

黄秋霞,赵克明,艾克代·沙拉木,等.乌鲁木齐一次重污染过程及其边界层特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(3):93-98.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



乌鲁木齐一次重污染过程及其边界层特征分析

黄秋霞¹,赵克明^{2*},艾克代·沙拉木³,柳宏英¹,叶尔克江·霍依哈孜¹

(1.昌吉州气象局,新疆 昌吉 831100;2.新疆气象台,新疆 乌鲁木齐 830002;3.克州气象局,新疆 阿图什 845350)

摘要:针对 2020 年 1 月 5—17 日乌鲁木齐出现的重污染天气,利用乌鲁木齐的探空站资料和地面常规气象数据计算了最大混合层高度、平均风速、逆温特性、边界层通风量、能见度、相对湿度等,对最大混合层高度、能见度、相对湿度与 PM_{2.5} 质量浓度进行了相关性分析,并利用 Hysplit 后向气团轨迹模式分析污染形成源。结果表明:此次重污染天气过程大气层结较为稳定,主要表现为逆温层厚(平均 577 m)、逆温强度大(平均 1.7 °C/100 m)、最大混合层高度低(平均 400 m);边界层通风量对局地空气质量影响显著;PM_{2.5} 质量浓度与相对湿度呈弱的正相关,与能见度呈指数相关;Hysplit 后向气团轨迹模式分析得出此次污染过程以局地排放为主要形成源。

关键词:最大混合层高度;边界层通风量;相对湿度;能见度;后向气团轨迹模式

中图分类号:P458.11

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)03-0093-06

空气污染物传输、扩散方式受天气驱动和人为污染物排放的共同影响^[1-4]。大气污染物在较短时间且排放量变化小的情况下,气象扩散条件为限制污染物浓度变化的主要因素^[5-8]。大气混合层厚度是在垂直方向上最直接反映污染物扩散的重要参数,也是影响其扩散的主要气象因子之一,对大气环境预测、环境规划、环境评价等领域具有指示意义^[9]。大气污染对人体健康、农作物生长以及区域生态系统带来不利影响^[10-12]。近年来,大气环境污染现状不容乐观,改善大气环境呼声日益强烈^[13]。乌鲁木齐作为我国大气污染最严重的城市之一,为东、西、南三面环山的特殊地形,处于二类山口风的气流通道中^[1],

在重污染期间,存在与周边城市间污染物相互输送的现象。

国外学者研究得出,大气混合层高度是影响大气污染物稀释、扩散的重要因素,在大气混合层高度较低的情况下,细颗粒物可以发生远距离的传输和沉降^[14-17],并对英国伯明翰、美国大峡谷地质公园、希腊雅典的高污染事件天气类型进行分型^[18-19]。国内学者自 20 世纪 80 年代以来对北京^[20]、上海^[21]、兰州^[22]、西安^[23]、乌鲁木齐^[19,24]、京津冀^[25-26]等地区的大气混合层高度特征及对大气污染物的影响研究表明,我国大气边界层西高东低,夏季最高、冬季最低。郝巨飞等^[27]认为邢台市出现的区域重污染天气为局地气象扩散条件的变化所致,稳定的高空大气环流和地面均压场是出现环境重污染事件的背景场。吴彦等^[28]、李霞等^[1,29]、赵克明等^[9]、李景林等^[30]等对乌鲁木齐混合层厚度变化、大气气溶胶光学厚度、重污染天气分型等做了分析;赵敬国等^[8]、买买提阿布都拉·依米尔等^[13]对兰州和和田地区污染物与气象条件的关系做了分析;李二杰等^[31]对河北一次重污染过程大气逆温特性、大气稳定性、排放源等进行了

收稿日期:2021-07-29;修回日期:2021-11-24

基金项目:新疆维吾尔自治区自然基金面上项目(2020D01A99);昌吉回族自治州科技项目(2020S03);新疆气象局中亚大气科学研究基金(CASS201719)

作者简介:黄秋霞(1989—),女,高级工程师,主要从事中长期预报与生态气候研究。E-mail:406257757@qq.com

通信作者:赵克明(1983—),男,高级工程师,主要从事天气预报、环境气象预报和研究。E-mail:zhaokeming_1983@163.com

分析。

乌鲁木齐市委市政府采取多项举措,大气污染质量得到了改善,但仍存在大气污染物严重的天气,其中2020年1月5—17日出现了连续10多天的重污染天气,给市民出行造成不便,身体健康受到了威胁。故本文对此次乌鲁木齐出现的重污染天气过程及边界层特征量进行分析,以期对乌鲁木齐及其他周边城市群的重污染防治和预报提供一定的参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

目前我国环保部门衡量空气质量优劣的标准为AQI,AQI指数越大则代表空气质量越差。本文的大气污染数据来源于乌鲁木齐环境监测站逐日发布的的数据资料(<http://www.xjemc.com/>);气象数据来源于乌鲁木齐气象站2020年1月逐日08时探空资料及气温、风速、相对湿度、能见度等常规地面资料。

1.2 方法

本文采用干绝热曲线法来判定乌鲁木齐日最大混合层高度。在假设空气为干空气或未饱和湿空气的条件下,湍流混合会促使气层的温度垂直分布趋于干绝热递减率。从地面气温 T 与气压 P_0 所确定的点沿干绝热线上升,与探空的温度垂直廓线相交,交点以下便是混合层;而从地面最高气温 T_{max} 和地面气压 P_0 所确定的点沿干绝热线上升,与温度垂直廓线相交,交点便是最大混合层厚度相应的 P_m ,再由压高公式计算混合层厚度 L :

$$L = \frac{R_d}{g} \ln \frac{P_0}{P_m} \quad (1)$$

式中: $R_d=287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, P_0 和 P_m 的单位为Pa; $\bar{t} = \frac{(T_m + T_{max})}{2}$ 表示气层平均温度,单位:K; T_m 是交点相应的气温。

大气稳定度等级采用修订的帕斯奎尔(Pasquill)稳定度分级法,分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中型、较稳定和稳定六级,分别表示为A、B、C、D、E、F^[31-33]。

大气边界层通风量(Ventilation Index,VI指数)是描述大气边界层内大气对污染物输送、扩散能力的特征量,大气边界层通风量可以很好的反映局地大气边界层通风能力对空气质量的影响^[34]。其计算公式为:

$$V_i = \sum_{i=10}^{ABLH} (h_i - h_{i-1}) \times v_i \quad (2)$$

式中: i 为该时刻风速对应的高度层(km), h_i 为 i 层的高度(km), v_i 为 i 层的风速(m/s),ABLH为该时刻边界层高度(km),大气边界层白天为混合层高度,夜间为稳定边界层高度。

2 重污染天气概况及天气形势分析

2.1 天气过程概况

环境空气质量指数(AQI)技术规定,AQI>200作为重污染的统计指标。根据空气质量实况监测数据分析(图1)可知,2020年1月5—17日乌鲁木齐出现的持续性重污染天气过程,时间长达13d,其中5—13日无降水,乌鲁木齐11和13日为轻度污染和中度污染;14—16日连续3d乌鲁木齐出现降雪天气,但以微量降雪为主,15日以后乌鲁木齐转为轻度污染至中度污染,18日天气过程结束后污染等级转为良。

重污染期间乌鲁木齐的污染程度略重,重污染天气日数为7d;1月5日开始出现重污染并呈现增强趋势,11日略有回落,后期乌鲁木齐再次出现重污染天气,待冷锋东移至东疆后,污染过程结束。本次重污染过程具有持续时间长、污染重、污染物难以清除等特点,给乌鲁木齐的市民身体健康、交通运输和社会生活等带来了严重的影响。

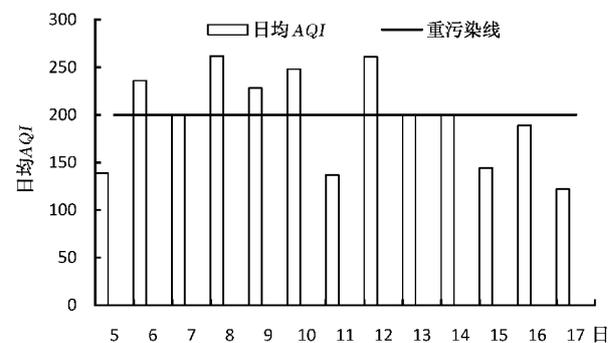


图1 2020年1月5—17日乌鲁木齐日均AQI变化

2.2 天气形势

重污染天气期间(2020年1月5—17日),新疆上空500hPa影响系统为较为稳定的纬向环流(图2a)。6—9日乌鲁木齐被稳定的乌拉尔山高压脊控制,地面处于稳定的蒙古冷高压的底后部(图2b),地面冷高压中心维持在1055hPa左右,高压左右振幅不超过5个经纬度,底层为逆温层,逆温层下部湿度条件较好,温度露点差 $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度条件较好,有利于污染物的吸湿,造成能见度下降,易形成大

范围的阴雾天气,导致污染物爆表,逆温层上部的湿度迅速减小。10—11日高空500 hPa受中亚弱短波扰动影响,冷空气较弱并未打破乌鲁木齐的污染状况,地面仍受蒙古冷高压影响,中心强度为1 052.5 hPa,9—10日底层逆温层仍存在,10日20时中低层的逆温强度逐渐减弱,距地2 300~2 700 m存在逆温层,底层大气湿度条件较好,温度露点差在1~2℃。11—14日500 hPa上空为纬向环流,影响系统转为新疆高压脊,环流形势较为稳定,地面仍为蒙古高压,中心强度为1 047.5~1 055 hPa,乌鲁木齐处于地面高压的底后部,稳定的天气形势易形成阴雾天气,11日底层逆温逐渐开始建立,13日达到最强,底层的湿度条件较好,温度露点差 ≤ 5 ℃,逆温层上部湿度较小。15—17日500 hPa的主导系统新疆高压脊减弱东移,影响系统转为西西伯利亚低槽,乌鲁木齐受冷空气影响,逆温层于15日被打破,地面高压仍为蒙古冷高压,并有一定的冷空气补充,由于天气系统弱,降雪量基本以微量为主,对污染物的沉降作用不大,能见度在850 m以下,最小能见度为77 m(17日),影响系统东移后

重污染天气才得以好转。

重污染期间大气环流形势稳定,冷空气强度较弱,地面冷高压中心强度强,位置较为稳定,底部为偏东气流,易形成回流天气,造成底层逆温现象维持时间长,进一步增强污染物的吸湿能力,能见度持续走低,长时间的阴雾天气导致污染严重,空气质量差。

3 边界层气象特征分析

3.1 最大混合层高度

混合层高度越低,大气污染物被积压程度越重,越不利于污染物扩散^[1]。本文利用干绝热曲线法计算了重污染期间日平均最大混合层高度(图3a),并与日平均PM_{2.5}质量浓度进行相关性分析。结果表明,日平均最大混合层高度与PM_{2.5}质量浓度呈现负相关,相关系数达-0.62,通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,即日最大混合层高度越高,PM_{2.5}质量浓度越低。此次重污染过程期间乌鲁木齐的日平均最大混合层高度为400 m,混合层高度较低。

逆温层对近地层空气中的水汽和污染物向上的

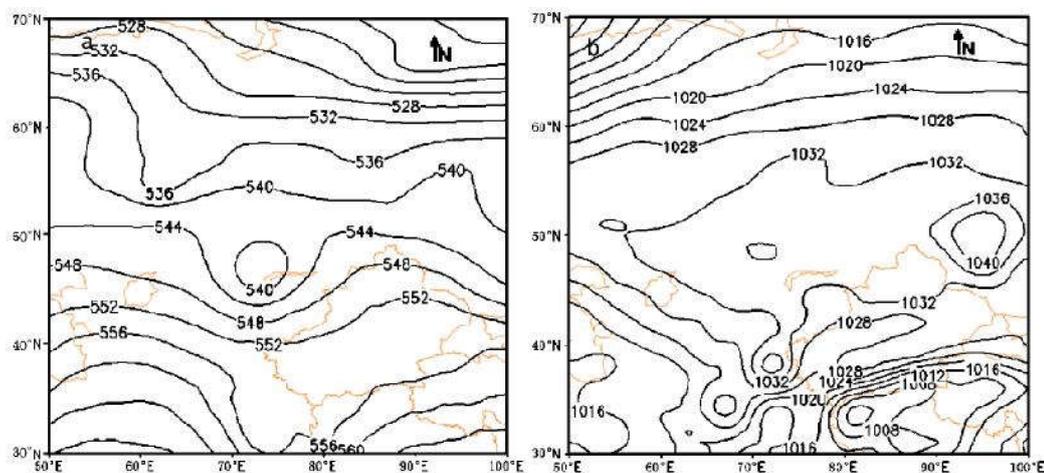


图2 2020年1月8日20时乌鲁木齐500 hPa高度场(a)和地面气压场(b)

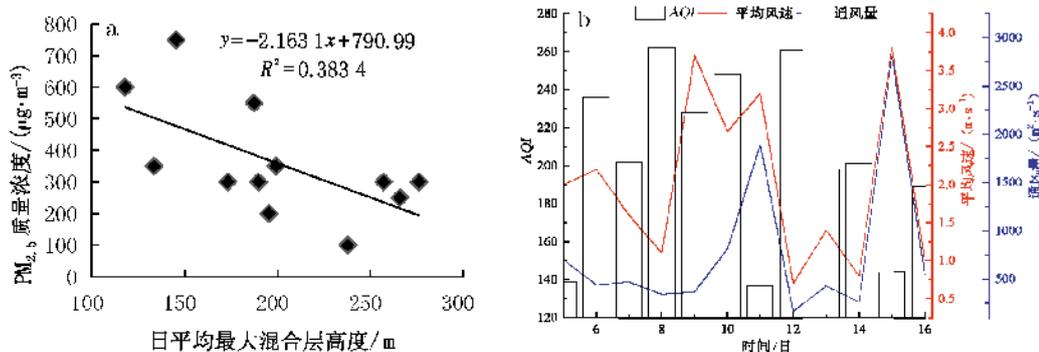


图3 干绝热法计算的乌鲁木齐日平均最大混合层高度和PM_{2.5}质量浓度的拟合(a)、逐日混合层顶至地面的平均风速与大气边界层通风量(b)

扩散起到阻挡作用,逆温层越厚影响越显著,厚的逆温层使大量的污染物聚集在对流层底部,进一步加剧大气污染的程度。通过乌鲁木齐08时的探空数据中第一层逆温厚度、逆温层温差和逆温层强度进行统计(表1),1月5—17日乌鲁木齐均出现了逆温天气,逆温概率为100%,乌鲁木齐重污染期间大气逆温现象较为严重,对大气污染物的扩散十分不利。重污染期间,乌鲁木齐日平均逆温层厚度为577.0 m,平均温度差为7.0 °C,平均强度为1.7 °C/100 m。污染过程具有逆温层厚、强度大的特点。

3.2 平均风速与边界层通风量

PM_{2.5}质量浓度的聚集、传输与近地层的风速和边界层通风量有关,较小的风速和边界层通风量不利于污染物的扩散。乌鲁木齐为典型的峡口城市,风速与PM_{2.5}质量浓度的关系更为密切。重污染期间逐日混合层顶至地面的平均风速与大气边界层通风量见图3b。重污染期间乌鲁木齐低层大气的平均风速较小,为2.2 m/s,不易于污染物的扩散;边界层通风量对局地空气质量影响显著,边界层通风量减小时,AQI呈增加趋势,随着边界层通风量的增大,AQI则呈减小趋势,局地空气质量得以改善。污染日边界层通风量在400~2 900 m²/s,极小值为166.7 m²/s,远小于非峡口城市广东佛山2013年12月的边界层通风量(1 500~5 000 m²/s)^[34]。

3.3 能见度和相对湿度

空气中的细小颗粒物的增加会导致大气透明度降低,当相对湿度增大时,细颗粒物粒径变大进而大幅度降低能见度^[31]。选取逐时的相对湿度、能见度与PM_{2.5}质量浓度进行相关分析,结果表明PM_{2.5}质量

浓度与相对湿度呈弱的正相关($R=0.18$),与能见度呈指数相关($R=-0.59$),都通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。重污染期间乌鲁木齐日平均相对湿度为76%,最大达91%,对能见度的降低有一定的作用。在高质量浓度区域($PM_{2.5}>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$),能见度对PM_{2.5}质量浓度的敏感性较差,随着PM_{2.5}质量浓度逐渐减小,能见度逐渐改善(图4b)。

4 污染源分析

Hysplit为欧拉—拉格朗日混合单粒子轨道模型,该模型可以处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源,具有较为完整的输送、扩散和沉降模式,已经被广泛地应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散研究中^[35]。

利用Hysplit后向气团轨迹模式对此次重污染的形成源进行气团轨迹模拟,按照气团轨迹传输方向和速度进行分类,从而解析污染形成源。本模式高度分别设置为100和500 m,分别代表局地近距离污染输送影响和大尺度远距离输送影响,起点设置为乌鲁木齐气象站,所使用的气象资料为NOAA全球资料同化系统(GDAS)资料,模拟出重污染时段逐日世界时00、06、12和18时4个时段后退36 h的气团轨迹,再利用聚类分析方法,将具有一定相似度的轨迹归为一类,得到具有代表性的3簇后向轨迹(图5)。结果表明,100 m高度81%气团来自局地区域间相互输送;13%来自伊犁州地区;500 m高度59%气团来自克拉玛依附近,23%的气团来自中亚的哈萨克斯坦。因此,此次污染过程以局地排放为主要形成源。

表1 乌鲁木齐08时逆温特征统计

日期	5日	6日	7日	8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日	15日	16日	17日
逆温层厚度/m	500	450	1 400	700	100	700	100	850	1 350	750	150	300	150
温度差/°C	4.6	11.4	7	6.6	5.5	12.4	3.6	15.9	13	5.1	0.2	4.6	0.8
逆温层强度/(°C/100 m)	0.9	2.5	0.5	0.9	5.5	1.8	3.6	1.9	1.0	0.7	0.1	1.53	0.53

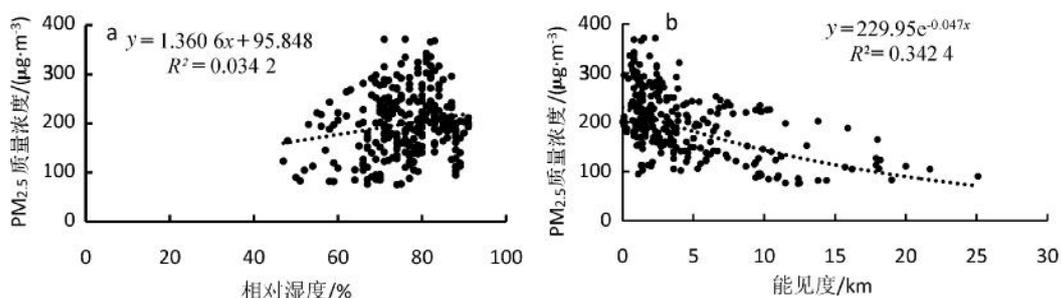


图4 相对湿度(a)、能见度(b)与PM_{2.5}质量浓度

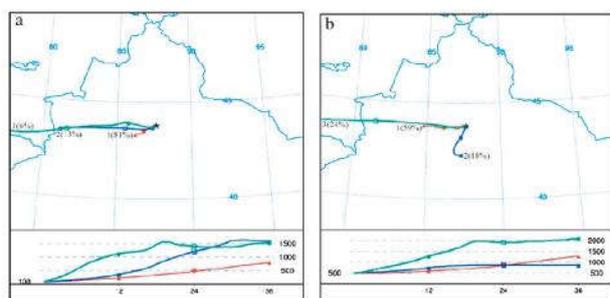


图5 1月5—17日影响乌鲁木齐100、500 m的簇聚类分析

(观测点位于43.78°N, 87.65°E)

5 结论

2020年1月5—17日乌鲁木齐出现了长达13 d的重污染天气,对市民生产生活带来不便,利用探空资料和地面常规数据对此次天气过程及边界层特征量进行分析,得出以下结论:

(1)此次重污染天气中,乌鲁木齐重度污染天气日数为7 d,重污染过程具有持续时间长、污染重的特点,稳定的大气环流形势和逆温层结为严重污染过程提供了有利条件。

(2)混合层高度与 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈负相关性,混合层高度(400.0 m)较低。逆温概率为100%,平均逆温厚度为577.0 m,平均温度差为7.0 °C,平均强度为1.7 °C/100 m,逆温层厚、强度大。低层大气的平均风速为2.2 m/s,不易于污染物的扩散。

(3)边界层通风量对局地空气质量影响较为显著,边界层通风量与 AQI 呈负相关; $PM_{2.5}$ 质量浓度与相对湿度呈弱的正相关,与能见度呈指数相关。

(4)通过Hysplit后向气团轨迹模式分析得知,此次污染过程以局地排放为主要形成源,主要为当地气象扩散条件导致。

参考文献:

[1] 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.

[2] FLEMMING G.The importance of air quality in human biometeorology[J].Int J Biometeorol,1996,39:192-196.

[3] CHENG C S Q, CAMPBELL M, LI Q, et al.A synoptic climatological approach to assess climatic impact on air quality in South-central Canada.Part I:Historical analysis [J].Water,Air,and Soil pollution,2007,182 (1-4):13-148.

[4] 连俊标,王式功,罗彬,等.四川盆地一次当地排放和沙尘输送双重影响的区域空气重污染过程研究[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(5):122-131.

[5] 姜大勝,王式功,郎咸梅,等.兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系[J].兰州大学学报(自然科学版),2011,37(4):133-139.

[6] 田伟,唐贵谦,王莉莉,等.北京秋季一次典型大气污染过程多站点分析[J].气候与环境研究,2013,8(5):595-606.

[7] 徐永清,张弛,王庆祥,等.城市近地层风特征与污染系数分析[J].气象与环境科学,2014,37(3):55-59.

[8] 赵敬国,王式功,王嘉媛,等.兰州市空气污染与气象条件关系分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2013,49(4):491-496.

[9] 赵克明,李霞,杨静.乌鲁木齐大气最大混合层厚度变化的环境响应[J].干旱区研究,2011,28(3):509-513.

[10] 曾先峰,王天琼,李印.基于损害的西安市大气污染经济损失研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(1):105-110.

[11] 姜磊,周海峰,柏玲,等.空气质量指数(AQI)的社会经济影响因素分析—基于指数衰减效应视角[J].环境科学学报,2018,38(1):390-398.

[12] 邱繁,王静,王栋成,等.济南章丘大气边界层风温场特征研究[J].气象与环境研究,2015,38(2):36-41.

[13] 买买提阿布都拉·依米尔,布帕提曼·艾拜都拉,陈天宇,等.新疆和田绿洲空气质量状况与气象条件的关系[J].干旱区研究,2020,37(1):46-57.

[14] HOLZWORTH G C .Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous united states [J].Mon Wea Rev,1964,92(5):235-242.

[15] JENKIN M E.Analysis of sources and partitioning of oxidant in the UK -part 1 :The NO X NO X math Container Loading Mathjax-dependence of annual mean concentrations of nitrogen dioxide and ozone [J].Atmos Environ,2004,38(30):5117-5129.

[16] PROSPERO J M.Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere:impact of African dust on the environment of the southeastern United States[J].Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America,1999,96(7):3396-3403.

[17] Mc GREGOR G R,Ba AMZELIS D.Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution relationships,Birmingham,United Kingdom[J].Theor Appl Climatol,1995,51:223-236.

[18] ROBERT E D,DAVID A G.A synoptic climatological analysis of air quality in the Grand Canyon National Park [J].Atmos Environ,part A.General Topics,1993,27(5):713-727.

[19] SINDOSI O A, KATSOU LIS B D, Bartzokas A.An objective definition of air mass types affecting Athens, Greece;the corresponding atmospheric pressure patterns and air pollution levels [J].Environmental Technology,2003,24(8):947-962.

[20] 尤焕苓,刘伟东,谭江瑞.北京地区平均最大混合层厚度

- 的时间变化特征[J].气象,2010,36(5):52-55.
- [21] 杨勇杰,谈建国,郑有飞,等.上海市近15 a 大气稳定度和混合层厚度的研究[J].气象科学,2006,26(5):536-541.
- [22] 王式功,姜大膀,杨德保,等.兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J].高原气象,2000,19(3):363-370.
- [23] 蔡新玲,吴素良,王繁强,等.西安市近10年大气稳定度和边界层厚度特征[J].气象科技,2007,35(6):814-817.
- [24] 李振杰,金莉莉,何清,等.乌鲁木齐大气混合层厚度和稳定度与大气污染的关系[J].干旱区地理,2019,42(3):478-491.
- [25] 沈新勇,陈逸智,郭春燕,等.京津冀地区一次雾霾过程的污染分布及来源分析[J].高原气象,2019,38(6):1332-1343.
- [26] 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,2015,36(6):1935-1943.
- [27] 郝巨飞,张功文,王晓娟,等.一次环境大气重污染过程的监测分析[J].高原气象,2017,36(5):1404-1411.
- [28] 吴彦,王健,刘晖,等.乌鲁木齐大气污染物的空间分布及地面风场效应[J].中国沙漠,2008,28(5):986-991.
- [29] 李霞,任宜勇,吴彦,等.乌鲁木齐污染物浓度和大气气溶胶光学厚度的关系[J].高原气象,2007,26(3):541-546.
- [30] 李景林,郑玉萍,刘增强.乌鲁木齐市低空温度层结与采暖期大气污染的关系[J].干旱区地理,2007,30(4):519-525.
- [31] 李二杰,刘晓慧,李洋,等.一次重污染过程及其边界层气象特征量分析[J].干旱气象,2015,33(5):856-860.
- [32] 刘强.大气污染物扩散中稳定度判定方法概述[J].干旱气象,2011,29(3):355-361.
- [33] 廖国莲.大气混合层厚度的计算方法及影响因子[J].中山大学研究生学刊(自然科学、医学版),2005,26(4):66-73.
- [34] 吴蒙,罗云,吴兑,等.佛山地区干季边界层垂直风温结构对空气质量的影响[J].环境科学学报,2017,37(12):4458-4466.
- [35] 王华,轩春怡,吴方,等.北京两次重污染沙尘天气成因及动力传输特征的对比研究[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(4):18-26.

Boundary Layer Characteristics of a Continuous Heavy Pollution in Urumqi

HUANG Qiuxia¹, ZHAO Keming², Aikedai Salamu³, LIU Hongying¹,
Erkejiang Hoyhazi¹

(1.Changji Meteorological Bureau, Changji 831100, China;

2.Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China;

3.Meteorological Bureau of Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture, Artux 845350, China)

Abstract In view of the heavy pollution weather in Urumqi from January 5 to 17, 2020, the maximum mixing layer height, average wind speed, inversion characteristics, boundary layer ventilation volume, visibility and relative humidity were calculated by using the sounding station and ground conventional data of Urumqi, and the correlation between the maximum mixing layer height, visibility, relative humidity and PM_{2.5} concentration were analyzed. The source of pollution was analyzed by Hysplit model. The results showed that the atmospheric stratification was relatively stable in this heavy pollution weather process, and the main causes of heavy pollution were the thickness of inversion layer (average 577 m), high intensity (average 1.7 °C/100 m) and low mixed layer height (average 400 m). The influence of boundary layer ventilation on local air quality was significant. PM_{2.5} concentration had a weak positive correlation with relative humidity and an exponential correlation with visibility. The analysis of Hysplit model showed that local emission was the main source of the pollution process.

Key words maximum mixing layer height; boundary layer ventilation volume; relative humidity; visibility; backward air mass trajectory model