一次冷锋过程中我国区域空气污染边界层特征

张 晨,朱 彬^{*},刘晓慧,侯雪伟,牟南南,康汉青,王丽娟 (南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室,国家综合气象观测专项试验外场,江苏 南京 210044)

摘要:利用常规地面气象和探空资料、ERA-interim 再分析资料、以及全国 PM_{2.5}浓度数据,针对 2015 年 3 月 7~11 日一次冷空气南下的锋面天气 过程中,我国华北、华东地区出现的大范围空气污染,开展了高空各层天气形势分析,以及本次过程中污染区域由北至南 6 个城市(北京、章丘、郑 州、南阳、武汉、长沙)边界层气象要素的垂直结构及其时空演变特征的研究.结果表明:在污染前期(3 月 7~8 日)中高纬度 500hPa 平直的纬向环流 和地面均压场,为污染天气的发生和维持以及空气污染物的集聚提供了有利的环流场.污染中期(3 月 8~10 日)冷空气南下,地面冷高压向华东地区移 动,重污染区域随冷高压前部的弱低压场或均压场由北向南移动.伴随着天气系统移动,六个地面观测站的边界层特征在时空上表现出相似性,由北 向南各站在污染期间先后出现多层逆温,风速较小,逆温层下相对湿度较大.此次多层逆温的形成是由于夜间近地面辐射冷却、冷锋移动过程中产生 的锋面逆温以及边界层以上的下沉运动造成的.本研究揭示了在天气系统移动中,位于天气系统相同部位站点的边界层结构具有共同的特征,及其 与空气污染的关系.

关键词: 空气污染; 天气系统移动; 边界层结构; 多层逆温

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)10-4284-08 DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0475

Boundary layer characteristics of an air pollution event in China during a cold front. ZHANG Chen, ZHU Bin^{*}, LIU Xiao-hui, HOU Xue-wei, MU Nan-nan, KANG Han-qing, WANG Li-juan (Outfield of National Comprehensive Meteorological Observation Special Experiment, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China). *China Environmental Science*, 2020,40(10): 4284~4291

Abstract: Using radiosonde and weather station data, reanalysis data of ERA-interim, and national PM_{2.5} concentration data, a cold front process during March 7 to 11, 2015 and its impact on air pollution were discussed. Our research focused on the circulation features at different levels of air, the vertical structure of the meteorological factors in the boundary layer and its spatiotemporal evolution characteristics from the north to south at six sites (Beijing, Zhangqiu, Zhengzhou, Nanyang, Wuhan, Changsha) during the southward moving process of the cold front. The results showed that in the first stage of the air pollution event (7~8March), the zonal circulation at 500hPa and the surface pressure field were even, and generated favorable conditions for the accumulation of air pollutants. In the second stage of the event (8~10March), the regions with heavy pollution were generally located in front of the cold high with weak pressure gradient, and moving southward accompanying the southward movement of the cold front. With the passing of the weather system, the boundary layer characteristics at six sites showed a similar feature of multi-level inversion occurring sequentially in time, and from north to south in space. The wind speed was low, and the relative humidity was high within the inversion layer. The formation of this multi-level inversions was due to the near-surface radiation cooling at night, frontal inversion of the moving cold front, and air sinking above the boundary layer. This study revealed that in a moving weather system, the boundary layer structures in the same part of the weather system had common characteristics, which were related closely to the occurring of air pollution.

Key words: air pollution; weather systems moving; boundary layer structure; multi-level inversion

研究表明,在特定条件下,如较低的风速、较高的相对湿度、大气层结稳定、逆温等,以及弱气压场和较低的混合层厚度等都不利于大气中污染物的扩散^[1-4].秋冬季为空气污染高发期,其主要受排放源和天气形势共同影响.大量研究发现污染物的分布主要集中在边界层内,因此对边界层结构与空气污染间关系的研究日益受到关注.Xu 等^[5]通过对 2016 年冬季我国长江三角洲地区一次污染过程分析得 出,污染期间寿县、南京和东山3个站点的双层逆温 结构在时间和空间上呈现由西北向东南推进,且上 层逆温抑制污染物和水汽向上扩散;下层逆温则抑 制了地表污染物的垂直扩散.Zhang 等^[6]基于 2007 收稿日期: 2020-02-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0602003);国家自然科学基金资助项目(91544229:41575148);2019 年江苏省研究生科研创新计划项目 (1344051901059)

* 责任作者, 教授, binzhu@nuist.edu.cn

年 1 月宜昌站(111.18°E,30.42°N)探空资料进行分析 得出其上空对流层中层和低层有两个逆温层存在.Li 等^[7]对中国 30°N 附近台站探空数据分析发现,对流 层中层和低层的大气逆温大多发生在秋冬两季,有时 冬季会有多层逆温发生.逆温层可以改变大气动力结 构^[8-9],阻碍大气垂直运动^[10-11],抑制对流和云的形 成^[12-13],最终导致大气污染物在边界层内累积^[14].

不同的天气形势对边界层结构有各异的影响,目前国内外学者利用不同的方法对污染过程中的天气系统进行分类,并探究其与空气污染间的关系. McGregor等^[15]通过使用聚类分析方法对污染天气过程分型,得到6类典型的天气类型,其中反气旋天气形势下的大气边界层抑制了垂直方向混合层的发展,不利于污染物的扩散.Ding等^[16]通过对北京 2003 年气象塔收集到的观测数据进行研究,得出在不同的边界层条件和天气系统下,气溶胶垂直分布在季节、时间和空间上具有明显的变化. Miao 等^[17]通过对北京地区 2013~2015 年冬季 900hPa 位势高度场进行天气分型得出:北京地区的重污染天气与其上空南风盛行或西风较弱、受反气旋控制密切相关.

Li 等^[18]发现华北平原和长江三角洲这两个最 大的城市群间时常发生污染物的跨界传输.Kang 等^[19]通过对长江三角洲冬季一次污染过程进行分 析得出:冷锋南下可将华北地区的大气污染物快速 清除,而冷锋是大气污染物的载体,进而使下游长江 三角洲空气质量恶化.Lin 等^[20]指出造成亚洲春季污 染物输送的主要机制:空气污染物被向东南移动的 冷锋锋面前部抬升,以及冷锋后部边界层内进行的 传输.因此,冷锋等移动的天气系统可能会对沿其移 动路径的空气质量产生重大影响.

前人研究表明,大部分研究局限于宏观环流形 势或者边界层内的风、温度、相对湿度等气象条件 对空气污染的影响.但将二者结合,对移动的天气系 统下,配合的边界层特征对空气污染的影响研究很 少.因此本文针对 2015 年 3 月 6~11 日我国东部发生 的一次大范围自北向南的空气污染过程,结合高空 冷高压系统移动路径,选取北京、章丘、郑州、南阳、 武汉、长沙六个站点,配合地面观测资料、垂直探空 数据、天气图以及地面 PM_{2.5}观测资料,研究天气系 统移动过程中,边界层内各气象要素和结构的时空 演变特,以及其与空气污染间的关系.

1 资料与方法

分析所用资料包括:每日 8 次的 MICAPS(气象 信息综合分析处理系统)地面数据(温度、露点、风 向、风速等气象要素)、6 个站点的 L 波段探空雷达 监测数据,观测时间为 2015 年 3 月 7~11 日,每日 08:00 和 20:00 两个时次,数据包括温度、相对湿度、 风向风速等气象要素,全国监测台站提供的 PM_{2.5}浓 度数据,物理量分析采用的是 ERA-Interim 0.75°× 0.75°再分析资料,每日 4 个时次.

2 结果与讨论

2.1 天气形势与空气污染概况

根据 2015 年 3 月北半球 500hPa 平均位势高度 及距平场(图略)分析发现,北半球中高纬度在西欧、 东亚、太平洋东部和北美东部呈现 4 种波型,东亚大 槽附近为正距平区,与常年同期相比东亚大槽较弱. 此外,亚洲中高纬地区受较平直的纬向环流控制,该 月冷空气活动强度较弱,导致我国大部地区气温较 常年同期偏高,不利于空气污染物的消散.

3 月 7~11 日,我国自华北南部至华中地区在 1000hPa 上依次受到高压控制(图 1),且高压中心自北 向南移动,最终减弱并入海.7日(图 1a),北京、天津、 河北大部和辽宁中南部等地处于低压倒槽前部均压 区内,各地均出现不同等级的污染,其中北京、天津等 地出现重度污染.8 日(图 1b)随着冷高压东移南下,污 染区域移至河北南部、山东北部以及河南地区.9~10 日(图 1c、d)冷高压逐渐减弱东移入海,而污染区域经 湖北移至湖南地区然后消散.冷锋的移动不仅会清除 当地的气溶胶粒子,也会将空气污染物输送至下游地 区.其中,7~8 日北京市的 PM2.5 峰值浓度为 280µg/m3, 而 8 日 13 时急剧下降至 35µg/m³.此时污染物传输至 郑州市和章丘市,两地的 PM2.5 浓度分别上升至 150 和 200µg/m³,并于 9 日 12:00 回落至 84µg/m³.10~11 日向下游传输的污染物同样造成了南阳、武汉、长 沙PM2.5浓度的剧烈波动,各站PM2.5浓度峰值出现时 间自北向南具有连续性.从图2中也可看出,3月7~11 日中度污染及以上区域(深灰色)自北向南呈传输型 分布.最终随着东移南下冷空气横扫华中地区,冷空 气后部清洁的偏北大风使空气污染物得到了有效的 清除,各站 PM2.5浓度明显减小.

20:00

b3月8日

40卷



图 1 2015 年 3 月 7~10 日地面等压线与 PM2.5 浓度(µg/m3,圆点填色)叠加图 Fig.1 Overlay map of ground isobar and $PM_{2.5}$ concentration ($\mu g/m^3$, dot filling) during March 7~10, 2015 黑色方点从北至南依次为北京、章丘、郑州、南阳、武汉、长沙



2015年3月6~12日6个观测站地表PM2.5浓度(µg/m3, 图 2 填色)和风矢量(m/s,箭头)叠加



左侧坐标轴刻度为6个观测站点的纬度.北京:39.9°N;章丘:36.7°N;郑州: 34.7°N;南阳: 33.1°N;武汉: 30.6°N;长沙: 28.2°N 左轴上的标签是 14 个观 察点的纬度

六站点PM2.5浓度和气象要素变化的时间进程 2.2

由 6 个站点 PM_{2.5} 浓度和地面气象资料(能见 度、气温及风矢量)随时间的演变图(图 3a~f)可 见,PM2.5浓度高值区(阴影区)发生的时间由北向南 依次出现.这与图 1 中的传输型污染显示的天气过 程结果是一致的.5 日 20:00~8 日 11:00 北京站 PM2.5 浓度维持在 121~280µg/m³,在此期间能见度仅为 3km,温度为 5~10℃,相对湿度为 80%左右(图略).污 染维持阶段(5日20:00~8日11:00),特别是在重污染 期间(7日02:00~8日11:00)北京站风速仅为1~2m/s, 风向多变,有利于出现污染天气.8日14:00开始,冷锋 后清洁干冷空气侵入北京地区,主导风向转为偏北 风,且风速增大至 5m/s 左右,温度和相对湿度显著下 降,PM2.5也浓度快速下降,能见度上升至 30km 左右, 污染天气过程结束.

8 日 14:00 章丘站 PM_{2.5} 浓度开始急剧上升,能 见度骤减至 3km 以下,出现小风、无主导风向、高 湿等特征,这与北京站7日02:00~8日08:00的高 PM2.5 浓度时段的特征相似.随着冷空气的入 侵,23:00开始风向转为偏东风然后转为偏北风,风速 增至 6m/s,温度和相对湿度迅速降低.与北京不同的 是,随冷锋过境时北京污染物浓度下降,而章丘污染 物浓度升高,这是由于随冷空气由北向南移动将上 游污染物向下游输送的结果.类似地,PM_{2.5}浓度高值 发生时次由北向南推进,郑州站 PM_{2.5}浓度高值发生 在 8 日 14:00~9 日 08:00;南阳站在 8 日 20:00~9 日 20:00;武汉站在9日20:00~10日11:00;长沙站在10日05:00~10日23:00.当冷空气来袭时,温度首先下降,PM_{2.5}由上游污染物传输至当地,当地PM_{2.5}浓度显著升高,然后冷锋后的大风清除作用,使得PM_{2.5}浓度迅速降低至优良等级.可见,北京以南各站在冷锋依次过境时,污染物浓度都会由于上游输送的影响而显著升高.



图 3 2015 年 3 月 7 日 02:00~11 日 23:00 期间 6 站点地面温度、PM_{2.5}浓度、能见度、风矢量的变化趋势 Fig.3 The trend of the ground temperature (°C), PM_{2.5} concentration (µg/m³), visibility (km), wind speed of the six stations during 02:00 on March 7~23:00 on March 11, 2015

阴影区域 PM2.5浓度≥115µg/m3.a.北京;b.章丘;c.郑州;d.南阳 e.武汉;f.长沙

2.3 天气系统移动时各站的多层逆温

对流层中下层逆温主要分为地形逆温、辐射逆 温、下沉逆温、平流逆温和锋面逆温等.逆温层的存 在,使大气层结变得稳定,影响上下层物质和能量的 交换,使大气动力和热力结构变得稳定,抑制空气垂 直混合和扩散,阻碍强对流的产生,从而造成边界层 内空气污染物的累积.

L 波段探空雷达秒数据包括每秒一组的气温、 高空气压、相对湿度、风速风向等气象要素,可获取 详细的边界层数据,为研究大气边界层结构提供依 据.选取 6 个站点探空雷达资料,分析本次冷空气南 下过程中传输型污染对应的由北至南各站点边界 层垂直结构特征,目的是判断边界层结构是否因天 气系统的移动而发生相似的变化.

图 4 给出了 6 个站点发生 PM_{2.5}浓度高值时期(图 3 中阴影区)气象要素垂直廓线图.7~8 日期间,北京出 现了大范围霾天气,PM_{2.5}浓度稳定在 250µg/m³ 左右, 为重度污染,此时北京处于高压前部的均压场区域.3 月8日08:00(图4a1)北京站在130m以下有贴地强逆 温存在,逆温强度达1.3℃/100m,400~800m出现第2层 逆温层,1200~1300m可见第3层逆温层,大气层结很稳 定.第2逆温层底以下(约500m)的相对湿度在70%左右, 而700m处相对湿度减小至30%以下.第2逆温层以下 风向为东北风、之上转为北到西北风.3层逆温结构一 直维持到8日20:00,冷锋过境后打破了原来的边界层 结构(图4a2),地面至1500m都转为西北大风.



Fig.4 Vertical profiles of temperature (°C), wind vector, and relative humidity (%) at each time of the six stations during March 7~9,

2015

a1/a2.北京;b.章丘;c.郑州;d.南阳 e.武汉;f.长沙.灰色箭头所指为逆温区间所在位置

3 月 8 日 08:00,章丘站与北京站边界层结构非 常相似,但第 3 层逆温层完全消失时间比北京站晚 约 12h(9 日 08:00 冷锋过境后).郑州站 3 层逆温出现时间较章丘站又晚 12h,于 8 日 20:00 在 160m 以下、

4288

400m~600m 和 1300m 处出现逆温层.南阳站于 9 日 08:00 在 700 和 1000m 处出现 2 层逆温,武汉站于 9 日 08:00 在 100m 以下、200~700m 以及 1100~1300m 内出现了 3 层逆温.长沙站逆温结构出现的最晚,9 日 20:00 200m 处有逆温层出现,1500m 附近有弱逆温, 未出现地面逆温.

通过以上垂直观测资料分析可以发现,6个站点 3 层逆温结构(南阳、长沙为 2 层)发生的时间表现出 地理位置上的从东北向西南方向的推进,且相对湿 度在中层逆温层以上(500~600m 左右)都有明显的 下降.各站在 3 层逆温出现时整层风速较小.当高空 冷空气南下,地面冷高压由北向南移动,发生多层逆 温的站点都处于冷高压前部的均压区或等压线稀 疏区域.冷锋过境后,各站风速先后显著增大,风向转 为东北风或偏北风.由此可见,当天气系统移动时,处 于同一天气系统相同位置的站点的边界层特征具 有相似性,边界层特征随天气系统的移动而变化.

2.4 多层逆温的成因分析

由于冷高压前部的均压区边界层较稳定并表 现出多层逆温结构,由此可见各站多层逆温的形 成原因与天气形势有紧密的联系.利用 2015 年 3 月 7~11 日欧洲中心再分析资料,对 6 个站点做 700~1000hPa 垂直速度的时间序列分析,图 6 给出 了北京、章丘、武汉三站(其他站略)的垂直速度 场在 PM_{2.5}浓度高值期间的特征,950hPa 处呈现出 弱的垂直运动,大气层结较稳定、有利于污染物的 累积.

结合图 4 气象要素垂直廓线图看,8 日 08:00~10 日 20:00 期间,从北京至南阳至长沙,3 层或 2 层(南阳 站、长沙站)逆温结构发生了地理位置上的自北向南 推进.其中,除南阳站和长沙站,200m 以下均出现了 贴地的辐射逆温层且多发生在早晨.第2层逆温多 出现在 400~900m 附近,以 600m 为中心.从 975hPa 温度平流场分析发现,8 日 02:00(图 5a)北京站附近 受暖平流控制,处于锋面前部暖气团中.8日08:00(图 5b)转为冷平流控制,此时地面锋线刚过北京站,冷平 流较弱,图 4a1 的 400~800m 气层气温还未下降,所以 产生了锋面逆温;郑州站、南阳站与之类似.章丘站 受前一股弱冷空气影响,在 975~950hPa(约 300~ 600m)有冷平流,而 950~925hPa(约 600~900m)处受 南下冷锋前部暖气团影响有暖平流(图 5c),因此,章 丘站上空有平流逆温产生.当冷锋过境时,锋后受冷 气团控制并有冷平流,而锋前暖气团沿锋面爬升有 弱暖平流存在,垂直方向上不同高度层气团移速不 同,使得冷暖空气混合不均,造成垂直方向上冷暖平 流分布不均^[21].武汉第 2 层逆温(图 4e 中 300~600m 处)与图 5d 中 975~950hPa(约 300~600m)的暖平流中 心重叠可以推知,该第2层逆温正是由底层冷平流 使气团降温,而上层暖平流加热气团导致的锋面逆 温,长沙站也有类似对应特征.

至于第 3 层逆温多出现在 1000~1500m 附近, 图 6a 中北京站上空 1000m(925hPa)处受下沉气流控 制,第 3 层逆温强度强,章丘站(图 6b)与之类似.而图 6c 武汉站受下沉气流控制时间短,第 3 层逆温强度 弱,郑州、南阳、长沙站有相似特征.在污染期间,各 站 925hPa 以下比湿较高,北京站达到 2.7g/kg,除北京 站外其余各站达到 4g/kg 左右,当冷空气来临时,比 湿迅速降低至 1g/kg 左右.





图 6 2015 年 3 月 7~10 日期间各站点垂直速度(等值线,Pa/s)和比湿(阴影,g/kg)垂直向时间变化 Fig.6 Profile of vertical speed (isoline, Pa/s) and specific humidity (shadow, g/kg) of stations during March 7~10, 2015 a.北京;b.章丘;c.武汉

据以上分析,在本次污染的 PM_{2.5}浓度高值时期, 各站均出现了 3 层或 2 层逆温结构,且随着冷高压的 不断南移,其前部均压区与之配合的多层逆温结构 也出现了由北往南的推进.均压区内大气层结稳定, 垂直运动小,为污染物的累积提供了条件.而冷高压 移动过程中垂直方向上温度平流的差异,近地面的 辐射作用等造成了多层逆温的形成,并且配合上游 地区输送来的污染物.使得所选 6 个站点 PM_{2.5}浓度 在冷锋前呈现短暂上升趋势.

3 结论

3.1 2015年3月7~8日期间,500hPa平直的西风气 流控制着我国中东部地区,地面的均压场有利于污 染天气的发生和维持.8~10日,冷高压南下,重污染区

域始终位于冷高压前部均压场处,并随之移动.而在 这期间,6个观测站点均在不同时次均处于地面冷高 压前部,它们边界层内先后出现多层逆温,边界层内 风速较小,逆温层下相对湿度较大等相似特征.而多 层逆温形成的原因与夜间近地面冷却形成的辐射 逆温,冷锋移动过程中冷暖气团混合不均匀产生的 锋面逆温,以及下沉运动所形成的下沉逆温有关.

3.2 除北京站外,其余各站在冷锋来临前污染物会 有一定的累积,且风速较小,相对湿度较高.而当冷锋 过境时,由于上游地区污染物随冷空气输送的影 响,PM_{2.5}浓度会显著升高.当冷锋完全扫过各站, PM_{2.5}浓度迅速下降为良好等级.

3.3 本次大范围污染过程中,北京站在 PM_{2.5} 浓度 高值期间(7日02:00~8日11:00)近地面至950hPa 垂 直运动弱.随冷高压南移,郑州站 8日14:00~9日 08:00,武汉站在9日20:00~10日11:00PM_{2.5}浓度等 级先后达到重度污染,垂直速度同样很弱.配合多层 逆温有利于污染物的累积.并且整层大气比湿较高, 达到 2.7~4g/kg,当冷锋过境后,比湿迅速降低至 1g/kg 左右.

参考文献:

- Wu M, Wu D, Fan Q, et al. Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the Pearl River Delta in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013,13(21):10755-10766.
- [2] Li Z, Guo J, Ding A, et al. Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality [J]. National Science Review, 2017,6(4): 810-833.
- [3] Wang Q, Sun Y, Xu W, et al. Vertically resolved characteristics of air pollution during two severe winter haze episodes in urban Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017,18(4):1–28.
- [4] Chan C Y, Li Y S, Xu X D, et al. Characteristics of vertical profiles and sources of PM and carbonaceous species in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2005,39(28):5113–5124.
- [5] Xu Y W, Zhu B, Shi S S, et al. Two inversion layers and their impacts on PM_{2.5} concentration over the Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019,58(11): 2349–2362.
- [6] Zhang Y S, Zhang S D, Yi F. Intensive radiosonde observations of lower tropospheric 517 inversion layers over Yichang, China [J]. Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 2009,71(1):180–190.
- [7] Li Y, Yan J, Sui X. Tropospheric temperature inversion over central China [J]. Atmospheric Research, 2012,116(12):105–115.
- [8] Nodzu M I, Ogino S Y, Tachibana Y, et al. Climatological description of seasonal variations in lower-tropospheric temperature inversion

layers over the Indochina Peninsula [J]. Journal of Climate, 2006, 19(13):3307-3319.

- [9] Cao G, Giambelluca T W, Stevens D E, et al. Inversion variability in the Hawaiian trade wind regime [J]. Journal of Climate, 2007, 20(7):1145–1160.
- [10] Palmen, Erik H, Friherre. Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation [Z]. Science, 1969.
- [11] Abdul W, Sabah A. Analysis of thermal inversions in the Khareef Salalah region in the Sultanate of Oman [J]. Journal of Geophysical Research, 2003,108(9):4274-4281.
- [12] Johnson, Richard H, Thomas M. Rickenbach, S, et al. Trimodal characteristics of tropical convection [J]. Journal of Climate, 1999,12(8):2397–2418.
- [13] Ding A, Huang X, Coauthors, et al. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China [J]. Geophysical Research Letters, 2016,43:2873–2879.
- [14] Wallace J, Kanaroglou P. The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO₂) and fine particulate matter (PM_{2.5}) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) [J]. Science of the Total Environment, 2009,407(18):5085– 5095.
- [15] McGregor G R, Bamzelis D. Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution relationships, Birmingham, United Kingdom [J]. Theoretical and Applied Climatology, 1995,51(4): 223-236.
- [16] Ding G, Wang S F, Mao Q J, et al. Vertical structures of PM₁₀ and PM_{2.5} and their dynamical character in low atmosphere in Beijing urban areas [J]. Science in China Ser: D Earth Science, 2005,48(0z2): 38–54.
- [17] Miao Y C, Liu S H, Huang S X. Synoptic pattern and planetary boundary layer structure associated with aerosol pollution during winter in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 682:464-474.
- [18] Li J, Wang Z, Huang H, et al. Assessing the effects of trans-boundary aerosol transport between various city clusters on regional haze episodes in spring over East China [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorlogy, 2013,65(1):20052–20066.
- [19] Kang H Q, Zhu B, Gao J H, et al. Potential impacts of cold frontal passage on air quality over the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19:3673–3685.
- [20] Lin C Y, Wang Z, Chen W N, et al. Long-range transport of Asian dust and air pollutants to Taiwan: observed evidence and model simulation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007,7(5):423–434.
- [21] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法 [M]. 北京:气象出版 社, 2000:69-74.
- [22] Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. Principles and methods of Meteorology [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2000: 69-74.

作者简介: 张 晨(1994-),男,内蒙古自治区通辽市人,南京信息工程大 学硕士研究生,主要从事大气物理学与大气环境研究.