

文章编号: 2096-1618(2023)04-0484-08

临汾地区持续性重污染天气过程成因分析

卫甜¹, 丁亨²

(1. 中国人民解放军 63729 部队, 山西 太原 030000; 2. 临汾市气象局, 山西 临汾 041000)

摘要:利用常规气象资料、NECP 再分析资料以及临汾市环境监测中心站的污染物浓度资料,对 2019 年 1 月 2–14 日临汾市区一次持续性重污染天气过程特征及气象成因进行分析,并运用 HYSPLIT-4 后向轨迹模式结合污染物排放清单数据,分析污染过程中的气流输送情况。结果表明:(1)此次持续性重污染天气过程范围广、持续时间长、污染高、强度大,临汾空气污染指数 AQI 峰值达 434,PM_{2.5}/PM₁₀ 值维持在 80% 左右,细粒子污染明显;(2)重污染期间,高空环流平直,多短波活动;中低层风速小,多弱辐合出现;地面上高压底部弱气压场控制,环流形势为重污染天气的发展维持提供有利气象条件;(3)重污染期间市逆温层层数多且逆温深厚,逆温层厚度与逆温层数成反比,有两层逆温且第一层厚度较厚的层结最不利于空气污染物扩散清除;(4)物理量场上,高层风速减小、中层风场辐合、850 hPa 以下以南风为主的小风天气及水汽场上一定范围内的较大湿度有利于颗粒物的累积和吸湿增长;交替出现的正负弱涡度平流随高度的增加或减小所引起的弱垂直运动对污染物的扩散清除不利,其中一定强度的正涡度平流随高度增加引起的上升运动会加剧污染物的水平和垂直输送,使污染严重且层次深厚;(5)污染期间,临汾主要受两条不同的偏西北路、偏西、偏东路 4 种输送气流的影响;其中,西北路出现频率最大,西路所携带的 SO₂ 多。

关键词:持续性重污染;气象成因;气流输送

中图分类号:X51

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.04.017

0 引言

近年来,中国经济稳中向好发展,但污染也日益严重^[1]。重污染天气是中国北方地区冬半年最主要的灾害天气之一。重污染天气的出现,常伴有低能见度现象,给城市交通、工业生产、农牧业生产和人们的健康带来很多不利影响^[2]。

气象工作者利用多种资料、应用多种方法,针对重污染事件的形成机制进行了深入的分析和讨论。特殊的天气条件是形成重污染的重要因素。任阵海等^[3]认为稳定的天气形势是造成局地重污染的重要条件。唐宜西等^[4]对 2013 年 1 月华北地区大范围持续污染天气进行研究,结果表明持续性污染是在弱天气系统稳定维持、无明显冷空气活动、大气层结稳定、湿度大的天气背景和气象条件下发生的。张人禾等^[5]提出在重污染天气中,超过 2/3 的个例是由气象因子所造成的。蔡新玲等^[6]分析了西安 PM₁₀ 污染特征及持续重污染过程,指出重污染是在 500 hPa 平直西风气流下,地面均压系统缓慢东移,边界层内出现稳定的大气层结以及近地面产生小尺度局地环流体所形成。

大气污染具有地域性特点,污染物除来自本地排放源外,一定程度上还受气流输送夹带路途中的污染物对

受点地区的影响^[7]。Bagtasa G 等^[8]分析了 2017 年 3 月菲律宾北部细颗粒物质量浓度升高事件,结果表明,该事件是由来自东亚北部的人为污染物在地表的远距离输送和印度支那的生物质燃烧排放造成的。王郭臣等^[9–10]分析了北京、天津的污染物输送特征,发现天津、北京污染物潜在源区受不同方向气流轨迹的影响差异显著。冬、春和秋季来自内陆的西北气流是天津 PM₁₀ 和 NO₂ 日均浓度最高值对应的气流轨迹;夏季来自西北和东南方向的气流是影响天津的主要气流轨迹。北京 PM_{2.5} 浓度的主要气流轨迹是西北方向气流。

近年来,污染天气频发,临汾作为大气污染最严重的城市之一,高频率的重污染天气已影响到人们的健康和正常生产生活,备受当地政府及各界人士的关注。2019 年 1 月中上旬临汾市区出现了持续性重污染过程,其中 8 天为严重污染天气。本文通过对重污染天气个例的分析,探讨重污染天气特征及形成机制,有利于提高重污染天气的预测水平。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文所用大气污染物浓度数据来自临汾市环境监测中心空气质量监测站的主要污染物(PM₁₀、SO₂、NO₂

等)、空气污染指数 AQI 的逐时浓度资料及市环境监测中心 LGJ-01 型气溶胶激光雷达观测资料;气象资料包括 2019 年 1 月 2–14 日临汾市自动观测站的地面、高空气象观测资料,常规 Micaps 数据资料以及同时段美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料,NCEP 资料空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为 6 h,垂直层数为 26 层,其中温度、垂直速度、风等物理量用于计算大气的涡度等情况;排放源清单数据是来自清华大学的东亚排放单 MIX,基准年为 2010 年,分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,排放清单中包含大气中主要污染物,并将人为排放源分为工业、电厂排放、居民废弃、汽车尾气以及农业 5 种类型,该排放清单可以展示不同地区污染物的分布情况,从而为分析受点污染物的输送情况提供有数据支持。

1.2 研究方法

天气过程分析采用天气学诊断法,气流输送分析运用美国 NOAA 空气资源实验室研制的 HYSPLIT-4 模式。该模式主要采用的大气扩散模式是欧拉和拉格朗日混合型模式,平流和扩散的处理方法均采用拉格朗日法,浓度计算用的是欧拉方法。HYSPLIT 能够较好地反映空气团在一段时间内的空间运行轨迹,目前被国内外广泛应用于分析一地污染物的输送来源及其传输路径的确定等^[11–13]。

根据后推得到多条气流轨迹后,用 Ward's 方差法配合 Angle Distance 算法根据气流的空间相似度(即传输速度和方向)对气流输送轨迹进行聚类分组,使组内各气流轨迹间的差异达到最小而不同组间的差异达到最大,从而得到不同输送类型的气流路径^[14]。把不同的轨迹与污染物质量浓度的时间点一一对应,可得到不同类型轨迹所携带的污染浓度情况^[15]。

2 天气实况

当城市空气质量的污染级别达到重度及以上(AQI 超过 200)的污染日为一个重污染日,连续 3 d 及以上出现重污染日为一次持续重污染过程。2019 年 1 月 2–14 日,临汾市出现持续性重污染天气,此次重污染过程范围广、持续时间长、污染高、强度大。根据临汾市环保局提供的空气污染指数 AQI 时间演变(图 1)看出,曲线呈三峰,1 月 1 日临汾的 AQI 186,之后污染指数不断增加,2 日开始达重度污染,并呈上升的趋势,临汾 AQI 在 5 日达第一峰(417),6 日略有所降,7 日再次达极值(434),之后在 12 日达第三次极值

(356),期间除 9 日 AQI(190)出现短暂中度污染的波谷外,其余时间均维持在较高水平。

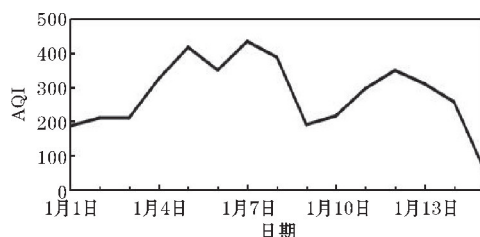


图1 2019年1月1日–15日临汾市AQI指数逐日变化

从 PM 的变化来看(图 2),整个过程(1 月 2–14 日)临汾的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度变化一致,也呈三峰,峰值分别与 AQI 三极值对应,最大 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ ($485 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $401 \mu g \cdot m^{-3}$)出现在 7 日,9 日前的污染强度明显大于后期。整个过程 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值比较平稳,一直维持在 80% 左右,细粒子污染明显。到 15 日受强冷空气影响,污染物浓度值迅速下降, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值也降至 20% 以下,说明受大风天气影响,细粒子消散,但风吹起的沙尘比例相对增多。

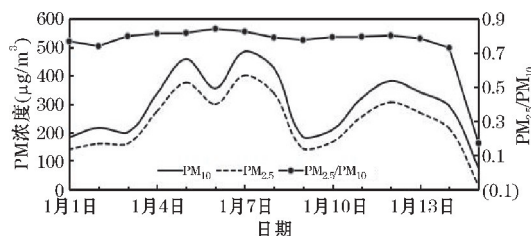


图2 2019年1月1–15日临汾市PM浓度时间序列

3 持续性重污染天气的环流形势及维持机制

污染物排放量和大气对污染物的稀释扩散能力是影响城市大气环境质量的两个主要因子。在污染物排放量一定的情况下,空气污染与气象条件关系密切,天气条件从根本上决定了气象要素的分布和变化,从而决定了大气的稳定度及其扩散能力,即在一定程度上决定了区域污染物浓度的高低变化。

3.1 大尺度天气形势

分析 2019 年 1 月持续性重污染天气期间天气形势(图 3),1 月 9 日前后的天气具有明显相似性。500 hPa 形势场上,9 日之前高纬地区低值系统弱,范围小,影响亚洲的冷空气势力整体偏弱, $25^\circ N \sim 45^\circ N$ 地区环流较平直,多短波槽活动;9 日 08 时,北支弱槽在东移过程中与南支波动同相位叠加,移至河套地区

西部,临汾处于高空槽前。850 hPa临汾地区风速较小,多出现弱辐合,使污染物在本地积累;至9日临汾转为偏南风,并有偏南风速辐合,使南风输送的水汽在临汾地区积累,临汾湿度加大,配合高空系统,给当地带来弱降水,弱降水的沉降作用使临汾的污染指数降至200以下,出现重污染间歇;10日开始,中高纬形成

两涡一脊,乌拉尔山高脊形成,使冷源地的冷空气不断向偏东的低涡中输送,冷空气在此不断积累,此时中纬度地区偏西风控制,无明显冷空气影响临汾,使当地污染天气再次发展,累积的冷空气于14日随东移加强的低涡南下影响山西省,结束了临汾持续性重污染天气。

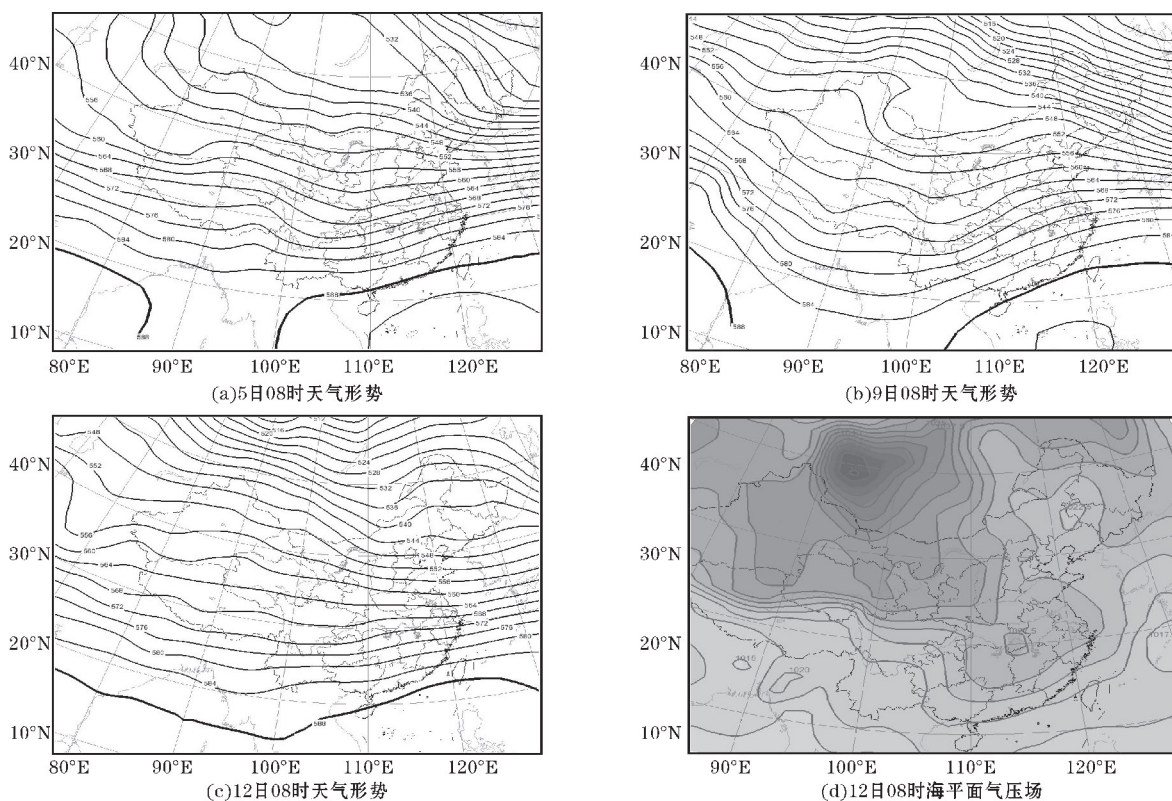


图3 500 hPa 天气形势图及海平面气压场

海平面上,蒙古高压稳定维持,临汾处高压底前部弱气压场中,地面风速较小,不利于污染物的扩散清除。8日蒙古冷高压分裂出一小高压东移南下,于9日与高原东部东移至河套的低压倒槽在陕西与山西交界处形成冷暖空气对峙,冷暖空气交汇有利9日弱降雪形成,但由于冷空气弱,持续时间短,对污染的清除作用有限;之后小高压减弱,临汾再次处弱气压场中,蒙古西部高压则不断发展壮大,于14日开始东移影响临汾,为当地带来大风天气,有效降低了AQI,结束了临汾的持续性严重污染天气。

3.2 大气逆温层特征

大气中逆温层的出现,使大气稳定性增强,能阻碍空气垂直运动的发展。逆温层下常聚集着大量的烟、尘、水汽凝结物等,造成大气污染同时影响天气变化。

临汾位于山西南部,根据气象探空站的分布及重污染时间段,选取临汾上游探空资料进行大气层结特征分析(图4)。连续重污染天气发生期间500 hPa高

度层以下每日都有1~2层甚至以上多层逆温,出现2层以上逆温的占67%,其中第一层逆温层底高平均810 hPa,第一层顶高773 hPa,平均厚度为37.2 hPa,厚度 ≥ 20 hPa的比例占67%;第二层逆温平均厚度为28.8 hPa,有两层逆温的重污染天气日的第一层逆温厚度基本比只有一层逆温的重污染天气日薄。1月6日、8日及11日出现了三层逆温,其第一层、第二层逆温的厚度及高度明显比其他日低很多,且对应的空气污染指数出现极小值,逆温层厚度与逆温层数成反比,且弱低的逆温层相对较利于空气污染物的扩散;出现AQI极大值的5日、7日、12日的第一层逆温层厚度均在50 hPa以上,最大甚至达117 hPa,明显比其他大部分时段要厚一些;第二层的厚度则基本在20~30 hPa,相比较其他时段厚度不明显。其他出现第一层逆温层厚度 > 50 hPa的6日、8日及10日只有一层逆温层,对应的AQI值相对比较小,说明此过程中有两层逆温层且第一层较厚的是最不利空气污染物扩散清除的大气层结。

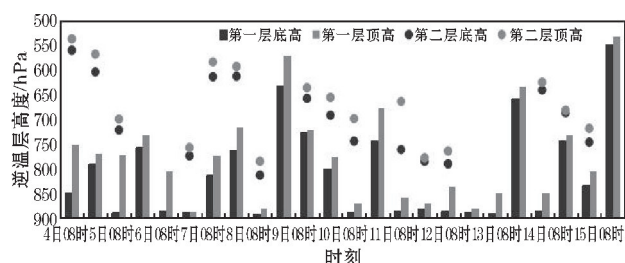


图4 2019年1月4-15日连续重污染天气逆温层分布特征

根据 Fernald 方法反演重污染期间临汾市区 LGJ-01 型气溶胶激光雷达观测资料得到相应的消光系数 (图 5)。从气溶胶消光系数最大递减率所在高度确定的大气边界层高度来看,此次污染期间,临汾市区的边界层高度明显分为两段,3 日开始边界层高度明显下降,8 日之前边界层高度均处于 0.8 km 以下,8 日边界层高度达最低,约 0.3 km 左右,9-10 日受弱冷空气影响,边界层高度出现明显上升,之后便又迅速下降至 0.6 km 左右,到 15 日强冷空气南下,临汾市边界层高度才明显上升。

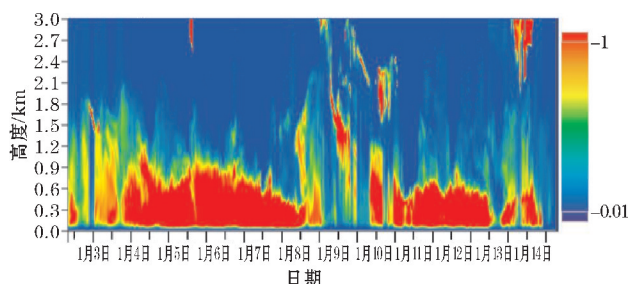


图5 2019年1月2-14日临汾市激光雷达消光系数

3.3 物理量条件

3.3.1 风场及湿度场垂直分布特征

图 6 给出重污染过程 4-15 日临汾上空水平风和相对湿度的时间-高度剖面。可看出,持续重污染期间,水平风场在 500 hPa 以上以偏西风为主,并于 6 日、8-9 日及 13 日出现明显的风速增大的现象,且 8-9 日风速明显大于重污染期间的其他时间,高层风速大增时段与 AQI 出现短暂低值时间相对应。

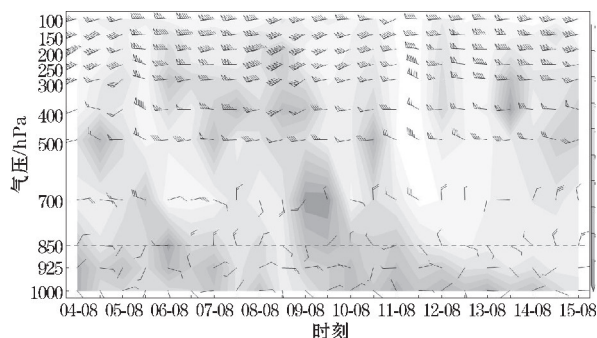


图6 2019年1月4-15日临汾地区风场和相对湿度
时间-高度剖面(阴影为相对湿度)

700 hPa 高度上,5、7、9 及 12 日有明显的风向辐合,其中除 9 日对应有大于 60% 的大湿度外,其余时段湿度均较小。中层风场辐合时段与空气污染指数极大值时段基本对应。低层 850 hPa 以下风场上除 9 日 08 时前后有 6 m/s 左右的偏东风以外,其余时段风速均较小,大都为 2 m/s 甚至更小,且风向杂乱,近地层以偏南风为主,小风天气条件一方面不利于污染物的扩散清除,另一方面有利于南边弱暖湿空气和污染物向临汾输送,使污染物和水汽等在近地面不断聚集。14 日夜間由于冷空气入侵,带来的辐散下沉运动使中低层产生了较强的偏北风,空气污染扩散条件明显转好,污染物得到有效清除,临汾市空气污染指数也降至 100 以下,持续重污染天气过程结束。

水汽场上,850 hPa 以下低层湿度均维持在 40%~50%,5 日夜間、7 日、9 日及 11-12 日出现水汽大值中心,这与中低层风场的辐合相对应,说明弱风场辐合有利于水汽在临汾累积,在一定范围内较大的湿度有利于颗粒物的吸湿增长,故水汽较大值时刻与污染较严重。其中 9 日湿度中心值达 80%,湿层也较其他时段明显深厚,配合中低层较好的动力条件,9 日出现弱降水,在降水的湿沉降作用下,空气污染物有所减少,临汾市 AQI 降至 200 以下,出现短暂的空气污染指数极小值。14 日开始,配合高空下沉气流低层湿度减小至 30% 以下,水汽和风场条件不利污染物的累积。

3.3.2 涡度平流及散度变化特征

涡度平流是涡度水平分布不均引起的涡度局地变化。涡度平流随高度的增加和减弱,可以反映地面系统的发展演变,从而有利判断近地层运动的方向和强弱。

临汾地区涡度平流垂直分布的时间变化图(图 7),重污染期间 700 hPa 以下中低层涡度平流很弱,基本为零。5 日、10 日大气中高层出现较强的负涡度平流中心,7 日和 9 日高空为正涡度平流中心,其中 9 日的正涡度明显大很多,其余时间高空正、负涡度平流交替出现,且都比较小。根据 ω 方程,涡度平流随高度增加,有上升运动;反之有下沉运动。5 日、10 日临汾上空涡度平流随高度的增加而减小,为下沉运动、下沉增温加大大气层结稳定度,使空气中污染颗粒物在边界层内悬浮积累,由于 5 日下沉运动较强,故大气层结更稳定,逆温层也比较厚,使污染物积累明显。7 日、9 日临汾市上空涡度平流随高度的增加而增加,有上升运动,上升运动可以将大气边界层内污染物向高空输送,但由于 7 日上升运动较弱,加之低层弱偏南风的辐合和湿度有所加大,一方面湿度增加有利于颗粒物吸湿增长,另一方面根据质量连续定律,气层内出现污染

物的垂直输送,使当地低层颗粒物浓度减小,为补充当地低层空气质量的损失,由其他地方空气进行补偿,这样周围污染物不断向当地输送,使7日污染严重且污染层次深厚;9日上升运动较强,加之低层较强偏东风输送冷空气和水汽,使大气层结不稳定、水汽条件也较好,从而出现弱降水,临汾市的严重污染天气因此得到短暂缓解。其他时段交替出现正负弱涡度平流随高度增加和减小,对应出现弱上升和下沉运动,这种弱垂直运动对污染物的扩散清除都不利,因此临汾市重污染一直持续,直至14日后强冷空气过境,低层风速加大,空气污染扩散条件明显转好,临汾市的重污染天气才结束。

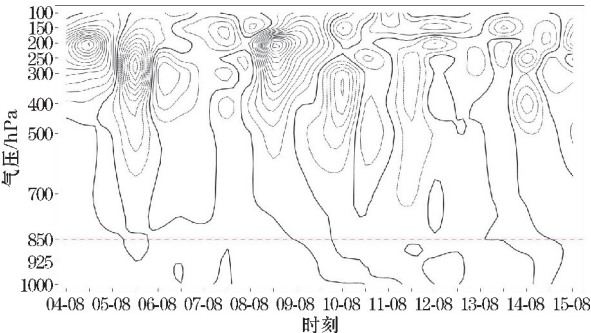


图7 2019年1月4-15日临汾地区涡度平流时间-高度剖面

4 气流输送的影响

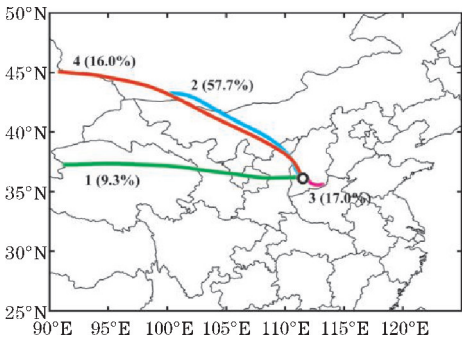
重污染期间的污染粒子除了本地源的贡献外,同时也包含不同距离输送下从上游地区输送的贡献,本地和输送来的污染物在静稳天气形势控制下由于没有扩散稀释通道而不断的累积升高,从而形成污染重、持续时间长的污染天气。从污染粒子输送角度对污染天气成因进行分析和讨论,有利于更全面地了解污染的成因。

采用 HYSPLIT-4 后向轨迹模式对临汾地区重污染期间进行逐小时的72 h后向轨迹计算,并聚类分析所得到的轨迹,从而得出污染期间影响临汾地区的主要输送气流类型的水平和垂直方向的输送特征。文中以临汾市城区(36.08°N、111.5°E)为轨迹起始点,计算时段为2019年1月1-14日。

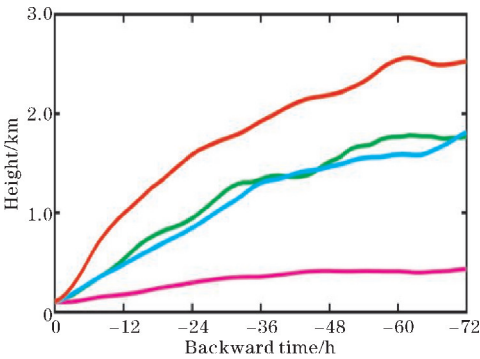
4.1 后向轨迹聚类分析结果

后向轨迹的聚类分析结果(图8a)显示,1月4-15日重污染期间,临汾地区主要受到偏西北路(轨迹2、4)、偏西路(轨迹1)及偏东路(轨迹3)4种输送气流的影响。图中轨迹的分布情况及其经过地方表示的是该空气团在到达临汾市之前所移动的方向和路径。可

通过气流轨迹来判断空气团的移动情况,其中较长的气流轨迹上气团的移动速度较快,短气流轨迹上气团的移动速度相对较慢。4条气流输送路径中偏西路径(轨迹1)出现概率最小,为9.3%,轨迹1的气流72 h前从青海东部出发经甘肃、银川过陕西后进入山西境内直接落入临汾地区,其输送距离较长,气流移送速度较快;西北路径有两条气流带,其中轨迹4出现频率为16%,为第二少,而其输送距离最远,移动最快,72 h前气流从北疆出发,途经整个内蒙西部过陕西北部从吕梁进入山西后到达临汾;东路轨迹3输送距离最短,气流72 h仅仅从山西的东南部晋城输送至临汾地区,移动非常缓慢,此路径出现概率为17%,出现概率排第二;西北路轨迹2出现概率高达57.7%,此路径与轨迹4基本重合,只是输送距离较路径4略短,气流72 h前起源于内蒙古西部边界,经内蒙古西部、山西北部从吕梁进入山西境内而到达临汾地区。



(a) 水平方向气流输送特征



(b) 垂直方向气流输送特征

图8 2019年1月4-15日临汾地区72 h后向轨迹

不同轨迹气流在输送过程中会将途经地的一些污染粒子携带至下游地区,且对流层中污染物一般在边界层内浓度较高,因此气流在输送过程中,当轨迹路径一致时,气流输送高度越低,越容易将湍流层内粒子携带至下游地区。4路轨迹在输送过程中均越接近临汾地区输送距离越短,说明接近临汾地区时风速减小,出现辐合,且4类气流越接近临汾高度不断下降,出现气流的下沉,使污染粒子累积。从轨迹垂直方向的分布

(图 8b)看到轨迹 4 的整个气流输送高度均较高,其 72 h 前起始高度达 2.5 km 左右,气流输送过程中高度逐渐降低,12 h 内下降高度最为明显;轨迹 1 和 2 上气流 72 h 前高度基本重合,位于 1.8 km 左右高度,输送过程中轨迹 1 的气流略高于轨迹 2;轨迹 3 输送距离最短,且输送高度最低,输送高度位于 0.5 km 之下,这类轨迹气流极易将地面排放出的污染物携带至受点地区,从而影响当地的空气质量。

4.2 不同聚类气流轨迹对污染天气的影响

2019 年 1 月 4–15 日临汾市重污染过程期间,影响临汾的 4 种气流的输送距离、输送高度及速度均存在明显差异,故其对临汾主要污染粒子的影响也应存在很大差异。将重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 等逐小时浓度数据与气流轨迹进行时间上的相互对应,得到不同气流到达受点时污染浓度,然后根据聚类分析的分

型结果,对每类型轨迹上的污染粒子做浓度平均,计算得出每类轨迹对应的临汾主要粒子质量浓度,再配合不同排放源的空间分布,进一步分析每类气流对当地污染的影响。

图 9 为根据东亚地区排放源清单而绘制的污染物分布情况。根据排放源的分布看到,各污染物高值分布区域类似,在中国华北东部的京津冀地区、汾渭平原、西南地区的成都东部附近及华东东部的浙江上海一带三类污染物的质量浓度均很高,在宁夏北部至内蒙西南部地区也存在一狭小的污染大值区。根据填色深浅可知,京津冀、汾渭平原、华东东部的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 的质量浓度要明显高于 NO_2 的;成都东部污染源区的 SO_2 含量较少,而 NO_2 含量明显偏高;宁夏至内蒙狭长地带则 $\text{PM}_{2.5}$ 含量明显高于其余俩。临汾所处的汾渭地区本地排放就很强大,但也存在有不同轨迹带来的外部污染物的积累。

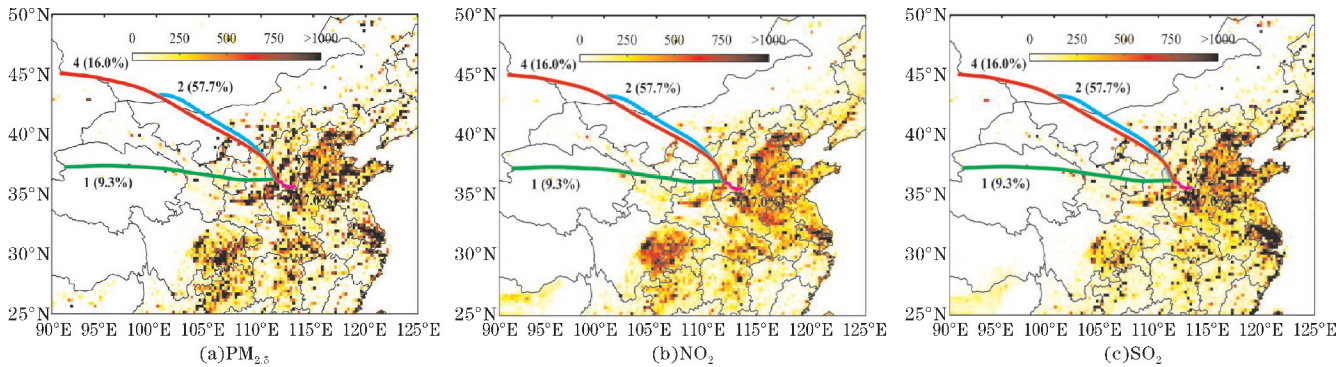


图 9 2019 年 1 月 4–15 日霾污染期间临汾地区四类聚类分析轨迹及 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 、 SO_2 排放源分布

基于排放源分布图的气流轨迹得出,气流轨迹 3 虽然所起步点的污染物浓度值均很大,但其输送的路径最短,所经过的源区相对也少;轨迹 2 和 4 均经过了内蒙古西南部和陕西北部的污染物源区;西路轨迹 1

在气流东移过程中,移动路径较长,其主要是经过了甘肃中部、宁夏南部及陕西的污染源区,所以轨迹 3 相对经历的源区最多。

表 1 后向轨迹聚类结果及其对应的污染粒子质量浓度

轨迹类型	轨迹数目/条	占比/%	污染物浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$					
			SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃	PM _{2.5}
第 1 类	29	9.2	120.4	78.4	343.9	3.7	11.1	284.8
第 2 类	180	57.7	97.1	76.8	291.5	3.4	15.8	233.6
第 3 类	53	17.0	104.8	76.7	340.2	4.3	8.6	268.9
第 4 类	50	16.0	109.0	94.4	378.6	5.0	14.1	299.4

表 1 从临汾市持续性重污染期间后向轨迹类型及其对应的大气污染物质量浓度定量的给出不同轨迹所携带污染浓度的大小。2019 年 1 月中上旬临汾持续重污染天气期间主要污染物 SO_2 在 4 条轨迹中的质量浓度介于 $97.1\sim120.4\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中轨迹 2 所对应的 SO_2 质量浓度最低,其浓度值为 $97.1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,而轨迹 1

的 SO_2 浓度含量最高,达 $120.4\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,轨迹 1 和 2 的高度虽然相似,但是轨迹 1 所途径甘肃、陕西等 SO_2 含量较大区的距离长,因此含量最高。

NO_2 在 4 条轨迹中的排放源强介于 $76.7\sim94.4\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中轨迹 3 所对应的 NO_2 质量浓度较低,其浓度值为 $76.7\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;轨迹 4 的 NO_2 浓度最高,达

$94.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。4条聚类轨迹中 $\text{PM}_{2.5}$ 含量均在 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,其中轨迹2所对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最低,其浓度值为 $233.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,轨迹4所对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度最高,其浓度值为 $299.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;

PM_{10} 在每条气流轨迹各污染物中的含量均是最高的,其排放源强度高于 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放强度,这是因为 PM_{10} 定义为直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物,其中已经包含粒子直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的细粒子。各轨迹中 PM_{10} 的含量基本达 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,轨迹2中 PM_{10} 浓度最低,为 $291.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 轨迹4的 PM_{10} 含量最高,达 $378.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

轨迹4与轨迹2相似路径,且高度最高,但轨迹4的除了 SO_2 含量略低于轨迹1外,其 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 的含量最各轨迹中均最高,这是由于颗粒物的远距离输送主要发生在自由对流层,而区域输送则主要发生在边界层内,因此移动快、高度高的气团不一定对应低浓度的污染物浓度值,因此其各种污染物含量均较轨迹2要多;轨迹3虽然高度最低,但其输送距离最短,所经源区也少,因此污染含量并不是高。

5 结论

(1)此次持续性重污染过程范围广、持续时间长(11天)、污染高、强度大(8天为严重污染)。临汾空气污染指数呈三峰结构,最大峰值434,整个过程 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 一直维持在80%左右,细粒子污染明显。

(2)重污染天气期间,500 hPa 形势场上,前期高纬地区低值系统弱,范围小, $25^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$ 地区环流较平直,多短波槽活动,影响临汾的冷空气势力整体很弱;850 hPa 临汾风速较小,多弱辐合;海平面场上,临汾处高压底前部弱气压场中,地面风速较小,环流形势不利于污染物的扩散清除。

(3)重污染期间500 hPa 高度层以下每日都有一层以上逆温,临汾第一层、第二层逆温层平均厚度分别为37.2 hPa和28.8 hPa,逆温层深厚;整个过程逆温层厚度与逆温层数成反比,有两层逆温且第一层厚度较厚的是最不利于空气污染物扩散清除的大气层结。

(4)物理量场上,高层风速减小、中层风场辐合、850 hPa 以下以南风为主方向的小风天气条件一方面不利于空气污染的扩散清除,另一方面有利弱暖湿空气和污染物向临汾输送;水汽场上一定范围内的较大湿度有利颗粒物的吸湿增长;涡度平流场上,交替出现的正负弱涡度平流随高度的增加或减小所引起的弱上升、下沉运动对污染物的扩散清除均不利,其中一定强度的上升运动会加剧污染物的水平和垂直输送,使得

污染严重且层次深厚。

(5)污染期间,临汾主要受两条不同偏西北路、偏西及偏东路共4种气流的影响。其中源于蒙古西部的西北路径出现概率最高,达57.7%;4路轨迹在输送过程中越接近临汾地区输送距离越短,输送高度越低,气流的下沉辐合,有利于污染物的累积。不同轨迹携带的污染粒子差别较大,轨迹1中 SO_2 含量最多,其对临汾 SO_2 的累积贡献比较大;轨迹2虽出现频率最多,但其各污染源强最小;轨迹4中颗粒物及 NO_2 含量最多,污染期间对临汾地区的颗粒物和 NO_2 贡献最多。

(6)临汾市区处吕梁山和太行山间的盆地,特殊地形易于形成稳定层结和污染物累积是临汾市持续性重污染天气产生不可忽视的重要因素。

致谢:感谢临汾市农业科技与社会发展项目(1910)对本文的资助

参考文献:

- [1] 王敏,黄滢. 中国环境污染与经济增长[J]. 经济学,2015,14(2):557-578.
- [2] 肖悦,田永中,许文轩,等. 中国城市大气污染特征及社会经济影响分析[J]. 生态环境学报,2018,27(3):518-526.
- [3] 任阵海,苏福庆,高庆先,等. 边界层内大气排放物形成重污染背景解析[J]. 大气科学,2005,29(1):57-63.
- [4] 唐宜西,张小玲,熊亚军,等. 北京一次持续霾天气过程气象特征分析[J]. 气象与环境学报. 2013,29(5):12-19.
- [5] 张人禾,李强,张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学:地球科学,2014(1):27-36.
- [6] 蔡新玲,王繁强,姜创业,等. 西安城市 PM_{10} 污染特征及持续重污染过程分析[J]. 气象科技,2008,36(6):697-700.
- [7] 苏彬彬,许据洋,张若宇,等. 区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响[J]. 环境科学,2014,35(8):2871-2877.
- [8] Bagtasa G, Cayetano M G, Chung-Shin Yuan, et al. Long-range transport of aerosols from East and Southeast Asia to northern Philippines and its direct radiative forcing effect[J]. Atmosphere Environment, 2019, 218: 117.
- [9] 王郭臣,王珏,信玉洁,等. 天津 PM_{10} 和 NO_2 输送路径及潜在源区研究[J]. 中国环境科学,2014,34(12):3009-3016.

- [10] 王郭臣,王东启,陈振楼. 北京冬季严重污染过程的 $PM_{2.5}$ 污染特征和输送路径及潜在源区[J]. 中国环境科学,2016,36(7):1931-1937.
- [11] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT-4 modeling system for trajectories[J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, 47 (4): 295-308.
- [12] Draxler R R, Stunder B, Rolph G, et al. HYSPLIT4 users guide [EB/OL]. Maryland: Silver Spring,2018-05-23.
- [13] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT-4 modeling system[EB/OL]. Maryland: SilverSpring,2018-05-23.
- [14] Borger, Lumbreras J, Vardoulakis S, et al. Analysis of long-range transport influences on urban PM using two-stage atmospheric trajectory clusters [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41 (21): 4434-4450.
- [15] 王茜. 利用轨迹模式研究上海大气污染的输送来源[J]. 环境科学研究,2013,26(4):357-363.

Cause Analysis of a Persistent Heavy Pollution Weather in Linfen Area

WEI Tian¹, DING Heng²

(1. NO. 63729 Troops of PLA, Taiyuan 030000, China; 2. Linfen Meteorological Bureau in Shanxi Province, Linfen 041000, China)

Abstract: Based on conventional meteorological data, NECP reanalysis data, and pollutant concentration data from Linfen Environmental Protection Bureau, this paper analyzes the weather characteristics and meteorological causes of a persistent heavy pollution that took place in Linfen from January 2 to 14, 2019. Combined with pollutant discharge inventory data, HYSPLIT4 backward trajectory model was used to analyze the air transport. The results are as follows: (1) This pollution weather is characterized by wide range, long duration and high pollution intensity. The peak value of Linfen's air pollution index AQI reached 434. The ratio of $PM_{2.5}/PM_{10}$ remains around 80%, so it's clearly fine particulates contamination. (2) During the period of continuous pollution weather, the upper circulation is straight and short-wave activity is frequent; the wind speed in the middle and lower layers is small, and there are many weak convergence. On the sea level pressure field, Linfen is in the weak pressure field that at the bottom of the high pressure which provides favourable meteorological conditions for the development and maintenance of heavy pollution weather. (3) During the period of pollution, the thickness of the inversion layer is inversely proportional to the number of layers. The stratification with two inversion layers and thicker thickness of the first layer is the most unfavorable to the diffusion and removal of air pollutants. (4) Physically, the following conditions are conducive to the accumulation of particulate matter and the increase of moisture absorption: decrease of wind speed in the upper layer, convergence of mid-level wind, light windy weather dominated by the south wind in low level, high humidity in a certain range, weak vertical motion and so on. The upward movement caused by positive vorticity advection of a certain intensity with the increase of height could intensify the horizontal and vertical transport of pollutants, resulting in serious and deep pollution levels. (5) During the period of pollution, Linfen is mainly affected by four kinds of conveying air flow, they are two different northwest roads, west road and east road; Among them, the northwest road appeared the most frequently, and the west road carried more SO_2 .

Keywords: persistent heavy pollution; causes of weather; pneumatic conveying