

杨浩,许冠宇,白永清,等,2018.湖北省近两年冬季月份PM_{2.5}污染天气型特征及其与大尺度环流的相关研究[J].气象,44(11):1454-1463.

湖北省近两年冬季月份PM_{2.5}污染天气型特征 及其与大尺度环流的相关研究^{*}

杨浩¹ 许冠宇² 白永清¹ 刘琳¹

¹ 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

² 武汉中心气象台,武汉 430205

提 要: 基于湖北省PM_{2.5}大气成分逐日监测数据和高分辨率气象再分析资料,利用EOF方法对2015—2016年湖北省近两年冬季月份PM_{2.5}的污染分型并分析其天气特征,探讨PM_{2.5}质量浓度与大尺度环流因子相关性,并计算得到海平面气压指数。结果表明:冬季PM_{2.5}质量浓度湖北中部高于东西部,时间序列上存在较大波动,且近两年有明显下降趋势。湖北省冬季PM_{2.5} EOF前4个特征向量时间系数的方差贡献为86.2%,能够反映PM_{2.5}空间场的主要特征。湖北省PM_{2.5}污染的天气型特征主要有两类:传输型污染和本地累积型,前者造成的PM_{2.5}污染浓度高于后者。传输型分别表现出全区污染、西部污染和中北部污染,全区污染时段湖北近地层以偏北气流为主,有利于将北方地区PM_{2.5}输送到湖北省;西部污染在于偏东气流将东部污染物以及沿海地区水汽输送到湖北省,同时受鄂西山脉的阻挡,污染物在湖北省西部地区聚积;中北部污染表现为东北和西北气流的汇集效应。本地累积型在静稳天气条件和地形共同作用下造成湖北东部污染和中南部污染。三种传输型污染物输送通道分别为北路输送、东路输送和东北路输送。东亚冬季风系统的高层东亚大槽和低层大陆冷高压减弱时,PM_{2.5}质量浓度增加。关键区的海平面气压相关指数与湖北省PM_{2.5}质量浓度和EOF第一模态时间系数相关性较好,对预报预测有一定指示意义。

关键词: PM_{2.5}质量浓度, EOF分型, 天气型, 相关指数

中图分类号: P427, X511

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.008

Study on PM_{2.5} Pollution Synoptic Patterns in Hubei Province and Its Connection with Large-Scale Circulation in Winter Months

YANG Hao¹ XU Guanyu² BAI Yongqing¹ LIU Lin¹

¹ Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

² Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430205

Abstract: Based on the PM_{2.5} air quality monitoring data of Hubei Province in winter months during 2015—2016, the PM_{2.5} mass concentration is classified by EOF method and its synoptic patterns are analyzed. The correlation between PM_{2.5} and large-scale circulation is discussed and correlation index with SLP is established. The results show that the PM_{2.5} mass concentration in central part of Hubei is higher than in the eastern and western parts. There are large fluctuations in the PM_{2.5} time series and a downward trend in the recent two years. Four distinguished modes of PM_{2.5} are clarified, which can explain over 86.2% of the variance. The synoptic patterns are transmission type and local accumulated type. The PM_{2.5} mass concentration of transmission type is higher than the other one. The transmission type presents pollution in the whole region, pollution in the west and pollution in the north-central, respectively. Northerly airflow

^{*} 国家重点研发计划(2016YFC0203304)、国家自然科学基金项目(91637211和41375057)及湖北省气象局科技发展基金项目(2017C05)共同资助

2017年9月21日收稿; 2018年7月11日收修定稿

第一作者:杨浩,主要从事短期气候诊断与预测研究。Email: yanghao0202@126.com

dominates Hubei during the whole region pollution, bringing $\text{PM}_{2.5}$ from northern China. For the west region pollution of transmission type, the pollutions and moisture are carried to western Hubei by east winds and the western Hubei mountain makes the pollutions accumulate in this area. The north-central region pollution shows a collection effect of northeast and northwest wind. The local accumulated type pollution in eastern Hubei and south-central Hubei are under the common cause of static weather condition and terrain. The transporting paths of three transmission type pollution are the north path, east path and north-east path. With the decrease of high-level East Asia trough and low-level cold continental high pressure, $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration increases. The correlation index with the sea level pressure is closely related to the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and the first EOF mode time coefficient which has certain significance for pollution forecasting.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration, EOF classification, synoptic patterns, correlation index

引 言

气象条件是决定大气污染物的空间分布及其随时间变化特征的重要因素(Zhang et al, 2015; 尚可等, 2016)。天气型对大气污染过程形成的影响和造成大气污染过程形成的主要环流系统已有广泛研究(Cheng et al, 2001; Wang et al, 2016)。例如, 当华北地区受大尺度高压控制时, 若高压中心位于山西南部, 河北为弱的低压区(地形槽), 将导致西南风气流盛行于该区域, 受此天气型控制, 西南方向的输送通道是引起北京大气污染的主要通道(陈朝晖等, 2008)。邓雪娇等(2006)研究发现, 深圳地区空气污染过程的控制天气型主要有副热带高压影响型、副热带高压与热带气旋共同影响型和变性冷高压脊影响型。2013 年 1 月我国东部频繁出现的重污染天气与贝加尔湖大尺度高压在中国境内长期滞留、对流层低层逆温密切相关(Tao et al, 2014)。总之, 大气重污染的形成不仅与风速、风向、相对湿度、温度、气压等气象要素具有一定的关系(尉鹏等, 2015; 白永清等, 2016, 张恒德等, 2017), 同时大尺度天气型(大尺度气旋、反气旋的动力、热力特征)影响区域污染物的传输、积累和清除过程(张人禾等, 2014; 刘琳等, 2017)。

湖北省年均霾日数近几十年整体呈现波动上升的趋势(许明芳等, 2014), 东亚大陆海平面气压降低、季节性北风的减弱和中国东部 500 hPa 的高压异常等因子为湖北地区冬季霾过程的维持提供了气象条件(肖莺等, 2015; 陈龙等, 2016)。2013 年 1 月湖北省特大霾过程的气候背景是北方冷空气活动出现显著间歇, 地面出现大面积均压场及弱鞍型场的

环流背景下发生的(李兰等, 2014)。近年来我国大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度呈逐渐恶化的趋势, $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征和成因是当前研究热点(何心河等, 2016), $\text{PM}_{2.5}$ 较其他大气污染物在大气中寿命更长, 且能随着大气运动传输至更远距离。目前国内外对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物区域输送的研究主要集中在京津冀、长三角及珠三角等地区(薛文博等, 2014; 聂滕等, 2016), 湖北省作为中部地区发展较快的省份之一, $\text{PM}_{2.5}$ 污染问题日益严峻。但有关湖北区域大气污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 分布特征、输送路径及其与天气型的相关性分析尚缺乏研究。

为此, 本文基于湖北省环保厅大气成分监测数据、常规气象观测资料及 ERA-Interim 逐日再分析资料, 对 2015—2016 年湖北省冬季月份 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征及与不同气象要素的相关性展开分析, 从天气型背景分析 $\text{PM}_{2.5}$ 形成的气象条件和输送维持机制, 以加深预报员对持续性污染天气形成机理的认识进而提高分析预报能力。

1 资料说明

湖北省对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的监测近年才逐渐完善, 其中 2013 年仅武汉市和神农架国家大气背景监测站对 $\text{PM}_{2.5}$ 指标进行监测, 2014 年新增宜昌和荆州 2 个重点城市对 $\text{PM}_{2.5}$ 指标进行监测, 2015 年才建立起湖北省全部 17 个地、市的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测网。本文分别选取 2015 年和 2016 年的 1、2、12 月共 6 个月湖北省 17 个地、市 $\text{PM}_{2.5}$ 指标逐日监测数据。气象场资料来源于欧洲中心 ERA-Interim 再分析数据, 包括逐日各层位势高度、相对湿度、风场以及海平面气压场, 水平分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 。

2 湖北省冬季 PM_{2.5} 时空分布特征

从湖北省冬季月份日平均 PM_{2.5} 质量浓度的空间分布(图 1)可以看出,整体呈现出中部污染值较大,东、西部略小的分布特征。极大值中心出现在襄阳地区,冬季平均值超过 $120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,中部的荆门、随州、宜昌、荆州等地的 PM_{2.5} 质量浓度均超过 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此外,武汉地区的 PM_{2.5} 质量浓度明显高于周边区域,超过 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。湖北省东、西部 PM_{2.5} 质量浓度低于中部,其中神农架的日平均 PM_{2.5} 质量浓度在 $60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,鄂东南的咸宁地区 PM_{2.5} 质量浓度低于 $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

气象条件是决定大气污染物空间分布的重要因素之一,同时,地形在一定程度上也能影响污染物的传输。湖北省地形分布大致为东、西、北三面环山,中间低平,略呈向南敞开的完整盆地,这种地形更有利于污染物在湖北中部平原的累积。此外,结合该省地域经济发展情况分析认为,武汉、宜昌和荆州地区的大气细颗粒物主要来源于工业排放和机动车排放,其中,武汉市工业排放和机动车排放对本地区大气细颗粒物环境浓度的贡献比例相对周边地区更高,图 1 中武汉地区 PM_{2.5} 质量浓度明显高于周边区域即证明了这点。

对 2015—2016 年冬季月份湖北省 17 地、市 PM_{2.5} 质量浓度进行平均,得到逐日浓度序列(图 2),近两年湖北省 PM_{2.5} 质量浓度在冬季存在明显波动,最大值为 $202.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,出现在 2015 年 1 月 26 日,最低值为 $24.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,出现在 2016 年 2 月 14 日,整个时段平均浓度为 $92.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从变化趋势来看,冬季 PM_{2.5} 质量浓度呈现明显下降趋势,变率超过 -22% ,2015 年和 2016 年冬季时段的 PM_{2.5} 质量浓度分别为 100.6 、 $84.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3 基于 EOF 分型的 PM_{2.5} 污染天气型特征

为进一步了解湖北省冬季 PM_{2.5} 质量浓度的时空特征,采用经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF)提取了湖北地区 2015—2016 年冬季逐日 PM_{2.5} 质量浓度的主要空间分布形势特征。EOF 在气象学中常被用来分析各种气象要素场,其基本原理是把 $\mathbf{X}_t, t=1, 2, \dots, n$, 看作 m 维空

间中的 n 个向量,现在要寻找一组正交基向量,把 $\mathbf{X}_t$ 尽可能准确地表示出来:

$$\mathbf{X}_t = \sum_{k=1}^K \alpha_k(t) \mathbf{V}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_t \quad (1)$$

式中, $\mathbf{V}_k$ 是 m 维向量; $\boldsymbol{\varepsilon}_t$ 是误差向量,也是 m 维。 $\mathbf{V}_k$ 不随时间变化,把它的 m 个分量 $v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{mk}$ 的值填在对应格点的位置上并分析等值线也得到一个空间分布图。当所选的 $\mathbf{V}_k$ 能尽可能准确地表达 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n$ 时,这些空间分布图就反映了 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n$ 共同的空间变化特征,常称 $\mathbf{V}_k$ 为空间型或空间特征向量, $\alpha_{k(t)}$ 为展开的时间系数。式(1)应用到本文中, $m=17$ (测站数), $n=181$ (观测时次)。特征向量表征了某一区域气候变量场的变率分布结构,其空间分布形式代表了该变量场的主体分布结构;所对应的时间系数为正,表明该时刻变量与此类分布形式相同的变化趋势;反之,系数为负则表明该时刻变量与此类分布形式相反的变化趋势,且其数值越大,对应的空间分布形式越显著(魏凤英, 2007)。湖北省冬季 PM_{2.5} 质量浓度经过 EOF 统计,前 4 个特征向量时间系数的累积方差贡献为 86.2% ,能够反映 PM_{2.5} 质量浓度空间场的主要特征(表 1)。

第一模态(EOF1)的方差贡献率为 64.9% ,是主要模态(图 3a)。其向量值均大于 0,反映湖北省 17 个监测点 PM_{2.5} 质量浓度变化一致的特征。当对应的时间系数大于 0 时,湖北各城市的 PM_{2.5} 质量浓度普遍较高,代表性时段如 2015 年 1 月 25—26 日等(表 1),反之则 PM_{2.5} 质量浓度普遍较低,如 2015 年 2 月 28 日等。该模态空间向量场大值区位于湖北东部,湖北西部山区向量值略低。需要指出的是,空间向量值的大小并不能完全表示 PM_{2.5} 质量浓度大小,还要结合时间系数的振幅分析实际 PM_{2.5} 质量浓度的空间分布。第二模态(EOF2)的方差贡献率为 12.3% ,基本上沿随州、天门、潜江一线呈东西方向对称:湖北西部为正值区,越往西向量值越大;湖北东部为负值区,越往东向量值越小。当对应的时间系数大于 0 时,表示湖北西部的正值区 PM_{2.5} 质量浓度增加,而东部负值区 PM_{2.5} 质量浓度减小;当时间系数小于 0 时则相反(表 1)。第三模态(EOF3)和第四模态(EOF4)方差贡献率分别为 4.9% 和 4.2% ,特征向量在湖北省分别表现为“正—负—正”和“负—正—负”的东西向空间分布型(图 3),代表不同的 PM_{2.5} 质量浓度空间分布特征。

进一步根据湖北省 PM_{2.5} 质量浓度四种主要模

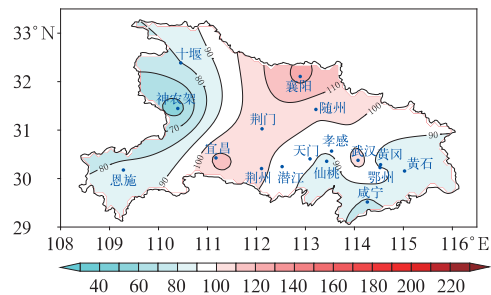


图 1 2015—2016 年冬季月份湖北省日平均 PM_{2.5} 质量浓度分布(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 1 Distribution of daily PM_{2.5} mass concentration in Hubei Province in winter months during 2015—2016 (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

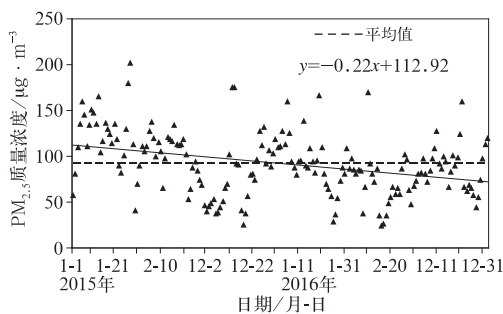


图 2 2015—2016 年冬季月份湖北省 PM_{2.5} 逐日平均质量浓度序列(三角形)、平均值(虚线)及变化趋势(直线)

Fig. 2 Series of daily mean PM_{2.5} mass concentration (triangle) in Hubei Province and its average value (dashed line) and trends (straight line) in winter months during 2015—2016

态的 EOF 时间系数振幅大小分别确定出八类典型时段(表 1),对各类型时段的 PM_{2.5} 质量浓度和气象要素分别进行合成,综合分析发现湖北省 PM_{2.5} 污染类型主要分为:传输型污染和本地累积型污染。

3.1 PM_{2.5} 传输型天气特征

湖北省 PM_{2.5} 质量浓度 EOF 分型第一模态的全区污染、第二模态的西部污染和第三模态的中北部污染代表了三种不同的传输型天气特征。

当为全区污染时(图 4a),污染极大值中心出现在襄阳地区,PM_{2.5} 质量浓度超过 $220 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,西部山区浓度略低,低值中心在神农架地区,但浓度也到达 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从地面环流合成分析(图 4b)中可以看到,整体表现为北路输送型天气特征。湖北地区地面以偏北气流为主,有利于将北方地区 PM_{2.5} 输送至湖北省,同时湖北大部地区低层湿度较大(70%以上),有利于近地层 PM_{2.5} 吸湿增长,加剧污染(白永清等,2016)。全区清洁时(图略),湖北全省 PM_{2.5} 质量浓度基本均降低到 $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下,北部浓度低于南部,说明污染扩散过程自北向南进行,这与天气变化特征有关。此时,北方蒙古冷高压加强,高压发展带来冷空气扩散南下,冷锋携带的偏西气流在陕西南部分为两支,其中一支西北气流由鄂西北进入湖北,在中东部转为北风继续南下,该支气流风速较强(图略),有利于污染物较快扩散,同时北方的干冷空气使该地区湿度明显降低(60%以下),PM_{2.5} 质量浓度进一步下降。

表 1 湖北省 PM_{2.5} 质量浓度经 EOF 分解后前 4 个特征向量时间系数的方差贡献及典型时段

Table 1 Variance contribution of the first four eigenvectors of PM_{2.5} EOF decomposition and their typical periods in Hubei Province

特征向量 (方差贡献)	时间系数>1.5σ 过程 /年.月.日	意义	时间系数<-1.5σ 过程 /年.月.日	意义
EOF1 (64.9%)	2015.1.12;2015.1.25—26; 2015.12.11—12;2016.1.4; 2016.1.18;2016.2.8	全区 PM _{2.5} 质量 浓度增大	2015.2.28;2015.12.4—5; 2015.12.16—17;2016.1.24—25; 2016.2.6;2016.2.13—16	全区 PM _{2.5} 质量 浓度减小
EOF2 (12.3%)	2015.1.5;2015.1.15; 2015.1.24;2016.1.5; 2016.12.19—20	湖北西部 PM _{2.5} 质量 浓度增大,东部减小	2015.1.6;2015.2.5; 2015.2.17;2015.12.12; 2015.12.14;2015.12.25—26	湖北东部 PM _{2.5} 质量 浓度增大,西部减小
EOF3 (4.9%)	2015.1.13;2016.1.12; 2016.1.19;2016.2.8; 2016.12.10—12	湖北东、西部 PM _{2.5} 质量 浓度增大,中部减小	2015.1.10;2015.12.9; 2015.12.31;2016.1.3—4; 2016.1.11	湖北东、西部 PM _{2.5} 质量 浓度减小,中北部增大
EOF4 (4.2%)	2015.1.4;2015.1.8—10; 2015.1.16;2015.1.19; 2015.2.16	湖北中南部 PM _{2.5} 质量浓度增大, 西北部减小	2015.12.21—23;2015.12.28; 2016.1.17—19	湖北中北部 PM _{2.5} 质量浓度增大, 西南部减小

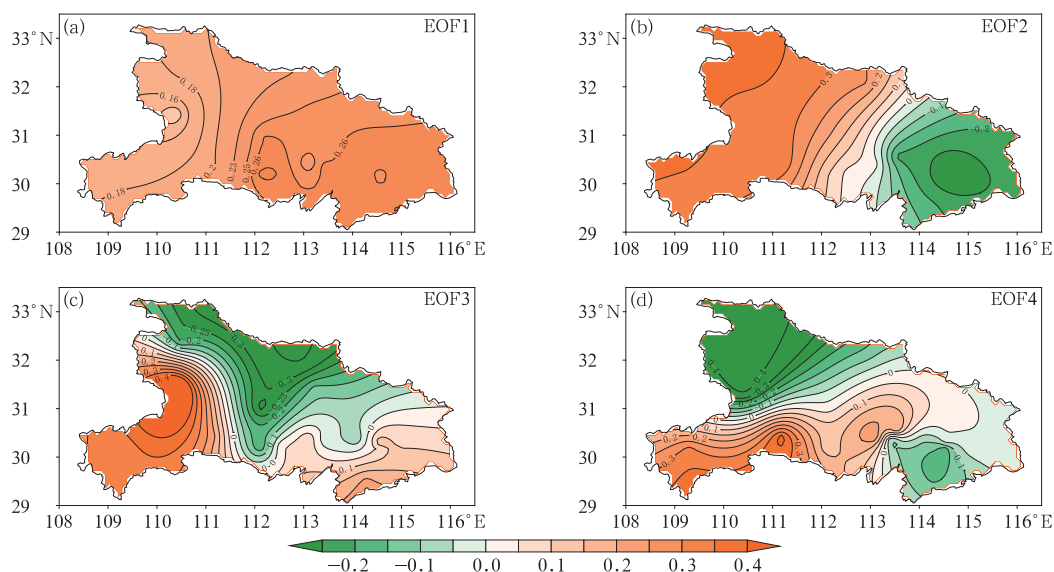


图3 湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 EOF 第一(a)、第二(b)、第三(c)和第四(d)特征向量的空间分布
(等值线和阴影均表示向量值)

Fig. 3 Spatial distribution of (a) first, (b) second, (c) third and (d) fourth eigenvectors of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration EOF decomposition in Hubei Province
(Contours and shaded areas indicate the eigenvector value)

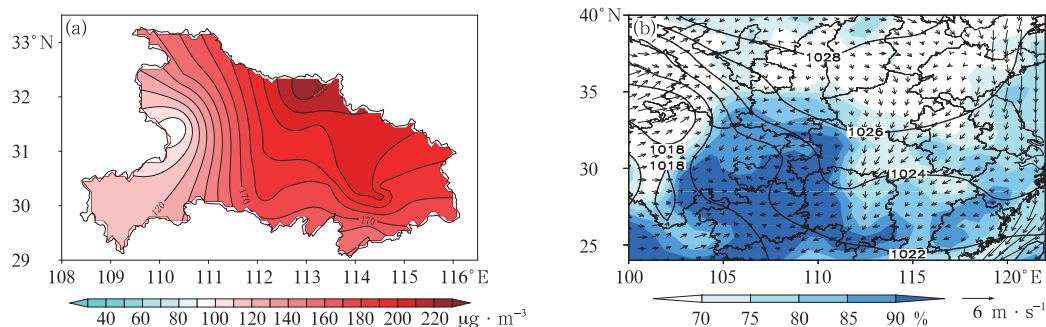


图4 湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 EOF(a)第一模态
全区污染时段合成场及(b)对应时段天气特征

(图4b中等值线、箭头和阴影分别表示地面气压、风场和相对湿度)
Fig. 4 (a) Whole region pollution of first mode of $\text{PM}_{2.5}$ EOF
in Hubei Province and (b) weather pattern
(In Fig. 4b, contours, arrows and shaded areas indicate surface pressure,
wind and relative humidity, respectively)

当西部污染时(图5a),两个极大值中心分别出现在襄阳和宜昌地区,均超过 $220 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,湖北西部 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度几乎全部在 $120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上(除神农架地区),湖北东部的黄石等地污染较轻, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度低于 $90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从地面形势场看到(图5b),此类型污染多以东北冷高压和西南地区暖低压发展影响为主,地面处于冷高压底部和暖低压前部,受偏东气流影响,有利于将东北部污染物

以及东部沿海地区水汽输送到湖北省,使得近地层污染物吸湿增长,同时受鄂西山脉的影响,有利于污染物在湖北省西部山区聚积。与全区污染时的北路输送型天气(图5b)相比,东北—西南向地面气压梯度较大,华东地区东北气流明显偏强,湖北东部偏东风较强,表现为东路输送型天气特征。

第三模态的中北部污染时段(图6a), $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度极大值中心位于襄阳地区,超过 $220 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,

另一大值中心位于武汉地区,神农架地区污染浓度较低。地面形势场显示(图 6b),弱的西北气流和东北气流在河南和湖北一带汇集,湖北中部地区表现为弱的东北风,携带北方的污染物到达湖北,使得湖北中部江汉平原 PM_{2.5} 质量浓度增加。湖北东南部为静风状态,大气扩散能力弱,有利于污染物累积,导致武汉地区成为污染高值区,同时湖北较高的相对湿度有利于污染物浓度进一步升高。该天气型整体表现为北路和东路组合型输送特征。

从清华大学公布的 2012 年污染源排放清单的分布(图略)来看,湖北周边污染源主要位于河南、山东、江苏、安徽及重庆等地。因此,结合以上几种传输型天气的地面风场分布,说明各模态均表现为较明显的传输型特征。

3.2 PM_{2.5} 本地累积型天气特征

湖北省 PM_{2.5} 质量浓度 EOF 分型第二模态的东部污染和第四模态的中南部污染表现为静稳天气条件下的本地累积型(图 7)。

当为东部污染时(图 7a),主要染区域分布在江汉平原及以东地区,极大值中心位于武汉地区,超过

180 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,湖北西部 PM_{2.5} 质量浓度全部低于 100 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对这该污染型的地面形势场分析(图 7c),发现此类污染过程主要为湖北中东部和华东地区的静稳型天气系统控制。地面弱蒙古冷高压东移带来较弱西北气流翻越鄂西山区之后在湖北东部减弱静止,本地污染物在江汉平原累积。虽然湖北东部相对湿度较低,但 PM_{2.5} 在鄂东南幕阜山脉阻挡的影响下无法扩散,造成江汉平原和鄂东的 PM_{2.5} 质量浓度增加。

湖北中南部污染时(图 7b),极大值中心位于宜昌地区,超过 210 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,湖北西北和东南部污染较轻,此类污染同样为本地型。此时,地面处于均压场中,气压梯度较弱(图 7d),湖北东部基本为静风区,西部山区弱的西风,相对湿度较低。陈龙等(2016)指出当大范围近地面大气层持续维持气压场均匀、静风或风速较小的天气即为静稳天气。在这种天气条件下,大气输送、扩散能力弱,污染物浓度升高主要以本地污染物排放累积为主。

通过对湖北冬季 PM_{2.5} 质量浓度的 EOF 分型,结合各模态天气型分析主要分为两类:传输型污染和本地累积型污染。传输型分别表现出全区污染、

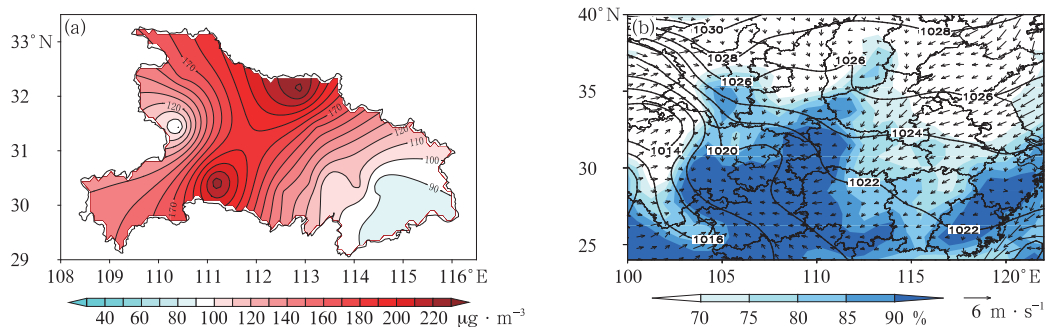


图 5 同图 4, 但为第二模态西部污染型

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for western pollution of second mode

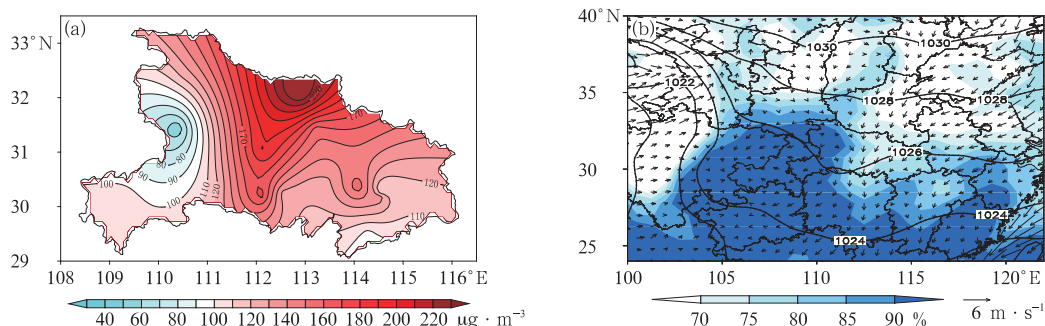


图 6 同图 4, 但为第三模态中北部污染型

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for north-central pollution of third mode

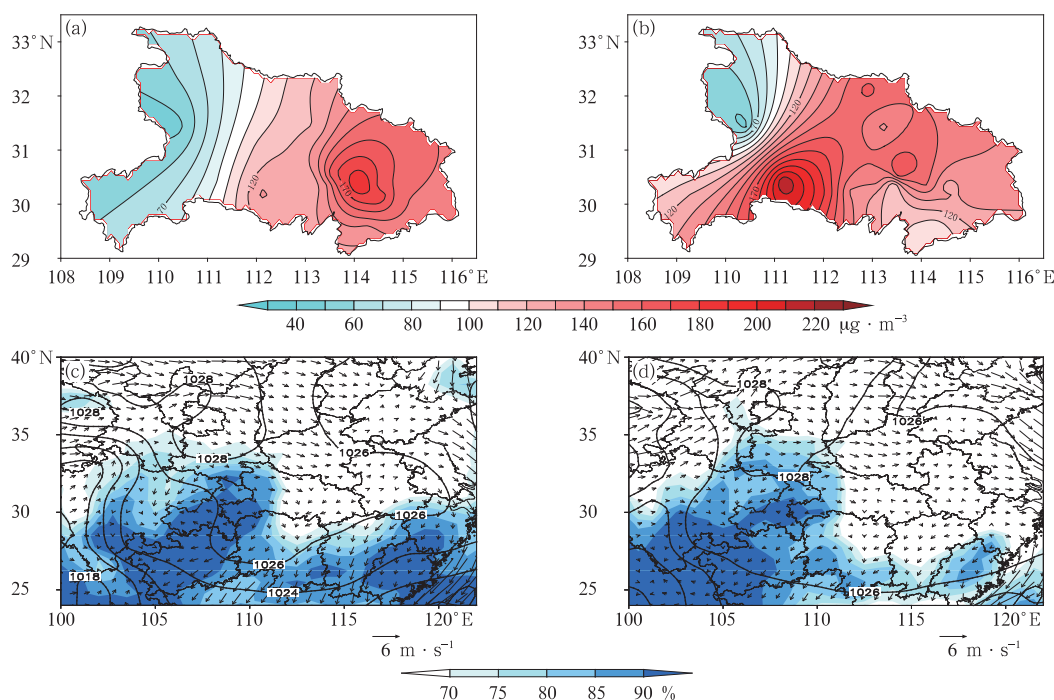


图 7 湖北省 PM_{2.5}质量浓度 EOF(a)第二模态东部污染和(b)第四模态中南部污染时段质量浓度合成场及(c,d)对应时段天气特征
(说明同图 4)

Fig. 7 (a) The eastern pollution of second mode and (b) south-central pollution of fourth mode of PM_{2.5} mass concentration EOF in Hubei Province and (c, d) the corresponding weather patterns
(Illustration is same as Fig. 4)

西部污染和中北部污染,全区污染时段湖北近地层以偏北气流为主,有利于将北方地区 PM_{2.5} 输送到湖北省;西部污染在于偏东气流将东部污染物以及沿海地区水汽输送到湖北省,同时受鄂西山脉的阻挡,污染物在湖北省西部地区聚积;中北部污染主要表现为东北路径输送。本地累积型在静稳天气条件和地形共同作用下造成湖北东部污染和中南部污染。传输型污染造成的 PM_{2.5} 质量浓度高于本地累积型污染。

4 PM_{2.5}传输型污染路径

徐祥德等(2005)研究指出,中国东部冬季重污染区域主要分布在京津冀、河南、山东、山西以及安徽等地。为进一步了解 PM_{2.5} 传输型天气条件下湖北省与周边重污染区域的输送过程,揭示不同传输型天气 PM_{2.5} 污染传输轨迹,利用美国国家海洋大气研究中心空气资源实验室的 HYSPLIT 轨迹模式(Draxler and Hess, 1998)进行气流来向轨迹模拟。该模式具有多种气象输入场、物理过程和不同

类型排放源,且拥有较完整的输送、扩散和沉降过程,可进行分辨率最高精确到小时的气流来向及去向轨迹模拟,国内外大量研究已将该模式用于气象、大气污染过程的分析中(邓雪娇等,2006;陈朝晖等,2008)。模式所用气象数据为 NECP 再分析资料。

上文分析发现,三种传输型污染分布中均表现出襄阳地区污染浓度最高(图 4~图 6),因此选取襄阳(32.1°N、112.9°E)为起始点,100 m 高度,分别计算 EOF 三个模态污染典型时段(表 1 中 EOF1 时间系数 $> 1.5\sigma$ 过程、EOF2 时间系数 $> 1.5\sigma$ 过程和 EOF3 时间系数 $< -1.5\sigma$ 过程)的 48 h 后向轨迹,以追踪抵达襄阳的气团过去 48 h 所经过的地方(图 8)。第一模态全区污染时段(图 8a),受北风气流影响,该时段内所有轨迹主要来自北方,气团经过河北、山东、山西、河南等地到达襄阳。在垂直方向上,PM_{2.5} 的轨迹线一直在 800 hPa 以下(图略),说明污染物的长距离输送一直稳定在低层。第二模态西部污染时段(图 8b),受偏东风气流影响,轨迹主要来自东部和东北部,气团经过山东、江苏、安徽、河南等地到达襄阳。轨迹高度维持在 900 hPa 以下,

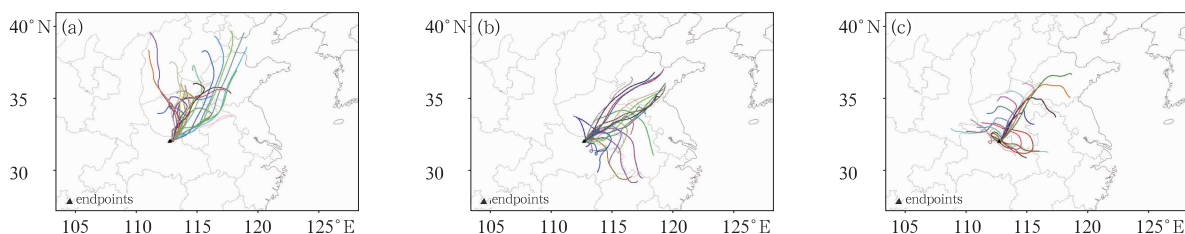


图 8 PM_{2.5} 质量浓度 EOF(a)第一模态全区污染,(b)第二模态西部污染和
(c)第三模态中北部污染时段(具体时段见表 1)襄阳 48 h 后向轨迹

Fig. 8 The 48 h back trajectory of (a) the whole region pollution of first mode,
(b) western pollution of the second mode and (c) north-central pollution
of the third mode of PM_{2.5} mass concentration EOF in Xiangyang of Hubei Province

高度低于来自北方的气团。第三模态中北部污染时段(图 8c),从气团轨迹明显看出受偏北和偏东气流的汇集作用影响,来自河南西部的气团和来自山东安徽等地的气团共同汇集到东北通道进入湖北省。

三种传输型污染环流形势各有不同,PM_{2.5} 的输送路径差异明显。但是影响空气质量转好的天气形势较为一致,都为西北气流控制(图略)。这表明湖北 PM_{2.5} 污染过程大部分情况可能与来自北部或东北部周边污染物的输送有关。这为污染物在湖北与周边地区的区域间输送研究提供了重要信息。

5 PM_{2.5} 污染与大尺度环流要素相关性分析

5.1 大尺度环流的影响

上文分析了湖北省冬季 PM_{2.5} 污染的几种天气型特征,在环境气象研究中,不仅需要诊断影响大气污染的区域性气象条件,大尺度环流背景同样对局地的污染起着至关重要的作用(Zhang et al, 2012; 董小芳等, 2017)。为了深入揭示造成湖北 PM_{2.5} 污染的典型环流形势,从 ERA-Interim 再分析资料中提取 500 hPa 位势高度场和海平面气压场,分别与湖北省平均 PM_{2.5} 质量浓度序列求相关。

在 2015—2016 年东亚冬季风系统中,500 hPa 高度上东亚大槽位于日本海附近,南方副热带高压位于 20°N 以南、120°E 以东,冬季风总体呈现明显的斜压结构,表现为强盛的垂直西风切变和整层冷平流(图略)。从湖北 PM_{2.5} 质量浓度与 500 hPa 位势高度的相关系数分布(图 9a)看出,在我国东部大陆存在一个显著正相关区,负相关区分别位于西北

太平洋和巴尔喀什湖附近。说明当我国东部上空 500 hPa 气压增强时,伴随着湖北地区 PM_{2.5} 质量浓度显著增加,此时控制我国东部的东亚大槽减弱,副热带高压偏强,不利于干冷空气东移南下,有利于污染物累积加重。

在近地面,冬季西伯利亚—蒙古冷高压位于欧亚大陆上空,北太平洋北部的阿留申地区存在一个明显的低压,此外,在阿拉伯海—孟加拉湾一带同样为低压系统(图略)。湖北 PM_{2.5} 质量浓度与海平面气压的相关场(图 9b)显示,亚洲区域主要存在两个相关显著区,其中从中国新疆到华东地区呈现显著负相关,最大相关区位于河套地区,正相关区域分布在印度半岛和阿拉伯海一带,极大值中心位于印度西部沿海地区。当大陆冷高压减弱时,中国东部西北风减弱,东北风偏强(图 9b),有利于外来 PM_{2.5} 污染物由华北地区输送到湖北,同时江南地区西南风偏强,导致污染物在湖北等地的持续累积。反之,大陆冷高压增强时,西北气流引导冷空气向东南爆发,湖北 PM_{2.5} 质量浓度降低,空气变清洁,此时阿拉伯海低压下降。

5.2 相关指数的建立

大量研究表明,东亚冬季风对我国天气气候具有重要影响(Wang et al, 2010),并且定义了诸多冬季风指数用来研究其与我国气候的关系(Wang et al, 2009)。但是,对东亚大尺度冬季风与区域性污染天气的关系研究较少,对湖北省污染影响的研究就更少了。

在湖北省 PM_{2.5} 质量浓度与海平面气压的相关场中(图 9b),两个相关显著区极大值中心分别位于河套地区和印度西部沿海地区,因此,本文在这两个区域框出大小相同的关键区(图 9b 方框),计算出关

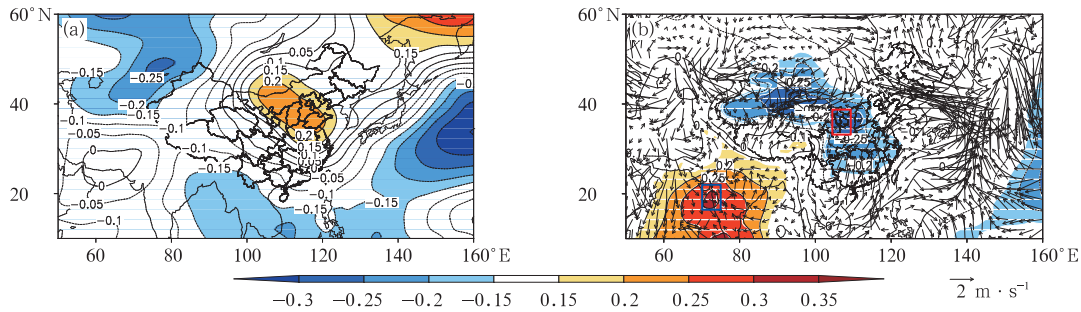


图9 2015—2016年冬季湖北省平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与(a)500 hPa位势高度和(b)海平面气压的相关分布

(阴影区表示通过0.10显著性水平检验,图9b中箭头表示重污染时段风场距平,红色和蓝色方框代表相关关键区)

Fig. 9 The correlation between Hubei $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and (a) 500 hPa geopotential height and (b) SLP in winter during 2015—2016

(Shaded areas indicate those having passed the 0.10 significance level test, arrows in Fig. 9b show wind anomalies during pollution, red and blue boxes represent two key correlated areas)

键区的平均海平面气压,利用两者气压差定义海平面气压指数作为湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的相关指数,该指数表示冬季东亚大陆和南亚沿海的气压差。具体公式如下:

$$I_{SLP} = SLP \left[\left(\begin{matrix} 38^\circ\text{N} \\ 33^\circ\text{N} \end{matrix} \right) 105^\circ\text{E}, \left(\begin{matrix} 38^\circ\text{N} \\ 33^\circ\text{N} \end{matrix} \right) 110^\circ\text{E} \right] - SLP \left[\left(\begin{matrix} 22^\circ\text{N} \\ 17^\circ\text{N} \end{matrix} \right) 69^\circ\text{E}, \left(\begin{matrix} 22^\circ\text{N} \\ 17^\circ\text{N} \end{matrix} \right) 74^\circ\text{E} \right] \quad (2)$$

利用式(2)计算得到湖北省冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化同期海平面气压指数序列,并对其进行标准化处理(图10)。通过与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度序列对比发现,两者相关系数到达-0.36,通过了0.01的显著性水平检验。前文对 $\text{PM}_{2.5}$ 的EOF模态分析得到第一模态(EOF1)的方差贡献率为64.9%,其时间系数序列与海平面气压指数的相关系数为-0.34(图10),同样通过了0.01的显著性水平检验。

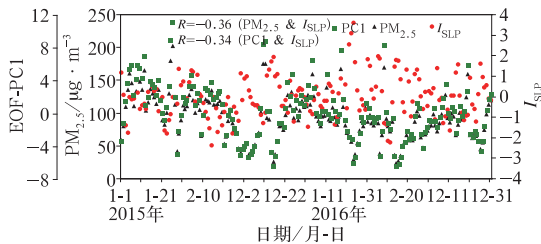


图10 2015—2016年冬季月份海平面气压关键区相关指数序列、湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及EOF第一模态时间系数

Fig. 10 Time series of SLP key areas correlation index, Hubei $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and the first EOF mode in winter months during 2015—2016

综上所述,影响湖北省冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化的环流因子既包括中国东部地面风场,又有来自对东亚大尺度高低空气压的响应。根据东亚冬季风环流特点及其与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的关系,挑选关键区建立的海平面气压相关指数对湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的预报有一定指示意义。

6 结论

本文基于湖北省环保厅 $\text{PM}_{2.5}$ 等大气成分监测数据和ERA-Interim逐日再分析资料,利用EOF方法对2015—2016年湖北省冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染分型,分析其天气特征,并从大尺度天气背景分析 $\text{PM}_{2.5}$ 污染形成的气象条件和输送扩散机制,进一步建立了海平面气压相关指数,主要结论如下:

2015—2016年湖北省冬季日平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度整体呈现出中部污染程度重,东、西部污染程度轻的分布特征。污染较严重的襄阳地区日平均值超过 $120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,武汉地区是湖北东部的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染中心,超过 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。湖北西部神农架地区污染最轻,日平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在 $60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下。时间序列上 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化存在较大波动,近两年有明显下降趋势。

湖北省冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 经过EOF统计,前4个特征向量的累积方差贡献为86.2%,能够反映 $\text{PM}_{2.5}$ 空间场的主要特征,其中第一模态方差贡献达到64.9%。对四种主模态各类型时段的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和气象要素合成归纳,湖北省 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的天气

型特征主要有两类:传输型污染和本地累积型污染。传输型污染造成的 PM_{2.5} 质量浓度高于本地累积型污染。

传输型分别表现出全区污染、西部污染和中北部污染,全区污染时段湖北近地层以偏北气流为主,有利于将北方地区 PM_{2.5} 输送到湖北省;西部污染在于偏东气流将东部污染物以及沿海地区水汽输送到湖北省,同时受鄂西山脉的阻挡,污染物在湖北省西部地区聚积;中北部污染主要表现为东北路径输送。本地累积型在静稳天气条件和地形共同作用下造成湖北东部污染和中南部污染。

三种传输型污染 PM_{2.5} 的输送路径差异明显,湖北 PM_{2.5} 污染可能与来自北部或东北部周边污染物的输送有关,全区污染、西部污染和中北部污染分别为北路输送、东路输送和东北路输送。这为污染物在湖北与周边地区的区域间输送研究提供了重要信息。PM_{2.5} 污染程度与东亚冬季风系统有显著的相关关系,尤其在高层东亚大槽和低层大陆冷高压减弱时,PM_{2.5} 质量浓度增加。挑选关键区建立的海平面气压相关指数与湖北省 PM_{2.5} 质量浓度和 EOF 第一模态时间系数相关性较好,对湖北省 PM_{2.5} 污染的预报有一定指示意义。

参考文献

- 白永清,祁海霞,刘琳,等,2016. 武汉大气能见度与 PM_{2.5} 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. 气象学报,74(2): 189-199.
- 陈龙,智协飞,覃军,等,2016. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J]. 气象,42(7):819-826.
- 陈朝晖,程水源,苏福庆,等,2008. 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,21(1):17-21.
- 邓雪娇,黄健,吴兑,等,2006. 深圳地区典型大气污染过程分析[J]. 中国环境科学,26(S1):7-11.
- 董小芳,杨华玮,张峦,等,2017. ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响[J]. 环境科学,38(12):4991-5003.
- 何心河,马建中,徐敬,等,2016. 2014 年 10 月京津冀地区一次 PM_{2.5} 污染过程的数值模拟[J]. 气象,42(7):827-837.
- 李兰,刘敏,方思达,等,2014. 湖北省 2013 年 1 月特大霾过程的气象成因分析[J]. 环境科学与技术,37(5):16-20.
- 刘琳,王玲玲,白永清,等,2017. 应用 WRF/Chem 模拟河南冬季大气颗粒物的区域输送特征[J]. 环境科学学报,37(5):1843-1854.
- 聂滕,李璇,王占山,等,2016. APEC 期间北京市 PM_{2.5} 时空分布与过程分析[J]. 中国环境科学,36(2):349-355.
- 尚可,杨晓亮,张叶,等,2016. 河北省边界层气象要素与 PM_{2.5} 关系的统计特征[J]. 环境科学研究,29(3):323-333.
- 魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术:第 2 版[M]. 北京:气象出版社.
- 尉鹏,任阵海,王文杰,等,2015. 2014 年 10 月中国东部持续重污染天气成因分析[J]. 环境科学研究,28(5):676-683.
- 肖莺,李兰,杜良敏,等,2015. 湖北省近年 11 次典型霾过程的气象要素和大气环流特征分析[J]. 长江流域资源与环境,24(Z1):191-196.
- 许明芳,苏天星,杨再强,等,2014. 湖北省 1980—2012 年霾气候变化特征的研究[J]. 中国农学通报,30(26):253-259.
- 徐祥德,周秀骥,施晓晖,2005. 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:地球科学,35(S1):1-19.
- 薛文博,付飞,王金南,等,2014. 中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学,34(6):1361-1368.
- 张恒德,张碧辉,吕梦瑶,等,2017. 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,43(8):998-1004.
- 张人禾,李强,张若楠,2014. 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,44(1):27-36.
- Cheng W L, Pai J L, Tsuang B J, et al, 2001. Synoptic patterns in relation to ozone concentrations in west-central Taiwan[J]. Meteor Atmos Phys, 78(1/2):11-21.
- Draxler R R, Hess G D, 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition[J]. Aust Meteor Mag, 47(4):295-308.
- Tao Minghui, Chen Liangfu, Xiong Xiaozhen, et al, 2014. Formation process of the widespread extreme haze pollution over northern China in January 2013: implications for regional air quality and climate[J]. Atmos Environ, 98:417-425.
- Wang Bin, Wu Zhiwei, Chang C P, et al, 2010. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: the northern and southern temperature modes[J]. J Climate, 23(6):1495-1512.
- Wang H L, Qiao L P, Lou S R, et al, 2016. Chemical composition of PM_{2.5} and meteorological impact among three years in urban Shanghai[J]. J Clean Prod, 112:1302-1311.
- Wang Lin, Huang Ronghui, Gu Lei, et al, 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity[J]. J Climate, 22(18):4860-4872.
- Zhang J P, Zhu T, Zhang Q H, et al, 2012. The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surroundings[J]. Atmos Chem Phys, 12(11):5031-5053.
- Zhang Li, Wang Tao, Lü Mengyao, et al, 2015. On the severe haze in Beijing during January 2013: unraveling the effects of meteorological anomalies with WRF-Chem[J]. Atmos Environ, 104:11-21.