

Analysis on the Characteristics of Atmospheric Particulate Matter and Its Causes of Atmospheric Circulation in Beijing

Xiaoling Hu, Yan Li*, Jiaqi Xia, Chunyan Lv, Ziqi Liu, Qiang Jiang

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu

Email: huxl19@lzu.edu.cn, liyanz@lzu.edu.cn

Received: May 6th, 2020; accepted: May 21st, 2020; published: May 28th, 2020

Abstract

In this paper, hourly observation data of air pollutants in Beijing, meteorological observation data and NCEP/NCAR reanalysis data were used to systematically analyze the air pollution situation, to summarize the variation characteristics of particulate matter concentration in different time scales in Beijing from 2015 to 2017. It was found that air pollution index of Beijing dropped, the air pollution situation improved, and the average daily concentrations of particulate matter and nitrogen oxide decreased year by year. However, the highest daily concentration of PM_{2.5} was 6.7 times higher than that of the grade II limits by China. The average number of days for the daily concentration of PM_{2.5} exceeding the grade II limits by China reached 32% of the total in the whole year. The problem of particulate matter pollution still deserved attention. 7 cases of fine particle pollution in winter during the whole cold surge process were selected to analyze its causes of atmospheric circulation. It was found that the combination of stable atmospheric environment, high humidity, poor horizontal and vertical dispersion conditions and external pollutant transport resulted in the occurrence of polluted weather in Beijing. After that, the upper-air blocking situation collapsed, the horizontal trough turned vertical, leading the cold air southward. The northwest clean air flow cooperated with the surface Mongolian high pressure system, which easily caused severe gale weather in the Beijing area, broke the inversion layer, and enhanced the particle diffusion ability. At the same time, the cold air southward will form precipitation weather and further remove the particles. The pollution weather ended.

Keywords

Beijing, Different Time Scales, Polluting Weather Process, Causes of Circulation

北京市颗粒物污染特征及其大气环流成因分析

胡小玲, 李艳*, 夏佳琦, 吕春艳, 刘子奇, 蒋强

*通讯作者。

兰州大学, 大气科学学院, 甘肃 兰州
Email: huxl19@lzu.edu.cn, *liyanlz@lzu.edu.cn

收稿日期: 2020年5月6日; 录用日期: 2020年5月21日; 发布日期: 2020年5月28日

摘要

本文利用北京市大气污染物逐时观测数据、气象观测资料、NCEP/NCAR再分析资料, 系统分析了2015年~2017年北京市大气污染概况, 总结了不同时间尺度颗粒物浓度变化特征, 结果表明北京市空气污染综合指数下降, 空气污染状况好转, 颗粒物和氮氧化物日均浓度超标天数逐年减少, 但PM_{2.5}超标倍数最高达6.7倍, 年均超标率达32%, 颗粒物污染问题仍然值得重视。选择伴随冬季冷空气过程发生的7例细颗粒物污染事件分析其大气环流成因, 发现污染天气过程中, 稳定的大气环境、高湿天气条件、较差的水平垂直扩散条件和外部污染物输送共同作用导致了北京市污染天气的发生; 之后, 高空阻塞形势崩溃, 横槽转竖, 引导冷空气南下, 西北清洁气流与地面蒙古高压系统相互配合, 易在北京地区造成剧烈大风天气, 打破逆温层, 增强颗粒物扩散能力, 同时冷空气南下形成的降水天气会进一步清除颗粒物, 污染天气消退。

关键词

北京市, 不同时间尺度, 污染天气过程, 环流成因

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气污染, 又称空气污染, 主要污染物包括气态污染物 NO₂、SO₂、O₃、CO、细颗粒物 PM_{2.5} 以及可吸入颗粒物 PM₁₀, 这些污染物是引起城市雾霾发生、降低能见度、影响人们健康的罪魁祸首[1] [2] [3]。长期暴露在污染大气中易造成肺功能受损、增加呼吸系统疾病发病率等[4] [5] [6], 其中颗粒物尤其是 PM_{2.5} 是影响人们心肺健康、改变人体免疫力的主要污染物[7] [8]。近年来大气污染的范围逐渐扩大, 大气污染程度排序为京津冀 > 中三角 > 长三角 > 珠三角[9], 政府部门对大气污染防治愈加重视, 使得大气污染研究逐渐成为科研领域热点。Flocas 等认为大气环流形势与局地气象条件对地中海城市地区空气污染形成有重要影响[10], 而国内研究也发现大气环流形势的移动与演变过程会影响到地面污染物堆积、扩散、输送[11] [12] [13], 从而影响到污染天气的形成和消退, 比如在一定环流背景下伴随冷空气而来的偏北大风等天气会使污染物消散, 而静小风的出现会造成气流停滞, 进一步形成区域性污染天气[14]。

进入 21 世纪以来, 京津冀地区霾日数整体呈增加趋势[15], 而北京市位于京津冀城市群的中心, 是个人口达 2170 万、机动车数量超过 500 万的大都市, 其污染具有区域性特征, 受到区域输送影响, 易形成持续性污染天气[16], 颗粒物污染已经逐渐取代传统的 SO₂ 污染成为北京市的主要污染物[17]。此外北京西拥太行山、北邻燕山、南接华北大平原、东靠渤海, 地形呈现向南开口的“簸箕”状[18], 独特的地形易使北京地区周围污染物沿各类尺度的西南气流风带、东南气流风带送至北京[19], 周边区域污染物的输送进一步加重北京市大气污染。针对北京地区严重的大气污染现状, 廖晓农等[20]研究发现北京地区冬

季持续性雾霾是在高空西北气流、低空多波活动天气背景下逆温层的出现引起的,而夏季持续性雾霾则是由于副热带高压形成的偏南风输送机制导致的;杨旭等[21]人将引起京津冀地区重污染的天气形势分为9类,对该地区污染天气的预报预警提供了较好的指导;此外静稳天气[22]和高温高湿天气[23]不利于颗粒物的扩散,易造成区域性的严重污染。

目前北京市的大气污染研究中关于污染天气环流成因的分析较少,且多数是研究一个污染天气过程,缺乏系统性和综合性。因此本文利用北京市2015年~2017年的大气污染物逐时观测数据,分析了北京市大气污染概况,总结了颗粒物浓度变化特征,从而评估北京市大气污染控制的有效性;选取三年中冬季7例细颗粒物污染天气过程,利用1981年~2010年和2015年~2017年的NCEP/NCAR再分析资料,分析污染天气过程前、中、后的大气环流特征,以期为北京市长期的大气污染防治工作提供科学的依据。

2. 数据与方法

本文所需数据有:2015年~2017年的大气污染物逐时观测数据(大气污染物包含PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃)和同期的常规气象观测资料;1981年~2010年和2015~2017年的再分析资料,资料均来源于NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Centers for Atmospheric Research),空间分辨率为2.5°×2.5°,要素有500 hPa温度场和位势高度场、700 hPa风场、1000 hPa风场和海平面气压场。

本文采用计算统计的方法,研究北京市2015年~2017年3年中的大气污染概况,并计算颗粒物日均浓度、月均浓度、小时浓度,利用我国2012年2月发布且在2016年1月1日在全国实施GB3095-2012《环境空气质量标准》中的二级标准[24](表1),统计出颗粒物超标天数,总结其污染特征。

Table 1. National environmental air quality standards
表 1. 国家环境空气质量标准

污染物种类	平均时间	浓度限值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		一级	二级
SO ₂	年平均	20	60
	24小时平均	50	150
	1小时平均	150	500
NO ₂	年平均	40	40
	24小时平均	80	80
	1小时平均	200	200
O ₃	日最大8小时平均	100	160
	1小时平均	160	200
PM ₁₀	年平均	40	70
	24小时平均	50	150
PM _{2.5}	年平均	15	35
	24小时平均	35	70

空气综合污染指数反映了空气污染的年际变化特征,各污染物污染分指数反映了每种污染物的年际变化特征,而污染负荷系数则代表着每种污染物对整体大气污染的贡献率。空气综合污染指数计算公式为:

$$P = \sum n_i = P_i \quad (1)$$

各污染物污染分指数计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (2)$$

污染负荷系数计算公式为:

$$F_i = P_i/P \quad (3)$$

式中 P 为空气综合污染指数, P_i 为第 i 项污染物的污染分指数, F_i 为第 i 项的污染负荷系数, n 为污染物项数, C_i 为第 i 项污染物质量浓度的年均值(O_3 为 O_{3-8h} 滑动平均的第 90 位百分数), S_i 为第 i 项空气污染的环境质量标准限制, 所有污染物的限制值 S_i 均采用《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中的二级标准 [17]。

污染天气的形成由污染源排放和气象条件共同影响, 本文主要探究大气环流形势引导的冷空气南下对污染天气的作用, 故本文以污染天气结束时气温降低超过 3°C 为标准筛选出 2015 年~2017 年冬季(12~2 月)因为冷空气到来引起的污染天气结束的污染天气过程共 7 例如表 2。利用 2015 年~2017 年的 NCEP/NCAR 再分析资料做污染天气过程前、中、后的合成分析, 并利用 1981 年~2010 年 30 年的再分析资料做二者的距平场进一步分析大气环流的异常特征。此处及后文中的污染天气过程前指污染天气到来前一天, 污染天气过程中指污染天气持续阶段, 污染天气后指污染天气结束后一天。

Table 2. Contaminated weather processes in the winter from 2015 to 2017

表 2. 2015 年~2017 年冬季的污染天气过程

污染天气过程	过程降温($^\circ\text{C}$)
2015.1.3~1.6	4.2
2015.12.8~12.11	3.2
2016.1.20~1.22	3.6
2016.2.10~2.13	4.1
2016.12.20~12.23	3.9
2017.2.14~2.17	3.4
2017.2.18~2.20	4.4

3. 北京市颗粒物的浓度变化特征

3.1. 北京市污染概况

由表 3 可以看出, 2015 年~2017 年 3 年中北京市空气综合污染指数 P 逐年下降, 到 2017 年 P 值下降了 18.0%, 证明北京市大气污染状况逐年好转。各污染物污染分指数呈现逐年递减趋势, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 降幅最为明显, 到 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 空气污染分指数下降了 28.3%, PM_{10} 次之, 下降了 18.2%。由污染负荷系数 F_i 可以看出 2017 年各污染物对北京市大气污染的贡献排序为 $\text{PM}_{2.5} > \text{PM}_{10} > \text{O}_3 > \text{NO}_2 > \text{SO}_2$, 其中 SO_2 对北京市污染贡献比重最小, NO_2 与 O_3 所占比重逐年增加, 但仍小于颗粒物对北京市整体污染的状况的贡献, $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 共贡献了 0.54, 所以颗粒物是北京市最主要的污染物, 这也印证了颗粒物污染已经逐渐取代传统的 SO_2 污染成为北京市的主要污染物的结论。故后文分析了颗粒物的浓度特征, 并选取细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染天气过程, 分析持续性大气污染发生的环流成因。

Table 3. Pollution Subindex P_i and Pollution Load Coefficient F_i of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 and O_3 in Beijing
表 3. 北京市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的污染分指数 P_i 与污染负荷系数 F_i

年份	$PM_{2.5}$		PM_{10}		SO_2		NO_2		O_3		P
	P_i	F_i	P_i	F_i	P_i	F_i	P_i	F_i	P_i	F_i	
2015	2.23	0.35	1.54	0.24	0.2	0.03	1.18	0.18	1.25	0.2	6.4
2016	2.03	0.34	1.41	0.24	0.15	0.03	1.13	0.19	1.24	0.21	5.96
2017	1.6	0.3	1.26	0.24	0.12	0.02	1.08	0.21	1.19	0.23	5.25

3.2. 北京市颗粒物日均浓度变化

图 1 分别显示了北京市 2015 年~2017 年 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 日均浓度变化。从整体上看,北京市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 三年里任意一年的日均浓度变化均呈现出大 U 型。 $PM_{2.5}$ 的日均浓度变化范围为 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 472 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 超标倍数最高可达 6.7 倍, 3 年来, $PM_{2.5}$ 的日均浓度超标天数高达 347 d, 年均超标天数为 115.7 d, 年均超标率达 32%。 PM_{10} 的日均浓度变化范围为 $9 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 772 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $772 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的超高浓度发生在 2017 年 5 月 4 日, 该日京津冀地区受地面鞍型场作用, 发生严重的沙尘天气[25], 沙尘天气可以使 PM_{10} 的浓度显著升高。2015 年~2017 年 PM_{10} 超标天数为 117 天, 年均超标天数为 39 d, 超标天数比例为 11%。综上可以看出即使北京市的颗粒物污染状况有所缓解, 但污染问题依然严峻。

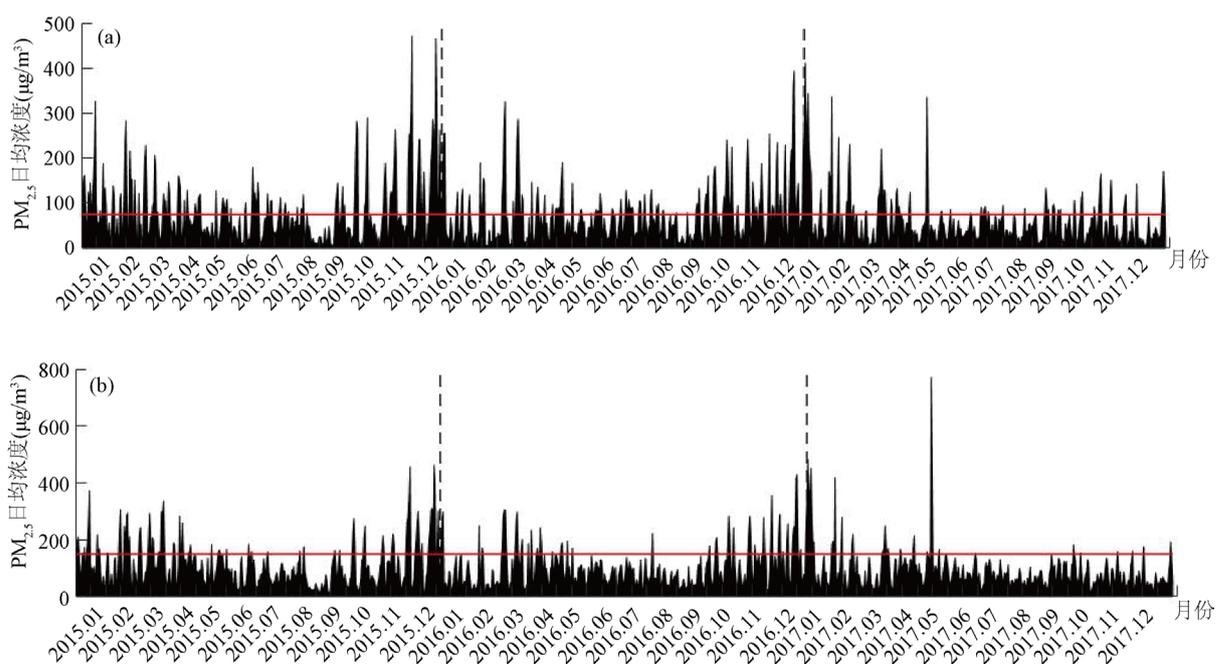


Figure 1. Daily concentration of particulate matter in Beijing (a, b refer to $PM_{2.5}$, PM_{10} , respectively)

图 1. 北京市颗粒物逐日浓度变化图(a、b 分别指 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} , 下同)

3.3. 北京市颗粒物月浓度变化

图 2 分别是 2015 年~2017 年 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的月均浓度变化, 三年中大气污染物的月均浓度有明显的差异。由图可以看出, $PM_{2.5}$ 的月均浓度变化整体上呈 U 型变化, 低值出现在 8 月份, 高值在 12 月~1 月, 值得注意的是 2017 年月均浓度有所下降, 且 9 月~12 月下降得较为明显, 这可能与 2017 年北京市开展

的各项大气污染防治工作有关。 PM_{10} 的月均浓度变化近似于 $PM_{2.5}$ ，但2017年5月份月均浓度骤升，结合该年5月4日的沙尘天气，说明北京地区这个时间段易出现沙尘天气，造成严重的天气污染。

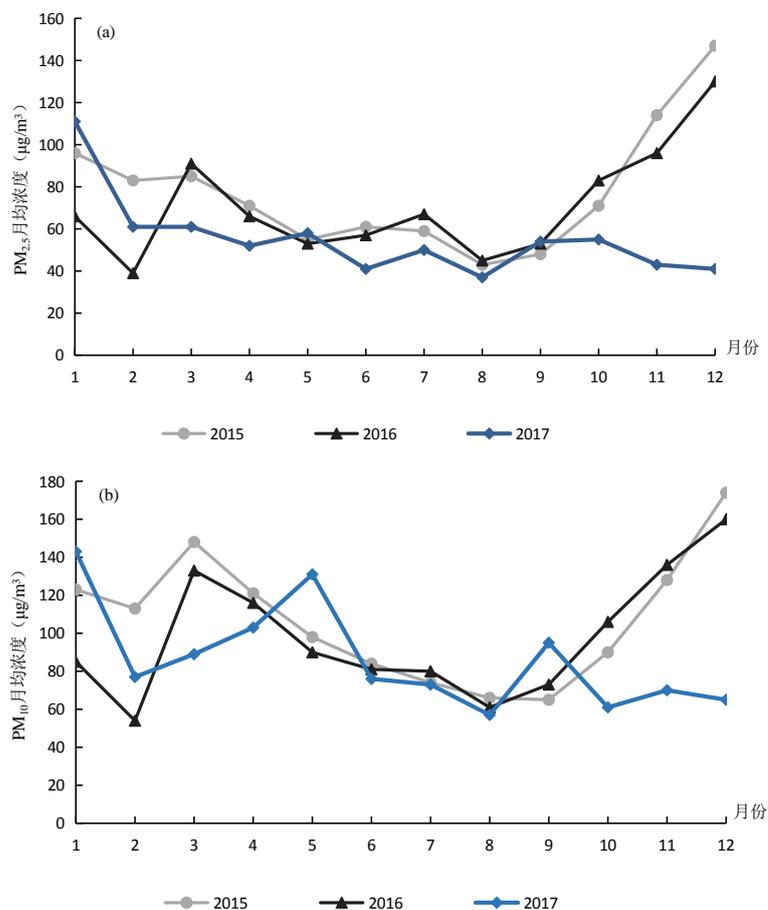


Figure 2. Monthly mean concentration of particulate matter in Beijing
图 2. 北京市颗粒物月均浓度变化图

3.4. 北京市颗粒物小时浓度变化

图 3 是北京市 2015 年~2017 年颗粒物的小时浓度变化图。从图中可以看出， $PM_{2.5}$ 小时浓度在春、夏、秋季变化不明显，而在冬季变化较为明显，变化幅度达到 $34 \mu g/m^3$ 。 $PM_{2.5}$ 在四季的 24 小时平均浓度分别为 $66 \mu g/m^3$ 、 $51 \mu g/m^3$ 、 $69 \mu g/m^3$ 、 $88 \mu g/m^3$ ，春夏季节， $PM_{2.5}$ 小时浓度在 10 时左右达到第一个峰值，这可能是因为机动车早高峰向大气环境中不断输入机动车尾气尘以及道路扬尘所致。午后不稳定边界层发展，混合层高度高，湍流垂直交换能力强，垂直扩散能力增强，使颗粒物浓度下降[26]，在 17 时达到谷值；而夜间混合层降低，其浓度再次回升，第二个峰值在 22~1 时出现。秋季和春夏季略有不同，小时浓度呈现 W 型，在 7~8 时和 16 时分别达到了谷值($60 \mu g/m^3$)和次谷值($67 \mu g/m^3$)，在 21 时达到了最大值($78 \mu g/m^3$)。冬季 $PM_{2.5}$ 小时浓度呈现大 U 型，在 7~16 时浓度值相差不大，在 22 时达到最大值，由于冬季处于采暖期，其小时浓度整体高于其他季节。

夏秋冬季， PM_{10} 小时浓度变化与 $PM_{2.5}$ 类似，春季两者差别较大。春季 PM_{10} 小时浓度呈 W 型分布，峰值和次峰值分别出现在 21~22 时和 9~10 时，谷值和次谷值分别出现在 5~7 时和 13~15 时，这点与 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化近似，但 5~16 时 PM_{10} 小时浓度值均大于冬季，结合上述 PM_{10} 月均浓度变化特征可得，这

一现象与春季白天沙尘天气的出现有关。

综上是对北京市大气污染物概况以及颗粒物不同时间尺度浓度变化特征的分析,可以得到3年来,北京市大气污染是颗粒物污染、臭氧污染和弱氮氧化物污染相互作用的结果,颗粒物污染有所缓解但相关的大气防控工作仍要继续。

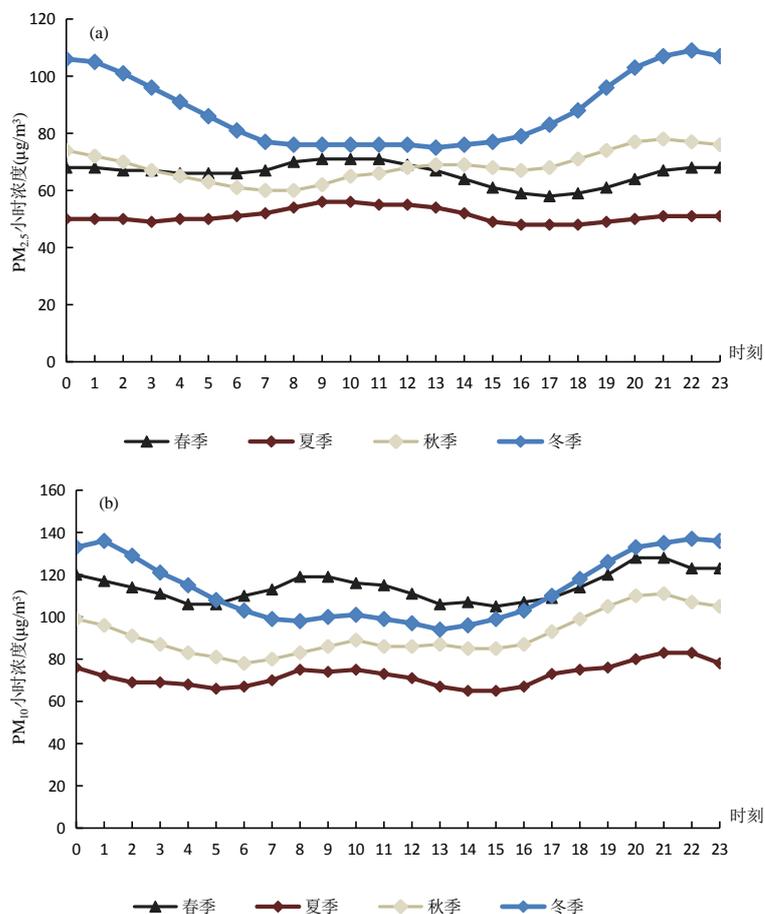


Figure 3. Hourly mean concentration of particulate matter in Beijing
图3. 北京市颗粒物小时浓度变化图

4. 污染天气过程的环流成因分析

北京市的大气污染以颗粒物污染为主,而颗粒物中细颗粒物 PM_{2.5} 对人体健康危害极大。颗粒物月均浓度高值集中在冬季(12月~1月份),且 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 冬季的相关性较好,故本文筛选出2015年~2017年冬季的7例细颗粒物污染天气过程,利用NCEP/NCAR再分析资料分别对500 hPa的温压场、700 hPa的风场、1000 hPa风场和海平面气压场做合成分析,并用过去30年的再分析资料做距平分析,从天气学角度分析颗粒物污染的大气环流成因。

图4是污染天气过程前各要素的合成图和距平图,合成场图4(a)可以看出在污染天气过程前,500 hPa高度场上中纬地区呈现出典型的两槽一脊型环流形势,北京市位于槽后脊前,受西北气流影响,引导冷空气南下,水汽输送条件差;而合成场(图4(c))中地面北京市受高压中心控制,气流向外辐散,且气压梯度大,水平风速高,颗粒物水平扩散条件良好,不易形成污染性天气。距平场(图4(b))可以看出,500 hPa高度上中纬地区位势高度距平场呈现正-负-正-负的分布,距平强度分别达到100 gpm、110 gpm、60

gpm、20 gpm，右侧的正距平范围覆盖整个中国区域，中心在内蒙古东部。这说明了污染天气过程前，贝加尔湖附近、东亚大槽均较往年偏强，强暖脊和强东亚大槽使得更强冷空气南下，形成大风天气，不利于污染天气的形成。概括来说污染天气过程前高空两槽一脊和地面高压系统相互配合，易在地面北京地区造成大风、低湿天气，形成良好的扩散条件，不利于颗粒物在近地面的堆积。

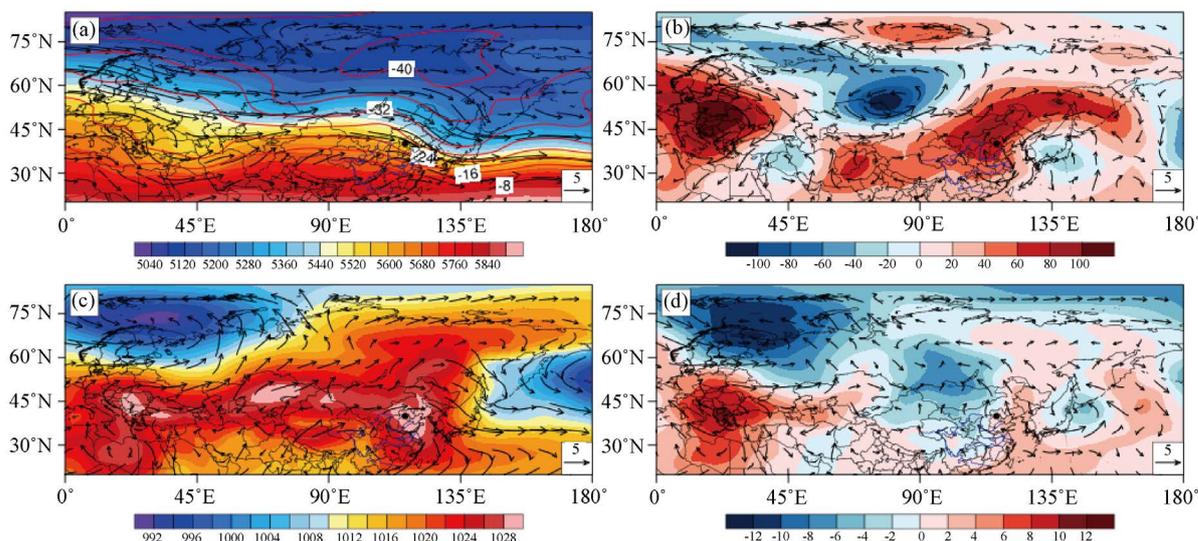


Figure 4. The synthesis and anomaly fields of the elements before pollution weather process, (a) 500 hPa potential height field (filled, unit: gpm), temperature field (solid red line, unit: °C) and 700 hPa wind field (vector arrow, unit: m/s); (b) 500 hPa potential height anomaly field and 700 hPa wind field anomaly field; (c) sea level pressure field (unit: hPa) and 1000 hPa wind field synthetic field; (d) sea level pressure anomaly field and 1000 hPa wind field anomaly field. The black points in the figure represent Beijing, the same as below

图 4. 污染天气过程前各要素的合成场和距平场, (a) 500 hPa 位势高度场(填充, 单位: gpm)、温度场(红色实线, 单位: °C)和 700 hPa 风场(矢量箭头, 单位: m/s); (b) 500 hPa 位势高度距平场和 700 hPa 风场距平场; (c) 海平面气压场(单位: hPa)和 1000 hPa 风场合成场; (d) 海平面气压场距平场和 1000 hPa 风场距平场, 图中黑色点代表北京市, 下同

污染天气过程中各要素的合成场和距平场如图 5 所示, 此时合成场(图 5(a)、图 5(c))与污染天气过程中是完全不同的, 合成场(图 5(a))表明 500 hPa 东亚中高纬有一横槽, 北京市高空维持偏西风气流, 无明显的冷暖平流, 与污染天气过程前的冷平流对比, 地面会有小幅度升温, 这和地面台站资料中北京市在污染天气中气温上升是吻合的。平直西风气流的维持不利于水汽的输送, 却在一定程度上有利于地面夜间辐射降温, 形成逆温现象, 从而加强大气稳定性, 使颗粒物和水汽聚集在近地面[27]; 与此同时 500 hPa (图 5(a))高度上高纬地区还有一个明显的东北 - 西南向的长波脊即阻塞高压, 高压脊前的东北引导气流会引导冷空气在西伯利亚地区聚集, 为地面冷空气的到来、污染天气的消散提供了良好的天气背景条件; 700 hPa (图 5(c))高度上中纬以偏西南气流为主, 有利于暖湿空气的输送和中层大气增温, 但由于没有冷空气配合, 形成降水的可能性极小, 却易在低空形成高湿条件, 降低大气能见度, 提高颗粒物浓度[28]; 此外近地面高压中心一分为二, 高压中心分别位于新疆北部和日本, 北京地区位于两个高压中心之间的相对低压带, 导致颗粒物不易扩散; 另一方面日本高压西南侧的东南风也会使珠江三角洲等区域的颗粒物输送至北京市。距平场图 5(b)可以看出, 500 hPa 高度上中纬地区位势高度距平场呈现正 - 负 - 正 - 负的分布, 但距平位置和强度有了明显的变化, 东亚地区的距平由负变正, 强度由 20 gpm 增加至 140 gpm, 距平中心东移至日本海附近, 正距平强度和位置的巨大变化导致东亚大槽大大减弱, 而东亚大槽的减弱是中纬地区西北气流转变为西风直流的主要原因。近地面上(图 5(d)), 海平面气压距平场的 2 个正距平中

心分别在欧洲西部和西北太平洋上,距平强度均达到了 6 hPa,西北太平洋气压的正距平与近地面风向的改变有关。

总之,污染天气过程中,高空中高纬存在一横槽,横槽的存在与维持是污染天气过程形成和维持的重要环流形势,同时高空阻塞高压的存在为横槽转竖和强冷空气南下创造了良好的背景条件。高空平直西风气流不利于水汽的输送,却在一定程度上有利于逆温层的形成,加强大气稳定性,中层暖湿平流输送和冷空气的缺失不利于降水的形成,高湿环境却会增加颗粒物浓度,近地面北京地区位于两个高压中心间的相对低压带,从而降低颗粒物扩散能力,近地面的东南风也易引起周边颗粒物向北输送,所以稳定的大气环境、高湿天气条件、较差的水平和垂直扩散条件和外部颗粒物输送共同作用导致了北京市污染天气的发生。

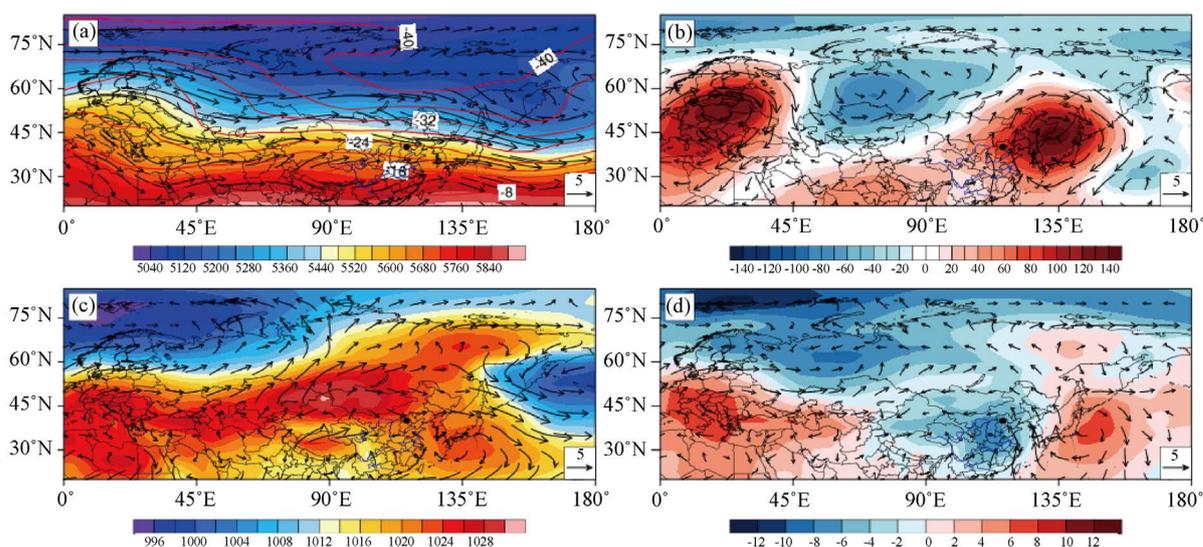


Figure 5. The synthesis and anomaly field of each element in pollution weather process

图 5. 污染天气过程中各要素的合成场和距平场

图 6 是污染天气过程后各要素的合成图和距平图,此时污染天气已经结束,空气中颗粒浓度明显降低,甚至降低至国家二级标准以下。500 hPa (图 6(a))高度上温度场自西欧至东亚呈现出西高东低的分布状态,此时阻塞形势崩溃,横槽转竖并向南加深,引导强冷空气向南爆发;海平面(图 6(c))上北京地区受蒙古高压控制,高低空系统相互配合易造成北京市地面剧烈降温和大风天气,污染天气过程中的逆温层被打破,大气稳定性变差,中层垂直运动增强,近地面盛行偏西北风,颗粒物的垂直和水平扩散条件良好;此外冷空气南下与水汽交汇易形成降水天气,有利于颗粒物尤其是细颗粒物的去除,降低颗粒物浓度。高空位势高度距平场(图 6(b))上 60°N 以北区域被负距平占据,以南以正距平为主,负距平强度较污染天气前、中加强,范围也向南扩大,这与冷空气大范围的向南输送有关,正距平强度则减弱且范围缩小。而近地面距平场(图 6(d))与污染天气过程中不同,北京地区受到大范围的海平面气压正距平控制,高压较往年有显著的增强,地面风速较常年也有明显的增强。

概括而言,冷空气的南下,是北京地区污染天气消退的主要原因,而阻塞形势崩溃,横槽转竖是冷空气向南爆发的诱因。伴随冷空气南下的西北清洁气流与地面蒙古高压系统相互配合,易在北京地区造成剧烈降温和大风天气,可以打破逆温层,利于颗粒物的扩散[13],同时冷空气南下形成的降水天气会进一步清除颗粒物,降低颗粒物浓度,污染天气消退。

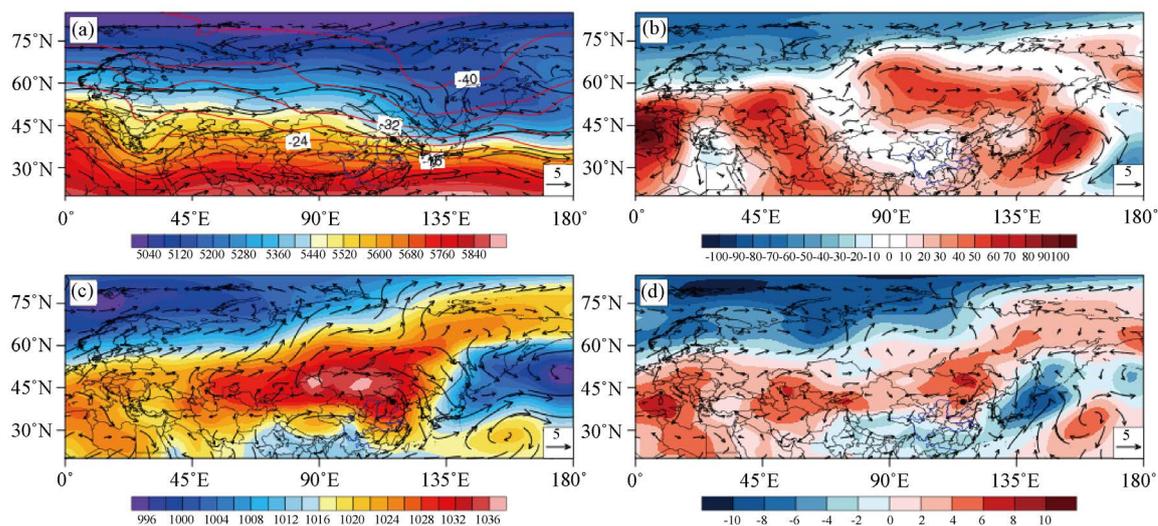


Figure 6. The synthesis and anomaly fields of the elements after pollution weather process

图 6. 污染天气过程后各要素的合成场和距平场

5. 结论和讨论

5.1. 结论

本文利用北京市 2015 年~2017 年的大气污染物数据、同期的气象要素资料以及再分析资料, 分析北京市大气污染概况, 总结颗粒物不同时间尺度浓度变化特征, 同时筛选出 3 年中冬季的 7 例细颗粒物污染天气过程, 并绘制大气环流合成图和距平图, 得到以下结论:

(1) 北京市大气污染是颗粒物污染、臭氧污染和弱氮氧化物污染相互作用的结果, 北京市污染物年均浓度逐年下降, 颗粒物和氮氧化物日均浓度超标天数逐年减少, 但 $PM_{2.5}$ 超标倍数最高可达 6.7 倍, 年均超标率达 32%, 颗粒物污染问题仍然值得重视, 春季时期易出现沙尘天气, 导致 PM_{10} 浓度飙升。

(2) 污染天气过程前高空两槽一脊的环流形势和地面高压系统相互配合, 易在地面北京地区造成大风、低湿天气, 形成良好的扩散条件, 不利于颗粒物在近地面的堆积。污染天气过程中, 高空中高纬平直西风气流不利于水气的输送, 却在一定程度上有利于逆温层的形成, 中层暖湿平流输送和冷空气的缺失不利于降水的形成, 却易使水汽和污染物近地面堆积, 而近地面北京地区位于两个高压中心间的相对低压带, 扩散能力较弱, 近地面的东南风也易引起周边污染物向北京输送, 导致污染天气的发生。之后, 高空阻塞形势崩溃, 横槽转竖, 引导冷空气南下, 伴随冷空气南下的西北清洁气流与地面蒙古高压系统相互配合, 易在北京地区造成剧烈大风天气, 打破逆温层, 利于颗粒物的扩散, 同时冷空气南下形成的降水天气会进一步清除颗粒物, 使污染天气消退。

5.2. 讨论

本文分析了 2015 年~2017 年北京市大气污染概况, 总结了颗粒物不同时间尺度浓度变化特征, 筛选了 7 例冬季细颗粒物污染天气过程, 从天气学方面分析了冬季污染天气过程前、中、后的大气环流特征, 为北京市污染天气的预防提供了一个科学依据, 但是由于探空资料等观测资料的缺乏, 无法从深层次的角度探讨污染形成的物理机制, 在下一步的工作中需要进一步收集资料深入研究。

致 谢

感谢兰州大学大气科学学院李艳教授给本文提供的撰写等方面的指点, 感谢国家人口与健康科学数

据共享平台为提供的数据支持！

基金项目

国家自然科学基金项目(41775051)。

参考文献

- [1] Kashima, S., Yorifuji, T., Tsuda, T., *et al.* (2018) Effects of Traffic-Related Outdoor Air Pollution on Respiratory Illness and Mortality in Children, Taking into Account Indoor air Pollution, in Indonesia. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **52**, 340-345. <https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3181d44e3f>
- [2] 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.
- [3] 苏健婷, 杜婧, 王春梅, 等. 大气污染物对北京市常住居民死亡影响的时间序列研究[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(5): 421-424.
- [4] Harding, R. and Maritz, G. (2012) Maternal and Fetal Origins of Lung Disease in Adulthood. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, **17**, 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.siny.2012.01.005>
- [5] Xiao, Q.Y., Liu, Y., Mulholland, J.A., *et al.* (2016) Pediatric Emergency Department Visits and Ambient Air Pollution in the U.S. State of Georgia: A Case-Crossover Study. *Environmental Health*, **15**, Article No. 115. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0196-y>
- [6] Yorifuji, T., Kashima, S. and Doi, H. (2016) Associations of Acute Exposure to Fine and Coarse Particulate Matter and Mortality among Older People in Tokyo, Japan. *Science of the Total Environment*, **542**, 354-359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.113>
- [7] Arden, C.P. and Douglas, W. (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **56**, 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- [8] 王跃思, 姚丽, 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.
- [9] 李婷婷, 尉鹏, 程水源, 等. 2005-2014年中三角城市群大气污染特征及变化趋势[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2977-2984.
- [10] Flocas, H., Kelessis, A., Helmis, C., *et al.* (2009) Synoptic and Local Scale Atmospheric Circulation Associated with Air Pollution Episodes in an Urban Mediterranean Area. *Theoretical and Applied Climatology*, **95**, 265-277. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0005-9>
- [11] 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): 57-63.
- [12] 朱佳雷, 王体健, 邢莉, 等. 江苏省的一次大面积重霾污染天气的特征和成因[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12): 1943-1950.
- [13] 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, 7(1): 133-148.
- [14] 吴兑, 廖雪莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 1-9.
- [15] 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.
- [16] 张岳鹏, 李璇, 聂滕, 等. 2014年2月北京PM_{2.5}污染过程及天气形势分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(2): 55-62.
- [17] 刘郁珏, 李艳, 苗世光. 北京市房山区大气污染物时空分布特征及气象影响因素分析[J]. 气象与环境学, 2018, 41(4): 60-69.
- [18] 刘欣艳, 任仁. 北京市大气污染的特点及成因[J]. 城市与减灾, 2003, 6(1): 41-43.
- [19] 苏福庆, 高庆先, 张志刚, 等. 北京边界层外来污染物输送通道[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 26-29.
- [20] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2031-2044.
- [21] 杨旭, 张小玲, 康廷臻, 等. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(9): 3201-3209.
- [22] 张恒德, 张碧辉, 吕梦瑶, 等. 北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J]. 气象, 2017, 43(8): 998-1004.
- [23] 胡敏, 刘尚, 吴志军, 等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(11): 2293-2298.
- [24] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB3095-2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社,

2012.

- [25] 魏巍, 张稳定, 陈焕盛, 等. 库布齐沙漠治理对京津冀地区空气质量影响: 2017年5月3-6日沙尘天气模拟[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 1-11.
- [26] 孟燕军, 程丛兰. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析[J]. 气象, 2002(4): 42-47.
- [27] 吕梦瑶, 张恒德, 王继康, 等. 2015年冬季京津冀两次重污染天气过程气象成因[J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 2748-2757.
- [28] 马小会, 廖晓农, 唐宜西, 等. 北京地区重空气污染天气分型及个例分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(5): 53-60.