

刘婉莉, 闫世明, 王雁, 等. 运城盆地秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 传输特征和源区分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(3): 119–126.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.03.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



运城盆地秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 传输特征和源区分析

刘婉莉¹, 闫世明^{2*}, 王雁², 李冬梅¹, 贺钰清³, 张倩倩¹

(1. 运城市气象局, 山西 运城 044000; 2. 山西省气象科学研究所, 山西 太原 030002;

3. 忻州市气象局, 山西 忻州 034000)

摘要: 利用 2017—2019 年空气质量监测数据, 采用 HYSPLIT 后向轨迹模式、聚类分析、潜在源贡献因子分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT), 对运城市秋冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 传输路径、对应重污染的天气形势和潜在源区进行分析。结果表明: (1) 运城近地层盛行偏东风时污染频率高, 出现弱的偏东风和西南风时, 污染物浓度较大。秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 后向轨迹西北方向最多, 达 53.53%, 偏东方向最少, 为 11.25%, 偏西方向和西南方, 分别为 16.61% 和 12.06%。(2) 不同轨迹对应天气形势不同, 西北和偏西轨迹下, 500 hPa 高度场上主要为两槽一脊, 700~850 hPa 受脊前西北气流影响, 地面为高压前底部型或均压场型; 西南轨迹下, 500 hPa 高度场上为偏西气流, 700~850 hPa 运城处于槽前西南气流, 地面气压场为高压前底部或均压场。(3) 运城 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在源区主要位于陕西南部、四川东部和新疆东南、甘肃的东南部等地区, 说明影响运城秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 有汾渭平原西南部的颗粒物区域输送, 西北方向新疆、甘肃的远距离颗粒物传输也是重要来源。

关键词: 大气污染特征; 后向轨迹; 聚类分析; 天气形势; 潜在源区

中图分类号: X513

文献标识码: A

文章编号: 1002-0799(2022)03-0119-08

近年来, 重污染天气频发, 公众健康受到严重影响^[1], 特别是汾渭平原污染问题非常严重, 已纳入国务院环境重点治理区域^[2]。地处汾渭平原中心区域的运城盆地, 西邻黄河, 位于吕梁山末端和中条山脉之间, 海拔高度在 330~360 m, 由于其特殊地形, 秋冬季重污染天气问题尤为严重。根据中国环境监测总站发布的全国城市空气质量状况月报, 169 个城市按照空气质量综合指数评价排名显示 (2018 年 6 月开始), 运城市 2018 年 11—12 月及 2019 年秋冬季排名在倒数第 2~倒数第 24, 空气污染较严重^[3]。重污染具有明显的区域性特征, 大气污染既和本地排放源有关, 也受外来污染物传输影响^[4]。很多学者

都对此进行了研究^[5-13], 陈朝晖等^[14]得出华北区域大气污染主要为西南路径传输; 苏福庆等^[15-16]分析认为北京市污染物输入通道来自边界层西南气流、东南气流和偏东气流; 太原秋冬季污染物主要通道来自西南方向, 重要潜在源区位于陕西省关中地区和山西省西南部^[17]。近年来汾渭平原大气污染问题受到很多关注, 汾渭平原大气颗粒物存在自甘南地区向东传输的偏西路径和沿太行山传输的偏东北路径^[2]。上述研究多侧重于工业发达城市, 对以农为主城市的污染源尚无涉及。不同地理位置污染物的输送扩散规律不同^[18-21], 本文以运城盆地为例, 对污染严重的农业城市进行污染物传输通道和源区研究, 以为大气污染治理提供科学依据。

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-10-17

基金项目: 山西省气象局重点项目(SXKZDQH20217106)

作者简介: 刘婉莉(1971—), 女, 高级工程师, 主要从事天气预报及环境气象研究工作。E-mail: 1971810405@qq.com

通信作者: 闫世明(1975—), 男, 正高级工程师, 主要从事大气环境研究。E-mail: qksysm@126.com

1 资料与方法

1.1 资料来源

气象数据来源于 2017 年 1 月—2019 年 12 月 NCEP 每日 4 个时次的数据(00、06、12 和 18 时), 用

于天气形势分析和后向轨迹计算。运城无探空站,最近探空站西安站位于运城西南约 200 km,使用西安探空资料可以反映运城上空大气层结情况;环境资料来源于山西省运城市生态环境监测中心的 2017—2019 年秋冬季逐日污染物资料($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 O_3)和逐时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度资料。依据环境空气质量 GB 3095-2012^[22]和 HJ 633-2012^[23],将空气质量按空气质量指数 AQI 分为 6 级,其中 AQI 在 201~300 为大气重度污染,>300 为严重污染。

1.2 方法

采用 HYSPLIT4 后向模式计算山西运城 2017 年 1 月—2019 年 12 月秋冬季的后向轨迹,该模式多用在大气传输研究中^[24]。本文的后向轨迹计算初始高度取为 300 m,后向运行时间为 72 h,间隔 1 h;采用二分 K 均值法^[17]进行聚类分析,用潜在源贡献因子分析法 (PSCF)^[17,25] 和浓度权重轨迹分析法 (CWT)^[17,26-27]识别污染潜在源区。PSCF 是基于气流轨迹分析来识别可能源区^[17,25],本研究通过将气团运动轨迹和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物浓度值结合给出潜在的污染排放源位置。CWT^[17,26-27]是一种计算潜在源区气流轨迹权重浓度,反映不同轨迹的污染程度的方法,能定量给出每个网格的平均权重浓度。

2 结果与讨论

2.1 运城市秋冬季大气污染特征

根据空气质量指数标准^[22,23],对 2017—2019 年运城环境监测资料进行统计分析,发现运城秋冬季重度污染天气主要集中在 1—2 月和 11—12 月 (表 1)。其中 1 月最多,重度污染在 9~12 d,累计污染日数达到 31 d;12 月次之,为 2~10 d,累计污染日为 20 d。本文重点研究此时段污染物传输特点,以下秋冬季均指这 4 个月。

表 1 2017—2019 年运城秋冬季各月重度污染天数/d

月	11	12	1	2
范围	1~7	2~10	9~12	2~9
合计	8	20	31	15

2017—2019 年秋冬季运城主要污染物浓度平均值见表 2。根据 HJ 633-2012^[23],得出运城秋冬季主要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ,表明污染以颗粒物为主,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 比 PM_{10} 污染更严重。2017—2019 年秋冬季 SO_2 浓度明显下降,说明政府燃煤治理成效明显,而颗粒物浓度变化不大,表明大气污染治理尤

其颗粒物污染治理仍任重道远。

表 2 2017—2019 年秋冬季运城主要污染物平均浓度/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

年	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2
2017	103	163	94	3 000	52
2018	87	140	51	2 000	41
2019	110	159	25	2 000	41
平均	100	154	57	2 000	45

图 1 给出了 2017—2019 年运城秋冬季首要污染物占比情况,可见在运城的秋冬季,颗粒物为首要污染物的天数占绝对主导地位($\geq 97\%$),其中 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数占比非常显著,达 70%以上,其次为 PM_{10} ($\geq 12.5\%$)。

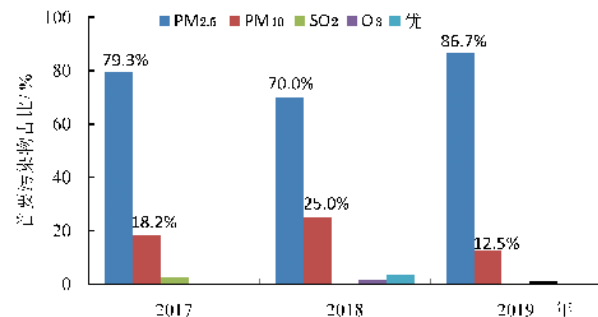


图 1 2017—2019 年秋冬季各首要污染物占比情况

2.2 近地面风场对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

图 2 显示了运城市 2017—2019 年秋冬季近地面风场和空气质量的关系。由图 2a 可知,偏东风 (ENE 和 E) 出现频率最高 (合计达 21.6%),出现污染频率也较高;东南风 (SSE 和 SE) 次之 (15.5%)。这是由于近地层气流受运城盆地东南部中条山脉的阻挡,在运城盆地形成折返,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 聚集,浓度升高,表明运城市特殊地形对污染影响显著。由图 2b 可知,在不同风速、风向下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异显著。静风或风速 $< 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值较高,同时在弱西北风时有 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大值中心,表明静风天气易造成运城 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度积累,弱西北风易导致重污染,同时还说明运城的污染受到本地源影响很大;风速为 $2\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,东北风和西南风时的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均高于其他风向,说明弱东北风和西南风也能引起 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升,表明区域传输过程对运城 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在明显影响;当西北风向下且风速 $> 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小,说明地面西北风风速 $> 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时有利于污染物清除。上述分析可知,运城秋冬季近地层盛行偏

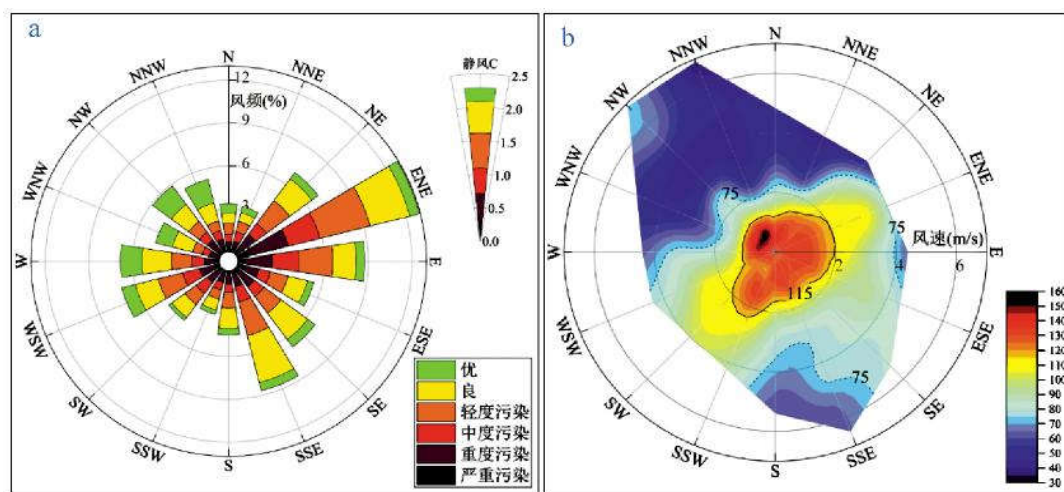


图2 2017—2019年运城市风频(a)及风向风速(b)与PM_{2.5}浓度关系(单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

东风(ENE和E),对应污染频率和PM_{2.5}浓度较高,微(静)风天气易造成运城PM_{2.5}浓度积累;西北风风速 $>2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时有利于污染物清除。

2.3 运城市秋冬季PM_{2.5}输送路径

运城秋冬季首要污染物为PM_{2.5},利用2017—2019年秋冬季PM_{2.5}的逐时资料,采用后向轨迹模式计算了到达运城(35.0°N,111.0°E)的2017—2019年秋冬季PM_{2.5}的逐时后向轨迹,后向轨迹计算初始高度取300 m,运行时间为72 h,间隔1 h;轨迹聚类分析采用二分K值法,得到了运城市秋冬季PM_{2.5}典型的5类输送轨迹(图3)。轨迹路线和方向表示气团在到达计算点(运城市)所经过的区域,轨迹长短可判断气团移速,长轨迹对应快速移动的气团,短轨迹对应移动缓慢气团^[2]。由图3可知,5类输送轨迹中,西北轨迹(第3、4类)占60.08%,偏西轨迹(第5类)占16.61%,西南轨迹(第2类)占12.06%,偏东方向轨迹(第1类)占11.25%。其中第3类轨迹沿西北路径,气团自新疆北部、内蒙西部、宁夏北部经陕西北中部影响到运城,此类占比最大(53.53%);其次为第5类轨迹(偏西方向),占比16.61%,粒子经新疆南部、青海、甘肃南部等地经陕西的关中地区到达运城。这两类轨迹都经过西北沙漠、戈壁以及黄土高原地区,在大风作用下,沿途携带大量粒子影响运城。由于受秦岭阻挡,气流沿秦岭北侧向东传输,与李雁宇等^[2]研究结论一致。第2类轨迹(12.06%)沿西南方向,颗粒物经四川盆地东部、陕西南部翻越秦岭传输到运城盆地,此类路径污染主要发生在中低层受西南气流影响下,暖湿气流输送有利于颗粒物的形成。第1、4类轨迹属于回流性质,第1类轨迹沿偏东路径,粒子由河南北部向偏

西方向经过三门峡传输到运城,占比较少(11.25%);第4类轨迹经内蒙古西北部、山西中北部移动到山西东南部,受太行山脉阻挡,在山西、河北、河南三省交界处折返,经郑州影响运城,此类轨迹占比最小(6.55%)。偏东路径比例较小与运城东部和南部受太行山余脉和中条山屏障影响,冬季偏东气流较少有关。

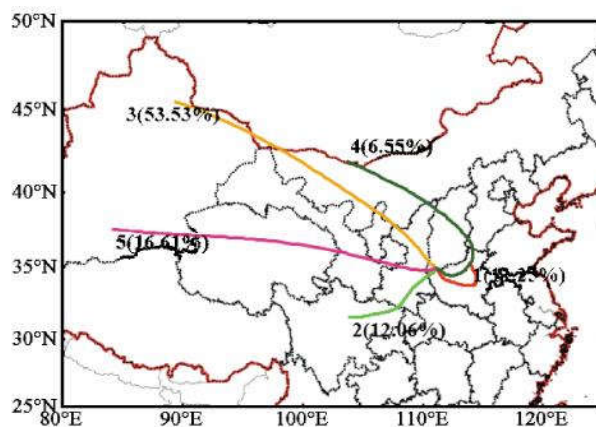


图3 运城2017—2019年秋冬季PM_{2.5}轨迹输送

分析5种类型轨迹对应的PM₁₀浓度及PM_{2.5}/PM₁₀浓度值(表3),发现第3类轨迹PM_{2.5}/PM₁₀值最低,第4、5类轨迹次之。一般PM_{2.5}/PM₁₀ <0.5 ,能够指示比较强的沙尘输送特征,但是第3~5类轨迹PM_{2.5}/PM₁₀浓度值均 >0.5 ,说明这3类轨迹起源虽然是沙尘源区,但其路径经过的区域仍有人为污染的特征(PM_{2.5}的浓度也较高)。例如轨迹5虽然起源于沙漠、戈壁等地区,但也同样经过甘肃和陕西等地的一些人口较为密集、人类生产活动较为活跃的城市,说明这些区域的人为污染也对运城市的PM_{2.5}产生

较大的影响;而第1、2类轨迹 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值高,说明轨迹1和轨迹2以区域污染输送为特征。

表3 运城市秋冬季5种聚类轨迹颗粒物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})浓度及平均移动速度

轨迹分类	$PM_{2.5}$ 浓度/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	PM_{10} 浓度/ ($\mu g \cdot m^{-3}$)	$PM_{2.5}/PM_{10}$	平均风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	出现 概率/%
1类	108	151	0.72	2.10	11.25%
2类	137	200	0.69	3.19	12.06%
3类	97	162	0.60	8.43	53.53%
4类	88	136	0.65	5.99	6.55%
5类	138	210	0.66	9.36	16.61%

第3类轨迹(西北方向)是外来污染物输送到运城的主要轨迹(占比最高),其次为第5类轨迹($PM_{2.5}$ 平均浓度最高),第2类轨迹(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 平均浓度均为次高)也是影响运城重污染的主要路径。秋冬季运城市出现污染时,来自西北或偏西方向的沙漠、戈壁及黄土高原地区的颗粒物远距离快速输送对运城颗粒物贡献大,但这些地区的人为污染同样对运城有一定影响;其次为西南方向,自四川盆地北部,经陕西南部到运城盆地。

图4为运城市秋冬季 $PM_{2.5}$ 5类轨迹的垂直分布。5类轨迹中,第5类长距离轨迹(偏西方向)传输高度最高,达2.5 km;第3类长距离轨迹(西北方向)传输高度在2.0 km以上,传输过程呈现缓慢下沉的特点,说明这两类气团都是快速向下游输送,接近目标城市迅速下沉;第2类轨迹(西南方向)的气团运动速度和传输高度均明显低于第3、4类和第5类轨迹,轨迹高度基本在1.0~1.5 km,高度较低,轨迹较短,属于近距离传输,在传输中具有先缓慢上升后快速下降的特点;第1类轨迹传输距离最短,垂直方向传输高度在5类轨迹中高度最低,在0.5~1.0 km,接近目标有突然下降的特点,轨迹短,高度低,污染

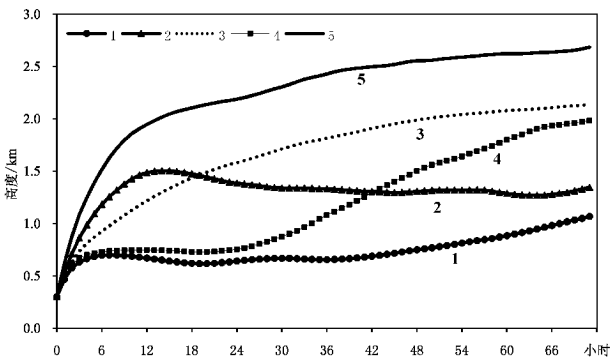


图4 运城市秋冬季 $PM_{2.5}$ 5类聚类轨迹垂直分布

物愈容易向下游传输^[17],因此第1类轨迹对运城污染有一定影响。可见,影响运城 $PM_{2.5}$ 浓度的传输轨迹主要为第1、2、3类和第5类轨迹,其中第3类、5类轨迹属于远距离传输,且传输高度高,而第1、2类轨迹属于近距离传输,传输高度低。

在各聚类轨迹下运城 $PM_{2.5}$ 等级分布情况见表4。第5类轨迹下重度污染以上出现几率最高,占比37.1%;其次为第2类轨迹,出现重度以上污染比重为34.2%,且其严重污染占比最高,为9.7%;第3类轨迹下出现重度污染以上占比18.9%;第4类轨迹优良天数占比最多,达到50.2%;第1类轨迹良到轻度污染占比达60.9%。表明第5类、第2类轨迹下容易发生重度污染天气,其中第5类轨迹重度污染占比最多,说明第5类、第2类轨迹虽然出现概率较小,但只要一出现就容易发生重度污染和严重污染;第4类、第1类轨迹轻度污染以下比重大,属于清洁轨迹。综上可知,第5类轨迹(偏西方向)和第2类轨迹(西南方向)出现重污染和严重污染概率大,其次为第3类轨迹(西北方向),为运城主要的重污染传输路径。

表4 运城市各聚类轨迹下 $PM_{2.5}$ 不同等级发生时所占的比重/%

轨迹分类	1类	2类	3类	4类	5类
优	5.0	1.1	19.8	10.1	4.0
良	32.0	20.2	26.5	40.1	20.6
轻度污染	28.9	25.3	21.2	30.2	21.6
中度污染	19.5	19.2	13.6	10.7	16.8
重度污染	9.4	24.5	14.0	6.7	28.7
严重污染	5.3	9.7	4.9	2.2	8.4
合计	100	100	100	100	100

2.4 主要的重污染传输轨迹天气形势

对主要的重污染传输轨迹天气形势进行统计分析发现,第3类轨迹(西北方向)和第5类轨迹(偏西方向)导致重污染对应的天气形势为:500 hPa高度场中高纬地区主要为两槽一脊(图5a),贝加尔湖地区为高压脊,形成阻高,阻挡极地冷空气南下,运城受脊前西北气流影响;700 hPa(图5b)处于脊前西北气流;850 hPa温度场高原东部到河套地区受暖脊控制;地面气压场一般为高压前底部型(图5c)或均压场型,运城风力很小。因为运城无探空站,使用最近的西安站探空来反映运城上空大气层结情况(图5d)。近地层925、700 hPa附近存在逆温层,大

气层结稳定,风力小,不利于西北或偏西方向传输的污染物扩散,导致运城出现重污染天气。

第2类轨迹(西南方向)对应重污染天气形势为:500 hPa 高度场上受纬向环流影响,河套地区一般为平直偏西气流(图 6a);700 hPa(图 6b)和 850 hPa 运城处于槽前西南气流;地面气压场一般对应为高压前底部(图 6c)、底部或均压场。探空图上(图 6d),925 和 700 hPa 附近都存在逆温层,稳定的大气层结不利于污染物颗粒扩散,此种形势天气一般为阴到多云。当 500~700 hPa 高度场上运城处于槽前西南气流时,850 hPa 受槽前西南或偏南气流影响时,地面气压场一般对应为高压底部时,对应为阴雨天气,此类个例出现较少。

2.5 PM_{2.5} 潜在源区

本文采用潜在源贡献因子分析法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT)来分析潜在污染来源和贡献大小。用 PM_{2.5} 浓度资料,基于 2017—2019 年秋冬季的后向轨迹来进行 PSCF 计算,以期得到运城市大气污染的潜在源。运城市秋冬季污染的 PM_{2.5} 潜在源区贡献计算结果如图 7, PSCF 的值越大,颜色越深,表明该网格对运城市 PM_{2.5} 的影响越大。

对运城市 PM_{2.5} 影响较大即 PSCF 高值区(潜在贡献 0.8 以上)主要位于西南部包括四川东部、陕西南部片区,其次位于西北部包括新疆东南、甘肃的东南部地区等区域(图 7)。西南部潜在源区的气团通过第 2 类轨迹进行近距离输送,经四川东部、陕西南部、关中地区等区域影响运城。西北潜在源区的气团主要沿着第 5 类轨迹通过远距离沿秦岭经关中地区快速输送到运城。山西东南部气团经河南西北部通过第 1 类轨迹近距离输送的潜在贡献也在 0.7 左右。另外西北地区贡献在 0.6~0.7 的潜在源区主要通过第 3 类轨迹远距离输送影响运城,虽然该潜在源区出现污染的概率较小,但经过该区域的轨迹几率很大(53.53%),因此其对运城的污染传输的影响不可轻视。

基于 PM_{2.5} 浓度,运用 CWT 分析可以进一步确定潜在源区的权重浓度, CWT 的计算结果见图 8。CWT 值越大,表示该网格区域对运城 PM_{2.5} 质量浓度贡献越大,将 CWT>120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域定义为主要贡献区。由图 8 可知,对运城 PM_{2.5} 值贡献超过 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域主要是甘肃东南部、陕西南部及河南东南部等地。对运城 PM_{2.5} 贡献超过 120 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

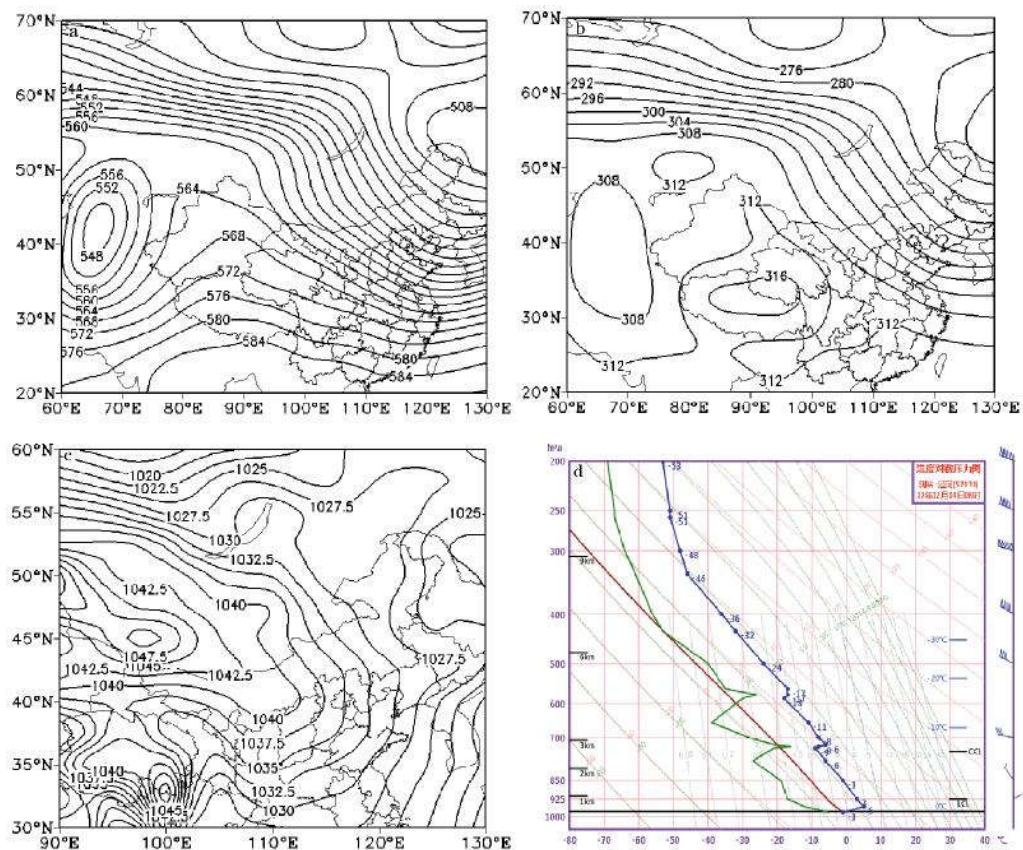


图 5 2017 年 12 月 4 日 08 时 500 hPa 高度场(a)、700 hPa 高度场(b)、地面气压场(c)及西安探空(d)
(实心圆点为运城位置)

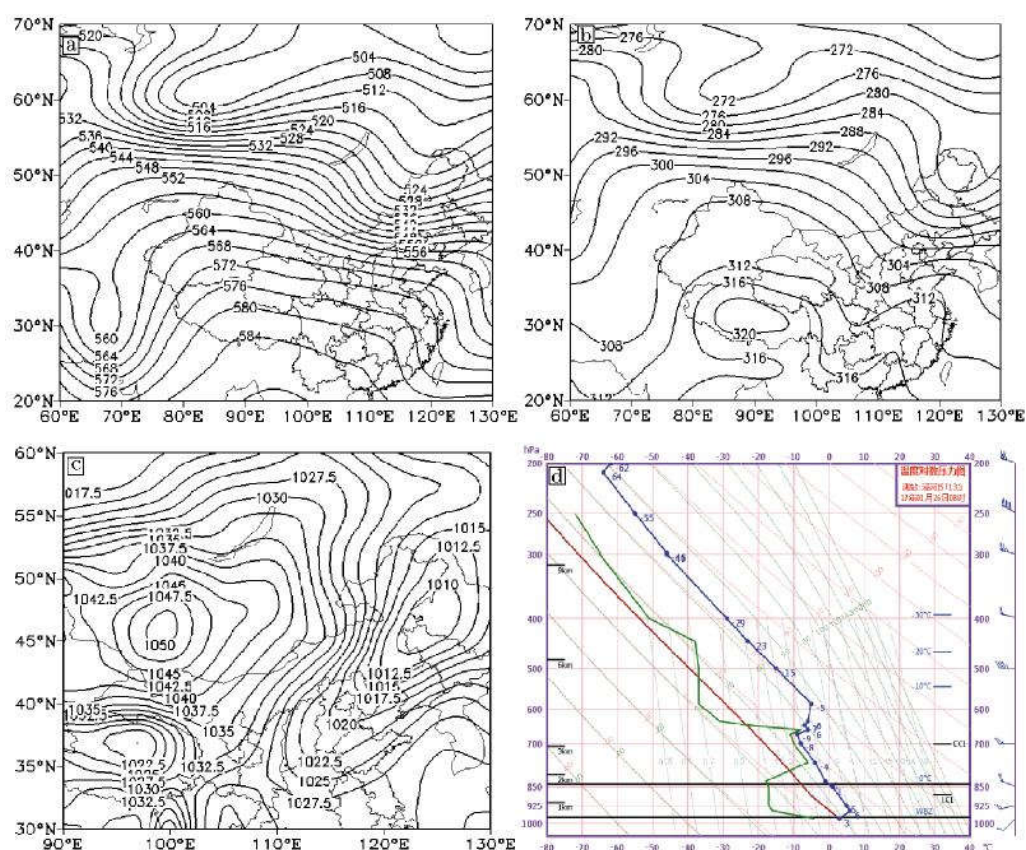


图6 2017年1月26日08时500 hPa高度场(a)、700 hPa高度场(b)、地面气压场(c)和西安探空(d)
(实心圆点为运城位置)

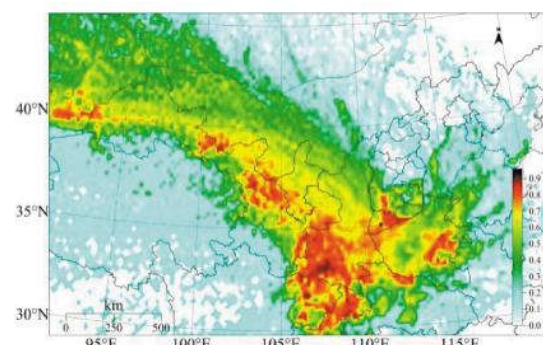


图7 运城市秋冬季潜在源区贡献分析

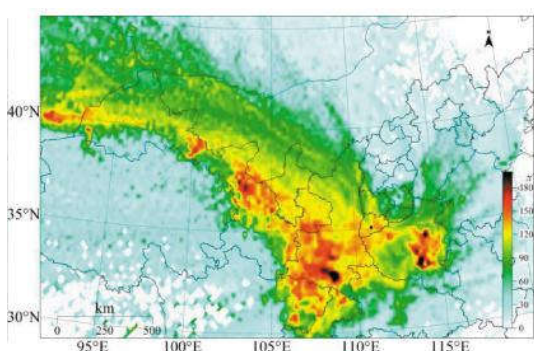


图8 运城市秋冬季浓度权重轨迹分析
(黑色实心圆点为运城位置)

的地区是新疆东南部、甘肃中部和东南部、陕西中南部、四川东部、重庆北部及河南东南部等地区。上述区域对运城市秋冬季 $PM_{2.5}$ 的贡献均在 $120 \mu g \cdot m^{-3}$ 以上,是重要的潜在源区^[17]。

通过对运城秋冬季 $PM_{2.5}$ 的输送路径结合潜在源区分析得出,运城大气污染物 $PM_{2.5}$ 潜在源区主要位于陕西南部、四川东部地区,通过西南方向(第2类轨迹)近距离区域传输;其次位于西北地区包括新疆东南、甘肃的东南部等地区,主要通过偏西路径(第5类轨迹)远距离快速输送到运城,对运城的 $PM_{2.5}$ 贡献很大,是导致运城秋冬季重度污染的重要原因之一;再次西北地区贡献在0.6~0.7的潜在源区通过第3类轨迹远距离输送也对运城影响较大,说明运城秋冬季 $PM_{2.5}$ 的浓度除了受来自汾渭平原西南部的颗粒物区域输送影响,还受来自偏西或西北方向新疆、甘肃的远距离颗粒物传输的影响。一些专家^[17,28-29]对西安、郑州和太原重污染的传输轨迹和潜在源区进行研究,认为山西南部也是西安、郑州和太原重污染过程污染物输送的源地之一。说明运城作为汾渭平原的中心地区,汾渭平原周边的污染物对其影响是相互的,所以不仅要加强区域联防

联控,还要加大西北防护林建设,才能有效提高大气污染治理成效,改善大气质量。

3 结论

(1)运城重污染天气主要集中在每年的 1—2 月和 11—12 月,PM_{2.5} 为运城秋冬季首要污染物。偏东风对应污染频率较高,静风时 PM_{2.5} 浓度较高,弱偏东风和西南风也会引起 PM_{2.5} 浓度升高。秋冬季西北、偏西轨迹和西南轨迹是外来污染物输送运城的主要轨迹,其中偏西和西南轨迹上容易出现重度污染和严重污染。

(2)重污染主要传输路径对应的天气形势为:500 hPa 高度场上一一般为两槽一脊或平直偏西气流,地面气压场对应高压前底部或均压场;在 700~850 hPa 高度场,西北和偏西轨迹对应脊前西北气流影响,而西南轨迹对应槽前西南气流。探空图上在 925 和 700 hPa 附近都存在逆温层,近地层大气层结稳定不利于污染物扩散。

(3)运城污染的潜在源区主要位于陕西南部、四川东部地区 and 新疆东南、甘肃的东南部等地区,分别通过西南方向路径进行近距离区域传输和通过偏西或西北路径远距离传输。建立汾渭平原及周边区域联防、联控机制和西北防护林防沙、固沙建设对运城污染防控十分必要。

参考文献:

- [1] 冯丽莎,宋攀,田力,等.河南 3 次重污染天气过程的气象条件诊断及传输影响分析[J].气象与环境科学,2020,43(1):104-113.
- [2] 李雁宇,李杰,杨文夷,等.2018 年汾渭平原及其周边地区大气颗粒物的传输特征 [J]. 环境科学学报,2020,40(3):779-791.
- [3] 中国环境监测总站,城市空气质量月报告[EB/OL].[2020-01-06].https://www.mee.gov.cn/hjzl/dqhj/cskqzlkzyb/index_1.shtml/.
- [4] 王艳,柴发合,王永红,等.长江三角洲地区大气污染物输送规律研究[J].环境科学,2008,29(5):1430-1435.
- [5] 李颜君,安兴琴,范广洲.北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析[J].中国环境科学,2019,39(3):915-927.
- [6] 谢启玉,何永晴,朱宝文,等.西宁市区不同天气形势下的 PM₁₀ 输送路径及潜在源区 [J]. 气象与环境科学,2018,41(1):56-61.
- [7] 王晓琦,郎建奎,程水源,等.京津冀及周边地区 PM_{2.5} 传输规律研究[J].中国环境科学,2016,36(11):3211-3217.
- [8] 滑申冰,师华定,王堃,等.2016—2017 年冬季华北地区一次重污染过程的气象条件分析[J].气象与环境科学,2018,41(4):47-53.
- [9] 李博,杨凡,李秀镇,等.2015 年青岛城阳一次持续污染过程中 PM_{2.5} 污染特征及潜在源区分析[J].气象与环境科学,2020,43(2):79-86.
- [10] 任传斌,吴立新,张媛媛,等.北京城区 PM_{2.5} 输送途径与潜在源区贡献的四季差异分析 [J]. 中国环境科学,2016,36(9):2591-2598.
- [11] 王继康,花丛,桂海林,等.2016 年 1 月我国中东部一次大气污染物传输过程分析[J].气象,2017,43(7):804-812.
- [12] 唐毅,陈治翰,罗治华,等.后向轨迹模式在攀枝花市 PM_{2.5} 来源分析研究中的应用 [J]. 四川环境,2016,35(4):83-89.
- [13] 葛跃,王明新,白雪,等.苏锡常地区 PM_{2.5} 污染特征及其潜在源区分析[J].环境科学学报,2017,37(3):803-813.
- [14] 陈朝晖,程水源,苏福庆,等.华北区域大气污染过程中天气型和输送路径分析[J].环境科学研究,2008,21(1):17-21.
- [15] 苏福庆,高庆先,张志刚,等.北京边界层外来污染物输送通道[J].环境科学研究,2004,17(1):26-29,40.
- [16] 苏福庆,任阵海,高庆先,等.北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统—边界层输送汇[J].环境科学研究,2004,17(1):21-25,33.
- [17] 闫世明,王雁,郭伟,等.太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析[J].环境科学,2019,40(11):4801-4809.
- [18] 李霞,贾健.复杂地形多尺度气流对城市大气污染影响的研究进展[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):1-10.
- [19] 彭端,杜尧东,樊琦,等.珠三角一次严重雾霾混合污染数值模拟分析[J].气象与环境科学,2021,44(5):1-9.
- [20] 李云,张莹,许金萍,等.天目山地区重污染天气预测模型及其环流特征研究[J].气象与环境科学,2021,44(3):54-60.
- [21] 宋京京,吴序鹏,夏祥鳌.华东农田秸秆燃烧对常州大气环境的影响[J].气象与环境科学,2016,39(2):18-25.
- [22] GB 3095-2012,环境空气质量标准[S].
- [23] HJ 633-2012,环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].
- [24] 姚森,张晗宇,王晓琦,等.2016 年 1 月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估[J].环境科学,2021,42(2):534-545.
- [25] BEGUM B A, KIM E, JEONG C H, et al. Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(20):3719-3724.
- [26] 王郭臣,王珏,信玉洁,等.天津 PM₁₀ 和 NO₂ 输送路径及潜在源区研究[J].中国环境科学,2014,34(12):3009-3016.
- [27] HSU Y K, HOLSEN T M, HOPKE P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in

- Chicago[J].Atmospheric Environment,2003,37(4):545–562.
- [28] 杨晓春,杜萌萌,吴其重,等.西安地区一次重污染过程的气象条件及轨迹分析[J].干旱气象,2016,34(3):547–552.
- [29] 段时光,姜楠,杨留明,等.郑州市冬季大气 PM_{2.5} 传输路径和潜在源分析[J].环境科学,2019,40(1):86–93.

Transport Characteristics of PM_{2.5} and Potential Sources in Autumn and Winter in Yuncheng Basin

LIU Wanli¹, YAN Shiming², WANG Yan², LI Dongmei¹, HE Yuqing³, ZHANG Qianqian¹

(1.Yuncheng Meteorological Bureau, Yuncheng 044000, China;

2.Shanxi Province Institute of Meteorological Sciences, Taiyuan 030002, China;

3.Xinzhou Meteorological Bureau, Xinzhou 034000, China)

Abstract Based on the air quality monitoring data from 2017 to 2019, the HYSPLIT backward trajectory model, cluster analysis, potential source contribution factor analysis (*PSCF*) and concentration weight trajectory analysis (*CWT*) were used to analyze the transport paths and major paths correspond to heavily polluted circulation patterns and potential sources of PM_{2.5} in Yuncheng in autumn and winter. The results show that the easterly wind prevails near the ground corresponding to relatively high pollution frequency, the weak easterly and southwest increase the PM_{2.5} concentration. Clustering analysis of backward trajectories of PM_{2.5} in autumn and winter show a great regularity. The trajectories are mainly from the northwest with high frequency of 53.53% but rarely from the east with low frequency of 11.25%. The amount of trajectories from the west and southwest are between them, which are 16.61% and 12.06%, respectively. Different tracks corresponded to different weather patterns, the heavy pollution weather pattern of the northwest and west tracks is mainly as follows: There are mostly “two troughs and one ridge” situation at 500 hPa; Yuncheng is affected by the northwest airflow before the ridge at 700~850 hPa; At sea level pressure, the high-pressure front bottom type or uniform-pressure field type is generally observed. The heavy pollution weather pattern in the southwest track is mainly as follows: The 500 hPa is generally straight westerly wind. At 700~850 hPa, Yuncheng is affected by the southwesterly in the east of the trough. The sea level pressure field is the front bottom (bottom) of high pressure or uniform pressure. The potential sources of PM_{2.5} in Yuncheng are mainly located in southern Shaanxi, eastern Sichuan, southeastern Xinjiang and the southeast part of Gansu. These indicate that the concentration of PM_{2.5} affecting Yuncheng in autumn and winter is not only from the regional transportation of particulate matter in the southwest part of the Fenwei Plain. Long-distance transportation of particulate matter from Xinjiang and Gansu provinces in the northwest are also the important sources.

Key words air pollution characteristics; backward trajectory; clustering analysis; synoptic situation; potential source area