

北京冬奥会和冬残奥会历史同期气溶胶污染的高空环流特征研究

缪育聪^{1,2,†} 彭艳玉^{1,2} 李建¹ 张根^{1,2}

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081; † E-mail: miaoyucong@yeah.net

摘要 通过分析北京和张家口地区长期地面气象资料、气溶胶浓度数据和探空数据, 研究冬奥会和冬残奥会历史同期(2015—2019年的2月1日至3月20日)的气象条件和气溶胶污染过程, 并利用数值模拟和客观环流分型方法, 探究高空环流和区域输送的影响。结果表明, 北京和张家口两地的气溶胶污染过程与近地面的暖、湿和小风条件有关。在850 hPa高度, 当两地受西北风影响时, 近地面的气溶胶浓度较低。北京的重污染过程主要与850 hPa高度的西南风有关, 张家口的重污染则主要与850 hPa高度的西南风和南风有关。虽然北京与张家口两市中心相距160多公里, 但两地的气溶胶污染和位温垂直结构变化有很强的关联性。当华东地区存在较强的高压系统时, 来自京津冀以南地区850 hPa高度的暖空气会输送到北京和张家口, 使两地同时出现高空增温现象, 进而增强对流层下部的热力稳定度, 不利于边界层的发展和污染物的垂直扩散。此外, 当上述环流出现时, 河北南部、山西北部 and 内蒙古中部等地区排放的污染物会通过输送过程影响北京。张家口地区海拔较高, 除本地排放外, 影响其空气质量的污染气团主要来自西部的上游地区。因此, 当出现不利的高空环流形势时, 除需要控制本地的排放外, 还要考虑对上游地区施行协同减排措施。

关键词 气溶胶污染; 环流形势; 区域输送; 冬奥会; WRF-Chem

Synoptic Characteristics Associated with Aerosol Pollution during the Same Period of Beijing Olympic and Paralympic Winter Games in History

MIAO Yucong^{1,2,†}, PENG Yanyu^{1,2}, LI Jian¹, ZHANG Gen^{1,2}

1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2. Key Laboratory for Atmospheric Chemistry, China Meteorological Administration, Beijing 100081; † E-mail: miaoyucong@yeah.net

Abstract To understand the complicated relationships between synoptic forcing, regional transport and aerosol pollution during the same period of the Beijing Olympic and Paralympic Winter Games in history from 2015 to 2019, long-term meteorological observations, aerosol measurements and radiosonde data in Beijing and Zhangjiakou were analyzed, in combination with numerical simulation and objective synoptic classification. It's found that the heavy aerosol pollution in both Beijing and Zhangjiakou is associated with warm, moist, and calm wind situations at the ground level. At the upper level, the heavy pollution events in Beijing are related to the 850 hPa southwest winds, and the heavy pollutions in Zhangjiakou are typically associated with the southwest and south winds. Although the distance between the centers of Beijing and Zhangjiakou is around 160 km, the increasing aerosol concentrations and occurrence of thermal inversion aloft are often synchronously observed in those two cities, which are relevant to certain large-scale synoptic patterns. When there is a high-pressure system in eastern China at the 850 hPa level, the warmer air mass in the southern regions can be brought to Beijing and Zhangjiakou, enhancing the thermal inversion and suppressing the development of boundary layer to some extent.

北京市自然科学基金(8192054)、国家自然科学基金(41705002)、北京市科技新星计划(Z201100006820138)、国家重点研发计划(2017YFA0603501)和中国气象科学研究院基本科研业务费(2020Z002)资助

收稿日期: 2020-06-16; 修回日期: 2020-07-02

Meanwhile, the aerosols emitted from the south Hebei, the north Shanxi and middle Inner Mongolia can be transported to Beijing, leading to the exacerbation of pollution. With a higher altitude, the polluted air masses advected to Zhangjiakou are mainly from the western upstream regions, which can deteriorate the air quality in addition to the local emissions. Thus, under the unfavorable synoptic conditions, joint efforts to reduce emissions in Beijing, Zhangjiakou, and those upstream regions should be considered to effectively mitigate the heavy pollution.

Key words aerosol pollution; synoptic pattern; regional transport; Winter Olympic Games; WRF-Chem

第24届冬季奥运会和第13届冬季残疾人奥运会将分别于2022年2月4日至20日和3月4日至13日在北京和张家口两地举行,主要会场位于北京奥体中心、北京延庆和张家口崇礼。以冬奥会为契机,北京与河北将在城市建设和环境保护等方面紧密合作,推进京津冀地区一体化。

京津冀地区位于我国环渤海区域的西部,华北平原北端,人口密集,城市化程度高,是我国重要的政治、文化和经济核心区,也是目前我国气溶胶污染最严重的地区之一^[1-4]。该地区的PM_{2.5}浓度季节变化特征明显,冬季污染最严重,秋、春季次之,夏季最轻^[5-6]。气溶胶浓度的季节变化不仅与排放和降水的变化有关,还受其他气象因子(特别是大气边界层内的气象要素)季节变化的影响^[7-9]。与2008年夏季奥运会相比,冬季总体上较差的大气扩散条件^[5-8]使得2022年冬奥会和冬残奥会期间的大气环境保障工作更具挑战性。

作为对流层的最底层,大气边界层是地表与自由大气间物质和能量交换的“桥梁”^[10]。污染物排进入大气之后,其扩散、输送、沉降和化学转化等过程都受边界层的影响和控制。受大尺度环流的影响,京津冀地区的重污染事件通常不是单独出现在某个城市,而是多个城市同时出现^[5,11]。例如,当500 hPa高度为偏西气流,850 hPa高度出现暖平流或受暖舌影响时,边界层的发展会受到抑制,使得边界层与自由大气间的物质交换减少,容易造成重污染过程^[12-13]。大尺度环流形势还会在很大程度上决定大气污染物和水汽的输送路径^[14-15]。北京地区的重污染事件常与东南方向上的高压系统有关,并伴有自南向北的污染物输送过程^[5,15-16]。对比北京与张家口两地,目前关于前者气溶胶污染过程的研究较多^[11-13,15-16],而针对后者的相关研究较少,张家口地区气溶胶污染的气象成因尚不十分清楚。

为了进一步厘清大尺度环流形势对北京和张家口地区气溶胶污染过程的影响,本文在分析两地的长期环境气象观测资料的基础上,利用客观环流分

型方法^[17],研究冬奥会和冬残奥会历史同期(2015—2019年)的环流特征,以期为冬奥会和冬残奥会期间大气污染的防控提供科学依据。

1 数据和方法

利用北京市奥体中心站(116.407°E, 40.003°N)以及张家口市人民公园站(114.899°E, 40.837°N)的PM_{2.5}浓度监测数据(图1)来指示两地的气溶胶污染程度。为了系统地研究气象条件与气溶胶污染的关系,本研究对北京(站点编号为54511 (116.467°E, 39.800°N))和张家口(站点编号为54401 (114.917°E, 40.767°N))两地的常规地面气象资料和高空气象资料进行分析,其中地面要素为逐小时观测,高空气象探测为每日两次,分别在每日的08时和20时(北京时间,下同)进行。为了匹配冬奥会和冬残奥会的举办时间,本文的研究时段为2015—2019年的2月1日至3月20日。为了减少假期对排放等方面的影响,本研究将春节法定假期和元宵节排除,用于分析的实际日数为206天。

在对局地环境气象资料进行分析的基础上,本研究还对高空环流进行客观分型,从区域尺度上了解气象条件与气溶胶污染的关系。与主观环流归类相比,客观分型不受人为判断的影响,可以更快、更准确地进行分类,并给出各个类别的出现频率。本文采用T模态的主成分分析方法^[18](T-PCA),对NCEP-FNL再分析资料中逐日850 hPa位势高度场进行分析。T-PCA是目前广泛应用的一种客观环流分型方法,归类结果在时间和空间上都具有较好的稳定性,已应用于研究不同环流类别对气溶胶污染^[16]、强对流^[19]以及暴雨^[20]的影响。应用T-PCA进行环流分型时,需要指定分类的总数,本研究将环流分类总数设置为7类。环流总数的设置可能对分型结果产生影响,为了检验结果的稳健性,我们对不同环流总数(7类和8类)的分型结果进行对比,发现两种总数设置找到的与重污染相关的环流具有很好的一致性(图略)。

为了进一步评估大尺度环流对污染物输送路径的影响,本文使用 HYSPLIT(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory)模式进行后向轨迹分析^[21]。HYSPLIT 模式由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)研发和维护,主要用于大气污染物输送和扩散过程的模拟计算^[21]。本研究使用 NCEP-FNL 再分析资料驱动 HYSPLIT 模式,进行后向轨迹追踪,设置轨迹起点为北京市奥体中心和张家口市人民公园,起始高度为距地面 100 m。HYSPLIT 模式从每日 20 时开始进行轨迹的回溯计算,每条轨迹追踪 24 小时。我们结合清华大学 MEIC (multi-resolution emission inventory for China)中的排放数据和后向轨迹,识别不同环流影响下的污染物潜在源区。

本文还利用中尺度天气与化学耦合模式 WRF-Chem(weather research and forecasting model coupled with chemistry)^[22],对 2018 年 3 月中旬的一次典型气溶胶污染过程进行模拟,进一步厘清区域输送过程^[23-24]对北京和张家口两地空气质量的影响。模拟区域如图 1(a)所示,以京津冀为中心,覆盖华北平原及周边的山地,水平分辨率为 27 km。在模拟过程中,使用 MEIC 数据设置大气污染物的排放,并利用 NCEP-FNL 资料设置初始和边界条件,选用的理化过程参数化方案包括 Noah 陆面过程方案^[25]、YSU 边界层方案^[26]、RRTMG 辐射传输方案^[27]、Betts-Miller-Janjic 积云方案^[28]、WSM5 微物理过程方案^[29]和 RADM2-MADE/SORGAM 化学机制^[30-32]。WRF-Chem 的起算时间为 2018 年 3 月 9 日 20 时,共模拟 172 小时,其中前 28 小时(3 月 9 日和 10 日)为模式的调整阶段。

2 结果与讨论

2.1 气象条件与气溶胶污染的关系

图 2 基于北京和张家口每日 08 时的探空观测,展示两地 2018 年 2 月 1 日至 3 月 20 日的位温垂直结构逐日变化情况。可以看出,北京和张家口两地的垂直热力结构基本上是同步变化的。例如,两个城市几乎同时在 3 月 11—15 日经历一次高空增温过程。图 2 还给出北京和张家的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度序列,两地在 2 月底、3 月初和 3 月中旬都发生较严重的污染事件,且都与高空增温过程有关。上述热力垂直结构与地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的协同演变现象不仅出现在 2018 年,而且在 2015, 2016, 2017 和 2019 年的

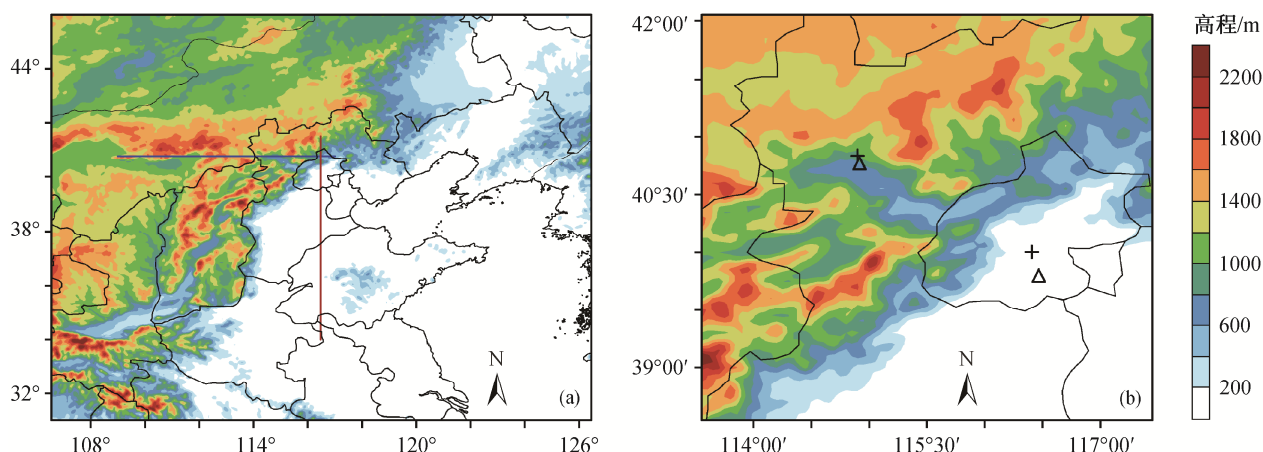
2—3 月时有发生(图略)。尽管北京与张家口两个市中心相距 160 多公里,但两地在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及大气热力结构的变化上有很强的关联性,表明可能同时影响北京和张家口的大尺度天气过程。

为了进一步了解气象条件与气溶胶污染的关系,图 3 和 4 对北京和张家口两地不同污染状况下的地面气象因子(2 m 高度温度、2 m 高度相对湿度和 10 m 高度风速)和高空气象因子(850 hPa 高度的位温和水平风)进行比较。本文根据 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日均值序列,选取 80 百分位数和 20 百分位数作为界定重污染和洁净状况的标准,即将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日均值大于 80 百分位数的时段(Top 20%)定义为重污染状况,并将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日均值小于 20 百分位数的时段(Bottom 20%)定义为洁净状况。如图 3 所示,北京在重污染状况下的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值高达 $181.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$,远高于洁净状况下的浓度平均值($9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$),二者间的差异通过显著性检验($p < 0.01$)。当北京出现重污染状况时,2 m 高度的温度和相对湿度平均值分别为 6.6°C 和 51%,都显著高于洁净状况下的平均温度(2.6°C)和平均湿度(20%),上述温度和湿度的差异均也通过显著性检验($p < 0.01$)。

此外,北京地区的 10 m 高度风速在不同污染状况下也存在明显的差别,重污染状况通常发生在小风条件下,这种风速差异也通过显著性检验($p < 0.01$)。与北京相比,尽管张家口地区重污染状况下的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低很多,但重污染状况也主要发生在小风和暖湿的气象条件下。在 850 hPa 高度,重污染与洁净状况之间的热力和动力差异更加明显(图 4)。在北京地区,前者的平均位温比后者高 14.4 K,前者的平均风速比后者低 5.4 m/s;张家口地区的平均温差和风速差分别可达 11.4 K 和 5.6 m/s。通过分析 850 hPa 高度的水平风向,我们发现当北京和张家口受西北风影响时,地面的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低。北京地区的重污染过程主要与 850 hPa 高度的西南风有关。张家口地区的情况与北京类似,重污染主要与西南风和南风有关。对比重污染与洁净状况下 850 hPa 高度的位温与风向(图 4)可以发现,北京和张家口两地的高空增温过程均与西南风相关。上述 850 hPa 高度的风-温对应关系可能与一些特定的大尺度环流形势联系密切。

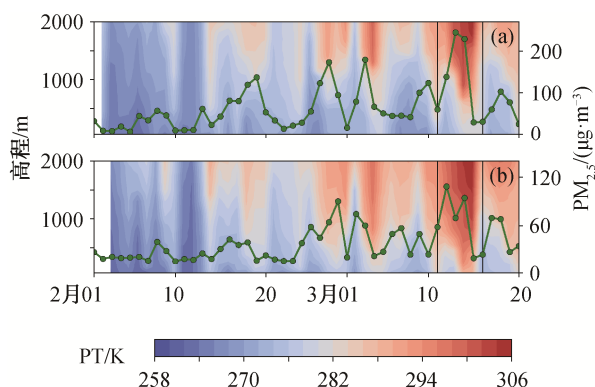
2.2 环流分型及区域输送过程分析

基于本文研究时段内 206 个日均 850 hPa 位势高度场(108°E — 129°E , 28°N — 49°N),利用 T-PCA 得到 7



(a) 华北及周边地区, 红线和蓝线分别代表图 9(c)和(d)中垂直剖面的位置; (b) 北京和张家口地区, “+”号和三角形分别代表空气质量监测站和气象观测站的位置

图 1 华北及周边地区的地形
Fig. 1 Terrain height of North China and its adjacent regions



(a) 北京, (b) 张家口; 位温为每日 08 时的观测数据; 绿色折线代表 $PM_{2.5}$ 浓度日均值; 黑色竖线代表 2018 年 3 月的一次典型污染过程

图 2 探空观测得到的 2018 年 2 月 1 日至 3 月 20 日北京和张家口地区位温及地面 $PM_{2.5}$ 浓度日均值的变化

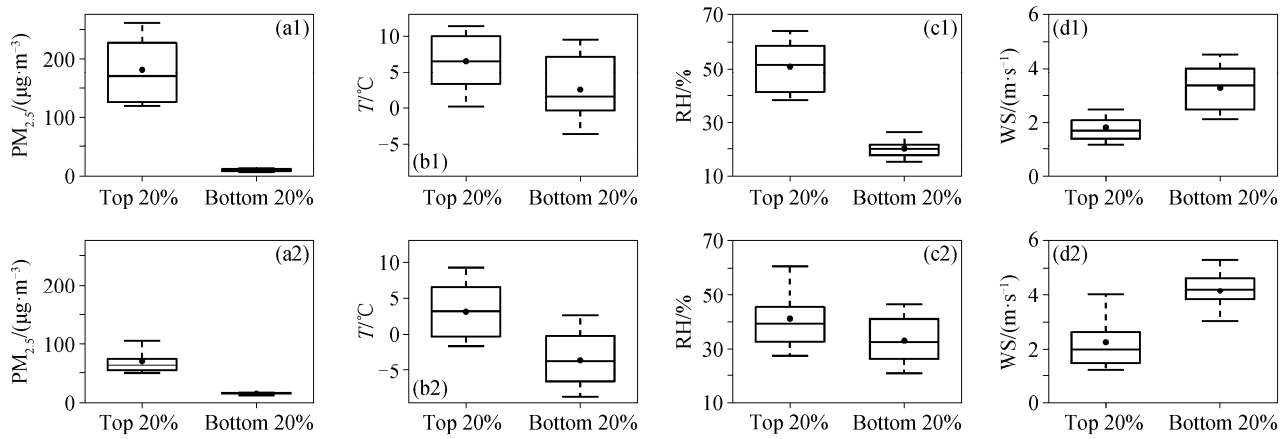
Fig. 2 Observed potential temperature profiles and $PM_{2.5}$ concentrations in Beijing and Zhangjiakou from Feb. 1 to Mar. 20, 2018

种不同类型的环流(图 5), 并将环流分型结果与北京和张家口两地重污染状况进行匹配(图 6), 结果表明北京和张家口两地的重污染事件主要与类型 1 和类型 6 相关。在北京, 分别有 21 个和 9 个重污染天与类型 1 和类型 6 有关(图 6(a)), 二者之和在所有重污染天中的占比达到 73%。张家口的情况与北京类似, 分别有 23 个和 7 个重污染天与类型 1 和类型 6 相关(图 6(b))。在 850 hPa 高度, 环流类型 1 主要包括华东地区的高压和 $45^{\circ}N$ 以北的低压(图 5(a)), 使北京和张家口地区以西南风为主。类型 6 与类型 1 相似, 高压和低压系统分别出现在京津冀的东南

方向和东北方向(图 6(f)), 北京和张家口大致位于两个系统间的辐合带($40^{\circ}N$), 主导风为西风。

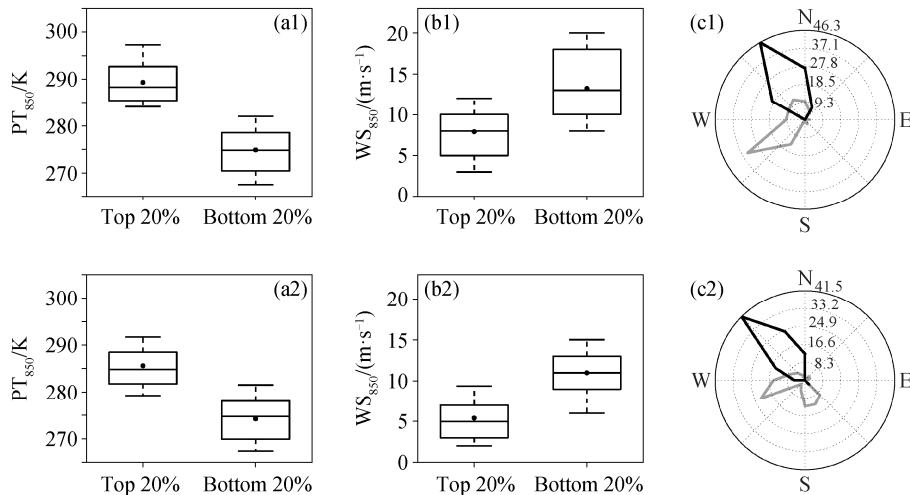
如图 7(a)和(f)所示, 在南部高压影响下, 上述两类环流会使南部较暖的气团输送到京津冀地区, 造成北京和张家口两地出现高空增温过程(图 2)。这种高空暖平流会在一定程度上增强对流层下部的热力稳定度, 并抑制边界层的发展^[5,9], 不利于北京和张家口两地污染物的垂直扩散, 使得局地容易出现重污染过程。环流类型 1 与类型 6 在 850 hPa 高度的风场和位温场配置情况(图 7)与探空资料反映的重污染状况下的高空风-温对应关系(图 4)具有较好的一致性。此外, 环流类型 1 和类型 6 还可能通过影响污染物的输送过程, 对北京和张家口两地的空气质量造成影响。图 8 给出与上述两类环流相关的重污染过程的后向轨迹, 可以看出, 北京地区的轨迹主要来自河北南部、山西北部 and 内蒙古中部(图 8(a)和(b)), 张家口地区的重污染过程则主要与来自山西北部 and 内蒙谷中部的气团有关(图 8(c)和(d))。

为了进一步厘清区域输送对北京和张家口两地空气质量的影响, 我们利用 WRF-Chem 对环流类型 1 主导的一次典型污染过程(2018 年 3 月 11—16 日)进行模拟。图 9(a)和(b)给出模拟得到的位温垂直结构和 $PM_{2.5}$ 浓度序列, 模拟结果与北京和张家口地区的实况非常接近, 两地位温模拟结果与实测值的相关系数均超过 0.80, $PM_{2.5}$ 浓度模拟值与实测值的相关系数也都超过 0.73。



(a1)~(d1) 北京, (a2)~(d2) 张家口; (a1)和(a2) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日均值, (b1)和(b2) 2 m 高度温度日均值, (c1)和(c2) 2 m 高度相对湿度日均值, (d1)和(d2) 10 m 高度风速; 横线分别表示 10、25、50、75 和 90 百分位数的数值, 圆点代表算术平均值, 下同

图 3 不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(Top 20%和 Bottom 20%)情况下北京和张家口地区的地面环境气象要素对比箱图
Fig. 3 Box-whiskers plots showing the different ground-level characteristics associated with the Top 20% and Bottom 20% $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Beijing and Zhangjiakou



(a1)~(c1) 北京, (a2)~(c2) 张家口; (a1)和(a2) 850 hPa 位温箱图; (b1)和(b2) 850 hPa 水平风速箱图; (c1)和(c2) 850 hPa 水平风向玫瑰图, 灰色花瓣表示 Top 20%, 黑色花瓣表示 Bottom 20%

图 4 不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度(Top 20%和 Bottom 20%)情况下北京和张家口地区高空气象要素的对比
Fig. 4 Box-whiskers and wind-rose plots showing the different meteorological factors at the 850 hPa level associated with the Top 20% and Bottom 20% $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Beijing and Zhangjiakou

基于 WRF-Chem 的模拟结果, 图 9(c)和(d)给出 2018 年 3 月 12 日 10 时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直剖面图。从穿过北京的南北垂直剖面(图 9(c))上, 可以看到大量气溶胶从河北南部(37°N)输送到北京。从横跨张家口和北京的东西剖面图(图 9(d))上, 可以看到内蒙古中部(110—112°E)的气溶胶浓度较高, 这些气溶胶颗粒物会在西风的影响下输送到下游的张家口和北京地区, 加重这两地的污染。

与环流类型 1 和类型 6 相比, 其他 5 种环流在 850 hPa 高度以西北风和冷平流为主(图 5 和 7), 不

易导致重污染过程(图 6)。在本文的研究时段(206 天)内, 有 61 天属于环流类型 1, 22 天属于环流类型 6, 二者出现的总频率高达 40%, 是冬奥会和冬残奥会举办期间需要重点关注的污染型环流。当上述两种类型的环流出现时, 除需要考虑对北京和张家口本地的排放进行控制外, 还要考虑对上游地区施行协同减排措施。本文结果与之前关于京津冀地区冬季和早春气溶胶污染的研究结果(重污染过程主要与高空暖平流及边界层内自南向北的污染物输送过程有关)^[5,15-16,33-35]较为一致, 但此前的研究主要关

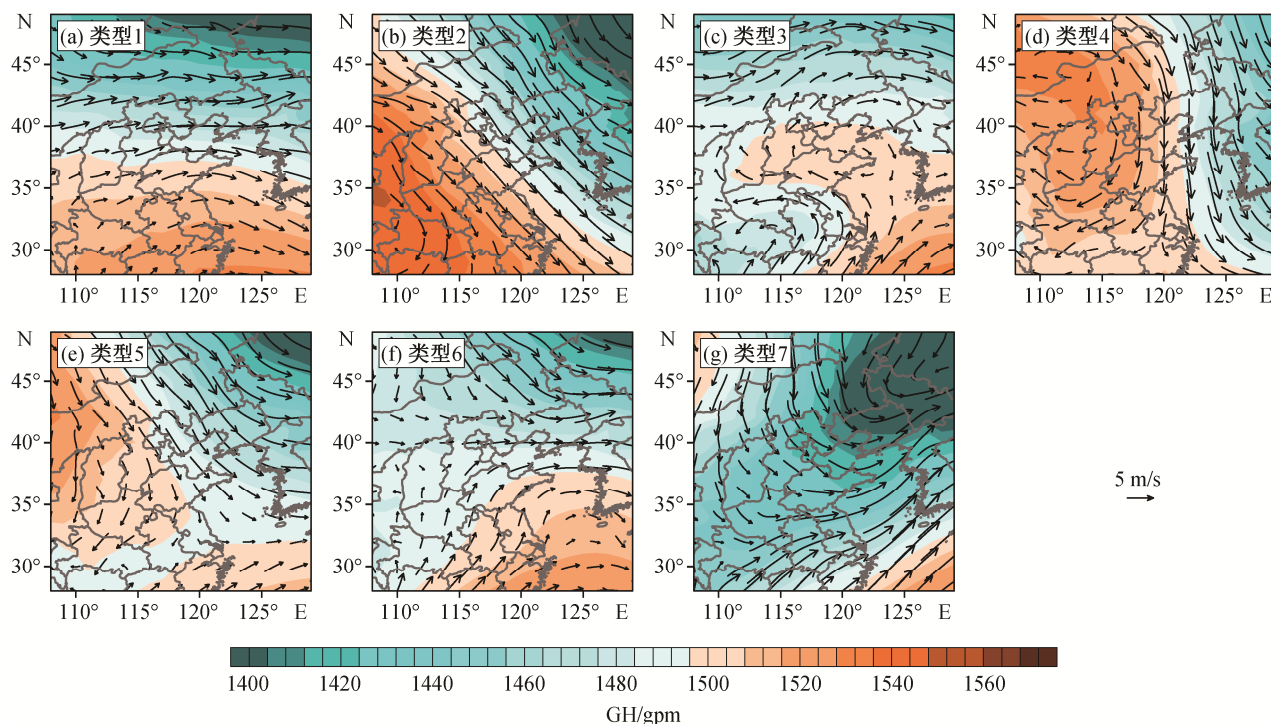


图5 利用T-PCA对850 hPa位势高度进行环流分型得到的环流类型
Fig. 5 The 850 hPa geopotential height fields and wind vector fields identified using T-PCA

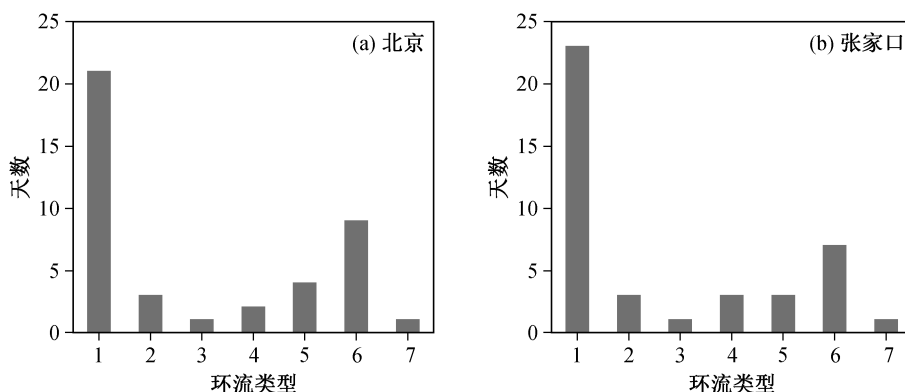


图6 北京和张家口地区重污染事件在不同环流类型中的发生频率
Fig. 6 Occurrence frequency of heavy pollution days under different synoptic types in Beijing and Zhangjiakou

注京津冀的平原地区,很少关注位于北部山区的张家口地区。与北京的情况不同,张家口地区海拔较高(图1),虽然河北南部平原地区排放的大气污染物很难输送到该地区,但山西和内蒙古等西部地区排放的污染物仍有可能在一些环流形势的作用下对张家口地区的空气质量产生影响(图8和图9(d))。

3 结论

本文通过分析北京和张家口地区的长期地面气象资料、气溶胶浓度数据和探空数据,研究冬奥会

和冬残奥会历史同期(2015—2019年的2月1日至3月20日)的气象条件和气溶胶污染过程,并利用数值模拟和客观环流分型方法,探究高空环流和区域输送的影响,得到以下主要结论。

1) 北京和张家口两地的气溶胶重污染过程主要发生在暖、湿和小风的气象条件下。

2) 虽然北京和张家口两市中心相距160多公里,但是两地 $PM_{2.5}$ 浓度及位温垂直结构的变化有很强的关联性。在850 hPa高度,当华东地区存在较强的高压系统时,京津冀以南地区较暖的气团会

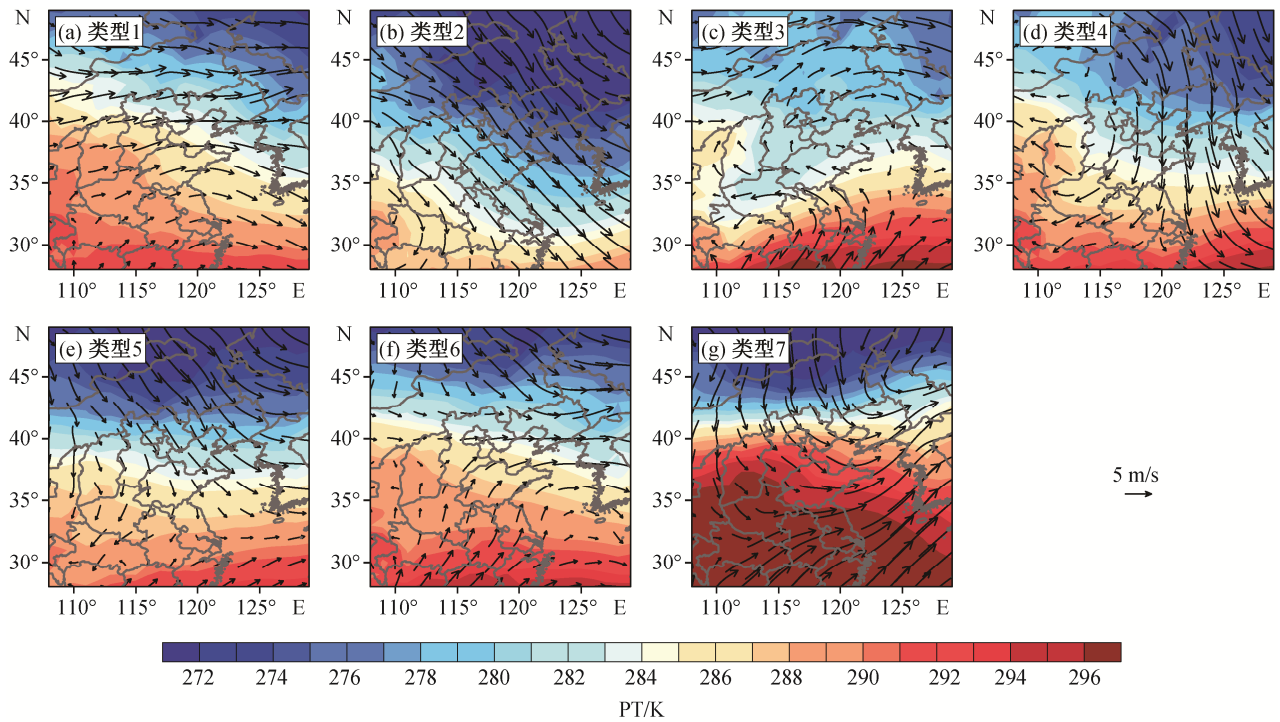
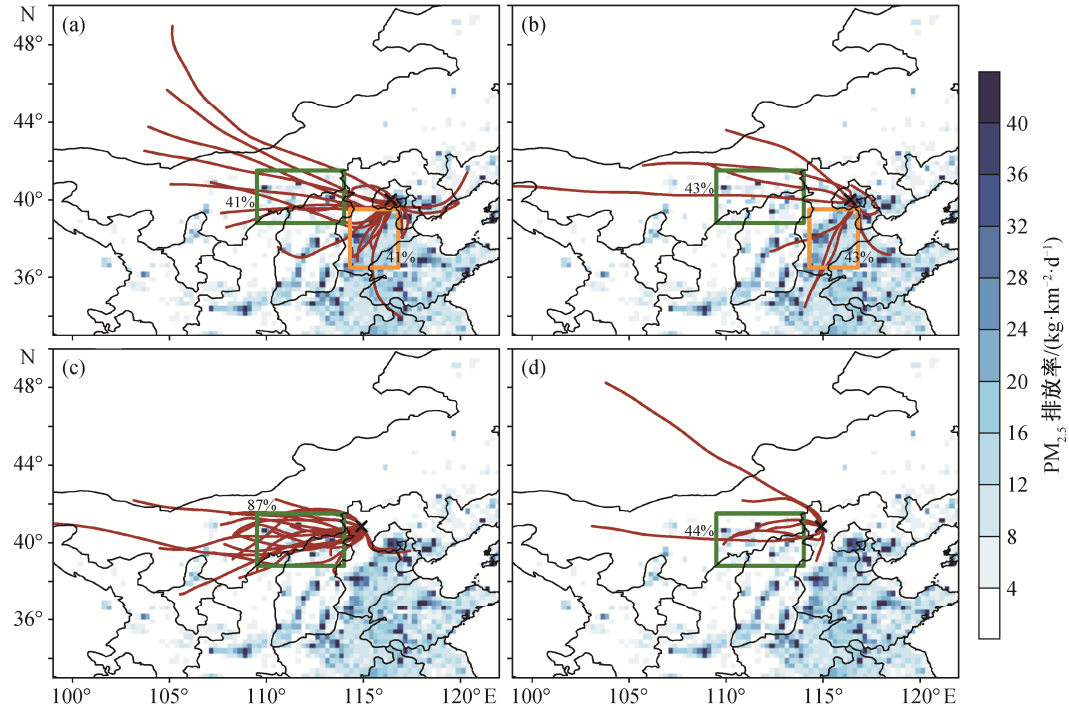


图7 不同环流类型的850 hPa位温及水平风场

Fig. 7 Spatial patterns of 850 hPa potential temperature and wind of different synoptic types



(a)和(b) 追踪起点为北京的后向轨迹, (c)和(d) 追踪起点为张家口的后向轨迹; (a)和(c) 环流类型 1, (b)和(d) 环流类型 6; 黑色×号表示后向轨迹的追踪起点位置, 绿色和黄色方框标识一些潜在源区, 并给出经过相关区域轨迹的占比

 图8 北京和张家口地区2016年2月PM_{2.5}排放的时空分布以及在类型1和类型6环流影响下重污染过程的后向轨迹分布
 Fig. 8 Spatial pattern of PM_{2.5} emission in Feb. 2016, and the 24-h backward trajectories to Beijing and Zhangjiakou during the heavy pollution days under synoptic Type 1 and Type 6

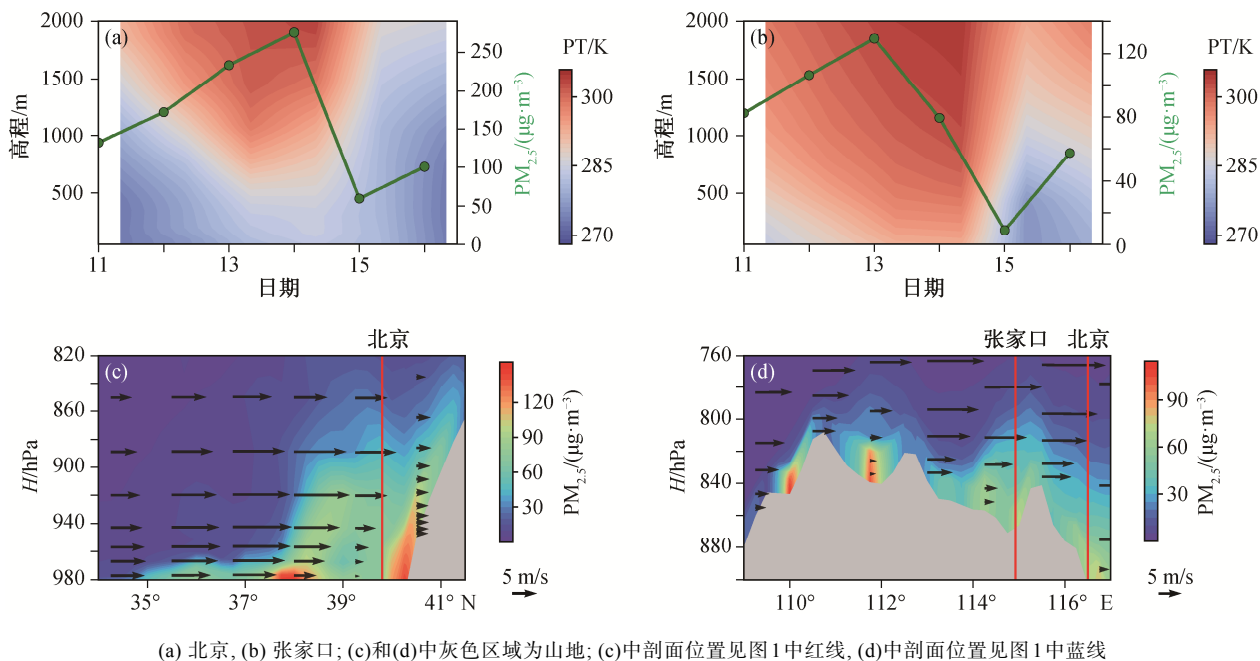


图9 模拟得到的北京和张家口地区2018年3月11—16日位温和近地面PM_{2.5}浓度变化以及3月12日10时经过两地的南北向和东西向垂直浓度剖面 and 风场

Fig. 9 Simulated potential temperature profiles and PM_{2.5} concentrations in Beijing and Zhangjiakou from Mar. 11 to 16, 2018 and vertical cross sections of PM_{2.5} concentrations cutting through Beijing and Zhangjiakou at 10:00 BJT on Mar. 12

输送到北京和张家口地区,使两地同时出现高空增温现象,抑制边界层的发展和污染物的垂直扩散,造成重污染。

3) 当不利的环流形势出现时,河北南部、山西北部和内蒙古中部等地区排放的污染物会通过输送过程影响北京。张家口地区海拔较高,不易受华北平原污染物排放的影响,对其造成影响的外来污染物主要来自西部上游地区。

致谢 中国气象局和中国环境监测总站为本研究提供北京和张家口地区的环境气象观测资料,清华大学MEIC模型研究组提供PM_{2.5}排放数据,在此一并致以谢意。

参考文献

- [1] 李名升,任晓霞,于洋,等. 中国大陆城市PM_{2.5}污染时空分布规律. 中国环境科学, 2016, 36(3): 641–650
- [2] 缪育聪,郑亦佳,王姝,等. 京津冀地区霾成因机制研究进展与展望. 气候与环境研究, 2015, 20(3): 356–368
- [3] 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. 环境科学学报, 2014, 34(1): 1–11
- [4] 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, 58(13): 1178–1187
- [5] Miao Y, Liu S, Guo J, et al. Unraveling the relationships between boundary layer height and PM_{2.5} pollution in China based on four-year radiosonde measurements. Environ Pollut, 2018, 243: 1186–1195
- [6] Li R, Li Z, Gao W, et al. Diurnal, seasonal, and spatial variation of PM_{2.5} in Beijing. Sci Bull, 2015, 60: 387–395
- [7] Miao Y, Liu S. Linkages between aerosol pollution and planetary boundary layer structure in China. Sci Total Environ, 2019, 650: 288–296
- [8] Miao Y, Hu X, Liu S, et al. Seasonal variation of local atmospheric circulations and boundary layer structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region and implications for air quality. J Adv Model Earth Syst, 2015, 7: 1602–1626
- [9] Miao Y, Li J, Miao S, et al. Interaction between planetary boundary layer and PM_{2.5} pollution in megacities in China: a review. Current Pollution Reports, 2019, 5(4): 261–271
- [10] Garratt J. Review: the atmospheric boundary layer. Earth-Science Rev, 1994, 37: 89–134
- [11] Miao Y, Che H, Zhang X, et al. Integrated impacts

- of synoptic forcing and aerosol radiative effect on boundary layer and pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20: 5899–5909
- [12] 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. *气象*, 2002, 28(4): 42–47
- [13] 谢付莹, 王自发, 王喜全. 2008年奥运会期间北京地区 PM_{10} 污染天气形势和气象条件特征研究. *气候与环境研究*, 2010, 15(5): 584–594
- [14] 艳艳, 缪育聪, 李建, 等. 海口地区2018年2月持续低能见度过程的气象条件分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5): 899–906
- [15] Miao Y, Liu S, Huang S. Synoptic pattern and planetary boundary layer structure associated with aerosol pollution during winter in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 682: 464–474
- [16] Miao Y, Guo J, Liu S, et al. Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their associations with boundary layer structure affecting aerosol pollution. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 3097–4110
- [17] Philipp A, Bartholy J, Beck C, et al. Cost733cat — a database of weather and circulation type classifications. *Phys Chem Earth*, 2010, 35: 360–373
- [18] Huth R. An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods. *Int J Climatol*, 1996, 16: 893–922
- [19] Yan Y, Miao Y, Guo J, et al. Synoptic patterns and sounding-derived parameters associated with summertime heavy rainfall in Beijing. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(3): 1476–1489
- [20] 赵洋洋, 张庆红, 杜宇, 等. 北京“7.21”特大暴雨环流形势极端性客观分析. *气象学报*, 2013, 71(5): 817–824
- [21] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT-4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Aust Meteor Mag*, 1998, 47: 295–308
- [22] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmos Environ*, 2005, 39: 6957–6975
- [23] Wang Q, Miao Y, Wang L. Regional transport increases ammonia concentration in Beijing, China. *Atmosphere*, 2020, 11(6): 563
- [24] Xiao Z, Miao Y, Du X, et al. Impacts of regional transport and boundary layer structure on the $\text{PM}_{2.5}$ pollution in Wuhan, Central China. *Atmos Environ*, 2020, 230: 117508
- [25] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State — NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. *Mon Weather Rev*, 2001, 129: 569–585
- [26] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Weather Rev*, 2006, 134: 2318–2341
- [27] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *J Geophys Res*, 2008, 113: D13103
- [28] Janjić Z I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sub-layer, and turbulence closure schemes. *Mon Weather Rev*, 1994, 122: 927–945
- [29] Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon Weather Rev*, 2004, 132: 103–120
- [30] Ackermann I J, Hass H, Memmesheimer M, et al. Modal aerosol dynamics model for Europe. *Atmos Environ*, 1998, 32: 2981–2999
- [31] Schell B, Ackermann I J, Hass H, et al. Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system. *J Geophys Res Atmos*, 2001, 106: 28275–28293
- [32] Stockwell W R, Middleton P, Chang J S, et al. The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *J Geophys Res*, 1990, 95: 16343–16367
- [33] 缪育聪, 刘树华. 雄安新区大气污染的气象特征分析. *科学通报*, 2017, 62(23): 2666–2670
- [34] Zhang H, Wang Y, Hu J, et al. Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. *Environ Res*, 2015, 140: 242–254
- [35] 韩霄, 张美根. 2013年1月华北平原重霾成因模拟分析. *气候与环境研究*, 2014, 19(2): 127–139