

## 青岛近海海雾预报多模式对比分析及误差订正

顾瑜, 时晓曦\*

(青岛市气象局, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 利用2018—2021年4—8月青岛气象自动观测站资料、ECMWF细网格模式资料、CMA-SH9模式资料及中国海洋大学区域大气与海洋短期实时预报系统模式,对比分析不同月份和不同天气形势下青岛近海各模式能见度产品效果预报。结果表明:在青岛雾季的不同月份,各模式的能见度预报效果有差距,整个雾季预报中,中国海洋大学模式最优,其次为CMA-SH9模式,ECMWF模式的预报效果最差。ECMWF模式的能见度预报较实况偏大,漏报率较高,与另外两个模式的差距明显,CMA-SH9模式和中国海洋大学模式的能见度预报较实况偏低,预报的雾日较实况偏多,漏报率较低但空报率较高。出雾时,当天气形势为低压倒槽型、锋面型、均压场型时,中国海洋大学模式的能见度总体预报效果最优,当天气形势为高压底部型时,CMA-SH9模式最优。运用线性回归方法、非线性回归方法和对数回归方法分别对各模式进行误差订正,对比发现非线性回归方法的订正效果最好,修正后ECMWF模式的准确率提高最为明显。

**关键词:** 青岛;海雾;能见度模式;误差订正

**中图分类号:** P732.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)03-0001-08

### 0 引言

海雾是指海上由于水汽凝结产生大量水滴,导致大气水平能见度小于1 km的天气现象。海雾是一种较为常见的灾害性天气,会对海陆空的交通、作业等产生严重影响<sup>[1]</sup>。雾的形成、扩散和消亡是微物理机制、热力和动力过程等因素复杂作用的结果,包括湿空气的冷却、热源和湿空气的混合、植被覆盖状况、水平风和垂直风特征、热力和水汽同下垫面(土壤、水面)之间能量和物质交换等。青岛濒临黄海,是世界上几个重要的海雾多发地区之一。海雾有着明显的海域性和季节性特征,夏季山东半岛南部附近海域的海雾发生频率达到峰值<sup>[2-5]</sup>,青岛雾季一般从4月开始,8月结束,海雾日数占青岛市总雾日数的58%。随着社会的发展,青岛作为我国北方重要的沿海城市、中国最早开创和发展气象科

技的三大城市(香港、上海、青岛)之一,人们对海雾的关注程度越来越高,同时近年来各种大型活动增多,对海雾预报的需求也明显提高,2018年上海合作组织峰会和2019年海军建军70周年阅兵期间的气象保障服务也很好体现了海雾精细化预报的重要性。

海雾通常在夜间生成,覆盖范围较广,具有一定的持续性和移动性,而海上观测站较少,常规观测资料稀疏,这使得海雾预报难度较大。目前国内外各种模式在海雾能见度预报的准确性和稳定性方面,较其他气象要素的预报仍有一定差距,不同模式在不同区域和不同时间尺度下,对海雾的预报适用性也有所不同。数值模式预报产品在气象预报业务中具有重要参考作用,近年来很多学者开展了数值模式预报效果检验研究。刘志杰等<sup>[6]</sup>建立了一种新的融合了相对湿度和液态水含量的能见度

收稿日期: 2023-07-03。

基金项目: 环渤海区域气象科技协同创新基金项目(QYXM202110);青岛市气象局海洋气象研发重点项目(2019qdxqz02);中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2020-072);青岛市气象局科研课题(2021qdxqx08)。

作者简介: 顾瑜(1992-),男,工程师,硕士,主要从事海雾研究。E-mail: lanbo\_wj@163.com

\*通信作者: 时晓曦(1987-),女,正研级高工,博士,主要从事海雾和大气边界层研究。E-mail: shi198710@126.com

算法,能较好地表征出黄渤海沿岸大雾等级的分布和变化;刘慧等<sup>[7]</sup>研究发现,随着能见度的降低,各模式的预报能力逐渐下降,各模式对日平均能见度的预报普遍偏大;傅刚等<sup>[8]</sup>利用中尺度数值天气预报和大气模拟模式 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 对黄海海域一次海雾事件进行了研究,计算出的大气水平能见度分布与卫星云图所显示的雾区范围吻合很好;陆雪等<sup>[9]</sup>对 WRF 模式 (Weather Research and Forecasting Model) 参数化方案敏感性研究发现,边界层方案对 WRF 模式的雾区模拟起决定作用,而微物理方案则影响较小;尹晓惠等<sup>[10]</sup>对 BJ-RUC 模式在北京一次大雾天气过程中的预报性能进行检验,结果表明该模式对能见度相关要素的预报与实况基本一致;赵诗童等<sup>[11]</sup>对 3 种夜间陆地雾反演方法进行研究,发现秋季和冬季的反演效果最好;杨巧兰等<sup>[12]</sup>在对 2014—2016 年珠海能见度的数值预报检验中发现,在低能见度时,模式预报值与观测值接近,而高能见度时模式预报值明显偏低。在目前研究中,针对青岛近海海雾能见度模式预报效果检验工作开展较少,对模式误差的订正能力也有待提升。本文通过研究对比几种常用的海雾预报模式在不同月份和不同海雾类型下的预报效果,总结其表现特征并制定误差订正方案,为实际业务中的海雾预报提供一定参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 实况资料

本文针对青岛雾季多模式海雾预报进行研究,收集并整理了 2018—2021 年雾季(4—8 月)青岛海雾多发区域的能见度要素观测数据(时间间隔为 1 h),数据来源于沿岸 5 个气象自动观测站(青岛、崂山、黄岛、奥帆中心、太平角)及近海 2 个气象自动观测站(朝连岛、大公岛)。观测站站点位置见图 1。

### 1.2 模式资料

欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)全球数值细网格模式每日运行两次(起报时间为 08 时和 20 时,北京时,下同),水平分辨率为  $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。中国气象局上海数值预报模式系统(China Meteorological Administration-Shanghai 9 km, CMA-SH9)是



图 1 站点位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of station location

基于第一代华东区域数值预报模式系统(Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System, SMS-WARR)改进升级而成,于 2014 年 6 月开始业务试运行。SMS-WARR 模式的初始场为 GFS (Global Forecasting System) 分析场,通过高级数据同化系统(Advanced Data Assimilation System, ADAS)同化了雷达、地面、探空等多种资料,每日运行两次(起报时间为 08 时和 20 时),水平分辨率为  $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 。该模式基于区域天气模式预报的雾等水成物(云水、云冰、雨水、雪)预报结果,利用消光经验算法,实现能见度(VIS)客观预报。具体算法为:  $VIS = -\ln(0.02) / \beta_{\text{ext}}$ , 式中  $\beta_{\text{ext}}$  代表总消光系数,可由水、雨水、云冰、雪的质量浓度计算得出。中国海洋大学区域大气与海洋短期实时预报系统(简称中国海洋大学模式)基于 WRF 模式,每天运行两次(起报时间为 08 时和 20 时)。该模式采用了基于湿度信息的能见度算法(A-F 算法),相较其他模式,该算法结合了自适应鱼群算法(Adaptive Fish Warm Algorithm, AFWA)与少样本学习(Few-Shot Learning, FSL)算法的优点<sup>[13]</sup>。模式设置初始的同化窗为 6 h,采用循环 3DVAR 同化方案,以 3 h 为间隔循环同化 3 次,背景误差采用 CV6,预报时长为 84 h,预报结果 3 h 输出一次。模式区域采用 3 层嵌套, D01 和 D02 采用双向嵌套, D03 采用 Ndown 单向嵌套,水平分辨率为  $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 。这 3 种模式均可以直接输出能见度产品,在本研究中,选取的能见度模式资料数据均为 20 时起报,时间间隔为 3 h,预

报时效为24~48 h。

### 1.3 个例选取标准

本文参考 Tardif<sup>[14]</sup>对海雾个例的选取方法和标准,结合青岛地区的海雾特点,在所选取的7个站点中,如果存在至少1个站点连续6 h的能见度小于1.6 km,则记为一次雾过程,模式产品连续2个时次的能见度预报均小于1.6 km,则记为一次雾预报,同时结合静止卫星云图,根据雾区生成地点及雾区移动方向,综合判别该次雾过程是否为海雾。

## 2 各模式预报效果对比分析

### 2.1 评分函数选取

本文对各模式的能见度预报效果对比分析主要运用风险评分(TS)、空报率(FAR)、漏报率(MAR)、命中率(POD)、偏差评分(BAS)和预报准确率(PC)6种评分函数,计算方法见表1、表2。

表1 评分函数说明

Tab.1 Explanation of scoring function

情况	预报无雾	预报有雾
实况无雾	ND	NB
实况有雾	NC	NA

表2 评分函数计算方法

Tab.2 Scoring function calculation method

评分函数	计算方法
风险评分	$TS=NA/(NA+NB+NC)$
空报率	$FAR=NB/(NA+NB)$
漏报率	$MAR=NC/(NA+NC)$
命中率	$POD=NA/(NA+NC)$
偏差评分	$BAS=(NA+NB)/(NA+NC)$
预报准确率	$PC=(NA+ND)/(NA+NB+NC+ND)$

### 2.2 各模式不同月份预报效果对比

对2018—2020年雾季(4—8月)按月份进行分析,可以得到不同月份各模式不同评分函数(见图

2),其中蓝色、红色、绿色实线分别对应ECMWF模式、CMA-SH9模式以及中国海洋大学模式。图(a)、(d)、(e)、(f)分别表示风险评分、命中率、偏差评分和准确率,均代表正向评分,这意味着雷达图范围越大,模式预报效果越好,而(b)和(c)表示的空报率和漏报率为反向评分,即雷达图范围越小,模式预报效果越好。雷达图结果表明,除了图2b和2c,绿色实线均总体包含红色和蓝色实线,蓝色实线范围最小,而图2b和2c的雷达图范围总体呈现出蓝色>红色>绿色的趋势,这意味着中国海洋大学模式的正向评分项总体高于其他两个模式,负向评分项总体低于其他两个模式,CMA-SH9模式次之,ECMWF模式的正向预报评分最低。

从时间维度来看,不同月份下不同模式的预报性能与总体趋势存在一定差异。具体表现为:4—6月6种评分函数的计算结果均为中国海洋大学模式最优,其次为CMA-SH9和ECMWF模式,说明中国海洋大学模式的预报效果优于CMA-SH9模式和ECMWF模式;7月除空报率外,其他指标的计算结果均为CMA-SH9模式最优,中国海洋大学模式次之,ECMWF模式最差,而中国海洋大学模式的空报率(47.4%)略低于CMA-SH9模式(47.5%),ECMWF模式的空报率最高(61.1%),说明7月各模式的总体预报效果为CMA-SH9模式最优,中国海洋大学模式次之,ECMWF模式最差;8月中国海洋大学模式除偏差评分的1.77低于CMA-SH9模式的2.22,其余5项评分均为最高,因此预报效果最好,另外两个模式的不同评分各有高低,预报效果相近。

图3为雾季各模式评分函数的总体表现,结合雷达图分析可以看到,在整个雾季,中国海洋大学模式的风险评分为0.52、空报率为48.2%、漏报率为13.3%、命中率为86.7%、准确率为77.5%,各项均为最优,仅偏差评分的1.69略低于CMA-SH9模式的1.70,ECMWF模式的偏差评分最低,为0.78,这是由于ECMWF模式能见度预报结果普遍较实况的偏大程度较高,表明其预报的雾日少于实况,因此其命中率也偏低;相反,中国海洋大学模式和CMA-SH9模式的偏差评分较高,表明其预报雾日远多于实况,因此两种模式的命中率也较高。



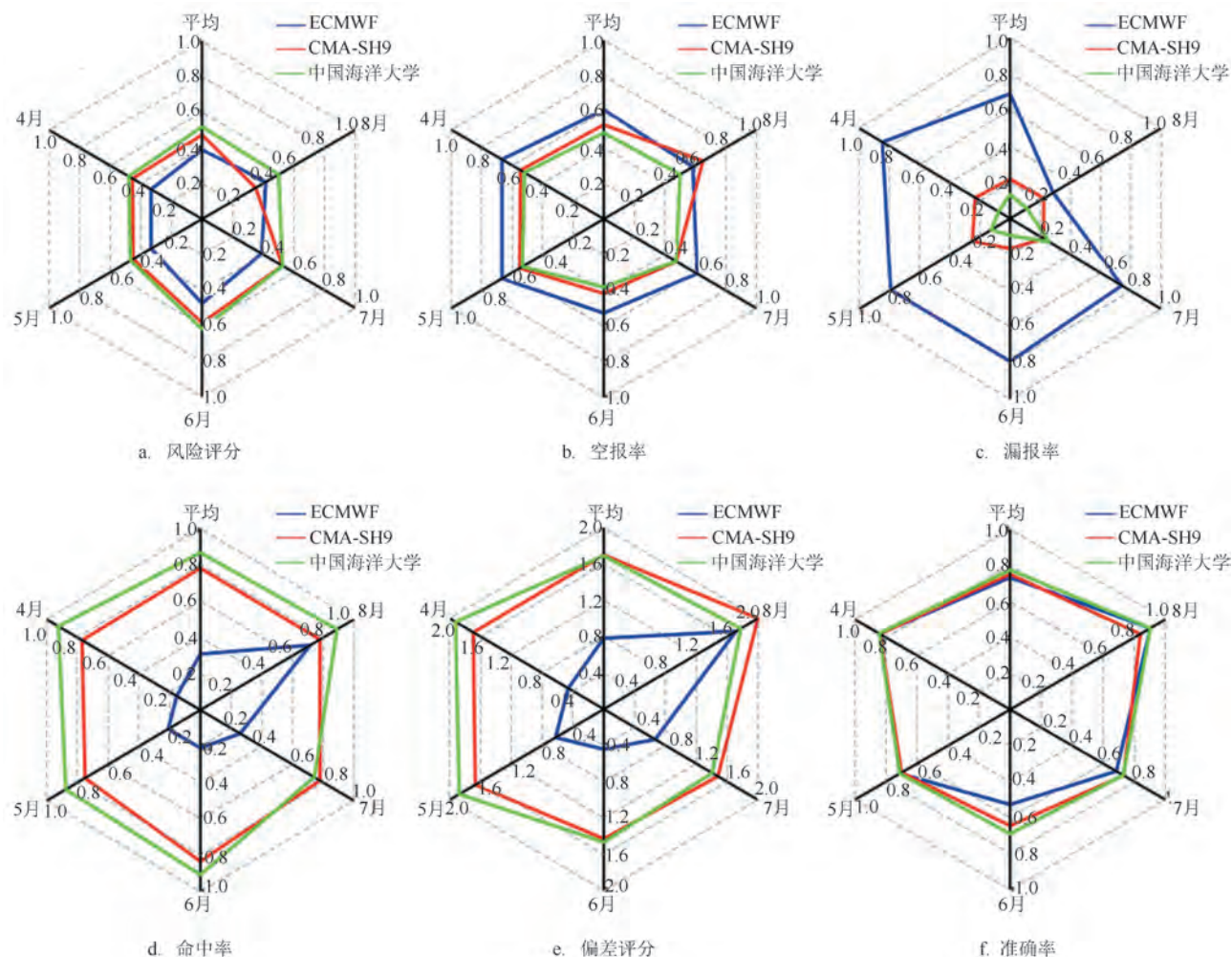


图2 2018—2020年4—8月各模式评分结果

Fig.2 Scores for each mode from April to August 2018

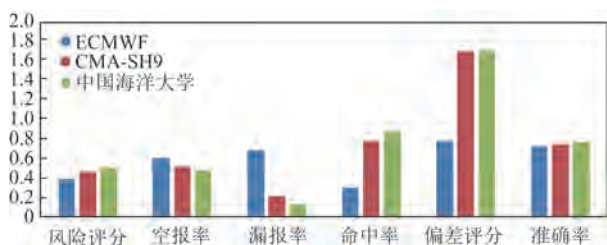


图3 2018—2020年雾季各模式评分函数

Fig.3 Scoring functions for various modes during the 2018—2020 fog season

### 2.3 不同天气形势下各模式预报效果对比

将2018—2020年实况雾过程按天气形势进行

分类,分为低压倒槽型、锋面型、高压底部型、均压场型4种类型。在多数天气形势下,中国海洋大学模式评分显著高于其他两个模式(图略),所有天气形势下ECMWF模式评分显著低于其他两个模式,这与2.2节得到的部分结论相一致。从不同天气形势来看,出雾时天气形势为低压倒槽型的占比最高,达到46%,其次为均压场型(23%)、锋面型(16%),高压底部型占比最低,为15%。通过对比不同形势场下雾季各模式命中率(见图4)可以发现,当雾过程天气形势为低压倒槽型、锋面型和均压场型时,中国海洋大学模式的命中率最高,CMA-SH9模式次之,ECMWF模式最差;当雾过程天气形势为高压底部型时,CMA-SH9模式的命中率最高,其次

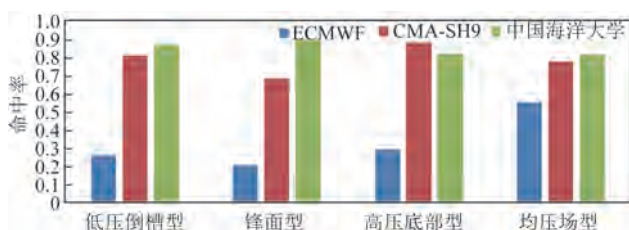


图4 2018—2020雾季各模式命中率

Fig.4 Probability of detection during the 2018—2020 fog season for each mode

为中国海洋大学模式和ECMWF模式。

### 3 各模式误差分析及订正

#### 3.1 误差分析

通过对各模式能见度的预报误差研究发现,当没有雾时,能见度实况与模式预报结果的差距较大,因此挑选出有雾个例,研究有雾时能见度实况与模式预报的误差,从而体现各模式在雾预报时的误差特征。稳定性和准确性是衡量预报模式的重要参考,因此通过绘制箱线图来分析各模式能见度预报结果与实况误差。箱线图能够直观体现样本点分布的总体位置和离散程度,箱子的中心位置代表不同模式预报的误差均值,箱子中心位置越接近0,表示该模式的预报误差越小,效果越好;而箱子长短则代表不同模式预报的误差分布,箱子长度越短,表示该模式的预报误差分布越集中,预报越稳定,预报效果越好。如图5所示,当实况有雾时,各模式的能见度平均误差均大于零,说明模式预报较实况偏大。ECMWF模式预报误差的箱线图中心位置最高,中国海洋大学模式的中心位置最低,说明ECMWF模式平均误差最大,CMA-SH9模式次之,中国海洋大学模式最小。从填色部分的箱体大小可以看出,箱线图长度由大到小依次为ECMWF模式、CMA-SH9模式和中国海洋大学模式,这意味着3种模式预报误差的离散程度依次降低,说明中国海洋大学模式的预报稳定性相对较高,CMA-SH9模式次之,而ECMWF模式最低。ECMWF模式为大尺度全球模式,因此在中小尺度预报上较中尺度模式存在一定的不足,可能是造成这种误差结果的原因之一,后续可以从与能见度相关的气象要素入手,寻找其内在联系。

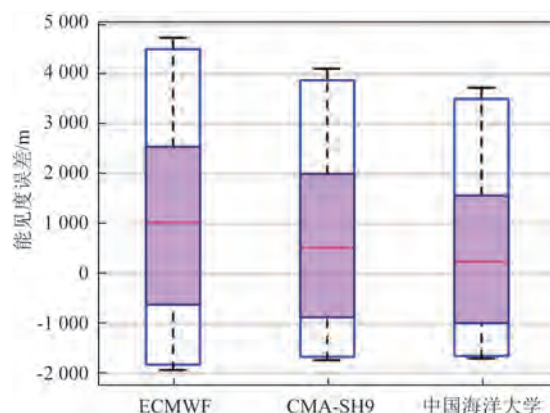


图5 各模式能见度预报与实况误差箱线图

Fig.5 Box plot of visibility prediction and actual error for each mode

#### 3.2 误差订正

多项式回归即使用多项式拟合的方法来构建回归模型。多项式拟合是根据已知数据找出相应多项式函数的参数,训练集的数据点个数须大于多项式参数个数,拟合过程实际上是一个超解线性方程组的求解过程。若多项式曲线外推模型的次数较高,则会出现“龙格现象”,即为了极限缩小误差使用高次多项式拟合,导致拟合曲线在样本点表现良好但在样本点范围外误差极大<sup>[14-16]</sup>。本文选取的多项式模型最高次数为2,分别构建线性回归模型、非线性模型(二次多项式回归模型)、对数回归模型来检验效果并选取最优结果。3种模型的基本形式为:

$$y_x = a + bx, x = x_0, x_1, \dots \quad (1)$$

$$y_x = a + bx + cx^2, x = x_0, x_1, \dots \quad (2)$$

$$y_x = a + b \ln x, x = x_0, x_1, \dots \quad (3)$$

式中: $y$ 为订正后的能见度(单位:m), $x$ 为订正前的能见度(单位:m), $a, b, c$ 为无量纲的系数。对各模式运用线性模型,订正后结果为:

$$y = 0.31x - 104.51 \quad (4)$$

$$y = 0.48x - 138.17 \quad (5)$$

$$y = 0.35x + 70.05 \quad (6)$$

对各模式运用非线性模型,订正后结果为:

$$y = -0.00056x^2 + 1.85x - 1095.8 \quad (7)$$

$$y = 0.00062x^2 - 0.74x + 347.16 \quad (8)$$

$$y = 0.00075x^2 - 0.89x + 424.87 \quad (9)$$



对各模式运用对数模型,订正后结果为:

$$y = 439.39 \ln x - 2841.8 \quad (10)$$

$$y = 344.79 \ln x - 2004.7 \quad (11)$$

$$y = 202.78 \ln x - 960.04 \quad (12)$$

挑选 2021 年 4—8 月青岛近海雾个例,将 3 种订正方案的能见度模式预报结果与实况进行对比,发现订正效果最好的为非线性订正方案。经非线性订正方案订正后,各模式的预报结果与实况的平均误差较订正前均有明显改善(见图 6),ECMWF 模式的订正效果尤为显著。订正后 ECMWF 模式预报结果较实况偏高,CMA-SH9 模式和中国海洋大学模式预报结果较实况偏低。尽管订正后提升效果最好的为 ECMWF 模式,但整体预报效果仍为中国海洋大学模式最好,CMA-SH9 模式次之,ECMWF 模式最差,可能原因是箱线图显示的中国海洋大学模式较高的预报稳定性在建立的订正模型中仍可传递。

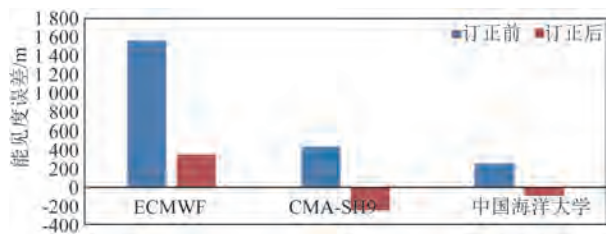


图 6 非线性模型订正前后模式预报平均误差对比

Fig.6 Comparison of average error of model prediction before and after nonlinear model correction

## 4 结论与展望

本文对比分析了 ECMWF 模式、CMA-SH9 模式和中国海洋大学模式的海雾能见度预报产品在不同月份和不同天气形势下的预报性能和误差特征。结论如下:

①各模式对青岛雾季不同月份的能见度预报效果有差距,最好的为中国海洋大学模式,其次是 CMA-SH9 模式,ECMWF 模式相对较差。4—6 月中国海洋大学模式最优,其次为 CMA-SH9 模式和 ECMWF 模式,7 月 CMA-SH9 模式最优,中国海洋大学模式次之,ECMWF 模式最差,8 月中国海洋大学模式最优,另外两个模式的预报效果差距不大。

②ECMWF 模式的能见度预报较实况偏大,漏

报率较高,与另外两个模式的差距明显,这是由于 ECMWF 模式的能见度预报结果普遍较实况偏大的程度较高,这在偏差评分上也有体现(小于 0.8); CMA-SH9 模式和中国海洋大学模式的能见度预报较实况偏低,预报雾日远多于实况,因此命中率较高。

③根据低压倒槽型、锋面型、高压底部型、均压场型 4 种不同天气形势下雾过程的对比研究发现,当雾过程天气形势为低压倒槽型、锋面型和均压场型时,各模式的命中率排名为中国海洋大学模式最优,ECMWF 模式最差,当雾过程天气形势为高压底部型时,CMA-SH9 模式的命中率最高,其次为中国海洋大学模式,ECMWF 模式最低。

④当实况有雾时,ECMWF 模式的能见度预报平均误差最大,CMA-SH9 模式次之,中国海洋大学模式最小。运用线性模型、非线性模型和对数模型分别对各模式进行误差订正,发现非线性模型的修正效果最好,订正后 ECMWF 模式预报效果的提升最为明显。

整体对比 3 种模式预报可以看到,中国海洋大学模式的能见度预报明显优于另外两个模式,在不同月份和不同天气形势下,其能见度预报效果基本均为最优,仅在雾季的 7 月较 CMA-SH9 模式略微偏差,但仍优于 ECMWF 模式,因此中国海洋大学模式具有很大的参考价值。本文通过研究得出了 3 种模式能见度预报产品的误差特征,但未对造成这种误差特征的原因进行深入分析,后续可从与能见度相关的气象要素入手寻找其内在联系。本文针对 3 种模式不同月份的表现特征进行了误差订正,订正后的模式预报产品后续可按月份开展进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.  
WANG B H. Sea fog[M]. Beijing: China Ocean Press, 1983.
- [2] 李建华, 崔宜少, 李爱霞. 山东半岛及其近海大雾的统计与分析[J]. 海洋预报, 2010, 27(6): 51-56.  
LI J H, CUI Y S, LI A X. Statistics and analysis of heavy fog over the Shandong Peninsula and its adjacent seas[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(6): 51-56.
- [3] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(3): 359-366.  
ZHANG S P, BAO X W. The main advances in sea fog research in China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(3): 359-366.

- [4] ZHANG S P, XIE S P, LIU Q Y, et al. Seasonal variations of Yellow Sea fog: observations and mechanisms[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(24): 6758-6772.
- [5] 丁做尉, 张苏平, 白慧, 等. 黄海雾季开始日期的确定及其年际变化[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(4): 11-18.
- DING Z W, ZHANG S P, BAI H, et al. Identification of the beginning of the sea-fog season over Yellow Sea and its annual variation[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(4): 11-18.
- [6] 刘志杰, 王炜, 赵玥, 等. 一种能见度融合方法在黄渤海区域雾数值预报中的应用[J]. *海洋预报*, 2021, 38(3): 59-67.
- LIU Z J, WANG W, ZHAO Y, et al. The application of an enhanced fusion algorithm for visibility in assessing the sea fog level in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(3): 59-67.
- [7] 刘慧, 饶晓琴, 张恒德, 等. 全国环境气象业务模式对比检验分析[C]//2016年全国重大天气过程总结和预报技术经验交流会. 北京: 中国气象学会, 中国气象局, 2016.
- LIU H, RAO X Q, ZHANG H D, et al. Comparative verification of national environmental meteorological operational models[C]//Beijing: Chinese Meteorological Society, China Meteorological Administration, 2016.
- [8] 傅刚, 王菁茜, 张美根, 等. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究——以2004年4月11日为例[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(5): 720-726.
- FU G, WANG J Q, ZHANG M G, et al. An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow Sea on 11 April, 2004[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(5): 720-726.
- [9] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄海海雾WRF参数化方案敏感性研究[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(3): 312-320.
- LU X, GAO S H, RAO L J, et al. Sensitivity study of WRF parameterization schemes for the spring sea fog in the Yellow Sea [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(3): 312-320.
- [10] 尹晓惠, 时少英, 邓长菊. 北京一次大雾天气成因分析及模式预报性能检验[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(1): 149-152.
- YIN X H, SHI S Y, DENG C J. Analysis of heavy fog process and model prediction test in Beijing[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(1): 149-152.
- [11] 赵诗童, 时晓曦, 吴晓京, 等. 三种经典夜间陆地雾遥感反演方法的适用性对比分析[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(1): 45-57.
- ZHAO S T, SHI X M, WU X J, et al. Applicability comparison of three classical remote sensing retrieval methods for nighttime land fog[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2021, 41(1): 45-57.
- [12] 杨巧兰, 夏冬, 王静. 2014—2016年珠海能见度的模式预报检验[J]. *广东气象*, 2021, 43(4): 33-36.
- YANG Q L, XIA D, WANG J. Verification of visibility model forecasts in Zhuhai from 2014 to 2016[J]. *Guangdong Meteorology*, 2021, 43(4): 33-36.
- [13] 田云菲, 杨悦, 高山红. 一个黄渤海海雾大气水平能见度算法[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(2): 24-33.
- TIAN Y F, YANG Y, GAO S H. An algorithm of atmospheric horizontal visibility associated with sea fog over the Yellow and Bohai Seas[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2019, 39(2): 24-33.
- [14] TARDIF R M. Characterizing fog and the physical mechanisms leading to its formation during precipitation in a coastal area of the northeastern United States[D]. Denver: University of Colorado, 2007.
- [15] 戚非, 闫勇, 田应. 基于MATLAB的多项式拟合[J]. *实验室科学*, 2006(5): 63-65.
- QI F, YAN Y, TIAN Y. Polynomial fit and interpolation of physical experiment data[J]. *Laboratory Science*, 2006(5): 63-65.
- [16] SCHOENFELD D. Partial residuals for the proportional hazards regression model[J]. *Biometrika*, 1982, 69(1): 239-241.

## Comparative analysis and error correction of multiple models for sea fog forecasts in the Qingdao coastal area

GU Yu, SHI Xiaomeng\*

(Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** This paper uses the data of Qingdao Meteorological Automatic Observation Station, ECMWF fine grid model, CMA-SH9 model and Ocean University of China Regional Atmospheric and Oceanic Short term Real time Forecast System from April to August during 2018—2021 to compare and analyze the visibility forecasting products in the Qingdao coastal area in different months and under different weather situations. The conclusions

are as follows: The visibility forecasts of each model vary in different months of fog season. The Ocean University of China model has the best forecasting effect in the whole fog season, followed by the CMA-SH9 model, and the ECMWF model has the worst forecasting effect. The visibility forecasts of the ECMWF model are larger than the actual situation, and there is a high rate of missing reports, which is significantly different from the other two models. The visibility forecasts of the CMA-SH9 model and Ocean University of China model are lower than the actual situation, and the forecast fog days are more than the actual situation. Although the rate of missing reports is low, the rate of false reports is high. The overall visibility forecasting effect of the Ocean University of China model is the best when the weather situation is low pressure inverted trough type, front type and pressure equalizing field type, and the CMA-SH9 model is the best when the weather situation is high pressure bottom type. The linear regression method, nonlinear regression method and logarithmic regression method are used to correct the errors of each model. The comparison shows that the nonlinear regression method has the best correction effect, and the accuracy of the modified ECMWF forecast has the most obvious improvement.

**Key words:** Qingdao; sea fog; visibility mode; error correction