

刘超,周雅蔓,魏娟娟,等.乌鲁木齐重污染日 $\text{PM}_{2.5}$ 不同增长型的污染特征及气象条件分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(5):127-134.
doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



乌鲁木齐重污染日 $\text{PM}_{2.5}$ 不同增长型的污染特征及气象条件分析

刘超^{1,2,3},周雅蔓^{3*},魏娟娟³,宫宇²,李淑婷¹

(1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002;2.国家气象中心,北京 100081;
3.新疆气象台,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 基于2015—2021年近7年乌鲁木齐冬季逐小时地面常规观测资料和空气质量数据,并结合ERA5再分析资料对重污染日 $\text{PM}_{2.5}$ 不同增长类型的污染特征、环流形势以及气象条件进行综合分析。结果表明:近7年乌鲁木齐冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染及以上级别的比例由41.2%降至8.6%, $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天数由63 d降至13 d,超过70%重污染日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增长分布在 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内。依据 $\text{PM}_{2.5}$ 增长类型判别方法,近7年乌鲁木齐冬季重污染日以缓慢型增长为主。对比分析爆发型增长和缓慢型增长的天气背景形势表明,两种增长类型在欧亚范围内500 hPa高空形势上均主要受西北或偏西气流影响,爆发型增长的高压脊势力较强,乌鲁木齐处于高压中心后部且气压梯度显著;而缓慢型增长的高压脊较为平直,乌鲁木齐位于高压后部的均压场控制下,气压梯度相对较弱。对比两种类型边界层内逆温厚度和强度发现,爆发型增长在925~700 hPa的逆温层平均厚度明显大于缓慢型增长,前者逆温强度达到 $1.8 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$,明显高于缓慢型增长的逆温强度 $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$,造成两种 $\text{PM}_{2.5}$ 不同类型增长与边界层内的逆温垂直特征分布结构存在密切联系。

关键词: 重污染; $\text{PM}_{2.5}$;污染特征;气象条件

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2022)05-0127-08

近年来,以大气细颗粒物为主的 $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物) 污染因其对能见度、人类健康和生态环境的复杂影响而引起越来越多的关注^[1-3]。自2013年《大气污染防治行动计划》实施以来,淘汰高污染和高排放的行业、优化产业和能源结构、限制车辆等一系列的污染源控制措施得以实施,我国重点地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现逐年下降的趋势,但与欧美国家相比仍有不小的差距, $\text{PM}_{2.5}$ 重污

染事件仍然频繁发生。事实上,当气象因素有利于污染物的积累时,近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度会明显增加^[4-6]。因此,关注 $\text{PM}_{2.5}$ 的增长机制及其与气象条件的关系是至关重要的。

有研究表明^[7-8]在不同气象条件下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增长主要表现为两种形式:爆发型增长和持续累积型增长。前者主要表现为短时间内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度快速由低值迅速达到峰值,而后者主要表现为 $\text{PM}_{2.5}$ 缓慢累积并持续多日。一般而言,本地污染源排放强度在短时间内变化不大,产生上述两种现象的原因与气象条件密不可分。吴兑等^[9]研究发现在京津冀地区形成一条“西南—东北”走向的近地层污染传输通道是北京地区霾污染快速加重的主要原因之一。吴进等^[7]研究发现2016年12月20—21日 $\text{PM}_{2.5}$ 维持高值的主要气象条件是近地面温度日变化较小且逆温层无

收稿日期:2022-05-12;修回日期:2022-06-09

基金项目: 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2020012);新疆自治区科技厅自然科学基金面上项目(2021D01A151);新疆气象局重点课题(ZD202201)

作者简介: 刘超(1989—),男,工程师,主要从事雾霾沙尘预报和研究工作。E-mail:liu_chao0120@126.com

通信作者: 周雅蔓(1990—),女,工程师,主要从事天气预报预测和灾害性天气研究。E-mail:15276759704@163.com

明显日变化。而 ZHONG 等^[10]认为主要是因为污染导致的边界层气象条件“转差”控制了 PM_{2.5} 爆发型增长。由此可以看出,针对不同污染过程污染物增长类型的主要成因仍存在不同的理解和认识,且主要研究区域集中在中东部地区,而对我国西部地区的研究较少。

乌鲁木齐是新疆政治、经济、文化中心,也是我国连接中亚及欧洲的重要交通枢纽。近年来,尽管当地政府持续努力治理大气环境质量,2021 年乌鲁木齐地区 PM_{2.5} 年均浓度仍达到 40 μg·m⁻³,是我国《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准的 1.1 倍,大气污染已成为当地群众最为关注的话题之一。大气污染严重的原因受多方因素影响,第一,乌鲁木齐大量污染物密集排放,产业结构偏重,能源结构偏煤炭,公路运输占比高;第二,与特殊的地理位置有关。乌鲁木齐位于新疆中天山北部的冲击平原上,东、西、南三面环山,地形整体呈现“东南高、西北低”的分布特征,市区处在北天山西段和东段的结合部,大体为朝北的“喇叭口”地形;第三,出现有利于污染发生发展的气象条件时,PM_{2.5} 极易增长。目前,关于乌鲁木齐大气污染的研究主要侧重于 PM_{2.5} 时空分布特征、PM_{2.5} 与气象条件关系以及边界层结构特征等^[11-13],尚未开展重污染日 PM_{2.5} 不同增长类型下的污染特征和气象条件分析。因此,本研究利用 2015—2021 年冬季 PM_{2.5} 浓度和气象数据,对 PM_{2.5} 不同增长类型下的环流形势特征、地面气象条件以及边界层逆温结构进行对比分析,以期进一步揭示乌鲁木齐大气污染机理,为 PM_{2.5} 精细化预报提供参考依据和理论支撑。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本研究主要选取乌鲁木齐 2015—2021 年冬季(11 月—次年 3 月)空气质量监测数据和气象数据,其中空气质量监测数据选取 10 个国控空气质量站点的小时污染物浓度数据,数据来源于全国城市空气质量实时发布平台(<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>);气象数据为乌鲁木齐地面气象常规观测数据,主要包括温度、风速风向以及相对湿度等。乌鲁木齐市地面气象常规观测站和空气质量站点分布如图 1 所示。高空环流和地面形势分析则使用 ERA5 再分析资料,ERA5 为 ECMWF 第五代全球大气再分析资料,提供了逐小时陆地和海洋气候变量,网格分辨率为 0.25°×0.25°。该数据基于改

进的三维变分技术,具有时空分辨率高、参数多等特点,受到众多学者的广泛关注^[14-15]。

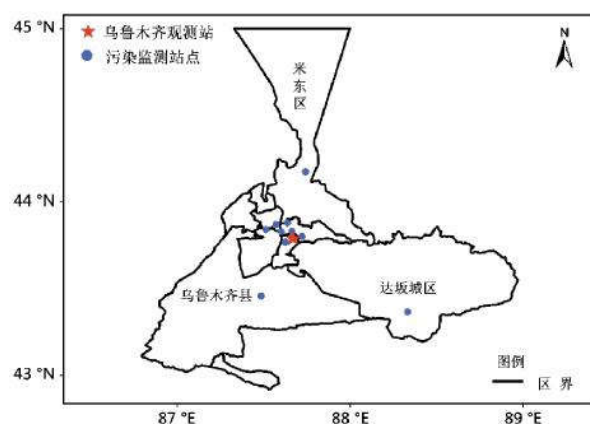


图 1 乌鲁木齐市空气质量和地面气象常规观测站点空间分布

1.2 统计方法

根据我国《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)空气质量日均浓度标准,若某日 PM_{2.5} 日均浓度 ≥ 150 μg·m⁻³ 则视为一个重污染日。本研究首先筛选出乌鲁木齐地区 2015—2021 年冬季所有重污染日,并计算每一个重污染日与前一日 PM_{2.5} 的日均浓度增长幅度,并参考 ZHONG 等^[16]研究结果,进一步判断该重污染日 PM_{2.5} 增长类型。本文将乌鲁木齐地区重污染日 PM_{2.5} 增长类型划分为:PM_{2.5} 爆发型增长日、快速型增长日和缓慢型增长日,即当年冬季 PM_{2.5} 浓度增长均值超过 2 倍属于爆发型增长日,低于 PM_{2.5} 浓度增长均值属于缓慢型增长日,而快速型增长为介于 1 倍均值和 2 倍均值之间。重污染日 PM_{2.5} 增长类型判别流程如图 2 所示。

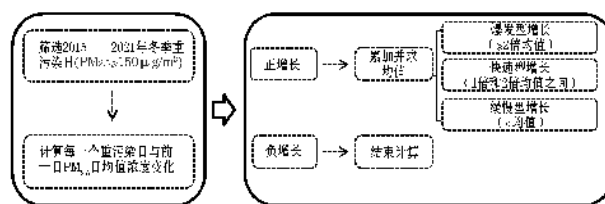


图 2 PM_{2.5} 增长类型判别流程

2 PM_{2.5} 污染特征分析

2.1 年际变化特征

图 3 是乌鲁木齐 2015—2021 年秋冬季 PM_{2.5} 各等级逐年比例分布。2015—2021 年乌鲁木齐冬季大气质量优良级别的比例呈逐年上升的特征,其中 2015 年冬季 PM_{2.5} 的优良比例仅为 27.4%,而 2021 年冬季增长至 57.2%。与此同时,PM_{2.5} 重污染及以

上的比例由 41.2% 下降至 8.6%，下降幅度达到 79.1%。但近 7 年 PM_{2.5} 非重污染的比例(轻度污染比例和中度污染比例之和)一直在 29.1%~41.6% 摆动，并没有明显的年际变化，而 2020、2021 年冬季 PM_{2.5} 轻度污染和中度污染的比例已分别降至 23% 和 13% 以下。此外，经统计 2015—2021 年冬季乌鲁木齐重污染天数共计 268 d (图 4)，PM_{2.5} 重污染日数呈逐年下降趋势，从 2015 年冬季的 63 d 下降至 2021 年冬季的 13 d，下降比例高达 79.3%。但重污染天气下的 PM_{2.5} 平均浓度呈 U 型分布，PM_{2.5} 浓度由 2015 年冬季的 224.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 缓慢下降至 2019 年冬季的 183.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，下降比例为 18.4%，PM_{2.5} 重污染的污染程度逐年下降。但 2020 年冬季起 PM_{2.5} 呈现出缓慢增长的趋势，PM_{2.5} 浓度分别为 192 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2020 年) 和 205.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2021 年)。统计结果表明，乌鲁木齐近年来空气质量得到明显改善，大气污染防治工作取得明显成效。

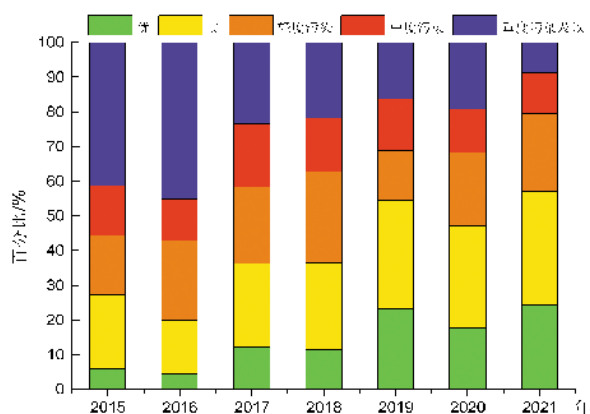


图3 乌鲁木齐2015—2021年冬季PM_{2.5}各级别逐年比例分布

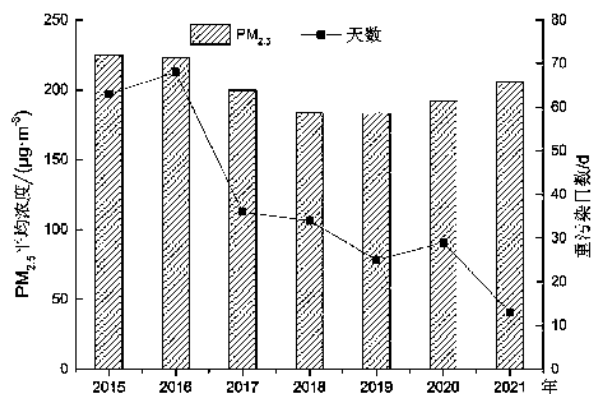


图4 乌鲁木齐2015—2021年冬季重污染日数和重污染日PM_{2.5}浓度变化

2.2 月变化特征

对近 7 年重污染分布日数和 PM_{2.5} 浓度进行逐月统计，结果表明，PM_{2.5} 重污染主要发生在 12 月—次年 2 月，其中 1 月重污染日数最多达 15.4 d，其次是 2 月(10.3 d)和 12 月(9.7 d)，而 11、3 月分别为 1.1、2.3 d(图 5)。1 月为冬季 PM_{2.5} 重污染日浓度最高的月份，达到 218.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由此可知，乌鲁木齐重污染频发且 1 月污染最重。

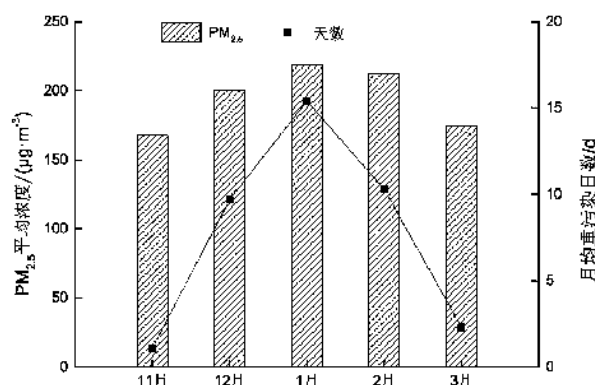


图5 乌鲁木齐2015—2021年冬季重污染日数和重污染日PM_{2.5}浓度逐月变化

2.3 不同PM_{2.5}增长型变化特征

通过计算 2015—2021 年冬季 PM_{2.5} 重污染日较前一日的浓度增长变化，并分别按照 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (增长幅度 < 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (增长幅度 > 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 浓度增长区间进行区间统计分析(图 6)。PM_{2.5} 浓度增长比例随着区间增长而不断降低，但超过 70% 的重污染日 PM_{2.5} 浓度增长分布在 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内，其中 0~30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 30~60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间的比例分别为 37.7% 和 34.7%。但也有超过 10% 的重污染日 PM_{2.5} 浓度增长在 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上，PM_{2.5} 浓度增长在 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的比例超过 5%。

从表 1 可知，除了 2017、2020 年冬季 PM_{2.5} 浓

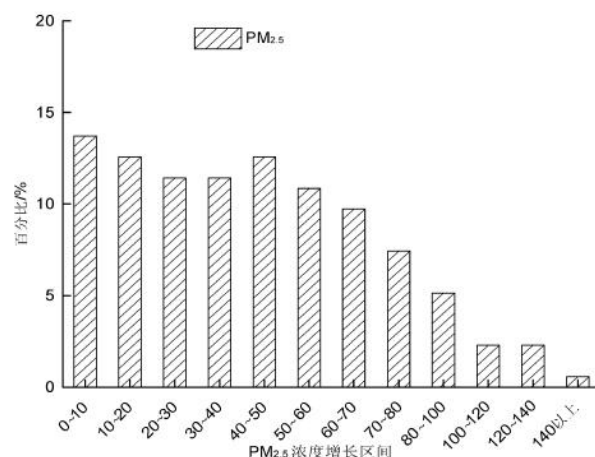


图6 PM_{2.5}重污染浓度增长区间分布

度增长均值低于 $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 外 (分别为 34.4 、 $38.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 其余均在 $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 其中 2016 年冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增长平均值达到 $53.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。按照 $\text{PM}_{2.5}$ 增长类型判别方法(图 2), 结合每年重污染日 $\text{PM}_{2.5}$ 增长均值进行分类, 乌鲁木齐 2015—2021 年冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染爆发性增长、快速型增长和缓慢型增长日分别为 13、82 和 94 d, 以缓慢型增长为主。因此, 乌鲁木齐冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染以缓慢型增长为主。此外, 爆发性增长和缓慢型增长类型的重污染日均呈现出逐年波动性下降的趋势, 其中 2021 年冬季未出现爆发性增长日, 并且缓慢型增长日下降至 4 d, 相较于 2015 年冬季下降比例高达 85.1%。由此可知, 对乌鲁木齐冬季爆发性增长日和缓慢型增长日的研究具有显著实际意义。

表 1 $\text{PM}_{2.5}$ 不同增长类型逐年变化

年	增长均值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆发性 增长/d	快速型 增长/d	缓慢型 增长/d
2015	49.2	3	25	27
2016	53.8	4	16	17
2017	34.4	2	12	15
2018	44.6	1	9	13
2019	45.2	2	9	7
2020	38.6	1	7	11
2021	48.6	0	4	4

3 环流分析

3.1 500 hPa 高度场

对 2015—2021 年乌鲁木齐冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长日和缓慢型增长日的 500 hPa 环流形势分别进行合成分析(图 7), 发现二者在欧亚范围内 500 hPa 高空形势上均主要受西北或偏西气流影响, 在新疆—西西伯利亚地区受一宽广的长波暖脊控制, 高压脊线主要位于 82°E 附近的新疆西部—阿尔泰山

以北地区, 这与前人研究结果^[11]较为一致。

但二者 500 hPa 高空形势场仍有明显差别, 主要体现在 3 个方面: 第一, 爆发性增长在黑海和里海之间存在明显高空槽, 环流经向度大, 槽前正涡度平流和正热成风涡度平流作用促使高空槽东移发展, 同时, 上下游效应有利于新疆—西西伯利亚高压脊发展; 而缓慢型增长则环流经向度较小, 高空槽曲率比爆发性增长的曲率小。第二, 在爆发性增长的天气下, 位于新疆—西西伯利亚地区的高压脊势力较强, 高压脊顶部主要位于 70°N 附近, 而缓慢型增长的高压脊较为平直, 高纬度为平直西风气流, 中纬度新疆及以北地区存在弱高压脊, 高压脊顶部主要位于 50°N 附近, 且 540 dagpm 位置较爆发性增长偏南 1 个纬距, 强度和影响范围明显低于爆发性增长。第三, 爆发性增长的大风区(风速 $>14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)主要位于新疆北部和东部, 而缓慢型增长的高空大风区偏北, 弱于爆发性增长, 这主要与高压脊势力较弱有关。

3.2 海平面气压场

乌鲁木齐发生重污染时的海平面气压场以高压后部型为主, 高压底部型次之。高压后部型主要是地面高压中心位于阿勒泰东部和蒙古国西北部之间, 乌鲁木齐位于地面高压的西南部; 而高压底部型是指高压中心位于新疆以北地区, 乌鲁木齐位于地面高压的南部^[11]。对 2015—2021 年乌鲁木齐冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发性增长日和缓慢型增长日的海平面气压场分别进行合成分析(图 8), 发现两种类型海平面气压场呈现出“东高西低”的分布特征, 其中二者高压中心均位于蒙古国西部和新疆以东地区, 但爆发性增长的高压中心强度略强于缓慢型增长, 且高压中心更偏南。此外, “东高西低”的气压场配置在地面形成回流型偏东风或东南风, 但对于乌鲁木齐而言, 当爆发性增长发生时, 乌鲁木齐处于高压中心的后部, 南北气压梯度较为显著; 当缓慢型增长发生时, 乌鲁木齐

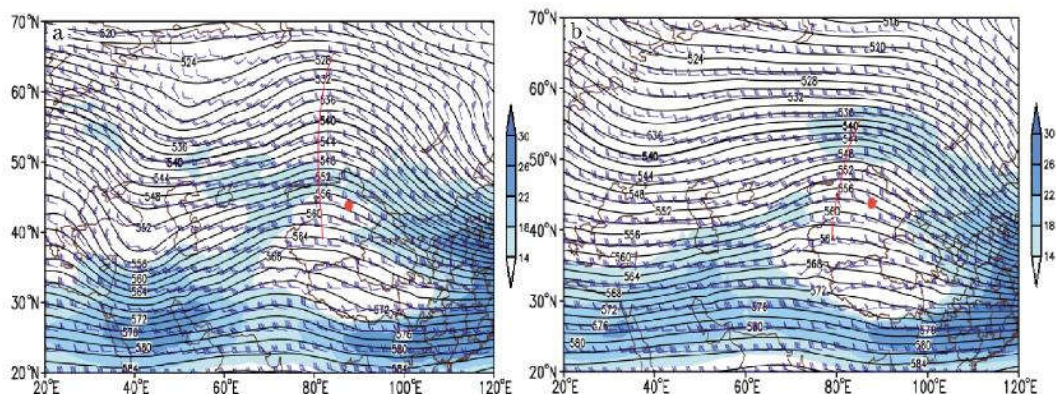


图 7 爆发性增长(a)和缓慢型增长(b)重污染日 500 hPa 环流形势和风场对比

位于高压后部的均压场控制下,气压梯度力较弱,说明爆发型增长时地面梯度风较缓慢型增长大。

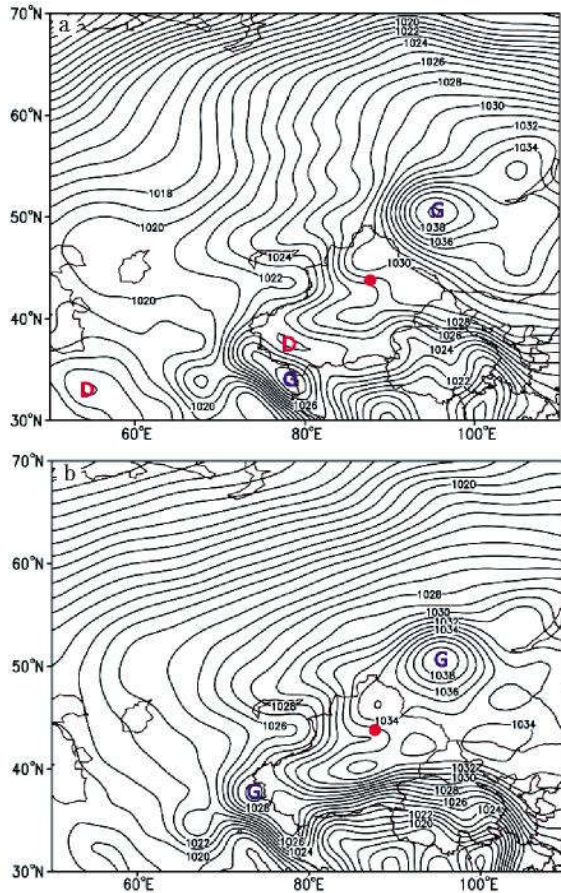


图8 爆发型增长(a)和缓慢型增长(b)
重污染日海平面气压场

4 气象条件分析

研究表明^[7],重污染天气除了受到相对静稳的高空环流影响外,地面气象要素对 PM_{2.5} 的时空分布、生消变化发挥着至关重要的作用。表2为两种增长类型的气象条件进行对比分析。两种类型下的温度在-9~-10℃,相对湿度分别为73.5%和75.2%。在低温环境下,近地面能够维持较高的相对湿度,主要与乌鲁木齐冬季地面长时间处于积雪覆盖的状态有关,近地面水汽条件主要来源于下垫面积雪的蒸发作用,这一特点与我国中东部其他城市不同^[18-19]。一般而言,较高的相对湿度常常导致颗粒物中的二次组分“吸湿增长”,出现污染物浓度爆发增长的现象,但对乌鲁木齐而言,同样的相对湿度出现两种截然不同的增长趋势,由此推断相对湿度并不是乌鲁木齐出现两种截然不同 PM_{2.5} 增长类型的驱动因子。同样,两种类型的主导风向均为偏东风,这与前述环流影响的结论一致。

表2 两种增长类型气象要素对比

增长类型	温度/℃	相对湿度/%	风速/(m·s ⁻¹)
爆发型增长	-9.2	73.5	1.7
缓慢型增长	-9.9	75.2	1.5

为进一步研究两种类型气象要素之间的差异,选取了2017年1月20—21日以及2020年1月22—23日分别作为爆发型增长和缓慢型增长的典型过程。前者 PM_{2.5} 日均浓度分别为234、346 μg·m⁻³,较前一日增长了69、111 μg·m⁻³;而后者 PM_{2.5} 日均浓度分别为162、164 μg·m⁻³,较前一日均增长2 μg·m⁻³。因此,对温度、相对湿度以及风场剖面进行对比分析(图9)。发现,二者相同之处在于污染发展初期850 hPa以下风速均较小,风速主要在2~4 m·s⁻¹,风向以东南风或南风为主导风向。但在污染发展中后期可以看出爆发型增长800 hPa以下的东南风明显大于缓慢型增长。此外爆发型增长700 hPa以西风环流为主,风速>4 m·s⁻¹,而缓慢型增长在700 hPa高度上风速较小,个别时次主导风向为东南风或静风。在 T-lnP 图中,700~925 hPa 相同高度上爆发型增长(图10a)存在明显逆温和等温层,且逆温强度和厚度均明显高于缓慢型增长(图10b)。

研究表明^[13,20-21],翻山影响乌鲁木齐的东南风往往伴随着逆温的发展,逆温强度、逆温层高度以及厚度对污染物的垂直分布发挥着重要的作用。本研究对利用乌鲁木齐每日探空资料对两种类型下的逆温厚度和强度进行统计分析,结果如表3。爆发型增长925~700 hPa逆温层平均厚度为757 m,明显大于缓慢型增长的633 m,爆发型增长的逆温层底部和顶部温差达13.4℃·(100 m)⁻¹,是缓慢型增长的1.8倍,导致爆发型增长的逆温层强度明显强于缓慢型增长,分别为1.8℃/100 m(爆发型增长)和1.2℃·(100 m)⁻¹(缓慢型增长),其中缓慢型增长逆温强度与冬季平均逆温强度较为接近(1.06℃·(100 m)⁻¹)^[9],但爆发型增长逆温强度是冬季常年逆温强度的1.7倍。由此可知,在地面气象条件相近的情况下,造成两种 PM_{2.5} 不同类型增长的主要因素是由于边界层内的逆温垂直特征分布结构造成。

表3 爆发型增长和缓慢型增长逆温对比

增长类型	逆温层厚度/m	逆温层底部和顶部温差/℃	逆温强度/(℃·(100 m) ⁻¹)
爆发型增长	757	13.4	1.8
缓慢型增长	633	7.3	1.2

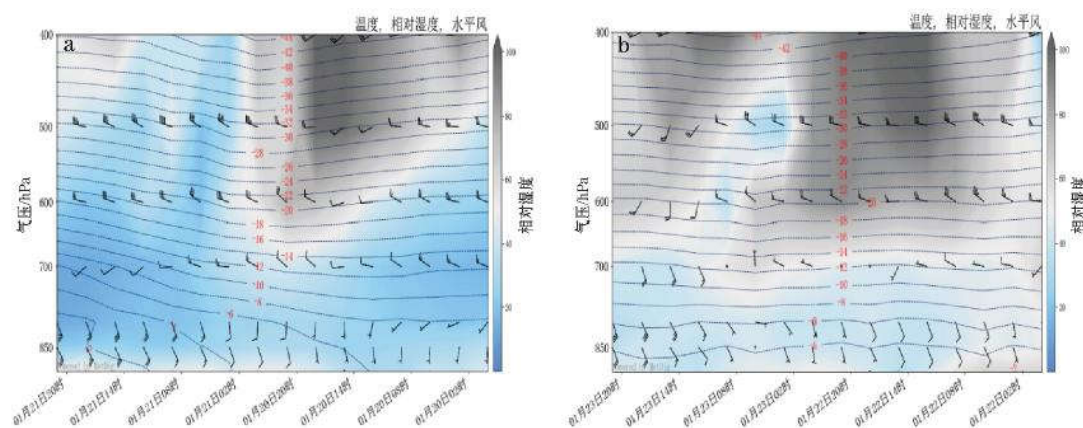


图9 2017年1月20—21日(a)和2020年1月22—23日(b)气象要素综合剖面

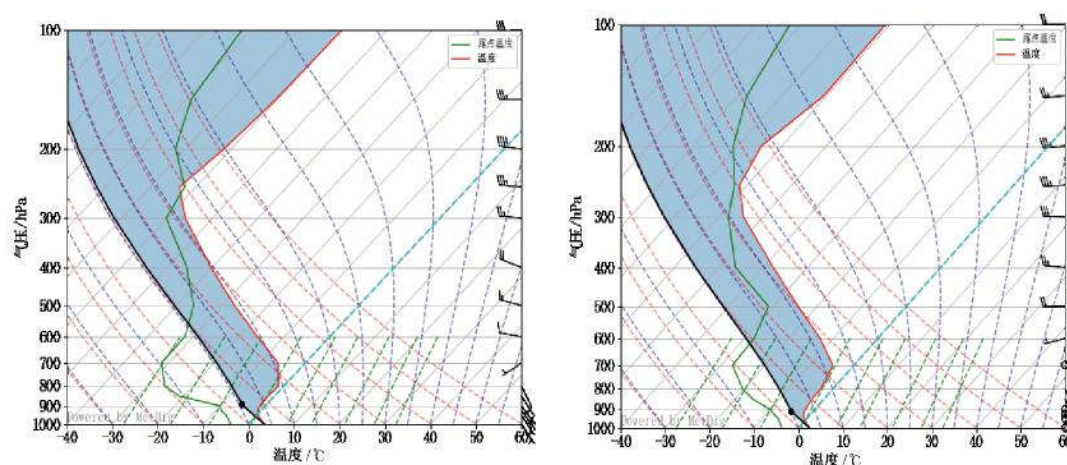


图10 2017年1月21日20时(a)和2020年1月22日20时(b) T - $\ln P$

5 结论

通过近7年乌鲁木齐冬季逐小时地面常规观测资料和空气质量数据的统计分析,并结合ERA5再分析场资料对重污染日 $PM_{2.5}$ 不同增长类型环流形势以及气象条件的分析,得到以下主要结论:

(1)2015—2021年乌鲁木齐冬季 $PM_{2.5}$ 重污染及以上的比例由41.2%下降至8.6%, $PM_{2.5}$ 重污染天数由63 d下降至13 d。有70%的重污染日 $PM_{2.5}$ 浓度增长分布在 $60 \mu g \cdot m^{-3}$ 以内,其中 $0 \sim 30 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $30 \sim 60 \mu g \cdot m^{-3}$ 的比例分别为37.7%和34.7%。但也有超过10%的重污染日 $PM_{2.5}$ 浓度增长在 $80 \mu g \cdot m^{-3}$ 以上。乌鲁木齐冬季 $PM_{2.5}$ 重污染以缓慢型增长为主,其中爆发型增长日、快速型增长和缓慢型增长日分别为13、82和94 d。

(2)爆发型增长和缓慢型增长在欧亚范围的500 hPa高空形势上均主要受西北或偏西气流影响,在新疆—西西伯利亚地区受一宽广的长波暖脊控制,但二者高空形势场仍有明显差别,爆发型增长的高压脊势力较强,而缓慢型增长的高压脊表现较

为平直。两种类型的海平面气压场均呈现出“东高西低”的分布特征,高压中心位于蒙古国西部和新疆以东地区。当爆发型增长发生时,乌鲁木齐处于高压中心的后部,气压梯度较为显著,而当缓慢型增长发生时,乌鲁木齐位于高压后的均压场控制下,气压梯度较弱。

(3)爆发型增长925~700 hPa逆温层平均厚度明显大于缓慢型增长,并且前者逆温强度达到 $1.8 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$,高于缓慢型增长的逆温强度 $1.2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。由此推断,相较于缓慢型增长,爆发型增长的边界层逆温强度大且逆温层较为深厚。

参考文献:

- [1] 马志强,赵秀娟,孟伟,等.雾和霾对北京地区大气能见度影响对比分析[J].环境科学研究,2012,25(12):1208-1214.
- [2] 孙志豪,崔燕平. $PM_{2.5}$ 对人体健康影响研究概述[J].环境科技,2013,26(4):75-78.
- [3] 姚青,韩素芹,蔡子颖.天津采暖期大气 $PM_{2.5}$ 中重金属元素污染及其生态风险评价[J].中国环境科学,2013,33

- (9):1596–1600.
- [4] 桂海林,江琪,康志明,等.2016年冬季北京地区一次重污染天气过程边界层特征[J].中国环境科学,2019,39(7):2739–2747.
- [5] 赵克明,李霞,孙鸣婧,等.乌鲁木齐冬季浅薄型焚风对大气扩散条件及空气质量的影响[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(1):13–20.
- [6] LIU C HUA C,ZHANG H D,et al.A severe fog-haze episode in Beijing-Tianjin-Hebei region:characteristics, sources and impacts of boundary layer structure[J]. Atmospheric Pollution Research,2019,10:1190–1202.
- [7] 吴进,李琛,孙兆彬,等.北京地区两次重污染过程中PM_{2.5}浓度爆发性增长及维持的气象条件[J].干旱气象,35(5):830–838.
- [8] 王跃,王莉莉,赵广娜,等.北京冬季PM_{2.5}重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J].气候与环境研究,2014,19(2):173–184.
- [9] 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[J].环境科学学报,2014,34(1):1–11.
- [10] ZHONG J T,ZHANG X Y,WANG Y Q,et al.Relative contributions of boundary-layer meteorological factors to the explosive growth of PM_{2.5} during the red-alert heavy pollution episodes in Beijing in December 2016[J].Journal of Meteorological Research,2017,31:809–819.
- [11] 李霞,杨静,麻军,等.乌鲁木齐重污染日的天气分型和边界层结构特征研究[J].高原气象,2012,31(5):1414–1423.
- [12] 赵克明,李霞,卢新玉,等.峡口城市乌鲁木齐冬季大气污染的时空分布特征[J].干旱区地理,2014,37(6):1108–1118.
- [13] 赵克明,李娜,李霞,等.乌鲁木齐冬季焚风天气过程大气扩散条件特征分析[J].干旱区地理,2021,44(6):1534–1544.
- [14] 刘婷婷,朱秀芳,郭锐,等.ERA5再分析降水数据在中国的适用性分析[J].干旱区地理,2022,45(1):66–79.
- [15] 刘鸿波,董理,严若婧,等.ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估[J].气候与环境研究,2021,26(3):299–311.
- [16] ZHONG J T,ZHANG X Y,WANG Y Q.Reflections on the threshold for PM_{2.5} explosive growth in the cumulative stage of winter heavy aerosol pollution episodes (HPEs) in Beijing[J].Tellus B:Chemical and Physical Meteorology,2019,71(1):1528134.
- [17] 刘超,花丛,康志明.2014—2015年上海地区冬夏季大气污染特征及其污染源分析[J].气象,2017,43(7):823–830.
- [18] 张静,刘端阳,钱映月,等.一次持续性雾霾天气的边界层结构特征[J].干旱气象,2018,36(3):483–491.
- [19] 赵桂香,杜莉,卫丽萍,等.一次持续性区域雾霾天气的综合分析[J].干旱区研究,2011,28(5):871–878.
- [20] 徐洁,张新军,王舒.乌鲁木齐一次持续性空气重污染过程气象成因分析[J].青海气象,2014(2):28–31.
- [21] 李振杰,金莉莉,何清,等.乌鲁木齐城区和郊区气温分布及廓线特征[J].干旱区地理,2019,42(6):1273–1281.

Pollution Characteristics and Meteorological Conditions of Different Growth Types of PM_{2.5} on Heavy Pollution Days in Urumqi

LIU Chao^{1,2,3}, ZHOU Yaman³, WEI Juanjuan³, GONG Yu², LI Shuting¹

(1. Institute of Desert Meteorology of China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

2. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China;

3. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China)

Abstract In this paper, the pollution characteristics, circulation situation and meteorological conditions of different growth types of PM_{2.5} on heavy pollution days were analyzed in winter in Urumqi during 2015–2021 based on hourly ground-based conventional observations, air quality data and combined with ERA5 reanalysis data. The results show that, the proportion of heavy PM_{2.5} pollution decreases from 41.2% to 8.6%, and the number of heavy PM_{2.5} pollution days decreases from 63 days to 13 days in winter in Urumqi during 2015–2021. Besides, more than 70% of heavy pollution days with PM_{2.5} concentration growth distribute within 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. According to the identification method of different growth types, PM_{2.5} heavy pollution in Urumqi are mostly slow growth type in winter during 2015–2021. By comparing and analyzing explosive growth type and slow growth type of circulation situations, both types are mainly influenced by northwesterly or westerly air currents in the 500 hPa high altitude over the Eurasian. The high pressure ridge of the explosive growth type is stronger, and Urumqi is located behind the high pressure centre and has a larger pressure gradient. While the high pressure ridge of the slow growth type is flatter, and Urumqi is under the control of the mean pressure field behind the high pressure, and the pressure gradient is relatively small. By comparing the thickness and intensity of the inverse temperature in the boundary layer of the two types, it is found that the thickness of the average inverse temperature layer of the explosive growth type is significantly larger than that of the slow growth type between 925–700 hPa, and the intensity of the inverse temperature of the former reaches $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$, which is significantly higher than that of the slow growth type ($1.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$), thus it can be seen that the main factor causing the two types is due to the vertical characteristic distribution structure of the inverse temperature in the boundary layer.

Key words heavy pollution; PM_{2.5}; pollution characteristics; meteorological conditions