

文章编号: 2096-1618(2024)05-0644-05

2021–2022 年冬季成都地区一次持续性 $PM_{2.5}$ 污染过程分析

赵欢¹, 许晨¹, 朱心悦¹, 张松宇^{2,3}, 康平^{2,3}

(1 成都市气象局, 四川 成都 610000; 2 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都, 610225; 3 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:为更好地研究近年来盆地 $PM_{2.5}$ 污染的变化规律, 通过分析 2021–2022 年冬季成都地区一次细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 污染的变化特征与气象条件关系得出, 本次污染过程具有持续时间长 (持续 21 d), 前期日变化不明显, 后期污染较前期严重的特点。由于污染过程期间, 较强的晴空辐射创造了有利的逆温条件, 大气混合层高度较低, 垂直方向上的通风能力较弱, 使大气稳定不利于污染扩散, 同时垂直和水平风场对污染物的输送能力都较弱, 使 $PM_{2.5}$ 逐步积累。进一步依托风廓线雷达观测数据计算局地回流指数 (R), 发现污染过程后期成都各地区 R 值逐步增大, 水平输送能力逐步增强, 前期东南部较好, 后期西部较好。

关键词: $PM_{2.5}$ 污染; 混合层高度; 风场输送; 局地回流指数

中图分类号: X513

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.05.018

0 引言

细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 是指空气动力学直径小于或等于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物, 也称为可入肺颗粒物, 是大气环境中化学组成最复杂、危害最大的污染物之一。随着社会和经济的发展, 环境问题越来越引发人们的重视, $PM_{2.5}$ 污染也引起广泛关注。研究表明, $PM_{2.5}$ 浓度与人为活动、污染源的排放和气象条件息息相关, 发生灰霾天气时, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度明显增加^[1], 而 $PM_{2.5}$ 是造成霾阶段水平能见度下降的主要因素^[2]。

中国的霾天气主要分布在 100°E 以东, 42°N 以南地区, “浊岛”现象非常明显, 且霾天气的季节分布基本为冬多夏少^[3]。研究发现, 天气静稳、静风和高湿的大气环境是导致持续性霾天气的天气学原因^[4–6]。四川盆地是中国霾污染较严重的地区^[7], 冬季霾日最多, 长期的近地面静风和稳定的大气层结是盆地严重霾天气形成和持续的原因^[8–9]。 $PM_{2.5}$ 高浓度区域则主要位于盆地西北部和南部地区, 呈现明显的“冬高夏低”季节性变化^[10–11]。

每年冬季, 四川盆地都会遭遇 $PM_{2.5}$ 污染问题。当前, 研究 $PM_{2.5}$ 污染过程的学者较多^[12–15], 但针对近年来盆地 $PM_{2.5}$ 污染个例的研究较少, 本文将分析 2021–2022 年冬季成都地区一次持续性 $PM_{2.5}$ 污染过程中气象条件与污染物的变化特征, 以期发现 $PM_{2.5}$ 污染的变化规律, 便于日后业务预报中重点关注气象条件的影响, 加强研判空气污染形势, 为冬季大气污染防治提供更专业性决策意见。

1 资料和方法

污染数据:成都地区 5 个环境监测站点 (图 1) 平均的逐时污染物 ($PM_{2.5}$) 数据, 来自全国城市空气质量实时发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>), 数据起止时间为 2021 年 12 月 31 日–2022 年 1 月 23 日。

气象观测数据:2021 年 12 月 31 日–2022 年 1 月 20 日成都温江站逐日平均气象观测资料, 以及温江、天府、彭州、龙泉和金堂的逐小时风廓线雷达资料 (图 1)。

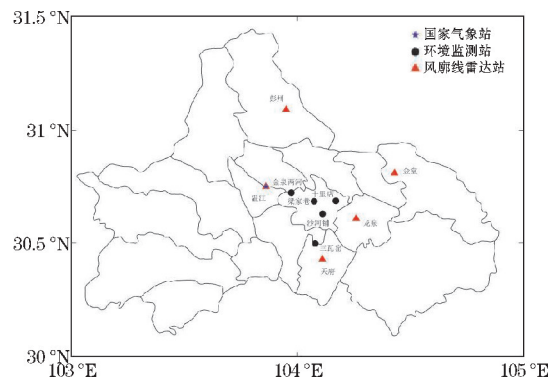


图1 污染数据和气象观测数据的站点分布

1.1 混合层高度

影响大气污染物扩散的重要因子是湍流强弱和混合层高度^[16]。当大气中性或不稳定时, 由于动力或热力湍流作用, 边界层上下层之间产生强烈的动量或热量交换, 通常把出现这一现象的层称为混合层。大气混合层高度是影响污染物在垂直方向扩散的重要因素, 体现了通风能力大小和污染物在垂直方向上被稀释的范围^[17]。混合层高度越小, 垂直方向上的通风能力越弱, 大气对污染物的稀释扩散能力越弱, 污染物浓

度越大。

利用罗氏法计算混合层高度。罗氏法是 Nozaki^[18]提出的一种用地面气象资料估算混合层厚度的方法。该方法计算公式:

$$h = \frac{121}{6}(6-P)(T-T_d) + \frac{0.169P(u_z+0.257)}{12f\ln(z/z_0)} \quad (1)$$

式中 h 为混和层高度(m), P 为 Pasquill 稳定度级别(大气稳定度级别为 A 至 F 时, P 值依次为 1~6), T 为地面气温(K), T_d 为露点温度(K), z 为离地面高度(m), u_z 为离地面 z 高度的平均风速(m/s), z_0 为地表粗糙度(m), f 为科氏力参数($f=2\Omega\sin\psi$, $\Omega=7.292\times 10^{-5}$ 弧度/秒, ψ 为地理纬度)。

1.2 水平和垂直风场

风场是影响污染物扩散的重要气象因子之一,而风廓线雷达探测风场具有实时性特点,能快速发现风向的变化,进而判断污染物的扩散方向和传输路径^[19-20],因此利用风廓线雷达逐小时平均数据(OOBS)中水平风向、水平风速和垂直速度分析污染过程期间水平和垂直风场的输送能力。

1.3 局地回流指数

局地回流表示在风场的作用下,某段平均时间 ΔT 内污染物被输送出去之后又被输送回来的现象,一般 ΔT 取24 h。局地回流指数(R)是风的矢量累积距离与标量累积距离之比,可描述大气的通风能力^[21]。利用地面风场及风廓线数据资料,不同高度的局地回流指数 R 计算方式为

$$R = \frac{\sqrt{(\Delta T \sum_{k_s}^{k_e} u_k)^2 + (\Delta T \sum_{k_s}^{k_e} v_k)^2}}{\Delta T \sum_{k_s}^{k_e} \sqrt{u_k^2 + v_k^2}} \quad (2)$$

式中, k_s 为起始时刻; k_e 为终止时刻; ΔT 为平均时间间隔; u_k 为南北风;计算得到的 R 是一个无量纲量。 R 取值为0~1, R 指数越大,接近1时表明风场可以进行有效输送;而 R 指数越小,表明局地回流越强,可能存在污染物被输送出去后又 被风场输送回来的情况,污染物不能被有效的输送扩散,而容易在本地滞留累积^[22]。由于污染物排放与人类生产生活密切相关,主要集中在大气边界层中,因而本研究主要选择2 km以下风廓线数据进行研究。

2 污染过程分析

2.1 污染过程概况

根据环境空气质量标准(GB3095-2012),当PM_{2.5}日平均浓度大于75 μg/m³时为PM_{2.5}污染日。

2021年12月31日-2022年1月20日(共21 d),成都地区发生了一次持续性细颗粒物(PM_{2.5})污染事件,图2为此期间成都地区PM_{2.5}逐小时浓度与日平均浓度随时间的变化趋势。

由图2可见,成都地区PM_{2.5}污染状况在2021年12月31日-2022年1月17日较为平稳,处于75~125 μg/m³,18日开始PM_{2.5}浓度迎来一次爆发性增长,20日达到日均浓度峰值153 μg/m³后快速回落,21日低于75 μg/m³限值,之后稳定维持,代表本次污染过程结束。

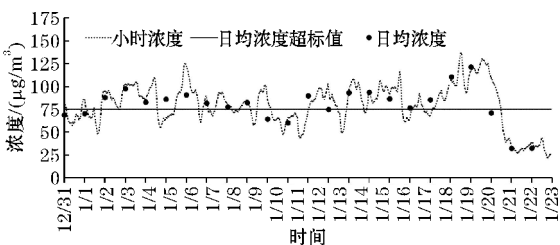


图2 2021年12月31日-2022年1月23日成都地区PM_{2.5}逐小时浓度和日均浓度随时间的变化趋势

图2中,PM_{2.5}逐小时浓度一天之中变化不规律,因此PM_{2.5}浓度日变化不明显。在18-20日的爆发性增长阶段,PM_{2.5}小时浓度从18日00时逐渐升高,19日下午达到峰值后快速回落又波动上升,20日上午再次达到峰值后又迅速下降,之后稳定维持在污染限值以下。

由此可见,本次PM_{2.5}污染过程具有持续时间长,日变化不明显,后期污染较前期严重的特点。

2.2 污染过程的地面气象要素和天气形势分析

由于大气污染与气象条件密切相关,不利的气象条件会加重大气污染程度,气温、相对湿度、风和降水等气象条件对大气环境污染的影响主要体现在对污染物的稀释、扩散和清除作用^[23-25]。

以温江站代表成都地区,从本次污染过程中的各类气象要素变化(图3)可见,平均气温和平均相对湿度呈现较明显的反相位关系,日均气温为高值相对湿度为低值,而过程期间日最高气温与最低气温差值均较大,说明昼夜温差较大,且温差越大,近地逆温强度越强。从图3的逆温强度可见,后期(14-19日)昼夜温差较前期更明显,晴空辐射更强,地面冷却降温迅速,早间近地强逆温概率更大,逆温条件更好,使大气更加稳定,污染物累积效果更明显。污染过程期间,地面风速在0~2 m/s,属于无风到轻风,不利于污染物扩散,且降水稀少,不利于污染物湿沉降。

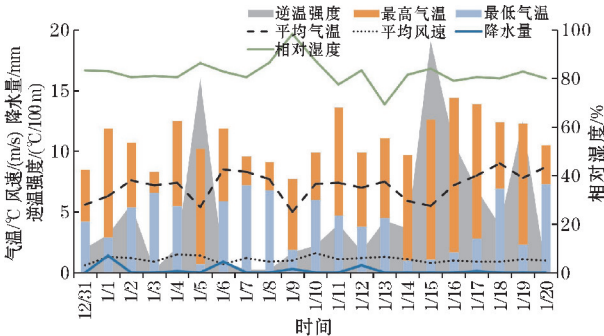


图3 2021年12月31日-2022年1月20日温江站逐日平均气温、相对湿度、风速、降水量和08时近地逆温强度随时间的变化趋势

进一步对本次污染过程期间500 hPa、700 hPa、850 hPa天气形势(图略)进行分析得出,1-16日成都地区500 hPa均为平直的偏西气流,没有明显的槽脊系统过境;17日中纬地区暖脊发展,成都地区位于脊前,西北风逐渐控制成都地区,随着高压脊减弱,南支槽东移发展,20日成都地区转为槽前西南气流影响。

700 hPa和850 hPa天气形势则显示,1-17日成都地区湿度条件都差,风场主要以东北风为主;20日湿度明显转好,风场转为南风,700 hPa西南风更加显著,配合高空南支槽前西南气流影响,有利于 $PM_{2.5}$ 的清除。

因此,本次污染过程主要受平直偏西气流影响,昼夜温差较大,晴空辐射较强,地面风速弱,气象条件不利于污染物扩散;由于后期受脊前西北气流影响,导致昼夜温差更大,晴空辐射更强,创造了更好的逆温条件,使大气更加稳定不利于污染物扩散;20日后随着南支槽发展,西南暖湿气流明显,有利于 $PM_{2.5}$ 的清除,导致污染结束。

2.3 污染过程的边界层大气热力污染气象条件分析

2.3.1 混合层高度

以温江站为代表,由混合层高度变化(图4)可见,本次污染过程期间成都地区混合层高度基本处于400~800 m,说明垂直方向上的通风能力较弱,污染物

易累积;20日混合层高度明显增高,代表垂直方向上的通风能力变强,大气垂直扩散能力增强。

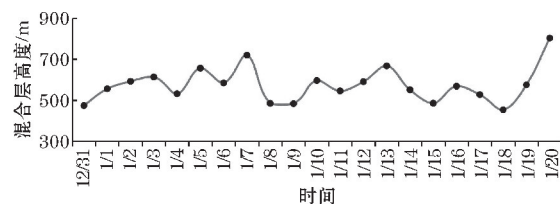
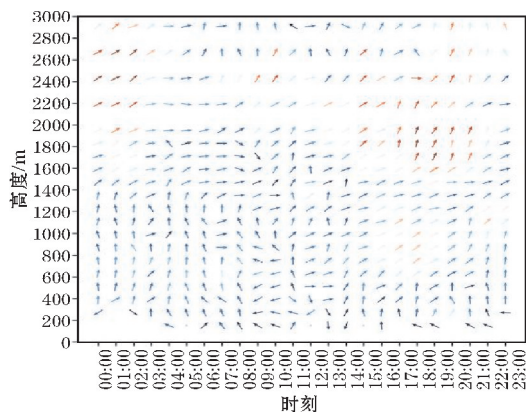


图4 2021年12月31日-2022年1月20日
污染期间温江站混合层高度变化

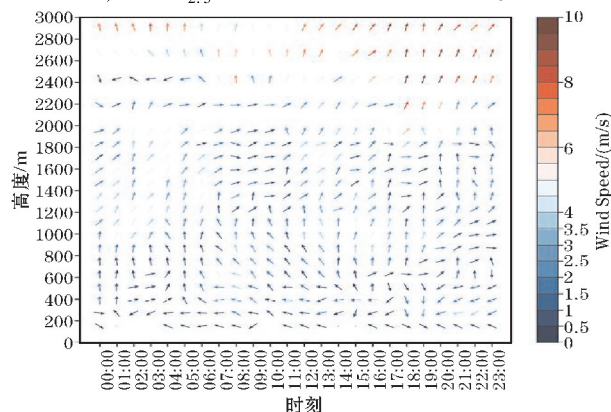
2.3.2 风场时间-高度剖面分析

由图2可知18-19日 $PM_{2.5}$ 浓度迎来一次爆发性增长随后迅速下降的过程,利用温江站的风廓线雷达数据绘制了精细化水平和垂直风场的时间-高度剖面图。图5(a)1000 m以下风速在16:00前非常小,水平风场对污染物的输送能力有限使 $PM_{2.5}$ 逐步积累。16:00-19:00风速在800 m附近出现一次2~3 m/s的增长, $PM_{2.5}$ 浓度随之呈现小幅下降,19:00后风速下降直至次日23:00均无风速大值出现,污染继续加重。 $PM_{2.5}$ 浓度值在19日下午回落。

图6中,1000 m以下夜间和上午呈现弱的下沉气流,下午到晚上由于太阳辐射加热地面,垂直风场变为弱的上升气流。由于下沉和上升速度都非常小,大气层结稳定,为 $PM_{2.5}$ 浓度的积累提供背景场。

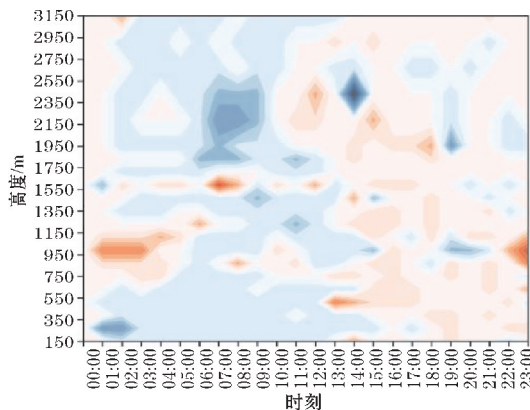


(a) 18日

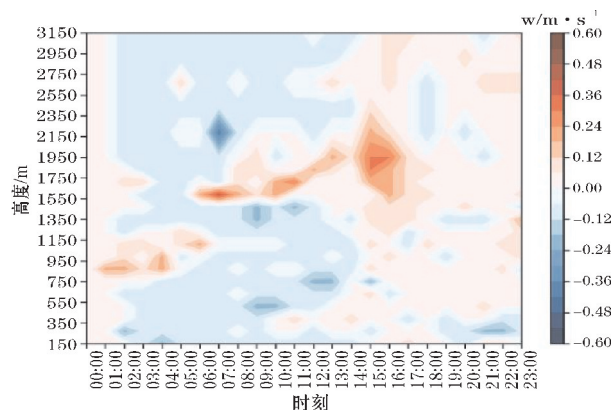


(b) 19日

图5 2022年1月18-19日温江站风廓线雷达水平风场时间-高度剖面图(箭头方向为水平风场风向,箭头填色为水平风场风速)



(a) 18日



(b) 19日

图6 2022年1月18-19日温江站风廓线雷达垂直速度时间-高度剖面图(填色部分红色表征上升运动,蓝色表征下沉运动)

以上分析表明,本次污染过程垂直和水平风场对污染物的输送能力都较弱,使PM_{2.5}逐步积累,当风速明显增大,风场对污染物输送能力提升,水平扩散条件转好,PM_{2.5}浓度就会下降。

2.3.3 局地回流指数

由2.3.2分析得出,后期(14–19日)由于昼夜温差更明显,晴空辐射更强,地面冷却降温迅速,创造更

好的逆温条件,使大气更加稳定,污染物累积效果更明显。因此,基于温江(西部),天府(东南部),彭州(西北部),龙泉(东部),金堂(北部)5站点的逐时风廓线雷达点测数据计算了本次污染过程后期(14–19日)成都市不同方位区域的局地回流指数(R),用以表征本次污染过程的局地污染扩散和本地滞留情况(图7)。

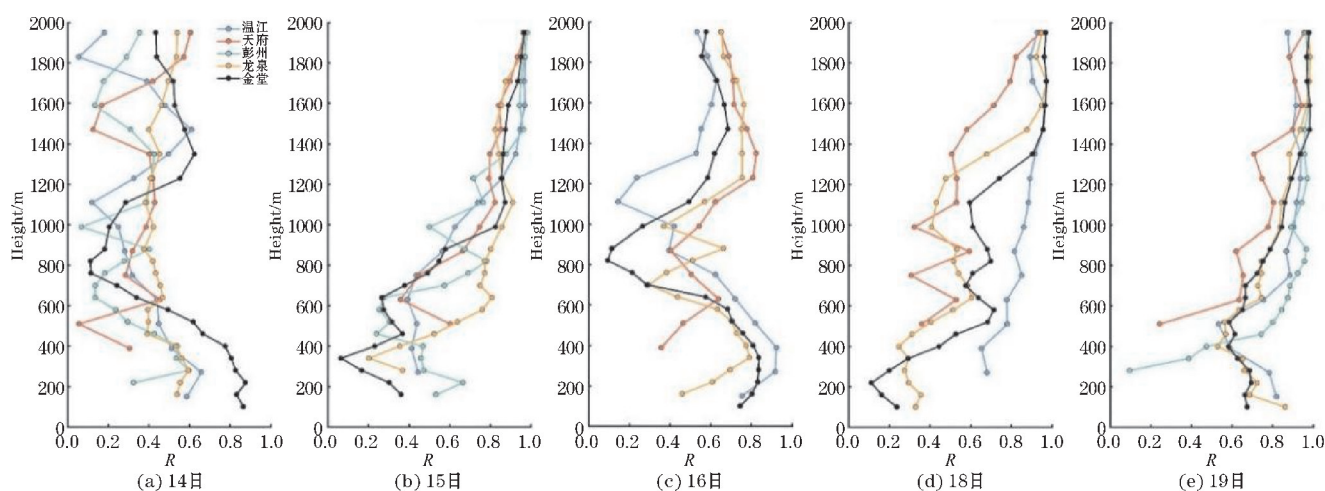


图7 2022年1月14–19日污染过程后期成都5站点局地回流指数随高度变化情况

如图7所示,14日金堂近地面回流指数较大,随高度下降明显,在800 m附近接近0后随高度上升,数值跨度较大,其余四站回流指数均相对偏小,说明除北部外其余地区水平输送能力较弱。15日5站点回流指数均呈现地面附近数值较小,随高度逐渐上升至接近最大值,说明近地层水平输送能力弱,高空水平输送能力较强。16日4站点回流指数廓线形状相近,大体呈 R 值随高度先减小后增大的趋势,说明近地层水平输送能力较前几日有所增大。18日温江近地面回流指数较大且随高度继续增大,其余3站地面附近 R 值较小,随高度有不同程度上升,说明西部地区水平扩散能力好。19日天府和彭州呈现出近地面回流指数偏小后随高度增大的趋势,其余3站全高度偏大,说明成都地区整体水平扩散能力较好。

因此,本次污染过程后期污染严重时段(14–19日),14日除东南部以外,成都其余地区水平扩散能力弱;15日高空水平输送能力较强,16–18日西部地区水平输送能力好;19日整体水平扩散能力较好。说明本次污染过程后期水平输送能力逐步增强,前期东南部较好,后期西部较好。

3 结论

2021年12月31日–2022年1月20日,成都地区出现细颗粒物PM_{2.5}典型持续性污染,具有持续时间长,日变化不明显,后期污染较前期严重的特点。通过分析污染过程期间的气象条件得出以下结论:

(1)本次污染过程主要受平直偏西气流影响,昼夜温差较大,晴空辐射较强,地面风速弱,气象条件不利于污染物扩散;由于后期受脊前西北气流影响,导致昼夜温差更大,晴空辐射更强,创造了更好的逆温条件,使大气更加稳定不利于污染物扩散;20日后随着南支槽发展,西南暖湿气流明显,有利于细颗粒物的清除,导致污染结束。

(2)本次污染过程垂直和水平风场对污染物的输送能力都较弱,使PM_{2.5}逐步积累,当风速明显增大,风场对污染物输送能力提升,水平扩散条件转好,PM_{2.5}浓度就会下降。

(3)通过计算局地回流指数表明,本次污染过程后期水平输送能力逐步增强,前期东南部较好,后期西部较好。

参考文献:

- [1] 杨洪斌,邹旭东,汪宏宇,等. 大气环境中PM_{2.5}的研究进展与展望[J]. 气象与环境学报,2012,28(3):6.
- [2] 杨晓亮,杨敏. 一次雾霾过程中气象因子与细颗粒物浓度关系的研究[J]. 干旱气象,2014,32(5):8.
- [3] 胡亚旦,周自江. 中国霾天气的气候特征分析[J]. 气象,2009,35(7):6.
- [4] 孙亮. 灰霾天气成因危害及控制治理[J]. 环境科学与管理,2012(10):75–79.

- [5] 陈瑞敏,吴雁,康文英,等. 连续雾霾天气污染物浓度变化及天气形势特征分析[J]. 气候与环境研究,2014,19(2):209-218.
- [6] 郭丽君,郭学良,方春刚,等. 华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析[J]. 中国科学:地球科学,2015(4):17.
- [7] 步巧利,吴润. 1960-2009年中国灰霾天气演变特征分析[J]. 广东气象,2018,40(5):3.
- [8] 刘馨语,陈权亮. 四川盆地大气层结变化及其对雾霾天气影响的个例研究[J]. 四川环境,2016,35(3):7.
- [9] 赵估,白爱娟. 四川盆地霾天气变化特征和典型霾过程分析[J]. 环境科学与技术,2015(S1):6.
- [10] 汤宇磊,杨复沫,詹宇. 四川盆地 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 高分辨率时空分布及关联分析[J]. 中国环境科学,2019,39(12):9.
- [11] 邓中慈,康平,胡成媛,等. 四川盆地 $PM_{2.5}$ 时空分布及影响因子研究[J]. 环境污染与防治,2020,42(11):4.
- [12] 唐利利,何莉,庞晓明. 南宁市空气中细颗粒物污染水平及其与气象因素的关系[J]. 广西科学院学报,2011,27(2):3.
- [13] 王宏,陈晓秋,余永江,等. 福州市 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 分布特征及气象影响因子分析[C]. 第29届中国气象学会年会. 2012:1-7.
- [14] 蒲维维,赵秀娟,张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J]. 应用气象学报,2011,22(6):716-723.
- [15] 戴春岭,齐堃,张菲菲,等. 石家庄市一次典型污染过程的 $PM_{2.5}$ 污染特征[J]. 环境研究与监测,2014,27(3):5.
- [16] 李梦,唐贵谦,黄俊,等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学,2015(6):9.
- [17] 毛维薇,张甫仁. 大气混合层高度对通风及污染物扩散的影响[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2016,33(6):8.
- [18] Nozaki K Y. Mixing Depth Model Using Hourly Surface Observations. Report 7053, USAF Environmental Technical Applications Center, 1973.
- [19] 黄奕丹,陈锦鹏,吴建成,等. 风廓线雷达资料在灰霾天气分析中的应用[J]. 海峡科学,2017(6):4.
- [20] 吴蒙,罗云,吴晓绚,等. 珠三角垂直风场输送能力对空气质量影响的观测研究[C]. 第35届中国气象学会年会 S12 大气成分与天气,气候变化与环境影响暨环境气象预报及影响评估. 2018.
- [21] 吴蒙,罗云,吴兑,等. 珠三角干季海陆风特征及其对空气质量影响的观测[J]. 中国环境科学,2016,36(11):10.
- [22] 陈晓阳,冯旭,范绍佳,等. 回流指数在空气质量变化研究中的应用[J]. 环境科学学报,2016,36(3):10.
- [23] 赵福燕,陈朝平,王凌,等. 成都市大气污染与气象条件关系分析[J]. 高原山地气象研究,2020,40(3):5.
- [24] 曹杨,王晨曦,赵晓莉,等. 成都市 $PM_{2.5}$ 污染特征及其与地面气象要素的关系分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(4):6.
- [25] 汤天然,陈建楠,李广前,等. 降雨对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响及人工降雨降低 $PM_{2.5}$ 浓度的探讨[J]. 贵州气象,2013,37(4):3.

Analysis of Persistent $PM_{2.5}$ Pollution Process during the Winter of 2021-2022 in Chengdu

ZHAO Huan¹, XU Chen¹, ZHU Xinyue¹, ZHANG Songyu^{2,3}, KANG Ping^{2,3}

(1. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu, 610000, China; 2. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China; 3. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, 610225, China)

Abstract: To study the variation regularity of $PM_{2.5}$ pollution in the basin in recent years, the relationship between the variation characteristics of $PM_{2.5}$ pollution and meteorological conditions in the winter of 2021-2022 in the Chengdu area was analyzed, the pollution process has the characteristics of long duration (lasting 21 days), no obvious diurnal variation in the earlier period, and more serious pollution in the later period than in the earlier period. During the pollution process, the strong clear sky radiation creates favorable inversion conditions, the lower altitude of the atmospheric mixing layer, and the weaker ventilation capacity in the vertical direction, which make the atmosphere stable and not conducive to the diffusion of pollution, at the same time, both vertical and horizontal wind fields are weak to transport pollutants, so that $PM_{2.5}$ gradually accumulated. Based on the wind profiler data, the local reflux index (R) was calculated, and it was found that the R value and the horizontal transport capacity of Chengdu gradually increased in the late stage of the pollution process, and the southeast was better in the early stage, the later west is better.

Keywords: $PM_{2.5}$ pollution; mixed layer height; wind transport; local backflow index