

基于 IBAM 指数的重庆地区空气污染 气象条件预报方法

胡春梅¹ 陈道劲¹ 周国兵¹ 王式功²

(1 重庆市气象台, 重庆 401147; 2 成都信息工程大学, 成都 610225)

摘要 通过重庆城区 2013—2016 年空气质量指数 AQI 与气象要素的相关分析, 引入表征大气温湿状态的物理量总温度、比湿、近地层风速、24 h 变压及大气低层总温度差, 构建新的空气污染气象条件指数 IBAM (Index Between Air pollution and Meteorology)。应用 2013 年 4 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日欧洲中心预报产品计算重庆地区历史 IBAM 指数, 通过 K 均值聚类分析, 引入极端天气事件概念确定空气污染气象条件阈值, 建立预报模型。利用 IBAM 指数与滞后 1 天 AQI 建立拟合曲线方程, 计算出 AQI 预报值, 计算预报准确率, 经过 2017 年 1 月 1 日至 2018 年 9 月 1 日样本检验, 72 h 内预报准确率在 70% 左右。通过误差分析发现: 当气象条件为大气污染物浓度主要影响因素且在大气污染源变化不明显时, 预报误差较小; 而当大气污染源变化明显时, 预报误差较大。该预报方法已在重庆市气象台业务应用, 对预防和处理重污染事件, 改善重庆地区空气质量有较好参考价值。

关键词 IBAM 指数; 潜势预报; 大气污染

中图分类号: P456.8 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190466 **文献标识码:** A

引言

关于空气污染潜势预报, 美国从 20 世纪 70 年代开始研究工作, 根据天气预报的风、涡度、天气状况、大气稳定度等气象因子, 用数值预报模式, 对污染源强度进行未来预报时效内的扩散气象条件计算^[1]。我国关于空气污染潜势预报及浓度预报的研究也较多。利用大气平流扩散箱格模型确定空气污染潜势指数^[2]。考虑气象要素及不同的天气形势影响, 利用加权方法得到空气污染潜势预报指数^[3]。引入适应度函数分级方法, 计算北京周边不同测站可能形成污染向北京输送的权重, 建立空气质量气象条件参数 PLAM (Parameters Linking Air Quality and Meteorology) 预报模型, 通过检验发现夏季预报效果稳定, PM₁₀ 日均浓度 24 h 预报相关系数接近 0.7^[4-5]。天津市环境气象中心基于大气化学模式 WRF/Chem 采用 4 种边界层方案构建空气质量浓度集合预报产品, 能较好地提高大气污染物浓度预报准确率^[6]。上海在 2000 年前后研发了城市空气质量预报系统, 集合多种模式及统计方法: CAPPS

模式、K 模式、分类统计方法、神经网络方法、门限自回归方法等^[7]; 随着数值模式的发展和计算资源的提升, 2008 年以 WRF/Chem 模式和 INTEX-B 与清华大学中国多尺度人为排放清单为基础构建了华东区域大气环境数值预报系统, 72 h 内预报效果较好, 污染预报的 CSI/TS 评分达到 0.55^[8]。广东在 2001 年前后基于动态统计模型、引入平流扩散箱格模式及自主研发的烟团模式等建立了空气质量预报系统; 自 2006 年开始研发珠江三角洲空气质量与能见度数值预报模式系统, 该系统基于中尺度气象模式 (MM5)、排放源模式 (SMOKE) 和大气化学模式 (CMAQ), 耦合本地排放源清单, 能较好的预报各种气溶胶对能见度的消光贡献及霾的发生、持续和消亡过程; 2016 年, 将 MM5-SMOKE-CMAQ 系统气象模式替代为 GRAPEs, 改进区域污染源输入, 在能见度与空气质量产品释用、光解过程计算、气溶胶廓线、气溶胶吸湿增长等方面进行了模式机理研究, 系统更名为华南区域大气成分业务数值预报模式系统, 即 GRACEs; 该系统对污染物日均浓度 24 h 预报误差较小, 模式整体对颗粒物预报有所

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“冬春季四川盆地西南涡活动对大气复合污染影响与机制研究”(91644226)资助

作者简介: 胡春梅, 女, 1979 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事灾害性天气预报与研究工作, Email: 505287201@qq.com

收稿日期: 2019 年 10 月 30 日; 定稿日期: 2019 年 12 月 18 日

低估,预报性能较稳定^[9-12]。

重庆城区由于特殊的地形地貌,气候特征表现为平均风速小、静风频率高、逆温现象突出。这使重庆城区大气污染物难于迅速向外扩散,空气污染较为严重。2013年以来,重庆城区在 PM₁₀、SO₂、NO₂ 3种大气污染物观测基础上,开始观测 PM_{2.5}、O₃、CO 质量浓度。重庆市气象局于 2015 年研发完成重庆市空气质量预报系统,由 WRF 模式提供气象场预报,然后驱动大气化学模式 CMAQ,进行大气污染物浓度预报,WRF-CMAQ 预报系统产品包括污染物浓度、空气质量指数 AQI、首要污染物及能见度等,由于 WRF 气象背景场的预报误差及排放清单的偏差,整体预报效果不太理想。在空气污染潜势预报方面,2007 年通过对重庆空气污染扩散气象条件指标的研究,建立了空气污染扩散气象条件等级预报模型,此模型预报效果较稳定^[13]。但建立模型时是以 PM₁₀ 为主要污染物,参考空气污染指数 API 为基础构建。以 PM_{2.5} 为重要内容的空气质量指数(AQI)的发布,要求立足于对 PM_{2.5} 的分析来建立相应的预报模型。所以本文通过对重庆城区 2013—2017 年主要大气污染物的统计特征分析,了解各种污染物的月变化、日变化特点;通过分析,挑选出与 AQI 指数相关显著且具有物理意义的气象要素,构建空气污染气象条件指数 IBAM (Index Between Air pollution and Meteorology)。本文构建的 IBAM 指数与中国气象科学研究院建立的 PLAM (Parameters Linking Air-quality and Meteorology) 指数有一定差异,PLAM 指数先挑选出与污染过程关系密切的敏感气象要素(日最高气温、相对湿度、气压及水汽含量),再引入适应度函数分级方法计算输送权重,建立 PLAM 预报模型。IBAM 指数同样先挑选敏感气象要素或变量(变压、风速、比湿、总温度差),而后归一化处理气象要素或变量形成 IBAM 指数,并将 IBAM 指数通过 K 均值聚类分析分类,根据分类引入极端天气事件的概念确定阈值,建立预报模型。本文建立的预报模型已经在重庆市气象台业务运行,经过检验评估,预报性能较稳定,对高污染过程时段及强度判断有一定指示性,能较准确预报出重庆地区污染过程,对预防和处理重污染事件,改善重庆地区环境空气质量有较好参考价值。

1 资料及研究方法

1.1 资料

在分析重庆城区大气污染物浓度统计特征时,应用重庆市环境监测中心 2013—2017 年 6 种大气污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO)质量浓度资料及日均空气质量指数 AQI (Air Quality Index)。在 AQI 与气象要素相关分析中,应用 2013—2017 年 NCEP/NCAR 再分析资料(2.5°×2.5°)。构建空气污染气象条件指数 IBAM 时,应用 2013 年 4 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日欧洲中心数值预报产品起报零场资料(0.25°×0.25°)。业务预报空气污染气象条件等级时,利用 EC 数值预报产品(12 h, 0.25°×0.25°,预报时效:168 h)。

1.2 研究方法

1.2.1 AQI 指数与气象要素相关分析

利用重庆城区日均 AQI 指数与中低层大气(700、850、925 hPa)的风、温、压、湿等气象要素^[14]作相关分析。表 1 为 AQI 指数与重庆城区最近的 3 个格点(105°E, 30°N; 107.5°E, 30°N; 110°E, 30°N)气象要素的相关系数。日均 AQI 与气温呈负相关,与 700 hPa 以下气温相关系数较高,通过 0.05 的显著性检验;与中低层气温差同样呈负相关,与 850 hPa 以下的温差相关系数高,与更高层的 850、700 hPa 温差相关系数低,不能通过显著性检验。AQI 指数与 700 hPa 以下相对湿度^[15]同样为负相关,中低层湿度与是否降雨有密切关系,湿度越大,越有利于降水,雨水的湿沉降作用,会使大气污染物浓度降低,AQI 指数减小;然而低层相对湿度差与 AQI 的相关性不显著。比湿表示大气中的绝对水汽含量,在降水发生时比湿大小与雨量大小有关,比湿与 AQI 同样呈负相关,相关性显著。由于相关分析是应用大尺度资料,所以,风速与 AQI 相关系数不高,但仍然可以看出,越低层的风速与 AQI 的相关系数越高,这说明近地层的风速对大气污染物的扩散影响更明显。地面气压的变化在某种程度上反应冷空气活动情况,冷空气影响时气压升高、近地层风速增大,利于 AQI 指数下降,所以 24 h 变压与 AQI 为负相关。

参考总温度公式:

$$T_t = T + \frac{L}{C_p} q + \frac{Ag}{C_p} Z + \frac{A}{2C_p} V^2 \quad (1)$$

其中, T_t 为与气块总能量相当的温度, T 为气块温度,

表 1 2013—2017 年重庆地区日均 AQI 与气象要素相关系数

要素	格点 1	格点 2	格点 3	
温度	1000 hPa	-0.28#	-0.25#	-0.25#
	925 hPa	-0.28#	-0.24#	-0.23#
	850 hPa	-0.26#	-0.22#	-0.21#
	700 hPa	-0.28#	-0.27#	-0.29*
温差	1000 与 925 hPa	-0.19#	-0.28#	-0.41*
	925 与 850 hPa	-0.18	-0.24#	-0.23#
	850 与 700 hPa	-0.12	-0.03	0.02
相对湿度	1000 hPa	-0.39*	-0.38*	-0.39*
	925 hPa	-0.36*	-0.39*	-0.39*
	850 hPa	-0.21#	-0.24#	-0.34*
	700 hPa	-0.36*	-0.29*	-0.27#
相对湿度差	1000 与 850 hPa	-0.08	-0.08	0.05
	925 与 850 hPa	-0.11	-0.15	0.05
比湿	925 hPa	-0.33*	-0.30*	-0.28#
	850 hPa	-0.37*	-0.33*	-0.30*
	700 hPa	-0.44*	-0.43*	-0.38*
全风速	925 hPa	-0.17	-0.08	-0.04
	850 hPa	-0.15	0.10	-0.06
风速分量	925 hPa(U)	0.17	-0.03	-0.11
	925 hPa(V)	0.07	0.06	-0.01
	850 hPa(U)	0.15	0.02	-0.02
	850 hPa(V)	0.05	0.04	-0.02
24 h 变压	08:00	-0.14	-0.15	-0.12
	20:00	-0.06	-0.06	-0.01

注:格点 1:105°E,30°N;格点 2:107.5°E,30°N;格点 3:110°E,30°N;
*表示通过 0.01 的显著性水平检验,#表示通过 0.05 的显著性水平检验,下同。

C_p 为定压比热, L 为凝结潜热系数, q 为气块比湿, A 为热功当量, g 为重力加速度, Z 为气块高度, V 为风速。

经比较, $\frac{A}{2C_p}V^2$ 动能项较小,可略去;在不考虑

$\frac{Ag}{C_p}Z$ 位能项的情况下,总温度公式简化为:

$$T_t = T + \frac{L}{C_p}q \quad (2)$$

计算影响大气扩散条件的温湿状态物理量^[16]。将 L 和 C_p 常数代入式(2),得到

$$T_t = T + 2.5q \quad (3)$$

由表 1 可知,气温、比湿与 AQI 相关系数高,根

据式(3)计算出中低层总温度与 AQI 指数相关系数也较高(表 2)。700、850、925 hPa 总温度、925 与 850 hPa 总温度差与 AQI 相关系数高,表明大气低层的温湿状态和层结状况对大气污染物浓度变化有较明显影响,而更高层的大气温湿状态与 AQI 相关系数较低,相关性不显著。

表 2 2013—2017 年重庆地区日均 AQI 与总温度、总温度差相关系数

要素	格点 1	格点 2	格点 3	
总温度	925 hPa	-0.32*	-0.29*	-0.27#
	850 hPa	-0.39*	-0.39*	-0.37*
	700 hPa	-0.34*	-0.29*	-0.28#
总温差	925 与 850 hPa	-0.23#	-0.22#	-0.19#
	850 与 700 hPa	-0.16	-0.07	-0.05

1.2.2 空气污染气象条件指数 IBAM

经相关分析发现,低层的气温、湿度及总温度与 AQI 指数相关系数高,同时考虑冷空气和风速对大气污染物浓度的影响,选出 4 个气象因子构建空气污染扩散气象条件指数 IBAM。分别为:表征冷空气活动的地面 24 h 变压;低层风速(大气边界层的风速可代表低层大气的水平扩散能力);表示温湿状态及层结状况的总温度差(大气扩散能力不仅与其水平输送情况有关,同样与垂直输送有关);700 hPa 比湿(较明显的降水对大气污染物的稀释沉降作用明显,由相关分析也发现,比湿与 AQI 相关性显著)。虽然相对湿度与 AQI 指数显著相关,但考虑相对湿度预报值误差较大,所以没有选取相对湿度构建 IBAM 指数。

对选出的 4 个气象因子作归一化处理

$$X = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

其中, X 为待归一化处理的变量, X_{\min} 为变量的最小值, X_{\max} 为变量的最大值。

将归一化处理后的无量纲数组合成空气污染扩散条件的综合指数 IBAM 指数 I_{BAM}

$$I_{\text{BAM}} = n + (B_1 + B_2 + \dots + B_i) - (C_1 + C_2 + \dots + C_n) \quad (5)$$

其中, B_i 为第 i 个相关系数为正的入选因子, C_n 为第 n 个相关系数为负的入选因子, n 是为了保证 IBAM 指数为正值加入的一个正整数(与 C_n 中的 n 相同)。

由于 4 个气象因子与 AQI 指数都为负相关,为了保证 IBAM 指数为正数,IBAM 指数表达式设定为

$$I_{\text{BAM}} = 4 - d_{p24} - q_{700} - d_{T_1} - F \quad (6)$$

其中, d_{p24} 为地面 24 h 变压, q_{700} 为 700 hPa 比湿, d_{T_1} 为近地层总温度差, F 为近地层风速。 d_{T_1} 和 F 因海拔高度的不同,将取不同高度层的值。

选取重庆及周边地区(100°~115°E, 25°~35°N)计算空气污染扩散气象条件 IBAM 指数,所用资料为 2013 年 4 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日欧洲中心细网格数值预报产品 20:00 起报零场资料。设:

$$A_1 = d_{p24} \quad (7)$$

$$A_2 = q_{700} \quad (8)$$

当海拔高度 $h < 800$ m 时,设:

$$A_3 = [T_{2m} + \frac{1}{2}(2.5q_{1000} + 2.5q_{925})] - (T_{850} + 2.5q_{850}) \quad (9)$$

$$A_4 = F_{925} \quad (10)$$

当海拔高度 $800 \leq h < 1500$ m 时,设:

$$A_3 = [T_{2m} + \frac{1}{2}(2.5q_{925} + 2.5q_{850})] - \frac{1}{2}(T_{850} + 2.5q_{850} + T_{700} + 2.5q_{700}) \quad (11)$$

$$A_4 = F_{850} \quad (12)$$

当海拔高度 $1500 \leq h < 2500$ m 时,设:

$$A_3 = (T_{2m} + 2.5q_{850}) - (T_{700} + 2.5q_{700}) \quad (13)$$

$$A_4 = \frac{1}{2}(F_{850} + F_{700}) \quad (14)$$

则:

$$I_{\text{BAM}} = 4 - A_1 - A_2 - A_3 - A_4 \quad (15)$$

其中, d_{p24} 表示 24 小时变压, T_{2m} 、 T_{850} 、 T_{700} 分别表示 2 m、850 和 700 hPa 温度, q_{1000} 、 q_{925} 、 q_{850} 、 q_{700} 分别表示 1000、925、850 和 700 hPa 比湿, F_{925} 、 F_{850} 、 F_{700} 分别表示 925、850 和 700 hPa 风速。当海拔高度超过 2500 m 时,不再计算 IBAM 指数。

具体地,对 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 进行归一化处理,设定 24 h 气压变化 d_{p24} 范围为 $-15 \sim 15$ hPa (小于 -15 当作 -15 处理,大于 15 当作 15 处理); 700 hPa 比湿 q_{700} 取值为 $0 \sim 12$ g/kg (大于 12 当作 12 处理); 总温度差 d_{T_1} 变化范围设定为 $-5 \sim 15$ °C (小于 -5 当作 -5 处理,大于 15 当作 15 处理); 925 hPa 风速 F_{925} 为 $0 \sim 15$ m/s (大于 15 当作 15 处理); 850 hPa 风速 F_{850} 为 $0 \sim 20$ m/s (大于 20 当作

20 处理); $\frac{1}{2}(F_{850} + F_{700})$ 风速为 $0 \sim 25$ m/s (大于 25 当作 25 处理)。

由以上方法计算出的 IBAM 指数数值介于 $0 \sim 4$ 之间,IBAM 指数越大,大气扩散条件越差,空气污染相对越严重。选取离重庆城区最近的格点(106.5°E, 29.5°N)分析 IBAM 指数的合理性。逐日对应的 IBAM 指数与日均 AQI 指数相关系数为 0.34, IBAM 指数与滞后 1 天的日均 AQI 指数相关系数为 0.46, 与滞后 2 天的 AQI 相关系数为 0.44, 与滞后 3 天的 AQI 相关系数为 0.37, 可见 IBAM 指数与滞后 1 天的 AQI 相关性最好, 所以建立预报模型时将 IBAM 指数与滞后 1 天的 AQI 对应。IBAM 指数的月变化曲线(图 1)显示, IBAM 指数在 1 月最高, 从 2 月开始逐渐降低, 至 7 月为全年最小值, 8—12 月逐渐升高, 与 AQI 月均值相关系数为 0.74, 同样说明 IBAM 指数能较好的反映空气污染扩散气象条件。

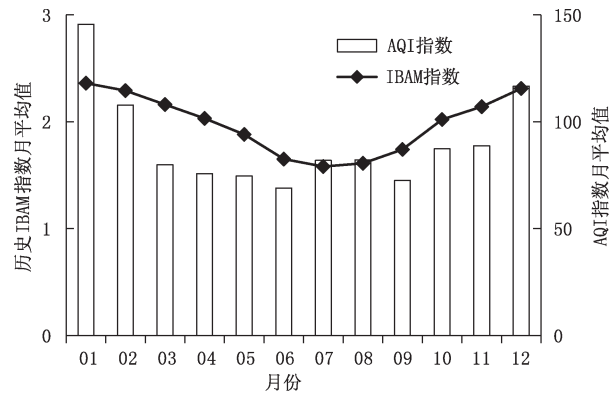


图 1 重庆 2013 年 4 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日历史 IBAM 与 AQI 指数逐月变化

1.2.3 空气污染气象条件预报方法

对(106.5°E, 29.5°N)格点 IBAM 指数作 K 均值聚类分析,因 AQI 指数分为 6 级, IBAM 指数对应分为 6 类。结果显示(表 3),较小的 IBAM 指数区间(0.92~1.44)和较大的 IBAM 指数区间(2.47~3.05)所占比例较小,大约分别占总样本的 9.2% 和 9.7%, 而中间的 4 类占总样本的 81%。仅从 IBAM 指数的分布不能看出对应 AQI 指数情况,针对每个 IBAM 指数区间对相应的 AQI 进行分析。将 IBAM 指数分类区间对应的平均 AQI 比较,随着 IBAM 指数的增大,平均 AQI 逐渐增大,分别为:

63、72、76、92、110、132。进一步比较每个 IBAM 指数区间达到轻度污染的样本数占各区间总样本数的百分比,随着 IBAM 指数的增大,达到轻度污染的 AQI 百分比不断增大;当 IBAM 指数区间平均值为 1.30(0.92~1.44 区间)时,达到轻度污染(AQI>100)的 AQI 样本占 3.7%;当 IBAM 指数区间平均值为 2.62(2.47~3.05 区间)时,达到轻度污染的

AQI 样本数占 64.6%。同样 AQI 指数超过 200 的重度污染样本所占百分比也随着 IBAM 指数的增大而增大,在 IBAM 指数区间平均值为 1.30 时,没有出现重度污染的样本,在 IBAM 指数区间平均值为 2.62 时,达到重度污染样本百分比为 11.5%。以上分析说明 IBAM 指数的构造和分类是合理的。

表 3 2013 年 4 月 1 日至 2016 年重庆城区历史 IBAM 指数分类与对应 AQI 对比

	IBAM 均值(区间)					
	1.30 (0.92~1.44)	1.58 (1.44~1.71)	1.85 (1.72~1.96)	2.08 (1.96~2.2)	2.32 (2.2~2.47)	2.62 (2.47~3.05)
样本数	108	213	218	259	256	113
占比/%	9.3	18.2	18.7	22.2	21.9	9.7
平均 AQI	63	72	76	92	110	132
AQI>100 占比/%	3.7	16	15.6	29.3	45.7	64.6
AQI>150 占比/%	0	0.5	2.8	8.8	18.4	31
AQI>200 占比/%	0	0.5	0.5	2.3	5.1	11.5

根据 IBAM 指数分类和 AQI 指数分布情况,考虑 IBAM 指数出现的气候概率,以 P 表示历史同期 IBAM 指数(A_h)大于预报日 IBAM 指数(A_p)的气候概率,确定空气污染扩散气象条件等级预报为:① $0.90 < P \leq 1.00$,一级(非常有利于大气污染物扩散);② $0.72 < P \leq 0.90$,二级(较有利于大气污染物扩散);③ $0.54 < P \leq 0.72$,三级(对大气污染物扩散无明显影响);④ $0.32 < P \leq 0.54$,四级(不利于大气污染物扩散);⑤ $0.10 < P \leq 0.32$,五级(很不利于大气污染物扩散);⑥ $0.0 \leq P \leq 0.10$,六级(非常不利于大气污染物扩散)。

例如:计算出某天的 IBAM 指数(即 A_p)为 1.98,查询这一天历史同期(设定在 1 个月之内,即预报日期之前 15 天到预报日期之后 15 天内)的 IBAM 指数所有样本,如果大于 1.98 的 IBAM 指数的样本数占查询总样本数的 30%,那么当天的空气污染扩散气象条件等级预报为五级(很不利于大气污染物扩散)。

2 重庆大气污染物统计特征

2.1 首要污染物

重庆城区 2013 年以前,首要污染物以 PM_{10} 为主。2013 年后新增 3 种污染物 $PM_{2.5}$ 、 O_3 、CO 质量浓度观测,首要污染物有 $PM_{2.5}$ 、 O_3 、 PM_{10} 和 NO_2 ,

其中 $PM_{2.5}$ 出现的次数最多,百分比为 58.4%, O_3 第 2(21.9%), PM_{10} 和 NO_2 出现百分比分别为 11.8%和 10.8%。秋冬季节首要污染物主要是 $PM_{2.5}$,夏季的首要污染物为 O_3 ,春季 $PM_{2.5}$ 、 O_3 、 PM_{10} 、 NO_2 都可能是首要污染物, SO_2 、CO 在重庆城区不是首要污染物(图略)。

2.2 大气污染物浓度月变化

重庆城区日均 AQI 指数月变化特征:1 月最高(约 138)、12 月为次高、2 月第 3,月均值都超过 100;月均 AQI 低于 70 的有 4、6、9 月;其余月份 AQI 平均值在 70~85 之间。相对应的季节变化,AQI 指数由高到低为冬、春、秋、夏,空气质量冬季最差;夏季相对较好,夏季的空气质量主要受 O_3 浓度影响(图略)。

空气质量等级统计结果显示,严重污染等级 6 级在重庆没有出现。按月出现频次比较,1 级(优)多出现在 9、10、6 和 7 月,12 月出现频次最少;2 级(良)出现频次最多在春季的 5、4 和 3 月,1 月出现频次最少;3 级(轻度污染)多出现在 12、2、8 和 1 月;4 级(中度污染)多出现在冬季 1、2 和 12 月;5 级(重度污染)主要出现在 1 月。总体上,出现频次最多的是 2 级、占 57.1%,其次是 1 级,占 15.6%,4、5 级出现频次较少,低于 10%;从近几年的空气质量等级可以看出,重庆城区优良等级的天数占 72.7%(表 4)。

表4 重庆2013—2017年各月空气质量等级统计

	1级	2级	3级	4级	5级
1月	11	37	33	35	39
2月	15	61	34	20	11
3月	21	101	24	5	4
4月	21	116	13	0	0
5月	20	120	15	0	0
6月	32	96	21	1	0
7月	34	86	29	6	0
8月	26	90	36	3	0
9月	43	94	10	3	0
10月	39	82	24	7	3
11月	17	97	25	11	0
12月	5	63	58	24	5
共计	284	1043	322	115	62
占比/%	15.6	57.1	17.6	6.3	3.4

2.3 大气污染物浓度日变化

重庆城区大气污染物浓度最高的站点为高家花园站,利用高家花园站分析各种污染物浓度日变化特征。由于天空状况对各种大气污染物的浓度影响较大,所以分晴天、阴天、多云和雨天分别分析日变化曲线。晴天标准为:无降水、气温日较差大于5℃、日照大于5h;多云:无降水、气温日较差大于5℃、日照大于0h且小于5h;阴天:无降水、气温日较差小于5℃、无日照;雨天:有降水。

如图2所示,6种污染物在晴天时的日变化幅度比其它天空状况下大。在没有降水时,PM_{2.5}和PM₁₀的日变化特点相似,全天存在2个高浓度时段,

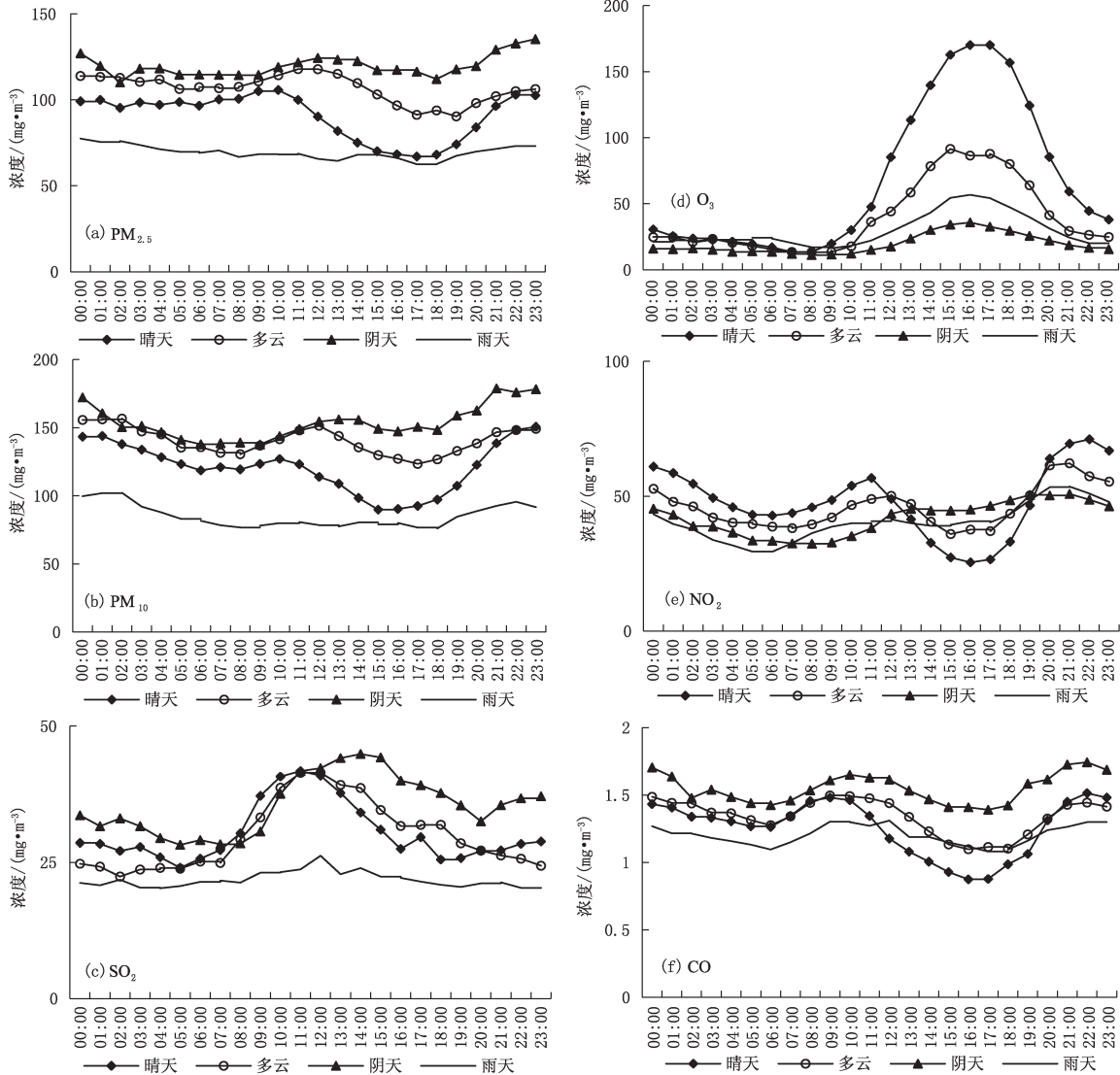


图2 2013—2017年重庆高家花园站不同天空状况污染物浓度日变化

(a)PM_{2.5}、(b)PM₁₀、(c)SO₂、(d)O₃、(e)NO₂、(f)CO

1 个时段在白天 10:00—12:00,另 1 个在夜间 22:00—24:00;PM_{2.5} 和 PM₁₀ 在阴天时浓度最高。SO₂ 和 O₃ 为单峰型变化,O₃ 的峰值一般出现在下午的 16:00 或 17:00,SO₂ 峰值出现在上午 11:00 前后,阴天时峰值偏晚出现在下午 14:00。NO₂ 为双峰型变化,最大峰值出现在夜间 22:00 前后,次峰值出现在上午 11:00 前后。CO 也呈双峰型变化,最大峰值出现在夜间 22:00 前后,次峰值出现在上午 10:00 前后。

3 预报效果检验分析

3.1 72 h 内预报准确率

由 IBAM 指数建立的空气污染扩散气象条件客观预报模型已经在重庆市气象台业务应用,为评估预报模型的预报性能,计算 24、48、72 h 预报准确率。空气污染扩散气象条件客观预报模型提供的是气象条件等级预报,不能直接通过 AQI 实况等级检验。根据计算出的历史 IBAM 指数与滞后 1 天的 AQI 指数相关关系,建立拟合曲线方程(图 3):

$$Y = 42.04X^2 - 111.3X + 148.4 \quad (16)$$

其中,Y 为滞后 1 天日均 AQI 指数,X 为历史 IBAM 指数。

拟合方程的相关系数为 0.497,通过 0.001 的显著性水平检验。由预报得到的 IBAM 指数计算出滞后 1 d 的日均 AQI 指数预报值,并得到相应的空气质量等级。评定标准设为:当实况在轻度污染以下等级时,预报空气质量等级与实况等级相同或者相差 1 个等级时,记为正确;预报与实况相差 2 个等级以上时,记为不正确;当实况在轻度污染以上等级时,预报空气质量等级与实况等级相同或者相差 1 个等级时,记为正确;预报与实况相差 2 个等级以上时,记为不正确。

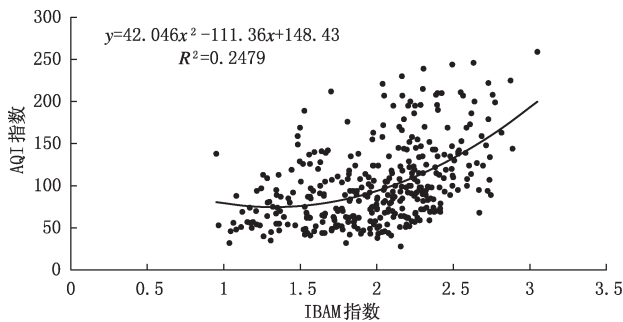


图 3 IBAM 指数与滞后 1 天日均 AQI 指数拟合曲线

预报检验时段选取为 2017 年 1 月 1 日至 2018 年 9 月 30 日。预报准确率为:24 h 70%、48 h 70%、72 h 71%。比较 3 个预报时次逐月准确率(图 4),春季 3—5 月、夏季 6—7 月和秋季 9—10 月,预报准确率较高,在 80%以上;冬季 1、2 月和夏季 8 月预报准确率较低,低于 50%。具体分析误差原因:冬季 1、2 月,超过 80%的误差预报等级偏高,这与 IBAM 指数的构造有关,IBAM 指数主要考虑大气的水平及垂直扩散能力,在 1 月和 2 月大气多处于静稳状态,计算出的 IBAM 指数较高,由 IBAM 指数拟合得到的 AQI 指数高,预报空气质量等级也偏高;空气质量预报等级偏低的情况多发生在出现中度或重度污染等级的时候,所以 1、2 月预报准确率低。然而,夏季 8 月,拟合方程计算出的 AQI 指数偏低,空气质量等级预报偏低;8 月为重庆伏旱期,太阳辐射强,首要污染物主要为 O₃,O₃ 为二次污染物,IBAM 指数并没有考虑污染物转化相关因素,所以 8 月预报效果不理想。

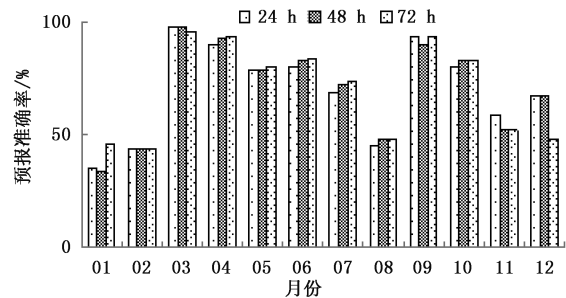


图 4 IBAM 指数空气污染 24 h、48 h、72 h 逐月预报准确率

3.2 污染过程预报误差分析

分别选取两次污染天气过程,分析误差原因。2017 年 12 月 19—30 日,重庆城区出现了一次持续时间较长的污染过程(图 5a)。从 19 日开始 AQI 指数超过 100,达到轻度污染,到 21 日,维持轻度污染;22 日,AQI 超过 150,达中度污染;27—28 日,AQI 超过 200,重度污染,污染物浓度达到最高;29 日后,AQI 指数降低,为轻度污染;31 日,AQI 下降至 100 以下,污染过程结束。对此次污染过程(以 24 h 预报说明),由预报 IBAM 指数计算出 AQI 指数与实况对比:19—22 日预报误差较小;23—25 日预报 AQI 指数偏低,但变化趋势一致;26—28 日,污染物浓度最高时,预报明显偏低;29—30 日,误差较小。

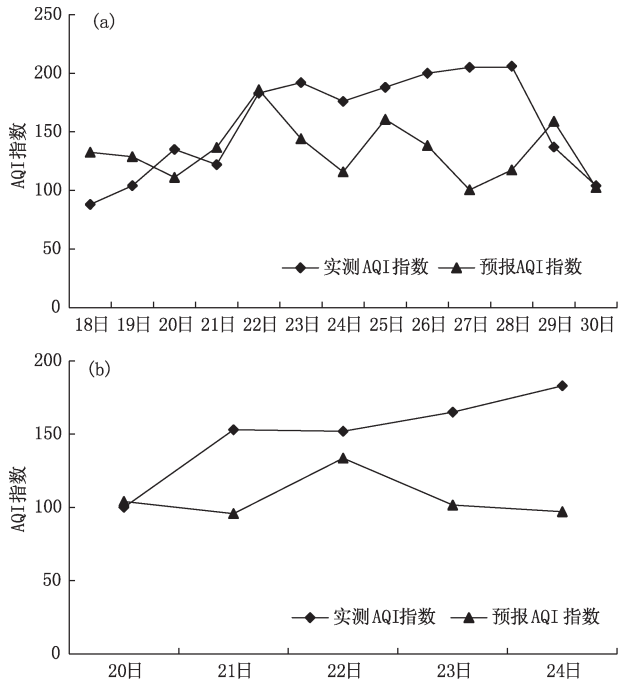


图5 实测与预报AQI指数:

(a)2017年12月18—30日,(b)2017年1月19—25日

2017年12月19—30日,重庆地区高空影响系统^[17](图略)演变:21日前为槽后西北气流;22—23日,有波动槽过境,并伴随弱冷空气影响;24—26日为偏西气流;27—28日,高原波动槽快速东移;29—30日为偏西波动气流,并伴有强冷空气影响。地面形势^[18]为高压底部、弱高压、高压后部、低压场及冷锋前部影响。天空状况以阴天为主,在19、24、28日

早上出现大雾,29—30日,有降水。从表5气象因子变化可知,在25日以前,由于850 hPa以下有逆温层(大气层结稳定度高)、冷空气强度弱、没有降水,总体大气污染扩散气象条件较差,不利于污染物扩散稀释和沉降;29日以后,受较强冷空气影响,低层逆温破坏、出现降水,AQI指数逐渐下降。26—28日预报明显偏低,对应分析25—27日IBAM指数中各项气象因子变化(表5),25日: q_{700} 比湿增加, d_{T_1} 总温度差增大,所以计算得到IBAM指数较小;26日: d_{p24} 为正变压, d_{T_1} 总温度差明显增大, q_{700} 比湿也较大,使IBAM指数明显减小,拟合得到AQI指数偏小,空气质量等级偏低;27日: d_{p24} 为负变压, d_{T_1} 总温度差减小,但 q_{700} 比湿增大, F_{925} 风速增大至7.1 m/s,同样得到较小IBAM指数。在污染过程爆发增长阶段,即使大气扩散条件略有好转,但没有明显冷空气影响、破坏低层逆温,或者明显的有效降水湿沉降作用,大气污染物仍然将维持高浓度。在持续污染发生,空气质量达到中度或重度污染时,IBAM指数预报误差较大。另一方面,大气污染物浓度不仅与气象条件有关,同样与污染源有密切关系。应用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)研发的Hysplit模式分析此次污染过程的后向轨迹(图6a)。25日以前,100、500及1000 m高度层气团主要为四川盆地污染源^[19],污染源相对固定。可见,此次污染过程前期主要为本地污染源,污染源变化较小,所以在大气污染物浓度变化主要受气象条件影响时,预报误差较小,预报效果较好。

表5 2017年12月18—30日IBAM指数气象要素24 h预报

	24 h 变压 A_1	700 hPa 比湿 A_2	总温度差 A_3	925 hPa 风速 A_4	850 hPa 以下 是否出现逆温 (高空观测)
	hPa	g/kg	°C	m/s	
18日 20:00	1.7	0.6	10.9	2.1	否
19日 20:00	1.2	0.7	14.8	2.5	否
20日 20:00	-2.8	0.4	10.3	3.9	是
21日 20:00	-10.4	1.2	5.8	3.9	是
22日 20:00	-2.4	3.4	7.4	1.0	是
23日 20:00	4.3	3.4	8.0	1.7	是
24日 20:00	-1.3	1.0	4.2	3.8	是
25日 20:00	-3.2	3.7	8.0	1.4	是
26日 20:00	5.3	3.6	10.7	2.1	是
27日 20:00	-7.3	5.4	4.9	7.1	是
28日 20:00	2.3	1.0	2.7	3.3	是
29日 20:00	8.9	4.4	6.0	2.3	否
30日 20:00	2.7	0.3	7.0	2.5	否

2017 年 1 月 21—24 日污染过程(图 5b), 预报等级偏低。整个污染过程 AQI 指数超过 150, 达到中度污染, 由预报得到的 IBAM 指数计算出 AQI 指数偏低明显。从高空形势(图略)分析, 21—24 日重庆地区主要受槽后西北气流影响, 在 22—23 日有波动槽过境, 但无降水出现; 地面形势为高压底部, 天空状况为多云到阴天。与 2017 年 12 月 19—30 日污染过程比较, 此次过程(表 6)大气低层层结稳定度为中性居多, d_{T_1} 较大, $d_{p_{24}}$ 负变压变化幅度小, 21、24 日有正变压, 20、21、23 日近地层风速 F_{925} 较大

(在 5 m/s 以上), 所以 IBAM 指数预报值较小, 大气扩散气象条件一般、对污染物扩散无明显影响, 预报 AQI 指数也较小。从气象因子分析可知, 气象条件对大气污染物扩散影响总体不差, 那为什么出现连续 4 d 的中度污染? 从后向轨迹模拟结果分析(图 6b), 100、500 m 高度输送来自青藏高原南部印缅地区, 1000 m 高度输送来自重庆东部两湖盆地地区, 说明此次污染过程为输送型污染, 污染源变化较大, 即使本地大气扩散条件对污染物影响不明显^[20], 大气污染物浓度仍然维持在较高水平。

表 6 2017 年 1 月 20—24 日 IBAM 指数气象要素 24 h 预报

	24 h 变压 A_1	700 hPa 比湿 A_2	总温差 A_3	925 hPa 风速 A_4	850 hPa 以下 是否出现逆温 (高空观测)
	hPa	g/kg	°C	m/s	
20 日 20:00	-1.3	3.2	10.1	7.3	否
21 日 20:00	3.0	1.7	8.9	0.9	是
22 日 20:00	-2.4	3.6	9.9	6.2	是
23 日 20:00	-2.1	4.2	11.2	5.4	否
24 日 20:00	4.9	2.5	8.4	0.3	否

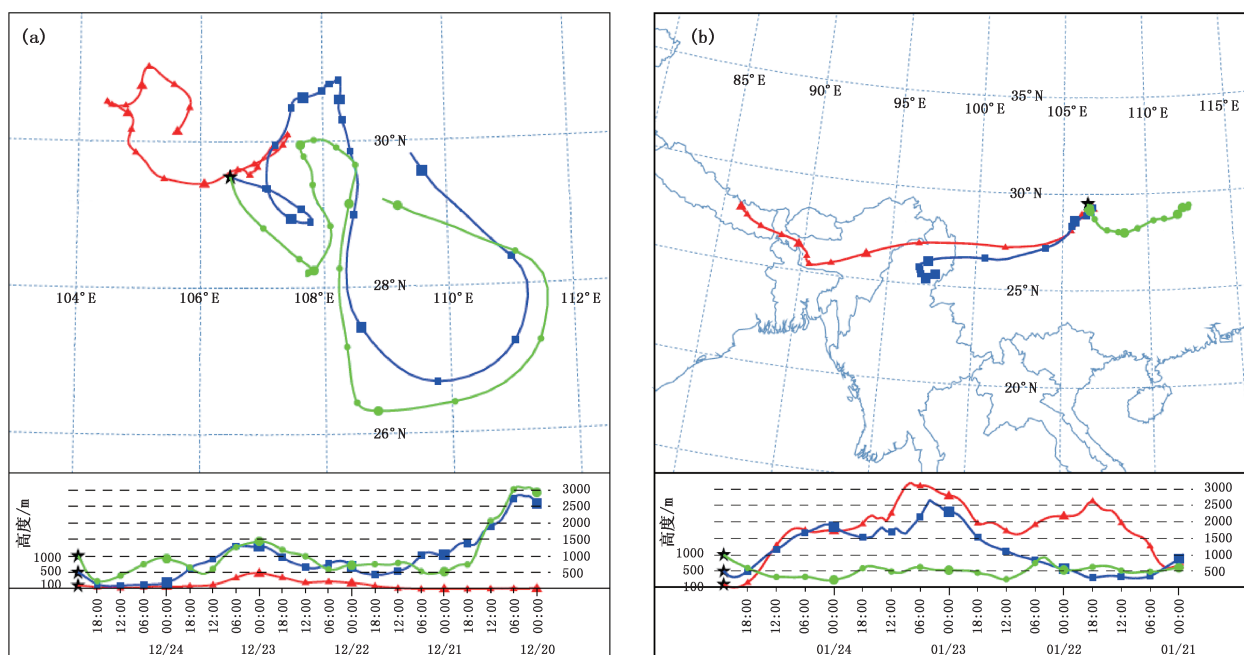


图 6 重庆两次连续污染过程后向轨迹:
(a)2017 年 12 月 24 日(120 h), (b)2017 年 1 月 24 日(96 h)
(图中★表示重庆)

从 2 次污染过程误差分析可知,基于 IBAM 指数建立空气污染气象条件预报方法,在大气污染源变化较小(本地污染累积为主)的情况下,预报效果较好;而在大气污染源变化明显(输送型污染为主)时,预报误差较大。在持续污染发生、空气质量达到中度或重度污染时,IBAM 指数预报误差也相对较大。另外,从本文构建的 IBAM 指数的各气象要素组成可知,客观预报方法对预测以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的 AQI 预报效果较好,而以 O_3 为首要污染物的 AQI 预报效果较差,其原因是因为 O_3 预测的控制气象因子为太阳辐射(日照时数),目前的 IBAM 指数中没有考虑辐射相关气象因子,而重庆夏季 O_3 为首要污染物,所以 AQI 指数预报误差较大。

4 结论与讨论

本文通过气象要素与 AQI 指数相关分析,挑选出相关显著且具有物理意义的气象因子,构建空气污染气象条件 IBAM 指数;应用 EC 数值预报产品计算历史 IBAM 指数,通过 K 均值聚类分析,引入极端天气事件概念确定空气污染气象条件阈值,建立预报模型;经过预报误差分析,得到如下结论:

(1)重庆城区的首要污染物主要是 $PM_{2.5}$,其次是 O_3 。冬季 AQI 指数最高,大气污染最严重。空气质量等级“良”出现的频率最高,占 57%;达到“轻度污染”以上的等级占 27%,没有出现“严重污染”等级。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 在阴天时浓度最高,全天存在 2 个高浓度时段(10:00—12:00,22:00—24:00); O_3 在晴天时浓度最高, O_3 和 SO_2 日变化为单峰型。

(2)由湿度和温度计算得到的总温度与 AQI 指数相关性显著。以低层风速、24 h 变压、比湿及总温度差构建空气污染气象条件 IBAM 指数,IBAM 指数越大,污染越严重。利用 K 均值聚类分析将 IBAM 指数分为 6 类,对分类后 IBAM 指数区间对应 AQI 指数分析证明了 IBAM 指数的合理性。

(3)利用极端天气事件概念确定空气污染气象条件阈值,通过查询历史同期 IBAM 指数出现的气候概率确定空气污染扩散气象条件预报等级。

(4)由 IBAM 指数拟合计算出 AQI 指数预报值,并与实测空气质量等级对比分析预报误差,72 h 内预报准确率在 70%左右。春季、秋季及夏季 6、7 月预报准确率较高,夏季 8 月、冬季 1、2 月误差相对较大。通过污染天气过程误差分析,当气象条件为

大气污染物浓度主要影响因素且在大气污染源变化较小(本地污染累积为主)的情况下,预报效果较好;而当大气污染源变化明显(输送型污染为主)时,预报误差相对较大。

本文基于 IBAM 指数建立的空气污染气象条件预报方法已经在重庆市气象台业务应用,预报效果较稳定,可以提前 7 天预报气象条件对重庆地区空气质量的影响,IBAM 指数引入 4 类敏感气象要素或变量,根据极端天气事件概念确定气象条件阈值,可以定量诊断出重庆及其周边地区空气污染的可能区域及强度,对霾污染的定量影响评估有重要指示意义和参考价值。然而此方法对于夏天的 O_3 污染和因污染源变化引起的大气污染物浓度变化,预报误差较大。为提高预报准确率,可针对 O_3 污染构建相对应的 IBAM 指数;另一方面,根据最新的排放清单,发展数值模式,提高空气污染潜势预报和浓度预报准确率。

参考文献

- [1] 程水源,郝瑞霞,杨智明.关于大气污染预测方法的新探讨[J].环境科学从刊,1991,12(2):34-38.
- [2] 徐大海,朱蓉.大气平流扩散的箱格预报模型与污染潜势指数预报[J].应用气象学报,2000,11(1):1-11.
- [3] 王迎春,孟燕军,赵习方.北京市空气污染业务预报方法[J].气象科技,2001,29(4):42-46.
- [4] 杨元琴,王继志,侯青,等.北京夏季空气质量的气象指数预报[J].应用气象学报,2009,20(6):649-655.
- [5] Zhang X Y, Zhong J T, Wang J Z, et al. The interdecadal worsening of weather conditions affecting aerosol pollution in the Beijing area in relation to climate warming [J]. Atmos Chem Phys, 2018, 18: 5991-5999.
- [6] 蔡子颖,姚青,韩素芹,等.基于多种边界层方案的天津 $PM_{2.5}$ 集合预报试验[J].应用气象学报,2017,28(5):611-620.
- [7] 谈建国,邵德民,黄家鑫,等.上海城市空气质量预报(日报)业务系统探讨[J].气象,2001,27(6):33-36.
- [8] 周广强,谢英,吴剑斌,等.基于 WRF-Chem 模式的华东区域 $PM_{2.5}$ 预报及偏差原因[J].中国环境科学,2016,36(8):2251-2259.
- [9] 吴兑,邓雪娇,林爱兰,等.广东省空气质量预报系统[J].气象科技,2003,31(6):351-355.
- [10] 邓雪娇,邓涛,吴兑,等.珠江三角洲空气质量与能见度数值预报模式系统[J].广东气象,2010,32(4):18-22.
- [11] 邓涛,邓雪娇,吴兑,等.珠三角灰霾数值预报模式与业务运行评估[J].气象科技进展,2012,2(6):38-44.
- [12] 邓雪娇,邓涛,麦博儒,等.华南区域大气成分业务数值预报 GRACEs 模式系统[J].热带气象学报,2016,32(6):900-907.

- [13] 胡春梅,刘德,陈道劲.重庆市空气污染扩散气象条件指标研究[J].气象科技,2009,37(6):665-669.
- [14] 黄少妮,孟金平,杜莉丽,等.陕西关中两次霾重污染过程气象条件分析[J].气象科技,2019,47(5):809-817.
- [15] 潘玮,左志燕,肖栋,等.近 50 年中国霾年代际特征及气象成因[J].应用气象学报,2017,28(3):257-269.
- [16] 严中伟,裴琳,周天军,等.2017 年冬季北京霾日极少的大尺度气候和环流背景:兼论“霾气候”预测研究[J].气象学报,2018,76(5):816-823.
- [17] Wu P, Ding Y H, Liu Y J. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Adv Atmos Sci, 2017, 34(4): 429-440.
- [18] 王莉莉,王跃思,王迎红,等.北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响[J].中国环境科学,2010,30(7):924-930.
- [19] 白永清,祁海霞,赵天良,等.湖北 2015 年冬季 PM_{2.5} 重污染过程的气象输送条件及日变化特征分析[J].气象学报,2018,76(5):803-815.
- [20] Seo J H, Park D R, Kim J Y, et al. Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999-2016) in Seoul, South Korea [J]. Atmos Chem Phys, 2018, 18: 16121-16137.

Forecast Method of Meteorological Conditions of Air Pollution in Chongqing Based on IBAM Index

HU Chunmei¹ CHEN Daojin¹ ZHOU Guobing¹ WANG Shigong²

(1 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147;

2 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

Abstract: A new technique for forecasting meteorological conditions of air pollution is developed by the analysis based on Air Quality Index (AQI) of PM_{2.5} from 2013 to 2016. According to the correlation analysis between AQI and meteorological factors, the IBAM (Index Between Air pollution and Meteorology) is built by four factors (specific humidity, surface wind velocity, surface pressure change in 24 hours, and the difference of total temperature between two levels in the lower troposphere) from 2013 to 2016 in Chongqing. Then the past IBAM is attained by use of the EC numerical forecast products from 1 April 2013 to 31 December 2016, and the prediction model of meteorological conditions is established by introducing the concepts of extreme weather events and K-means cluster analysis. The fitting curve equation between IBAM and AQI of 1-day lagging can be used to calculate the forecast value of AQI; then according to the ranking standards of air quality, the forecasting accuracy of air pollution grades in 72-h prediction reaches about 70% by a test with the samples of nearly two years (from 1 January 2017 to 1 September 2018). Through the error analysis of two air pollution events, the results show that the prediction of air pollution grades is relatively well when the meteorological condition is the major factor impacting the spread of the pollutants in atmosphere or the change of air pollution sources is not obvious (local accumulation as main air pollution mode). However, the prediction errors increase evidently when the change of air pollution sources is relatively remarkable because of upstream transportation. This forecast technique is applied in the real-time prediction services in the Chongqing Meteorological Observatory, which has important reference value for preventing heavy air pollution events and improving air quality in Chongqing.

Keywords: IBAM Index; potential prediction; air pollution