沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology
第13卷 第5期
2019年10月

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.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2019.05.018

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

连俊标[1],王式功[1,2*],罗 彬[3],杜云松[4],张 巍[4],蒋婉婷[1]
(1.成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 610225;2.贵州省遵义院士工作中心,贵州 遵义 563000;
3.四川省环境政策研究与规划院,四川 成都 610041;4.四川省生态环境监测总站,四川 成都 610091)

摘 要:针对四川盆地大气污染及其成因的特殊性,利用四川盆地18个城市的大气污染监测和气象观测数据以及NCEP 1°×1再分析资料,对2017年12月19日—2018年1月3日四川盆地由当地排放和外来沙尘输送双重影响的区域性大气污染过程进行分析。结果表明:2017年12月19—28日四川盆地环流场配置不利于大气污染物扩散,垂直温度层结稳定,在当地污染源持续排放下污染物浓度缓慢上升,此阶段为静稳型大气污染。29日冷空气过程打破前期不利于污染物扩散的环流场及垂直温度层结,气态污染物浓度明显下降;但伴随冷空气活动的外来沙尘输送使PM_{10}浓度迅速增大,部分城市出现沙尘型重污染;特别是广元地区受沙尘直接影响最严重,PM_{10}浓度为原来的4.5倍;成都市虽未通过沙尘天气的表观判断,但对颗粒物离子浓度和化学组分都有显著影响。因此,当时PM_{10}和CO浓度24 h比值变化受沙尘输送和天气条件共同影响,在不同时段和地区都存在明显差异,初步揭示出由静稳型大气污染向沙尘型污染转换阶段的内在变化特征,具有重要科学价值。

关键词:四川盆地;双重污染源影响;区域性污染;粗颗粒物占比值;静稳型污染;沙尘型污染
中图分类号:X51 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-0799(2019)05-0122-10

城市空气质量主要受污染源、气象、地理条件以及人为活动4个因素共同影响[1]:(1)污染源有自然排放源和人为排放源两大类,我国大气颗粒物污染源主要来自扬尘、燃煤、工业、机动车、生物质燃烧以及二次颗粒物[2],污染源排放的增加会使大气污染更严重;(2)山谷、盆地等特殊地形条件下,地形阻隔和气流交换不畅会使污染物不易扩散;(3)静风、逆温等静稳天气同样不利于污染物扩散[3-4],而强日照、高温等气象条件则有利于臭氧等光化学污染物的生成[5-6],高湿度也有利于颗粒物的生成[7],同等气象条件对不同空气污染的影响也存在差异[8];(4)人类活动改变了地表环境及污染源排放,如大城市热岛效应直接影响边界层气象场条件和污染物浓度分布[9-10],污染期间的应急防控措施则可有效缓解大气污染[11-12]。空气污染事件是在多个因素共同作用下发生的,短时大气污染过程中气象场的变化对污染过程的影响尤为关键,因此备受关注。

四川盆地处于青藏高原东侧背风区,周围环绕高海拔山脉,形成中间低、周边高的盆地地形。在这种复杂地形条件下,盆地内部年平均风速仅1.2 m/s,大部分地区灰霾日数近年来呈增加趋势[18];冬季700 hPa高度层"干暖盖"现象[19]和低边界层高度[20]则容易形成重污染事件。因此四川盆地是我国继京津冀、长三角和珠三角地区之后的第4个空气重污染区域,其空气质量问题也是研究热点。探明各区域的空气污

收稿日期:2019-06-04;**修回日期**:2019-06-24
基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91644226);面上项目(41775147);四川省重大科技专项(2018SZDZX0023);国家重点研发计划"全球变化及应对"重点专项(2016YFA0602004)
作者简介:连俊标(1991—),男,硕士研究生,主要从事环境气象研究工作。E-mail:296528588@qq.com
通讯作者:王式功(1955—),男,教授,主要从事环境气象方面的教学与研究工作。E-mail:wangsg@cuit.edu.cn

染形成机制，对我国大气污染防治和经济发展规划具有重要意义[13-17]。

目前，四川盆地空气质量研究主要集中在颗粒物污染[21-26]、光化学污染[27-31]和生物质燃烧污染[32-34]这 3 个方面,沙尘污染的研究[35]相对较少。盆地冬春季静稳型大气污染期间遭遇北方沙尘输送影响,导致颗粒物浓度剧增，造成更长时间重污染的研究甚少。因此本文对 2017 年 12 月 19 日—2018 年 1 月 3 日四川盆地由当地排放和沙尘输送双重污染源影响导致的区域性空气重污染过程进行分析，旨在探明不同污染时段之间的差异，揭示出由静稳型污染向沙尘型污染转换阶段的内在变化特征，为此种类型的污染防控提供新的科学参考。

1 资料与方法

1.1 数据来源

本文使用中国环保部公布的 2017 年 12 月 19 日—2018 年 1 月 3 日四川盆地 18 个城市(达州、成都、自贡、绵阳、宜宾、德阳、泸州、内江、雅安、重庆、眉山、广安、资阳、乐山、南充、巴中、遂宁、广元)共 110 个空气质量监测站的空气污染监测数据；中国气象局公布的 18 个城市共 126 个气象站的地面气象监测数据;成都信息工程大学资环楼(103.998°E, 30.589°N)楼顶(距离地面约 12 m)的 Anderson 分级采样器 24 h(17:05—17:05)颗粒物连续采集结果；美国环境预报中心(NCEP)/美国国家大气研究中心(NCAR)提供的空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为 6 h 的 FNL 再分析资料；中国生态遥感信息服务网提供的风云三号 C 星可见光红外扫描辐射仪(VIRR) 沙尘监测图；美国国家海洋大气管理局 NOAA 提供的后向轨迹资料。

1.2 算法介绍

利用数学平均计算污染物浓度和气象要素值；并根据空气质量分指数方法[36]计算 *AQI* 值,确定首要污染物;根据沙尘天气影响时段判定方法[37]统计本次过程期间受沙尘天气影响的城市及时间；同时分析不同高度层环流场配置和温度层结对大气污染过程的影响;利用反距离权重插值[38]估计污染物浓度和气象要素时空分布。

2 污染过程概述

2.1 区域平均时间变化

根据环流形势和污染物浓度的变化特征，选取 2017 年 12 月 19 日—2018 年 1 月 3 日(共 16 d)为本次过程研究时段。将该时段盆地 18 个城市污染物浓度值进行算数平均代表盆地总体污染，计算 *AQI* 值，可确定本次污染过程中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 为首要污染物；并计算粗颗粒物浓度占比值（PM_{10}-$PM_{2.5}$)/PM_{10},即 2.5~10 μm 粒径范围颗粒占 PM_{10} 比例。

如图 1 所示,本次过程在 19—28 日期间 PM_{10}、$PM_{2.5}$、*AQI* 值均稳定上升，峰值出现在 23 日,24 日略有下降。19 日 *AQI* 值为 104,盆地进入轻度污染状态;随着污染逐渐加重,22 日 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别达到 76 μg/m³ 和 120 μg/m³，高于二级浓度限定值[36]；*AQI* 值为 160,盆地进入中度污染状态。22—28 日盆地维持中度污染，颗粒物浓度与 *AQI* 值缓慢上升，但(PM_{10}-$PM_{2.5}$)/PM_{10} 值低于 30%,即该期间主要为细颗粒物污染。29 日出现第一次转折,PM_{10} 浓度值比 28 日增大 60 μg/m³，达到过程峰值 246 μg/m³；*AQI* 值为 208,盆地出现重度污染。30 日 PM_{10} 浓度值变化不大，但 $PM_{2.5}$ 浓度值与 *AQI* 值下降，因此(PM_{10}-$PM_{2.5}$)/PM_{10} 值在 28—29 日增大到峰值 68%,即该期间以粗颗粒物污染为主。31 日后 PM_{10} 浓度下降,$PM_{2.5}$ 浓度值回升,导致(PM_{10}-$PM_{2.5}$)/PM_{10} 值持续下降,粗颗粒物污染影响逐渐减弱。2018 年 1 月 3 日出现第二次转折,PM_{10} 大幅降至 78 μg/m³（降幅 79 μg/m³),$PM_{2.5}$ 大幅降至 50 μg/m³(降幅 42 μg/m³),*AQI* 值降至 72(等级良),本次过程彻底结束。

由本次过程污染物浓度的变化特征,可知 2017 年 12 月 19—28 日期间颗粒物浓度缓慢增大，细颗粒物污染明显，具有静稳型污染特征。29—31 日 PM_{10} 浓度大幅度增大,但 $PM_{2.5}$ 浓度反而下降,粗颗粒物污染明显，不同粒径颗粒物浓度的反常变化具有沙尘天气[39-41]特征。2018 年 1 月 3 日各污染要素同步下降,则可能与冷空气入侵以及降水过程相关。

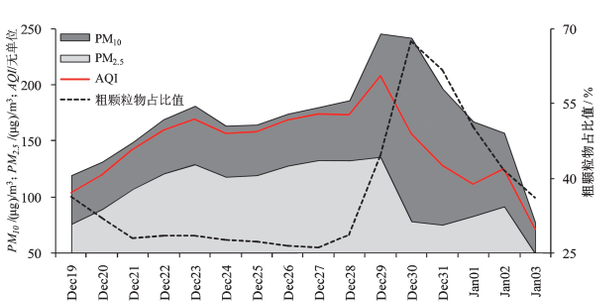


图 1 2017 年 12 月 19 日—2018 年 1 月 3 日四川盆地污染物要素日平均值变化

(深灰色为 PM_{10} 浓度,单位:μg/m³;浅灰色为 $PM_{2.5}$ 浓度,单位:μg/m³;红色实线为 *AQI*;黑色虚线为粗颗粒物占比,单位:%)

2.2 沙尘影响判定与评估

使用沙尘影响时段判定方法[37]进行诊断，可见部分城市出现沙尘天气（表 1）。19—20 日内江出现沙尘天气，与该期间盆地粗颗粒物占比值较高相对应，仅持续 18 h，PM_{10} 峰值较低，不作深入探讨。29—31 日盆地北部广元、德阳和绵阳 3 个城市先后出现沙尘天气，持续时间 46~54 h，其中广元市受影响最严重，PM_{10} 峰值高达 886 μg/m³。

表 1 本次污染过程中受沙尘天气影响的城市

城市	影响时段	持续时间/h	PM_{10} 峰值/（μg/m³）	峰值时间
内江市	19 日 20 时—20 日 13时	18	203	19 日 20 时
广元市	29 日 06 时—31 日 03 时	46	886	29 日 08 时
德阳市	29 日 15 时—31 日 20 时	54	650	29 日 17 时
绵阳市	29 日 16 时—31 日 13 时	46	619	29 日 19 时

根据 2017 年 12 月 28 日 12 时我国 FY-3C/VIRR 的卫星云图可知，该期间在我国新疆和内蒙古地区均有大面积沙尘天气活动区域，结合 2017 年 12 月 29 日 09 时广元市的 21 时后向轨迹分析（200、500、1000 m）可知，广元市出现的沙尘主要来自内蒙古地区（图 2）。

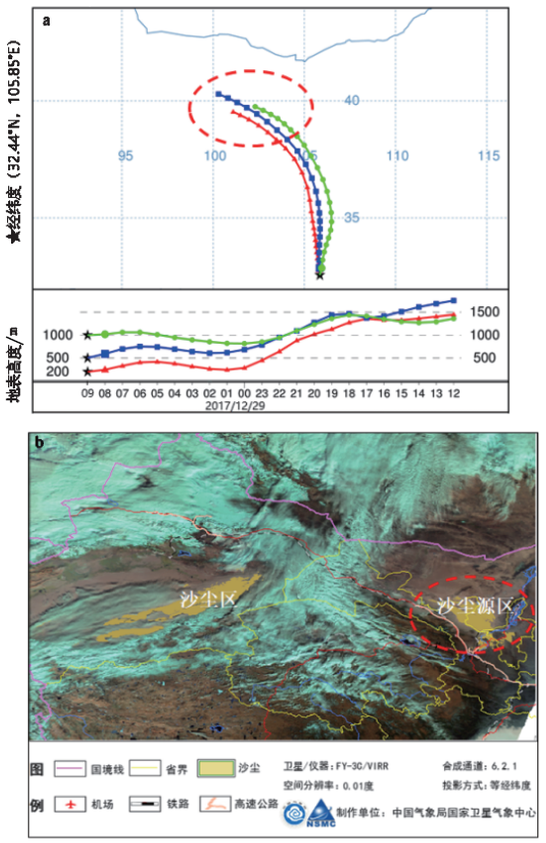


图 2 2017 年 12 月 29 日 09 时（北京时，下同）广元市后向轨迹（a）和 2017 年 12 月 28 日 12 时风云三号 C 星可见光红外扫描辐射仪观测沙尘源区图（b）

由表 2 可知 PM_{10} 过程峰值出现时间集中在 23 日和 29—30 日，与 *AQI* 2 个峰值时间相对应；除广元、绵阳和德阳外，还有成都等 9 个城市 PM_{10} 峰值出现时间在沙尘活动期间，但未通过沙尘天气判断。为验证这 9 个城市是否受沙尘影响，在这里以成都市为代表，选取 *AQI* 峰值对应时段（2017 年 12 月 22—23 日、29—30 日），对成都信息工程大学资环楼顶颗粒物 24 h（17:05—17:05）连续采集结果进行离子色谱分析。22—23 日、29—30 日成都信息工程大学站 24 h 连续采样 $PM_{2.5}$ 浓度值分别为 241 μg/m³ 和 124 μg/m³，期间三瓦窑国控监测站的采样值分别为 218 μg/m³ 和 121 μg/m³，即 22—23 日、29—30 日 $PM_{2.5}$ 浓度值分别偏差 10%和 2%，采样结果可信。

离子色谱分析（表 3）可知 22—23 日总离子浓度值（148.01 μg/m³）是 29—30 日总离子浓度值（78.34 μg/m³）的 1.89 倍；22—23 日地壳总离子（Ca^{2+}/Na+/Mg^{2+}）浓度值（12.88 μg/m³）是 29—30 日的（30.00 μg/m³）的 0.43 倍；即 29—30 日期间成都市

表 2 盆地各城市 PM_{10} 峰值出现时间

城市	峰值/（μg/m³）	峰值时间	城市	峰值/（μg/m³）	峰值时间	城市	峰值/（μg/m³）	峰值时间
广安	294	23 日 20 时	广元	886	29 日 08 时	自贡	387	30 日 14 时
巴中	315	23 日 21 时	德阳	650	29 日 17 时	眉山	333	30 日 16 时
达州	422	25 日 20 时	绵阳	619	29 日 19 时	资阳	388	30 日 16 时
重庆	256	26 日 19 时	雅安	378	29 日 20 时	内江	335	30 日 20 时
泸州	311	27 日 22 时	成都	361	29 日 23 时	宜宾	322	30 日 21 时
乐山	272	28 日 22 时	遂宁	341	30 日 13 时	南充	248	30 日 21 时

颗粒物浓度比 22—23 日低,但地壳离子浓度反而更大。22—23 日细颗粒物(粒径 6~9 级)离子浓度值(125.49 μg/m³)是粗颗粒物(粒径 1~5 级)离子浓度值(22.52 μg/m³)的5.6 倍;29—30 日细颗粒物离子浓度值(30.52 μg/m³)是粗颗粒物离子浓度值(47.82 μg/m³)的 0.63 倍;即 22—23 日以细颗粒物污染为主,29—30 日以粗颗粒物污染为主。29—30 日成都市颗粒物总浓度下降,但地壳总离子浓度和粗颗粒物浓度值反而大幅度升高,这种变化与沙尘天气活动有关。说明以成都市为代表的其他 9 个城市,虽然没有出现沙尘天气,但仍然受到沙尘颗粒物的影响;出现沙尘天气的 3 个城市,受沙尘影响更明显,地壳总离子浓度值和粗颗粒物浓度值明显更高。

表 3 不同离子色谱分析结果 μg/m³

	离子总浓度	地壳离子总浓度	1~5 级	6~9 级
12 月 22—23 日	148.01	12.89	22.52	125.49
12 月 29—30 日	78.35	30.00	47.83	30.52

注:粒径范围为 2.10 μm<1~5 级<11.00 μm,6~9 级<2.10 μm。

2.3 *AQI* 时空分布

将四川盆地 18 个城市 110 个大气污染监测站点的 *AQI* 日平均值进行反距离权重插值,并根据等级划分(图 3)。可知 2017 年 12 月 19 日起盆地出现大面积轻度以上污染区域,且面积逐渐扩大,于 21 日覆盖整个四川盆地;同时在盆地东部的达州,盆地西北部的成都、德阳和绵阳,盆地西南部的宜宾、自贡和泸州地区形成 3 个中度污染中心。22—28 日期间盆地污染程度明显加重,大面积中度污染区在盆地内稳定维持凹型分布;3 个污染中心进一步出现重度污染。29 日受沙尘输送影响,出现第一次转折:盆地北部的广元、绵阳和德阳地区出现严重污染,西部多个城市则出现重度以上污染。30 日 *AQI* 重度以上污染区域面积迅速缩小,31 日之后四川盆地继续维持大面积轻度污染。2018 年 1 月 3 日出现第二次转折,盆地污染过程彻底结束。

3 污染期间天气概述

3.1 500 hPa 高空环流场

根据 500 hPa 高空环流背景场可知,2017 年 12 月 19—26 日四川盆地 500 hPa 受较弱偏西风气流影响,有利于低层污染物积累[42],其中 23—24 日有弱北方槽在黄河流域东移过境,对盆地影响较弱;因此 19—26 日盆地污染物浓度稳定持续上升,且在 24 日略下降。27—28 日“干性”南支槽过境,同样有利于污染物浓度增大[43]。29—30 日受北方槽底过境影响,四川盆地有明显 24 h 负变温,打破不利于污染物扩散的高空环流场,但沙尘过程反而使污染加重。之后槽区东移减弱,2018 年 1 月 2 日起转受脊区控制,西南风加大,直到过程结束。

3.2 700 hPa 天气型

700 hPa 天气系统是影响四川盆地冬季大气污染的关键,不同 700 hPa 天气型对盆地污染的影响有明显差异。根据宁贵财[44]划分的 9 种 700 hPa 空气重污染天气型,对本次过程的 700 hPa 环流场(图 4)进行归类。可知,2017 年 12 月 19 日四川盆地受 TYPE-2 西北部弱高压型(NWH⁻)控制,21 日转为 TYPE-9 低压型(L),即由高压前部型转为低槽型,天气型的变化不利于污染物扩散,期间盆地大气污染情况逐渐加重。22—28 日期间以低槽型天气为主,且无降水过程,属于重污染天气型,污染物稳定维持在较高浓度。29 日受 TYPE-5 西部强高压型(WH⁺)控制,即盆地西北面存在强高压区,高压中心 320 gpm,为本次过程期间 700 hPa 最强高压中心;高压东面与北方槽相互作用使偏北风加强,引导冷

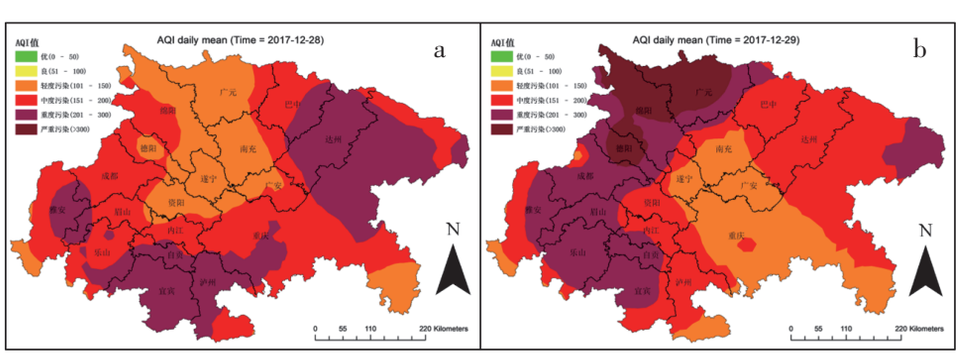


图 3 四川盆地 *AQI* 等级空间分布

(a 为 2017 年 12 月 28 日;b 为 2017 年 12 月 29 日)

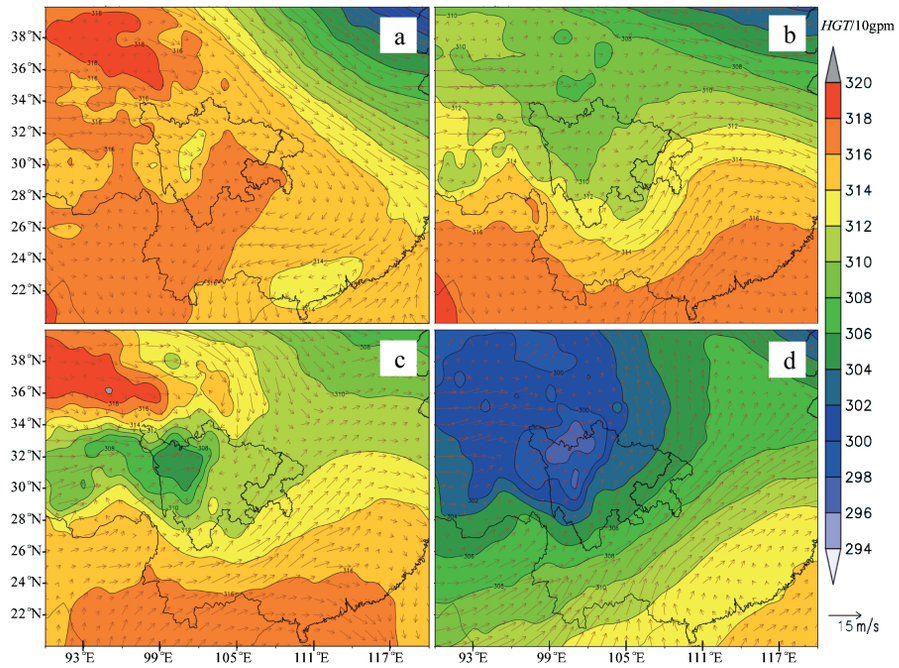


图 4　700 hPa 环流场天气型

（a 为 2017 年 12 月 19 日 14 时，b为2017 年 12 月 21 日 14 时，c为2017 年 12 月 29 日 14 时，d为2018 年 01 月 03 日 14 时；彩色填色为等高线，单位:10 gpm；棕色矢量为风场，单位:m/s）

空气进入盆地，有利于污染物扩散；但是 29 日的沙尘过程使得盆地 PM_{10} 浓度不降反升，污染情况更加严重，同时改变重污染分布区域。31 日之后高压减弱，低压发展，形成 TYPE-7 西部低涡型（WV）；由于无降水过程，这种干低涡天气型使得四川盆地继续维持轻度以上污染。2018 年 1 月 3 日 TYPE-7 西部低涡型（WV）天气型进一步加强，高层冷空气补充，并产生明显降水，湿低涡天气型控制下污染物的清除效果明显，污染过程结束。

3.3　850 hPa 区域平均时间变化

污染物在近地面累积是造成大气污染的主要原因，因此低层气象要素的变化对污染物浓度变化有指示作用。本小节选取 28°~32°N，103°~108°E 代表四川盆地区域，对本次过程 850 hPa 气象要素计算算数平均值，代表期间 850 hPa 平均温度和相对湿度时间变化。19—28 日盆地由冷高压转受暖低压控制，850 hPa 温度、相对湿度稳定升高，有利于颗粒污染物生成；且该期间无降水，风速低，不利于污染物清除，污染情况逐渐加重。29—30 日冷高压过程使风速明显加大，温度、相对湿度大幅度降低，有利于污染物扩散；但沙尘过程导致污染进一步加重。2018 年 1 月 3 日第二次冷空气过程再次使风速加大、温度下降，且在盆地内大部分地区出现降水，其中日最大降水量为 16 mm（重庆酉阳），至此本次区域性污染彻底结束。

3.4　垂直层结剖面分析

为探究四川盆地 700 hPa 天气型对大气污染变化的作用，使用 FNL 再分析资料，以 31°N 为中线，经度为 102°~110°E，高度为 1000~500 hPa 作垂直剖面（图 5）。从温度层结看，19 日盆地 700 hPa 受 TYPE-2 西北部弱高压型（NWH^-）控制时，600 hPa 以上降温，600 hPa 以下增温，最大增幅 4 ℃位于 700 hPa，温度层结稳定度较低，此时盆地污染相对较轻。21 日受 TYPE-9 低压型（L）控制时，仅盆地中西部 800 hPa 以下低层 24 h 温差为负，800 hPa 以上高度均为正，最大增幅 7 ℃；同时 750~600 hPa 高度有明显逆温层，“暖盖效应”明显；因此大气层结十分稳定，污染物扩散不利。21—28 日期间这种静稳型温度层结多次出现，导致盆地维持中度以上污染，且缓慢加重。29 日受 TYPE-5 西部强高压型（WH^+）控制时，550 hPa 以下强降温，最大降温中心位于 700 hPa（降幅-14 ℃），强冷空气的活动打破静稳型温度层结，对污染物的扩散有利；但沙尘输送使 PM_{10} 浓度升高，造成沙尘型重度污染。2018 年 1 月 3 日受 TYPE-7 西部低涡型（WV）控制，新一轮冷空气使整层大气降温，层结不稳定，同时在降水湿沉降共同作用下，污染物彻底清除。从风场变化看，21 日与 19 日相比，600~500 hPa 中高层由西北风转为偏

西风，风速明显下降,850 hPa 以下转为偏南风,即高层扩散不利,低层偏南风输送水汽。29 日与 21 日相比，中高层西南风加强，有利于污染物扩散;800 hPa 以下东北风加强，使得沙尘进入盆地后向西面输送,与29 日 *AQI* 分布相吻合。

综合环流场配置以及垂直温度层结可知,2017 年 12 月 19—28 日四川盆地环流场配置和垂直温度层结的转变和维持,导致污染物扩散条件逐渐变差,污染物浓度值逐渐升高，属于典型的静稳型大气污染。29 日冷空气过程打破了不利于污染物扩散的环流场配置和稳定的温度层结，但沙尘输送造成盆地沙尘型重度污染。2018 年 1 月 3 日新一轮冷空气过程则是本次过程彻底结束的原因。

4　沙尘过程分析

针对沙尘输送造成的转折性变化,本节对沙尘过程中由静稳型污染向沙尘型污染转换的不同阶段进行探讨。沙尘期间盆地 SO_2、NO_2、CO、O_3 浓度峰值分别为 98 μg/m³(雅安),123 μg/m³(达州),5.56 mg/m³(达州),155 μg/m³(自贡),各气态污染物浓度均低于国家一级浓度限值[45],但 CO 浓度远高于其他气态污染物，其浓度变化更具有代表性。因此选取 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 CO 进行研究，而 SO_2、NO_2、O_3 浓度值远低于颗粒物和 CO 浓度值,在这里不作讨论。

4.1　沙尘期间代表城市污染要素时间变化

由北到南选取广元、成都、重庆 3 个城市作为代表,分析沙尘期间盆地不同纬度污染物要素变化(图 6)。若将粗颗粒物占比值(PM_{10}–$PM_{2.5}$)/PM_{10}>50%首次出现的时间视为受到沙尘影响，其先后顺序分别为广元(29 日 05 时)、成都(29 日 17 时)和重庆(30 日 03 时)。

当沙尘 29 日 05 时抵达广元市时,其 PM_{10} 浓度为 197 μg/m³,之后浓度迅速升高,3 h 后(29 日 08 时)达到峰值 886 μg/m³,约为原来的 4.5 倍。沙尘期间,广元市出现约 24 h 的 PM_{10} 浓度高值峰区,该期间 CO 浓度明显下降,并达到最低值 0.5 mg/m³,表明该时段(29 日 06 时—30 日 07 时)内沙尘对盆地的直接影响。沙尘直接影响之后,随着沙尘输送停止和风速减小，较粗沙尘颗粒物得到沉降，因此广元市 PM_{10} 浓度迅速下降;而浮尘颗粒物则悬浮在空中短时间无法清除,因此粗颗粒物占比值继续维持 50%以上,该阶段视为沙尘间接影响。

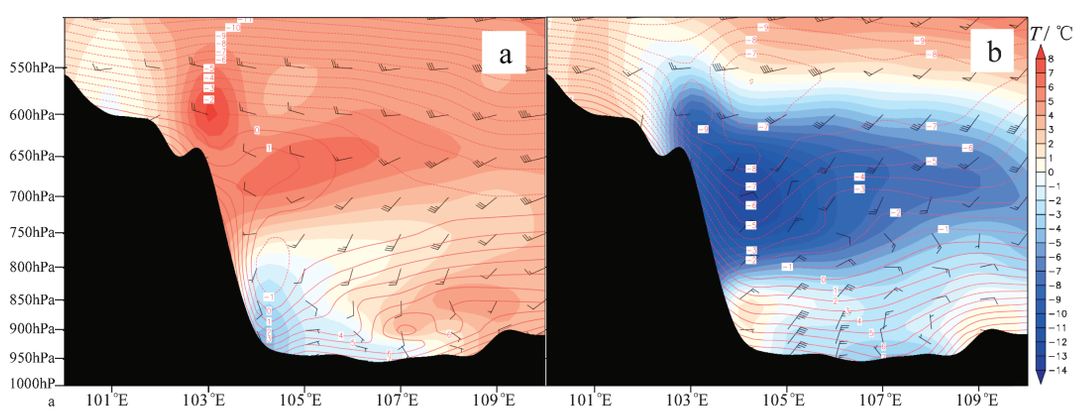


图 5　以 30°N 为中心,经度为 102°~110°E,高度为 1000~500 hPa 的垂直剖面

(a 为2017 年 12 月 21 日 14 时,b 为 2017 年 12 月 29 日 14 时;红蓝填色为 24 h 温差,单位:℃;红色虚线为等温线,单位:℃;黑色风杆为水平风,单位:m/s;黑色填色为地形)

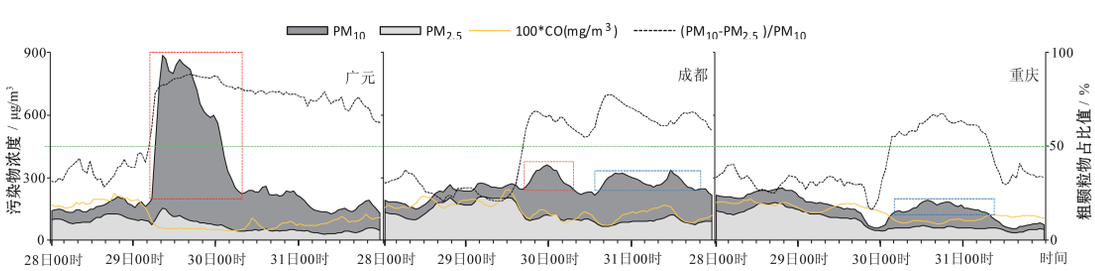


图 6　沙尘期间代表城市污染物要素随时间变化

(左纵坐标:深灰填色为 PM_{10},浅灰填色为 $PM_{2.5}$,单位:μg/m³;黄实线为 CO,单位:mg/m³;红虚框为沙尘直接影响;蓝虚线框为沙尘间接影响)

与广元市相比，成都市位置偏南，因此 29 日 17 时(255 μg/m³)起才受到沙尘影响，6 h 过后 PM_{10} 到达峰值(361 μg/m³)，为原来的 1.4 倍，而高值峰区结束时间则广元市相似；证明成都市受沙尘直接影响，但影响时间更晚，且影响程度不如广元市。与广元市 PM_{10} 浓度单峰型变化不同，成都市在沙尘间接影响期间还出现第二次峰值 302 μg/m³，为原来的 1.2 倍；第三次峰值 337 μg/m³，为原来的 1.3 倍。与此同时粗颗粒物占比值波动上升，最大值为 77%(30 日 16—18 时)；与 2013 年 6 月—2014 年 5 月期间成都市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 最小值 0.28[46]相比，本次过程粗颗粒物占比更高。这表明沙尘间接影响期间，浮尘颗粒输送对成都市 PM_{10} 浓度变化有明显影响。

沙尘直接影响期间，重庆市颗粒物浓度持续下降，于 29 日 22 时 PM_{10} 浓度值达到谷值 60 μg/m³，之后才逐渐回升；30 日 03 时起粗颗粒物占比值首次超过 50%(PM_{10} 浓度值 128 μg/m³)，10 h 后(30 日 13 时)达到峰值 191 μg/m³，是原来的 1.5 倍，31 日 7 时之后粗颗粒物占比值重新低于 50%。综合考虑，说明重庆市位于盆地南部，不受沙尘输送直接影响，反而在冷空气作用下，污染物浓度和粗颗粒物占比值均同步下降，即冷空气对污染物有明显的清除效应；29 日 22 时之后 PM_{10} 浓度和粗颗粒物占比值增大，主要是浮尘颗粒输送到重庆市造成的，属于沙尘间接影响。比较成都市与重庆市在沙尘间接影响期间 PM_{10} 浓度峰区出现的时间和增幅，可知：各个地方受浮尘颗粒物输送影响时间段并不相同，但变化幅度差距不大，而盆地南部受影响时间更短。

4.2 沙尘过程风场与污染物浓度 24 h 比值变化

由于沙尘颗粒通过偏北风传输，本节选取全风速和风速南北分量，PM_{10} 和 CO 浓度 24 h 比值空间分布进行比较，探究沙尘过程不同阶段在沙尘输送和风场的共同作用下，PM_{10} 和 CO 浓度的变化。可知，2017 年 12 月 29 日 00 时即沙尘过程到达前，盆地以 1 级风为主，2 级风区主要位于盆地南部的重庆、遂宁和广安区域，污染物浓度 24 h 比值>1 区域位于东西两侧，比值<1 区域主要位于盆地南部。表明没有沙尘过程影响时，污染物变化相对一致，浓度 24 h 比值低值区和大风区相关性较高，污染物扩散受全风速的影响。

2017 年 12 月 29 日 08 时沙尘过程直接影响开始时(图 7)，盆地北部广元、绵阳和巴中地区全风速达到 2 级；盆地大部分区域 PM_{10} 浓度增大，且增大幅度由北向南递减，其中 PM_{10} 浓度大幅度增大区域与偏北风分量区域相吻合；盆地南部宜宾、泸州和重庆地区，PM_{10} 浓度降低，证明未受到沙尘输送影响。值得注意的是，巴中地区同为 2 级大值风区，且位置较北，但由于巴中东部区域存在偏南风分量大值区，PM_{10} 浓度增大幅度相对同纬度其他地区并不明显。CO 浓度变化与 00 时相比变化不大，但盆地北部 2 级风区降幅更明显。因此在沙尘前期，沙尘输送到盆地后，随着风速增大，颗粒物由北向南扩散；而 PM_{10}

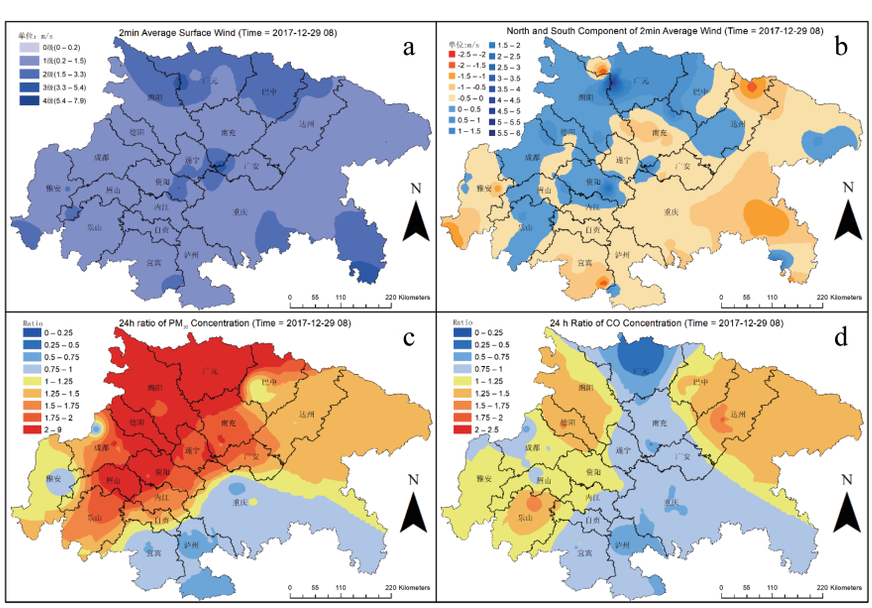


图 7 2017 年 12 月 29 日 08 时四川盆地地面场要素分布

(a 为全风速，单位:m/s；b为风速南北分量，正值表示偏北风分量，负值表示偏南风分量，单位:m/s；c 为 PM_{10} 浓度 24 h 比值；d为 CO 浓度 24 h 比值，无单位；比值<1 表明浓度值比 24 h 前更低；比值>1 表明浓度值比 24 h 前更高)

浓度增大幅度的关键是南北风分量;CO 浓度减少大值区则与全风速大值区密切相关; 沙尘输送未到达的南部地区,污染物浓度均降低。

2017 年 12 月 29 日 21 时为沙尘过程直接影响中期, 四川盆地 2 级大值风区和偏北风分量区基本影响整个盆地,CO 浓度值全面降低,偏北风分量大值区 CO 清除效率更明显。PM_{10} 浓度 24 h 比值大幅度增大区域集中在广元、德阳和绵阳 3 个出现沙尘天气现象的地区,其周边城市则小幅度增大,其余地区 PM_{10} 浓度 24 h 比值低于 1。该阶段在沙尘输送和更大的全风速和偏北风分量共同影响下, 受沙尘影响严重的北部地区,PM_{10} 浓度继续增大; 受沙尘影响不明显的南部地区,PM_{10} 浓度则减小, 且重庆南部减少幅度更大。

2017 年 12 月 30 日 18 时, 即沙尘过程间接影响期间, 风场重新恢复 1 级风和偏南风为主。此时 PM_{10} 浓度 24 h 比值分布与上一阶段相比正好相反,原本在沙尘输送影响下,PM_{10} 浓度大幅度升高的北部区域,随着沙尘输送的结束及沙尘颗粒沉降,如今 PM_{10} 浓度降幅最明显;原本在大风清除作用下,PM_{10} 浓度减少幅度越大的南部区域, 由于风速减小和浮尘颗粒输送, 如今 PM_{10} 浓度增大越明显。CO 浓度 24 h 比值同样证明, 在大风作用下盆地北部 CO 清除效果最明显,随着风速下降,该地区的 CO 浓度则开始回升;其余地区则继续下降。即沙尘间接影响期间,污染物浓度变化与前期浓度值有密切关系:随着沙尘输送的结束和风速降低,沙尘颗粒物得到沉降,盆地北部 PM_{10} 浓度下降; 浮尘颗粒物输送则使盆地南部 PM_{10} 浓度上升;受风速减弱影响,盆地北部 CO 浓度开始回升,其余地区仍继续下降。

6 结论与讨论

以气象条件和污染源作为切入点, 对 2017 年 12 月 19—28 日四川盆地静稳型污染和29 日之后沙尘型污染 2 个不同阶段气象场和污染物的变化趋势进行分析。结果发现静稳型污染期间盆地 500 hPa 受减弱的偏西风影响,700 hPa 受重污染型天气型控制,中高层扩散条件不利,低层温度、湿度稳定上升有利于污染物生成; 伴随着本地大气污染源持续排放,颗粒物浓度同步缓慢上升,形成以细颗粒物为主的静稳型中度以上污染。29 日外来沙尘输送伴随冷空气活动进入盆地, 造成 PM_{10} 浓度大幅度升高,形成以粗颗粒物为主的沙尘型污染。其中盆地北部广元市、绵阳市和德阳市 29—31 日出现沙尘天气,成都市 29—30 日地壳总离子浓度和粗颗粒物总浓度均明显增大。

对沙尘过程中代表城市的污染物浓度变化进行研究发现, 沙尘直接影响期间污染物浓度变化幅度最大, 其中广元市 PM_{10} 浓度增大到原来的 4.5 倍,CO 浓度则明显下降;沙尘间接影响期间,成都市和重庆市 PM_{10} 浓度增大很可能是由浮尘颗粒物输送造成。而风场与污染物浓度 24 h 比值变化特征可知:沙尘过程前(静稳型污染),污染物浓度与风速大小关系较密切; 沙尘直接影响期间 (沙尘型污染),PM_{10} 浓度变化受沙尘输送与气象场共同影响,其中盆地北部沙尘输送作用更明显, 则 PM_{10} 浓度增大;盆地南部大风清除作用更明显, 则 PM_{10} 浓度减小。沙尘间接影响期间,随着沙尘输送结束和风速减弱,沙尘颗粒得到沉降,浮尘颗粒则在盆地内继续输送,盆地北部 PM_{10} 浓度减小, 南部 PM_{10} 浓度则开始增大。

本文研究内容弥补了四川盆地在静稳型和沙尘型污染共同作用下污染过程变化特征的研究空缺,初步揭示静稳型污染向沙尘型污染转换过程的不同阶段中, 盆地不同地区污染物浓度变化特征和主要影响因子, 能为空气污染防控规划提供新的科学依据,具有重要科学价值。但本文研究内容仍有不足,如沙尘的具体输送路径等细节,仍需进一步补充。

参考文献:

[1] 李小飞,张明军,王圣杰,等.中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J].环境科学,2012,33(6):1936-1943.

[2] 胡敏,唐倩,彭剑飞,等.我国大气颗粒物来源及特征分析[J].环境与可持续发展,2011,36(5):15-19.

[3] 赵敬国,王式功,张天宇,等.兰州市大气重污染气象成因分析[J].环境科学学报,2015,35(5):1547-1555.

[4] 张恒德,张碧辉,吕梦瑶,等.北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J].气象,2017,43(8):998-1004.

[5] 吴锴,康平,王占山,等.都市臭氧污染特征及气象成因研究[J].环境科学学报,2017,37(11):4241-4252.

[6] 曹庭伟,吴锴,康平,等.成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J].环境科学学报,2018,38(4):1275-1284.

[7] 刘凡,谭钦文,江霞,等.成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 [J]. 环境科学,2018,39(4):1466-1472.

[8] 周兆媛,张时煌,高庆先,等.京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析 [J]. 资源科学,2014,36(1):191-199.

[9] 徐祥德,周秀骥,施晓晖.城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征[J].中国科学(D 辑),2005,35(增刊):

1–19.

[10] 韩素芹,孟冬梅,佟华,等.天津城市热岛及其对污染物扩散影响的数值模拟 [J]. 生态环境学报 2009,18(2):403–407.

[11] 王自发,李杰,王哲,等.2013年1月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J].中国科学,2014,44(1):3–14.

[12] 王凌慧,曾凡刚,向伟玲,等.空气重污染应急措施对北京市 $PM_{2.5}$ 的削减效果评估[J].中国科学,2015,35(8):2546–2553.

[13] 王冠岚,薛建军,张建忠.2014年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J].气象与环境科学,2016,39(1):34–42.

[14] 王跃思,姚丽,刘子锐,等.京津冀大气霾污染及控制策略思考[J].中国科学院院刊,2013,28(3):353–363.

[15] 程真,陈长虹,黄成,等.长三角区域城市间一次污染跨界影响[J].环境科学学报,2011,31(4):686–694.

[16] 刘芷君,谢小训,谢旻,等.长江三角洲地区 O_3 污染时空分布特征[J].生态与农村环境学报,2016,32(3):445–450.

[17] 廖志恒,家仁,范绍佳,等.2006—2012年珠三角地区空气污染变化特征及影响因素[J].中国环境科学,2015,35(2):329–336.

[18] 郭晓梅,陈娟,赵天良,等.1961—2010年四川盆地霾气候特征及其影响因子[J].气象与环境学报,2014,30(6):100–107.

[19] Ning G C, Wang S G, Yim S H L, et al. Impact of low-pressure systems on winter heavy air pollution in the northwest Sichuan Basin, China [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2018,18(18): 13601–13615.

[20] Liao T T, Gui K, Jiang W T, et al. Air stagnation and its impact on air quality during winter in Sichuan and Chongqing, southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018,635: 576–585.

[21] 郭倩,汪嘉杨,周子航,等.成都市一次典型空气重污染过程特征及成因分析 [J]. 环境科学学报,2018,38(2):629–639.

[22] 邵梦琪,甘维金,向卫国.2017年初一次四川重污染过程气象条件综合分析 [J]. 成都信息工程大学学报,2018,22(2):212–219.

[23] 史凯. 成都市一次重度灰霾期间大气PM2.5的自组织临界特性[J].环境科学学报,2014,34(10):2645–2653.

[24] 陈朝平,杨康权,冯良敏,等.四川盆地一次持续性雾霾天气过程分析 [J]. 高原山地气象研究,2015,25(3):73–77.

[25] 李展,陈建文,杜云松,等.成都及周边城市一次区域性空气污染过程特征分析 [J]. 环境科学与技术,2015,38(3):125–130.

[26] 张彩艳,吴建会,张普,等.成都市冬季大气颗粒物组成特征及来源变化趋势 [J]. 环境科学研究,2014,27(7):782–789.

[27] 闫静. 盆地气候条件下成都市城区臭氧污染特性研究[D].成都:西南交通大学,2014:1–41.

[28] 肖钟湧,江洪.四川盆地大气 NO_2 特征研究[J]. 中国环境科学,2014,31(11):1782–1788.

[29] 苏榕,陆克定,徐家燕,等.基于观测模型的重庆大气臭氧污染成因与来源分析 [J]. 中国科学: 地球科学,2018,48(1):102–112.

[30] 陈源,谢绍东,罗彬.成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012–2013年)[J].环境科学学报,2016,36(3):1021–1031.

[31] 赵川鸿,赵鹏国,周筠珺.西南地区臭氧空间分布及变化趋势[J].气象科学,2018,38(2):49–156.

[32] 李展,杜云松,王斌.2013年成都地区一次秸秆焚烧特征及成因分析[J].环境保护科学,2015,41(1):65–69.

[33] 周雯,陈建文,王斌,等.成都大气污染物在焚烧秸秆时的溯源初步探究[J].中国环境监测,2014,30(3):47–54.

[34] 瞿群,杨毅红,宋丹林,等.成都典型秸秆燃烧季节 $PM_{2.5}$ 中化学成分研究[J].气候与环境研究,2016,21(4):439–448.

[35] 廖乾邑,罗彬,杜云松,等.北方沙尘对四川盆地环境空气质量影响和特征分析[J].中国环境监测,2016,32(5):51–55.

[36] 环境保护部.HJ633–2012环境空气质量指数(AQI)技术规范[S].北京:中国环境科学出版社,2012.

[37] 环境保护部办公厅.关于印发《受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定》的通知[Z].环办监测[2016]120号,2017–01–04.

[38] 张锦明,郭丽萍,张小丹.反距离加权插值算法中插值参数对DEM插值误差的影响[J].测绘科学技术学报,2012(1):51–56.

[39] 刘宁微,马雁军,王扬锋,等.丹东市大气颗粒物质量浓度变化特征及其与能见度的关系 [C]//中国大气环境科学与技术学术会议暨中国环境科学学会大气环境分会学术年会.2009.

[40] 唐红军,张凯,刘兵,等.北方沙尘天气过程对遂宁市环境空气质量的影响 [J]. 环境与健康杂志,2015,32(8):731–734.

[41] 徐文帅,张大伟,李云婷,等.北京两次沙尘污染过程中 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征 [J]. 气候与环境研究,2016,21(1):78–86.

[42] 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.

[43] 郭荣芬,黎成超,邓聪,等."2015·3·22"云南大范围空气污染事件气象成因分析[J].灾害学,2017,32(3):91–95.

[44] 宁贵财.四川盆地西北部城市群冬季大气污染气象成因

及其数值模拟研究[D].兰州大学,2018.
[45] 环境保护部.GB3095-2012 环境空气质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2012.
[46] 孙欢欢,倪长健,崔蕾,等.成都市大气颗粒物污染特征及与气象因子的关联性分析 [J]. 环境污染与防治,2016,38(5):55-60.

A Study on Regional Air Heavy Pollution Process with Double Impact of Local Emission and Dust Transport in Sichuan Basin

LIAN Junbiao[1], WANG Shigong[1,2], LUO Bin[3], ZHANG Wei[4], DU Yunsong[4], JIANG Wanting[1]
(1.Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
2. Zunyi Academician Center, Chinese Academy of Sciences & Chinese Academy of Engineering, Zunyi 563000, China;
3.Sichuan Provincial Environmental Policy Research and Planning Institute, Chengdu 610041, China;
4. Sichuan Ecological Environment Monitoring Station, Chengdu 610091, China)

Abstract The analysis of the paper use air pollution and meteorological monitoring data from 18 cities in the Sichuan basin and NCEP1°×1° reanalysis data from December 19, 2017 to January 3, 2018. The results are as follows: The regional air pollution process in the Sichuan basin was double affect by the excessive emission of local air pollutants and the transportation of external sand and dust, which reflecting the particularity of air pollution and its genesis in the Sichuan basin.During the period from December 19 to 28, 2017,the atmospheric circulation field configuration and vertical temperature stratification in the Sichuan basin are not conducive to the diffusion of atmospheric pollutants.Therefore, the type of pollution during this period is static and stable air pollution, while the concentration of pollutants slowly rises under the continuous emission of local air pollution sources. On December 29 the cold air process broke the weather conditions which not conducive to the diffusion of pollutants, and resulting in a significant decline in gaseous pollutants.However, the external sand and dust transport which associated with cold air activity caused the concentration of PM_{10} increased rapidly, resulting in heavy dust pollution in some cities in the Sichuan basin. In particular, the Guangyuan area was the most seriously affected by direct sand and dust transport, and the concentration of PM_{10} rose to 4.5 times. Although Chengdu did not pass the diagnosis of sand and dust weather, there were significant changes in the concentration of particulate ions and chemical components. It indicate that the change of 24 h concentration ratio of PM_{10} and CO were double affect by sand and dust transport and weather conditions, which were significant differences in different periods and regions.

Key words Sichuan basin; dual pollution source impact; regional pollution; coarse particulate matter ratio; static and stable pollution; dust pollution