

王静,陈静,钟有亮,等,2017. GRAPES-REPS 西南低涡预报检验评估[J]. 气象,43(4):385-401.

GRAPES-REPS 西南低涡预报检验评估^{*}

王 静¹ 陈 静² 钟有亮³ 张 进² 李晓莉²

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 国家气象中心,北京 100081

3 成都信息工程大学,成都 610225

提 要: 利用 2015 年 6—8 月 GRAPES-REPS(Global/Regional Assimilation and Prediction System-Regional Ensemble Prediction System)区域集合预报资料,并设计西南低涡格点资料客观识别方法对西南低涡中心位置进行定位,首先评估 GRAPES 控制预报对西南低涡的预报准确性,之后挑选出四次生命史较长的西南低涡过程,分析评估 GRAPES-REPS 对西南低涡发生、发展、移动及降水过程集合预报性能。结果表明:(1)GRAPES 模式对西南低涡预报的命中率较高,空报率略大于漏报率。(2)GRAPES-REPS 对西南低涡发生和发展的预报效果较好,绝大部分集合预报成员能预报西南低涡发生和发展过程,但对西南低涡发生时间预报总体偏早。(3)GRAPES-REPS 对西南低涡移动路径在 24 h 预报时效内比较合理,且集合预报平均明显优于控制预报,24 h 之后东移型西南低涡移动路径明显偏北。(4)GRAPES-REPS 对西南低涡强度预报总体偏强,表现为中心正涡度值偏大,位势高度值偏低。(5)24 h 预报时效内,西南低涡触发的小雨到大雨量级的降水概率评分均有较好表现,且落区与实况接近,而暴雨落区个别略有偏北,但基本吻合。24 h 之后,由于东移型西南低涡移动路径偏北导致模式预报降水落区偏北。可见,模式对西南低涡强降水有一定预报能力,因此,提高 GRAPES-REPS 中尺度集合预报能力,将有助于改进西南低涡强降水预报。

关键词: GRAPES-REPS,西南低涡,集合预报,路径预报,检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.001

Verification and Evaluation of the Southwest Vortex Forecast by GRAPES-REPS

WANG Jing¹ CHEN Jing² ZHONG Youliang³ ZHANG Jin² LI Xiaoli²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025

Abstract: The data of Global/Regional Assimilation and Prediction System-Regional Ensemble Prediction System (GRAPES-REPS) from June to August 2015 are used and an objective method based on grid data is designed for locating the center position of the southwest vortex. Firstly, the accuracy of GRAPES to the southwest vortex is tested, then 4 long-life southwest vortexes are picked to evaluate the ensemble forecasting performance of GRAPES-REPS in the generating, developing, moving and precipitation process of southwest vortex. The results show that: (1) accuracy of GRAPES to the southwest vortex keeps a high score, and the false rate is slightly larger than the missing rate. (2) GRAPES-REPS performs well in forecasting generation and development of the southwest vortex. Most ensemble members can predict these

^{*} 国家自然科学基金项目(91437113 和 41475044)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506005 和 GYHY201006015)、国家科技支撑计划项目(2015BAC03B01)共同资助

2016 年 6 月 15 日收稿; 2017 年 2 月 15 日收修定稿

第一作者:王静,主要从事数值天气预报和集合预报研究. Email:wangj_929@163.com

通信作者:陈静,主要从事数值天气预报和集合预报研究. Email:chenj@cma.gov.cn

processes, but the occurring time is earlier than observation. (3) The forecasted moving path for southwest vortex by GRAPES-REPS in 24 h is reasonable, the ensemble forecast is averagely much better than control member, and the path goes to north after 24 h in the eastward moving cases. (4) The forecast of the intensity of the southwest vortex is too strong, with higher value of center positive vorticity and lower value of geopotential height. (5) In 24 h forecast, the rain score for light rain to heavy rain triggered by the southwest vortex performs well, and the rainfall area matches the observation very well, while area for torrential rain lies slightly north in some cases, but mostly is reasonable. After 24 h, since the pathway of the eastward moving southwest vortexes is by north, the prediction of strong rainfall area follows the same trend. It can be seen that the system has the ability to forecast precipitation caused by the southwest vortex. So, improving the capability of mesoscale ensemble forecast by GRAPES-REPS would be helpful for the prediction of precipitation caused by the southwest vortex.

Key words: GRAPES-REPS (Global/Regional Assimilation and Prediction System-Regional Ensemble Prediction System), the southwest vortex, ensemble forecast, pathway forecasting, verification

引 言

西南低涡是在青藏高原特殊地形和环流背景共同作用下形成于高原东侧具有气旋性环流的 α 中尺度天气系统,通常产生于对流层低层(700 hPa 或 850 hPa),水平尺度 300 ~ 500 km (朱乾根等, 2000),其发生、发展不仅给源地造成降水,在一定条件下东移也将导致其移动路径上大范围降水,是对西南地区及长江中下游天气有重要影响的中尺度对流天气系统(陶诗言, 1980; 卢敬华, 1986)。我国历史上许多罕见的特大洪涝灾害,都与西南低涡东移发展有关(程麟生和郭英华, 1988; 陈忠明等, 2003; 赵思雄和傅慎明, 2007),如 1981 年 7 月 12—14 日四川“81·7”特大暴雨灾害,造成直接经济损失近 25 亿元;1998 年长江流域发生全流域大洪水,造成直接经济损失 916 亿元等。西南低涡发生、发展物理机制研究一直受到我国气象学家的高度重视(Wu and Chen, 1985; 高守亭, 1987),有关西南低涡的涡源、结构、物理机制、影响因子、数值模拟等已经有了很多研究(赵平和孙淑清, 1991; 李国平等, 1991; 李跃清等, 2012; 王其伟和谈哲敏, 2014; 刘晓波和储海, 2015; 卢萍等, 2016),且西南低涡的预报技术也一直受到预报员的重视。早期的西南低涡预报方法是采用经验外推预测西南低涡的移动趋势,如成都中心气象台曾提出预报西南低涡的人工智能专家系统(汪之义和汪丽, 1994),20 世纪 80 年代以来,科学家将中尺度模式引入西南低涡数值预报的研究(罗四维等, 1984; Shen et al., 1986; 何光碧等,

2005),王新敏等(2009)对比了 ECMWF 和 T213 两种数值模式对 2008 年 7 月 21—23 日西南低涡过程的移动路径及其引发暴雨的预报能力进行检验,认为模式对西南低涡系统移动路径预报仍然存在偏差。

集合预报是一种随机动力概率预报方法,解决了单一确定性数值预报存在的不确定性问题(陈静等, 2002),近年来,区域中尺度集合预报在高影响天气的预报中已经成为一种重要的科学技术手段(陈静等, 2005),一些基于有限区域数值预报模式的集合预报系统已经建立并得到发展(Zhang et al., 2015a)。中国气象局数值预报中心自主研发的 GRAPES-REPS 区域集合预报系统于 2014 年进入业务化运行,产品提供公众共享(<http://www.nmc.cn/publish/nwpc/grapes-regional/probability/index.html>)。而将集合预报运用到时空尺度较小的西南低涡数值预报中,将有利于提高对这类对流天气系统的预报能力(陈静, 2003)。在目前的业务工作中,预报员迫切地需要了解 GRAPES-REPS 对于西南低涡的预报能力以及可能存在的偏差,特别是西南低涡移动路径和降水落区的误差等,从而采取适当的人工订正,做出较合理的预报(宗志平等, 2013)。

本文基于 GRAPES-REPS 区域集合预报系统,对西南低涡集合预报进行检验评估,首先挑选了 2015 年夏季(6—8 月)四次生命史超过 36 h 的西南低涡过程,统计这四次西南低涡的源地、生命史、降水落区和移动类型;并将四次过程分为两种类型:东移型(7 月 14—17 日; 7 月 21—23 日)和停滞型

(6月12—14日;8月16—19日),通过判断西南低涡中心及移动,分析集合预报与实况相较的误差特征,并对涡旋强度和降水进行集合预报检验评估,以期在实际业务预报和集合预报性能改进提供参考依据。

1 2015年夏季长生命史西南低涡活动统计及环流形势

我国暴雨灾害主要发生在主汛期6—8月,这也是西南低涡尤为活跃的时期,其生命有时长至3~5 d,本文重点评估2015年6—8月持续时间超过

36 h的长生命史西南低涡集合预报效果。首先利用美国国家环境预报中心(National Center of Environment Prediction, NCEP)的业务全球格点分析资料(Final Operational global Analysis, FNL)统计2015年夏季长生命史的西南低涡过程,统计区域为 $26^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 、 $99^{\circ}\sim 109^{\circ}\text{E}$ 。统计结果如表1,2015年6—8月发生了四次长生命史的西南低涡过程,分别发生于6月12—14日(以下简称“6·12”过程)、7月14—16日(以下简称“7·14”过程)、7月21—23日(以下简称“7·21”过程)、8月17—19日(以下简称“8·17”过程)。

表1 2015年夏季(6—8月)西南低涡活动特征

Table 1 Active features of the southwest vortex in summer (June—August) 2015

发生时间/UTC	结束时间/UTC	源地	降水分布特征	移动类型
6月12日12	6月14日00	盆地东部	重庆、贵州北部地区	停滞型
7月14日06	7月16日12	盆地东部	四川大部分地区长江中下游	东移型
7月21日18	7月23日12	九龙地区	四川盆地东部、重庆地区、长江中下游	东移型
8月17日00	8月19日00	盆地中部	四川盆地中东部、重庆地区	停滞型

图1是与这四次西南低涡过程对应的环流形势图,下面将详述这四次西南低涡过程特征。“6·12”过程低涡的源地位于四川盆地东部,发生于6月12日12 UTC,生命过程中低涡在四川—重庆一带徘徊。在12日12 UTC,500 hPa呈平直西风气流(图1a),在700 hPa等压面上,四川盆地东部有等高线闭合低中心(3090 gpm)和正绝对涡度中心($25\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$),在发展过程中受高原涡影响,低涡中心位置出现东西摆动,低涡降水主要分布在盆地中部、重庆南部以及贵州地区。

“7·14”过程的西南低涡发生时间是7月14日06 UTC,源地位于四川盆地东南部,低涡发生时,500 hPa高度上川西高原地区受低压槽控制(如图1b所示);700 hPa高度上四川盆地东部有等高线闭合低中心和正涡度中心,高度中心最低值为3080 gpm,绝对涡度中心最大值达到 $30\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,7月15日00 UTC,850 hPa高度上在西南低涡东南部出现西南低空急流。7月14—16日,受500 hPa川西高原低压槽东移影响,西南低涡加强并东移发展,造成四川盆地和长江流域大范围降水,降水落区呈东西向带状分布,与低涡移动路径吻合,日降水极大值位于四川东南部和重庆西部地区。

“7·21”过程源地是九龙地区,西南低涡出现时

间是7月21日18 UTC,此次过程也属于东移型西南低涡过程,其环流形势与“7·14”过程相似,500 hPa高度上四川盆地上空存在一较强的低压槽(图1c),700 hPa上四川盆地有等高线闭合低中心及正涡度中心,高度中心最低值为3095 gpm,中心最大绝对正涡度值为 $25\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,西南低涡随500 hPa低压槽东移而东移发展,影响长江中下游地区,造成四川东南部、重庆、湖南等地区大范围降水。

“8·17”过程西南低涡源地位于四川盆地中东部,生成于8月17日00 UTC,直至8月19日00 UTC一直在四川盆地中东部、重庆地区徘徊停滞,维持了较长时间。“8·17”过程的环流形势特征如图1d所示,在四川盆地中部,500 hPa上为低压槽,700 hPa上有等高线闭合低中心(3100 gpm)和正绝对涡度中心($25\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$),8月18日06 UTC,低涡西北侧冷空气开始加强,涡旋强烈发展并略向东有移动,但此时正值台风影响,西太平洋副热带高压缓慢北抬,环流形势相对稳定,因而西南低涡涡旋的移动缓慢,给四川盆地中东部,重庆西南部造成大范围强降水,其中重庆高坪日降水量最大值达到192.7 mm。

由上可见,“6·12”过程和“8·17”过程属于停滞型西南低涡,而“7·14”过程和“7·21”过程属于东移

型西南低涡,这两类西南低涡的环流形势存在较大差异,第 3 节将对这四次西南低涡过程的发生、演变、移动、强度及其引发的降水进行集合预报检验。

2 资料和方法

2.1 GRAPES-REPS 及资料简介

2015 年中国气象局数值预报中心业务运行的 GRAPES-REPS 集合成员数为 15 个,包含 1 个控制预报和 14 个扰动预报,预报范围为中国区域($15^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 、 $75^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$),水平分辨率 $0.15^{\circ}\times 0.15^{\circ}$,水平格点数 502×330 ,垂直坐标为地形追随高度坐标,垂直层次 31 层,预报时效 72 h,背景场和侧边界条件由数值预报中心 T639 全球集合预报系统提供,初值扰动技术采用集合变换卡尔曼滤波方法(ensemble transform Kalman filter,ETKF)(Wang and Bishop, 2003; 马旭林等, 2008; Zhang et al, 2015b),模式扰动方法采用多物理过程组合(张涵斌等, 2014)。

选取 2015 年 6—8 月 GRAPES-REPS 的西南低涡实时预报结果,模式初始时间为 00 UTC,模式输出间隔为 6 h。等压面真实资料为美国国家环境预报中心(NCEP)FNL 格点分析场和 GRAPES-MESO 中尺度模式分析场,降水观测资料采用国家气象信息中心的高分辨率地面—卫星—雷达三源降水融合格点分析资料,分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ (潘旸等, 2015)。

2.2 格点资料西南低涡中心客观识别方法

西南低涡路径预报效果是西南低涡预报评估的重要方面,然而,西南低涡中心及移动路径定位没有统一的方法。如高原所出版的《西南低涡年鉴》(中国气象局成都高原气象研究所和中国气象学会高原气象学编委会, 2016)对西南低涡的识别方法是由人工分析天气图的方式判断西南低涡中心;Li et al (2014)采用 700 hPa 等压面层风场的辐合中心确定西南低涡中心位置,并据此标准作出其移动路径的预报;而 Zhong et al(2014)则考虑西南低涡的斜压结构,取低涡范围内垂直层次上的涡度最大值所在经纬度为其中心位置。

本文综合《西南低涡年鉴》(中国气象局成都高原气象研究所和中国气象学会高原气象学编委会,

2016)和 Li et al(2014)的定位方法,结合 GRAPES 模式水平分辨率,利用 700 hPa 高度场、涡度场以及风场信息,设计了一种适用于格点资料的西南低涡中心客观识别方法。详细计算过程如下:首先在西南低涡活动区域($26^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 、 $99^{\circ}\sim 109^{\circ}\text{E}$)700 hPa 气压场中搜寻一个低值中心(p_x, p_y),确定其经纬度,并以此作为西南低涡中心初始猜测点(初猜点),接着在(p_x, p_y)附近寻找涡度最大值的点(V_x, V_y),最后在该点(V_x, V_y)附近寻找风速最小值的位置,通过差值和格点向经纬度转换,将该点作为西南低涡中心位置(λ, φ),并将这一位置作为下一时效初猜点的坐标($\lambda_{ij}, \varphi_{ij}$),按上述高度低值中心、涡度最大值中心、风速最小值中心顺序修订确定该预报时效西南低涡中心位置,如此循环直至预报结束。确定好各预报时效西南低涡中心位置后,就可绘制其移动的路径。

图 2 展示了在任意两次西南低涡过程中任一成员、任一预报时效中,由该方法确定的西南低涡中心(圆点)与高原所《西南低涡年鉴》标准下主观判断的西南低涡中心(三角)的对比。可见该方法确定的西南低涡中心基本与年鉴标准重合,在本文分析的四次个例中发现,个别时效有不止一个西南低涡系统发生,这时该方法会出现一定偏差,本文以风场辐合中心为基准对西南低涡中心做出修正。

通过该方法形成合理的西南低涡实况移动路径和预报路径后,可以计算集合预报成员路径预报误差及离散度分布,以评估 GRAPES-REPS 对西南低涡移动路径的预报能力。

2.3 西南低涡集合预报评估方法

选择 700 hPa 西南低涡涡度最大值和位势高度最低值作为西南低涡强度指标,检验分析 GRAPES-REPS 对西南低涡强度变化的预报能力。而降水检验方法则采用目视法、概率预报、降水评分等方法,其中降水评分主要采用 AROC(area of relative operating characteristic)评分和 TS(threat score)评分。相对作用特征 ROC(relative operating characteristic)是将信号探测理论应用到数值天气预报二分类要素预报的检验方法,将命中率和假警报率在笛卡尔坐标上绘成一曲线,即为 ROC 曲线,而 ROC 与横坐标轴围成的面积即为 AROC(陈静, 2003),AROC 值 >0.5 为有效的预报,且值越大表明预报越好,检验结果详见下文。

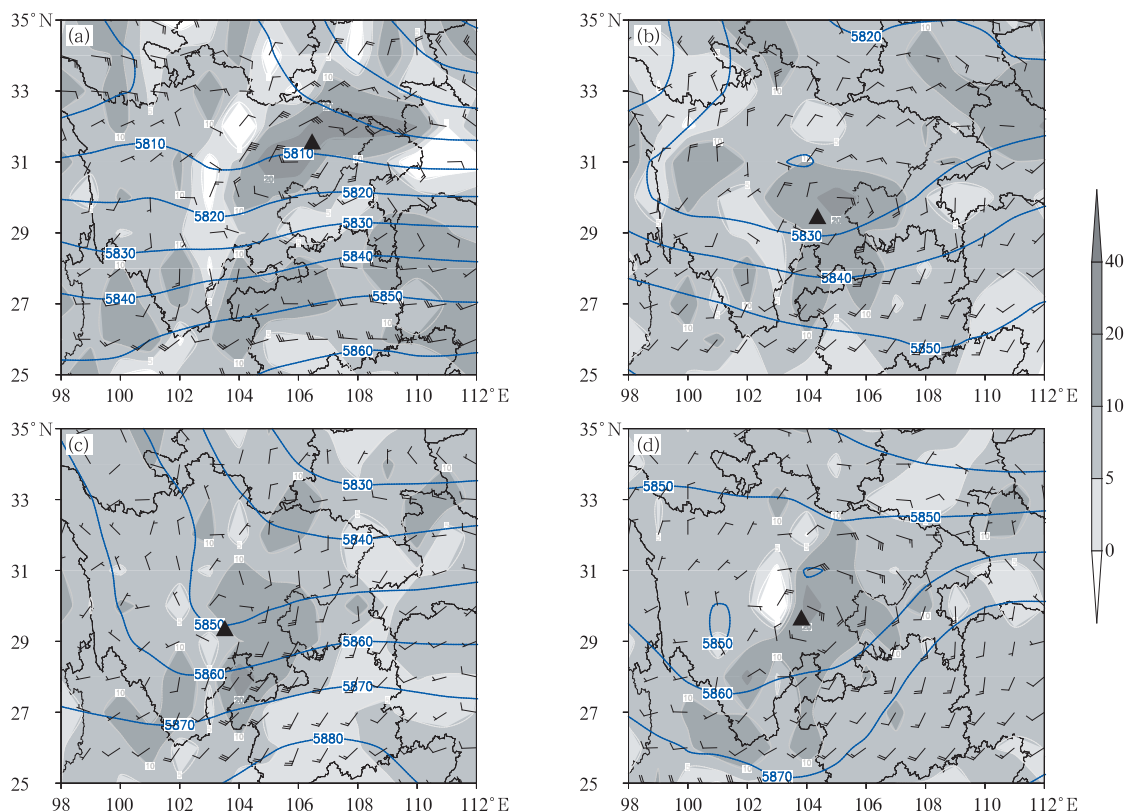


图1 2015年6月12日12 UTC(a)、7月14日06 UTC(b)、7月21日18 UTC(c)和
8月17日00 UTC(d) 500 hPa 高度场(实线)、700 hPa 风场、
绝对涡度(填色图,单位: 10^{-5} s^{-1})、涡旋中心(实心三角)

Fig. 1 The 500 hPa height field (solid line), 700 hPa wind field, absolute vorticity
(shaded area, unit: 10^{-5} s^{-1}), vortex center (solid triangle)

(a) 12 UTC 12 June, (b) 06 UTC 14 July, (c) 18 UTC 21 July, (d) 00 UTC 17 August 2015

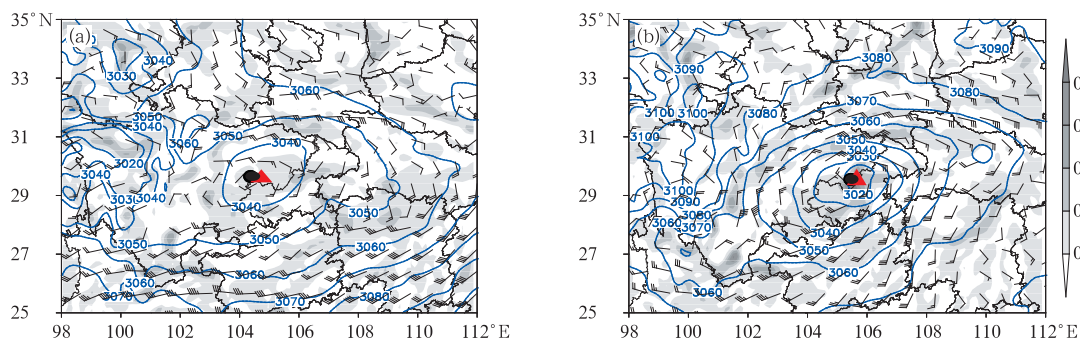


图2 客观识别方法确定的西南低涡中心(圆点)与按年鉴标准确定的西南低涡中心(三角)位置对比
(a)成员1于6月12日00 UTC起报的42 h预报, (b)成员5于7月14日00 UTC起报的18 h预报
(蓝色实线为700 hPa 高度场; 风标为700 hPa 风场; 阴影为垂直涡度,单位: 10^{-3} s^{-1})

Fig. 2 Comparison of the southwest vortex centers by the objective method (dot) and the subjective
method of Institute of Plateau Meteorology (triangle)

(a) the 42 h forecast starting from 00 UTC 12 June by Member 1, (b) the 18 h forecast starting
from 00 UTC 14 July by Member 5

(Blue solid line represents 700 hPa height; vane is 700 hPa wind; shaded area is vertical vorticity, unit: 10^{-3} s^{-1})

3 西南低涡集合预报检验结果

3.1 西南低涡控制预报评估

首先分析 GRAPES-REPS 控制预报对西南低涡的预报能力,评估时段为 2015 年 6 月 9 日至 7 月 9 日,预报起报时间为 00 UTC,预报间隔 12 h,真实参考资料采用 FNL 分析资料。评估方法采用二分类预报检验方法,统计模式中西南低涡发生的次数与 FNL 资料中的情况做对比,并建立二分类检验联列表,分析西南低涡预报的命中率、空报漏报等基本情况(Jolliffe and Stephenson, 2016)。

表 2 是 2015 年 6 月 9 日至 7 月 9 日西南低涡控制预报二分类检验联列表,由此计算出 GRAPES-REPS 控制预报对西南低涡预报的命中率为 84.72%,空报率为 37.75%,漏报率为 15.27%,ETS 评分为 0.37,可见控制预报模式对西南低涡的命中率较高,漏报率较低,说明 GRAPES-REPS 对西南低涡的预报具有较高的可信度。

表 2 2015 年 6 月 9 日至 7 月 9 日西南低涡
控制预报二分类检验联列表

Table 2 Dichotomous event contingency table
of the forecast of the southwest vortex
from 9 June to 9 July 2015

GRAPES-REPS	FNL	
	发生	未发生
发生	61	37
未发生	11	108

表 3 是西南低涡 24、48 和 72 h 预报检验评分,可见 ETS 评分在 24 h 达到 0.49,之后随预报时效的增加而逐渐降低;BIAS 评分在 00~48 h 为 1.00~1.30,但在 72 h 预报达到 1.89,后期偏差明显增大;整体来看西南低涡漏报率较低,命中率较高,接近于 1,空报率大于漏报率,具体分析空报原因发现,GRAPES 模式对四川盆地西南部九龙地区(27°

表 3 检验评分随预报时效的分布

Table 3 The test scores of forecast at different lead time

评分	预报时效		
	24 h	48 h	72 h
ETS	0.49	0.45	0.34
BIAS	1.30	1.00	1.89
命中率	0.90	1.00	1.00
漏报率	0.10	0.00	0.00
空报率	0.31	0.38	0.47

~29°N、100°~102°E)总是空报了一个低值系统,且生命史通常不超过 12 h。总体来看,GRAPES 模式对西南低涡有较高的预报能力。

3.2 西南低涡生成、发展及演变评估

3.2.1 生成及发展时间预报评估

利用 GRAPES-REPS 初始时间为 00 UTC 的 72 h 预报资料,逐时次统计 15 个集合成员中预报存在西南低涡的集合成员数,集合成员数大(小)说明大部分集合成员预报存在(不存在)西南低涡。从集合成员数随预报时效的变化可以看出 GRAPES-REPS 对西南低涡生成及发展的预报情况,与实际观测对比,可以评估 GRAPES-REPS 预报西南低涡生成及发展时间的准确程度。因此,本文统计了这四次西南低涡过程生成前后 3 d 预报的集合成员数,结果见图 3。

首先分析“7·14”过程和“7·21”过程这两次东移型西南低涡。图 3a 是 7 月 13、14 及 15 日 00 UTC 起报的集合成员数统计结果。首先看 7 月 13 日 00 UTC 的预报,在 24 h 预报中,未扰动的控制预报和 9 个集合成员均生成了西南低涡,比实际观测生成时间(14 日 06 UTC)提前了 6 h,而 30 h 预报正对应于实际观测生成时间,有 13 个成员预报有西南低涡,比上一时次增加 3 个,可见有 3 个成员正确预报了西南低涡生成时间,总体来说,控制预报和大部分成员对西南低涡生成时间预报均略偏早;再看 7 月 14 日 00 UTC 的预报,在模式积分初始时刻,控制预报和 8 个集合成员均有西南低涡,仍然比实际观测早 6 h,在 6~60 h 预报中,13~15 个集合成员均预报出西南低涡环流,说明 GRAPES-REPS 对低涡维持预报较好;从 15 日 00 UTC 的预报可见,控制预报中西南低涡在 42 h 预报时效已消亡,比实际观测消亡时间(16 日 06 UTC)偏晚 12 h,而大部分集合成员均比实况偏晚 12~18 h,可见控制预报和大部分集合成员均对低涡消亡时间预报偏晚。图 3b 则是“7·21”过程在 7 月 20、21 及 22 日 00 UTC 起报的西南低涡集合成员生成数统计,结果与“7·14”过程类似,不再赘述。

由上可知,对东移型西南低涡,尽管 GRAPES-REPS 有个别集合成员能够准确预报该生成和消亡时间,但控制预报和大部分集合成员对西南低涡生成时间预报偏早,对低涡消亡预报偏晚,而在低涡维持阶段,几乎所有成员均能预报出西南低涡环流。

图 3c 是“6·12”停滞型西南低涡过程连续 3 d

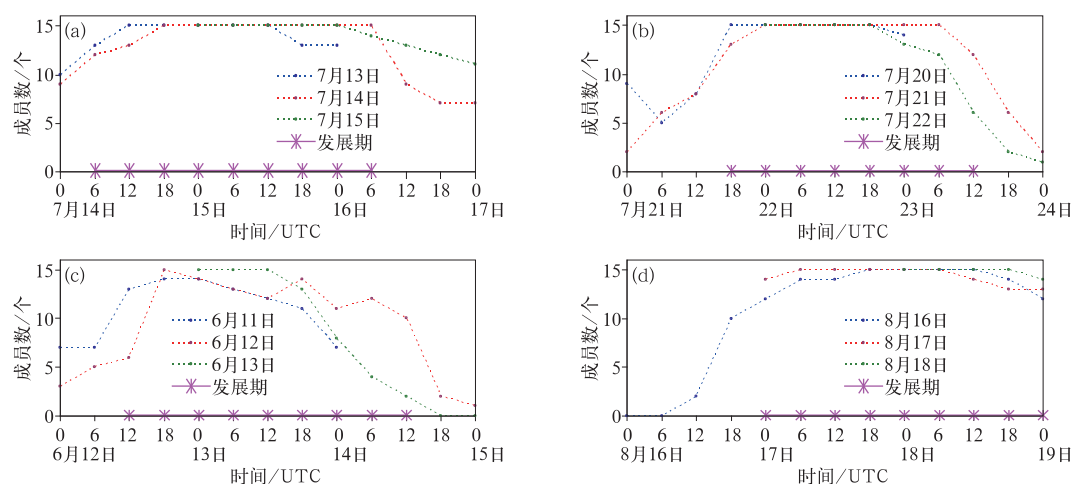


图3 GRAPES-REPS连续3 d初始时间为00 UTC预报中存在西南低涡的集成员数

(a) “7·14”过程, (b) “7·21”过程, (c) “6·12”过程, (d) “8·17”过程

(—*—为实况西南低涡发展期)

Fig. 3 The number of ensemble members in the 3 d forecast of the southwest vortex by GRAPES-REPS

(a) process on 14 July, (b) process on 21 July, (c) process on 12 June, (d) process on 17 August

(The initial time is 00 UTC; —*— is the developing period of the southwest vortex)

的预报(详见图中说明),此次西南低涡实况强度较弱,预报与实况接近,连续3 d预报的西南低涡成员数呈现出减—增—减的特点。图3d是8月16、17和18日00 UTC起报的集成员数统计结果,首先分析8月16日00 UTC的预报,18 h预报中,控制预报和9个集成员均预报生成西南低涡,比实际观测中出现西南低涡时间(17日00 UTC)提前6 h,生成预报偏早;在低涡发展阶段均有14~15个集成员预报出西南低涡环流,说明GRAPES-REPS对“8·17”过程西南低涡维持预报均较好;在8月17日00 UTC起的预报中,控制预报54 h预报低涡消亡,比实际观测(19日00 UTC)晚6 h,而大部分集成员对低涡生命结束预报偏晚6~12 h;18日00 UTC的对低涡消亡的预报同样偏晚6~12 h(图中略),可见GRAPES-REPS控制预报和大部分集成员均对低涡消亡时间预报偏晚。总的来说,GRAPES-REPS对停滞型和东移型西南低涡过程在生成阶段、维持阶段和消亡阶段的预报有相似结论,即对西南低涡生成时间预报偏早,消亡时间预报偏晚,对低涡的维持预报较好。

3.2.2 移动路径预报评估

通过以上西南低涡发生前后连续3 d的预报可以看出,西南低涡生成当日00 UTC的预报能够涵盖西南低涡完整生命过程,且在西南低涡生成及发展阶段集成员数均略大于其余两日,模拟效果相对较好,因此在以下的路径评估中,均采用西南低

涡生成当日00 UTC的预报。

图4a是7月14日00 UTC起报的GRAPES-REPS集合预报西南低涡移动路径及实际观测路径。由图可见,“7·14”过程实际观测的西南低涡沿东北偏东方向移动,24 h预报时效内,控制预报和集合平均移动路径均较观测路径略偏北,集合平均则略优于控制预报,各集成员西南低涡中心位置离散度不大。24 h之后的西南低涡集合预报路径明显偏北,低涡中心大都散落在观测低涡中心的西北方向。同为东移型的“7·21”西南低涡路径移动预报特征(图4b)与“7·14”过程相似,不同的是,在18~24 h预报时效内(7月21日18 UTC至22日06 UTC),控制预报和集合平均路径较观测偏南,而24 h(7月22日06 UTC)之后集合预报路径比实际移动路径偏北,西南低涡集合平均预报移向明显优于控制预报。

可注意到,“7·14”和“7·21”过程在24 h预报时效之后,西南低涡路径中均存在预报偏北问题,且偏北程度随时间增加而增大。分析路径预报偏北的原因,对“7·14”过程,与西南低涡相应的500 hPa表现为有低槽东移,而集合预报模式则在500 hPa高度上预报了一个较实况偏强的闭合低压中心(图略),引导低层西南低涡向北偏移;此外模式对低涡东部南风预报偏强,引导西南低涡向北移动,造成路径预报误差。“7·21”过程中,500 hPa高度预报与实况接近,但由于西南低涡东南部中低层西南气

流预报明显偏强(图略),牵引西南低涡向东北方向移动。

图 5 是两次停滞型西南低涡的控制预报、集合成员和集合预报平均以及观测西南低涡中心位置及移动路径示意图。从图 5a 可见,在 6 月 12 日 18 UTC 至 13 日 12 UTC,西南低涡中心在东南和西北方向略有摆动,而 6 月 12 日 00 UTC 的预报显示,集合控制预报对西南低涡中心位置和移动路径东西摆动幅度更大,而集合预报平均的移动路径呈东西向摆动,中心位置较观测偏北约 50~100 km,偏差较小,摆动幅度和转折时间均与观测更为接近,表明集合平均对西南低涡路径和移动预报具有明显优势。“8·17”过程亦为停滞型西南低涡,西南低涡中心位置及路径预报如图 5b 所示,各集合成员对西

南低涡中心位置预报均沿东北向移动,且移速缓慢,移动距离较小,控制预报和集合平均对低涡中心位置预报均存在略微偏北和滞后。在实际观测中,低涡在四川东部沿东北方向缓慢移动,直至生命结束均未移出四川盆地,集合预报平均更接近实际观测。

由以上的路径分析可以发现,无论是东移型还是停滞型西南低涡都存在预报偏北的问题,但偏北的程度各不相同,接下来对四次过程路径偏差定量分析。图 6 是与这四次西南低涡过程发展期相对应的 GRAPES-REPS 集合预报路径离散度及误差。图 6a 和 6b 是东移型的“7·14”和“7·21”过程,图 6c 和 6d 是停滞型的“6·12”和“8·17”过程。

由图 6a 可见,“7·14”过程的 6~24 h 路径预报误差增长平缓,集合预报平均误差明显小于控制

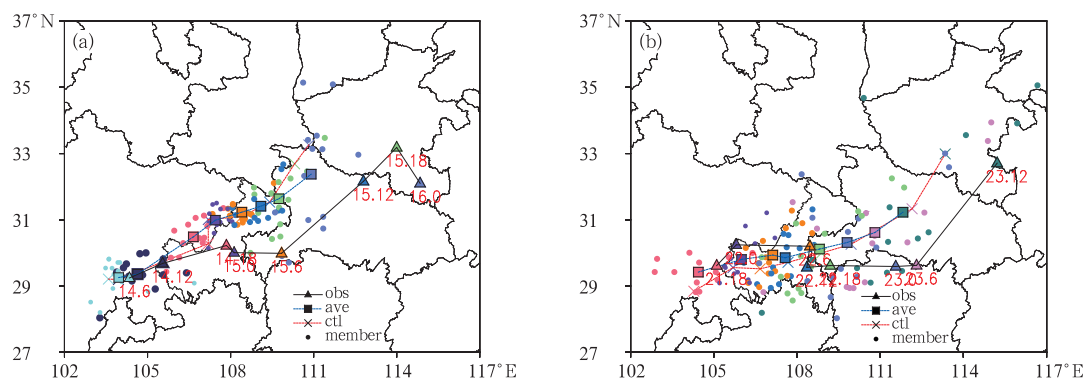


图 4 GRAPES-REPS 西南低涡中心位置及移动路径预报图

(a) 初始时间 7 月 14 日 00 UTC, (b) 初始时间 7 月 21 日 00 UTC

(× 控制预报, · 集合成员, ■ 集合预报平均, ▲ 实际观测; 图中颜色代表不同的预报时效: ● 0 h, ● 6 h, ● 12 h, ● 18 h, ● 24 h, ● 30 h, ● 36 h, ● 42 h, ● 48 h, ● 54 h, ● 60 h)

Fig. 4 Diagram of the southwest vortex center position and pathway predicted by GRAPES-REPS

(a) initial time: 00 UTC 14 July, (b) initial time: 00 UTC 21 July

(× control member, · ensemble member, ■ average of ensemble forecast and ▲ observation; different colors represent different forecast lead time: ● 0 h, ● 6 h, ● 12 h, ● 18 h, ● 24 h, ● 30 h, ● 36 h, ● 42 h, ● 48 h, ● 54 h, ● 60 h)

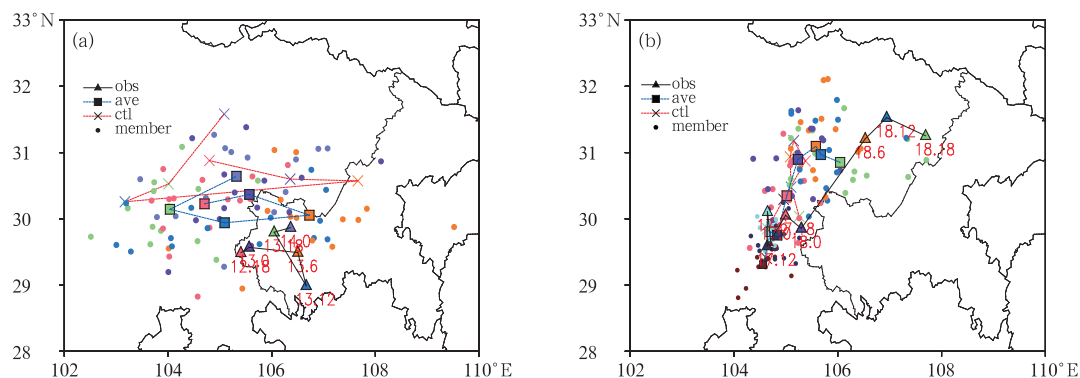


图 5 同图 4, 但 (a) 初始时间 6 月 12 日 00 UTC, (b) 初始时间 8 月 17 日 00 UTC

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for (a) initial time: 00 UTC 12 June, (b) initial time: 00 UTC 17 August

预报;24 h 预报的集合预报平均误差为 126 km,而控制预报为 142 km;24 h 之后预报误差曲线增长明显,且控制预报的误差与集合平均误差基本重合;从集合离散度分析的发现,此次过程离散度在 24 h 之内略有减小,之后缓慢增长,最大达到 125.5 km,总体偏小。由图 6b 可见,“7·21”过程 18~30 h 集合预报平均预报误差小于控制预报;24 h 预报的集合预报平均误差为 52 km,而控制预报达到 77 km;30~42 h 集合预报平均和控制预报都呈现出减小趋势,误差值减小到约 50~80 km,且此时控制预报误差优于集合平均,此次过程的集合离散度增长十分明显,特别是在 36 h 之后,随着预报时效的增加,发散的程增大。如图 6c 可见,“6·12”过程的 18~24 h 控制预报的误差值在 170 km 以内,集合预报平均误差明显小于控制预报;24 h 集合平均的预报误差为 89 km,而控制预报为 137.5 km;24~36 h 控制预报的误差增长明显,最大值达到 366 km,而集合预报平均误差值未超过 200 km,体现出明显优势,还可注意到,此次过程 12~36 h 的离散度随时间增长明显。“8·17”过程则如图 6d 所示,0~24 h 控制预报和集合预报平均误差都呈现出增长趋势,集合预报平均误差小于控制预报;24 h 控制预报误差达到 148 km,而集合预报平均为 116 km;24~36 h 控制预报和集合平均预报误差都维持在 210 km

以内,集合预报平均优于控制预报;“8·17”过程离散度增长,但增幅较小,36 h 预报仍未超过 100 km。

由误差和离散度分析可见,GRAPES-REPS 对四次西南低涡过程预报中,两次东移型西南低涡过程前期,集合平均预报误差小于控制预报,而在后期,集合平均预报随控制预报增大,集合平均的优势消失;在两次停滞型的低涡预报中,集合平均预报则始终保持明显优势。由离散度的计算公式可知,当离散度较小时,说明各个集合成员预报的西南低涡中心分布较紧密,反之说明集合成员间比较发散。集合平均误差的大小体现了集合平均预报与实况之间的距离。理想的集合预报离散度应与误差大小相当,若离散度增长幅度长时间明显小于误差增长幅度,则表明集合预报发散度不够。本文四次过程离散度随时间均有增长的趋势,“7·14”过程 12 h 预报之后离散度明显小于误差,集合成员在各个时次均明显偏北,实况并没有落在集合成员预报的范围内,结合图 4a 可见,“7·14”过程存在系统性偏北的偏差。“7·21”过程前 4 个时次集合成员的中心分散在实况周围,而随着预报时效的增加,路径误差呈现偏北的趋势(图 4b),可知这两次东移型的西南低涡过程均存在系统性偏北的误差特征。“6·12”过程集合成员中心较分散,实况落在集合成员间,没有出现明显的系统性误差。“8·17”过程西南低涡移

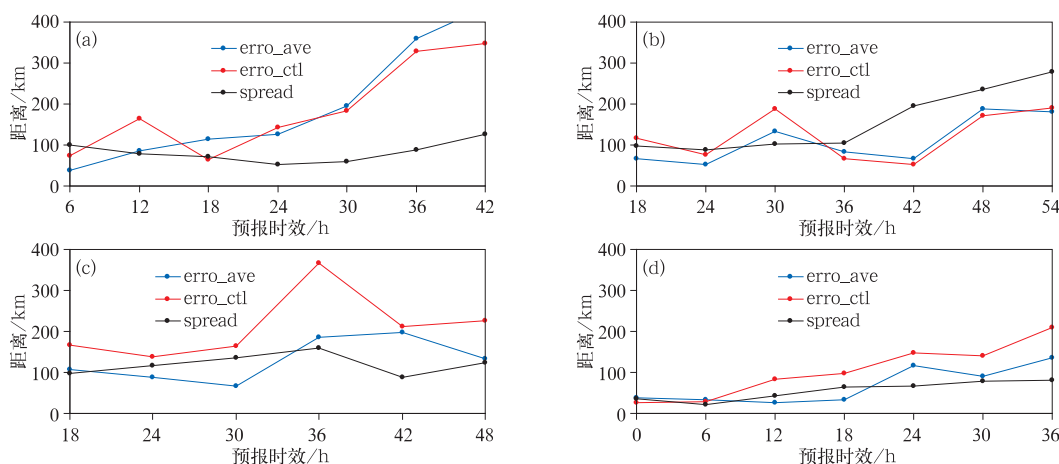


图 6 与西南低涡发展期相对应的 GRAPES-REPS 集合预报路径离散度及误差

(a) 初始时间 7 月 14 日 00 UTC, (b) 初始时间 7 月 21 日 00 UTC,

(c) 初始时间 6 月 12 日 00 UTC, (d) 初始时间 8 月 17 日 00 UTC

Fig. 6 Track dispersion and error of GRAPES-REPS ensemble forecast corresponding to the developing period of the southwest vortex

(a) initial time: 00 UTC 14 July, (b) initial time: 00 UTC 21 July,

(c) initial time: 00 UTC 12 June, (d) initial time: 00 UTC 17 August

动的范围不大,因而集合成员预报的西南低涡中心比较集中,此次过程也没有明显的系统性偏差。

3.2.3 西南低涡强度预报评估

通过对两种移动类型的低涡路径评估,初步了解了 GRAPE-REPS 系统对西南低涡移动范围的预报效果,接下来将对低涡的强度预报进行检验评估,评估主要从高度场和涡度场两个方面着手。集合预报箱线图能够直观地反映出各集合成员对某一气象要素预报的分布情况,对比实况分析值,能够体现出各集合成员预报的偏差情况和离散程度。图 7 即为两次东移型(“7·14”,“7·21”)及两次停滞型(“6·12”,“8·17”)西南低涡过程 700 hPa 的最低位势高度值和最大涡度值箱线图。

图 7a₁ 和 7b₁ 是这两次东移型西南低涡过程的最低位势高度值,两次过程位势高度变化有相似的规律,仅以“7·21”西南低涡过程为例进行说明,其

700 hPa 最低位势高度分析值维持在 3060~3100 gpm,集合预报平均和控制预报则在 2960~3060 gpm,均低于分析值,且控制预报值较集合平均更低。图 7c₁ 和 7d₁ 是两次停滞型过程的最低位势高度值,同理仅以“8·17”过程为例进行详细分析,从图 7d₁ 可见,“8·17”过程实况最低位势高度值维持在 3080~3120 gpm,集合预报平均和控制预报基本重合,维持在 3020~3060 gpm。可见,集合成员对于这四次西南低涡过程的中心位势高度值预报均偏小,表明 GRAPES-REPS 西南低涡强度预报偏强,集合平均略优于控制预报。

图 7a₂ 和 7b₂ 是两次东移型西南低涡过程的最大涡度值,由图 7b₂ 可见“7·21”过程实况西南低涡的最大涡度变化范围为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,集合预报平均为 $0.4 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,而控制预报变化范围较大,且明显大于集合平均预

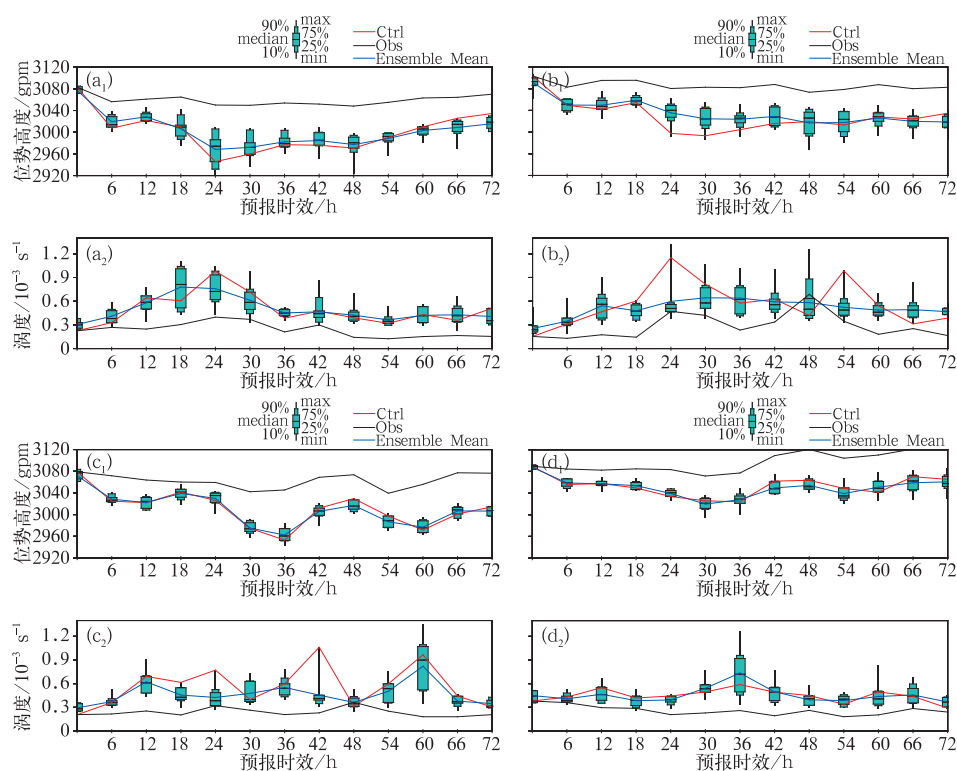


图 7 西南低涡过程 700 hPa 的最低位势高度值(a₁~d₁)和最大涡度值(a₂~d₂)箱线图

(a₁, a₂)初始时间 7 月 14 日 00 UTC, (b₁, b₂)初始时间 7 月 21 日 00 UTC,

(c₁, c₂)初始时间 6 月 12 日 00 UTC, (d₁, d₂)初始时间 8 月 17 日 00 UTC

Fig. 7 Boxplots diagram of the minimum geopotential height (a₁~d₁) and the maximum vorticity (a₂~d₂) of 700 hPa in the southwest vortex

(a₁, a₂) initial time: 00 UTC 14 July, (b₁, b₂) initial time: 00 UTC 21 July,

(c₁, c₂) initial time: 00 UTC 12 June, (d₁, d₂) initial time: 00 UTC 17 August

报;图 7c₂ 和 7d₂ 是两次停滞型西南低涡过程的最大涡度值,由图 7d₂ 可见“8·17”过程实况最大涡度维持在 $0.2 \times 10^{-3} \sim 0.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,集合预报平均和控制预报在 $0.3 \times 10^{-3} \sim 0.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。这表明,集合成员对于两种移动类型的西南低涡涡度值预报均偏大,与位势高度最低值预报相似,同样说明 GRAPES-REPS 西南低涡强度预报偏强,而集合预报平均更接近实况。

在涡旋强烈发展期,各个集合成员的最低位势高度值和最大涡度值相差较大,如 7 月 21 日 00 UTC 的 24 h 预报(图 7b₁),最低位势高度值约为 3000 gpm,最高约为 3050 gpm,两者相差达 50 gpm,而此时最大涡度值相差也超过 $0.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;其余过程的集合预报强度预报特点与此相似,不再赘述。从西南低涡的强度预报分析来看,集合预报位势高度值预报偏小,显示 GRAPES-REPS 系统对温度预报为正偏差;而涡度值预报偏大,表明对风场预报存在偏强的趋势。

3.3 强降水概率预报检验

3.3.1 降水预报 AROC 评分

图 8 为这四次西南低涡过程的 AROC 评分,评分区域为西南低涡活动影响地区($25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 、 $100^{\circ} \sim 115^{\circ} \text{E}$)。图 8a 和 8b 分别是两次东移型(“7·14”,“7·21”)低涡过程,其降水评分具有相似的特征,仅由“7·21”过程为例作详细分析,由图 8b 可见,“7·21”过程在 18~48 h 预报时效内(西南

低涡活跃时期),0.1、10 和 25 mm 量级的 AROC 评分值均 > 0.5 ,表现出较好的预报技巧;25 和 50 mm 量级降水的 AROC 值甚至在 18~30 h 接近 0.75,而此时正是“7·21”过程的强降水时间(7 月 21 日 18 UTC 至 22 日 06 UTC);同样,图 8c 和 8d 分别是两次停滞型(“6·12”,“8·17”)低涡过程,可见停滞型过程与东移型降水 AROC 评分具有同样的特点,不再赘述。

总的来说,东移型和停滞型西南低涡降水评分结论相似,即 GRAPE-REPS 系统在 48 h 预报时效内对小雨到中雨量级的降水评分较好,大雨量级的降水评分在强降水发生时段有较好的表现,表明 GRAPES-REPS 对西南低涡触发的强降水预报具有一定的预报能力。

3.3.2 强降水概率预报

图 9 是四次过程 24 h 累计实况降水和 GRAPES-REPS $\geq 50 \text{ mm}$ 概率预报图。图 9 第一列($a_1 \sim d_1$)为四次西南低涡 0~24 h 累计降水实况分布,第二列($a_2 \sim d_2$)为 0~24 h $\geq 50 \text{ mm}$ 降水的概率分布,第三列($a_3 \sim d_3$)为 24~48 h 累计实况降水,第四列为 24~48 h $\geq 50 \text{ mm}$ 降水的概率分布。

首先分析“7·14”过程,从图 9a₁ 可见,0~24 h 实况降雨带成东北—西南向分布,降水最大值出现在四川泸州地区,50 mm 降水概率大值区域主要分布在重庆和四川西北交界处(图 9a₂),较实况略偏北,但基本合理。24~48 h 暴雨量级降水主要分布在湖北东部(图 9a₃),而 50 mm 降水概率大值区明

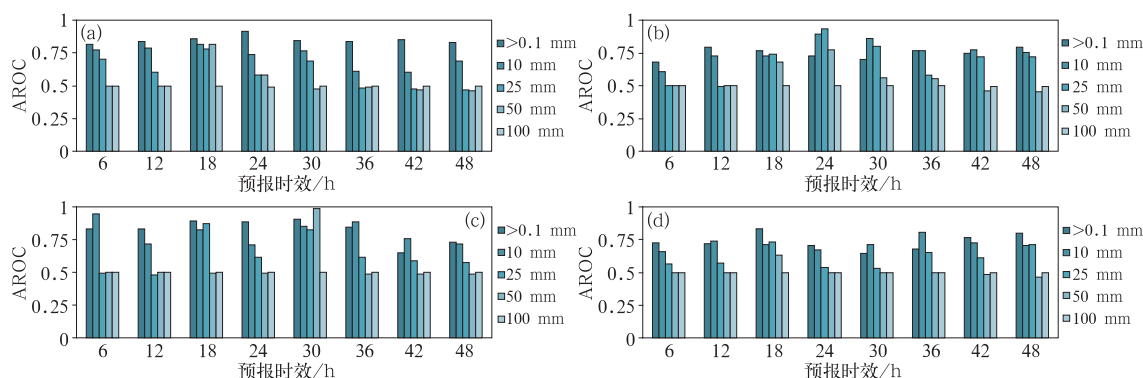


图 8 西南低涡影响区域($25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 、 $100^{\circ} \sim 115^{\circ} \text{E}$)逐 6 h 降水 AROC 评分

(图 8a~8d 初始时间同图 6)

Fig. 8 AROC score of the every 6 h precipitation in the southwest vortex affecting area: $25^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$, $110^{\circ} \sim 115^{\circ} \text{E}$

(Figs. 8a—8d of initial times are the same as in Figs. 6a—6d, respectively)

显偏北偏西(图 9a₁)。“7·21”过程 0~24 h 实况暴雨量级的降水分布在四川泸州地区(图 9b₁), ≥ 50 mm 的概率预报大值区(图 9b₂)与实况基本吻合,但大值区形态有差异,实况为南北向分布,而集合预报呈东西向分布。24~48 h 暴雨量级的概率预报大值区与实况相比有偏北的特征(图 9b₃ 和 9b₄)。“6·12”过程西南低涡影响区域的 0~24 h 强降水

分布在贵州东南部(图 9c₁),而暴雨量级的概率预报大值区分布在贵州中部(图 9c₂),略有偏北,24~48 h 概率预报大值区则比实况(图 9c₃)略有偏西的特征(图 9c₄)。“8·17”过程 0~24 h 实况累计降水的大值区呈“T”形分布(图 9d₁),大暴雨区出现在四川东部和重庆中部,GRAPES-REPS 概率大值区则出现重庆中部地区(图 9d₂),四川盆地东部强降水的

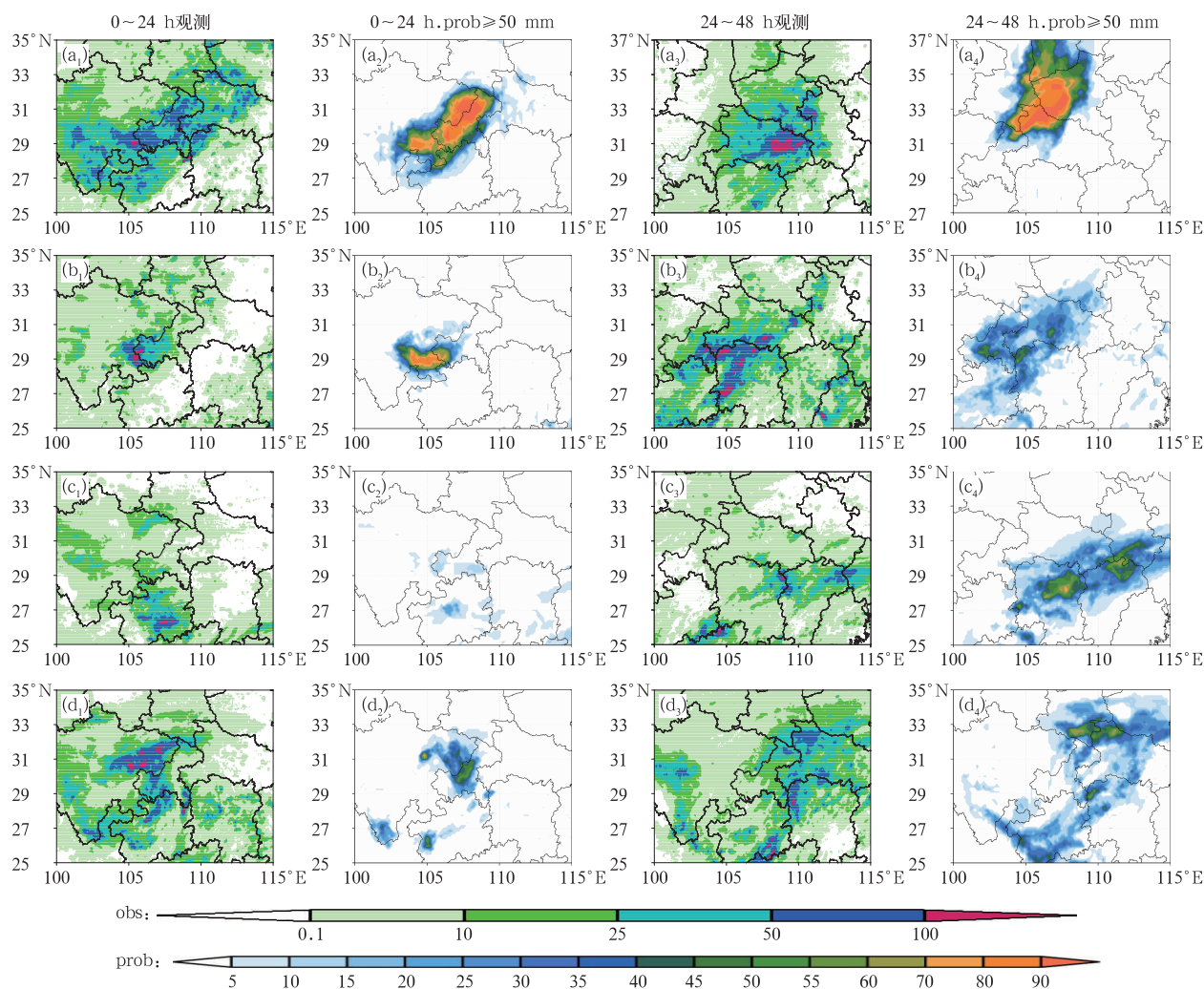


图 9 24 h 降水实况及 GRAPES-REPS 的 24 h 累计降水概率预报

(a₁~d₁) 0~24 h 实况累计降水, (a₂~d₂) 0~24 h 累计降水 ≥ 50 mm 概率预报,
(a₃~d₃) 24~48 h 实况累计降水, (a₄~d₄) 24~48 h 累计降水 ≥ 50 mm 概率预报;
(a₁~a₄) 初始时间 7 月 14 日 00 UTC, (b₁~b₄) 初始时间 7 月 21 日 00 UTC,
(c₁~c₄) 初始时间 6 月 12 日 00 UTC, (d₁~d₄) 初始时间 8 月 17 日 00 UTC

Fig. 9 Observed precipitation in 24 h and probability forecast of 24 h accumulated precipitation by GRAPES-REPS

(a₁~d₁) observed precipitation in 0~24 h, (a₂~d₂) probability forecast of accumulated precipitation ≥ 50 mm in 0~24 h, (a₃~d₃) observed precipitation in 24~48 h, (a₄~d₄) probability forecast of accumulated precipitation ≥ 50 mm in 24~48 h
(a₁~a₄) initial time: 00 UTC 14 July, (b₁~b₄) initial time: 00 UTC 21 July,
(c₁~c₄) initial time: 00 UTC 12 June, (d₁~d₄) initial time: 00 UTC 17 August

概率值偏小,24~48 h暴雨量级的概率预报与实况相比略有滞后(图 9d₃ 和 9d₄)。

由以上分析表明,暴雨落区预报的准确性与西南低涡的移动特征密切相关,GRAPES-REPS 对这四西南低涡强降水概率预报的结果显示:0~24 h暴雨概率预报与实况相比略有偏差,但基本吻合;24~48 h,东移型西南低涡降水明显偏北,而停滞型则略有偏西,表现出略有滞后的特征。

3.3.3 集合成员降水检验

图 10 是四次西南低涡生成 24 h 内路径预报平均误差以及 6 h 累计降水 TS 评分平均值,下面简要分析各集合成员 6 h 累计降水与路径预报误差的相关特征。

首先看两次东移型西南低涡过程,“7·14”过程西南低涡生成 24 h 内,由降水邮票图(图略)可以发现,集合成员对小雨到中雨量级降水预报基本与实况吻合,大雨落区范围略偏大,而暴雨中心则偏东偏北且范围偏大,其中成员 1、成员 5 小雨到大雨量级降水落区表现相对合理,由图 10a 可以发现,以上预报较好的成员不仅在 TS 评分有上好表现,其路径误差也相对较小。由“7·21”过程集合成员降水分布邮票图可见(图 11),各集合成员小雨预报范围与实况比较接近,中雨预报范围偏大,而大部分集合成员对大雨以上降水落区偏西偏北,也有部分成员如

成员 1(图 11b)、成员 2(图 11c)、成员 13(图 11n)暴雨落区与实况比较接近,由图 10b 可以看出,这些成员的 TS 评分均有较好表现,且其中成员 2 与成员 13 的 24 h 平均误差也较低。

下面来看停滞型西南低涡,对“6·12”过程集合成员降水分析,发现成员 5 在小雨到中雨范围预报合理,大到暴雨有漏报,而成员 11 在中雨量级预报范围偏大,大雨到暴雨落区基本与实况吻合,在图 10c 中可以发现,成员 5 路径预报误差较小但其大雨 TS 评分没有展现优势,而成员 11 的 TS 评分从小雨到大雨均有上佳表现,其路径预报误差也较低。从图 12 集合邮票图可以看出,“8·17”过程各集合成员小雨到中雨量级的降水预报区域基本合理,大雨以上量级降水与实况存在偏差,如成员 5、成员 8 仅在小雨到中雨降水区域相对合理(图 12),大雨以上则存在漏报,同样在图 10d 中可以发现,以上成员 TS 评分较高且路径误差相对较低。从图 12l 可以发现成员 11 暴雨的预报也有较好的表现,后文将对此成员的降水特征做进一步分析。

以上分析说明,当集合成员对西南低涡路径预报更为合理时,其降水评分亦较好,大雨到暴雨量级的降水预报更为准确,这进一步表明,大雨到暴雨以上降水落区预报准确性在很大程度上取决于西南低涡移动路径预报的准确性;然而降水评分与路径误

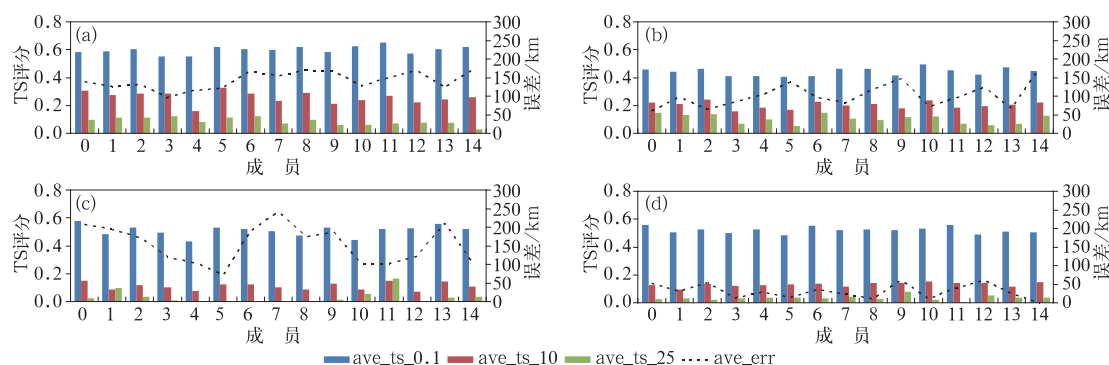


图 10 西南低涡生成 24 h 内 GRAPES-REPS 集合预报路径平均误差及 6 h 累计降水 TS 评分平均值

(a) “7·14”过程, (b) “7·21”过程, (c) “6·12”过程, (d) “8·17”过程

(柱状图中蓝色、红色和绿色分别代表 0.1、10 和 25 mm 量级 6 h 累计降水 TS 评分平均值,

黑色虚线代表 24 h 路径预报平均误差)

Fig. 10 Average error of the forecasted pathway by GRAPES-REPS and average TS scores

of 6 h accumulated precipitation in 24 h since the southwest vortex was generated

(a) process on 14 July, (b) process on 21 July, (c) process on 12 June, (d) process on 17 August

(The blue, red and green colors in the histogram represent the average TS scores of 6 h accumulated

precipitation in 0.1 mm, 10 mm and 25 mm ranks, and the blank dashed line means

the average error of the 24 h forecasted pathway)

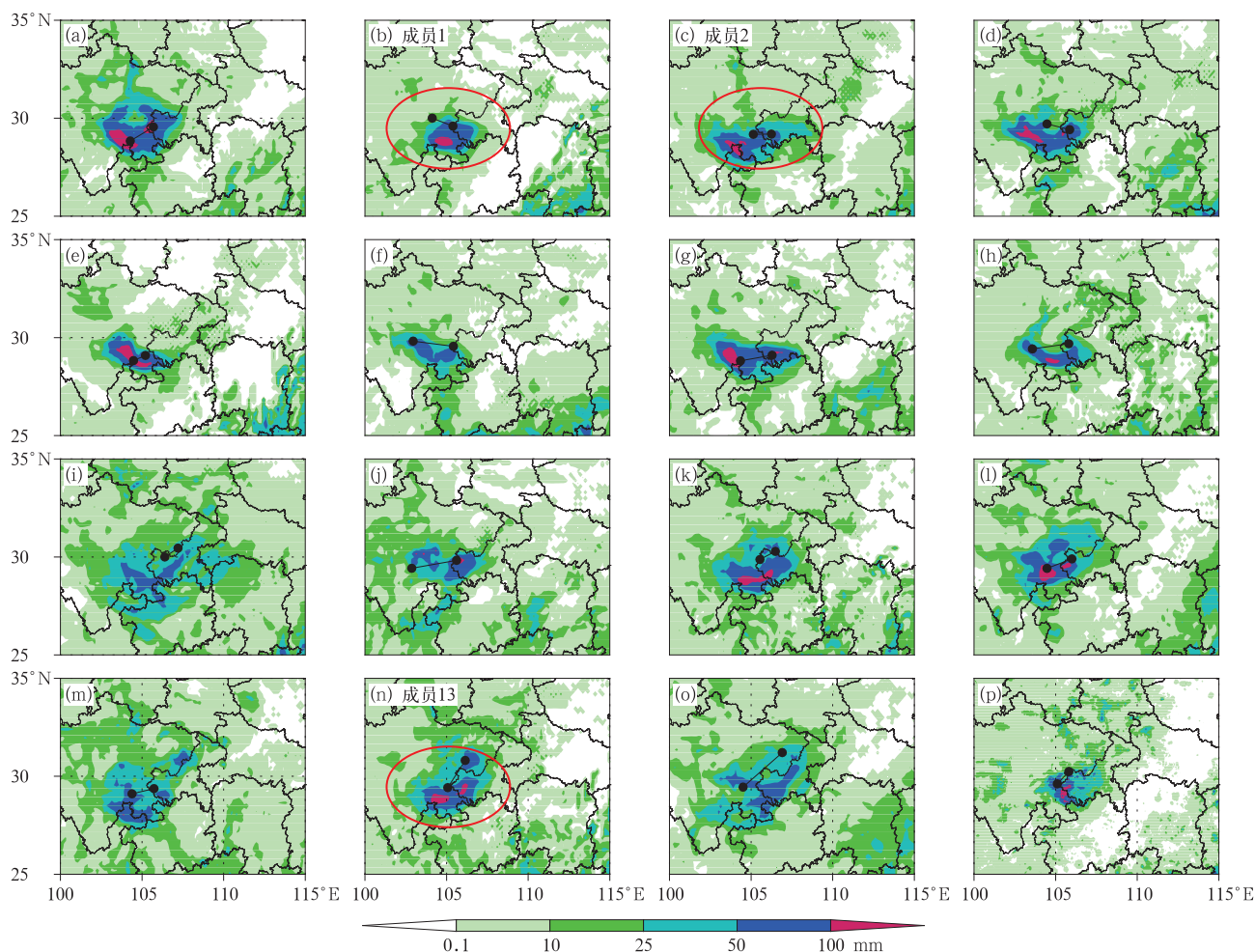


图 11 初始时间为 7 月 21 日 00 UTC 的西南低涡 18~24 h 移动路径、集成员 24 h 累计降水预报邮票图(a~o)及实况观测(p)
(图中●为低涡中心,其连线为低涡移动路径)

Fig. 11 The pathway of the southwest vortex in 18–24 h forecast, the initial time is 00 UTC 21 July, 24 h accumulated precipitation of ensemble members in GRAPES-REPS (a–o) and the observed precipitation (p)

(● means the center of the southwest vortex, and the lines between them represent the pathway)

差并没有绝对的对等关系,这是由于影响降水的因素有很多,除了低涡路径预报以外还要考虑其他方面因素。

以下简要分析一次过程中大部分集合预报成员暴雨落区预报出现较明显偏差的原因,以“8·17”过程为例。图 13 是暴雨落区预报较好的集成员 11 的 850 hPa 比湿和风场预报与实况分析场的比较图。从西南低涡发展成熟期的 8 月 18 日 00 UTC 分析场可见(图 13a),850 hPa 西南低涡东南部为较强的南风气流,西北部的东北气流最大风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且在低涡东南侧以及低涡中心西北部存在水汽大值区;在 8 月 17 日 00 UTC 的 24 h 集成

员 11 预报图上(图 13b),西南低涡形态、中心位置与实况均比较相近,且东南侧的比湿分布预报比较合理,而大部分集成员西南气流预报偏强,东北气流预报偏弱,对于比湿 $> 14 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水汽预报范围偏大(图略),使得暴雨预报落区的偏差较大。

综上所述,这四次西南低涡降水预报检验表明,GRAPES-REPS 对西南低涡影响区域的小—中雨预报较好,但暴雨以上强降水预报存在偏差,主要原因是 GRAPES-REPS 对西南低涡移动路径、形态及影响区域水汽等要素场预报与实况存在偏差所致。

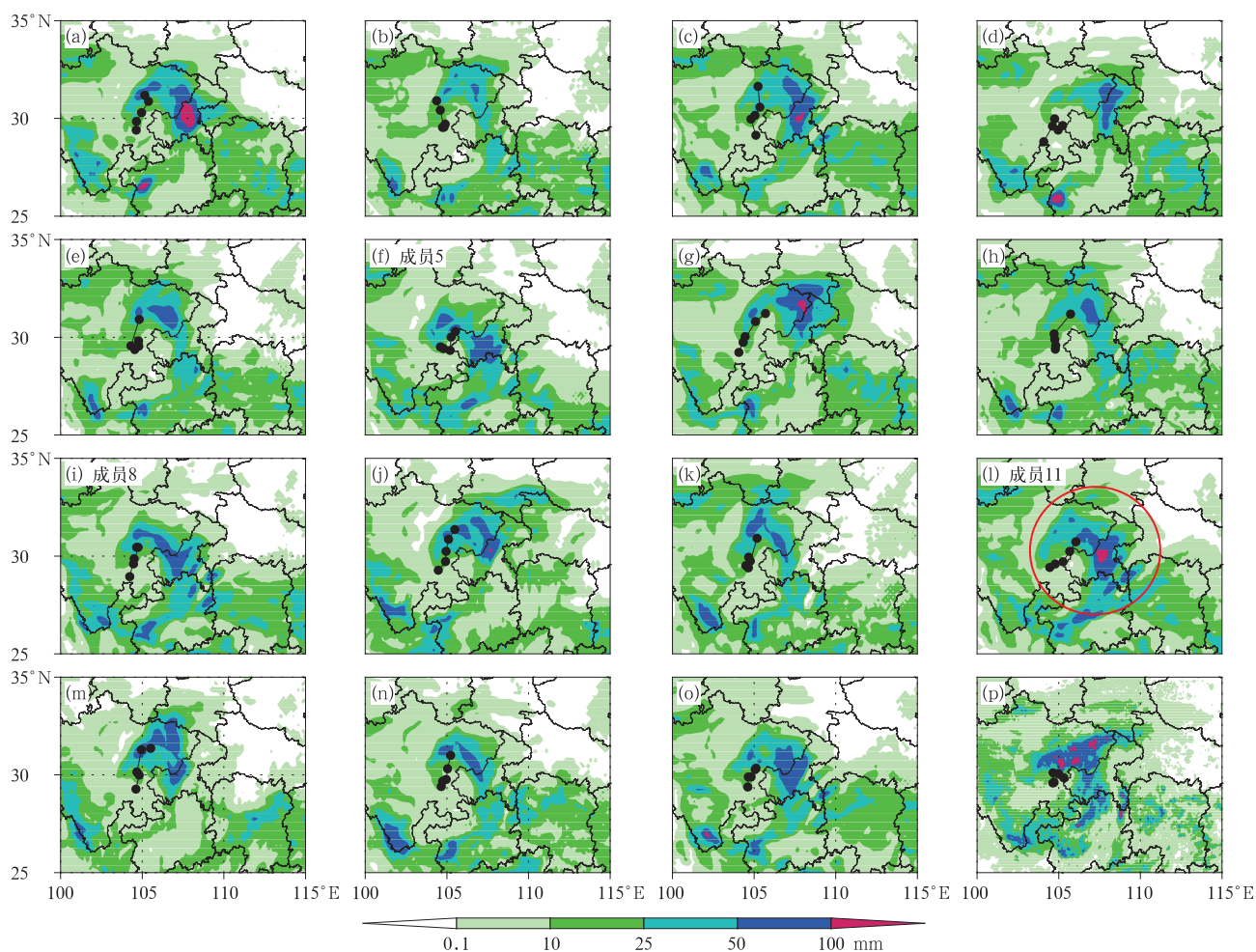
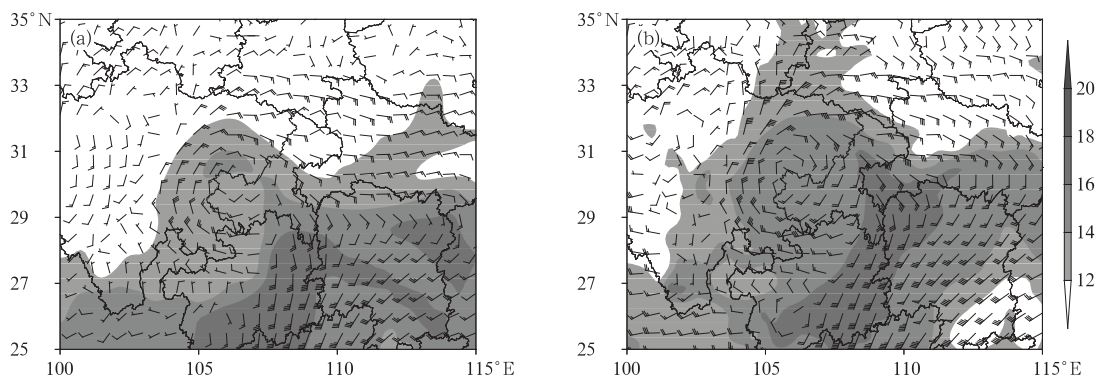


图 12 同图 11, 但初始时间为 8 月 17 日 00 UTC

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for the initial time 00 UTC 17 August

图 13 2015 年 8 月 18 日 00 UTC 实况分析(a)及 17 日 00 UTC 24 h 集合预报成员 11 预报(b)的 850 hPa 比湿(阴影, 单位: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 13 The 850 hPa specific humidity (shaded area, unit: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of observed field at 00 UTC 18 August (a) and 24 h forecasted field of ensemble member 11 at 00 UTC 17 August (b) 2015

4 结 论

GRAPES-REPS 区域集合预报系统由中国气

象局数值预报中心研发并于 2014 年实现业务化运行,为了更好地了解 GRAPES-REPS 对中尺度天气系统西南低涡的预报效果,特别是西南低涡移动路径和降水落区的误差等,本文就 GRAPES-REPS 对

西南低涡的预报进行了一系列的检验,为预报员应用 GRAPES-REPS 和模式研发人员改进集合预报性能提供参考依据。首先通过分析连续 2015 年 6 月 9 日至 7 月 9 日一个月的 GRAPES 控制预报资料,获得 GRAPES 模式对西南低涡预报的准确性及空报漏报情况。之后利用 2015 年 6—8 月 GRAPES-REPS 区域集合预报资料,挑选四次生命史超过 36 h 的西南低涡过程,通过设计客观识别方法确定西南低涡中心,评估了 GRAPES-REPS 对西南低涡的移动路径预报效果以及中心位置预报误差和离散度分布;之后对西南低涡强度预报进行检验分析;最后通过降水评分、概率预报等对低涡造成的降水进行检验。得到结果和结论如下:

(1) 从连续一个月的资料分析,GRAPES 模式对西南低涡预报的命中率较高,但空报率大于漏报率,分析原因是四川盆地九龙地区空报较多。

(2) 对西南低涡生成和发展时间的检验结果显示,控制预报和大部分集合成员对生成时间预报偏早,对消亡预报偏晚,而在低涡维持阶段,几乎所有成员均能预报出西南低涡气旋性环流。

(3) GRAPES-REPS 对西南低涡移动路径在 24 h 预报时效内较合理,24 h 预报时效之后,东移型和停滞型的西南低涡路径预报都存在不同程度的偏北,且东移型过程移动路径偏北特征更加明显。分析四次过程控制预报与集合预报平均移动路径预报误差发现,西南低涡生命活动前期集合预报平均的移动路径误差明显小于控制预报,体现出明显优势,且这种优势在停滞型过程中表现尤为突出;此外四次过程移动路径离散度随预报时效延长而增长,离散度大小受西南低涡移动路径系统性预报偏差影响较大。

(4) 对西南低涡的强度预报检验分析显示,GRAPES-REPS 对西南低涡中心涡度值预报偏大,位势高度值预报偏低,表明温度和风场预报均存在正偏差。

(5) 24 h 预报时效内,GRAPES-REPS 对西南低涡影响区域的小—中雨量级降水概率评分均有较好表现,且概率预报大值区与实况接近,而暴雨概率预报最大值区个别略有偏北,但基本吻合。24 h 预报时效之后,由于东移型西南低涡移动路径偏北,导致降水落区偏北,而停滞型西南低涡降水则表现出略偏西的特征。主要原因是 GRAPES-REPS 对西南低涡移动路径、形态及影响区域水汽等要素场预

报与实况存在偏差所致,因此需要重点提高 GRAPES-REPS 对西南低涡移动路径及水汽场等要素的概率预报技巧。

致谢:感谢国家气象中心高丽博士、张玉涛博士、四川省气象台陈朝平在检验方法、集合预报绘图程序中提供的帮助。

参考文献

- 陈静,2003. 中尺度暴雨短期集合预报研究[D]. 北京:中国气象科学研究院.
- 陈静,薛纪善,颜宏,2002. 集合数值预报发展与研究进展[J]. 应用气象学报,13(4):497-507.
- 陈静,薛纪善,颜宏,2005. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究[J]. 大气科学,29(5):717-726.
- 陈忠明,徐茂良,闵文彬,2003. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨[J]. 高原气象,22(2):162-167.
- 程麟生,郭英华,1988. “81·7”四川暴雨期西南低涡生成和发展涡源诊断[J]. 大气科学,12(1):18-26.
- 高守亭,1987. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用[J]. 大气科学,11(3):263-271.
- 何光碧,陈静,李川,等,2005. 低涡与急流对“04·9”川东暴雨影响的分析与数值模拟[J]. 高原气象,24(6):1012-1023.
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2016. 预报检验:大气科学从业者指南(第二版)[M]. 李应林,等,译. 北京:气象出版社.
- 李国平,万军,卢敬华,1991. 暖性西南低涡形成的一种机制[J]. 应用气象学报,2(1):91-99.
- 李跃清,赵兴炳,张利红,等,2012. 2012 年夏季西南涡加密观测科学试验[J]. 高原山地气象研究,32(4):1-8.
- 刘晓波,储海,2015. 一次西南低涡东移引发长江中下游暴雨的诊断研究[J]. 气象,41(7):825-832.
- 卢敬华,1986. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社.
- 卢萍,李旭,李英,等,2016. 空间加密探空观测资料对西南低涡暴雨天气过程数值模拟的影响[J]. 大气科学,40(4):730-742.
- 罗四维,王安宁,章俊根,等,1984. 夏季青藏高原对它附近流场影响的数值试验[J]. 高原气象,3(2):19-29.
- 马旭林,薛纪善,陆维松,2008. GRAPES 全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究[J]. 气象学报,66(4):526-536.
- 潘咏,沈艳,宇婧婧,等,2015. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面—卫星—雷达三源降水融合试验[J]. 气象学报,73(1):177-186.
- 陶诗言,1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社:196-199.
- 汪之义,汪丽,1994. 预报西南低涡的人工智能专家系统[J]. 四川气象,14(3):4-7.
- 王其伟,谈哲敏,2014. 地形对西南低涡涡源形成的动力影响作用[EB/OL]. 中国科技论文在线[2006-11-20]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200611-549>.
- 王新敏,宋自福,张霞,等,2009. 一次西南涡路径预报偏差分析及数值模拟[J]. 气象,35(5):18-25.
- 张涵斌,陈静,智协飞,等,2014. GRAPES 区域集合预报系统应用研究[J]. 气象,40(9):1076-1087.

- 赵平,孙淑清,1991. 一次西南低涡形成过程的数值试验和诊断(一)——地形动力作用和潜热作用西南低涡影响的数值对比分析[J]. 大气科学,15(6):46-52.
- 赵思雄,傅慎明,2007. 2004年9月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场分析[J]. 大气科学,31(6):1059-1075.
- 中国气象局成都高原气象研究所,中国气象学会高原气象学编委会,2016. 2014 西南低涡年鉴[M]. 北京:科学出版社.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,2000. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社.
- 宗志平,陈涛,徐珺,等,2013. 2012年初秋四川盆地两次西南涡暴雨过程的对比分析与预报检验[J]. 气象,39(5):567-576.
- Li Jun, Du Jun, Zhang Dalin, et al, 2014. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China[J]. Quart J Roy Meteorol Soc, 140(680):766-782.
- Shen R J, Reiter E R, Bresch J F, 1986. A simplified hydrodynamic mesoscale model suitable for use over high Plateau regions[J]. Arch Mei Geohy Biocl Ser A, 34:251-296.
- Wang X, Bishop C H, 2003. A comparison between Breeding and Ensemble Transform Kalman Filter Ensemble Forecast Schemes[J]. Atmos, 60(9):1140-1158.
- Wu Guoxiong, Chen Shoujun, 1985. The effect of mechanical forcing on the formation of a mesoscale vortex[J]. Quart J Roy Meteorol Soc, 111:1049-1070.
- Zhang Hanbin, Chen Jing, Zhi Xiefei, et al, 2015a. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system[J]. Adv Atmos Sci, 32(8):1143-1155.
- Zhang Hanbin, Chen Jing, Zhi Xiefei, et al, 2015b. A comparison of ETKF and downscaling in a regional ensemble prediction system[J]. Atmos, 6(3):341-360.
- Zhong Rui, Zhong Linhao, Hua Lijuan, et al, 2014. A climatology of the southwest vortex during 1979—2008[J]. Atmos Oce Sci Lett, 7(6):577-583.