

苏静,孙娴,胡琳,等.陕西省环境气象评估指数 *EMI* 时空变化特征研究[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):147–155.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



陕西省环境气象评估指数 *EMI* 时空变化特征研究

苏 静¹,孙 娴²,胡 琳²,林 杨³,王 琦²

(1.陕西省大气探测技术保障中心,陕西 西安 710014;2.陕西省气候中心,陕西 西安 710014;

3.陕西省气象科学研究所,陕西 西安 710016)

摘 要:基于陕西省 10 地市 2015—2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度实况监测数据和同期 *EMI* 指数,统计分析 *EMI* 和 $PM_{2.5}$ 相关性及近年 *EMI* 的时空分布特征,定量评估气象条件变化及综合治理措施对陕西环境空气质量的影响。结果表明:陕西省 2015—2020 年 *EMI* 指数可以较好地表征和评估气象条件变化导致 $PM_{2.5}$ 浓度的变化。2015—2020 年 *EMI* 指数呈线性降低趋势,气象条件持续向好。月 *EMI* 指数均呈明显的单谷分布特征,*EMI* 指数冬半年大,夏半年小。各区域 *EMI* 指数总体上呈关中高,陕南次之,陕北最低的分布特点,关中中部、东部 *EMI* 指数最大。*EMI* 正距平百分比高值区主要出现在关中地区,各年关中均有 60% 以上面积正距平,其中 2016 年冬季关中 83.0% 面积正距平,37.5% 面积正距平超过 100%。2020 年陕西省各区域环境空气质量较 2015—2019 年均有明显改善,全省 $PM_{2.5}$ 浓度较前 5 a 平均降低 24.8%,全省气象条件改善使 $PM_{2.5}$ 浓度较近 5 a 降低 16.4%,排放变化使得 $PM_{2.5}$ 浓度较前 5 a 平均下降 9.4%,可见近年陕西省大气污染综合治理措施成果显著,环境质量明显改善。

关键词:陕西省;细颗粒物 $PM_{2.5}$;环境空气质量评价; $PM_{2.5}$ 气象条件评估指数(*EMI*);贡献率

中图分类号:X513

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2024)02-0001-09

随着经济的高速发展和工业化、城镇化加快,雾霾天气频发,大气环境污染等环境气象问题凸显。2013 年以来,我国相继出现多次大范围持续性雾霾天气^[1-4], $PM_{2.5}$ 大范围严重超标,对城市交通和人民的健康生活造成严重影响,大气环境问题已成为政府和相关学者关注的焦点^[5-7],迫切需要对颗粒物污染的复杂形成机制和气象影响进行深入探究^[8-11]。

国内外学者针对不利气象条件对空气污染影响

展开了广泛深入的研究。Seinfeld^[12]等研究了大气气溶胶和空气污染及其之间的关系,Flocas^[13]、Pope^[14]等人的研究表明天气环流在污染事件的形成中起着至关重要的作用。Wang 等^[15]认为气候因子也会影响雾一霾的形成。张小曳等^[16]指出我国现今雾一霾问题的主因是严重的气溶胶污染,但气象条件对其形成、分布、维持与变化的作用显著,通过对比排放和气象条件对区域霾形成的贡献,发现一次排放的气溶胶与排放强度关系密切,而二次气溶胶的形成与变化受气象条件影响大。陈镭等^[17]研究发现槽后西北气流、垂直层结稳定及地面气压场较弱的条件有利于上海地区污染物积聚和维持。马学款等^[18]通过研究发现一定的大气扩散能力和强有力的减排措施,是形成“APEC 蓝”的主要原因。张恒德、毛卓成等^[19-21]也从不同角度研究了京津冀、长江三角洲气

收稿日期:2023-04-07;修回日期:2023-06-04

基金项目:中国气象局气候变化专项(CCSF201938);陕西省重点研发计划(2021SF-476)

作者简介:苏静(1977—),女,工程师,主要从事大气综合观测研究。

E-mail:250437380@qq.com

通信作者:孙娴(1969—),女,正高级工程师,主要从事环境气象和气候变化及应用研究工作。E-mail:sunxian@163.com

象条件对大气污染的影响。江琪^[2]、吕梦瑶等^[23]研究了 $PM_{2.5}$ 浓度与不同气象因子的关系。张敏等人^[24-26]基于气象要素综合建立静稳指数可以较好反映大气综合扩散能力,指标可以用于空气质量预报和大气环境气象条件评估。《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,将以西安为中心的汾渭平原列为重点区域性空气污染区域之一。胡琳等^[27-29]从时间和空间两方面定性分析了陕西省霾天气气候特征及气象影响因素。

大气环境治理措施和气象条件变化是影响大气污染物变化的两大决定因素,而二者是相互交织相互作用,难以定量分离的。2019 年中国气象局发布了气象条件评估指数行业标准^[30],可采用环境气象评估指数 EMI 定量分析气象条件对污染物浓度变化的影响程度以及减排调控的实际效果。焦亚音等^[31-32]基于环境气象评估指数开展了污染气象贡献相关研究工作,但关于气象条件对陕西省环境影响的定量研究成果尚未多见,本研究依据 QX/T 479—2019 规定的构建方法,建立适用于陕西省的 $PM_{2.5}$ 气象条件评估指数,反映气象条件变化对空气质量的影响,以期将 EMI 指标应用于陕西省及相关地区环境气象评估、重污染天气过程评估、大气污染治理成效量化评估等工作,为政府决策提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

1.1.1 空气质量资料

陕西省 10 地市(榆林、延安、铜川、宝鸡、咸阳、西安、渭南、汉中、安康、商洛)2015—2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度实况监测数据,数据来自中国环境监测总站的站点 $PM_{2.5}$ 浓度观测日均值数据,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。

1.1.2 环境气象评估指数(EMI)

基于中国气象局空气质量预报模式 CUACE 开发的环境气象评估指数,采用清华大学开发的中国多尺度排放清单数据 MEIC,选用同期 T639 分析场为背景气象场,并用地面、探空观测资料同化,计算水平分辨率为 15 km 的 EMI 指数,采用双线性插值方法将 EMI 格点数据转换成站点。环境气象评估指数(EMI)是表征气象条件影响下气溶胶排放、沉降、传输和扩散等过程的综合指数。

1.1.3 研究区域

陕西省位于中国中部黄河中游地区,地处 105°

$29^{\circ}\sim 111^{\circ}15'E$ 、 $31^{\circ}42'\sim 39^{\circ}35'N$ 之间,地势呈南北高、中间低,由高原、山地、平原和盆地等多种地貌构成,北山和秦岭把陕西分为三大自然区。陕西省下辖 10 个地市,其中榆林、延安为陕北黄土高原区,宝鸡、咸阳、铜川、西安、渭南为关中平原区,汉中、安康、商洛为陕南秦巴山区(图 1)。

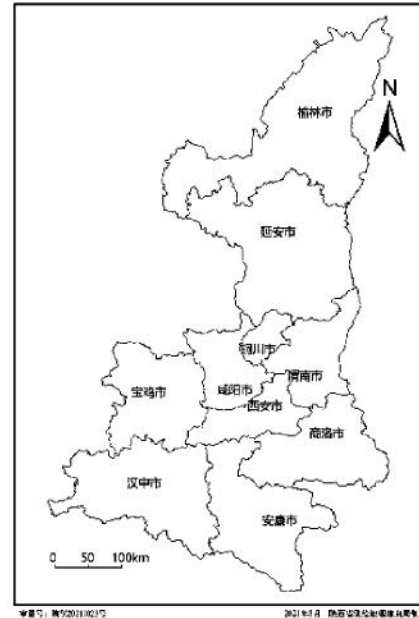


图 1 陕西 10 地市分布

1.2 方法说明

1.2.1 环境气象评估指数(EMI)

EMI 是表征 $PM_{2.5}$ 浓度变化中气象条件贡献的无量纲指标,用地面~1 500 m 高度气柱内 $PM_{2.5}$ 平均浓度与参考浓度的比值表示 ($EMI = \frac{C}{C_0}$, C_0 根据环境空气质量指数技术规定(HJ633~2012)^[33]得到), EMI 越大表征气象条件越不利于近地面大气中 $PM_{2.5}$ 的稀释与扩散。

以中国气象局雾—霾数值预报业务模式 CUACE V2.0 为基础,通过数值模式系得到数值解,计算见式(1)~式(4)。

$$I = I(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} (E + T + D) \cdot dt, \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{C_0 \cdot H} + \int_0^H (s - d) \cdot dh, \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{C_0 \cdot H} + \int_0^H \left(\mu \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + \omega \frac{\partial c}{\partial z} \right) \cdot dh \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{C_0 \cdot H} + \int_0^H \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right\} \cdot dh \quad (4)$$

式中: I 为 *EMI* 指数,无量纲; t_0 为积分起始时间(s); t_1 为积分终止时间(s); t 为时间(s); E 为排放沉降项(s^{-1}); T 为传输项(s^{-1}); D 为扩散项(s^{-1}); $C_0=35\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $H=1\text{ }500\text{ m}$; s 为 $\text{PM}_{2.5}$ 排放率 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$); d 为 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降率($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$); h 为高度(m); μ 为东西方向水平风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),西风风速为正,东风风速为负; C 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$); x 为东西方向距离(m); v 为南北方向水平风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),南风风速为正,北风风速为负; y 为南北方向距离(m); ω 为垂直方向风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); z 为垂直方向距离(m); K_x 为东西方向水平扩散系数($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$); K_y 为南北方向水平扩散系数($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$); K_z 为垂直方向水平扩散系数($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)。

1.2.2 气象条件和排放条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献的定量方法

根据 QXT 479—2019, 定量分离气象条件和排放贡献,定义排放变化率 R_E (表征排放变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的贡献率)和气象条件变率 R_W (表征气象因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的贡献率), 正值代表气象条件同比不利,负值代表气象条件同比有利,见式(5)~(6):

$$R_E=\frac{O_1/O_0}{E_1/E_0}-1\text{ ,}\tag{5}$$

$$R_W=\frac{(I_1-I_0)}{I_0}\text{ .}\tag{6}$$

式中: O_0 为“时段 0”实测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$); O_1 为“时段 1”实测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$); I_0 为“时段 0”*EMI*, 无量纲; I_1 为“时段 1”*EMI*,无量纲; R_E 为“时段 1”相对于“时段 0”排放变化率,无量纲; R_W 为“时段 1”相对于“时段 0”气象条件变化率,无量纲。

2 结果与分析

2.1 *EMI* 指数可靠性检验

在污染源相对稳定的情况下,*EMI* 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的变

化主要由气象条件决定, 因此两者会有较好的相关性。一年内污染源变化相对较小,因此通过计算分析 2015—2020 年全省 10 个地市 *EMI* 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关性,检验 *EMI* 的可靠性(表 1)。全省 10 个主要城市 2015—2020 年 *EMI* 和 $\text{PM}_{2.5}$ 平均相关系数为 0.44~0.63,均通过 0.001 的显著信检验;其中重点区域关中 5 市相关系数最高,高于全省平均,西安、渭南、咸阳 2015—2020 年平均相关系数超过 0.50;北部城市的相关系数高于南部地区。全省和各市 2016、2019 和 2020 年 *EMI* 和 $\text{PM}_{2.5}$ 相关系数较高,2018 年较低,主要可能由于 2018 年作为大气“国十条”的收官之年,污染源整治持续推进,实际污染源变化更大,导致 *EMI* 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性降低。可见, *EMI* 可以较好地表征和评估各种气象条件变化导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化。

2.2 陕西省 *EMI* 时空分布特征

2.2.1 年际变化特征

从图 2 可知,2015—2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度较高,2020 年的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度最低,为 $41.6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,较 2015—2019 年降低 $11.0\sim 21.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2015—2020 年全省主要城市平均 *EMI* 指数为 2.26,2015 年最大,为 2.42,2020 年最小,为 2.02,*EMI* 指数呈线性降低趋势,与 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度变化趋势基本一致。近几年气象条件持续向好,有利于近地面大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的稀释与扩散。

2.2.2 *EMI* 月季变化特征

从图 3 可知, $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度为 $54.4\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。1 月最大,为 $110.9\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,12 月次之;11 和 2 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高;7 月 $\text{PM}_{2.5}$ 月浓度最小,为 $28.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大,为 $94.3\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,其次为秋季,夏季最小,为 $29.1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。*EMI* 年平均指数为 2.25,季节分布与 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度一致,冬季最大,为 2.85,秋季次

表 1 2015—2020 年陕西省各市 *EMI* 和 $\text{PM}_{2.5}$ 相关系数

年	关中					陕北		陕南			全省
	西安	咸阳	渭南	宝鸡	铜川	榆林	延安	汉中	安康	商洛	
2015	0.55	0.46	0.47	0.35	0.43	0.53	0.42	0.35	0.26	0.38	0.42
2016	0.68	0.60	0.63	0.53	0.51	0.52	0.52	0.35	0.33	0.55	0.52
2017	0.62	0.51	0.59	0.48	0.52	0.39	0.49	0.16	0.33	0.28	0.44
2018	0.59	0.48	0.61	0.42	0.47	0.26	0.28	0.20	0.33	0.42	0.40
2019	0.51	0.49	0.55	0.49	0.51	0.55	0.53	0.42	0.40	0.45	0.49
2020	0.58	0.53	0.69	0.60	0.51	0.53	0.57	0.53	0.38	0.49	0.54
多年	0.59	0.51	0.59	0.48	0.49	0.46	0.47	0.34	0.34	0.43	0.48

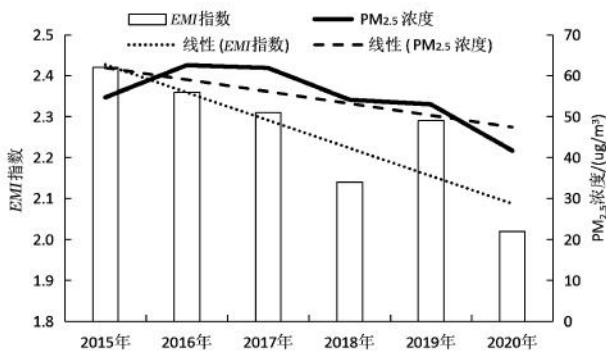


图2 2015—2020年陕西省各市平均EMI指数及PM_{2.5}浓度变化曲线

之,夏季最小,为1.78。1月最大达,为2.95,4月EMI指数最小仅为1.45,4~8月EMI指数均不超过2.0。PM_{2.5}浓度和EMI指数均呈明显的单谷分布特征。总体来讲,冬半年EMI指数大,气象条件不利于近地面大气中PM_{2.5}的稀释与扩散,PM_{2.5}浓度明显高于夏半年。

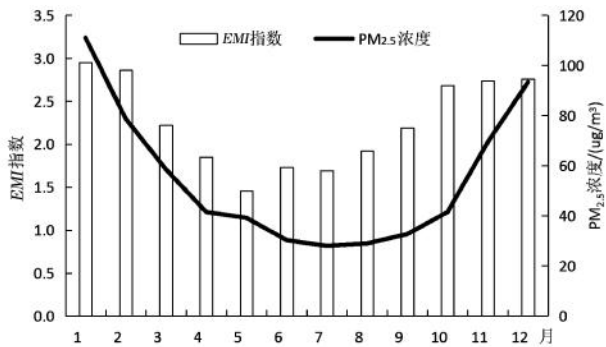


图3 全省月平均EMI指数及PM_{2.5}浓度变化曲线

2.2.3 EMI空间分布特征

图4为2015—2020年全省多年平均EMI空间分布。全省各区域EMI的分布特征为关中高、陕南次之,陕北最低。关中地区是EMI高值区,关中中、东部EMI指数最大,经开区、秦汉新城、草滩等地超过5.00,西安平均达到3.60;其次是咸阳,平均为3.18;渭南EMI平均指数位居第三,为2.78;其余各地市平均>2.00。陕南各地安康最大,为1.83,其次商洛,为1.66,汉中为1.40,陕南各市EMI指数略大于陕北明显小于关中。陕北EMI指数最小,榆林仅1.26,延安为1.34,定边、横山等地EMI指数平均>1.00。气象条件有利于近地面大气中PM_{2.5}的稀释与扩散。根据陕西省气象局空气污染卫星遥感统计数据,全省关中地区存在狭长颗粒物污染带,气溶胶光学厚度的大值区位于西安市区(高污染区),并向东扩展至高陵区、临潼区和渭南市,与EMI指数的分

布基本一致。

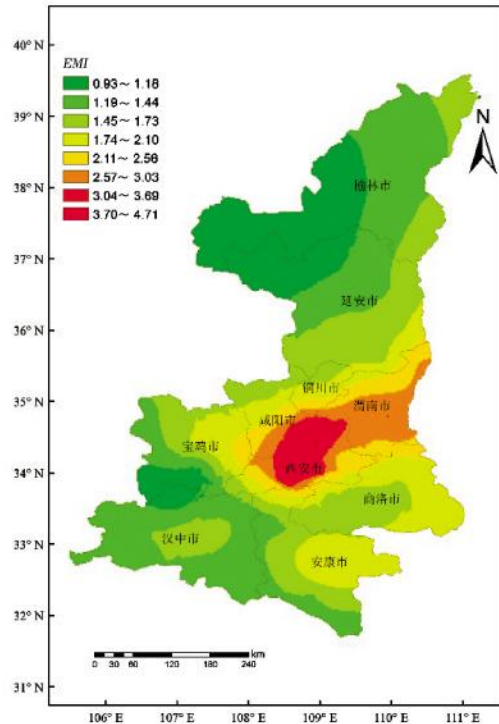


图4 陕西省年平均EMI指数空间分布

2.2.4 EMI指数的距平变化分析

EMI指数表征气象条件影响下PM_{2.5}排放、传输、扩散以及沉降等整体效应,通过计算冬季EMI指数距平百分比,分析气象条件影响的空间分布特征。采用2015—2020年EMI指数的平均值作为参考标准,将每年冬季EMI指数与平均值的差值除以平均值所得的百分率,作为每年冬季距平百分比,其中正值代表气象条件相对不利,负值表示气象条件相对有利^[28]。

从2015—2020年冬季EMI距平百分比空间分布和各区域年变化(图5、图6)可知,2015—2020年各年正距平区域主要位于关中地区,其次陕南部分地区,2015—2020年关中、陕南、陕北冬季平均面积正距平百分率分别为76.6%、19.8%和5.6%,其中各年关中均有60%以上的面积为正距平。关中地区北部有黄土高原,南部有秦岭,呈东宽西窄“喇叭口”形盆地,特殊的盆地地形环境,造成大气大多处于稳定状态,大气交换较弱、污染累积效应强可能是关中冬季EMI正距平的主要原因。冬季污染气象条件影响与地形密切相关,陕西省污染气象条件最不利的区域为关中盆地的EMI正距平百分比高值区,其次为陕南;陕北地区污染气象条件较为有利。西安、咸阳、渭南等地的气象条件最差,榆林、延安的气象条件最

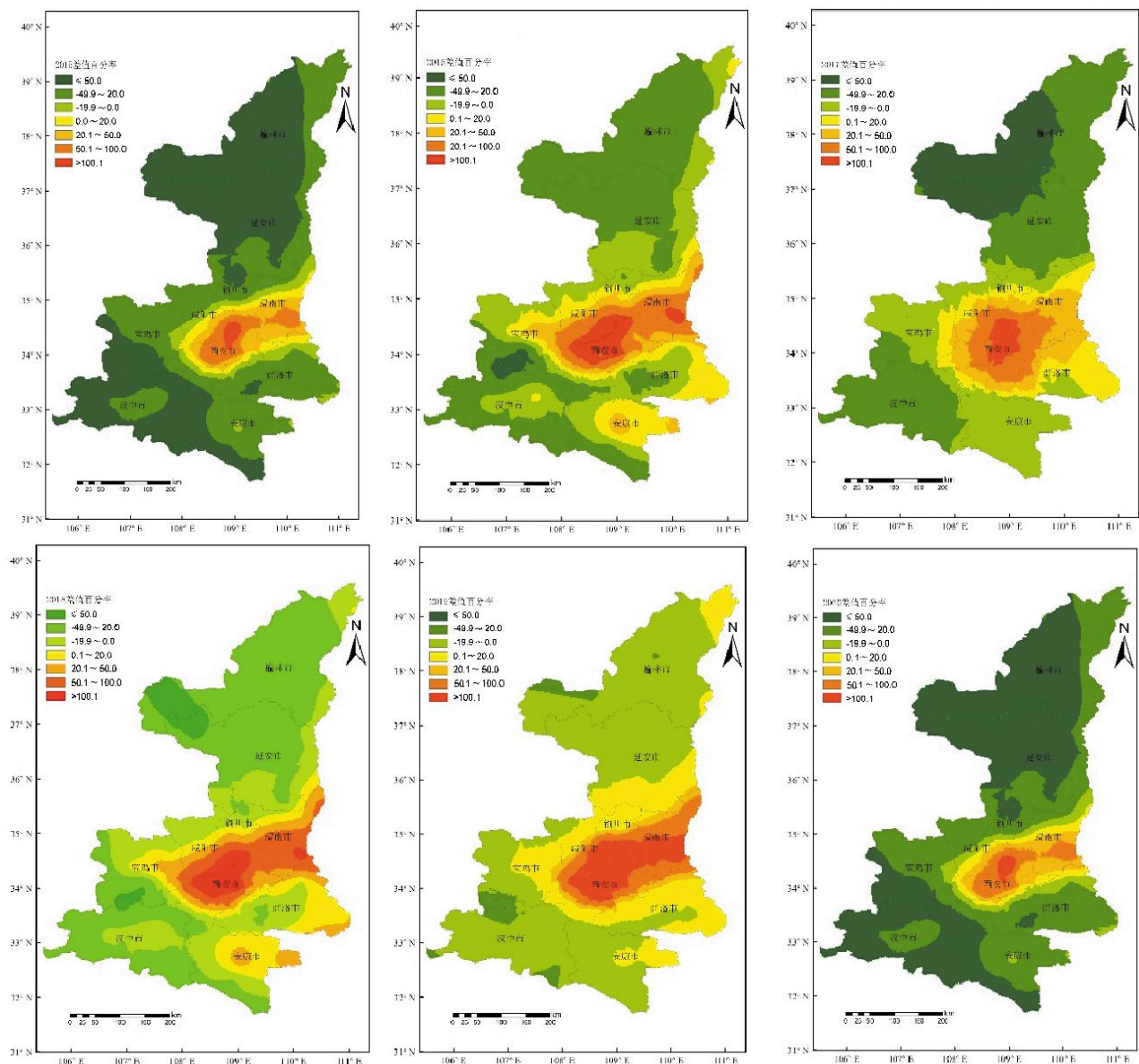


图 5 2015—2020 年冬季陕西各地 *EMI* 距平百分比分布
(a 为 2015 年,b 为 2016 年,c 为 2017 年,d 为 2018 年,e 为 2019 年,f 为 2020 年)

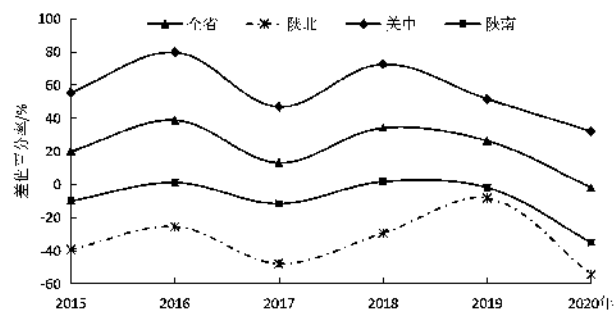


图 6 2015—2020 年冬季陕西全省及三大区域 *EMI* 距平百分比年变化

好,结论与胡琳^[28]等的研究结论基本一致。说明除人为排放较高外,恶劣的气象条件是关中地区空气污

染严重的重要原因。
冬季气象条件存在明显的年际变化特征,全省和各区域距平百分比变化趋势较为一致,均为 2016、2018 年距平百分比大,2020 年距平百分比小的特点。2016 年冬季 *EMI* 正距平百分比为 38.7%,为 2015—2020 年中最高的年份,正距平面积最大,陕北、关中、陕南分别有 6.3%、83.0%和 32.5%的面积为正距平,关中 37.5%的面积正距平超过 100%。因此,2016 年气象条件最不利,易出现较严重的重污染。2016 年冬季全省 $PM_{2.5}$ 浓度平均为 $116.0 \mu g \cdot m^{-3}$,是 2015—2020 年中冬季最高的年份,其中 1 月 1—13 日关中地区出现持续 13 d 的区域重污染天气过程,这与图 5 中 *EMI* 距平百分比高值区相对

应,表明该持续时间长的重污染过程与气象条件紧密相关。2015、2017、2020 年陕北 *EMI* 为负距平,2020 年冬季 *EMI* 负距平百分比为-2.0%,说明 2020 年冬季气象条件有利于 $PM_{2.5}$ 扩散,2020 年全省和各区域冬季环境气象条件均为近年最好。

2.3 气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率分析

$PM_{2.5}$ 浓度主要受 2 个变量的影响,一是污染物的排放量,二是气象条件;其中污染物排放强度大是污染形成的内因,不利气象条件则是重污染天气形成的外因。将全省按陕北、关中、陕南三大区域划分,分别评估各区域和全省气象条件和污染排放对 $PM_{2.5}$ 浓度变化所造成的影响,分别从气象和环境的角度评估大气污染综合治理措施的实际成效。

2.3.1 2020 年较 2015—2019 年气象条件和污染排放对 $PM_{2.5}$ 浓度影响

从表 2 可知,2020 年全省各区域环境空气质量较 2015—2019 年均有明显改善,其中全省 $PM_{2.5}$ 浓度较前 5 a 降低 24.8%,较 2015—2017 年下降 25% 以上,三大区域 $PM_{2.5}$ 浓度较前 5 a 平均下降明显,下降率均超 10%。陕南 $PM_{2.5}$ 浓度较前 5 a 平均下降最多,达 30.2%,陕南 2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度较 2015、2016 年均下降近 40%;其次是关中,下降 22.9%,关

表 2 2020 年较 2015—2019 年 $PM_{2.5}$ 浓度及气象条件和排放条件对 $PM_{2.5}$ 浓度影响 %

年	评估类别	陕北	关中	陕南	全省
2015 年	气象条件变化率	-17.6	-18.7	-27.4	-21.1
	排放变化率	-7.1	-19.2	-16.7	-15.7
	$PM_{2.5}$ 浓度变化率	-23.1	-35.3	-39.5	-34.0
2016 年	气象条件变化率	-11.8	-16.3	-25.6	-18.2
	排放变化率	1.3	-16.4	-15.3	-12.1
	$PM_{2.5}$ 浓度变化率	-10.1	-31.8	-37.0	-28.7
2017 年	气象条件变化率	-11.3	-13.9	-22.3	-15.9
	排放变化率	-1.4	-16.2	-11.5	-11.4
	$PM_{2.5}$ 浓度变化率	-12.2	-29.5	-31.1	-26.2
2018 年	气象条件变化率	-4.6	-6.7	-18.9	-9.9
	排放变化率	-4.3	-12.2	-11.0	-10.0
	$PM_{2.5}$ 浓度变化率	-8.6	-19.4	-27.8	-19.8
2019 年	气象条件变化率	-19.7	-12.8	-21.6	-16.8
	排放变化率	12.5	-4.8	7.7	2.4
	$PM_{2.5}$ 浓度变化率	-9.7	-17.8	-15.6	-15.5
2015— 2019 年 平均	气象条件变化率	-13.0	-13.7	-23.2	-16.4
	排放变化率	0.2	-13.8	-9.4	-9.4
	$PM_{2.5}$ 浓度变化率	-12.7	-26.7	-30.2	-24.8

中 2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度较 2015、2016 和 2017 年下降超过 30%。气象要素通过扩散、传输、干湿沉降和化学转化等方式对 $PM_{2.5}$ 浓度降低有明显的贡献。气象条件使 2020 年全省 $PM_{2.5}$ 浓度较近 5 a 降低 16.4%,较 2015 年降低 21.1%,较 2016、2017 和 2019 年降低 10% 以上。同样气象条件使得陕南 2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度较前 5 a 降低最多,达 23.2%,陕北、关中降低 13% 左右。说明 2020 年气象扩散条件最好,其次是 2018 年,2016 年气象扩散条件最差;陕南气象扩散条件改善最多,关中气象扩散条件改善最少。2020 年气象条件使全省 $PM_{2.5}$ 浓度较前 5 a 降低 16.4%,而实际 $PM_{2.5}$ 浓度降低 24.8%,排除气象条件影响,排放变化使得 $PM_{2.5}$ 浓度较前 5 a 平均下降 9.4%,并且较 2016、2017 和 2018 年下降 10% 以上。排放变化使关中 $PM_{2.5}$ 浓度下降最为显著,2020 年较 2015、2016、2017、2018 年均下降 10% 以上。

2.3.2 2016—2020 年较基准年气象条件和污染排放对 $PM_{2.5}$ 浓度影响

以 2015 年的气象条件和 $PM_{2.5}$ 浓度为基准,逐年评估气象条件和减排措施对 $PM_{2.5}$ 浓度降低的贡献。从图 7 可知,2016—2020 年全省平均 $PM_{2.5}$ 浓度较 2015 年降低 9.3%,除 2016 年全省平均升高 2.7% 外,2017—2020 年分别降低 1.2%、9.9%、40.3%、14.5%、19.1%。三大区域浓度陕南降低最多为 19.5%,陕北次之为 13.3,关中为 0.4%,其中关中 2016、2017 年分别升高 13.8% 和 10.3%,2019、2020 年陕南 $PM_{2.5}$ 浓度降低最多,超过 20%。2016—2020 年气象条件转好导致全省平均 $PM_{2.5}$ 浓度降低 7.4%,其中 2018、2020 年浓度降低较多均超过 10%。除 2019 年陕北气象条件贡献为负以外,其余各年气象条件均使 $PM_{2.5}$ 浓度降低,2020 年陕南降低最多 23.8%。2016—2020 年,减排措施导致浓度降低 2.5%,2019、2020 年浓度分别降低 10.4% 和 8.8%,降低最多为 2019 年陕南,为 23.1%,其次为陕南 2020 年,为 15.7%。

综上所述,气象条件对空气质量的影响不容忽视。近年陕西省大气污染治理的重视程度高,治理力度大,蓝天保卫战初见成效。贡献率分析方法从气象贡献的角度定量评估气象条件和减排措施对 $PM_{2.5}$ 浓度下降的作用,在实现气象条件和减排效果评估发挥重要作用。

3 结论与讨论

(1) 陕西省 10 个主要城市 2015—2020 年 *EMI*

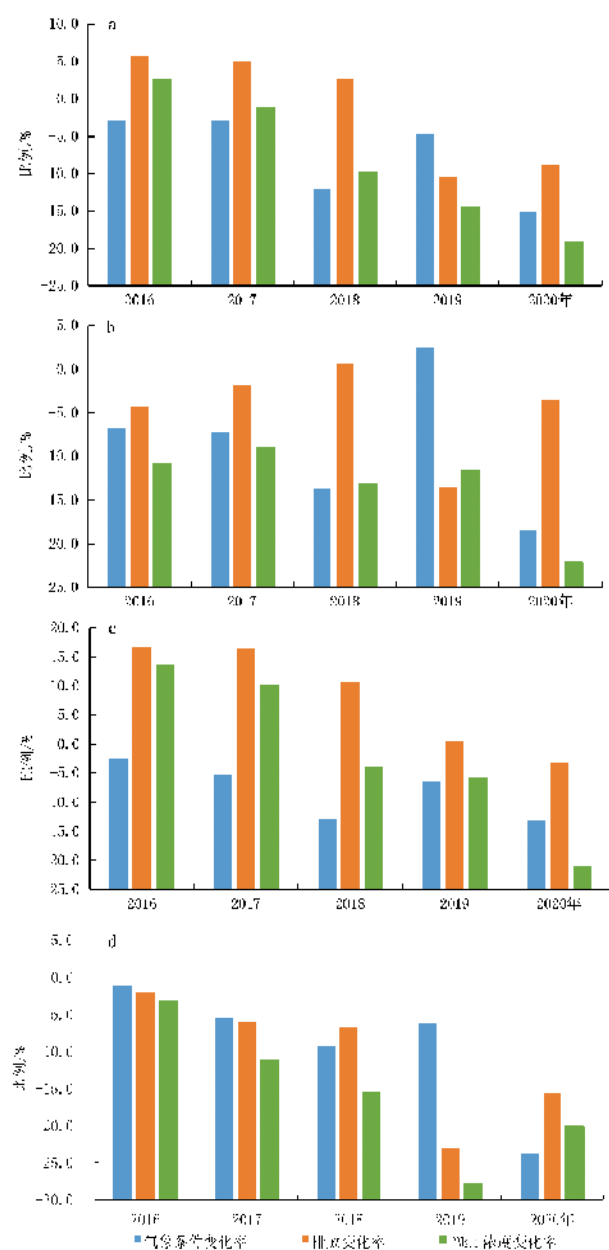


图7 2016—2020年气象条件和减排对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的贡献

(以2015年气象条件和 $PM_{2.5}$ 浓度为基准,a为全省,
b为陕北,c为关中,d为陕南)

和 $PM_{2.5}$ 平均相关系数均通过0.001显著性检验, EMI 可以较好地表征和评估各种气象条件变化导致 $PM_{2.5}$ 浓度的变化。

(2)通过气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度贡献的定量分析方法评价不同年份及不同月份的气象条件影响,2015—2020年 EMI 指数呈线性降低趋势,与 $PM_{2.5}$ 年均浓度变化趋势基本一致,近几年气象条件持续向好,有利于近地面大气中 $PM_{2.5}$ 的稀释与扩散。年内月均浓度和 EMI 指数均呈明显的单谷分布特征,

其中1月最大,12月次之;秋、冬季 EMI 指数大,气象条件不利于近地面大气中 $PM_{2.5}$ 的稀释与扩散, $PM_{2.5}$ 浓度明显高于春、夏季。

(3)陕西省各区域 EMI 的分布总体上呈关中高、陕南次之、陕北最低的特点。关中地区是 EMI 高值区,关中南、东部 EMI 指数最大, EMI 指数空间分布与卫星遥感统计的气溶胶光学厚度的分布基本一致。

(4)2015—2020年关中、陕南、陕北冬季平均面积正距平百分率分别为76.6%、19.8%和5.6%,受不利的气象条件及地形的影响, EMI 正距平百分比高值区主要位于关中地区,各年关中地区均有60%以上的面积为正距平,其中2016年冬季关中地区83.0%的面积为正距平,37.5%面积正距平超过100%。受特殊盆地地形影响,陕西省污染气象条件最不利的区域为关中盆地,其次为陕南地区;陕北地区污染气象条件较为有利。西安、咸阳、渭南等地的气象条件最差,榆林、延安的气象条件最好。

(5)2020年全省各区域环境空气质量较2015—2019年均有明显改善,全省 $PM_{2.5}$ 浓度较前5a平均降低24.8%,气象要素通过扩散、传输、干湿沉降和化学转化等方式对 $PM_{2.5}$ 浓度降低有明显的贡献,全省气象条件改善使 $PM_{2.5}$ 浓度较近5a降低16.4%;排除气象条件影响,排放变化使得 $PM_{2.5}$ 浓度较前5a年平均下降9.4%。2016—2020年全省平均 $PM_{2.5}$ 浓度较2015年降低9.3%,陕南降低最多为19.5%,2016—2020年气象条件转好导致全省平均 $PM_{2.5}$ 浓度降低7.4%,减排措施导致浓度降低2.5%,2019、2020年分别使浓度降低10.4%和8.8%。近年陕西省大气污染治理的重视程度高,治理力度大,蓝天保卫战初见成效,大气污染综合治理措施成果显著,环境质量明显改善。

EMI 作为大气污染治理第三方评估的一个技术工具,可用于评估各种气象条件变化导致 $PM_{2.5}$ 浓度的变化,可以定量分离出气象条件变化和排放变化对 $PM_{2.5}$ 浓度影响,比较系统地对大气污染治理效果作出评估分析。目前对污染物输入影响和输出影响的认识不够系统和深入,因此进一步分析研究污染来源贡献,针对 $PM_{2.5}$ 污染的综合性和复杂性,开展 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 综合污染减排的对比评估是下一步研究工作的重点方向。通过研究,以期能够完善大气污染气象条件影响的定量化评估和预评估业务,为政府持续深入地开展 $PM_{2.5}$ 污染的治理,加强细颗粒物控制提供科学依据。

参考文献:

- [1] 关月,何立富.2013年1月大气环流和天气分析[J].气象,2013,39(4):531-536.
- [2] 蔡子颖,韩素芹,汪靖,等.基于天气背景天津地区重污染天气特征分析[J].环境科学学报,2017,37(10):3906-3917.
- [3] 王静,施润和,李龙,等.上海市一次重雾霾过程的天气特征及成因分析[J].环境科学学报,2015,35(5):1537-1546.
- [4] 张慧琳,丁文广,田莘冉,等.2015年监测城市雾霾污染的时空分布特征及社会经济原因分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(1):123-131.
- [5] 刘海猛,方创琳,黄解军,等.京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J].地理学报,2018,73(1):177-191.
- [6] 余倩楠,徐茜,周陶冶,等.长三角地区2015年大气重污染特征及其影响因素[J].环境科学学报,2018,38(8):3185-3196.
- [7] 廖志恒,孙家仁,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.
- [8] CHEN S,JIANG N,HUANG J,et al.Estimations of indirect and direct anthropogenic dust emission at the global scale[J].Atmospheric Environment,2019,200:50-60.
- [9] 陈颖元,王晓琦,程水源,等.京津冀和长三角地区一次重霾过程气象成因及传输特征[J].中国环境科学,2021,41(6):2481-2492.
- [10] 尹晓梅,李梓铭,乔林,等.北京冬季疫情期间空气质量及气象影响分析[J].中国环境科学,2021,41(5):1985-1994.
- [11] 卿清涛,刘佳,李小兰,等.四川盆地一次持续性雾霾天气演变特征及其成因[J].干旱气象,2021,39(4):610-619.
- [12] SEINFELD J H,PANDIS S N.Atmospheric Chemistry and Physics:From Air Pollution to Climate Change [M].New York:John Wiley & Sons,2012.
- [13] FLOCAS H,KELESSIS A,HELMIS C,et al.Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area [J].Theoretical and Applied Climatology,2009,95(3/4):265-277.
- [14] POPE R J,SAVAGE N H,CHIPPERFIELD M P,et al.The influence of synoptic weather regimes on UK air quality:regional model studies of tropospheric column NO₂[J].ACP,2015,15(13):18577-18607.
- [15] WANG Lili,ZHANG Nan,LIU Zirui,et al.2014.The influence of climate factors,meteorological conditions,and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region during January 2013[J].Adv Meteor,2014:685971.
- [16] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾·霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.
- [17] 陈镭,马井会,耿福海,等.上海地区一次典型连续颗粒物污染过程分析[J].气象,2016,42(2):203-212.
- [18] 马学款,张碧辉,桂海林,等.APEC前后北京几次静稳天气边界层特征对比分析[J].气象,2017,43(11):1364-1373.
- [19] 张恒德,吕梦瑶,张碧辉,等.2014年2月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析[J].环境科学学报,2016,36(12):4340-4351.
- [20] 毛卓成,马井会,瞿元昊,等.2015年上海地区空气质量状况及其与气象条件的关系[J].气象与环境学报,2018,34(2):52-60.
- [21] 雷正翠,郑媛媛,刘银峰,等.2018年常州一次罕见持续性雾霾天气分析[J].气象,2019,45(8):1123-1134.
- [22] 江琪,王飞,张恒德,等.北京市PM_{2.5}和反应性气体浓度的变化特征及其与气象条件的关系[J].中国环境科学,2017,37(3):829-837.
- [23] 吕梦瑶,张恒德,王继康,等.2015年冬季京津冀两次重污染天气过程气象成因[J].中国环境科学,2019,39(7):2748-2757.
- [24] 张敏,蔡子颖,韩素芹.天津静稳指数建立及在环境气象预报和评估中的应用[J].环境科学学报,2020,40(12):4453-4460.
- [25] 陈懿妮,罗玲,马昊,等.杭州市静稳天气指数构建及应用研究[J].环境科学学报,2020,40(12):4461-4469.
- [26] 栗培真,向卫国,张小玲.成都静稳天气综合指数的构建及其应用[J].成都信息工程大学学报,2020,35(1):87-95.
- [27] 胡琳,程路,林扬,等.关中区域大气重污染年份气象条件分析[J].干旱区研究,2020,37(6):1496-1503.
- [28] 胡琳,张侠,苏静,等.陕西省霾天气变化特征及气候成因分析[J].干旱区地理,2019,42(4):707-714.
- [29] 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.
- [30] 全国气象防灾减灾标准化技术委员会(SAC/TC 345).PM_{2.5}气象条件评估指数(EMI):QX/T 479-2019[S].北京:中国气象出版社,2019.
- [31] 焦亚音,孟凯,杜惠云,等.京津冀中南部污染气象贡献的时空变化特征[J].中国环境科学,2021,41(11):4982-4989.
- [32] 刘洪利,龚山陵,何建军,等.环境气象评估指数EMI原理及应用[C]//第35届中国气象学会年会S12大气成分与天气、气候变化与环境影响暨环境气象预报及影响评估.合肥:中国气象学会,2018.
- [33] 环境保护部.环境空气质量评价技术规范(试行):HJ 663-2013[S].北京:中国环境科学出版社,2013.

Spatiotemporal Variation Characteristics of Meteorological Condition Assessment Index in Shaanxi

SU Jing¹, SUN Xian², HU Lin², LIN Yang², WANG Qi²

(1. Shaanxi Atmospheric Detection Technical Support Center, Xi'an 710014, China;

2. Shaanxi Climate Center, Xi'an 710014, China;

3. Shaanxi Institute of Meteorological Sciences, Xi'an 710016, China)

Abstract This paper used the actual monitoring data of PM_{2.5} concentration and EMI index in Shaanxi Province from 2015 to 2020, analyzed the temporal and spatial distribution characteristics of EMI in recent years, evaluated the impact of meteorological conditions change and control measures on Shaanxi ambient air quality. The results show that: From 2015 to 2020, EMI index can characterize and evaluate the changes quite good in PM_{2.5} concentration caused by meteorological conditions. Since 2015, EMI index showed a linear decreasing trend with the pickup of meteorological conditions. EMI index was higher in winter than that in summer and it is high in Guanzhong region, followed by southern Shaanxi and northern Shaanxi, with the highest occurring in the central and western regions of Guanzhong region. According to the spatial distribution of meteorological conditions in winter, it was found that the regions with high positive EMI anomaly percentage concentration were in Guanzhong region. In the winter of 2016, the area of positively off level were 83.0% and positively offset by more than 100% were 37.5% in Guanzhong. Compared to the past five years, the PM_{2.5} concentration decreased by 24.8 %, among them, the contribution rates of emission reduction and meteorological conditions respectively are 16.4% and 9.4%. It can be seen that the comprehensive control measures of air pollution in the province have achieved remarkable results in recent years, and the environmental quality has improved significantly.

Key words Shaanxi province; fine particle PM_{2.5}; ambient air quality assessment ; evaluation on meteorological condition index of PM_{2.5} pollution; contribution rate.