

季风槽环境中暴雨中尺度对流系统的分析与数值预报试验^{*}

蒙伟光¹ 张艳霞¹ 吴亚丽¹ 徐道生¹ 陈德辉^{1,2}

MENG Weiguang¹ ZHANG Yanxia¹ WU Yali¹ XU Daosheng¹ CHEN Dehui^{1,2}

1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所/区域数值天气预报重点实验室, 广州, 510080

2. 国家气象中心/数值预报中心, 北京, 100081

1. *Institute of Tropical and Marine Meteorology/Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangzhou 510080, China*

2. *National Meteorological Center/Numerical Weather Prediction Center, Beijing 100081, China*

2019-02-22 收稿, 2019-07-26 改回.

蒙伟光, 张艳霞, 吴亚丽, 徐道生, 陈德辉. 2019. 季风槽环境中暴雨中尺度对流系统的分析与数值预报试验. 气象学报, 77(6):980-998

Meng Weiguang, Zhang Yanxia, Wu Yali, Xu Daosheng, Chen Dehui. 2019. Analysis and numerical prediction experiment of rainstorm-producing MCSs in a monsoon trough environment. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(6):980-998

Abstract Using ground based precipitation data, satellite cloud images, radar echoes and NCEP reanalysis data, this study analyzes characteristics of MCSs (Mesoscale Convection Systems) associated with a continuous rainstorm that occurred over the coastal areas of South China within a monsoon trough, and investigates the possibility of numerical prediction of the MCSs precipitation. The analysis shows that the rainstorm was caused by a number of successive MCSs. In similar environments, these MCSs developed into different modes with different horizontal scales. The maximum could be organized into a meso- α scale MCC, while meso- β scale linear or banded convective systems were more common. Comparative analysis of two MCSs that respectively presented as quasi-circular MCC (MCS-2) and banded MCS (MCS-4) reveals that convection in both of the two MCSs began to develop at the nighttime, showing a good correlation with fluctuations in the southerly low-level jet in the monsoon trough. Examination of the observed proximity soundings shows that it is difficult to distinguish the modes and the evolutionary tendencies of different MCSs using diagnostic variables such as convective available potential energy (CAPE) and vertical wind shear, which are considered to be good precursors for MCSs precipitation prediction. The representativeness of soundings used to derive these quantities will affect the application of various forecasting tools such as that based on the "ingredients-based method". Prediction simulation with the GRAPES_GZ model shows that it is possible to explicitly predict MCSs precipitation by the numerical model. In comparison, the 3 km resolution run can better predict the occurrence of MCSs-induced rainstorm, but are sensitive to the option with or without CP (convective parameterization) scheme. Though running without the CP scheme could better predict earlier stage rainfall in both MCSs, it overpredicted precipitation as the MCSs evolved into their mature stages. How to describe mechanisms for organized convection in MCSs and how to deal with problems of CP schemes at "grey-zone resolution" are two issues that need to be considered carefully.

^{*} 资助课题: 国家重点研发计划课题(2018YFC1506902)、广东省科技计划项目(2017B020244002)、国家自然科学基金面上项目(41275053、41505039)。

作者简介: 蒙伟光, 主要从事中尺度天气数值模拟与预报技术研究。E-mail: wgmeng@gd121.cn

通信作者: 陈德辉, 主要从事数值天气预报模式研发工作。E-mail: chendh@cma.gov.cn

Key words Monsoon trough rainstorm, Mesoscale convection systems, Diagnostic analysis, Numerical prediction experiments, Convective parameterization scheme, Grey-zone resolution

摘 要 应用地面降水观测资料、卫星云图、雷达回波以及 NCEP 再分析资料,对华南沿海受季风槽影响下发生的一次持续性暴雨的中尺度对流系统(MCS)进行分析,并探讨采用数值模式对中尺度对流系统降水进行预报的可能性。分析表明,暴雨由多个相继发展的中尺度对流系统造成。在相似环境中,不同中尺度对流系统发展形态和水平尺度有较大差异,最大可组织发展成 α 中尺度对流复合体(MCC),但一般为 β 中尺度线状或带状对流系统。对其中发展形态分别表现为椭圆形中尺度对流复合体(MCS-2)和带状 β 中尺度对流系统(MCS-4)的对比分析发现,对流的起始发展均发生在夜间,与季风槽中低空急流的南风脉动有良好对应关系。基于临近探空资料的诊断发现,被认为对中尺度对流系统组织发展有指示作用的关键物理量如对流有效位能(CAPE)和风垂直切变难以区分不同中尺度对流系统的发展形态和趋势,探空资料的代表性将影响诸如“配料法”等暴雨客观预报方法的建立和应用。利用华南区域中心 GRAPES(GRAPES_GZ)数值模式对两个中尺度对流系统进行的模拟预报结果表明,采用数值模式对中尺度对流系统降水进行显式预报已成为可能。比较而言,3 km 水平分辨率模式可以更好地预报出暴雨的发生,但结果对是否调用对流参数化(CP)方案敏感。尽管不依靠对流参数化方案模式能够较好地预报出中尺度对流系统初始降水的发生,但会过度预报发展成熟后的降水。模式中如何描述中尺度对流系统对流的组织发展机制、如何处理对流参数化方案的“灰色分辨率”问题需要仔细考虑。

关键词 季风槽暴雨,中尺度对流系统,诊断分析,数值预报试验,对流参数化方案,灰色分辨率

中图法分类号 P456.7

1 引 言

中尺度对流系统(MCS, Mesoscale Convective System)是一种重要的降水对流系统。不同中尺度对流系统的对流发展表现出不同的形态,实际预报工作能否对此做出判断对降水的准确预报十分关键。因此,对影响中尺度对流系统组织发展形态及发展强度的环境条件的理解至关重要(Laing, et al, 1997; Parker, et al, 2000; Cohen, et al, 2007; Jirak, et al, 2007)。

就有利于中尺度对流系统发展的天气尺度环流特征来说,中层弱的短波槽、强斜压带、强的暖平流、配合有明显辐合气流的低空急流以及高层强辐散等,均与中尺度对流系统的发展密切相关。就环境物理量特征而言,人们试图寻找有代表意义的参量和阈值用于指导预报。Parker 等(2000)研究发现,中尺度对流系统尤其是中尺度对流复合体(Mesoscale Convective Complex, MCC, 一种特殊的中尺度对流系统),常形成于低层具有较强风垂直切变和较高对流有效位能(CAPE)的斜压大气中。Coniglio 等(2007)和 Cohen 等(2007)的工作均注意到对流有效位能大小、环境风垂直切变强弱在区分对流系统是趋于发展成熟或趋于减弱、中尺度对流系统天气是强对流性质还是弱对流性质等方面有指示作用。Jirak 等(2007)在对众多中尺度对流系统

形成条件进行考察后认为,低层暖平流、风垂直切变以及环境场的不稳定性是影响对流能否发展成为中尺度对流系统最为关键的因子。采用类似于暴雨预报“配料法”(Doswell III, et al, 1996),集中考虑这些关键因子的影响,他们还提出了中尺度对流系统指数(MCS index)用于指导预报。

中国针对有利于中尺度对流系统发展环流形势及环境条件也开展了不少研究(郑永光等, 2002; 孙建华等, 2002a, 2002b; 柳艳菊等, 2005; 夏茹娣等, 2006),识别了一些有利于不同中尺度对流系统发展的环流形势(Meng, et al, 2013; He, et al, 2017)。如 He 等(2017)曾识别出有利于中国中东部中尺度对流系统发展的环流型主要是短波槽前型和冷涡型两种。进一步考察还发现前者环境风场的垂直切变更强、盛行暖平流,并且,在低空急流出口处具有明显的气流辐合,而后者则与强锋区关联,伴有明显锋生过程。

华南地处低纬度,每年汛期的降水除由西风带系统携冷空气触发对流造成外,伴随西南夏季风活动的热带对流云团也为这一区域带来了丰富的雨水,其中均不乏源自中尺度对流系统的贡献。从卫星云图、雷达回波的观测可注意到这些中尺度对流系统可表现为多种形态。与冷空气活动相关的暴雨中尺度对流系统,从云图普查分析(梁巧倩等, 2012)发现,如按照 Jirak 等(2003)的标准划分,其组织发

展形态有近 40% 表现为 α 中尺度线状或带状对流系统 (PECS), 31% 表现为 β 中尺度线状或带状对流系统 ($M\beta$ PECS), 而达到中尺度对流复合体 (MCC) 和 β 中尺度对流复合体 ($M\beta$ MCC) 标准的发生概率远低于 α 中尺度线状或带状对流系统或 β 中尺度线状或带状对流系统。中尺度对流系统大多表现为线状或带状发展形态, 而且水平尺度小, 为华南暴雨的预报增加了难度。与季风活动相关的中尺度对流系统也有类似的特征。加上受区域内中小尺度地形、陆海界面差异等复杂下垫面环境因素的影响, 致使中尺度对流系统的初生、演变、减弱、消亡等过程都更复杂。加强对这一地区暴雨中尺度对流系统发展特征及其可预报性的研究非常必要。

选取一次发生于华南沿海的季风槽持续暴雨过程, 对引发暴雨的中尺度对流系统的发展特征进行研究, 在对季风槽相似环境中不同形态中尺度对流系统的活动及其可能的影响因素进行分析的基础上, 应用华南区域中心 GRAPES (GRAPES_GZ) 数值模式对中尺度对流系统暴雨的发生进行模拟预报, 考察模式对此类中尺度强降水对流系统的预报能力。

2 个例、数据和方法

选取的个例发生于 2011 年 6 月 28—30 日, 是季风槽影响下集中发生在华南西部沿海的一次持续性暴雨过程。地面自动气象站雨量记录表明, 3 d 的最大累计雨量超过 500 mm。从卫星云图可观察到, 在相似环流背景影响下, 暴雨由多个中尺度对流系统的连续发生和活动造成。但在不同时段, 即使在相同的区域, 这些中尺度对流系统的组织发展形态和结构特征有较大差异, 给暴雨预报造成了困难。

分析采用的数据包括地面自动气象站降水观测数据、地面和探空观测资料、雷达回波和卫星云图以及 NCEP/FNL 再分析格点 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 资料等。雷达回波及卫星云图主要用于描述中尺度对流系统的演变过程。结合 NCEP/FNL 再分析资料以及地面和探空观测资料, 采用常规诊断计算分析方法考察不同环境物理量对中尺度对流系统形成发展的指示作用。此外, 应用华南区域中心 GRAPES_GZ 模式开展模拟预报试验, 讨论模式对中尺度对流系统降水进行显式预报的可能性。

3 暴雨过程概况及中尺度对流系统的活动和组织发展形态

3.1 暴雨过程概况

图 1 为连续 3 d 逐日 (08 时—08 时, 北京时, 下同) 观测的 24 h 累计雨量和 3 d 的总雨量分布。从 28 日开始, 暴雨主要发生在广东西部沿海阳江地区。28 日累计雨量中心极值超特大暴雨标准 (≥ 250 mm), 达 300 mm, 29 日约为 210 mm。尽管 30 日雨势趋于减弱, 但降水仍超过 100 mm, 达到大暴雨标准 (图 1c), 3 d 的最大累计雨量超过 500 mm (图 1d)。

3.2 中尺度对流系统活动特征和组织发展形态

基于风云 2 号卫星红外云图黑体辐射亮温 (TBB) 资料, 采用 Jirak 等 (2003) 的划分标准, 将中尺度对流系统分为中尺度对流复合体、 α 中尺度线状或带状对流系统、 β 中尺度对流复合体、 β 中尺度线状或带状对流系统 4 类, 重点追踪分析直接引发暴雨的中尺度对流系统的活动。表 1 给出了不同中尺度对流系统起始发展时间、组织发展形态、系统持续时间及移动方向等特征数据。结果表明 28—30 日总共有 5 个明显的中尺度对流系统为暴雨中心带来了强降水, 其中前两个中尺度对流系统的组织发展形式表现为椭圆形结构, 另外 3 个表现为线状或带状结构。而且只有 MCS-2 和 MCS-3 达到了 α 中尺度, 其余均属于 β 中尺度。

图 2、3 分别给出了其中两个中尺度对流系统 (MCS-2 和 MCS-4) 2 h 间隔云图的演变特征。其中 MCS-2 为具有椭圆形结构的中尺度对流复合体, 发展最强盛时, 云顶 $TBB \leq -52^\circ\text{C}$, 水平范围超过 $320\text{ km} \times 280\text{ km}$, 系统发展成熟后持续时间长达 9 h。MCS-4 为带状的 β 中尺度对流系统, 最强盛时云顶 $TBB \leq -52^\circ\text{C}$, 水平范围约为 $280\text{ km} \times 100\text{ km}$, 发展成熟后维持时间超过 6 h。可以看到两个中尺度对流系统对流初生的位置均位于广东西部沿海, 可能与这里海陆界面差异、沿海地形影响有关。后面的分析还会提及在季风槽环流影响下, 槽南侧西南季风登陆华南沿岸时南风增大及其与东西走向海岸线的作用可能对对流的触发有重要影响。问题是为什么在相似的环流背景中一些中尺度对流系统可以进一步组织发展成为中尺度对流复合体, 并持续发展较长时间, 而另一些中尺度对流系统则仅发展

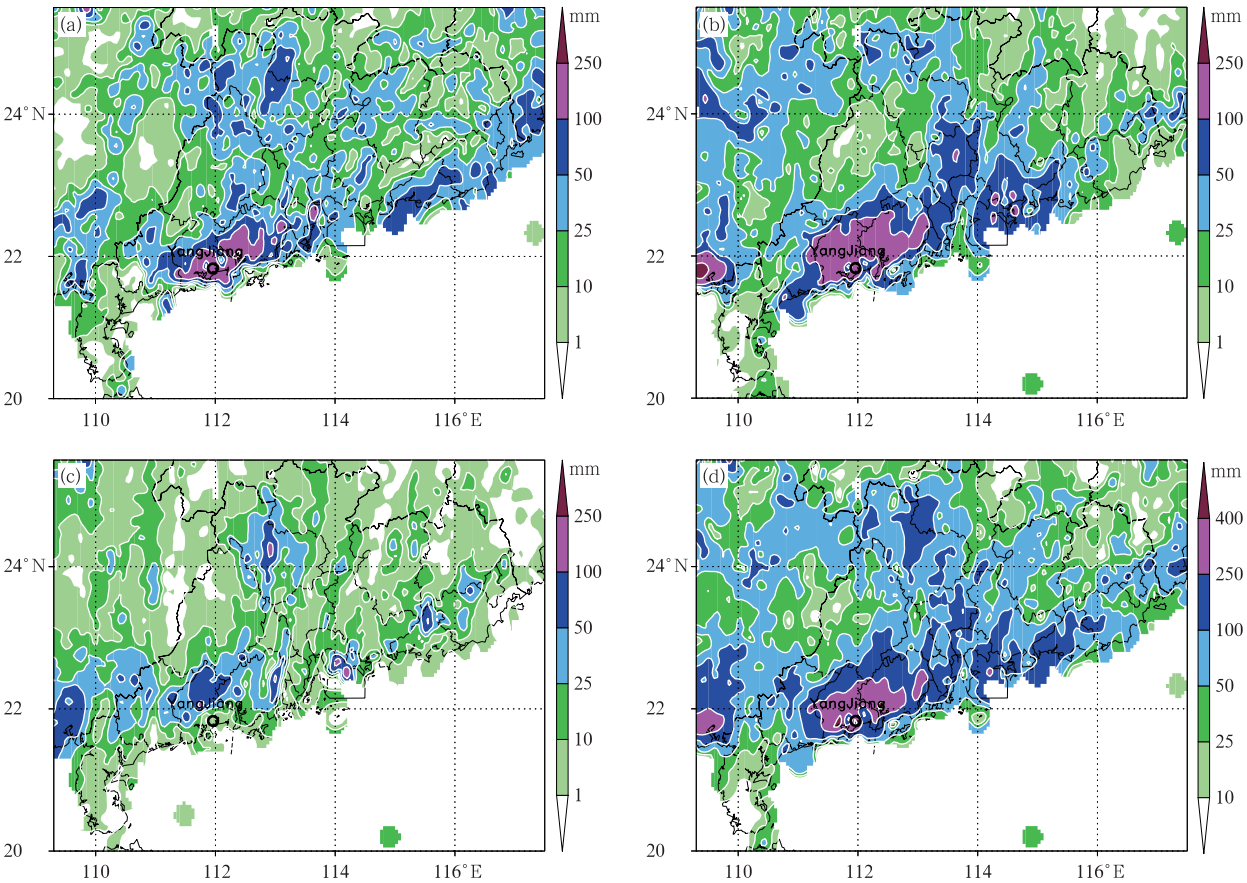


图1 2011年6月28—30日逐日(08时—08时)降水(a—c)和3 d 累计雨量(d)

Fig. 1 Observed daily (08:00 – 08:00 BT) rainfall from 28 to 30 June 2011 (a – c) and 3 d accumulated rainfall (d)

表1 暴雨过程中影响广东西部沿海中尺度对流系统的活动特征

Table 1 Characteristics of MCSs in the rainstorm over coastal areas in western Guangdong province

序号	起始时间	成熟时间	组织发展形式	持续时间(h)	移动方向
MCS-1	28日09时	28日12时	M β MCC	8	准静止/东北东
MCS-2	29日00时	29日04时	MCC	9	偏东/准静止
MCS-3	29日18时	29日21时	PECS	5	准静止/偏东
MCS-4	30日03时	30日05时	M β PECS	6	准静止/偏北
MCS-5	30日14时	30日17时	M β PECS	3	准静止/东北东

达 β 中尺度,维持时间相对较短?

如 MCS-2,分析发现其初始对流发展于午夜,开始时位于粤西沿海,表现为东北—西南走向的对流云带并向东移动。图 2a 给出的是 29 日 00 时的云图,此时 MCS-2 对流云带位于雷州半岛东部及粤西沿海,随着对流系统进一步向东移动和发展(图 2b),云带与前一个位于珠江口西岸趋于消亡的中尺度对流系统的残余云系发生合并,进一步发展成为具有较大水平范围、椭圆形结构的中尺度对流复

合体(图 2c、d)。之后 MCS-2 位置少动,如从系统发展成熟的 29 日 04 时算起,MCS-2 发展成中尺度对流复合体后维持的时间超过 9 h,至 13 时后才逐渐减弱、消亡。29 日粤西沿海大范围的大暴雨(> 100 mm)区(图 1b)正是由这一中尺度对流复合体影响造成。

MCS-4 的初始对流发生于 30 日 03 时前后(图 3a),2 h 后对流云已组织发展成为一个 β 中尺度对流系统,其组织发展形态表现为长条带状(图 3b),

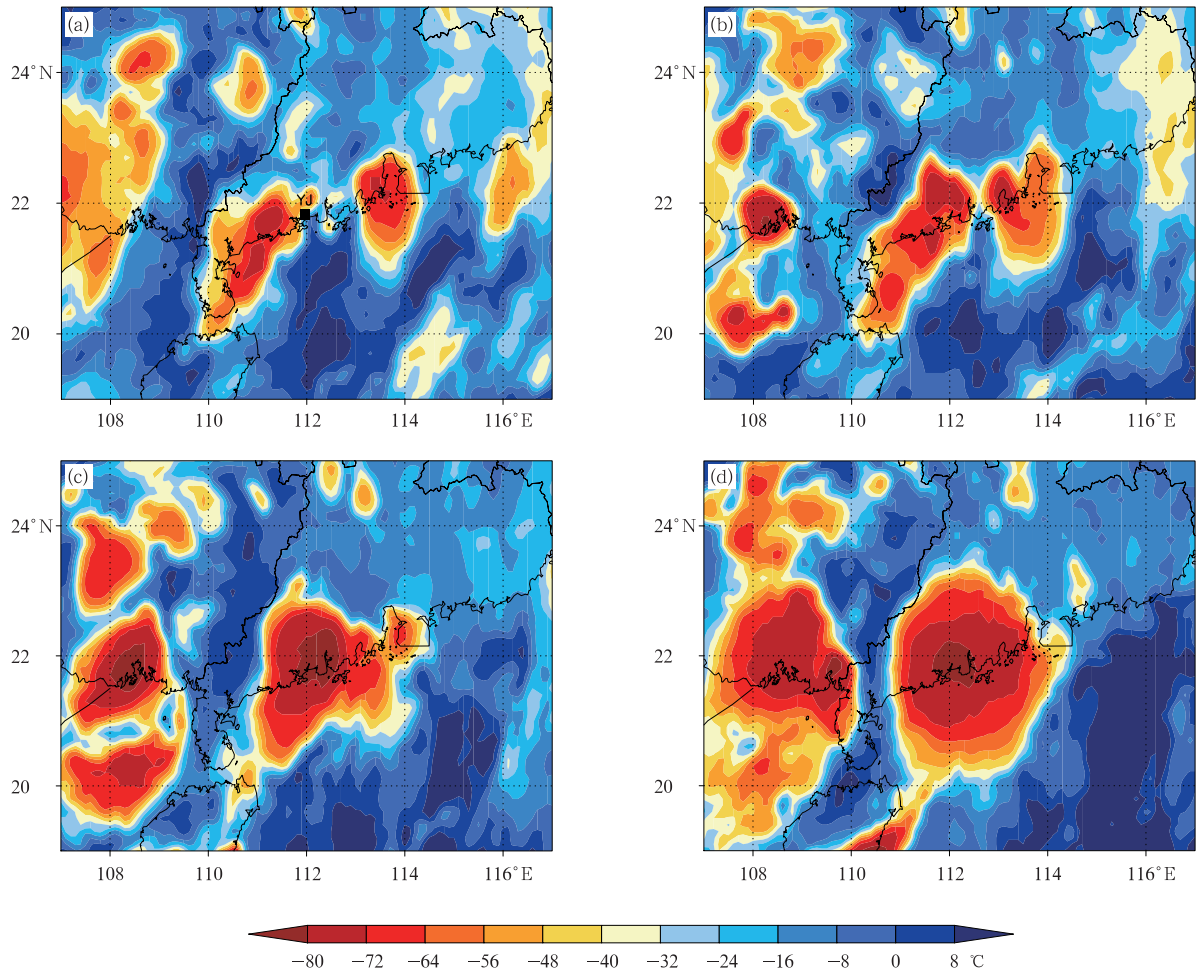


图2 2011年6月29日MCS-2的卫星红外云图

(a. 00时, YJ为探空站阳江所在位置, b. 02时, c. 04时, d. 06时)

Fig. 2 Infrared satellite images for MCS-2 on 29 June 2011

(a. 00: 00 BT, YJ denotes the location of Yangjiang sounding station,

b. 02: 00 BT, c. 04: 00 BT, d. 06: 00 BT)

与 MCS-2 有明显区别。该中尺度对流系统形成后位置也呈准静止状态,对流云发展强度有反复。从图 3c 可看到,与前 2 h 相比,此时中尺度对流系统的云顶温度有所升高,表明对流发展有所减弱。但随后 2 h,云顶温度又逐渐降低,对流重新发展增强(图 3d)。尽管如此,MCS-4 最终并没有发展成为具有更大尺度的中尺度对流复合体,只是作为带状的 β 中尺度对流系统维持发展。由于中尺度对流系统中的对流反复发生,MCS-4 发展成熟后维持时间超过 6 h, 12 时后才减弱消亡。

3.3 中尺度对流系统回波结构特征

不同发展形态的中尺度对流系统具有不同的降

水结构特征,这是中尺度对流系统具有不同长短生命史并造成不同强度灾害天气的重要原因。图 4 为对应这两个中尺度对流系统从初生至发展成熟阶段由华南组网雷达观测到的 2 h 间隔的降水回波(最大组合反射率)。可以看到与 MCS-4 呈长条带状的回波结构不同,MCS-2 的降水回波发展范围更加宽广、呈团状。发展成熟后(图 4c)强回波区位于团状回波的东侧(下风向),回波反射率因子强度普遍超过 40 dBz。而其西侧的回波较为均匀,多在 20—35 dBz。系统前部为对流降水、后部为层云降水,这是典型的中尺度对流系统降水结构形态。已有研究(Houze, et al, 1990; Houze, 1997)表明,这种降水

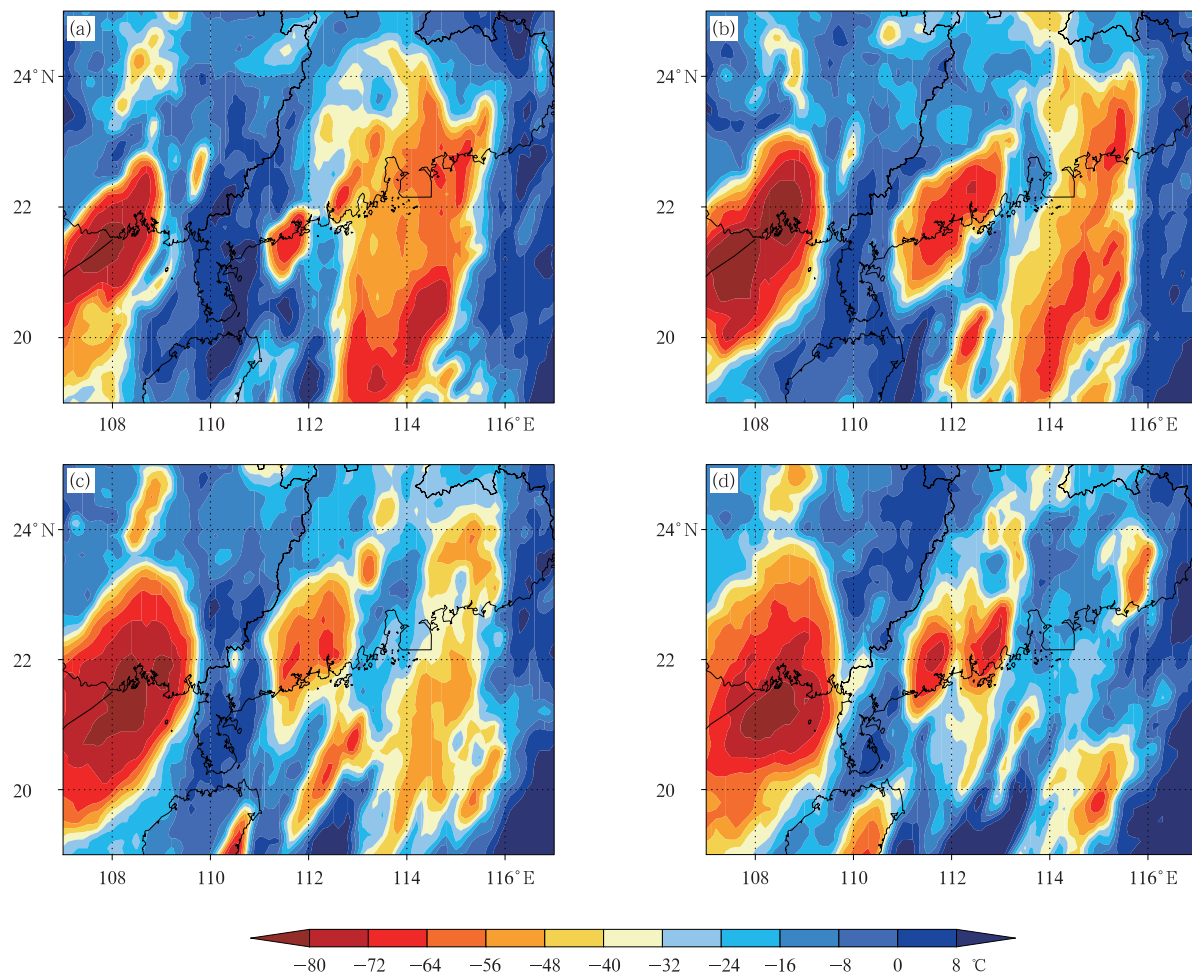


图3 2011年6月30日MCS-4的卫星红外云图

(a. 03时, b. 05时, c. 07时, d. 09时)

Fig. 3 Infrared satellite images for MCS-4 on 30 June 2011

(a. 03:00 BT, b. 05:00 BT, c. 07:00 BT, d. 09:00 BT)

结构形态将有助于中尺度对流系统发展出自身的环流结构,通过次级环流激发中尺度对流系统周边发生新的对流,促进中尺度对流系统进入一种自激维持的发展过程,使分散的对流得以组织发展从而有机会形成更大水平尺度的中尺度对流系统。MCS-2能发展成为 α 中尺度对流复合体,与其发展过程中演变出的这种降水结构形态有关系。比较而言,属 β 中尺度的MCS-4其降水回波表现为带状或条状结构,强对流回波平行分布于带状回波区中。缺乏稳定的自激维持发展机制,尽管MCS-4发展后期降水回波向北移动并且范围有所扩大,但最终没有发展成中尺度对流复合体,而且其持续发展时间比

MCS-2要短(表1)。

4 天气形势及热力学环境

从有利于暴雨发生天气形势分析出发,通过对影响中尺度对流系统发展几个关键物理量的诊断分析,试图理解为什么在相似的天气尺度形势影响下,中尺度对流系统发展的水平尺度、组织发展形态及持续发展时间有所不同。

4.1 天气形势

图5给出暴雨发生期间28日08时和29日08时的地面天气形势。28日08时季风槽位于华南沿海一带,槽西段低压环流位于越南北部及北部湾地

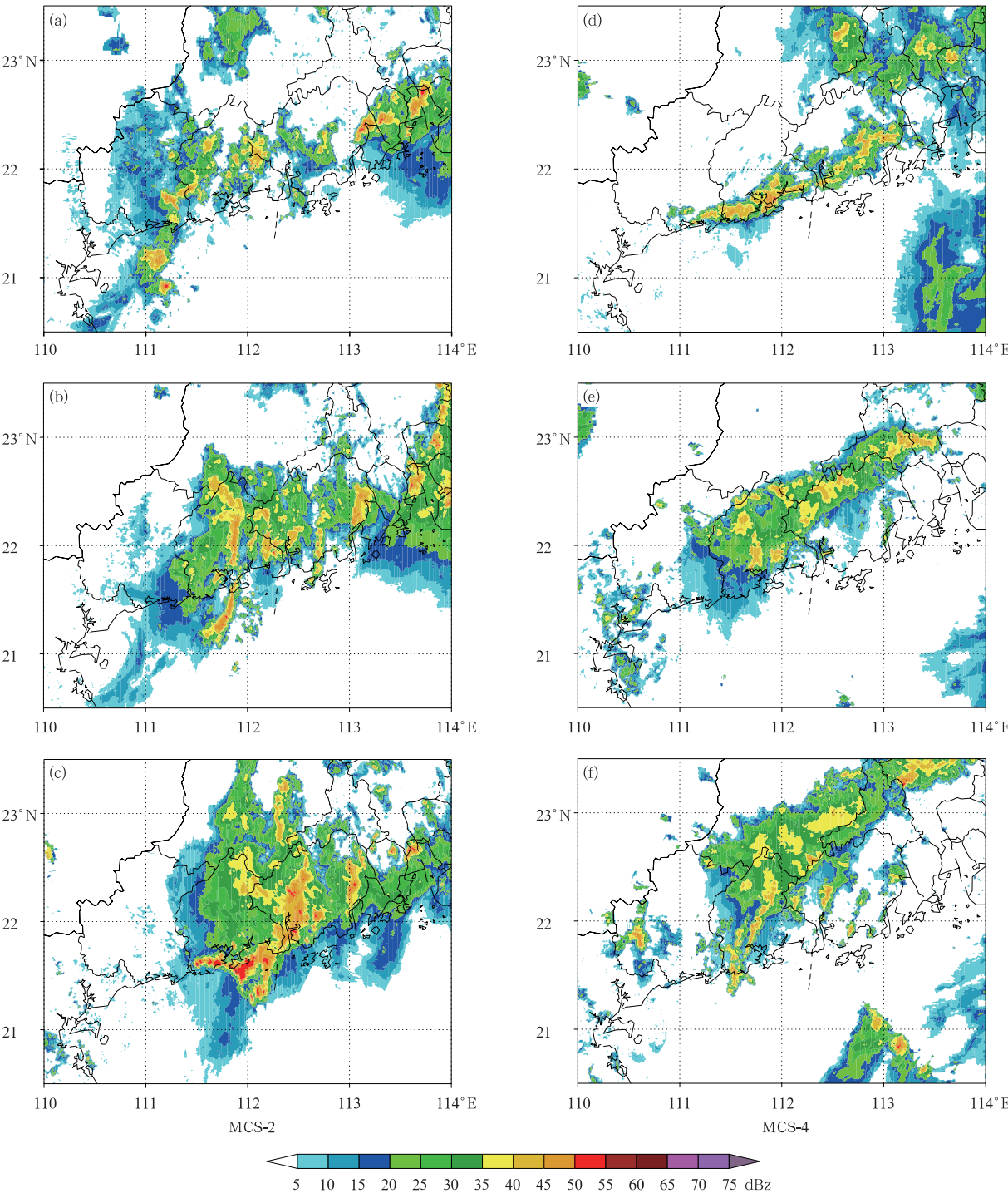


图 4 雷达观测的中尺度对流系统降水回波(最大组合反射率)
(a、b、c. 29 日 00、02、04 时 MCS-2、d、e、f. 30 日 03、05、07 时 MCS-4)
Fig. 4 Observed MCSs radar echoes (maximum composite reflectivity)
(a, b, c. MCS-2 at 00:00, 02:00 04: 00 BT 29 June; d, e, f. MCS-4 at 03:00, 05:00, 07:00 BT 30 June)

区(图 5a)。29 日 08 时季风槽强度有所增强,低压环流中心气压下降,由此造成季风槽东南侧气压梯

度增大、南风增强(图 5b)。这将有助于西南季风登陆广东,尤其是在广东西部沿海一带,南风直接吹向

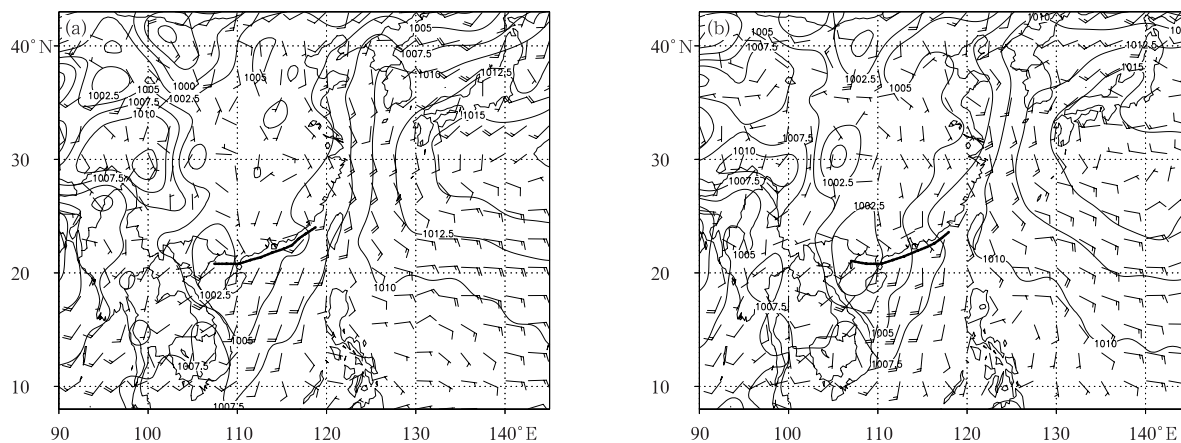


图5 2011年6月28日(a)和29日(b)08时地面天气形势

(等压线间隔为2.5 hPa,粗实线为地面季风槽线位置)

Fig. 5 Surface weather charts at (a) 08:00 BT 28 June and (b) 08:00 BT 29 June 2011

(The contour interval for isobars (thin lines) is 2.5 hPa; the thick line denotes the position of monsoon trough)

东西走向的海岸线,低层辐合增强将有助于对流发展。

图6为与图5相对应的12 h后的500和850 hPa等压面形势,高空形势的演变也反映出类似变化特征。500 hPa上,与28日20时(图6a)相比,29日20时(图6b)季风槽加深发展出了完整的低压环流,而且由于西太平洋副热带高压主体强度有所增强,5880 gpm等高线向西南侧伸展,进一步促进了季风槽东南侧气压梯度增大,这都可引起华南西部沿海一带西南季风增强、南风增大。850 hPa上,与28日20时(图6c)相比,29日20时(图6d)华南及其西部沿海一带的西南季风更强,而且急流轴向北发展(图6d),为华南西部沿海一带带来了丰富的水汽。从整层大气可降水量看,这一时段西部沿海的可降水量最大超过65 mm(图略),只要有适合的动力条件将触发对流降水发生。图6a、b灰阶为1000—500 hPa的厚度,强厚度区位于暴雨区上游,反映出厚度(暖)平流为中尺度对流系统的发展提供了条件。

图7为地面自动气象站降水和卫星云图TBB以及NCEP再分析资料给出的中尺度对流系统活动主要范围(21.5°—22.5°N, 111.5°—112.5°E)平均降水、云顶温度及其南侧低空急流南风分量的时间演变。与前面分析一致,平均降水和云顶温度变化都反映出持续暴雨发生期间共有5个中尺度对流

系统活动,而且从其与低空急流南风分量变化对应关系看,中尺度对流系统发展可能与急流中风速的脉动有关。尤其对于MCS-2和MCS-4来说,对流发展与风速变化的这种对应关系更为密切。如MCS-2,从28日20时开始伴随南风增强,对流开始发展,云顶温度逐渐下降,至29日01时MCS-2平均云顶温度下降至 -52°C ,直至15时,平均云顶温度均维持在 -52°C 以下。MCS-4的发展也有类似特点。

对流云从夜间开始发展至次日凌晨,上午发展达最强,与夜间低空急流的维持发展有关,这并非是偶然现象,在其他一些华南沿海季风暴雨过程中也有发现(蒙伟光等,2014)。国际上也有研究(Laing, et al, 2000; Houze, et al, 2004)指出,夜间低空急流通过对边界层不稳定性起维持作用,可为中尺度对流系统发展提供对流的“可维持性”条件,从而将更有机会把对流组织发展成中尺度对流系统。但也要看到,尽管MCS-4发展相对较弱,对应却有更强急流和南风的活动,图7中不论是在850 hPa还是在925 hPa上,与MCS-4相对应的南风均更强,反映出中尺度对流系统的发展还受到其他因素的影响。

4.2 热力学环境

图8给出了中尺度对流系统发展位置附近阳江探空站(21.90°N, 112.00°E)的Skew T - $\lg p$ 图,选取的探测时间为与MCS-2和MCS-4发生前最邻近

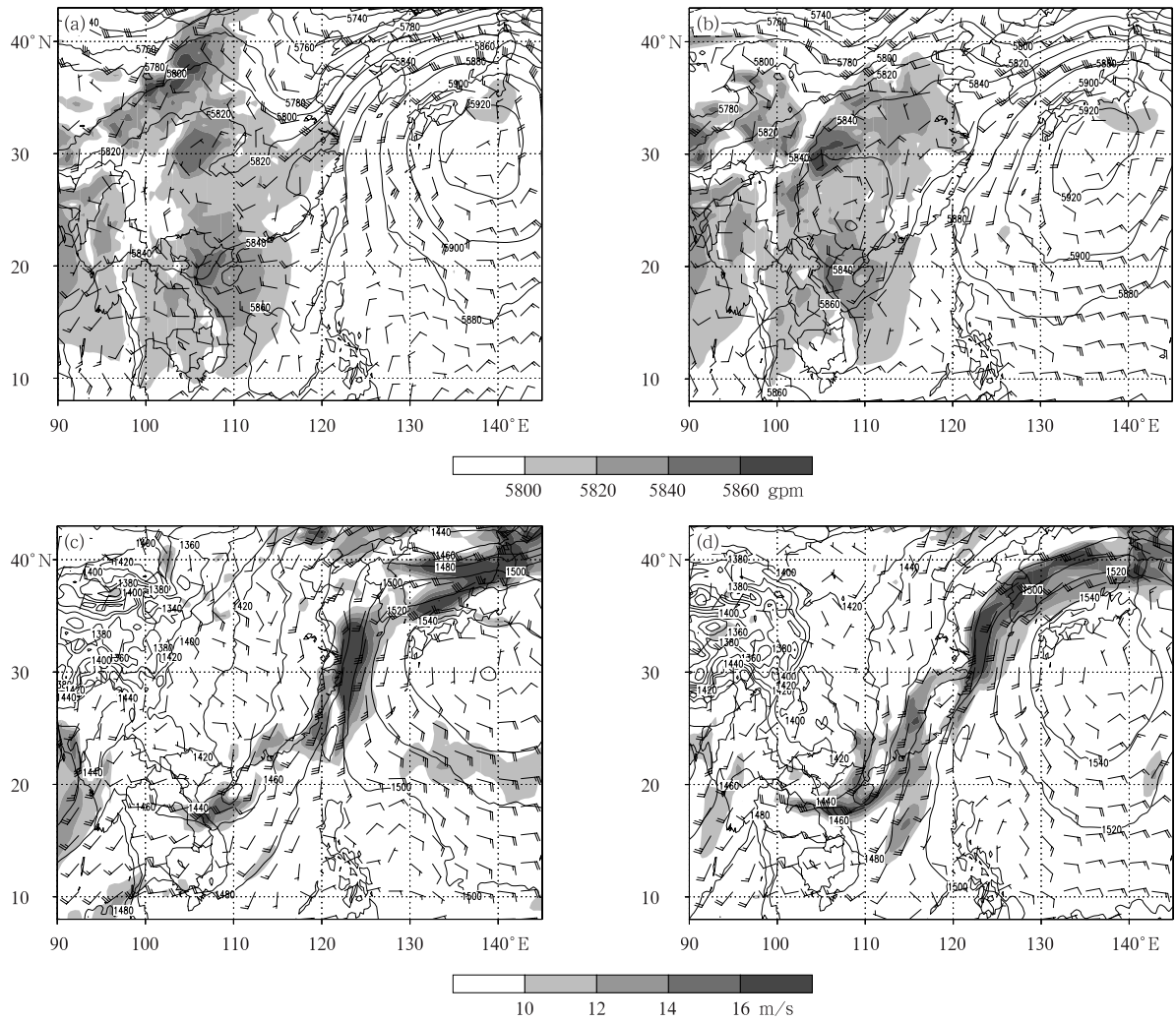


图6 2011年6月28日和29日20时500(a,b)和850(c,d) hPa等压面形势
(a,b中灰阶为1000—500 hPa厚度 ≥ 5800 gpm的区域, c,d中灰阶为850 hPa风速 ≥ 10 m/s的区域)
Fig.6 Weather charts at 500 (a, b) and 850 (c, d) hPa at 20:00 BT 28 and 29 June 2011
(Shaded areas in a and b indicate the 1000—500 hPa thickness ≥ 5800 gpm, and the shaded areas in c and d indicate 850 hPa wind speed ≥ 10 m/s)

的28日20时和29日20时。比较而言,MCS-2发展环境对流层中层相对较干下层较湿的特征更为明显,此时500 hPa上温度露点差超过 8°C ,低层差异则相对较小,而MCS-4环境则表现为整层湿润、温度露点差小。热力学参数的计算表明,地面气块具有的对流有效位能(SBCAPE)均较小,28日20时为 686 J/kg ,29日20时为 78 J/kg 。但两个时次在最不稳定层次(分别为992和993 hPa)的气块均具有较大的对流有效位能(最不稳定气块对流有效位能)值,其中MCS-4环境大气具有更大的最不稳定

气块对流有效位能达到 1849 J/kg ,而MCS-2的仅为 1162 J/kg 。这都意味着如果有适当的抬升机制,MCS-4环境由于可提供更多的不稳定能量,对流的发展将更强盛。

为了更准确地描述中尺度对流系统发展的环境,表2进一步给出了基于近地面100 hPa混合层计算得到的对流有效位能(MLCAPE)值以及环境低层风场垂直切变的计算结果。同时为了更准确地刻画MCS-4发展的环境大气,采用更接近MCS-4开始发展时间地面常规观测资料(30日02时)对29

日 20 时探空资料进行订正的方法,重新计算了相关的物理量,结果列于表 2 中。可以看到混合层对流有效位能与最不稳定气块对流有效位能的大小接近,28 日 20 时和 29 日 20 时,计算的 MLCAPE 分

别为 1179.3 和 1604.1 J/kg,也是后者更大。而且对探空资料进行订正后计算得到的结果达到 1573.9 J/kg,与订正前相当,表明 MCS-4 发展环境具有更高的不稳定能量是可信的。

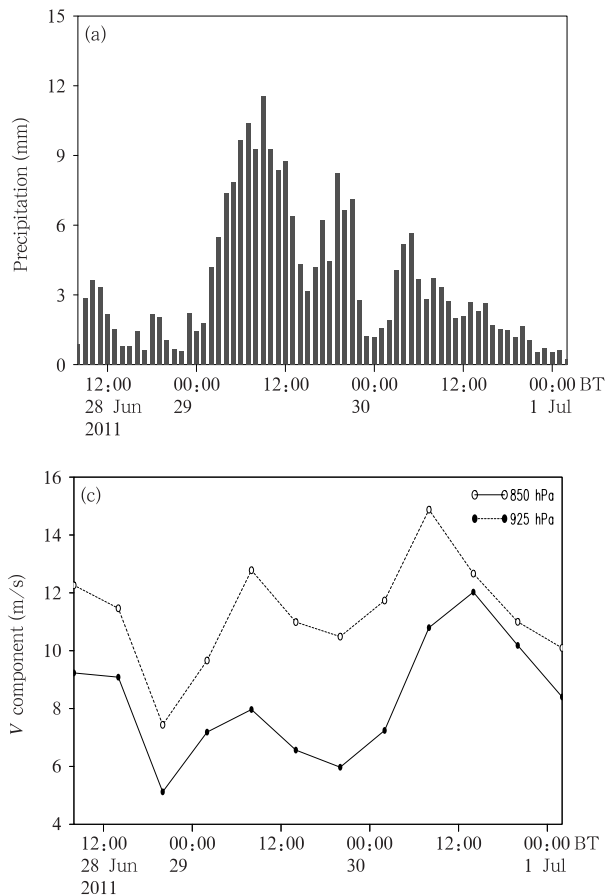


图 7 中尺度对流系统降水(a)、云顶温度 TBB(b)及其南侧低空急流南风分量(c)的时间演变

Fig.7 Evolution of MCSs precipitation (a) cloud top temperature TBB (b) and southerly wind component of LLJ to the south of MCSs (c)

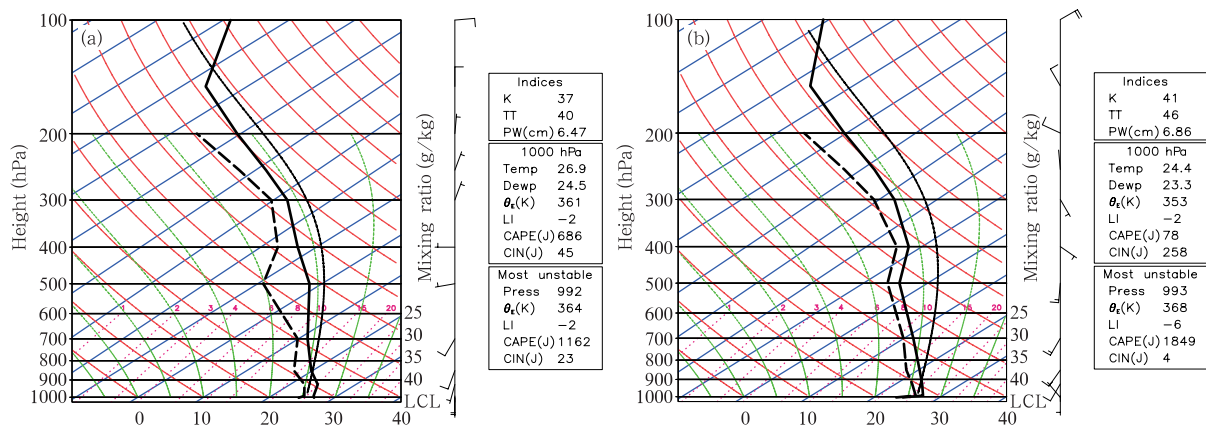


图 8 2011 年 6 月 28 日 20 时(a)和 29 日 20 时(b)由阳江探空资料绘制的 Skew T-log p

Fig.8 Skew T-log p soundings for Yangjiang station at (a) 20:00 BT 28 and (b) 20:00 BT 29 June 2011

表2 中尺度对流系统附近基于探空资料计算的诊断量

Table 2 Diagnostic variables based on sounding data near the MCSs

时次/站点	MLCAPE(J/kg)	MLCIN(J/kg)	BS _{0-3 km} (m/s)	BS _{0-6 km} (m/s)
28日20时/阳江	1179.3	42.8	6.5	7.6
29日20时/阳江	1604.1	29.7	15.4	7.9
30日02时/阳江	1573.9	31.1	16.9	4.7

就对流抑制能量(CIN)来说,MCS-2 环境场的MLCIN 与 MUCIN 一样具有比 MCS-4 环境更大的值,而且风的垂直切变小,尤其是 0—3 km 的风垂直切变(BS_{0-3 km})两者的对比更明显,MCS-2 的仅为 6.5 m/s 左右,而 MCS-4 的大于 15 m/s。如此看来,这两个中尺度对流系统难以用环境对流有效位能值和风垂直切变大小判断其发展趋势。

以上的分析一定程度上表明,被认为对中尺度对流系统组织发展有较好指示作用的关键物理量如对流有效位能和风垂直切变用于区分华南中尺度对流系统的不同发展趋势有较大的不确定性。这可能与用来计算物理量的探空资料的代表性有关,受时间和空间分辨率限制,基于常规探空观测资料应用“配料法”思路对中尺度对流系统暴雨进行预报将会受到限制。

5 华南区域中心 GRAPES_GZ 模式对两个中尺度对流系统暴雨模拟预报效果的分析

随着数值预报技术的发展和计算能力的提高,采用数值模式对中尺度对流系统降水进行显式和实

时的预报已成为模式预报技术发展追求的目标之一。应用华南区域中心基于中国 GRAPES 模式(薛纪善等,2008)发展的数值预报系统 GRAPES_GZ(陈子通等,2016)对 MCS-2 和 MCS-4 的降水过程进行模拟预报,除考察模式水平分辨率提高、云分析技术应用对模拟结果的影响外,重点考察对流参数化(CP)方案应用及调整对预报效果的影响。

5.1 不同模拟预报试验的设计

共设计 5 组不同的试验(表 3)。其中 Exp-1 和 Exp-2 的设置与目前业务运行的 GRAPES_GZ 9 km 和 GRAPES_GZ 3 km 模式一致,两者均采用 SAS 对流参数化方案。考虑到模式分辨率和对流参数化方案的适用性,其中业务 3 km 模式对 SAS 方案进行了调整,增加了对浅对流过程的考虑。其他 3 组为设计的不同敏感性试验,分别用于考察云分析技术应用、对流参数化方案应用以及浅对流过程对模拟结果的影响。除表 3 所列之外,试验中模式采用的其他物理过程方案分别有:WMS6 云微物理方案,RRTMG 长、短波辐射方案,MRF 边界层方案和自主研发的陆面过程方案 SMS 等。

表3 5组不同试验的设置

Table 3 Model configurations for the five different suites of experiments

	Exp-1	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5
模式区域格点数	882×553	913×513	913×513	913×513	913×513
水平分辨率(km)	9	3	3	3	3
积分步长(s)	90	40	40	40	40
对流参数化方案	SAS	SAS+浅对流	SAS+浅对流	无	SAS
云分析方案	无	有	无	有	有

鉴于 MCS-2 和 MCS-4 活动时间,模式分别从 28 日 20 时和 29 日 20 时开始积分,进行 24 h 的模拟预报。模式初始场和边界条件均由美国 NCEP/GFS 模式的预报输出提供。考虑到两个中尺度对流系统历时不超过 12 h,均在次日的 14 时之前减弱消亡,下面主要针对截至 14 时之前的 12 h 累计雨量和 中尺度对流系统主要活动区域平均降水强度演变的模拟结果进行分析。

5.2 不同试验累计雨量的对比分析

图 9 给出了两种不同水平分辨率模式模拟的两个中尺度对流系统的 12 h 累计降水与观测的比较。观测表明两个中尺度对流系统引起的降水均主要集中在发生在粤西阳江附近,相对来说 MCS-2 的大暴雨(累计雨量≥100 mm)落区更为偏南、范围更大,雨量中心最大值超过 400 mm,而 MCS-4 的大暴雨区主要位于阳江北部,雨量中心最大值约为 200 mm。

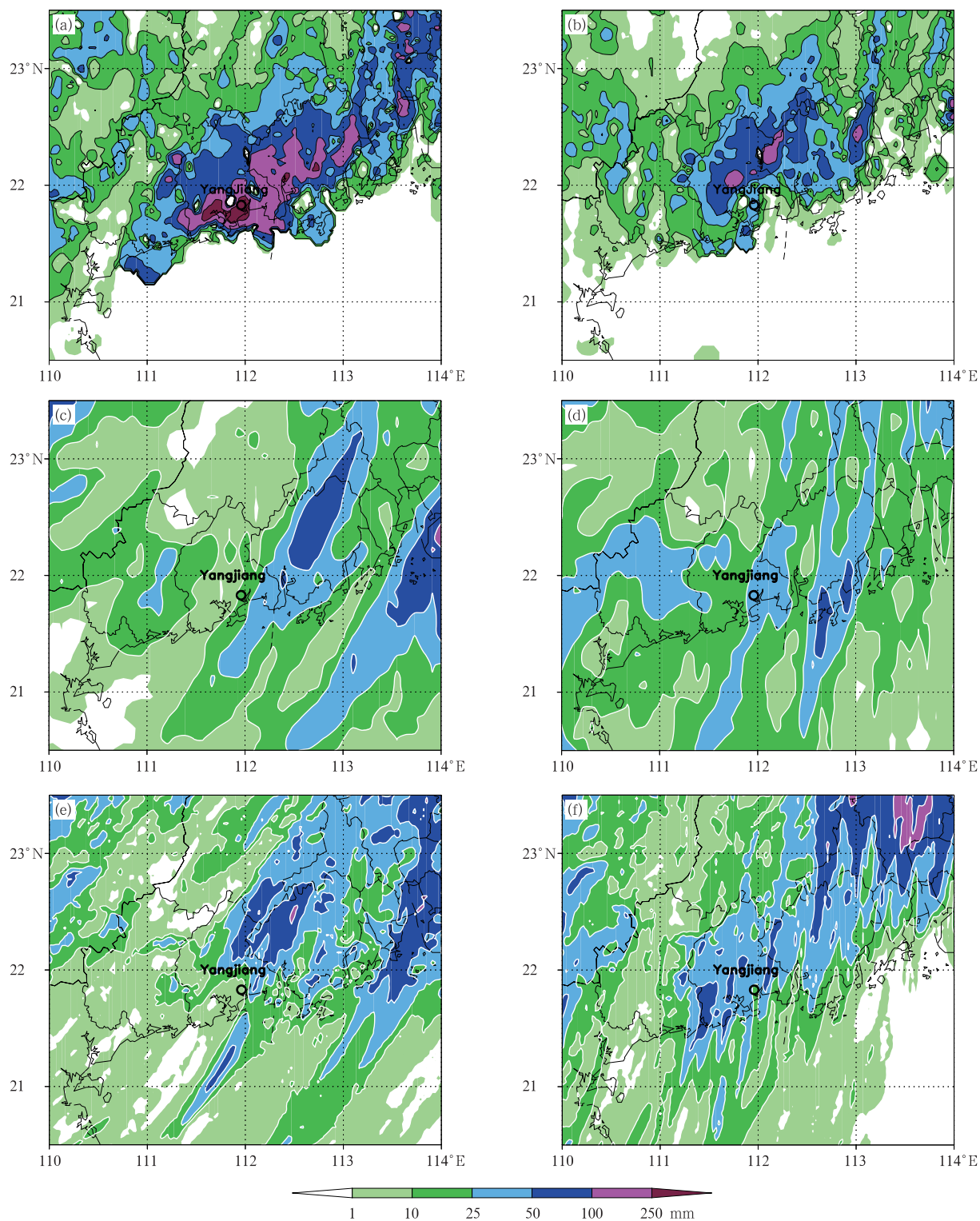


图9 不同水平分辨率模式模拟的两个中尺度对流系统12 h 累计雨量与观测雨量

(a. 观测; MCS-2, b. 观测; MCS-4, c. 9 km Exp-1; MCS-2, d. 9 km Exp-1; MCS-4,
e. 3 km Exp-2; MCS-2, f. 3 km Exp-2; MCS-4)

Fig. 9 Comparison of 12 h accumulated rainfall for the two MCSs between observations and simulations with different horizontal resolutions

(a. Observations; MCS-2, b. Observation; MCS-4, c. 9 km Exp-1; MCS-2,
d. 9 km Exp-1; MCS-4, e. 3 km Exp-2; MCS-2, f. 3 km Exp-2; MCS-4)

尽管两种不同分辨率的试验 Exp-1 和 Exp-2 均模拟出粤西有暴雨过程发生,但暴雨发生强度、落区与实际观测仍有不少偏差。就 MCS-2 降水来说,Exp-1 模拟的降水量明显偏少,中心最大值仅为 80 mm 左右,较强的降水落区偏向粤西东部和北部,对阳江附近的大暴雨区明显漏报。与此类似,Exp-1 也漏报了 MCS-4 在阳江北部的暴雨中心,模拟的暴雨区偏向东南部沿海,而且量级也明显偏小。具有更高水平分辨率的 Exp-2 的模拟效果有改进,尤其对 MCS-2 可以模拟出更大雨量。尽管暴雨落区仍然偏北,但与 Exp-1 结果相比更接近于观测。同样,Exp-2 模拟的 MCS-4 强降雨区也更加集中发生在阳江附近,雨量也更大,这都反映出水平分辨率提高模式可以模拟出更合理的结果。

图 10 给出了其他几个分辨率同为 3 km 的敏感性试验的结果。比较 Exp-2(图 9e、f)和 Exp-3(图 10a、b)的结果可了解云分析技术应用的影响。由于模式开始积分时间比两个中尺度对流系统对流起始发展的时间均早 6 h 以上,云分析技术的应用对两个中尺度对流系统降水模拟结果的影响很小,表现为 Exp-3 模拟出了与 Exp-2 十分相似的降水量大小和分布特征。采用云分析技术获取模式积分初始时刻云水物质信息,并通过张弛逼近方法将其融入模式预报来达到缩短模式积分起转时间,已被证明对改进模式短时效的降水预报效果有作用(Hu, et al, 2006, 2007; 吴亚丽等, 2018)。但也有研究发现随着预报时效延长其影响将减弱。这里两个试验结果的差异小,可能与中尺度对流系统降水在模式积分数小时后才开始发生有关系。

比较 Exp-4、Exp-5 和 Exp-2 试验结果,可考察模式水平分辨率提高至 3 km 后是否仍保留对流参数化方案或者对流参数化方案中是否考虑浅对流过程对模拟结果的影响。众所周知,作为模式降水预报的一种重要参数化方案,对流参数化方案设计的初衷是为了考虑模式网格不能分辨的深对流云的整体贡献。因此,多数对流参数化方案均假设深对流云只占网格区面积的很小一部分,一般只适用于网格距大于 10 km 的情形(Molinari, et al, 1992)。随着模式网格距缩小、水平分辨率提高,部分深对流云将可以被格点尺度直接分辨,模式降水机制将由云微物理方案直接描述,对流参数化方案的应用将遭遇“分辨率灰色区域”(Gerard, 2007)问题。因此,如

何为处于“分辨率灰色区域”的模式或者在给定分辨率情况下,为某一区域的降水预报找到最合适的对流参数化方案成为一个非常重要的问题(Sun, et al, 2013; 徐道生等, 2015; 万子为等, 2015)。针对华南区域中心 GRAPES_GZ 业务预报模式采用的 SAS 对流参数化方案(Grell, 1993),目前的华南区域中心 GRAPES_GZ 3 km 模式(Exp-2 试验设置)主要是在原对流参数化方案中采用考虑浅对流过程的方法进行调整,避免对流参数化方案被过度调用,以保证模式格点尺度降水与次网格尺度降水的合理分配。

图 10c、d 以及图 10e、f 分别为模式不采用对流参数化方案和对流参数化方案不做调整的模拟结果。显然,如果不采用对流参数化方案(Exp-4),模式的格点尺度降水将产生过度预报问题。从具体降雨量预报看,Exp-4 模拟的 MCS-2 和 MCS-4 的 12 h 累计雨量中心最大值分别为 240 和 180 mm,尽管与实际观测的最大值(如图 9a、b)相比,结果仍偏少,但大暴雨区所覆盖的面积均被过度预报(图 10c、d)。采用未经调整的对流参数化方案时,Exp-5 对 MCS-2 和 MCS-4 最大雨量中心的模拟结果仅为 140 和 90 mm(图 10e、f)。尽管克服了对降水过度预报问题,但模拟的雨量中心最大值却更小,这与对流参数化方案的过度调用有关,有必要作相应的技术调整。

Exp-2 是在 Exp-5 基础上通过在对流参数化方案中考虑浅对流过程而进行的一种调整。对比发现 Exp-2 模拟的两个中尺度对流系统的雨量中心比 Exp-5 的模拟结果还要小,仅为 100 和 80 mm 左右(图 9e、f)。显然,就这两个中尺度对流系统降水预报来说,目前的调整方案并没有达到目的。

图 11 为采用 TS(Threat Score)、FSS(Fraction Skill Score)和 ETS(Equitable Threat Score)3 种预报技巧评分方法对不同试验进行评分的结果,可更为客观地了解不同试验的预报效果。评分主要针对图 9、10 绘图区的格点降水进行,可以看到前两种方法在不同降水分级的评分结果非常类似,邻域法 FSS 由于在观测和预报匹配空间尺度上的扩展,比传统 TS 方法得分更高。MCS-2 的预报,Exp-4 和 Exp-5 对 1.0—50.0 mm 所有 6 个不同分级降水预报的评分均较高,而且 Exp-4 对大于 15 mm 高量级降水的评分更高,反映出不采用对流参数化方案的

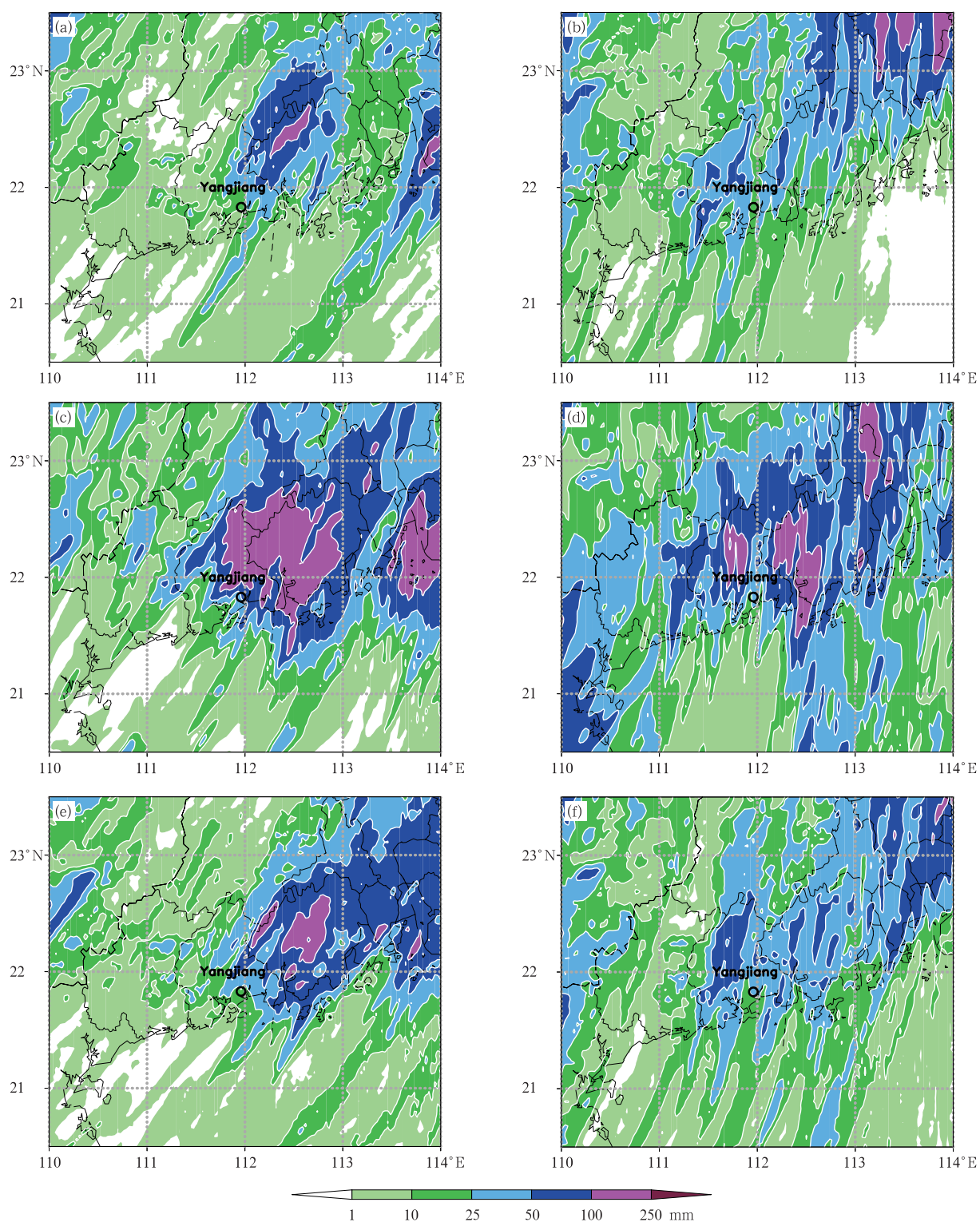


图 10 3 个不同试验模式模拟的两个中尺度对流系统 12 h 累计雨量

(a. Exp-3; MCS-2, b. Exp-3; MCS-4, c. Exp-4; MCS-2,
d. Exp-4; MCS-4, e. Exp-5; MCS-2, f. Exp-5; MCS-4)

Fig. 10 12 h accumulated rainfall (unit; mm) for the two MCSs simulated by the other three different experiments

(a. Exp3; MCS-2, b. Exp3; MCS-4, c. Exp4; MCS-2, d. Exp4; MCS-4, e. Exp5; MCS-2, f. Exp5; MCS-4)

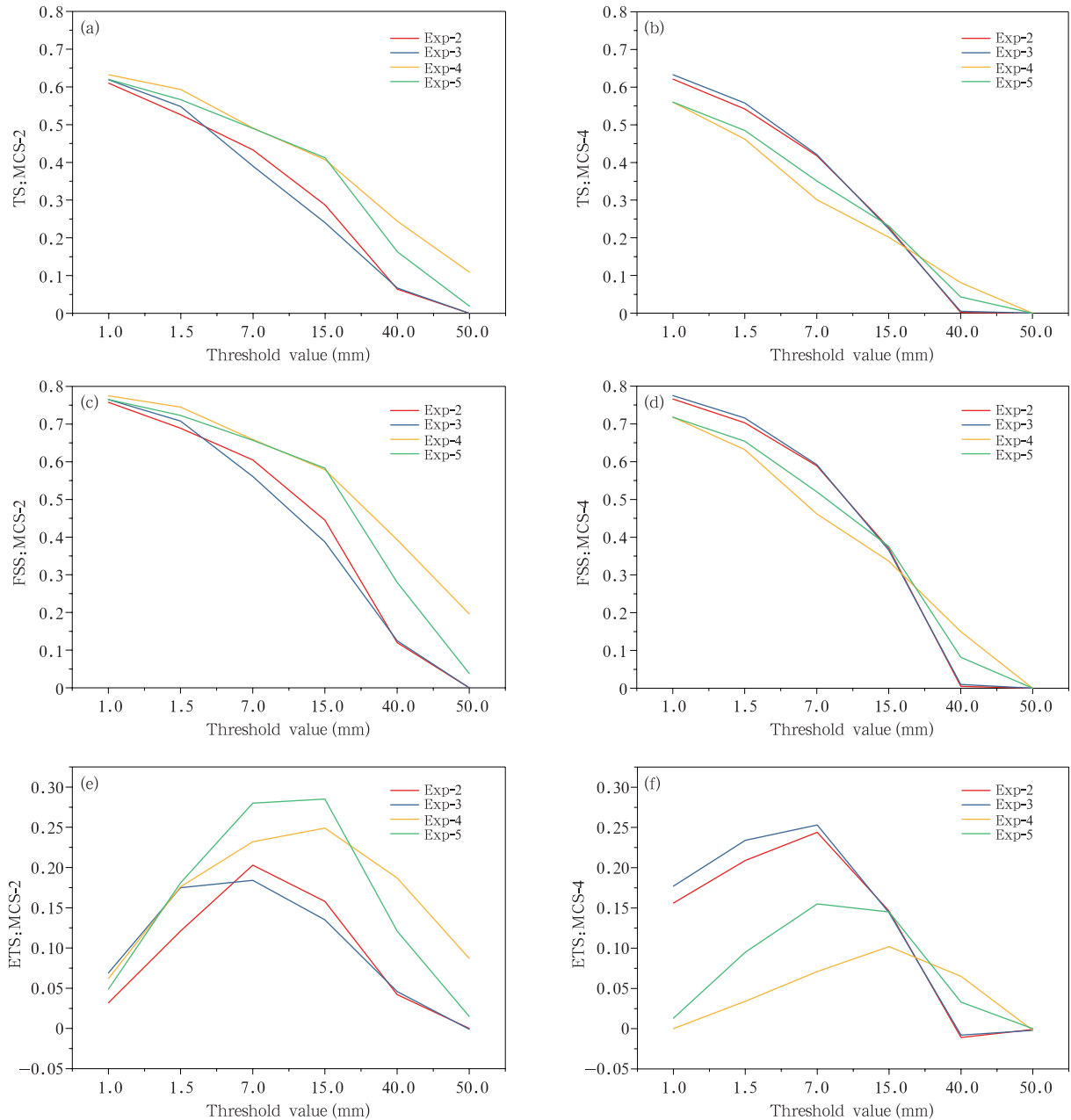


图 11 3 种预报技巧评分方法对 GRAPES_GZ 3 km 模式不同预报试验 12 h 累计降水的评分

(a. TS; MCS-2, b. TS; MCS-4, c. FSS; MCS-2, d. FSS; MCS-4, e. ETS; MCS-2, f. ETS; MCS-4)

Fig. 11 Forecast skill scores for 12 h accumulated rainfall simulated in different experiments by GRAPES_GZ 3 km

(a. TS; MCS-2, b. TS; MCS-4, c. FSS; MCS-2, d. FSS; MCS-4, e. ETS; MCS-2, f. ETS; MCS-4)

Exp-4 预报效果最好(图 11a, c)。MCS-4 的预报, 除大于 40.0 mm 以上降水评分之外, 保留对流参数化方案的几个试验的 TS、FSS 评分效果更好, 而且对对流参数化方案进行调整的试验 Exp-2 和 Exp-3 对 40.0 mm 以下降水分级的预报获得了更高的评分(图 11b, d)。

ETS 评分是对 TS 评分方法的一种改进, 通过剔除一些非技巧因素的影响, 评定结果被视为更加“公正”。与前面分析一致, Exp-4 和 Exp-5 对 MCS-2 降水的预报比其他试验有更高的 ETS 评分(图 11e), 不采用对流参数化方案的 Exp-4 在中、高量级降水的预报上效果更好。对于 MCS-4 的预报,

保留对流参数化方案试验的预报效果更好,除 40.0 mm 以上高量级降水预报之外,其 ETS 评分更高(图 11f)。

是否保留对流参数化方案对两个不同中尺度对流系统降水预报效果存在明显差异,反映出采用数值模式对中尺度对流系统降水进行显式预报仍有不确定性。模式如何描述不同形态中尺度对流系统的降水物理过程,如何对相关的技术方案进行调整值得深入探讨。

5.3 不同试验平均逐时降水强度的对比分析

图 12 给出了不同试验模拟中尺度对流系统在主要活动区 (21.5° — 22.5° N, 111.5° — 112.5° E) 平

均小时雨量变化与观测的比较。就 MCS-2 来说(图 12a),观测的平均降水强度从 29 日 02 时后明显增大,从 04 时开始中尺度对流系统发展成熟后平均雨强超过 6 mm/h 并一直维持至 13 时,最强平均雨强出现在 09 时超过 11 mm/h。与前面分析结果相似,有、无云分析两个试验模拟结果的差异不大,模拟降水强度时间变化特征两者基本一致。同样,是否考虑浅对流两个试验的模拟结果也反映出尽管对流参数化方案的应用都克服了 Exp-4 试验降水过度预报问题,但也模拟出了比观测弱的雨强。图中反映出对流参数化方案不考虑浅对流的试验 Exp-5 模拟的雨强均不超过 4—5 mm/h,与实际观测平均

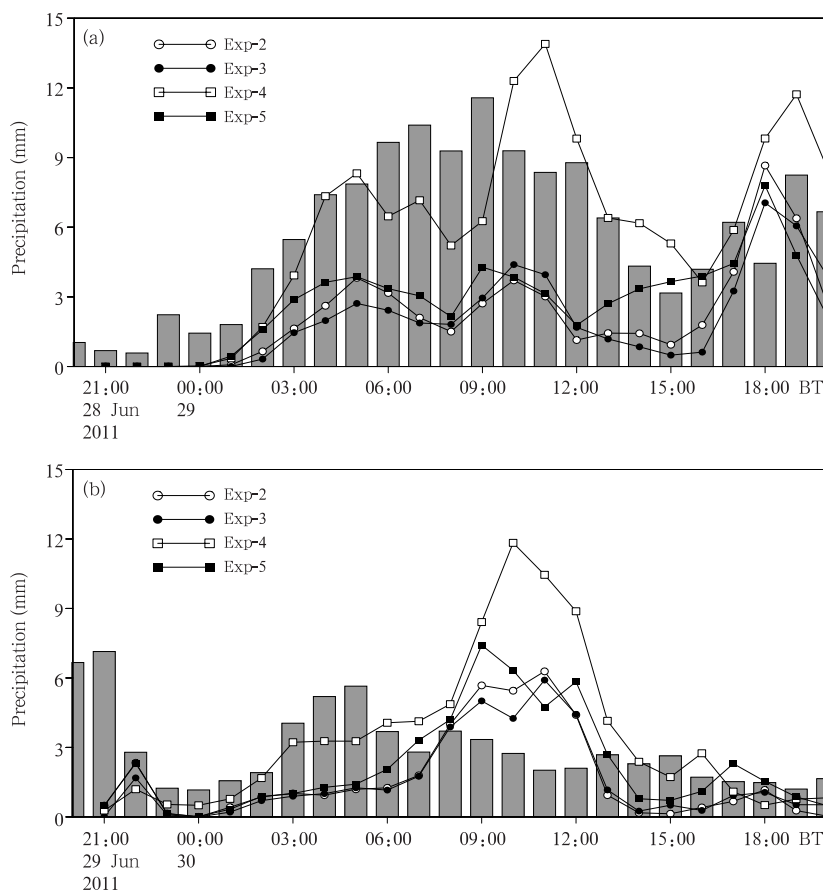


图 12 GRAPES_GZ 3 km 模式不同试验模拟 MCSs 在主要活动区 (21.5° — 22.5° N; 111.5° — 112.5° E) 平均小时雨量变化(线条)与观测(直方柱)的比较
(a. MCS-2, b. MCS-4)

Fig. 12 Comparison of hourly rainfall averaged over the MCSs active area (21.5° — 22.5° N; 111.5° — 112.5° E) between simulations by GRAPES_GZ 3km (lines) and observations (bars)
(a. MCS-2, b. MCS-4)

降水强度普遍超过 8~9 mm/h 仍有比较大的差距。Exp-2 模拟的降水强度更弱,几乎在所有的时次,其模拟的雨强均比 Exp-5 弱。相似的特征在 MCS-4 的模拟结果中(图 12b)也有体现,这里不再赘述。

值得指出的是,虽然不保留对流参数化方案的 Exp-4 试验过度预报了中尺度对流系统产生的降水,但却捕捉到了许多与观测结果相似的特征。不论是对 MCS-2 还是对 MCS-4, Exp-4 均更好地模拟出了中尺度对流系统开始时段降水的发展情况(图 12),模拟的降水强度均在 02—03 时前后开始增大,而且与观测值接近,降水的过度预报主要出现在对流系统发展后期。这些分析结果提示我们,尽管采用高分辨率数值模式对中尺度对流系统降水进行显式预报已成为可能,但结果仍有不确定性,实际预报实践中,积累模式产品应用经验、做好释用工作很有必要。另外,就模式预报技术的发展来说,如何更好地刻画中尺度对流系统的维持发展机制,如何更合理的描述次网格对流效应等问题仍需要细致考虑。

6 结论和讨论

应用地面自动气象站降水观测资料、卫星云图、雷达回波以及 NCEP 再分析格点资料,对 2011 年 6 月底发生于华南沿海由季风槽引发的持续性暴雨过程中的中尺度对流系统的活动及发展环境进行了分析。同时,探讨了利用中尺度数值天气预报模式对中尺度对流系统降水进行显式预报的可能性。主要结论如下:

(1) 本次形成于粤西沿海季风槽环境中的暴雨由多个相继发展的中尺度对流系统造成。在相似的环流形势下,不同中尺度对流系统发展水平尺度有较大差异,最大的可组织发展成 α 中尺度对流复合体,但多数为 β 中尺度,而且以长带状的组织发展形态为主。

(2) 对两个发展形态分别表现为中尺度对流复合体(MCS-2)和 $M\beta$ PECS(MCS-4)的中尺度对流系统对比分析表明,中尺度对流系统的发展与季风槽南侧低空急流上的南风脉动有良好对应关系。季风槽和急流向北推进对中尺度对流系统对流触发有重要影响。

(3) 探空资料诊断结果发现,被认为对中尺度对流系统组织发展有较好指示作用的关键物理量如对流有效位能和风垂直切变难以区分不同中尺度对

流系统的发展趋势。与具有更大水平尺度的 MCS-2 相比, MCS-4 发展环境场反而具有更高的对流有效位能值和更强的风垂直切变。用于诊断的探空资料的代表性将影响诸如“配料法”等暴雨客观预报方法的应用。

(4) 利用华南区域中心 GRAPES_GZ 模式系统对两个暴雨中尺度对流系统进行的模拟预报结果表明, 3 km 分辨率模式可以对中尺度对流系统降水进行显式预报,但结果仍有不确定性,预报结果对是否保留对流参数化方案敏感。尽管不依靠对流参数化方案模式能够描述中尺度对流系统对流初始发展情况,但会过度预报中尺度对流系统发展成熟后的降水。实际预报实践中要用好模式预报产品,需要积累应用经验做好释用工作。

随着水平分辨率提高,尽管数值模式已有可能对中尺度对流系统降水进行显式预报,但如何更加合理和科学地设计模式的降水机制仍需要深入探讨。限于篇幅,文章仅从模式对比试验进行了分析。高分辨率模式中如何修改对流参数化方案,从“尺度自适应”角度完善关于次网格尺度深对流效应及其与浅对流过程、云微物理过程的相互影响,协调模式降水物理过程与动力过程相互作用机制,这都需要在今后工作中加强研究。

此外,需要指出的是本次暴雨中尺度对流系统发生在受季风槽影响环境中,实际上华南发生的暴雨尤其是暖区暴雨大多形成于弱的大尺度强迫环境中,中小尺度扰动信息(如中小尺度地形、外流边界等)是暴雨中尺度对流系统发生更重要的强迫源。模式对此类中尺度对流系统的可预报性如何,模式如何描述这些中小尺度强迫对暴雨中尺度对流系统形成的影响等问题,都需要给予更多关注。

参考文献

- 陈子通, 戴光丰, 钟水新等. 2016. 中国南海台风模式(trams-v2.0)技术特点及其预报性能. 热带气象学报, 32(6): 831-840.
- Chen Z T, Dai G F, Zhong S X, et al. 2016. Technical features and prediction performance of typhoon model for the South China Sea. J Trop Meteor, 32(6): 831-840 (in Chinese)
- 梁巧倩, 项颂翔, 林良根等. 2012. 华南前汛期 MCS 的活动特征及组织发展形式. 热带气象学报, 28(4): 541-551. Liang Q Q, Xiang S X, Lin L G, et al. 2012. MCS characteristics over South China during the annually first rainy season and their organization types. J Trop Meteor, 28(4): 541-551 (in Chinese)
- 柳艳菊, 丁一汇, 赵南. 2005. 1998 年南海季风爆发时期中尺度对

- 流系统的研究: I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件. 气象学报, 63(4): 431-442. Liu Y J, Ding Y H, Zhao N. 2005. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the South China Sea in 1998: I Analysis of large-scale fields for occurrence and development of meso-scale convective systems. *Acta Meteor Sinica*, 63(4): 431-442 (in Chinese)
- 蒙伟光, 张艳霞, 袁金南等. 2014. 华南沿海 2011 年 7 月 15—18 日持续暴雨过程中的季风槽与中尺度对流系统相互作用. 气象学报, 72(3): 508-525. Meng W G, Zhang Y X, Yan J N, et al. 2014. Monsoon trough and MCSs interactions during the persistent torrential rainfall event of 15 - 18 July 2011 along the South China coast. *Chinese J Atmos Sci*, 72(3): 508-525 (in Chinese)
- 孙建华, 赵思雄. 2002a. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I: 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究. 大气科学, 26(4): 541-557. Sun J H, Zhao S X. 2002a. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall of South China Part I: A numerical simulation study of meso- β convective system inducing heavy rainfall. *Chinese J Atmos Sci*, 26(4): 541-557 (in Chinese)
- 孙建华, 赵思雄. 2002b. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II: 物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用. 大气科学, 26(5): 633-646. Sun J H, Zhao S X. 2002b. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall in South China Part II: Effect of physical processes, initial environmental fields and topography on meso- β convective system. *Chinese J Atmos Sci*, 26(5): 633-646 (in Chinese)
- 万子为, 王建捷, 黄丽萍等. 2015. GRAPES-MESO 模式浅对流参数化的改进与试验. 气象学报, 73(6): 1066-1079. Wan Z W, Wang J J, Wang L P, et al. 2015. An improvement of the shallow convection parameterization scheme in the GRAPES-meso. *Acta Meteor Sinica*, 73(6): 1066-1079 (in Chinese)
- 吴亚丽, 蒙伟光, 陈德辉等. 2018. 一次华南暖区暴雨过程可预报性的初值影响研究. 气象学报, 76(3): 323-342. Wu Y L, Meng W G, Chen D H, et al. 2018. A study of the impact of initial conditions on the predictability of a warm-sector torrential rain over South China. *Acta Meteor Sinica*, 76(3): 323-342 (in Chinese)
- 夏茹娣, 赵思雄, 孙建华. 2006. 一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究. 大气科学, 30(5): 988-1008. Xia R D, Zhao S X, Sun J H. 2006. A study of circumstances of meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China. *Chinese J Atmos Sci*, 30(5): 988-1008 (in Chinese)
- 徐道生, 张艳霞, 王刚等. 2015. Meso-SAS 对流参数化方案的改进及其在 9 km 分辨率模式中的应用. 热带气象学报, 31(5): 608-618. Xu D S, Zhang Y X, Wang G, et al. 2015. Improvement of meso-SAS cumulus parameterization scheme and its application in a model of 9 km resolution. *J Trop Meteor*, 31(5): 608-618 (in Chinese)
- 薛纪善, 陈德辉. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京: 科学出版社, 383pp. Xue J S, Chen D H. 2008. Scientific Design and Application of Numerical Prediction System GRAPES. Beijing: Science Press, 383pp (in Chinese)
- 郑永光, 陶祖钰, 王洪庆等. 2002. 黄海及周边地区 α 中尺度对流系统发生的环境条件. 气象学报, 60(5): 613-619. Zheng Y G, Tao Z Y, Wang H Q, et al. 2002. Environment of meso α -scale convective system development in Yellow sea region. *Acta Meteor Sinica*, 60(5): 613-619 (in Chinese)
- Cohen A E, Coniglio M C, Corfidi S F, et al. 2007. Discrimination of mesoscale convective system environments using sounding observations. *Wea Forecasting*, 22(5): 1045-1062
- Coniglio M C, Brooks H E, Weiss S J, et al. 2007. Forecasting the maintenance of quasi-linear mesoscale convective systems. *Wea Forecasting*, 22(3): 556-570
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea Forecasting*, 11(4): 560-581
- Gerard L. 2007. An integrated package for subgrid convection, clouds and precipitation compatible with meso-gamma scales. *Quart J Roy Meteor Soc*, 133(624): 711-730
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon Wea Rev*, 121(3): 764-787
- He Z W, Zhang Q H, Bai L Q, et al. 2017. Characteristics of mesoscale convective systems in central East China and their reliance on atmospheric circulation patterns. *Int J Climatol*, 37(7): 3276-3290
- Houze R A Jr, Smull B F, Dodge P. 1990. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. *Mon Wea Rev*, 118(3): 613-654
- Houze R A Jr. 1997. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox?. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(10): 2179-2196
- Houze R A Jr. 2004. Mesoscale convective systems. *RevGeophys*, 42:RG4003
- Hu M, Xue M, Brewster K. 2006. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. *Mon Wea Rev*, 134(2): 675-698
- Hu M, Xue M. 2007. Impact of configurations of rapid intermittent assimilation of WSR-88D radar data for the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic thunderstorm case. *Mon Wea Rev*, 135(2): 507-525
- Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R L. 2003. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. *Mon Wea Rev*, 131(10): 2428-2449
- Jirak I L, Cotton W R. 2007. Observational analysis of the predicta-

- bility of mesoscale convective systems. *Wea Forecasting*, 22(4): 813-838
- Laing A G, Fritsch J M. 1997. The global population of mesoscale convective complexes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 123(538): 389-405
- Laing A G, Fritsch J M. 2000. The large-scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes. *Mon Wea Rev*, 128(8): 2756-2776
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in East China. *Mon Wea Rev*, 141(5): 1629-1647
- Molinari J, Dudek M. 1992. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Mon Wea Rev*, 120(2): 326-344
- Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 128(10): 3413-3436
- Sun Y, Yi L, Zhong Z, et al. 2013. Dependence of model convergence on horizontal resolution and convective parameterization in simulations of a tropical cyclone at gray-zone resolutions. *J Geophys Res Atmos*, 118(14): 7715-7732