

Analysis of Meteorological Conditions for Heavy Pollution Events in Chengdu in the Early Winter of 2018

Yuzhang Tang, Dongbei Xu*, Yuqing Gou

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: 18382332459@163.com, *xdb@cuit.edu.cn

Received: July 4th, 2019; accepted: July 19th, 2019; published: July 26th, 2019

Abstract

From December 11 to 22, 2018, a heavy pollution process lasting for 12 days took place in Chengdu. Based on hourly environmental monitoring data from 7 sites in Chengdu, provided by Ministry of Ecological Environment of China, observation data of Wenjiang meteorological station in Chengdu, sounding data of Wenjiang station from University of Wyoming and $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NCEP/NCAR reanalysis data, pollution characteristics, meteorological pollution parameters, wind speed characteristics of 850 hPa and 925 hPa and atmospheric circulation background in this process were analyzed. The results showed that fine particulate matter was the primary pollutant in the heavy pollution process, and the pollution was more serious in the later stage than in the earlier stage. There were 3 key factors for pollution accumulation. First, the upper air of Sichuan basin maintained a straight westerly wind or was controlled by the northwest airflow in front of the ridge, resulting in weak vertical movement. Second, low-level warm advection reduced the bottom height of the inversion layer, which limited the height of the mixing layer and reduced the atmospheric environmental capacity. Third, atmosphere under 850 hPa horizontal wind speed was small. The horizontal wind speed on the isobaric surface of 850 hPa and 925 hPa was a good indication for pollutant accumulation and diffusion. There was a weak cold front during the pollution weather process, but it was too weak to change stable atmospheric junction completely. Therefore, the pollution weather process lasted a long time. The main reason for the end of the heavy pollution process was that the upper polar cold vortex guided the cold air southward and coordinated with the surface anticyclone to invade Chengdu from the western path, completely changing the stable atmospheric junction of the lower atmosphere.

Keywords

Heavy Pollution, Meteorological Conditions, Inversion Layer, Temperature Advection

2018年初冬成都市重污染事件气象条件分析

唐玉章, 许东蓓*, 苟玉清

*通讯作者。

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: 18382332459@163.com, *xdb@cuit.edu.cn

收稿日期: 2019年7月4日; 录用日期: 2019年7月19日; 发布日期: 2019年7月26日

摘要

2018年12月11日~22日, 成都地区发生了一次长达12天的重污染过程。本文利用中国生态环境部提供的成都市7个站点逐时环境监测资料、成都市温江气象站观测资料、怀俄明大学提供的温江站探空资料以及NOAA提供的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NCEP/NCAR再分析资料, 对此次重污染过程的污染特征、污染气象参数特征、850 hPa和925 hPa水平风速特征、大气环流背景进行了分析。结果表明, 细颗粒物是此次重污染过程的首要污染物, 污染过程后期较前期严重; 四川盆地高空维持平直西风或受脊前西北气流控制, 导致垂直运动弱、低空出现暖平流使逆温层底部高度降低, 因此限制了混合层高度, 使大气环境容量减小、850 hPa以下大气水平风速较小是污染物累积的三大关键因素; 850 hPa、925 hPa等压面上水平风速对污染物的累积和清除具有很好的指示意义; 此次重污染过程中15日有一次冷空气活动, 但是持续时间短, 并未改变静稳的大气层结, 因此, 重污染过程得以维持较长时间; 21~22日高空极地冷涡引导冷空气南下, 并配合地面冷高压从西方路径入侵成都, 彻底改变低空静稳大气层结, 是此次重污染过程结束的主要原因。

关键词

重污染, 气象条件, 逆温层, 温度平流

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

排进大气中的污染物质主要来源于人为排放和自然排放。随着城市化进程加快、工业化水平提高、城市人口以及汽车拥有量增加, 人类活动污染物排放总量日益增加, 是造成我国近些年来重污染事件频发的主要原因[1] [2] [3]。成都处于四川盆地的西部, 常年多雾, 年平均风速仅为 $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 出现静风的几率较大[4], 总体逆温频率较高, 且以贴地逆温为主[5]。因此, 易使污染物累积, 造成重污染事件, 对民众的生活质量和当地的经济带来不利影响。大气扩散理论研究和实验研究表明, 在不同气象条件下, 同一污染源排放所造成的地面污染物浓度可相差几十倍乃至上百倍, 这是由于大气对污染物的稀释扩散能力随着气象条件的不同而发生巨大变化的缘故[6]。在大气边界层高度较低、高压变性出海、偏东和偏南气流输送高湿度空气三种气象下, 气溶胶吸湿增长效应显著, 易导致严重灰霾天气[7]。胡亚旦等[8]通过分析中国大陆灰霾天气分布的时空分布特征证明, 在年际尺度上, 霾天气与风力条件具有很好的负相关性, 风力条件是大气污染物扩散的最主要动力源。一般来说, 污染物浓度与风速的平方成反比, 通常风速越大越有利于空中污染物质的稀释扩散。而长时间的小风(风速为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)或静风则会抑制污染物质的扩散, 使近地层的污染物质成倍的增加[9]。张琳娜等[10]研究发现水平扩散条件主要与冷暖平流密切相关, 当低空出现暖平流时, 水平扩散条件会转差; 当低空出现冷平流时, 水平扩散条件会变好。气温的垂直分布表征大气层结稳定度, 直接影响湍流活动的强弱, 支配空气污染物的散布, 而逆温层的

出现标志大气层结十分稳定,阻碍污染物向上扩散,往往使污染更严重[11]。可见,气象条件对大气污染程度有显著的影响,而天气现象与气象状况都是在一定的天气形势背景下产生的。因此,在污染源排放稳定的情况下,高低空的环流形势及配置在一定程度上对大气污染物扩散起决定性作用[12]。赵娜等[13]利用 2013~2016 年河北省 196 个环境观测资料和气象资料对河北易出现重污染的天气进行分型,使空气污染预报更为精准。

成都作为西南地区的经济文化中心,其地理位置的特殊性对西南地区经济发展具有重大意义。近些年成都市政府加大空气污染治理力度,控制人为污染源排放量,空气质量呈现逐年向好趋势。因此,在污染源排放量减少的情况下,气象条件对于城市重污染事件形成所起作用增大。2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日成都出现了一次历时 12 天的重污染过程,本文从气象条件方面入手对此次污染过程进行分析,加深对成都冬季污染特征的认识,为污染的预报及治理提供更多的科学依据。

2. 观测资料与处理方法

污染资料使用 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日成都市 7 个环境监测站(沙河铺、十里店、大石西路、三瓦窑、君平街、金泉两河、龙泉驿区政府)逐小时的污染监测数据,其监测要素有:SO₂、NO₂、CO、O₃、PM_{2.5}、PM₁₀浓度、AQI,首要污染物。气象观测资料包括温江站地面观测数据、NCEP/NCAR (2.5°×2.5°)再分析资料、怀俄明大学(美国)提供的 08 时、20 时(北京时)温江站探空资料。利用 2.5°×2.5° NCEP/NCAR 再分析资料分析本次重污染过程的环流形势特征;利用温江站探空资料研究了逆温层特征;利用地面观测数据并采用罗氏公式计算、分析了混合层高度及其与此次重污染过程的联系。混合层高度计算公式如下:

$$L = \frac{121}{6}(6-P)(T-T_d) + \frac{0.169(U_z + 0.257)}{12f \ln(z/z_0)}$$

式中: L (m)高度; P 为 Pasquill 大气稳定度级别; T (°C)为温度; T_d 为露点温度; U_z (m·s⁻¹)为 Z (m)高度处观测的平均风速; Z_0 (m)为地面粗糙度; f 为地转参数。

3. 污染特征分析

3.1. AQI 变化特征

图 1 为 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日,成都市日均 AQI、逐时 AQI 和平均 AQI 日变化。由图 1(a)可以看出,本次重污染过程从 2018 年 12 月 11 日开始至 2018 年 12 月 22 日结束,共持续 12 天。AQI 从 11 日开始持续上升,并在 13 日 12:00 达到峰值(116);13 日~15 日 AQI 稳定维持,但有小幅下滑,15 日后下滑幅度增大,并在 16 日达到此次污染过程的最低值(90),空气质量级别为良。在 17 日时 AQI 突破 100,达到轻度污染,此后 AQI 继续上升,在 20 日达到峰值(205),空气质量级别为重度污染;20 日 12:00 至 22 日 AQI 持续下降,重污染过程结束。通过以上分析并依据我国环境保护部发布的环境保护标准[14],可将污染过程可分为两个时期:11 日~16 日为重污染过程前期,该时期以轻度污染为主;17 日~22 日为重污染过程后期,此时期以中度污染和重度污染为主。

由图 1(b)可以看出本次重污染过程逐时 AQI 变化幅度大,并伴有 5 次急剧下降的特征。12 月 11 日 00 时至 13 日 12 时, AQI 处于起伏上升阶段,至 13 日 6 时之前,空气质量以良为主,个别时次达到空气质量达到优。13 日 6 时至 13 日 11 时空气质量下降,达到轻度污染。13 日 12 时至 15 日 12 时持续轻度污染,这一时段中 13 日 11 时至 13 日 20 时, AQI 稳定维持在 130 以上;13 日 21 时至 14 日 8 时 AQI 有小幅下降,此后至 15 日 10 时起伏较小,维持在 110。15 日 10 时至 15 日 19 时空气质量好转,达到为良。随后空气质量恶化,为轻度污染,并维持到 16 日 11 时,此后 AQI 下降幅度较大,在 16 日 18 时到

达最低值(57)。16日19时至19日6时这一时间段轻度污染和重度污染交替出现,16日19时AQI急剧上升,在17日11时达到峰值(174),随后又急剧下降在16时达到最低值(100),此后空气质量再度恶化,在21时达到中度污染,之后维持中度污染到19日6时。19日7时AQI持续上升,在11时突破200达到重度污染,此后重度污染与中度污染交替出现,但AQI均维持在190以上,到20日13时达到此次污染过程的最高值(246)。19日14时至21日15时AQI在波动中呈现明显的下降趋势,在15时达到最低值(118),在此阶段中度污染、重度污染、轻度污染三者交替出现。21日16时至19时AQI短时间内上升,此后发生断崖式下降,21时空气质量级别达到良,本次重污染过程结束。

由图1(c)可以看出,此次污染过程的平均AQI日变化中各个时段的平均值均达到110以上,且出现两个明显的波峰,和一个波谷。0:00~8:00AQI缓慢上升,8时以后AQI开始急剧上升,在11:00出现第一个波峰,这一时段为每日的AQI最高值,达到139;12时至16时AQI急剧下降,在17:00出现波谷,其对应的AQI为115;18:00~19:00AQI发生小幅上升,在19:00出现第二个波峰,此后污染物浓度维持在轻度污染水平。由此可见,在23:00到次日早上8点这段时间内污染物浓度基本维持稳定状态,08时后污染物浓度急剧上升在正午前达到一天中的最大值,午后空气质量明显好转,傍晚空气质量又有所恶化。结合逐时AQI和平均AQI日变化图的分析,发现08:00~11:00和12:00~16:00时是两个关键时间段,分别对应一天中污染物浓度的急剧。

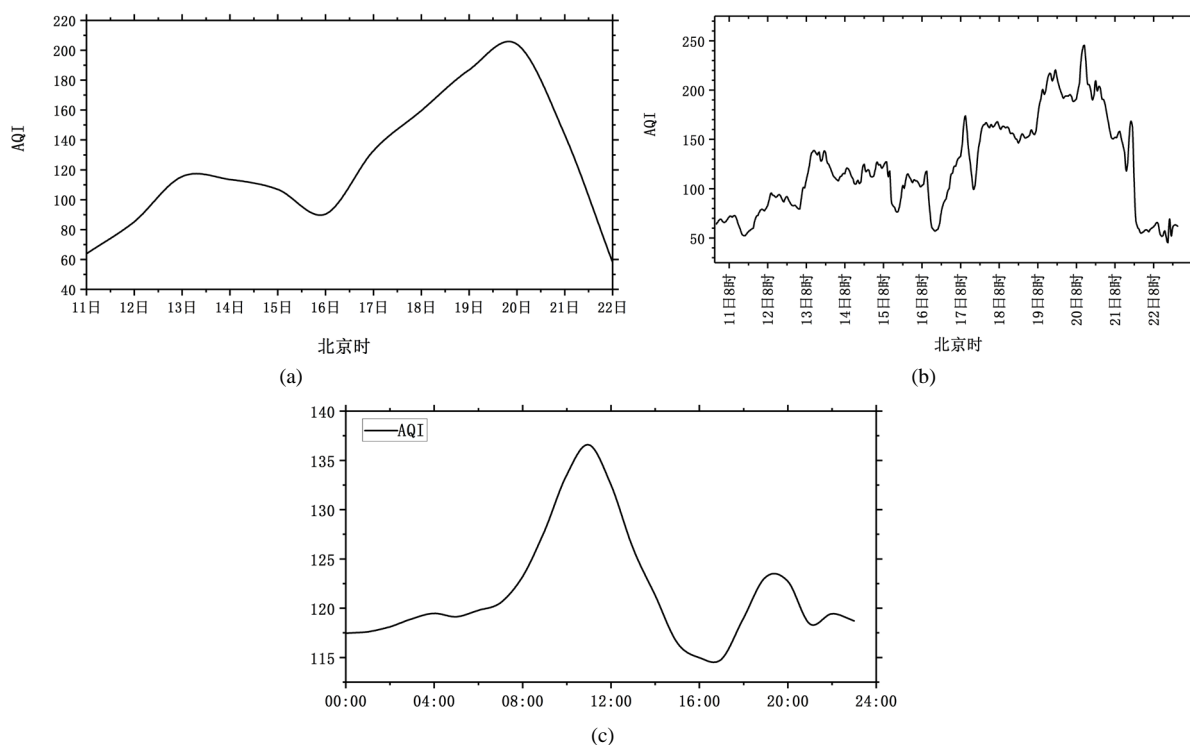


Figure 1. Daily AQI (a), hourly AQI (b) and daily variation of average AQI (c) in Chengdu of province from 11 December 2018 to 22 December 2018

图 1. 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日成都市日均 AQI (a)、逐时 AQI (b)和平均 AQI 日变化(c)

3.2. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 变化特征

据环境监测数据表明, $PM_{2.5}$ 是此次污染过程的首要污染物。图2为2018年12月11日至2018年12月22日,成都市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度逐时变化(a), $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比值的逐时变化图2(b)。从图2(a)可以看出, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的浓度变化趋势基本保持一致,结合AQI的逐时变化图来看,其变化趋势与AQI

逐时变化趋势也极为一致。从 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比值的逐时变化图来看, 在 16 日之前, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比值均在 0.5 以上, 说明在此时间段内细粒子对大气颗粒污染贡献更大。16 日到 17 日这一时间段内, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比值发生断崖式下降, 短时间内低于 0.5。16 日 20 时到 17 日 20 时, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比值上升明显。17 日 20 时到 21 日 08 时, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比值基本维持在 0.65 以上。在污染过程结束阶段, $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度比值波动中减小。通过图 2 的分析可知, 在本次污染过程中, 细粒子对大气颗粒污染贡献远超过粗粒子, 这与环境监测数据的结果较为符合。

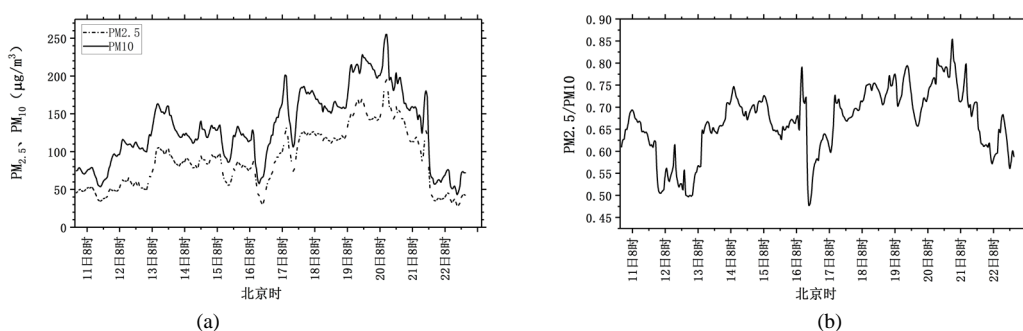


Figure 2. The hourly variation of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentration (a), ratio of $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} (b) in Chengdu of Sichuan province from 11 December 2018 to 22 December 2018

图 2. 2018 年 11 日 0:00 时至 2018 年 12 月 22 日 23 时成都市 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度(a)及其二者比值(b)的逐时变化

4. 污染事件天气形势特征

4.1. 大气环流背景分析

本次重污染事件与气象条件密切相关, 由大气环流背景及污染物浓度变化特征将本次过程细分为四个阶段, 图 3 为本次污染过程四个阶段的环流形势图, 第一阶段: 2018 年 12 月 11 日 08 时至 18 年 12 月 14 日 18 时, 此阶段主要污染物浓度开始上升, 并达到轻度污染; 第二阶段: 2018 年 12 月 14 日 20 时至 2018 年 12 月 16 日 20 时, 此阶段空气质量出现两次由中度污染转为优的情况; 第三阶段: 2018 年 16 日~20 日, 此阶段为空气污染加重阶段, 表现为中度污染和重度污染的交替出现; 第四阶段: 2018 年 12 月 21 日至 2018 年 22 日, 此阶段污染物浓度持续下降, 空气质量迅速转为优。以下针对这四个阶段分别进行讨论。

第一阶段, 12 月 11 日前受冷空气影响, 空气质量良好。12 月 11 日后, 500 hPa 上, 四川盆地上空环流保持持续的平直西风; 850 hPa 温度场上始终为一暖脊, 且有暖平流向四川盆地输送; 海平面气压场上, 冷高压持续减弱, 成都位于地面冷高压前部的均压场中, 等压线稀疏, 气压梯度小, 风速很小, 属于小风状态, 有利于大气静稳层结的形成和维持, 污染物浓度持续上升, 空气质量转坏。第二阶段中, 500 hPa 上, 位于贝加尔湖北部的冷涡从西北—东南方向移动, 低压槽由 75°N 延伸至 30°N, 四川盆地处于低压槽底部。与此同时, 位于里海西侧的切断低涡向东移动, 在我国新疆北部形成一弱脊, 共同引导高纬冷空气南下, 四川盆地上空有较强的冷平流。850 hPa 上, 四川盆地有冷平流输送, 温度脊减弱。海平面上, 我国青藏高原地区的冷高压加强, 并沿西方路径南下, 弱冷空气随后入侵到四川盆地内, 地面风速短时内加大, 有利于污染物的水平扩散, 污染物浓度在短时内下降, 空气质量由轻度污染转优。第三阶段中, 17 日至 18 日 500 hPa 上, 高空冷涡继续向东南方向移动, 低压槽也随之移动到 125°E 附近, 四川盆地上空受槽后西北气流控制。19 日高空冷涡一分为二, 主体部分西退至贝加尔湖西北部, 其底部为平直西风带, 低压槽随较弱的冷涡入海并逐渐减弱。19 日至 20 日, 四川盆地上空转为平直西风控制。在此阶段内, 850 hPa 上始终有暖平流向四川盆地内部输送, 盆地南部的温度脊重新建立。海平面气压场上, 地面高压强度也逐渐减弱, 四川盆地处于地面冷高压前部的均压场中。这样的高低空环流配置有利

于污染物的逐步累积, 在 20 日 19 时主要污染浓度达到此次污染过程的峰值。第四阶段, 21 日 08 时 500 hPa 上, 高空冷涡中横槽开始转竖, 20 时低压槽底部南压至四川盆地, 冷空气迅速南下, 等温线密集, 温度槽向低纬南压。21 日 850 hPa 上冷锋锋区位于我国新疆地区, 22 日锋区南压至四川盆地北部。海平面气压场上冷高压迅速增强, 其中心气压值达到 1052 hPa, 并沿西北—东南方向向南移动控制成都地区。低层冷空气沿西方路径入侵, 受冷空影响, 850 hPa、925 hPa 等压面上水平风速加大, 彻底改变静稳大气层结, 污染物浓度迅速降低, 空气质量达到优。至此, 历时 12 天的重污染过程结束。

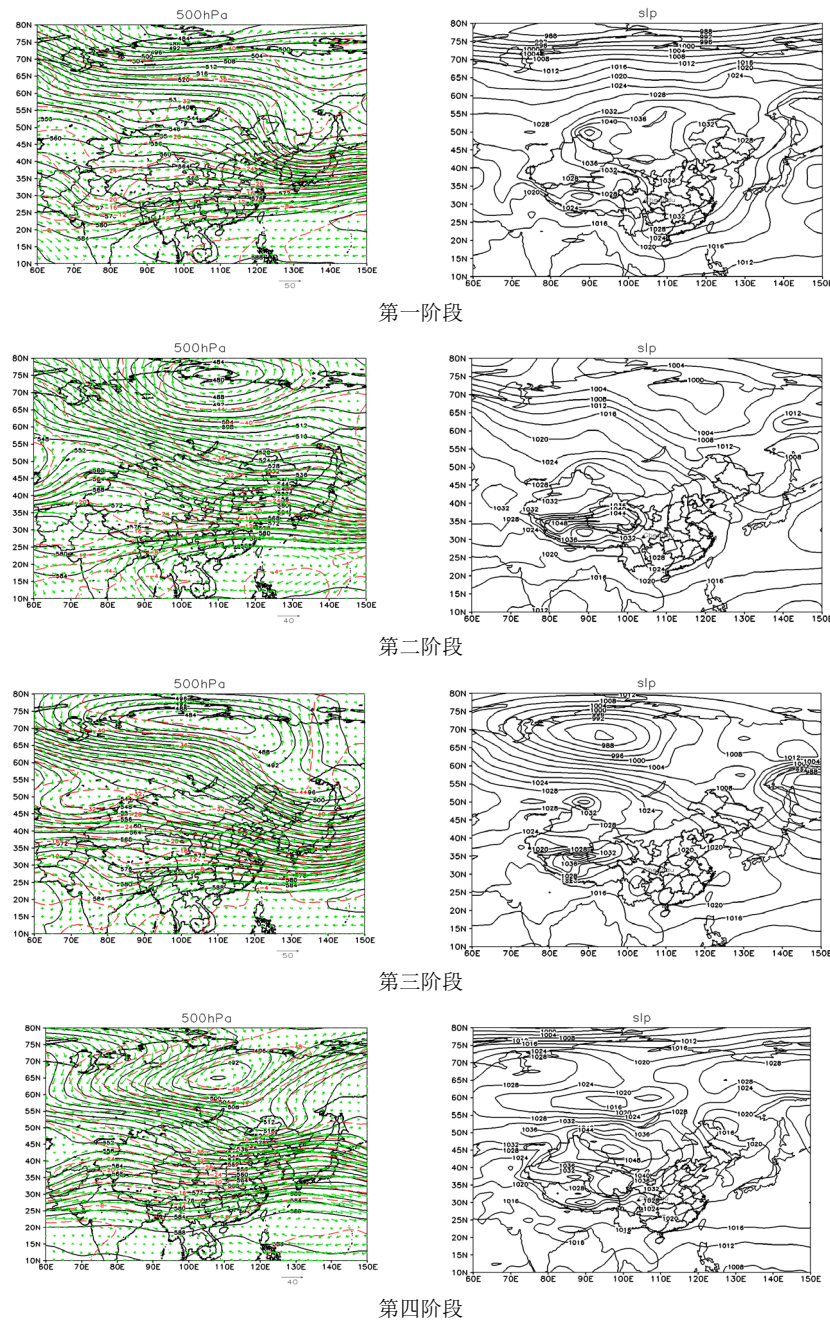


Figure 3. Synoptic chart of 500 hPa and sea level pressure field (hPa) of 4 stages of heavy pollution process from 11 December 2018 to 22 December 2018 in Chengdu

图 3. 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日成都市重污染过程 4 个阶段 500 hPa 天气图和海平面气压场(hPa)

通过以上对大气环流背景的分析可知,在这次历时 12 天的重污染过程中,受高空冷涡南下影响,并配合地面高压加强南下,共有两次冷空气影响成都地区,第一次由于高空冷涡位置偏东,成都地区受冷空气影响较小,致使污染物浓度下降后又迅速上升是本次重污染过程历时较长的原因。除此之外,在 19 日 500 hPa 上,四川盆地上空西侧有短波槽活动,成都位于短波槽槽后;850 hPa 上,盆地内风场有气旋式辐合;海平面气压场上,成都西侧高原上为反气旋控制,南部有一气旋。因此,成都正好处在弱的辐合场中。该日,成都地区 24 小时累计降水 2.3 mm,由于降水量偏小,且地面没有冷空气补充,降水过程并没有起到清洁污染物的作用,相反,由于成都上空湿层深厚,造成污染物浓度升高。此次重污染过程中在空气质量恶化加重和污染维持阶段,对应的大气环流为,在 500 hPa 上,四川盆地维持平直西风或受脊前西北气流控制,垂直上升运动较弱;850 hPa 上有温度脊存在,同时有暖平流向盆地内输送;地面图上,成都位于高压前部的均压场中,水平气压梯度力小,出现小风甚至静风。

4.2. 污染气象参数特征

大气环流在一段时间内维持相对稳定,是污染物累积的重要基础,而稳定的大气层结能够抑制对流运动,阻碍空气污染物向高空传输,为空气污染的持续、加重创造了极为有利的条件。混合层高度能够表征污染物在铅直方向上被对流与湍流运动输送所能达到的最大高度。因此,它反映了对污染物垂直扩散的能力,是影响空气污染物的重要气象因子之一[15]。以下,本文将分别论述此次重污染过程的混合层高度特征及逆温层特征。

4.2.1. 混合层高度特征

在空气污染气象学中,计算混合层高度有干绝热作图法、罗氏计算等方法[16]。本文利用温江气象站观测资料,采用罗氏计算方法计算此次成都地区重污染过程中每日 08 时、11 时、14 时、17 时、20 时的混合层高度,并求其平均值代表白天混合层的平均高度。

从图 4 可以看出,12 日至 14 日,成都市的混合层高度由 565 m 下降到 216 m,AQI 由 90 上升至 131;14 日至 16 日混合层高呈现上升趋势,由 216 m 上升到 549 m,AQI 下降到最低点 80;17 日至 19 日混合层高度逐渐下降,空气质量随之恶化,达到重污染级别;22 日混合层高度跃升至本次过程的最大值 690 m,AQI 下降至最低值 57,污染过程结束。在整个重污染过程中,前期混合层的整体高度相对较高,平均高度达到 459 m,对应的污染程度较轻;后期混合层高度相对较低,平均高度仅为 357.5 m,对应的污染程度也较重。混合层高度越高时,大气的的环境容量也相对较大,污染程度也较轻;当混合层高度下降时,大气的的环境容量也随之下降,污染程度加重。AQI 与混合层高度之间呈现明显的负相关性,其相关系数达到-0.644。

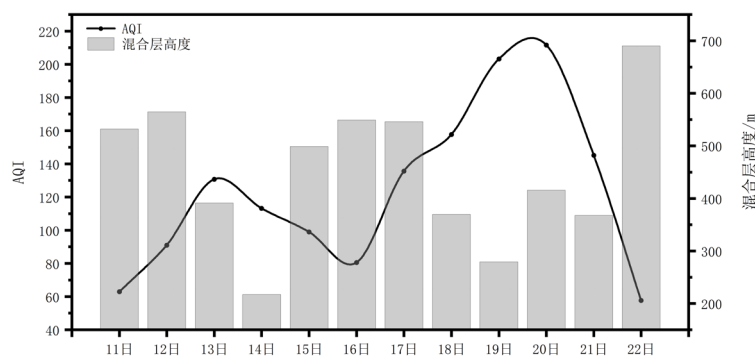


Figure 4. Average mixing layer height and average daily AQI during the day
图 4. 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日白天混合层平均高度和日平均 AQI

从表 1 可以看出, 污染物监测要素中只有 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 与混合层高度具有明显的负相关性, 相关系数分别达到 -0.642 和 -0.660 , 并且通过 0.05 显著性检验。结合图 4 及表 1 分析可知, 低的混合层高度使大气环境容量减小, 抑制了污染物在垂直向上的扩散, 造成 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度累积。据环境监测数据表明, $\text{PM}_{2.5}$ 是此次重污染过程的首要污染物质, 这也在一定程度上解释了细颗粒物是此次污染过程的首要污染物质。值得注意的是, 臭氧在本次污染过程中与混合层高度呈现明显的正相关性。因此, 即使是在空气质量较好的情况下, 臭氧的含量也有可能超标, 同样也会对人造成危害。所以, 相关部门应该加强对于臭氧污染的治理。

Table 1. Correlation coefficient between mixing layer height with various pollution monitoring elements area from 11 December 2018 to 22 December 2018 in Chengdu

表 1. 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日成都地区混合层高度与各污染监测要素的相关系数

相关系数	污染监测要素						
	AQI	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	O_3	CO	NO_2	SO_2
R	-0.644^*	-0.642^*	-0.660^*	0.635^*	-0.387	-0.463	-0.054

注: *表示相关系数通过 0.05 显著性检验。

4.2.2. 逆温层特征

逆温层的出现标志大气层结十分稳定, 阻碍污染物垂直扩散, 往往使污染更加严重。本文利用怀俄明大学提供的温江站 08 时和 20 时两个时次的探空资料, 对此次重污染过程中低层大气出现的逆温进行分析讨论。研究发现, 本次重污染过程中, 低层大气共存在两种类型的逆温层, 一种是接地逆温, 另一种是距离地面高度在 1000 m~3000 m 的脱地逆温。脱地逆温在整个重污染过程中始终存在, 而接地逆温出现的频率为 67%。在重污染过程前期, 接地逆温与脱地逆温同时出现的频率高达 90%, 而在重污染过程后期二者同时出现的频率仅为 30%。接地逆温的厚度普遍较小, 只在 12 日 08 时和 17 日 08 时其厚度超过 100 m, 其逆温层厚度分别为 147 m、313 m, 其余时段内接地逆温层厚度均在 100 m 以下, 其中最小的接地逆温层厚度仅为 18 m。

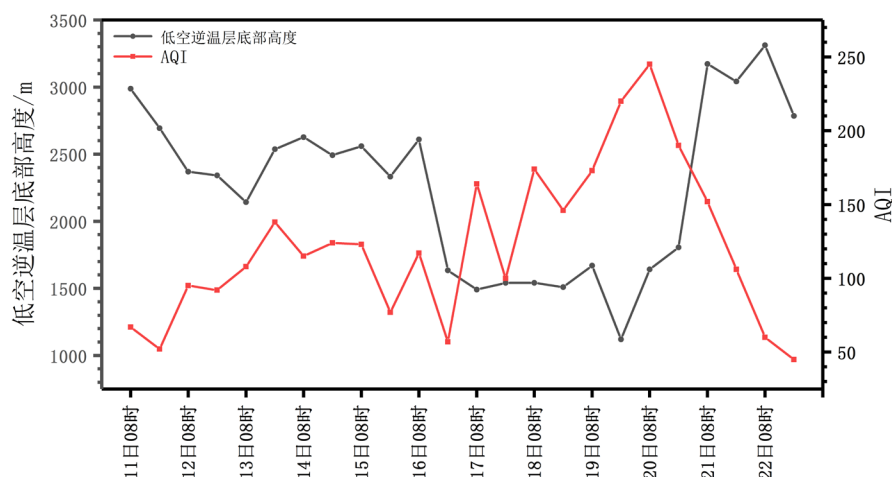


Figure 5. The bottom height of inversion layer and AQI at 08:00 and 20:00 from 11 December 2018 to 22 December 2018 in Chengdu

图 5. 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日成都市 08 时、20 时脱地逆温层底高度及 AQI 变化图

在此次重污染过程中, 呈现出前期接地逆温与脱地逆温同时出现的频率远比后期高, 但污染实况却

是前期污染程度较后期污染程度轻的特点。因此,本文从这一特征出发,研究了脱地逆温层底部高度与AQI之间的关系,二者之间的关系如图5所示。从图5可以看出,11日08时至13日08时,脱地逆温层底部高度由2988 m下降至2563 m,而AQI由52上升138;13日20时至15日16日08时脱地逆温层底部高度在2500 m上下波动,而AQI也在100上下起伏;16日20时至20日20时脱地逆温层底部高度在2000 m左右浮动,在此期间AQI不断攀升,在19日20时,脱地逆温层底部高度跌至2000 m, AQI随之达到峰值;此后,脱地逆温层底部高度攀升至3000 m以上,而AQI急剧下降,空气质量好转,重污染过程结束。AQI与脱地逆温层底部高度具有十分明显的负相关性,二者的相关系数为-0.6。结合图4可以看出,12日至16日期间,脱地逆温层底部高度在2500 m上下浮动,而17日至21日脱地逆温层底部大致位于大气边界层顶部。因此,位于大气边界层以上的脱地逆温不仅会限制混合层的高度,并且其底部越低对混合层的影响越大。脱地逆温层通过限制混合层的高度,来影响污染物在垂直方向上散布空间的大小。当脱地逆温层底部高度越低时,污染物向上扩散的空间就越小,空气污染就越严重;当脱地逆温层底部高度越高时,污染物向上扩散的空间增大,空气污染程度就越小。因此,脱地逆温层底部高度是影响污染物浓度变化的重要因素之一,这与杜荣光等[17]研究发现污染物浓度与逆温层底部高度呈负相关的结论一致。

综上可知,脱地逆温层底部高度限制了混合层高度,使大气环境容量减小,有利于污染物浓度累积。因此,虽然污染过程前期接地逆温和脱地逆温同时出现的频率较高,但是由于脱地逆温层底部高度相较于污染过程后期高,造成的空气污染程度并没有后期严重。因此,脱地逆温层底部高度是影响此次污染过程的重要污染气象因子。

4.3. 影响污染物扩散的气象条件

4.3.1. 水平风

风是污染物在水平方向上扩散的最直接动力,污染物浓度与风的大小具有明显的负相关性[18]。成都地区的平均海拔在540 m,而850 hPa、925 hPa等压面距海平面的高度分别在1500 m和850 m左右,并且在地面上成都地区多出现小风、静风状态,甚至在污染物快速扩散阶段最大平均风速也不超过 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此,本文选取850 hPa和925 hPa两等压面上的水平风速来分析此次重污染过程中水平风对污染物扩散所起的作用。

图6中黑色实线表示850 hPa等压面上水平风速变化趋势;蓝色实线表示925 hPa等压面上水平风速变化趋势;红色实线代表AQI的变化趋势。从图6可以看出,AQI与风速具有明显的正相关性,这是因为污染物浓度对风速的反应具有滞后效应,即当水平风速增大(减小)时,污染物的浓度并不能立即做出反应,而是在一段时间后污染物的浓度才下降(升高)。在11日08时至12日08时,850 hPa风速由 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此后一直到14日20时,850 hPa和925 hPa等压面上风速均维持静风状态,不利于污染物的扩散,因此在此期间污染物的浓度不断升高。15日至17日,在此期间风速有三次增大、减小的过程,分别对应污染物浓度有三次下降、上升过程。其中在15至16日有两次风速增大过程使空气质量好转,并达到良。18日20时风速减小到 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此后维持到20日20时,污染物浓度不断攀升,并在20日20时左右达到峰值。20日20时至22日20时,850 hPa和925 hPa水平风速增大,850 hPa上最大风速达到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,925 hPa上风速始终维持在 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在此期间,由于两等压面上水平风速长时间维持在较大值,风力在水平方向上对污染物的输送明显,污染物浓度不断下降,空气质量好转,至此重污染过程结束。

通过以上分析可知,当水平风速增大时,污染物浓度随后会下降;当水平风速减小时,随后污染物的浓度会升高。虽然短时间内水平风速的增大能够在一定程度上减轻污染,但是污染物浓度随后又会发生反弹,并不能彻底使空气质量好转。因此,850 hPa、925 hPa等压面上水平风速对污染物的累积和清洁效果较为显著。

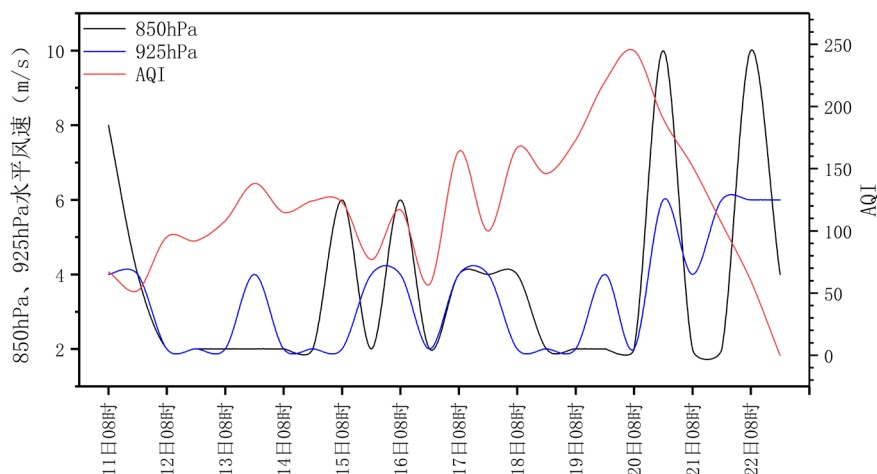


Figure 6. The horizontal wind speed of 850hPa and 925hPa and AQI at 08:00 and 20:00 from 11 December 2018 to 22 December 2018 in Chengdu

图 6. 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日成都市 850 hPa、925 hPa 等压面上 08 时、20 时水平风速及 AQI 变化图

4.3.2. 温度平流

大尺度环流是大气污染物累积的气象背景条件，而低层大气的层结稳定度同样是污染物累积的重要因素。稳定的大气层结条件使污染物不易向上扩散，造成污染物浓度增大，但是当低空存在一定的冷平流时会打破稳定的大气层结，从而有利于污染物在垂直方向扩散。

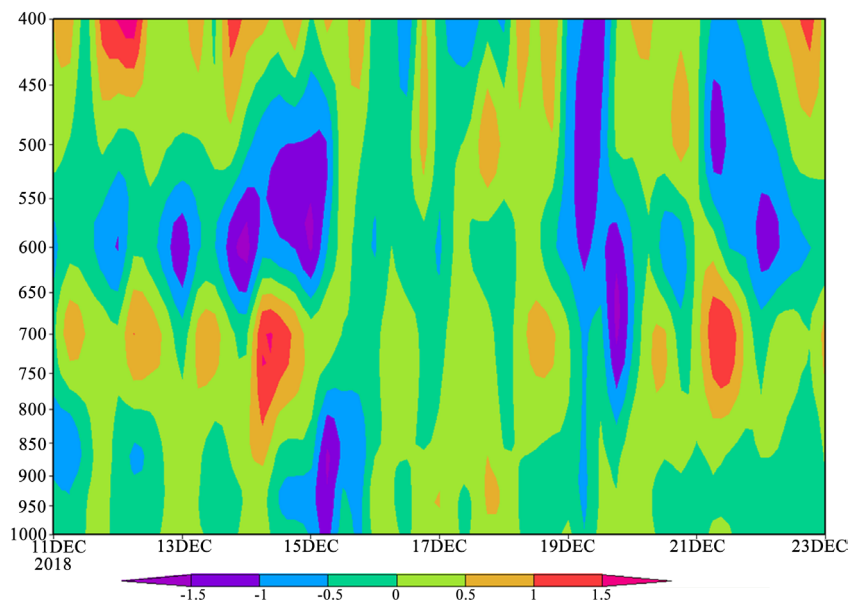


Figure 7. Average temperature advection in Chengdu area from 11 December 2018 to 22 December 2018

图 7. 2018 年 12 月 11 日至 2018 年 12 月 22 日成都地区平均温度平流 单位($10^{-4} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$)

本文利用每日 4 次的 NCEP ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$)再分析资料，通过计算成都区域的温度平流平均值随时间变化(图 7)，来研究此次重污染过程低空温度平流与空气质量的关系。从图 7 可以看出，11 日至 13 日近地面冷平流在减弱，且冷平流与暖平流交替出现，脱地逆温层底部高度下降，在 13 日 08 时降至最低值 2100 m，AQI 由 50 上升至 150；14 日 20 时至 16 日 08 日，受高空极涡后部偏北气流引导冷空气南下导致地

面高压加强影响,成都地区低空出现较强的接地逆温。在此期间脱地逆温层底部高度升高,并维持在 2600 m 左右,AQI 呈现下降趋势,其中分别在 15 日 17 时、16 日 08 时空气质量好转,空气质量级别达到良。虽然低层较强的冷平流在一定程度上改变了逆温层,脱地逆温层底升高,进而使混合层高度上升,扩大了大气环境容量并导致污染物浓度下降,但是 15 日 08 时后高空并没有强冷平流进行补充,冷平流持续短,低空迅速变暖,污染物浓度又迅速反弹。17 日至 18 日成都地区高空受偏西或西北气流控制,低空以暖平流为主,脱地逆温层底部高度降低,期间均维持在 1600 m,AQI 也持续上升。19 日成都受高空短波槽影响,受高空冷平流影响,08 时有接地逆温出现,脱地逆温层底部高度出现小幅上升,但 20 时低空转为暖平流,脱地逆温层底部高度又下降至 1100 m,在此期间 AQI 并未出现大幅下降的情况,反而有所上升。这说明,如果仅受高空系统的影响,而没有地面系统相配合,对污染物清洁作用较弱。21 日至 22 日,受高空极涡逆时针旋转,引导冷空气南下,并配合地面高压系统冷空气从西方路径入侵我国影响,成都高、低空均有冷平流出现,脱地逆温层底部高度迅速上升至 3200 m 以上的高度,同时配合 850 hPa 等压面高度以下风速增大,污染物浓度迅速下降,重污染过程结束。

5. 结论与讨论

通过对 2018 年 12 月 11 日~22 日成都市历时 12 天的重污染过程进行分析,得到以下结论:

1) 此次重污染过程共历时 12 天,其中轻度污染天数 4 天、中度污染 3 天、重度污染 2 天,前期以轻度污染为主,后期以中度、重度污染为主。整个重污染过程呈现“空气质量恶化-减轻并短时转好-持续恶化-达到峰值-迅速转好”的特点。细颗粒物是此次污染过程的首要污染物。

2) 在本次重污染过程中污染物持续累积阶段大气环流背景较为相似:500 hPa 上,四川盆地维持平直西风或受脊前西北气流控制,垂直上升运动较弱;由于青藏高原的阻挡,西风气流从高原南北两侧绕过,700 hPa 上从南侧绕过的西风气流进入四川盆地,因此盆地内暖平流输送明显,这是成都地区脱地逆温层得以稳定维持的主要原因;850 hPa 以下水平风速较小;地面图上,成都位于高压前部的均压场中,水平气压梯度力小,经常出现小风、静风,甚至在污染扩散阶段最大平均风速也不超过 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3) 低空温度平流能够改变脱地逆温层底高度。当低空出现冷平流时,脱地逆温层底部高度会升高;当出现暖平流时,脱地逆温层底部高度会降低。而脱地逆温层底部高度在一定程度上限制了混合层的高度,使前期脱地逆温层底部高度明显高于后期,造成前期整体混合层高度大于后期。而较低的混合层高度,会抑制污染物垂直输送,致使污染物累积。因此,前期大气环境容量大于后期,有利于污染物在垂直方向上扩散。这是前期空气污染程度明显小于后期的原因之一。

4) 850 hPa、925 hPa 等压面上水平风速对污染物的累积和清洁效果较为显著。当两等压面上水平风速大于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,AQI 会减小;当两等压面水平风速均在 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,污染物便会累积,并且二者之间的对应关系相当好,风力条件对于污染物的清洁效果明显。因此,850 hPa、925 hPa 等压面上水平风速对污染物的累积和清除具有很好的指示意义。

5) 过程中 15 日极涡引导冷空气南下,但由于极涡位置偏东,致使影响成都地区的冷空气较弱,且持续时间短,空气质量只在 15 日 17 时和 16 日 08 时短时间内发生好转,并没有起到彻底清洁大气的作用,造成污染过程历时较长。而造成本次重污染过程结束的主要原因是,极地地区高空冷涡引导冷空气迅速南下,配合地面强冷高压沿西方路径入侵我国,同时,850 hPa 上锋区南压至四川盆地北部,导致 850 hPa 及 925 hPa 等压面上水平风速增大,彻底改变稳定的大气层结状态。分析本次个例发现,若只有单一的高空系统如高空短波槽,而没有低空及地面系统配合,且没有较大降水发生时,并不能对大气起到清洁作用,反而会因湿层变得深厚而使污染加重。

参考文献

- [1] 过宇飞, 刘端阳, 周彬, 等. 无锡市霾天气特征及影响因子研究[J]. 气象, 2013, 39(10): 1314-1324.
- [2] 陈丽芳. 杭州市灰霾气候特征及与清洁过程的对比分析[J]. 科技通报, 2012, 28(7): 31-35.
- [3] 吴兑, 廖国莲, 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.
- [4] 颜玉倩, 朱克云, 张杰, 等. 成都地区春季一次持续性灰霾天气过程特征及预测[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(1): 33-39.
- [5] 周书华, 倪长健, 刘培川. 成都地区大气边界层逆温特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(2): 108-111.
- [6] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等. 空气污染气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [7] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005, 31(4): 3-7.
- [8] 胡亚旦, 周自江. 中国霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 73-78.
- [9] 唐敬, 蔡旭晖, 康凌, 等. 复杂地形低风速气象特征分析[J]. 气象科学, 2011, 31(4): 542-547.
- [10] 张琳娜, 郭锐. 2012年冬季北京三种高影响天气的关联与成因分析[J]. 气象, 2014, 40(5): 598-604.
- [11] 李培荣, 向卫国. 四川盆地逆温层特征对空气污染的影响[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(2): 220-226.
- [12] 王珊, 廖婷婷, 王莉莉, 等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3452-3462.
- [13] 赵娜, 马翠平, 李洋, 等. 河北重度污染天气分型及其气象条件特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 839-846.
- [14] 王艳琴. 环境保护部发布 HJ633-2012《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》[J]. 中国标准导报, 2012(4): 49.
- [15] 廖碧婷, 黄俊, 王春林, 等. 广州地区灰霾过程和清洁过程的边界层特征对比分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 34-45.
- [16] 但尚铭. Pasquill 大气稳定度查算图及其制作方法[J]. 环境科学, 1988, 42(2): 78-80.
- [17] 杜荣光, 齐冰, 郭惠惠, 等. 杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 49-53.
- [18] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org