

鲁蓉, 孙建华, 傅慎明. 2018. 近海水汽初值和对流影响一次华南前汛期沿海强降雨对流系统发展过程的机理研究 [J]. 大气科学, 42 (1): 1–15. Lu Rong, Sun Jianhua, Fu Shenming. 2018. Influence of offshore initial moisture field and convection on the development of coastal convection in a heavy rainfall event over South China during the pre-summer rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 1–15, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16261.

近海水汽初值和对流影响一次华南前汛期沿海强降雨对流系统发展过程的机理研究

鲁蓉^{1,2} 孙建华^{1,3} 傅慎明¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 本研究在对华南季风降水试验 (SCMREX) 观测资料分析的基础上, 采用数值模拟试验探讨南海北部区域湿度场初值误差和海上对流对 2014 年 5 月 8 日华南沿海地区的一次强降雨过程的中尺度对流系统 (MCS) 的发展和移动的影响。加密探空和风廓线观测分析表明在珠江口地区有西南风和偏东风急流形成的辐合区, 为对流在该地区增强发展提供了条件。增加和减少近海湿度以及关闭积云和微物理过程潜热释放, 所造成的温度场以及风场的变化对广东沿海地区的对流的强度和移动路径都有明显的影响。特别是增加海上关键区的湿度, 由于海上对流的发展改变了整个区域的环流, 抑制了陆地上对流的发展。关闭海上关键区对流过程潜热的释放, 导致低空急流到达更加偏北的位置, 对流系统在模拟的后期向东北移动。通过这些试验表明, 海上的湿度等要素场和对流活动对沿海地区的降雨预报有着十分重要的影响, 需要进一步加强海上观测及其资料同化方法。

关键词 中尺度对流系统 低空急流 敏感试验 对流潜热 降雨预报

文章编号 1006-9895(2018)01-0001-15

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16261

Influence of Offshore Initial Moisture Field and Convection on the Development of Coastal Convection in a Heavy Rainfall Event over South China during the Pre-summer Rainy Season

LU Rong^{1,2}, SUN Jianhua^{1,3}, and FU Shenming¹

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract This paper utilizes observation data from the SCMREX (Southern China Monsoon Rainfall Experiment) and numerical sensitive simulation experiments to investigate the influence of moisture amount and convection development over the northern South China Sea on MCS (Mesoscale Convective System) of a heavy rainfall event in coastal South China on May 8, 2014. Intensive soundings and wind profiler data reveal that there existed a convergence region formed

收稿日期 2016-11-07; 网络预出版日期 2017-05-16

作者简介 鲁蓉, 女, 1990 年出生, 博士研究生, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: lurongiap@sina.com

通讯作者 孙建华, E-mail: sjh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41675045, 灾害天气国家重点实验室基金项目 2016LASW-B05

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41675045), Fund of National Key Laboratory of Disaster Weather (Grant 2016LASW-B05)

by the southwesterly and easterly jet in the Pearl River delta, which provided a favorable condition for the development of convection. When the initial relative humidity was increased or decreased in the offshore area, or latent heat released from the cumulus and microphysical processes were turned off, significant effects could be found on the intensity and movement of convection in the coastal area of Guangdong owing to the adjustment of temperature and wind fields. In particular, when increasing offshore initial humidity, prosperous sea convection modified the circulation in the entire simulation area, and suppressed the development of convection over the land. Moreover, if latent heat from cumulus and microphysical processes were turned off, the low-level jet could reach further north, and the convective system moved to the northeast in the later stage. These experiments indicate that the offshore initial moisture field and convection are indeed important for precipitation forecast in the coastal area. Therefore it is necessary to enhance offshore observation and data assimilation method in the future.

Keywords Mesoscale Convective System (MCS), Low-level jets, Sensitivity experiment, Latent heat, Rainfall forecast

1 引言

华南地处我国最南端, 每年汛期开始早、持续时间长、暴雨频繁, 华南前汛期是我国的主要雨带之一。20 世纪 80 年代后, 针对华南前汛期暴雨已开展一些外场观测试验和不少研究工作(张庆红等, 2000; 孙健等, 2002; 周秀骥等, 2003), 特别是针对产生洪涝的暴雨过程开展了深入研究, 如 1994 年珠江流域的暴雨(梁必骥, 1997; 孙建华和赵思雄, 2000, 2002), 1998 年珠江流域的暴雨(Zhao et al., 2007) 等。

华南的暴雨中, 暖区暴雨是一个独特的降水类型(黄土松和《华南前汛期暴雨》编写组, 1986)。暖区暴雨, 一般是指发生在距地面锋面 200~300 km 的暖区一侧的暴雨, 或者是发生在西南风和东南风汇合气流中, 甚至无切变的西南气流里, 但不受台风等热带系统控制。暖区暴雨有着鲜明的特征: 降水强度大、雨量相对集中、范围比锋面暴雨小、突发性强(广东气象局《广东省天气预报技术手册》编写组, 2006)。这些特征使得暖区暴雨的预报难度很大。针对华南暖区暴雨的触发机理和环流特征也有不少研究(黄土松和《华南前汛期暴雨》编写组, 1986; 丁治英等, 2011; 夏茹娣等, 2006; Wang et al., 2014; Wu and Luo, 2016), 华南暖区暴雨具有显著的中尺度特征, 与中尺度辐合线、低空急流有直接联系。经过众多气象工作者的努力, 对华南前汛期暴雨的研究取得了一些进展, 但每年各气象台站对前汛期暴雨的空报、漏报现象时有发生, 因此对前汛期暴雨的研究任务依然任重道远。

2014 年 5 月 8~11 日广东出现了持续性的强降雨过程(麦健华等, 2016), 其中 5 月 8~9 日广东多地出现暴雨到大暴雨, 局部出现特大暴雨, 珠江口附近多个站点累计降水量超过 200 mm, 此次强

降水过程使广东地区出现洪涝灾害, 并造成了人员伤亡以及严重的经济损失。此外, 中国气象科学研究院于 2013 年 5~6 月和 2014 年 5~6 月实施华南季风降水试验(SCMREX), SCMREX 是针对我国华南季风强降水, 尤其是突发性暴雨灾害亟待解决的科学问题而提出的国际科学试验计划(Luo et al., 2017)。试验区域选为广东、广西、海南、香港以及周边海域, 在原有的业务观测网的基础上实行加密观测。5 月 8~9 日过程处于 SCMREX 的观测时段, 观测资料丰富, 且中尺度对流系统在海岸及近海地区持续时间长, 造成了强降雨过程(图 1), 给预报带来了一定的难度。因此, 这个个例值得深入探讨。

中尺度对流系统(MCS)的可预报性也是中尺度气象学的重要研究内容, 有很多学者利用数值模式探讨了 MCS 的可预报性(Anthes et al., 1985; Zhang et al., 2006, 2007; Wandishin et al., 2008, 2010; Cintineo and Stensrud, 2013)。Stensrud and Wicker (2004) 根据业务模式的误差, 研究在给定环境条件的不确信范围内的 MCS 可预报性, 且中尺度的可预报性关注的是 MCS 系统本身以及其产生的天气现象。此外还有不少学者对我国的梅雨锋上 MCS 的可预报性展开了深入研究(Bei and Zhang, 2007; Luo and Chen, 2015)。对于初始误差, Wandishin et al. (2008, 2010) 的研究结果发现湿度扰动对最大上升运动的强度和地面大风的影响最大, 而所有变量的扰动对 MCS 特征的预报都有显著影响。针对我国飚线系统的研究发现水汽可能影响 MCS 的组织类型和强度(孙建华等, 2014)。广东沿海地区的对流系统和降雨的预报难度较大, 主要也是由于广东地区紧邻南海, 南海对流活动产生的热量和水汽输送可以影响该区域的大气环流特征及对流系统的发生发展(Ciesielski and Johnson, 2006; 柳艳菊

等, 2005; 柳艳菊和丁一汇, 2005)。此外, 由于海上没有丰富的观测资料, 在实际的工作中沿海的天气预报和科学研究受到了很多局限, 因此, 本研究将探讨邻近广东的南海北部地区的湿度场和对流产生的感热、潜热的变化对沿海陆地上 MCS 的影响。

2 资料和方法

2.1 资料

本文分析的资料包括中国气象局和 SCMREX 提供的各种观测资料, 其中包括全国逐小时加密降水资料、24 h 降雨量、每 3 h 的地面观测和每 6 h 的探空资料以及华南地区多部雷达的基数据, FY-2E 气象卫星的亮温资料, 以及欧洲中期天气预报中心 (ECMWF ERA-interim reanalysis data) 逐 6 h 的全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。文中所有资料和模拟分析时间统一采用协调世界时。

2.2 模拟试验设计

由于观测资料的时空分辨率不高, 无法研究降水系统的结构特征和影响其移动的主要因子。本文采用 WRF 模式开展模拟试验, 三层嵌套网格的水平格距分别为 27 km、9 km、3 km (图 2a), 采用双向嵌套, 垂直方向为 50 层。微物理方案为 WSM6, 第一、二层模拟区域积云方案为 Betts-Miller-Janjic, 第三层嵌套不采用积云方案。长波辐射选取 RRTM 方案, 短波辐射为 Dudhia 方案, 陆面层为 Noah 方案, 行星边界层选取 Yonsei University 方案。欧洲中心 6 h 一次的再分析资料作为初始条件和边界条件, 同时同化地面观测资料和探空资料改进初值。模拟初始时间为 2014 年 5 月 8 日 00 时 (协调世界时, 下同), 积分时长为 24 h。

在成功模拟系统的发生发展过程后, 通过设计系列数值模拟试验来探讨临近广东沿海的南海北部区域 ($20^\circ\text{N} \sim 24^\circ\text{N}$, $111^\circ\text{E} \sim 118.5^\circ\text{E}$) 中海洋部分 (图 2b, 本研究中称为关键区) 的初值误差对大陆沿海地区对流发展和移动的影响 (表 1)。因为湿度场是初值中误差最大的场, 且对对流的影响也特别显著 (Wu et al., 2013; 孙建华等, 2014; Luo and Chen, 2015)。因此, 首先将初始场中海上关键区内整层湿度分别降低 10% (RH90)、20% (RH80), 再分别将同区域湿度增加 10% (RH110)、20% (RH120)。在改变湿度场试验的基础上, 关闭关键区的对流潜热和感热 (CLS), 试验不改变初始场湿度, 而是只让该地区不发生对流, 进而研究其对大

陆沿海地区对流系统造成的影响。

表 1 试验方案

Table 1 Configuration of the numerical experiments

试验名称	试验方案
CNTL	对照试验
RH90	海上关键区内初始场水汽整层降低 10%
RH80	海上关键区内初始场水汽整层降低 20%
RH110	海上关键区内初始场水汽整层增加 10%
RH120	海上关键区内初始场水汽整层增加 20%
CLS	关闭海上关键区内积云与微物理过程潜热和感热释放

3 个例概况和观测资料分析

2014 年 5 月 8~9 日广东中南部及近海地区出现了一次强降水过程, 降水等级达到大暴雨甚至局地特大暴雨, 最大累计降水出现在珠江口附近, 主降雨发生在 8 日傍晚至夜间。从雷达组合反射率来看, 8 日 04 时左右对流在广西东部和广东西部触发, 发展起来后逐渐形成组织程度较高的中尺度对流系统, 从云顶亮温 (TBB) 来看, MCS 的规模已经达到 α 中尺度。8 日 14 时以后对流系统开始向海上移动, 且期间珠江口地区有源源不断的新对流生成, 与原有的对流主体合并发展, 使得整个对流系统在沿海和近海地区维持了较长时间, 于 9 日夜间才逐渐衰弱消亡。

此次过程的环流背景非常利于对流系统的发展, 8 日华南地区主要处在 500 hPa 高空槽前 (图 3a), 低层 850 hPa 华南大部分地区位于低涡前侧 (图 3b), 且低空急流在傍晚至夜间发展起来, 急流的左侧伴有低涡的活动, 强辐合上升可以造成较强的降水。天气系统移动缓慢, 使得雨带能够维持较长时间。虽然南海季风潮尚未爆发, 但此次低空急流是在热带暖湿气流中风速加大形成的。从阳江探空站的风场可以看到 700 hPa 以下主要为西南风, 且风速从 8 日 00 时至 9 日 00 时是逐渐增加的, 有边界层和对流层低层两支急流 (图 4b)。结合大气可降水量和对流有效位能 (CAPE) 值来看 (图 3, 图 4a), 强劲的西南风给广东地区带来了大量的水汽和热量。总体来说, 此次大暴雨过程是在有利的大尺度环流形势稳定维持下发生的。

阳江处于此次过程主雨带的西侧, 其本站降雨量较小, 珠海站位于强降雨中心附近, 该站主要的降雨发生在 12 时以后。如图 5a 所示, 降水系统过境前 00~06 时低层 600 m 以下为偏东风, 中层为南风, 与阳江站对比, 可以确认在珠江口的对流层

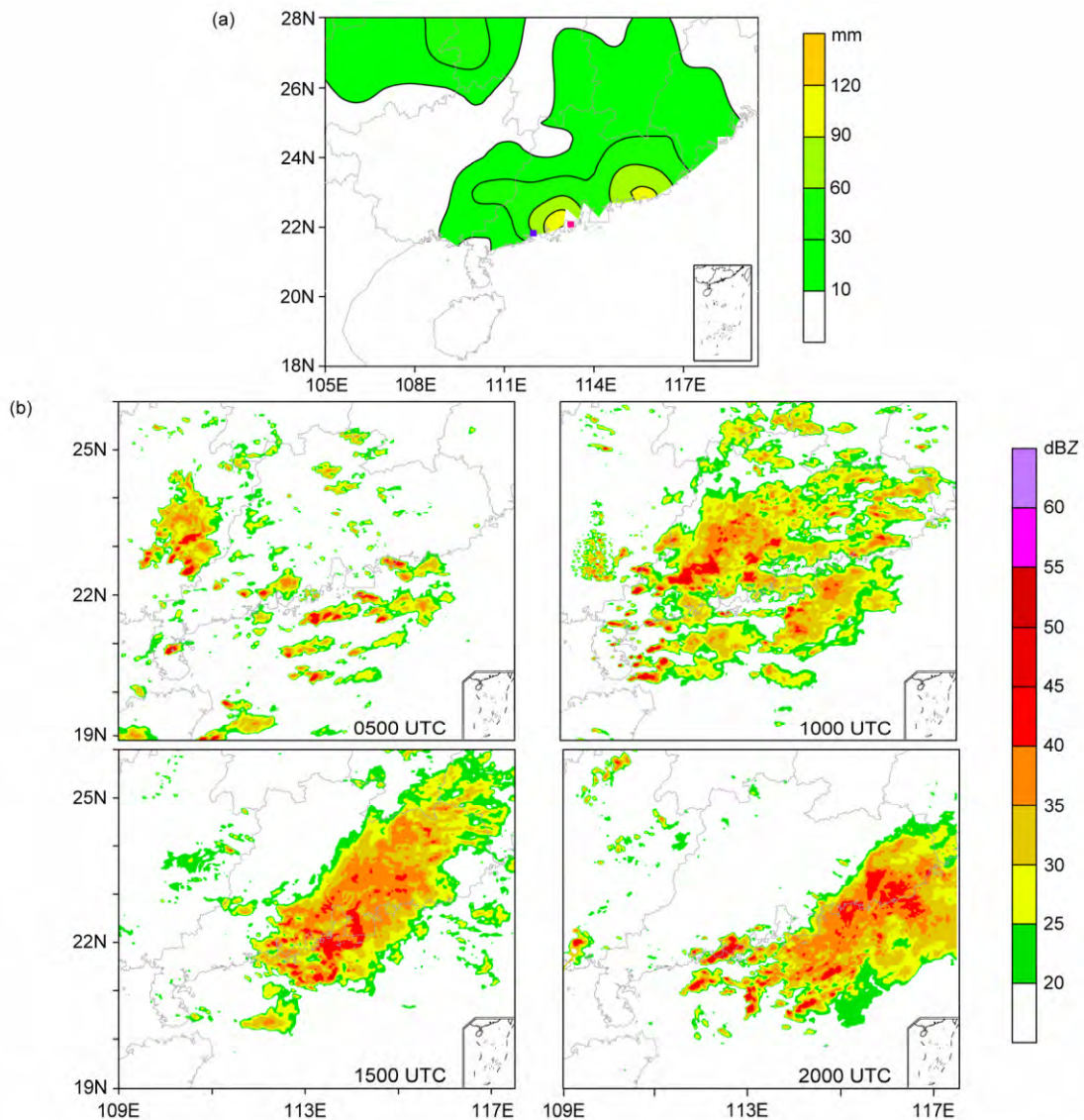


图1 2014年5月8日(a)00时(协调世界时,下同)至9日00时24小时观测降雨量(单位:mm),以及(b)05、10、15、20时雷达组合反射率(单位:dBZ)。(a)图中蓝色和红色方块分别表示阳江和珠海观测站位置

Fig. 1 (a) Observed accumulative precipitation from 0000 UTC 8 to 0000 UTC 9 May 2014 (units: mm) and (b) composite radar reflectivity at 0500 UTC, 1000 UTC, 1500 UTC, 2000 UTC 8 May (units: dBZ). The blue and red squares in figure (a) indicate the locations of Yangjiang and Zhuhai observation stations, respectively

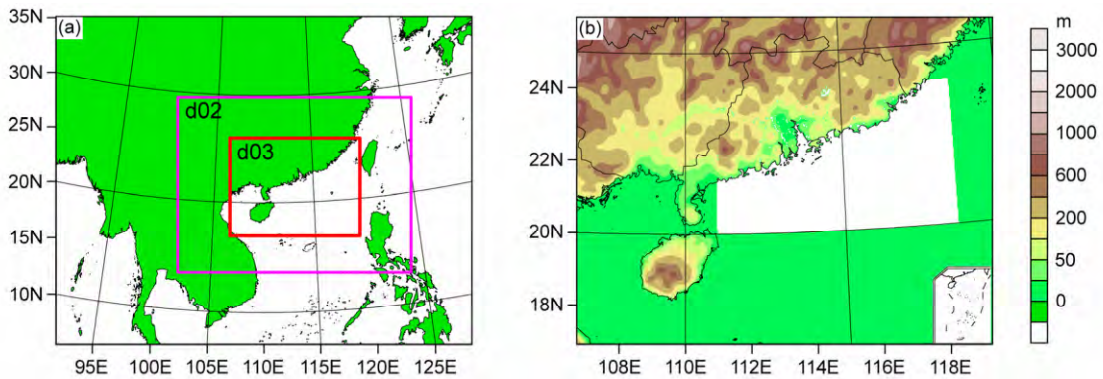


图2 模拟区域图:(a)三重嵌套网格范围;(b)d03区域范围(阴影为华南地区地形高度,白色区域为所有敏感试验的海上关键区)

Fig. 2 Schematic diagram of simulation domains: (a) Triple nesting domains; (b) d03 domain with shaded areas indicating South China terrain height and the white area indicating the critical offshore zone of all sensitive experiments

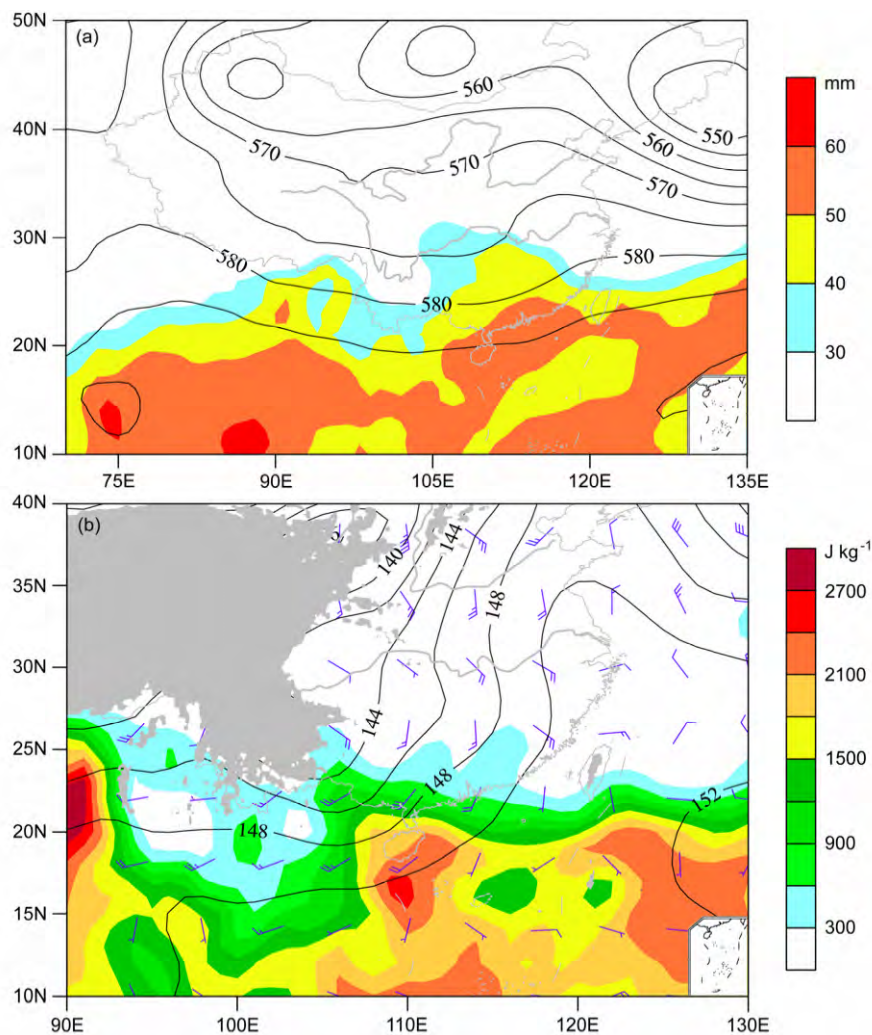


图3 2014年5月8日12时的环流形势:(a) 500 hPa位势高度(黑色等值线,单位: dagpm)和整层可降水量(阴影,单位: mm);(b) 850 hPa位势高度(黑色等值线,单位: dagpm)和风向(风标,风向杆全风速为 4 m s^{-1})以及对流有效位能(CAPE;阴影,单位: J kg^{-1})

Fig. 3 Synoptic weather pattern at 1200 UTC 8 May 2014: (a) Geopotential height (black isoline, units: dagpm) at 500 hPa and precipitable water (shaded, units: mm); (b) geopotential height (black isoline, units: dagpm), wind field (barbs, full bar represents wind speed of 4 m s^{-1}) at 850 hPa, and convective available potential energy (CAPE; shaded, units: J kg^{-1})

低层有西南风急流与偏东风急流的辐合。1500 m 以上即 850 hPa 左右转为偏西风, 风向随高度顺时针旋转有弱的暖平流。08 时之后低层偏东风和 1500 m 以上偏西风风速增加, 风向未改变, 对应小时降水量(图 5b)和雷达回波来看, 区域内有小尺度的局地对流生成。13 时开始, 中低层风向发生突变且风速增加, 风向由偏东风转为偏西风, 对应着强对流天气系统过境, 并且系统风为明显的西风(13~14 时), 而中层环境风为西南风(14 时之后)。18 时之后, 低层风减弱, 系统离开珠海地区向东移动。上述分析表明中低层的风速和风向的改变与对流系统之间有着密切的关联。

4 试验结果分析

4.1 模拟降雨量

对照试验模拟的 2014 年 5 月 8 日的日降水量分布(图 6a), 总体来说模拟雨带与观测基本一致, 强降水中心集中在广东沿海地区也契合较好, 但珠江口以东的降水中心没有模拟出来。因为模拟试验能够基本反映此次降水过程, 因此将它作为本文研究的对照试验, 与其他敏感试验进行对比分析。结果表明: RH90 试验在沿海地区降水中心强度减弱, 且粤北沿海降雨量显著降低, 而内陆地区 30 mm 以上降水区域有所增大, 整体来说雨带与对照试验较

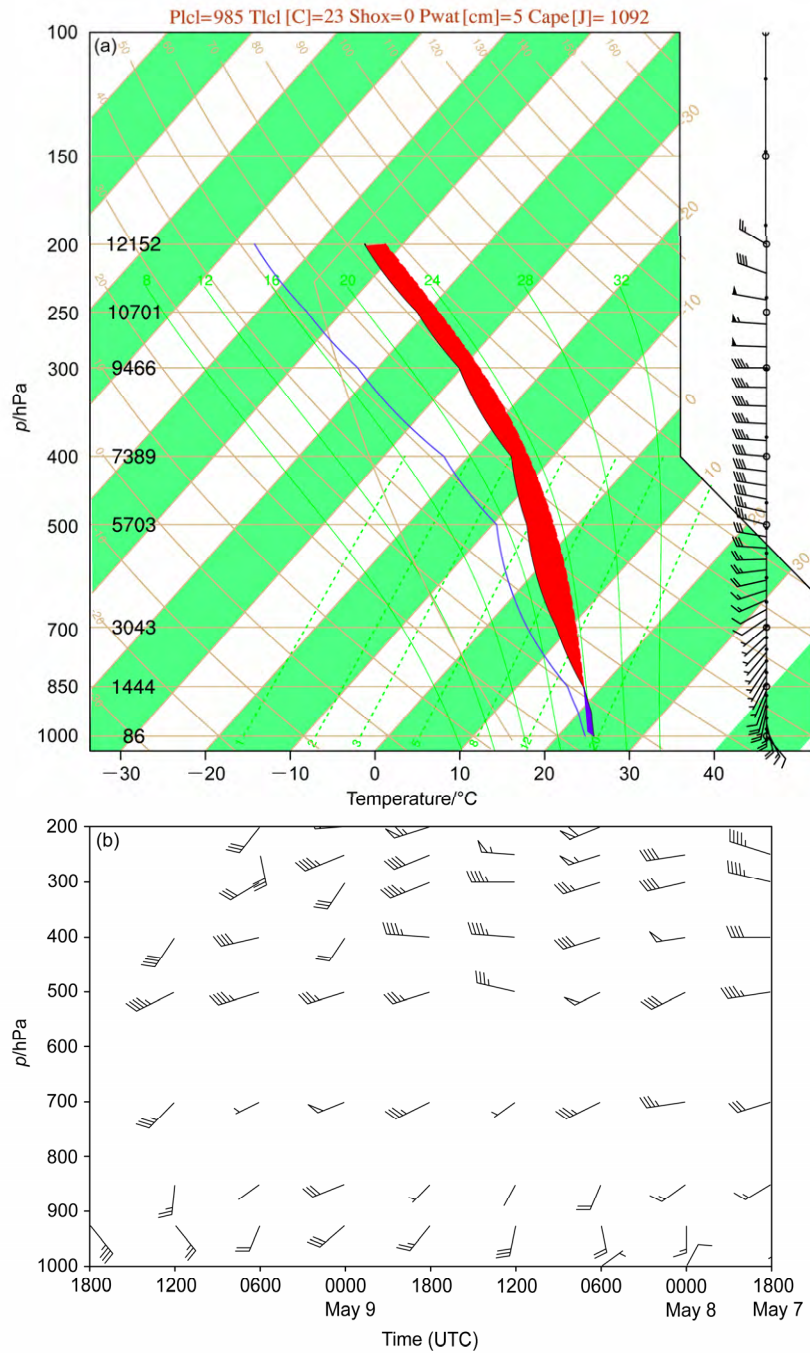


图4 (a) 2014年5月8日12时阳江站的 T - $\log p$ 图(黑色实线表示温度曲线,蓝色实线为露点温度曲线,单位: $^{\circ}\text{C}$), (b) 2014年5月7日18时至5月9日18时阳江站的探空风廓线(单位: m s^{-1})

Fig. 4 (a) Skew- T / $\log p$ diagram at Yangjiang station at 1200 UTC 8 May 2014 (the black line represents the temperature profile while the blue line represents the dew point profile, units: $^{\circ}\text{C}$), (b) wind profiles at Yangjiang station from 1800 UTC 7 May to 1800 UTC 9 May, 2014 (units: m s^{-1})

为相似但位置略偏西(图 6c); RH80 试验的降水比 RH90 弱, 雨带差异更为明显(图 6d); RH110 试验在沿海降水强度减弱幅度很大, 降水中心也更加偏向内陆, 降水在广东内部分布均匀(图 6e); RH120 在所有试验中沿海降水强度最弱, 且降水大

值中心位于粤西和粤北, 雨带与对照试验差异也最为突出(图 6f); CLS 试验的雨带偏向内陆且平行于海岸线分布(图 6b), 但这个试验模拟出了雨带上的两个中心, 尽管雨带整体比对照试验偏北偏西。以上分析表明增加和减少关键区的湿度都造成

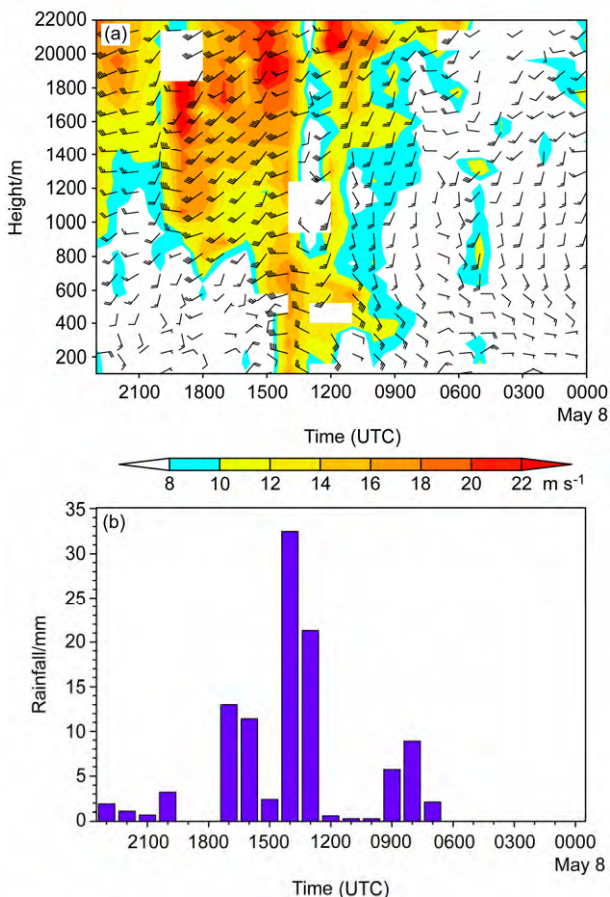


图5 2014年5月8日00~23时珠海站的(a)风廓线(阴影为风速,单位: $m s^{-1}$)和(b)逐小时雨量分布(单位: mm)。横坐标(时间)从右向左

Fig. 5 (a) Wind profiles (units: $m s^{-1}$) and (b) hourly rainfall (units: mm) at Zhuhai station on 8 May. The shadings in (a) represent wind speed, abscissa represents time (from right to left)

了雨带的北移和减弱,模拟降雨量的差异是由模拟的对流系统发生发展过程的差异造成的,因此,下面将分析各试验中MCS的特征。

4.2 对比各试验MCS演变

为了探讨几组试验MCS演变的差异,将它们模拟的雷达组合反射率逐一进行对比(图7),重点关注对流系统强度和位置的变化。由于对流发展起来后对环境场影响剧烈,那么此时的差异场因为对流造成的强干扰不能反应初始场带来的直接变化和调整;另一方面模式处于启动阶段要素场的差异又较小,所以选择对流初生不久的8日07时作为差值场的代表时刻,关闭对流潜热感热试验响应变化更加迟缓,以8日09时为代表,进行各要素场演变的详细分析。文中所有的差值场皆为对照试验变量减去敏感试验变量。

降低海上关键区湿度后,RH90试验中(图7b),07时之前其与对照试验相比差异微乎其微,之后,CNTL试验在珠江三角洲南部和近海陆续有新对流生成,融入主体后迅速向偏东方向移动,但是RH90试验对流系统主体向东移动缓慢,大约滞后3个小时。RH90试验的后期与CNTL试验有两点不同:(1)13时以后粤北的层状云对流趋于消散;(2)MCS到达海岸线以后,整体东移减缓,且新生的强对流始终停留在紧邻珠三角的海域内。总的来说,降低海上关键区域10%的湿度后,对流的组织形态和强度变化不是很大,主要差异在于对流向东的移速减缓,整体位置较CNTL试验而言更加偏向于内陆方向。与RH90试验结果对比,RH80试验由于湿度改变更大(图7c),造成的对流和降水的误差也更加明显。首先是陆地上广东中西部MCS发展初期强度就相对较弱,之后更是直接向东北方向移动远离海岸。17时之后,珠三角地区陆上对流发展起来,不断新生后仍向东北方向移动,主体只有小部分移动到海上。概括来看,初始场海上湿度降低越多后造成的对流系统误差也就越大,使得对流更偏向内陆。

减少海上关键区的相对湿度后,MCS的强度减弱且移动方向偏向内陆。下面分析海上关键区域湿度增加后MCS的演变情况。RH110试验的结果是海上MCS的发展更为剧烈(图7d)。从8日01时开始,海上关键区域的西南边界处强对流首先启动,对流系统随后按照盛行风的方向逐渐向东北移动并减弱衰亡。但是随后南边界及其南侧不断有旺盛的新对流生成,受新生对流传播方向的影响,后期海上对流改为向东甚至东南方向移动。RH110试验05~08时对流在内陆比CNTL试验弱,但是在海岸线附件发展旺盛。8日09时以后在广东地区大范围内迅速发展,接着向东北方向移动并减弱。与CNTL试验比较,其对流组织更为零散,整体而言,对流强度也弱一些。RH120和RH110试验结果类似,海上关键区的西边界和南边界附近也是由于较大的湿度梯度激发了较强的对流(图7e),这些对流在盛行风的影响下同样在海上向东北移动,但很快消亡。而在陆地上新生的对流相比于CNTL试验和RH110试验更弱,影响范围小且组织程度不高,在向东北移动的过程中也是迅速消减。

增加和减少海上关键区湿度场的试验结果表明,海上关键区湿度场的改变对陆地上广东地区的

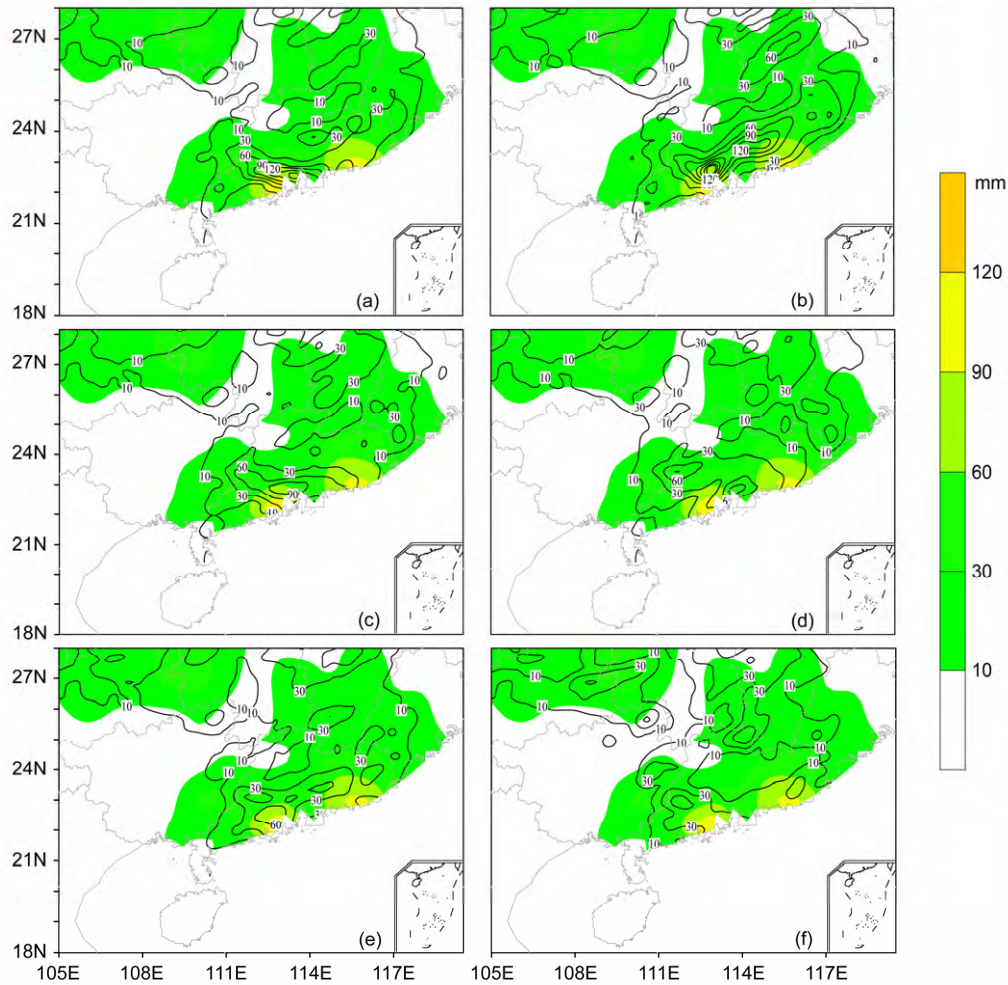


图 6 2014 年 5 月 8 日所有试验的模拟日降雨量 (黑色实线, 单位: mm) 和观测的日降雨量 (阴影, 单位: mm): (a) CNTL 试验; (b) CLS 试验; (c) RH90 试验; (d) RH80 试验; (e) RH110 试验; (f) RH120 试验

Fig. 6 Comparisons of simulated daily precipitation (black solid lines, units: mm) for all experiments and observed daily precipitation (shaded, units: mm) on 8 May 2014: (a) CNTL experiment; (b) CLS experiment; (c) RH90 experiment; (d) RH80 experiment; (e) RH110 experiment; (f) RH120 experiment

MCS 发展的强度和路径有显著的影响。海上湿度的改变从陆地上对流生成时刻开始, 就会对 MCS 产生影响: 对照试验中 05 时 MCS 生成后, 每组敏感试验同时刻的 MCS 与之相比, 形态或强度上都开始出现差异。具体来说, 减少湿度的试验改变相对较小, 只是强度略有减弱。而增加湿度试验从 05 时开始, 不仅陆地上 MCS 强度减弱显著, 没有组织成较强的系统 (个别时刻强盛的对流广泛分布), 且生命史短, 另外对流位置偏差也大。

海上湿度的影响主要体现在水汽输送以及海上对流的潜热释放两个方面, 减少海上关键区的湿度场造成陆地上对流减弱主要的原因可能是水汽输送有所减弱, 而增加湿度场陆地上对流减弱, 主要的原因可能是海上对流增强后, 释放的潜热增

加, 改变环流特征。为了更直接地探索海上对流对陆地对流的影响, 我们设计了关闭海上关键区内积云和微物理过程中潜热释放试验, 即 CLS 试验。CLS 试验与 CNTL 试验对比, 整个环境场的响应和调整比较缓慢, 主要影响体现在后期对流形态和 MCS 移动路径上。在模式积分的前 8 小时中, 从雷达回波反射率来看, 两者差异甚微 (图 7f)。说明在对流整体未发展起来或者不够强盛时, 关闭模式中海上对流过程的潜热, 并不会影响到内陆对流的生成和移动。09 时以后, CNTL 试验 MCS 向东北偏东方向移动入海, 后期向东南方向移动和发展; 但是 CLS 试验 MCS 的移动路径在 09 时之后与 CNTL 试验的东南移向相反, 即向东北方向移动。总体而言, 当陆地上对流系统靠近海岸时, 近海

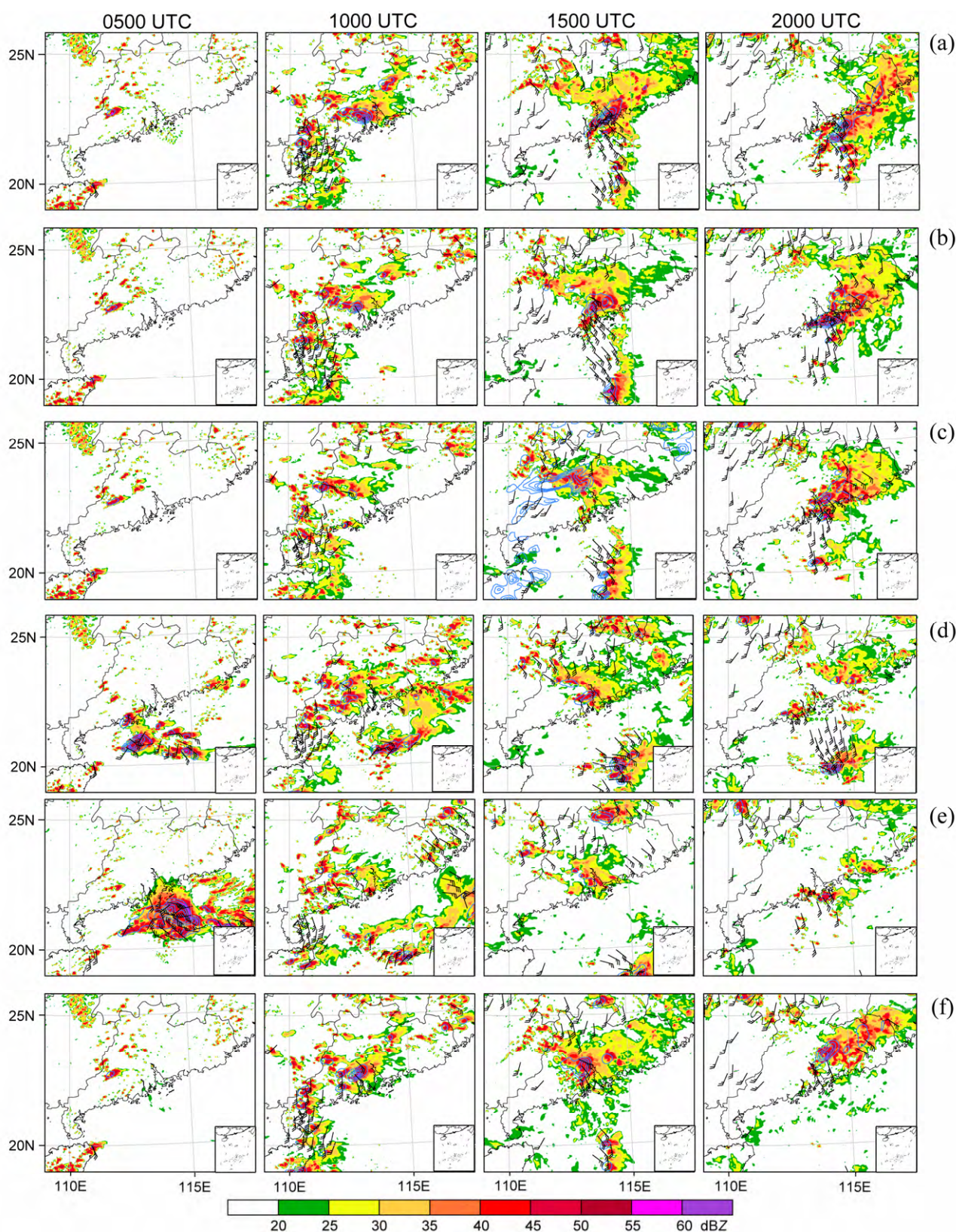


图7 2014年5月8日所有试验模拟的雷达组合反射率(阴影,单位:dBZ)、地面10 m风场(风标,大于 8 m s^{-1})以及小时雨量(蓝色等值线:间隔10 mm):(a) CNTL试验;(b) RH90试验;(c) RH80试验;(d) RH110试验;(e) RH120试验;(f) CLS试验

Fig. 7 Composite radar reflectivity (shaded, units: dBZ), hourly rainfall (blue lines, interval: 10 mm), and surface wind at 10 m (barbs, $> 8\text{ m s}^{-1}$) simulated by all experiments on 8 May 2014: (a) CNTL; (b) RH90; (c) RH80; (d) RH110; (e) RH120; (f) CLS

有利的对流条件会促使 MCS 在海岸附近增强, 并可能延长其生命史。

4.3 各试验造成对流发展差异的原因分析

试验中只改变了海上某个区域的初值湿度场或者关闭, 为什么会对照陆地上对流的发生发展过程有强度, 甚至移动路径完全改变的影响? 下面将分析造成模拟对流系统发展过程改变的原因。

RH90 和 RH80 试验前期温度、气压、湿度、风场等要素调整改变幅度不大, 主要差异是对流系统的东移分量偏小, 即向海洋移动的速度减缓。首先分析低层 925 hPa 的风、温度场的调整情况。珠三角外围邻近的海域上气温差值场 (CNTL - RH90/80) 为正值, 表示敏感试验在此区域内温度降低, 结合 RH80 试验比 RH90 试验海上关键区湿度降低多, 说明关键区域湿度减少越多, 温度下降幅度却越小 (图 8a、b)。而紧邻海岸内陆地区温度较 CNTL 试验则偏高, 且 RH80 的增幅更大一些。CNTL 试验与 RH90 和 RH80 试验差值风场上, 沿海岸地区陆地上有弱东北风, 说明敏感试验西南风要稍强一些, 不利于 MCS 到达珠三角继续向南海移动, 而是向东北方向移动。珠三角外围海上差值场有明显的东风分量, 对应的是 CNTL 试验在沿海有较强偏东风, 它与广东南部来的偏南风辐合, 有利于对流在珠三角和邻近海域发展, 而敏感试验在海上则是一致的偏南风, 它们偏东风的位置主要在广东中部, 图 8 的辐合差异场也可以体现出其相应的辐合区更加远离海岸偏向内陆。850 hPa 的差值风场与 925 hPa 相似 (图 8c、d), 但是温度差值场却已经相反, 同区域海洋温度比对照试验偏高, 而沿海陆地温度偏低。500 hPa 和 200 hPa 温度差值场分布与 850 hPa 相似, 但沿海陆地上的正值区范围更为狭小 (图略)。减少关键区湿度后低层陆地温度升高是由于沿海陆地上对流发展弱, 低层的降温效果减小; 中层和高层温度降低, 是因为对流的潜热释放减小。在海上敏感试验存在辐合中心 (图 8), 对流相对活跃。因此, 其温度低层偏低, 中高层偏高。

RH110、RH120 试验与减少湿度的两组试验相比, 整个温度场和风场以及 MCS 的发展过程变化较大。低层 925 hPa 上, 关键区域的西侧 (113°N 以西) 海洋和陆地上除了广东中部外, 其它地区温度都有明显的增加 (图 9a、b), 使得原来 CNTL 试验中南北向的温度梯度转变为偏东西方向的温

度梯度, 风场也随之做出了调整, CNTL 试验中广东东南部海洋上空的偏南风转为 RH110、RH120 试验中的偏西风, 且风速增大显著, 破坏了对照试验中近海偏东风与陆上偏西风在珠江口南岸地区的辐合, 导致该地区没有新生对流单体出现。另一方面, 陆地上广东中北部东西向温度梯度减小, 海洋吹向陆地的偏东风风速也相应减小, 不能将更多的水汽带向内陆地区, 使得陆地上对流减弱。850 hPa 形势场呈现出类似的结构。另外值得注意的是, 400 hPa 以上 RH110、RH120 试验高层风场的差异场表现出了与低层相反分布特征 (图 9c、d)。在研究区域内, 高层差值风场在广东中北部有明显的偏北风, 说明 RH110、RH120 试验在内陆高层南风偏大。南海上风向的调整也很显著, 显著的西风差值分量表明了 RH110、RH120 试验在低纬海洋上空偏西风减小。400 hPa 以上差值环流场和 975 hPa (850 hPa) 这种相反的特征, 以及两组试验前期整层温度上升充分说明了海洋上局地湿度增加后, 早期海上的强盛的深对流可以通过向大气输送大量的潜热和感热, 从而对周围区域内整个对流层的温度场和风场都产生影响, 并对沿海地区和海洋上的降水分布格局与演变特征进行较明显的调整。本个例增加海上关键区的湿度后, 海洋上对流的快速发展, 迅速地调整了附近的环流特征, 导致邻近的大陆上对流系统发生减弱、路径改变。

增加和减少海上关键区大气湿度的试验表明, 湿度场的改变导致的海上对流的改变, 会调整邻近地区的大气环流, 增加湿度场的调整要比减少湿度场的调整显著。对于关闭海上关键区域内对流潜热的试验, 由于只考察对流产生的潜热的影响, 要素场的响应较其它几组试验要迟缓许多, 积分前期对流尚未发展起来对周围环境场的影响非常小。09 时以后, 两个试验的对流发展开始出现差异, CLS 试验对流位置略偏北一些 (图 7a、f), 且逐渐趋向于平行于海岸分布; 而 CNTL 试验对流位置更加偏东接近海岸, 且在对流系统的后部还有很强的新生对流。

为了分析这种差异可能存在的原因, 首先探讨一下两个试验各层环流场的差异。从图 10 可以看出, 925 hPa 上的差异表现为敏感试验在珠三角及其北部包括周边海域温度比对照试验偏低, 使得近海与内陆的温度梯度增大, 从而使海岸吹向内陆的

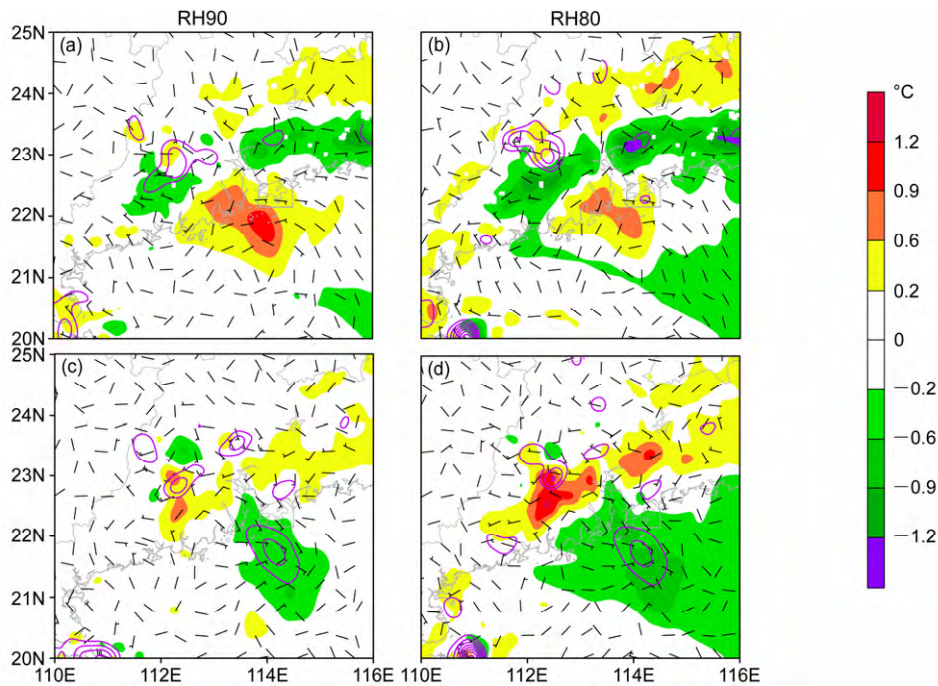


图 8 5月8日07时对照试验与RH90(左列)、RH80(右列)试验的(a、b)925 hPa及(c、d)850 hPa温度场(阴影,单位:°C)、风场(风标,单位:m s⁻¹)差值。紫色等值线表示RH90、RH80试验与对照试验散度差负值(间隔 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 8 Differences (CNTL - RH90/80) in temperature (shaded, units: °C) and wind (barbs, units: m s⁻¹) between CNTL and RH90 (RH80) experiments at 0700 UTC 8 May. Left panel represents RH90, and right panel represents RH80. Top and bottom panels are for (a, b) 925 hPa and (c, d) 850 hPa, respectively. Purple contours represent the convergence regions of RH90 and RH80 experiments relative to that of the control experiment (intervals: $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

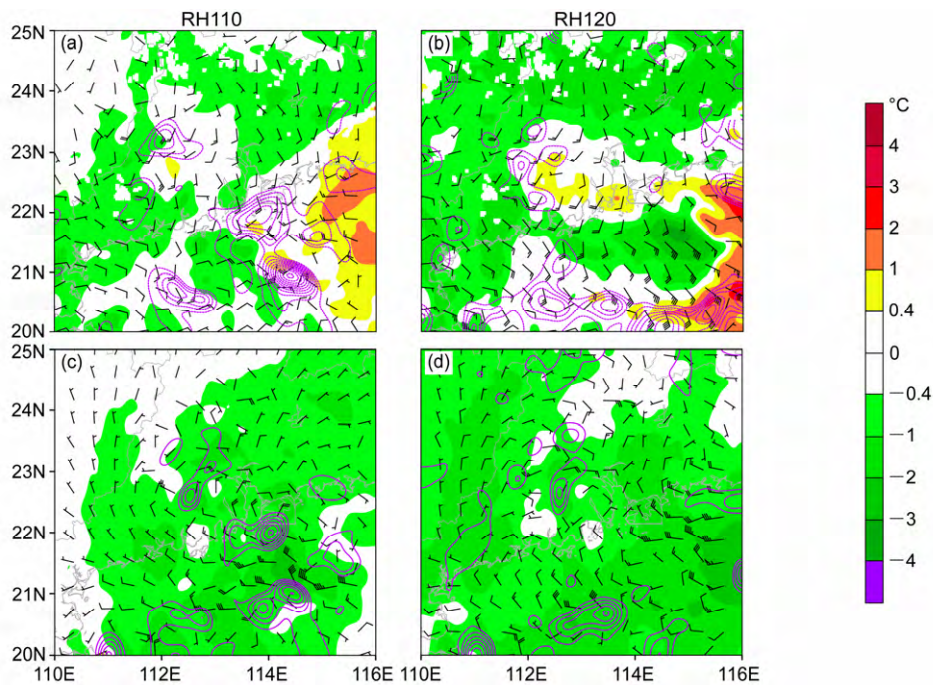


图 9 5月8日07时对照试验与RH110(左列)、RH120(右列)试验的(a、b)925 hPa及(c、d)400 hPa温度场(阴影,单位:°C)和风场(风标,单位:m s⁻¹)差值,925 hPa紫色等值线同图8,表示敏感试验相对于对照试验的辐合区,400 hPa则为对应的辐散区

Fig. 9 Differences (CNTL - RH110/120) in temperature (shaded, units: °C) and wind (barbs, units: m s⁻¹) between CNTL and RH110 (RH120) experiments at 0700 UTC 8 May. Left panel represents RH110, and right panel represents RH120. The top and bottom panels depict results at (a, b) 925 hPa and (c, d) 400 hPa, respectively. Purple contours at 925 hPa are the same as in Fig.8, while those at 400 hPa represent divergence regions

东南风风速相对偏大且位置更为深入,这一点与降低初始场海上相对湿度效果类似,辐合的位置偏向内陆导致对流更不容易向海岸发展(图 10a)。850 hPa 两个试验显著的不同体现在敏感试验急流可以到达更加偏北的位置,有利于推动对流向东北移动(图略)。500 hPa 温度差值场在紧邻海岸的洋面上以及珠三角也表现出了显著的正值(图 10b),说明 CNTL 试验在这些区域内一些小对流的积云和微物理过程释放了热量,使得沿海温度升高,为对流向海洋继续移动提供了有利的条件。而 CLS 试验关闭了积云和微物理过程释放的潜热,使得近海气温处在较低的状态,不利于对流的活跃和传播。图 10b 中广东南部的近海地区中低层差值风场表现为偏北风,结合敏感试验和对照试验各自风场来看(图略),CLS 试验在该区域内南风分量更为显著,西风分量较小,有利于对流向北移动;而在珠三角及广东北部沿海地区差值风场为偏西风,对应着 CLS 试验东风相对较小,且东风大值区位置更加靠近内陆,导致偏东风与偏南风的辐合位置偏西,间接使得珠江口南岸没有东西风辐合不能生成新的对流单体,从对流系统预报角度来分析,向东传播速度减小,同时刻敏感试验对流和雨带位置也相应偏西。

从海平面气压场(SLP)来看(图 10c、d),09 时敏感试验中的海上高压更加向陆地倾斜,在珠三角及其北部地区体现的较为明显,这在一定程度上强迫对流向内陆靠近(图 10c)。在对流发展的后期 16 时,CNTL 试验在海上的气压明显偏低(图 10d),这与 CISK 机制在低层的降压作用有关。在 500 hPa 高度场中,前期位势高度场的变化非常小,后期主要变化是对照试验在海上的位势高度扰动加深,显然是海上充足的水汽和热量使得陆地上移动过来的对流得以进一步发展,这一点在 850 hPa 后期的高度场演变中也很突出。与中低层的这种特征相对,对流发展后期 200 hPa 差异场上增暖和辐散的位置主要在珠江口及其周围海区,这与对照试验 MCS 发展的位置是一致的。这些对流发展中后期形势场的分析,说明了 CISK 机制(Charney and Eliassen, 1964; Ooyama, 1964)在组织化对流发展过程中的作用。而敏感试验关闭了海上对流过程中的潜热,恰好切断了海上的 CISK 机制,阻隔对流向海上发展和传播。

5 总结和讨论

本研究主要利用华南季风降水试验(SCMREX)观测资料,分析了一次广东沿海地区强降雨过程,并采用数值模拟试验探讨邻近广东沿海的南海北部区域初值误差(湿度场)和对流活动对广东沿海地区 MCS 发展和移动的影响。本次过程是在有利的大尺度环流形势下发生的,主要有 500 hPa 高空槽与 850 hPa 的低涡和急流相配合,加密探空和风廓线观测表明在珠江口地区有西南风和偏东风急流形成的辐合区,为对流在该地区增强发展提供了上升运动和充分的水汽等。根据本文的研究结果,可以归纳总结为如图 11 的概念模型,近海对流的发生发展会改变沿海地区的温度梯度、风场辐合等特征,从而影响陆地上中尺度对流系统的触发、强度和移动路径。

在敏感试验中,通过降低和增加海上关键区内初始场的湿度,以及关闭此区域内积云和微物理过程的潜热释放,探讨海上关键区水汽初值场和对流对广东沿海地区对流发展过程的影响及其机制。初始场降低海上湿度,陆地上的 MCS 东移减缓强度略有减弱;增加初始场海上湿度,初期海上旺盛的对流发展对之后整个区域的温湿风场及 MCS 发展过程的改变都很显著,陆地上的对流系统强度、形态和移动路径都发生了较大的调整;关闭海上对流潜热主要造成 MCS 向东北方向移动并偏离海洋。

海上关键区初值场湿度降低后,广东沿海地区及其东部海洋温度梯度的改变引起风场的变化,珠三角及其北部沿海地区低层由海洋吹向陆地的东风分量减弱,大值区更加深入内陆,使得偏西风与偏东风的整体辐合位置更偏向内陆,随之造成对流也更靠向广东内陆发展和移动。同时由于海上的湿度相对偏低,输送到陆地上的水汽通量也略有减弱,使得早期陆地上的对流强度要弱于对照试验。海上关键区初值场湿度增加后,海上大范围对流迅速发展起来,产生降雨过程,同时降水过程又释放大量的凝结潜热,改变了海上关键区和周围陆地的环流特征。环流的调整有利于海上对流的发展,抑制了陆地上对流的强度。关闭海上关键区对流的潜热释放,切断了海上 CISK 机制,致使对流无法进一步向海洋传播,且海上的对流也无法发展起来。同时对沿海地区的温湿梯度产生影响,低

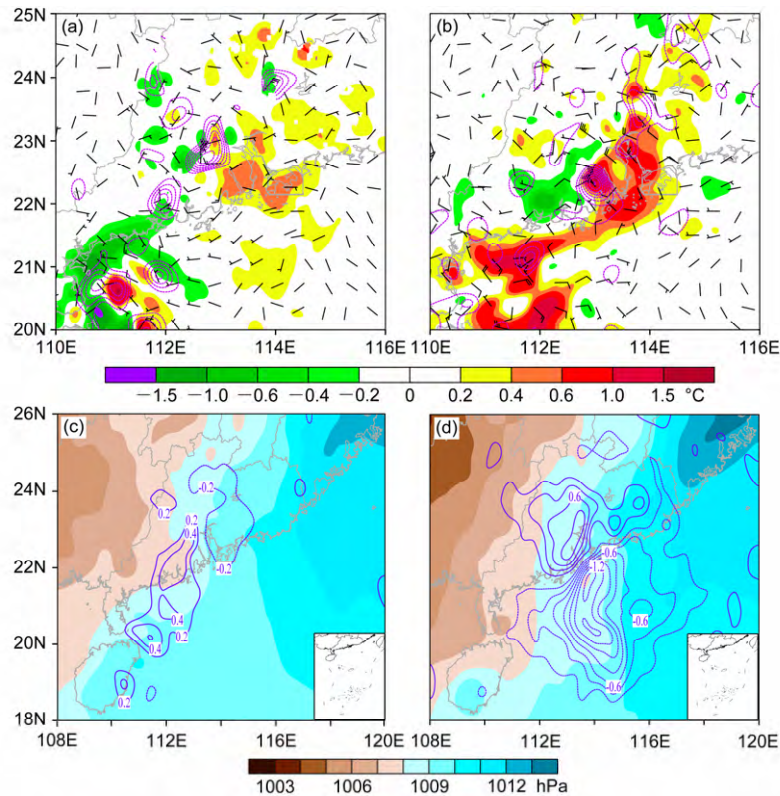


图 10 5 月 8 日 09 时对照试验与 CLS 试验的温度 (阴影, 单位: °C) 风场 (风标, 单位: $m s^{-1}$) 差值以及对照试验与 CLS 试验差值的相对辐合区 (等值线, 等值线间隔: $3 \times 10^{-5} s^{-1}$): (a) 925 hPa; (b) 500 hPa. 模拟的 SLP (阴影, 单位: hPa), CNTL - CLS 试验 SLP 之差 (等值线, 单位: hPa): (c) 8 日 09 时, 叠加 CLS 试验 SLP; (d) 8 日 16 时, 叠加 CNTL 试验 SLP

Fig. 10 Differences (CNTL - CLS) in temperature (shaded, units: °C), wind (barbs, units: $m s^{-1}$) between CNTL and CLS experiments and convergence regions of CLS relative to CNTL experiment (contours, intervals: $3 \times 10^{-5} s^{-1}$) at 0900 UTC 8 May: (a) 925 hPa; (b) 500 hPa. SLP (shaded, units: hPa) and SLP differences between CLS and CNTL (CNTL - CLS, contours, units: hPa): (c) 0900 UTC 8 May (shaded areas indicate SLP in CLS); (d) 1600 UTC 8 May (shaded areas indicate SLP in CNTL)

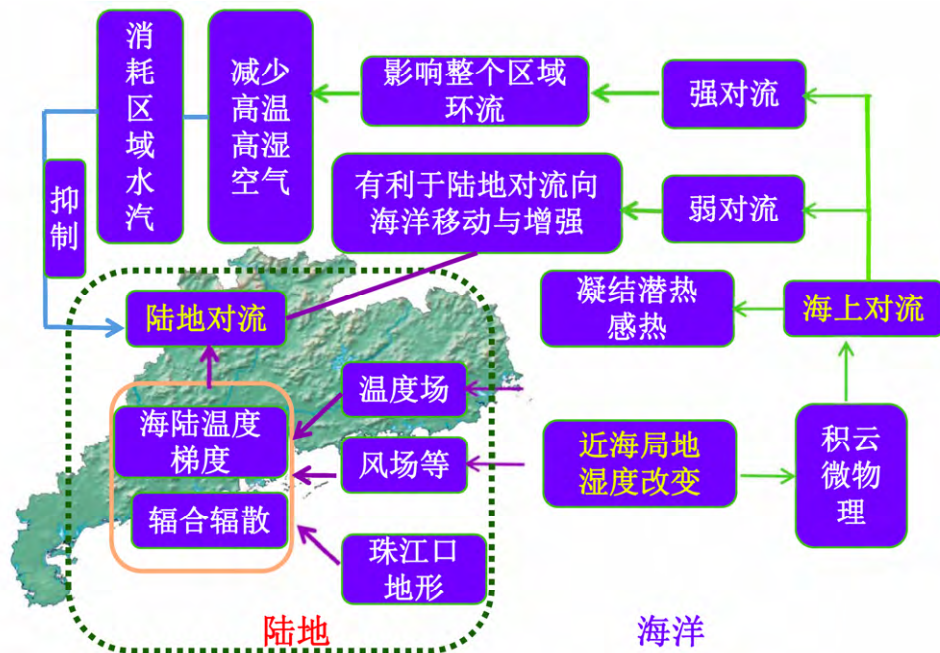


图 11 近海湿度初值场和对流影响陆地和海岸对流过程示意图

Fig. 11 Schematic diagram of how offshore initial moisture field and convection influence the development of land and coastal convection

层动力和水汽辐合位置更偏向内陆,且低空急流可以到达更加偏北的位置,使得对流系统在模拟的后期向东北移动。

本文的研究表明南海北部地区初值湿度场的不确定性可以显著影响广东沿海地区 MCS 的预报效果。但本文只是针对个例湿度场的试验结果,今后应开展对其他变量和不同个例的试验,探讨海上的观测以及资料的同化对改进沿海地区对流强度和落区预报的重要作用。

参考文献 (References)

- Anthes R A, Kuo Y H, Baumhefner D P, et al. 1985. Predictability of mesoscale atmospheric motions [J]. *Adv. Geophys.*, 28: 159–202, doi:10.1016/S0065-2687(08)60188-0.
- Bei N F, Zhang F Q. 2007. Impacts of initial condition errors on mesoscale predictability of heavy precipitation along the Mei-Yu front of China [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133 (622): 83–99, doi:10.1002/qj.20.
- Charney J G, Eliassen A. 1964. On the growth of the hurricane depression [J]. *J. Atmos. Sci.*, 21 (1): 68–75, doi:10.1175/1520-0469(1964)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2.
- Ciesielski P E, Johnson R H. 2006. Contrasting characteristics of convection over the northern and southern South China Sea during SCSMEX [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (4): 1041–1062, doi:10.1175/MWR3113.1.
- Cintineo R M, Stensrud D J. 2013. On the predictability of supercell thunderstorm evolution [J]. *J. Atmos. Sci.*, 70 (7): 1993–2011, doi:10.1175/JAS-D-12-0166.1.
- 丁治英, 刘彩虹, 沈新勇. 2011. 2005~2008年5、6月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析 [J]. *热带气象学报*, 27 (3): 307–316. Ding Zhiying, Liu Caihong, Shen Xinyong. 2011. Statistical analysis of the relationship among warm sector heavy rainfall, upper and lower tropospheric jet stream and South Asia high in May and June from 2005 to 2008 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27 (3): 307–316, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.03.003.
- 广东气象局《广东省天气预报技术手册》编写组. 2006. 广东省天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社. Guangdong Meteorological Bureau, “The Weather Forecast Technical Manuals in Guangdong Province” Writing Group. 2006. *The Weather Forecast Technical Manuals in Guangdong Province (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 黄士松,《华南前汛期暴雨》编写组. 1986. 华南前汛期暴雨 [M]. 广州: 广东科技出版社. Huang Shisong, “Heavy Rainfall during Pre-rainy Season in South China” Writing Group. 1986. *Heavy Rainfall during Pre-rainy Season in South China (in Chinese)* [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press.
- 梁必骥. 1997. “94.6”珠江流域特大暴雨洪涝特征分析 [J]. *中国减灾*, 7 (4): 21–24. Liang Biji. 1997. Characteristics analysis of “94.6” heavy rainstorm and flood over Pearl River basin [J]. *Disaster Reduction in China (in Chinese)*, 7 (4): 21–24.
- 柳艳菊, 丁一汇. 2005. 1998年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究 II: 中尺度对流系统对大尺度场的作用 [J]. *气象学报*, 63 (4): 443–454. Liu Yanju, Ding Yihui. 2005. A study on the meso-scale convective systems during summer monsoon onset over the South China Sea in 1998 II: Effect of the meso-scale convective systems on large-scale fields [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63 (4): 443–454, doi:10.11676/qxxb2005.044.
- 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 [J]. *气象学报*, 63 (4): 431–442. Liu Yanju, Ding Yihui, Zhao Nan. 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 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63 (4): 431–442, doi:10.11676/qxxb2005.043.
- Luo Y L, Chen Y R X. 2015. Investigation of the predictability and physical mechanisms of an extreme-rainfall-producing mesoscale convective system along the Meiyu front in East China: An ensemble approach [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (20): 10593–10618, doi:10.1002/2015JD023584.
- Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al. 2017. The southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98 (5): 999–1013, doi:10.1175/BAMS-D-15-00235.1.
- 麦建华, 于玲玲, 方宇凌, 等. 2016. 2014年5月广东连续两次暴雨过程对比分析 [J]. *广东气象*, 38 (2): 1–5. Mai Jianhua, Yu Lingling, Fang Yuling, et al. 2016. Comparing and analyzing two consecutive heavy rains over Guangdong Province in May 2014 [J]. *Guangdong Meteorology (in Chinese)*, 38 (2): 1–5, doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2016.02.001.
- Ooyama K. 1964. A dynamical model for the study of tropical cyclone development [J]. *Geophys. Int.*, 4: 187–198.
- Stensrud D J, Wicker L J. 2004. On the predictability of mesoscale convective systems [C]// Preprints, AMOS 11th National Conference. Brisbane, Australia: Australian Meteorological and Oceanographic Society (AMOS), 62–67.
- 孙健, 赵平, 周秀骥. 2002. 一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响 [J]. *气象学报*, 60 (3): 333–342. Sun Jian, Zhao Ping, Zhou Xiujie. 2002. The mesoscale structure of a South China rainstorm and the influence of complex topography [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 60 (3): 333–342, doi:10.11676/qxxb2002.040.
- 孙建华, 赵思雄. 2000. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 24 (3): 381–392. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2000. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (3): 381–392, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.03.10.
- 孙建华, 赵思雄. 2002. 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 [J]. *大气科学*, 26 (4): 541–557. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2002. 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 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26 (4): 541–557, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.04.11.
- 孙建华, 郑淋淋, 赵思雄. 2014. 水汽含量对爬线组织结构和强度影响的数值试验 [J]. *大气科学*, 38 (4): 742–755. Sun Jianhua, Zheng

- Linlin, Zhao Sixiong. 2014. Impact of moisture on the organizational mode and intensity of squall lines determined through numerical experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 742–755, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13187.
- Wandishin M S, Stensrud D J, Mullen S L, et al. 2008. On the predictability of mesoscale convective systems: Two-dimensional simulations [J]. Wea. Forecasting, 23 (5): 773–785, doi:10.1175/2008WAF2007057.1.
- Wandishin M S, Stensrud D J, Mullen S L, et al. 2010. On the predictability of mesoscale convective systems: Three-dimensional simulations [J]. Mon. Wea. Rev., 138 (3): 863–885, doi:10.1175/2009MWR2961.1.
- Wang H, Luo Y L, Jou B J D. 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX: Observational analysis [J]. J. Geophys. Res., 119 (23): 13206–13232, doi:10.1002/2014JD022339.
- Wu D C, Meng Z Y, Yan D C. 2013. The predictability of a squall line in South China on 23 April 2007 [J]. Adv. Atmos. Sci., 30 (2): 485–502, doi:10.1007/s00376-012-2076-x.
- Wu M W, Luo Y L. 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-summer rainy season of 2015 [J]. J. Meteor. Res., 30 (5): 719–736, doi:10.1007/s13351-016-6089-8.
- 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 [J]. 大气科学, 30 (5): 988–1008. Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of circumstances of meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 988–1008, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.26.
- Zhang F Q, Odins A M, Nielsen-Gammon J W. 2006. Mesoscale predictability of an extreme warm-season precipitation event [J]. Wea. Forecasting, 21 (2): 149–166, doi:10.1175/WAF909.1.
- Zhang F Q, Bei N F, Rotunno R, et al. 2007. Mesoscale predictability of moist baroclinic waves: Convection-permitting experiments and multistage error growth dynamics [J]. J. Atmos. Sci., 64 (10): 3579–3594, doi:10.1175/JAS4028.1.
- 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等. 2000. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟 [J]. 科学通报, 45 (18): 1988–1992. Zhang Qinghong, Lau K H, Wang Hongqing, et al. 2000. Numerical simulation on mesoscale convective system along Mei-Yu front in southern China [J]. Chinese Science Bulletin, 45 (22): 2093–2096, doi:10.1007/BF03183534.
- Zhao S X, Bei N F, Sun J H. 2007. Mesoscale analysis of a heavy rainfall event over Hong Kong during a pre-rainy season in South China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (4): 555–572, doi:10.1007/s00376-007-0555-2.
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. 98 华南暴雨科学试验研究 [M]. 北京: 气象出版社, 220pp. Zhou Xiuji, Xue Jishan, Tao Zuyun, et al. 2003. Heavy Rainfall Experiment in South China during Pre-summer Rainy Season (HUAMEX), 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 220pp.