

基于 CMA-TRAMS 集合预报的“5·22”极端降水事件可预报性分析*

肖柳斯¹ 张华龙² 张旭斌^{3,4} 冯璐³ 谌志刚⁵ 戴光丰^{3,4}

XIAO Liusi¹ ZHANG Hualong² ZHANG Xubin^{3,4} FENG Lu³ CHEN Zhigang⁵ DAI Guangfeng^{3,4}

1. 广州市气象台, 广州, 511430

2. 广东省气象台, 广州, 510641

3. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州, 510641

4. 广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州, 510641

5. 广州市气象台, 广州, 511430

1. *Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430, China*

2. *Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510641, China*

3. *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510641, China*

4. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangzhou 510641, China*

5. *Guangzhou Meteorological Bureau, Guangzhou 511430, China*

2020-11-05 收稿, 2021-07-09 改回.

肖柳斯, 张华龙, 张旭斌, 冯璐, 谌志刚, 戴光丰. 2021. 基于 CMA-TRAMS 集合预报的“5·22”极端降水事件可预报性分析. 气象学报, 79(6): 956-976

Xiao Liusi, Zhang Hualong, Zhang Xubin, Feng Lu, Chen Zhigang, Dai Guangfeng. 2021. Predictability analysis of the extremely heavy rainfall in the Pearl River Delta on 22 May 2020 using CMA-TRAMS-based ensemble prediction system. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(6):956-976

Abstract An extremely heavy rainfall occurred in the Pearl River Delta on 22 May 2020 with the sliding 1 h maximum precipitation of 201.8 mm, and the total rainfall of 351 mm in 3 h. In order to investigate the key forecasting factors and the predictability of this case, the evaluation and sensitivity analysis of precipitation forecasts by the mesoscale ensemble prediction system that is based on the Tropical Regional Atmosphere Model for the South China Sea (CMA-TRAMS(EPS)) are carried out. The results show that compared with the ECMWF Ensemble Prediction System (ECMWF-EPS), the good-performance members of CMA-TRAMS(EPS) have better ability to capture the intensity and spatial distribution of the heavy rainfall, but they still miss the extremity. The better prediction ability of these members comes from their effective prediction of the evolution characteristics of the low vortex and low-level jet (or boundary layer jet) as well as the intensity and location of the coupling between the two systems. The strong southerly wind component of the low-level jet (boundary layer jet) over the eastern part of the Pearl River Delta is conducive to the deceleration of the low vortex moving and the enhancement of cyclonic convergence, both of which are favorable for long duration and high efficiency of precipitation. In addition, the development of the low vortex itself has feedback on changes in the intensity of low-level jet (boundary layer jet). The low-level jet (boundary layer jet) is accelerated in a small area due to the feedback of the enhanced

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(41975136、41875182)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515011118)、广东省重点领域研发计划项目(2020B1111200001)、广东省气象局科研项目(GRMC2018Z05)、广州市气象学会科研项目(M202101)、雷达应用及强对流短临预警技术创新团队项目(GRMC202002)。

作者简介: 肖柳斯, 主要从事数值模式解释应用研究。E-mail: xiaoliusi104@163.com

通信作者: 张旭斌, 主要从事高分辨率集合预报技术研究。E-mail: xbzhang@gd121.cn

vortex circulation. This coupling mechanism is well described by the good-performance ensemble members. However, the coupling position of the low vortex and low-level jet (or boundary layer jet) predicted by other members is located to the east and south of its actual position, and the convergence intensity is underestimated. The above biases in the simulation lead to the deviation of rainfall intensity and rainfall area. In addition, heavy rainfall results in the formation of cold pool and intensifies the contrast between the surface warm ridge and cold pool (with horizontal temperature gradient of 0.23—0.76°C/km), which is conducive to the maintenance of mesoscale convergence line and strengthens the backward propagation of convection, leading to extreme rainfall. However, all the members of CMA-TRAMS(EPS) have obvious deficiencies in forecasting the organization and propagation characteristics of the mesoscale systems, which limits the ability of CMA-TRAMS(EPS) for predicting extremely heavy rainfall.

Key words Ensemble forecast, CMA-TRAMS(EPS), Extremely heavy rainfall, Predictability

摘要 2020年5月22日珠江三角洲地区出现了一次极端强降水天气,最大滑动小时雨量201.8 mm,3 h雨量达到351 mm。为探讨此次极端强降水的关键预报因子及可预报性,对热带中尺度集合预报系统(CMA-TRAMS(EPS))降水预报产品进行检验评估和敏感性分析,结果表明:与欧洲中期数值预报中心集合预报系统(ECMWF-EPS)相比,CMA-TRAMS(EPS)的好成员对本次过程降水强度及位置的预报结果与实况更接近,但对极端性预报仍有欠缺。好成员的预报能力来自于对低涡和(超)低空急流的演变特征以及两者强度和位置耦合的有效预测。好成员组预报珠江三角洲东部(超)低空急流南风分量较强,有利于低涡缓慢移动和气旋性辐合增强,致使降水持续时间长、效率高。而低涡自身发展又反馈于急流强度变化,好成员组较准确地刻画了增强的低涡环流反馈导致急流小范围加速的耦合特征。其他成员组预报的低涡和(超)低空急流的耦合位置偏东、偏南,辐合强度偏弱,导致降水强度或落区出现偏差。此外,强降水致使冷池形成,并增强激烈的冷、暖气团对峙(水平温度梯度达0.23—0.76°C/km),有利于中尺度辐合线维持,加强对流后向传播并产生极端降水量。但CMA-TRAMS(EPS)两组成员在预报中尺度系统的组织性和传播特征方面均存在明显不足,限制了集合预报系统对极端降水的预报能力。

关键词 集合预报, 热带中尺度集合预报系统, 极端降水, 可预报性

中图法分类号 P457.6

1 引言

近30年来,受全球变暖及城市化进程的影响,极端强降水有向超大城市群集中并增强的趋势(Liang, et al, 2017; 唐永兰等, 2019)。在强热岛效应影响下,珠江三角洲城市群突发的极端小时降水事件显著增加(Wu, et al, 2019),破纪录的降水事件屡屡发生。2020年5月21日夜至22日早晨,广东省出现了一次暴雨到大暴雨、局地特大暴雨的过程(“5·22”降水事件)。降水中心位于广州市、东莞市等经济繁荣、人口密集区域,1、3 h降水超过当地历史极值,累积强度大,强降水造成了严重的城市内涝、村庄受浸、河堤塌方及山体滑坡等次生灾害,并导致4人死亡,公交、地铁、广深动车停运,经济损失非常严重。

“5·22”降水事件为一次季风爆发背景下,低涡和低空急流共同影响的极端强天气过程。事后,广东省气象局组织了专题分析,预报员从环流背景、多源观测资料分析和历史个例对比等传统角度开展了研究,有助于了解该降水事件的天气学成因。动、热力和水汽条件均有利于暴雨事件的发生,短

期预报能够关注到此次暴雨过程,但无论是主观预报或是确定性模式预报对其极端性估计均存在明显不足。由于极端降水是小概率事件,其发展具有很大的不确定性,用数值天气预报模式对其进行单一初值的确定性预报远远不够(高丽等, 2019; Wu, et al, 2020)。

集合预报能够包容部分偏差,并反映未来天气的多种可能变化状况,对小概率天气事件具有更好的预报效果,是改善数值模式的不确定性及提高极端事件可预报性的科学有效方法(杜钧等, 2014; 高丽等, 2019)。目前,世界上多个气象中心正在着力发展集合预报业务(陈静等, 2020; 陈超辉等, 2020; Zhang, 2018a, 2018b; Medina, et al, 2019),其中欧洲中期天气预报中心集合预报系统(ECMWF-EPS)的业务产品在中国应用最为广泛(Yu, et al, 2016; Du, et al, 2018; 伍志方等, 2018; 陈涛等, 2019)。ECMWF-EPS是全球集合预报系统,降水预报强度普遍偏弱,对中尺度对流系统发展演变的描述能力不足(Yu, et al, 2016; 王毅等, 2020),因此区域甚至对流尺度集合预报系统的研发备受重视。中国气象局广州热带海洋气象研究所基于CMA-MESO

(原 GRAPES_MESO)模式开发了中国气象局南海台风数值预报系统(Tropical Regional Atmosphere Model for the South China Sea, CMA-TRAMS; Chen, et al, 2014)(原南海台风数值预报系统, TRAMS)。Zhang(2018a)基于CMA-TRAMS建立了热带中尺度集合预报系统(CMA-TRAMS(EPS)),并通过3 a的批量试验证明CMA-TRAMS(EPS)在台风强度、强降水及大风预报方面比ECMWF-EPS更具优势。2020年针对CMA-TRAMS进行了版本升级,CMA-TRAMS(EPS)已投入业务试运行(陈子通等, 2020)。

集合预报系统中各成员具有相似的天气、气候背景,经过积分计算后,预报结果存在差异,从误差演变的角度能够衡量预报变量与集合成员模式初值及物理过程的耦合关系,近年来被广泛应用于天气系统动力特征和实际可预报性的研究(Torn, et al, 2008; Yu, et al, 2016; 王毅等, 2017; 闵锦忠等, 2020)。常用的研究方法包括组间差异分析和集合敏感性分析(ESA)(Schumacher, 2011; 代刊等, 2018)。相较于历史个例的对比,集合敏感性分析方法更适用于挖掘影响模式降水的关键因子,有助于加深对典型天气发生演变的机理研究及模式可预报性能研究。作为研究预报误差和可预报性的新工具,集合敏感性分析方法在温带和热带气旋(Torn, et al, 2009; Brown, et al, 2015; 代刊等, 2018; 陈伟斌等, 2019)、阻塞高压(Matsueda, et al, 2011; Quandt, et al, 2019)、东风波(Torn, 2010)、强对流(Hill, et al, 2016; Limpert, et al, 2018)、暴雨(Yu, et al, 2016; 王毅等, 2017; Du, et al, 2018; 陈涛等, 2019; Wu, et al, 2020)等多种类型天气系统和高影响天气的分析和机理研究中得到应用。

CMA-TRAMS(EPS)上线运行以来,目前仍少见针对该集合预报系统在极端暴雨天气中的业务性能检验和实例分析方面的研究。本研究针对CMA-TRAMS(EPS)在“5·22”降水事件中反映的集合成员降水与天气尺度系统、中尺度系统的因果联系展开讨论,探讨CMA-TRAMS(EPS)集合预报产品对该类极端暴雨个例的预报能力,以期为提高该类极端天气的预报水平提供参考,增强对过程机理和CMA-TRAMS(EPS)性能的理解,并为后续深入研究集合预报系统对于华南北极天气预报的适用和改进方向提供基础。

2 资料和方法

2.1 资料

为了了解CMA-TRAMS(EPS)的基本性能,用ECMWF-EPS做参考,分别对两套集合预报产品进行主、客观检验。起报时间为2020年5月21日08时和20时(北京时,下同)。ECMWF-EPS共50个扰动集合成员和1个对照预报成员,预报产品的水平网格分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,预报间隔为6 h。CMA-TRAMS(EPS)以CMA-TRAMS(陈子通等, 2020)为基础,通过对ECMWF-EPS分析场与预报场进行降尺度处理获得各个集合成员的扰动初值与侧边界条件。CMA-TRAMS垂直方向上采用高度地形追随坐标,并采用Charney-Philips跃层。积云对流参数化方案采用SAS(Han, et al, 2011),微物理过程采用WSM6方案(Hong, et al, 2006),边界层物理方案使用MRF(Hong, et al, 1996),长波辐射过程采用RRTM方案,短波辐射过程采用Dudhia方案。CMA-TRAMS(EPS)共30个扰动集合成员和1个对照预报成员,范围覆盖(0.8° — 54.8°N , 70° — 160°E),水平网格数为1001(经向)、601(纬向),垂直方向共65层,输出等压面标准为17层(1000—10 hPa),水平网格分辨率为9 km,预报间隔为1 h。本次过程分析重点关注预报时效36 h以内。

实况资料包括广东省内共2895个自动雨量站(含国家级气象站及区域气象站)逐5 min观测数据、中国气象局陆面融合实况分析产品(CLDAS)及ECMWF的再分析资料(ERA5),具体参数如表1所示。由于各数据时、空分辨率不一致,首先对数据进行预处理。

2.2 集合敏感性分析(ESA)方法

集合敏感性分析(ESA)方法假设集合成员的预报变量与某个因子预报场存在线性关系,分析输入变量或模型的变化可了解所关心变量的受影响程度。CMA-TRAMS(EPS)有30个扰动成员,预报敏感度(S)可定义为(Torn, et al, 2008)

$$S = \frac{\partial J}{\partial X_i} = \frac{\text{cov}(J, X_i)}{\sqrt{\text{var}(X_i)}} \quad (1)$$

式中, J 为预报变量值, X_i 为*i*成员的状态变量, cov 为协方差算子, var 为方差算子。经过数学转换可得 S 与 J 、 X_i 的相关系数 cor 成正比(王毅等,

表1 数据集说明
Table 1 Description of datasets

类型	名称	说明	水平分辨率	时间分辨率	起报时刻
实况/分析	雨量站	自动气象站观测	—	5 min	—
	CLDAS	融合分析数据	0.05°	1 h	—
	ERA5	再分析资料	0.25°	1 h	—
预报	ECMWF-EPS	全球集合预报	0.5°	6 h	21日08、20时
	CMA-TRAMS(EPS)	区域集合预报	9 km	1 h	21日08、20时

2020)。即

$$S = \text{cor}(J, X_i) \quad (2)$$

因此,相关系数的绝对值越大,初始状态变量的扰动引起预报结果的变动越大,即预报量对状态变量较为敏感。

2.3 集合组间差异分析方法

集合组间差异分析法指设定分类标准将各成员分组,再合成分析各组成员的环境参量并对比差异。以降水为例,降水预报的落区和强度均可作为分组依据。如果把落区准确而强度偏弱或偏强的成员归类,也可作为一个成员组。合成场反映各组成员的共有特征,通过对比分组合成场的差异,能够挖掘两组成员共同的差别(Lamberson, et al, 2016; Wu, et al, 2020)。例如,伍志方等(2018)通过对比“5·7”过程中ECMWF-EPS分组成员各层要素的分布差异,指出地面系统的异常是中尺度系统触发的主因。

文中将预报落区和强度均相对较好的成员归类为“好成员(GOOD)”。除GOOD组以外,其他成员的结果会有多种表现,可能存在显著的预报位置或强度偏差,甚至部分成员强度和位置的偏差均较大。由于本研究的目标在于研究GOOD成员跟大部分成员的差异,因此,除“GOOD”成员之外,其余成员均归入“其他成员(OTHERS)”组。

3 “5·22”降水事件概况

3.1 降水分布情况

“5·22”降水事件中珠江三角洲和莲花山南部的惠州市至汕头市一带出现了暴雨以上降水,最强降水中心位于珠江三角洲中部,东莞市高埗镇中心村测得全省最大累计雨量399.50 mm(图1a)。该过程短时雨量大,局地强降水持续时间长,广州市东部和东莞市中北部地区部分站点(图1b)小时雨

强非常极端(120 mm/h,曾智琳等,2020),广州市黄埔大桥站测得最大整点雨强167.8 mm/h,滑动小时雨量达到201.8 mm(22日02时15分到03时15分);东莞市东城街道的最大3 h雨量达到351 mm(22日00时30分到03时30分),打破东莞市本地历史记录。超过5 mm/(5 min)的强降水持续了4—5 h(图1c),以黄埔大桥站(图1d)为例:强降水从01时40分开始,02时和03时前后分别达到次峰值和峰值,03时前后,连续3个时次的最大5 min降水量超过30 mm,0.5 h降水量已超过100 mm,降水效率极高。

3.2 天气形势分析

以ERA5资料为基础,对2020年5月21日20时至22日02时的环流形势进行分析。200 hPa,华南地区位于南亚高压东侧及高空西风急流右侧的扇形辐散区(图2a),夜间到凌晨良好的高空辐散条件维持并略有加强(图2e)。500 hPa华南地区位于东亚大槽后部,受槽后脊前西北气流控制影响,与同一时刻多年(2001—2018年)的平均态相比,中国东部地区高度场显著偏低,而大陆西部地区偏高(图2b)。02时西部副热带高压的强度维持,114°E以东副热带高压的强度有所减弱,“西高东低”的特征更加明显,西偏北气流引导低层系统东移南压,珠江三角洲地区东侧可见短波槽活动,中层的动力条件进一步转好(图2f)。925 hPa,华南地区的暖湿区与低压槽相伴发展东移(图2c),02时广东省东部地区涡度增大并可见闭合等高线,低涡南侧的偏西和西南两支超低空急流显著增强,低层辐合和水汽输送条件进一步改善(图2g)。地面,中尺度辐合线逐渐东移南压至珠江三角洲东部地区,有利于局地强降水系统的触发。整层可降水量高值区域范围显著扩大,强度增强,中心值超过85 kg/m²(图2d、h),远大于当日多年(2001—2018年)

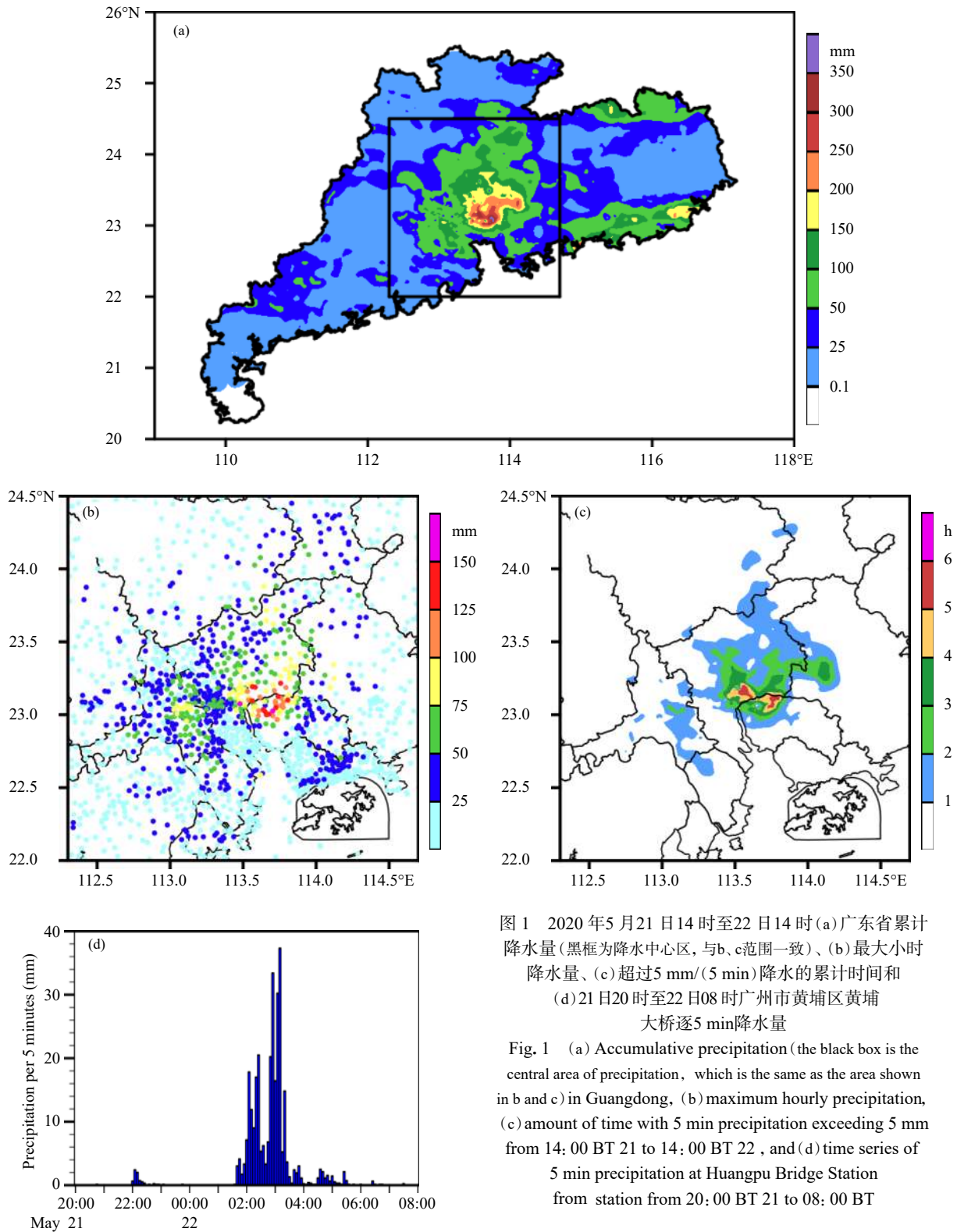


图1 2020年5月21日14时至22日14时(a)广东省累计降水量(黑框为降水中心区,与b、c范围一致)、(b)最大小时降水量、(c)超过5 mm/(5 min)降水的累计时间和(d)21日20时至22日08时广州市黄埔区黄埔大桥逐5 min降水量

Fig. 1 (a) Accumulative precipitation (the black box is the central area of precipitation, which is the same as the area shown in b and c) in Guangdong, (b) maximum hourly precipitation, (c) amount of time with 5 min precipitation exceeding 5 mm from 14: 00 BT 21 to 14: 00 BT 22, and (d) time series of 5 min precipitation at Huangpu Bridge Station from station from 20: 00 BT 21 to 08: 00 BT

平均值(58 kg/m²),充沛的水汽条件异常有利于极端性暴雨过程的出现。总而言之,夜间系统配置向更有利于强降水的趋势转变。

4 集合预报结果检验

以当今预报水平较高的业务系统 ECMWF-EPS 为参考,与 CMA-TRAMS(EPS)进行主、客观

对比检验,可了解CMA-TRAMS(EPS)对本次极端降水过程的预报能力。由于过程的主要降水时段为5月22日凌晨,检验的目标时段选定为21日20时至22日08时的12 h降水。

分别对比2个模式在2个起报时(21日08时

和20时)的具体预报。从08时起报的降水分布邮票图(图3)可见,ECMWF-EPS中主要降水落区与CMA-TRAMS(EPS)相似,但降水中心强度差异较为明显;20时起报的ECMWF-EPS降水量调整增大,但仍只有少数成员预报出局地100 mm量级的降水

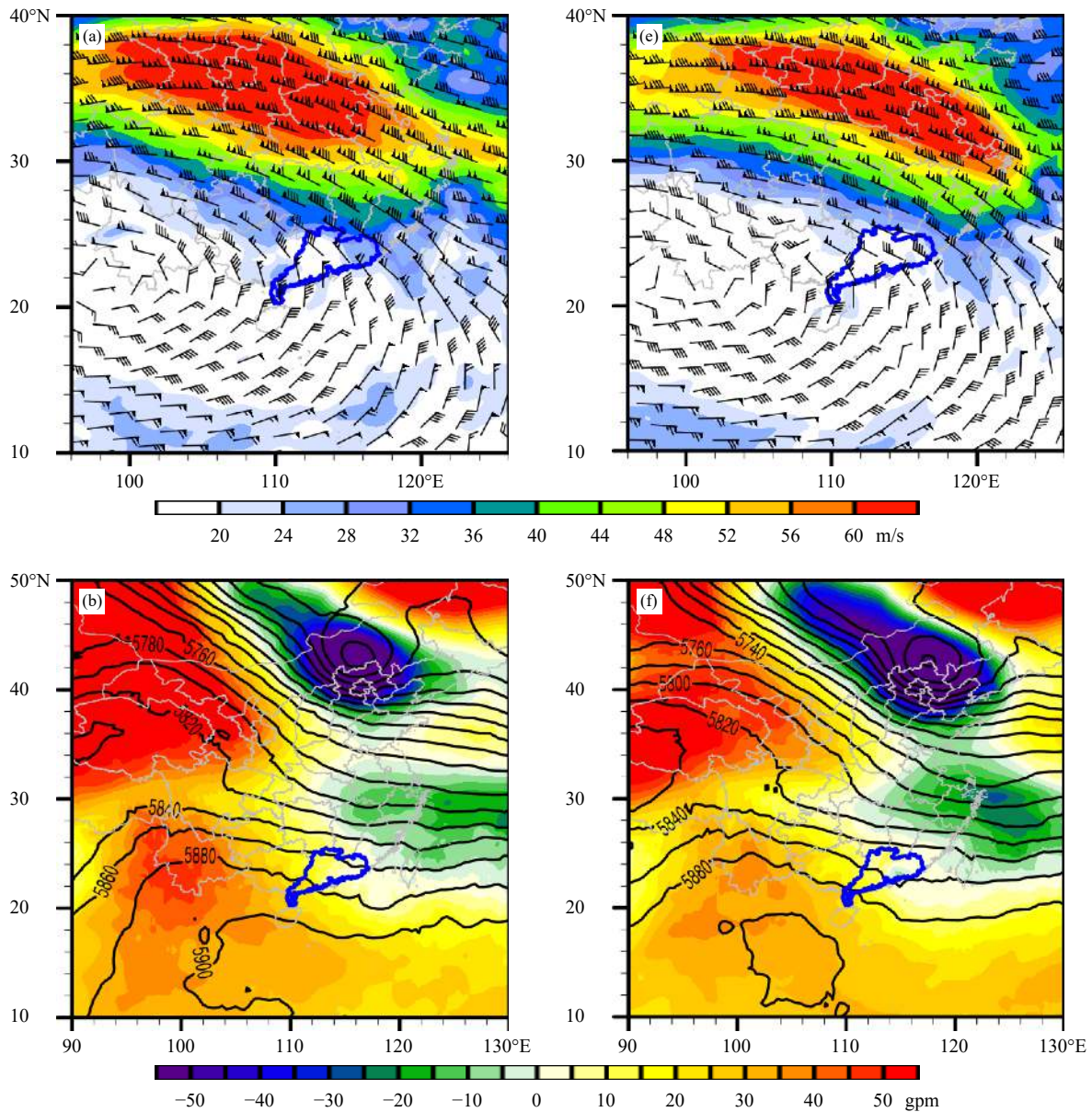
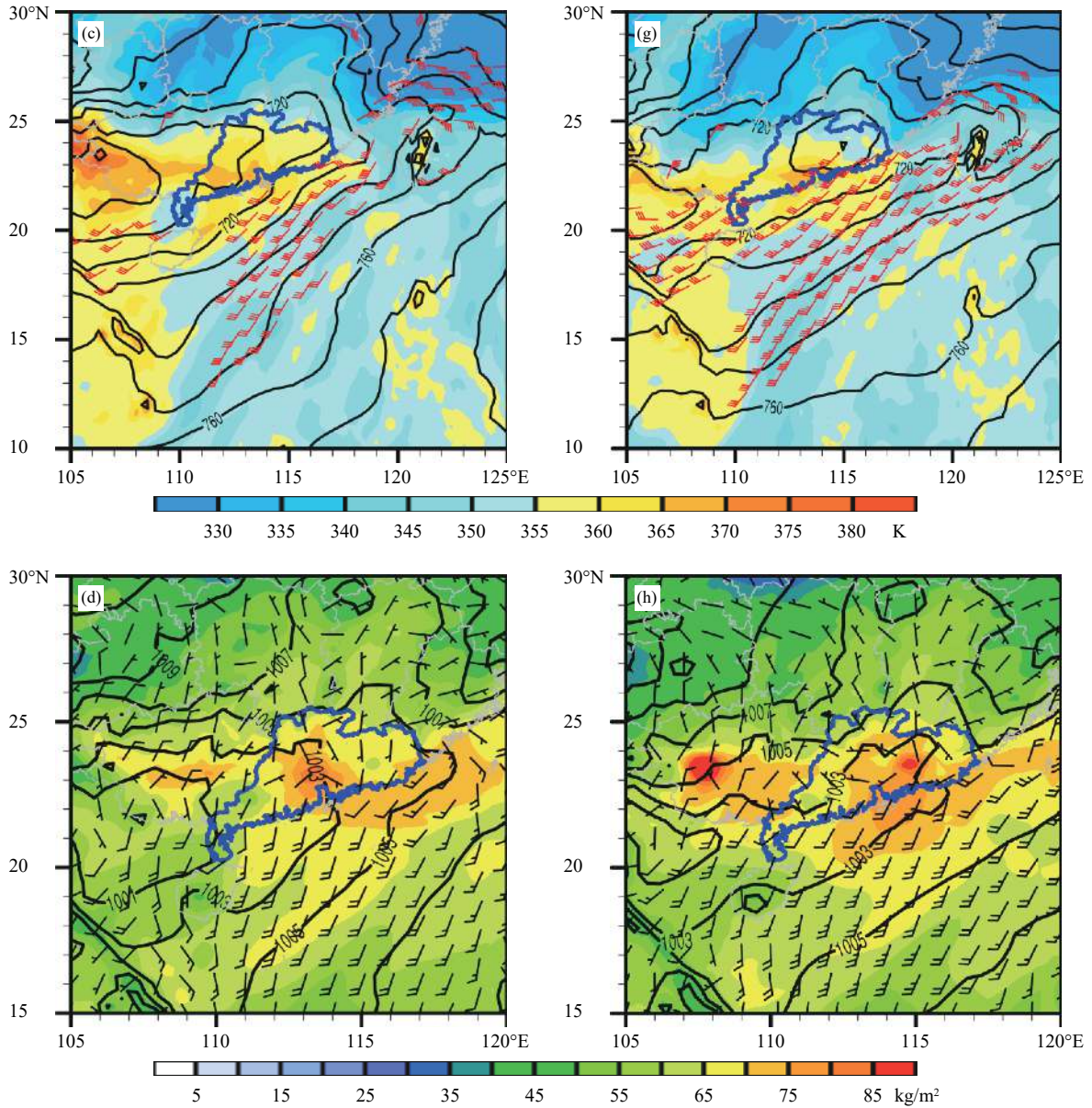


图2 2020年5月(a、b、c、d)21日20时和(e、f、g、h)22日02时(a、e)200 hPa风场(色阶), (b、f)500 hPa高度场(等值线,单位:gpm)及其与多年平均差值场(色阶), (c、g)925 hPa高度场(等值线,单位:gpm)、假相当位温(色阶)和急流(大于12 m/s), (d、h)海平面气压(等值线,单位:hPa)、整层可降水量(色阶)和地面风场

Fig. 2 (a, e) Wind field at 200 hPa (shaded), (b, f) geopotential height (contour, unit: gpm) and anomalies from multi-year average (shaded) at 500 hPa, (c, g) geopotential height (contour, unit: gpm), pseudo-equivalent potential temperature (shaded) and jet stream (over 12 m/s) at 925 hPa, and (d, h) sea-level pressure (contour, unit: hPa), total precipitable water (shaded) and wind field at 20: 00 BT 21 (a, b, c, d) and 02: 00 BT 22 (e, f, g, h) May 2020



续图 2

Fig. 2 Continued

(图 4)。08 时起报的 CMA-TRAMS(EPS)降水强度普遍较大,强降水范围也偏大,强降水中心主要位于粤东地区;20 时起报的 CMA-TRAMS(EPS)雨量较 08 时有所减小,成员之间分歧增大,但部分成员的量级、落区位置和形态预报均与实况更相符。

为客观评价两个模式各成员之间及不同起报时刻的结果差异,利用双线性插值法将模式预报结果插值到 2895 个雨量站上,计算 21 日 20 时至 22 日 08 时广东省全部自动雨量站的 TS(Threat score)评分和空报率(FAR)以进行定量检验。结果

显示,ECMWF-EPS 的预报结果调整明显,08 时起报的 100 mm 降水 TS 评分均为 0,仅 1(8)个成员 50 mm 降水 TS 大于 0.4(0.2)。部分成员 TS 较低的同时,FAR 较高(图 5a₁、a₂),表明预报落区与实况位置有偏差。20 时起报的结果中,TS 明显提升,8 个成员 100 mm 降水 TS 大于 0,17(6)个成员 50 mm 降水 TS 超过 0.2(0.4)。但 FAR 也普遍上升,部分成员(如 25 号)FAR 比 TS 更大(图 5b₁、b₂),配合落区分布(图 4)可见落区的范围大小及位置与实况存在明显偏差。

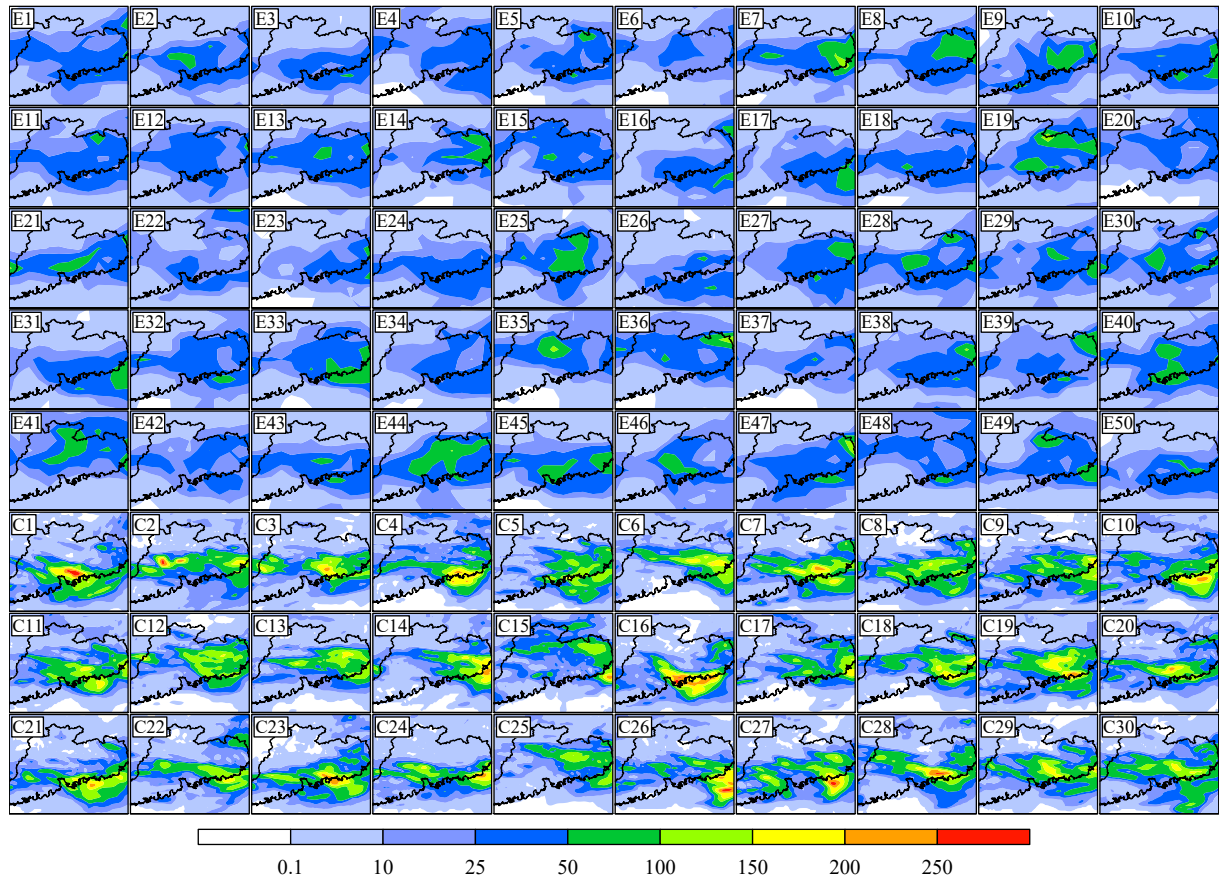


图3 2020年5月21日08时起报的2020年5月21日20时至22日08时12 h累计降水量(ECMWF-EPS成员以“E”开头,CMA-TRAMS(EPS)成员以“C”开头,单位:mm)

Fig. 3 Forecasts of 12 h accumulated precipitation from 20:00 BT 21 to 08:00 BT 22 May 2020 initialized at 08:00 BT 21 May 2020 (ECMWF-EPS members begin with "E" and CMA-TRAMS(EPS) members begin with "C", unit: mm)

CMA-TRAMS(EPS)不同时刻起报的结果也有明显不同,08时起报的降水范围和强度均较大,50 mm降水TS超过0.2的成员(图5a₃)数量远多于20时起报的结果(图5b₃),19个成员100 mm降水TS大于0,但差异较大。大多数成员50 mm降水FAR超过0.2(图5a₄),意味着08时的高TS是以高FAR为代价的。而20时起报的TS评分(图5b₃)显示各成员的差异较大,部分成员(如7、23号)在50 mm和100 mm降水中均具有较高TS,且FAR小于0.2(图5b₄),表明这些成员对降水落区的空间位置把握能力更强。

通过对比集合预报的平均场和离散度可进一步了解成员降水的预报性能。20时起报的12 h集合平均降雨量和离散度分布(图6)表明,ECMWF-EPS平均降水量均在100 mm以下,存在3个超过50 mm的降水中心,其中珠江三角洲北部和东南部

局地性较强,而粤东降水中心沿着海岸线分布且范围较大(图6a)。离散度大值中心位于珠江三角洲北部,次中心位于粤东沿海(图6b),分别与两个降水中心相对应。

CMA-TRAMS(EPS)预报降水中心位置偏东,雨量超过50 mm的范围更广,集中在粤东海岸线附近(图6c)。CMA-TRAMS(EPS)的集合离散度较ECMWF-EPS显著偏大,最大值位于珠江三角洲东南部(图6d红色框),其中心值超过50 mm。次中心(图6d白色框)位置与ECMWF-EPS相似,但是量值明显偏大。

降水量与集合离散度存在一定相关,降水量较大时,离散度绝对值往往较大(苏翔等,2012; Su, et al, 2014),两个模式预报的粤东沿海(图6b、d白色框)及ECMWF-EPS预报的珠江三角洲北部地区(图6b红色框)离散度高值中心除了与模式预报不

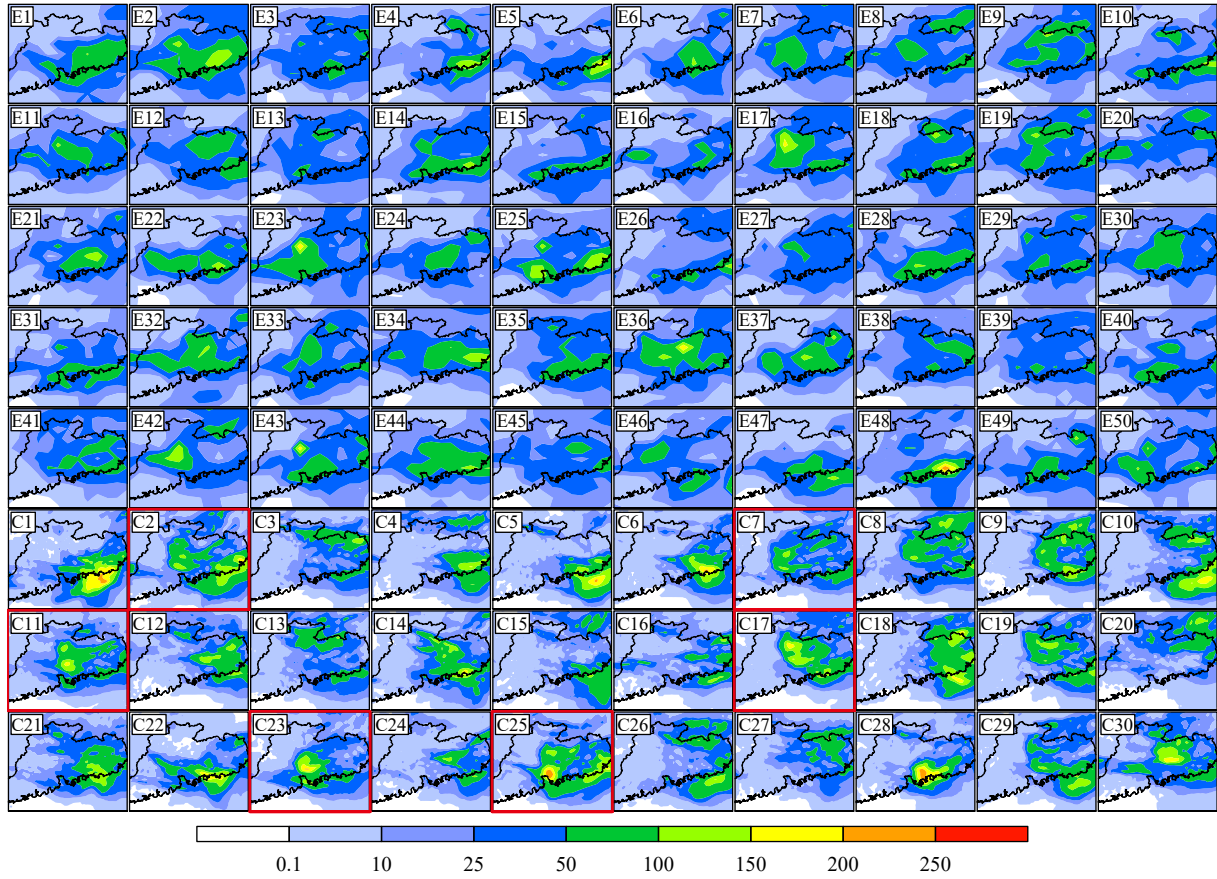


图4 同图3,但起报时刻为2020年5月21日20时(红框为“GOOD”组成员)

Fig. 4 Same as Fig. 3 except that the initial time is 20:00 BT 21 May 2020 (the red boxes indicate GOOD group members)

确定程度有关外,也与集合平均值较大有关。珠江三角洲东部,尤其是东南部地区(图6d红色框)CMA-TRAMS(EPS)预报的平均降水量25—50 mm,量值较小,但是离散度较周边均显著偏大,表明CMA-TRAMS(EPS)对珠江三角洲东部地区的降水预报具有高度的不确定性,部分成员预报的降水量具有一定极端性。实际出现的极端降水恰是在此区域附近,反映出CMA-TRAMS(EPS)部分成员对此次极端性降水具有一定的预报能力。该区域内ECMWF-EPS预报的平均场量级与CMA-TRAMS(EPS)类似,但是离散度较小,预报不确定性较小,ECMWF-EPS预测该区域出现极端降水的概率较小。

上述分析表明,ECMWF-EPS预报的雨量普遍较小,对极端降水的预报明显不足,而CMA-TRAMS(EPS)预报的强度更接近实况。不同时刻起报的集合预报结果均有一定调整,CMA-TRAMS(EPS)在20时起报的结果中,部分成员无论对降水强度或落区均有较好的预报效果,与其他成员存在较大的差

异,不同成员组之间具有较高的对比意义,以后将选用最临近时刻(20时起报)的结果进行分析。通过对比主观及客观定量检验结果,CMA-TRAMS(EPS)的2、7、11、17、23和25号成员被选入“GOOD”组,其他成员归入“OTHERS”组。在粤东沿海地区,两组成员预报均存在一个集合平均雨量最大值区,范围及强度相当。而“GOOD”组预报在珠江三角洲东部地区还有一个降水中心,落区的形态与实况相似,但是极值中心较实况弱。其中23号是最佳成员,其预报落区和强度与实况都具有较高的相似度。

5 结果

5.1 多因子的集合敏感性分析

文中将集合敏感性分析方法应用于CMA-TRAMS(EPS)中,针对动力因子(海平面气压、500 hPa位势高度、200 hPa位势高度、850 hPa纬向风、925 hPa纬向风、850 hPa经向风、925 hPa经

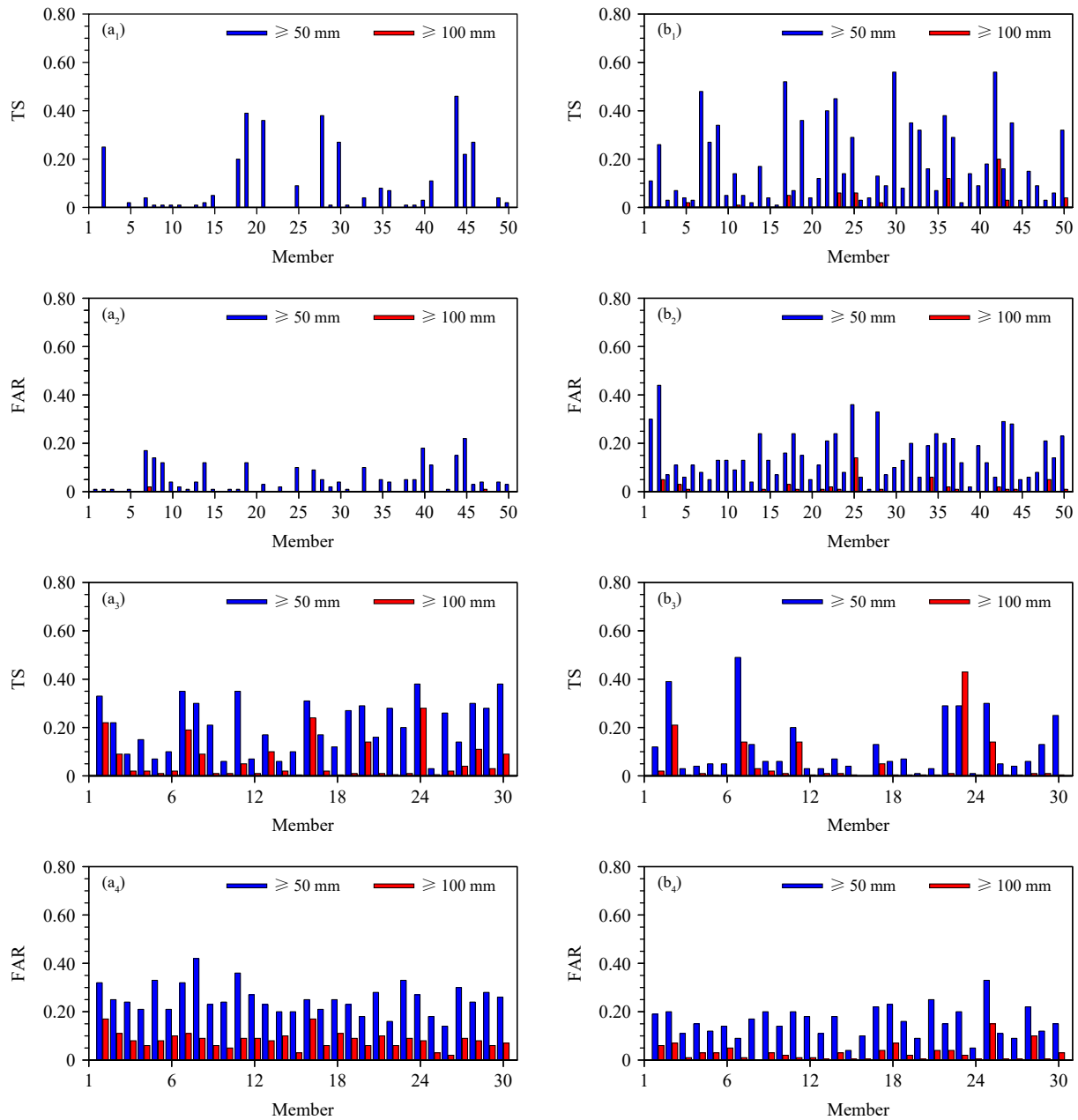


图5 2020年5月21日08时(a₁—a₄)和20时(b₁—b₄)起报的广东省21日20时至22日08时12 h累计降水量的ECMWF-EPS(a₁、b₁、a₂、b₂)和CMA-TRAMS(EPS)(a₃、b₃、a₄、b₄)的TS评分和空报率

Fig. 5 TS and FAR for ECMWF-EPS (a₁, b₁, a₂, b₂) and CMA-TRAMS(EPS) (a₃, b₃, a₄, b₄) forecasts of 12 h accumulated precipitation from 20:00 BT 21 to 08:00 BT 22 May 2020 in Guangdong province (the forecasts are initialized at 08:00 (a₁—a₄) and 20:00 (b₁—b₄) BT 21 May 2020, respectively)

向风)、水汽因子(925 hPa 比湿、地面比湿)和热力因子(925 hPa 假相当位温、925 与 500 hPa 假相当位温差、地面温度)计算集合敏感度,以对比极端降水事件对不同因子的敏感程度。

结果(图7)表明,敏感度最高的是850 hPa 经向风(0.84),其次为500 hPa 位势高度场(-0.83),

敏感度绝对值超过0.7的主要为动力因子,如850 hPa 纬向风(-0.78)、925 hPa 经向风(0.77, -0.73)、925 hPa 纬向风(-0.73)和海平面气压(0.73)。由此可见,850 hPa 和 925 hPa 风场的配置与模式预报降水关系非常密切,其中经向风尤为重要。模式降水与这两层经向风的正相关显著高于

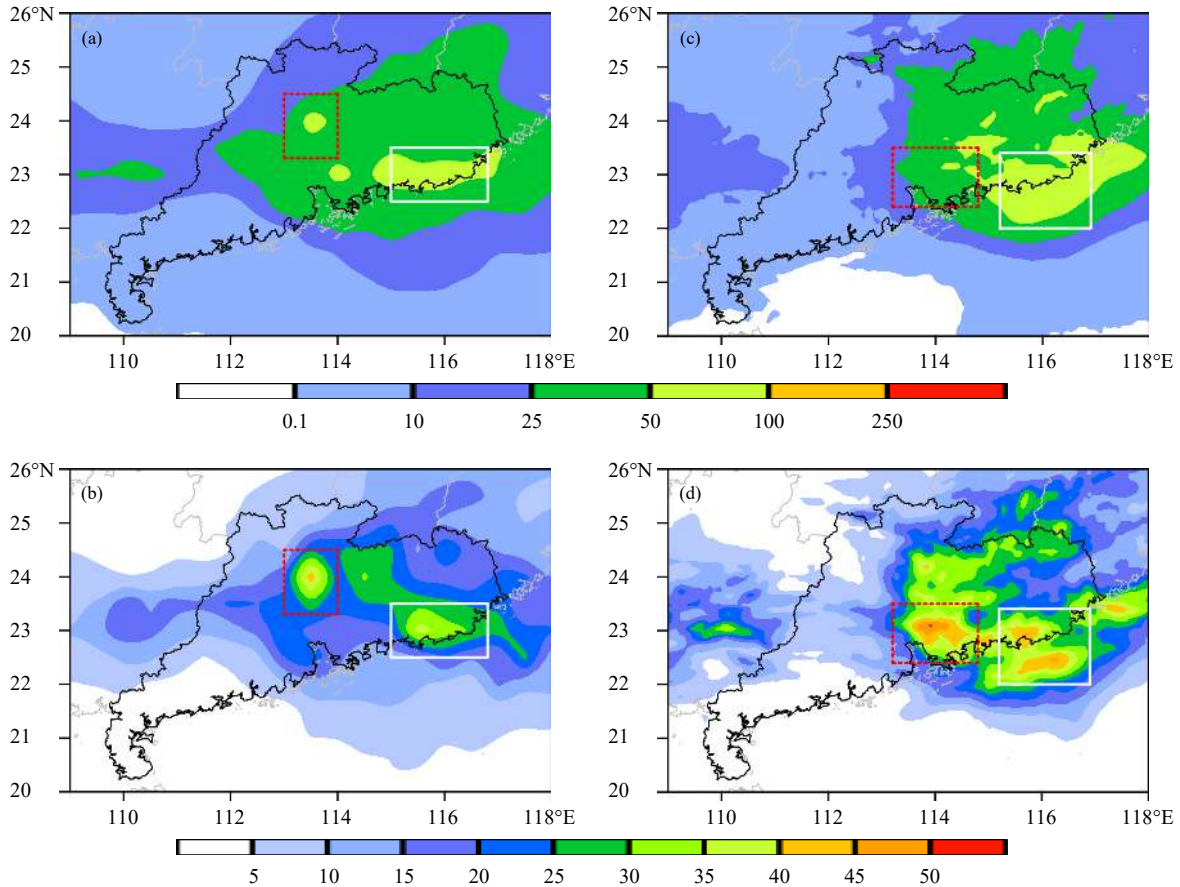


图6 2020年5月21日20时起报的2020年5月21日20时至22日08时ECMWF-EPS (a、b)和CMA-TRAMS(EPS) (c、d)的(a、c)集合平均降水量和(b、d)离散度(单位: mm, 红色虚线框和白色实线框代表高离散度区域)

Fig. 6 (a, c) Ensemble mean forecasts and (b, d) spreads of accumulative precipitation forecasts for the period from 20: 00 BT 21 to 08: 00 BT 22 May by (a, b) ECMWF-EPS and (c, b) CMA-TRAMS(EPS) initialized at 20: 00 BT 21 May 2020 (unit: mm, the red dashed box and the white solid box indicate two areas of high spread)

负相关, 南风正向扰动更有利于降水增加, 3.2节中所提及的(超)低空急流增强正是降水增加的关键配置。此外, 除了500 hPa高度场外, 其他因子正、负敏感区多数成对出现, 相关均通过了99%显著性*t*检验。850 hPa和925 hPa的风场尤为显著, 其中经向风正、负敏感区分别位于东南和西北方向, 而纬向风大致为南北向分布, 成对风场敏感度的配置体现了CMA-TRAMS(EPS)降水与低层涡度场的强度具有密切的正相关关系。

低层温度、湿度和不稳定能量条件与降水也存在一定的相关, 敏感度量级相当, 绝对值为0.5—0.6。广东省中南部陆地的地面温度敏感度超过0.6, 该地区温度越高, 越有利于研究区(图1a黑框所示)出现强降水, 但是周边的温度负相关未能通过99%显著性*t*检验。

综上所述, 集合预报对降水强度的预报与不同高度层的动、热力因子均具有一定的联系, 但相关存在差别, 相关最高为表征中、低层的动力因子(如850 hPa和925 hPa风场、500 hPa高度场), 表明此次降水过程的天气系统(即低涡和低空急流)的动力特征与降水强度关系最密切, 需开展进一步的分析。

5.2 天气尺度系统的可预报性分析

5.2.1 低涡

本次降水过程的低层切变系统由中国西南地区的低涡东移演变而来。南方汛期, 西南涡与南风急流是华南地区致洪暴雨重要组成成员(黄明策等, 2010), 并且强降水主要分布在环流中心或系统移向的右前侧。由于局地累计雨量严重依赖于降水系统的移动方式, 移速慢的气旋有助于降水维持

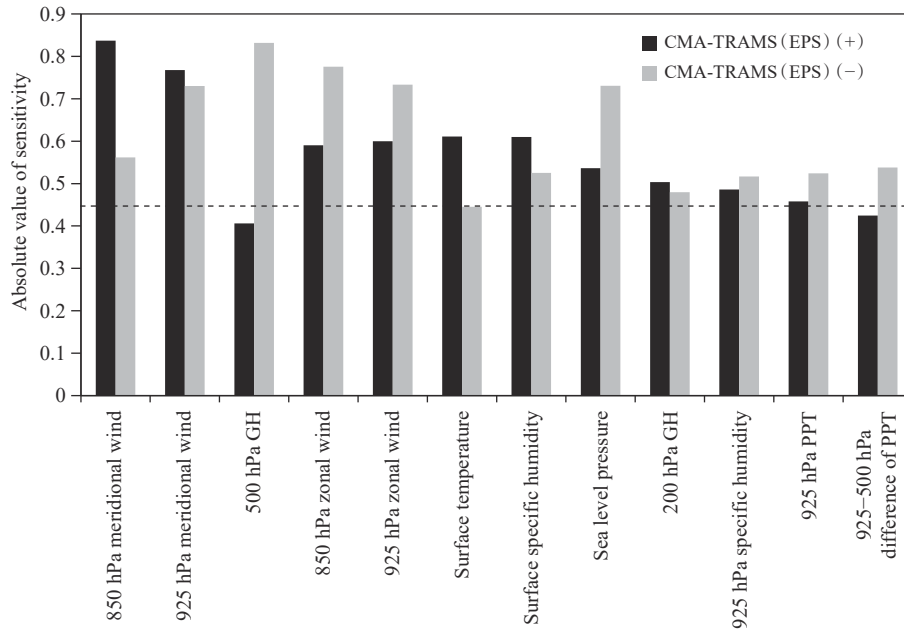


图7 CMA-TRAMS(EPS)集合成员预报敏感度极值

(黑色: 正, 灰色: 负; 黑色虚线对应相关系数通过99%的显著性 t 检验, GH和PPT分别为位势高度和假相当位温缩写)

Fig. 7 Extremum of forecast sensitivity of CMA-TRAMS(EPS) members (black: positive sensitivity, grey: minus sensitivity; the black dotted line corresponds to the correlation coefficient passing the 99% confidence level; GH and PPT are the abbreviation names of geopotential height and potential pseudo-equivalent temperature, respectively)

和积累,因此低涡的移动路径直接影响落区的位置和降水强度(Li, et al, 2014)。

CMA-TRAMS(EPS)各成员低涡的预报路径均大致呈纬向,位于粤中的偏东地区至粤东偏北地区,分布跨度约为2.5纬度、3.5经度,离散度较大,部分成员移速较快,12 h内移动路径更长(图8a);随着预报时效延长,离散度更趋明显。在所有成员中,GOOD组成员的低涡东移为主,移速呈先慢后快的特征(图8b),22日02时该组成员的低涡中心位置较其他成员明显偏西(图8c),演变趋势与实况较为一致。其中7和23号成员的移动路径与实况最接近,两者TS评分也最高,FAR较小;而11和25号较实况略偏南,FAR较高,表明降水落区仍具有一定偏差(图5)。

以低涡东移速度作为预报量,对各因子做敏感度计算,可见低涡东移速度对经向风速敏感度较高。集合敏感度正值较小,低涡东移速度与北风的相关较弱。负值中心粤中偏东地区,极小值低于-0.8,表明该区域南风越大,低涡东移速度越慢(图8d),珠江三角洲东部地区的南风汇入有利于低涡在其北部停滞。

对比CMA-TRAMS(EPS)和ERA5的低空风分布有助于了解模式对低层形势的预报偏差,进一步得出模式对低涡预报偏差的成因。CMA-TRAMS(EPS)的偏东风场较再分析场更强,珠江三角洲北部地区尤为明显(图9)。其中GOOD组成员(图9a、d)对珠江三角洲东侧的偏南风 and 西侧的偏北风均预报偏强、南侧的西南风预报略偏强,各向风场的配置致使GOOD组成员在珠江三角洲地区形成了偏强的气旋性环流,低涡预报较实况偏强。OTHERS组成员在广东省境内的850 hPa偏北风较实况显著偏强,在珠江三角洲北部形成北风差值中心。沿海差值西南风与陆上差值东北风交汇,在珠江口东侧沿海增强了气旋性环流(图9b),造成与实况偏离的降雨中心。由于925 hPa上OTHERS组成员的偏北风偏差更显著,经向风的辐合区南推至海上,偏差风的气旋性特征不明显(图9e)。两组成员的差异表明,广东省中部GOOD组成员气旋性环流更强,低涡强度比OTHERS组成员大得多(图9c、f)。

上述特征表明,GOOD组成功预报了低涡缓慢移动的特征,同时预报气旋性涡度偏强,有利于在

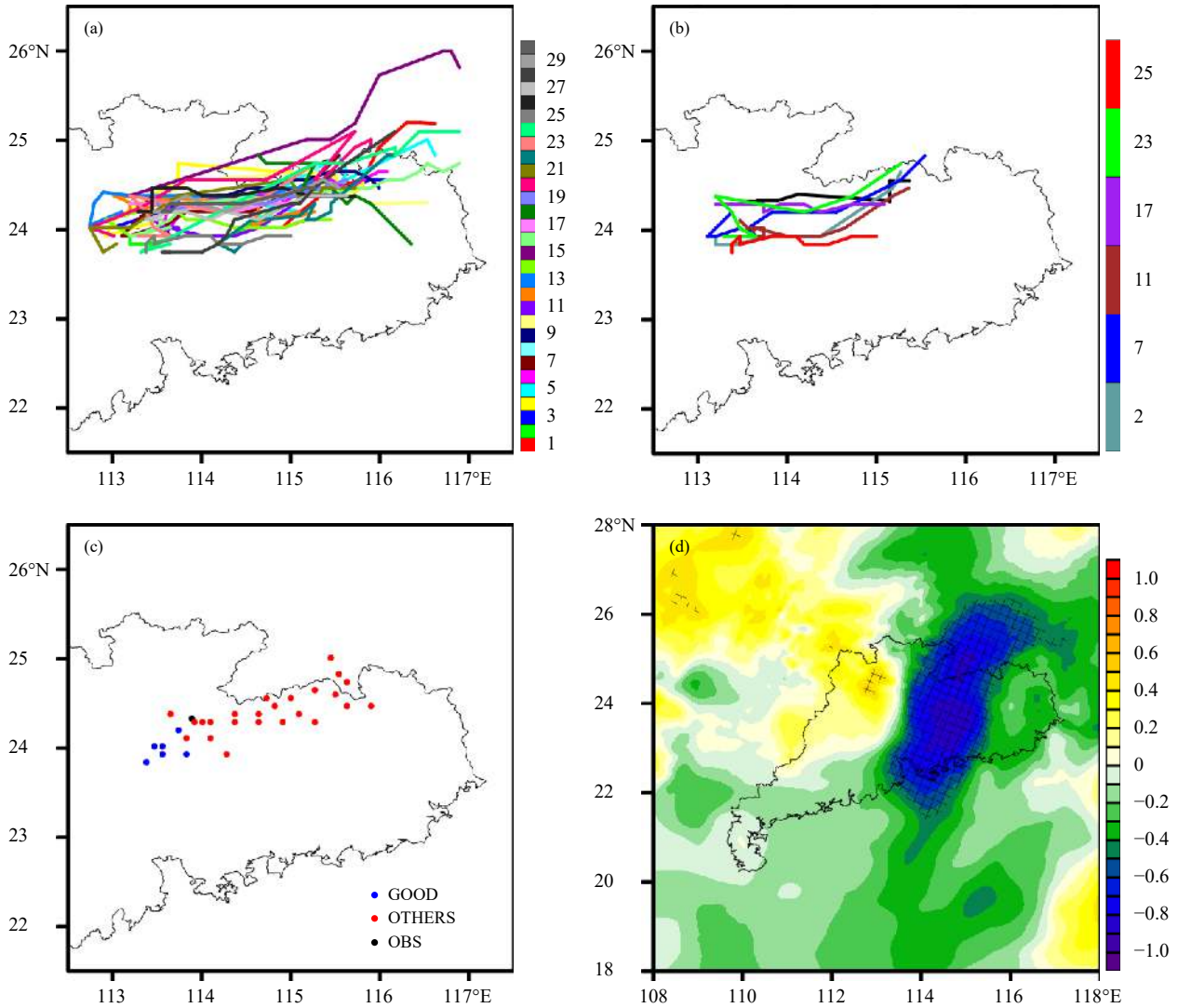


图 8 850 hPa 层 CMA-TRAMS(EPS)2020 年 5 月 21 日 21 时至 22 日 08 时(a)所有成员和(b)GOOD 组成员预报的低涡移动路径(黑色路径为再分析场), (c)22 日 02 时低涡中心位置, (d)低涡中心经度与南风的敏感度(网格表示通过 99% 显著性 t 检验区域)

Fig. 8 Low vortex tracks from 21: 00 BT 21 to 08: 00 BT 22 May predicted by (a) all members and (b) GOOD group members of CMA-TRAMS(EPS), (c) location of low vortex center at 02: 00 BT 22 May 2020, (d) sensitivity between longitude of low vortex and southerly wind at 850 hPa (areas that pass the 99% confidence level t -test are represented by grids)

珠江三角洲地区预报较强的降水,部分成员 24 h 降雨量可达 200 mm。即便如此,模式降水的强度仍远不及实际出现的极端降水强度。因此,除低涡以外,还有低空急流等其他系统对极端降水具有影响。

5.2.2 低空急流

低空急流输送暖湿空气,增大风垂直切变,从而增强大气环境的不稳定性,对锋面降水或暖区对流触发和维持均有重要作用(刘鸿波等, 2014; Du, et al, 2014; Huang, et al, 2017)。由上文分析也可见偏南风急流有利于低涡的停滞,两个天气系统的

相互作用对局地暴雨具有一定贡献。

Du 等(2018)指出,锋面和暖区降水强度分别受到低空急流和超低空急流主导,并且两者的敏感中心分别位于陆面和海面。就本次过程中 850 hPa 的低空急流而言,两组成员差异最明显的区域位于珠江三角洲东侧陆面(图 9c),与 Du 等(2018)分析的锋面降水的敏感中心一致。与实况对比,GOOD 组成员的西南急流强度偏强(图 9a),自海面向陆地,经向风(南风)正偏差逐渐增大;OTHERS 组成员陆面上经向偏差风以北风为主,偏南风较实况明

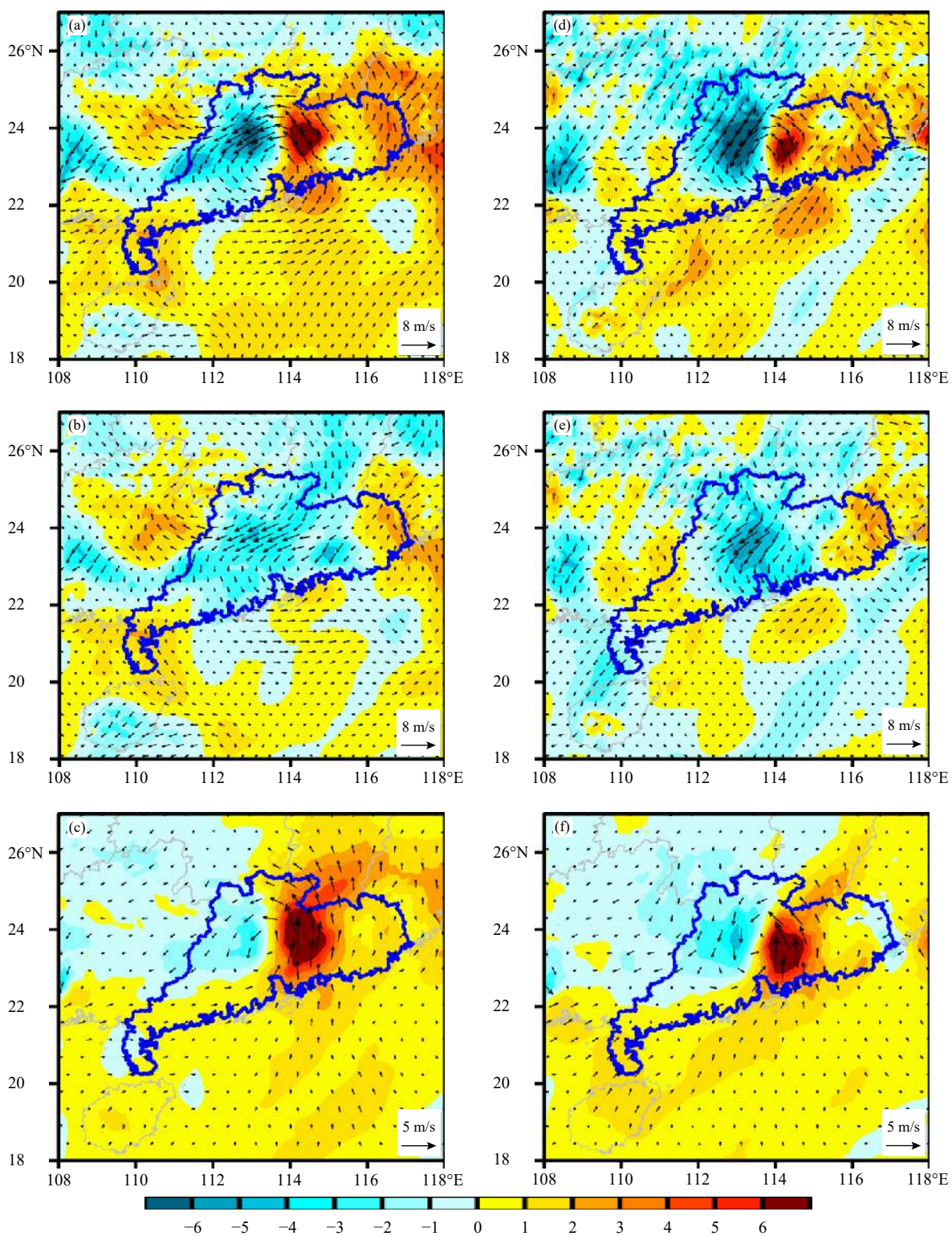


图9 850 hPa(a、b、c)和925 hPa(d、e、f)层(a、d)GOOD 组成员和再分析场、(b、e)OTHERS 组成员和再分析场及 (c、f)GOOD 组成员和 OTHERS 组成员的差值风场(色阶为经向风偏差,单位: m/s)

Fig. 9 Differences in wind field between (a, d) GOOD group and reanalysis, (b, e) OTHERS group and reanalysis and (c, f) GOOD group and OTHERS group at 850 hPa (a, b, c) and 925 hPa (d, e, f) levels, respectively (the shadings are for deviations of meridional wind, unit: m/s)

显弱(图 9b)。陆面风场的差异配置对低涡强度有重要影响,偏强的低空急流通过夹卷作用在暴雨区东南侧进行动量、水汽和能量输送(李建辉, 1982),有助于加剧降水强度。

两组成员陆面上超低空(925 hPa)急流南风分量较实况强的范围和幅度比低空(850 hPa)急流小。近岸海面上,GOOD组的南风预报显著偏强(正偏差),112°E和115°E附近海面存在2个南风偏差核(图 9d),在该核区位置,OTHERS组同样存在南风偏强的现象,但是幅度较小,2个正偏差区有断裂(图 9e)。换言之,GOOD组超低空偏南急流强度明显比OTHERS强(图 9f)。超低空急流是季风在天气尺度上的重要载体,其物质及能量的输送方式与低空急流有所不同。本次极端个例中,模式对珠江三角洲东部地区边界层北风的预报偏强,GOOD组成员由于偏南急流较实况强,使得急流前端辐合上升区维持在珠江三角洲南部,从海上来的暖湿气流从暴雨底部汇入,提升了低层雨滴浓度,促进底层加湿过程,有利于对流不稳定层结的建立和对流降水的形成(李建辉, 1982; Du, et al, 2018)。由于模式同时存在南、北两个方向的风速偏差,在偏差耦合作用下加强了低层异常上升运动,较实况强的垂直上升运动导致预报降水率的增大,从而使模式预报降水量接近极端值的概率增大,降水增幅与偏强的动力作用具有一定关系。而OTHERS组成员在模式偏强北风的背景下,辐合区快速南压至海上,使得落区偏移的同时,降水的累积量也不足。

(超)低空急流有显著的日变化,通常在夜间增强,早晨达到最大值,使得华南沿海季风降水有夜间多发的特点(Du, et al, 2014)。ERA5再分析场(图 10a、d)显示,(超)低空急流均有夜间增强的特征,陆上增速中心位于粤东,海上急流加速轴位于海南岛东部海面上。925 hPa上,海陆的超低空急流加速中心之间由顺畅的增强西南风场相连,意味着上游风速的日变化增大对下游的风速增大具有一定作用;但下游的急流增速比上游更大,在沿岸出现了加速度辐散区,以850 hPa层最明显,这意味着陆地的急流强度变化不完全是由日变化造成的。

从天气系统的分布配置可见,低空急流与低涡

在陆地连接,低空急流的大风速区是低涡环流的一部分,暖湿气流的动力辐合增强低涡强度,而低涡自身发展又促进了低空急流的加速。在对应位置上,天气系统之间正反馈作用使两者共同发展。这种作用在850 hPa上更显著,925 hPa的急流在边界层的摩擦作用下,加速度有所减小,辐合相对较弱。

CMA-TRAMS(EPS)两组成员对夜间低空急流风速变化预报的差异较大,导致模式降水的强度和分布出现差异。GOOD组西南急流的加速中心与实况接近,急流增长强度(尤其是南风分量)略偏强(图 10b、e),体现了CMA-TRAMS在华南地区常存在的系统性偏强特征(Zhong, et al, 2015)。一般而言,环境风偏强使对流系统移动加快,但是本组成员中南北风的增速对比强烈,并且加速区呈东南—西北向配置,有利于低涡旋转和辐合加强。相比之下,OTHERS组的低空急流风速增长虽也较大,但以偏西分量为主,偏南分量增幅较小,大风速轴东移至粤东沿海,陆上的急流增速中心强度显著偏弱,风场辐合强度偏弱,由于急流增长的动力作用导致垂直上升运动增量较小(图 10c、f)。

低空急流的强度和辐合程度既受自身日变化的影响,还因增强的低涡环流反馈而小范围加速,而低空急流的动力辐合作用促进低涡的发展。模式只有能够较好捕捉到两系统位置及强度的耦合关系(如GOOD组),才能较好地预报降水落区及强度。

5.3 中尺度特征的可预报性分析

多数极端降水事件都伴有后向传播、“列车效应”等中尺度对流组织化特征(徐珺等, 2018; 曾智琳等, 2020; 盛杰等, 2020)。在本次极端降水过程中,中尺度辐合线在珠江三角洲东北部的长期维持、强降水单体沿中尺度辐合线后向传播是导致极端降水发生的关键中尺度特征。中尺度辐合线的维持依赖两方面条件:(1)辐合线南侧暖区的维持利于水平温度梯度增大。从22日02时地面温度场(图 11a)可见,粤东和粤北的平均温度仅为24—25℃,而珠江口西侧沿海及粤西地区的温度超过29℃,珠海至阳江一带的暖中心温度略高于海面温度,23°N附近形成一条接近与纬向平行的温度锋线。(2)地面冷池的形成及其与暖气团的对峙促使中尺度锋生。降水发生后,珠江三角洲中部地区的冷舌

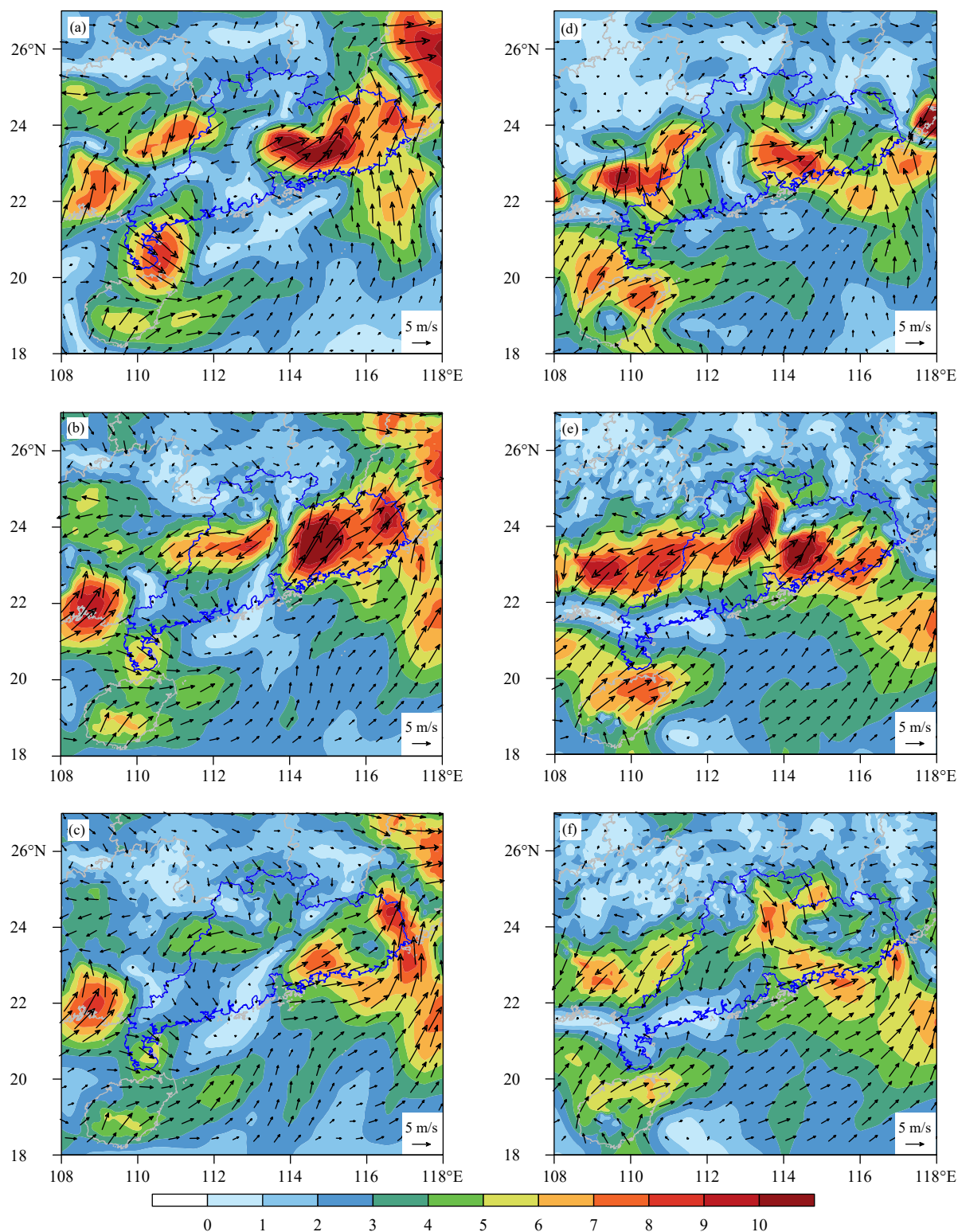


图 10 不同情景下 (a, d. ERA5, b, e. GOOD, c, f. OTHERS) 2020 年 5 月 22 日 02 时和 21 日 20 时风速差 (a, b, c. 850 hPa, d, e, f. 925 hPa; 单位: m/s)

Fig. 10 Wind variations (a, b, c. 850 hPa; d, e, f. 925 hPa; unit: m/s) for 02: 00 BT 22 and 20: 00 BT 21 May 2020 in different conditions (a, d. ERA5; b, e. GOOD; c, f. OTHERS)

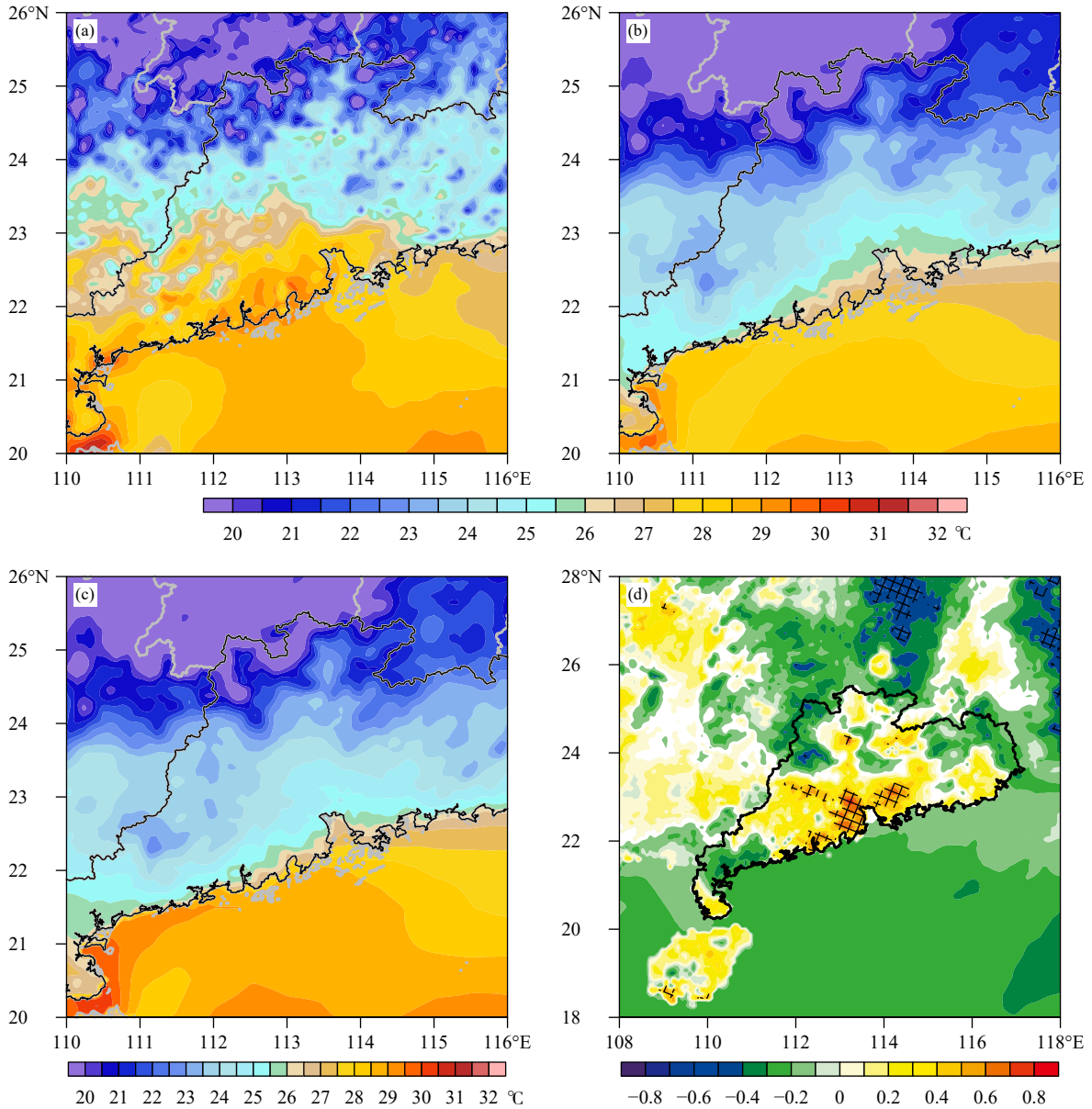


图 11 2020 年 5 月 22 日 02 时 (a) 地面温度场、(b) GOOD 组温度场、(c) OTHERS 组温度场和 (d) 降水对地面温度的敏感度

Fig. 11 Surface temperature from (a) observations, (b) GOOD group, (c) OTHERS group and (d) precipitation sensitivity to surface temperature at 02: 00 BT 22 May 2020

伸向暖中心。22 日 03 时广州市珠江街和东莞市沿江东路形成冷池, 两站与西南或偏南方向站点的水平温度梯度为 0.23—0.76°C/km。其中东莞市沿江东路与官桥滘村局地的强温度梯度(0.76°C/km)超过 2018 年华南超历史极值降水事件中冷池强度(温度梯度为 0.33—0.35°C/km, 曾智琳等, 2020)的 2 倍。冷、暖气团的激烈对峙, 有利于锋区新生和对流后向传播。

集合敏感性分析结果表明, CMA-TRAMS(EPS) 的降水对珠江口两岸的气温预报有较高的敏感度(图 11d), 气温越高, 越有利于降水增幅, 体现了模式降水预报对热力作用的响应。CMA-TRAMS(EPS) 所有成员均预测粤西冷空气南下速度偏快(图 9d、e), 导致暖脊范围较实况明显偏小, 强度偏弱。虽然相比于 OTHERS 组, GOOD 组预测珠江口两岸的气温更高, 热力条件更有利, 但是仍大幅度低于

实况(图11b、c)。从海面向陆地伸展的暖舌不仅输送水汽和能量,而且增强了中尺度锋区的斜压性,对中尺度天气系统的维持和降水的增强均有重要作用。而各成员对珠江口两岸气温预报的冷偏差一定程度上导致了该集合预报系统对于极端降水效率的低估。

21日入夜后粤北以平流降温为主,强降水区的降温幅度显著高于冷平流造成的降温幅度(图12a),形成一片孤立于天气尺度锋区的对流冷池。大气中的水滴蒸发吸热过程是对流冷池形成的主要机制,高空干冷空气夹卷有助于加速该热力过程。冷池致使地面高压形成,其风场具有多向扩散特征,南部和偏西南部均为偏北风,而同一时刻,珠江口

西部暖区受两支边界层急流主导,存在西南风和东南风的辐合,因此在冷池的西侧与南侧,与暖区的暖湿平流形成风向辐合,辐合强度较强(图12b),对对流的触发和向后传播起关键作用。

CMA-TRAMS(EPS)在反馈强降水带来的冷池特征方面仍存在较大不足。从GOOD组成员的温度场与风场配置(图12c)可见,模式模拟的暖脊和冷区主要为环境冷、暖平流的产物,低涡中心负变温幅度小,风场也未见中尺度辐合线特征。弱变温可能是由于冷平流而非中尺度动力效应造成的。集合敏感度分析(图11d)显示,降水对珠江三角洲北侧的气温有一定的负敏感度,但未能通过显著性 t 检验,意味着大部分成员预报的降水与负变

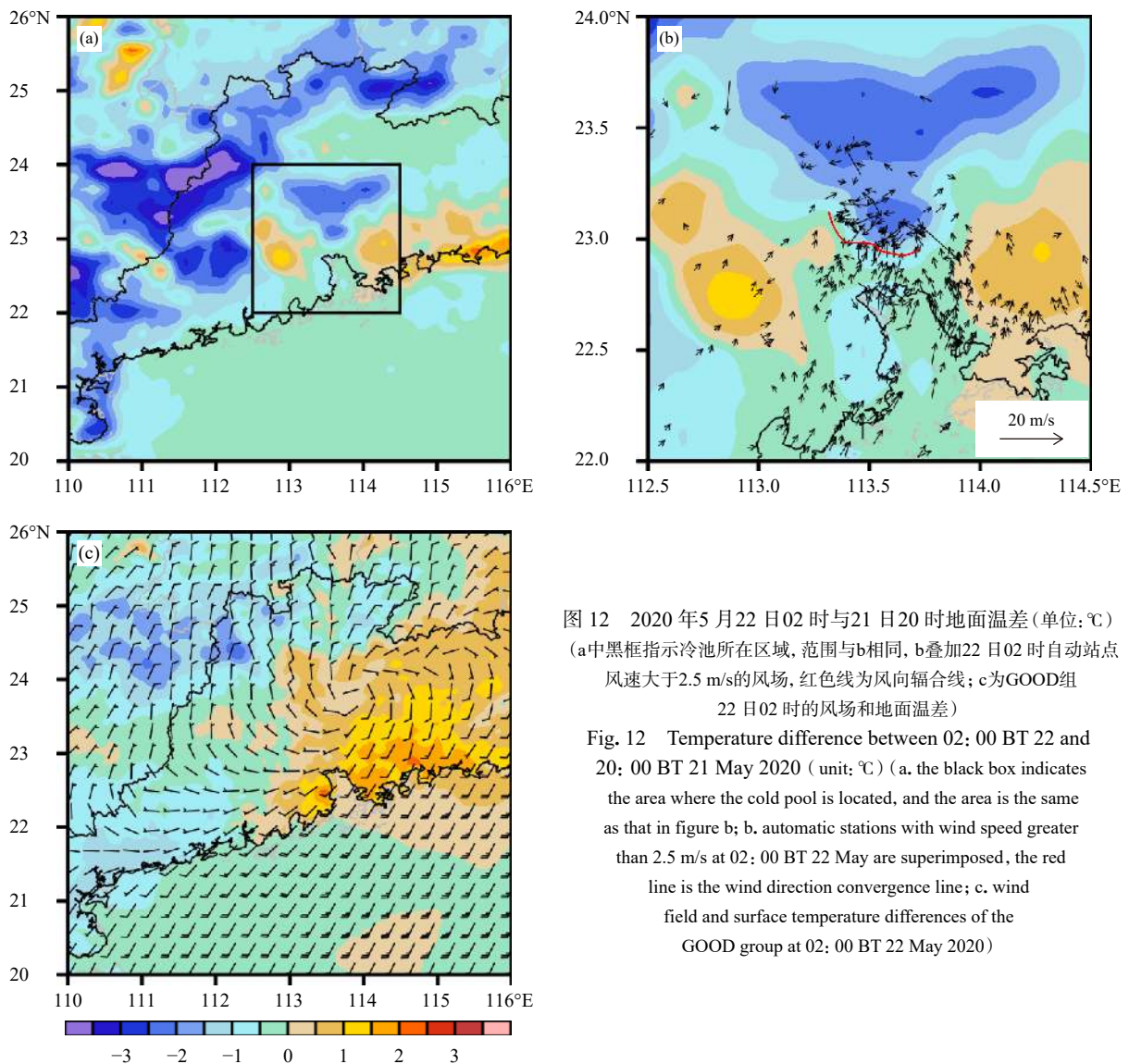


图12 2020年5月22日02时与21日20时地面温差(单位:℃)
(a)中黑框指示冷池所在区域,范围与b相同,b叠加22日02时自动站点
风速大于2.5 m/s的风场,红色线为风向辐合线;c为GOOD组
22日02时的风场和地面温差)

Fig. 12 Temperature difference between 02: 00 BT 22 and
20: 00 BT 21 May 2020 (unit: °C) (a. the black box indicates
the area where the cold pool is located, and the area is the same
as that in figure b; b. automatic stations with wind speed greater
than 2.5 m/s at 02: 00 BT 22 May are superimposed, the red
line is the wind direction convergence line; c. wind
field and surface temperature differences of the
GOOD group at 02: 00 BT 22 May 2020)

温并不高度相关,反映模式模拟对流系统组织性和中尺度传播动力机制仍有不足,限制了CMA-TRAMS(EPS)模式对极端降水的可预报能力。

6 结论和讨论

本研究着眼于集合预报在极端天气过程中的应用,利用集合敏感性分析和集合组间分析方法对热带中尺度集合预报系统(CMA-TRAMS(EPS))在2020年5月22日珠江三角洲地区一次极端降水天气过程中的可预报性进行研究。这次过程发生在华南前汛期季风爆发的背景下,西南涡向东南方向移至珠江三角洲地区,与夜间增强的低空急流耦合产生了一次极端强降水天气。降水过程具有降水效率极端性强、累计雨量较大,造成人员伤亡及经济损失严重的特点。

CMA-TRAMS(EPS)部分成员临近时刻起报的12 h降水强度和落区预报结果与实况较为接近,对此次极端降水具有一定的预报能力。集合敏感性分析表明,低涡和低空急流的发展是模式降水的关键系统。本次降水与低层温度和湿度也存在一定的相关。

基于以上的认识,着眼于CMA-TRAMS(EPS)在天气尺度系统(低涡和低空急流)和中尺度系统(地面中尺度辐合线、暖脊和冷池)的可预报性能进行深入讨论。基于对比研究价值考虑,根据主观对比和定量检验结果,选出“好成员(GOOD)”组,其余成员均归入“OTHERS”组。其中,GOOD组对本次过程降水的强度及空间位置的预报结果与实况更接近,但极端性方面仍有欠缺。该组成员较好的预报能力来自于对低涡和(超)低空急流的演变特征,以及两者强度和位置耦合的有效预测。集合敏感性分析结果表明南风动量汇入有利于低涡的缓慢移动和增强。利用组间差异分析方法进一步探讨可知,GOOD组预报珠江三角洲东部(超)低空急流南风分量较强,不仅有利于低涡缓慢移动,并增强了气旋性辐合,致使降水持续时间长、效率高。而低涡自身发展又反过来促进急流强度的变化。GOOD组既反映出急流强度日变化状况,并较准确地刻画了增强的低涡环流反馈导致急流小范围加速的耦合特征。而OTHERS组预报的低涡和(超)低空急流的耦合位置偏东偏南,辐合强度偏弱,导

致降水强度或落区出现偏差。总而言之,当低涡和(超)低空急流的位置和强度耦合程度较高时,模式对极端天气的预报能力才会提高。

由于中尺度对流组织化的模拟能力是能否预报极端降水量的关键因素。本个例中,冷池与其西南或偏南方向上暖区之间的水平温度梯度达 $0.23\text{--}0.76\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,激烈的冷、暖气团对峙加强了中尺度锋区和对流后向传播。而CMA-TRAMS(EPS)对珠江口西侧的暖脊强度预报偏弱,并且反映的冷区主要为温度平流的产物,大部分成员的降水对负变温并未能形成高相关,CMA-TRAMS(EPS)两组成员在预报中尺度系统的组织性和传播特征方面均存在明显不足,从而影响集合预报系统对极端降水的预报能力。

提高分辨率可以增强模式对中尺度系统的预报能力,以分辨率达到3 km的中国气象局广东快速更新同化数值预报系统(CMA-GD)为例,在临近时刻,模式地面要素预报较好地反映了与强降水区匹配的冷池、地面辐合线和中尺度低涡等系统的演变特征,该模式预报降水效率也较高,达到 $140\text{ mm}/(3\text{ h})$ 。未来的工作将考虑采用更高分辨率的集合预报系统来分析此次强降水过程的中小尺度天气系统的可预报性。此外,文中仅针对单个极端降水过程做了集合敏感性及成员对比分析,而面向不同的天气流型配置,CMA-TRAMS(EPS)的分析结果可能出现较大差异,为了得到更普适的结果,仍需对更多的个例进行分析。

参考文献

- 陈超辉,王勇,杜钧等. 2020. 欧洲业务集合预报系统进展. *气象科技进展*, 10(2): 19-29. Chen C H, Wang Y, Du J, et al. 2020. Overview of the European operational ensemble prediction systems. *Adv Meteor Sci Technol*, 10(2): 19-29 (in Chinese)
- 陈静,李晓莉. 2020. GRAPES全球/区域集合预报系统10年发展回顾及展望. *气象科技进展*, 10(2): 9-18. Chen J, Li X L. 2020. The review of 10 years development of the GRAPES global/regional ensemble prediction. *Adv Meteor Sci Technol*, 10(2): 9-18 (in Chinese)
- 陈涛,孙军,谌芸等. 2019. 广州“5-7”局地突发特大暴雨过程的数值可预报性分析. *气象*, 45(9): 1199-1212. Chen T, Sun J, Chen Y, et al. 2019. Study on the numerical predictivity of localized severe mesoscale rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017. *Meteor Mon*, 45(9): 1199-1212 (in Chinese)
- 陈伟斌,翟舒楠,韩慎友. 2019. 基于集合敏感性方法的台风“山竹”暴雨预

- 报分析. 中国农学通报, 35(18): 85-94. Chen W B, Zhai S N, Han S Y. 2019. Typhoon Mangkhut (1822): A forecast analysis of rainstorm based on ensemble sensitivity method. *Chinese Agric Sci Bull*, 35(18): 85-94 (in Chinese)
- 陈子通, 徐道生, 戴光丰等. 2020. 热带高分辨率模式(TRAMS-V3.0)技术方案及其系统预报性能. *热带气象学报*, 36(4): 444-454. Chen Z T, Xu D S, Dai G F, et al. 2020. Technical scheme and operational system of tropical high-resolution model (TRAMS-V3.0). *J Trop Meteor*, 36(4): 444-454 (in Chinese)
- 代刊, 毕宝贵, 朱跃建. 2018. 2016年7月华北极端降水的中期预报误差分析. *科学通报*, 63(3): 340-355. Dai K, Bi B G, Zhu Y J. 2018. Investigation of the medium-range forecast errors for the extreme rainfall event in North China during July 19–20, 2016. *Chinese Sci Bull*, 63(3): 340-355 (in Chinese)
- 杜钧, Grumm R H, 邓国. 2014. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”: 以北京2012年7月21日特大暴雨为例. *大气科学*, 38(4): 685-699. Du J, Grumm R H, Deng G. 2014. Ensemble anomaly forecasting approach to predicting extreme weather demonstrated by extremely heavy rain event in Beijing. *Chinese J Atmos Sci*, 38(4): 685-699 (in Chinese)
- 高丽, 陈静, 郑嘉雯等. 2019. 极端天气的数值模式集合预报研究进展. *地球科学进展*, 34(7): 706-716. Gao L, Chen J, Zheng J W, et al. 2019. Progress in researches on ensemble forecasting of extreme weather based on numerical models. *Adv Earth Sci*, 34(7): 706-716 (in Chinese)
- 黄明策, 李江南, 农孟松等. 2010. 一次华南西部低涡切变特大暴雨的中尺度特征分析. *气象学报*, 68(5): 748-762. Huang M C, Li J N, Nong M S, et al. 2010. An analysis of the mesoscale features of an excessive rainfall triggered by low-vortex shear in the western part of South China. *Acta Meteor Sinica*, 68(5): 748-762 (in Chinese)
- 李建辉. 1982. 华南初夏的超低空急流及其对暴雨的影响. *气象学报*, 40(3): 319-326. Li J H. 1982. Ultra low-level jets and the heavy rain in early summer over South China. *Acta Meteor Sinica*, 40(3): 319-326 (in Chinese)
- 刘鸿波, 何明洋, 王斌等. 2014. 低空急流的研究进展与展望. *气象学报*, 72(2): 191-206. Liu H B, He M Y, Wang B, et al. 2014. Advances in low-level jet research and future prospects. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 191-206 (in Chinese)
- 闵锦忠, 吴乃庚. 2020. 近二十年来暴雨和强对流可预报性研究进展. *大气科学*, 44(5): 1039-1056. Min J Z, Wu N G. 2020. Advances in atmospheric predictability of heavy rain and severe convection. *Chinese J Atmos Sci*, 44(5): 1039-1056 (in Chinese)
- 盛杰, 郑永光, 沈新勇. 2020. 华北两类产生极端强天气的线状对流系统分布特征与环境条件. *气象学报*, 78(6): 877-898. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y. 2020. Climatology and environmental conditions of two types of quasi-linear convective systems with extremely intense weather in North China. *Acta Meteor Sinica*, 78(6): 877-898 (in Chinese)
- 苏翔, 袁慧玲. 2012. TIGGE夏季降水集合预报的初步检验//第29届中国气象学会年会论文集. 沈阳: 中国气象学会. Su X, Yuan H L. 2012. Preliminary evaluation of TIGGE ensemble predictions of summer precipitation//Proceedings of the 29th Annual Conf of Chinese Meteorological Society, Shenyang: Chinese Meteor Soc (in Chinese)
- 唐永兰, 徐桂荣, 于晓晶. 2019. 近49a中国30°N带不同地形下大城市与其郊区的降水特征. *暴雨灾害*, 38(4): 354-363. Tang Y L, Xu G R, Yu X J. 2019. Precipitation characteristics in large cities and their suburbs under different terrains in 30°N zone of China in recent 49 years. *Torrential Rain Disaster*, 38(4): 354-363 (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. *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. *Plateau Meteor*, 36(5): 1245-1256 (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. *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. *Adv Meteor Sci Technol*, 10(2): 58-64, 74 (in Chinese)
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋等. 2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性. *气象*, 44(4): 485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al. 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017. *Meteor Mon*, 44(4): 485-499 (in Chinese)
- 徐琨, 毕宝贵, 湛芸等. 2018. “5·7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析. *气象学报*, 76(4): 511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al. 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017. *Acta Meteor Sinica*, 76(4): 511-524 (in Chinese)
- 曾智琳, 湛芸, 王东海. 2020. 2018年8月华南超历史极值降水事件的观测分析与机理研究. *大气科学*, 44(4): 695-715. Zeng Z L, Chen Y, Wang D H. 2020. Observation and mechanism analysis for a record-breaking heavy rainfall event over Southern China in August 2018. *Chinese J Atmos Sci*, 44(4): 695-715 (in Chinese)
- Brown B R, Hakim G J. 2015. Sensitivity of intensifying Atlantic hurricanes to vortex structure. *Quart J Roy Meteor Soc*, 141(692): 2538-2551
- Chen Z T, Zhang C Z, Huang Y Y, et al. 2014. Track of super Typhoon Haiyan predicted by a typhoon model for the South China Sea. *J Meteor Res*, 28(4): 510-523
- Du Y, Zhang Q H, Chen Y L, et al. 2014. Numerical simulations of spatial distributions and diurnal variations of low-level jets in China during Early Summer. *J Climate*, 27(15): 5747-5767
- Du Y, Chen G X. 2018. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: Ensemble-based analysis. *Mon Wea Rev*, 146(11): 3827-3844
- Han J, Pan H L. 2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system. *Wea Forecast*, 26(4): 520-533
- Hill A J, Weiss C C, Ancell B C. 2016. Ensemble sensitivity analysis for

- mesoscale forecasts of dryline convection initiation. *Mon Wea Rev*, 144(11): 4161-4182
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon Wea Rev*, 124(10): 2322-2339
- Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J Korean Meteor Soc*, 42(2): 129-151
- Huang L, Luo Y L. 2017. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for South China during the presummer rainy season. *J Geophys Res Atmos*, 122(16): 8494-8516
- Lamberson W S, Torn R D, Bosart L F, et al. 2016. Diagnosis of the source and evolution of medium-range forecast errors for extratropical cyclone Joachim. *Wea Forecast*, 31(4): 1197-1214
- Li J, Du J, Zhang D L, et al. 2014. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over Southwest China. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(680): 766-782
- Liang P, Ding Y H. 2017. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916–2014. *Adv Atmos Sci*, 34(3): 321-334
- Limpert G L, Houston A L. 2018. Ensemble sensitivity analysis for targeted observations of supercell thunderstorms. *Mon Wea Rev*, 146(6): 1705-1721
- Matsueda M, Kyouda M, Toth Z, et al. 2011. Predictability of an atmospheric blocking event that occurred on 15 December 2005. *Mon Wea Rev*, 139(8): 2455-2470
- Medina H, Tian D, Marin F R, et al. 2019. Comparing GEFS, ECMWF, and postprocessing methods for ensemble precipitation forecasts over Brazil. *J Hydrometeorol*, 20(4): 773-790
- Quandt L A, Keller J H, Martius O, et al. 2019. Ensemble sensitivity analysis of the blocking system over Russia in summer 2010. *Mon Wea Rev*, 147(2): 657-675
- Schumacher R S. 2011. Ensemble-based analysis of factors leading to the development of a multiday warm-season heavy rain event. *Mon Wea Rev*, 139(9): 3016-3035
- Su X, Yuan H L, Zhu Y J, et al. 2014. Evaluation of TIGGE ensemble predictions of northern hemisphere summer precipitation during 2008–2012. *J Geophys Res Atmos*, 119(12): 7292-7310
- Torn R D, Hakim G J. 2008. Ensemble-based sensitivity analysis. *Mon Wea Rev*, 136(2): 663-677
- Torn R D, Hakim G J. 2009. Initial condition sensitivity of Western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis. *Mon Wea Rev*, 137(10): 3388-3406
- Torn R D. 2010. Ensemble-based sensitivity analysis applied to African easterly waves. *Wea Forecast*, 25(1): 61-78
- Wu M W, Luo Y L, Chen F, et al. 2019. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China. *J Appl Meteor Climatol*, 58(8): 1799-1819
- 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 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. *Tellus A*, 68(1): 31045
- Zhang X B. 2018a. A GRAPES-based mesoscale ensemble prediction system for tropical cyclone forecasting: Configuration and performance. *Quart J Roy Meteor Soc*, 144(711): 478-498
- Zhang X B. 2018b. Application of a convection-permitting ensemble prediction system to quantitative precipitation forecasts over Southern China: Preliminary results during SCMREX. *Quart J Roy Meteor Soc*, 144(717): 2842-2862
- Zhong S X, Chen Z T. 2015. Improved wind and precipitation forecasts over South China using a modified orographic drag parameterization scheme. *J Meteor Res*, 29(1): 132-143