

钱维宏,陈绿文,栗晗.中期模式扰动量在广州-东莞极端暴雨中的解释应用[J].气象研究与应用,2020,41(2):07-13.

Qian weihong, Chen Lyuwen, Li Han. Interpretation and application of the anomalous parameters predicted by medium-range numerical weather forecast model in the Guangzhou-Dongguan extremely heavy rain event [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(2): 07-13.

中期模式扰动量在广州-东莞极端暴雨中的解释应用

钱维宏^{1,2*}, 陈绿文², 栗 晗³

(1.北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100081; 2.中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080;

3.河南省气象台, 郑州 450003)

摘要: 2020 年 5 月 22 日凌晨, 在珠三角地区发生了罕见的先有高闪电密度和随后具有“短时雨强强、累积雨量”特征的局地特大暴雨, 单站 5min 雨强达到 37.3 mm。考虑极端暴雨发生的扰动涡度动力条件和扰动湿度水汽条件, 跟踪了欧洲中期天气预报中心模式分析的和提前预报的 850hPa 扰动气流辐合线和其上的扰动湿度分布。结果表明, 该中心的模式可以提前 4—5d 预报出扰动辐合线位置, 而扰动湿度中心与暴雨位置有偏离。中期模式产品解释应用的前景是, 扰动气流辐合线和其上的扰动物理量特征可为临近强对流天气的监测提供信息。

关键词: 中期模式产品; 解释应用; 扰动气流; 极端暴雨; 闪电密度

中图分类号: P456

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2020.2.02

OSID:



引言

南海夏季风爆发后, 我国华南就进入到了一年一度的雨季。风调雨顺的季风降水是华南生态年循环所需要的, 但雨季中特别集中的局地短时特大暴雨则对生态、人民的生命和财产安全有危害的。2020 年 5 月 21 日至 22 日凌晨, 广州东南部到东莞北部发生了一场局地特大暴雨, 对社会经济造成了巨大损害。本文在分析此场局地特大暴雨的时空分布特征基础上, 比较传统天气图与扰动天气图^[1-2]上有利于特大暴雨发生的天气形势, 再从中期模式产品中寻找有利于扰动环境预报的信号, 最后给出对该例暴雨的认识。

1 特大暴雨的时空分布

通常, 24h 降水量为 50mm 或以上的强降雨称为“暴雨”。但是, 在季风区的夏季降水中, 50mm 的降水可能会集中发生在几个小时, 甚至几分钟内。本次暴雨过程刷新了广东省“龙舟水”期间(5 月 21 日—6 月 20 日) 1h 和 3h 的降水强度纪录: 5 月 22

日 03 时, 广州黄埔区发生了 1h 最大降水量 167.8mm; 22 日 00 时 30 分至 03 时 30 分, 东莞东城发生了最大 3h 降雨量 351mm。

上述两地之间的距离并不远, 但降水恰有时间和空间上的差异。图 1 给出了广州黄埔大桥站和东莞东城育华路站在 2020 年 5 月 22 日凌晨 00 时 00 分至 04 时 00 分期间每 5min 的降水量。黄埔大桥站的峰值降水出现在 02 时 45 分至 03 时 10 分, 25min 累积降水量 137.5mm, 期间出现了 3 个 5min 降水超过 30mm 的峰值, 最大的峰值出现在 03 时 5 分至 10 分, 达 37.3mm。东城育华路站的降水从 00 时 30 分左右开始增强, 5min 降水量最大值出现在 02 时 40 分至 45 分, 达 21.5mm。总体上看, 黄埔大桥站的强降水更为集中和剧烈, 在 02 时 00 分至 03 时 00 分的 1h 累积降水量达到了 167.8mm。东城育华路站的强降水持续时间则更长, 在 00 时 30 分至 03 时 30 分的 3h 累积降水量达到了 351mm。可见, 对不同的观测站和不同的时段, 降水强度是不一样的。每 5min 的降水量可能受局地对流过程的影响较大, 因此对其进行预报是困难的, 但 1h 平均的降水量可能

收稿日期: 2020-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(41775067)、广东省自然科学基金(2018A030313969)、广东省气象局科技项目(GRMC2017M01)

作者简介: 钱维宏(1957-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 季风、海气相互作用。E-mail: qianwh@pku.edu.cn

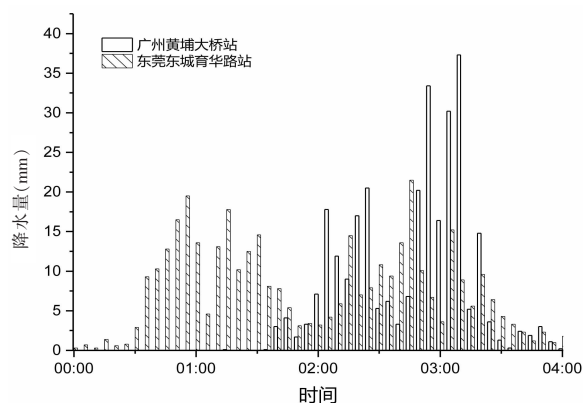


图1 2020年5月22日00时00分—04时00分黄埔大桥和东城育华路两个自动气象站每5min降水量

主要与大气中可分辨的扰动环流系统有关,我们希望对后者有所认识。

每个小时的降水中心位置是有规律地移动的。图2给出了5月21日23时至22日04时的逐小时降水量的空间分布(图中用十字符号示出广州黄埔

大桥和东莞东城育华路两个自动气象站的位置,下同)。在21日23时前一个小时内,50mm的降水主要发生在广州市的北部至惠州的西北部(图2a)。在21日的最后1h内(图2b),从广东省东部的汕尾到西部的肇庆均出现了降水团,总体降水呈东西带状,中部地区最大的降水中心则已经南移到广州的东部至惠州的西部一带。在22日01—02时(图2c—d),降水中心继续南移到广州的东南部与东莞北部交界处,降水强度也进一步增加,局部地区1h降水量开始达到了100mm以上,系统的南移速度减缓,并开始向西北偏西方向延展。22日03时(图2e)降水达到最强,范围也达到了最大,强降水中心位置在广州的中东部至东莞的北部。22日04时(图2f),降水中心南下到了东莞中部,同时向西延伸进入佛山,强度逐渐减小。6h中,强降水中心经历了由广州东北部向南移动,到与东莞交界处转弯向西进入佛山的路径,最大降水发生在转弯的4个小时内。

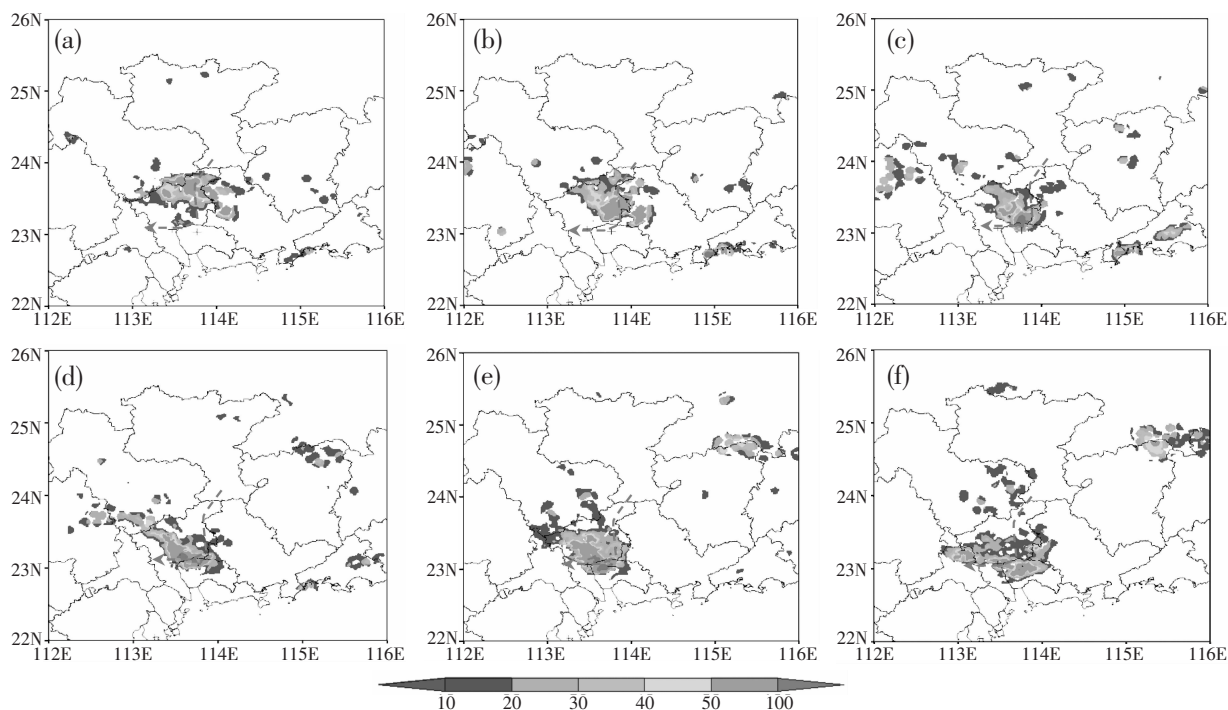


图2 2020年5月21日23时—22日04时逐小时降水量分布

a—f 分别为5月21日23:00至22日04时的小时降水量;阴影,10mm、50mm间隔,红虚线箭头指示强降水中心随时间的移动方向

从图1和图2看出,造成广州—东莞暴雨灾害的极端降水集中在22日凌晨的前4个小时中。图3给出了2020年5月22日00:00至04:00累积降水量的空间分布。大于50mm的降水站分布于平行华南海岸线的降水带之上,其中最大的200~300mm降

水中心在广州南部—东莞之间,广州黄埔大桥站和东莞东城育华路站位于降水中心上。数百公里长的暴雨带和数十公里范围的局地强降水是我们需要分析和预报的对象。

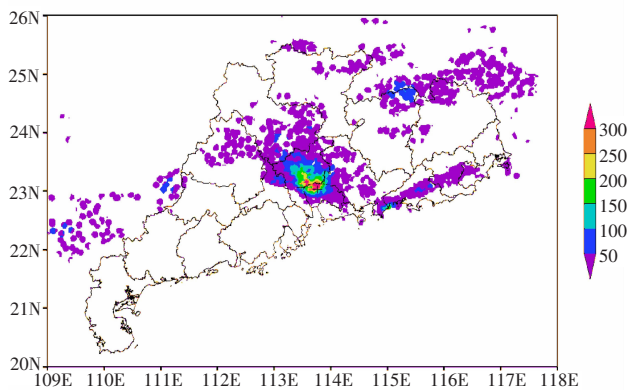


图3 2020年5月22日00时至04时累积降水量分布
阴影, 50mm 间隔

广州黄埔大桥站和东莞东城育华路站出现如此强烈的降水与大气中的对流活动有关。当对流活动旺盛的时候, 对流云的高度会很高, 大气温度 0°C 层以上的大量冰相粒子通过碰撞、温差等起电机, 可形成不同极性的电荷区并导致放电现象, 即闪电。图4给出了5月21日23时至22日04时粤港澳闪电定位系统^[3]探测到的逐小时总闪电回击(在本文中特指地闪回击次数与云闪强脉冲放电次数之和)密度分布情况。在5月21日23时前的1h, 最大的闪电中心位于惠州的西部, 另外在广州东北部、汕尾

西南沿海地区以及江门北部也存在分散的闪电活动(图4a)。随后1h中, 惠州西部以及汕尾西南沿海地区的闪电活动明显增强(图4b), 1h闪电回击密度最大值甚至超过了 $100 \text{次} \cdot (\text{km}^2)^{-1}$, 如此剧烈的闪电活动是非常罕见的。22日01时(图4c), 广州东部和惠州西部的闪电中心融合成为一个整体, 并南移进入东莞北部, 闪电密度高值区进一步增大, 同时汕尾西南沿海地区的闪电密度中心在原地增大。22日02时(图4d), 广州-东莞闪电密度中心发展到最大, 1h闪电回击密度超过 $100 \text{次} \cdot (\text{km}^2)^{-1}$ 的区域进一步扩大。22日03时(图4e), 广州区域内的闪电活动迅速减弱和消散, 而东莞区域内仍然维持一定强度的闪电活动。22日04时(图4f), 西移进入佛山的降水云团产生了新的闪电活动, 广州东部-东莞一带的闪电活动继续减弱。

总体上, 闪电活动与地面降水的位置和移动趋向是相对应的, 但是闪电密度最大的时间出现在22日01-02时, 比最强的降水时间早了约1h。另外, 广州黄埔大桥站出现最强的5min降水的时候(22日3点左右), 其上的闪电活动却是处于减弱和消散的阶段。

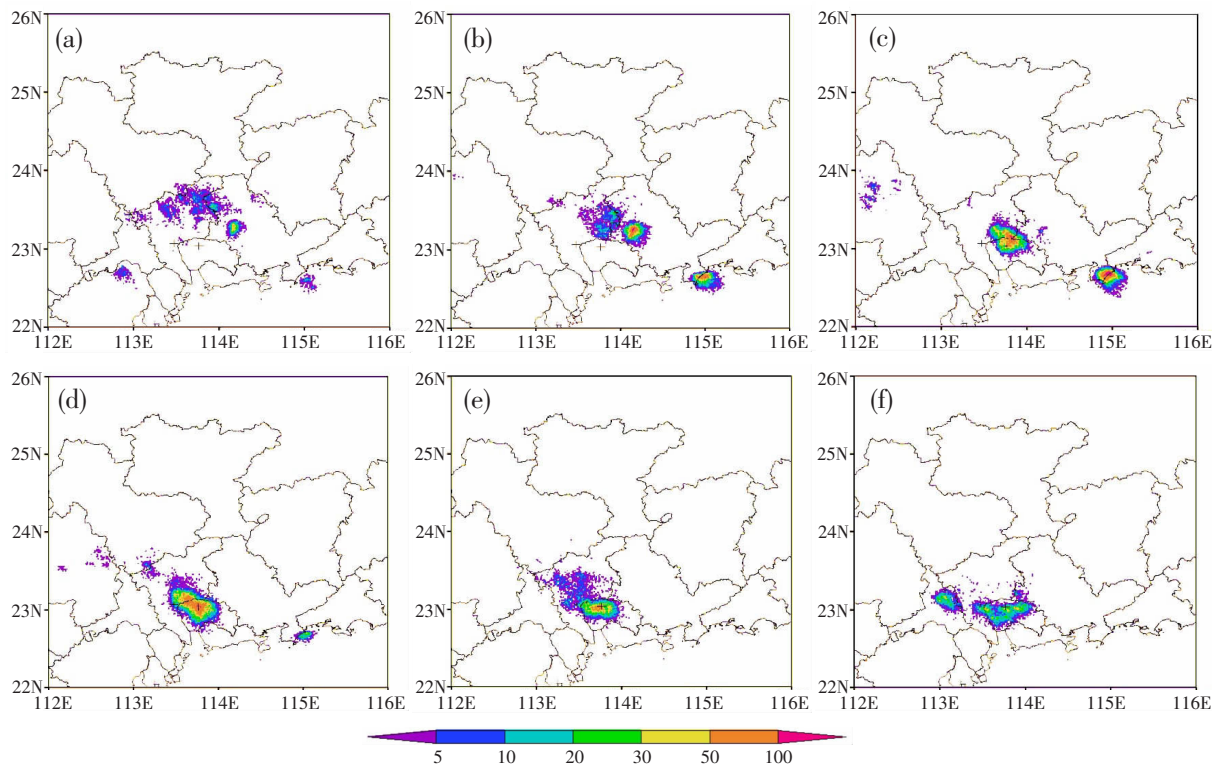


图4 2020年5月21日23时—22日04时逐小时闪电回击密度分布

a-f 分别为5月21日23时至22日04时逐小时闪电回击密度; 阴影, $5, 10, 20, 50 \text{次} \cdot (\text{km}^2)^{-1}$ 间隔

2 两种天气图的比较

广东处于华南沿海地区,夏季风爆发之后,低层大气潮湿,降水的发生主要取决于对流层低层的动力学条件。在日常的降水预报中,传统天气图是被广泛使用的工具。在中央气象台绘制的 850hPa 天气图上(图 5),广东是在比湿达到 $12\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的有利于降水的潮湿区域中。2020 年 5 月 21 日 20 时(图 5a),一个气旋中心位于福建的西部,一条东西方向的风

切变线位于广东的北部,切变线北侧的风速小于南侧。12h 后的 22 日 08 时 850hPa 天气图上,气旋中心应该还在福建的西部,气旋西侧的槽线向西南延伸到了海南岛上(图 5b)。槽线西侧的西北风与东侧的西南风都达到了 $16\sim 20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,广东沿海地区位于比湿达到 $12\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的有利降水区域中。21 日晚上的东西方向切变线,到 22 日早上还存在于广东的北部。在东亚东北部的环流形势是,一个北方气旋位于我国东北,朝鲜半岛上有一个高压。

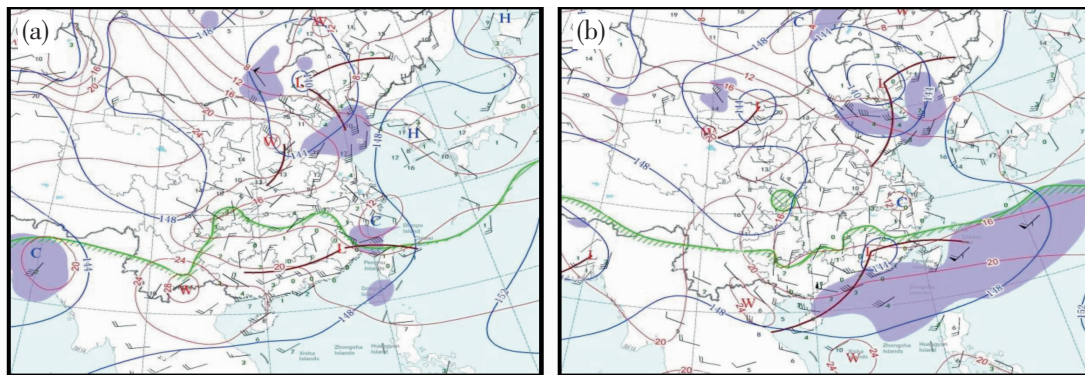


图 5 2020 年 5 月 21 日 20 时(a)和 22 日 08 时(b)850hPa 层的风向风速和温度露点差(数字),位势高度(蓝线, $4\times 10\text{gpm}$ 间隔),温度(红线, 4°C 间隔),字母 H/L 指示高/低压中心,字母 W/C 指示暖/冷中心,棕色实(虚)线段是槽线或切变线,紫色填充区为风速达 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区域,绿色线条栅格化一侧为比湿达到 $12\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域

5 月 20 日是南海季风爆发的日子。从该日起南海 850hPa 层上气候风场发生了季节性的突变,由气候东风转成了气候西风^[4]。图 5 中的风速包含了瞬变气候和扰动分量两个部分。当从实况的观测风场中去掉瞬变气候部分,留下的是 850hPa 上的扰动风(图 6)。图 6a 中有三个气旋:孟加拉国有一个热带气旋扰动,它从孟加拉湾形成后登陆并造成了灾害;中国东北有一个北方气旋扰动,其周围有多条扰动风切变线,对应扰动湿位涡分布中的正异常带;福建

西部有一个副热带气旋扰动,在其东西两侧各有一条扰动风的切变线,西侧的扰动气流辐合线经过广东的北部,其上有多个小的扰动湿位涡中心,对应为有利于降水的动力扰动和水汽扰动条件。12h 后的 22 日 08 时(图 6b),孟加拉的热带气旋有所减弱,东北气旋加深稍向东南移动,位于福建的气旋位置并没有明显的移动。在 21–22 日夜间,明显变化的是福建气旋东西两侧的扰动气流辐合线的位置和强度。福建气旋西侧扰动气流辐合线的位置并没有入

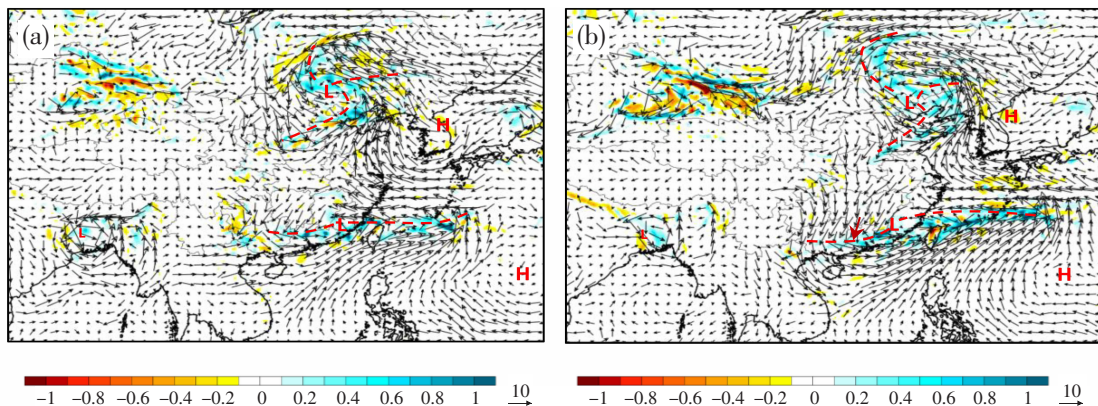


图 6 ECMWF 模式初始场分析的 2020 年 5 月 21 日 20 时(a)和 22 日 08 时(b)850hPa 层的风扰动(箭头, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和扰动湿湿度(阴影, $0.1\times 10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$ 间隔),红虚线是扰动气流辐合线,字母 L/H 为气旋/反气旋环流的中心,红箭头是指向广州的北风

海,而是刚刚南移到海岸线上。扰动气流辐合线北侧东北风与南侧西南风在强度和方向上的对峙加强了。这个过程表明,广东的中南部地区在过去的 12h 中有强烈的对流性系统发展。扰动湿位涡是用来描述强降水的^[5]。21 日 20 时至 22 日 08 时的扰动湿涡度分布带的位置与图 3 所示凌晨 4h 内的暴雨带位置是一致的。广州附近及其以东地区也确实有正的扰动湿涡度中心。22 日的白天,随着气旋扰动中心东移到台湾岛以东,这条扰动气流辐合线和其上的扰动湿涡度带也入南海了。

3 模式预报产品中的扰动环境

欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 模式 21 日 08 时起报的 48h 内的大于 100mm 累积降水中心位

置比实况偏东了约 200km(图略)。该模式在短期内降水预报的强度偏弱和中心位置偏东偏北的现象已有分析,但该模式对扰动系统的预报能力可以达到平均 6.7d^[6]。于是,我们考察 ECMWF 模式从不同时刻起报到 2020 年 5 月 22 日 02 时的 850hPa 扰动风场和扰动湿涡度分布(图 7)。图 7a 是提前 18h 的预报,即从 5 月 21 日 08 时起报的结果,它应该是预报的图 6 中两个时刻的中间结果。北方的气旋扰动中心已经移到辽宁的西部,周围有三条扰动气流辐合线,对应有异常的天气。我们关注的是位于广东与福建交界处扰动涡旋向西延伸的扰动气流辐合线。它的位置正好压在广州上空,与扰动湿涡度带一致,但是一个扰动湿涡度中心偏在广州以东近百公里处。

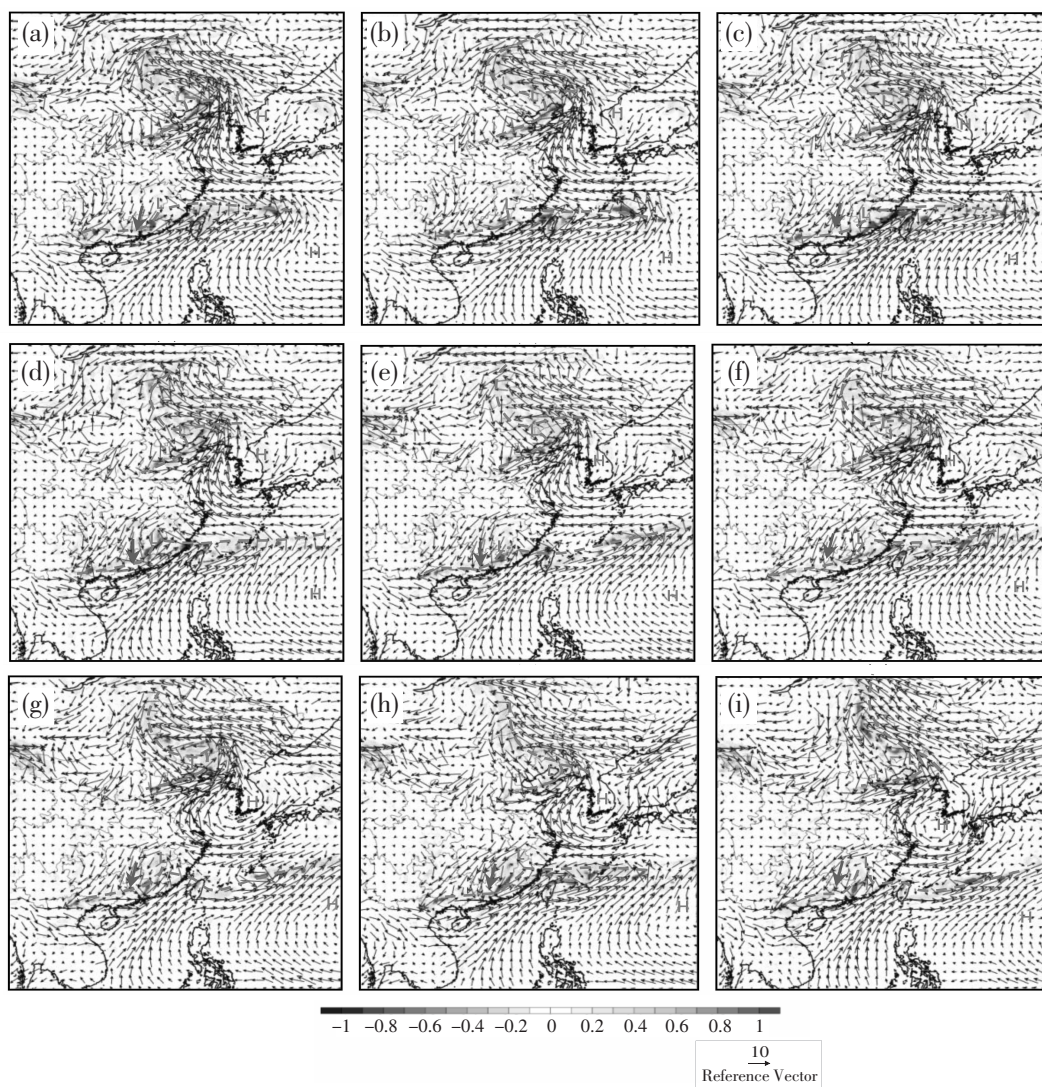


图 7 ECMWF 模式提前(a)18h,(b)30h,(c)42h,(d)54h,(e)66h,(f)78h,(g)90h,(h)102h,(i)114h 预报的 2020 年 5 月 22 日 02 时 850hPa 层的扰动风(箭头,m/s)和扰动湿位涡(阴影, $0.1 \times 10^{-6} \cdot s^{-1}$),标注符号同图 6

图 7b-i 是提前 30h 至提前 114h 预报的 22 日 02 时 850hPa 扰动风场和扰动湿涡度分布。ECMWF 模式提前 4-5d 预报的 850hPa 扰动气流辐合线和扰动湿涡度位置都经过广州的上空,其中可分辨的一个扰动湿涡度中心偏在广州的东北侧。但是,偏北扰动气流的中间位置矢量直指广州。ECMWF 模式在 850hPa 层的空间分辨率是 0.75 经纬度,格点之间的距离是大约 80km。扰动湿涡度是同时考虑了正的扰动涡度和扰动湿度的共同作用对可能发生降水的贡献,即同时考虑了动力和湿度两个条件^[6]。这样的空间分辨率计算出的扰动涡度会有近百公里的偏差。所以,为克服这个不足,模式的空间分辨率需要达到 10km 左右。此外,ECMWF 模式在提前 126h 后的预报中,扰动涡旋的中心位置和扰动气流辐合线的位置与实况偏差就逐渐放大了。ECMWF 模式与所有的原始方程组模式一样,都存在长期数值积分后的气候漂移^[7]。

4 结论与讨论

针对 2020 年 5 月 21 日至 22 日夜间广州东南部到东莞北部发生的局地特大暴雨,分析了暴雨发生的时空变化特征、传统天气图和扰动天气图上的暴雨系统及 ECMWF 模式对扰动环流系统与扰动物理量的预报能力。对这次南方特大暴雨过程的分析,传统天气图和扰动天气图的对比可以帮助预报员在实践中迅速分辨有利于强对流性天气发生的位置和时间。

暴雨中心从 21 日 20 时开始由韶关向南移动,22 时后进入广州市。22 日凌晨 02-03 时,暴雨中心到达广州与东莞的交界处,并相对稳定了 2-3h。此时广州中东部至东莞北部遭遇了猛烈的降水,其中广州黄埔大桥站 5min 降水量最大值达到 37.3mm,1h 累积降水量达到了 167.8mm,东莞东城育华路站 3h 累积降水量达到 351mm。本次暴雨过程中最强降水时段之前连续 1-2h 都出现了罕见的强闪电活动,说明该降水系统中持续存在着极强的上升气流。但是广州黄埔大桥站出现最强 5min 降水的时候,其上空的闪电活动反而是减弱和消散的。闪电活动的突然减弱,反映了雷暴云中的强上升气流维系机制的崩溃,其间大量的高空强降水粒子迅速向地面倾泻,这可能是造成本次广州黄埔大桥站极端短时强降水的主要原因。单站降水具有很大的突变性,对于单站极端降水预警和预报,目前尚无可靠的定量方

法。闪电活动一定程度反映了对流云不同位置上升气流以及电荷分离和放电现象,闪电频发中心可以用于预示未来 1-2h 后的强降水出现位置,闪电的频数探测可以用于强降水的临近预报。

华南极端降水多出现在扰动天气图上 850hPa 风场的辐合线上,其中风速的不均匀分布会产生局地扰动系统,对应局地极端降水。从站点观测资料到客观分析在不同的网格点上,这一过程会影响到扰动系统的准确定位。传统天气图中的基本大气变量包含有瞬变气候,而瞬变气候的物理本质是太阳高度角辐射强迫与下垫面特征达到动力学和热力学平衡时的大气状态,可以反映气候降水,而不是极端降水。实况降水应该是气候降水与扰动系统降水的叠加。扰动天气图上的形态对比特征,如扰动辐合线两侧扰动风的对峙特征,会加深预报员对扰动系统发生位置和强度的直观判断,也就是对极端降水发生位置的判断。

进入 5 月份后期的华南极端暴雨多与 850hPa 及其以下大气边界层的扰动风辐合线和其上的扰动系统有关。扰动辐合线上的扰动系统作为极端降水产生的动力学条件,可以用扰动涡度表示,而要产生极端降水的水汽条件可以用扰动比湿表示。局地强降水必须同时满足扰动涡度和扰动水汽的叠加条件,于是定义的扰动湿涡度可以用来定位极端暴雨。虽然 ECMWF 模式能够提前 4-5d 较好地预报出华南扰动辐合线的位置,但其上的扰动系统的位置描述会出现偏差,未来的改进途径需要提高模式的分辨率和观测资料的分辨率。当然,对 ECMWF 模式产品中扰动辐合线之中—短期预报时效解读,可以为雷达、闪电定位提供加密观测的信息,形成嵌套式的预警—预报流程。

参考文献:

- [1] 钱维宏,蒋宁,杜钧.中国东部 7 类暴雨异常环流型[J].气象,2016,42(6):674-685.
- [2] 钱维宏,梁卓轩,金荣花,等.扰动变量在强对流天气分析和模式评估中的应用—以苏北里下河地区引发龙卷的扰动系统为例[J].气象,2017,43(2):166-180.
- [3] 陈绿文,吕伟涛,张义军,等.粤港澳闪电定位系统对高建筑物雷电的探测[J].应用气象学报,2020,31(2):165-174.
- [4] Qian Weihong, Yang Song. Onset of the regional monsoon over Southeast Asia [J]. Meteorol. Atmos. Phys., 2000, 75: 29-38.

- [5] Qian Weihong, Jiang Ning, Du Jun. Anomaly-based weather analysis versus traditional total-field-based weather analysis for depicting regional heavy rain events [J]. Weather and Forecasting, 2016, 31(1):71-93.
- [6] Qian Weihong, Li Jin, Shan Xiaolong. Application of synoptic-scale anomalous winds predicted by medium-range weather forecast models on the regional heavy rainfall in China in 2010[J]. Science China:Earth Sciences, 2013(6):1059-1070.
- [7] Qian Weihong. Temporal Climatology and Anomalous Weather Analysis[M]. Springer, 2017.

Interpretation and application of the anomalous parameters predicted by medium-range numerical weather forecast model in the Guangzhou-Dongguan extremely heavy rain event

Qian weihong^{1,2*}, Chen Lyuwen², Li Han³

- (1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 10081;
2. Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080;
3. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003)

Abstract: An extremely heavy rain event, which was characterized by preceding high lightning density and thereafter the anomalous intensity of the rainfall in both the minute-scale and the hour-scale, occurred in the Pearl River Delta region in the early morning of May 22, 2020. The peak 5 minute-precipitation recorded by Automatic Weather Station (AWS) was found to be up to 37.3 mm. The anomalous flow convergence line and the moist vorticity distribution at 850hPa were traced using the initially analyzed and predicted field of ECMWF, to reveal the anomalous vorticity and humidity condition favorable for the extremely heavy rain event. The results show that the anomalous flow convergence line can be predicted 4-5 days in advance by the ECMWF, while holding a bias between the predicted center of the moist vorticity and the position of the heavy rain event. One of the application prospects of the medium-range numerical weather forecast model is that the predicted anomalous flow convergence line as well as the physical parameters along it can provide critical background information for the nowcasting of the convective weather.

Key words: Production of the medium-range numerical weather forecast model; Interpretation and application; Anomalous flow; Extremely heavy rain event; Lightning density