

吴进,马志强,熊亚军,等.北京地区供暖季两次重污染过程气象条件对比[J].海洋气象学报,2019,39(1):38-45.
WU Jin, MA Zhiqiang, XIONG Yajun, et al. Comparative analysis of meteorological conditions for two heavy pollution processes during the heating season in Beijing[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1):38-45. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.004. (in Chinese)

北京地区供暖季两次重污染过程气象条件对比

吴进^{1,2}, 马志强², 熊亚军², 乔林², 李琛³

(1.北京城市气象研究院,北京 100089;2.京津冀环境气象预报预警中心,北京 100089;3.北京市气象服务中心,北京 100089)

摘要:为对比分析北京地区供暖季期间两次重污染过程的影响因素,利用气象常规和非常规资料、环保监测站观测资料分析了2016年11月2—5日(以下简称“2016年过程”)和2018年3月11—14日(以下简称“2018年过程”)两次重污染过程的气象条件。结果表明:2018年过程与2016年过程天气尺度高低层天气影响系统类似,地面平均风速均为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大气水平扩散条件基本相似,边界层风场的分布及风速大小基本一致,但2018年过程低层暖气团影响高度达2 km以上且逆温强度很大,大气垂直扩散条件更不利于污染物的扩散;2018年过程 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较2016年过程污染最重单站峰值浓度偏低30.2%,全市平均浓度也较其略低,且未出现爆发性增长阶段,浓度积累增长平缓;2016年过程一氧化碳(CO)出现爆发性增长,4 h浓度上升接近 $1\ 000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,峰值浓度为 $3\ 179 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,黑碳(BC)浓度持续较高且峰值浓度为 $19\ 939 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$;2018年过程期间CO峰值浓度较2016年过程下降24.6%,且未出现爆发性增长阶段,BC有一定日变化特征,峰值浓度为 $4\ 228 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,远远低于2016年过程。两次重污染过程发生在基本相似的气象条件下,2018年的垂直扩散能力更为不利,但从细颗粒物和一次排放污染物对比来看,2018年过程多种污染物浓度显著下降、平均浓度明显降低,这与人为减排限排等因素密切相关。

关键词:重污染;扩散条件; $\text{PM}_{2.5}$;CO;黑碳

中图分类号:X516;X13 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-3599(2019)01-0038-08

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.004

Comparative analysis of meteorological conditions for two heavy pollution processes during the heating season in Beijing

WU Jin^{1,2}, MA Zhiqiang², XIONG Yajun², QIAO Lin², LI Chen³

(1. Institute of Beijing Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089, China; 2. Beijing-Tianjin-Hebei Prediction and Early Warning Center for Environmental Meteorology, Beijing 100089, China; 3. Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089, China)

Abstract In order to compare and analyze the factors affecting the two heavy pollution processes during the heating season in Beijing, the meteorological conditions of the two processes from 2 to 5 November 2016 and from 11 to 14 March 2018 are analyzed by using the meteorological conventional and unconventional data and the observation data of the environmental monitoring station. The results are as follows. 1) In the 2018 process and the 2016 process, the upper and lower synoptic systems are similar, both of the mean surface wind speed are around $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the horizontal atmospheric diffusion

收稿日期:2018-12-05; 修订日期:2019-01-10

基金项目:北京市重大科技项目(Z181100005418014)

作者简介:吴进,女,硕士,高级工程师,主要从事环境预报服务和大气环境污染研究,wujin_0472@163.com。

通信作者:马志强,男,博士,研究员,主要从事大气环境污染相关研究,zqma@ium.cn。

conditions are basically similar, and the distribution of wind field in the boundary layer and the wind speed are basically the same. However, the height of the lower warm layer in the 2018 process is above 2 km, the temperature inversion intensity is high, and the atmospheric diffusion conditions are more disadvantageous for the vertical diffusion of pollutants. 2) Compared with the 2016 process, the peak $PM_{2.5}$ concentration in the 2018 process is 30.2% lower, the city average concentration is also slightly lower, and there is no explosive increase phase, but slow concentration growth. 3) In the 2016 process, the carbon monoxide (CO) increases explosively, which increases by $1\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ in 4 hours, and the peak concentration is $3\ 179\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. The concentration of black carbon (BC) is continuously high and the peak concentration is $19\ 939\ \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 4) In the 2018 process, the peak concentration of CO decreases by 24.6% compared to the 2016 process and there are no explosive increase phase. There are diurnal variations for BC, the peak concentration of which is $4\ 228\ \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, far lower than that of the 2016 process. Though the two heavy pollution processes occur under similar meteorological conditions and the vertical diffusion conditions in the 2018 process are more disadvantageous, the concentration of various pollutants decreases significantly in the 2018 process and the average concentration decreases obviously. The air quality improvement may be closely related to the reduction of pollutant emissions.

Key words heavy pollution; diffusion condition; $PM_{2.5}$; CO; BC

引言

我国空气质量在2005—2014年10年期间整体恶化趋势明显,尤其在京津冀周边最为显著,最主要的原因是京津冀区域聚集大量高污染产业,而当地地形和气候系统又不利于污染物扩散^[1-3]。北京地区重污染事件自2001年以来急剧增长^[4],高浓度值出现的时间越来越向秋、冬季集中^[5]。在东亚冬季风减弱和颗粒物充足的大背景下,霾天气与风力负相关性明显减弱,与水汽条件的正相关性明显加强,而与冬季风强度呈显著负相关^[6-9]。从天气尺度背景而言,表面风速及其上空对流层中低层的水平风垂直切变对雾霾天气过程具有动力影响^[10],近地面湿度高、静风和混合层高度低等边界层气象条件不利于污染物扩散,是重污染天气发生的主要气象因素^[11-13]。秋冬季节除了气象条件有利于重污染天气出现之外,供暖季大量煤炭等燃烧排放也是导致重污染天气频发的重要原因之一^[14-16],气象条件和人为排放因素共同导致重污染天气的发生。

假如首要污染物相同且气象条件相似,但重污染事件发生在减排限排措施力度没有这么大的情况下,北京的污染程度与现在相比是否会存在明显差异?该问题的研究不仅对提高环境气象预报准确率具有重要意义,同时也能为相关部门提供决策依据。故本文从首要污染物以及气象场的相似性等方面进行了筛选,遴选了两个重污染个例进行对比分析,希望能为决策部门提供一定参考依据。

1 资料与方法

2018年3月11—14日,北京发生了一次高空纬向环流结合地面辐合区造成的细颗粒物重污染天气。受东北风影响,北京地区11日白天的空气质量仍为良好,11日夜间至12日,受系统性偏南风影响,污染气团沿太行山一带由南向北输送,北京地区污染物浓度不断升高,并于13—14日达到重度污染。受冷空气影响,15日凌晨本次重污染天气过程结束。此次过程具有持续时间长、影响范围广等特点,在850 hPa显著暖平流背景下,北京地区出现了强逆温。同时,近地层高湿以及偏南风造成的污染物区域传输和聚集共同导致北京地区极端不利的扩散条件。但在强逆温、静稳、高湿等气象条件下,北京市的日均浓度并未达到严重污染程度,且没有出现 $PM_{2.5}$ 小时浓度爆发性增长现象。从大气环流形势以及主要污染物相似角度出发,选取2016年11月2—5日北京地区发生的一次细颗粒物重污染天气过程作为比照对象,与本轮重污染天气过程开展对比分析。

所使用常规气象数据来自于北京市观象台逐小时气象观测数据,主要使用相对湿度、2 min平均风速、地面气压等气象要素。逐小时 $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于大气成分气象观测站,北京地区平均采用昌平、朝阳、大兴环境示范站、房山、海淀、门头沟、南郊观象台、苹果园中学、顺义、通州10站平均,仪器采用Grimm180环境颗粒物检测仪。一氧化碳

(CO)、黑碳(BC)逐小时观测数据来源于北京地区12个国控大气环境质量监测站(<http://www.cnemc.cn/>)。风廓线雷达是位于北京市观象台(39°48'N, 116°28'E)的L波段低对流层风廓线雷达,雷达频率1 270 MHz~1 375 MHz,探测高度10 km,垂直分辨率120 m,共59层,时间分辨率6 min。微波辐射计位于北京市观象台,地基微波辐射计为12通道(美国Radiometrics公司生产的TPWVP-3000型),反演得到的大气廓线共47层。使用数据已通过质量控制,均为北京时。

2 结果分析

2.1 两次重污染过程的PM_{2.5}浓度对比

2016年11月1—5日(以下简称“2016年过程”)空气质量从良逐步到重度污染,2018年3月11—14日(以下简称“2018年过程”)空气质量由良逐步增加到了重度污染,两次过程污染物前期基础浓度以及污染累积时长基本一致(表1)。

2016年重污染过程北京地区PM_{2.5}浓度最高时段出现在4日17时(图1a),全市平均浓度为259 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染最重站点为海淀,16时达

430 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染物浓度呈现逐步积累上升趋势;2018年重污染过程北京地区PM_{2.5}浓度呈缓慢上升趋势,无显著爆发性增长时段,峰值浓度出现在14日02时(图1b),全市平均为252 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染最重站点为海淀,14时达300 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2018年过程较2016年过程单站峰值浓度偏低30.2%,全市平均浓度也较其略低。

表1 2016年11月1—5日和2018年3月11—14日北京空气质量

Table 1 Air quality in Beijing from 1 to 5 November 2016 and from 11 to 14 March 2018

重污染过程	个例日期	日平均空气质量
2016年过程	11月1日	良
	11月2日	轻度污染
	11月3日	重度污染
	11月4日	重度污染
	11月5日	重度污染
2018年过程	3月11日	良
	3月12日	中度污染
	3月13日	重度污染
	3月14日	重度污染

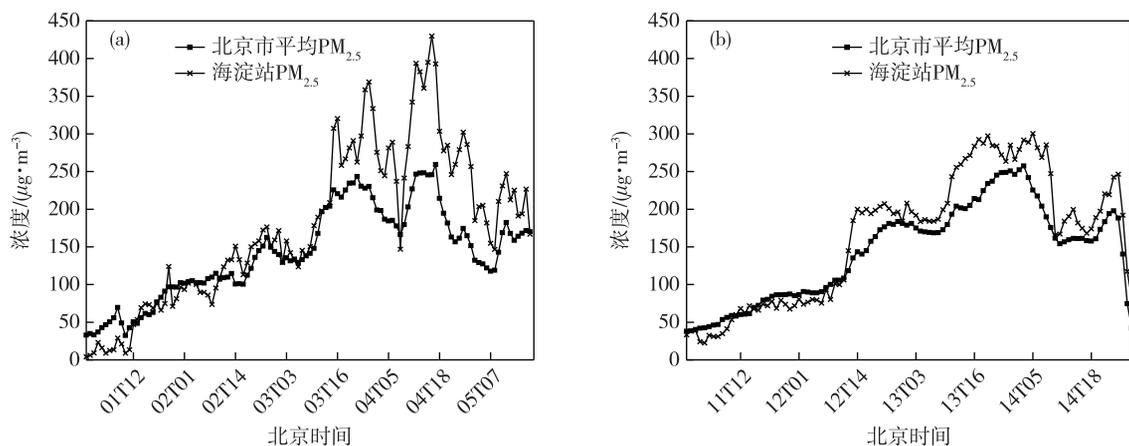


图1 北京地区PM_{2.5}逐时浓度(a. 2016年11月1—5日;b. 2018年3月11—14日)

Fig.1 Hourly concentration of PM_{2.5} in Beijing (a. from 1 to 5 November 2016, b. from 11 to 14 March 2018)

2.2 一氧化碳(CO)与黑碳(BC)浓度对比

冬季CO浓度普遍比夏季高,沈阳市市府大街1985年调查表明,CO在冬季采暖期的平均浓度是夏季非采暖期的2倍^[17]。CO直接人为源主要包括化石和生物燃料的燃烧以及生物质的燃烧^[18-19]。可见,CO直接排放源主要位于近地层(南京城区上空大气一氧化碳的观测分析),且以人为源排放为主。大气中CO的汇主要是通过OH自由基反应,从而从大气中清除,但冬季气温低且辐射弱,光

化学反应减弱,使得作为CO汇的OH的浓度降低,因此冬季CO浓度可较为直接地反映人为源直接排放情况。

黑碳气溶胶的人为源主要来自于煤炭、石油等化石燃料、汽车尾气、生物质燃烧等。在大气气溶胶成分中占比例较小,一般占百分之几或十几,黑碳气溶胶本身较为稳定,基本不与其他物质发生反应,很难在大气中通过化学过程清除,唯一的汇是干湿沉降清除,因此众多学者认为,黑碳气溶胶可

作为污染示踪剂表征气团传输^[20-21]。

两次重污染过程中并未出现显著降水,且无冷空气活动,故大气对气溶胶粒子的干湿沉降作用可以忽略不计。CO和BC的浓度变化基本可以反应一次排放的情况。2016年过程CO呈上升趋势(图2a),3日夜间至5日早晨浓度一直维持在 $2\ 500\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,峰值浓度出现在5日06时,浓度为 $3\ 179\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,且在3日17—21时出现浓度陡升,4h浓度上升接近 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;2018年过程期间CO上升幅度较小(图2b),基本稳定维持在 $1\ 000\sim$

$2\ 400\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,浓度峰值出现在13日23时,为 $2\ 397\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,峰值浓度较2016年过程下降24.6%,且未出现爆发性增长阶段。BC浓度变化显示,2016年过程前期BC浓度较高且峰值出现在3日00时,为 $19\ 939\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,4日白天后有所下降,维持在 $5\ 000\sim 10\ 000\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$;2018年过程BC有一定日变化特征,峰值浓度出现在13日15时,为 $4\ 228\ \text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,远远低于2016年过程。说明污染物一次排放量远小于2016年过程。

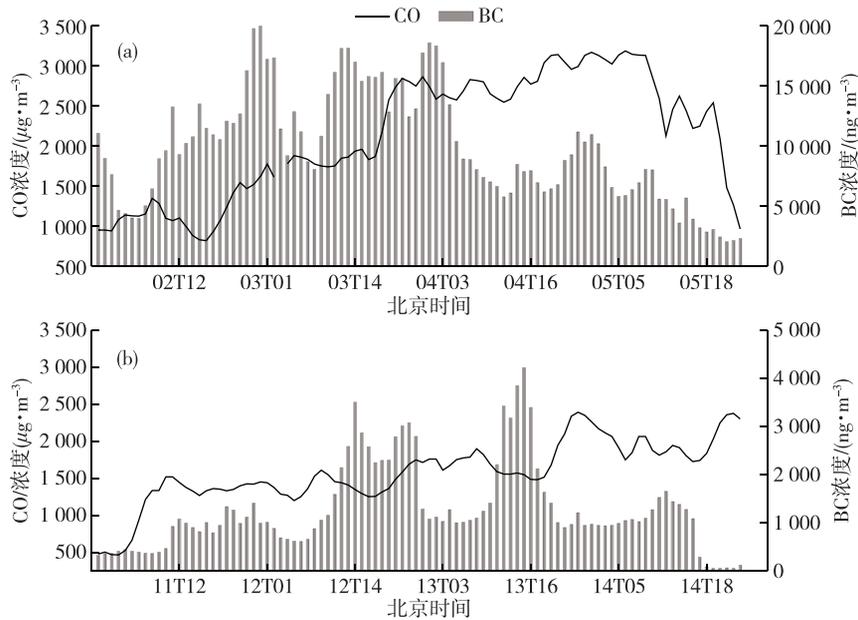


图2 北京地区BC和CO逐时浓度(a. 2016年11月2—5日;b. 2018年3月11—14日)

Fig.2 Hourly concentration of BC and CO in Beijing (a. from 2 to 5 November 2016, b. from 11 to 14 March 2018)

2.3 两次重污染过程天气形势及地面气象要素对比

重污染过程往往是在高空平直西风气流配合地面弱辐合区的天气形势下,大气趋于静稳状态,地面风速较小且逆温长时间维持,不利于空气污染物的水平和垂直扩散。2016年过程污染较重时段华北区域高空盛行西北偏西气流,无短波槽活动,地面处于弱辐合区底部,2018年过程仍是在高空偏西气流及地面弱辐合区底部形成,两次过程的天气尺度天气形势基本类似(图3、4)。

2016年过程期间地面2 min平均风速小于 $3.4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (风力3级)的时次占比98.8%,小于 $1.6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (风力2级)的时次占比为61.4%;最大相对湿度98%,最小相对湿度36%,平均相对湿度68.3%;最大露点温度 $7.1\ ^\circ\text{C}$,最小露点温度 $-6.1\ ^\circ\text{C}$,平均露点温度值为 $2.2\ ^\circ\text{C}$;气压最小值

$1\ 002.3\ \text{hPa}$,平均气压 $1\ 013.3\ \text{hPa}$ (图5a)。2018年过程地面2 min平均风速小于 $3.4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时次占比为95.8%,小于 $1.6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的时次占比为59.1%;最大相对湿度88%,最小相对湿度28%,平均相对湿度59%;最大露点温度 $6.8\ ^\circ\text{C}$,最小露点温度 $-6\ ^\circ\text{C}$,平均露点温度 $1\ ^\circ\text{C}$;气压最小值 $1\ 002.5\ \text{hPa}$,平均气压 $1\ 006.3\ \text{hPa}$ 。从近地面气象要素的对比显示,两次过程地面风速60%左右时段均小于 $1.6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,2016年过程的相对湿度略大于2018年过程,但两次过程的最大露点、平均露点和气压最小值非常接近,说明两次过程近地面绝对水汽含量及水平辐合条件基本类似(图5b)。

2.4 两次重污染过程垂直气象要素分布

2016年过程受暖气团控制,低层逆温自1日夜间开始建立,2—4日逆温层厚度逐渐增大且逆温强度增强,最强逆温出现在4日20时,逆温厚度达

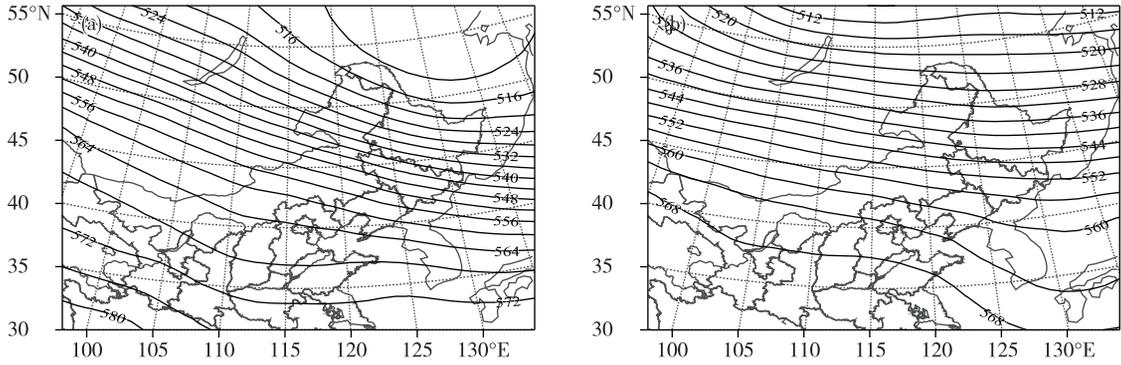


图3 500 hPa 高度场(a. 2016年11月4日08时,b.2018年3月13日08时;单位:dagpm)
Fig.3 Geopotential height field at 500 hPa (a. 08:00 on 4 November 2016, b. 08:00 on 13 March 2018; units: dagpm)

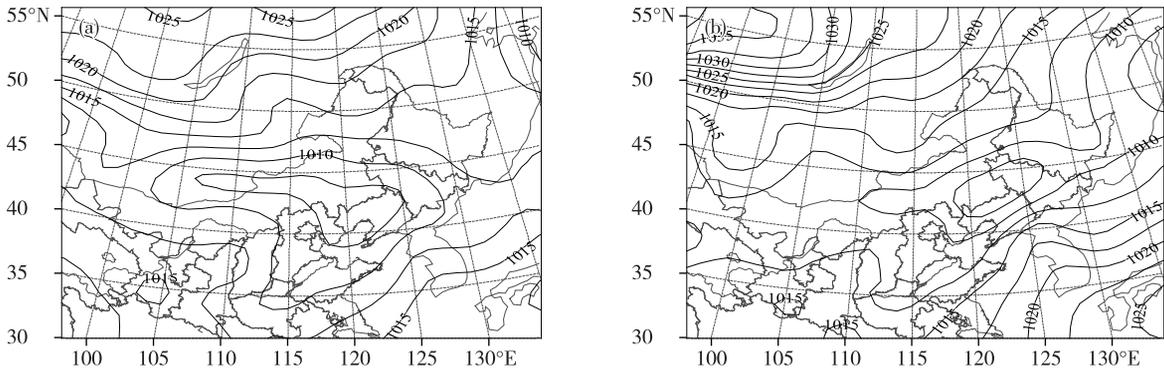


图4 地面气压场(a.2016年11月4日08时,b.2018年3月13日08时;单位:hPa)
Fig.4 Surface pressure field (a. 08:00 on 4 November 2016, b. 08:00 on 13 March 2018; units: hPa)

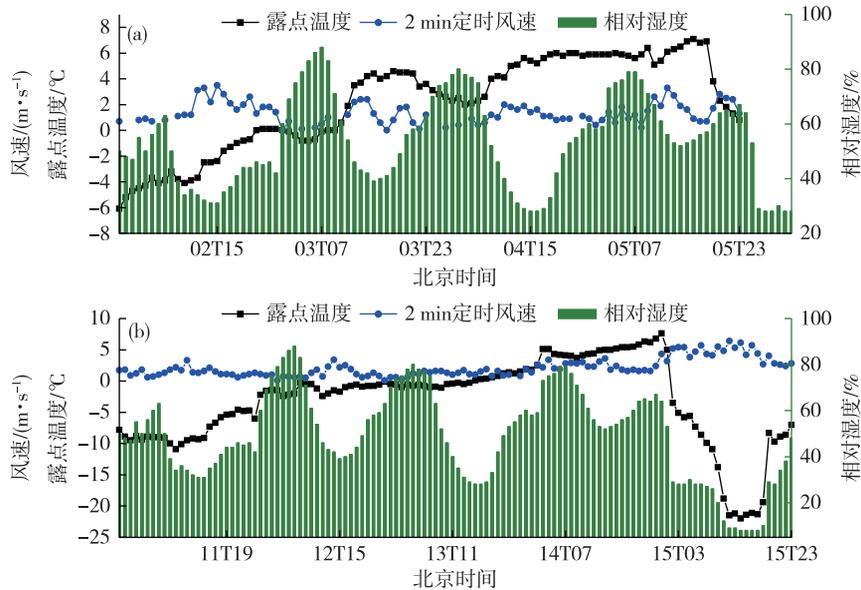


图5 地面露点、风速和相对湿度(a.2016年11月1—5日,b.2018年3月11—15日)
Fig.5 Surface dew point, wind speed, and relative humidity of Beijing Meteorological Observatory (a. from 1 to 5 November 2016, b. from 11 to 15 March 2018)

1 000 m,1 000 m 气温达到 17 ℃左右,高低层逆温强度达 12 ℃(图 6a);2018 年过程由于低层暖气团

强盛导致在 11 日出现近地面和低层的双层逆温,12 日 08 时高低层温差达到 12 ℃,之后不断加强且长

时间维持,13 日 08 时逆温强度达 16 °C,仍为双层

逆温,大气垂直扩散能力很差(图 6b)。

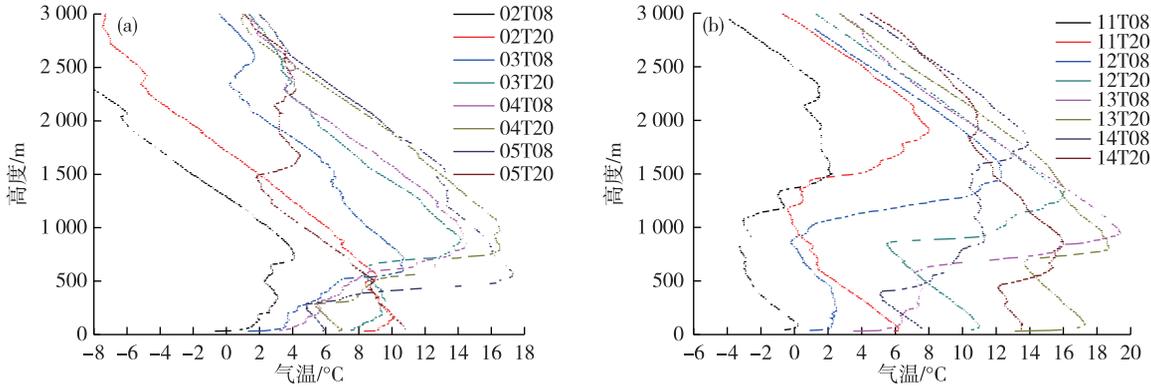


图 6 北京市观象台 L 波段秒级探空 (a.2016 年 11 月 2—5 日;b.2018 年 3 月 11—14 日)

Fig.6 L-band second-level sounding diagram of Beijing Meteorological Observatory (a. from 2 to 5 November 2016, b. from 11 to 14 March 2018)

由温度和相对湿度垂直剖面可知,2016 年过程 1.5 km 处气温为 10 °C,暖脊最高升至 1.8 km,暖气团影响时间段为 3 日夜间至 4 日夜间,同时 0.5 km 以下相对湿度显著增加,有一定日变化特征,夜间湿度在 80%以上(图 7a);2018 年过程暖气团势力更强,影响时段为 12 日夜间至 13 日夜间,1.5 km

处气温最高为 12 °C,暖脊最高升至 2 km 左右,500 m 以下增湿明显,但日变化特征强于 2016 年过程,夜间湿度最大也在 80%以上(图 7b)。两次污染过程低层暖气团势力都较强,2018 年更强于 2016 年,所以造成逆温强度显著大于 2016 年过程,大气垂直扩散能力更差。

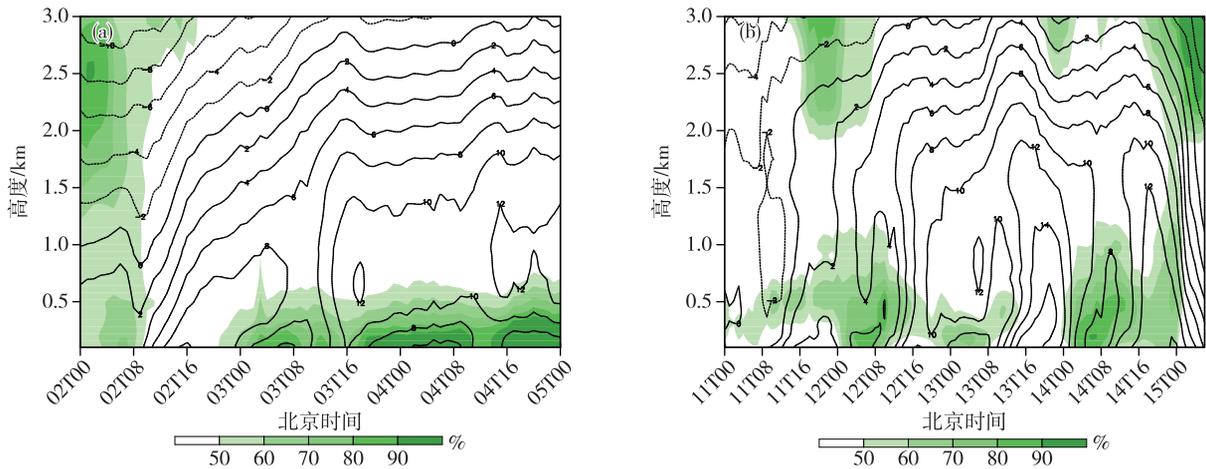


图 7 北京市观象台气温(等值线,单位:°C)和相对湿度(填色,单位:%)垂直分布(a. 2016 年 11 月 2—5 日;b.2018 年 3 月 11—14 日)

Fig.7 Vertical distribution of temperature(isoline, units: °C) and relative humidity (colored, units:%) of Beijing Meteorological Observatory (a. from 2 to 5 November 2016, b. from 11 to 14 March 2018)

两次污染过程边界层均为小风(图 8),由近地面风向转换来看,两次过程均受到山谷风影响,白天盛行偏南风,谷风的层次基本能延伸至边界层顶,夜间转为偏北风,从边界层内风场的分布及风速大小来看,两次过程比较类似。

2.5 两次重污染过程大气扩散能力对比

水平风速、边界层高度是衡量大气水平和垂直

扩散条件的常用综合性指数。边界层高度越低代表大气扩散条件越差,反之,代表扩散条件越好。表 2 给出两次重污染天气过程的风速和边界层高度,两次过程水平风速平均值均为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大气水平扩散条件基本相当;2018 年过程的平均边界层高度为 483 m,明显低于 2016 年过程的 567 m,大气垂直扩散能力更差。综上所述,2018 年过程较 2016

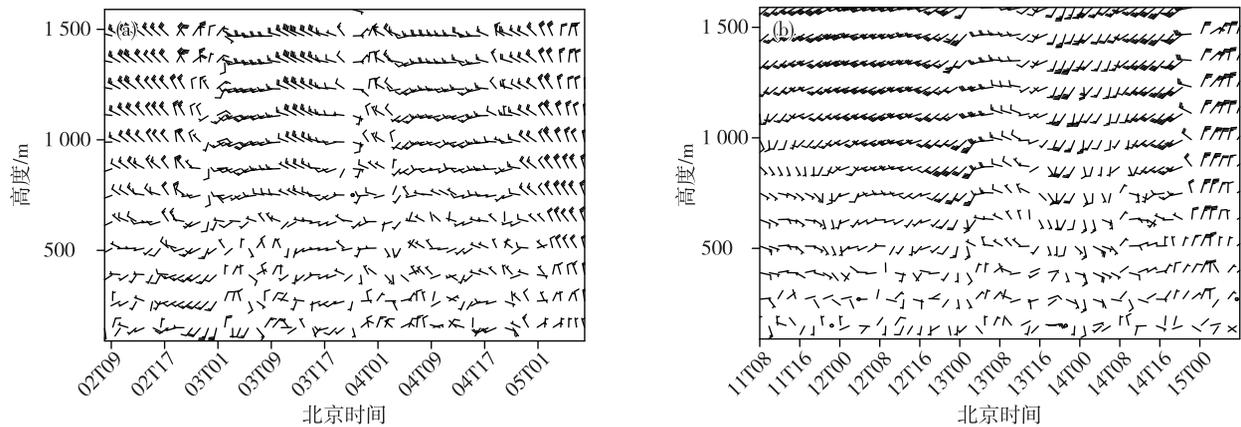


图8 北京市气象台风场垂直分布(a. 2016年11月2—5日;b. 2018年3月11—14日)

Fig.8 Vertical distribution of wind field of Beijing Meteorological Observatory (a. from 2 to 5 November 2016, b. from 11 to 14 March 2018)

年过程的气象条件更不利于污染物扩散。上述现象的发生,主要是强逆温所致。2018年过程中,北京地区中层回暖显著,850hPa温度明显偏高,导致

北京地区强逆温层的发展和维持,严重抑制了大气污染物的垂直扩散能力。

表2 2016年和2018年两次重污染过程的综合指数

Table 2 Composite index of the two heavy pollution processes in 2016 and 2018

2016年	地面风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	边界层高度/m	2018年	地面风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	边界层高度/m
11月2日	1.8	784	3月11日	1.4	565
11月3日	1.0	593	3月12日	1.2	364
11月4日	1.1	423	3月13日	1.1	529
11月5日	1.6	468	3月14日	2.3	473
平均值	1.5	567	平均值	1.5	483

综上所述,2016年与2018年重污染过程的天 气尺度气象条件较为相似,甚至2018年气象条件更不利于空气污染物的扩散,但从污染程度来看,2018年的峰值浓度及全市平均低于2016年过程,BC和CO浓度降低显著,说明除气象条件之外,2013年国务院组织实施《大气污染防治行动计划》以来,京津冀及周边地区能源结构和产业结构调整,散煤治理和“散乱污”企业综合整治,秋冬季严重过剩产能错峰生产和运输等关键治理措施取得了显著成效,尤其是2018年减排限排措施力度极大,其对污染过程的减轻有重要作用。

3 结论

1) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化对比显示,2018年过程较2016年过程污染最重单站峰值浓度显著偏低,全市平均浓度也较其略低,且未出现爆发性增长阶段,浓度积累增长平缓。

2) CO和BC浓度变化对比表明,2016年过程CO呈上升趋势,3日17—21时出现浓度陡升现象,4h浓度上升接近 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,峰值浓度为 $3179 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,BC浓度较高且峰值浓度为 $19939 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$;2018年过程期间CO上升幅度较小,峰值浓度较2016年过程下降24.6%,且未出现爆发性增长阶段,BC有一定日变化特征,峰值浓度为 $4228 \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$,远远低于2016年过程。说明污染物一次排放量远小于2016年过程。

3) 通过供暖季两次重污染天气的气象条件对比分析表明,2018年过程与2016年过程天气尺度高低层天气影响系统类似,地面平均风速相同,大气水平扩散条件基本相似,边界层风场的分布及风速大小基本一致,但从暖气团影响的高度以及逆温强度推断,2018年过程大气垂直扩散条件更不利于污染物的扩散。

4) 两次重污染过程发生在相似的气象条件下,

2018年的气象条件更不利,但从细颗粒物和一次排放污染物对比来看,2018年过程多种污染物浓度显著下降、平均浓度明显降低、重污染持续时间大幅缩短,这与人为减排限排等因素密切相关。

参考文献:

- [1] 王跃思,张军科,王莉莉,等.京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J].地球科学进展,2014,29(3):388-396.
- [2] 王跃思,姚利,刘子锐,等.京津冀大气霾污染及控制策略思考[J].中国科学院院刊,2013,28(3):353-363.
- [3] 吴兑,吴晓京,李菲,等.1951—2005年中国大陆霾的时空变化[J].气象学报,2010,68(5):680-688.
- [4] 孙彧,马振峰,牛涛,等.最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征[J].气候与环境研究,2013,18(3):397-406.
- [5] 苗蕾,廖晓农,王迎春.基于长时间序列的北京PM_{2.5}浓度日变化及气象条件影响分析[J].环境科学,2016,37(8):2836-2846.
- [6] 贺圣平,王会军.东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征[J].大气科学,2012,36(3):523-538.
- [7] 丁一汇,柳艳菊.近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):37-48.
- [8] 尹志聪,王会军,郭文利.华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征[J].地球科学,2015,45(5):649-655.
- [9] 尹志聪,王会军,袁东敏.华北黄淮冬季霾年际增多与东亚冬季风的减弱[J].科学通报,2015,60(15):1395-1400.
- [10] 张人禾,李强,张若楠.2013年1月中国东部持续性强雾-霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学:地球科学,2014,44(1):27-36.
- [11] 赵习方,徐晓峰,王淑英,等.北京地区低能见度区域分布初探[J].气象,2002,28(11):55-57.
- [12] 陈静,吴兑,刘啟汉.广州地区低能见度事件变化特征分析[J].热带气象学报,2010,26(2):156-164.
- [13] 熊亚军,唐宜西,寇星霞,等.北京春季一次霾和沙尘混合污染天气过程分析[J].干旱气象,2017,35(1):100-107.
- [14] 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.
- [15] 刘瑞婷,韩志伟,李嘉伟.北京冬季雾霾事件的气象特征分析[J].气候与环境研究,2014,19(2):164-172.
- [16] 陈瑞敏,吴雁,康文英,等.连续雾霾天气污染物浓度变化及天气形势特征分析[J].气候与环境研究,2014,19(2):209-218.
- [17] 周洪昌.城市汽车排放CO污染模式的概略分析[J].1994,15(5):78-82.
- [18] INGERSOLL R B, INMAN R E, FISHER W R. Soil's potential as a sink for atmospheric carbon monoxide[J]. Tellus,1974,26(1/2):151-159.
- [19] HEICHEL G H. Removal of carbon monoxide by field and forest soils[J].J Environ Quality,1973,2(4):419-423.
- [20] 秦世广,汤洁,温玉璞.黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J].气象,2001,27(11):3-7.
- [21] 薛敏,王跃思,孙扬,等.北京市大气中CO的浓度变化监测分析[J].环境科学,2006,27(2):200-206.