

近几年我国霾污染实时季节预测概要

尹志聪^{①②*}, 王会军^{①②}, 段明铨^①

① 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/大气科学学院, 江苏 南京 210044;

② 中国科学院 大气物理研究所 竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

* 联系人, E-mail: yinzhc@163.com

2018-12-24 收稿, 2018-12-28 接受

国家自然科学基金资助项目(91744311;41705058)

摘要 近些年,中国东部经历了严重的霾污染,对人体健康、交通安全、生态系统以及社会经济有巨大的危害。在1周以内的霾污染预报之外,季节尺度的霾污染预测可以给减排治污措施的制定提供更长时间尺度的科学支撑。本文以年际增量为预测对象,选取前期外强迫因子为自变量,分别针对京津冀和长三角区域建立逐月的冬季霾日数季节尺度预测模型,并开展了实时的季节预测。总体来看,京津冀和长三角区域预测模型的性能大体处于相似的水平,均方根误差在2 d左右,对距平符号的捕捉率在80%以上,对霾日数变化的长期趋势具有很好的再现能力。在2016/2017年冬季京津冀霾日数实时预测中,模型预测的结果相对于常年值的定性结论全部准确,相对于前一年污染状况的结论大多数准确。在2017/2018年冬季长三角霾日数实时预测中,12月和1月的预测误差较小,2月的预测误差在2 d左右。

关键词
霾;
污染;
气候预测;
减排

2013年1月,中国东部爆发了持续性的重度霾污染,江苏、北京、浙江、安徽和山东的霾日数都出现了52 a来的极值(关月和何立富,2013;韩霄和张美根,2014;靳军莉等,2014;张金良等,2014;王博妮等,2016;郑龙飞等,2016;包云轩等,2018)。在此之后,霾污染作为一种灾害性天气开始引起学者的广泛关注,在霾污染的气候特征和天气成因方面取得了很多研究成果(张小曳等,2013;Zhang et al., 2014;丁一汇和柳艳菊,2014;袁东敏和马小会,2017)。此外,从过去几十年来看,中国东部霾污染的变化是由社会经济发展导致的长期趋势分量和年际-年代际气候变化分量相叠加而形成的(Zhang et al., 2018)。那么,在年际-年代际分量中是什么前期因子来调控霾污染是否频繁出现的呢?这些影响因子是否具有成为季节预测因子的潜力呢?这是一个非常值得关注的、亟待解释的科学问题。

针对2013和2014年华北冬季极端霾事件的综合诊断分析指出海表面温度(Sea Surface Tempera-

ture, SST)、海冰和陆面等外强迫因子能够通过在大气中激发遥相关,例如欧亚遥相关型(EU)、西太平洋遥相关型(WP)和东大西洋/西俄罗斯波列(EA/WR),进而影响局地的大气扩散条件(Yin and Wang, 2017)。年际和年代际尺度上,北大西洋海温与中国东部冬季以及春季霾都存在显著的联系(Xiao et al., 2015; Chen et al., 2018)。在太平洋,前期秋季北太平洋海温与华北冬季霾日数呈显著的负相关,这种负相关在数值模式中也有稳定的体现(Yin and Wang, 2016a)。此外,ENSO(Gao and Li, 2015; Li et al., 2017; Zhao et al., 2018)和PDO(Zhao et al., 2016)等更大尺度的海温信号对中国东部霾也表现出显著的调控作用。在西风带背景下,高原大地形东侧背风坡构成“避风港”效应,也可能是影响中国东部区域霾日的因素之一(徐祥德等, 2015)。近些年,北极区域温度升高和海冰减少趋势都非常明显,对北半球中高纬度的气候有显著的影响,例如近些年频现的冬季强寒潮和降雪都和北

引用格式: 尹志聪,王会军,段明铨,2019.近几年我国霾污染实时季节预测概要[J].大气科学学报,42(1):2-13.

Yin Z C, Wang H J, Duan M K, 2019. Outline of the real-time seasonal haze pollution prediction in China in recent years[J]. Trans Atmos Sci, 42(1):2-13. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181224001. (in Chinese).

极海冰的减少有密切的联系(Liu et al., 2012)。北极海冰的减少显著地加重了中国东部的冬季霾污染,可以解释 45%~67% 的年际-年代际变化方差(Wang et al., 2015a)。有所区别的是,前期秋季波弗特海海冰和东北平原冬季霾日数呈现出显著的正相关关系,它们是之间通过阿拉斯加湾海温和相关的大气环流联系起来的(Yin et al., 2019)。10 月和 11 月,欧亚大陆的雪盖开始逐渐形成。与之相关的地面水分和辐射的变化,以大气波列作为桥梁对 12 月中国北方的霾污染产生显著的影响(Yin et al., 2017)。

大气污染与前期外强迫之间的密切联系为开展典型区域大气污染的季节预测提供了充分的可能性。在众多季节预测的方法中,基于年际增量的预测模型往往具备独特的优势。年际增量的预测方法是 Wang et al. (2000) 基于东亚季风系统区气候的准两年规律性提出的。从该方法建立之后,有了很多应用尝试,也取得了不错的效果(王会军等, 2012; Wang et al., 2015b), 比如曾成功应用于长江中下游夏季降水(Fan et al., 2008)、华北汛期降水(范可等, 2008)、东北夏季气温(Fan and Wang, 2010)、西太平洋台风(Fan and Wang, 2009)和东北冬半年大雪和暴雪日数等(Fan and Tian, 2013)。Huang et al. (2014) 也曾利用年际增量方法有效地改进了 DEMETER 模式对于 APO 的预测; Tian et al. (2018) 则改进了 NCEP CFS 模式对东亚冬季风的预报。实际上,在研究一些受社会经济因素和气候条件共同调控的问题时,使用年际增量的方法可以较好的将缓变的社会经济趋势去除,更集中的反映出气候因素的影响。尹志聪等(2014)曾利用年际增量方法较好地建立了北京香山红叶变色日的预测模型,预测信号被放大了 70% 左右,预测精度明显提高。Zhou and Wang (2014) 也利用年际增量的方法通过海冰成功地预测了东北地区的玉米和水稻产量。那么,将年际增量的预测方法应用到华北和长三角地区的霾污染季节预测,是否能够表现出高效的实时预测能力呢? 本文将首先介绍所研发的霾污染季节预测模型及其性能,然后介绍过去两年在华北和长三角地区开展实时霾污染季节预测的情况。

1 资料与方法

霾污染是典型的学科交叉领域,既可以用能见度和相对湿度来定义,也可以用污染物浓度来确认。在建立短期气候预测模型时,往往需要几十年的数

据作为支撑。因此,本文的霾日数(代表霾污染的基本状态)是采用长序列的气象观测数据,根据气象学定义反算而来(Yin et al., 2017)。在计算时,采用的 1979—2018 年 1 天 4 次的中国东部气象观测数据包括能见度、相对湿度、风、降水和灾害性天气现象等。当 4 个时次的观测数据中,有 1 个时次的能见度低于 10 km (2014 年之后低于 7.5 km),同时相对湿度低于 90%,即认为当天为 1 个霾日。之后,将降水、风吹雪、沙尘等影响能见度的天气现象从霾日数中剔除,得到最后的霾日数。本文所用的外强迫因子数据主要包括美国大气和海洋局提供的 1979—2018 年秋季(9—11 月)逐月的扩展重建海表面温度(Smith et al., 2008),地表气温(Kalnay et al., 1996),土壤湿度(vanden Dool, 2003),南极涛动指数(Mo, 2000),以及哈德莱中心提供的 1979—2018 年的海冰密度数据(Rayner, 2003)。

基于年际增量的短期气候预测方法将年际增量,而不是气候距平值作为预测对象。其中,某年的年际增量被定义为当年的变量值减掉去年的变量值。由于年际增量能够反映气候变量的准两年变化特征,同时能够有效地利用前一年的观测信息,使得气候变量的年际和年代际变化均可以被较好地捕捉(王会军等, 2008, 2012)。同时,年际增量的预测方法使得预测对象信号增强,也就是方差增大(图 1),其预测的准确度理论上也是要高于直接使用气候变量的准确度。

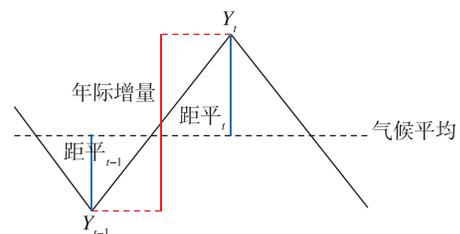


图 1 年际增量方法预测对象的示意图

Fig.1 Schematic diagram of predictand in the interannual increment method

当一个变量(Y),比如霾日数,受社会经济因素和气候条件共同调控时,可以将 Y 分解为缓变的社会经济分量(Y_S)和气候分量(Y_C),也就是 $Y = Y_S + Y_C$ 。那么,该变量的年际增量 $dY = Y_t - Y_{t-1} = (Y_S + Y_C)_t - (Y_S + Y_C)_{t-1} = (Y_S)_t - (Y_S)_{t-1} + (Y_C)_t - (Y_C)_{t-1}$ 。通常来讲,当年和前一年的污染排放是相近的,由其引起的霾分量的变化是很小的,也就是说 $(Y_S)_t - (Y_S)_{t-1} \approx 0$,进而可以得到 $dY \approx (Y_C)_t - (Y_C)_{t-1}$ 。则可

以认为,霾日数的年际增量可以更强地反映出受气候条件影响的霾变化的波动。将年际增量预测值累加到前一年的观测值之后,又能再现年代际趋势,同时将社会经济分量引入。

在建立预测模型时,采用的方法主要是多元线性回归和广义相加模型。其中,广义相加模型是广义线性模型的半参数扩展,其假设函数是相加的,函数的组成成分是光滑函数(Chiang, 2007)。广义相加模型通过联结函数,建立因变量的数学期望与自变量的光滑函数的关系,在解决因变量与自变量间的高度非线性和非单调关系方面有较大的优势。

2 华北区域霾污染预测模型

2.1 华北冬季霾日数预测

人类活动是霾日数快速增加的物质基础,而有利的大气环流则为霾天气的发生构造了至关重要的背景环境。前期有效的外强迫因子能够通过影响大气环流和局地气象条件来影响霾天气的发生。前期秋季日本海到外兴安岭的地表气温负年际增量(x_1)在大气中激发出类似EU波列负位相和WP波列正位相,进而加强华北上空的反气旋性异常导致华北冬季霾污染加重。前期秋季的海温异常,通过使东亚急流北移(阿拉斯加湾附近SST正年际增量, x_2)或削弱东亚冬季风环流(格陵兰岛以南SST负年际增量, x_3),使得华北地区出现异常南风,局地的风速降低,湿度增加。这种静稳型气象条件为霾的吸湿增长提供了有利的环境,使得霾天气易发,频发(Yin and Wang, 2016a)。而前期秋季波弗特海域的海冰正异常(x_4),通过辐射冷却作用,在波弗特海两侧激发出正反气旋,使得波弗特海和阿拉斯加湾的地面风速降低,引起次月洋面温度升高。这种暖洋面通过加热大气,在对流层中高层形成了有利于霾天气发生的大气环流(Yin et al., 2019)。此外,前期夏季蒙古东部土壤湿度(x_5)、前期秋季环渤海地区土壤湿度(x_6),以及9—10月南极涛动(x_7)也可以通过大气遥相关作为桥梁影响到华北上空的反气旋,进而调控华北本地的垂直和水平扩散条件(Yin and Wang, 2016b)。上述7个前期影响因子和华北冬季霾日数年际增量之间的线性相关系数分别为-0.47、0.47、-0.50、0.37、-0.59、0.41、-0.54(图2),均通过95%的置信度检验。

Yin and Wang(2016b)选用上述7个前期的因子(年际增量),采用多元线性回归的方法建立了华北冬季霾日数的预测模型,不仅能够再现霾日数的

长期趋势、拐点、极值,在预报值上也有很好的精确度(图3)。针对1979—2013年的霾日数年际增量的预测,进行“去一法”交叉验证,均方根误差为3.3 d,相关系数为0.73,可以解释总方差的53%。两个独立预测年份,也就是2014和2015年的预报误差分别为0.09和-3.3 d。将前一年的观测值累加到预报的年际增量上,可以得到预测的当年霾日数。比如,将预测的2012年霾日数年际增量叠加到观测的2011年冬季霾日数上,结果就是预测的2012年霾日数。从图3可以发现,原始(去趋势)预测值和观测值的相关系数是0.89(0.87)能够很好地再现长期趋势、年际-年代际分量,并且对极值也有很好的把握能力。此外,模型对距平的同号率反映是成功的,可以达到100%。

由图2可以发现,虽然各预测因子和因变量之间以显著的线性关系为主,但依然有非线性关系存在。因此,进一步采用能够涵盖非线性关系的广义相加模型建立了预测模型。当采用非线性的方法时,建立预测模型所需要的预测因子减少为2个(x_2 :阿拉斯加海湾的海表面温度, x_4 :波弗特海海域的海冰面积),但预测精度却没有下降(Yin and Wang, 2017)。预测的年际增量的均方根误差为3.01 d。除了年际变化之外,该模型还能很好地捕获对流层准两年振荡特征和2010年以来急剧增加的趋势,并对冬季霾日数的长期趋势和转折点能很好地模拟,同号率高达91.7%(图4)。而2014年和2015年的独立样本实验结果显示,预测偏差分别为0.86和0.19 d。为了获得更多的独立预测实验样本,设计了循环独立样本实验。在不同的截止年份下,广义相加模型是由1980至该年的数据训练得到,之后到2015年的数据均用作独立样本实验。在循环的2005—2015年实时预测中,2015年的霾日数被独立预测了11次,2014年的霾日数则被独立预测了10次。通过进行循环独立样本实验,可以进一步评估该模型对近些年污染严重形势下霾日数的预测能力。实验结果表明,同号率达到100%,并且每年的预测结果并没有很大的变化,表明建立的预测模型有很好的稳定性(图5)。

2.2 京津冀区域的实时逐月霾污染预测模型

霾污染包含大量的有毒粒子,对人体健康、交通安全、生态系统以及社会经济有巨大的危害。当霾污染发生在首都经济圈——京津冀区域时,造成的危害更是难以估量。因此,为给京津冀霾污染防治提供更有针对性的科学支持,有必要在华北预测模

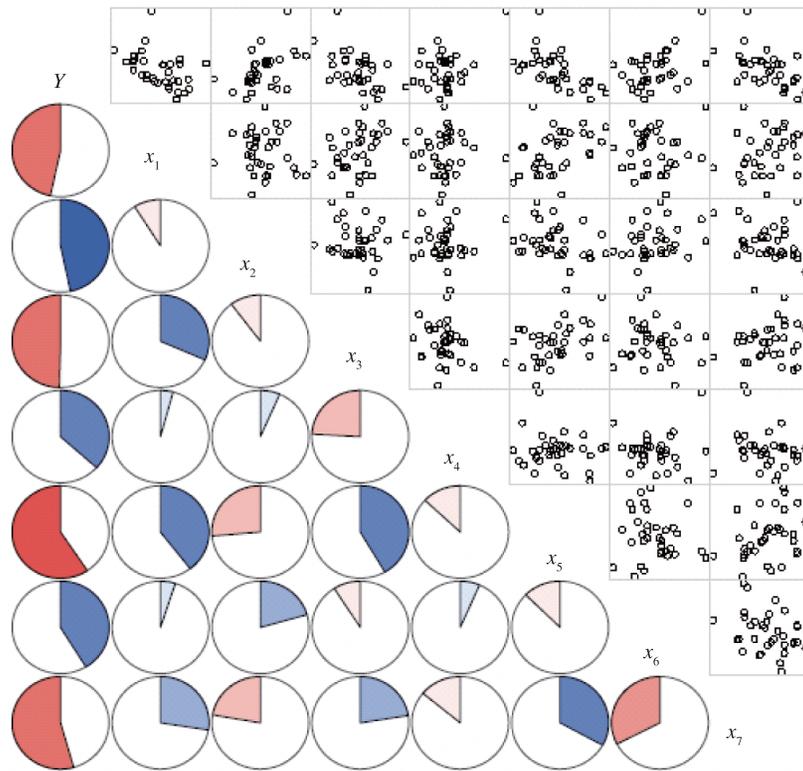


图2 因变量(霾日数的年际增量, Y)和自变量(x_1, x_2, \dots, x_7)之间的相关系数和散点图(左下部分为相关系数的饼图,红/蓝色代表正/负相关关系,面积代表绝对值;右上部分为要素之间的散点图)

Fig.2 Correlation coefficients and scatter diagrams between dependent variable (interannual increments of haze days, Y) and independent variables (x_1, x_2, \dots, x_7) (pie chart with the correlation coefficient in the lower left; red/blue represents positive/negative correlation, while area of the pie chart represents absolute value; scatter diagram between elements in upper right)

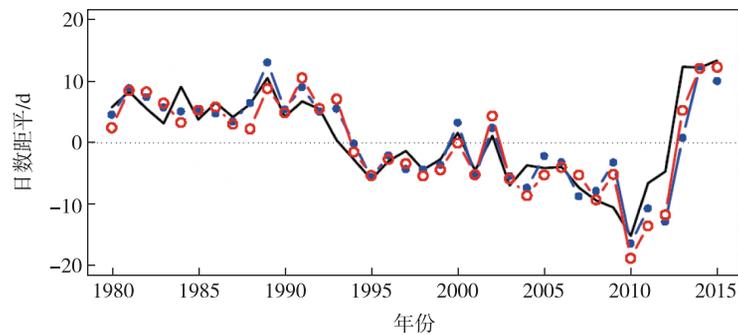


图3 观测(黑色)和多元线性回归(蓝色)、广义相加模型(红色)预测的华北冬季霾日数距平(1980—2013年的预测值为交叉检验的结果,2014和2015年的预测值为独立预测的结果;引自 Yin and Wang(2016b))

Fig.3 The temporal variation of measured (black) winter haze days anomalies from 1980 to 2015, multiple linear regression (blue) and generalized additive model (red) simulative winter haze days anomalies, which was composed of cross fitted series from 1980 to 2013 and predicted values in 2014 and 2015 (quoted from Yin and Wang (2016b))

型的基础上,进一步将预测范围集约到京津冀区域。进一步的研究发现,虽然12月、1月和2月京津冀

区域的霾日数距平两两之间均呈现出显著的正相关关系(即变化特征类似),但当将线性趋势去除之

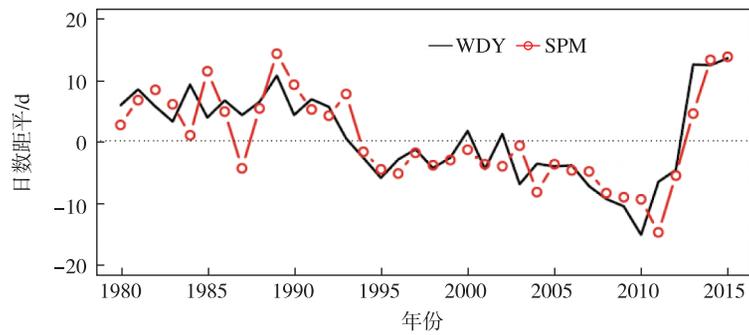


图4 观测(黑色)和广义相加模型预测(红色)的华北冬季霾日数距平(1980—2013年的预测值为交叉检验的结果,2014和2015年的预测值为独立预测的结果;引自 Yin and Wang(2017))

Fig.4 The temporal variation of measured (black) winter haze days anomalies from 1980 to 2015, and generalized additive model (red) simulative winter haze days anomalies, which was composed of cross fitted series from 1980 to 2013 and predicted values in 2014 and 2015 (quoted from Yin and Wang(2017))

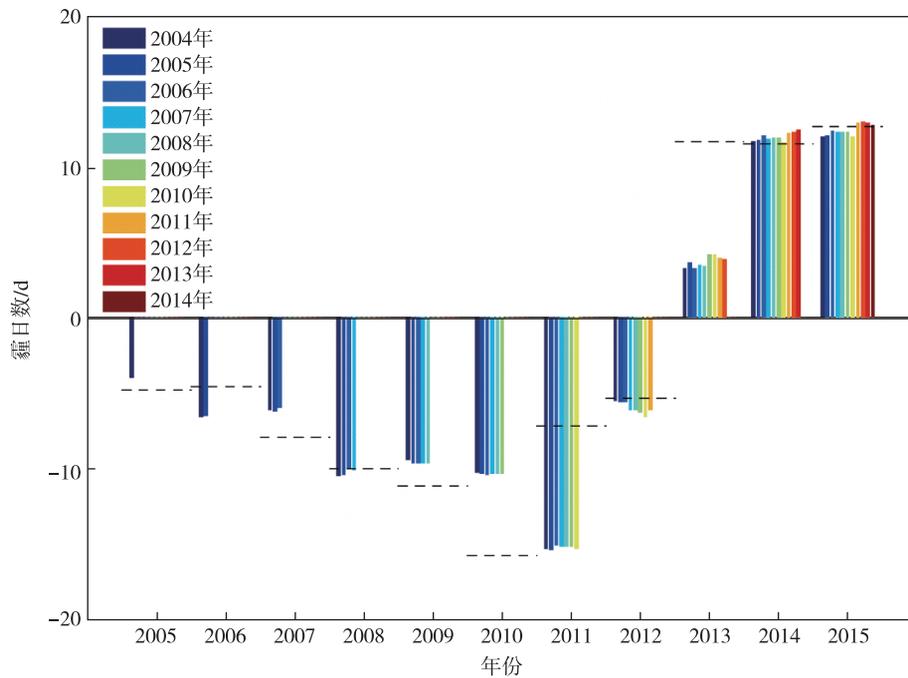


图5 循环独立样本预测实验的华北平原冬季霾日数预测值(柱状)和观测值(虚线)(训练样本的截止年表示广义相加模型是由1980至该年的数据训练得到,之后到2015年的数据均用作独立样本实验,比如,从2011年开始出现的黄色柱型代表的是2011—2015年的数值是由1980—2010数据训练得到的模型预测而来。引自 Yin and Wang(2017))

Fig.5 The winter haze days anomalies from independent cyclic predictions (bars) and observations (dashed lines).The expiration year of training data means that the generalized additive model was trained by the datasets from 1980 to this year,and the winter haze days anomalies from the next year to 2015 were independently predicted.For example, the results plotted with yellow bars (existing from 2011) were independently predicted by the generalized additive model trained by the data from 1980 to 2010(quoted from Yin and Wang(2017))

后,12月和2月霾日数之间的相关性变得不显著(表1)。同时,3个月的年际增量之间并没有显著的相关性。此外,统计了气候预测最关注的正负号,

发现37a的年际增量中仅有14a表现为冬季3个月同号。因此,无论是从预测的精细程度方面出发,还是从预测基础的科学性上考虑,均有必要针对京

京津冀区域冬季3个月的霾污染分开建立气候预测模型。同时,为了在11月给出整个冬季的预测结果,在选取前期外强迫预测因子时,将时间限制在9和10月。选取因子后,采用多元线性回归的方法,建立京津冀区域的实时逐月霾污染预测模型。

表1 1979—2015年冬季各月京津冀霾日数之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between monthly haze days in winter from 1979 to 2015

月份	年际增量		距平		去线性趋势	
	12月	1月	12月	1月	12月	1月
1月	0.18		0.57 ¹⁾		0.53 ¹⁾	
2月	0.22	0.22	0.34 ¹⁾	0.49 ¹⁾	0.31	0.47 ¹⁾

注:1)表示通过置信度为95%的显著性水平检验。

相比而言,由表2可见,12月霾污染预测模型的性能最好,能够解释年际增量46%的变化,均方根误差仅有1.56 d。叠加前一年监测信息后,年际变化异常同号率能达到86%,对长期趋势(相关系数0.71)和年际变化(去除线性趋势后,相关系数0.65)的把握也是比较好的。次年2月的模型性能次之,能够解释年际增量58%的变化,均方根误差仅有1.73 d,年际变化异常同号率为81%。次年1月的模型性能仅能解释年际增量37%的变化,均方根误差为2.24 d,但同号率保持在83%。将3个月份的预测结果相加后,即可得到冬季平均的预测结果,不仅优于3个分月的预测性能,而且优于直接用冬季平均霾日数建模的性能。冬季预测结果能够解释年际增量66%的方差。叠加前一年监测信息后,同号率能达到91.7%,对长期趋势(相关系数0.81)和年际变化(去除线性趋势后,相关系数0.77)的把握也是最好的。

表2 京津冀实时逐月霾污染预测模型的性能指标

Table 2 Performance indexes of real-time prediction model of monthly haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region

月份	RMSE/ d	MAE/ d	LCC	EV/ %	PSSano/ %	LCCano	DCCano
12月	1.56	1.34	0.68	46	86	0.71	0.65
1月	2.24	1.79	0.61	37	83	0.71	0.70
2月	1.73	1.41	0.76	58	81	0.61	0.61

注:年际增量指标:RMSE/MAE是均方根误差/绝对误差;LCC是年际增量预测和观测的相关系数;EV是解释方差。距平指标:PSSano是距平同号百分比;LCCano和DCCano分别是相关系数和去趋势后相关系数。

3 长三角区域实时逐月霾污染预测模型

虽然,长三角地区的冬季霾污染在近些年呈现出缓慢下降的趋势,但由于长江三角洲地区的人口和经济密度很大,是“一带一路”与长江经济带的重要交汇地带,因此有必要开展长三角地区霾日数的气候预测。在建模之前,先对预测对象(也就是逐月霾日数的年际增量)特征进行分析,发现虽然12月霾日数的年际增量和1月、2月霾日数年际增量之间的相关系数能够达到95%的置信水平,但是却分别为正、负相关(图6)。1月和2月的霾日数年际增量之间不存在显著的相关关系。因此,在建立实时霾污染预测模型时,需要针对每一年的霾日数分别建立模型。研究发现,前期9—10月的海表面温度、海冰、地面温度、地面湿度和南极涛动对冬季霾污染有显著地影响。据此,分别针对每个月的霾污染选定不同的预测因子。选取的年际增量预测因子如表3所示,均与霾日数的年际增量表现出显著的线性相关关系(95%的置信度检验阈值为0.31)。

从“去一法”交叉检验(1980—2014年)和独立预测实验(2015和2016年)的结果来看,在引入前一年的观测值之后,预测值对霾污染的长期趋势都有比较好的把握能力。同时,模型对霾日数变化的年际-年代际分量也能够成功再现(图7),但略差于对长期趋势的反映能力。具体到每一年的预测性能(表4),次年2月霾日数预测模型的性能最好,能够解释年际增量54.8%的变化,均方根误差仅有1.76 d,年际变化异常同号率为86.1%,对2015和2016年的独立预测误差分别为-0.44和-2.22 d。12月和1月霾污染的预测模型性能相仿,分别能够解释年际增量47.6%和41%的变化,均方根误差在2 d左右,年际变化异常同号率均在83.3%。但是,1月独立预测检验的误差明显大于12月。与京津冀区域实时逐月霾污染预测模型对比来看,两者的预测性能大体处于相似的水平,均方根误差在2 d左右,对距平符号的捕捉率在80%以上,对霾日数变化的长期趋势(相关系数0.7左右)具有很好的再现能力,能够投入实时预测应用。区别是,京津冀区域实时逐月霾污染预测模型对年际-年代际分量的把握能力(相关系数0.6左右)要优于长三角地区的预测模型(相关系数0.5左右)。

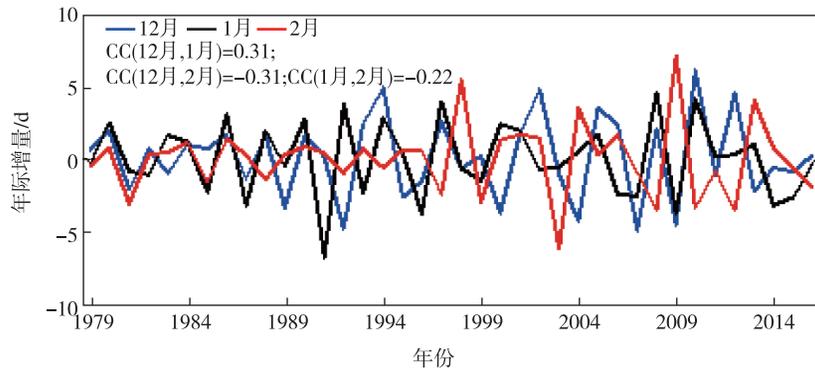


图6 1979—2016年长三角地区冬季逐月霾日数的年际增量(12月(蓝)、1月(黑)、2月(红)两两之间的相关系数(I_{CC})标注在左上角)

Fig.6 Interannual increments of monthly haze days in winter in the Yangtze River Delta region from 1979 to 2016, the correlation coefficient(CC) among December(blue), January(black) and February(red) is marked at upleft

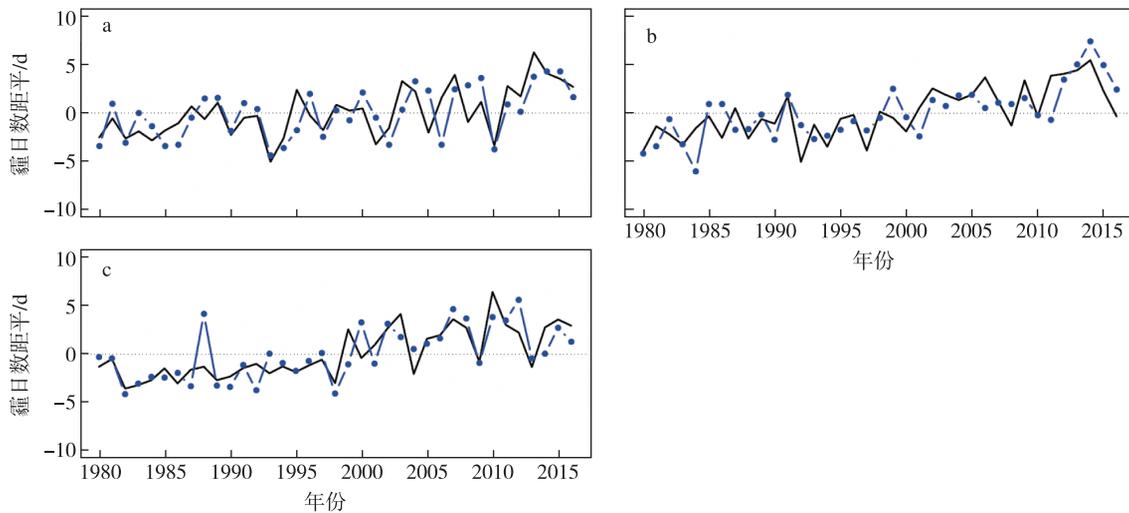


图7 1980—2016年观测(黑色)和预测(蓝色)的长三角地区冬季逐月霾日数的距平(1980—2014年的预测值为交叉检验的结果,2015和2016年的预测值为独立预测的结果):(a)12月;(b)1月;(c)2月

Fig.7 Observed (black) and predicted (blue) winter haze days anomalies in the Yangtze River Delta region (the predicted values from 1980 to 2014 are the results of cross testing, and those for 2015 and 2016 are the result of independent prediction): (a) December; (b) January; (c) February

表3 长三角区域实时逐月霾污染预测模型选取的前期预测因子(年际增量)及其与霾污染之间的线性相关系数

Table 3 selected predictors (interannual increments) for the real-time monthly haze pollution prediction models in the Yangtze River Delta region, and their linear correlation coefficients with haze pollution

自变量	12月	1月	2月
x_1	-0.58(中国西南部土壤湿度)	-0.54(伊朗高原东部土壤湿度)	-0.53(巴尔喀什湖以北土壤湿度)
x_2	-0.48(华东地区土壤湿度)	-0.32(萨尔温江流域土壤湿度)	0.38(黄土高原附近土壤湿度)
x_3	-0.43(格陵兰岛以南 SST)	0.43(西太平洋 SST)	0.47(印度洋中部 SST)
x_4	0.46(东欧平原以南地表温度)	0.39(墨西哥湾附近 SST)	0.45(日本岛以南海区 SST)
x_5	-0.35(南方涛动)	-0.37(西北太平洋 SST)	0.45(伊朗高原附近地表温度)
x_6		0.40(中南半岛地表温度)	华北平原附近地表温度(-0.40)
x_7		0.48(长三角地区地表温度)	

注:预测因子的时间范围是9月和10月.

表4 长三角实时逐月霾污染预测模型的性能指标

Table 4 Performance indexes of the real-time prediction model of monthly haze pollution in the Yangtze River Delta

月份	RMSE/d	MAE/d	LCC	EV/%	Bias ₁₅ /d	Bias ₁₆ /d	PSSano/%	LCCano	DCCano
12月	2.09	1.72	0.69	47.6	0.81	-1.08	83.3	0.67	0.54
1月	1.99	1.59	0.64	41	2.69	2.83	83.3	0.69	0.38
2月	1.76	1.38	0.74	54.8	-0.44	-2.22	86.1	0.74	0.54

注:年际增量指标:RMSE/MAE是均方根误差/绝对误差;LCC是年际增量预测和观测的相关系数;EV是解释方差;Bias₁₅和Bias₁₆是对2015和2016年独立预测的误差。距平指标:PSSano是距平同号百分比;LCCano和DCCano分别是相关系数和去趋势后相关系数。

4 实时预测和效果检验

2016年11月,采用2.2中建立的京津冀区域的实时逐月霾污染预测模型开展了实时预测,并形成了建议服务材料(王会军等,2017a)。在此次预测中,模型输出的2016/2017年冬季3个月的霾日数分别为22.7、16.8和14.8d,均大于该月常年值,霾污染比较严重。为了提升可读性和服务效果,还将预测结果与前一年(2015/2016年)冬季的实际状况进行了对比(表5)。根据2016/2017年冬季3个月的霾日数观测值,模型预测的结果相对于常年值的定性结论全部准确,相对于前一年污染状况的结论大多数准确。仅在与2015年12月霾日数的比较中有错误结论,主要是因为实测的2016年12月霾日数与去年相当,而不是预测的偏多。从具体的预测误差来看,12月和1月的预测误差在2d左右,2月的预测误差很小(图8)。

2017年11月,在服务建议材料中增加了根据长三角区域实时逐月霾污染预测模型开展的实时预测结果(王会军等,2017b)。模型输出的2017/2018年冬季3个月的长三角地区的霾日数分别为19.8、15和15.6d。其中,12月和2月的预测结果大于该月常年值,霾污染比较严重。1月的预测结果略少于常年值,处于正常水平。根据2017/2018年冬季3个月的霾日数观测值,模型预测的结果相对于常年值的定性结论全部准确,相对于前一年污染状况的结论大多数准确(表5)。仅在与2017年2月霾日数的比较中有错误结论,主要是因为实测的2017年2月霾日数明显少于去年,而不是预测的偏多。从具体的预测误差来看,12月和1月的预测误差很小,可以忽略,2月的预测误差在2d左右(图9)。

表5 主要实时预测结论及核查(引自王会军等(2017a, 2017b))

Table 5 Main real-time prediction conclusions and verification (quoted from Wang et al. (2017a, 2017b))

月份	2016/17年冬季, 京津冀霾日数	2017/18年冬季, 长三角霾日数
12月	多于2015年12月, 也明显多于常年平均;	多于2016年12月, 明显多于常年平均;
1月	少于2016年12月, 也少于2016年1月, 但多于常年平均;	少于2017年12月, 略少于2017年1月, 也略少于常年平均;
2月	少于2016年12月, 略多于2016年2月, 也多于常年平均;	少于2017年12月, 略多于2017年2月, 明显多于常年平均;

注:黑体为正确的结论,红色为错误的结论。

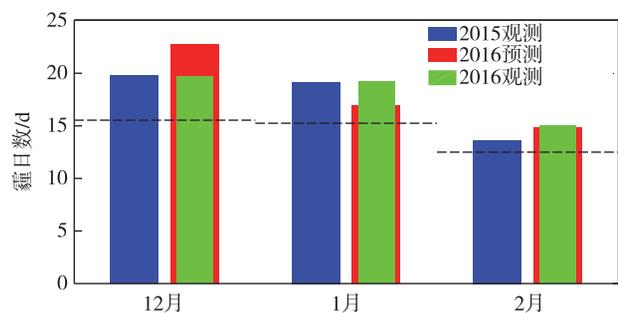


图8 京津冀区域监测的2015/2016年(蓝色)、预测的2016/2017年(红色)和监测的2016/2017年(绿色)的冬季逐月霾日数(虚线为常年值)

Fig.8 Observed 2015/2016 (blue), predicted 2016/2017 (red) and measured 2016/2017 (green) winter haze days in the Beijing-Tianjin-Hebei region (the dotted line is the climatic mean value)

5 结论与讨论

以年际增量为预测对象,选取前期外强迫因子为自变量,分别针对京津冀和长三角区域建立冬季

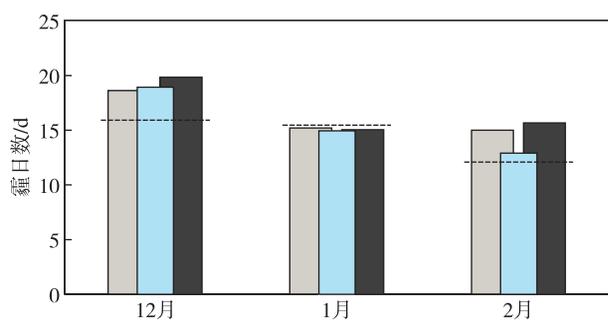


图9 长三角区域监测的2016/2017年(灰色)、预测的2017/2018年(黑色)和监测的2017/2018年(蓝色)的冬季逐月霾日数(虚线为常年值)

Fig.9 Observed 2016/2017 (gray), predicted 2017/2018 (black) and measured 2017/2018 (blue) winter haze days in the the Yangtze River Delta region (the dotted line is the climatic mean value)

霾日数预测模型。在计算年际增量之后,冬季3个月霾日数的变化特征有明显的差异,因此分别建立3个月的预测模型更有科学性。从实时气候预测的角度考虑,选取了9—10月显著相关的前期外强迫作为预测因子。总体来看,京津冀和长三角区域预测模型的性能大体处于相似的水平,均方根误差在2 d左右,对距平符号的捕捉率在80%以上,对霾日数变化的长期趋势具有很好的再现能力,能够投入实时预测应用。但是,京津冀区域实时逐月霾污染预测模型对年际-年代际分量的把握能力要优于长三角地区的预测模型。分月来看,京津冀12月霾污染预测模型的性能最好,均方根误差仅有1.56 d,年际变化异常同号率能达到86%。长三角区域2月霾日数预测模型的性能最好,能够解释年际增量54.8%的变化,均方根误差仅有1.76 d,年际变化异常同号率为86.1%。在2016/2017年冬季京津冀霾

日数实时预测中,模型预测的结果相对于常年值的定性结论全部准确,相对于前一年污染状况的结论大多数准确,表现出很好的预测性能。类似的,在2017/2018年冬季长三角霾日数实时预测中,12月和1月的预测误差可以忽略,2月的预测误差在2 d左右。

需要注意的是,在2017/2018年冬季京津冀区域霾日数实时预测中,模型并没有令人满意的表现。究其原因,一方面是模型对极端气候条件的把握能力还有所欠缺,另一方面是受到当年冬季超高强度的污染物限排措施的影响。虽然2017/2018年冬季京津冀地区的空气质量有了很大地改善,必须认识到这是“人努力-天帮忙”的综合作用。在未来,一旦偏差的大气环流扩散条件出现,将在一定程度上抵消“人努力”减排的效果,增加大气污染治理的难度。因此,在科学评估天气气候效用的前提下,更强的减排力度和有效的减排措施是有必要的。长三角地区的冬季霾污染在近些年呈现出缓慢下降的趋势,但从预测预估的结果来看,未来气候条件不利于大气污染物扩散,减排力度和措施还是需要进一步坚持和强化。

在一周以内的霾污染天气预报技术已经比较成熟的现状下,要重视1~2周和跨季节霾污染的预测研究和预测结果的应用,为政府和社会提前制定能源计划(如天然气和燃煤的配比和存储等)、实施减排措施、科学选择减排力度提供科学依据。此外,还需要加强对京津冀和长三角区域霾污染过程的研究,定量评估北京市、上海市(以及其他若干超大城市)外来污染输送和本地污染物排放的相对贡献,为科学制定大气污染控制对策提供定量的科学依据。

参考文献(References)

包云轩,邵艺,李迅,2018.基于MODIS的北京地区一次霾过程的能见度反演[J].大气科学学报,41(5):710-719. Bao Y X, Shao Y, Li X, 2018. Visibility inversion of a haze process in Beijing by remote sensing based on MODIS satellite observations[J]. Trans Atmos Sci, 41(5):710-719. (in Chinese).

Chen S F, Guo J P, Song L Y, et al., 2018. Inter-annual variation of the spring haze pollution over the North China Plain: roles of atmospheric circulation and sea surface temperature[J]. Int J Climatol.

Chiang A Y, 2007. Generalized additive models: an introduction with R[J]. Technometrics, 49(3):360-361.

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]. Science China: Earth Sciences, 44(1):37-48. (in Chinese).

Fan K, Wang H J, 2009. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific[J]. Wea Forecasting, 24(4):974-986.

Fan K, Wang H J, 2010. Seasonal prediction of summer temperature over Northeast China using a year-to-year incremental approach[J]. J Meteor Res, 24(3):269-275.

- Fan K, Tian B Q, 2013. Prediction of wintertime heavy snow activity in Northeast China[J]. *Chin Sci Bull*, 58(12):1420-1426.
- 范可, 林美静, 高煜中, 2008. 用年际增量方法预测华北汛期降水[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(11):1452-1456. Fan K, Lin M J, Gao Y Z, 2008. Prediction of precipitation in flood season in North China by interannual increment method[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 38(11):1452-1459. (in Chinese).
- Fan K, Wang H J, Choi Y J, 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River Valley summer rainfall[J]. *Chin Sci Bull*, 53(4):602-609.
- Gao H, Li X, 2015. Influences of El Niño Southern Oscillation events on haze frequency in eastern China during boreal winters[J]. *Int J Climatol*, 35(9):2682-2688.
- 关月, 何立富, 2013. 2013 年 1 月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 39(4):531-536. Guan Y, He L F, 2013. Analysis of the January 2013 atmospheric circulation and weather[J]. *Meteorol Mon*, 39(4):531-536. (in Chinese).
- 韩霄, 张美根, 2014. 2013 年 1 月华北平原重霾成因模拟分析[J]. *气候与环境研究*, 19(2):127-139. Han X, Zhang M G, 2013. Model analysis of haze formation over the North China Plain in January 2013[J]. *Climatic Environ Res*, 19(2):127-139. (in Chinese).
- Huang Y Y, Wang H J, Fan K, 2014. Improving the prediction of the summer Asian-Pacific oscillation using the interannual increment approach[J]. *J Climate*, 27(21):8126-8134.
- 靳军莉, 颜鹏, 马志强, 等, 2014. 北京及周边地区 2013 年 1—3 月 PM_{2.5} 变化特征[J]. *应用气象学报*, 25(6):690-700. Jin J L, Yan P, Ma Z Q, 2014. Characteristics of PM_{2.5} in Beijing and surrounding areas from January to March in 2013[J]. *J Appl Meteor Sci*, 25(6):690-700. (in Chinese).
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3):437-471.
- Li S L, Han Z, Chen H P, 2017. A comparison of the effects of interannual Arctic sea ice loss and ENSO on winter haze days: observational analyses and AGCM simulations[J]. *J Meteorol Res*, 31(5):820-833.
- Liu J, Curry J A, Wang H, et al., 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(11):4074-4079.
- Mo K C, 2000. Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies[J]. *J Climate*, 13(20):3599-3610.
- Rayner N A, 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night Marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *J Geophys Res*, 108(D14):4407.
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al., 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880—2006)[J]. *J Climate*, 21(10):2283-2296.
- Tian B Q, Fan K, Yang H Q, 2018. East Asian winter monsoon forecasting schemes based on the NCEP's climate forecast system[J]. *Clim Dyn*, 51(7/8):2793-2805.
- van den Dool H, 2003. Performance and analysis of the constructed analogue method applied to US soil moisture over 1981—2001[J]. *J Geophys Res*, 108(D16):8617.
- 王博妮, 濮梅娟, 苗茜, 2016. 江苏地区连续性雾霾天气的污染物浓度变化和特征分析[J]. *大气科学学报*, 39(2):243-252. Wang B N, Pu M J, Miao Q, 2016. Analysis of the characteristics and variation of pollutant concentrations for a long-lasting fog and haze event in the Jiangsu area[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(2):243-252. (in Chinese).
- Wang H J, Zhou G Q, Yan Z, 2000. An effective method for correcting the seasonal; interannual prediction of summer climate anomaly[J]. *Adv Atmos Sci*, 17(2):234-240.
- 王会军, 孙建奇, 郎咸梅, 等, 2008. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果[J]. *大气科学*, 32(4):806-814. Wang H J, Sun J Q, Lang X M, et al., 2008. Some new results in the research of the interannual climate variability and short-term climate prediction[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(4):806-814. (in Chinese).
- 王会军, 范可, 郎咸梅, 等, 2012. 中国短期气候预测的新理论、新方法和新技术[M]. 北京: 气象出版社: 226. Wang H J, Fan K, Lang X M, 2012. New theory, method and new technology for short-term climate prediction in China[M]. Beijing: Meteorological Press: 226. (in Chinese).
- Wang H J, Chen H P, Liu J P, 2015a. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China[J]. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 8(1):1-9.
- Wang H J, Fan K, Sun J Q, et al., 2015b. A review of seasonal climate prediction research in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 32(2):149-168.
- 王会军, 尹志聪, 孙建奇, 等, 2017a. 关于 2017 年 1—2 月京津冀霾污染趋势预测展望[R]//中国科学院院士建议. 北京: 中国科学院学部工作局. Wang H J, Yin Z C, Sun J Q, et al., 2017a. Prospects for haze pollution trend prediction in Beijing, Tianjin and Hebei from January to February 2017[R]//Proposal by Academicians of the Chinese Academy of Sciences. Beijing: Bureau of the Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese).
- 王会军等院士和专家, 2017b. 关于 2017 年冬季京津冀和长三角区域霾污染趋势的预测展望[R]//中国科学院院士建议. 北京: 中国科学院学部工作局. Wang H J and other academicians and experts, 2017b. Forecast and prospect of haze pollution trend in Beijing, Tianjin, Hebei and Yan-

- gtze River Delta Region in Winter 2017[R]//Proposal by Academicians of the Chinese Academy of Sciences.Beijing:Bureau of the Academy of Sciences,Chinese Academy of Sciences.(in Chinese).
- Xiao D,Li Y,Fan S J,et al.,2015.Plausible influence of Atlantic Ocean SST anomalies on winter haze in China[J].Theor Appl Climatol,122(1/2):249-257.
- 徐祥德,王寅钧,赵天良,等,2015.中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J].科学通报,60(12):1132-1145. Xu X D,Wang Y J,Zhao T L,et al.,2015.“Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze[J].Chinese Science Bulletin,60(12):1132-1145.(in Chinese).
- 尹志聪,袁东敏,丁德平,等,2014.香山红叶变色日气象统计预测方法研究[J].气象,40(2):229-233. Yin Z C,Yuan D M,Ding D P,et al.,2014.Statistical prediction based on meteorology of cotinus coggygia leaves discoloration-day in the fragrant hill[J].Meteor Mon,40(2):229-233.(in Chinese).
- Yin Z C,Wang H J,2016a.The relationship between the subtropical western Pacific SST and haze over north-central north China Plain[J].Int J Climatol,36(10):3479-3491.
- Yin Z C,Wang H J,2016b.Seasonal prediction of winter haze days in the north-central North China Plain[J].Atmos Chem Phys,16(23):14843-14852.
- Yin Z C,Wang H J,2017.Statistical prediction of winter haze days in the north China Plain using the generalized additive model[J].J Appl Meteor Climatol,56(9):2411-2419.
- Yin Z C,Wang H J,2018.The strengthening relationship between Eurasian snow cover and December haze days in central North China after the mid-1990s[J].Atmos Chem Phys,18(7):4753-4763.
- Yin Z C,Wang H J,Chen H P,2017.Understanding severe winter haze events in the North China Plain in 2014:roles of climate anomalies[J].Atmos Chem Phys,17(3):1641-1651.
- Yin Z C,Li Y Y,Wang H J,2019.Response of early winter haze days in the North China plain to autumn Beaufort sea ice[J].Atmos Chem Phys.doi:10.5194/acp-2018-783.
- 袁东敏,马小会,2017.2016年12月16—21日重度霾过程及大气环流异常[J].气候与环境研究,22(6):757-764. Yuan D M,Ma X H,2017.The severe haze process in 16—21 December 2016 and associated atmospheric circulation anomalies[J].Climatic Environ Res,22(6):757-764.(in Chinese).
- 张金良,高健,刘喆,等,2014.2013年灰霾事件及其对北京市医院成人门诊急症量影响的描述性研究[J].环境与健康杂志,31(10):853-859. Zhang J L,Gao J,Liu J,2014.The descriptive study on the effect of haze episode on adult daily counts of outpatient and emergenc[J].Journal of Environment and Health,31(10):853-859.(in Chinese).
- Zhang Q Q,Ma Q,Zhao B,et al.,2018.Winter haze over North China Plain from 2009 to 2016:influence of emission and meteorology[J].Environmental Pollution,242:1308-1318.
- 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,57(1):26-35.
- 张小曳,孙俊英,王亚强,等,2013.中国雾霾成因及其治理的思考[J].科学通报,58(13):1178-1187. Zhang X Y,Sun J Y,Wang Y Q,et al.,2013.Consideration on the causes of fog and haze in China and its control[J].Chin Sci Bull,58(13):1178-1187.(in Chinese).
- Zhao S,Li J P,Sun C,2016.Decadal variability in the occurrence of wintertime haze in central eastern China tied to the Pacific Decadal Oscillation[J].Sci Rep,6:27424.Zhao S Y,Zhang H,Xie B,2018.The effects of El Niño-Southern Oscillation on the winter haze pollution of China[J].Atmos Chem Phys,18(3):1863-1877.
- 郑龙飞,谢郁宁,刘强,等,2016.南京地区2013年12月重霾污染事件成因分析[J].大气科学学报,39(4):546-553. Zheng L F,Xie Y N,Liu Q,et al.,2016.Heavy haze events during December 2013 in Nanjing[J].Trans Atmos Sci,39(4):546-553.(in Chinese).
- Zhou M Z,Wang H J,2014.Late winter sea ice in the Bering Sea:predictor for maize and rice production in Northeast China[J].J Appl Meteor Climatol,53(5):1183-1192.

Outline of the real-time seasonal haze pollution prediction in China in recent years

YIN Zhicong^{1,2}, WANG Huijun^{1,2}, DUAN Mingkeng¹

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CIC-FEMD)/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education(KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

² Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

In recent years, severe haze pollution has been damaging human health, traffic security, the ecosystem and social economy in eastern China. In addition to the haze forecast within 1 week, seasonal haze prediction provides scientific support for longer periods to the decisions of emission reduction. In this study, taking the annual increment as the predictand, monthly prediction models were trained for the Beijing-Tianjin-Hebei and Yangtze Delta regions. The performances of the built models were similar, with 2 days of root-mean-square error and $a > 80\%$ simulation rate of the anomalies' mathematical sign. In the real-time seasonal prediction for Beijing-Tianjin-Hebei haze days in the winter of 2016, the results with respect to the climate mean (the previous year) were completely (mostly) accurate. During the winter of 2017, the predicted biases for the December and January haze days in the Yangtze River Delta were very small, and the bias of February was nearly 2 days.

haze ; pollution ; seasonal prediction ; emission reduction

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181224001

(责任编辑:张福颖)