

叶日新, 胡振菊, 唐晓, 等. 常德市一次重污染过程天气特征及成因[J]. 陕西气象, 2023(2): 35-42.

文章编号: 1006-4354(2023)02-0035-08

常德市一次重污染过程天气特征及成因

叶日新¹, 胡振菊¹, 唐晓², 刘志鹏¹, 刘勇军³

(1. 常德市气象局, 湖南常德 415000; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

3. 常德市环境监测站, 湖南常德 415000)

摘要:为探讨常德重污染过程中气象成因和污染物来源, 利用空气质量监测数据和高空、地面气象观测数据, 结合月移动第 30 百分位法、后向轨迹模式、时滞相关等方法, 对湖南省常德市 2015 年 12 月 31 日至 2016 年 1 月 5 日出现的一次持续重污染过程进行分析。结果表明: ①此次重污染过程最高峰出现于北方弱冷空气渗透南下, 地面风向转为东北风、中低层大气辐散下沉加强之时。②月移动第 30 百分位法定量估算此次重污染过程中污染物外来源和本地源各自的贡献率, 发现外来源与 $PM_{2.5}$ 质量浓度监测值变化趋势一致, 相关系数为 0.97, 5 日重污染最强时段外来源直接贡献了 $PM_{2.5}$ 总质量浓度的 73.0%。③后向轨迹追踪此次过程污染气团来源于河北、山东、河南等重污染区域; 时滞相关分析表明: 北京、济南、武汉和荆州的重污染分别超前于常德约 50、40、12 h 和 5 h。④常德“两山夹一凹朝东北开口”的特殊地形具有“避风港”效应, 北方污染气团随弱冷空气南下, 低层大气下沉运动及特殊的地形共同为本次污染过程的形成和维持提供了有利条件。

关键词:重污染; 月移动第 30 百分位法; HYSPLIT 后向轨迹模式; 时滞相关

中图分类号: P458.3

文献标识码: A

近年来雾霾发生频次不断提高, 大气污染日趋严重, 并呈现区域性特征^[1-3]。污染不仅严重危害人体健康^[4-6], 而且对气候变化、大气环境有严重影响^[7-10]。重污染天气形成和维持的原因一方面取决于污染物排放强度, 另一方面也与天气形势、大气边界层特征等气象条件密不可分^[11-14]。另外一些研究也揭示了气溶胶的二次转化是冬季霾过程形成的重要机制^[15-18]。灰霾过程的特点及其霾的来源和形成机理因地区和城市各自的特征而呈现许多差异。研究表明, 京津冀地区持续重污染过程大多由静稳天气引起^[19-20], 而中部城市除了均压区静稳天气外, 冷锋前部型和低压倒槽型不稳定气象条件下也可造成严重污染^[21-24]。

国内外对于大气污染的研究大多集中在工业发达城市以及人口较密集地区, 随着城市化进程的加快, 中小城市的经济规模和工业化水平不断

提升, 与之相关的污染物排放也快速增长。湖南北部城市常德, 在 2015 年 12 月 31 日—2016 年 1 月 5 日的长时间大范围灰霾过程中 $PM_{2.5}$ 的 AQI 小时峰值高达 441, 一度在城市空气质量实时排名中为全国倒数第一。目前针对常德的大气污染研究非常缺乏, 已有的研究大部是基于整年或大气污染防治特护期观测数据给出的 $PM_{2.5}$ 源解析, 而针对其时空分布特征、区域来源及贡献的定量分析等系统性研究还很少, 这导致区域性污染对常德灰霾形成的机制不清楚, 污染防控难度大。针对这一现状, 该研究利用大气污染物小时质量浓度数据、常规气象资料、NCEP 再分析资料, 综合分析上述重污染过程的气象要素条件以及形成原因, 以期能为中小城市雾霾的预测、污染应急处理提供理论支撑。

收稿日期: 2021-12-27

作者简介: 叶日新(1986—), 女, 汉族, 湖南益阳人, 硕士, 工程师, 主要从事天气预报及大气污染扩散气象研究。

基金项目: 湖南省气象局预报员专项(XQKJ20C008)

1 资料和方法

1.1 数据来源

本研究以湖南西北部城市常德为研究对象,研究区域地形及监测站位置见图 1(见第 37 页)。资料为常德市 5 个国控空气质量监测站点(市监测站、市二中、鼎城区环保局、市技术监督局、白鹤山)及北京、济南、武汉、荆州的 AQI 及主要污染物逐小时质量浓度资料(来源于中国环境监测总站空气质量实时发布系统),地面气象观测资料、FNL1°×1°再分析资料及常德市数字高程模型(DEM)资料。HYSPLIT 后向轨迹模式采用的资料为美国国家环境预测中心(NCEP)提供的同时段全球资料同化系统(global data assimilation system, GDAS)数据,分辨率为 0.5°×0.5°,该数据 6 h 记录一次,分别为 00:00、06:00、12:00、18:00(世界时)。

1.2 研究方法

对污染物来源的分析采用拉格朗日混合单粒子轨道模型的后向轨迹模式(HYSPLIT),这一方法可以追溯重污染期间不同高度层气团的运动轨迹,分析污染物的输送情况,进而追踪污染物来源。HYSPLIT(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory)轨迹模式是由美国国家海洋大气研究中心空气资源实验室与澳大利亚气象局联合研发的用于计算气团轨迹以及分析复杂输送、扩散、化学转化和沉积模拟的综合模式系统。

对外来源贡献的估算采用月移动百分位法,该方法假设本地源为不包括北方污染传输过程的 PM_{2.5} 监测值,通过对候选百分位数(第 5 百分位数、第 10 百分位数、第 30 百分位数、第 40 百分位数和第 50 百分位数)进行敏感性试验,对比不同百分位数计算得到的本地 PM_{2.5} 估算值与去除北方污染传输过程后的监测值,两者线性拟合斜率最接近 1 的百分位数是最合理的,计算结果确定 30 百分位数^[25-26]用于估算本地源。

计算某一天 $D(x)$ 本地源贡献($PM_{2.5}[L][D(x)]$),可以运用 EXCEL 表格的 percentile 函数求得,即

$$PM_{2.5}[L][D(x)] = PERCENTILE(PM_{2.5}[D(15-x)], PM_{2.5}[D(14-x)], \dots, PM_{2.5}[D(x)],$$

$$\dots, PM_{2.5}[D(14+x)], PM_{2.5}[D(15+x)], 0.3), \quad (1)$$

其中,右边括号内是 $D(x)$ 前后 15 天 PM_{2.5} 质量浓度的时间序列。

外来源贡献量($PM_{2.5}[R]D(x)$)计算公式为 $PM_{2.5}[R][D(x)] = PM_{2.5}[D(x)] - PM_{2.5}[L][D(x)]$ 。 (2)

2 重污染过程与气象条件分析

2.1 重污染过程概况

在 2015 年 12 月 31 日至 2016 年 1 月 5 日持续 6 d 的空气污染过程中(图 2,见第 37 页),除 1 月 2 日、3 日平均 AQI 指数稍有减小外,最高和平均的 AQI 指数一直维持在重度污染级别,其中 1 月 5 日最高和平均 AQI 指数在前期累积基础上有明显上升,1 月 5 日 07:00 一度达 441。大量研究表明,大气污染物的质量浓度除了与源排放有关外,还与气象条件以及地形等密切相关^[27-29]。气象因子中风力、降水、湿度以及大气不稳定性等对污染物的扩散与消除有重要作用。因此下文在分析重污染过程各颗粒物逐时演变特征的基础上,重点研究最严重的阶段(2016 年 1 月 5 日)重污染形成与气象背景条件之间的联系。

常德市 5 个空气质量监测站点监测结果显示此次重污染过程期间首要污染物是 PM_{2.5}。由于白鹤山监测站为对比站,因此只对城区其他四个站点逐小时 PM_{2.5}、SO₂、NO₂、O₃ 平均质量浓度进行分析。从图 3 PM_{2.5} 质量浓度变化可以看出,1 月 4 日夜间 PM_{2.5} 质量浓度上升明显,最大数据为 411 ug/m³;SO₂ 与 NO₂ 质量浓度变化较一致,4 日夜间略有变化;O₃ 质量浓度具有白天增长、夜间减弱的特征。这四类主要污染物的质量浓度变化差异主要是由于不同污染物的生成和削减机制不一样。1 月 4 日 08:00—21:00 常德市区有 7.9 mm 降雨量,但由于此期间最大的小时雨强不足 1.0 mm/h,对污染物的沉降作用有限。21:00 后降水停止但天空云量多,相对湿度维持在 80% 以上,污染物质量浓度变化不明显。1 月 5 日凌晨开始,随着地面风向由西北转为东北,风速加大,PM_{2.5} 质量浓度快速增加了 1 倍。

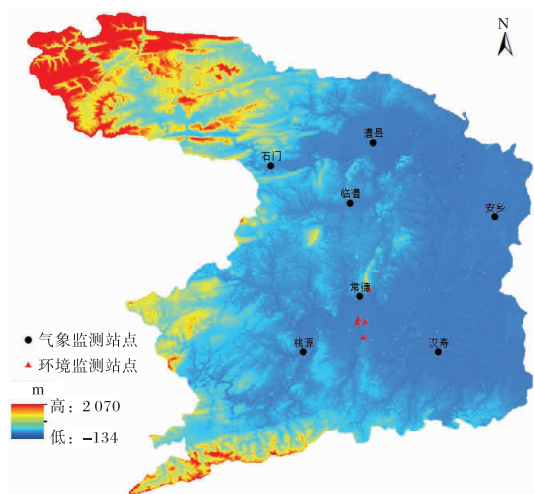


图1 常德市地形及监测站点位置(文见 36 页)

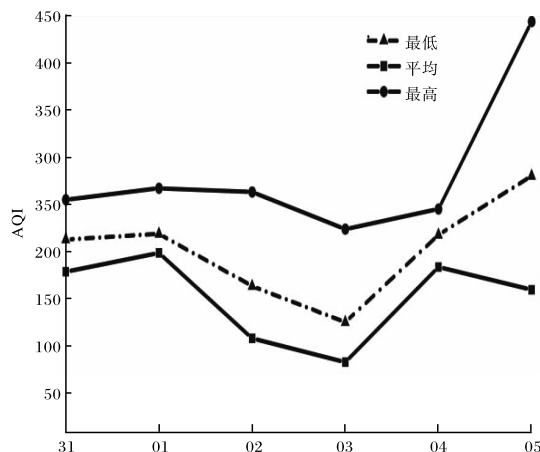
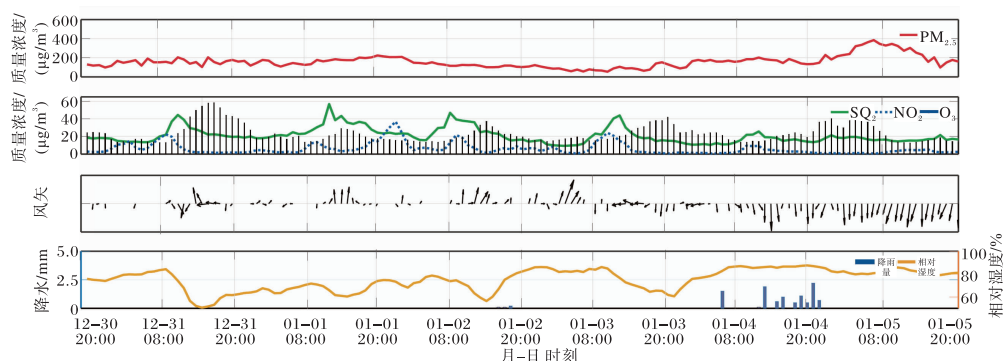


图2 常德市 2015-12-31—2016-01-05 逐日平均、最高、最低 AQI 指数变化(文见第 36 页)

图3 常德市 2015-12-30T20—2016-01-05T20 逐小时 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和气象要素变化

研究表明,颗粒物质量浓度加大一方面是由于有从高污染区向低污染区的输送,导致气溶胶数密度增加,另一方面可能因为随着相对湿度增加气溶胶吸湿增长,造成单位体积内各颗粒物质量增加^[28]。在 $PM_{2.5}$ 快速增加的时段内, SO_2 、 NO_2 的质量浓度略有减小,这可能是由于阴天相对湿度大,温度低,水汽含量高,促使大气中的硫化物和氮氧化物被氧化成二次颗粒物而使 $PM_{2.5}$ 质量浓度增高。值得一提的是, O_3 质量浓度一般会随着太阳辐射的增强和环境温度的升高而增大,至 15:00 左右达到最大^[29]。此次重污染过程有两个峰值,分别为 1 日和 5 日,下文将深入对比分析两个峰值阶段的天气背景和形成原因。

2.2 重污染过程天气特征

从大尺度环流形势来看,两个峰值阶段的相同点有:1 日 08 时和 5 日 08 时 500 hPa 常德市区均处于槽前西南气流中、中低层(850 hPa)为均压

场控制、湖南—湖北—河南均为辐散区(图略)。不同之处主要在于中低层和地面风场与冷空气强度。1 日 08 时 850 hPa 常德地区为副高西南部,吹偏南风,而 5 日 08 时前 850 hPa 及其以下有弱冷空气渗透南下,冷式切变辐合在湘北地区,这表明后一过程中低层环流形势更不利于污染物扩散。从 FNL 再分析资料的地面风场和气压场分析来看(图 4a、4b):两个时次都有弱冷空气的影响,常德地区都为东北偏北风,1 日 08 时表现为两高之间的辐合形势,风速为 0.5 m/s;但是后一过程冷空气更强,且 4 日 20 时前后有冷锋过境,4 日 20 时至 5 日 08 时平均风力增大至 0.9 m/s,整个中东部地区均为一致的东北偏北风。当北方存在重污染区时东北风的输送能为下游地区污染物质量浓度急剧增加提供条件,期间 SO_2 、 NO_2 质量浓度降低至中度污染水平以下, $PM_{2.5}$ 质量浓度却增加造成重污染。有学者曾指出当扩散条件

更好时,外来型重污染比静稳型重污染会使 SO_2 、 NO_2 明显下降而使颗粒物快速增加^[30]。分析温度对数压力图特征(图略)可以看到,1日和5日

700 hPa 以下长沙站及湖北各站都具有逆温层,但5日的逆温层厚度明显大于1日,对污染物的垂直扩散更为不利。

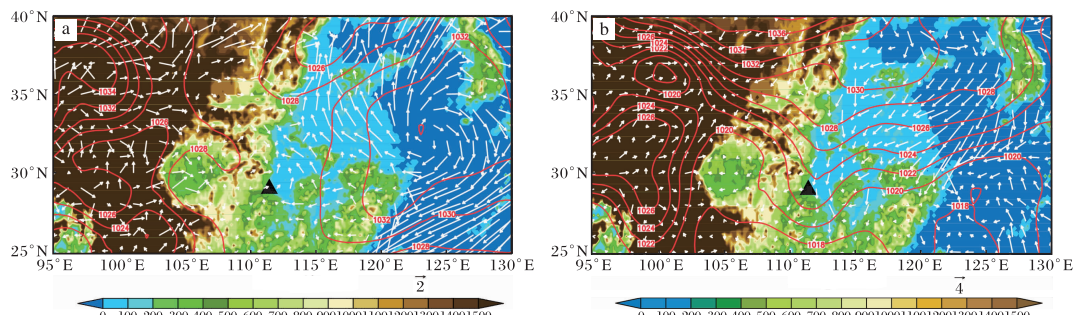


图4 地面气压场(红色等值线)和风场(a 2016-01-01T08,b 2016-01-05T08;

▲表示常德中心城区监测站位置;填色表示海平面高度(单位为 m))

利用 FNL 再分析资料分析常德中心城区监测站(29.03°N、111.41°E,下同)大气相对湿度、垂直上升速度和水平风场的演变情况(图5)。2日和3日在800 hPa以下有短暂的垂直上升运动,同时900 hPa以下为弱的偏南风,相对湿度小,这种气象条件不利于外地污染物从北方输入,也不利于本地污染物的累积;因此AQI指数与气溶胶粒子浓度在此时间段较低。从4日白天开始逐渐转为弱东北风,风速逐渐增大,这说明低层大气形成了自北向南水平输送条件;从大气垂直速度场来看,4、5日各有一个下沉中心,且中心位置逐日下移,5日08:00左右降至近地层,这表明大气垂直扩散条件逐渐变差。污染物在有利的水平输送条件下配合垂直方向的沉积,气溶胶粒子浓度增加,导致了4日晚间开始的爆发式增长,这与

王潇等^[31]对西安市一次霾过程中的分析结果一致。

3 重污染成因分析

3.1 污染物来源

从前面的分析可知,本次常德重污染过程与外来污染输送有很大关系,弄清外来污染的源头,对于区域联控有非常重要的意义。模式将常德市城区监测站所处经纬度设为起始点,将1月5日08:00(北京时)作为起始回算时间,模拟48 h气团的后向轨迹运动,轨迹模拟起始高度为100 m、500 m、1500 m,分布代表大气边界层底、边界层中部、边界层顶附近气流特征。模拟结果(图略)显示,1500 m高空气流有明显垂直方向波动,最早从缅甸北部向东爬升,经过横断山脉后转向东北,再经过贵州后不断下降到达湘西北地区;而低层500 m和100 m的气团路径相似,主要受东北气流的影响,气流的高度变化较小,从河北与山东交界地区低层开始运动,于3日20:00左右影响河南,绕过大别山时略有上升,之后进入两湖盆地逐步下降直达湘西北常德市境内。这种低层气团的稳定输送及下沉运动,使得近地层大气层结趋于稳定,造成污染物的积聚。

HYSPLIT后向轨迹模式的模拟表明低层气流主要通过一条北方传输通道到达常德市,需重点关注这一通道上的空气质量变化。从2016年1月3至5日全国AQI指数分布的空间变化可以看到(图略):3日20:00重污染区中心主要在山东、河南一带;4日08:00时至河南南部,之后重

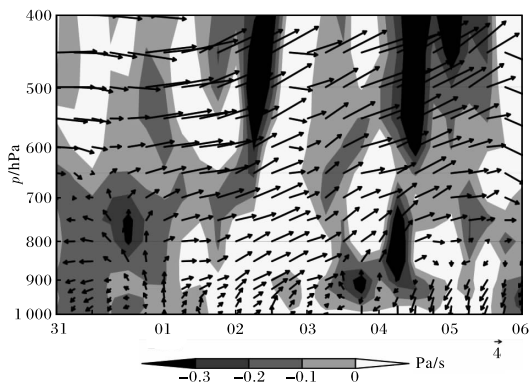


图5 2015-12-31—2016-01-06 常德站(29.03°N、111.41°E)气象要素时间剖面图(阴影表示垂直速度;箭头表示水平风向风速,单位为 m/s)

污染区向西向南发展,20时转移至湖北省境内,而河南山东等地污染明显减弱;5日08:00时常德等湖南北部城市污染加重,而北方空气质量好转。因此当冷空气从东北偏北路径南下,关注北方污染输送通道,如华北黄淮等地雾霾天气的发展对常德污染物浓度变化有重要意义。

3.2 外来源和本地源贡献

采用市监测站 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度日均值序列,运用月移动 30 百分位法,求出每天的本地源和外来源 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化(图 6)。

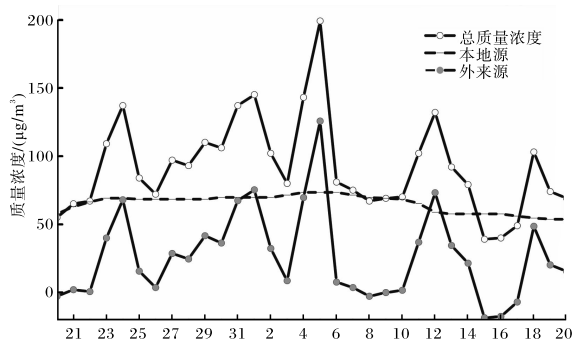


图6 2015-12-21—2016-01-20 常德市
 $\text{PM}_{2.5}$ 源分解变化

从2015年12月21日—2016年1月20日本地源 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化来看,其基本维持在 $54 \sim 74 \text{ ug/m}^3$,与总浓度变化相关性较小;外来源与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测值变化趋势一致,相关系数为 0.97,并通过了 0.001 的显著性检验。在2015年12月31日至2016年1月5日重污染时

段,外来源质量浓度分别在1日、5日各出现了一个高峰,特别是4日从 69.6 ug/m^3 快速上升到 125.6 ug/m^3 ,5日外来源质量浓度占总污染的73%。结合上文天气形势分析不难看出,在冷空气影响下北方污染气团向南输送致使常德细颗粒物质量浓度于5日达到最高峰。对于有利污染物扩散条件下的时段,如1月15—16日地面南风加强,本地产生的污染物将得到稀释,外来源为负值,因此 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测值明显下降。

3.3 常德市与污染物输送通道上各城市污染时滞相关性

从上述分析可以看出,本次常德污染源沿着一条北方输送通道进入常德。选取污染源输送通道上4个主要城市(北京、济南、武汉、荆州)的 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度值与常德进行时滞相关性分析(图7)发现,常德与北京、济南 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在较远时段(50 h 与 40 h)为正相关,与相近的武汉和荆州在临近时段内(12 h 与 5 h)也为正相关。这四个时间点的相关系数仅通过 0.1 的显著性检验,说明在有利的天气形势下,北京、济南等北方污染物分别在约 50 h 到 40 h 内就可长距离输送至常德;当武汉和荆州污染增强后的 12 h 到 5 h 内,常德污染物质量浓度也随之增大。由此可见,常德外来输入型污染需密切关注大约 2 天前北京、济南污染物质量浓度以及 12 h 前武汉污染物质量浓度的变化,及时制订有效的管控措施。

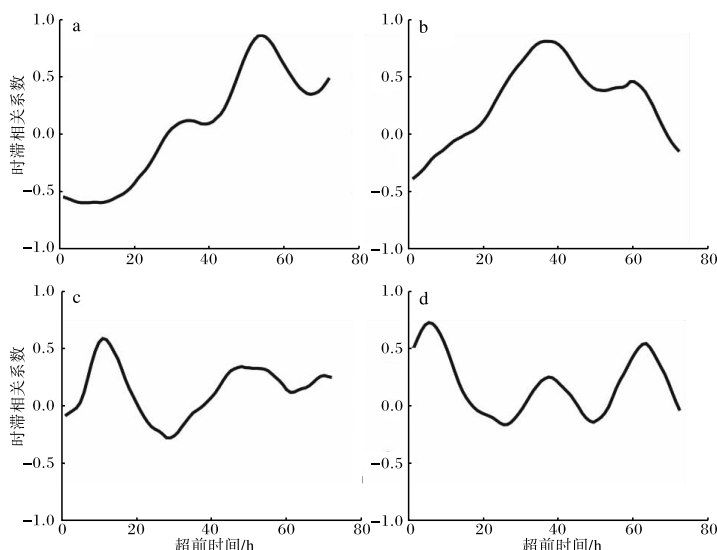


图7 常德与北京(a)、济南(b)、武汉(c)和荆州(d) $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的时滞相关系数

上述时滞关系从污染通道上主要城市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与其风场的关系(图 9)可以得到进一步证实。此次过程各城市污染物质量浓度峰值自北向南依次出现,当北京、济南受较强北风控制时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度快速下降,随后武汉、荆州及常德

地区随着东北风的出现和维持,各城市污染物质量浓度依次增大。冷空气的作用一方面是北方城市污染清除的有效机制,另一方面将引导重污染区向下游地区发展。

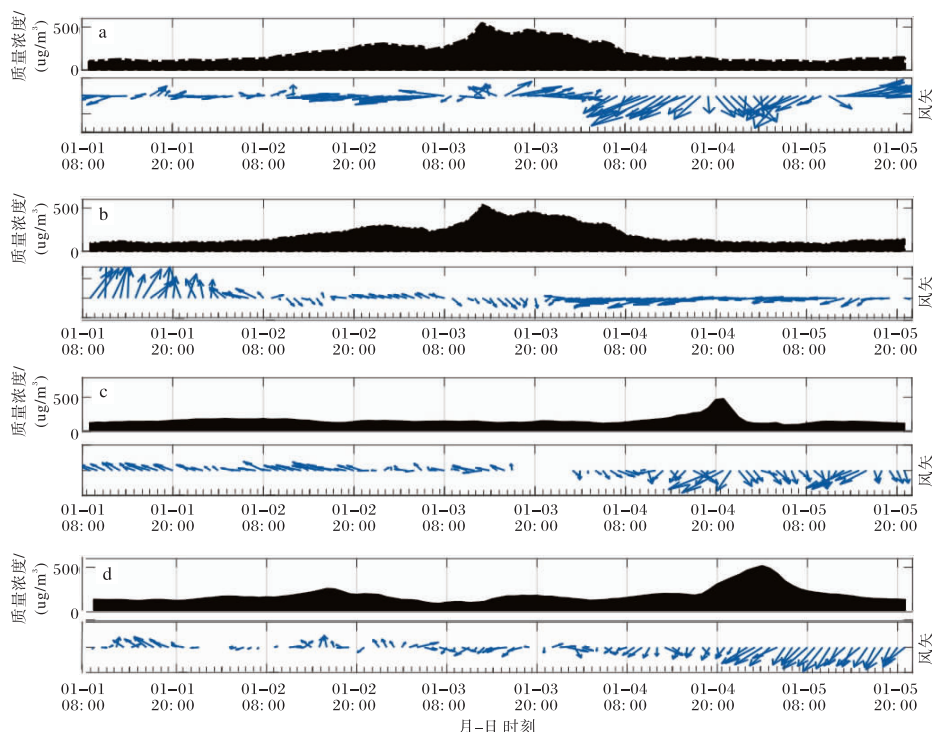


图 8 2016-01-01—05 逐小时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与风场(a 北京;b 济南;c 武汉;d 荆州)

3.4 特殊地形

魏文秀等^[32]讨论河北霾分布与地形和风速的关系时指出:山麓(山地和盆地的过渡地带)对于天气系统起到了阻挡和削弱作用,使山麓地区形成了一个“避风港”,因而大气稳定程度高于山区和平原;同时山麓多年平均风速要小于山地和平原,因此水平扩散条件也较差。湖南省地势属于江南丘陵和南岭山地向江汉平原的过渡地带,常德作为湘北门户,西北部为武陵山系,西南部为雪峰山余脉,东部为沅、澧水下游和洞庭湖平原,形成了向东北开口的不对称马蹄形,由此构成了南、北高,中间低,“两山夹一凹”的基本地貌轮廓。在此种地形条件下,当北方污染物随着冷空气扩散南下,常德地区大气处于静稳时,容易出现长时间重污染天气。

综上,根据本次过程气团的后向轨迹及全国空气质量分布,可以认为外来污染物长距离输送

与静稳条件下本地污染的积累,再加上特殊的地理位置和地形等因素是常德市 2016 年 1 月初重污染过程产生的重要成因。

4 结论与讨论

(1)常德此次重污染过程大气中低层均为均压场,有明显下沉气流存在,垂直方向近地层存在逆温。当北方有冷空气入侵、地面风场由西北风转为东北风时,首要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度快速增加,污染加重。

(2)此次重污染过程大部分由外来污染物输送引起,HYSPLIT 后向轨迹模式追踪到污染气团来源于山东、河南等北方重污染区域。外来源与 $\text{PM}_{2.5}$ 监测值变化趋势一致,重污染最强时段外来源直接贡献了 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量浓度的 73.0%。

(3)北京、济南、武汉和荆州的重污染分别超前于常德约 50 h、40 h、12 h 和 5 h,因此密切关注其北方通道城市空气质量变化对常德霾污染的预

测有重要作用。常德同武汉、荆州等中部城市 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发式增长常伴有地面东北风的加强,作为湘北门户,外来污染物首当其冲影响常德。常德市两山夹一凹”的特殊地貌特征具有“避风港”效应,更加剧了污染物的积累。

(4)常德市 2016 年 1 月初发生的重污染过程主要由北方污染物输送和本地静稳气象条件的共同影响。关注北方污染输送通道城市的空气质量变化对常德空气污染防治、制订有效的管控措施有一定参考意义,但如何影响及影响的物理机制还有待于进一步探讨。

参考文献:

- [1] 刘厚凤,杨欣,陈义珍,等. 中国重霾过程污染气象研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11):1917-1922.
- [2] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [3] CHAN C K, YAO X. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1):1-42.
- [4] MATUS K, NAM K M, SELIN N E, et al. Health damages from air pollution in China[J]. Global environmental Change, 2012, 22(1):55-56.
- [5] AUNAN K, PAN X C. Exposure-response functions for health effects of ambient air pollution applicable for China-a Meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2004, 329(1-3):3-16.
- [6] ANDREAS K, WOLFGANG A, GABRIELE K, et al. Ozone pollution and ozone biomonitoring in European cities. Part I: Ozone concentration and cumulative exposure indices at urban and suburban sites[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(40): 7963-7974.
- [7] GETTELMAN A, SHINDELL D T, LAMARQUE J F. Impact of aerosol radiative effects on 2000-2010 surface temperatures[J]. Climate Dynamics, 2015, 45(7-8):1-15.
- [8] ZHANG Y L, F CAO. Is it time to tackle $\text{PM}_{2.5}$ air pollutions in China from biomass-burning emissions? [J]. Environmental Pollution, 2015, 202(7):217-219.
- [9] GRAMSCH E, CERECEDA-BALIC F, OYOLA P, et al. Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM_{10} and Ozone data [J]. Atmospheric environment, 2006, 40(28): 5464-5475.
- [10] SLOWIK J G, CZICZO D J, ABBATT J P D. Analysis of cloud condensation nuclei composition and growth kinetics using a pumped counterflow virtual impactor and aerosol mass spectrometer [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4(8):1677-1688.
- [11] 李沈鑫,邹滨,刘兴权,等. 2013-2015 年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况时空变化[J]. 环境科学研究, 2017, 30(5):678-687.
- [12] LIU Jun, DENISE Mauzerall, CHEN Qi, et al. Air pollutant emissions from Chinese households: A major and under appreciated ambient pollution source [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(28): 7756-7762.
- [13] KANG C M, LEE H S, KANG B W, et al. Chemical characteristics of acidic gas pollutants and $\text{PM}_{2.5}$ species during hazy episodes in Seoul, South Korea [J]. Atmospheric Environment. 2004, 38(28):4749-4760.
- [14] HAN B, RUI Z, YANG W, et al. Heavy haze episodes in Beijing during January 2013: Inorganic ion chemistry and source analysis using highly time-resolved measurements from an urban site[J]. Science of the Total Environment, 2015, 15(7): 11111-11141.
- [15] 杨铁金,王慧超,李红梅,等. 辽宁西南典型城市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2022, 41(1):13.
- [16] HUANG Huijun, ZHAN Guowei, LIU Chunxia, et al. A case study of numerical simulation of sea fog on the southern china coast[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 22(4):497-507.
- [17] 马志强,赵秀娟,孟伟,等. 雾和霾对北京地区大气能见度影响对比分析[J]. 环境科学研究, 2012, 25(11):1208-1214.
- [18] 张程,于兴娜,安俊琳,等. 南京北郊霾天气溶胶化学组分粒径分布特征[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8):9.
- [19] 张恒德,吕梦瑶,张碧辉,等. 2014 年 2 月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12):4340-4351.

- [20] GAO J, TIAN H, CHENG K, et al. The variation of chemical characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 107(4): 1-8.
- [21] 吴兑, 吴晟, 李菲, 等. 粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重空气污染的分析[J]. 中国环境科学, 2011, 34(1): 540-545.
- [22] LU M, TANG X, WANG Z, et al. Source tagging modeling study of heavy haze episodes under complex regional transport processes over Wuhan megacity, Central China[J]. Environmental Pollution, 2017, 231(1): 612-621.
- [23] LEE H M, PARK R J, HENZE D K, et al. $PM_{2.5}$ source attribution for Seoul in May from 2009 to 2013 using GEOS-Chem and its adjoint model[J]. Environmental Pollution, 2017, 221(2): 377-384.
- [24] 戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 等. 江苏秋冬季重度霾的分型研究[J]. 气象学报, 2016, 74(1): 133-148.
- [25] ESCUDERO M, QUEROL X, PEY J, et al. A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(26): 5516-5524.
- [26] 房春生, 孙俪袁, 孔茹钰, 等. 长春市大气环境中 PM_{10} 外来源估算研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(24): 146-150.
- [27] 徐丽娜, 李忠, 胡亚男, 等. 2019年冬季呼和浩特市大气污染频发的气象条件分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(1): 112-118.
- [28] 徐丽娜, 李兴华, 冯震, 等. 呼和浩特市大气污染特征及气象影响因子研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 150-157.
- [29] 于阳春, 胡波, 王跃思. 北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2505-2510.
- [30] 赵敬国, 王式功, 张天宇, 等. 兰州市大气重污染气象成因分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1547-1555.
- [31] 王潇, 曹念文, 黄婧婷, 等. 西安市一次霾过程中气溶胶垂直分布特征及气象要素影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(9): 1519-1526.
- [32] 魏文秀, 张欣, 田国强. 河北霾分布与地形和风速关系分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 49-52.