

徐娟娟,郝丽,王百灵,等. 关中一次重污染天气过程气象特征分析[J]. 陕西气象,2018(4):1-6.

文章编号:1006-4354(2018)04-0001-06

关中一次重污染天气过程气象特征分析

徐娟娟¹,郝 丽²,王百灵³,樊 超⁴,娄盼星¹

(1. 陕西省气象台,西安 710016; 2. 陕西省气候中心,西安 710016;
3. 杨凌气象局,陕西杨凌 712100; 4. 长安区气象局,陕西长安 710100)

摘 要:利用常规观测资料、风廓线资料、PM_{2.5}质量浓度资料及 HYSPLIT-4 模式,对 2016 年 12 月 31 日—2017 年 1 月 6 日陕西关中盆地一次霾重污染天气过程的气象特征进行了分析。结果表明:此次过程发生在 500 hPa 纬向平直气流、地面东高西低的典型环流形势下,稳定的大气层结和边界层逆温强烈抑制了污染物的垂直扩散;边界层风场存在 500 m 之下的偏南风、500~1 000 m 偏北风和 1~1.5 km 的纬向小风速区的三层结构特征,弱偏南风的水汽输送、弱对流不稳定和中高层的弱纬向风的阻挡,使得污染物在边界层内充分混合并堆积。污染物质量浓度与低层风关系密切,当低层为弱偏南风时,相对湿度逐渐上升,PM_{2.5}质量浓度升高;反之,当气流转为偏北风时,相对湿度明显下降,PM_{2.5}质量浓度降低。输送至西安的气团路径共有西北、偏南及本地路径三类,西北气流携带的大颗粒污染物、偏南气流的增湿效应及污染物的输送和本地污染源的叠加,共同造成了盆地的重污染天气的发生,其中直行偏南路径占比最高为 38%,本地路径次之,占比 25%。

关键词:霾;重污染;气象特征;关中

中图分类号:P458.1

文献标识码:A

由于经济规模迅速扩大和城市化进程加快,城市群区域和大城市的大气气溶胶污染日趋严重,20 世纪 80 年代以后中国霾日明显增加,到 21 世纪,我国东部大部分地区几乎超过 100 d,大城市超过 150 d^[1-3],霾已成为中国秋冬季节主要的灾害性天气之一。形成灰霾天气,大气污染物的源排放是内因,气象条件是外因。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。在不同气象条件下,同一污染源排放所造成的地面污染物质量浓度可相差几十倍乃至几百倍,因此,研究气象因子对灰霾天气的影响十分重要^[3]。大量的个例分析表明^[4-7],在地面及低空较长时间维持低风速、高湿度和静力稳定的天气条件下,逆温、较低的混合层高度等不利于污染物扩散的气象条件以及特殊地形,是造成北京地区重污染持续较长的原因,高压南下东移阻滞型和

与北上台风(或热带低压)相关联的弱高压控制型是造成北京 PM₁₀ 重污染的二类典型天气形势。吴兑等^[8-10]利用常规观测资料、能见度资料及 PM₁₀ 浓度值资料等对珠江三角洲的灰霾成因进行大量分析研究发现,珠江三角洲的灰霾天气多发生在旱季,典型霾天气过程出现在每年 10 月至次年 4 月。近地层输送条件即地面流场与大气污染物稀释扩散密切相关。纬向环流显著的年份,冷空气跨越南岭、到达珠江三角洲的机会比较小,污染物易于堆积;纬向环流不显著的年份,气流南北交换显著,冷空气跨越南岭、到达珠江三角洲的机会比较大。伴随冷空气的大风天气有利于污染物扩散,区域霾天气过程与区域内静小风过程,即出现气流停滞区有密切联系。清洁对照过程与强平流输送有关,垂直输送能力不足也是加重灰霾天气的气象条件之一。

关中平原目前已成为全国主要的霾集中地之一,西安的霾日为全国排名前十。截止 2012 年,西安地区的霾日较 20 世纪 80 年代增加了近一倍^[11],且日益加重。2016 年 12 月 30 日至 2017 年 1 月 5 日关中地区出现了长达 7 d 的霾重污染天气过程,其中渭南、咸阳、西安三个站点自 2016 年 12 月 31 日起均达到严重污染级别,是近几年来污染较为严重的一次过程。利用多种观测资料,对本次重污染天气过程的气象条件、要素特征等进行分析,进一步探讨关中盆地重污染天气过程的特征及原因。

1 数据和方法

所使用观测数据包括常规地面、高空观测数据,日平均空气质量指数 AQI、逐小时 $\text{PM}_{2.5}$ 观测值及风廓线数据。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及 AQI 指数数据来源于中国环境监测总站网站公布的数据。风廓线数据为西安市长安区风廓线雷达 1 h 平均风观测值。HYSPLIT-4 模式使用的气象数据来自于美国 NOAA 官方网站的 GDAS(global data assimilation system) $1^\circ \times 1^\circ$ 分析数据。

聚类分析是按照样本的相似性、亲疏程度将它们进行分型划类的一种多元统计分析方法。后向轨迹聚类就是根据气团轨迹的空间相似度,即传输速度和方向,对所有到达模式受点的气团轨迹进行分组聚类,以判断受点不同时间段主导气流方向和污染物潜在来源^[12]。

2 结果及其分析

2.1 污染物质量浓度时空分布

定义当某日城市空气质量的污染级别达到重度及以上(AQI 超过 200)的污染日定义为一个重污染日,连续 3 d 及以上出现的重污染日定义为一次持续重污染过程^[13]。从空气质量指数 AQI^[14]的时间演变(图 1)来看,此次过程中,自 2016 年 12 月 27 日起污染指数开始逐渐增大,至 30 日渭南、咸阳、西安 3 个站点 AQI 指数均达到 200 以上的重度污染级别,并呈现不断上升的趋势,咸阳站 2017 年 1 月 4 日达 AQI 极值(500),西安站 AQI 指数在 5 日也达 499。从污染物组成来看,除 1 月 4 日咸阳首要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 混合、西安 1 月 5 日首要要污染物为 PM_{10}

外,污染过程期间关中 5 个城市大部分地区首要污染物均为 $\text{PM}_{2.5}$ 。对比五城市来看,铜川由于地势高,污染等级较低,咸阳和西安污染最为严重。本次重污染过程覆盖了整个关中地区,具有范围广、持续时间长、污染强度大的特点,是近年来关中地区冬季典型的持续性污染过程。

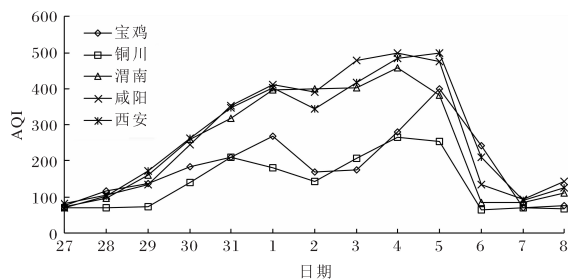


图 1 2016-12-27—2017-01-08
关中五市 AQI 指数逐日变化

2.2 大尺度天气形势

天气条件从根本上决定了气象要素的分布和变化,从而决定了大气的扩散能力与大气的稳定程度,即在一定程度上决定了区域污染物质量浓度的高低变化^[15]。从环流形势来看,500 hPa 天气图上,亚洲中高纬在乌拉尔山和鄂霍次克海附近各存在一个高空槽,两槽之间气流平直多波动,没有明显冷空气南下影响陕西。2016 年 12 月 31 日 08 时至 2017 年 1 月 6 日 08 时,在 15°N 、 90°E 附近,孟加拉湾南支槽建立并维持(图 2),陕西中南部位于槽前弱西南气流中,700 hPa 和 850 hPa 上关中地区风速较小,风向以偏南风为主。弱偏南风输送的水汽使陕西云量较多。

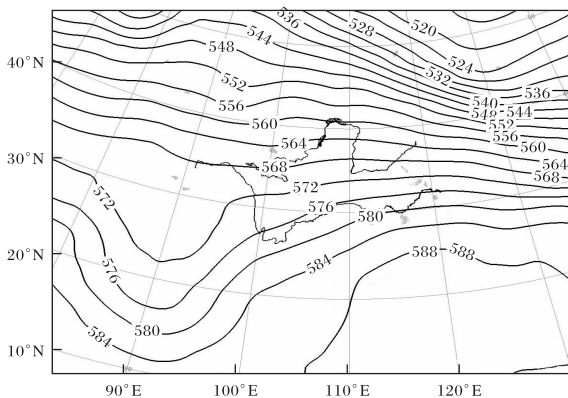


图 2 2017-01-03T20 500 hPa 环流形势

从地面图上看,30 日 20 时之前(图略),陕西处于均压场中,地面风速小,不利于污染物的扩散输送。30 日晚至 2017 年 1 月 1 日,贝加尔湖以西有冷高压发展,陕西处于高压外围的弱均压场中,风速小,静稳天气维持。1 日 14 时(图 3a),贝加尔湖以西冷高压外围有弱冷锋移至河套西北部,锋前冷空气扩散南下进入陕西。2 日 8 时,关中地区出现 3~5 ℃ 的负变温,冷空气对污染物的清除使关中盆地重污染状况得到改善。2 日关中地区各站点 AQI 指数出现不同程度的下降;但由于冷空气强度较弱,持续时间短,对污染物的清除作用有限,位于关中盆地腹地的咸阳、西安和渭南站 AQI 指数下降幅度明显小于位于山区的铜川和宝鸡站,仍

为严重污染级别。2 日 11 时(图略)后,陕西再次处于弱均压场中,青藏高原东部低压倒槽也稳定维持并逐渐发展强盛。4 日 05 时之后陕西受低压倒槽控制,17 时(图 3b)低压倒槽与东北高压形成东高西低的地面环流形势。这种东高西低的环流形势是陕西重污染天气过程典型环流形势^[16]。倒槽的阻挡使西伯利亚强冷空气受阻而不能南下,加上盆地的特殊地形,使得污染物在关中地区持续堆积。这期间关中地区 AQI 指数达到最大值,4 日咸阳站达极大值 500,5 日西安达 499。5 日晚贝加尔湖南部冷高压开始加强南压。6 日 08 时,冷锋压至河套地区并继续南压,陕西开始出现降水,关中地区各站点 AQI 指数迅速降至 100 左右,此次污染过程结束。

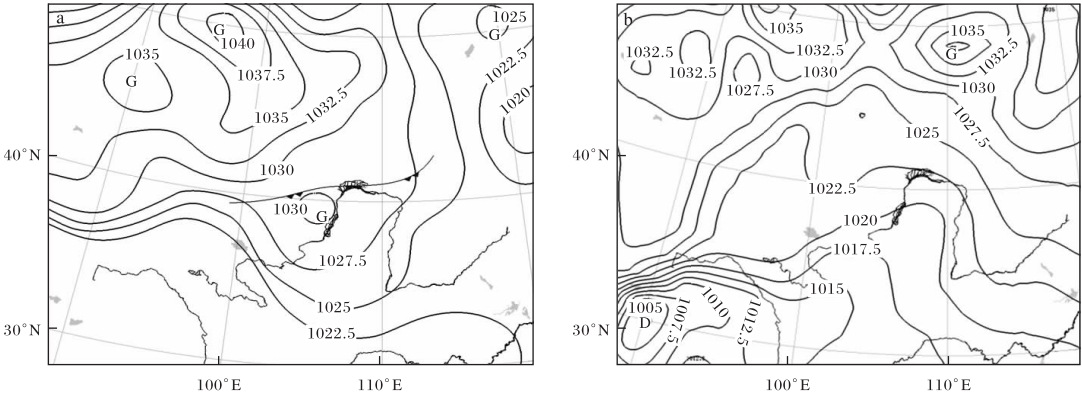


图 3 2017 年 1 月海平面气压场(a 1 日 14 时;b 4 日 17 时)

2.3 边界层风场特征

风廓线雷达是利用晴空大气中的湍流活动的后向散射效应探测大气风场的高时空分辨精细化结构的有效工具^[17]。利用长安站风廓线资料进一步分析重污染期间边界层风场特征。研究表明风廓线雷达探测得到的水平风在 700 hPa 高度下是可信的^[18],因此本文重点分析 3 km 以下的风场。12 月 30 日—1 月 2 日 06 时(图略),低层 500 m 以下多为南风或东南风,且风速较小(大都小于 4 m/s),500~1 000 m 为东北风或北风,风速小于 10 m/s。低层东南风与中层东北风虽然有低空垂直风切变,存在动力不稳定,但缺少触发机制,使得污染物不能有效扩散。同时还可以看出,1 000~1 500 m 存在一个小风速区,气流平直且风速较弱,风速大都小于 6 m/s,抑制了污染物的垂直扩散,使得污染物在边界层内积聚。与地

面图上贝加尔湖冷空气南下相对应,2 日 06 时至 13 时长安上空转为偏北气流(图 4,方框中),污染物质量浓度有小幅下降。15 时之后,与前一阶段类似,长安地区 500 m 以下转为南风,中层 500~1 000 m 转为东北风或北风,1 000~1 500 m 以上仍然为小风速区,这种形势一直维持至 6 日 03 时。这期间污染物质量浓度再次上升,5 日 12 时西安 PM_{2.5} 质量浓度达到最大值 575 μg/m³。随后低空转为偏西风,本次污染过程结束。可以看出,关中地区在重污染期间,边界层风场呈现出 500 m 之下的偏南风、500~1 000 m 的偏北风和 1 000~1500 m 的小风速区的三层结构特征,动力不稳定难以发展,边界层中上层的小风速区使得污染物积聚在 1 500 m 之内,与秦岭大气科学实验基地布设的连续采样的微脉冲激光雷达观测结果一致。

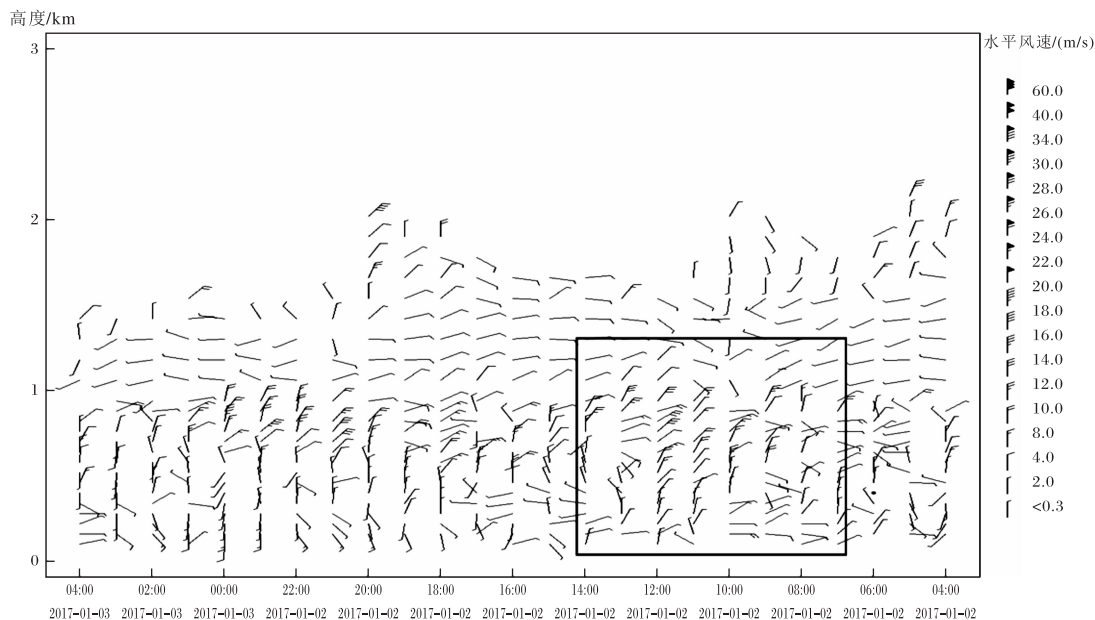


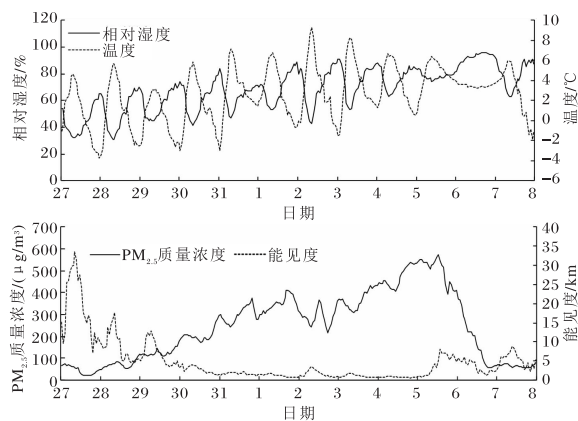
图4 2017-01-02T04—03T04 长安站逐小时风廓线

2.4 气象要素变化特征

为了进一步探究关中盆地污染逐渐加重的原因,选取西安市平均逐小时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和长安站(34.26°N , 108.58°E)地面要素进行分析(图5)。1月1日之前,西安低层为弱偏南气流,相对湿度偏高并逐渐上升。研究表明,气溶胶吸湿增长特性和相对湿度呈正相关,相对湿度越接近粒子临界饱和比,气溶胶可溶性粒子越容易吸收水汽而增大,吸湿增长越显著,有利于空气散射作用增强,能见度下降和雾霾天气出现^[19-20]。1日晚有弱冷空气进入西安,风向转为偏北风。2日白天相对湿度明显下降,造成 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度明显降低;2日转为偏南风后,相对湿度快速增长并维持在90%附近, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度持续升高。6日转为明显偏北气流,相对湿度迅速降低,污染物质量浓度迅速下降,本次污染过程结束。同时,可以看出能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈现反相关的变化趋势,由于细颗粒物对大气的消光左右, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的快速增长造成了大气能见度急剧降低^[21]。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度较高时,对应于弱的偏南气流、较高的相对湿度和较低的能见度。

2.5 探空分析

从西安泾河站温度对数压力图来看,重污染

图5 2016-12-27—2017-01-08 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与长安站温度、相对湿度和能见度的关系

期间关中盆地上空大气一直处于绝对稳定状态,并且在850 hPa以下存在逆温层(图4a)。对应两次污染物质量浓度峰值,第一次峰值时泾河站925 hPa为偏北风,850 hPa为偏东风,层结稳定,低层湿度较小,700 hPa和500 hPa均为弱偏西风,无明显扰动(图6a);第二次峰值时,850 hPa和700 hPa都转为偏南风,850 hPa以下湿度明显增加,同时逆温层厚度达到3 km左右(图6b),强逆温以及低层增湿作用,使污染物垂直扩散能力进一步减弱,污染物堆积效应进一步增强,达到本次重污染天气过程的峰值。

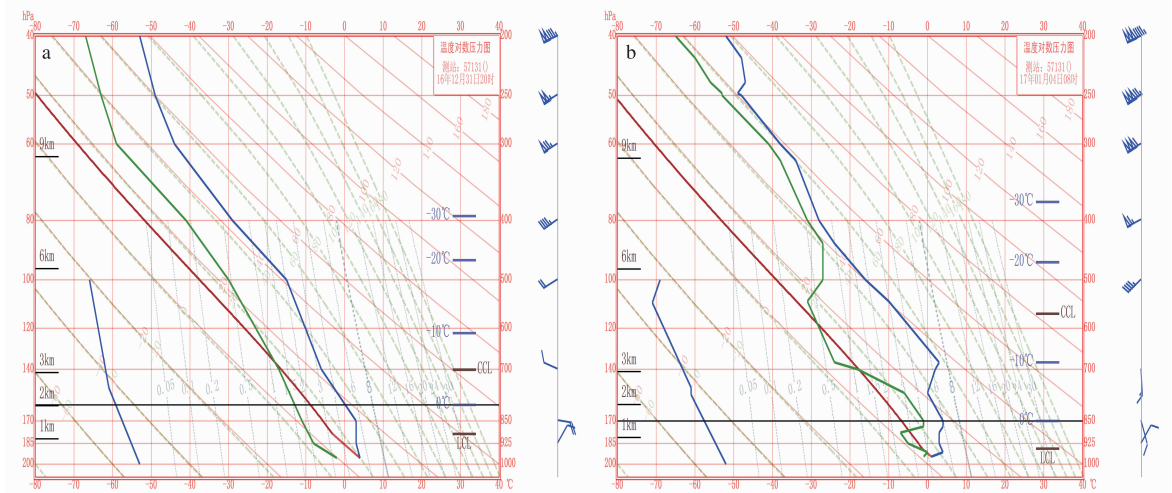
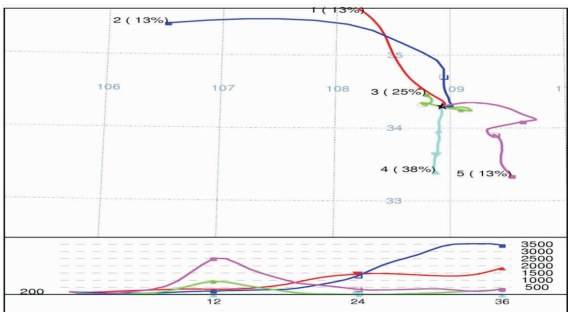


图6 2017-01-01T08(a)和2017-01-04T08(b)泾河站(34.43°N,108.97°E) T-Lnp图

2.6 后向轨迹聚类分析

为了进一步研究关中气流的输送路径特征,利用美国 NOAA 的 HYSPLIT-4^[22]模式对1月2—5日到达西安站(34.30°N,108.93°E)的后向气流轨迹进行聚类分析,并计算各类轨迹数占总轨迹数的比例(图7),以判断关中盆地污染物的潜在输送来源。计算高度为200 m。从图7可以看出,本次过程到达关中的气流路径共有三类。一类是西北路径,共有两条:一条路径最远、移动速度最快,经甘肃—宁夏—延安到达西安;另一条经宁夏附近进入西安。西北路径起始输送高度在2 000 m以上,途经沙漠半沙漠地区携带大颗粒污染物逐渐沉降至西安地区,这也解释了为何本次污染过程中西安和咸阳 AQI 极大值时,首要污染物为 PM₁₀或包含 PM₁₀的原因。第二类是偏南路径,共有两条:一条向北直接进入西安地区;另一条由于秦岭地形阻挡,先向东后经盆地喇叭口地形向西绕行进入西安地区。这也与地面上受低压倒槽控制相对应,偏南气流携带大量水汽和一部分污染物到达西安。第三类是本地路径,此类路径中风速小,移动路径短,污染物主要来自于盆地内部。对比这三类路径占比,直接进入西安的偏南路径占比最高,达38%,其次本地路径占25%,本地污染源对西安地区强污染天气的贡献不容忽视。



不同颜色的线条表示不同气团路径,1~5 数字表示路径序号,百分数表示所占比例;图形下方时间—高度曲线表示不同路径的气团在距离当前时刻之前 36、24、12、0 h 所处的高度/m

图7 2017-01-02—05 西安站(34.3°N, 108.93°E)空气质点轨迹聚类

3 结论

- (1)此次重污染天气过程期间,500 hPa 上中纬度以平直纬向气流为主,低层多弱偏南风,没有明显冷空气南下影响陕西。地面环流形势场上,陕西处于污染天气典型的东高西低的环流形势下。
- (2)重污染期间关中上空大气一直处于稳定状态,850 hPa 持续存在逆温层,强烈抑制了空气的垂直混合交换,使污染物在边界层底部堆积。
- (3)重污染期间边界层风场存在 500 m 之下的偏南风、500~1 000 m 偏北风和 1 000~1500 m 的纬向小风速区的三层结构特征,弱偏南风的水汽输送、弱对流不稳定和中高层弱纬向风的阻挡,

使得污染物在边界层内充分混合并堆积。

(4)从地面气象要素分析来看,污染物质量浓度与低层风场和湿度关系密切。边界层盛行弱的偏南风时,相对湿度逐渐上升,污染物质量浓度增大;风向偏北时,相对湿度明显下降,污染质量物浓度减小。

(5)后向气流轨迹的聚类分析可以看出,输送至西安的气流路径共有五条,三类,即偏南路径两条、西北路径两条及本地路径。西北气流携带的大颗粒污染物、偏南气流的增湿效应及污染物的输送和本地污染源的叠加,共同造成了关中盆地的重污染天气过程。其中直行偏南路径占比最高,为38%;本地路径占比次之,为25%,本地污染源对污染物的增长不容忽视。

致谢

感谢西安市气象局杨晓春和陕西省长安区气象局樊超提供的资料支持,陕西省气象台刘慧博士和黄少妮博士在模式应用及内容分析方面给予的帮助,特此感谢!

参考文献:

[1] 吴兑,吴晓京,李菲,等. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报,2010,68(5): 680-688.

[2] 吴兑. 大城市区域霾与雾的区别和灰霾天气预警信号发布[J]. 环境科学与技术,2008,31(9): 1-7.

[3] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报,2012,32(2): 257-269.

[4] 郭利,张艳昆,刘树华,等. 北京地区PM₁₀质量浓度与边界层气象要素相关性分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2011,47(4): 607-612.

[5] 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.

[6] 徐晓峰,李青春,张小玲. 北京一次局地重污染过程气象条件分析[J]. 气象科技,2005,33(6): 543-547.

[7] 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.

[8] 吴兑,廖碧婷,陈慧忠,等. 珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展[J]. 气候与环境研究,2014,19(2): 248-264.

[9] 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.

[10] 吴兑,吴晟,陈欢欢,等. 珠三角2009年11月严重灰霾天气过程分析[J]. 中山大学学报(自然科学版),2011,50(5): 120-127.

[11] 胡琳,苏静,陈建文,等. 西安地区霾天气特征及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(7): 41-45.

[12] 严晓瑜,侯晓辉,武万里,等. 银川地区大气颗粒物输送路径及潜在源区分析[J]. 环境科学学报,2018,38(5): 1727-1738.

[13] 李国翠,范引琪,岳艳霞,等. 北京市持续重污染天气分析[J]. 气象科技,2009,37(6): 656-659.

[14] 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[J]. 中国环境管理干部学院学报,2012,22(1): 44.

[15] 杨素英,赵秀勇,刘宁微. 北京秋季一次重污染天气过程的成因分析[J]. 气象与环境学报,2010,26(5): 13-16.

[16] 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.

[17] 李峰,施红蓉. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析[J]. 气象,2014,40(8): 992-999.

[18] 董丽萍,吴蕾,王令,等. 风廓线雷达组网资料初步对比分析[J]. 气象,2014(9): 1145-1151.

[19] 童尧青,银燕,钱凌,等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学,2007,27(5): 584-588.

[20] 孙燕,张备,严文莲,等. 南京及周边地区一次严重烟霾天气的分析[J]. 高原气象,2010,29(3): 794-800.

[21] 颜鹏,刘桂清,周秀骥,等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性[J]. 应用气象学报,2010,21(3): 257-265.

[22] 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.