sciences*, 2007; 19(2): 167—175
- 26 段 卿, 安俊琳, 王红磊, 等. 南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征. *环境科学*, 2014; 35(7): 2460—2467
Duan Qing, An Junlin, Wang Honglei, *et al.* Pollution characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric particles in Nanjing northern suburb in summer. *Environmental Science*, 2014; 35(7): 2460—2467
- 27 Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources: 2. C1 through C30 organic compounds from medium duty diesel trucks. *Environmental Science and Technology*, 1999; 33(10): 1578—1587
- 28 Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources: 5. C1—C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles. *Environmental Science and Technology*, 2002; 36(6): 1169—1180
- 29 Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China. *Geophysical Research Letters*, 2006; 33(20): 382—385
- 30 Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources: 3. C1—C29 organic compounds from fireplace combustion of wood. *Environmental Science and Technology*, 2002; 35(9): 1716—1728
- 31 He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Measurement of emissions of fine particulate organic matter from Chinese cooking. *Atmospheric Environment*, 2004; 38(38): 6557—6564

The Meteorological Causes and Source Analysis of Typical Haze Event During Wintertime in Nanjing Northern Suburb

ZHANG Yuan-yuan^{1 2}, LIU Shou-dong^{1 2}, CAO Fang^{1 2*}, ZHANG Wen-qi^{1 2},
LIU Xiao-yan^{1 2}, BAO Meng-ying^{1 2}, ZHANG Yanlin^{1 2}

(Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC),
Nanjing University of Information Science & Technology¹, Nanjing 210044, P. R. China;
Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME) / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of
Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology², Nanjing 210044, P. R. China)

[Abstract] Nanjing has suffered one of the most serious persistent haze episodes in winter from January 14 to 28, 2015. During a comprehensive observation-based campaign, ground meteorological data, backward trajectory analysis and major air pollutants, as well as organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) concentrations in PM_{2.5} were used to investigate the causes of the haze and source of pollutants. The results have demonstrated that high-pressure system and stationary pressure field were the synoptic background for haze processes during the campaign. The analysis of the trajectories and gaseous precursors showed that the formation of the first haze process was significantly affected by the regional transport of highly polluted air masses in Shanxi and Hebei. The second haze process was a short-term local pollution event, mainly caused by the unfavorable diffusion conditions such as low wind speed and extremely low boundary layer which led to a rapid accumulation of pollutants in the surface layer. Referred to the satellite fire spot map, an average value 7.66 of the OC/EC ratio indicated that the third haze episode influenced by biomass burning from south China considerably. High relative humidity is favorable for the formation of the secondary pollutants, increasing the pollution degree of the fourth haze process. CO, SO₂ and NO₂ were significantly correlated with particulate matter, and the OC/EC ratio ranged from 2.54 to 11.61, indicating that coal fossil fuel, biomass burning and vehicle exhaust emissions were the major sources of pollutants in the haze formation during this campaign.

[Key words] haze causes analysis PM_{2.5} gas pollutants carbon components