

高荣珍,李欣,时晓曦,等. 基于 WRF 模式的青岛近海能见度算法比较研究[J].海洋气象学报,2018,38(2):28-35.  
Gao Rongzhen, Li Xin, Shi Xiaomeng, et al. Comparative study on three algorithms of the visibility in Qingdao offshore areas based on WRF model[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(2):28-35. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.02.004. (in Chinese)

## 基于 WRF 模式的青岛近海能见度算法比较研究

高荣珍<sup>1,2</sup>,李欣<sup>1</sup>,时晓曦<sup>1</sup>,任兆鹏<sup>1</sup>,郝燕<sup>1</sup>,戴京笛<sup>3</sup>

(1. 青岛市气象局,山东 青岛 266003; 2. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心,山东 青岛 266003; 3. 淄博市气象局,山东 淄博 255000)

**摘要:** 采用 GFS 背景场资料和 ADAS 资料同化系统,使用 WRF 模式对 2014—2016 年青岛近海 17 个海雾个例进行了模拟,分析了 3 种能见度算法的预报效果。结果表明, FSL (Forecast Systems Laboratory) 算法对于沿海站、岸基站雾的预报较 SW99 (Steoltinga and Warner 1999) 算法有优势; 对于海岛站而言, SW99 算法则优于 FSL 算法。混合算法 CVIS (Combined Visibility) 较单一算法预报雾准确率有所提高。3 种能见度算法基本上是高估能见度的, SW99 算法能见度预报均方根误差最大。另外, SW99 算法对沿海站、岸基站雾开始时间预报较实况多偏晚, 结束时间预报较实况多偏早, 持续时间预报较实况多偏短。

**关键词:** WRF; 能见度预报; 青岛近海海雾; SW99 算法; FSL 算法; CVIS 算法

**中图分类号:** P732.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)02-0028-08

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.02.004

## Comparative study on three algorithms of the visibility in Qingdao offshore areas based on WRF model

GAO Rongzhen<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, SHI Xiaomeng<sup>1</sup>, REN Zhaopeng<sup>1</sup>, HAO Yan<sup>1</sup>, DAI Jingdi<sup>3</sup>

(1. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China; 2. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266003, China; 3. Zibo Meteorological Bureau, Zibo 255000, China)

**Abstract** Based on GFS background data and ARPS Data Assimilation System, visibility forecasts of 17 offshore sea fog cases in Qingdao from 2014 to 2016 are analyzed using the WRF model and three visibility algorithms in this paper. The results show that the FSL algorithm has advantages over the SW99 algorithm in forecasting the fog and its start time for coastal stations and shore-based stations, while the latter is better than the former for island stations. The hybrid CVIS algorithm improves the forecast accuracy of fog compared to single algorithm. The three algorithms basically overestimate the visibility, and the SW99 algorithm has the maximum root mean square error in the visibility forecast. In addition, by the SW99 algorithm for coastal stations and shore-based stations, the start time of fog forecast is basically later than the actual time, the end time of forecast earlier, and the duration of forecast shorter.

**Key words** WRF; visibility forecast; the offshore sea fog in Qingdao; the SW99 algorithm; the FSL algorithm; the CVIS algorithm

收稿日期:2018-02-27; 修订日期:2018-04-02

基金项目:山东省气象科学研究所数值天气预报应用技术开放研究基金项目(SDQXKF2014Z03)

作者简介:高荣珍,女,博士,高级工程师,主要从事中短期天气预报及海雾相关预报研究,gaorz0@163.com。

## 引言

海雾是海面上大气水平能见度(简称能见度)降低到 1 km 以下的天气现象<sup>[1]</sup>。海雾形成后,大多数向下风向扩展,可影响到沿海地区,给海上和沿海地区的交通、各种海上作业带来严重影响。黄海是我国几个边缘海中海雾出现频率最高的海区<sup>[2]</sup>,青岛位于黄海之滨,每年 4—7 月频受海雾影响<sup>[3]</sup>,准确预报海雾的发生及大气低能见度的演变至关重要。

海雾的预报方法主要有天气学方法、统计预报方法以及数值预报方法<sup>[4]</sup>,均在我国沿海地区海雾的业务预报中取得了一定成效<sup>[3,5-9]</sup>,尤其是随着数值预报技术的快速发展,通过在数值模式后处理模块中增加雾的诊断算法,我国初步建立了黄渤海、华东沿海海雾数值预报系统,为沿海地区海雾预报业务提供了技术支撑<sup>[8-9]</sup>。数值预报方法可以实现海雾及大气低能见度的精细化预报,弥补了天气学以及统计学方法预报海雾的不足,但由于海上观测资料的匮乏以及海雾形成物理过程的复杂性,海雾预报准确率以及能见度精细化预报水平仍有待不断提高。能见度演变属于复杂的大气光学现象,导致其变化的直接原因是大气中气溶胶的变化,而气溶胶的变化是受气象条件和气象要素所制约的<sup>[10]</sup>。因此,海雾及能见度预报的准确性一方面取决于模式对与海雾形成的相关气象要素的预报准确性,另一方面取决于基于气象要素的能见度算法。国外学者根据当地观测资料提出了多种能见度算法,最常用的算法是基于能见度和液态水含量的经验关系<sup>[11-15]</sup>,经验公式系数略有差异,傅刚等<sup>[16]</sup>对黄海水雾的个例研究表明,不同经验公式计算的能见度差异较小。此外,还有算法基于相对湿度<sup>[17]</sup>或相对湿度与温度露点差<sup>[18]</sup>实现能见度计算。上述能见度算法都是利用当地观测资料确定的, Bang et al.<sup>[19]</sup>以及林艳等<sup>[20-21]</sup>的研究表明,不同环境条件下,利用数值模式做雾及能见度的预报,需要对能见度算法的适用性做进一步检验。

本文利用 WRF 模式对 2014—2016 年青 岛近海雾个例的模拟结果,根据 3 种算法分别计算了能见度,旨在研究当数值模式及其所用初始场已经确定的前提下每种算法的能见度预报情况,以确定一个适用于本地的能见度算法。

## 1 数据及能见度算法简介

### 1.1 观测资料

所用数据包括 2014—2016 年高空、地面常规气象观测资料以及沿海站青岛站、岸基站太平角站和海岛站潮连岛站等 3 个自动站(图 1)逐小时气象观测资料。其中,青岛站为国家基准气候站,经纬度为 36.07°N、120.33°E,海拔高度 76 m,相对海洋距离在 2 km 以内;太平角站为岸基站,经纬度为 36.05°N、120.37°E,海拔高度 25 m,相对海洋距离在 50 m 以内;潮连岛站为海岛站,经纬度为 35.89°N、120.88°E,海拔高度 52 m,距离青岛站 50 km 左右。太平角站和潮连岛站均为区域自动站,是上海长望公司 DZZ3 型 6 要素(风、温、压、湿、能见度和降水)自动气象站;青岛站为 DZZ4 型 7 要素自动站,增加了露点温度观测。这 3 个站能见度情况基本可以代表青岛近海海域及沿海地区的海雾情况。

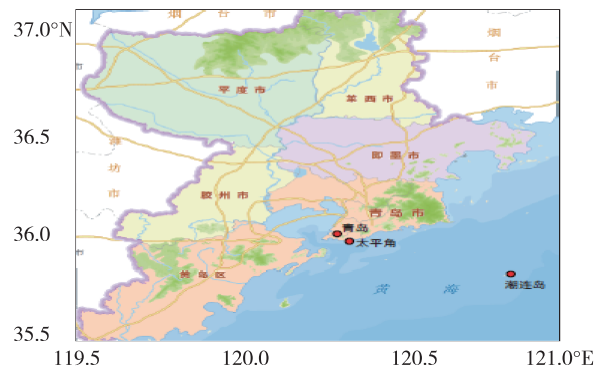


图 1 自动气象站分布(红实心圆为青岛站、太平角站、潮连岛站所在位置)

Fig.1 Distribution of automatic meteorological stations (Red solid circles for locations of Qingdao Station, Taipingjiao Station and Chaolian Island Station)

基于天气形势以及能见度小于 1 km、风向为偏南风、有雾时无强降雨等条件初步挑选了 25 个海雾个例(表 1)。就这 25 个个例而言,太平角站海雾持续时间较其他两站要偏长,持续时间平均为 15 h,青岛站持续时间最短平均为 10 h;从最小能见度来看太平角站海雾最强,一般每次过程最小能见度为 0.1 km 左右。

### 1.2 模式预报系统简介

所用模式为 WRF V3.3,模式覆盖区域 110~140°E,25~45°N,水平分辨率为 9 km,模式背景场为 GFS 全球模式预报,模式结果逐时输出,其他参数设置见表 2。模式采用了 ADAS (ARPS Data

Assimilation System) 即中尺度预报模式 ARPS 的数据同化系统<sup>[22]</sup>, 这是一个能同化常规、非常规资料的中尺度分析系统, 最初由俄克拉荷马州立大学开发, 2009 年上海台风所引进到华东区域数值预报模式系统 SMB-WARMS<sup>[9]</sup>。ADAS 采用了 Bratseth 连续迭代方法、微物理调整系统和复杂云分析系统,

对地面观测、探空资料、雷达资料等进行同化和三维云分析。本文中 ADAS 同化的观测数据包括模式范围内探空观测和地面气象站观测(包括常规天气观测 SYNOP, 船舶观测 SHIP, 机场地面报 METAR, 浮标 BUOY 等), 为模式提供初始场, 空间分辨率为 9 km。

表 1 25 个海雾个例日期及各站雾起止时间、持续时间和最小能见度

Table 1 The date, start and end time, duration and minimum visibility of 25 selected sea fog cases

个例号	雾日 (yyyymmdd)	雾起止时间 (ddhh)			雾持续时间/h			最小能见度/km		
		青岛	太平角	潮连岛	青岛	太平角	潮连岛	青岛	太平角	潮连岛
1	20140402	0204—0209	0204—0219	0205—0210	5	15	5	0.1	0.1	0.3
2	20140409	0817—0904	0816—0903	0818—0904	11	11	10	0.2	0.1	0.3
3	20140410	0915—1006	0908—1007	0916—1007	15	23	15	0.1	0.1	0.2
4	20140411	1021—1107	1017—1106	1019—1100	10	13	5	0.2	0.1	0.3
5	20140511	1109—1113	1108—1114	1110—1115	4	6	5	0.1	0.2	0.1
6	20140525	2419—2508	2418—2507	2419—2510	13	13	15	0.1	0.1	0.1
7	20140626	2603—2608	2603—2612	2607—2609	5	9	2	0.2	0.1	0.6
8	20140720	1919—2006	1908—2006	1919—1920	11	22	1	0.1	0.1	0.6
9	20150501	3017—0110	3014—0110	3009—0109	17	20	24	0.2	0.1	0.1
10	20150502	0118—0205	0113—0204	0113—0217	11	15	28	0.2	0.1	0.1
11	20150525	2421—2506	2421—2506	2423—2508	9	9	9	0.1	0.1	0.2
12	20150530	2920—3007	2915—3006	2920—3009	11	15	13	0.2	0.1	0.1
13	20150601	0106—0118	0107—0118	0107—0113	12	11	6	0.2	0.1	0.3
14	20150602	0204—0208	0205—0300	0205—0215	4	19	10	0.3	0.1	0.6
15	20150608	0721—0810	0721—0812	0722—0814	13	15	16	0.3	0.2	0.1
16	20150609	0818—0911	0815—0917	0814—0911	17	26	21	0.1	0.1	0.1
17	20150610	0920—1014	0914—1014	0920—1012	18	24	16	0.2	0.1	0.1
18	20150611	1020—1104	1020—1104	1100—1109	8	8	9	0.1	0.1	0.1
19	20150616	—	1522—1616	1600—1613	0	18	13	2.4	0.1	0.1
20	20150710	0922—0923	1006—1010	1004—1006	1	4	2	0.5	0.1	0.2
21	20160227	2622—2709	2623—2709	2621—2706	11	10	9	0.1	0.1	0.1
22	20160317	1702—1713	1702—1715	1702—1714	11	13	12	0.2	0.2	0.1
23	20160318	1719—1810	1719—1810	1718—1812	15	15	18	0.1	0.1	0.1
24	20160409	0822—0909	0823—0920	0903—0916	11	21	13	0.1	0	0.1
25	20160413	1300—1308	1300—1320	1302—1320	8	20	18	0.1	0.1	0.1
平均					10	15	12	0.3	0.1	0.2

表 2 WRF 模式参数设置

Table 2 Parameter settings for WRF model

参数	参数设置
微物理过程	WSM6 类冰雹方案 <sup>[23]</sup>
长波辐射方案	RRTM 方案 <sup>[24]</sup>
短波辐射方案	Dudhia 方案 <sup>[25]</sup>
近地面层方案	Monin-Obukhov 方案 <sup>[26]</sup>
陆面过程方案	Noah 陆面过程方案 <sup>[27]</sup>
边界层方案	YSU 方案 <sup>[28]</sup>
积云参数化方案	未采用积云参数化方案

### 1.3 能见度算法

选用的 3 种能见度算法如下。

1) Steolinga and Warner (SW99) 算法。

SW99 算法<sup>[12]</sup>基于液态水含量, 液态水含量包括云水 ( $cw$ )、云冰 ( $ci$ )、雨水 ( $rw$ )、雪水 ( $sn$ ) 混合, 综合考虑了多种水凝性物质对消光系数的影响, 即:

$$vis(km) = \frac{-\ln(0.02)}{144.7cw^{0.88} + 1.1rw^{0.75} + 163.9ci^{1.00} + 10.4sn^{0.78}} \quad (1)$$

本研究利用模式输出的最低层液态水含量计算的能见度<sup>[29]</sup>,该算法当计算的能见度数值大于20 km时,设定能见度为20 km。

### 2) Forecast Systems Laboratory (FSL)算法。

FSL 算法由美国 NOAA 预报系统实验室研发,基于相对湿度  $RH$  和温度露点差<sup>[18]</sup>,即:

$$vis(mile) = 6000 \times \frac{t - t_d}{RH^{1.75}} \quad (2)$$

其中 1mile = 1.609 344 km。该算法当相对湿度为100%时,能见度为0 km。

### 3) CVIS(Combined Visibility)算法。

CVIS 算法是基于 SW99 算法和 FSL 算法的混合算法,同时计算两种能见度,取能见度较小的<sup>[19]</sup>,即:

$$vis(km) = \min(SW99, FSL) \quad (3)$$

## 2 主要结果

### 2.1 模式结果检验及个例剔除

为了解模式结果的可靠性,首先对模式输出的与海雾形成有关的近地面层要素(2 m 温度、10 m 风速以及 2 m 温度露点差和相对湿度)进行了均方根误差(RMSE)检验,另外,也进行了晴雨检验。青岛站观测要素最为齐全,所以检验基于该站进行,每个个例 RMSE 检验时次为实际有雾时次,其公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (4)$$

其中,  $X_{obs,i}$  为  $i$  时次自动站能见度观测值,  $X_{model,i}$  为  $i$  时次该站点能见度预报值,  $n$  为每个个例海雾持续时间。

初选 25 个海雾个例中,2 m 气温 RMSE 介于 0.2~4.8 °C 之间,平均为 2.1 °C;温度露点差预报误差总体上要小于温度预报误差, RMSE 介于 0.1~3.0 °C 之间,平均为 0.7 °C;10 m 风速 RMSE 介于 0.5~5.3 m/s 之间,平均为 2.7 m/s;2 m 相对湿度 RMSE 介于 0.4%~16.4% 之间,平均为 4.4%。庄晓翠等<sup>[30]</sup>指出,均方根误差 < 4.5 个单位可评价要素预报具有参考价值。如图 2 所示,2 m 气温 1 例、10 m 风速 5 例、相对湿度 8 例 RMSE 大于 4.5 个单位。根据能见度计算公式,露点温度差和相对湿度

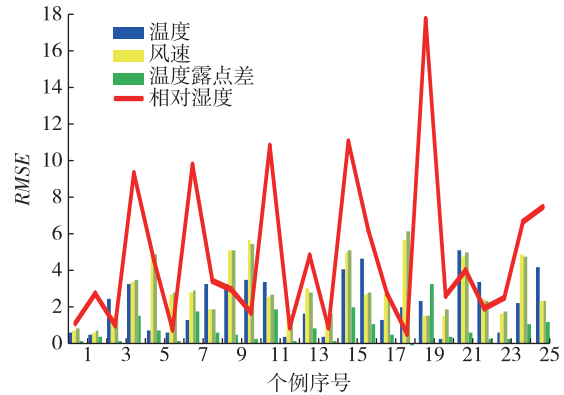


图2 青岛站 25 个初选海雾个例 2 m 气温(单位:°C)、温度露点差(单位:°C)、10 m 风速(单位:m/s)、2 m 相对湿度(单位:%)的均方根误差

Fig.2 RMSE of surface temperature (units: °C) at 2 m, depression of the dew point (units: °C), wind speed (units: m/s) at 10 m and relative humidity at 2 m at Qingdao station based on 25 sea fog cases

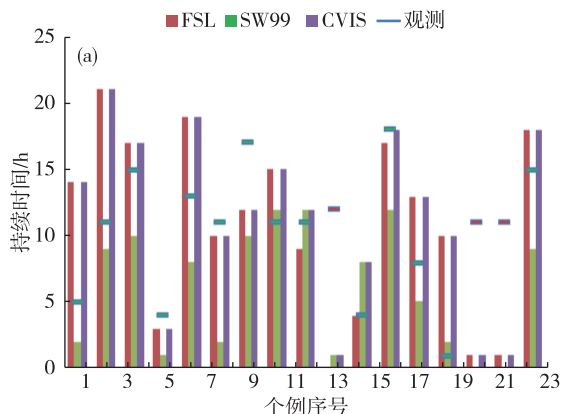
两个要素预报水平对能见度至关重要,所以剔除了这两个要素预报均方根误差大于 4.5 个单位的个例(4、7、11、15、16、19、24、25)。降水检验结果表明,青岛站无降水 15 次,有降水 10 次,其中 1.0 mm 以上降水 3 次,雾出现于降雨接近结束阶段,1.0 mm 及以下降水 7 次,主要为伴随雾出现的毛毛雨。模式预报有雨正确 10 次,预报无雨正确 8 次,空报 7 次,无漏报,可见模式对 72% 个例是预报准确的。雨量预报上,个例 24、25 与实况差异较大,按上面个例剔除标准这两个个例被删除,这样 WRF 模式基本可满足有雾时无强降雨的条件。

### 2.2 海雾预报准确率分析

为了解基于 WRF 模式的各种算法对青岛近海海雾的预报准确性,对所选 17 个个例均进行了有雾、无雾的检验,即对某一站点的某一海雾个例各算法计算的能见度小于 1 km 即预报该站有雾正确,否则为漏报。图 3a、b 分别为青岛站和潮连岛站 17 个海雾个例雾持续时间与不同算法预报的雾持续时间对比,持续时间为 0 表明该算法预报无雾。

所选 17 个海雾个例中,对于青岛站而言(图 3a),FSL 算法、SW99 算法、CVIS 算法漏报次数分别为 1 次、2 次、0 次。CVIS 算法预报准确率为 100%,FSL 算法为 94%,SW99 算法为 88%。对于太平角站(图略),三种算法漏报个例与青岛站相同。对于潮连岛站(图 3b)而言,FSL 算法漏报次数增加到 6 次,而 SW99 算法、CVIS 算法无漏报,这样 FSL 算法预报准确率降为 65%,SW99 算法和 CVIS 算法预报

准确率为 100%。雾有无预报准确率较高,是因为



没有考虑非海雾日时模式及算法的空报个例情况。

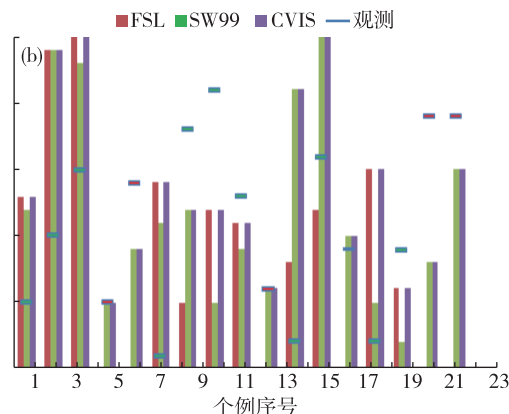


图3 青岛(a)、潮连岛(b)雾实际持续时间与不同算法预报的持续时间对比

Fig.3 Observed and forecast duration of sea fog cases at Qingdao Station (a) and Chaolian Island Station (b)

可见,基于 WRF 模式的不同能见度算法对不同测站预报准确率有所不同。其中, CVIS 算法由于综合考虑了 SW99 算法和 FSL 算法,对 3 个站均无漏报,预报准确率为 100%;对于沿海站青岛站、太平角站而言, FSL 算法略优于 SW99 算法;对于海岛站潮连岛站而言, SW99 算法则明显优于 FSL 算法。 FSL 算法对于沿海站与海岛站这种海雾预报准确率的差异与模式对沿海站的相对湿度预报准确率略高于海岛站有关。以个例 5 为例,基于 FSL 算法计算的能见度可预报青岛站有雾,但是潮连岛站雾漏报(图 3),由图 4 不难发现,潮连岛站相对湿度预报误差明显大于青岛站,而且整个过程中相对湿度预报值始终较观测值偏低,模式对海岛站相对湿度预报的干偏差大于沿海站,导致该站能见度数值较大,从而导致雾漏报。 SW99 算法对于海岛站雾预报的优势,一方面可能是液态水含量的预报差异;另一方面可能是该算法没有考虑气溶胶和霾的影响<sup>[31]</sup>,青岛站距海岸线 2 km 左右,污染较海岛站要重,对能见度降低有一定作用,导致雾的漏报,这仍有待于今后进一步研究。

### 2.3 海雾起止时间、持续时间误差分析

表 3 为雾开始时间误差绝对值、雾结束时间误差绝对值及雾持续时间误差绝对值在不同时段所占比例统计结果。

以开始时间误差绝对值在 6 h 以内比例来看,青岛站 3 种算法 (FSL、SW99、CVIS) 分别为 100%、87%和 94%,太平角站为 87%、60%和 83%,潮连岛站为 72%、82%和 76%;以结束时间误差绝对值在 6 h 以内比例来看,青岛站 3 种算法分别为 75%、87%和 76%,太平角站为 69%、80%和 70%,潮连岛

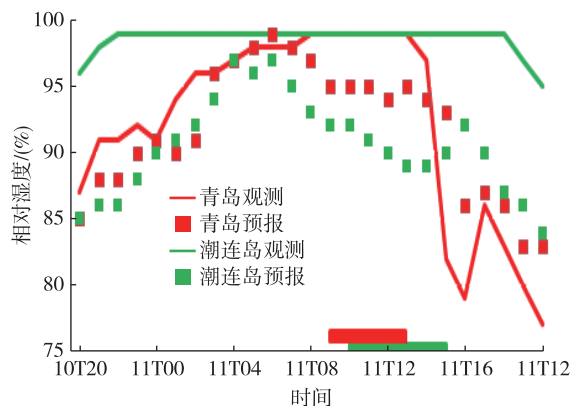


图4 2014年5月11日(个例5)青岛站与潮连岛站相对湿度观测和预报对比(横轴红色、绿色线条分别表示青岛站、潮连岛站有雾时段)

Fig.4 Observed and forecast relative humidity at Qingdao Station and Chaolian Island Station on 11 May 2014 (Case 5) (X-axis: red line for fog time at Qingdao Station, green line for fog time at Chaolian Island Station)

站为 63%、59%和 59%;以持续时间误差绝对值在 6 h 以内比例来看,青岛站 3 种算法分别为 68%、80%和 65%,太平角站为 63%、47%和 65%,潮连岛站为 36%、49%和 48%。可见,基于 WRF 模式的各能见度算法对青岛站雾起止时间、持续时间预报略好于太平角站和潮连岛站;各能见度算法对于雾结束时间预报误差一般大于开始时间预报误差。其中,基于 FSL 算法的青岛站雾开始时间误差绝对值平均最小为 2.4 h;基于 SW99 算法的青岛站雾结束时间误差绝对值平均最小为 3.6 h;基于 SW99 算法的青岛站雾持续时间误差绝对值平均最小为 4.5 h。基于 CVIS 算法的雾起止时间误差、持续时间误差多

介于两个单一算法之间,可见 CVIS 算法在雾起止时间方面较单一算法改进不大。

由雾起止时间比实况早晚次数以及持续时间比实况长短次数来看(表略),SW99 算法对青岛站、

太平角站雾开始时间预报较实况多偏晚,平均分别偏晚 4 h、6 h;而对这两个站雾结束时间预报较实况多偏早,持续时间预报较实况多偏短。

表 3 三站雾开始时间误差绝对值、结束时间误差绝对值和持续时间误差绝对值不同时段所占比例

Table 3 Ratio of the absolute value of errors of the start time, end time and duration of sea fog cases at three stations during different periods %

站点	方法	开始时间误差绝对值 不同时段( <i>t</i> )所占比例					结束时间误差绝对值 不同时段( <i>t</i> )所占比例					持续时间误差绝对值 不同时段( <i>t</i> )所占比例				
		<i>t</i> =0 h	0 h< <i>t</i> ≤2 h	2 h< <i>t</i> ≤6 h	6 h< <i>t</i> ≤12 h	<i>t</i> >12 h	<i>t</i> =0 h	0 h< <i>t</i> ≤2 h	2 h< <i>t</i> ≤6 h	6 h< <i>t</i> ≤12 h	<i>t</i> >12 h	<i>t</i> =0 h	0 h< <i>t</i> ≤2 h	2 h< <i>t</i> ≤6 h	6 h< <i>t</i> ≤12 h	<i>t</i> >12 h
		青岛	FSL	25	38	38	0	0	6	44	25	25	0	6	31	31
	SW99	0	20	67	13	0	20	40	27	13	0	0	27	53	20	0
	CVIS	12	47	35	6	0	12	41	24	24	0	6	24	35	35	0
太平角	FSL	13	13	63	13	0	0	50	19	25	6	0	19	44	31	6
	SW99	0	7	53	33	7	27	20	33	13	7	0	7	40	40	13
	CVIS	12	12	59	18	0	12	41	18	24	6	0	18	47	35	0
潮连岛	FSL	27	9	36	27	0	0	36	27	27	9	0	9	27	27	36
	SW99	12	29	41	18	0	12	29	18	24	18	12	6	29	35	18
	CVIS	18	24	35	24	0	12	29	18	24	18	12	12	24	29	24

### 2.4 能见度均方根误差和偏差检验

为了解基于 WRF 模式不同算法的能见度预报误差情况,分别计算了 3 个站每个海雾个例有雾时段的能见度均方根误差(RMSE, km)和能见度预报偏差(km),如表 4 所示。误差反映了模式及初始场导致的误差以及能见度算法本身的误差。

表 4 三个站 17 个个例平均的 RMSE 和偏差

Table 4 Mean RMSE and mean errors of 17 cases at 3 stations km

方法	站点	RMSE	三站平均	偏差	三站平均
SW99	青岛	13.7		10.5	
	太平角	15.0	12.7	12.3	9.6
	潮连岛	9.3		6.0	
FSL	青岛	1.4		0.7	
	太平角	1.8	1.8	0.9	0.9
	潮连岛	2.2		1.2	
CVIS	青岛	1.5		0.5	
	太平角	1.8	1.7	0.8	0.5
	潮连岛	1.8		0.3	

17 个个例有雾时段 3 站平均 RMSE 结果表明,SW99 算法 RMSE 最大为 12.7 km, FSL 算法和 CVIS

算法 RMSE 较小,分别为 1.8 km、1.7 km。不同算法对不同站能见度预报的误差也存在差异,其中 SW99 算法差异最大,潮连岛站 RMSE 较青岛站和太平角站要偏小,这与 SW99 算法对海岛站上雾预报准确率高于沿海站是一致的。

由平均偏差来看,上述 3 种算法是高估能见度的,尤其是 SW99 算法,能见度预报偏差最大, FSL 算法和 CVIS 算法最小。SW99 算法有雾时段 3 站平均偏差为 9.6 km,主要是由于这种算法计算的能见度突变特征较明显,另外这种算法预报的沿海站、岸基站雾持续时间较实况明显偏短。

### 3 结论与讨论

基于 WRF 模式对青岛近海 17 个海雾个例的模拟结果,采用 3 种不同算法对青岛近海海雾及能见度预报进行了比较研究。通过对模式输出的近地面层气象要素的检验,表明该模式对青岛沿海地区的要素预报具备一定参考价值。

对于所选的 17 个海雾个例,基于 WRF 模式的不同能见度算法对青岛沿海海雾具有不同的预报能力。其中, FSL 算法对于青岛站和岸基站太平角站海雾预报准确率达 94%,较 SW99 算法略有优势;但对于海岛站潮连岛站而言, SW99 算法预报准确

率可达100%,明显优于FSL算法。CVIS算法由于综合考虑了SW99算法和FSL算法,预报准确率为100%。

基于WRF模式的各能见度算法预报的雾起止时间、持续时间与实况一致次数较少,而且起止时间误差、持续时间误差不确定性较大,表明了雾及能见度的精细化预报难度之大。相对而言,各算法对青岛站雾起止时间、持续时间预报略好于太平角站和潮连岛站。另外,基于WRF模式的各能见度算法对于雾结束时间预报误差一般大于开始时间预报误差。CVIS算法在雾起止时间方面较单一算法改进甚微。

SW99算法能见度RMSE最大,相对而言,潮连岛站RMSE较青岛站和太平角站要略偏小,从偏差来看,上述能见度算法基本上是高估能见度的,尤其SW99算法。SW99算法基于液态水含量,由于边界层、微物理过程的复杂性数值模式预报的液态水含量误差较其他常规气象要素预报误差大得多<sup>[32]</sup>,进而导致能见度的误差也较大。鉴于此Zhou and Du<sup>[33]</sup>、Zhou et al.<sup>[29]</sup>、Payra and Mohan<sup>[34]</sup>以及陈东辉等<sup>[7]</sup>分别建立了基于气象要素的多规则雾诊断预报方法。Zhou and Du<sup>[33]</sup>、Zhou et al.<sup>[29]</sup>研究表明,利用模式输出的液态水含量、相对湿度、风速、云顶、云底高度建立的雾的诊断方法,比利用能见度与液态水含量关系诊断雾的预报评分提高了1倍,但这种诊断方法只能识别是否有雾。兼顾雾及能见度的预报,CVIS算法较单一算法有一定的优势,可作为青岛近海海雾及能见度预报行之有效的算法。

## 参考文献:

- [1] 王彬华.海雾[M].北京:海洋出版社,1983:352.
- [2] 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.
- [3] 江敦双,张苏平,陆惟松.青岛海雾的气候特征和预测研究[J].海洋湖沼通报,2008(3):7-11.
- [4] 章国材.中国雾的业务预报和应用[J].气象科技进展,2016,6(2):42-48.
- [5] 胡波,杜惠良,郝世峰,等.一种统计技术结合动力释用的沿海海雾预报方法[J].海洋预报,2014,31(5):82-86.
- [6] 高荣珍,李欣,任兆鹏,等.青岛沿海海雾决策树预报模型研究[J].海洋预报,2016,33(4):80-87.
- [7] 陈东辉,尚子微,宁贵财,等.环渤海地区雾天气分型及预报方法[J].气象,2017,43(1):46-55.
- [8] 黄彬,陈涛,陈炯,等.黄渤海海雾数值预报系统及检验方法研究[J].气象科技,2009,37(3):271-275.
- [9] 徐同,李佳,杨玉华,等.SMS-WARMS V2.0模式预报效果检验[J].气象,2016,42(10):1176-1183.
- [10] 盛立芳,申莉莉,李秀镇,等.水平能见度经验公式在青岛沿海地区的应用[J].中国海洋大学学报,2009,39(5):877-882.
- [11] Gultepe I, Isaac G A, Strawbridge K. Variability of cloud microphysical and optical parameters obtained from aircraft and satellite remote sensing during RACE[J]. Int J Climatol, 2001, 21(4): 507-525.
- [12] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event [J]. J Appl Meteor, 1999, 38(4): 385-404.
- [13] Pinnick R G, Hoihjelle D L, Fernandez G, et al. Vertical structure in atmospheric fog and haze and its effects on visible and infrared extinction[J]. J Atmos Sci, 1978, 35(10): 2020-2032.
- [14] Eldridge R G. The relationship between visibility and liquid water content in fog[J]. J Atmos Sci, 1971, 28(7): 1183-1186.
- [15] Kunkel B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models[J]. J Climate Appl Meteor, 1984, 23(1): 34-41.
- [16] 傅刚,李晓岚,魏娜.大气能见度研究[J].中国海洋大学学报,2009,39(5):855-862.
- [17] Smirnova T G, Benjamin S G, Brown J M. Case study verification of RUC /MAPS fog and visibility forecasts [C]//AMS: The 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, Florida. Boston: AMS, 2000: 31-36.
- [18] Doran J A, Roohr P J, Beberwyk D J, et al. The MM5 at the Air Force Weather Agency-New products to support military operations [C]//AMS: The 8th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology, Dallas, Texas, 10-15 January, 1999. Boston: AMS, 1999.
- [19] Bang C H, Lee J W, Hong S-Y. Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF Model [J]. J Korean Soc Atmos Environ, 2008, 24(E2): 92-101.
- [20] 林艳,杨军,鲍艳松,等.山西省冬季雾中能见度的数值模拟研究[J].南京信息工程大学学报(自然科学版), 2010, 2(5): 436-444.
- [21] 林艳,王茂书,林龙官.四川省冬季雾的数值模拟及能见度参数化[J].南京信息工程大学学报(自然科学版), 2013, 5(3): 222-228.
- [22] Brewster K. Application of a Bratseth analysis scheme

- including Doppler radar [ C ]// AMS. The 15th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, Virginia, August, 1996. Boston: AMS, 1996: 92-95.
- [23] Hong S-Y, Lim J-O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [ J ]. J Korean Meteor Soc, 2006, 42(2): 129-151.
- [24] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [ J ]. J Geophys Res: Atmos, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [25] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [ J ]. J Atmos Sci, 1989, 46(20): 3077-3107.
- [26] Zhang D L, Anthes R A. A high-resolution model of the planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data [ J ]. J Appl Meteor, 1982, 21(11): 1594-1609.
- [27] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [ J ]. Mon Wea Rev, 2001, 129(4): 569-585.
- [28] Hong S-Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [ J ]. Mon Wea Rev, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [29] Zhou B B, Du J, Gultepe I, et al. Forecast of low visibility and fog from NCEP: Current status and efforts [ J ]. Pure Appl Geophy, 2012, 169(5): 895-909.
- [30] 庄晓翠, 周鸿奎, 李博渊. T639 模式在新疆北部暖区强降雪中的预报检验 [ J ]. 干旱气象, 2015, 33(6): 1031-1037.
- [31] 周斌斌, 蒋乐, 杜钧. 航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报 [ J ]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 29-41.
- [32] Gultepe I, Muller M D, Boybeyi Z. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models [ J ]. J Appl Meteor climatol, 2006, 45(11): 1469-1480.
- [33] Zhou B B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system [ J ]. Wea Forecasting, 2010, 25(1): 303-322.
- [34] Payra S, Mohan M. Multirule based diagnostic approach for the fog predictions using WRF modelling tool [ J ]. Adv Meteor, 2014(1): 1-11.