

夏凡,李昌义,刘诗军,等.雾与能见度数值预报诊断 SW 方案和 FSL 方案改进的研究及评估[J].海洋气象学报,2020,40(3):48-59.

XIA Fan, LI Changyi, LIU Shijun, et al. Research and evaluation of improved SW and FSL schemes for diagnosis and numerical simulation of fog and visibility[J].Journal of Marine Meteorology,2020,40(3):48-59. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.006. (in Chinese)

雾与能见度数值预报诊断 SW 方案 和 FSL 方案改进的研究及评估

夏凡¹,李昌义¹,刘诗军¹,王夏添²

(1.山东省气象科学研究所,山东 济南 250031;2.高唐县气象局,山东 高唐 252800)

摘要: 为了提高雾与能见度的预报水平,对业务上常用的两种能见度诊断方案,即 Stoelinga and Warner(SW)方案与 Forecast Systems Laboratory(FSL)方案的改进进行预报试验,SW方案基于 Gulpepe 方案考虑了液态水粒子数浓度对能见度的影响,FSL改进方案中利用了递减平均法对公式中用到的温度与露点温度进行订正,并用其重新计算公式中的相对湿度。基于山东省气象科学研究所逐时更新循环(hourly update cycle,HUC)业务模式输出结果,从2015—2016年选取10次雾天气过程,并详细分析了2015年11月13—14日这次雾天气过程的预报结果,比较了改进前后各方案对雾与能见度的预报效果,结果显示:在模式预报的雨水含量占总液态含水量比例较大的预报时效,改进后的SW方案对雾与能见度预报效果优于原始方案,在模式预报液态含水量接近0的预报时效,改进前后的SW方案对雾与能见度的预报效果相当;利用订正的温度与露点温度重新计算相对湿度,其平均绝对误差(mean absolute error,MAE)降低明显的预报时段,改进后的FSL方案对雾与能见度的预报效果大大提升。将两种改进后的方案相融合并进行预报试验,结果显示,综合对能见度与雾的预报效果,Combined Visibility(CVIS)方案要优于其他两种改进方案。

关键词: SW方案;FSL方案;改进方案;CVIS方案;雾;能见度;数值预报

中图分类号:P456.7;P457.7 文献标志码:A 文章编号:2096-3599(2020)03-0048-12
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.006

Research and evaluation of improved SW and FSL schemes for diagnosis and numerical simulation of fog and visibility

XIA Fan¹, LI Changyi¹, LIU Shijun¹, WANG Xiatian²

(1. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China; 2. Gaotang Meteorological Bureau, Gaotang 252800, China)

Abstract To improve the forecast of fog and visibility, prediction experiments are conducted to optimize the two operational diagnostic schemes for forecast of visibility, namely Stoelinga and Warner (SW) scheme and Forecast Systems Laboratory (FSL) scheme. SW scheme takes into account the impact of number concentration of liquid water particles on visibility based on Gulpepe scheme. In the improvement of FSL scheme, the decaying averaging method is employed to correct the temperature and dew point and then the relative humidity is recomputed. Base on the simulating results from HUC (hourly update cycle)

收稿日期:2020-06-19; 修订日期:2020-08-20

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(SDQXKF2015M04);山东省气象局科研项目(2016sdqxm08, 2015sdqzx01)

作者简介:夏凡,男,硕士,工程师,从事数值天气预报与模式数据质控工作,xf0718@126.com。

通信作者:李昌义,男,高级工程师,主要从事中尺度模式应用技术研究,lcyn@163.com。

model of Shandong Institute of Meteorological Sciences, 10 fog processes are selected from 2015 to 2016, among which the forecast of the fog process from 13 to 14 November 2015 is analyzed in detail, and the forecast skills of fog and visibility between the original and improved schemes are compared. The results are as follows. 1) When the rain water content takes up a large proportion in the total liquid water content in the model forecast, the forecast skill of fog and visibility by the improved SW scheme is better than that by the original SW scheme, while when little liquid water content can be forecast by the model, the forecast skill of fog and visibility between the original and improved SW schemes are equivalent. 2) When the mean absolute error (MAE) of the relative humidity, which is recomputed with the corrected temperature and dew point, decreases notably during the forecast period, the forecast skill of fog and visibility by the improved FSL scheme is greatly enhanced. The improved SW and FSL schemes are integrated into one scheme named Combined Visibility (CVIS) scheme, and the results of experiments show the general forecast skill of CVIS scheme is better than that by the two improved schemes.

Key words SW scheme; FSL scheme; improved scheme; CVIS scheme; fog; visibility; numerical simulation

引言

雾是一种灾害性天气,雾的出现会使能见度下降,导致交通系统瘫痪,严重影响人们出行和运输业。我国对雾的研究起步较晚,目前准确地预报雾还有一定难度,预报员多凭借经验对雾进行短时效的主观预报。近些年随着对雾的各项研究工作^[1-2]深入开展,不少学者尝试用天气学^[3-4]与统计学^[5-7]原理对雾进行预报。陈东辉等^[3]总结了雾天气出现时高空与地面天气形势并与 T639 输出的模式诊断量相结合,以此预报未来 1~3 d 环渤海雾天气。周须文等^[7]利用相关分析法找出与低能见度雾相关的气象因子,建立了低能见度雾的分级预报方程。

这些方法可以提供雾的有、无二分类预报或者是分级预报,无法给出雾出现时能见度的定量预报,这已经不能满足公众日益增长的气象服务需求。例如,高速公路交通管理制度标准给出明确要求:当能见度低于 200 m 时应实行限速管制,当能见度低于 50 m 时应当关闭。针对出现雾天气时低能见度的预报,国外学者根据大量观测数据和试验设计了不少能见度诊断方案,如 Kunkel 方案^[8]、Stoelinga and Warner (SW) 方案^[9]、Gultepe 方案^[10-11]、NCEP 的 Rapid Update Cycle (RUC) 方案^[12]以及 Forecast Systems Laboratory (FSL) 方案^[13]等,这些能见度方案利用模式输出的液态含水量、相对湿度与温度露点差等要素值计算能见度,从而为雾出现时能见度的定量预报提供了参考依据。国内学者利用这些方案对低能见度雾进行初步预报试验,夏凡和李昌义^[14]比较了 SW 方案、RUC 方

案与 FSL 方案对雾和能见度的预报效果。高荣珍等^[15]利用 Combined Visibility (CVIS) 方案将 SW 方案与 FSL 方案进行融合,结果显示融合方案对雾的预报效果优于任何一种单一方案。

上面提到的能见度方案均是由国外学者根据大量观测试验得到,然而不同区域气候特征存在差异,因此这些方案对本地的能见度与雾是否有可预报性还要进一步验证。林艳等^[16]利用太原机场 2009 年冬季能见度与相对湿度数据改进了 RUC 方案的计算公式,改进后的方案预报能见度与观测值更为接近。管琴等^[17]在 RUC 方案加入了空气污染对能见度的影响。夏凡和李昌义^[14]在研究中还发现,除了计算公式,方案所包含的气象要素的准确性也会影响到雾与能见度的预报效果。本文针对这些问题,对业务上常用的 SW 与 FSL 两种能见度方案进行改进,以期提高各方案对雾与能见度的预报效果,为预报员提供更加客观准确的预报产品。

1 资料与方法简介

1.1 资料简介

山东省气象科学研究所于 2015 年实时业务运行逐小时更新循环(hourly update cycle, HUC)模式,使用国家气象信息中心下发的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 T639 模式数据作为初始条件和边界条件;模拟区域的中心经纬度为 $116.5^\circ\text{E}, 36.5^\circ\text{N}$;垂直分层为 51 层;双层嵌套,外、内层网格的分辨率分别为 27 km 与 9 km,本文选取第二层模式资料作为预报数据。观测资料为山东 123 个国家级气象观测站(以下简称“山东 123 站”)数据。选取 2015—2016 年山东 10

次低能见度雾天气个例(表1),对应选取雾天气出现前一天 20:00(北京时,下同)作为 HUC 模式起报时刻,将 0~24 h 时效,即 20:00—次日 20:00 的模式数据作为预报场。

表 1 2015—2016 年 10 次雾天气个例的出现日期

Table 1 Dates of 10 fog cases that occurred from 2015 to 2016

个例序号	日期	个例序号	日期
1	2015 年 11 月 14 日	6	2015 年 12 月 2 日
2	2015 年 11 月 15 日	7	2015 年 12 月 23 日
3	2015 年 11 月 21 日	8	2015 年 12 月 24 日
4	2015 年 11 月 30 日	9	2015 年 12 月 25 日
5	2015 年 12 月 1 日	10	2016 年 1 月 3 日

1.2 方法简介

1.2.1 Gultepe 方案

STOELINGA and WARNER^[9] 基于大气中各液态含水量的密度与消光系数的经验关系,给出了 SW 方案的计算公式,如下:

$$Vis = \frac{-\ln(0.02)}{\beta} \quad (1)$$

式中, $-\ln(0.02)$ 是经验系数, $\beta = \beta_{cw} + \beta_{rw} + \beta_{ci} + \beta_{sn}$, β_{cw} 、 β_{rw} 、 β_{ci} 与 β_{sn} 分别代表模式预报的云水(cw)、雨水(rw)、云冰(ci)与雪(sn)含量的消光系数,均是三维预报量,能见度值的计算只用到模式最底层的液态含水量,是二维预报量,各液态含水量密度与消光系数的经验关系由表 2 给出,其中 C_{cw} 、 C_{rw} 、 C_{ci} 与 C_{sn} 分别表示云水、雨水、云冰与雪的密度。

表 2 SW 方案中各种液态水的密度(单位: $g \cdot m^{-3}$)与消光系数(单位: km^{-1})的关系

Table 2 Relationship between concentration (units: $g \cdot m^{-3}$) of liquid water and extinction coefficient (units: km^{-1}) in SW scheme

水凝物	经验关系
云水	$\beta_{cw} = 144.7C_{cw}^{0.88}$
雨水	$\beta_{rw} = 1.1C_{rw}^{0.75}$
云冰	$\beta_{ci} = 163.9C_{ci}^{1.00}$
雪	$\beta_{sn} = 10.4C_{sn}^{0.78}$

GULTEPE et al.^[10] 试验发现,在固定的空气体积中不改变水凝物的含量,能见度与水凝物粒子数存在较强的负相关,在 SW 方案的基础上,GULTEPE et al.^[10] 给出了综合考虑空气中水凝物含量和水凝物粒子数浓度的能见度计算公式,如下:

$$Vis = \frac{1.002}{(C \times N_d)^{0.6473}} \quad (2)$$

式中, $C = C_{cw} + C_{rw} + C_{ci} + C_{sn}$, N_d 表示液态水粒子浓度。在大量外场观测试验分析的基础上,GULTEPE et al.^[11] 又对公式(2)进行改进,改进后的公式如下:

$$Vis = \frac{0.87706}{(C \times N_d)^{0.49034}} \quad (3)$$

GULTEPE and ISAAC^[18] 研究发现 N_d 与温度 T 存在如下拟合关系:

$$N_d = -0.071T^2 + 2.213T + 141.56 \quad (4)$$

本文将公式(3)定义为 SW-V1 方案。将式(4)代入式(3),与 SW 方案计算公式相比,当温度在 $-10 \sim 30$ °C 之间时,雨水与雪这两项的系数变大,SW-V1 方案增强了雨水与雪对能见度的削弱作用。

1.2.2 FSL 方案改进方法

FSL 方案由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic & Atmospheric Administration, NOAA)的预报系统实验室研发,该方案基于大量观测试验,利用能见度和温度露点差与相对湿度的关系进行拟合,公式如下:

$$FSL = 6000 \times \frac{t - t_d}{V_{rh}^{1.75}} \quad (5)$$

式中, t (单位: °C)、 t_d (单位: °C) 与 V_{rh} (单位: %) 分别表示温度、露点温度与相对湿度。夏凡和李昌义^[14] 研究指出, FSL 方案对相对湿度误差较敏感,相对湿度误差较大的试验, FSL 方案对雾与能见度的预报效果均较差。

相对湿度是由温度与露点温度共同计算,本文利用递减平均法分别对温度与露点温度进行订正,该方法可以不断对模式误差进行更新来降低模式系统误差,邱学兴等^[19] 利用该方法对国家气象中心 T639 预报系统的 500 hPa 高度、850 hPa 温度与 2 m 温度成功进行订正,递减平均法计算流程如下:

第一步为误差估计。

$$e_i(t) = f_i(t) - o_i(t) \quad (6)$$

式中, $o_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 站的观测值, $f_i(t)$ 表示对应 t 时刻第 i 站的预报值, $e_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 站的误差值。

第二步为误差累加。

选择适当的权重系数,将前 24 h 各预报时效的误差值累加到前 48 h 相同预报时效的误差值,得到更新后各个预报时效的误差值。

$$E_i(t) = (1 - w)E_i(t - 2) + we_i(t - 1) \quad (7)$$

式中, $E_i(t)$ 为对应 t 时刻第 i 站更新后的误差值, w

为权重系数。当 $t=1$, 对式(7)进行冷启动, 即 $w=1$, $E_i(t-2)=0$, 经过一段时间的迭代累加, $E_i(t)$ 变化较小, 本文误差计算需要的迭代累加时间为两个月。

第三步为误差改进。

将 t 时刻对应的预报值减去更新误差值得到最终的预报值。

$$F_i(t) = f_i(t) - E_i(t) \quad (8)$$

式中, $F_i(t)$ 为 t 时刻第 i 站订正后的预报值。

图 1 给出了权重系数 0.01~0.20 对应的 HUC 模式 2 m 预报温度的山东 123 站 0~24 h 预报时效平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)^[14], 随着系数的增大, MAE 有减小的趋势, 在 0.12 后 MAE 变化较小, 最小值对应的系数为 0.11, 因此, 选用 0.11 作为 HUC 模式递减平均法的订正权重系数。

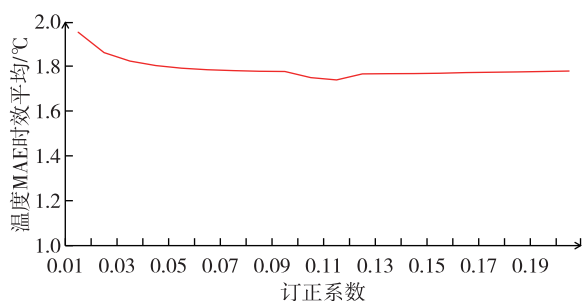


图 1 权重系数 0.01~0.20 对应的山东 123 个站点 0~24 h 时效 2 m 预报温度平均绝对误差 (MAE) 的时效平均 (单位: °C)

Fig.1 Mean MAE of 0-24 h forecast temperature at 2 m in the 123 stations of Shandong (units: °C) corresponding to the weight coefficient between 0.01 and 0.20

利用订正后的温度与露点温度分别计算饱和水汽压与水汽压 (公式(9)), 然后计算相对湿度 (公式(10)), 其中 t 与 t_d 分别表示温度与露点温度, e_s 与 e 分别表示饱和水汽压与水汽压, V_{rh} 为相对湿度。利用订正后的温度、露点温度和相对湿度并基于 FSL 方案重新计算能见度 (公式(5)), 本文将其定义为 FSL-V1 方案。

$$e_s = 6.11 \times 10^{7.5t/(t-35.85+273.15)}$$

$$e = 6.11 \times 10^{7.5t_d/(t_d-35.85+273.15)} \quad (9)$$

$$V_{rh} = \frac{e}{e_s} \times 100\% \quad (10)$$

1.2.3 CVIS 方案

CVIS 原理是基于 SW 与 FSL 方案计算能见度, 取两者最小值^[20]。公式如下:

$$CVIS = \min(SW, FSL) \quad (11)$$

1.2.4 评估方法介绍

本文利用 MAE^[14] 来评估各方案改进前后对能见度的预报效果, 使用这种评估方法可以避免正负误差相互抵消。

以能见度低于 1 km 的站点判定为有雾 (包括大雾、浓雾与强浓雾) 出现, 使用二分类事件评估方法对雾的预报进行检验, 方法主要包括 TS (threatening score) 评分与空报率 (false alarm rate, FAR) (公式(12)~(13))。由表 3 可见, 式(12)与式(13)中, a 表示预报正确的站点数; b 表示空报的站点数; c 表示漏报的站点数; d 表示观测与预报均没有出现雾的站点数。

$$TS = \frac{a}{a + b + c} \times 100\% \quad (12)$$

$$FAR = \frac{b}{b + d} \times 100\% \quad (13)$$

表 3 雾预报检验分类表

Table 3 Verification of fog forecast

观测	预报	
	有	无
有	a	c
无	b	d

2 改进效果评估

为避免赘述, 本文只对 2015 年 11 月 13—14 日雾天气的模式预报 (13 日 20 时起报, 进行 24 h 预报) 结果进行详细分析。由地面填图 (图略) 来看, 13 日 20 时, 地面形势较稳定, 山东处于均压场中, 以北风为主, 风速 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度露点差较小, 全省大部地区在 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 除了鲁西北西部与鲁西南地区, 其他地区有 $0 \sim 5 \text{ mm}$ 降水, 这些条件均有利于雾的出现。14 日 08 时, 山东全省大部地区温度露点差依旧保持在 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 降水落区主要在鲁西北东部、鲁中东部与鲁东南地区, 雨量在 $0 \sim 1 \text{ mm}$ 。

2.1 SW 方案改进效果评估

由 2015 年 11 月 13 日 23 时实况 (图 2a) 可以看出, 雾出现的站点主要集中在鲁西北、鲁中北部和半岛西部, SW 方案 (图 2b) 预报出的雾站点零星分布在鲁西北、鲁南与半岛地区。SW-V1 (图 2c) 方案预报出雾站点明显多于 SW 方案, 预报出鲁西北大部分出雾站点, 但是在鲁南出现空报。在实况中, 这一区域多为能见度 $1 \sim 3 \text{ km}$ 的轻雾区。

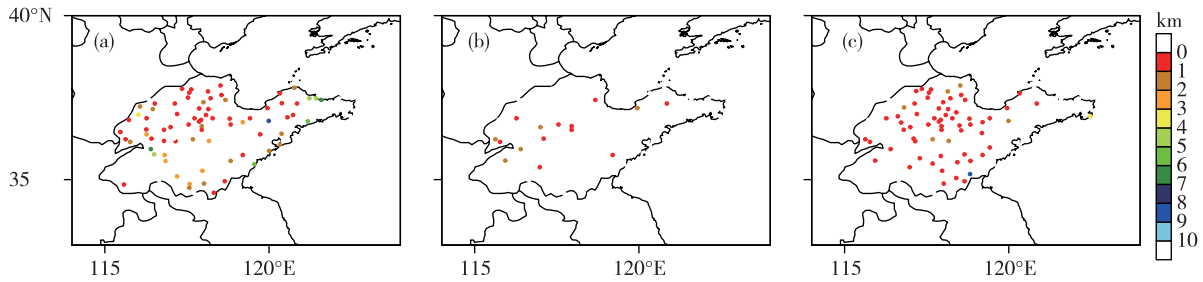


图2 2015年11月13日23时观测站点雾分布(a)、SW(b)与SW-V1(c)方案预报站点雾分布(能见度小于1 km)

Fig.2 Distribution of stations with observed fog (a) and distribution of stations with forecast fog by SW scheme (b) and SW-V1 scheme (c) at 23:00 BST 13 November 2015 (visibility less than 1 km)

由SW与SW-V1预报的0~24 h能见度的MAE(图3)可以看出,改进方案预报的能见度在0~12 h预报时效MAE值较SW方案降低,在13~24 h预报时效,SW-V1方案预报能见度的MAE较SW方案改进效果不明显。

SW方案改进前后预报雾的TS评分(图4a)显示,SW-V1方案在0~9 h预报时效有正效果,尤其在0~5 h预报时效,TS评分由10%~20%提高到50%~60%,改进前后方案在16~24 h预报时效TS评分为0。空报率分布图(图4b)显示,SW-V1方案在大部分预报时效略高于或等于SW方案。

模式预报的总液态含水量,除了云水含量还有雨水含量,由图5可以看出,当雨水含量占总液态含水量比例较高的预报时效,SW-V1方案预报雾的TS评分提升明显,比例较低时,TS评分提高不明显。这是由于改进方案均增强了雨水含量对能见度的削弱作用。而在16~24 h这个预报时段,HUC模式预报的总液态含水量近乎为0,因此改进前后方案预报雾的TS评分为0,同时两者预报的能见度差异不明显。

2.2 FSL方案改进效果评估

2015年11月14日09时实况(图6a)显示,雾主要出现在鲁西北、鲁西南和山东半岛地区。FSL方案(图6b)预报出雾站点较少,零星分布在山东半岛地区,在鲁西北地区漏报站点较多,FSL-V1方案(图6c)较好地模拟出了鲁西北与山东半岛出雾的站点。

由图7可以看出,在0~12 h预报时效,FSL-V1方案预报能见度的MAE较FSL方案降低并不明显,在13~24 h预报时效,FSL-V1方案预报能见度的MAE降低更为明显。

由各预报时效的TS评分(图8a)来看,在0~12 h预报时效FSL-V1的改进效果不明显,有的预报时效TS评分低于FSL方案,在之后的预报时效FSL-V1方案明显高于FSL方案;由两种方案预报雾的空报率(图8b)来看,在整个预报时段,两者差异并不明显。

由订正前后相对湿度在各预报时效的MAE(图9)可以看出,在0~12 h订正效果不显著,MAE大致相同,在13~24 h订正后的相对湿度MAE明显小于订正前,这使得FSL-V1方案在0~12 h时效对能见度与雾的预报效果的改进不明显,而在13~24 h则

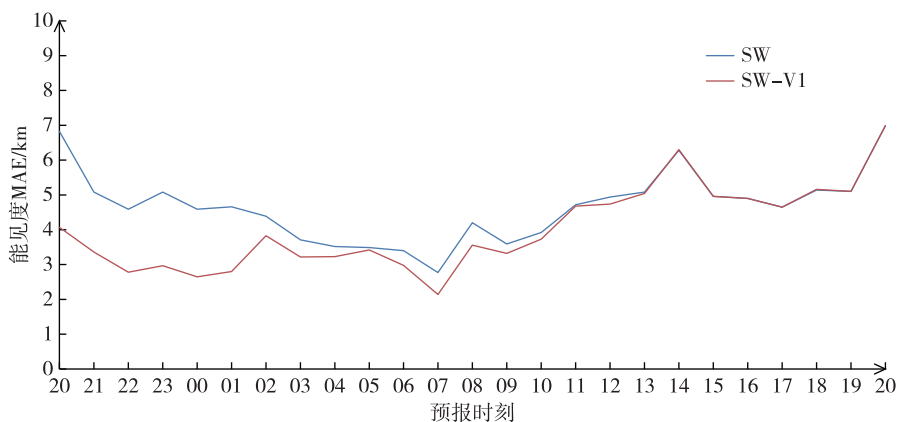


图3 2015年11月13日20时起报0~24 h预报时效SW与SW-V1方案预报能见度的平均绝对误差(MAE;单位:km)

Fig.3 MAE of 0-24 h visibility forecast(units: km) by SW scheme and SW-V1 scheme initiated at 20:00 BST 13 November 2015

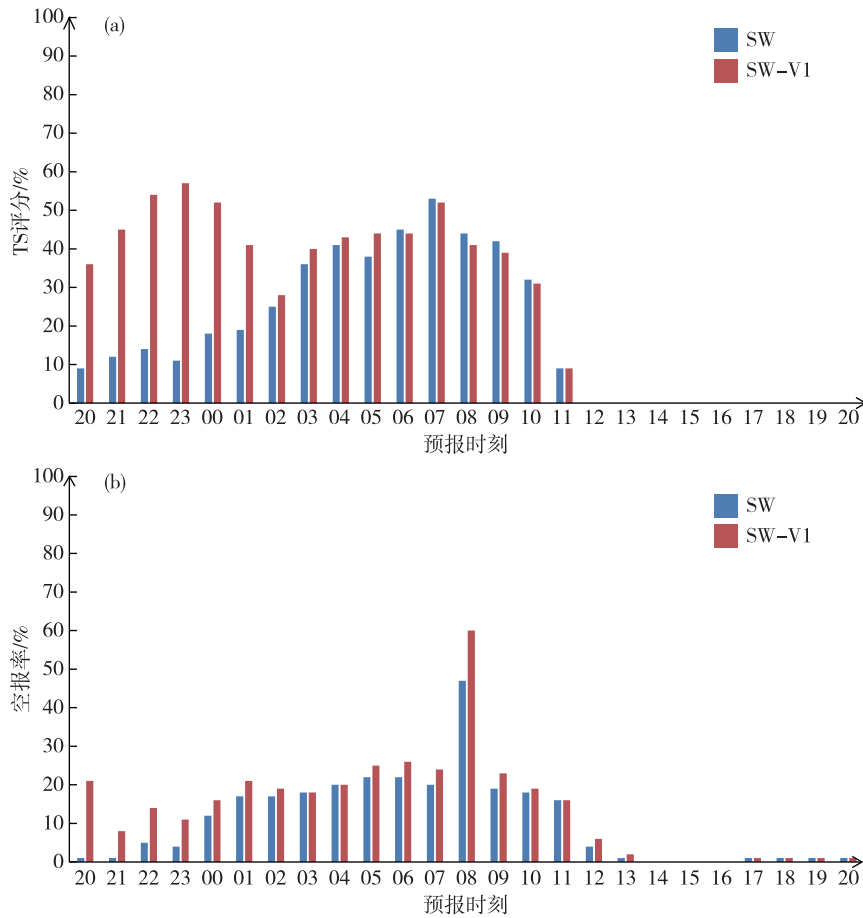


图 4 2015 年 11 月 13 日 20 时起报 0~24 h 预报时效 SW 与 SW-V1 方案预报雾的 TS 评分(a)与空报率(b)
 Fig.4 TS (a) and FAR (b) of 0-24 h fog forecast by SW scheme and SW-V1 scheme initiated at 20:00 BST 13 November 2015

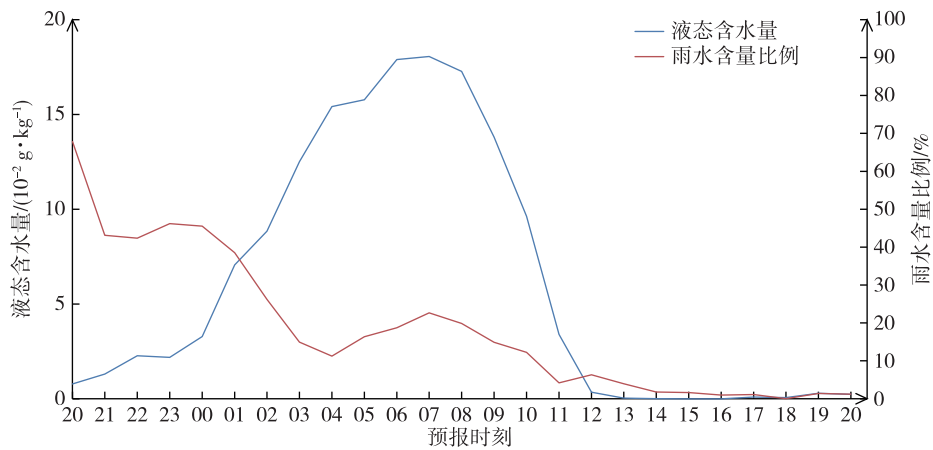


图 5 2015 年 11 月 13 日 20 时起报 0~24 h 预报时效 HUC 模式预报的总液态含水量(单位: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)与雨水含量占总液态含水量比例(单位:%)
 Fig.5 Total liquid water content (units: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and proportion of rain water content (units: %) in total liquid water content by 0-24 h forecast of HUC model initiated at 20:00 BST 13 November 2015

有明显的改进效果。

2.3 各改进方案效果评估对比

通过以上的对比试验发现, SW-V1 方案与 FSL-V1 方案分别对 SW 方案与 FSL 方案改进效果

较好,下面将 SW-V1 与 FSL-V1 方案进行融合,计算 CVIS,并且比较这三种方案对能见度与雾的预报效果。

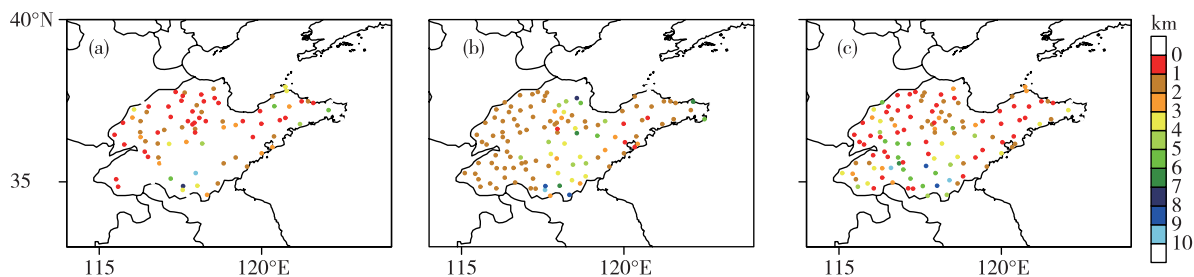


图6 2015年11月14日09时观测站点雾分布(a)、FSL(b)与FSL-V1(c)方案预报站点雾分布(填色为能见度,单位:km)
Fig.6 Distribution of stations with observed fog (a) and distribution of stations with forecast fog by FSL scheme (b) and FSL-V1 scheme (c) at 09:00 BST 14 November 2015 (colored area for visibility, units: km)

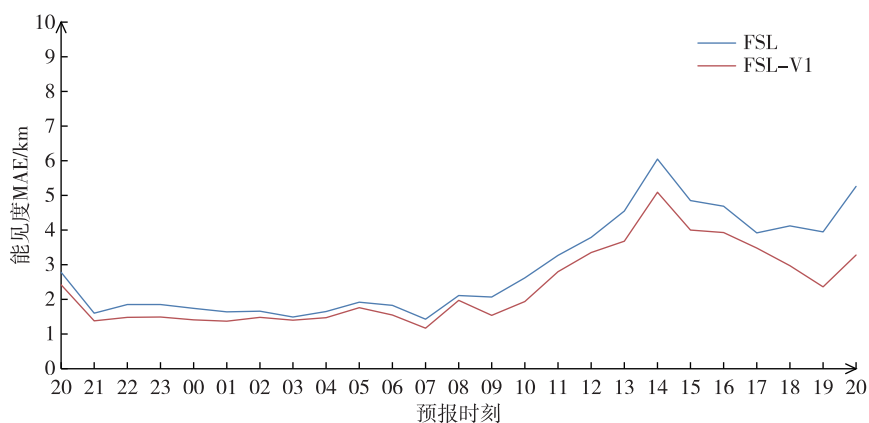


图7 2015年11月13日20时起报0~24 h预报时效FSL与FSL-V1方案预报能见度的平均绝对误差(MAE;单位:km)
Fig.7 MAE of 0~24 h visibility forecast (units: km) by FSL scheme and FSL-V1 scheme initiated at 20:00 BST 13 November 2015

由三种改进方案预报能见度的MAE(图10)可以看出,SW-V1方案最差,CVIS与FSL-V1方案效果相当;由TS评分在各预报时效分布(图11a)来看,模式预报的雨水含量占比较高的预报时段,SW-V1方案高于FSL-V1方案,在相对湿度订正效果较明显的预报时段,FSL-V1方案高于SW-V1方案,由空报率在各预报时效分布(图11b)来看,大部分预报时段,SW-V1方案高于FSL-V1方案,模式没有模拟出液态含水量的预报时段,SW-V1方案的空报率为0,相应的FSL-V1方案空报率也较低。CVIS方案取了两种方案能见度最小值,所以TS评分在大部分预报时效高于其他两种方案,部分预报时效略低于某一方案,空报率也略高于其他两种方案,这是由于CVIS方案预报雾空报站数增加的原因。

2.4 各改进方案效果批量评估

为了对上述检验结果进一步验证,图12—14分别给出其他9次雾天气SW-V1、FSL-V1与CVIS方案计算能见度的MAE,对雾预报的TS评分与空报率,由图可见,各次天气的检验结果与2015年11月

13日这次过程大致相似,大部分预报时效,CVIS计算能见度的MAE低于或等于其他两种方案,CVIS方案对雾预报的TS评分与空报率在大部分预报时效高于或等于其他两种方案,当两种方案对雾预报的空报站数较多时,CVIS的TS评分会低于其中一种方案。总体来看,CVIS方案对能见度与雾的预报效果优于其他两种改进方案。

3 结论与讨论

本文基于Gultepe方案与递减平均法分别对SW与FSL诊断方案进行改进,对2015—2016年山东10次出雾天气进行预报试验,并详细分析了2015年11月13—14日雾天气预报结果,对比了各方案改进前后对能见度与雾的预报效果,最后将改进效果较好的方案融合并进行了对比,得到以下结论:

1) 13—14日雾天气的模式结果显示,在模式雨水含量占总液态含水量比例较大的预报时段,SW-V1方案预报能见度的MAE小于SW方案,对雾预报的TS评分高于SW方案;当模式预报液态含水量接近0的预报时段,改进前后SW方案对雾与能见

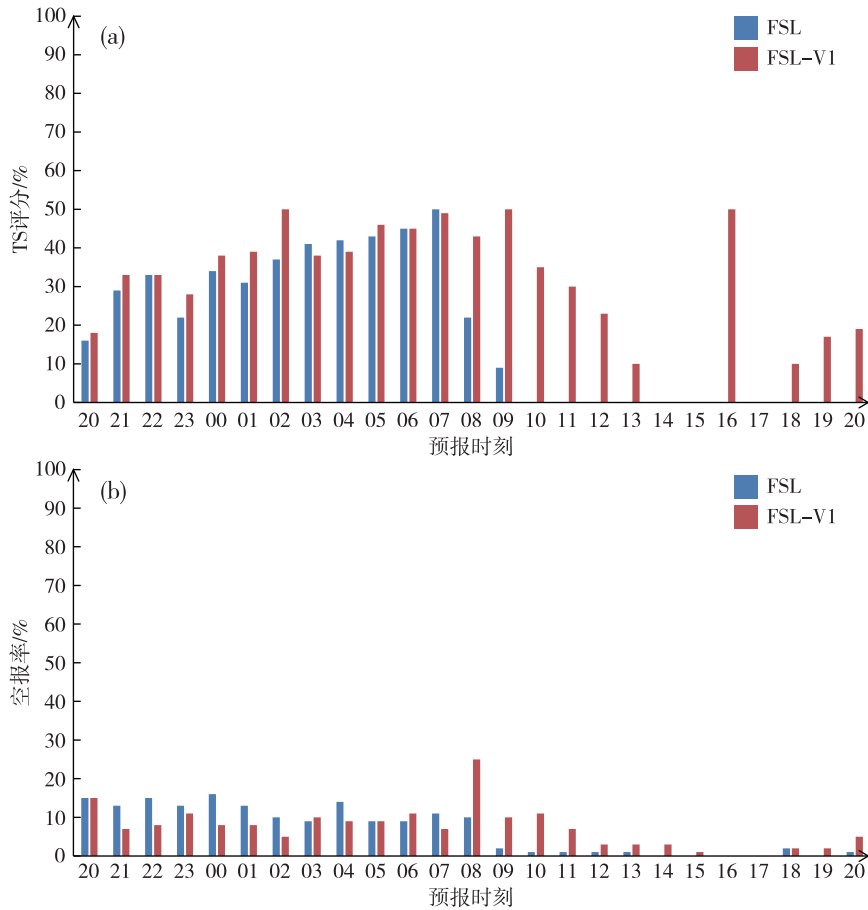


图 8 2015 年 11 月 13 日 20 时起报 0~24 h 预报时效 FSL 与 FSL-V1 方案预报雾的 TS 评分(a)与空报率(b)
Fig.8 TS (a) and FAR (b) of 0-24 h fog forecast by FSL scheme and FSL-V1 scheme initiated at 20:00 BST 13 November 2015

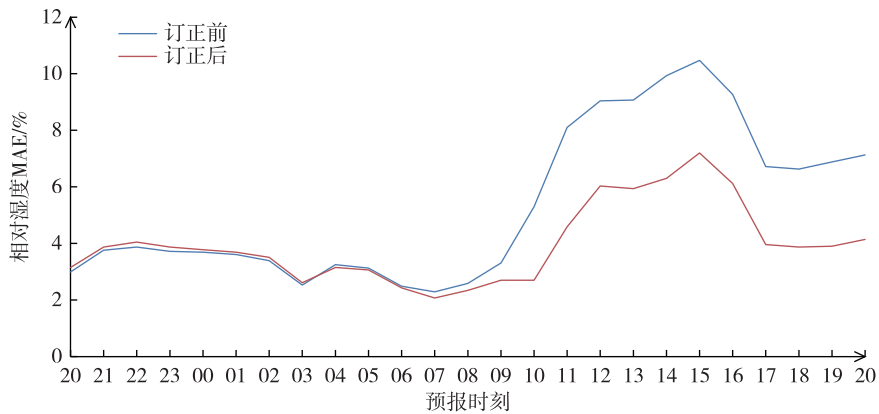


图 9 2015 年 11 月 13 日 20 时起报 0~24 h 预报时订正前后相对湿度的平均绝对误差 (MAE; 单位: %)
Fig.9 MAE of 0-24 h relative humidity (units: %) forecast before and after correction initiated at 20:00 BST 13 November 2015

度的预报效果基本相同。

2) 13—14 日雾天气的模式结果显示,在相对湿度订正效果较小的预报时段,FSL-V1 方案对 FSL 方案改进效果不明显,在相对湿度订正效果较大的预报时段,FSL-V1 方案预报能见度的 MAE 明显小于 FSL 方案,对雾预报的 TS 评分也远高于 FSL 方案。

3) 比较 SW-V1、FSL-V1 与 CVIS 三种改进方案在雾天气时对能见度与雾的预报效果,大部分预报时效 SW 方案预报能见度的 MAE 最大,CVIS 方案最低,CVIS 方案预报雾的 TS 评分要高于其他两种改进方案,CVIS 方案的空报率要高于其他两种方案,当两种方案空报站数较多的预报时效,CVIS 方

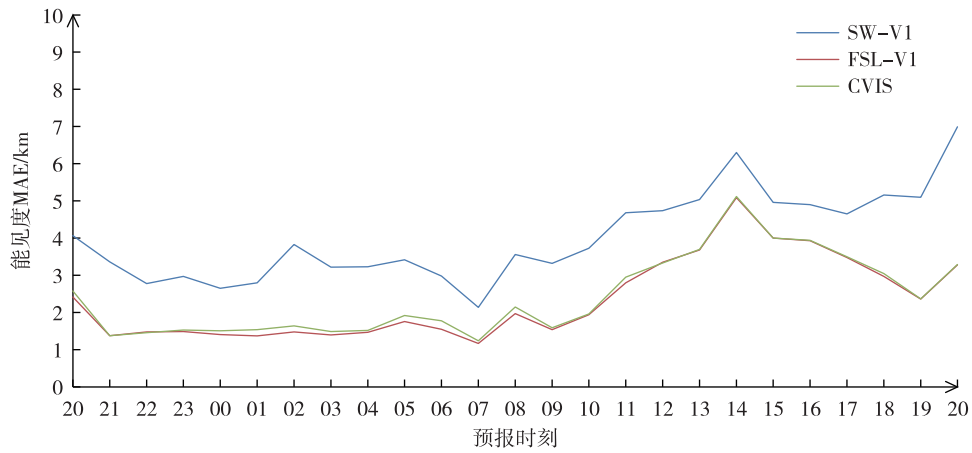


图 10 2015 年 11 月 13 日 20 时起报 0~24 h 预报时效 SW-V1、FSL-V1 与 CVIS 方案预报能见度的平均绝对误差 (MAE; 单位: km)

Fig.10 MAE of 0~24 h visibility forecast (units: km) by SW-V1 scheme, FSL-V1 scheme, and CVIS scheme initiated at 20:00 BST 13 November 2015

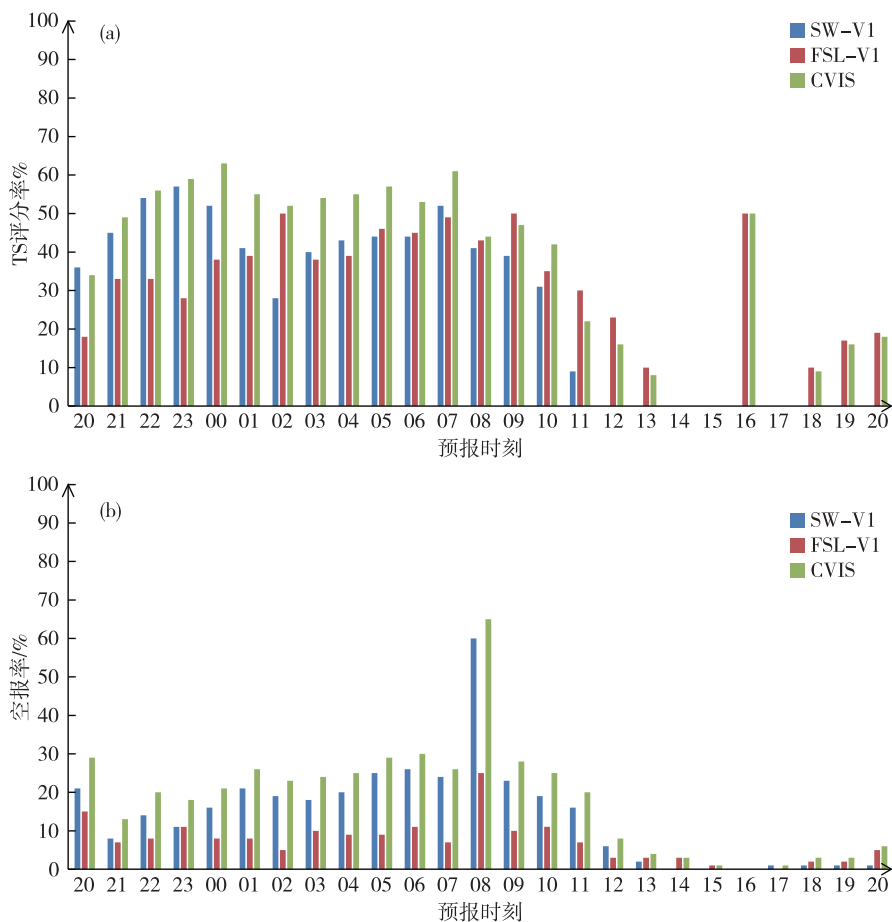


图 11 2015 年 11 月 13 日 20 时起报 0~24 h 预报时效 SW-V1、FSL-V1 与 CVIS 方案预报雾的 TS 评分 (a) 与空报率 (b)

Fig.11 TS (a) and FAR (b) of 0~24 h fog forecast by SW-V1 scheme, FSL-V1 scheme, and CVIS scheme initiated at 20:00 BST 13 November 2015

案的 TS 评分会低于其中一种改进方案。其他 9 次
预报结果显示, CVIS 方案在雾天气下对能见度与雾
的预报效果最优。

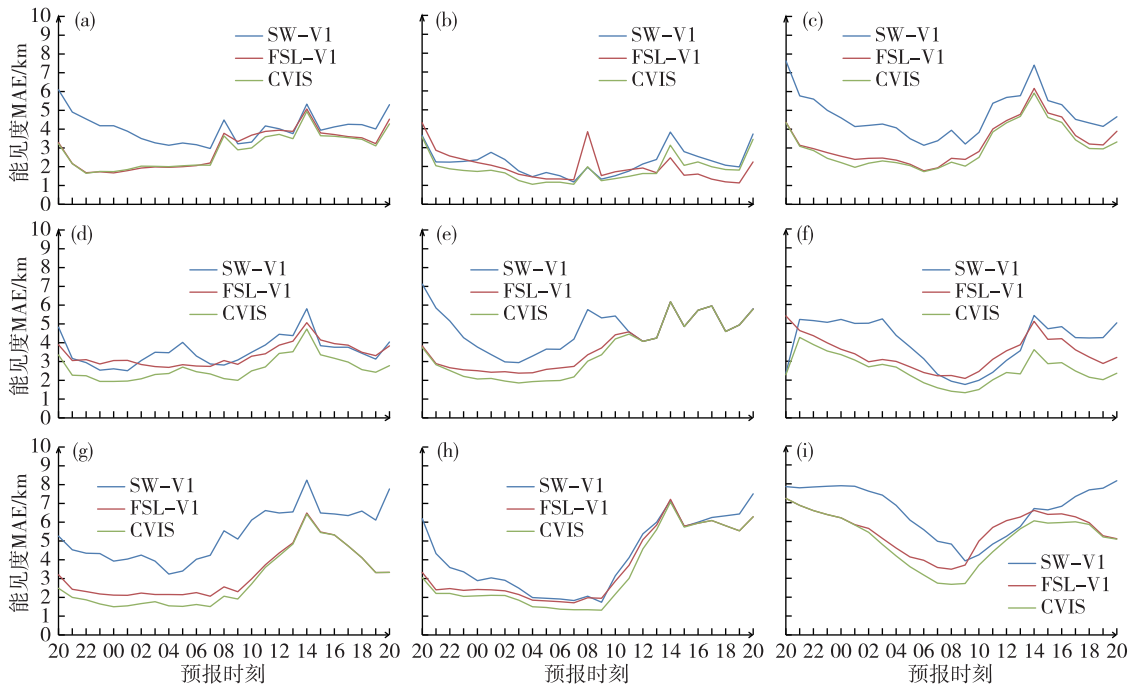


图 12 20 时起报 0~24 h 预报时效 SW-V1、FSL-V1 与 CVIS 方案预报能见度的平均绝对误差 (MAE; 单位: km; a. 2015 年 11 月 14 日, b. 2015 年 11 月 20 日, c. 2015 年 11 月 29 日, d. 2015 年 11 月 30 日, e. 2015 年 12 月 1 日, f. 2015 年 12 月 22 日, g. 2015 年 12 月 23 日, h. 2015 年 12 月 24 日, i. 2016 年 1 月 2 日)

Fig.12 MAE of 0~24 h visibility forecast (units: km) by SW-V1 scheme, FSL-V1 scheme, and CVIS scheme initiated at 20:00 BST (a. 14 November 2015, b. 20 November 2015, c. 29 November 2015, d. 30 November 2015, e. 1 December 2015, f. 22 December 2015, g. 23 December 2015, h. 24 December 2015, i. 2 January 2016)

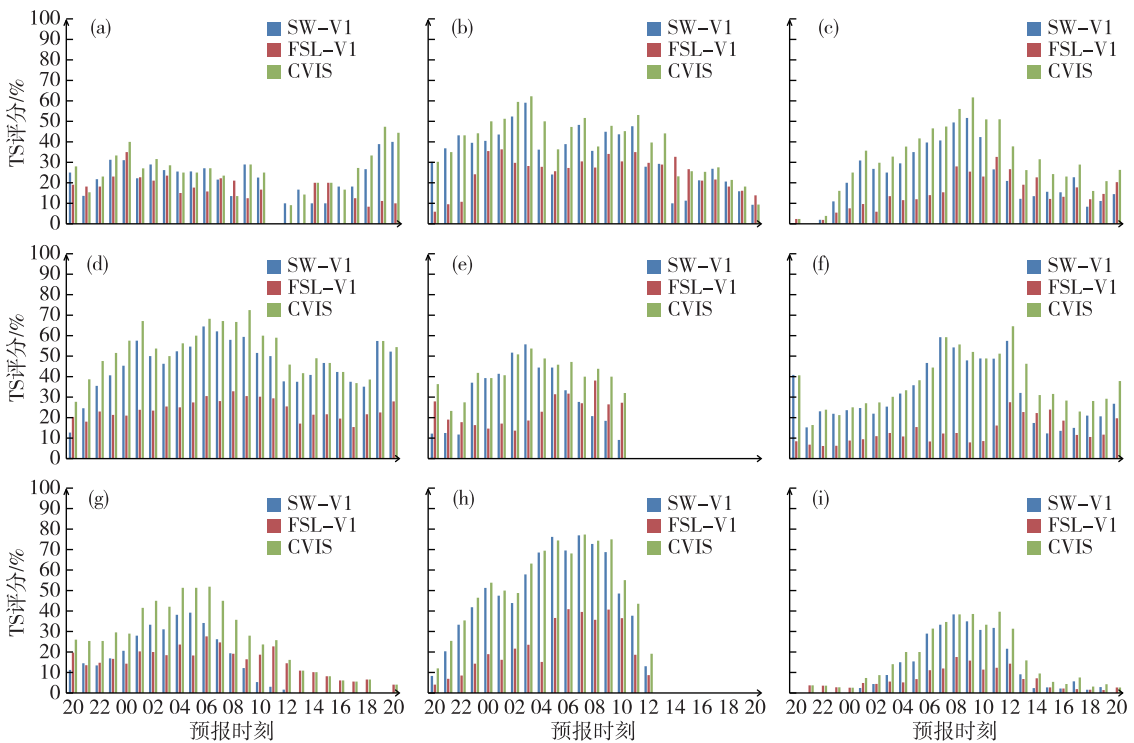


图 13 20 时起报 0~24 h 预报时效 SW-V1、FSL-V1 与 CVIS 方案预报雾的 TS 评分 (单位: %; a. 2015 年 11 月 14 日, b. 2015 年 11 月 20 日, c. 2015 年 11 月 29 日, d. 2015 年 11 月 30 日, e. 2015 年 12 月 1 日, f. 2015 年 12 月 22 日, g. 2015 年 12 月 23 日, h. 2015 年 12 月 24 日, i. 2016 年 1 月 2 日)

Fig.13 The same as Fig.12, but for TS (units: %)

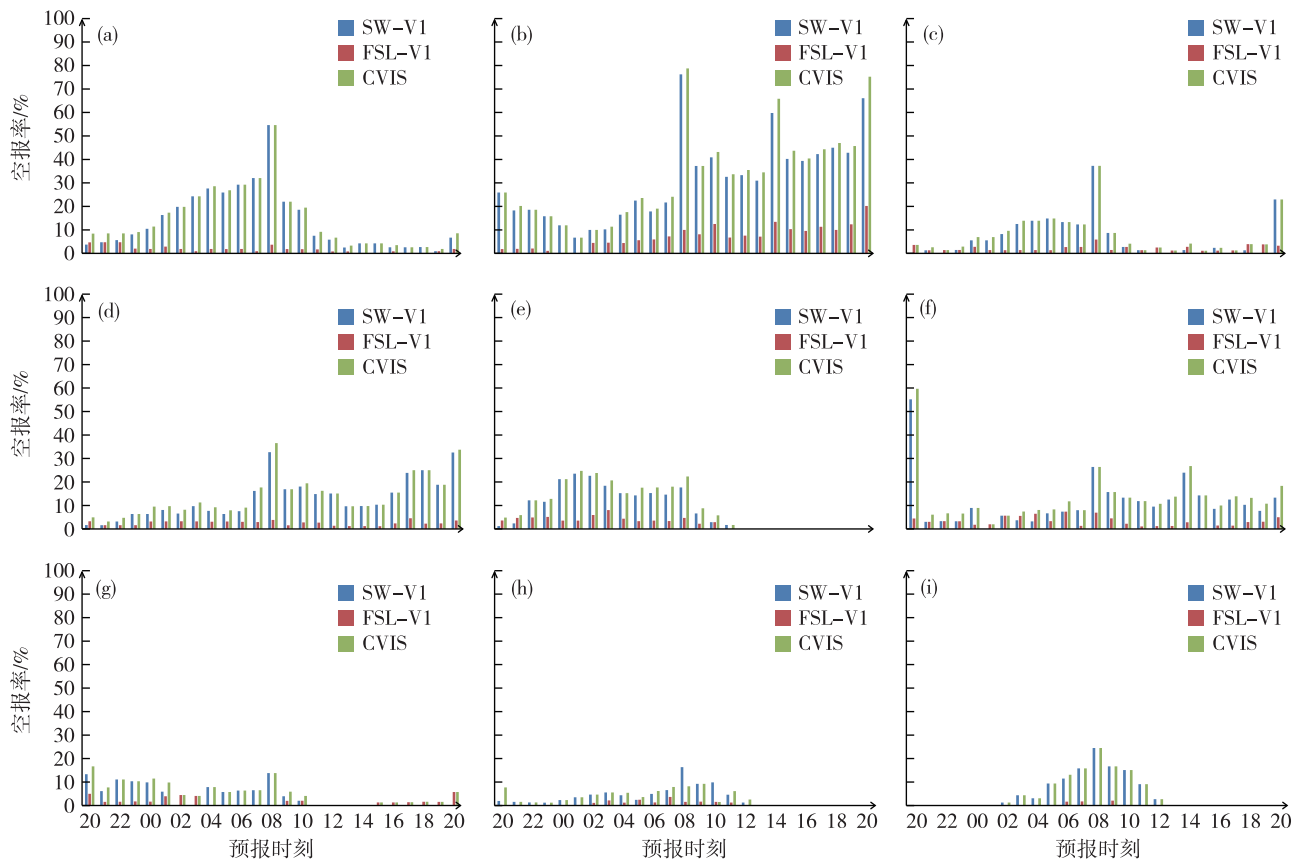


图 14 20 时起报 0~24 h 预报时效 SW-V1, FSL-V1 与 CVIS 方案预报雾的空报率(单位:%; a. 2015 年 11 月 14 日, b. 2015 年 11 月 20 日, c. 2015 年 11 月 29 日, d. 2015 年 11 月 30 日, e. 2015 年 12 月 1 日, f. 2015 年 12 月 22 日, g. 2015 年 12 月 23 日, h. 2015 年 12 月 24 日, i. 2016 年 1 月 2 日)

Fig.14 The same as Fig.12, but for FAR (units: %)

参考文献:

- [1] 孙颖, 马艳, 高荣珍, 等. 山东一次持续性平流辐射雾过程特征及成因分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 128-135.
- [2] 侯淑梅, 杨成芳, 王建林, 等. 上合组织青岛峰会期间海雾维持和消散阶段的环境场特征[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 86-94.
- [3] 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.
- [4] 田小毅, 朱承瑛, 张振东, 等. 长江江苏段江面雾的特征和预报着眼点[J]. 气象, 2018, 44(3): 408-418.
- [5] 吴兑, 邓雪娇, 游积平, 等. 南岭山地高速公路雾区能见度预报系统[J]. 热带气象学报, 2006, 22(5): 417-422.
- [6] 黄健, 黄辉军, 黄敏辉, 等. 广东沿岸海雾决策树预报模型[J]. 应用气象学报, 2011, 22(1): 107-114.
- [7] 周须文, 时青格, 贾俊妹, 等. 低能见度雾的分级预报方法研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(1): 161-166.
- [8] KUNKEL B A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. J Climate Appl Meteor, 1984, 23(1): 34-41.
- [9] 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.
- [10] GULTEPE I, MÜLLER 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.
- [11] GULTEPE I, PEARSON G, MILBRANDT J A, et al. The fog remote sensing and modeling field project [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2009, 90(3): 341-359.
- [12] SMIRNOVA T G, BENJAMIN S G, BROWN J M. Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility forecasts [C]// American Meteorological Society. The 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Orlando, Florida: AMS, 2000: 31-36.
- [13] 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]// American Meteorological Society. The 8th Conference on Aviation, Range, and

- Aerospace Meteorology. Dallas, Texas:AMS,1999:10-15.
- [14] 夏凡,李昌义.基于3种能见度方案山东地区雾天气预报试验研究[J].气象与环境学报,2018,34(3):48-57.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 管琴,李青平,黄铃光,等.太原雾天能见度预报[J].气象与环境学报,2013,29(4):47-53.
- [18] GULTEPE I, ISAAC G A. Aircraft observations of cloud droplet number concentration: Implications for climate studies[J]. Quart J Roy Meteor Soc,2004,130(602):2377-2390.
- [19] 邱学兴,王东勇,陈宝峰.T639模式预报系统误差统计和订正方案研究[J].气象,2012,38(5):526-532.
- [20] 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.