

章建成,徐敬,赵秀娟,等,2024. 地形及暖锋共同影响下京津冀典型重污染过程数值模拟[J]. 气象,50(9):1071-1080. Zhang J C,Xu J,Zhao X J,et al,2024. Numerical simulation of synergic effect of topography and warm front on typical heavy air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Meteor Mon,50(9):1071-1080(in Chinese).

地形及暖锋共同影响下京津冀典型 重污染过程数值模拟^{*}

章建成¹ 徐 敬² 赵秀娟² 张自银² 程思宇²

¹ 国家气象中心,北京 100081

² 北京城市气象研究院,北京 100089

提 要: 由于京津冀所处的独特地理位置,地形及中尺度天气对该地区空气污染的形成起到至关重要的作用。2023 年 12 月 29—30 日京津冀发生了一次典型区域性重污染过程。利用 RMAPS-CHEM 数值模式系统的预报结果,结合地面 PM_{2.5} 质量浓度及气象资料等,研究了地形及暖锋共同作用下边界层过程加剧平原地区重污染程度的影响机制。结果发现:受华北地形槽影响,西南风在传输污染物的同时还将暖湿气团自南向北输送,造成京津冀平原东南侧形成低空暖锋;在暖锋及地形的共同影响下,被污染的冷气团因东南侧受暖锋驱动、西北侧受地形限制,堆积于近山区平原的地面附近,形成冷池;冷池的逆温、静风和极低边界层等强稳定大气层结特性,导致污染物被限制在有限垂直空间内,同时弱风造成气团停滞,抑制污染物水平方向的传输和扩散,这些不利因素最终导致污染物浓度持续积累。

关键词: 地形,暖锋,冷池,重污染,数值模拟,京津冀

中图分类号: P427,P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.051301

Numerical Simulation of Synergic Effect of Topography and Warm Front on Typical Heavy Air Pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

ZHANG Jiancheng¹ XU Jing² ZHAO Xiujuan² ZHANG Ziyin² CHENG Siyu²

¹ National Meteorological Centre, Beijing 100081

² Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: Due to the unique geographical location of the Beijing-Tianjin-Hebei Region, topography and mesoscale weather play a crucial role in the formation of regional air pollution in this region. A typical air pollution process was observed in the region from 29 to 30 December 2023. To explore the causes and deep formation mechanism for this pollution process, the influences of mesoscale weather and boundary layer structure on the intensification of heavy pollution under the warm front and special terrain background are studied on the basis of the numerical simulation of RMAPS-CHEM system, the PM_{2.5} concentration observation and the meteorological data. It is found that under the influence of North China topographic trough, the southwest wind not only transported the pollutants, but also brought the warm and humid air mass from south to north, resulting in the formation of an obvious low-level warm front on the southeast side of the Beijing-Tianjin-Hebei Plain. Synergistically, impacted by warm front and topographic thermal characteristics, the polluted cold air mass was driven by warm front in the southeast side and restricted by terrain

^{*} 北京自然科学基金项目(8222049)、国家自然科学基金项目(42175188、41975168)共同资助

2024 年 2 月 23 日收稿; 2024 年 5 月 23 日收修定稿

第一作者:章建成,主要从事环境气象相关预报服务工作. E-mail: zhangjianc@cma.cn

通讯作者:徐敬,主要从事区域大气污染形成机制研究. E-mail: jxu@ium.cn

in the northwest side, forming accumulation called cold pool near the surface of the plain area close to the mountains. The strong stable atmospheric condition of the temperature inversion in the cold pool, calm wind and extremely low boundary layer height led to the pollutants to be trapped in a limited vertical space. At the same time, the weak wind caused the stagnation of air mass and inhibited the horizontal transmission and diffusion of pollutants. These adverse factors ultimately resulted in the continuous accumulation of pollutant concentrations.

Key words: topography, warm front, cold pool, heavy air pollution, numerical simulation, Beijing-Tianjin-Hebei

引 言

京津冀作为世界上人口最稠密的地区之一,自2013年“大气污染防治行动计划”实施以来,PM_{2.5}总体污染趋势得到有效缓解(Zhang et al, 2017; Zhai et al, 2019),但在某些特殊天气条件下其浓度水平仍异常偏高,污染期间PM_{2.5}质量浓度日均值可高达200 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,且污染区域覆盖了京津冀绝大部分平原地区(Cheng et al, 2018)。已有工作除了在排放清单、化学机制等方面深入开展外,还对区域性污染的气象成因进行了广泛研究,探讨了我国华北地区天气形势与空气污染的关系(Ye et al, 2016; 江琪等, 2022)。研究发现,西风气流穿越太行山脉后下沉并绝热升温,通常在背风面形成一个与地形密切相关的低压槽,低压槽的辐合作用诱发污染带在靠近山脉的平原地区形成(苏福庆等, 2004),被污染的气团经常在冷锋到来之前于山地平原结合地带不断积聚(Kang et al, 2019),发展成为区域性严重污染过程。已有研究对于重污染的成因揭示具有重要的科学意义,但研究结果大多将导致区域性污染的气象条件简单归纳为边界层高度降低、风速减弱以及相对湿度升高等诸多不利气象要素变化(Zheng et al, 2015; Sun et al, 2016; 张琴和姚秀萍, 2021; 丁伟宸等, 2023; 周涛等, 2023)。然而,边界层作为影响地面空气质量的重要因素,为什么边界层内仅在特定条件下呈现低风速、低边界层高度和高相对湿度的特征?这种特定条件是如何形成的?仍有待进一步研究。

此外,京津冀平原背靠太行山(西部)和燕山(北部),东临渤海,山地-平原、海洋-陆地等地形起伏及下垫面性质不均匀的特殊地理条件,构成影响边界层热、动力结构演变的重要因素(王倩倩等, 2022),

这些已被证实是引发该地区稳定天气条件下区域污染形成的重要诱因(Hu et al, 2014; Miao et al, 2015)。其中,冷池是地形和中尺度天气系统共同影响下形成的、极易造成空气污染的特殊天气条件之一。冷池的定义为充满冷空气的地形洼地,通常发生在盆地和山谷,当长波辐射或冷平流造成地表附近的空气冷却,而天气尺度平流使高层空气增温时(Conangla et al, 2018),由此产生的稳定分层抑制了冷池内空气与周围大气的混合,造成气团停滞(Daly et al, 2010),这种现象可持续数天。冷池具有逆温、弱风、边界层高度极低、地形侧向约束以及高低层大气交换抑制等强稳定的大气层结特征,世界范围内诸多地区对冷池在局地尺度或更大范围空气污染形成中的不利影响进行了广泛报道(Lareau et al, 2013)。京津冀平原所处的独特地形背景十分有利于冷池的形成, Jin et al (2022)研究指出此类气象条件是引发京津冀地区秋冬季区域性严重污染的典型天气之一,占比接近30%。冷池的形成、维持和衰变机制已被广泛研究(Wilson and Fovell, 2016; Arduini et al, 2020),但特定区域的地理条件是独特的,当京津冀地区出现重污染过程时,边界层结构与背景地形及中尺度天气间存在何种关联?以及如何对区域性污染加剧造成影响?是本研究关注的重点。

2023年12月29—30日京津冀地区出现了一次区域性重污染过程,分析显示:重污染时段PM_{2.5}质量浓度(以下简称浓度)大梯度带与地形梯度带走向几乎完全一致,在近山地带形成明显分界,将相对清洁的空气与污染气团区分开来;与以往研究报道一致,富含极高浓度PM_{2.5}的气团仅覆盖了平原区域(Jin et al, 2021),且山地-平原结合地区出现了明显的冷池现象,这意味着地形和中尺度天气过程可能共同影响着污染物时空分布特征,导致了PM_{2.5}浓度的急剧变化,本文针对此次典型区域污染过程

形成的影响机制进行探讨。

1 数据与方法

1.1 数据

本文使用的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐时观测数据来自全国城市空气质量实时监测平台 (<http://106.37.208.233:20035/>), 研究重点关注京津冀地区 9 个重点城市(图 1): 北京、天津、石家庄、张家口、承德、保定、廊坊、衡水、邯郸。采用中心城区覆盖站点的观测平均值代表该城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平, 上述 9 个城市分别包含 9、11、9、5、4、8、4、3、4 个观测站点, 2.2 节预报与观测对比所使用的预报结果样本与各城市覆盖站点的数量一致。具体处理如下: 首先将格点化预报结果依据距离最短原则向站点插值, 然后筛选出跟观测站点位置一致的格点数据进行平均。

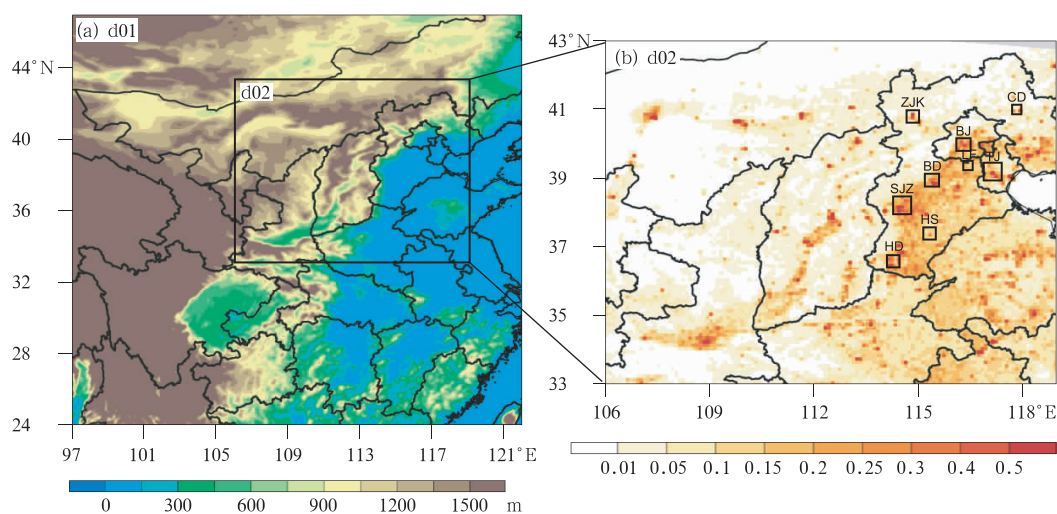
1.2 模式系统

本研究使用快速更新多尺度资料分析和预报系统化学子系统(RMAPS-CHEM) 48 小时预报时效的模式结果。该系统由北京市气象局研发, 是支撑华北区域空气质量、雾-霾及能见度预报的重要业务模式系统(赵秀娟等, 2016; 徐敬等, 2019; 王媛媛等, 2020); RMAPS-CHEM 模式系统以 WRF-CHEM v3.3.1 为积分主模式, 采用气象模式(WRF)和大

气化学模式(CHEM)在线耦合方式进行同步积分计算, 其中选用的主要物理、化学过程方案设置参见赵秀娟等(2016)。RMAPS-CHEM 系统采用嵌套预报方式, 外层预报范围覆盖区域如图 1a 所示, 水平分辨率为 9 km, 内层预报范围覆盖京津冀及周边区域(图 1b), 水平分辨率为 3 km; 垂直方向上自地面至模式层顶(50 hPa)分为 30 层, 其中 1500 m 以下含 13 层。

RMAPS-CHEM 系统由 RMAPS-ST 系统提供气象预报场。RMAPS-ST 系统基于 WRF 模式和 WRF-DA 三维变分同化模块构建, 同化了大量常规气象观测资料、GPS 水汽和飞机观测资料, 以及华北地区多部天气雷达资料, 对京津冀及周边地区气象要素有很好的预报能力(陈敏等, 2011; 张鑫宇等, 2021), 可为 RMAPS-CHEM 提供较准确的气象背景场。

RMAPS-CHEM 系统采用的排放清单由清华大学创建(<http://www.meicmodel.org>), 代表年份为 2019 年, 水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 时间分辨率为月; 清单排放数据覆盖电力、工业、民用、交通和农业 5 类排放行业, 模拟内层区域各行业累计 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度空间分布状况如图 1b 所示。由图 1b 所选城市位置及 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度空间分布可知, 除张家口和承德处于山地背景、人为排放相对稀少外, 其余 7 个城市均位于开阔的华北平原地区, 处于高排放背景下。



注: 图 b 中字母为城市名简称; BJ: 北京, TJ: 天津, SJZ: 石家庄, ZJK: 张家口, CD: 承德, BD: 保定, LF: 廊坊, HS: 衡水, HD: 邯郸。

图 1 (a) 模式嵌套预报区域及地形高度(填色), (b) d02 区域 $\text{PM}_{2.5}$ 排放强度(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 空间分布

Fig. 1 (a) Forecast zone and terrain height (colored), (b) spatial distribution of emission intensities of $\text{PM}_{2.5}$ (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in Domain 2

2 结果分析

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 时间变化特征

图 2 显示了污染过程前后京津冀 9 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预报值与观测值的逐时变化对比,2023 年 12 月 27—30 日期间,除张家口和承德站的 $\text{PM}_{2.5}$ 始终维持着相对较低的浓度水平外($<80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),其余各站均呈现出一致的上升趋势,其中 29 日午后浓度增长迅速,30 日凌晨达到高值,各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均浓度均高于 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。各站中:保定高浓度值持续时间最长且峰值最高(图 2d),于 30 日 21 时出现浓度极大值,为 $249 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;北京高浓度值持续时间最短(图 2c),最大小时浓度出现在

29 日 23 时($172 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),30 日午后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度开始迅速下降;京津冀平原东部和南部城市在 30 日凌晨至白天维持较高浓度,入夜后呈下降趋势(图 2e,2f,2h,2i)。此次污染过程具有区域普遍性,高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 对京津冀东南部平原地区影响最大,向北延伸至北京,更为偏北(承德)、偏西的山区城市(张家口)受到的影响较小。

利用各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均浓度观测数据检验了模式的预报效果,统计结果见表 1。总体来看,模式在平原污染地区预报得到的浓度逐时变化趋势与观测结果一致,预报值与观测值的相关系数分布在 $0.86 \sim 0.96$,且两者浓度数值接近,预报误差较小,表明 RMAPS-CHEM 系统对此次污染过程具有较好的预报能力,模式预测的京津冀平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间变化规律及污染程度接近实况。

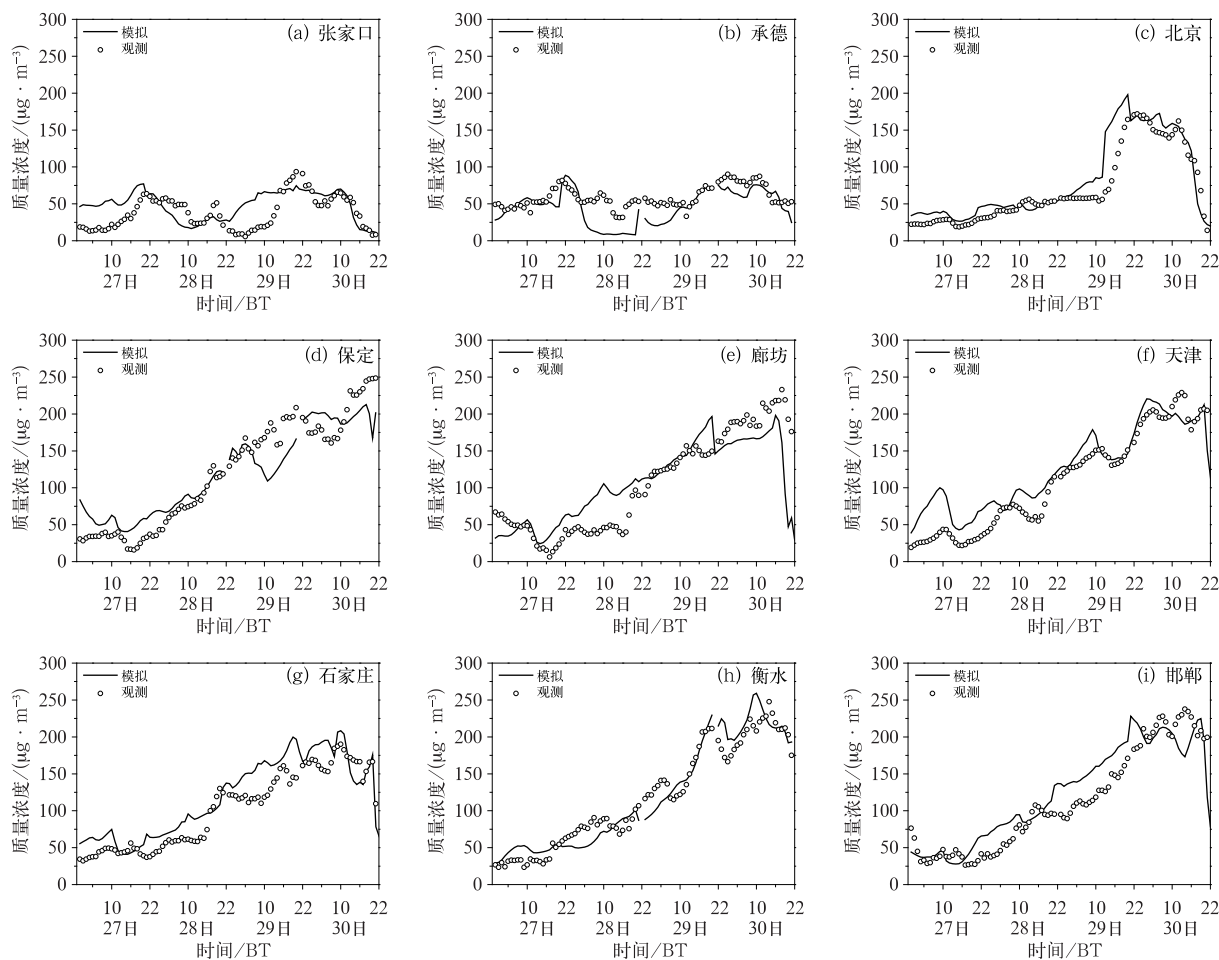


图 2 2023 年 12 月 27—30 日观测及预报的各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐时变化

Fig. 2 Hourly variation of observed and simulated concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in each city from 27 to 30 December 2023

表 1 2023 年 12 月 27—30 日各城市 PM_{2.5} 小时平均浓度的观测与预报结果对比
Table 1 Comparison of observed and simulated concentrations of hourly averaged PM_{2.5} in each city from 27 to 30 December 2023

参量	北京	天津	张家口	承德	保定	廊坊	石家庄	衡水	邯郸
观测值/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	69.5	109.5	38.1	58.4	120.9	103.9	101.4	118.7	113.1
预报值/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	80.7	125.2	47.9	45.1	121.0	106.1	118.3	120.2	122.5
相关系数	0.93	0.95	0.54	0.65	0.92	0.86	0.93	0.96	0.90
均方根误差/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	28.8	35.8	24.3	21.9	30.9	39.9	25.3	19.1	32.3

2.2 PM_{2.5} 空间演变特征及气象条件分析

污染累积阶段 PM_{2.5} 浓度区域分布变化如图 3 所示,模式预报的 PM_{2.5} 浓度空间分布特征与观测结果吻合,预报浓度高低值的相对位置、分布范围与观测场基本一致,模式较好地再现了污染过程发展的空间演变趋势。观测与预报结果均显示,在污染累积前期(29 日 08—14 时),华北平原地区以偏南风为主导风向,系统性南风贯穿整个京津冀平原,此时偏南气流携带高浓度污染物自南向北输送。至 29 日 20 时,除了西北部山区外,京津冀平原地区 PM_{2.5} 小时浓度普遍高于 110 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;29 日夜间

至 30 日清晨是污染最为严重的时段,整个华北平原被高浓度区覆盖,PM_{2.5} 小时浓度均大于 150 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。通过对污染累积前后风场的对比发现,污染严重时段系统性偏南风向东南撤出,退至河北与山东交界,风速及风向切变在这些地区出现清晰的边缘(30 日 02—08 时)。此时在京津冀西南—东北走向的山地平原结合地带形成了一条狭长的风辐合带(大概位置如图 3d,3e 蓝色虚线矩形所示),辐合带的西北侧为山地下坡风、指向东南,东南侧为偏南风,辐合带内以静风为主。这种风场结构形成一个复杂的大气污染物汇聚区。本文研究结果与京津冀地区低层局地大气环流的气候统计特征一致(曾佩

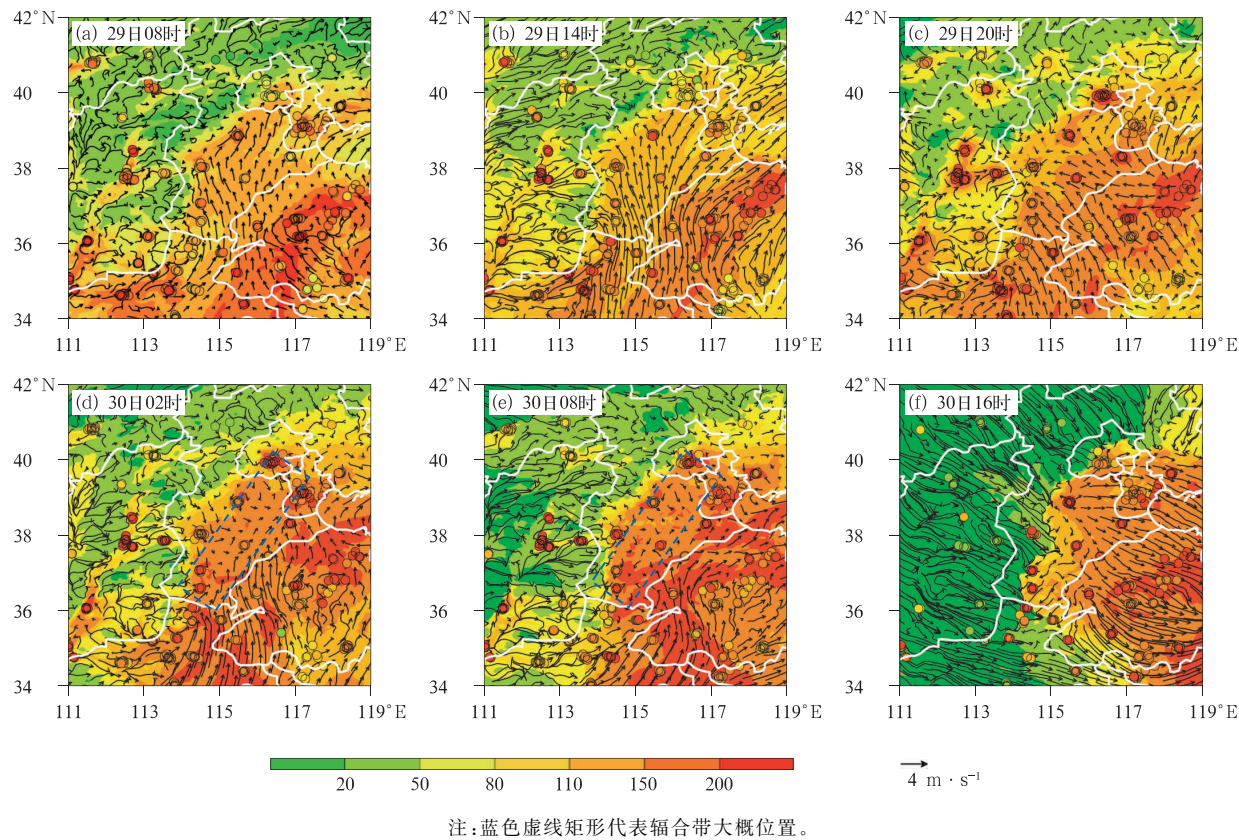


图 3 2023 年 12 月 29—30 日污染累积阶段地面 PM_{2.5} 浓度(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)预报(填色)和观测(圆点)及风场(风矢)空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of simulated (colored) and observed (dot) surface PM_{2.5} concentrations (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), wind field (wind vector) during accumulation stage of pollutants from 29 to 30 December 2023

生等,2019),这是导致该地区污染物持续累积的典型地面风场辐合形势(Li et al,2017;Jin et al,2022;Xu et al,2022)。

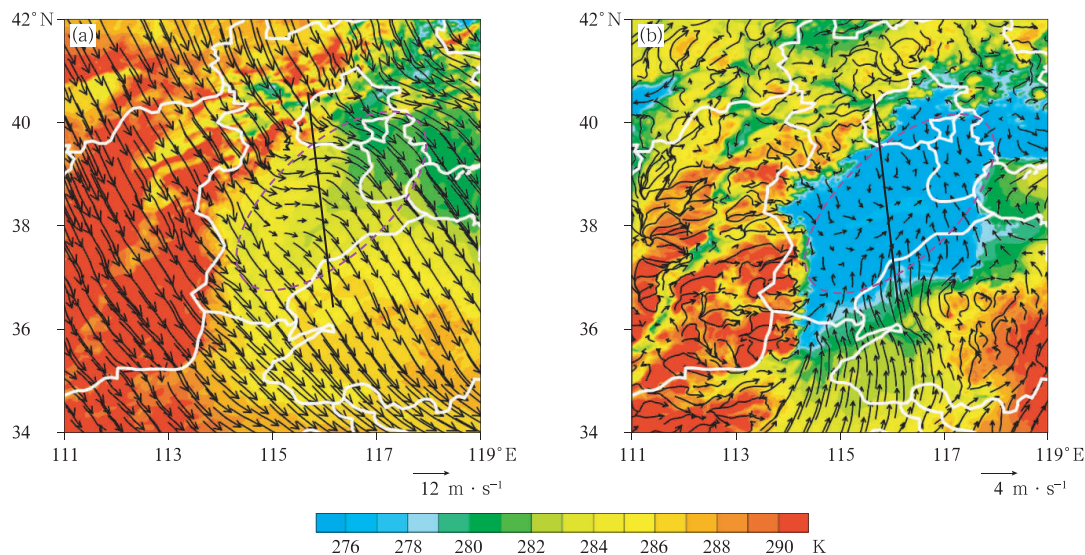
此次污染过程的天气背景显示(图略),污染累积初期在华北地区沿太行山东侧边缘 850 hPa 有一个浅槽,槽前有一条明显的暖舌伸向东北,京津冀平原上空大气被槽前暖平流源源不断加热,地面形成一条低气压带,该低压系统的形成与华北地形槽密切相关(刘瑞晨等,1983)。在此天气条件下,京津冀受槽前偏南气流影响,西南风在输送污染物的同时还将暖湿空气自南方吹向北方,在京津冀平原东南侧形成低空暖锋。华北地形槽及低空暖锋的发展对该地区大气污染的发生起到至关重要的作用,地形槽系统对其他地区空气质量的类似影响也有报道(Seaman and Michelson,2000)。此次污染过程以 850 hPa 出现强冷空气平流、冷高压入侵华北平原、地面盛行强烈的偏北风,污染物自西北向东南迅速扩散而结束(如图 3f 所示)。

上述分析显示,污染初期,在偏南风的传输作用下污染物聚集在华北平原北侧山前区域,表明偏南风输送很大程度上影响着京津冀地区的污染累积;而重污染时段,PM_{2.5}浓度的急剧增加似乎更多受到局地风场辐合带影响,天气尺度锋面系统和地形热力特性差异可能在边界层结构演变及污染物积聚过

程中起到重要的调节作用。

2.3 边界层结构特征

为了揭示边界层结构变化加剧京津冀平原污染程度的驱动机制,首先对 RMAPS-CHEM 预报得到的相当位温(θ_e)进行分析。 θ_e 的定义为根据干绝热过程饱和湿空气上升至气团中全部水蒸气凝结并达到 1000 hPa 的温度(Bolton,1980)。 θ_e 是一个表征大气温度、湿度和气压等综合因素的物理量,在天气学中常用于气团性质和锋面分析(Heimann,1992;Skinner et al,2011),对流层中下层 θ_e 的分布状况主要反映大气温度场和湿度场的变化特征。图 4 显示了污染最严重时段 30 日 02 时华北上空(图 4a,模式第 15 层,约 1200 m 高度)以及地面(图 4b) θ_e 的空间分布。由图可见,在京津冀平原地面出现一个明显的 θ_e 低值区(即冷池),其大致区域如图 4b 中椭圆区所示,冷池区西北和东南边缘均存在着明显的细窄 θ_e 梯度带,将其与周边高 θ_e 区分开来。冷池东南侧,偏南气流携带暖湿空气与冷池内干冷空气形成鲜明对比,该位置对应低空暖锋(图略);冷池西北侧,太行山因为海拔较高被强烈的太阳辐射加热(Hu et al,2014),当西北风盛行时,来自山地的暖平流受地形影响在 1000 m 左右的高度上自西北向东南传输,持续加热京津冀平原地区上层空气(图 4a)。



注:椭圆区代表冷池的大概位置,黑色实线为图 6 垂直剖面位置。

图 4 RMAPS-CHEM 预报的 2023 年 12 月 30 日 02 时京津冀及周边地区(a)上空及(b)地面的相当位温(填色)和风场(风矢)空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the equivalent potential temperature (colored) and wind (wind vector) in (a) upper air and (b) surface layer simulated by RMAPS-CHEM in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the adjacent area at 02:00 BT 30 December 2023

这种“上部加热、地面冷却”的垂直热力结构极不利于对流发展,地面冷池区被强稳定的逆温层覆盖,边界层高度下降。大气边界层高度对污染物扩散和稀释具有重要意义,预报结果清楚地显示出上述垂直热力结构对边界层高度的抑制作用贯穿了整个冷池区,例如30日夜間(02时)京津冀平原地区边界层高度不足100 m(图5a)。此外,稳定的大气层结结构使边界层下方的气团与上层分离,导致夜间地面风速减弱,冷池内风速小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图5b),绝大部分为静风区。因此,极低的边界层高度导致冷池区内污染物被限制在有限的垂直空间内,同时,弱风造成气团停滞,不利于水平方向的传输和扩散,导致大气污染物持续积累,污染程度不断加剧,据Jin et al(2021)估计,类似情况下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度可在8小时内增加约 $200\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

为了更细致地揭示污染加剧时段边界层结构特征,本文选择一条横切(自西北向东南,位置如图4中黑色实线所示)冷池区的垂直剖面作进一步分析,图6a显示了剖面处12月30日02时预报的 θ_e 及风场垂直分布。由图可见,冷池区冷空气堆积在近地层浅浅的区域内,下层相对较冷的气团被上层较热的气团覆盖,大气层结在垂直方向上表现为强稳定特性。另一个十分明显的特征是等温线自东南向西北倾斜,这与暖锋锋面受地形影响暖气团沿坡度抬

升有关(Jin et al, 2022)。横切面东南端受暖锋影响,以上升运动为主;西北端受冷气团控制,为明显的下沉气流(图6b);在京津冀山地平原结合地区上空,较强的暖气团上升气流与冷空气下沉气流直接碰撞,导致该地区边界层高度急剧下降,为空气污染物的扩散留下了非常小的垂直空间。

本研究获得的地形及暖锋影响下边界层热、动力结构特征的概念模型示意图如图6c所示,该结果与Jin et al(2022)提出的京津冀地区典型污染类型边界层空间结构的概念模型一致,即图6a中冷池区对应暖锋前孤立、稳定的冷空气团,其东南侧为暖锋后混合充分的暖湿大气,可以清晰地看到平原近山地区冷空气在东南侧受暖锋驱动、西北侧受到地形限制,于近地面形成堆积的现象。这种地形和暖锋共同驱动的边界层结构,是导致京津冀区域形成严重污染的典型天气过程之一, Jin et al(2022)针对2015—2020年秋冬季共发生的82次污染过程统计显示,该天气形势占比26%。此外,大量研究表明,冷池的形成通常受到地形影响(Lareau et al, 2013),其他类似地形条件地区也报道了相似的研究结果,如:在盆地或山谷底部持续数天的冷池具有明显的稳定分层、弱风和侧向限制特征,这些不利因素极易造成近地表空气污染物积聚(Whiteman et al, 2001; Silcox et al, 2012; Conangla et al, 2018)。

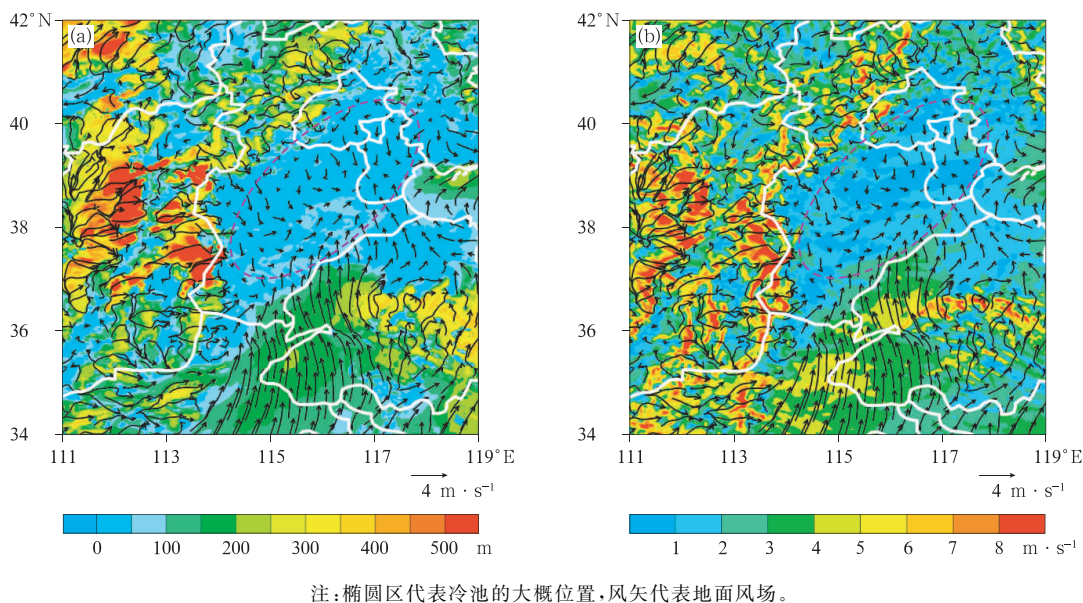


图5 RMAPS-CHEM 预报的2023年12月30日02时京津冀及周边地区(a)边界层高度(填色)及(b)地面风速(填色)空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of (a) boundary layer height (colored) and (b) surface wind speed (colored) simulated by RMAPS-CHEM in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the adjacent area at 02:00 BT 30 December 2023

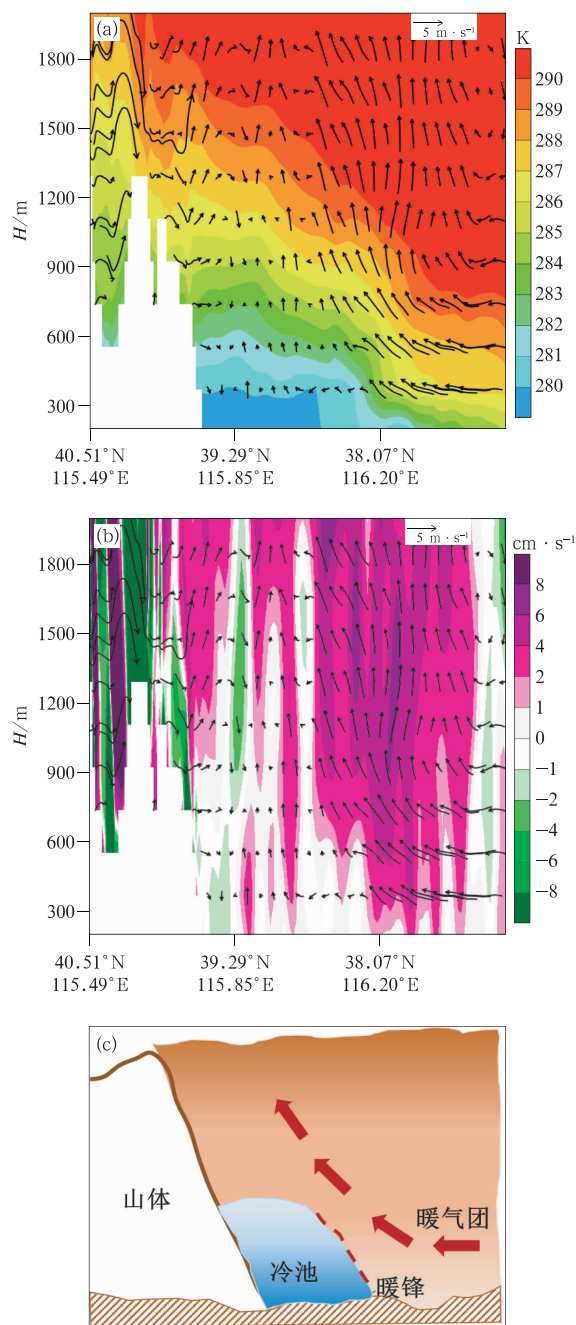


图 6 2023 年 12 月 30 日 02 时 (a) 相当位温 (填色)、
(b) 垂直速度 (填色, 放大 100 倍) 和流场 (箭头)

沿图 4 黑色实线的垂直剖面, (c) 边界层热、
动力结构特征概念模型示意图

Fig. 6 Cross-section of (a) equivalent potential temperature (colored) and (b) vertical velocity (colored, multiplied by 100) with air flow field (arrow) along the black solid line in Fig. 4 at 02:00 BT 30

December 2023, (c) schematic diagram of conceptual model of thermodynamic and dynamic structure characteristics of the boundary layer

3 结 论

2023 年 12 月 29—30 日在京津冀发生了一次典型区域性重污染过程, 重污染时段平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度普遍高于 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、城市中心区高于 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 本研究利用京津冀 $\text{PM}_{2.5}$ 地面浓度观测数据和气象资料分析, 以及 RMAPS-CHEM 数值预报系统提前 48 小时的预报结果, 研究了此次污染过程形成及污染程度加剧的影响机制, 获得的主要研究结论如下:

(1) 污染过程发展前期, 受华北地形槽前偏南气流影响, 京津冀平原地区被系统性偏南风控制, 西南风中高浓度污染物的输送作用造成京津冀 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升。污染加剧污染时段, 系统性西南风向东南撤出, 退至河北与山东交界, 西南风携带的暖湿气团与京津冀平原干冷气团形成鲜明对比, 于平原地区东南侧形成一条明显的低空暖锋。

(2) 在暖锋及地形热力特性的共同影响下, 被污染的冷气团东南侧受暖锋驱动、西北侧受到地形限制, 于京津冀山地平原结合地区的近地面形成冷池。冷池表现出强稳定大气层结特性, 极低的边界层高度及逆温结构导致污染物被限制在有限垂直空间内, 同时静风造成气团停滞, 不利于水平方向的传输和扩散, 这些不利因素最终导致污染物浓度持续积累、污染程度加剧。

(3) RMAPS-CHEM 业务模式系统对此次典型污染天气具有较好的预报能力, 模式有效预测出京津冀平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时间变化规律及污染程度。模式预报的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布特征与观测结果吻合, 预报结果很好地再现了污染过程发展趋势, 合理地揭示了边界层结构特征与污染物浓度空间分布的关联机制。本研究结果有助于提升京津冀区域性重污染过程的预报预警能力。

参考文献

- 陈敏, 范水勇, 郑祚芳, 等, 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探[J]. 气象学报, 69(1): 181-194. Chen M, Fan S Y, Zheng Z F, et al, 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast[J]. Acta Meteor Sin, 69(1): 181-194 (in Chinese).
- 丁伟宸, 刘勤亚, 张俊, 等, 2023. 北京大兴国际机场不利气象条件下飞机尾气排放对大气环境影响的模拟研究[J]. 气象, 49(1): 62-73.

- Ding W C, Liu Q Y, Zhang J, et al, 2023. Simulation study on atmospheric environmental impact of aircraft emissions of Beijing Daxing International Airport under adverse meteorological conditions[J]. *Meteor Mon*, 49(1): 62-73 (in Chinese).
- 江琪, 桂海林, 花丛, 等, 2022. 济南市大气污染天气分型与冷空气对污染物的影响机制研究[J]. *气象*, 48(10): 1281-1291. Jiang Q, Gui H L, Hua C, et al, 2022. Influence mechanisms and weather patterns of air pollution episodes in Jinan[J]. *Meteor Mon*, 48(10): 1281-1291 (in Chinese).
- 刘瑞晨, 扈忠慈, 李人和, 1983. 华北平原中尺度低气压的若干事实[J]. *大气科学*, 7(1): 78-87. Liu R C, Hu Z C, Li R H, 1983. Certain facts about the meso-scale low over the North China Plains[J]. *Chin J Atmos Sci*, 7(1): 78-87 (in Chinese).
- 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等, 2004. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇[J]. *环境科学研究*, 17(1): 21-25. Su F Q, Ren Z H, Gao Q X, et al, 2004. Convergence system of air contamination in boundary layer above Beijing and North China: transportation convergence in boundary layer[J]. *Res Environ Sci*, 17(1): 21-25 (in Chinese).
- 王倩倩, 权建农, 程志刚, 等, 2022. 2019年冬季北京海陀山局地环流特征及机理分析[J]. *气象学报*, 80(1): 93-107. Wang Q Q, Quan J N, Cheng Z G, et al, 2022. Local circulation characteristics and mechanism analysis of Haituo Mountain in Beijing during winter 2019[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(1): 93-107 (in Chinese).
- 王媛媛, 赵玮, 邢楠, 等, 2020. 基于 RMAPS-CHEM 模式产品的北京地区能见度预报订正[J]. *气象*, 46(3): 403-411. Wang Y Y, Zhao W, Xing N, et al, 2020. Visibility forecast correction based on RMAPS-CHEM model products in Beijing[J]. *Meteor Mon*, 46(3): 403-411 (in Chinese).
- 徐敬, 陈丹, 赵秀娟, 等, 2019. RMAPS_Chem V1.0 系统 SO₂ 排放清单优化效果评估[J]. *应用气象学报*, 30(2): 164-176. Xu J, Chen D, Zhao X J, et al, 2019. Evaluation on SO₂ emission inventory optimizing applied to RMAPS_Chem V1.0 system[J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(2): 164-176 (in Chinese).
- 曾佩生, 朱蓉, 范广洲, 等, 2019. 京津冀地区低层局地大气环流的气候特征研究[J]. *气象*, 45(3): 381-394. Zeng P S, Zhu R, Fan G Z, et al, 2019. Study on climatic characteristics of local circulation in the lower atmosphere in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Meteor Mon*, 45(3): 381-394 (in Chinese).
- 张琴, 姚秀萍, 2021. 鲁中地区霾期间气溶胶的垂直分布及其与气象条件的关系[J]. *气象*, 47(9): 1099-1112. Zhang Q, Yao X P, 2021. Vertical distribution of aerosol and its relationship with meteorological conditions during haze in central part of Shandong Province[J]. *Meteor Mon*, 47(9): 1099-1112 (in Chinese).
- 张鑫宇, 陈敏, 孙娟珍, 等, 2021. WRF-DA 中地面观测资料同化方案的改进与应用[J]. *气象学报*, 79(1): 104-118. Zhang X Y, Chen M, Sun J Z, et al, 2021. Improvement and application of the ground observation data assimilation scheme in WRF-DA[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(1): 104-118 (in Chinese).
- 赵秀娟, 徐敬, 张自银, 等, 2016. 北京区域环境气象数值预报系统及 PM_{2.5} 预报检验[J]. *应用气象学报*, 27(2): 160-172. Zhao X J, Xu J, Zhang Z Y, et al, 2016. Beijing regional environmental meteorology prediction system and its performance test of PM_{2.5} concentration[J]. *J Appl Meteor Sci*, 27(2): 160-172 (in Chinese).
- 周涛, 周青, 张勇, 等, 2023. 汾渭平原 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象成因分析[J]. *气象*, 49(11): 1359-1370. Zhou T, Zhou Q, Zhang Y, et al, 2023. Characteristics of PM_{2.5}-O₃ compound pollution and meteorological impact in Fenwei Plain[J]. *Meteor Mon*, 49(11): 1359-1370 (in Chinese).
- Arduini G, Chemel C, Staquet C, 2020. Local and non-local controls on a persistent cold-air pool in the Arve River Valley[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(731): 2497-2521.
- Bolton D, 1980. The computation of equivalent potential temperature[J]. *Mon Wea Rev*, 108(7): 1046-1053.
- Cheng N L, Li Y T, Cheng B F, et al, 2018. Comparisons of two serious air pollution episodes in winter and summer in Beijing[J]. *J Environ Sci*, 69: 141-154.
- Conangla L, Cuxart J, Jiménez M A, et al, 2018. Cold-air pool evolution in a wide Pyrenean Valley[J]. *Int J Climatol*, 38(6): 2852-2865.
- Daly C, Conklin D R, Unsworth M H, 2010. Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts[J]. *Int J Climatol*, 30(12): 1857-1864.
- Heimann D, 1992. Potential and equivalent-potential temperature patterns at cold fronts with pre-frontal foehn[J]. *Meteor Atmos Phys*, 48(1-4): 165-171.
- Hu X M, Ma Z Q, Lin W L, et al, 2014. Impact of the Loess Plateau on the atmospheric boundary layer structure and air quality in the North China Plain: a case study[J]. *Sci Total Environ*, 499: 228-237.
- Jin X P, Cai X H, Yu M Y, et al, 2021. Mesoscale structure of the atmospheric boundary layer and its impact on regional air pollution: a case study[J]. *Atmos Environ*, 258: 118511.
- Jin X P, Cai X H, Yu M Y, et al, 2022. Regional PM_{2.5} pollution confined by atmospheric internal boundaries in the North China Plain: analysis based on surface observations[J]. *Sci Total Environ*, 841: 156728.
- Kang H Q, Zhu B, Gao J H, et al, 2019. Potential impacts of cold frontal passage on air quality over the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmos Chem Phys*, 19(6): 3673-3685.
- Lareau N P, Crosman E, Whiteman C D, et al, 2013. The persistent cold-air pool study[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 94(1): 51-63.
- Li G H, Bei N F, Cao J J, et al, 2017. Widespread and persistent ozone pollution in eastern China during the non-winter season of 2015: observations and source attributions[J]. *Atmos Chem Phys*, 17(4): 2759-2774.
- Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al, 2015. Numerical study of the effects of local atmospheric circulations on a pollution event over Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. *J Environ Sci*, 30: 9-20.
- Seaman N L, Michelson S A, 2000. Mesoscale meteorological structure of a high-ozone episode during the 1995 NARSTO-northeast study

- [J]. *J Appl Meteor*, 39(3):384-398.
- Silcox G D, Kelly K E, Crosman E T, et al, 2012. Wintertime $\text{PM}_{2.5}$ concentrations during persistent, multi-day cold-air pools in a mountain valley[J]. *Atmos Environ*, 46:17-24.
- Skinner P S, Weiss C C, Schroeder J L, et al, 2011. Observations of the surface boundary structure within the 23 May 2007 Perryton, Texas, supercell[J]. *Mon Wea Rev*, 139(12):3730-3749.
- Sun Y L, Chen C, Zhang Y J, et al, 2016. Rapid formation and evolution of an extreme haze episode in northern China during winter 2015[J]. *Sci Rep*, 6(1):27151.
- Whiteman C D, Zhong S, Shaw W J, et al, 2001. Cold pools in the Columbia Basin[J]. *Wea Forecasting*, 16(4):432-447.
- Wilson T H, Fovell R G, 2016. Modeling the evolution and life cycle of stable cold pools[J]. *Wea Forecasting*, 31(6):1753-1769.
- Xu J, Li J, Zhao X J, et al, 2022. Effectiveness of emission control in sensitive emission regions associated with local atmospheric circulation in O_3 pollution reduction: a case study in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Atmos Environ*, 269:118840.
- Ye X X, Song Y, Cai X H, et al, 2016. Study on the synoptic flow patterns and boundary layer process of the severe haze events over the North China Plain in January 2013[J]. *Atmos Environ*, 124:129-145.
- Zhai S X, Jacob D J, Wang X, et al, 2019. Fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) trends in China, 2013—2018: separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology[J]. *Atmos Chem Phys*, 19(16):11031-11041.
- Zhang J L, Reid J S, Alfaro-Contreras R, et al, 2017. Has China been exporting less particulate air pollution over the past decade? [J]. *Geophys Res Lett*, 44(6):2941-2948.
- Zheng G J, Duan F K, Su H, et al, 2015. Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions[J]. *Atmos Chem Phys*, 15(6):2969-2983.

(本文责编:戴洋)