



关中地区一次典型沙尘天气对空气质量的影响及沙尘来源

王蕾^{1,2,✉}, 刘笑¹, 陈浩^{2,3}, 闫东杰^{1,✉}, 王永平⁴, 蔡欢², 张佳音², 张秦铭², 和莹²

1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 2. 陕西省环境监测中心站, 陕西省环境介质痕量污染物监测预警重点实验室, 西安 710054; 3. 渭南市环境保护监测站, 渭南 714000; 4. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061

摘要 基于环境空气质量监测数据, 应用 HYSPLIT 后向轨迹模式、潜在源贡献因子 (PSCF) 和浓度权重轨迹 (CWT) 等综合分析了关中地区一次典型扬沙天气过程对城市环境空气质量的影响特征及沙尘来源。结果表明, 2020 年 3 月 26 日关中地区受沙尘天气影响 16 h, 关中 5 市出现重度及以上污染 3~9 h, 除渭南外的 4 市当日空气质量较沙尘前日转差 1~3 个级别, 达到轻度至重度污染。在这次沙尘天气期间, 关中 5 市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的小时浓度均呈“单峰”型变化, PM_{10} 的小时浓度变幅为 $PM_{2.5}$ 的 1.2~13.5 倍; $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的浓度比值下降时段位于沙尘天气前期, 其谷值滞后 PM_{10} 峰值 1~2 h; SO_2 、 NO_2 和 CO 的小时浓度明显下降, O_3 的小时浓度日变化幅度减小。此次沙尘天气由蒙古气旋和地面冷锋系统引起, 关中地区主要沙尘源地为我国腾格里沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地及蒙古国中西部戈壁沙漠, 沙源地临近城市在沙尘来临前风速风向有骤变现象, 受沙尘影响城市 PM_{10} 浓度的上升滞后其 1~5 h。该研究结果可为关中城市受沙尘天气影响型环境空气质量预报提供参考。

关键词 关中地区; 沙尘; 空气质量; PM_{10}

近年来, 我国沙尘天气发生频次呈减少趋势^[1], 这与全球气候变暖和土地荒漠化治理成效显著密切相关^[2]。然而, 沙尘天气仍是我国所面临的严重灾害性天气之一, 它的发生可使大气水平能见度显著下降和颗粒物浓度明显上升^[3], 继而恶化城市空气质量。沙尘天气还会对人类的生产和生活及社会经济产生严重影响, 如引发人体呼吸道、消化道和心血管等人群健康问题^[4-5], 造成交通受阻、能源供应中断和农作物受损等社会经济问题^[6]。因此, 全面研究和分析沙尘天气的形成机制和特征, 并及时进行预报预测, 对于减轻沙尘天气对城市 and 人类影响具有重要意义。

国内外学者针对沙尘天气的成因、时空分布特征、传输路径及源区分布、大气环境质量影响特征、监测和预测预报等开展了大量研究^[7-13]。在大气环境质量影响特征方面, 学者们大多采用环境空气质量监测数据、常规气象观测数据和激光雷达观测方法等手段进行分析研究。马雁军等^[3]分析了辽宁一次沙尘天气过程及其对不同粒径颗粒物的影响, 结果表明沙尘前后 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_1 的浓度变化很大, 且不同粒径颗粒物浓度的增加程度不同; 蒋雨荷等^[14]对我国北方一次强沙尘暴天气过程进行了研究, 发现沙尘暴期间城市 PM_{10} 日平均质量浓度最高达到了 $1\,763\,\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超出二级标准 12 倍, SO_2 、CO 和 NO_2 日平均质量浓度均有所下降, 而 O_3 质量浓度变化不大; 谭子渊等^[15]对甘肃一次典型沙尘天气过程的影响特征进行了探讨, 发现沙尘天气对不同区域影响不同, 而这与其当地下垫面特征、风速和边界层高度等密切相关。

我国西北地区气候干燥、降水稀少、沙源丰富, 为沙尘天气的高发区域, 也是中亚沙尘源区的一部分^[16]。我国的主要沙尘移动路径可分为 3 条: 偏西路径、西北路径和偏北路径^[17]。关中地区地处陕西省中部, 位于西北地区沙尘源区下游的黄土高原南部地区, 常受到沙尘天气传输的侵扰。王蕾等^[18]发现

收稿日期: 2023-04-13; 录用日期: 2023-09-21

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2020JQ-982, 2021JQ-963, 2023-JC-YB-401)

第一作者: 王蕾 (1983—), 女, 博士, 高级工程师, 19416253@qq.com; ✉通信作者: 王蕾 (1983—), 女, 博士, 高级工程师, 19416253@qq.com; 闫东杰 (1981—), 男, 博士, 副教授, yandongjie_2000@163.com

2016—2020 年关中地区严重污染天中有 20.5%~66.7% 是因沙尘天气影响而致，可见沙尘天气对其环境空气质量的影响不容忽视。然而，现有研究大多聚焦于我国甘肃、内蒙古和新疆等地，针对关中地区的相关研究较少^[19-22]。本研究选取影响关中地区全域且全年最强的一次沙尘天气，分析了其对关中地区城市环境空气质量的影响，包括沙尘影响期间颗粒物和气态污染物浓度响应特征、首要污染物变化、沙尘源贡献和空气质量等级变化等，同时采用 HYSPLIT 后向轨迹模式、潜在源贡献因子 (PSCF) 和浓度权重轨迹分析 (CWT) 等确定了沙尘传输路径及其来源，为掌握沙尘传输对关中地区空气质量的影响规律及沙尘天气影响型空气质量预报预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本研究所用的城市环境空气质量数据和地面小时气象数据来自陕西省空气质量联网监测管理平台 (<http://221.11.17.250:9000/Home>)。轨迹计算所用资料来源于美国气象环境预报中心 NCEP 全球资料同化系统 GDAS 气象数据，空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ，分别为 00、06、12、18(UTC 时间)4 个时次，高度层为 23 层，气象要素包括温度、湿度、气压、水平和垂直风速等。

1.2 研究方法

沙尘天气过程识别依据《受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定》(环办监测 [2016] 120 号)^[23] 和《关于沙尘天气过程影响扣除有关问题的通知》(总站气字 [2020] 76 号)^[24] 进行，同时对沙尘天气过程的起止时间判定。沙尘天气强度划分依据《沙尘天气分级技术规定》(总站生字 [2004] 31 号)^[25]。

基于城市环境空气质量小时监测数据，分析沙尘天气影响过程及前后关中各市颗粒物和气态污染物的质量浓度响应特征。描述沙尘天气影响过程时，分为沙尘前 (沙尘起始前 6 h)、沙尘期 (沙尘起始至结束) 和沙尘后 (沙尘结束后 6 h)3 个阶段。将沙尘天气起始前 6 h 平均污染物浓度作为城市受沙尘天气影响之前的参照质量浓度，简称沙尘前质量浓度。颗粒物受沙尘天气影响变化幅度用沙尘期峰值质量浓度比沙尘前质量浓度的增加倍数表示，其计算公式见式 (1)；颗粒物受沙尘天气影响响应快慢用颗粒物质量浓度变化速率表示，其计算公式见式 (2)；沙尘天气对颗粒物质量浓度日均值的贡献计算公式见式 (3)。

$$M = \frac{(C_m - C_0)}{C_0} \quad (1)$$

$$v = \frac{(C_m - C)}{H} \quad (2)$$

$$\Delta C = C_1 - C_2 \quad (3)$$

式中：M 为颗粒物质量浓度增加倍数，无量纲； C_m 为峰值质量浓度， C_0 为沙尘前质量浓度； v 为速率， $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot\text{h}^{-1}$ ， C 为沙尘起始/结束时刻质量浓度， H 为沙尘起始/结束时刻至峰值质量浓度时刻经历小时数， h ； ΔC 为沙尘天气对颗粒物浓度日均值的贡献， C_1 为实测沙尘影响日颗粒物质量浓度日均值， C_2 为未受沙尘天气影响时的颗粒物背景质量浓度值 (沙尘影响前一日实测浓度日均值)。式 (1)、(2) 和 (3) 中质量浓度单位均为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

应用 HYSPLIT 后向轨迹模式，以此次沙尘天气最先到达的宝鸡 (34.35°N , 107.18°E) 为代表城市，分别以其沙尘起始时间 3 月 26 日 00:00 和 PM_{10} 质量浓度峰值时间 3 月 26 日 04:00 为后推起始时间，模拟 500 m 高度 24 h 后向轨迹，分析此次关中地区沙尘来源。采用 PSCF 和 CWT 分析确定关中地区沙尘源区，所用轨迹为 5 市 3 月 25—26 日逐时次 500 m 高度 24 h 后向轨迹。PSCF 是基于条件概率函数发展而来的一种识别潜在污染源的方法^[26]，该方法将研究区域划分为若干个网格 ij ，PSCF 值为经过网格的污染轨迹端点数 m_{ij} 与落在该网格的所有轨迹端点数 n_{ij} 的比值。PSCF 是一种条件概率，当某一网格中的 n_{ij} 小于研究区域内每个网格内平均轨迹端点数的 3 倍时，就需要引入权重系数 W_{ij} 来降低 PSCF 的不确定性。PSCF 计算方法见式 (4)， W_{ij} 规定见式 (5)，WPSCF 计算方法见式 (6)。

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (4)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & 80 < n_{ij} \\ 0.70 & 20 < n_{ij} \leq 80 \\ 0.42 & 10 < n_{ij} \leq 20 \\ 0.05 & n_{ij} \leq 10 \end{cases} \quad (5)$$

$$WPSCF = W_{ij} \times PSCF_{ij} \quad (6)$$

CWT 方法可计算轨迹权重浓度,分析不同潜在污染源的贡献大小^[27],在 CWT 分析中同样使用权重系数,以减少 n_{ij} 较小时所引起的不确定性。CWT 计算方法见式 (7),WCWT 计算方法见式 (8)。

$$CWT_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl} \quad (7)$$

$$WCWT = W_{ij} \times CWT_{ij} \quad (8)$$

式中: CWT_{ij} 是网格 ij 平均权重浓度; l 是轨迹; C_l 是轨迹 l 经过网格 ij 时对应的大气污染物浓度; τ_{ijl} 是轨迹 l 在网格 ij 停留时间。PSCF 中所用权重系数同样适用于 CWT 分析,以减少 n_{ij} 较小引起的误差。

2 结果与讨论

2.1 沙尘天气概况及天气形势分析

根据 2020 年大气环境气象公报^[28],3 月 25—26 日,受较强冷空气影响,蒙古国中西部发生了较强的沙尘天气,随后我国西北地区和东北地区西部出现了扬沙或浮尘天气,新疆南疆部分地区达到了沙尘暴及强沙尘暴级别。受此次沙尘传输影响,关中地区 3 月 26 日出现了全年最强的一次沙尘天气。由表 1 可知,3 月 26 日 0:00,沙尘最先到达宝鸡,随后自西向东移动先后影响咸阳、西安、铜川、渭南 4 市,整个沙尘过程共持续 16 h,其中宝鸡、咸阳和西安达到扬沙天气级别,铜川出现浮尘天气,渭南为受沙尘天气影响。各城市中宝鸡 PM_{10} 峰值浓度最高,超过环境空气质量二级标准 ($150 \mu g \cdot m^{-3}$) 的 10 倍。

表 1 2020 年 3 月 26 日关中 5 市沙尘天气过程识别结果

Table 1 Identification results of dust weather process identification in 5 cities in Guanzhong region on 26th March, 2020

城市	开始时刻	结束时刻	影响时长/h	PM_{10} 峰值/ $(\mu g \cdot m^{-3})$	沙尘级别
宝鸡	03-26 00:00	03-26 10:00	11	1 651	扬沙
咸阳	03-26 03:00	03-26 15:00	13	1 355	扬沙
西安	03-26 04:00	03-26 15:00	12	1 221	扬沙
铜川	03-26 04:00	03-26 10:00	7	932	浮尘
渭南	03-26 08:00	03-26 15:00	8	437	受沙尘天气影响

2020 年 3 月 25 日 20:00,蒙古国西部形成冷高压系统,中心气压达 1 040 hPa。同时,从蒙古冷高压伸出的冷锋也已到达了我国内蒙古^[29]、宁夏及陕北一带,强冷空气蓄势待发。至 26 日 02:00,冷高压继续东移南下,冷锋抵达关中地区,在槽后脊前的西北气流引导下,冷空气携带上游沙源地沙尘传输至关中,受其影响关中 5 市自西向东空气质量相继出现了不同程度转差。至 26 日 08:00,冷锋移出关中地区,冷空气东移,关中地区沙尘影响开始逐渐减弱,各市 PM_{10} 质量浓度基本呈下降趋势,空气质量开始逐渐好转。

2.2 颗粒物质量浓度变化响应特征

图 1 为 3 月 25 日 18:00—26 日 21:00 关中 5 市颗粒物小时质量浓度变化曲线。在沙尘天气前,各市颗粒物质量浓度普遍较低,沙尘期颗粒物质量浓度先升高后降低,呈“单峰”型变化。各市 PM_{10} 质量浓度平均上升速率达 $24 \sim 371 (\mu g \cdot m^{-3}) \cdot h^{-1}$,下降速率达 $62 \sim 253 (\mu g \cdot m^{-3}) \cdot h^{-1}$,除渭南外的其他 4 市具有明显的“急升急降”特征。各市颗粒物质量浓度峰值时间随着沙尘气团主体的移动而变化:在 3 月 26 日 00:00,沙尘开始影响宝鸡,宝鸡 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈迅速上升趋势,于 04:00 达到其各自峰值质量浓度,颗粒物增加倍数分别为 11.5 倍和 2.0 倍;在 03:00,沙尘东移开始影响咸阳,其颗粒物增加倍数分别为 13.7 倍和 2.6 倍;在 04:00,沙尘到达西安和铜川,两市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度急剧上升,分别于 3 h 和 2 h 后达到其各自峰

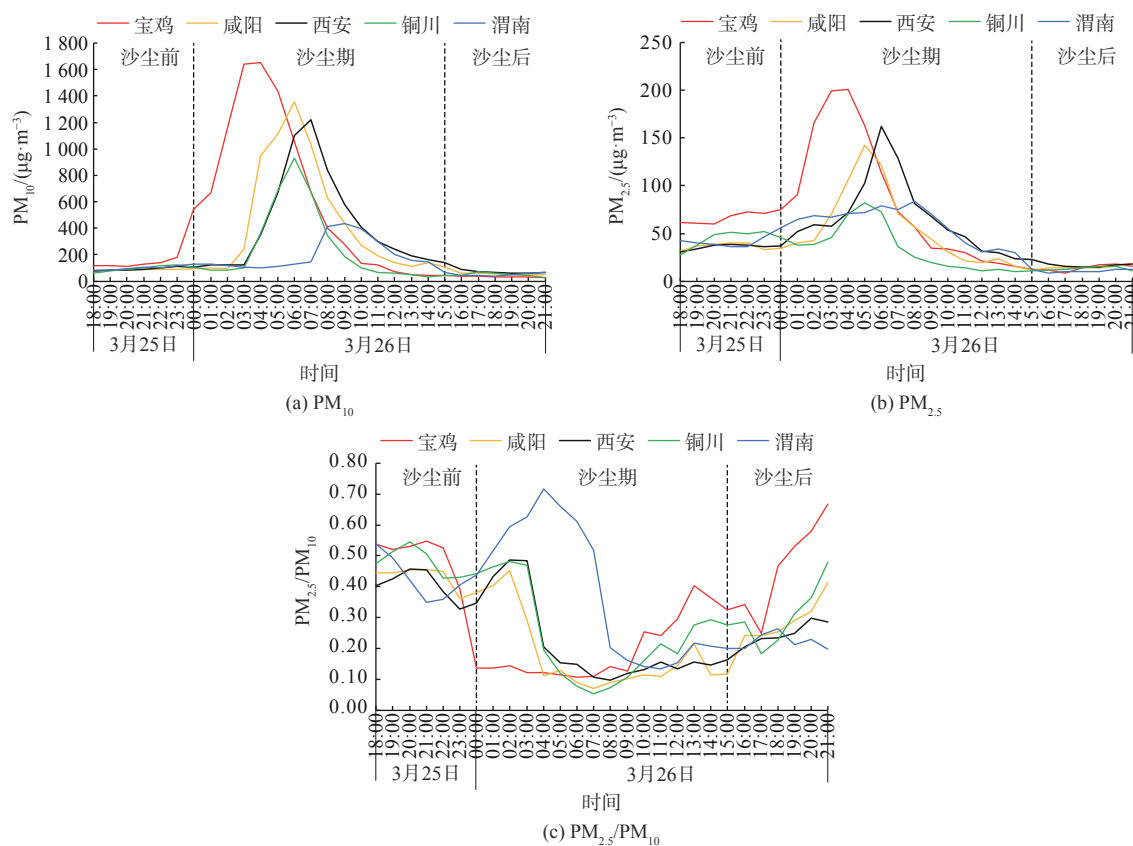


图1 2020年3月25日18:00—26日21:00关中5市颗粒物小时质量浓度变化

Fig. 1 Hourly variation of particulate matter concentration in 5 cities of Guanzhong region from 18:00 on 25th March to 21:00 on 26th March, 2020

值浓度,前者颗粒物增加倍数分别为9.8倍和2.4倍,后者分别为8.2倍和0.8倍;在08:00,沙尘移入渭南,其颗粒物增加倍数分别为2.7倍和0.2倍。在15:00,沙尘天气对关中地区影响结束,各市颗粒物浓度均回落至正常水平。整体上看,此次沙尘天气过程前后粗、细颗粒物浓度变化基本同步,但 PM_{10} 的小时变化幅度大,为 $PM_{2.5}$ 的1.2~13.5倍。

$PM_{2.5}/PM_{10}$ 小时变化曲线近似呈倒“Z”型。沙尘前质量浓度比值相对较高, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 平均在40%以上。随着沙尘天气的发展,各市质量浓度比均于其各自沙尘天气起始时刻呈下降趋势,于 PM_{10} 峰值质量浓度后1~2 h达到质量浓度比的最小值(5%~13%),之后缓慢上升。以宝鸡为例,在3月25日23:00其质量浓度比为39%,在26日00:00沙尘开始影响宝鸡, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 迅速下降到了14%,01:00—07:00其质量浓度比仍保持连续下降,达到了最小值11%后开始波动上升,恢复甚至超过沙尘前质量浓度比值水平。各市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 下降时段均位于沙尘天气前期,占沙尘期时长比例为38%~73%,结合颗粒物增加倍数可知,沙尘天气前期以粗颗粒为主,而后期质量浓度比值的上升说明细颗粒逐渐占据主导地位,这与蒋雨荷等^[14]的研究结果一致。

2.3 气态污染物质量浓度变化情况

图2为3月25日18:00—26日21:00关中5市气态污染物质量浓度变化曲线。沙尘天气对气态污染物浓度有一定影响。在沙尘天气前,关中各市 SO_2 和CO质量浓度变化不大,而 NO_2 质量浓度呈明显的上升趋势。这主要是由于晚高峰机动车尾气的排放和夜间NO对 O_3 的滴定效应所致。在沙尘期, SO_2 、 NO_2 和CO质量浓度整体呈下降趋势,宝鸡、咸阳、西安、铜川和渭南 SO_2 下降幅度为41.0%~61.3%; NO_2 下降幅度为62.7%~81.5%;CO下降幅度为45.5%~61.7%。气象数据显示宝鸡、咸阳、西安、铜川和渭南沙尘期极大风速分别达到了6.2、8.6、7.5、8.2和8.6 $m \cdot s^{-1}$,大风的强扩散作用是造成 SO_2 、 NO_2 和CO质量浓度下降的主要原因。在沙尘后,各市 SO_2 质量浓度基本趋于稳定,为3~6 $\mu g \cdot m^{-3}$, NO_2 和CO质量浓度有所上

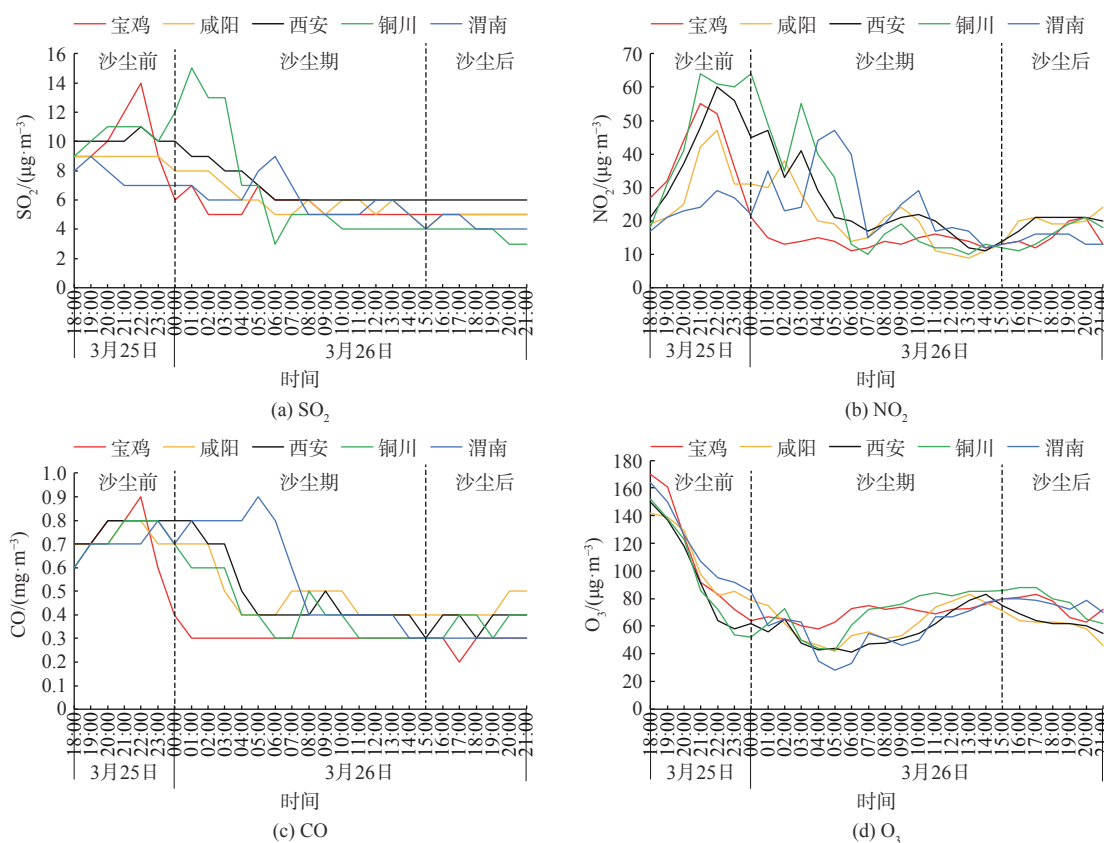


图2 2020年3月25日18:00—26日21:00关中5市气态污染物小时浓度变化

Fig. 2 Hourly variation of gaseous pollutants concentration in 5 cities of Guanzhong region from 18:00 on 25th March to 21:00 on 26th March, 2020

升。 O_3 质量浓度变化趋势不同于 SO_2 、 NO_2 和CO,为先下降后上升再下降,这主要与其日变化特征有关^[30]。沙尘期 O_3 质量浓度日峰值低于非沙尘日(3月25日5市 O_3 峰值质量浓度达152~170 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),日变化幅度明显减小。这是因为一方面沙尘期大气扩散条件较好, O_3 不容易积累,另一方面沙尘期颗粒物浓度相对较高,其散射作用削弱了太阳辐射,臭氧生成潜势减弱^[31]。

2.4 城市沙尘影响日颗粒物浓度沙尘源贡献及环境空气质量状况影响

图3为沙尘天气对关中各市3月26日 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度贡献。沙尘天气过程对各市 PM_{10} 质量浓度日均值贡献为28~276 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,贡献大小由高到低排序依次为:宝鸡>咸阳>西安>铜川>渭南,与各市沙尘天气强弱显著相关;对各市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均质量浓度贡献为-17~-4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,贡献值均为负。因此,此次沙尘天气过程对 $\text{PM}_{2.5}$ 有削减作用,削减程度由高到低排序依次为:铜川>渭南>宝鸡>咸阳>西安。

在沙尘前一日(3月25日),5市空气质量等级均为良,其中宝鸡首要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$,西安、咸阳、铜川和渭南均为 O_3 。在沙尘影响日(3月26日),除渭南外,其余4市的日空气质量等级均上升了1~3个级别,达到了轻度至重度污染,5市首要污染物均为 PM_{10} 。从小时空气质量监测数据看,5市小时空气质量等级在良至严重污染之间,各市重度及以上污染时长达3~9 h,占沙尘影响总时长的37.5%~81.82%,排序依次为:宝鸡

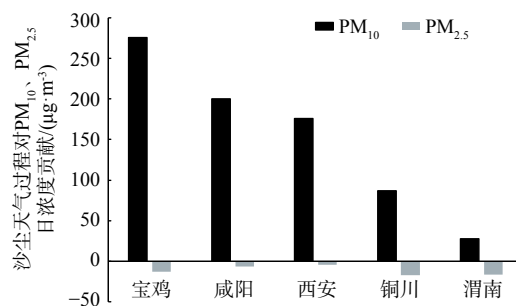


图3 沙尘天气过程对关中5市2020年3月26日 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 日浓度贡献

Fig. 3 Contribution of dust weather process to the daily concentration of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in 5 cities of Guanzhong on 26th March, 2020

(81.8%)>铜川(57.1%)>西安(50.0%)>咸阳(46.2%)>渭南(37.5%)。结合沙尘对各市颗粒物日均值贡献大小看,此次沙尘天气对关中各市影响程度存在显著空间差异,对宝鸡影响最大,渭南最小。这与其所处的地理位置和上游沙尘的传输路径密切相关。

2.5 沙尘传输路径及来源分析

图4为3月26日00:00和04:00宝鸡24 h后向轨迹。3月26日00:00气流轨迹来自我国内蒙古腾格里沙漠,沿东南方向移动抵达宝鸡,为西北路径;04:00气流轨迹来自蒙古国戈壁沙漠,由北向南移动经内蒙古等地到达宝鸡,为偏北路径。对比2个时刻气流轨迹长度可知,04:00的气流轨迹更长,这表明来自蒙古国戈壁沙漠的气团移动速度更快,此次关中地区沙尘天气主要来自蒙古国中西部戈壁沙漠的远距离输送。

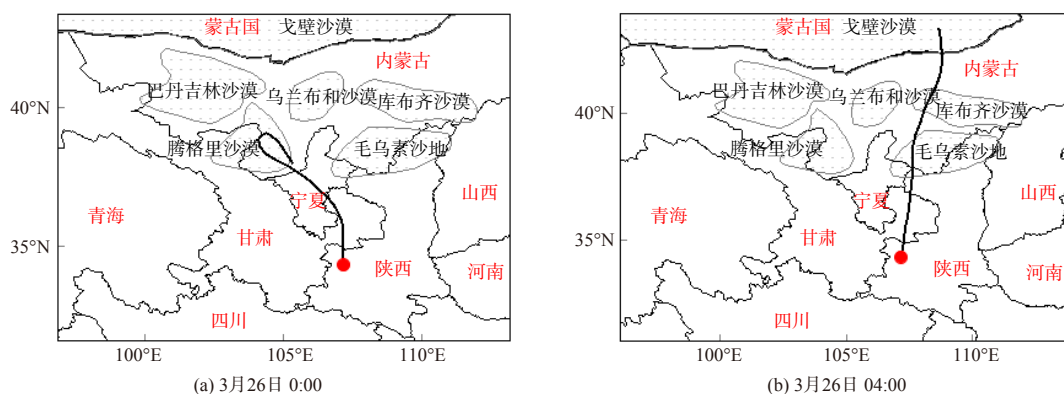


图4 2020年3月26日宝鸡后向轨迹

Fig. 4 Backward trajectory of Baoji on 26th March, 2020

图5为3月25—26日关中地区PSCF和CWT分析结果。在PSCF分析中,WPSCF值越大,表示该网格区域对受点城市 PM_{10} 质量浓度影响越大,高WPSCF值所对应网格区域就是影响受点城市 PM_{10} 质量浓度的潜在源区。对于CWT分析,WCWT值越大,表示该网格对应区域对受点城市 PM_{10} 质量浓度的贡献程度越大。PSCF与CWT分析结果基本一致,WPSCF和WCWT较大值主要分布在我国内蒙古中西部戈壁沙漠、宁夏北部、甘肃东部以及蒙古国中西部戈壁沙漠。结合后向轨迹、PSCF和CWT分析,对照蒙古国和我国沙漠地带分布可知,此次关中地区沙尘天气主要来源于我国腾格里沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地及蒙古国中西部戈壁沙漠,其传输路径为西北路径叠加偏北路径。

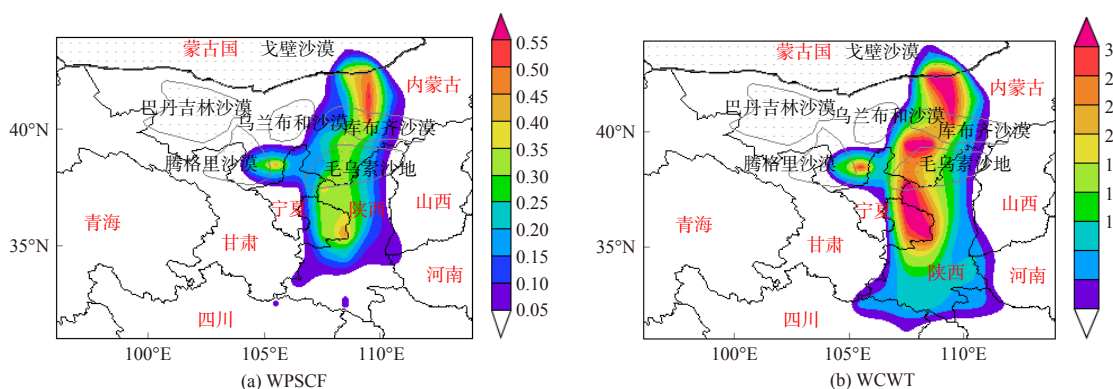


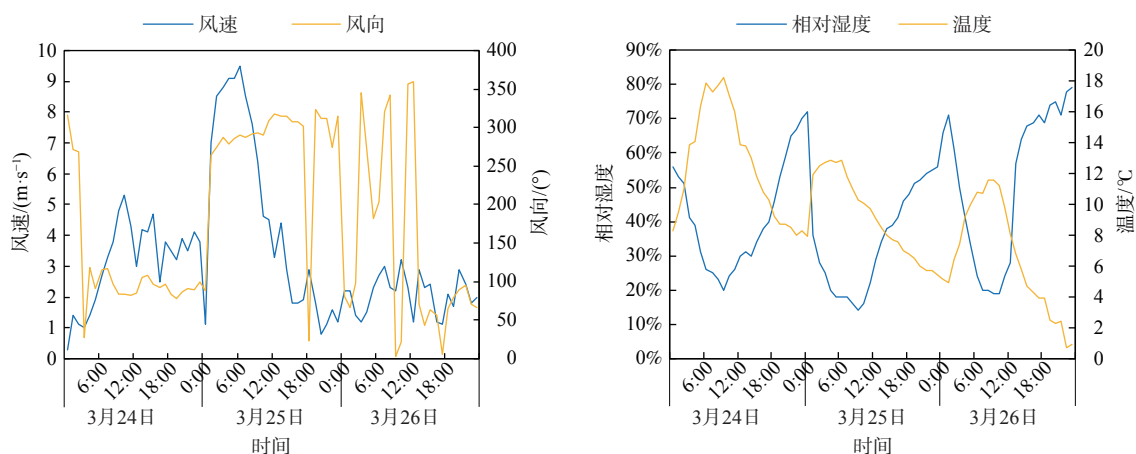
图5 2020年3月25—26日关中地区PSCF和CWT分析

Fig. 5 The analysis of WPSCF and WCWT in Guanzhong region on 25th and 26th March, 2020

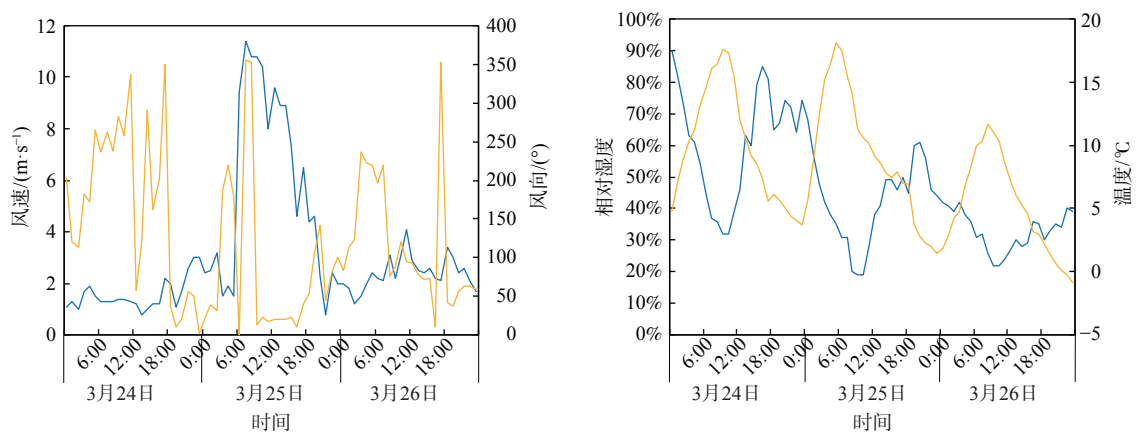
2.6 沙源地至关中地区主要气象条件分析

选取本次沙尘路径上临近沙源地的代表城市中卫(西北路)和阿拉善盟东部(北路)、传输路径下游城市固原和关中地区首个受沙尘影响城市宝鸡,分析3月24—26日沙源地至关中地区地面主要气象要素的变化

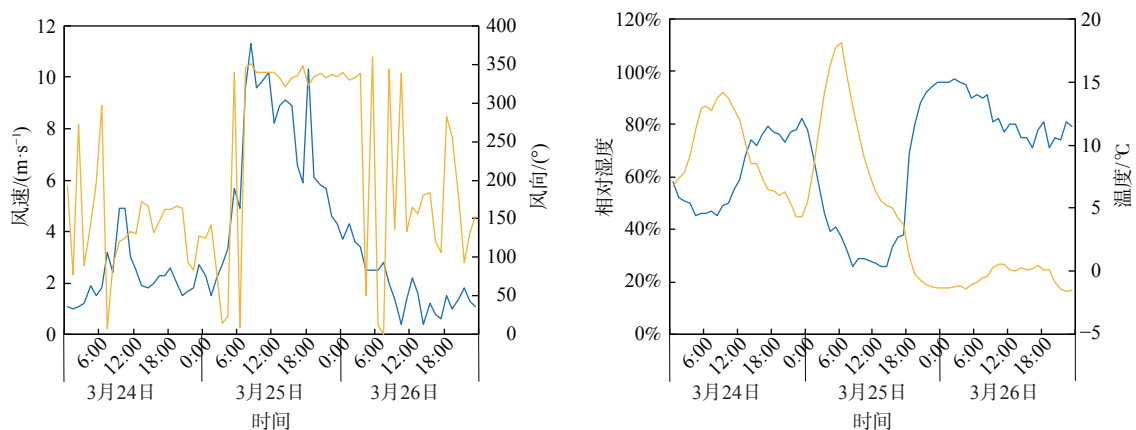
情况,结果如图6所示。在3月25日9:00,中卫风向由东风急转为西风,风速骤升为前1h的6.4倍($7.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),1h后开始发生沙尘天气,沙尘级别相继达到扬沙、沙尘暴(PM_{10} 最高质量浓度 $2\,704\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),整个沙尘过程持续16h,主导风向为西北风,最大风速达 $9.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在25日14:00,阿拉善盟东部风向由南风急转为北风,风速迅速增大到前1h的6.3倍($9.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),15:00 PM_{10} 质量浓度骤升,16:00沙尘级别达到沙尘暴(PM_{10} 最高质量浓度 $3\,781\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),整个沙尘过程持续6h,主导风向为偏北风,风速持续大于 $8.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大达 $11.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在25日11:00,固原风向由偏东风转为偏北风,风速逐渐增大,15:00风速迅速上升为前1h的2.0倍($9.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),16:00开始受沙尘影响,21:00达到扬沙级别,整个沙尘过程持续14h,主导风向为偏北风或西北风,最大风速达 $11.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在25日23:00,宝鸡风向由偏东风迅速转变为



(a) 中卫



(b) 阿拉善盟东部



(c) 固原

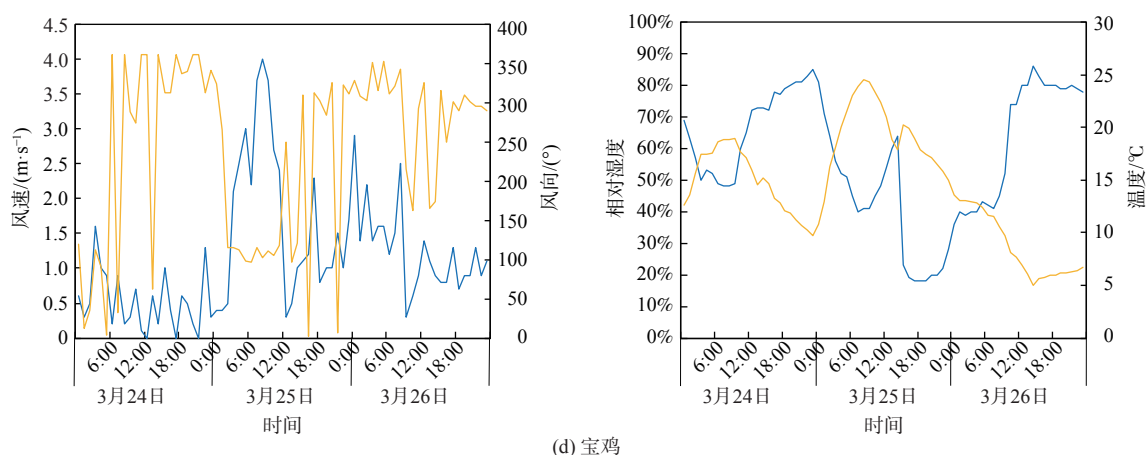


图6 2020年3月24—26日城市气象要素小时变化

Fig. 6 Hourly variation of urban meteorological elements from 24th to 26th March, 2020

西北风，风速波动上升。在26日0:00沙尘开始影响宝鸡，2:00达到扬沙级别，整个沙尘过程持续11 h，主导风向为西北风，最大风速达 $2.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。综上所述，本次沙尘过程中临近沙源地城市中卫、阿拉善盟东部沙尘来临前风速与风向都有不正常骤变现象，骤变后的强风是沙源地良好的起沙风力条件，风向转变后的指向及持续性指示着沙尘的来源和去向^[32]；大多沙尘过程自上游沙源地传输至下游受沙尘影响城市时风速具有明显的递减性^[33-34]，而本次沙尘过程沙源地临近城市至传输路径下游城市，风速递减并不明显，这与中卫—固原、阿拉善盟东部—固原之间特殊的地形有关，位于黄河平原地带的中卫受西侧山脉影响形成西北风，抵达位于六盘山脉谷地之中的固原时通过峡谷效应风速进一步增大，而阿拉善盟东部的高原地形则利于携带沙尘气团的强风通过，风力保持并向下游传输。从风速风向骤变时间及沙尘发生时间看，受沙尘影响城市 PM_{10} 质量浓度的上升相较于风速的增大和风向的转变具有一定的滞后性，中卫、阿拉善盟东部、固原和宝鸡的滞后时间分别为1、1、5和1 h。此外，中卫、阿拉善盟东部、固原和宝鸡在受沙尘天气影响期间相对湿度均有明显下降，4市最高相对湿度均小于40%，同时沙尘影响期间日最高气温较沙尘前整体有所降低，这也说明本次沙尘过程主要受上游干旱地区的干燥冷空气影响。

3 结论

1) 2020年3月26日，关中地区受上游沙尘天气传输影响出现全年最强的一次沙尘天气，整个过程持续16 h；关中5市自西向东受到不同程度影响，中西部宝鸡、西安和咸阳达到扬沙级别，北部铜川和东部渭南分别达到浮尘级别和受沙尘天气影响； PM_{10} 最高小时质量浓度出现在宝鸡，达到 $1\,651 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，超过环境空气质量二级标准的10倍。

2) 在沙尘天气影响期间，关中5市 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度同步呈现先升高后降低的“单峰”型变化， PM_{10} 小时质量浓度变化幅度大，为 $\text{PM}_{2.5}$ 的1.2~13.5倍；沙尘天气前期 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值显著下降，其谷值时刻比 PM_{10} 峰值时刻滞后1~2 h，沙尘天气后期 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值逐渐增大，细颗粒占比升高； SO_2 、 NO_2 和CO质量浓度均存在不同程度下降， O_3 质量浓度日变化幅度减小。

3) 沙尘天气对关中5市环境空气质量的影响主要体现在 PM_{10} 质量浓度的显著升高和空气质量等级的明显转差。沙尘对关中5市 PM_{10} 质量浓度日均值贡献为 $28\sim 276 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，沙尘影响日5市重度及以上污染持续3~9 h，除渭南外的4市，日空气质量由沙尘前日的良转差1~3级，达到轻度至重度污染。本次沙尘天气过程宝鸡受影响程度最大，渭南最小。

4) 本次沙尘天气由蒙古气旋和地面冷锋引起，关中地区主要沙源地为我国腾格里沙漠、库布齐沙漠、毛乌素沙地及蒙古国中西部戈壁沙漠，传输路径为西北路径叠加偏北路径。临近沙源地城市在沙尘来临前风速与风向的不正常骤变、受沙尘影响城市 PM_{10} 质量浓度上升相对于其风速增大和风向转变的滞后性、传输路径城市风向转变后的持续性指向等可作为下游城市沙尘影响型空气质量预报的关注要点。

参考文献

- [1] 王存忠, 牛生杰, 王兰宁. 50年来中国沙尘暴的多时间尺度变化特征[J]. *大气科学学报*, 2009, 32(4): 507-512.
- [2] 徐冉, 张碧辉, 安林昌, 等. 2000—2021年中国沙尘传输路径及气象成因分析[J/OL]. *中国环境科学*, 2023, 43(9): 4450-4458.
- [3] 马雁军, 刘宁微, 洪也, 等. 2011年春季辽宁一次沙尘天气过程及其对不同粒径颗粒物和空气质量的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(5): 1160-1167.
- [4] 孙兆彬, 安兴琴, 崔薏薏, 等. 北京地区颗粒物健康效应研究—沙尘天气、非沙尘天气下颗粒物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})对心血管疾病入院人次的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8): 2536-2544.
- [5] 王金玉, 李盛, 王式功, 等. 沙尘污染对暴露人群呼吸系统健康的影响[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 826-831.
- [6] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 沙尘暴及相关的自然灾害[J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(3): 225-226.
- [7] 魏巍, 皮冬勤, 晏平仲, 等. 2017年春季华北地区一次典型沙尘重污染天气过程研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(5): 1699-1707.
- [8] GUAN Q, LUO H, PAN N, et al. Contribution of dust in northern China to PM_{10} concentrations over the Hexi corridor[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 947-958.
- [9] KELLEY M C, ARDON D K. Analyzing two decades of dust events on the southern great plains region of west Texas[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, 12(6): 101091.
- [10] KIM I S, LEE J Y, WEE D, et al. Estimation of the contribution of biomass fuel burning activities in north Korea to the air quality in Seoul, south Korea: application of the 3D-PSCF method[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 230: 104628.
- [11] WANG S G, YUAN W, SHANG K. The impacts of different kinds of dust events on PM_{10} pollution in northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(40): 7975-7982.
- [12] 曾令建, 缪启龙, 高庆先, 等. 沙尘天气对北京大气环境质量及太阳辐射的影响[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(4): 433-439.
- [13] 符传博, 丹利, 唐家翔, 等. 基于轨迹模式分析海口市大气污染的输送及潜在源区[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 36-42.
- [14] 蒋雨荷, 王式功, 靳双龙, 等. 中国北方一次强沙尘暴天气过程的大气污染效应[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1344-1351.
- [15] 谭子渊, 马敏劲, 杨屹, 等. 一次典型沙尘天气过程对甘肃空气质量的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(6): 750-763.
- [16] 王涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 322-327.
- [17] 邱新法, 曾燕, 缪启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J]. *地理学报*, 2001, 56(3): 316-322.
- [18] 王蕾, 蒙瑞丽, 曹磊, 等. 2016—2020年沙尘天气对陕西省空气质量的影响特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 130-138.
- [19] WANG Y Q, ZHANG X Y, ARIMOTO R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at Xi'an, China during spring[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368: 875-883.
- [20] 胡元洁, 蒋楠. 沙尘天气对西安市环境空气质量的影响[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 53-60.
- [21] 宁海文, 王式功, 杜继稳. 西安沙尘天气特征及其对空气质量的影响[J]. *中国沙漠*, 2005, 26(6): 94-98.
- [22] 魏颖, 陈焕盛, 刘航, 等. 春季沙尘对关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度影响的多尺度模拟研究[J]. *大气科学*, 2020, 44(1): 76-92.
- [23] 中华人民共和国环境保护部. 受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定[S]. 北京, 2017.
- [24] 中国环境监测总站. 关于沙尘天气过程影响扣除有关问题的通知[S]. 北京, 2020.
- [25] 中国环境监测总站. 沙尘天气分级技术规定[S]. 北京, 2004.
- [26] DIMITRIOU K, GRIVAS G, LIAKAKOU E, et al. Assessing the contribution of regional sources to urban air pollution by applying 3D-PSCF modeling[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 248: 105187.
- [27] HSU Y K, HOLSEN T M, HOPKE P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago[J]. *Atmospheric Environment*, 2023, 37: 545-562.
- [28] 编写组. 大气环境气象公报(2020年)[R]. 北京: 中国气象局, 2020: 44-46.
- [29] 周晓敏, 张涛. 2020年3月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 2020, 46(6): 863-872.
- [30] 崔蕾, 倪长健, 王超, 等. 成都市 O_3 浓度的时间变化特征及相关因子分析[J]. *中国环境监测*, 2015, 31(6): 41-46.
- [31] 杜韬. 兰州大气细颗粒物和臭氧的污染特征、形成、机制及相互作用[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [32] 沙金燕. 黄河流域生态保护背景下宁夏春季沙尘暴与地形的相关性分析[J]. *宁夏农林科技*, 2021, 62(7): 37-40, 56.
- [33] 郭晓宁, 王钰, 马秀梅, 等. 半干旱区一次典型沙尘重污染天气过程分析—以青海东部为例[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(2): 343-353.
- [34] 张艺萌, 李晓岚, 张宏升, 等. 2020年春季中国北方一次扬沙天气过程微气象学与沙尘输送特征[J]. *气象与环境学报*, 2022, 38(4): 19-26.

(责任编辑: 靳炜)

The impact of a typical dust weather on air quality and the source of the dust in Guanzhong region

WANG Lei^{1,2,*}, LIU Xiao¹, CHEN Hao^{2,3}, YAN Dongjie^{1,*}, WANG Yongping⁴, CAI Huan², ZHANG Jiayin², ZHANG Qinming², HE Ying²

1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Environmental Monitoring Center, Shaanxi Key Lab for Environmental Monitoring and Forewarning of Trace Pollutants, Xi'an 710054, China; 3. Weinan Environmental Monitoring Station, Weinan 714000, China; 4. Shaanxi Academy of Environmental Sciences, Xi'an 710061, China

*Corresponding author, E-mail: 19416253@qq.com; yandongjie_2000@163.com

Abstract Based on the ambient air quality monitoring data, the influence characteristics on urban ambient air quality of a typical sand blowing weather process in Guanzhong region and the source of dust were analyzed by applying HYSPLIT backward trajectory mode, potential source contribution factor (PSCF) and concentration weight trajectory (CWT). The results showed that on March 26, 2020, Guanzhong region was affected by dust weather for 16 hours, and 5 cities in Guanzhong had severe and above pollution for 3~9 hours. The air quality in four cities except Weinan was 1~3 levels worse than that of the day before the dust, reaching light to heavy pollution. During the dust weather, the hourly concentration of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the five cities of Guanzhong showed a “unimodal” variation, and the hourly concentration of PM_{10} was 1.2~13.5 times that of $PM_{2.5}$. The decreasing period of $PM_{2.5}/PM_{10}$ concentration ratio was located in the early stage of dust weather, and its valley value lagged behind the peak value of PM_{10} 1~2 h. The hourly concentration of SO_2 , NO_2 and CO decreased significantly, and the daily variation range of the hourly concentration of O_3 decreased. The dust weather was caused by the Mongolian cyclone and the ground cold front system, and the main sources of dust were the Tengger desert, Kubuqi desert, Mu Us sandland and the Gobi desert in central and western Mongolia. The wind speed and direction of the cities near the sand source area had a sudden change before the arrival of dust, and the increasing of the PM_{10} concentration in the cities affected by the dust lagged behind it by 1~5 h. The results of this study can provide a reference for forecasting and early warning of the influence of dust weather on ambient air quality in Guanzhong region.

Keywords Guanzhong region; sand; air quality; PM_{10}