

陈良吕, 夏宇, 2024. 川渝地区一次短时强降水天气的集合敏感性分析[J]. 气象, 50(4): 407-419. Chen L L, Xia Y, 2024. Ensemble sensitivity analysis on a short-time severe rainfall event occurred in the area of Sichuan and Chongqing[J]. Meteor Mon, 50(4): 407-419 (in Chinese).

川渝地区一次短时强降水天气的集合敏感性分析*

陈良吕¹ 夏宇²

¹ 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147

² 北京城市气象研究院, 北京 100089

提 要: 为了加深对川渝地区短时强降水天气的认识, 为提高业务预报技巧及改进数值模式提供参考, 选取了川渝地区一次短时强降水天气过程, 基于对流尺度集合预报系统, 开展了目标区域平均降水量对模式初值的集合敏感性分析, 并探讨了相应的动力学机制。主要结论如下: 敏感区的分布与对目标区域降水起到关键影响作用的系统有较好的对应: 850 hPa 和 700 hPa 西南低涡周围的敏感区呈现出正负相间的分布特征, 500 hPa 低压槽左(右)侧为负(正)敏感区, 250 hPa 高空西南急流区域(南侧)为正(负)敏感区, 中低层与锋区前(后)部对应区域为正(负)敏感区。说明西南低涡周围负(正)敏感区的西北(东南)风越强, 低压槽左(右)侧西北(东南)风越强, 高空急流区域(南侧)西南(东北)风越强以及锋前(后)温度越高(低), 则越有利于西南低涡内的辐合上升运动, 500 hPa 低压槽的加强, 250 hPa 高空辐散的加强, 锋区温度梯度增大以及锋面抬升作用加强等并对目标区域的降水产生正面的影响。

关键词: 集合预报, 集合敏感性, 川渝地区, 短时强降水

中图分类号: P458, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.022001

Ensemble Sensitivity Analysis on a Short-Time Severe Rainfall Event Occurred in the Area of Sichuan and Chongqing

CHEN Lianglü¹ XIA Yu²

¹ Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

² Beijing Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: This article aims to understand the short-time severe rainfall events in the area of Sichuan and Chongqing more comprehensively, and provide references for improving operational forecast skills and numerical weather forecast skills. Based on a convection-scale ensemble forecast system, a short-time severe rainfall event that occurred in the area of Sichuan and Chongqing is selected, and then the ensemble sensitivity analyses of the average precipitation in the target region to the model initial values are carried out and the corresponding dynamic mechanisms are discussed. The results show that the distribution characteristics of sensitive areas correspond well with the synoptic systems that play a key role in the precipitation forecast of the target regions. The sensitive areas around the southwest vortex at 850 hPa and 700 hPa show positive and negative distribution characteristics, the left (right) side of the 500 hPa trough shows negative (positive) sensitive area, the high-level southwest jet area at 250 hPa (south side) shows positive (negative) sensitive area, and the corresponding areas corresponding with the front (back) of the front

* 中国气象局气象能力提升联合研究专项(22NLTSY003)、国家自然科学基金青年基金项目(42205165)、重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2023TIAD-KPX0065)和重庆市气象局业务技术攻关项目(YWJSGG-202406)共同资助

2023 年 6 月 21 日收稿; 2024 年 1 月 26 日收修定稿

第一作者: 陈良吕, 主要从事集合预报和资料同化研究. E-mail: chenllv214@163.com

通讯作者: 夏宇, 主要从事集合预报和资料同化研究. E-mail: yxia@ium.cn

zone of the middle and low layers show positive (negative) sensitive area. These findings indicate that the stronger the northwest (southeast) wind in the negative (positive) sensitive area around the southwest vortex, the stronger the northwest (southeast) wind on the left (right) side of the trough, the stronger the southwest (northeast) wind in the upper jet stream zone (south), and the higher (lower) the pre-frontal (post-frontal) temperature is, the more favorable they are to the convergence upward movement in the southwest vortex, to the strengthening of the 500 hPa trough, to the strengthening of the 250 hPa divergence, to the increase of the temperature gradient in the frontal zone and to the strengthening of the frontal uplift, which finally result in positive impacts on the precipitation in the target regions.

Key words: ensemble forecast, ensemble sensitivity, Sichuan and Chongqing, short-time severe rainfall

引 言

短时强降水是指小时降水量大于或等于 20 mm 的天气过程,由于降水强度大且历时短,极易诱发城市内涝、山洪、泥石流、山体滑坡等次生灾害。受到独特的天气背景及复杂地形的影响,在每年夏季的主汛期,我国川渝(即四川省和重庆市)地区短时强降水天气频发(张利红等,2009;何光碧,2012;李强等,2017;彭飞等,2022;Luo et al, 2016),严重影响当地社会经济的发展以及人民群众的生命财产安全。川渝地区的短时强降水天气与地形的相关性较高,地形强迫作用是强降水触发及发展的重要原因(方德贤等,2020),且该区域天气学背景复杂,容易受到复杂多变的西南低涡和高原东移天气系统的影响(陈鹏等,2021)。由于短时强降水天气有限的可预报性以及川渝地区独特的地形和天气特征,对其开展精细化预报一直是科研和业务中的难点,针对该类天气的数值预报水平及业务预报技巧均亟待提高。

既往研究表明,在高影响天气的上游区域通常存在着敏感区(Snyder, 1996; Lorenz and Emanuel, 1998),发掘这些关键敏感区并探讨其对应的动力学机制,对于提高相应的数值预报水平及业务预报技巧具有重要的科学意义。一方面,敏感性分析结果能够为优化数值模式中的资料同化和集合预报扰动技术、诊断模式误差来源及传播机制、附加目标观测(即适应性观测)等提供科学参考;另一方面,敏感性分析结果对于实际天气预报业务也有很重要的应用价值。一般来说,预报员对于影响某种天气过程的关键因素通常都具有一定的经验,如果敏感性分析结论与预报员的主观经验一致,则能够增强预报员的信心。另外,预报员可以在实际使用集合预报过程中关注基于敏感性分析得到的关键敏感区,结合实时

更新的观测资料对集合预报进行订正(杜钧和李俊, 2014),或选择敏感区中表现较好的集成员(Ancell, 2016),来减小未来预报的误差和不确定性。

集合敏感性分析的基本思想是基于具有流依赖特性的集合预报样本研究模式初始扰动(或前期模式预报变量)对随后预报量的影响,近十几年来,经过不断改进,集合敏感性分析已经在很多方面得到了广泛的研究和应用(王毅等, 2020; 郑明华等, 2020)。集合敏感性分析方法在提出之后首先被应用到了天气尺度系统的研究中,包括温带气旋(Chang et al, 2013)、热带气旋(Torn and Hakim, 2009)、阻塞高压(Parker et al, 2018)等,揭示了对这些天气事件发生发展起着关键作用的大气运动特征。集合敏感性方法也可以用于研究暴雨(Schumacher, 2011; Lynch and Schumacher, 2014),特别是确定性数值模式预报效果不好的暴雨过程的关键影响系统及其演变特征。近几年也基于集合敏感性方法对华北盛夏暴雨(Yu and Meng, 2016; 王毅等, 2018)、西南地区西南低涡引发暴雨(Li et al, 2014; 王毅等, 2017)和华南暴雨(Huang and Luo, 2017; Zhang and Meng, 2018; 孙璐等, 2022; Sun et al, 2023)等天气过程也开展了较多的研究。

近年,相关研究证明了集合敏感性分析方法应用在强对流天气的研究中也是可行的。Bednarczyk and Ancell(2015)针对美国南部的一次强对流天气,对前期环境场的敏感性进行了分析,发现了上游地区的高层位势涡度和低层热动力条件对于对流的触发和发展有着显著的影响。国内学者也开展了一些针对短时强降水天气过程的集合敏感性研究。Wu et al(2020)对江淮地区一次短时强降水天气过程进行了敏感性分析,探讨了对流触发对前期环境场的敏感性,结果表明对流的触发对于超低空川渝急流、边界层温度增幅及地形复杂区域的边界层风

向和风速敏感。Zhang et al(2020)对两次对流性强降水天气个例进行了研究,探究了分析区域内降水开始时刻附近的区域平均降水强度与前期水平风场、温度以及湿度条件的关系,分析结果表明敏感性的分布指示了对降水起到关键影响作用的系统,如西南暖湿空气输送的轴线位置、分析区域附近的气旋性涡度和上升运动等。

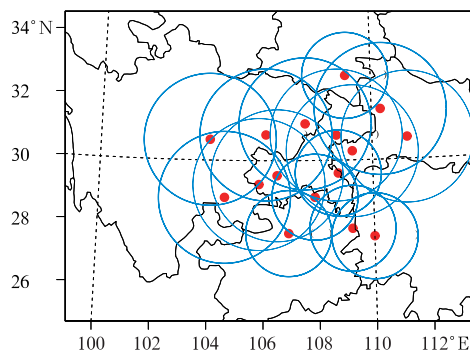
鉴于此,本文选取了川渝地区一次短时强降水天气过程,基于对流尺度集合预报系统,开展局地的短时强降水对初值的集合敏感性分析,以期加深对这类天气过程的认识,为提高该类天气的数值预报水平及业务预报技巧提供有价值的线索。

1 系统和方法

1.1 对流尺度集合预报系统简介

本文选取了2022年6月27日发生在川渝地区的一次短时强降水天气个例开展了试验,对流尺度集合预报系统基于WRF-V4.1构建,如图1所示。模式区域($24.5^{\circ}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ 、 $99^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$)以重庆为中心,覆盖了重庆及周边省份的部分地区,分辨率为3 km,垂直方向为51层。采用了重庆市气象局基于GSI(gridpoint statistical interpolation)同化系统(Shao et al,2016)的雷达资料集合卡尔曼滤波同化系统同化模式范围内的16部多普勒雷达(雷达站点位置及影响范围如图1所示)的反射率因子和径向风资料(胡婧婷等,2022;陈良吕和夏宇,2023)。

具体试验方案如图2所示:首先,本文构建了一套成员个数为31个、模式网格为27-9-3 km三重嵌套的中尺度集合预报试验系统(陈良吕等,2017;陈良吕和夏宇,2023),该系统最内层3 km区域范围与本文的对流尺度集合预报系统一致。2022年6月27日07:00(北京时间,下同)由中尺度集合预报试验系统2022年6月26日20:00起报的11 h集合预报资料(3 km区域)作为背景场,基于集合卡尔曼滤波同化系统(集合成员数为31个)进行1 h同化时间窗内逐15 min的雷达资料循环同化,得到31个集合成员的分析初值,在此基础上采用多物理过程组合[即不同集合成员采用不同的边界层方案(YSU、MYJ和MYNN)]的方式进行模式物理过程扰动,所有集合成员均采用Thomson微物理过程方案、Noah陆面过程方案以及RRTMG长波辐射和



注:红点为站点,蓝圈为影响范围。

图1 对流尺度集合预报系统范围及同化雷达的站点分布和影响范围

Fig.1 Model domain of convective scale ensemble prediction system and the location and influence range of assimilated radars

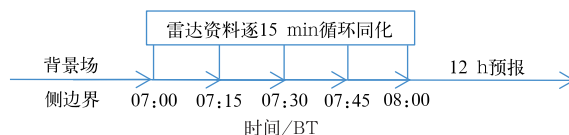


图2 循环同化及集合预报试验流程

Fig.2 Flow chart of the cycled assimilation and ensemble forecast experiments

短波辐射方案。另外,采用中尺度集合预报试验系统9 km区域的集合预报资料生成各个集合成员的侧边界条件。在此基础上,进行31个成员的12 h集合预报。

1.2 集合敏感性分析方法简介

采用由Garcies and Homar(2009)提出的标准化集合敏感性进行分析,该方法通过集合预报的轨迹来估计模式预报变量对初值或者前期模式预报变量的敏感性以及预报误差增长的时空分布特征。假设给定有 M 个成员的集合预报,对于一个模式预报变量 J ,其对初值或者之前某一时刻的模式状态变量 x_i 的标准化集合敏感性可以被定义为:

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{Cov}(J, x_i)}{\text{Var}(x_i)} \times \sigma(x_i)$$

式中: J 是对 M 个预报变量的评估,本文采用的是目标区域内区域平均的降水量, x_i 是 M 个成员在第 i 个格点处的初始变量(或前期模式变量)的集合,Cov表示协方差,其度量了两个变量之间的线性相关程度,而Var表示方差,度量了分析变量的离散程度, σ 则表示标准差。“Sensitivity”即为得到的敏

感性模态。敏感性的量纲与模式预报变量的量纲一致,敏感性的值代表了状态变量 x_i 变化 1 个标准差引起的预报变量 J 的变化大小。基于标准化集合敏感性进行分析,可以更加合理和方便地对不同区域以及不同状态变量的敏感性,找出对预报量影响最大的敏感区及状态变量。

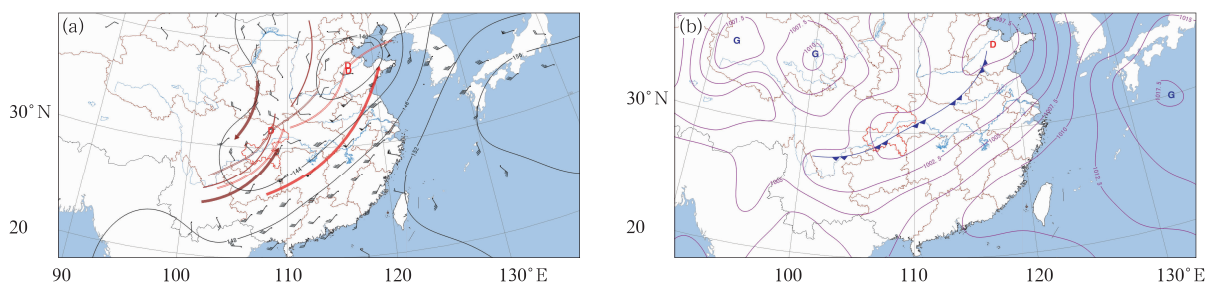
考虑到与对流性短时强降水密切相关的因素主要包括水汽、上升运动以及大气层结稳定性三个方面,因此本文主要针对模式初值中的 850、700、500 和 250 hPa 的纬向风、经向风以及温度场、海平面气压和模式整层可降水量等变量进行敏感性分析。

2 降水个例简介

图 3a 和 3b 分别为 2022 年 6 月 27 日 08:00 的高

空和地面天气形势。从图 3 中可以看出:500 hPa 有低压槽东移,东北冷涡后部有冷空气下滑。700 hPa 和 850 hPa 在重庆东北部地区有西南低涡,低涡两侧有切变线,850 hPa 低空急流从西南地区延伸到华北地区。地面上有冷锋南下,重庆和川东地区位于地面低压槽内。

在高空槽、西南低涡、切变线、低空急流及地面冷锋等天气系统的共同影响下,2022 年 6 月 26—27 日,川渝地区东部自西向东出现降水天气。随着系统的东移加强,6 月 27 日 08:00—11:00,重庆东北部部分地区出现短时强降水天气(降水实况如图 4 所示),小时最大降水强度均达到了 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,3 h 累计降水最大值为 62.0 mm。本文将图 4 红框标识的目标区域内的平均降水量作为模式预报变量进行集合敏感性分析。

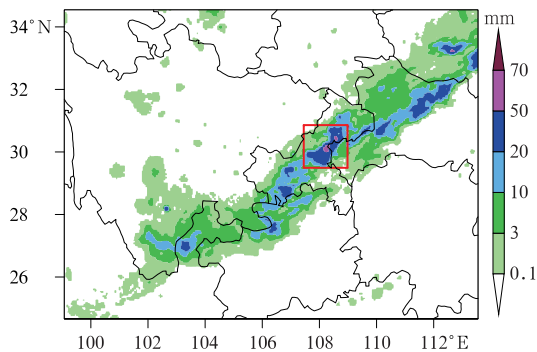


注:图 a 中,等值线:850 hPa 位势高度,单位:dagpm;风羽:850 hPa 风场;深红色箭头:700 hPa 低空急流;浅红色箭头:850 hPa 低空急流;红色实线:500 hPa 高空槽;双实线:切变线;字母 D:低涡位置。

图 b 中,等值线:海平面气压场,单位:hPa;蓝色锯齿线:锋面;字母 D:低压中心;字母 G:高压中心。

图 3 2022 年 6 月 27 日 08:00(a)高空和(b)地面天气形势图

Fig. 3 (a) Upper and (b) surface synoptic analysis charts at 08:00 BT 27 June 2022



注:红框为目标区域,下同。

图 4 2022 年 6 月 27 日 11:00 的 3 h 累计降水量

Fig. 4 The 3 h accumulated precipitation at 11:00 BT 27 June 2022

3 集合敏感性分析

图 5 给出了高空各特征层纬向风集合平均及目标区域平均降水量对高空纬向风的集合敏感性。从图中可以看出:850 hPa 目标区域位于西南低涡附近,目标区域周围的敏感区呈现出正负相间的分布特征,即北侧和西北侧为负敏感区,西南侧为正敏感区,东南侧为负敏感区,东北侧为正敏感区。考虑原因是西南低涡受到两侧切变线的牵拉后呈东北—西南向的椭圆状,因此,负敏感区的偏东风分量越大、正敏感区的偏西风分量越大,则越有利于低涡内的辐合上升运动并对目标区的降水产生有利的影响。

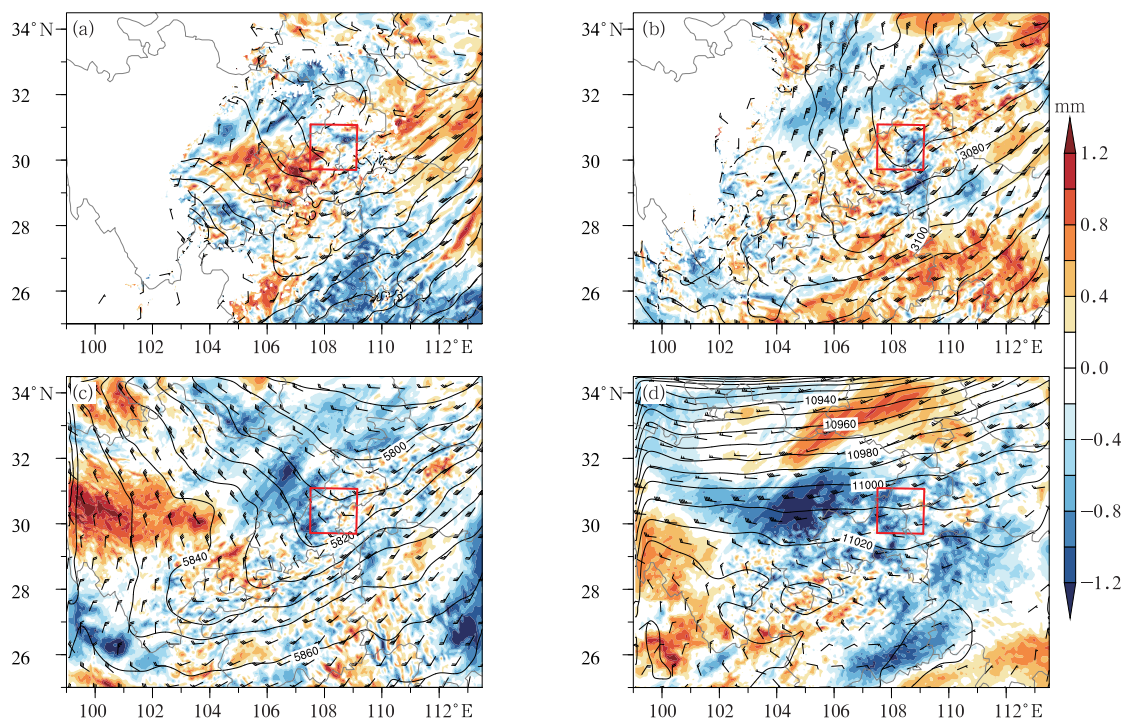


图5 2022年6月27日08:00高空位势高度(等值线,单位:gpm)和纬向风集合平均(风羽)及目标区域平均降水量对纬向风的集合敏感性(填色)
(a)850 hPa,(b)700 hPa,(c)500 hPa,(d)250 hPa

Fig. 5 Ensemble mean of upper geopotential height (contour, unit: gpm) and zonal wind (barb) as well as the ensemble sensitivity of averaged precipitation in target area to upper zonal wind (colored) at 08:00 BT 27 June 2022
(a) 850 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa, (d) 250 hPa

850 hPa 低空急流入口区附近及其南侧为较为明显的负敏感区,低空急流区域则为正敏感区。700 hPa 目标区域也位于西南低涡附近,目标区域周围的敏感区呈现出与 850 hPa 类似的正负相间的分布特征;700 hPa 低空急流区域均呈现出较为明显的正敏感区。500 hPa 目标区域位于低压槽附近,低压槽左侧为明显的负敏感区,右侧为正敏感区,说明低压槽左侧偏西风分量越大以及低压槽右侧偏东风分量越大,则越有利于低压槽的加强并对目标区域的降水产生正面的影响。250 hPa 川西高原中部分地区呈现较强的正敏感区,提示该区域偏西风分量越大则会对目标区域的降水产生正面的影响;250 hPa 在 $32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $104^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 为正敏感区,该区域对应着高空西南急流,其南侧则分布着大范围的负敏感区,说明高空急流区域偏西风分量越大、高空急流南侧偏东风分量越大,则会形成更强的高层辐散并对目标区域的降水产生正面的影响。

图6给出了高空各特征层经向风集合平均及目

标区域平均降水量对高空经向风的集合敏感性。从图中可以看出:与图5分析结果类似,850 hPa 和 700 hPa 低涡周围的敏感区呈现出正负相间的分布特征,即北侧为负敏感区,西侧为正敏感区,东南侧为负敏感区,东北侧为正敏感区。考虑原因是西南低涡受到两侧切变线的牵拉后呈东北—西南向的椭圆状,因此,负敏感区的偏北风分量越大、正敏感区的偏南风分量越大,则越有利于低涡内的辐合上升运动并对目标区的降水产生有利的影响;850 hPa 和 700 hPa 低空急流区及其附近地区均为较为明显的正敏感区,提示该区域偏南风分量越大有利于低空急流的加强并对目标区域的降水产生正面的影响。500 hPa 目标区域位于低压槽附近,低压槽左侧为负敏感区、右侧为正敏感区,说明低压槽左侧偏北风分量越大以及低压槽右侧偏南风分量越大,则越有利于低压槽的加强并对目标区域的降水产生正面的影响。250 hPa 在 $32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ 为正敏感区,该区域对应着高空西南急流,其南侧则分

布着大范围的负敏感区,说明高空急流区域偏南风分量越大、高空急流南侧偏北风分量越大,则会形成更强的高层辐散并对目标区域的降水产生正面的影响。

综合图 5 和图 6 的各项分析结果,总体而言:高层风场敏感区的分布与对降水起到关键影响作用的系统有较好的对应:850 hPa 和 700 hPa 西南低涡周围的敏感区呈现出正负相间的分布特征,考虑原因是西南低涡受到两侧切变线的牵拉后呈东北—西南向的椭圆状,因此,负敏感区的西北风越强、正敏感区的东南风越强,则越有利于低涡内的辐合上升运动并对目标区的降水产生有利的影响;500 hPa 低压槽左侧为负敏感区,右侧为正敏感区,说明低压槽左侧西北风越强以及低压槽右侧偏东南风越强,则越有利于低压槽的加强并对目标区域的降水产生正面的影响;250 hPa 高空西南急流区域为正敏感区,其南侧则分布着大范围的负敏感区,说明高空急流区域西南风越强、高空急流南侧东北风越强,则会形

成更强的高层辐散并对目标区域的降水产生正面的影响。总体而言,就集合敏感性值大小而言,纬向风、经向风各特征层的集合敏感程度差别不大。对比图 5 和图 6 可发现,纬向风和经向风集合敏感性分布特征较为一致,但各特征层经向风的集合敏感性值明显大于各特征层纬向风的集合敏感性值,说明目标区域平均降水量对经向风更为敏感。

图 7 给出了高空各特征层温度场集合平均及目标区域平均降水量对高空温度场的集合敏感性。从图中可以看出:850、700 和 500 hPa 目标区域均为正敏感区且 700 hPa 和 500 hPa(850 hPa)敏感性大值中心位于目标区域内(目标区域南侧),250 hPa 目标区域则为负敏感区,提示目标区域内中低层温度越高、高层温度越低,大气温度垂直递减率越大,则越有利于层结不稳定的形成和加强并对目标区的降水产生有利的影响。从图 3b 中可以看出,地面冷锋呈东北—西南向分布,西起于四川盆地南部,东止于山东中西部地区,横贯重庆中东部偏西地区。图 7

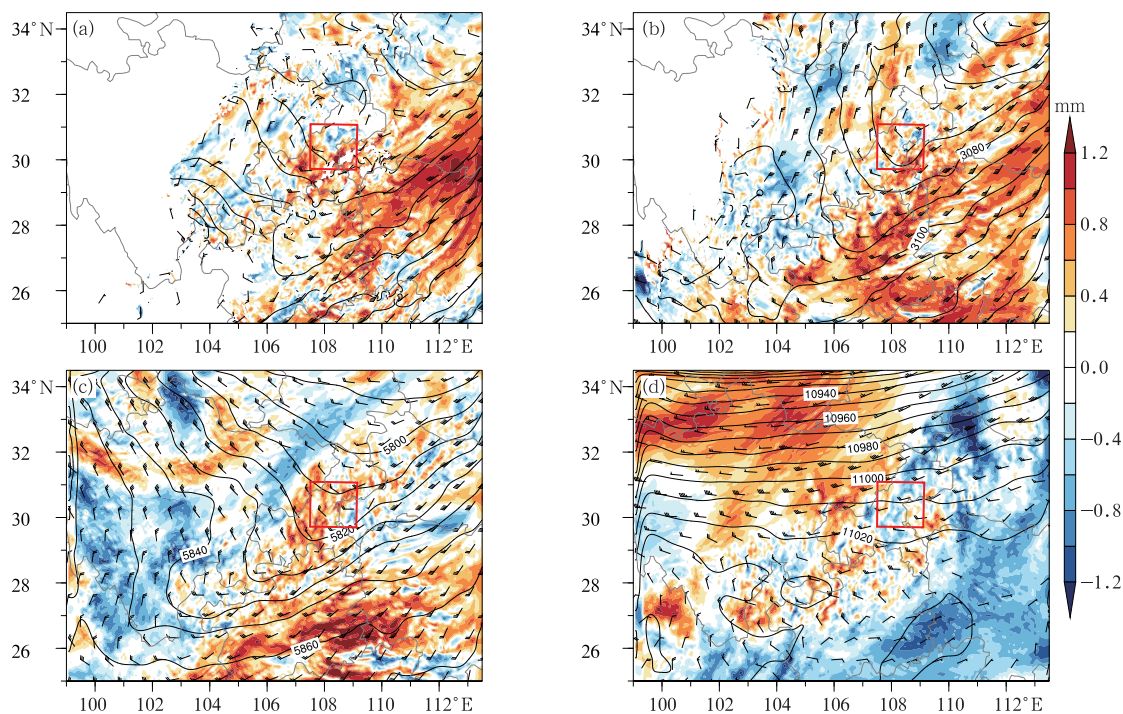


图 6 2022 年 6 月 27 日 08:00 高空位势高度(等值线,单位:gpm)和经向风集合平均(风羽)及目标区域平均降水量对经向风的集合敏感性(填色)
(a)850 hPa, (b)700 hPa, (c)500 hPa, (d)250 hPa

Fig. 6 Ensemble mean of upper geopotential height (contour, unit: gpm) and meridional wind (barb) as well as the ensemble sensitivity of averaged precipitation in target area to upper meridional wind (colored) at 08:00 BT 27 June 2022
(a) 850 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa, (d) 250 hPa

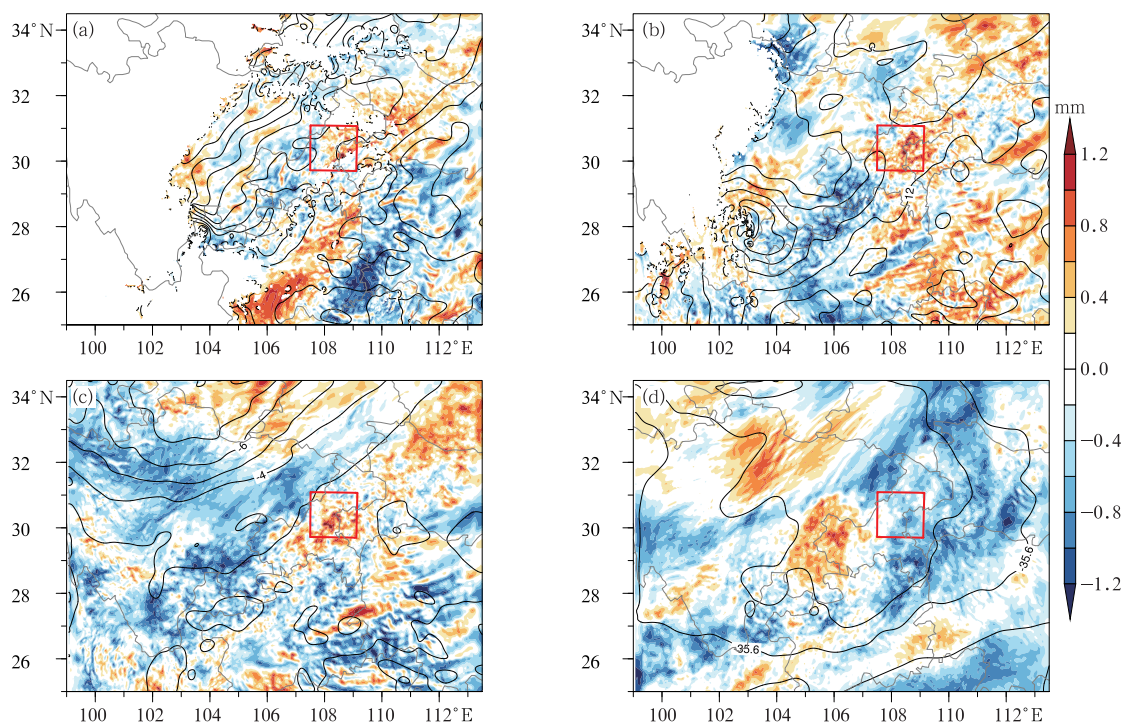


图7 2022年6月27日08:00高空温度集合平均(等值线,单位:℃)及目标区域

平均降水量对高空温度的集合敏感性(填色)

(a)850 hPa,(b)700 hPa,(c)500 hPa,(d)250 hPa

Fig. 7 Ensemble mean of upper-air temperature (coutour, unit: ℃) and the ensemble sensitivity of averaged precipitation in target area to upper-air temperature (colored) at 08:00 BT 27 June 2022

(a) 850 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa, (d) 250 hPa

中850、700和500 hPa与锋区前部对应区域为正敏感区,与锋区后部对应区域则为负敏感区,且由于锋区向冷空气一侧倾斜,正敏感区和负敏感区的交界线较地面冷锋位置偏西。提示锋前温度越高、锋后温度越低,则越有利于锋区温度梯度增大和锋面抬升作用加强并对目标区的降水产生有利的影响。850 hPa在湖南中西部地区呈现正负相间的敏感区分布特征,考虑与850 hPa低空急流有关,从图3a中可以看出,正负敏感区的交界线与850 hPa低空急流的位置相对应,考虑原因是低空急流左(右)侧盛行上升(下沉)运动,上升(下沉)运动越强,水汽相变释放(吸收)热量越强并导致温度越低(高)。700 hPa低空急流两侧也表现出了类似的敏感区分布特征。250 hPa在重庆中西部偏西地区及川西高原东北部地区为较强的正敏感区。就动力学机制而言,上述区域的温度对目标区域的降水影响不大,因此考虑出现这样的敏感性模态说明了上述区域与目标区域降水量变化特征的相位相同。总体而言,各特征层温度场集合敏感程度差别不大。

图8给出了整层可降水量集合平均及目标区域平均降水量对整层可降水量的集合敏感性。从图中

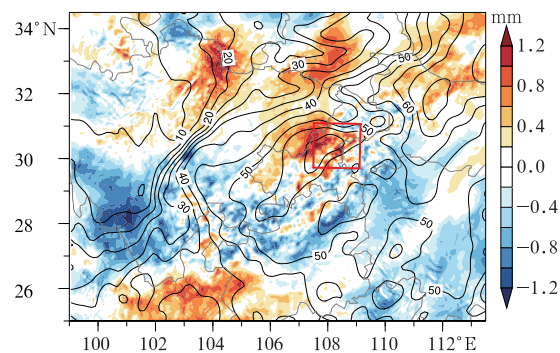


图8 2022年6月27日08:00整层可降水量集合平均(等值线,单位:mm)及目标区域平均降水量

对整层可降水量的集合敏感性(填色)

Fig. 8 Ensemble mean of integrated predictable precipitation (contour, unit: mm) and the ensemble sensitivity of averaged precipitation in target area to integrated predictable precipitation (colored) at 08:00 BT 27 June 2022

可以看出:目标区域为整层可降水量的高值区,大值中心位于目标区域内。低值区和低值中心则位于川西高原;川西高原和云贵高原东北部部分地区为明显的正敏感区,川西高原西北部、中部和南部地区则为明显的负敏感区。就动力学机制而言,上述区域对目标区域的水汽输送影响不大,因此出现这样的敏感性模态说明了上述区域与目标区域的整层可降水量变化特征的相位一致。总体而言,目标区域为正敏感区,其周围则为零散分布的负敏感区,提示目标区域相对于周围区域的水汽越充沛,则会对目标区域的降水产生正面影响。

图 9 给出了海平面气压场集合平均及目标区域平均降水量对海平面气压场的集合敏感性。从图中可以看出:对比图 3b 可发现,目标区域位于海平面气压场的低压槽内,为明显的负敏感区,提示目标区域内气压越低,越有利于低层的辐合上升运动并对目标区域的降水产生正面影响。总体而言,敏感区的分布与低压槽及其两侧的高压分布较为一致,即低压槽区域为负敏感区,低压槽两侧的高压区域则为正敏感区,提示低压槽区域气压越低、高压区域气压越高,则越有利于气压梯度的增大及地面辐合上升运动的加强,从而对目标区域内的降水产生有利的影响。

综合对比图 5~图 9 的集合敏感性分析结果,就集合敏感区的范围和敏感性值大小而言,对目标区域降水最敏感的区域及变量是 850 hPa 和 700 hPa 低空急流区域的风场,且经向风分量的敏感程度明

显大于纬向风。其次是 850 hPa 和 700 hPa 西南低涡附近的风场,此后依次是 500 hPa 低压槽两侧的风场、高空急流及其南侧区域的风场、目标区域内的整层可降水量、目标区域内的温度场、目标区域内的海平面气压。根据上述敏感性分布结果,提示目标区域降水最敏感的天气系统依次是 850 hPa 和 700 hPa 低空急流、西南低涡、500 hPa 低压槽、高空急流、地面冷锋和地面低压槽。

4 集合敏感性分析结果可靠性验证

为了验证集合敏感性分析结果的可靠性,本文在前面工作的基础上,对比分析不同集合成员的降水预报性能,挑选出预报明显较好的和明显较差的集合成员,并对对比分析集合预报中两类成员在敏感区域内的敏感要素的分析误差,如果预报较好的成员分析误差较小且预报较差的成员分析误差较大,则可以在一定程度上印证集合敏感性分析结果的可靠性。图 10 给出了各个集合成员 3 h 累计降水预报的暴雨量级降水 TS 评分及目标区域平均降水量。从图中可以看出:不同成员的暴雨量级降水 TS 评分差异较大,第 8 个集合成员 TS 评分最低,为 0.13;第 17 个成员 TS 评分最高,为 0.46;第 23 个集合成员 TS 评分为 0.43。不同集合成员在目标区域的平均降水量差异也较大,第 8 个集合成员在目标区域的平均降水量最小,为 6.85 mm;第 16 个集合成员在目标区域的平均降水量最大,为 15.36 mm;第 23 个集合成员与第 16 个集合成员则基本相当,为 15.33 mm。综合不同成员的暴雨量级降水 TS 评分及在目标区域的平均降水量的结果,本文选取了第 8(23)个集合成员作为预报明显较差(优)的集合成员进行对比分析。

图 11 给出了第 8 个集合成员和第 23 个集合成员的 3 h 累计降水预报,对比图 4 可发现:第 8 个成员对目标区域内的强降水预报存在大范围的漏报,仅对目标区域东北侧小范围内的强降水有一些把握,但落区总体偏东偏北;第 23 个成员对目标区域内的强降水预报较为准确,虽然不可避免地存在落区和强度的偏差,强降水雨带的范围与实况相比略偏大,落区略偏东;总体而言,第 23 个成员预报明显优于第 8 个集合成员的预报,且第 23 个集合成员在目标区域内的平均降水量为第 8 个集合成员的 2.3 倍左右。接下来,本文将分析第 8 个集合成员和第

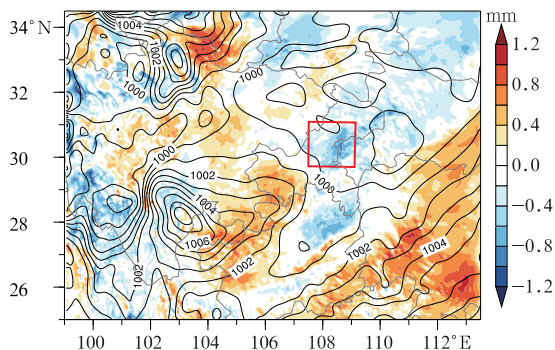


图 9 2022 年 6 月 27 日 08:00 海平面气压集合平均(等值线,单位:hPa)及目标区域平均降水量对海平面气压的集合敏感性(填色)

Fig. 9 Ensemble mean of sea level pressure (contour, unit: hPa) and the ensemble sensitivity of averaged precipitation in target area to sea level pressure (colored) at 08:00 BT 27 June 2022

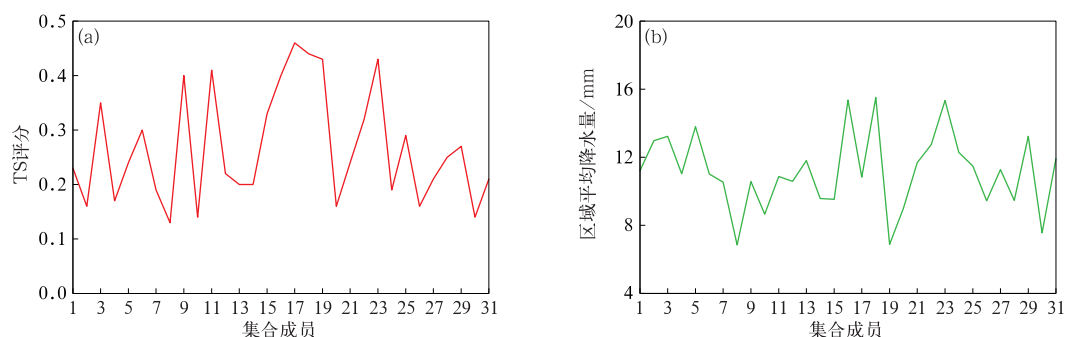


图10 各个集合成员2022年6月27日08:00起报的3 h累计降水预报的

(a)暴雨量级降水 TS评分及(b)目标区域平均降水量

Fig. 10 (a) Threat score of rainstorm and (b) averaged precipitation in target area for the 3 h accumulated rainfall forecast initialized at 08:00 BT 27 June 2022 of each ensemble member

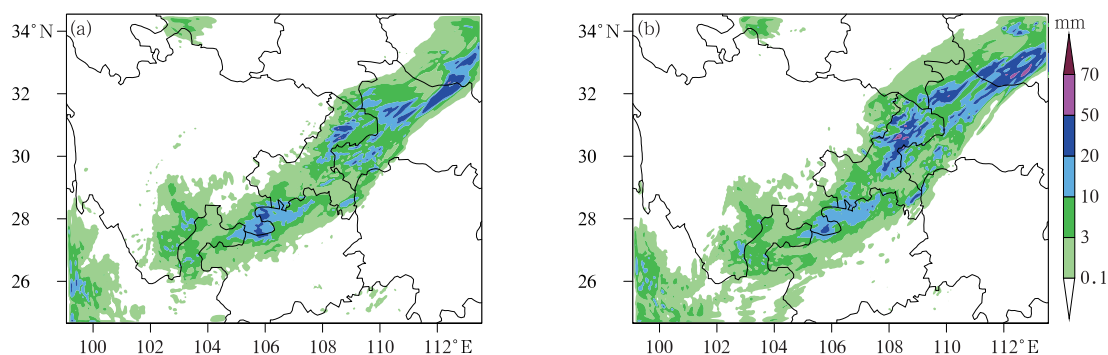


图11 (a)第8个集合成员和(b)第23个集合成员2022年6月27日08:00起报的3 h累计降水预报

Fig. 11 The 3 h accumulated rainfall forecast initialized at 08:00 BT 27 June 2022

for the (a) 8th and (b) 23th ensemble members

23个集合成员的850、700、500和250 hPa风场的分布特征,并与850、700、500和250 hPa经向风和纬向风的集合敏感性分布特征进行对比,由此在一定程度上验证集合敏感性分析结果的可靠性。

图12给出了第8个集合成员(图12a)和第23个集合成员(图12b)模式初值高空各特征层的风场。对于850 hPa风场(图12a₁, 12b₁):对比图3a可发现,第23个集合成员的西南低涡中心位置与实况更为接近,第8个集合成员的西南低涡中心位置与实况相比则明显偏东偏北;对比图5a和图6a可发现,在四川盆地东北部为风场的负敏感区,第23个集合成员在该区域的偏北风分量明显强于第8个集合成员;在重庆中东部偏南地区及贵州北部地区为风场的正敏感区,可以看到第23个集合成员在该区域的偏西风 and 偏南风分量明显强于第8个集合成员;另外,在湖南、湖北中东部的低空急流区域,总体上第23个集合成员在该区域的偏西风和偏南风分

量强于第8个集合成员。

对于700 hPa风场:对比图12a₂, 12b₂及图3a可发现,第23个集合成员的西南低涡中心位置与实况更为接近,第8个集合成员的西南低涡中心位置与实况相比则略偏东偏北;在四川盆地东北部为风场的负敏感区,可以看到第23个集合成员在该区域的偏北风分量明显强于第8个集合成员;在重庆东部和西南部偏东地区及湖北西南部地区为风场的正敏感区,可以看到第23个集合成员在该区域的偏西风 and 偏南风分量明显强于第8个集合成员;另外,在湖南、湖北中东部的低空急流区域,总体而言,第23个集合成员在该区域的偏西风和偏南风分量明显强于第8个集合成员。

对于500 hPa风场:对比图12a₃, 12b₃及图3a可发现,第23个集合成员的500 hPa低压槽位置与实况更为接近,第8个集合成员的500 hPa低压槽位置与实况相比则明显偏东;在500 hPa低压槽槽

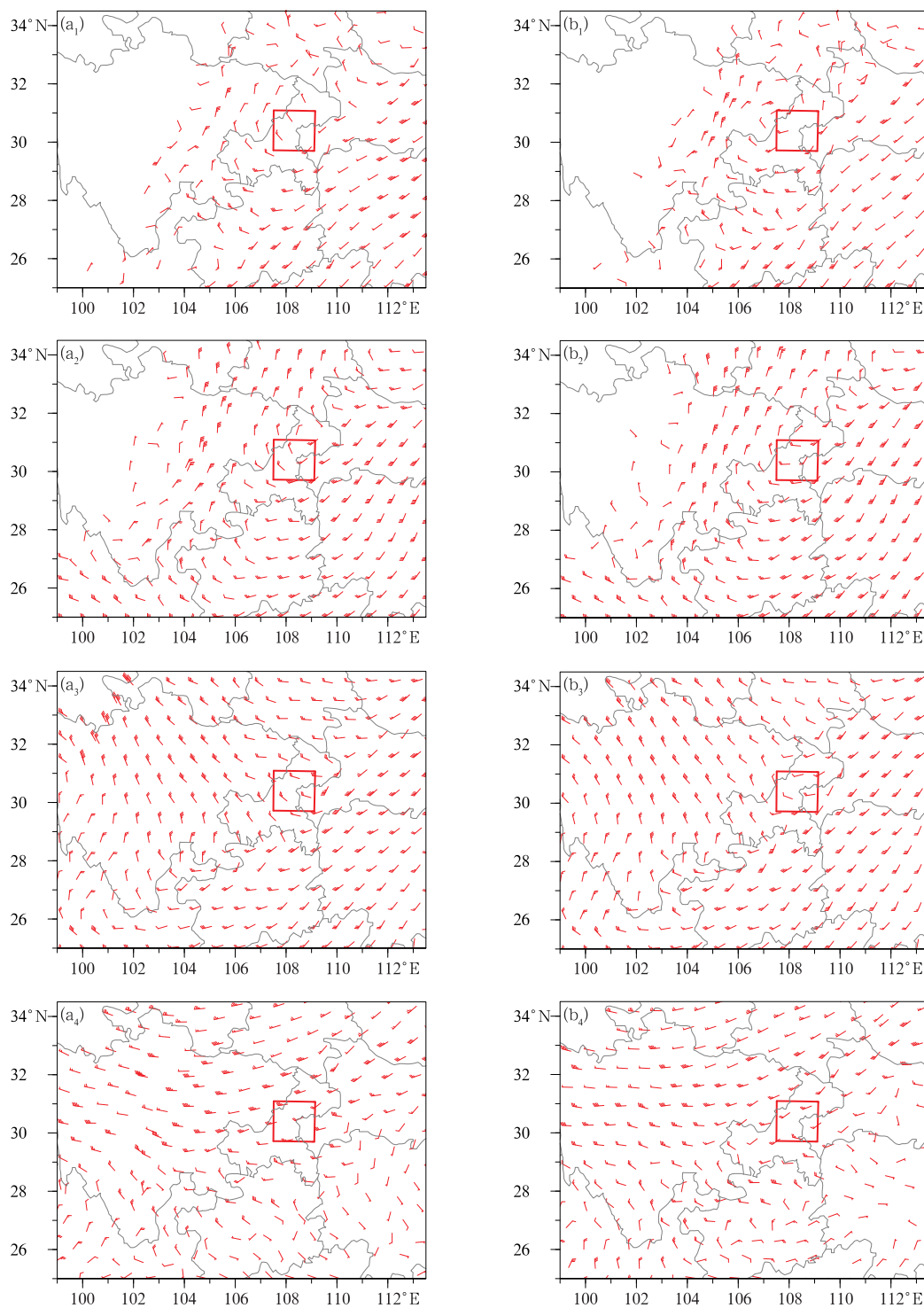


图 12 (a)第 8 个集合成员和(b)第 23 个集合成员 2022 年 6 月 27 日 08:00 的模式初值高空风场

(a_1, b_1) 850 hPa, (a_2, b_2) 700 hPa, (a_3, b_3) 500 hPa, (a_4, b_4) 250 hPa

Fig. 12 The upper wind field of model initial values at 08:00 BT 27 June 2022 for the (a) 8th and (b) 23th ensemble members

(a_1, b_1) 850 hPa, (a_2, b_2) 700 hPa, (a_3, b_3) 500 hPa, (a_4, b_4) 250 hPa

后区域为风场的负敏感区,可以看到第 23 个集合成员在该区域的西北风总体而言明显强于第 8 个集合

成员;在 500 hPa 低压槽前区域为风场的正敏感区,可以看到第 23 个集合成员在该区域的偏西风和

偏南风分量均明显强于第8个集成员。

对于250 hPa风场:对比图12a₁,12b₁可发现,在四川中部和北部的大范围区域均为明显的正敏感区,可以看到第23个集成员在该区域的西南风总体而言明显强于第8个集成员,第8个集成员在川西地区大范围区域盛行西北风。

综合图12的各项分析结果:预报较好的成员相对于预报较差的成员而言,对高空各特征层提示的敏感性天气系统(如西南低涡和500 hPa低压槽)的位置与实况更为接近;在高空各特征层的正(负)敏感区,预报较好的集成员的偏西(东)或偏南(北)风分量明显强于预报较差的集成员。上述结果在一定程度上验证了本文集合敏感性分析结果的可靠性。

5 结论和讨论

为了加深对川渝地区短时强降水天气的认识,为提高业务预报技巧及改进数值模式提供有价值的线索,本文选取了川渝地区一次短时强降水天气过程,基于对流尺度集合预报系统,选取目标区域内平均的降水量作为模式预报变量,针对模式初值中的850、700、500和250 hPa纬向风、经向风、温度场以及海平面气压和模式整层可降水量等变量进行了集合敏感性分析。主要结论如下:

(1)高层风场敏感区的分布与对降水起到关键影响作用的系统有较好的对应。850 hPa和700 hPa西南低涡周围的敏感区呈现出正负相间的分布特征,500 hPa低压槽左(右)侧为负(正)敏感区,250 hPa高空西南急流区域(南侧)为正(负)敏感区,说明西南低涡周围负(正)敏感区的西北(东南)风越强,低压槽左(右)侧西北(东南)风越强以及高空急流区域(南侧)西南(东北)风越强,则越有利于西南低涡内的辐合上升运动,500 hPa低压槽的加强以及250 hPa高空辐散的加强并对目标区域的降水产生正面的影响。

(2)中低层(高层)温度场目标区域均为正(负)敏感区且中低层与锋区前(后)部对应区域为正(负)敏感区,提示目标区域内中低层(高层)温度越高(低)以及锋前(后)温度越高(低),则越有利于大气温度垂直递减率的增大以及大气层结不稳定的形成和加强、锋区温度梯度增大以及锋面抬升作用加强并对目标区的降水产生有利的影响。

(3)目标区域整层可降水量为明显的正敏感区,周围则为零散分布的负敏感区,提示目标区域相对于周围区域的水汽越充沛,则会对目标区域的降水产生正面影响。

(4)海平面气压场低压槽(高压)区域为负敏感区,提示低压槽(高压)区域气压越低(高),则越有利于气压梯度的增大及地面辐合上升运动的加强,从而对目标区域内的降水产生有利的影响。

(5)总体而言,就集合敏感区的范围和敏感性值的大小而言,对目标区域降水最敏感的天气系统依次是850 hPa和700 hPa低空急流、西南低涡、500 hPa低压槽、高空急流、地面冷锋和地面低压槽。

(6)通过对比分析发现,预报较好的成员相对于预报较差的成员而言,对高空各特征层提示的敏感性天气系统(如西南低涡和500 hPa低压槽)的位置与实况更为接近;在高空各特征层的正(负)敏感区,预报较好的集成员的偏西(东)或偏南(北)风分量明显强于预报较差的集成员;上述结果在一定程度上验证了本文集合敏感性分析结果的可靠性。

根据上述研究结论,加强多源观测资料(特别是高时空分辨率的雷达资料)同化技术研究及应用并提高中低层风场等初值的准确性,有望提高数值模式对川渝地区短时强降水预报技巧。另外,经过与预报员讨论,本文的集合敏感性分析结果及其对应的天气学和动力学机制与预报员的业务经验均较为一致,因此,建议预报员在使用对流尺度集合预报产品时可以结合不断更新的实况资料对比集成员在相关敏感区的表现(如西南低涡的位置、低空急流的强度等),对在敏感区预报较优的成员给与更多的关注并动态调整预报结论,以期减少预报误差和不确定性。

本文仅对川渝地区的一次短时强降水天气过程进行了集合敏感性分析,由此识别出的敏感区、敏感因子及对应的动力学机制还需要更多的个例分析来提炼出具有普适意义的结论。同时,鉴于川渝地区独特的地形和天气背景特征,不同地形区域(或者不同中小尺度天气背景影响下)发生的短时强降水天气的敏感性分析结果存在怎样的共性和差异?也值得进行研究和探讨。后期将选取川渝地区的多个强降水天气个例开展系统性的集合敏感性分析,以期得到系统性的研究结论,为改进数值天气预报和提高业务预报技巧提供科学参考。

参考文献

- 陈良吕, 吴征, 高松, 2017. 重庆中尺度集合预报系统预报性能分析[J]. 高原山地气象研究, 37(4): 21-27. Chen L L, Wu Z, Gao S, 2017. Prediction performance analysis of Chongqing mesoscale ensemble prediction system[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 37(4): 21-27(in Chinese).
- 陈良吕, 夏宇, 2023. 对流尺度集合预报成员数对降水预报的影响[J]. 应用气象学报, 34(2): 142-153. Chen L L, Xia Y, 2023. The influence of ensemble size on precipitation forecast in a convective scale ensemble forecast system[J]. J Appl Meteor Sci, 34(2): 142-153(in Chinese).
- 陈鹏, 周盈颖, 冯萍, 等, 2021. 重庆短时强降水时空特征分析[J]. 气象科技进展, 11(2): 39-45. Chen P, Zhou Y Y, Feng P, et al, 2021. The characteristics of short-time strong precipitation distribution[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(2): 39-45(in Chinese).
- 杜钧, 李俊, 2014. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用[J]. 气象科技进展, 4(5): 6-20. Du J, Li J, 2014. Application of ensemble methodology to heavy-rain research and prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 4(5): 6-20(in Chinese).
- 方德贤, 董新宇, 邓承之, 等, 2020. 2008~2016年重庆地区降水时空分布特征[J]. 大气科学, 44(2): 327-340. Fang D X, Dong X N, Deng C Z, et al, 2020. Temporal and spatial distribution of precipitation in Chongqing during 2008—2016[J]. Chin J Atmos Sci, 44(2): 327-340(in Chinese).
- 何光碧, 2012. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 38(2): 155-163. He G B, 2012. Review of the southwest vortex research[J]. Meteor Mon, 38(2): 155-163(in Chinese).
- 胡婧婷, 陈良吕, 夏宇, 2022. 雷达资料不同同化试验对短时降水预报影响的分析[J]. 暴雨灾害, 41(6): 679-690. Hu J T, Chen L L, Xia Y, 2022. Analysis of the influence of different assimilation experiments of radar data on short-term precipitation forecast[J]. Torrential Rain Disaster, 41(6): 679-690(in Chinese).
- 李强, 邓承之, 张勇, 等, 2017. 1980—2012年5—9月川渝盆地小时强降水特征研究[J]. 气象, 43(9): 1073-1083. Li Q, Deng C Z, Zhang Y, et al, 2017. Study on spatio temporal distribution characteristics of hourly heavy rainfall in Sichuan and Chongqing from May to September during 1980—2012[J]. Meteor Mon, 43(9): 1073-1083(in Chinese).
- 彭飞, 李晓莉, 赵滨, 等, 2022. CMA全球数值预报系统东亚地区中期大尺度预报误差溯源初步探究: 个例分析[J]. 气象, 48(6): 665-676. Peng F, Li X L, Zhao B, et al, 2022. Preliminary exploration on the origin of large-scale medium-range forecast errors over East Asia in the CMA global numerical prediction system: a case study[J]. Meteor Mon, 48(6): 665-676(in Chinese).
- 孙璐, 陈思远, 潘贤, 等, 2022. 华南暖区暴雨预报的模式初始场质量敏感性分析[J]. 气象科学, 42(3): 356-367. Sun L, Chen S Y, Pan X, et al, 2022. Sensitivity analysis of model initial value of a rainstorm in the warm sector of South China[J]. J Meteor Sci, 42(3): 356-367(in Chinese).
- 王毅, 代刊, 张晓美, 等, 2020. 集合敏感性在预报误差及可预报性研究中的应用进展综述[J]. 气象科技进展, 10(2): 58-64, 74. Wang Y, Dai K, Zhang X M, et al, 2020. Research progress in study of forecast errors and predictability based on ensemble sensitivity[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2): 58-64, 74(in Chinese).
- 王毅, 何立富, 代刊, 等, 2017. 集合敏感性方法在高原涡和西南涡引发暴雨过程中的应用[J]. 高原气象, 36(5): 1245-1256. Wang Y, He L F, Dai K, et al, 2017. An ensemble sensitivity analysis of a heavy rainfall over Sichuan Basin under interaction between plateau vortex and southwest vortex[J]. Plateau Meteor, 36(5): 1245-1256(in Chinese).
- 王毅, 马杰, 代刊, 2018. “7·20”华北强暴雨集合预报的中期预报转折和不确定性分析[J]. 气象, 44(1): 53-64. Wang Y, Ma J, Dai K, 2018. Ensemble-based analysis of medium-range forecast change and uncertainty for the 20 July 2016 severe heavy rainfall over North China[J]. Meteor Mon, 44(1): 53-64(in Chinese).
- 张利红, 杜钦, 陈静, 等, 2009. 地面观测资料在西南地区数值预报中的敏感性试验[J]. 气象, 35(6): 26-35. Zhang L H, Du Q, Chen J, et al, 2009. Sensitive experiments of surface observation data in numerical weather precipitation over southwestern China[J]. Meteor Mon, 35(6): 26-35(in Chinese).
- 郑明华, 杜钧, Colle B A, 2020. 集合敏感性分析在北半球中纬度高影响天气中的应用[J]. 气象科技进展, 10(2): 42-57. Zheng M H, Du J, Colle B A, 2020. Applications of ensemble sensitivity analysis to high-impact weather systems in the middle latitudes of Northern Hemisphere[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2): 42-57(in Chinese).
- Ancell B C, 2016. Improving high-impact forecasts through sensitivity-based ensemble subsets: demonstration and initial tests[J]. Wea Forecasting, 31(3): 1019-1036.
- Bednarczyk C N, Ancell B C, 2015. Ensemble sensitivity analysis applied to a southern plains convective event[J]. Mon Wea Rev, 143(1): 230-249.
- Chang E K M, Zheng M H, Raeder K, 2013. Medium-range ensemble sensitivity analysis of two extreme Pacific extratropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 141(1): 211-231.
- Garcies L, Homar V, 2009. Ensemble sensitivities of the real atmosphere: application to Mediterranean intense cyclones[J]. Tellus A, 61(3): 394-406.
- Huang L, Luo Y L, 2017. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for South China during the pre-summer rainy season[J]. J Geophys Res: Atmos, 122(16): 8494-8516.
- Li J, Du J, Zhang D L, et al, 2014. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over Southwest China[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 140(680): 766-782.
- Lorenz E N, Emanuel K A, 1998. Optimal sites for supplementary weather observations: simulation with a small model[J]. J Atmos Sci, 55(3): 399-414.

- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al, 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. *J Climate*, 29(24): 8703-8719.
- Lynch S L, Schumacher R S, 2014. Ensemble-based analysis of the May 2010 extreme rainfall in Tennessee and Kentucky[J]. *Mon Wea Rev*, 142(1): 222-239.
- Parker T, Woollings T, Weisheimer A, 2018. Ensemble sensitivity analysis of Greenland blocking in medium-range forecasts[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 144(716): 2358-2379.
- Schumacher R S, 2011. Ensemble-based analysis of factors leading to the development of a multiday warm-season heavy rain event [J]. *Mon Wea Rev*, 139(9): 3016-3035.
- Shao H, Derber J, Huang X Y, et al, 2016. Bridging research to operations transitions; status and plans of community GSI[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 97(8): 1427-1440.
- Snyder C, 1996. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(5): 953-961.
- Sun L, Wang Q P, Chen S Y, et al, 2023. Forecast error and predictability for the warm-sector and the frontal rainstorm in South China[J]. *J Trop Meteor*, 29(1): 128-141.
- Torn R D, Hakim G J, 2009. Initial condition sensitivity of Western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis[J]. *Mon Wea Rev*, 137(10): 3388-3406.
- Wu N G, Zhuang X R, Min J Z, et al, 2020. Practical and intrinsic predictability of a warm-sector torrential rainfall event in the South China monsoon region[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 125(4): e2019JD031313.
- Yu H Z, Meng Z Y, 2016. Key synoptic-scale features influencing the high-impact heavy rainfall in Beijing, China, on 21 July 2012[J]. *Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr*, 68(1): 31045.
- Zhang M R, Meng Z Y, 2018. Impact of synoptic-scale factors on rainfall forecast in different stages of a persistent heavy rainfall event in South China[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 123(7): 3574-3593.
- Zhang X Y, Min J Z, Wu T J, 2020. A study of ensemble-sensitivity-based initial condition perturbation methods for convection-permitting ensemble forecasts[J]. *Atmos Res*, 234: 104741.

(本文责编:俞卫平)