

二级地形东移 MCS 影响下游降水的典型个例研究

杨如意¹, 张元春^{2,3}, 孙建华², 慕建利¹, 于廷照¹

1. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

3. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都, 610072

摘要 本文针对一次典型的二级地形中尺度对流系统 (mesoscale convective system, MCS) 东移与高原东移对流合并影响下游对流系统个例开展数值模拟研究, 发生时段为 2016 年 6 月 29 日-7 月 1 日, 本次过程导致长江中游至江淮流域地区出现了一次范围较大的强降水过程。高分辨率的数值模拟清楚地再现了二级地形对流东移与高原东移对流合并发展影响下游对流系统的发展过程, 较好地刻画出长江中下游地区降水的时空分布特征。此次对流发展过程主要经历形成, 移出, 合并和减弱阶段。其中, 在形成阶段, 由于西南低涡东北的气旋式扰动, 二级地形 MCS 于夜间在西部山地地区形成, 至次日凌晨东移到二级地形东部边界并且增强发展。发展加强后的二级地形 MCS 逐渐移出地形之后下游已有零散对流 (高原东部对流东移至二级地形东部所致) 在午后逐渐组织起来后, 受到夜间增强的低空急流影响, 与二级地形东移对流合并发展。合并后的 MCS 东移和发展推动上升运动增强, 从而低层辐合增强, 对流层低层诱发中尺度涡旋, 涡旋和对流共同发展, 引发长江中下游地区强降水。

关键词: 二级地形, 东移 MCS, 影响机理, 数值模拟

文章编号: 2023080A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23080

收稿日期 2023-06-01 收到, 网络预出版日期 2023-??-??

作者简介 杨如意, 女, 1991 年出生, 博士, 主要从事数值预报统计后处理研究。E-mail: yangry@cma.gov.cn

通讯作者 张元春, E-mail: zhyc@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 (41975057, U2142202 和 62106270) 和高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目 (SZKT202101)。

Funded by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41975057, U2142202 and 62106270) and Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province (Grant No.SZKT202101)

28 **Typical case study of Impact of a typical Eastward-Propagating**
29 **Mesoscale Convective System over the Second-Step terrain on its**
30 **downstream rainfall**

31 Yang Ruyi¹, Zhang Yuanchun², Sun Jianhua², Mu Jianli¹, Yu Tingzhao¹

32 1. Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing, China

33 2. Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese
34 Academy of Sciences, Beijing 100029

35 **Abstract** A typical mesoscale convective system (MCS) over the second-step terrain that moved
36 eastward, merged with convection moving eastward from the eastern edge of the Tibetan Plateau (TP),
37 and influenced the downstream convection systems, had been studied using a numerical simulation.
38 The case occurred from June 29 to July 1, 2016, and resulted in heavy precipitation in the middle
39 reaches of the Yangtze River to the Yangtze-Huai River Basin. This simulation had successfully
40 reproduced the eastward movement of the MCSs over the second-step terrain and the merging with
41 convection moving eastward from the TP, which affected the downstream convective systems. The
42 results revealed the spatiotemporal distribution of precipitation over the middle and lower Yangtze
43 River. The evolution of the MCS is divided into four stages: the formation stage, the propagation stage,
44 the merging stage, and the weakening stage. Due to the cyclonic disturbance in the northeastern part of
45 the Southwest Vortex, the MCS formed in the western mountainous area over the second-step terrain.
46 After moving eastward out of the second-step terrain, the MCS merged with the eastward-propagating
47 convection from the eastern edge of the TP over the downstream areas, which promoted the strong
48 development of upward motion, enhanced the convergence in the lower layers, and induced a
49 mesoscale vortex in the lower troposphere. The mesoscale vortex and the merged convection gradually
50 coupled, triggering heavy rainfall in the eastern plains east of the second-step terrain.

51
52 **Key words:** the second-step terrain, eastward-propagating MCS, numerical simulation, impact
53 mechanism

60 1 引言

61 长江中下游地区是暴雨洪涝灾害频发地区，而暴雨的发生与中尺度对流系统(mesoscale
62 convection systems, MCSs)密切相关(夏茹娣等, 2006; 周海光, 2008; 高守亭等, 2008; 杀莎
63 等, 2018)。研究表明，引发长江流域降水的对流可向上游追溯至青藏高原和二级地形触发的东
64 移对流系统(Yasunari et al., 2006; Yu et al., 2007; 胡亮等, 2008; Yang et al., 2019; 王晓芳等,
65 2020)。青藏高原上空尺度对流系统触发后，可在有利的中层引导气流的影响下，东移影响下
66 游地区，并通过合并、再生等过程不断发展增强，引发长江中下游地区强降水(单寅等, 2003;
67 Hu et al., 2016; 王靖羽等, 2019; Mai et al., 2021)。高原对流东移过程中与高原涡和西南涡相
68 互作用亦可促使其发展增强，进而影响下游地区降水(陈忠明和闵文彬, 2004; Fu et al., 2019)。
69 傅慎明等(2011)综合利用卫星红外亮温、地面观测等多种资料分析 2003 年和 2007 年梅雨期内
70 高原对流东移影响下游地区降水的发展过程，结果表明高原对流移至四川盆地后，在有利的环流
71 配置下诱发西南低涡，西南涡东移造成梅雨锋降水。田珊儒等(2015)通过动、热力学诊断分析
72 并结合高分辨率中尺度数值模拟试验研究青藏高原一次东移对流系统的发展演变过程，指出高原
73 低涡东移过程中触发高原对流的生成，对流系统引发的降水所释放的凝结潜热，又进一步加强了
74 高原低涡的强度，形成正反馈机制。汤欢等(2020)对一次青藏高原 MCS 东移与下游西南涡作
75 用引发四川盆地强降水的事件进行了研究，结果表明高原 MCS 与西南低涡的上升运动叠加可直
76 接引发强降水。此外，高原 MCS 东移影响下游降水还与地形密切相关，在一级地形和四川盆地、
77 二级地形和东部平原的 MPS (mountain-plain solenoid) 环流作用下，对流东移加强梅雨锋涡旋和
78 降水，造成严重的洪涝灾害(Bao et al., 2011; Sun and Zhang, 2012; Zhang et al., 2014)。

79 二级地形(包括中国东部的秦岭、巫山山脉等)直接触发的对流系统东移也会对长江中下游地
80 区的强对流天气产生显著影响(Zhang et al., 2022)。Yang et al. (2019)对 2000~2016 年 5~8
81 月二级地形东移 MCS 进行识别追踪，并统计东移 MCS 在长江中下游地区引发的降水量与该地
82 区降水总量的比例，结果表明长江中游地区 35%的降水与二级地形东移 MCS 相关。此类东移
83 MCS 在青藏高原以东对流层中层西风槽、低空急流等有利的环流形势下组织、发展以及长时间
84 维持，向下游移动过程中对长江中下游地区的强降水造成显著影响(Yang et al., 2020)。

85 以往的研究大多集中于高原对流东移过程中减弱，移至二级地形后再次组织发展并东移造成
86 长江中下游地区暴雨等灾害性天气。也有一些研究对二级地形触发的对流云团东移影响下游地区
87 开展了深入研究(Zhang et al., 2022)。而还有一类二级地形 MCS 在东移至下游地区后，与高原

东移对流合并后能够继续发展增强,从而影响下游对流系统,也可造成长江中下游地区的强降水。
2016 年 6 月 29 日 20:00 BST (Beijing Standard Time) ~7 月 1 日 23:00 BST, 长江上游至江淮流
域地区发生一次范围较大的强降水过程, 雨带覆盖四川、重庆、湖北、江苏等省市, 特别在 6
月 30 日 22:00 BST ~7 月 1 日 22:00 BST 期间, 湖北东部、安徽中部、江苏大部等多地的 24 小
时累积降水量达到暴雨级别 (50 mm), 局地降水量 250 mm (图 1)。此次降水过程具有雨强
强超过持续度大, 时间长、波及范围广等特点, 造成此次的强降水的 MCS 即为高原东移对流系
统与二级地形生成 MCS 合并后增强发展起来。本文利用高分辨率数值模式, 开展二级地形对流
东移与青藏高原对流共同影响下游地区降水的发展过程和演变机理研究。

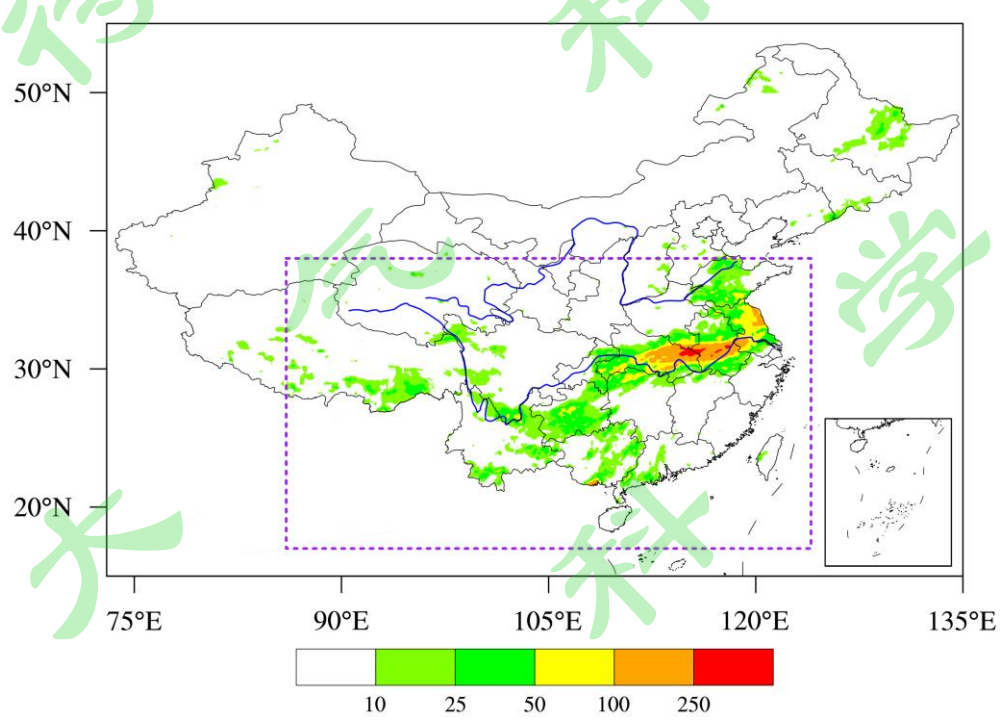


图 1 2016 年 6 月 30 日 22:00 BST~7 月 1 日 22:00 BST 累计降水量 (单位: mm), 紫色框代
表模拟区域。
Fig.1 Cumulative precipitation from 22:00 BST on June 30, 2016 to 22:00 BST on July 1, 2016 (unit:
mm), the purple dashed rectangle denotes the domain of the simulations.

2 资料和方法

本文采用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP)
的 FNL 全球分析资料 (Final Operational Global Analysis) 开展环流分析, 并作为数值模拟实验
的初始和边界条件, 其空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 垂直层次为 26 层, 时间分辨率为 6 小时, 分别为

02 BST、08 BST、14 BST、20 BST（对应世界时 18 时、00 时、06 时、12 时）。所使用的降水资料来自国家气象信息中心研发的中国自动站观测降水与 CMORPH 卫星反演降水产品融合的逐时降水网格数据集，格点分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ （沈艳等，2013）。采用相当黑体温度（Black Body Temperature，以下简称 TBB）开展 MCS 的识别和追踪，数据来源于日本高知大学提供的逐小时静止卫星资料（<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/archive-e.html>），该数据共有 4 个红外通道，分别为：IR1、IR2、IR3、IR4，本文使用 IR1 通道。基于模式匹配的自动识别方法（Li et al., 2012; Yang et al., 2020）对 2016 年 6 月 29 日~7 月 1 日长江流域的 MCS 进行追踪，具体标准为：1）云团尺度首次满足 $TBB \leq -52^{\circ}$ 的连续冷云面积大于等于 5000km^2 的时刻为初始时刻；2）持续时间大于等于 3 小时；3） $TBB \leq -52^{\circ}$ 的连续冷云面积不再满足 5000km^2 的时刻为云团的消亡时刻。

3 个例概况

2016 年 6 月 29 日 23:00 BST 在青藏高原东部边界（ 102.5°E ， 30°N 附近）有对流云团（C0）生成（图 2a），之后东移出高原，在 30 日 04:00 BST 到达四川盆地后对流得到发展增强，于 07:00 BST 达到最强（图 2c），继续东移至二级地形之后对流减弱（30 日 12:00 BST）。午后，零散分布于二级地形东部的 C0 移至平原地区后再次增强。30 日 22:00 BST，C0 在二级地形以东的平原地区发展形成东西向对流云带 C2，同时在二级地形的西部山地（ 108°E ， 30.5°N 附近）出现新生对流（C1）（图 2d）。C1 形成后快速发展，于 23:00 BST 组织为中尺度对流系统 MCS1（云团面积达到 5000km^2 ）（图 2e）。7 月 1 日 04:00 BST，MCS1 东移至二级地形东部地区（图 2f），在凌晨 06:00 BST 附近移出地形并且对流得到发展，移出地形后与长江中游（ 115°E 附近）对流 C2 合并后增强（07:00 BST）（图 2g），从而造成了湖北地区强降水过程。此后对流继续东移影响下游地区，1 日 17:00 BST 后，对流强度迅速减弱（图 2i），23:00 BST 东移至江苏中部后消亡。

由于此次降水主要发生在 6 月 30 日~7 月 1 日，本文主要分析二级地形西部对流影响下游对流系统发展引发强降水的过程。根据 MCS 发展过程的分析，其发展演变过程可划分为以下阶段：形成阶段（6 月 30 日 22:00 BST~7 月 1 日 03:00 BST），移出阶段（7 月 1 日 04:00 BST~06:00 BST），合并阶段（7 月 1 日 07:00 BST~16:00 BST）和减弱阶段（7 月 1 日 17:00 BST~23:00 BST）。

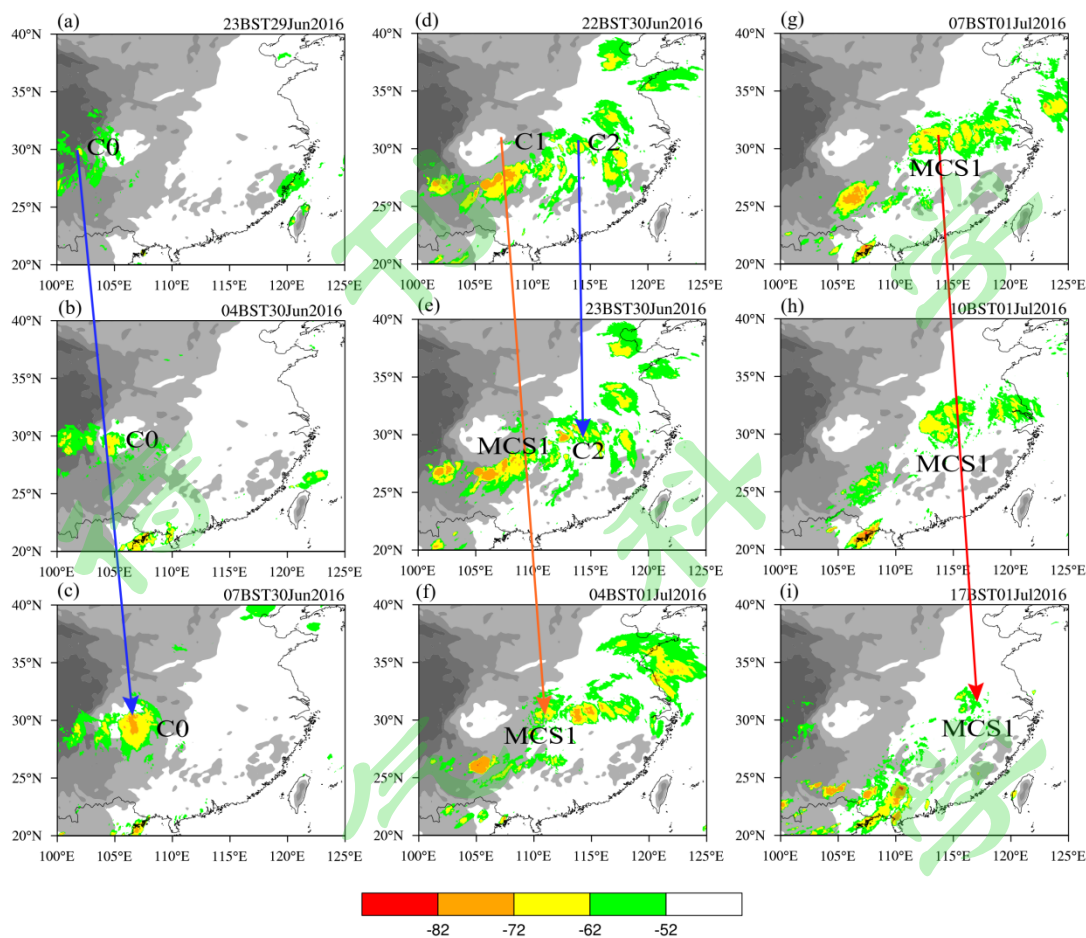


图 2 2016 年 6 月 29 日~7 月 1 日 MCS 发展演变过程（阴影为 TBB，单位：°C）。蓝色箭头指向高原对流的发展演变，橙色箭头代表二级地形 MCS 的发展演变，红色箭头为两者合并后的发展演变。

Fig.2 The evolution process of MCS from June 29, 2016 to July 1, 2016 (cloud top temperature is denoted by color shading, unit: °C). The blue line denotes the evolution of plateau convection, the orange line represents the evolution of MCS over the second-step terrain, the orange line indicates the evolution of merged MCS.

图 3 为 MCS 各个阶段代表性时刻的高低层环流特征。形成阶段（6 月 30 日 23:00 BST），对流层中层（500 hPa，图 3a）中高纬度呈现两槽一脊的环流形势，贝加尔湖以南受到弱脊影响，较强的东北冷涡完全控制我国东北至华北地区。青藏高原东部至二级地形地区有短波槽发展（东北冷涡以南），西太平洋副热带高压（西太副高）西伸至 105° E 附近，二级地形以东地区处于短波槽前和副高外围的西南气流中，中层较强的引导气流有利于对流的东移发展。对应于 500 hPa 短波槽，高原东部四川盆地至二级地形的对流层低层（700 hPa 和 850 hPa，图 3e 和图 3i）有西南低涡维持，二级地形以东地区均受到西南低空急流的影响，较强的水汽输送有利于对流的东

移和发展，且对流云带 C2 在长江中下游地区形成。移出阶段，500 hPa 上短波槽减弱（图 3b），
 对流层低层（700 hPa）西南低涡也有所东移，并在其东北部（113° E，32.5° N 附近）有扰动
 新生（气旋性切变，图 3f），850 hPa 上新生扰动对应于强的辐合中心，为对流的东移发展提供
 了动力条件（图 3j）。合并阶段，对流已经完全移出二级地形并与下游对流 C2 合并，500 hPa
 上短波槽也继续东移但强度略有减弱（图 3c），对应 700 hPa 上气旋性切变增强，西南气流也有
 所增强（图 3g）。随着中层短波槽的东移，850 hPa 上西南低涡东移减弱，最终在二级地形以东
 西南气流的北边界出现较强的辐合中心（图 3k），并形成中尺度涡旋（图略）。减弱阶段，合
 并后东部对流逐渐减弱，伴随 500 hPa 短波槽明显减弱（图 3d），对流层中低层的中尺度涡旋逐
 渐减弱（图 3h 和图 3l），西部对流也逐渐减弱至消亡。

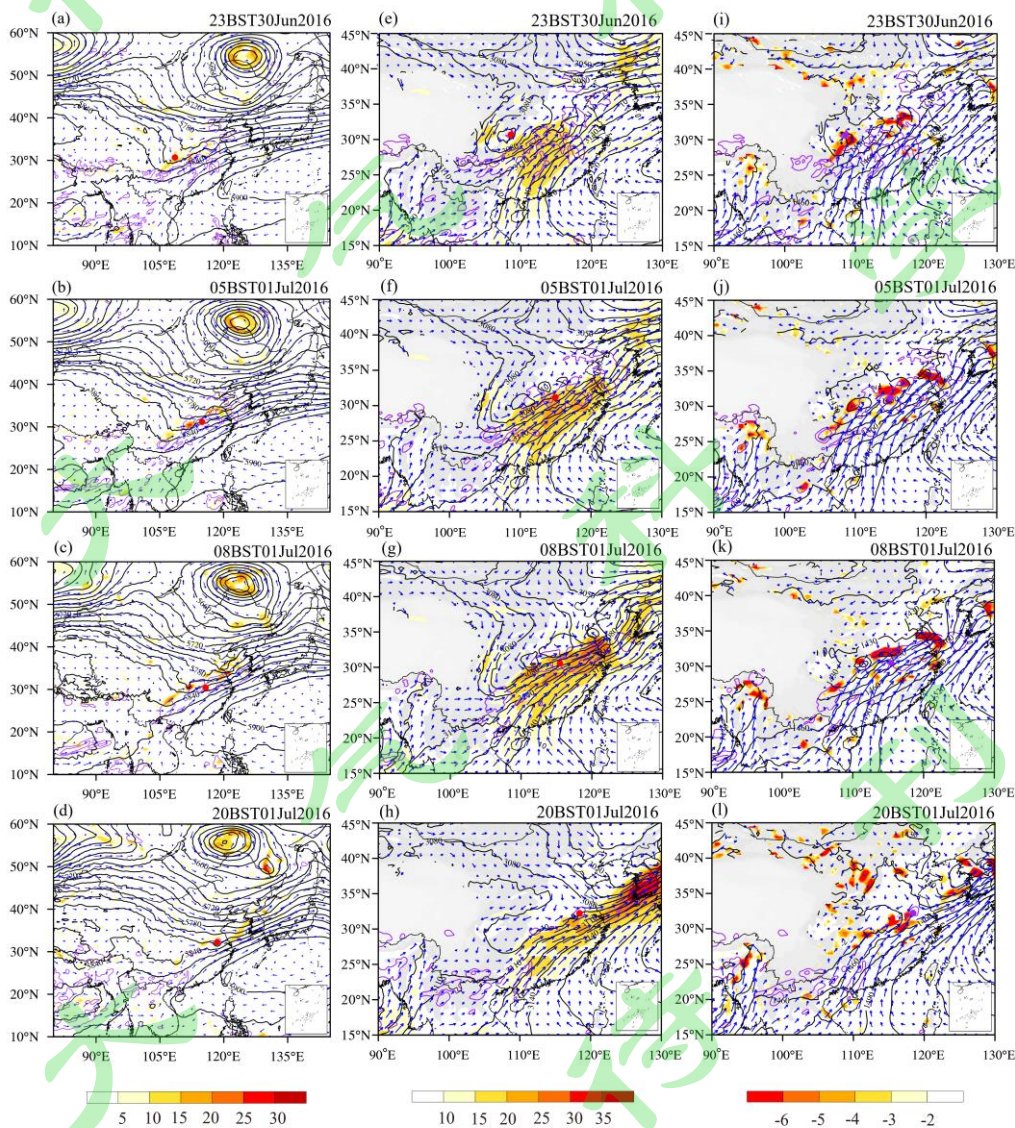


图 3 MCS 形成 (a、e、i)、合并 (b、f、j)、移出 (c、g、k) 和减弱 (d、h、l) 四个阶段
 中低层环流场：位势高度（黑色实线，单位：gpm），风场（蓝色箭头），TBB 等于-52°C 轮廓

线（紫色实线），500 hPa（左）：相对涡度（彩色阴影，单位： 10^{-5}s^{-1} ），红色圆点代表各个时刻 MCS 的中心位置；700 hPa（中）：风速（彩色阴影，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），红色圆点代表各个时刻 MCS 的中心位置；850 hPa（右）：散度（彩色阴影，单位： 10^{-5}s^{-1} ），紫色圆点代表各个时刻 MCS 的中心位置。

Fig.3 The synoptic weather pattern of MCS during formation (a, e, i), merging (b, f, j), propagating (c, g, k) and weakening stage (d, h, l) : geopotential height (black line, unit: gpm) , wind field (blue arrow), -52°C profile of TBB (purple lines), 500 hPa (left): relative vorticity (shading, unit: 10^{-5}s^{-1}), red dots denote the locations of MCS; 700 hPa (middle): wind speed (shading, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), red dots denote the locations of MCS; 850 hPa (right): divergence (shading, unit: 10^{-5}s^{-1}), purple dots denote the locations of MCS.

4 模拟结果分析

4.1 数值模式设置与参数配置

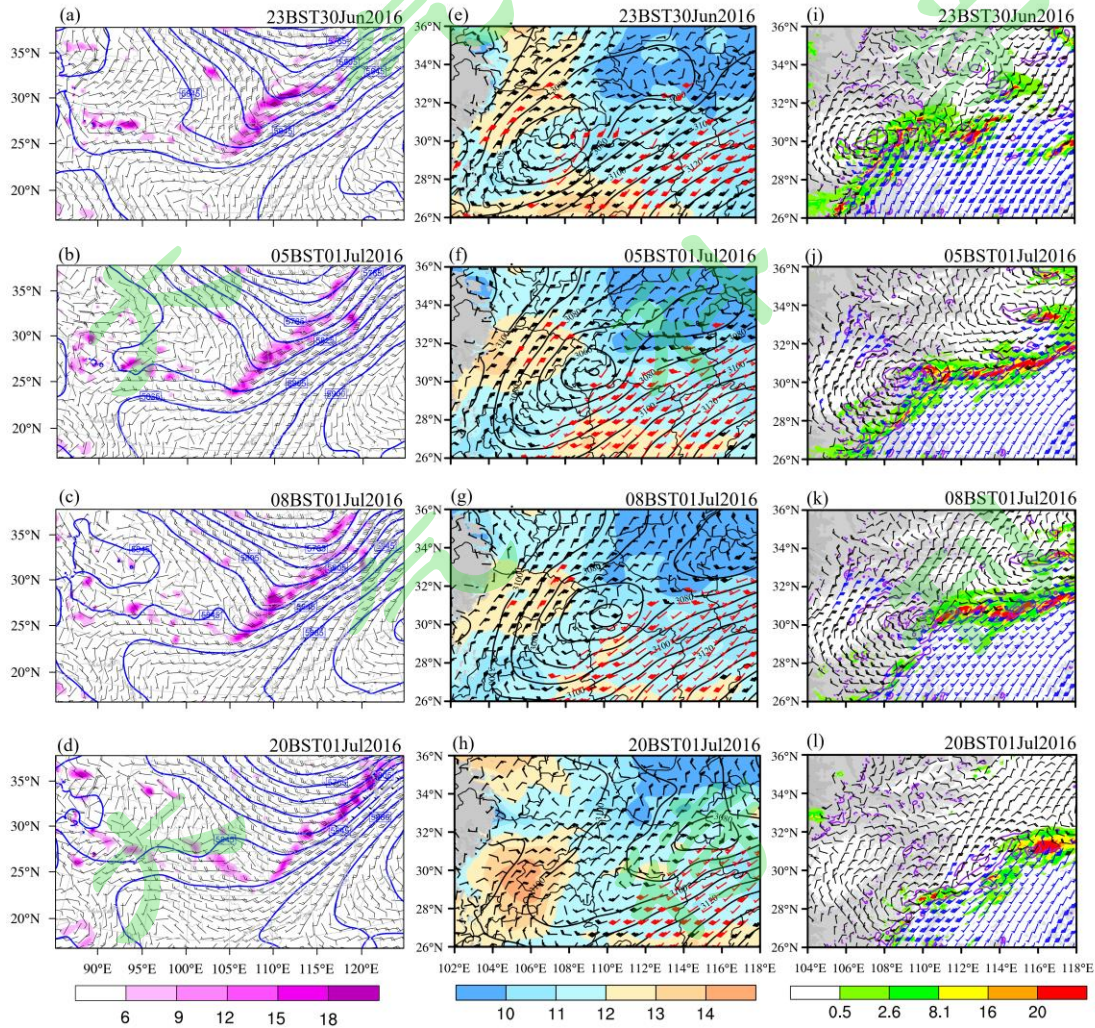
采用中尺度数值模拟 WRF (V3.8) 开展高分辨率数值模拟。由于青藏高原东部对流 (C0) 的东移发展对二级地形以东平原对流 (C2) 的生成和二级地形西部山区对流 (C1) 的触发有一定的上下游效应，模拟时间从高原东部对流形成开始，因此模拟时段为 2016 年 6 月 29 日 20:00 BST~7 月 1 日 23:00 BST。将地面自动站与探空观测到的风场、温度场等基本要素数据与 NECP FNL 再分析资料(时间分辨率 6 小时，空间分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$) 融合，构成客观分析场，然后插值到 σ 层上，产生初始条件和边界条件。模式采用单层网格，范围如图 1 所示，水平格点数为 1120×620 ，格距为 4km，垂直层次为 50 层，模式层顶为 50 hPa。模拟区域采用 WSM 6-class 微物理方案(Hong and Lim, 2006)，RRTM 长波辐射方案(Mlawer et al., 1997)，Dudhia 短波辐射方案(Chen and Dudhia, 2001)，Noah 陆地方案(Chen and Dudhia, 2001)，YSU 边界层方案(Hong et al., 2006)。积分时间步长为 5s，积分时长 52 小时，模式结果分辨率为 1 小时。

4.2 环流形势对比

图 4 为模拟对流所对应中低层的环流形势。6 月 30 日 23:00 BST，500 hPa 短波槽位于四川盆地东部至二级地形地区，西太副高西伸至 108°E 附近，模拟位置略偏东(图 4a)。二级地形以东的下游地区受槽前和副高外围的西南气流控制。此后短波槽逐渐东移，自 7 月 1 日 08:00 BST 开始减弱(图 4c)，至 20:00 BST 槽线东移至 110°E 以东(图 4d)，与再分析形势一致(图 3d)。6 月 30 日 23:00 BST，对应于 500 hPa 短波槽前，700 hPa 上有西南低涡发展，且伴随短波槽的东

190 移，西南低涡也逐渐东移至二级地形（图 4e），与图 3e 中再分析环流形势基本吻合。7 月 1 日
 191 04:00~06:00 BST，随着短波槽的东移，模式较好的再现出西南低涡逐渐向东移出二级地形（图
 192 4f）。1 日 10:00 BST 之后，涡旋发展移至二级地形以东（112.5° E，31° N 附近），此后继续
 193 东移并发展增强，至 20:00 BST 后涡旋逐渐减弱，涡旋中心也逐渐消失（图 4h）。

194 850 hPa 模拟环流场上（图 4i），6 月 30 日 23:00 BST 西南涡分布在四川盆地至二级地形地
 195 区，涡旋中心位于二级地形西部，二级地形以东区域受西南气流影响，并且在安徽河南交界处存
 196 在西南风和东南风的气旋性切变，与图 3i 的风场分布基本一致。发展至 1 日 03:00 BST，西南低
 197 涡的涡旋中心东移至二级地形地区，并在移动过程中进一步组织增强。05:00 BST 东移出地形后，
 198 西南低涡强度有所减弱（图 4j）。发展到 08:00 BST，西南低涡移至二级地形以东后重新组织发
 199 展，与 850 hPa 再分析场基本一致（图 4k）。18:00 BST 之后，涡旋强度逐渐减弱，组织结构逐
 200 渐零散化。发展至 20:00 BST，850 hPa 上基本无风场的闭合环流，正涡度中心也明显减弱（图
 201 4l）。整体来看，模拟的高低层环流形势的发展演变与再分析资料结果基本一致。



202 图 4 模拟环流场 500 hPa（左）：位势高度（蓝色实线，单位：gpm），风场（风羽：5 m·s⁻¹），
 203

相对涡度（彩色阴影，单位： 10^{-5}s^{-1} ）；700 hPa（中）：温度（彩色阴影，单位： $^{\circ}\text{C}$ ），风场（风羽： $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，风速大于 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 用红色标出），位势高度（黑色等值线）；850 hPa（右）：逐小时降水（彩色阴影，单位： $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ），风场（风羽： $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，风速大于 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 用蓝色标出），相对涡度（紫色等值线，单位： 10^{-4}s^{-1} ）。

Fig.4 The synoptic circulations of simulation at 500 hPa (left): geopotential height (blue line, unit: gpm), wind barb (full barb: $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and relative vorticity (shading, unit: 10^{-5}s^{-1}) ; 700 hPa (medium): temperature (shading, unit: $^{\circ}\text{C}$), wind barb (full barb: $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wind speeds greater than $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ are denoted by red barb), geopotential height (black line, unit: gpm); 850 hPa (right): hourly precipitation (color shading, unit: $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), wind barb (full barb: $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, wind speeds greater than $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ are denoted by blue barb), relative vorticity (purple line, unit: 10^{-4}s^{-1}).

4.3 降水结果对比

根据观测分析可以得出，此次过程中包括两次对流东移发展过程：一是高原东部对流形成后，东移至二级地形东部后减弱，午后在二级地形以东平原地区形成对流带；二是受西南低涡东部气旋性扰动影响，二级地形西部山区对流生成，东移出地形后与平原对流带合并加强，在长江中下游（尤其是湖北中部）产生较强降水。因此，模拟结果验证分为两个时段，第一时段为6月29日20:00 BST~30日22:00 BST，第二时段为6月30日22:00 BST~7月1日23:00 BST。从实况累积降水分布来看，第一时段降水集中在重庆及周边地区（二级地形西部山区），超过50mm的降水中心分布重庆西南部和北部，模拟结果基本复现出雨带的分布特征和北部降水中心，西南部降水中心略有偏差（图5a、b）。第二时段的降水显著增强，雨带整体东移，超过50mm雨带覆盖二级地形以东的长江中下游至江淮流域地区，呈东西向带状分布，局地降水中心（湖北安徽交界处）超过250mm（图5c、d）。模拟结果表明，模式较好地刻画出雨带的分布和降水的与落区，降水强度略强。

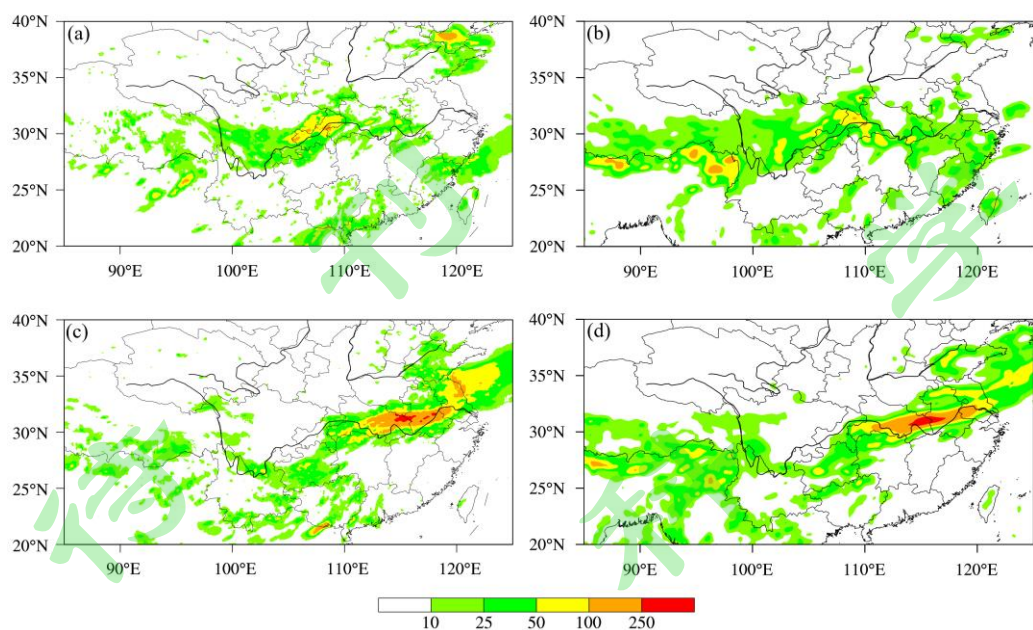


图5 6月29日20:00 BST~30日22:00 BST ((a)、(b)) 和6月30日22:00 BST~7月1日23:00 BST ((c)、(d)) 的累积降水量 (mm) : (a)、(c) 实况; (b)、(d) 模拟结果。

Fig.5 Cumulative precipitation (unit:mm) from 2000 BST on June 29, 2016 to 2200 BST on June 30, 2016 ((a)、(b)) and from 2200 BST on June 30, 2016 to 2300 BST on July 1, 2016 ((c)、(d)): (a), (c) observed precipitation; (b), (d) simulated precipitation.

选取 MCS 发展演变过程中各个阶段代表性时刻对比模拟与观测的逐小时降水分布情况 (图6), 对流形成阶段 (6月30日23:00 BST), 模拟降水与观测降水空间分布特征基本一致, 均主要位于贵州北部、重庆东部及长江中游等地区, 模拟降水强度略强(图 6a、b)。对流东移出二级地形阶段 (7月1日06:00 BST), 除江苏北部及安徽北部, 模拟降水可较好的刻画实况降水的强度和分布。雨带的分布与观测较为一致, 但落区较形成阶段有所东移(图 6c、d)。二级地形东移对流与下游对流系统合并阶段 (7月1日11:00 BST), 除分布在湖北、安徽中部地区的降水中心略偏强外, 模拟结果中降水分布特征与实况高度吻合, 降水带均横穿湖北、安徽及江苏等地区呈东西向带状分布(图 6e、f)。对流减弱阶段 (7月1日23:00 BST), 与之前阶段降水强度相比, 模拟和实况降水均明显减弱, 且主要位于安徽中部、江苏中南部及湖北东南部地区, 但模拟降水在江苏中南部地区雨强偏强, 覆盖范围偏大 (图 6g、h)。总体来看, 降水的模拟结果较完整的再现了二级地形对流东移过程中各个阶段实况降水的时空分布特征, 可用于研究二级地形对流东移影响下游降水的物理过程。

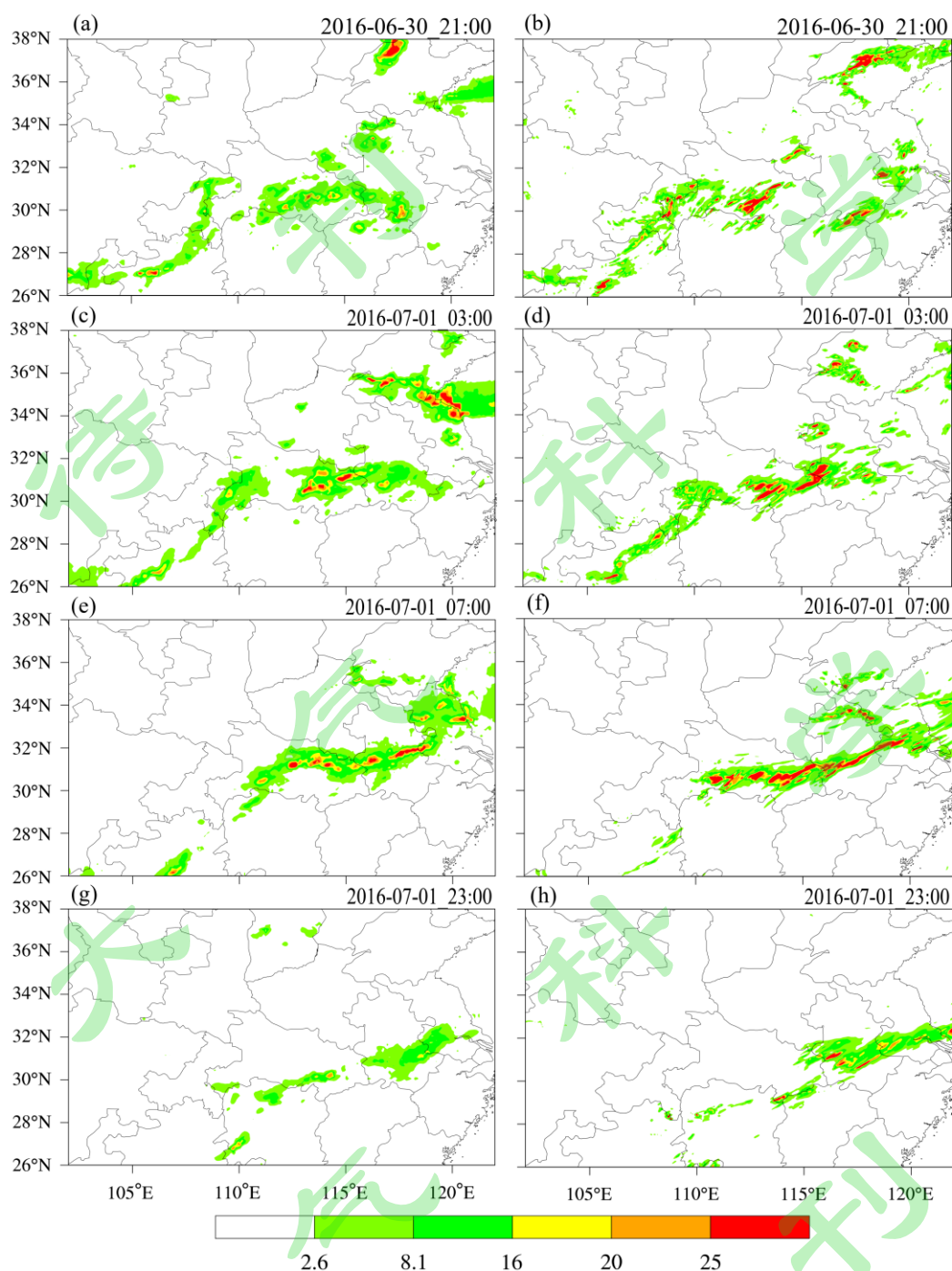


图 6 MCS 发展各个阶段代表性时刻逐时降水量（单位：mm），实况（左边）；模拟（右边）。

Fig.6 Hourly precipitation at representative moments of four stages in MCS lifetime: observation (left); simulation (right).

4.4 二级地形对流东移影响下游对流和涡旋的发展过程

通过与实况的降水过程、天气形势等对比可以看出，本次模拟较成功地再现了此次强降水过程。由实况分析（图 3）可以看出，二级地形新生对流东移出地形后，与受高原东部对流东移发

展形成的长江中游对流系统合并后发展加强，从而在二级地形东部的长江中下游地区造成强降雨。但模拟结果中对流发展较强，云顶温度较低，因此模拟结果中采用云顶温度 $\leq -56^{\circ}\text{C}$ 的云团展示 MCS 的发展演变过程（图 7）。根据云顶温度 $\leq -56^{\circ}\text{C}$ 的识别结果，2016 年 6 月 29 日 22:00 BST 在青藏高原东部边界（ 102.5°E ， 29°N 附近）有对流云团生成，此后不断发展东移，在 30 日 07:00 BST 到达四川盆地后对流增强，30 日 18:00 BST 之后，对流云团在二级地形以东的平原地区发展形成东西向对流云带 C2（图 7）。30 日 21:00 BST，重庆中部地区首次出现云顶温度小于 -52°C 的对流（C1），随后持续发展增强，2 小时后（即 30 日 23:00 BST）面积达到 5000km^2 ，即达到 MCS 形成时刻的标准，MCS1 形成（图 7a）。此后对流系统持续加强，1 日 03:00 BST 云顶最低温度达到 -82°C 以下（图 7c），并向东移出二级地形，07:00 BST 移到平原地区与下游对流（C2）合并后强度增强，并继续东移影响长江中下游地区（图 7e）。发展至 18:00 BST，对流强度明显减弱，22:00 BST，云团十分零散，趋于消亡（图 7i）。此次数值试验较好的复现出两次对流东移发展过程：一是对流在高原东部形成后，东移至二级地形以东平原地区形成对流带；二是新生对流在二级地形西部山区形成，东移出地形后与平原对流带合并加强，东移过程中影响长江中下游地区。基于上述模拟结果，本文关注于二级地形 MCS 生成后的发展机理，将二级地形 MCS 个例的发展过程划分为形成阶段（6 月 30 日 21:00 BST~7 月 1 日 03:00 BST），移出阶段（7 月 1 日 04:00 BST~06:00 BST），合并阶段（7 月 1 日 07:00 BST~17:00 BST）和减弱阶段（7 月 1 日 18:00 BST~23:00 BST）。与观测 MCS 的发展过程对比，模拟的二级地形 MCS 触发较早，形成阶段较观测早 1 小时；观测和模拟的 MCS 形成后均向东移出二级地形，移出阶段起止时间完全吻合；MCS 移出地形后与下游对流合并增强，模拟结果中 MCS 发展更为旺盛，合并阶段持续时间较观测长 1 小时；与合并阶段相对应，模拟 MCS 的减弱阶段开始时刻晚于观测 1 小时。综上所述，模拟结果中 MCS 四个阶段的划分与观测基本一致，因此本节利用模拟结果深入研究二级地形新生对流在各个阶段具体发展过程以及影响下游对流和涡旋发展的演变机理。

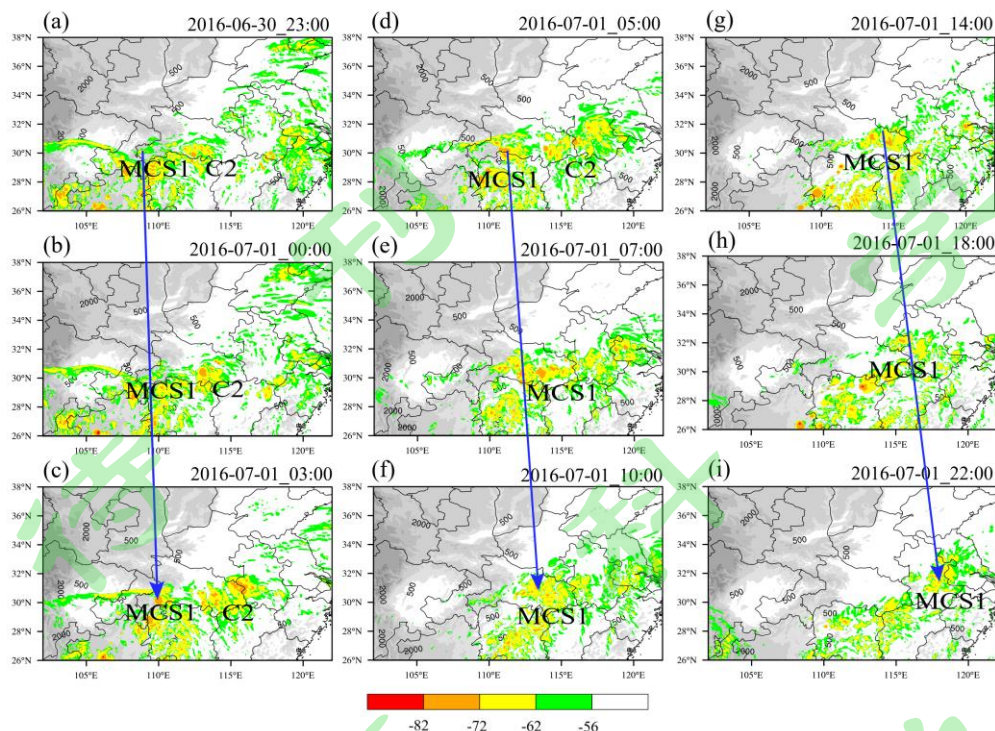


图 7 模拟的二级地形对流发展演变过程：云顶温度（单位：℃）。

Fig.7 The simulated evolution of convection over the second-step terrain identified by the cloud top temperature (unit: °C).

4.4.1 形成阶段（6 月 30 日 21:00 BST~7 月 1 日 03:00 BST）

6 月 30 日 21:00 BST，二级地形新生对流在二级地形西部（30° N，109° E 附近）触发，发展至 23:00 BST，对流组织形成 MCS1（图 7a）。7 月 1 日 03:00 BST，MCS1 在二级地形上东移并进一步发展加强（图 7c）。结合 850 hPa 风场分析，对流发生于西南低涡的中心附近，对应东南风和偏东风的气旋式切变。由于夜间西南低空急流的增强，风场辐合增强，二级地形 MCS1 形成（图 8a,b; 图 7a）。随着中层短波槽的东移，西南低涡东移发展，MCS1 也有所增强。1 日 03:00 BST，伴随西南低涡的涡旋中心东移至二级地形地区(图 8e)， MCS1 移至二级地形东部地区（图 7c）。700 hPa 风场和 850 hPa 类似，MCS1 位于西南低涡的东部气旋式切变区域，西南低涡对应于相对湿度和相当位温的高值区，为对流的发展提供良好的能量与水汽条件(图 8e,f)。垂直速度与假相当位温的垂直剖面（图 9a）也可以看出，MCS1 形成时在 109° E 附近，西侧对流层低层 1-2 km 存在涡度大值区。7 月 1 日 03:00 BST，对流发展加强，强上升运动已发展到 5 km 以上，水平方向上位于 110-111° E 之间（图 9c）。

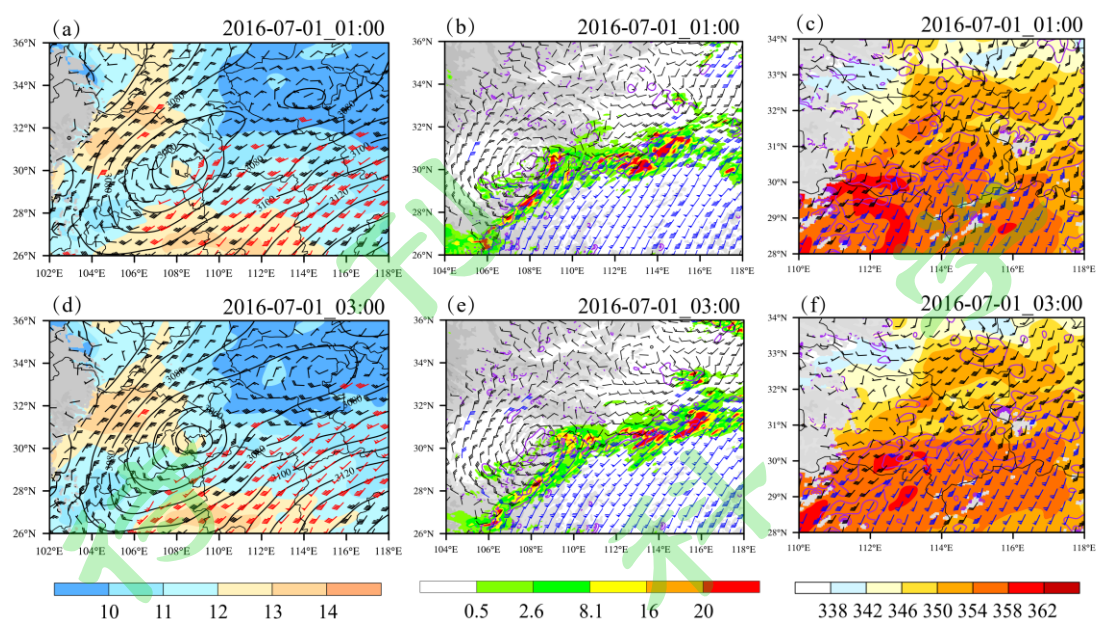


图 8 对流形成阶段中低层环流场，700 hPa（左侧）：温度（彩色阴影，单位：°C），风场（风羽：4 m·s⁻¹，风速大于 16 m·s⁻¹用红色标出），位势高度（黑色等值线）；850 hPa（中间）：逐小时降水（彩色阴影,单位：mm·h⁻¹），风场（风羽：4 m·s⁻¹，风速大于 12 m·s⁻¹用蓝色标出），相对涡度（紫色等值线，单位：10⁻⁴s⁻¹）；925 hPa（右侧）：相当位温（彩色阴影，单位：K），风场（风羽：4 m·s⁻¹，风速大于 16 m·s⁻¹用蓝色标出），散度（紫色等值线，单位：10⁻⁵s⁻¹）。

Fig.8 The synoptic weather pattern for formation stages of MCS at 700 hPa (left): temperature (shading, unit: °C), wind barb (full barb: 4 m·s⁻¹, wind speeds greater than 16 m·s⁻¹ are denoted by red barb), geopotential height (black line, unit: gpm); 850 hPa (medium): hourly precipitation (color shading, unit: mm·h⁻¹), wind barb (full barb: 4 m·s⁻¹, wind speeds greater than 12 m·s⁻¹ are denoted by blue barb), relative vorticity (purple line, unit: 10⁻⁴s⁻¹); 925 hPa (right): equivalent potential temperature (color shading, unit: K), wind barb (full barb: 4 m·s⁻¹, wind speeds greater than 16 m·s⁻¹ are denoted by blue barb) and divergence (purple line, unit: 10⁻⁵s⁻¹).

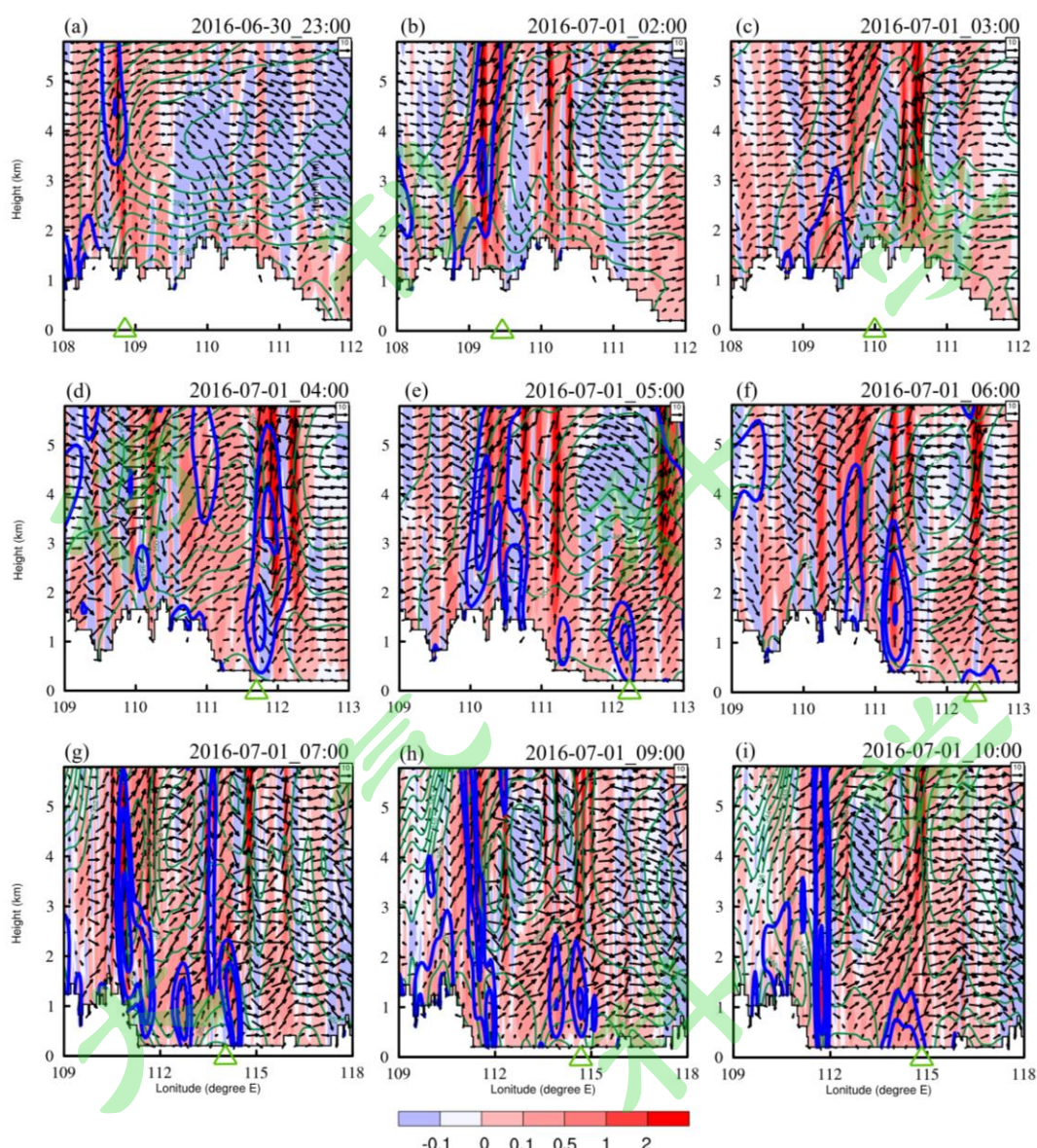


图 9 对流形成 (a、b、c)、移出 (d、e、f) 和合并 (g、h、i) 阶段沿 30.1°N 的垂直剖面图：垂直速度（彩色阴影，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），假相当位温（绿色等值线，单位：K），相对涡度（蓝色实线，只标出大于 $0.5\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 的涡度值），对流所在位置（绿色三角形）。

Fig.9 Height-longitudinal cross sections along 30.1°N during formation (a, b, c), propagating (d, e, f) and merging (g, h, i) stages of MCS: vertical velocity (shading, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), pseudo equivalent potential temperature (green line, unit: K), relative vorticity (greater than $0.5\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$, blue line), location of MCS (green triangle).

4.4.2 移出阶段（7 月 1 日 04:00 BST~06:00 BST）

7 月 1 日 04:00 BST~06:00 BST，MCS1 东移加强后逐渐移出地形，此时长江中下游地区有对流 C2（高原东移对流所致）稳定维持（图 7d）。对流移出过程中，二级地形东侧地形过渡区

内降水显著增强，强降水的影响区域不断扩展（图 10b, e）。自 7 月 1 日 04:00 BST, 700 hPa 上，
二级地形以东的长江中下游地区西南低空急流发展强盛，暖湿气流输送充足，对应于相对湿度和
相当位温的高值区（图 10a、 d）；850 hPa 上，西南低涡在东移过程中逐渐减弱（图 10b、 e）；
925 hPa 风场上出现西南风和东北风的切变扰动，说明由于对流的发展增强，上升运动强烈发展，
对流层低层（925 hPa）的辐合增强，二级地形东侧 30°N 附近出现了气旋式切变（图 10c, f）。
垂直剖面上（图 9f），06:00 BST 对流移出二级地形进入平原区，移出后的 MCS1 与下游已有对
流 C2 开始合并，对流带位于低空急流的北部边界（图 10d、 e）。

与形成阶段相比，对流层中层（500 hPa）的引导气流增强有利于二级地形新生对流东移，
并逐渐移出地形（图 4b）。对流层低层，700 hPa 上的西南气流明显增强，风速大值区（ $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
以上）逐渐向北推进且覆盖范围增大，有利于暖湿气流向北输送（图 10a、 d）。同时，850 hPa
上，位于对流东南侧的低空急流明显增强，强的低层辐合和充足的水汽输送有利于对流的发展东
移（图 10b、 e）。因此，对流层中低层的环流形势有利于二级地形新生对流逐渐移出地形。

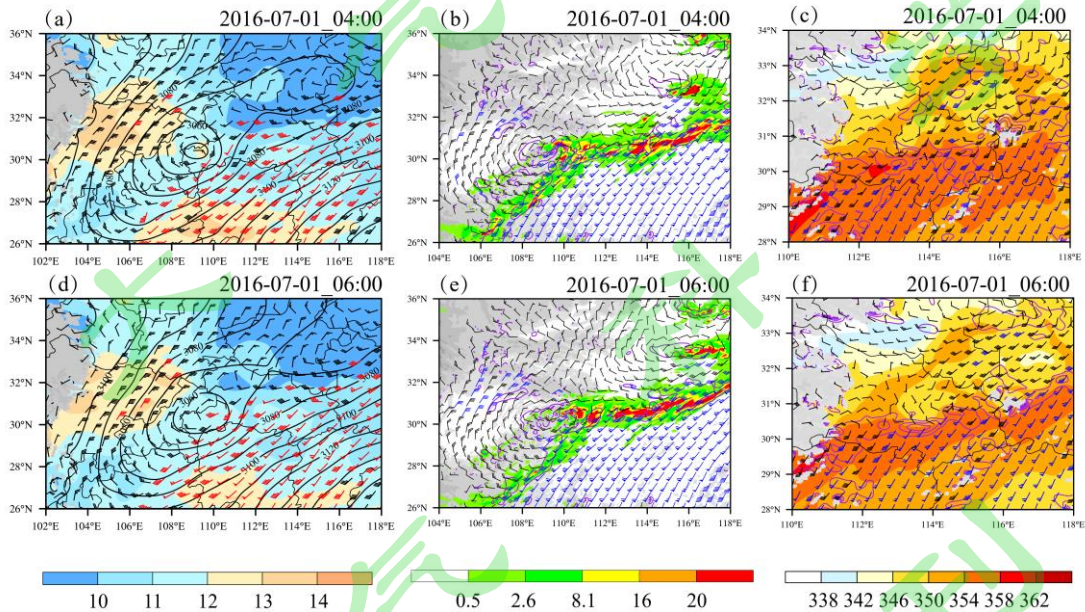


图 10 同图 8，但为对流移出阶段。

Fig.10 As in Fig.8, but for propagating stage of MCS.

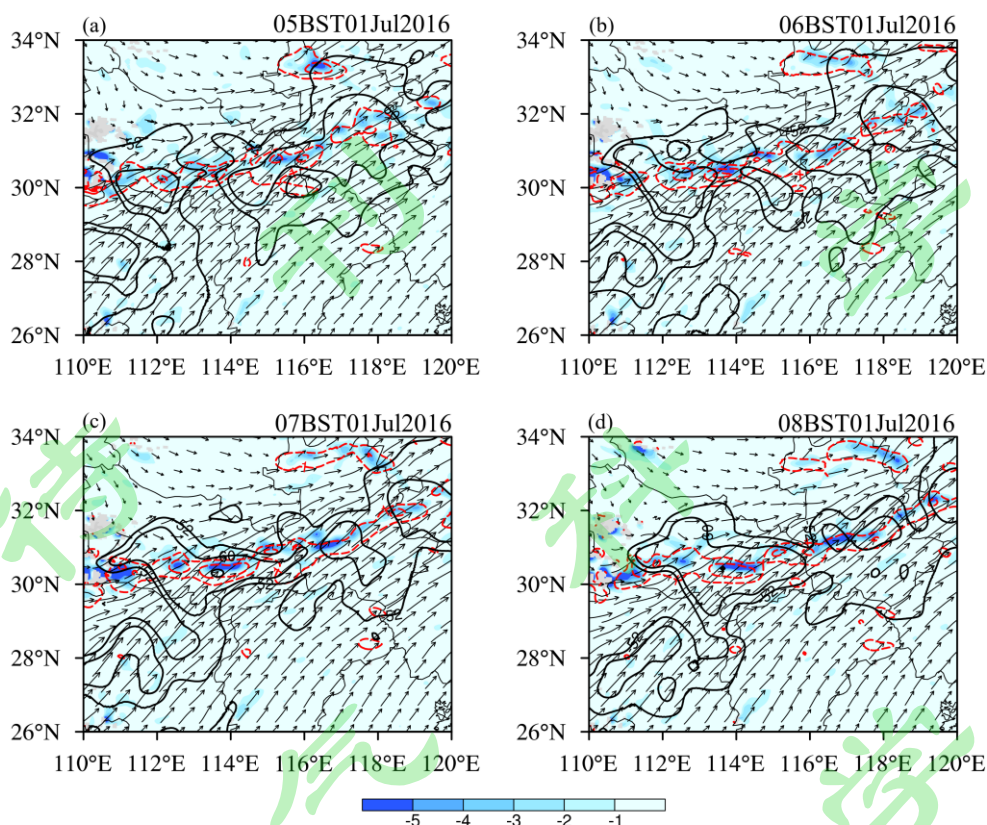


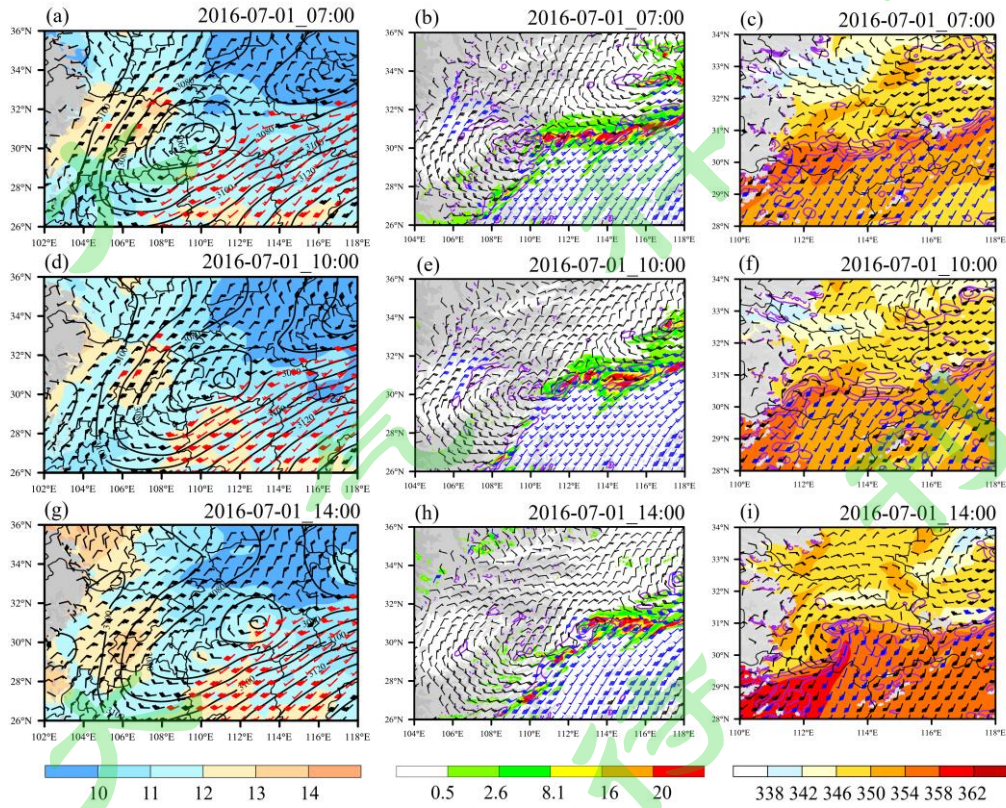
图 11 2016 年 7 月 1 日 05:00~08:00 BST 模拟的 500 hPa 水平风场(黑色箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、850 hPa 散度(彩色阴影,单位: 10^{-5}s^{-1})、850 hPa 垂直速度(红色虚线,只标出大于等于 1 的垂直速度值,单位: $10^{-1}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和云顶温度(黑色等值线,只标出小于等于 -52°C 的云顶温度值,单位: $^{\circ}\text{C}$)。

Fig.11 Simulated wind field at 500 hPa (black arrow, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), relative vorticity at 850 hPa (purple line, unit: 10^{-5}s^{-1}), the vertical velocity more than 1 at 850 hPa (red dashed lines, units: $10^{-1}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and cloud top temperature (cloud top temperature lower than -52°C is denoted by black line, unit: $^{\circ}\text{C}$) from 0500 BST to 0800 BST on July 1, 2016.

4.4.3 合并阶段(7月1日 07:00 BST~17:00 BST)

7月1日05时,对流云团合并前,MCS1和下游已有对流C2均主要位于850hPa西南低空急流形成的辐合区内,强中心位置与急流北侧风场的强辐合带(30°N 附近)相吻合,为对流的合并提供较好的动力条件。对流层中层500hPa对应槽前西南引导气流,西风分量较强,云团北侧为西风气流,有利于MCS的东移,并与下游对流合并(图11a)。7月1日06时,850hPa急流北侧辐合带发展增强,上升运动也有所增强,对流云团与下游对流开始合并(图11b)。7月1日07:00BST,MCS1完全东移出地形并与下游已有对流C2合并,合并后的对流系统发展

350 增强（图 11c），强上升运动出现在二级地形的东部边界（111°E 附近）。伴随对流的合并增强，
351 江汉地区降水逐渐发展加强，连接形成一条近乎东西走向的降水带（图 12b）。强降水释放的凝
352 结潜热有效推动了垂直上升运动的发展增强，其不断向高层延伸。随着对流的合并发展，上升运
353 动进一步增强，从而促进辐合增强（图 1c、d）诱发低层涡旋，对流与涡旋的耦合促使对流发展，
354 从而引发强降水。发展至 1 日 10:00 BST，925 hPa 风场在二级地形东部边界的（112°E，30°N 附
355 近）相当位温高值区出现闭合环流，低层涡旋形成。垂直剖面图可清晰反映出低层 925 hPa 附近
356 的正涡度高值中心（图 9i）。与之对应，850 hPa 上的正相对涡度值增大，流场呈现出闭合的气
357 旋式结构，700 hPa 西南涡亦东移至二级地形东部边界（图 12d），中低层涡度中心垂直打通。
358 与此同时，合并后的对流云团与涡旋逐渐耦合，由于垂直上升运动的叠加增强效应，对流组织发
359 展并东移，长江中下游地区的降水也随之增强，影响区域向南北邻近区域扩展。此后涡旋东移发
360 展增强，逐渐演变为中尺度涡旋，在 14:00 BST 达到最强，此时 700 hPa 西南涡发展加强并移出
361 二级地形，涡旋中心附近温度明显升高(图 12g), 925 hPa 涡旋亦明显增强并东移至二级地形以东，
362 涡旋南部相当位温明显升高(图 12i)。伴随中低层涡旋的东移，对流系统和降水落区逐渐移至长
363 江中下游地区。



364

365

图 12 同图 8，但为对流合并阶段。

366

Fig.12 As in Fig.8, but for merging stage of MCS.

4.4.4 减弱阶段（7月1日 18:00 BST~23:00 BST）

7月1日 18:00 BST, 850 hPa 涡旋中心基本稳定在 114° E 附近, 但强度明显减弱(图 13b)。对流系统东移且速度较快, 逐渐脱离涡旋中心东移至涡旋的东北部, 强度亦明显减弱。与此同时, 降水的覆盖范围逐渐移至长江下游地区, 小时雨强显著减弱。伴随对流的东移和减弱, 涡旋也有所减弱, 发展至 21:00 BST, 850 hPa 上基本无风场的闭合环流, 涡度中心也明显减弱。此时涡旋南部中低层西南气流减弱, 水汽输送明显减少(图 13e), 700 hPa 上相对湿度的大值带明显减弱, 覆盖范围南退至 30° N 以南地区(图 13d), 低层 925 hPa 上相当位温的中心值也明显降低(图 13f), 以上条件均不利于对流和涡旋的继续发展和维持。此后, 对流系统快速减弱至消亡。

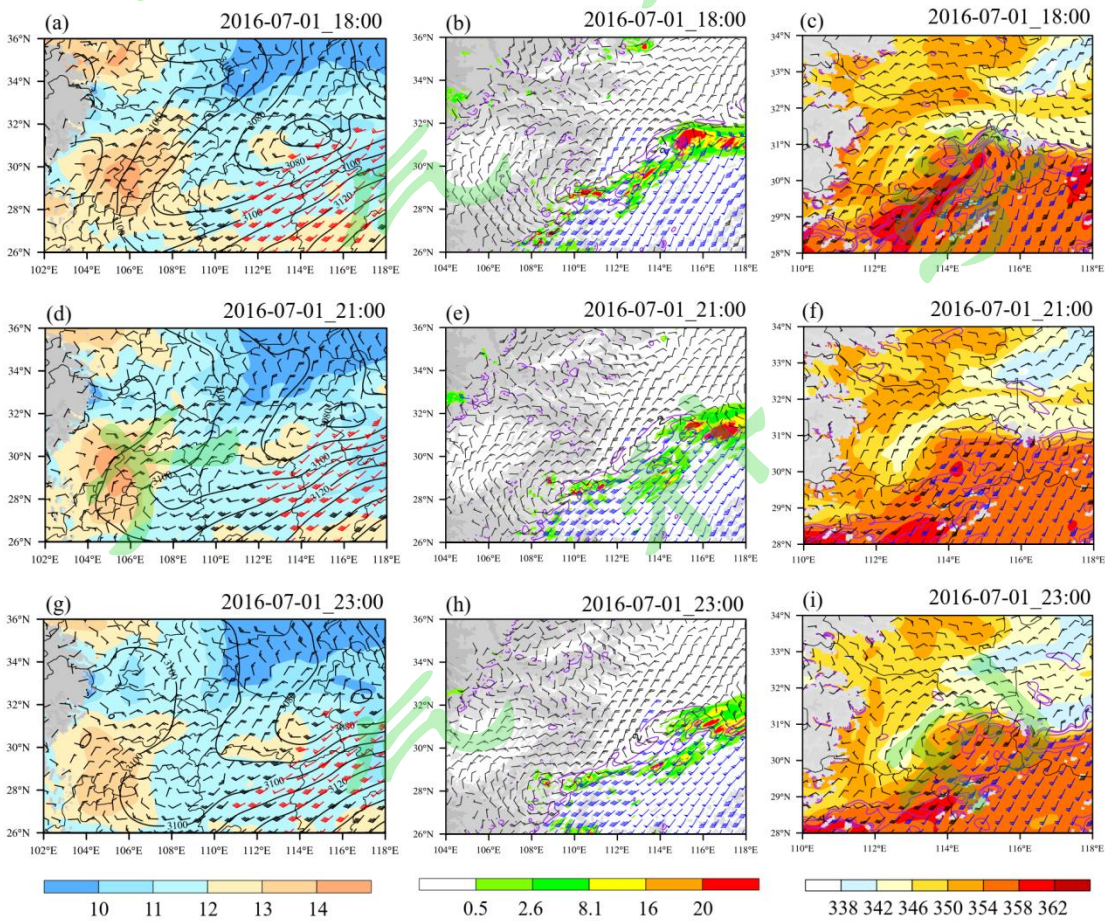


图 13 同图 8, 但为对流减弱阶段。
Fig.13 As in Fig.8, but for wakening stage of MCS.

5 结论与讨论

本文选取了二级地形对流与高原东移对流合并发展,影响下游对流系统发展,并导致长江中游至江淮流域地区出现较大范围强降水过程。此次过程发生于 2016 年 6 月 29 日 22:00 BST~7 月 1 日 23:00 BST,高原东部对流东移减弱,移至二级地形以东后零散对流在下游再次发展,二级地形对流形成于西南低涡的东北部,东移出地形后与下游再次发展的对流合并,进一步发展增强,影响下游平原地区产生较强降水,长江中游地区尤为显著。

通过高分辨率的数值模式(WRFV3.8)开展数值试验,模式的初始和边界条件加入地面和探空资料客观分析后,模拟结果清楚地再现了二级地形对流东移与高原东移对流合并发展影响下游对流系统的发展过程,较好地刻画出长江中下游地区降水的时空分布特征。主要取得以下结论:

高原东部对流东移至二级地形东部后在长江中下游地区减弱形成零散对流。同时,在西南低涡东北部的气旋性扰动区内,二级地形西部山地有对流形成。形成后的对流东移发展,主要经过以下四个阶段,1)形成阶段(6月30日23:00 BST),由于西南低涡东北的气旋式扰动,二级地形新生对流于夜间在西部山地地区形成,至次日凌晨(7月1日03:00 BST)东移到二级地形东部边界并且增强发展。2)移出阶段(1日04:00~06:00 BST),发展加强后的二级地形新生对流逐渐移出地形。3)合并阶段,下游已有零散对流(高原东部对流东移至二级地形东部所致)在午后逐渐组织起来后,受到夜间增强的低空急流影响,进一步发展成对流云团。1日07:00 BST,二级地形新生对流完全移出地形后,与下游零散对流形成的对流云团合并。合并后的对流进一步发展加强,推动上升运动强烈发展,低层辐合增强,从而在对流层低层诱发中尺度涡旋,涡旋和对流共同发展,引发长江中下游地区强降水。4)减弱阶段,1日17:00 BST后,对流东移速度较快,而中尺度涡旋基本稳定在 114° E附近,强度明显减弱,21:00 BST后基本无闭合环流。23:00 BST,对流快速减弱至消亡。

通过此次典型过程的数值模拟和机理研究,揭示出一次二级地形新生对流触发东移后与高原东移对流合并增强,诱发对流层低层中尺度涡旋,以及影响下游对流系统和降水的物理过程和发展机理,对长江中下游地区中尺度对流系统和降水的预报提供一定的参考意义。由于本文仅基于一个个例的数值模拟开展研究,未来将通过多个典型个例对此类二级地形对流东移影响下游降水的物理机制进行深入探索。此外,本文的数值模拟只针对二级地形 MCS 和下游已有对流合并的个例,未来还需要研究在无下游对流的情况下,二级地形对对流的触发和东移的影响机理。

参考文献:

- 沈艳, 潘昀, 宇婧婧, 等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估 [J]. 大气科学学报, 36(1): 37-46. Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 36(1): 37-46. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2013.01.005
- 王晓芳, 李超, 杨浩, 等. 2020. 青藏高原东移云团研究进展 [J]. 暴雨灾害, 39(5): 433-441. Wang Xiaofang, Li Chao, Yang Hao, et al. 2020. Research progress on east-moving cloud clusters from the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 39(5): 433-441. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.001
- 王婧羽, 王晓芳, 汪小康, 等. 2019. 青藏高原云团东传过程及其中中尺度对流系统的统计特征 [J]. 大气科学, 43(5): 1019-1040. Wang Jingyu, Wang Xiaofang, Wang Xiaokang, et al. 2019. Statistical Characteristics of Eastward Propagation of Cloud Clusters from the Tibetan Plateau and Mesoscale Convective Systems Embedded in These Cloud Clusters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(5): 1019-1040. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18167
- 汤欢, 傅慎明, 孙建华, 等. 2020. 一次高原东移 MCS 与下游西南低涡作用并产生强降水事件的研究 [J]. 大气科学, 44(6): 1275-1290. Tang Huan, Fu Shenming, Sun Jianhua, et al. 2020. Investigation of Severe Precipitation Event Caused by an Eastward-Propagating MCS Originating from the Tibetan Plateau and a Downstream Southwest Vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1275-1290. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19206
- 单寅, 林珏, 付慰慈, 等. 2003. 夏季青藏高原上中尺度对流系统初生阶段特征 [J]. 热带气象学报, 19(1): 61-65. Shan Yin, Lin Hui, Fu Weici, et al. 2003. The Features of MCS during its Initiation over Tibetan Plateau in Summer [J]. Journal of Tropical Meteorology, 19(1): 61-65. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2003.01.008
- 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 2011. 梅雨期青藏高原东移对流系统影响江淮流域降水的研究 [J]. 气象学报, 69(4): 581-600. Fu Shenming, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2011. A study of the impacts of the eastwards propagation of convective cloud systems over the Tibetan Plateau on the rainfall of the Yangtze-Huai River basin [J]. Acta Meteorologica Sinica, 69(4): 581-600. doi: 10.11676/qxxb2011.051

田珊儒, 段安民, 王子谦, 等. 2015. 地面加热与高原低涡和对流系统相互作用的一个个例研究 [J]. 大气科学, 39(1): 125-136. Tian Shanru, Duan Anmin, Wang Ziqian, et al. 2015. Interaction of surface heating, the Tibetan Plateau vortex, and a convective system: A case study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 125-136. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13311

沙莎, 沈新勇, 李小凡. 2018. 一次梅雨锋暴雨过程中多尺度能量相互作用的研究 II. 实际应用 [J]. 大气科学, 42 (5): 1119-1132. Sha Sha, Shen Xinyong, Li Xiaofan, et al. 2018. The study of multi-scale energy interactions during a Meiyu front rainstorm. Part II: Practical application [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (5): 1119-1132. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17196

周海光. 2008. , 强热带风暴碧利斯 (0604) 引发的特大暴雨中尺度结构多普勒雷达资料分析 [J]. 大气科学, 32(6): 1289-1308. Zhou Haiguang. 2008. 3D structure of the heavy rainfall caused by BILIS (0604) with doppler radar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1289-1308. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.05

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

胡亮, 徐祥德, 赵平. 2018. 夏季青藏高原对流系统移出高原的气象背景场分析 [J]. 气象学报, 76(6): 944-954. Hu Liang, Xu Xiangde, Zhao Ping. 2018. A study of the meteorological background of convective systems over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica, 76(6): 944-954. doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2003.01.008

高守亭, 孙建华, 崔晓鹏. 2008. 暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究 [J]. 大气科学, 32(4): 854-866. Gao Shouting, Sun Jianhua, Cui Xiaopeng. 2008. Numerical simulation and dynamic analysis of mesoscale torrential rain systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(4): 854-866. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.13

Yang R Y, Zhang Y C, Sun J H, et al. 2019. The characteristics and classification of eastward-propagating mesoscale convective systems generated over the second-step terrain in the

- Yangtze River Valley [J]. Atmos. Sci. Lett., 20:e874. doi: 10.1002/asl.874
- Jun L, Wang B, W D H. 2012. The characteristics of mesoscale convective systems (MCSs) over East Asia in warm seasons [J]. Atmos. Oceanic. Sci. Lett., 5(2): 102–107. doi: 10.1080/16742834.2012.11446973
- Yang R Y, Zhang Y C, Sun J H, et al. 2020. The comparison of statistical features and synoptic circulations between the eastward-propagating and quasi-stationary MCSs during the warm season around the second-step terrain along the middle reaches of the Yangtze River [J]. Sci. China. Earth. Sci., 63: 1209–1222. doi: 10.1007/s11430-018-9385-3
- Zhang Y C, Sun J H, Fu S M. 2014. Impacts of diurnal variation of mountain-plain solenoid circulations on precipitation and vortices east of the Tibetan Plateau during the mei-yu season [J]. Adv. Atmos. Sci., 31(1): 139-153. doi: 10.1007/s00376-013-2052-0
- Sun J H, Zhang F Q. 2012. Impacts of mountain-plains solenoid on diurnal variations of rainfalls along the Mei-yu front over the East China plains [J]. Mon. Wea. Rev., 140: 379-397. doi: 10.1175/mwr-d-11-00041.1
- Bao X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation east of the Tibetan Plateau over China [J]. Mon. Wea. Rev., 139(9): 2790-2810. doi: 10.1175/mwr-d-11-00006.1
- Hu L, Deng D F, Gao S T, et al. 2016. The seasonal variation of Tibetan convective systems: Satellite Observation: Seasonal change of Tibetan CS [J]. J Geophys Res: Atmospheres, 121(10): 5512-5525. doi: 10.1002/2015jd024390
- Fu S M, Mai Z, Sun J H, et al. 2019. Impacts of convective activity over the Tibetan Plateau on plateau vortex, southwest vortex, and downstream precipitation [J]. J Atmos Sci, 76: 3803-3830. doi: 10.1175/jas-d-18-0331.1
- Yasunari T, Miwa T. 2006. Convective Cloud Systems over the Tibetan Plateau and Their Impact on Meso-Scale Disturbances in the Meiyu/Baiu Frontal Zone [J]. J METEOROL SOC JPN, 84(4): 783-803. doi: 10.2151/jmsj.84.783
- Li J, Wang B, Wang D H. 2012. The characteristics of mesoscale convective systems (MCSs) over East Asia in warm seasons [J]. Atmos. Oceanic. Sci. Lett., 5: 102–107. doi: 10.1080/16742834.2012.11446973

498 Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous
499 China [J]. Geophys Res Lett, 34: L01704. doi: 10.1029/2006gl028129
500 Zhang Y C, Sun J H, Yang R Y, et al. 2022. Initiation and evolution of long-lived eastward propagating
501 mesoscale convective systems over the second-step terrain along Yangtze-Huaihe River Valley [J].
502 Adv. Atmos. Sci., 39(5): 763–781.
503 doi: 10.1007/s00376-022-1303-3
504