

张浩,石春娥,杨元建,2019. 基于东亚冬季风指数的安徽省冬季霾预测研究[J]. 气象,45(3):407-414. Zhang H, Shi C E, Yang Y J, 2019. Prediction of winter haze days in Anhui Province based on East Asian winter monsoon index[J]. Meteor Mon, 45(3): 407-414(in Chinese).

基于东亚冬季风指数的安徽省冬季霾预测研究^{*}

张 浩^{1,2} 石春娥^{1,2} 杨元建³

1 安徽省气象科学研究所/安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥 230031

2 寿县国家气候观象台/中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地,寿县 232200

3 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044

提 要: 东亚冬季风强度与中国中东部冬季霾日数的变化在年际尺度上密切相关,这为霾的短期气候预测提供了可能的物理因子。利用 NCEP/NCAR 再分析资料和安徽省 1980—2016 年气象观测数据,采用统计分析方法研究安徽省 1 月霾日数与同期不同东亚季风指数的关系,确定了安徽省不同区域冬季霾的主要季风指数预测因子,建立安徽省冬季霾的月尺度预测模型,并进行了验证。结果表明:(1)1 月气候霾日数与 6 类东亚冬季风指数均呈反相关关系,其中淮河以北、江淮之间两个区东亚大槽强度指数与气候霾日数的相关系数在各项指数中最高,沿江江南为西伯利亚高压强度指数与气候霾日数的相关系数在各项指数中最高。(2)不同分区建立的 1 月气候霾日数的预测模型均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检,验证结果表明,霾日数预测等级与实况等级基本一致,各区均未出现预测错误的情况,表明模型具有较好的预测表现。(3)在安徽省冬季霾实际预测业务中,相比 NCEP CFS2 模式输出的环流预报场,ECMWF SYSTEM4 模式输出环流预报场的预测效果更好。

关键词: 冬季霾,东亚冬季风,相关关系,预测模型,安徽

中图分类号: P456,P427

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.010

Prediction of Winter Haze Days in Anhui Province Based on East Asian Winter Monsoon Index

ZHANG Hao^{1,2} SHI Chune^{1,2} YANG Yuanjian³

1 Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing of Anhui Province/Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031

2 Shouxian National Climatology Observatory/Huaihe River Basin Typical Agro-Ecosystems Meteorology Field Experiment Station of CMA, Shouxian 232200

3 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Interannual variation in the intensity of the East Asian winter monsoon (EAWM) is closely related to that in winter haze days in the middle and eastern China, providing a possible physical factor for short-term climate prediction of haze days. Using the NCEP/NCAR reanalysis data and the meteorological observation data of Anhui Province from 1980 to 2016, the statistical analysis method is used to study the relationship between the number of haze days in Anhui Province and six different EAWM indices (EAWMI) in January, and the main EAWMI for winter haze days in different regions of Anhui Province are extracted, and then the monthly predictive model of winter haze days in Anhui Province is established and verified. The results show that: (1) The number of climatic haze days in January is negatively related to

^{*} 安徽省自然科学基金(1608085MD84)、国家自然科学基金项目(41601550)、安徽省气象科技发展基金(KM201714)及安徽省重点研究和开发计划(1804a0802215)共同资助

2018 年 5 月 28 日收稿; 2018 年 10 月 23 日收修定稿

第一作者:张浩,主要从事大气环境和大气成分变化研究. Email:hero-1225@163.com

the six EAWMI. For both the northern part of the Huaihe River and regions between the Yangtze River and the Huaihe River, the correlation coefficient between the East Asia large trough intensity index and the number of climatic haze days is the highest. For along and to the south of the Yangtze River, the correlation coefficient between the Siberia high-intensity index and the number of climatic haze days is the highest. (2) The prediction models for the number of haze days are established in three different regions, and all of them have passed the significance test with $\alpha=0.01$ level. The verification results show that the predicted haze days are very similar with actual situations, and no predictive errors appear in three regions, which indicates that all the prediction models present a good predictive performance. (3) In the predictive work on winter haze days in Anhui Province, it is better to use the output by the ECMWF SYSTEM4 model than that by NCEP CFS2.

Key words: winter haze days, East Asian winter monsoon, correlation, prediction model, Anhui

引 言

近年来,随着我国经济的快速发展、城市化进程的加快,以及能源和交通规模的加大,大气污染日益严重,各地霾天气频发、重发,特别是 20 世纪 80 年代以来霾日增多趋势明显(高歌,2008;吴兑等,2010;符传博和丹利,2014)。以往研究表明,快速的经济发展和城市化进程所导致的污染物排放是霾日增多的主要原因,且明显受局地的风、相对湿度、层结稳定度等气象条件的影响(童尧青等,2007;张浩等,2010;丁一汇和柳艳菊,2014;齐冰等,2012),气象条件的不同使得大气对污染物的扩散稀释能力出现较大的差异。

近年来,研究发现不利的气候条件和气候变异对霾天气的发生有着非常重要的影响,有研究证实东亚冬季风的年代际减弱所引起的大尺度环流场异常是霾日增多的主要原因之一(张人禾等,2014;尹志聪等,2015;吴萍等,2016;张蓬勃等,2015;石春娥等,2016),如 2013 年 1 月东亚冬季风偏弱抑制了对流的发展,造成地面风速减弱,不利于近地面污染物输送和扩散,导致中国东部地区发生持续性的强雾、霾天气(张人禾等,2014)。尹志聪等(2015)研究指出东亚冬季风减弱使得环流形势在水平方向和垂直方向上都不利于污染物的扩散,从而有利于华北黄淮地区冬季霾的发生。吴萍等(2016)研究表明,东亚冬季风的强弱直接影响地面风速的大小,东亚冬季风减弱使得中国中东部地区强风日数减少,弱风日数增加,进而导致冬季霾日数增加。吴兑等(2008)分析发现,纬向环流显著与否与珠江三角洲霾天气的发生频率关系密切,纬向环流显著的年份,污染物易于堆积,有利于霾天气形成。

综上所述,东亚冬季风的年际、年代际变化对中国区域霾日的变化产生了重要影响,但由于地形地貌、污染源排放、气候背景条件具有明显的区域性差异,不同地区霾的形成及变化原因也不尽相同。因此,需要针对不同地区霾的发生情况与气候因子的关系开展研究,进而对霾天气的变化趋势进行预测,以便采取适当的措施应对可能出现的污染天气。安徽省位于中国东部,属于泛长三角地区,随着城市化进程加快,并受周边大气污染输送的影响,20 世纪 80 年代以后霾天气迅速增多(石春娥等,2016;邓学良等,2015),而目前对安徽霾天气与气候条件关系的研究还不多见。本文利用 1980—2016 年安徽气象观测数据和 NCEP/NCAR 再分析资料分析安徽 1 月霾与 6 类东亚冬季风指数的关系,寻找影响霾天气的关键气候因子,建立霾的月尺度预测模型,开展霾短期气候预测业务,为政府相关部门应对可能出现的重污染天气过程提供技术支撑。

1 资料与方法

1.1 资料来源及处理

1.1.1 气象观测数据

研究所用气象观测数据来自安徽省气象信息中心的 80 个国家气象站 1980—2016 年的能见度、相对湿度、降水、天气现象等常规观测要素,其中能见度数据在 2013 年以前全为人工观测,2013 年 4 月开始陆续采用仪器观测,2016 年 1 月开始全部采用仪器观测。综合考虑数据完整性和测站搬迁少的原则,确定 46 个站点进行研究,同时考虑到气候差异(石春娥等,2018),将安徽分为淮河以北、江淮之间、沿江江南 3 个区域,其中淮河以北 16 站,江淮之间 15

站,沿江江南15站,站点位置和分区情况见图1。

由于观测原理不同,目测与器测能见度存在明显偏差,为了保证能见度数据的一致性,本文按照樊高峰等(2017)提出的方法[式(1)],把所有器测能见度转换为目测能见度。

$$\frac{VIS_{器测}}{VIS_{目测}} \approx 0.766 \quad (1)$$

式中, $VIS_{目测}$ 和 $VIS_{器测}$ 分别表示目测能见度和器测能见度(单位:km)。

目前对于霾日的定义仍没有统一标准(石春娥等,2017),本文应用目前广泛使用的日均值法(吴兑等,2014)重建安徽霾日(即排除其他有视程障碍的天气现象后,日均能见度低于10 km,日均相对湿度低于90%记为一个霾日),进一步得到不同区域的平均霾日数。

1.1.2 再分析资料

NCEP/NCAR资料来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA),包括1980年以来的逐月平均高度场、海平面气压差、风场等再分析资料,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直17层。

利用NCEP/NCAR再分析资料计算了东亚大槽强度指数(孙柏民和李崇银,1997)、西伯利亚高压强度指数(郭其蕴,1994;龚道溢等,2002)、500 hPa纬向风切变强度指数(Ting et al, 1996; 郭其蕴, 1983)、海平面海陆气压差强度指数(郭其蕴, 1983; 徐建军等, 1999)、850 hPa经向风强度指数(Yang et al, 2002)、东亚急流经向切变强度指数(Yang et al, 2002; Lau et al, 1988)6类反映东亚冬季风强

弱的指数。其中东亚大槽强度指数(East Asian trough, EAT)利用($25^{\circ} \sim 45^{\circ}N, 110^{\circ} \sim 145^{\circ}E$)区域内500 hPa高度场的平均值乘以-1表示(贺圣平和王会军, 2012)。西伯利亚高压强度指数(Siberian high, SH)利用($40^{\circ} \sim 60^{\circ}N, 80^{\circ} \sim 120^{\circ}E$)区域内平均海平面气压值表示西伯利亚高压强度指数表示(刘实等, 2012)。500 hPa纬向风(u_{500})切变强度指数利用500 hPa高度中低纬和中高纬两个区域纬向风切变表示(朱艳峰, 2008)。海平面海陆气压差(difference of sea level pressure between land and sea, PLS)强度指数利用 $10^{\circ} \sim 50^{\circ}N$ 范围内海平面气压差之和表示(刘实等, 2012)。850 hPa经向风(v_{850})强度指数利用($30^{\circ} \sim 60^{\circ}N, 105^{\circ} \sim 150^{\circ}E$)区域内850 hPa经向风的平均值乘以-1表示(贺圣平和王会军, 2012)。东亚急流(East Asian jet stream, EAJ)经向切变强度指数利用($25^{\circ} \sim 40^{\circ}N, 80^{\circ} \sim 180^{\circ}E$)、($45^{\circ} \sim 60^{\circ}N, 60^{\circ} \sim 160^{\circ}E$)两个区域300 hPa纬向风的差值表示(贺圣平和王会军, 2012)。

1.1.3 大气环流预测场

大气环流预测场为国家气候中心MODES系统下发的两种模式输出场,包括美国国家环境预报中心(NCEP)的CFS2模式和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的SYSTEM4模式,处理后得到月平均的环流预测场,每月下旬滚动预报。其中,NCEP CFS2的起始年份为1982年,预报时效为10个月,ECMWF SYSTEM4起始年份为1981年,预报时效为7个月。两种模式的水平分辨率均为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,预报要素均包括:500、200 hPa高度场,200、850、925 hPa水平风场,以及海平面气压场。

1.2 研究方法

1.2.1 霾日数去趋势化

霾天气的变化受污染物排放和气象条件的共同影响,分析表明,随着社会经济快速发展和城市化进程加快,安徽各区域冬季霾日数均呈上升趋势,而波动变化主要受气候条件变化的影响。因此本文引用气象产量的做法(张浩等, 2015),引入气候霾日数,由趋势霾日数和实际霾日数的差值表示,即对霾日数进行去趋势化处理,反映了由于气候条件变化导致的霾日数变化,其中趋势霾日数采用线性、曲线和滑动平均等多种模拟方法进行分段模拟,并对模拟的合理性进行峰度和偏度检验。本文利用1月气候

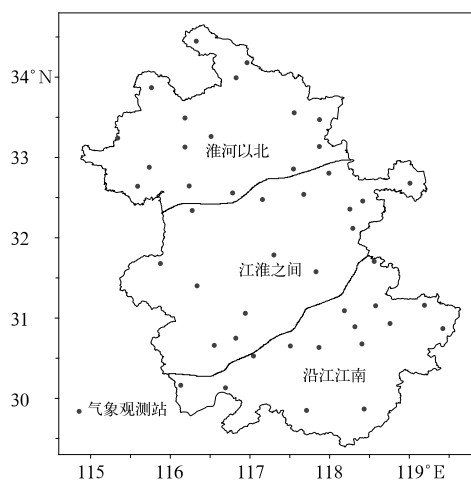


图1 气象观测站分布及分区

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations and division

霾日数与大气环流指数进行相关性分析,在此基础上建立气候霾日数的预测模型。

1.2.2 标准化处理

为了消除不同物理量纲的影响,对东亚冬季风指数作标准化处理,计算公式为:

$$I_i = \frac{A_i - \bar{A}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}} \quad (2)$$

式中, I_i 为第 i 年某一要素的标准化值, n 为样本长度, A_i 为第 i 年某一要素值, \bar{A} 为某要素的气候平均值,统一为 1981—2010 年的 30 年平均。

1.2.3 建模方法和验证

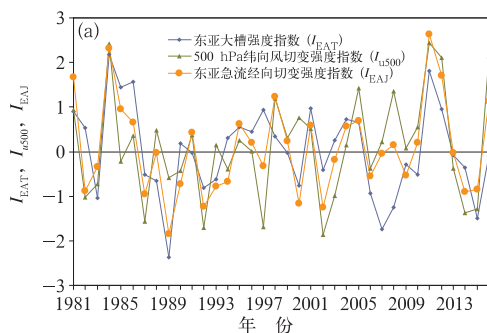
(1) 建模方法。通过各区气候霾日数与东亚冬季风指数的相关性分析,确定预测因子,利用 SPSS 统计软件建立 1 月气候霾日数的预测模型。为了对预测模型进行验证,从 1981—2016 年中每 5 年选取 1 年作为验证样本,即 1985、1990、1995、2000、2005、2010、2015 年共 7 年,其他 29 年作为建模样本。

(2) 验证方法。将霾日数标准化值 (I) 进行分级检验,按照 $I \geq 2$ (明显偏多)、 $1 < I < 2$ (偏多)、 $-1 \leq I \leq 1$ (正常)、 $-2 < I < -1$ (偏少)、 $I \leq -2$ (明显偏少) 分为五个等级。如果预测等级与实况等级相同,则为正确;预测等级与实况等级相差一个等级,为基本正确;预测等级与实况等级相差两个等级及以上,为错误。

2 结果分析

2.1 安徽省不同区域气候霾日变化特征

图 2 为安徽 3 个区域 1981—2016 年 1 月气候



霾日数的年变化。可以看出,安徽 1 月气候霾日数呈波动变化,以淮河以北为例,在 1990、1992、2006、2007、2013 年气候霾日数明显偏多,而在 1984、1986、2005、2009、2011 年气候霾日数明显偏少,江淮之间和沿江江南气候霾日数异常年份与淮河以北基本一致。

2.2 东亚冬季风指数与霾日数的相关性分析

图 3 为 6 类东亚冬季风指数的年变化。可以看出,1 月的 6 类东亚冬季风指数同样呈波动变化,对比安徽 1 月气候霾日数年变化发现,东亚冬季风指数与气候霾日数呈反对应关系,即在东亚冬季风偏弱的年份,来自北方的冷空气减弱,近地面风速减弱,不利于污染物的扩散,导致霾日数偏多,反之亦然。从东亚大槽强度指数 (I_{EAT}) 来看,1984、1986、2001、2005、2011 年 I_{EAT} 偏强年份,相对应气候霾日数偏少;相反,在 1983、1989、1992、2007 年 I_{EAT} 强度偏弱年,气候霾日数偏多。

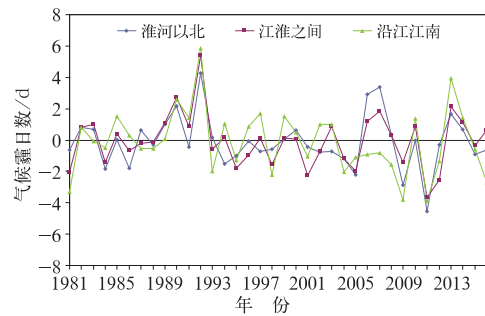


图 2 1981—2016 年安徽各区域 1 月平均气候霾日数年变化

Fig. 2 Variation of annual climatic haze days averaged over different regions in Anhui in January during 1981—2016

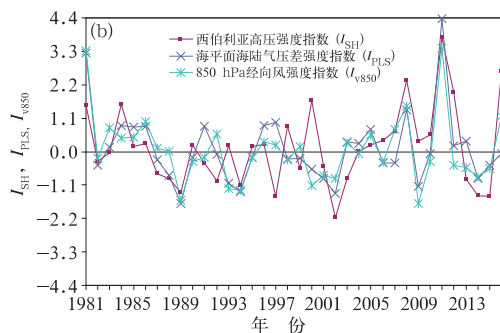


图 3 1981—2016 年 1 月东亚季风指数年变化

Fig. 3 Variation of annual East Asian monsoon in January during 1981—2016

进一步分析了各区域 1 月气候霾日数与东亚冬季风指数的相关性(表 1),可以看出,不同区域 1 月气候霾日数与不同东亚冬季风指数之间相关性有所不同,淮河以北, I_{EAT} 、东亚急流经向切变强度指数 (I_{EAJ}),以及 500 hPa 纬向风切变强度指数 (I_{u500})与气候霾日数相关性较高,分别为 -0.574 、 -0.531 、 -0.445 ,均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,相比较而言, I_{EAT} 与气候霾日数相关性最高;海平面海陆气压差强度指数 (I_{PLS})与气候霾日数关系系数也通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。江淮之间,同样是 I_{EAT} 、 I_{EAJ} 和 I_{u500} 与气候霾日数相关性较高,分别为 -0.533 、 -0.512 、 -0.503 ,均通过 $\alpha=0.01$ 的显著

性水平检验,相比较而言, I_{EAT} 与气候霾日数相关性最高;西伯利亚高压强度指数 (I_{SH})、 I_{PLS} 与气候霾日数关系系数也通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。沿江江南, I_{SH} 、 I_{u500} 、 I_{EAJ} 与气候霾日数相关性较高,均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,相比较而言, I_{SH} 与气候霾日数相关性最高。同时分析了单站霾日数与东亚冬季风指数的相关关系,发现有个别站点拟合效果好于区域平均,考虑到实际业务中要对全省霾的发生趋势进行预测,因此,本文采用分区进行拟合。最终确定淮河以北、江淮之间、沿江江南分别用 I_{EAT} 、 I_{EAT} 、 I_{SH} 建立 1 月霾日数预测模型。

表 1 1981—2016 年安徽各区域 1 月气候霾日数与东亚季风指数的相关性分析
Table 1 Correlation analysis between climatic haze days and East Asian monsoon index in Anhui in January during 1981—2016

	I_{EAT}	I_{SH}	I_{u500}	I_{PLS}	I_{u850}	I_{EAJ}
淮河以北	-0.574^{**}	-0.281	-0.445^{**}	-0.370^*	-0.199	-0.531^{**}
江淮之间	-0.533^{**}	-0.397^*	-0.503^{**}	-0.347^*	-0.202	-0.512^{**}
沿江江南	-0.139	-0.576^{**}	-0.530^{**}	-0.252	-0.269	-0.469^{**}

注: **、* 表示通过 $\alpha=0.01$ 、 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验。

Note: ** and * denote passing $\alpha=0.01$, $\alpha=0.05$ significant level tests, respectively.

另外对 12、2 月气候霾日数与东亚冬季风指数的相关关系也进行了分析(表略),结果与 1 月类似,各区气候霾日数与东亚冬季风指数均呈负相关关系。其中 12 月三个区都是 I_{EAT} 与气候霾日数相关性最高;2 月淮河以北、江淮之间为 I_{u500} 与气候霾日数相关性最高,沿江江南为 I_{SH} 与气候霾日数相关性最高。

2.3 预测模型建立和检验

2.3.1 预测模型建立

根据上述分析确定的气候霾日数预测模型的预测因子,建立各个区 1 月气候霾日数的预测模型(表 2)。显著性水平检验表明,各区月气候霾日数模型的相关系数大于 0.6,均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,显著性水平检验的 P 值都小于 0.001,

说明模型整体的合理性和各个因子对霾日数影响的显著性。

2.3.2 预测检验

利用以上模型对检验样本进行预测检验,并与实况值进行了对比。首先利用预测模型得到气候霾日数,然后与趋势霾日数累加得到预测霾日数,再对预测霾日数和实际霾日数进行标准化处理。表 3 为各区 1 月的霾日数预测检验结果,可见,各区霾日数预测等级与实况等级基本一致,3 个区均未出现预测错误的情况,淮河以北、江淮之间 7 年中均有 5 年为预测正确,2 年为基本正确,沿江江南 7 年中有 4 年为预测正确,3 年为基本正确,表明模型具有较好的预测表现。

2.4 预测模型的应用

由于在实际的霾天气月尺度预测业务中,需要用到大气环流的预测场,而模式输出的大气环流预测场与 NCEP 资料具有一定的差异。因此,首先利用 1982—2016 年的 NCEP CFS2 和 ECMWF SYSTEM4 模式环流预报场和同期的 NCEP 再分析资料,分别计算得到相应的东亚冬季风指数,分析两种模式的输出结果与 NCEP 资料的拟合效果,以确定

表 2 安徽各区域 1 月气候霾日数的预测模型
Table 2 Prediction model of climatic haze days in Anhui in January

回归模型	相关系数 (R)	显著性水平 (P)
淮河以北 $I = -0.066 - 1.122I_{EAT}$	0.657	<0.001
江淮之间 $I = -0.033 - 1.027I_{EAT}$	0.612	<0.001
沿江江南 $I = -0.105 - 1.050I_{SH}$	0.670	<0.001

表 3 安徽各区域 1 月霾日数预测检验

Table 3 Verification of haze days prediction in Anhui Province in January

年份	淮河以北			江淮之间			沿江江南		
	实况等级	预测等级	预测结果	实况等级	预测等级	预测结果	实况等级	预测等级	预测结果
1985	正常	偏少	基本正确	正常	偏少	基本正确	正常	正常	正确
1990	偏多	正常	基本正确	偏多	正常	基本正确	偏多	正常	基本正确
1995	正常	正常	正确	正常	正常	正确	正常	正常	正确
2000	正常	正常	正确	正常	正常	正确	正常	正常	正确
2005	正常	正常	正确	正常	正常	正确	正常	正常	正确
2010	正常	正常	正确	偏多	偏多	正确	偏多	正常	基本正确
2015	明显偏多	明显偏多	正确	明显偏多	明显偏多	正确	偏多	明显偏多	基本正确

采取哪种模式的环流预测场。在此基础上求取模式环流向 NCEP 环流的一元回归,然后将拟合结果进行标准化处理后带入预测模型,得到霾日数预测结果。实际业务中,预测 1 月则采用上一年 12 月的模式输出结果。

1 月沿淮淮北和江淮之间的气候霾日数预测模型所需要的东亚冬季风指数为 I_{EAT} ,沿江江南为 I_{SH} 。因此,分别分析两种东亚冬季风指数的拟合效果(表 4),可以看出,利用 ECMWF SYSTEM4 模式输出结果与 NCEP 再分析资料得到的两种东亚冬季风指数相关性明显好于 NCEP CFS2 模式,相关性均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验,因此 1 月霾日数预测中利用 ECMWF SYSTEM4 模式输出结果进行拟合。

表 4 1 月 I_{EAT} 、 I_{SH} 指数相关性分析Table 4 Correlation analysis between I_{EAT} and I_{SH} in January

	NCEP CFS2	ECMWF SYSTEM4
I_{EAT}	0.196	0.585
I_{SH}	0.227	0.516

利用分区霾天气月尺度预测模型和 ECMWF SYSTEM4 模式输出结果,预测了 2018 年 1 月安徽省霾天气发生趋势(表 5),结果应用于安徽省环境气象业务,提高了环境气象业务服务能力和技术水平。从预报结果看,淮河以北 1 月霾日数预测等级与实况等级相同,均为较常年明显偏多,江淮之间和沿江江南预测等级与实测等级相差一个等级,预测结果基本一致。

表 5 2018 年 1 月安徽霾日数预测结果

Table 5 Haze days prediction in Anhui in January 2018

	淮河以北	江淮之间	沿江江南
实况等级	明显偏多	明显偏多	偏多
预测等级	明显偏多	偏多	正常

3 结论与讨论

(1) 1 月安徽气候霾日数与 6 类东亚冬季风指数均呈反相关关系,其中淮河以北、江淮之间两个区东亚大槽强度指数与气候霾日数的相关系数在各项指数中最高,沿江江南为西伯利亚高压强度指数与气候霾日数的相关系数在各项指数中最高。

(2) 建立了各个区 1 月气候霾日数的预测模型,模型均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验;验证结果表明,各区霾日数预测等级与实况等级基本一致,均未出现预测错误的情况,表明各月的模型均具有较好的预测表现。

(3) 对 NCEP CFS2 和 ECMWF SYSTEM4 模式环流预测场进行了检验,结果表明,1 月 ECMWF SYSTEM4 模式输出与 NCEP 再分析资料的拟合效果较好;预测模型应用于安徽省环境气象业务服务中,取得较好效果。

由于霾天气受污染物排放和气象条件的共同影响,预测难度较大,且大气运动复杂多变,导致预测的不确定性增加。另外,对霾日数的预测受制于模式预报结果,模式本身存在误差,一定程度上影响了预测的准确性。在以后的研究中,将进一步分析影响霾的关键气象因子,以提高预测的准确性,同时加大对霾天气过程预测的研究,提高业务服务的客观化和定量化水平,使预测结果更具有针对性。

参考文献

- 邓学良,石春娥,姚晨,等,2015. 安徽霾日重建和时空特征分析[J]. 高原气象, 34(4): 1158-1166. Deng X L, Shi C E, Yao C, et al, 2015. Research of hazes reconstruction and their features in Anhui Province[J]. Plateau Meteor, 34(4): 1158-1166 (in Chinese).
- 丁一汇,柳艳菊,2014. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大

- 气湿度的关系[J]. 中国科学:地球科学, 44(1):37-48. Ding Y H, Liu Y J, 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity[J]. *Sci China: Earth Sci*, 44(1):37-48 (in Chinese).
- 樊高峰,任律,毛裕定,2017. 基于人工与自动观测对比分析的霾日重建[J]. 中国环境科学, 37(4):1254-1261. Fan G F, Ren L, Mao Y D, 2017. Reconstruction of haze day database based on the comparison between manual and automatic observations[J]. *China Environ Sci*, 37(4):1254-1261 (in Chinese).
- 符传博,丹利,2014. 重污染下我国中东部地区 1960~2010 年霾日数的时空变化特征[J]. 气候与环境研究, 19(2):219-226. Fu C B, Dan L, 2014. Spatiotemporal characteristics of haze days under heavy pollution over central and eastern China during 1960—2010[J]. *Clima Environ Res*, 19(2):219-226 (in Chinese).
- 高歌,2008. 1961—2005 年中国霾日气候特征及变化分析[J]. 地理学报, 63(7):761-768. Gao G., 2008. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961—2005[J]. *Acta Geographica Sin*, 63(7):761-768 (in Chinese).
- 龚道溢,朱锦红,王绍武,2002. 西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析[J]. 高原气象, 21(1):8-14. Gong D Y, Zhu J H, Wang S W, 2002. The influence of Siberian high on large-scale climate over continental Asia[J]. *Plateau Meteor*, 21(1):8-14 (in Chinese).
- 郭其蕴,1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析[J]. 地理学报, 38(3):207-217. Guo Q Y, 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation[J]. *Acta Geographica Sin*, 38(3):207-217 (in Chinese).
- 郭其蕴,1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系[J]. 应用气象学报, 5(2):218-225. Guo Q Y, 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies China[J]. *J Appl Meteor Sci*, 5(2):218-225 (in Chinese).
- 贺圣平,王会军,2012. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征[J]. 大气科学, 36(3):523-538. He S P, Wang H J, 2012. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(3):523-538 (in Chinese).
- 刘实,朱艳峰,孙力,等,2012. 东亚冬季风指数:QX/T 144—2011 [S]. 北京:气象出版社:9. Liu S, Zhu Y F, Sun L, et al, 2012. Index of East Asia Winter Monsoon: QX/T 144—2011 [S]. Beijing: China Meteorological Press:9 (in Chinese).
- 齐冰,刘寿东,杜荣光,等,2012. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析[J]. 气象, 38(10):1225-1231. Qi B, Liu S D, Du R G, et al, 2012. The characteristic analysis of climatic and environmental factors on the haze weather in Hangzhou[J]. *Meteor Mon*, 38(10):1225-1231 (in Chinese).
- 石春娥,王喜全,李元妮,等,2016. 1980~2013 年安徽霾天气变化趋势及可能成因[J]. 大气科学, 40(2):357-370. Shi C E, Wang X Q, Li Y N, et al, 2016. The trend of haze in Anhui Province from 1980 to 2013 and the possible reasons[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(2):357-370 (in Chinese).
- 石春娥,张浩,马井会,等,2017. 基于器测能见度的霾天气判断标准的探讨[J]. 高原气象, 36(6):1693-1702. Shi C E, Zhang H, Ma J H, et al, 2017. Investigation on norm of haze identification based on hourly auto-monitored visibility[J]. *Plateau Meteor*, 36(6):1693-1702 (in Chinese).
- 石春娥,张浩,杨元建,等,2018. 安徽省持续性区域霾污染的时空分布特征[J]. 中国环境科学, 38(4):1231-1242. Shi C E, Zhang H, Yang Y J, et al, 2018. The trend of persistent regional haze in Anhui Province and corresponding characteristics of aerosol pollution[J]. *China Environ Sci*, 38(4):1231-1242 (in Chinese).
- 孙柏民,李崇银,1997. 冬季东亚大槽的扰动与热带对流活动的关系[J]. 科学通报, 42(5):500-504. Sun B M, Li C Y, 1997. Relationship between disturbance of East Asian trough and tropical convection activities[J]. *Chin Sci Bull*, 42(5):500-504 (in Chinese).
- 童尧青,银燕,钱凌,等,2007. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 27(5):584-588. Tong Y Q, Yin Y, Qian L, et al, 2007. Analysis of the characteristics of haze phenomena in Nanjing area[J]. *China Environ Sci*, 27(5):584-588 (in Chinese).
- 吴兑,陈慧忠,吴蒙,等,2014. 三种霾日统计方法的比较分析——以环首都圈京津冀晋为例[J]. 中国环境科学, 34(3):545-554. Wu D, Chen H Z, Wu M, et al, 2014. Comparison of three statistical methods on calculating haze days-taking areas around the capital for example[J]. *China Environ Sci*, 34(3):545-554 (in Chinese).
- 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等,2008. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报, 19(1):1-9. Wu D, Liao G L, Deng X J, et al, 2008. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta[J]. *J Appl Meteor Sci*, 19(1):1-9 (in Chinese).
- 吴兑,吴晓京,李非,等,2010. 1951—2005 年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 68(5):680-688. Wu D, Wu X J, Li F, et al, 2010. Temporal and spatial variation of haze during 1951—2005 in Chinese mainland[J]. *Acta Meteor Sin*, 68(5):680-688 (in Chinese).
- 吴萍,丁一汇,柳艳菊,等,2016. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系[J]. 气象学报, 74(3):352-366. Wu P, Ding Y H, Liu Y J, et al, 2016. Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the wintertime haze frequency over central-eastern China[J]. *Acta Meteor Sin*, 74(3):352-366 (in Chinese).
- 徐建军,朱乾根,周铁汉,1999. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性[J]. 应用气象学报, 10(1):1-8. Xu J J, Zhu Q G, Zhou T H, 1999. Sudden and periodic changes of East Asian winter monsoon in the past century[J]. *J Appl Meteor Sci*, 10(1):1-8 (in Chinese).
- 尹志聪,王会军,袁东敏,2015. 华北黄淮冬季霾年代际增多与东亚冬季风的减弱[J]. 科学通报, 60(15):1395-1400. Yin Z C, Wang H J, Yuan D M, 2015. Interdecadal increase of haze in winter over North China and the Huang-Huai Area and the weakening of the East Asia winter monsoon[J]. *Chin Sci Bull*, 60(15):

- 1395-1400(in Chinese).
- 张浩,马晓群,王晓东,2015.安徽省冬小麦水分盈亏特征及其对产量的影响[J].气象,41(7):899-906. Zhang H, Ma X Q, Wang X D, 2015. Water budget characteristics of winter wheat and its impact on the yield in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 41(7): 899-906(in Chinese).
- 张浩,石春娥,邱明燕,等,2010.合肥市霾天气变化特征及其影响因素[J].环境科学学报,30(4):714-721. Zhang H, Shi C E, Qiu M Y, et al, 2010. Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(4): 714-721(in Chinese).
- 张蓬勃,管兆勇,邵鹏程,等,2015.江苏冬季霾日数的年代际变化与环流异常和区域增暖的可能联系[J].热带气象学报,31(1): 103-111. Zhang P B, Guan Z Y, Shao P C, et al, 2015. Interdecadal changes of wintertime haze days in Jiangsu Province in association with circulation anomalies and regional warming trends [J]. J Trop Meteor, 31(1): 103-111(in Chinese).
- 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. Zhang R H, Li Q, Zhang R N, 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013[J]. Sci China: Earth Sci, 44(1): 27-36(in Chinese).
- 朱艳峰,2008.一个适用于描述中国大陆冬季气温变化的东亚冬季风指数[J].气象学报,66(5):781-788. Zhu Y F, 2008. An index of East Asian winter monsoon applied to description the Chinese mainland winter temperature changes[J]. Acta Meteor Sin, 66(5): 781-788(in Chinese).
- Lau K M, Yang G L, Shen S H, 1988. Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia[J]. Mon Wea Rev, 116(1): 18-37.
- Ting Mingfang, Hoerling M P, Xu Taiyi, et al, 1996. Northern hemisphere teleconnection patterns during extreme phases of the zonal-mean circulation[J]. J Climate, 9(10): 2614-2633.
- Yang Song, Lau K M, Kim K M, 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies [J]. J Climate, 15(3): 306-325.