

赵翠光,赵声蓉,林建,等,2022. 基于区域建模的能见度预报及影响因子分析[J]. 气象,48(6):773-782. Zhao C G,Zhao S R, Lin J,et al,2022. Visibility forecast and influence factor analysis based on regional modeling[J]. Meteor Mon,48(6):773-782(in Chinese).

基于区域建模的能见度预报及影响因子分析^{*}

赵翠光 赵声蓉 林 建 吕终亮 姚 莉 韦 青

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用 2008—2018 年逐日能见度站点观测资料,通过旋转经验正交函数分解方法分析得到不同季节能见度天气的客观分区,在此基础上,以 2017—2019 年欧洲中期天气预报中心全球数值预报模式输出和相关诊断量及站点观测资料分别作为预报因子和预报量,应用多元线性回归、事件概率回归估计和判别分析等综合算法,分区域、分季节建立能见度预报模型,并将区域预报模型应用于区域内站点,得到站点能见度预报结果。以 2020 年资料为独立样本进行试报,检验结果表明:基于区域建模的能见度预报效果在不同季节、不同预报时效较模式直接输出有很大提升,明显订正了模式对冬季低能见度天气低估的情况,在 1 km 以下级别低能见度预报中显示出较高的预报技巧,尤其在低能见度出现较多的 05 时最为明显。因子分析表明,影响能见度的因子主要是与边界层条件密切相关的温、压、湿、风等因子,以及反映下垫面热状况因子、降水相关因子和稳定度因子。不同季节、不同等级能见度预报模型中高频因子不同,春季高频因子主要为温度相关因子,夏季与降水相关的因子选入频次较高,秋、冬季不稳定因子更重要。

关键词: 区域建模,能见度预报,影响因子

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.033001

Visibility Forecast and Influence Factor Analysis Based on Regional Modeling

ZHAO Cuiguang ZHAO Shengrong LIN Jian LYU Zhongliang YAO Li WEI Qing

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on rotated empirical orthogonal function analysis of the daily observational data of visibility from 2008 to 2018, the objective division of visibility in different seasons is obtained. Taking the global numerical prediction model of ECMWF from 2017 to 2019 as the prediction factor, the visibility prediction model for different regions and seasons is built and the regional model is applied to the station for prediction. Then the ECMWF model forecast data in 2020 are used as an independent sample, and the seasonal forecast of visibility in China is carried out. The results show that using the comprehensive algorithm of multiple linear regression, regression estimate of event possibility and discriminant analysis, the visibility forecast of model output statistics based on regional model output statistics is much better in different seasons and different forecast projections than the model direct output (DMO). The underestimation of DMO is corrected, and the improvement of winter forecast score is the most obvious. The model shows high prediction skills in the prediction of low visibility below 1 km, especially at 05:00 BT. Factor analysis shows the high-frequency factors affecting visibility mainly include temperature, pressure, humidity and wind that are closely related to boundary layer conditions, as well as surface thermal conditions, precipitation

^{*} 国家重点研发计划(2017YFC1502005、2018YFC1507205)共同资助

2021 年 9 月 26 日收稿; 2022 年 2 月 16 日收修定稿

第一作者:赵翠光,主要从事客观要素预报及相关技术研究. E-mail:zhaocg@cma.gov.cn

通讯作者:赵声蓉,主要从事客观要素预报及相关技术研究. E-mail:zhaosr@cma.gov.cn

related factors and stability. The high-frequency factors selected for visibility prediction of different orders in different seasons are different. Spring is sensitive to temperature-related factors, the factors related to precipitation are selected more frequently in summer, and the unstable factors in autumn and winter are more important.

Key words: regional modeling, visibility forecast, influence factor

引言

能见度(指大气水平能见度,下同)是天气预报中重要的天气要素,低能见度天气不仅影响人们的日常生活和身体健康,而且对交通运输、航空、航海等影响更为严重。水平能见度下降到1 km以下,常会导致航行延误、高速封闭,也是造成历史上许多航空灾难的原因之一(Allett, 2004)。因此能见度预报,尤其是低能见度天气的预报十分重要。

数值预报模式中能见度预报通常由云水含量、相对湿度和降水等其他物理量诊断得到(Smirnova et al, 2000; Benjamin et al, 2004; Gultepe and Milbrandt, 2010)。Herman and Schumacher(2016)的研究表明雾-霾和强降水是造成能见度降低的重要因素,而雾的形成对地面风、低层稳定性和湍流及其他因素等的微小差异具有较高的灵敏性(Gultepe et al, 2007),因此数值预报模式中能见度预报准确率较低。

不同数值预报模式,由于动力框架和物理参数化方案等方面的差异,具有不同的预报系统误差。通过统计方法,在历史的模式和观测资料基础上建立相关模型可以在一定程度上消除系统误差,从而达到对模式预报进行订正的目的。美国气象发展实验室研究表明以全球预报系统为基础的模式输出统计(MOS)预报的性能优于模式直接输出(Dallavalle et al, 2004)。研发人员通常采用神经网络、多元回归分析、支持向量机及深度学习等统计方法,开展定量和概率的能见度预报研究(周开鹏等, 2020; 胡海川等, 2018; 吴波等, 2017; 熊亚军等, 2015; 张自银等, 2018; 路婵, 2010),但针对全国范围的能见度预报工作较少,且低能见度预报仍然是难点问题。

针对以上问题,本文采用基于区域建模的MOS方法,开展中国区域能见度预报试验。MOS(Glahn and Lowry, 1972)是业务预报中重要的模式后处理方法,针对不连续分布的要素(如能见度、降水等),则利用事件概率回归方法有较好的预报效果(An-

tolik, 2000; 赵声蓉等, 2009)。同时由于低能见度为小概率事件,采用区域建模方法来扩展小概率事件的“样本数”,提高预报模型的稳定性。区域建模方法是将变化特征相似的站点归为一个区,联合区域内站点建立预报模型(赵翠光和赵声蓉, 2011; Wilks, 2011),再将区域模型应用到区域内任何站点上,实现站点预报。

本文首先利用能见度多年历史实况观测资料,采用旋转正交经验分解(EOF)方法(黄嘉佑, 1990)分季节对全国能见度天气进行客观分区;在客观分区基础上,采用多元线性回归(MLR)、事件概率回归估计(REEP)和判别分析的综合算法建立区域预报模型,将区域预报模型应用到区域中任意站点上;检验分析了试报结果,并与模式输出进行对比;最后对模型所选高频因子进行分析和讨论。

1 能见度天气区划分

分区方法包括客观方法和主观方法,主观方法一般是按照人为经验、行政地域等进行划分。经验正交函数(EOF)分析是提取气象要素场时空变化优势信号的方法,EOF分析方法分离出的空间分布结构能够反映气象要素场的主要空间特征,但是不能清晰地表示不同地理区域变化特征(魏凤英, 2007),所取区域范围不同,得到的特征向量空间分布也不同。但上述局限可以通过EOF得到克服。

EOF是在EOF展开的基础上再做最大正交方差旋转,从而使原要素场的信息特征集中映射到荷载场所表示的优势空间上,旋转后荷载的贡献要比旋转前分布均匀,这是因为旋转后各主成分着重表现空间的相关性分布特征,高荷载只集中在某一较小的区域,而使其他大部区域的荷载尽可能地接近0,从而更容易识别空间型,旋转后的特征场在时间上也比旋转前更稳定。

已有能见度天气分区研究工作多是以月、季资料为基础开展(黄楚惠等, 2019; 程叙耕等, 2013; 林建等, 2008; 张利等, 2011; 周贺玲等, 2007; 王淑英

等,2003),并不适用于逐日能见度预报。因此本文以 2008—2018 年逐日能见度站点观测资料为基础,针对我国春夏秋冬四个季节,采用 REOF 对能见度进行客观分区。按 Cattell(1966)提出的方法,当主分量解释方差突变时,来确定分区个数,为验证划分区域是否合理,对各分区第一主成分两两求相关,检验表明这些不同区域之间的能见度异常变化存在着显著的差异,分区是合理的。

根据 REOF 得到四个季节能见度天气区如图 1 所示。整体上看,与全国二级气象地理区划(郭进修等,2006)相似,但本文分区更能体现要素的季节变化和区域气候特征。以山东省为例,春季和夏季山东全省变化特征较一致,而秋、冬季呈现内陆和沿海气候特征不同的特点,冬季山东半岛东部 3 个站(由于站数少,图中没有显示,但是在建模中得到应用)和辽宁南部沿海为一个区,区别于山东其他地区。这与“秋、冬季内陆大雾高发,沿海大雾日数较少。从深秋到冬季,山东内陆常出现大范围大雾,而沿海海温较低不易出现大雾天气”的研究结论(林建等,2008;郗兴文,2010;李建华等,2010)是一致的。

2 建模资料

2.1 预报量定义

能见度为不连续的非正态分布变量,在使用回归方法时,直接预报能见度很难得到好的预报效果,因而将能见度划分为不同级别(见表 1),把级别定义为预报量。能见度资料来源于国家气象信息中心整编的 2017—2019 年全国 2423 个站点的能见度实况观测。

2.2 预报因子

本文使用的模式资料为 2017—2020 年欧洲中

表 1 能见度分级

Table 1 Visibility classification	
分级	能见度/km
1	<1
2	<2
3	<5
4	<10
5	≥10

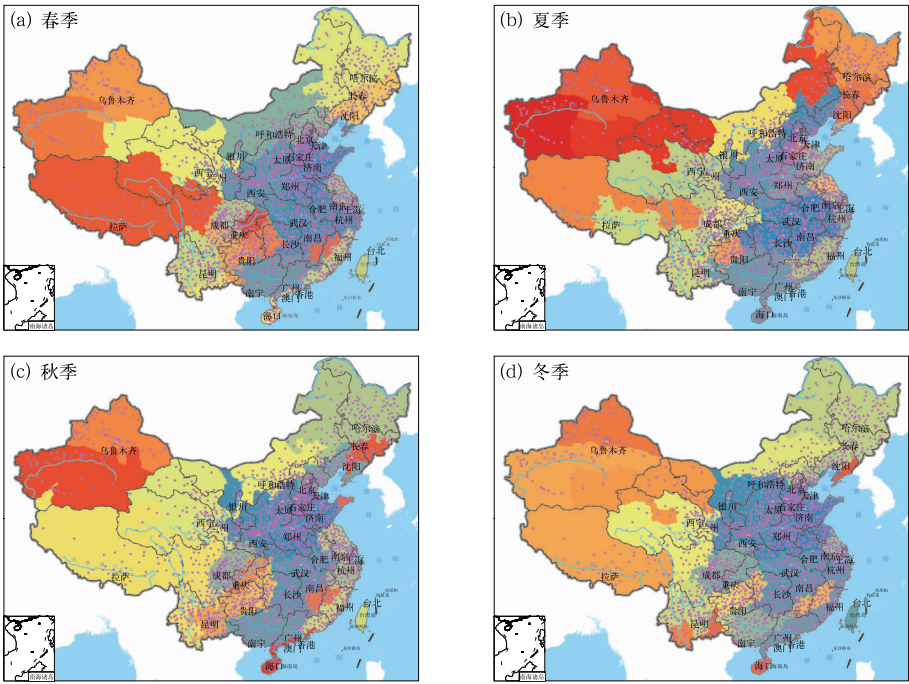


图 1 基于 2008—2018 年逐日能见度观测资料 REOF 方法分解的
(a~d)我国不同季节能见度客观分区

Fig.1 Division of visibility in (a—d) different seasons in China based on
REOF of daily observation visibility from 2008 to 2018

期天气预报中心(ECMWF)全球数值预报模式输出产品。为涵盖能见度的发生发展,预报因子包括模式直接输出产品(直接因子)和诊断得到的具有物理意义的派生因子(表 2)。直接因子包括温、压、湿、风、降水、云量、能见度、地表反照率等模式直接输出量。派生因子分为四类:一是温湿、水汽因子,例如:温度露点差、Ky 指数、湿静力温度、饱和湿静力温度、假相当位温、比湿、水汽通量、水汽通量散度、相对湿度超过 90% 的高度层数等;二是动力因子,例如:涡度、散度、螺旋度、偏差风等;三是动力和热力综合因子,例如:位涡、湿位涡、位涡倾斜发展判据、锋生函数等;四是要素的梯度、切变、平流变化和时间累计因子,例如:温度、气压梯度,风速、位温、不同高度层的(假)相当位温的垂直切变,温度、涡度、厚

度平流,3 时次累计平均垂直速度等。将以上的地面或各高度层的变量放入候选因子“池”中,为下一步建立能见度预报模型做准备。

3 建模技术方案

本文采用 MLR、REEP 和判别分析等综合算法,建立某一时刻能见度与各物理量之间的统计关系。其中 REEP 方法是将被预报量看成随机事件,将事件出现与否转化为 0、1 化的二值变量,预报结果为 0~1 的概率值,等级预报则是在概率预报基础上,基于特定的判别条件(本文采用 TS 评分最大的判别条件),在建模样本中确定事件出现与否的概率判别阈值(Weiss and Ghirardelli,2005)。

表 2 建模候选因子分类
Table 2 Classification of building model candidate factors

直接因子	派生因子			
	温湿、水汽因子	动力因子	动力和热力综合因子	要素的梯度、切变、平流变化和时间累计因子
温度、气压、湿度、风、降水、云量、能见度、地表反照率等	温度露点差、K 指数、湿静力温度、饱和湿静力温度、假相当位温、水汽通量、水汽通量散度、相对湿度超过 90% 的高度层数等	涡度、散度、涡度平流、散度差、螺旋度、偏差风等	位涡、湿位涡、位涡倾斜发展判据、锋生函数等	温度、气压梯度,风速、位温、不同高度层的(假)相当位温的垂直切变,温度、涡度、厚度平流,3 个时次累计平均垂直速度等

以 2017—2019 年资料按春夏秋冬四个季节建立模型。为了更好地处理季节过渡的问题,相邻两个季节之间时间重叠了一个月:分别为春季(2 月 15 日至 6 月 15 日);夏季(5 月 15 日至 9 月 15 日);秋季(8 月 15 日至 12 月 15 日);冬季(11 月 15 日至 3 月 15 日)。

回归分析中,预报因子需要与预报对象具有较好的相关性,且预报因子之间要相对独立,因为预报因子间相关性过大,会使得回归系数对样本数据的微小变化变得十分敏感,从而使得预报模型变得很不稳定。经过预处理的预报因子数量非常大,在建模的过程中不可能把所有因子引入,因而,在预报因子进入回归过程前,先对因子进行初选,在因子初选方案中,一方面选择与预报量相关系数绝对值较大的因子,另一方面为减少复共线性问题,选择因子之间近似独立,即因子之间相关系数小的因子。

区域建模(RMOS)方法是同一天气分区中样本共享,基于历史的数值预报模式预报产品和实况资料,通过 MLR、REEP 和判别分析等综合算法建立区域预报模型,将区域模型应用到区域中任意站点上,得到站点预报模型。基于 RMOS 方法的能见度预报流程如图 2 所示。

4 能见度预报检验及高频因子分析

4.1 能见度预报检验分析

为评价预报方法效果,对 2020 年 20 时起报的 RMOS 和模式直接输出(DMO)的能见度预报分季节进行检验分析。图 3 为不同等级、不同季节能见

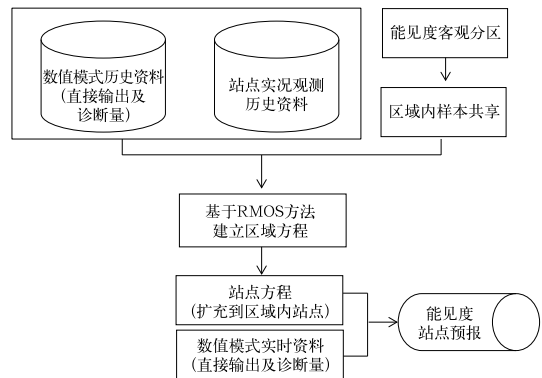


图 2 RMOS 方法的能见度预报流程
Fig. 2 Flow chart of visibility prediction based on RMOS method

度在不同预报时效的 TS 评分,36 h 预报时效内 RMOS 相对于 DMO 在不同季节、不同等级、不同时效上都表现出更好的预报效果,1 km 以下级别预报改进最明显。RMOS 预报 TS 评分相对于 DMO 有更明显的日变化特征,在夜间和凌晨低能见度出现次数较多的时次评分较高,中午和下午评分较低。RMOS 预报的 TS 相对于 DMO 的提高也显示出日变化特征,最大值出现在 05 时,最小值在 14 时和 17 时。值得注意的是,秋季 RMOS 1 km 以下级别的能见度预报 TS 评分没有明显的日变化特征,这可能与秋季易发生大范围持续性的平流雾,低能见度天气日变化特征较弱有关(林建等,2008)。

DMO 和 RMOS 预报在不同季节显示出不同的预报性能。DMO 预报春、夏季节优于秋、冬季节,在 1 km 和 2 km 以下级别夏季明显优于其他季节。RMOS 预报是秋、冬季节优于春、夏季节,且冬季明

显优于其他季节,夏季相对较差。不同季节 RMOS 相对于 DMO 预报 TS 评分几乎均有提高,而冬季预报提升明显,特别在 1 km 以下级别上提升最为明显。对比冬季 RMOS 和 DMO 能见度预报的 Bias 评分(图 4)可以发现,DMO 很大程度上低估了事件的发生,不同级别的能见度预报范围都明显小于实况;对于 10 km 和 5 km 以下级别的能见度事件, RMOS 订正后预报范围略大于实况,但对于 1 km 和 2 km 以下级别的较低能见度事件,由于局地性较强, RMOS 订正后预报范围较实况偏大一些,也不难理解。冬季 RMOS 相对于 DMO 提高最为明显,主要是因为冬季大气环流相对于其他季节更稳定,数值模式的环流形势及要素预报较好,加上冬季能见度在四个季节中平均最低(林建等,2008;张利等,2011),低能见度样本多, RMOS 方法所建模型预报稳定,从而可得到更好的预报。

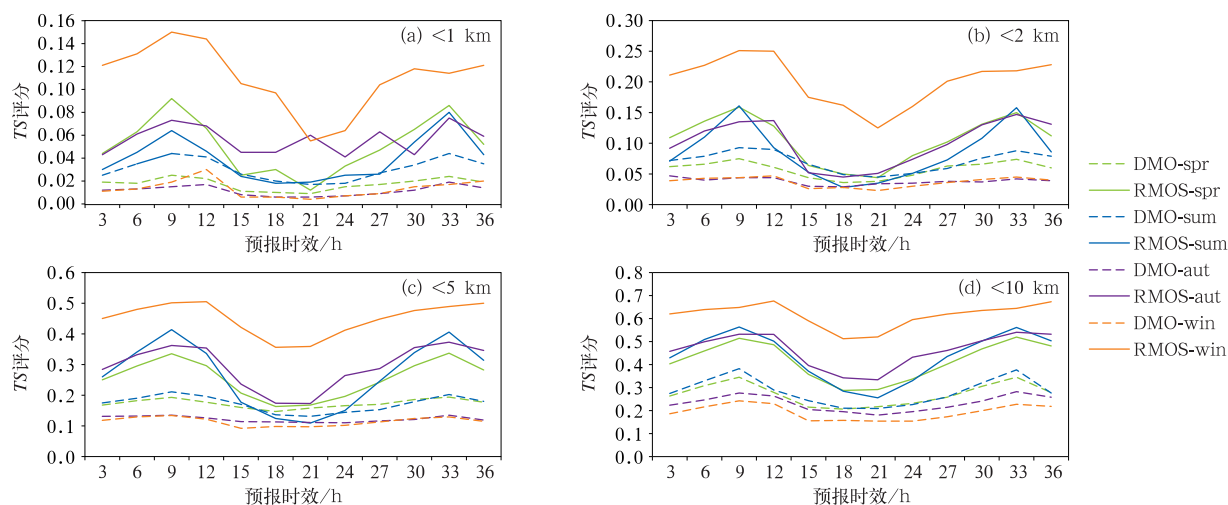


图3 2020年全国不同季节(a~d)不同等级RMOS和DMO不同预报时效的TS评分
(spr, sum, aut, win 分别代表春、夏、秋、冬)

Fig. 3 TS scores of RMOS and DMO forecast projection hour (a—d) for different levels and seasons in China in 2020
(spr, sum, aut and win represent spring, summer, autumn and winter, respectively)

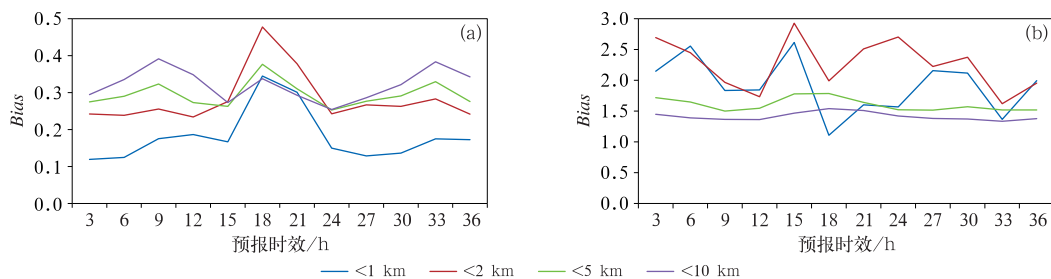


图4 2020年全国冬季各等级(a)DMO, (b)RMOS不同预报时效Bias评分

Fig. 4 (a) DMO and (b) RMOS forecast projection hour bias scores at different levels in China in the winter of 2020

夏季大部分预报时效 RMOS 预报相对于 DMO 有很大改进, 5 km 以下级别 11—17 时的预报 TS 评分略低于 DMO, 但 RMOS 的预报偏差 Bias 优于 DMO(图略)。从图 5 可以看到, 四个季节中伴有降水的低能见度事件发生频率均在 14 时前后达到峰值, 但夏季下午的低能见度伴有降水的比例最高达 70% 以上, 和刘承晓等(2017)的研究结论“7—8 月与降水相关的低能见度相对集中在午后 13—15 时”是一致的, 可见夏季午后的低能见度天气很多是由降水引起。刘西川等(2010)研究发现, 降水粒子对能见度的影响受降水粒子类型、密度、速度、大小等多种因素影响, 二者关系并不唯一确定, 而能见度仪的观测前提是假定整个大气是均匀的, 当大气均匀时代表性好, 反之亦然。因此, 能见度自动观测仪在出现降水时测量准确度不高(刘惠兰等, 2014; 司鹏和高润祥, 2015)。RMOS 方法预报是由实况观测和模式产品统计后处理得到, 如果实况观测不稳定必定会影响统计预报效果。

4.2 高频因子分析

不同分区不同等级的预报模型都是基于相同的预报因子群, 模型最终选出与预报对象对应的最优因子组合, 因此最终入选方程的预报因子会存在差异。对四个季节区域方程进行因子频数统计分析,

可以考察因子对方程的贡献。表 3 和表 4 给出了四个季节模型中不同预报等级因子频数前十位的因子, 总体上看, 高频因子涵盖模式过去 3 小时内 10 m 阵风、能见度因子和温、压、湿、风等基本因子以及反映下垫面热状况的反照率、与稳定度有关的相当位温垂直切变、气压梯度、锋生函数、位涡等因子以及 3 h 变温、温度平流等因子。

由于能见度和边界层条件密切相关, 能见度预报模型所选频数较高因子几乎均为低层因子, 模式过去 3 小时内 10 m 阵风、能见度、2 m 最大相对湿度和风速基本因子稳居前列, 很多文献阐述了这些因子对能见度的重要性(宗晨等, 2019; 丁一汇和柳艳菊, 2013; 张利娜等, 2008; 程叙耕等, 2013; 李霞和王胜利, 2012; 叶堤等, 2006)。由于不同季节不同等级能见度的成因有所不同, 因此统计得到的高频影响因子也不尽相同。

春、秋、冬季低能见度天气常伴有辐射雾, 主要发生在晴朗、微风、近地层水汽充沛的夜间和早晨。这个时间天空没有云层阻挡, 地面散热快, 近地层空气温度迅速下降, 如果空气中存在较多水汽, 就会过饱和形成雾, 所以, 除了模式的过去 3 小时内 10 m 阵风和能见度因子, 2 m 相对湿度、2 m 最大相对湿度因子排名也比较靠前。

四个季节中夏季的能见度预报与降水有统计意

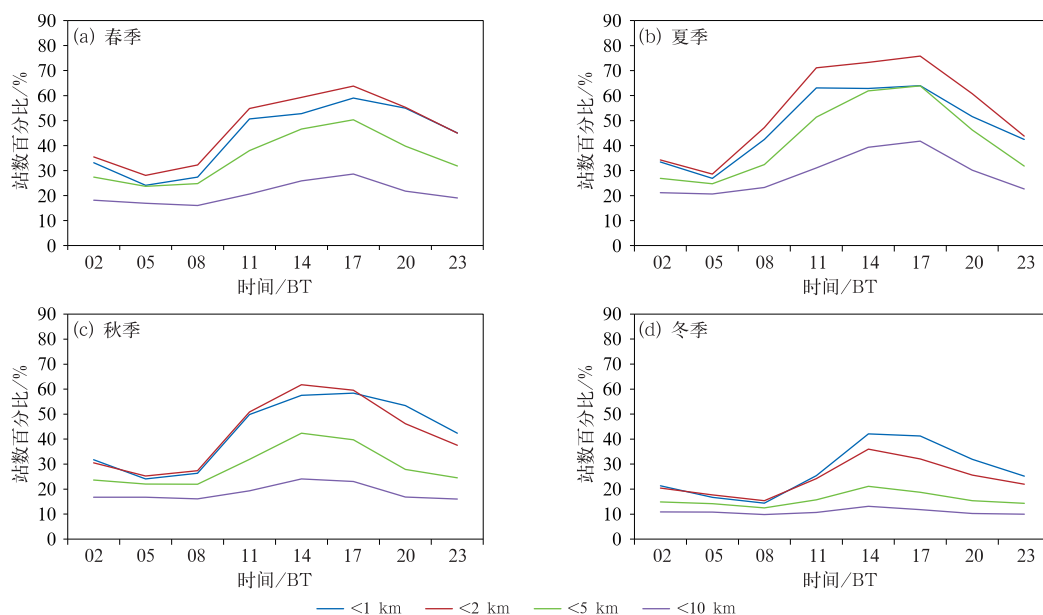


图 5 2020 年全国(a~d)不同季节各等级能见度中伴有降水的站数占总站数百分比的日变化

Fig. 5 Daily variation of the percentage of stations with precipitation to total stations in visibility of different levels in (a—d) different seasons in 2020 in China

义上的高相关,包括湿层厚度(相对湿度 $\geq 90\%$ 的高度层数)、整层水汽含量以及表征不稳定的 700 hPa Ky 指数等与降水相关的因子,这跟 4.1 节分析的夏季午后的低能见度天气通常是由降水(伴有降水的比例最大达 70%以上)引起的观点高度一致。

低层的变温和温度平流是影响春季能见度的主要因子,低层温度的迅速降低有利于水汽快速达到饱和,从而有利于雾的形成。微弱的低层暖平流的不断输入,非常有利于近地层逆温的重建和维持,平流过程对大雾天气的长时间维持具有重要作用,而当伴随负温度平流南下的偏北风的爆发则有利于大雾的消散。

地表反照率因子在春、夏季相对于秋、冬季被选入频次更多,特别是对低能见度天气影响较大。地表反照率是反映地表对太阳短波辐射反射特性的物

理参量,反照率效应使地表接收的短波辐射减少,地面增温效应显著减小,从而阻碍了大雾过程的消散,使大雾天气得以维持。

地面气压梯度在春、秋、冬季作为预报模型高频因子,可能跟它反映梯度风的大小或锋区强度有关。由于锋生作用产生浅层抬升,有利于饱和湿空气的凝结以及近地层逆温的长时间维持,易造成锋前雾的形成。冬季,地面均压场容易导致低能见度辐射雾的形成(林建等,2008)。

近地层相当位温的垂直切变在秋、冬季节被统计为高影响因子,它包含了温度和湿度的垂直变化,表征近地面层湍流活动和边界层大气的稳定度。冬季,低层位涡被列入低能见度预报十大高频因子之一,这可能跟位涡下传及地面气旋发展相关。

除了低层因子外,秋季 100 hPa 经向风的平方,

表 3 不同季节 10 km 以下能见度预报建模因子频数排序

Table 3 The frequency ranking of forecast modeling factors for visibility below 10 km in different seasons

序号	春季	夏季	秋季	冬季
1	过去 3 小时内 10 m 阵风	相对湿度 $\geq 90\%$ 的高度层数	能见度	过去 3 小时内 10 m 阵风
2	能见度	能见度	过去 3 小时内 10 m 阵风	2 m 最大相对湿度
3	2 m 最大相对湿度	地表反照率	2 m 最大相对湿度	2 m 相对湿度
4	y 方向的地面气压水平梯度	整层水汽含量	950 hPa 温度平流	2 m 露点温度
5	2 m 相对湿度	1000 hPa 风速	1000 hPa 相当位温垂直切变	整层水汽含量
6	100 hPa 3 h 变高	24 小时有无降水	100 hPa 经向风的平方	2 m 平均相对湿度
7	900 hPa 3 h 变温	1000 hPa 相对湿度	相对湿度 $\geq 90\%$ 的高度层数	900 hPa 相当位温垂直切变
8	1000 hPa 风速	过去 3 小时内 10 m 阵风	2 m 相对湿度	能见度
9	900 hPa 温度平流	700 hPa Ky 指数	y 方向的地面气压水平梯度	地面气压
10	地面气压的水平梯度	1000 hPa 相邻 3 时次最大相对湿度	925 hPa 相当位温垂直切变	y 方向的地面气压水平梯度

表 4 不同季节 1 km 以下能见度预报建模因子频数排序

Table 4 The frequency ranking of forecast modeling factors for visibility below 1 km in different seasons

序号	春季	夏季	秋季	冬季
1	2 m 相对湿度	相对湿度 $\geq 90\%$ 的高度层数	能见度	过去 3 小时内 10 m 阵风
2	过去 3 小时内 10 m 阵风	1000 hPa 相对湿度	过去 3 小时内 10 m 阵风	2 m 相对湿度
3	能见度	整层水汽含量	1000 hPa U 偏差风	2 m 最大相对湿度
4	2 m 最大相对湿度	能见度	2 m 最大相对湿度	2 m 露点温度
5	y 方向的地面气压水平梯度	1000 hPa 风速	2 m 相对湿度	2 m 平均相对湿度
6	1000 hPa 风速	1000 hPa 相邻 3 时次平均相对湿度	100 hPa 经向风的平方	能见度
7	2 m 平均相对湿度	地表反照率	1000 hPa 相对湿度	地面气压
8	1000 hPa 相对湿度	24 小时有无降水	925 hPa 相当位温垂直切变	900 hPa 相当位温垂直切变
9	地表反照率	700 hPa Ky 指数	600 hPa 锋生函数	900 hPa 位涡
10	1000 hPa 3 h 变温	x 方向的地面气压水平梯度	x 方向的地面气压水平梯度	1000 hPa y 方向的比湿水平梯度

春季 100 hPa 3 h 变高也为高频因子。当对流层上部西风急流存在,高空风速在大气的动能、热量、水汽和气溶胶等能量和物质输送、交换中发挥着关键作用。高空风速特征,对于地面天气的时空分布和动力过程具有重要作用。城市和区域污染物、粉尘

和花粉的扩散和传输也依赖高空风(任国玉等,2009;邹进上等,1990)。

不同等级所选的十大高频因子大部分相同,只是排序上有些变化,但是在秋、冬季的 1 km 以下级别偏差风和位涡因子是有别于 10 km 以下级别的

高频因子,这可能跟秋、冬季静稳天气造成的低能见度有关。

5 结论与讨论

本文基于2008—2018年能见度实况观测资料,采用REOF分解方法对不同季节的能见度进行客观天气分区。以2017—2019年ECMWF模式输出、相关诊断量及站点观测资料分别作为预报因子和预报量,利用MLR、REEP、判别分析等综合算法,针对不同季节的能见度进行区域建模,并应用到区域内的站点上进行预报。

对2020年的能见度预报进行对比检验发现,RMOS和DMO能见度预报TS评分的日变化特征明显,在夜间和凌晨评分较高,下午评分较低。不同季节、不同等级RMOS预报TS评分相对于DMO均有提高。冬季1 km以下级别预报评分提升最为明显,RMOS订正了DMO低能见度预报低估现象,TS提高最大值出现在05时,最小值在14时和17时。

对预报因子统计分析显示,影响能见度的高频因子主要是与边界层条件密切相关的温、压、湿、风等基本因子以及反映下垫面热状况因子、降水相关因子、稳定性及辐射冷却作用的因子,并且不同季节、不同等级能见度预报被选入的高频因子不同。低层的变温和温度平流是影响春季的主要因子;地表反照率对春、夏季低能见度影响较大;夏季与降水相关的因子选入频次最多,包括降水量、湿层厚度、整层水汽含量等;秋、冬季反映边界层温湿度垂直变化的不稳定因子在能见度预报中也非常重要。

本文仅以数值模式产品及诊断量作为预报因子来建立短期能见度预报的统计模型,要解决低能见度空报率相对较大的问题,还应考虑大气成分等因子的应用。另外,对于短时预报来说,预报因子中还可加入雷达、卫星及地面气象及环境观测要素产品,以提高预报效果。

参考文献

程叙耕,何金海,车慧正,等,2013. 1980—2010年中国区域地面风速对能见度影响的地理分布特征[J]. 中国沙漠,33(6):1832-1839. Cheng X G, He J H, Che H Z, et al, 2013. Impact of surface wind speed on atmospheric visibility and its geographic pattern over China in 1980—2010[J]. J Desert Res, 33(6):1832-1839(in Chinese).

丁一汇,柳艳菊,2013. 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, 2013. 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, 57(1):36-46(in Chinese).

郭进修,王秀荣,王维国,2006. 中国气象地理区划手册[M]. 北京:气象出版社. Guo J X, Wang X R, Wang W G, 2006. Handbook of Meteorological Geographical Regionalization in China[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

洪全,2003. 重庆市大气能见度变化趋势及影响因子[J]. 重庆大学学报,26(5):151-154. Hong Q, 2003. The trend of visibility and its affecting factors in Chongqing[J]. J Chongqing Univ, 26(5):151-154(in Chinese).

胡海川,张恒德,朱彬,等,2018. 神经网络方法在环渤海能见度预报中的应用分析[J]. 气象科学,38(6):798-805. Hu H C, Zhang H D, Zhu B, et al, 2018. Application analysis of neural network method in visibility forecast of coastal cities around Bohai Sea[J]. J Meteor Sci, 38(6):798-805(in Chinese).

黄楚惠,王彬雁,陈朝平,等,2019. 近10年四川盆地低能见度时空分布特征及订正方法研究[J]. 高原山地气象研究,39(4):67-73. Huang C H, Wang B Y, Chen C P, et al, 2019. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of low visibility over the last ten years in Sichuan Basin, China and correction methods for model forecasts[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 39(4):67-73(in Chinese).

黄嘉佑,1990. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社. Huang J Y, 1990. Meteorological Statistical Analysis and Forecasting Methods[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

李建华,崔宜少,李爱霞,2010. 山东半岛及其近海大雾的统计与分析[J]. 海洋预报,27(6):51-56. Li J H, Cui Y S, Li A X, 2010. Statistics and analysis of heavy fog in Shandong Peninsula and its offshore areas[J]. Mar Forecasts, 27(6):51-56(in Chinese).

李霞,王胜利,2012. 1980—2007年新疆地区能见度的变化特征及其影响因子研究[J]. 沙漠与绿洲气象,6(3):14-20. Li X, Wang S L, 2012. Variation characteristics in atmospheric visibility and their effective factors in Xinjiang during 1980—2007[J]. Desert Oasis Meteor, 6(3):14-20(in Chinese).

林建,杨贵名,毛冬艳,2008. 我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J]. 气候与环境研究,13(2):171-181. Lin J, Yang G M, Mao D Y, 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns[J]. Climatic Environ Res, 13(2):171-181(in Chinese).

刘承晓,周建平,翟振芳,等,2017. 2011—2015年安徽省高速公路低能见度变化特征[J]. 气象科技,45(5):858-863. Liu C X, Zhou J P, Zhai Z F, et al, 2017. Distributional characteristics of low visibility in expressways over Anhui Province[J]. Meteor Sci Technol, 45(5):858-863(in Chinese).

刘惠兰,周静,朱华亮,等,2014. 自动观测与人工观测能见度的差异性分析及检验[J]. 安徽农业大学学报,41(3):485-490. Liu H

- L, Zhou J, Zhu H L, et al, 2014. Difference analysis and test of horizontal visibility between automatic observation and manual observation[J]. *J Anhui Agric Univ*, 41(3): 485-490 (in Chinese).
- 刘西川, 高太长, 刘磊, 等, 2010. 降水现象对大气消光系数和能见度的影响[J]. *应用气象学报*, 21(4): 433-441. Liu X C, Gao T C, Liu L, et al, 2010. Influences of precipitation on atmospheric extinction coefficient and visibility[J]. *J Appl Meteor Sci*, 21(4): 433-441 (in Chinese).
- 路婵, 2010. 大气污染物与气象条件对长沙城市能见度的影响分析[D]. 长沙: 中南大学. Lu C, 2010. Effects of air pollutants and meteorological conditions on visibility [D]. Changsha: Central South University (in Chinese).
- 任国玉, 张爱英, 王颖, 等, 2009. 我国高空风速的气候学特征[J]. *地理研究*, 28(6): 1583-1592. Ren G Y, Zhang A Y, Wang Y, et al, 2009. Climatology of upper wind speeds over China[J]. *Geogr Res*, 28(6): 1583-1592 (in Chinese).
- 司鹏, 高润祥, 2015. 天津雾和霾自动观测与人工观测的对比评估[J]. *应用气象学报*, 26(2): 240-246. Si P, Gao R X, 2015. A comparative evaluation on automatic and manual observations of fog and haze in Tianjin[J]. *J Appl Meteor Sci*, 26(2): 240-246 (in Chinese).
- 王淑英, 张小玲, 徐晓峰, 2003. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析[J]. *气象科技*, 31(2): 109-114. Wang S Y, Zhang X L, Xu X F, 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing[J]. *Meteor Sci Technol*, 31(2): 109-114 (in Chinese).
- 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. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistics Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 吴波, 胡邦辉, 王学忠, 等, 2017. 基于近似支持向量机的能见度释用预报研究[J]. *热带气象学报*, 33(1): 104-110. Wu B, Hu B H, Wang X Z, et al, 2017. Visibility forecast based on proximal support vector machine[J]. *J Trop Meteor*, 33(1): 104-110 (in Chinese).
- 郗兴文, 2010. 山东内陆秋冬季大雾形成的气候特征[J]. *安徽农业科学*, 38(15): 7971-7973. Xi X W, 2010. The climate features of autumn and winter fog in Shandong Inland[J]. *J Anhui Agric Sci*, 38(15): 7971-7973 (in Chinese).
- 熊亚军, 廖晓农, 李梓铭, 等, 2015. KNN数据挖掘算法在北京地区霾等级预报中的应用[J]. *气象*, 41(1): 98-104. Xiong Y J, Liao X N, Li Z M, et al, 2015. Application of KNN data mining algorithm to haze grade forecasting in Beijing[J]. *Meteor Mon*, 41(1): 98-104 (in Chinese).
- 叶堤, 蒋昌潭, 王飞, 2006. 重庆市市区大气能见度变化特征及其影响因素分析[J]. *气象与环境学报*, 22(6): 6-10. Ye D, Jiang C T, Wang F, 2006. Characteristics of atmospheric visibility and its controlling factors in Chongqing[J]. *J Meteor Environ*, 22(6): 6-10 (in Chinese).
- 张利, 吴润, 张武, 2011. 1955—2000年中国能见度变化趋势分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 47(6): 46-55. Zhang L, Wu J, Zhang W, 2011. Analysis of visibility variations in China from 1955 to 2000[J]. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 47(6): 46-55 (in Chinese).
- 张利娜, 张朝林, 王必正, 等, 2008. 北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析[J]. *大气科学*, 32(6): 1229-1240. Zhang L N, Zhang C L, Wang B Z, et al, 2008. Evolution characteristics of atmospheric visibility in the Beijing expressway and the corresponding physical analysis[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(6): 1229-1240 (in Chinese).
- 张自银, 赵秀娟, 熊亚军, 等, 2018. 基于动态统计预报方法的京津冀雾霾中期预报试验[J]. *应用气象学报*, 29(1): 57-69. Zhang Z Y, Zhao X J, Xiong Y J, et al, 2018. The fog/haze medium-range forecast experiments based on dynamic statistic method[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(1): 57-69 (in Chinese).
- 赵翠光, 赵声蓉, 2011. 华北及周边地区夏季分区客观降水预报[J]. *应用气象学报*, 22(5): 558-566. Zhao C G, Zhao S R, 2011. The regional objective precipitation forecast in North China and adjacent areas in summer[J]. *J Appl Meteor Sci*, 22(5): 558-566 (in Chinese).
- 赵声蓉, 赵翠光, 邵明轩, 2009. 事件概率回归估计与降水等级预报[J]. *应用气象学报*, 20(5): 521-529. Zhao S R, Zhao C G, Shao M X, 2009. Regression estimate of event possibility and precipitation categorical forecast[J]. *J Appl Meteor Sci*, 20(5): 521-529 (in Chinese).
- 周贺玲, 田晓飞, 王建军, 2007. 廊坊市能见度的变化规律及影响因子分析[J]. *资源与产业*, 9(5): 111-113. Zhou H L, Tian X F, Wang J J, 2007. Analysis on variety regulation and influence factors of air visibility in Langfang City[J]. *Resour Ind*, 9(5): 111-113 (in Chinese).
- 周开鹏, 黄萌, 樊旭, 等, 2020. 基于逐步回归和神经网络的北京市能见度预报对比[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 56(4): 522-526. Zhou K P, Huang M, Fan X, et al, 2020. Visibility forecast based on the neural network and multiple stepwise regression in Beijing[J]. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 56(4): 522-526 (in Chinese).
- 宗晨, 钱玮, 包云轩, 等, 2019. 江苏省夏季浓雾的时空分布特征及气象影响因子分析[J]. *气象*, 45(7): 968-977. Zong C, Qian W, Bao Y X, et al, 2019. Temporal-spatial variations of summer heavy fog and its meteorological influence factors in Jiangsu Province[J]. *Meteor Mon*, 45(7): 968-977 (in Chinese).
- 邹进上, 江静, 王梅华, 1990. 高空气候学[M]. 北京: 气象出版社. Zou J S, Jiang J, Wang M H, 1990. High-Altitude Climatology[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- Allett T, 2004. Linate crash report[J]. *Airports Int*, 37(3): 24-25.
- Antolik M S, 2000. An overview of the National Weather Service's centralized statistical quantitative precipitation forecasts[J]. *J Hydrol*, 239(1-4): 306-337.
- Benjamin S G, Dévényi D, Weygandt S S, et al, 2004. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC[J]. *Mon Wea Rev*, 132(2): 495-518.

- Cattell R B, 1966. The scree test for the number of factors[J]. *Multivariate Behav Res*, 1(2):245-276.
- Dallavalle J P, Erickson M C, Maloney J C III, 2004. Model output statistics (MOS) guidance for short-range projections[C]//Preprints, 20th Conf. on Weather Analysis and Forecasting/16th Conf. on Numerical Weather Prediction.
- Glahn H R, Lowry D A, 1972. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 11(8):1203-1211.
- Gultepe I, Milbrandt J A, 2010. Probabilistic parameterizations of visibility using observations of rain precipitation rate, relative humidity, and visibility[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(1):36-46.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al, 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives[J]. *Pure Appl Geophys*, 164(6):1121-1159.
- Herman G R, Schumacher R S, 2016. Using reforecasts to improve forecasting of fog and visibility for aviation[J]. *Wea Forecasting*, 31(2):467-482.
- Smirnova T G, Benjamin S G, Brown J M, 2000. Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility forecasts[C]//Preprints, Ninth Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Orlando, FL: Amer Meteor Soc; 31-36.
- Weiss M, Ghirardelli J, 2005. A summary of ceiling height and total sky cover short-term statistical forecasts in the Localized Aviation MOS Program (LAMP) [C] // Preprints, 21st Conf. on Weather Analysis and Forecasting/17th Conf. on Numerical Weather Prediction. Washington, DC: Amer Meteor Soc.
- Wilks D S, 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* [M]. 3rd ed. Oxford: Academic Press.

(本文责编:俞卫平)