

李超,崔春光,蒋兴文,等,2018.特殊地形对鄂东北一次局地强降水过程的作用机制分析[J].气象,44(9):1117-1135.

特殊地形对鄂东北一次局地强降水过程 的作用机制分析^{*}

李超^{1,2} 崔春光^{1,2} 蒋兴文³ 王晓芳^{1,2} 赖安伟^{1,2} 汪小康^{1,2}

1 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430205

2 暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

3 中国气象局成都高原气象研究所,成都 610072

提 要: 基于 FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料和来自国家气象信息中心的区域自动站与 CMORPH 小时降水融合产品,通过高分辨率的 WRF 数值模拟,本文重点分析了 2015 年 7 月 22—24 日期间在西南涡东移过程中,受长江中下游特殊地形影响,在鄂东北江汉平原河谷地区诱发生成的一次短时局地强降水天气过程,围绕特殊地形对局地降水增幅的作用机制展开一系列的深入研究,研究表明:此次局地强降水过程是在长江中下游特殊的中尺度地形影响下,配合东移西南涡前部偏南暖湿气流的输送,两者共同作用而诱发产生,此次局地降水过程持续时间短,降水增幅显著。之后,通过研究单一地形对局地降水的影响发现,大别山脉作为单一地形的作用效果为提升局地降水增幅,扩大强降水范围;幕阜山脉作为单一地形的作用效果为削弱降水增幅,缩小强降水范围。进一步深入分析上述单一地形影响降水变化的作用机制得出,大别山脉的地形作用有利于局地强降水区附近对流层低层的层结对流不稳定性增强,以及降水区近地面层冷池的维持和增强,有利于提升局地降水的增幅。而与大别山脉对局地降水作用效果不同,就幕阜山脉单一地形而言,地形对偏南暖湿气流的阻挡作用,削弱了局地强降水期间进入降水区的水汽通量,继而对局地降水的增幅有抑制作用。此外通过研究组合地形对局地降水的影响时发现,大别山脉、幕阜山脉、皖南山地,以及幕阜山脉和皖南山地之间的狭窄河谷地形共同构成的类似“喇叭口”地形,其产生的狭管效应,使进入地形区内的偏南气流辐合加强,而幕阜山脉和大别山脉之间的河谷地区,作为偏南气流从幕阜山脉东侧绕流进入江汉平原的重要通道,有效保证了强降水区域内充足的正涡度平流输送,上述有利的地形组合配置对于局地降水发展增强起到了至关重要的作用。

关键词: 东移西南涡,降水增幅,特殊地形,对流不稳定,冷池,涡度平流

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.001

Mechanism Analysis of the Effect of Special Topography in Middle-Lower Reaches of Yangtze River on Local Severe Precipitation in Northeast Hubei

LI Chao^{1,2} CUI Chunguang^{1,2} JIANG Xingwen³ WANG Xiaofang^{1,2}
LAI Anwei^{1,2} WANG Xiaokang^{1,2}

1 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

2 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Wuhan 430205

3 Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072

Abstract: Based on FNL reanalysis data and hourly precipitation data converted from both regional meteorological station and CMORPH and using the method of high resolution WRF numerical simulation, this

^{*} 国家自然科学基金项目(41375057,91637211,41620104009 和 41541037)及湖北省气象局科技课题(2016S05)共同资助

2017 年 5 月 4 日收稿; 2017 年 12 月 21 日收修定稿

第一作者:李超,主要从事中尺度天气诊断和模拟研究. Email:276385240@qq.com

通信作者:崔春光,主要从事雷达资料同化技术研究和中尺度暴雨形成机理研究. Email:cgcui@whhr.com.cn

paper analyzes a typical short-time local heavy rain process triggered by easterly mobile southwest vortex and complex terrain located in the northeast of Hubei in 22–24 July 2015. Further study is made on possible effect mechanism of how the mesoscale topography affects the increment of local rainfall. The result shows that the increment process of local rainfall was under the influence of the special topography in the middle-lower reaches of Yangtze River, coupled with the effect of transportation of moist air in the front of southwest vortex. The two items worked together, triggering the weather process. The duration of local rainfall was short, but the increment was obvious. By researching the effect mechanism of single terrain on the local rainfall, we found that the Dabie Mountain's terrain height impacted increment and scope of local severe rainfall positively, while the Mufu Mountain's terrain height influenced the increment and scope of local rainfall negatively. As for the effect of Dabie Mountain's terrain on the rainfall, the terrain was advantageous to reinforcement of convective instability, reinforcement of wind convergence and vertical shear, as well as maintenance and reinforcement of cold pool in lower troposphere. Different from Dabie Mountain's terrain, Mufu Mountain's terrain obstructed southerly moisture flow, then decreased the transportation of vapor flux above the rainfall area, which was unfavorable for increment of local rainfall. In addition, by researching the effect mechanism of the combined terrain on the local rainfall, we found the trumpet-shaped topography consisting of Dabie Mountain's terrain, Mufu Mountain's terrain, Wannan Mountain's terrain, and river valley between Mufu Mountain and Wannan Mountain, which forced the southerly airflow into terrain area to converge. What's more, the river valley between Mufu Mountain and Dabie Mountain acted as an important channel for the southerly airflow to flow back into the Jiangnan Plain from the east of Mufu Mountain, which effectively guaranteed the positive vorticity advection to be transported into the heavy precipitation area. In a word, the above favorable terrain configuration resulted in the increment of local severe rainfall.

Key words: easterly mobile southwest vortex, increment of rainfall, special topography, convective instability, cold pool, vorticity advection

引言

我国地形复杂且覆盖面积大,山区局地强对流天气和局地暴雨往往发生频繁且难于预报,中小尺度地形作用对局地暴雨等短时强降水的强度和落区有重要影响(Whiteman, 2000)。因此,地形的动力效应和热力效应及其对天气、气候的影响近年来一直是气象学家关注的重点科学问题之一。

关于中小尺度地形对天气、气候影响的研究,最早可以追溯到 20 世纪 30 年代, Lyra, Queney 等将流体力学中均质不可压有限厚度的绕流问题的表面波解应用到大气中小尺度气流过山问题中;而国内关于中小尺度地形作用的系统研究最早可以追溯到 20 世纪 50 年代,叶笃正(1956)当时对比总结了背风波的各种理论。之后随着外场观测试验的开展和理论研究的不断深入,人们逐渐认识到中小尺度地形作用不仅局限于动力作用,对应的具体表现为:驻

点、山脉波动、水跃、强下坡风、转子、尾流和位势涡度带等(Bougeault et al, 1997; 2001; Grubišić and Lewis, 2004; Grubišić et al, 2004)。除此之外,地形热力作用同样不能被忽视,由地形下垫面的差异及气流抬升释放的潜热决定的水平方向非均一受热程度(Prandtl, 1952; Gleeson, 1951),对局地风场和降水场变化亦有重要影响。

近年来随着数值模式的不断发展,基于不同模式围绕长江中下游的地形暴雨机理的研究工作陆续取得了一些富有价值的研究成果,例如崔春光等(2002)基于高分辨率的 η 坐标模式对 1998 年 7 月 21 日一次鄂东沿江的特大暴雨过程研究后发现,大别山对边界层偏南风暖湿气流的阻滞作用,使位于迎风面上游的暴雨带有所加强,幕阜山对边界层水汽输入的拦截则使位于背风面下游的暴雨带初期发展缓慢,地形抬高造成的摩擦辐合增强了此次暴雨过程。臧增亮等(2004)基于 ARPS 模式分析了 1999 年 6 月 23–24 日江淮地区一次暴雨过程指

出,偏南的暖湿气流爬坡易造成水汽场的辐合,而且地形对动力场和水汽场的影响与切变线的相对位置有关,当切变线上的垂直上升运动和爬坡效应相叠加时,对暴雨增幅效应最为明显。尹宜舟等(2009)利用 WRF 模式对 2007 年 7 月 8—9 日发生在淮河流域的梅雨锋暴雨进行了模拟及开展了相关的地形敏感性试验后发现,大别山地区地形对其邻近的区域(主要是湖北东北部及河南东南角)的降水影响很明显,在没有地形的情况下,地形所引起的切变消失,对应降水也消失,或者只剩下由气流切变产生的降水。赵玉春等(2011)基于 WRF 模式对具有大对流有效位能和条件不稳定层结下中小尺度地形降水的影响进行了一系列三维理想试验,结果发现在大对流有效位能和条件不稳定下,地形重力波破碎触发对流是地形对流降水的主要机制之一,地形重力波的形成、特征和传播受到环境条件制约,也受到地形自身参数的影响。当对流形成后,对流系统自身的下曳气流和降水蒸发冷却形成向外流出的低层辐散气流可激发新的对流,同时对流还可激发重力波与地形重力波相互作用,使地形降水模态复杂化。张家国等(2015)针对 2012 年 7 月 12—13 日湖北东北部一次连续两天的特大暴雨过程研究后发现,暴雨中尺度对流系统频发于鄂东北地区与大别山脉对雷暴冷池的阻挡有密切联系。受地形影响,向后传播演变的中尺度对流系统因少动或因列车效应明显,常在山前一定距离内产生极端强降水。

江淮地区和江南地区因其地形的复杂性,在长江中下游局地暴雨的发生发展过程中起着重要的作用,杨金钊等(1991)曾简单概括了该区域的地形特点,淮北主要为平原地区,江淮之间和江南分别为丘陵和山区,幕阜山、九岭山位于西南,九华山、黄山、天目山位于东南,大别山盘踞在江淮平原中部,而上述地形的不同加热和摩擦效应产生的中尺度环流对局地强对流天气有明显作用。

上述已有的研究成果有效地揭示了江淮地区中尺度地形暴雨发生机理,但是由于不同天气个例对应的环流背景场差异、中尺度地形差异以及模式本身的不确定性(杨金钊等,1991;孙健等,2002;冯强等,2004;盛春岩等,2012;李博等,2013;吴涛等,2017;郑婧等,2014),导致基于不同模拟数据得出的关于地形作用机理的某些研究结论有出入,因此,需要等将来更高分辨率的观测资料逐渐丰富后,对其进行进一步验证。

本文选取了 2015 年 7 月 22—24 日一次西南涡东移过程中,在长江中下游特殊地形影响下,诱发生成的短时局地强降水天气过程。利用高分辨率的数值模拟,通过不同的地形敏感性试验方案,分别从单一地形的影响和组合地形的影响等多个角度出发,探讨了长江中下游特殊地形对此次局地降水增幅的作用机制,主要是考虑到以下几点:一方面此前围绕江淮地形暴雨的研究成果中大多探讨的是地形对 α 中尺度及其以上尺度降水系统的影响,而围绕地形对 β 中尺度降水对流系统影响的研究却较少涉及,另一方面湖北东侧江淮地区中小尺度地形对纬向移动系统的影响比对经向移动系统的影响更为显著(王宛亭,2003)。此外,需要特别指出的一点,大别山脉、幕阜山脉,以及两者之间夹着的江汉平原河谷地区所构成的鄂东特殊地形区,即本文研究的短时局地强降水出现区域,一直是湖北省强降水的高发区之一(吴翠红等,2013),旨在通过本文的研究能进一步加深对该地区灾害性降水天气发生机理的认识,对提升区域极端降水预报水平产生积极的作用。

1 原始资料、模式参数简介与试验方案设计

本文选用的原始资料为 FNL 再分析资料,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为 6 h,垂直层数为 31 层。选用的逐小时降水资料为国家气象信息中心的区域自动站与 CMORPH 小时降水融合产品。

本文进行 WRF 模拟时涉及的主要参数如下:模式采用三层嵌套,内层到外层的格距依次为 3、9、27 km。模拟起始时间为 2015 年 7 月 22 日 20:00 (北京时,下同),终止时间为 2015 年 7 月 23 日 20:00,将模拟结果设定为逐小时输出。微物理过程方案选取 Thompson 方案,长波辐射方案选取 RRTM 方案,短波辐射方案选取 Dudhia 方案,近地层方案为 Monin-Obukhov 方案,陆面过程方案选取热量扩散方案,边界层方案选取 YSU 方案,最内层不采用积云参数化方案,中层、外层积云方案选取 BMJ 方案,侧边界为弹性侧边界。

为了深入研究长江中下游地区单一地形和组合地形对局地降水过程的作用机制,分别设计了如下四组地形敏感性试验,具体设计方案和试验目的如下表 1~表 4:

表 1 单一地形去除对局地降水影响的敏感性试验

Table 1 Sensitivity tests of removes of single terrain and combined terrain impact on local precipitation

名称	控制试验	敏感性试验	试验目的
试验方案一	所有地形均未作改变的原始模拟结果	去除大别山脉地形后对应的模拟结果	探究大别山脉的存在对局地降水变化的影响
试验方案二	所有地形均未作改变的原始模拟结果	去除幕阜山脉地形后对应的模拟结果	探究幕阜山脉的存在对局地降水变化的影响

表 2 单一地形的海拔高度改变对局地降水影响的敏感性试验

Table 2 Sensitivity tests of altitude variation of single terrain impact on local precipitation

名称	控制试验	敏感性试验一	敏感性试验二	试验目的
试验方案一	所有地形均未作改变的原始模拟结果	大别山脉地形高度增加 1 倍对应的模拟结果	大别山脉地形高度减半对应的模拟结果	探究大别山脉不同地形高度对局地降水变化的影响
试验方案二	所有地形均未作改变的原始模拟结果	幕阜山脉地形高度增加 1 倍对应的模拟结果	幕阜山脉地形高度减半对应的模拟结果	探究幕阜山脉不同地形高度对局地降水变化的影响

表 3 组合地形间气流通道的开启和关闭对局地降水影响的敏感性试验

Table 3 Sensitivity tests of the switch state of air channel between combined terrain impact on local precipitation

名称	控制试验	敏感性试验	试验目的
试验方案一	幕阜山脉与皖南山地之间的气流通道维持开启,即组合地形未作改变对应的原始模拟结果	针对幕阜山脉与皖南山地之间的气流通道,采用与二者近似等高的地形对其封堵(视为该气流通道关闭)之后对应的模拟结果	探究幕阜山脉与皖南山地之间狭窄河谷地形产生的狭管效应对局地降水变化的影响
试验方案二	幕阜山脉与大别山脉之间的气流通道维持开启,即组合地形未作改变对应的原始模拟结果	针对幕阜山脉与大别山脉之间的气流通道,采用与二者近似等高的地形对其封堵(视为该气流通道关闭)之后对应的模拟结果	探究幕阜山脉与大别山脉之间狭窄河谷地形产生的狭管效应和地形阻挡产生的绕流对局地降水变化的影响

表 4 基于特定组合地形对应的局地气流场改变对局地降水影响的敏感性试验

Table 4 Sensitivity tests of the variation of local wind field's impact on local precipitation based on specific combined terrain

名称	控制试验	敏感性试验	试验目的
试验方案一	长江中下游地形区附近对流层低层风场保持不变的原始模拟结果	长江中下游地形区南侧、低涡前侧对流层低层风场的经向风分量缩小 10 倍对应的模拟结果	探究针对特定的组合地形,局地气流场改变对局地降水变化的影响

2 东移西南涡对应的背景环流场与降水场分布特征分析

根据图 1 的背景环流场与降水场分布特征可以看出,西南涡初生于四川盆地东南部与云贵高原东部相连接地区,低涡发展成熟后,先朝东南方向移动至贵州地区,再折向东北方向,继续向东移动。在此期间,低涡诱发的降水主要位于低涡前部的偏南气流的水汽输送带内。此外,需要特别指出的是 23 日 02:00—08:00 时段内,由于受到东移西南涡外围环流和长江中下游特殊地形的影响,大别山脉上游河谷地区出现短时局地强降水中心(详见图 11 中的红

色方框处,降水强度达到特大暴雨量级),最初该强降水中心与低涡系统的主降水带相互独立,之后随着低涡继续东移发展,该强降水中心与低涡系统的主降水带合并增强,在引导气流的作用下,向长江下游地区移动。根据上述降水场的分布和演变特征,将 23 日 02:00—08:00 期间,鄂东北的降水过程视为一次典型的局地短时强降水过程。因此,为了进一步揭示此次鄂东复杂地形区局地强降水过程的发生发展机理,下文将根据高分辨率的数值模拟结果以及一系列的地形敏感性试验结果,重点研究长江中下游地区中尺度地形对此次局地强降水过程的作用机制。

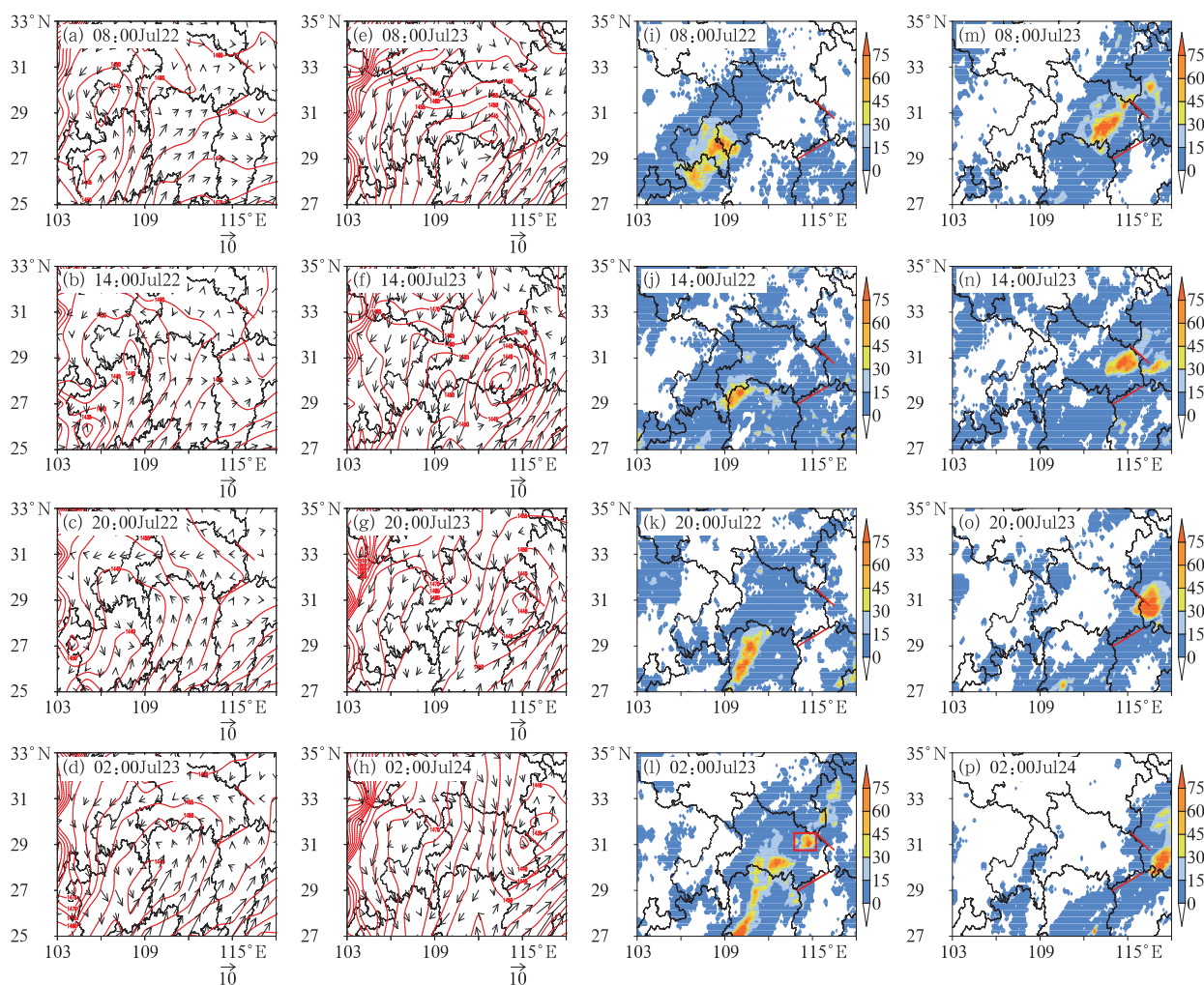


图1 2015年7月22日08:00至24日02:00西南涡东移期间对应的背景环流场和实况降水场

(a~h)环流场(矢量箭头表示850 hPa风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,等值线表示位势高度,单位: gpm),

(i~p)降水实况场(填色表示6 h累积降水量,单位: mm,图中红色实线分别代表大别山脉和幕阜山脉走向)

Fig. 1 The background circulation and observed precipitation within the period of southwest vortex easterly moving from 08:00 BT 22 to 02:00 BT 24 July 2015

(a~h) circulation field (vector arrow: 850 hPa wind field, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

contour: geopotential height, unit: gpm),

(i~p) observed precipitation (color area: 6 h cumulative precipitation, unit: mm,

red contour: the direction of Dabie Mountain and Mufu Mountain)

3 鄂东北局地降水过程的实况分析和模拟效果评估

对比图2降水实况场和模拟场可以得出,从总体上来说,WRF模式较准确地模拟出了该次大别山脉上游河谷地区的局地强降水过程,主要体现在以下两个方面:第一,模式模拟出的极端降水出现时间、位置与实况均保持一致,23日02:00之前,湖北

东侧地形区附近无强降水中心出现。23日02:00—05:00强降水中心出现,并位于大别山脉上游的河谷地区,强降水中心与低涡系统的主降水雨带相互独立,根据降水的上述演变特征,将这一时段视为局地强降水过程的发展增强阶段,下文将主要围绕这一时段内,地形对降水的增幅作用展开分析讨论。此后(23日05:00—08:00)强降水中心沿东北方向移动,虽然降水范围进一步扩大,但是降水强度未出现明显变化,根据降水的上述演变特征,将这一时段

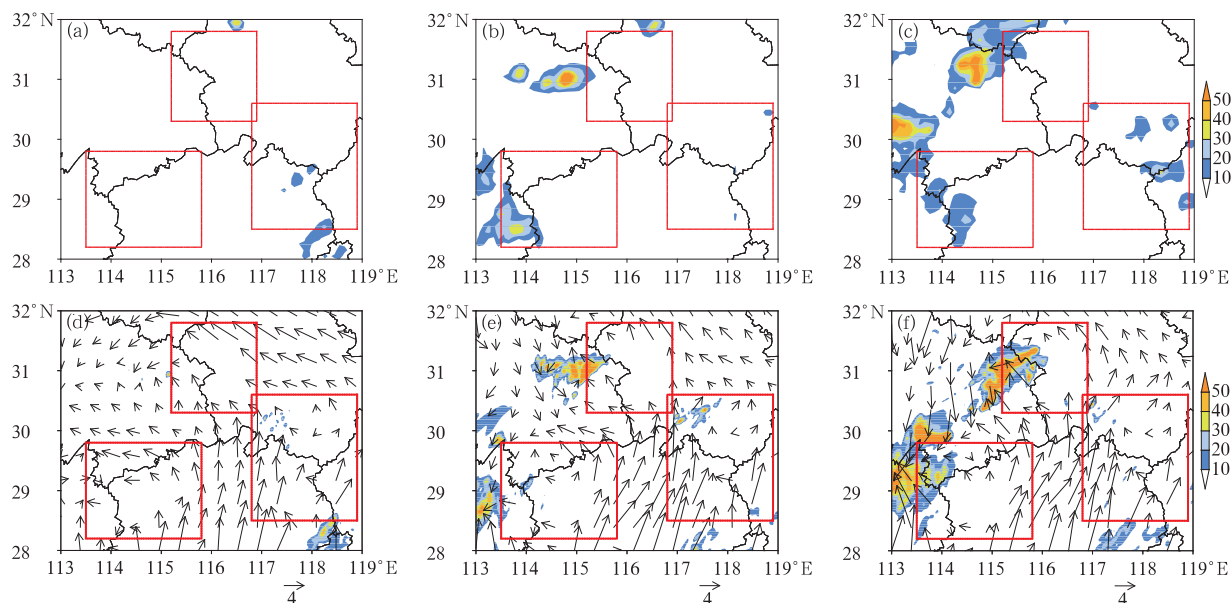


图 2 2015 年 7 月 22 日 23:00 至 23 日 08:00 逐 3 h 累积降水实况场和模拟场的对比

(a, b, c) 实况场, (d, e, f) 模拟场

(a, d) 22 日 23:00 至 23 日 02:00, (b, e) 23 日 02:00—05:00, (c, f) 23 日 05:00—08:00

(填色表示降水量, 单位: mm, 矢量箭头表示 900 hPa 风场, 红色方框区域为大别山脉、
幕阜山脉和皖南山地地形区)

Fig. 2 Comparison of the observation field and simulation field of 3 h cumulative precipitation
from 23:00 BT 22—08:00 BT 23 July 2015

(a, b, c) observation field, (d, e, f) simulation field

(color area: precipitation, unit: mm; red boxes: Dabie Mountain,

Mufu Mountain and Wannan Mountain, respectively)

视为降水的成熟维持阶段。第二, 模式模拟出的降水强度、走向与实况降水强度、走向基本保持一致, 且很好地反映出了强降水纬向型雨带的分布特征。综上所述, 该模拟场较准确再现了湖北东侧地形区附近该次局地强降水过程的分布特征, 模拟得到的高分辨率数据用于后续的分析研究是可行的。因此, 根据上述高分辨率模拟场(图 2d, 2e, 2f), 对此次局地强降水过程对应的天气系统及其与地形的相互配置关系做了简要的分析, 分析结果表明此次鄂东北的局地强降水过程受到东移西南涡前侧的偏南暖湿气流、北方南下的干冷气流, 以及长江中下游中尺度地形作用等多重因素, 共同影响下而诱发产生。低涡前侧对流层低层偏南暖湿气流, 从地形区南侧沿幕阜山脉与皖南山地之间的河谷地区进入地形区, 之后通过大别山脉与幕阜山脉之间的河谷地形, 绕流进入江汉平原, 在此与北方南下的干冷气流在大别山脉上游相汇, 此外参照局地降水分布特征发现, 局地降水最初在大别山脉上游迎风面出现增强, 之后沿着大别山脉迎风坡向东北方向移动, 而该强

降水区正好位于前文所述南北气流的交汇带上。因此, 有利的天气形势, 以及特殊的地形配置, 对局地降水的发展增强有重要影响。下文将从多个角度, 重点分析局地降水发展增强阶段(23 日 02:00—05:00), 长江中下游地形对局地降水的作用机制。

4 长江中下游地区主要地形区特点介绍

为了便于后文的研究, 本文将大别山脉及其附近的山地丘陵地形统一划分为大别山脉地形区, 将幕阜山脉及其附近的山地丘陵地形统一划分为幕阜山脉地形区, 皖南山地及其附近的丘陵地形统一划分为皖南山地地形区。从图 3 看出, 大别山脉地形区主要位于江淮平原中部, 山脉呈西北—东南走向。地形区大部分山峰海拔 400~800 m, 山地地区主要海拔 1200 m 以上。而本文幕阜山脉地形区主要是指包括幕阜山脉、连云山脉和九岭山脉在内的统一性的地理片区, 即广义的幕连九山脉, 其主要位于江

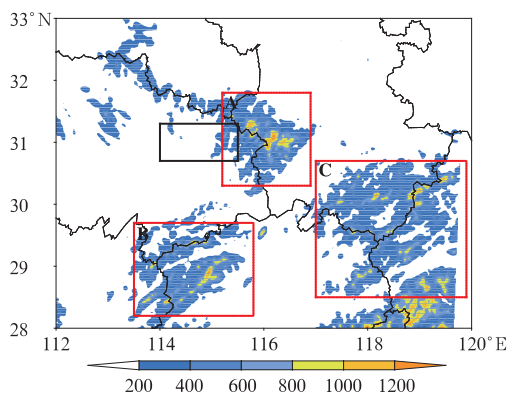


图3 长江中下游地区的主要地形分布和局地强降水的出现区域

(填色表示地形高度,单位:m,红色方框表示主要地形区,其中A为大别山脉地形区,B为幕阜山脉地形区,C为皖南山地地形区,黑色方框表示此次局地降水区所处的位置)

Fig. 3 The distribution of main topography in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the region of severe local precipitation (color area: topography, unit: m; red box: main topography; A: Dabie Mountain, B: Mufu Mountain, and C: Wannan Mountain; black box: the severe local precipitation)

汉平原南侧的湖北、湖南、江西三省交界处,山脉呈东北—西南走向,地形区内主要山峰海拔多在千米以上,平均海拔在1000 m以下。皖南山地地形区以丘陵地形为主,主要由天目—白际山脉、黄山山脉

和九华山脉组成,其主要位于长江中下游平原丘陵地区以南的山地丘陵地带,山脉也呈准东北—西南走向,地形区内大部分山峰海拔在800 m以下。三大地形区呈三极分布特征,尤其针对从上述地形区南侧,沿幕阜山脉地形区和皖南山地地形区之间的河谷地区进入地形区的低层偏南气流有汇聚和增强作用。此次局地强降水过程发生于大别山脉上游迎风坡处,降水的形成可能与大别山脉地形抬升和偏东气流的地形绕流作用有紧密联系,下文将通过一系列的地形敏感性试验和深入的研究分析,进一步揭示局地强降水的发生发展机制。

5 地形对局地降水变化的影响

5.1 单一地形的存在对局地降水变化的影响

通过对比大别山脉地形去除的控制试验和敏感性试验(图4)结果看出,当大别山脉地形去除后,强降水带向东延伸,继而证实大别山脉地形对降水带东移有阻滞作用,地形作用使迎风坡处降水增强,而根据逐小时的区域平均降水强度的对比结果(图4c)看出,大别山脉的存在(图4c黑色实线)提升局地降水增强的幅度,即地形对局地降水的增强有促进作用。通过对比幕阜山脉地形去除的控制试验和敏感性试验(图5)结果看出,当幕阜山脉地形去除

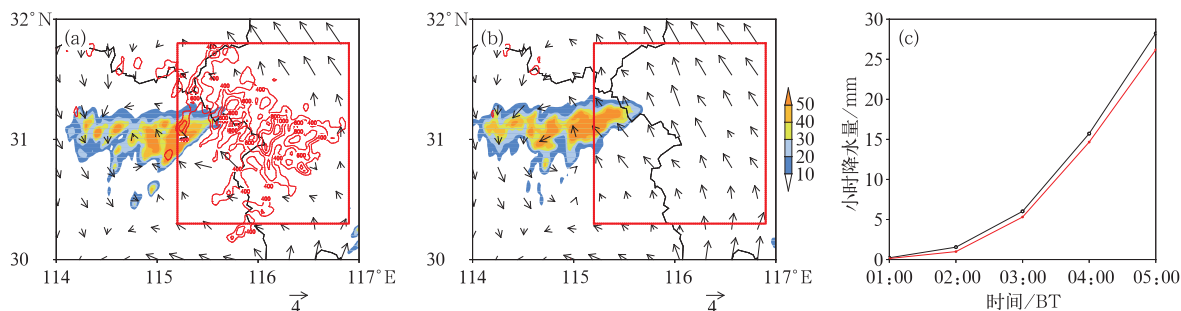


图4 2015年7月23日02:00—05:00基于大别山脉有无的累积降水敏感性试验对比

(a)大别山脉地形未作改变的控制试验,(b)大别山脉地形完全移除的敏感性试验

(填色:降水量,单位:mm;矢量箭头:02:00时刻900 hPa等压面风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

红色方框:大别山脉地形区,等值线:地形高度,单位:m);

(c)敏感性试验与控制试验在降水中心附近区域平均的逐小时降水量

(黑色实线:控制试验,红色实线:大别山脉地形完全移除对应的敏感性试验)

Fig. 4 Comparison of cumulative precipitation in control test and sensitivity test based on the remove of Dabie Mountain terrain during 02:00–05:00 BT 23 July 2015

(a) control test, (b) sensitivity test of remove of Dabie Mountain

(color area: precipitation, unit: mm; vector arrow: wind field at 900 hPa at 02:00, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; red box: Dabie Mountain area; contour: terrain height, unit: m); (c) regional mean hourly precipitation of control test and sensitivity test separately (black contour: control test, red contour: sensitivity test of remove of Dabie Mountain)

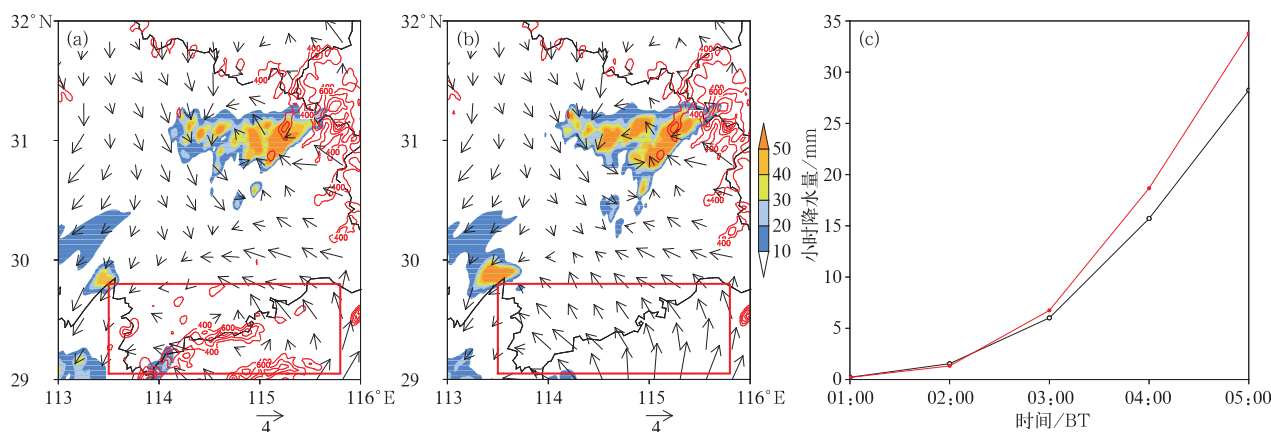


图5 同图4,但为幕阜山脉

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for Mufu Mountain

后,降水带向南扩展,结合逐小时的区域平均降水强度的对比结果(图5c)看出,幕阜山脉的存在(图5c黑色实线)降低局地降水增强的幅度,即地形对局地降水的增强有抑制作用。皖南山地由于距离局地强降水区较远,作为单一地形对局地降水变化的影响有限,因此,不在此作分析研究。

5.2 单一地形高度的改变对局地降水变化的影响

同上文一样,由于局地强降水区距离皖南山地地形区较远,因此在研究单一地形高度改变对局地强降水过程的影响时,主要围绕大别山脉和幕阜山脉的地形作用展开,而不考虑皖南山地地形作用。基于上述认识,分别设计了地形敏感性试验方案一与地形敏感性试验方案二,探讨地形对局地降水的影响,试验结果如图6和图7所示。

图6可以看出,当大别山脉地形高度增加1倍时,强降水范围进一步扩大,且区域平均的逐小时降水增强的幅度也进一步提升,反之,当大别山脉地形高度减半时,强降水范围减小,且区域平均的逐小时降水增强的幅度对应降低。图7可以看出,当幕阜山脉地形高度增加1倍时,强降水范围缩小,且区域平均的逐小时降水增强的幅度对应降低,反之,当幕阜山脉地形高度减半时,强降水范围扩大,且区域平均的逐小时降水增强的幅度呈现上升趋势。

综合表1与表2的单一地形对局地降水变化影响的试验结果发现,大别山脉对局地降水增幅有促进作用,幕阜山脉对局地降水增幅有抑制作用,其可能原因:相对于大别山脉而言,强降水落区主要位于其迎风面。对于幕阜山脉而言,强降水落区主要

位于其背风面。已有的研究结果(傅抱璞,1992;徐昕等,2010;盛春岩等,2014)表明,对于像大别山脉这种西北—东南走向,且迎风面地形坡度小于 45° 的山脉,大别山脉地形高度增加,对应增强对流层低层大别山脉迎风坡处的垂直上升气流,以及降水区附近水平气流的气旋性涡度(陈潜和赵鸣,2006),继而使其迎风面降水增强;对于向幕阜山脉这种东北—西南走向,且平均海拔高度小于1000 m的山脉,幕阜山脉地形高度增加,对应削弱背风面低层水汽输送(后文有详细说明),此外,根据局地降水的分布形态和演变特征看出降水具备显著的对流性特征,且朱素行等(2010)曾研究发现幕阜山脉地形高度的增加不利于背风面对流性降水的增强。

6 地形对局地降水变化的作用机制

局地强降水的出现与背景场的局地大气环境特征有密切联系,地形作用可以改变降水区附近各类气象要素的分布特征。因此,通过对比研究地形试验中物理诊断量的演变,能进一步揭示出地形对局地降水的作用机制,下文将从地形对降水区附近层结对流稳定性的影响、地形对局地降水冷池效应的影响、地形对降水区水汽收支的影响等三个面展开研究,探讨单一地形对局地降水变化的可能作用机制。

6.1 地形作用引起的层结对流不稳定变化对局地强降水的影响

里查森数常被用来区分各种尺度扰动系统是否

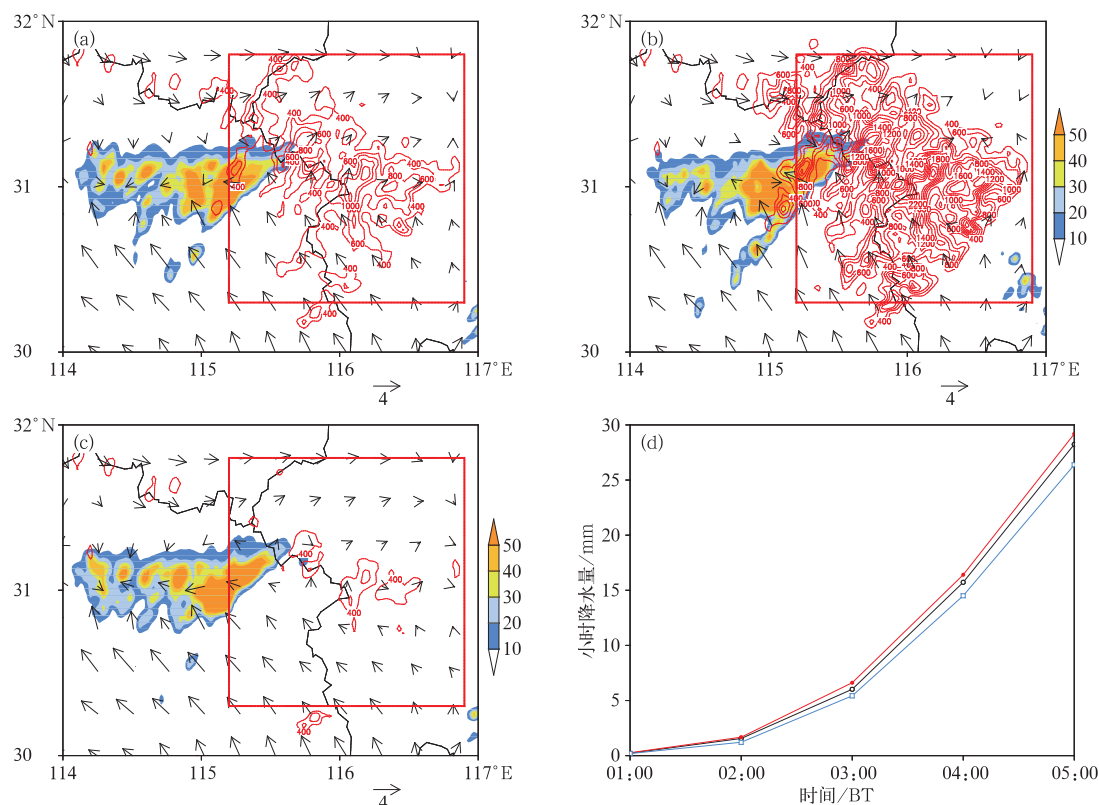


图6 2015年7月23日02:00—05:00基于大别山脉地形高度的累积降水敏感性试验对比
(a)大别山脉地形高度未作改变的控制试验,(b)大别山脉地形高度增加1倍的敏感性试验,

(c)大别山脉地形高度减半的敏感性试验

(填色:降水量,单位:mm;矢量箭头:02:00时刻900 hPa等压面风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

红色方框:大别山脉地形区,等值线:地形高度,单位:m);

(d)敏感性试验与控制试验在降水中心附近区域平均的逐小时降水量

(单位:mm,黑色实线:控制试验,红色实线:大别山脉地形高度增加1倍的敏感性试验,

蓝色实线:大别山脉地形高度减半的敏感性试验)

Fig. 6 Comparison of cumulative precipitation in control test and sensitivity test based on Dabie Mountain terrain altitude during 02:00–05:00 BT 23 July 2015

(a) control test, (b) sensitivity test of double terrain height of Dabie Mountain,

(c) sensitivity test of half terrain height of Dabie Mountain

(color area: precipitation, unit:mm; vector arrow: wind field at 900 hPa at 02:00, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

red box: Dabie Mountain area; contour: terrain height, unit: m);

(d) regional mean hourly precipitation of control test and sensitivity test separately

(black contour: control test, red contour: sensitivity test of double terrain height of Dabie Mountain,

blue contour denotes sensitivity test of half terrain height of Dabie Mountain)

稳定以及暴雨的落区预报中,但是其结果并未能体现出水汽的贡献,但是在对流系统发展过程中,水汽的演变起到了非常重要的作用。因此,在考虑水汽作用下,本文通过计算湿里查森数来探究地形对层结稳定性的影响(郭蕊,2012;王宗敏等,2014),根据文献(刘建文等,2005)中关于湿里查森数的定义(公式1),计算了基于大别山脉地形高度的控制

试验和敏感性试验分别对应的湿里查森数和假相当位温的垂直分布,计算结果如图8:

$$Ri^* = -\frac{1}{\theta_{sc}} \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p} / \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)^2 \frac{p}{R_d T_v} \quad (1)$$

式中, Ri^* 表示湿里查森数, V 为风速, θ_{sc} 为假相当位温,虚温为 $T_v = 1 + 0.608 \times q$, R_d 为干空气的比气体常数, q 为大气比湿。当 $0 < Ri^* < 1$ 时,表明此

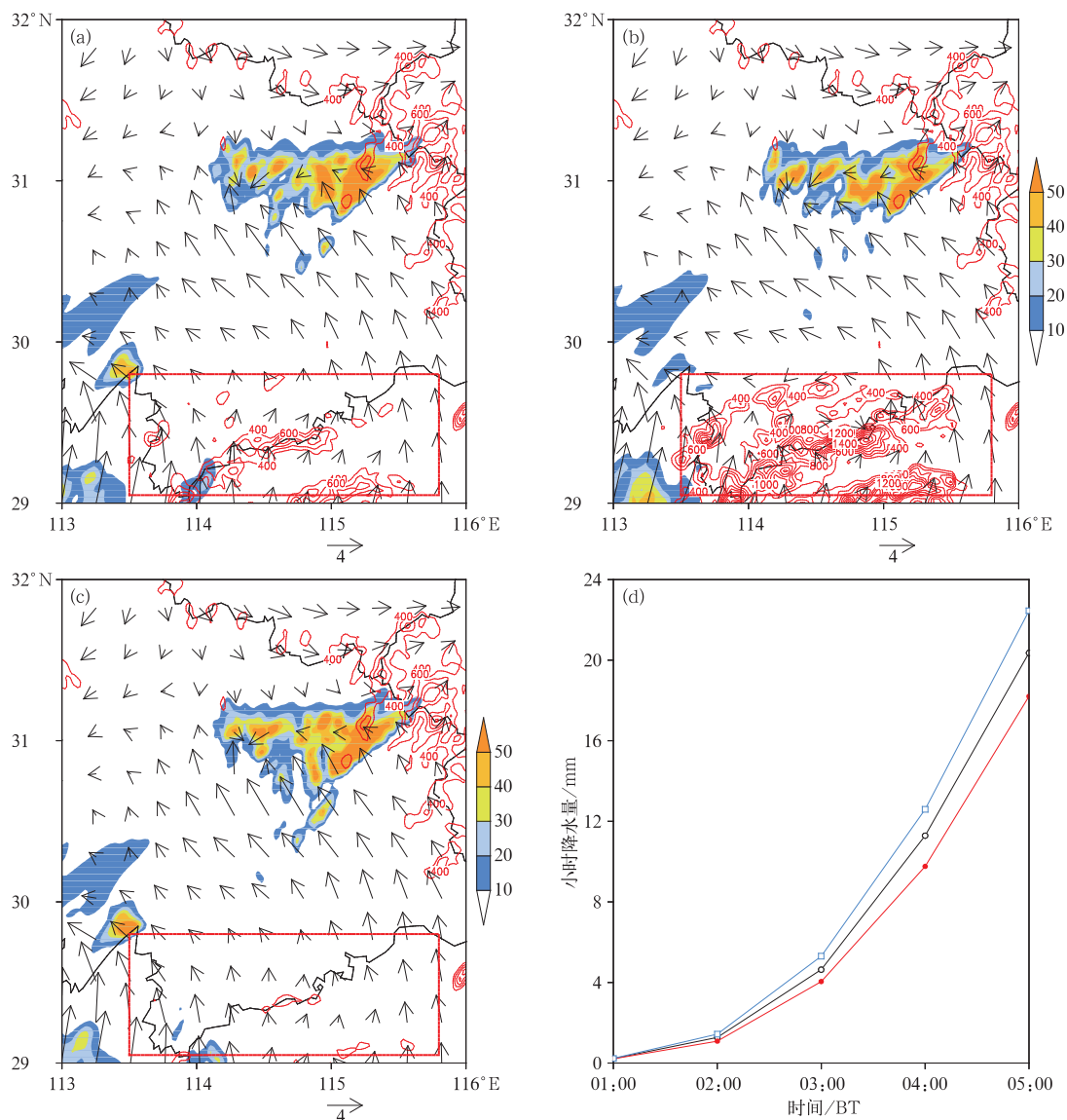


图7 同图6, 但为幕阜山脉

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for Mufu Mountain

时大气层结对称不稳定, 当 $Ri^* < 0$ 时, 表明此时大气层结对流不稳定。

根据图8基于大别山脉地形高度的控制试验与敏感性试验分别对应的湿里查森数的垂直分布可以看出, 在局地出现降水之前(00:00—02:00), 无论控制试验与敏感性试验对流层低层(900~700 hPa)的 Ri 均以负值为主, 说明局地环境场有利于对流不稳定的发展。一方面通过纵向观察 Ri 的变化特征看出, 随着局地强降水时段的临近, 大别山脉西侧 Ri 出现两处负值中心, 且随时间推移, 呈现增强的趋势。另一方面通过横向比较局地强降水临近时刻对应的控制试验和敏感试验发现, 当抬升大别山脉地

形高度时(图8g), 对应显著增强大别山脉西侧的 Ri 负值中心。反之, 当降低大别山脉地形高度时(图8i), 对应削弱大别山脉西侧的 Ri 负值中心。如前文所述, Ri 负值的强弱可以作为判断区域内层结对流稳定性的主要依据。因此, 上述试验结果证实大别山脉地形作用对强局地降水区对流层低层的层结对流不稳定的发展有促进作用。由于幕阜山脉地形高度的改变对局地强降水区 Ri 值分布的影响不明显(图略), 因此不在此做深入讨论。

根据 Ri 的计算公式可以看出, Ri 值的变化, 与相当位温的垂直分布, 以及风场垂直切变有密切联系。为了进一步了解地形对 Ri 值变化的主要作用

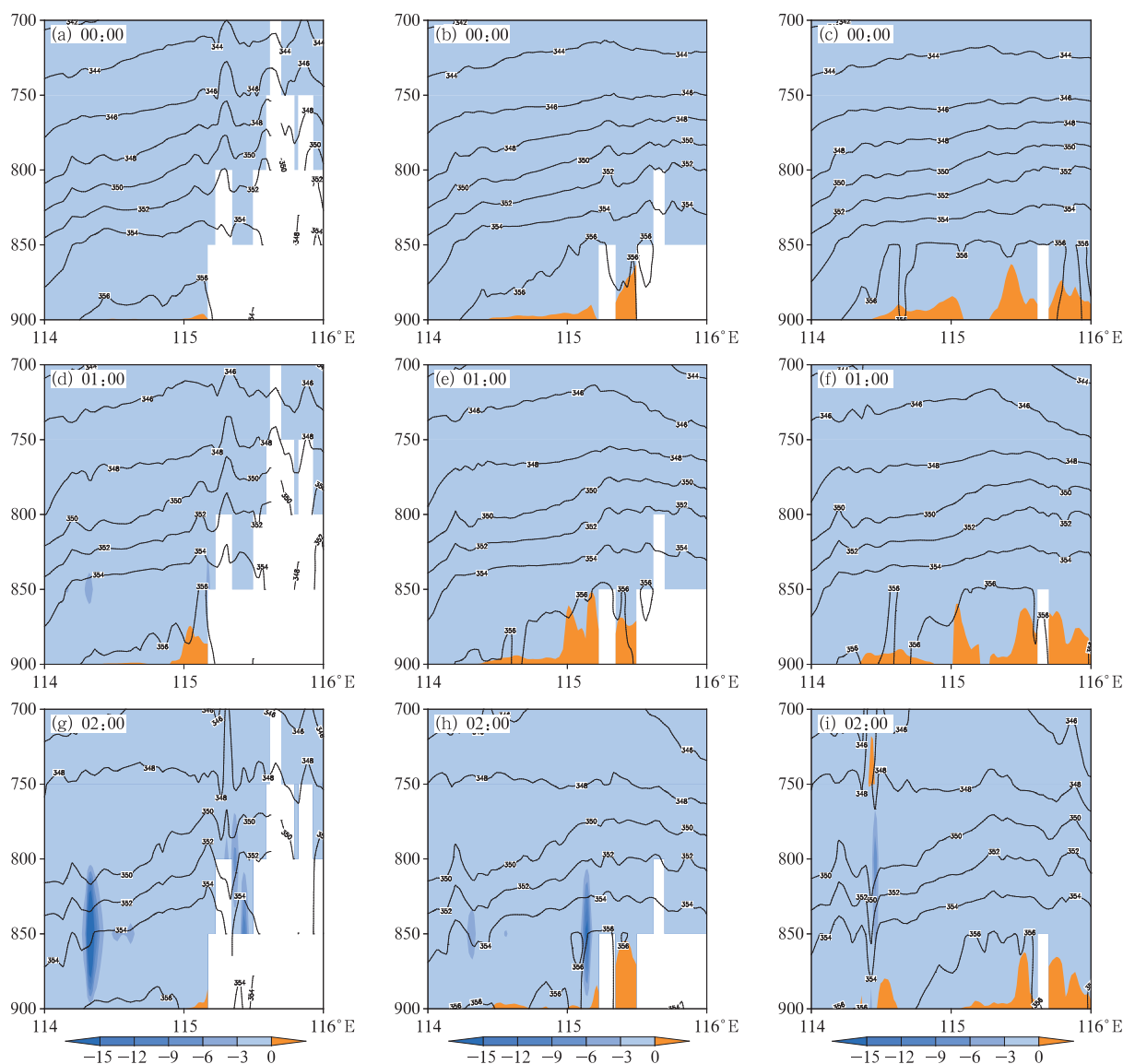


图8 2015年7月23日00:00—02:00基于大别山脉地形高度的控制试验与敏感性试验分别对应的湿里查森数 Ri 沿 $31^{\circ}N$ 的垂直剖面
(a, d, g)大别山脉地形高度增加1倍的敏感性试验,(b, e, h)大别山脉地形高度未作改变的控制试验,(c, f, i)大别山脉地形高度减半的敏感性试验
(填色:湿里查森数数值;等值线:假相当位温,单位:K;白色阴影表示地形)

Fig. 8 The Richardson number vertical distribution of control test and sensitivity test based on Dabie Mountain terrain height across $31^{\circ}N$ latitude during 00:00–02:00 BT 23 July 2015

(a, d, g) double terrain height of Dabie Mountain, (b, e, h) control test, (c, f, i) half terrain height of Dabie Mountain

(color area; Richardson number; contour: potential pseudo-equivalent temperature, unit: K; white shading: terrain)

机理,下文将围绕上述两方面展开研究。首先,对比分析控制试验与敏感性试验的相当位温垂直分布(图8等值线)后发现,一方面控制试验与敏感性试验中假相当位温均呈现随高度降低的分布特征,说明此时强降水区上空维持较强的对流不稳定状态

(刘璐等,2015)。另一方面,当抬升大别山脉地形高度时,对应使大别山脉西侧的对流层低层相当位温降低的地区呈现进一步降低的趋势(图8g,8h),并且假相当位温降低的区域与 Ri 负值中心位置正好对应,尤其在大别山脉西侧迎风坡处假相当位温的

随地形高度的变化最为显著。分析假相当位温呈现上述变化的原因,可能是由于地形的阻挡作用使暖湿气流在山前堆积造成的。之后,对比分析控制试

验与敏感性试验的风场垂直切变特征(图9)后发现,伴随局地强降水时段的临近(01:00与02:00),当抬升大别山脉地形高度时,对应显著增强大别山

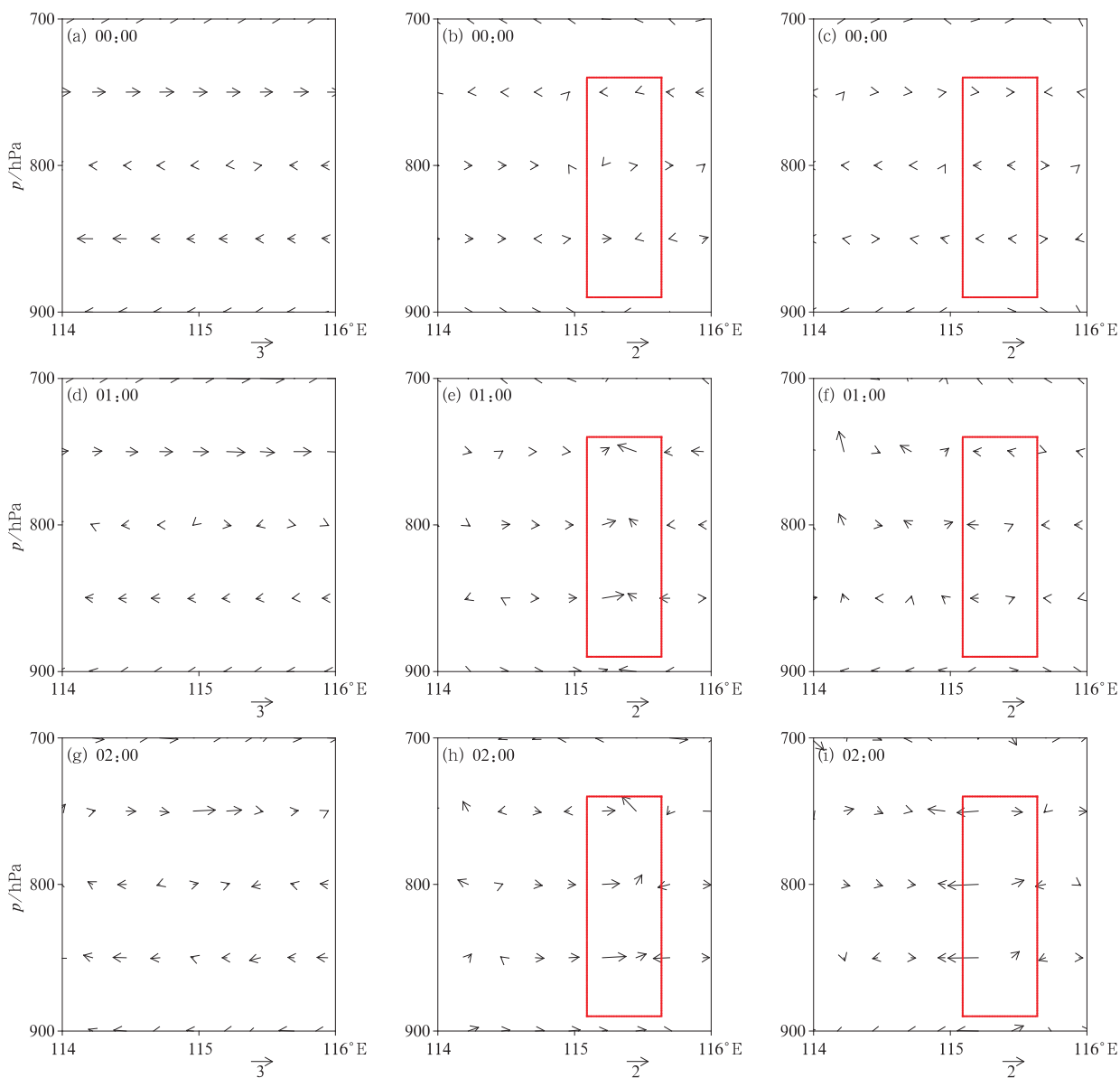


图9 2015年7月23日00:00—02:00基于大别山脉地形高度的控制试验

与敏感性试验分别对应的风场沿31°N的垂直剖面

(a, d, g)大别山脉地形高度未作改变的控制试验, (b, e, h)大别山脉地形高度增加1倍的敏感性试验

与控制试验的风场差值, (c, f, i)大别山脉地形高度减半的敏感性试验与控制试验的风场差值

(矢量箭头表示纬向风场与垂直风场的合成风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 The wind field vertical distribution of control test and sensitivity test based on Dabie Mountain terrain height across 31°N latitude during 00:00—02:00 BT 23 July 2015

(a, d, g) control test, (b, e, h) the wind difference between sensitivity test

and control test under double terrain height of Dabie Mountain, (c, f, i) the wind

difference between sensitivity test and control test under half terrain height of Dabie Mountain

(vector arrow: synthetic wind field of zonal wind and vertical wind, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

脉迎风面一侧风场垂直切变(图9e,9h红色方框),反之,当降低大别山脉地形高度时,削弱迎风面一侧风场垂直切变(图9f,9i红色方框)。这与尹宜舟等(2009)针对一次发生在淮河流域的梅雨锋暴雨过程,通过地形敏感性试验,诊断得出的结论相一致,其研究结果也肯定了大别山脉的地形产生的风切变效应,对湖北东北部局地降水发生发展的重要作用。进一步分析风场垂直切变呈现上述变化的原因,主要是由于大别山脉迎风坡的强迫抬升作用增强了风场垂直切变,并且地形高度愈高,风场垂直切变愈明显。

综上所述,局地强降水出现前,大别山脉地形动力作用增强了局地环境场的层结对流不稳定性,并对此后局地降水的增幅起到了重要的推动作用。

6.2 地形作用引起的冷池效应变化对局地强降水的影响

考虑到此次局地降水过程伴随有显著的对流特征,降水持续期间,冷下沉气流在近地面形成冷池,而冷池的维持和增强有利于对流系统的进一步发展,因此有必要围绕地形作用对局地降水增幅期间近地面冷池效应的影响,展开深入的研究分析。图10为局地降水增强期间,地形敏感性试验方案一中大别山脉不同地形高度参数分别对应的扰动温度场和速度场的垂直分布,对于局地降水增强初期(02:00)而言,由于此时降水强度较小,对流发展不明显,强降水中心附近近地面的冷池尚未形成,大别山脉地形高度的变化对冷池效应的影响有限,对于局地降水增强中期(03:00)而言,随着对流和降水的增强,强降水中心附近近地面的冷池形成,大别山脉地形高度的抬升能显著增强近地面的冷池效应,而大别山脉地形高度的降低会削弱近地面的冷池效应,对于局地降水增强后期(04:00)而言,随着对流和降水的进一步增强,局地降水区附近近地面的冷池效应也随之增强,大别山脉地形高度的抬升和降低分别对应近地面冷池效应的增强和削弱。上述研究结论证实了张家国等(2015)围绕2012年7月12—13日发生于大别山脉西侧极端降水过程,研究结论的合理性,该研究认为中尺度对流系统频发于鄂东北地区,与大别山脉对雷暴冷池的阻挡有密切联系。

6.3 地形作用引起的极端降水区水汽收支变化对局地强降水过程的影响

由于江淮地区中、南部是复杂的中尺度山脉地

带,它对近地面层潮湿的南来气流将会有所阻碍(杨金钊等,1991),结合局地强降水中心出现的位置,因此围绕幕阜山脉不同地形高度分别对应的水汽通量差异做了进一步的深入分析。根据控制试验与敏感性试验分别对应的水汽通量输送特征(图11)发现,局地降水发展增强前(11:00—02:00)相较于局地降水发展增强期间(02:00—05:00),幕阜山脉地形高度的改变对强降水区水汽输送的影响更小。而局地降水发展增强期间(02:00—05:00),当幕阜山脉地形高度抬升时,相较于控制试验,局地强降水区所处的江汉平原河谷地区上空的水汽通量被部分削弱(图11i蓝色方框),反之,当幕阜山脉地形高度降低时,相较于控制试验,上述地区上空的水汽通量对应出现增强(图11l蓝色方框)。而对于局地降水系统而言,充足的水汽输送是局地降水系统发展增强的必要条件(王靖羽等,2014;周长艳等,2015),因此,从水汽通量输送的角度较好地解释了当幕阜山脉地形高度减半时,局地强降水范围扩大且降水增幅进一步增加的原因。

7 长江中下游地区组合地形对局地降水变化的影响

一方面考虑到长江中下游地形的特殊性(如图3),位于西南部的幕阜山脉、东南部的皖南山地、中北部大别山脉,以及山脉之间河谷地区,共同构成有利于偏南气流产生辐合变化的“喇叭口”地形,该特殊地形作为偏南气流进入长江中下游地形区的主要通道,其产生的地形动力作用对于此次局地降水的增强有重要影响。另一方面注意到局地强降水期间,幕阜山脉和大别山脉对偏南气流的阻挡作用,使偏南气流产生绕流(详见图4和图5),而绕流携带的涡度平流通过山脉之间的河谷地区源源不断输送至降水区,对于局地降水增强有重要意义。为此,本文设计了两组敏感性试验,分别假设开启和关闭幕阜山脉和皖南山地之间的气流输送通道,以及幕阜山脉与大别山脉之间的气流输送通道,通过对比分析,探讨组合地形对此次局地强降水发生发展的作用机制。

图12可以看出,通过对比开启和关闭幕阜山脉和皖南山地之间的气流通道后的涡度平流输送和局地降水变化特征,发现关闭该气流通道后,削弱了偏南风向“喇叭口地形”的气流输送,继而使强降水

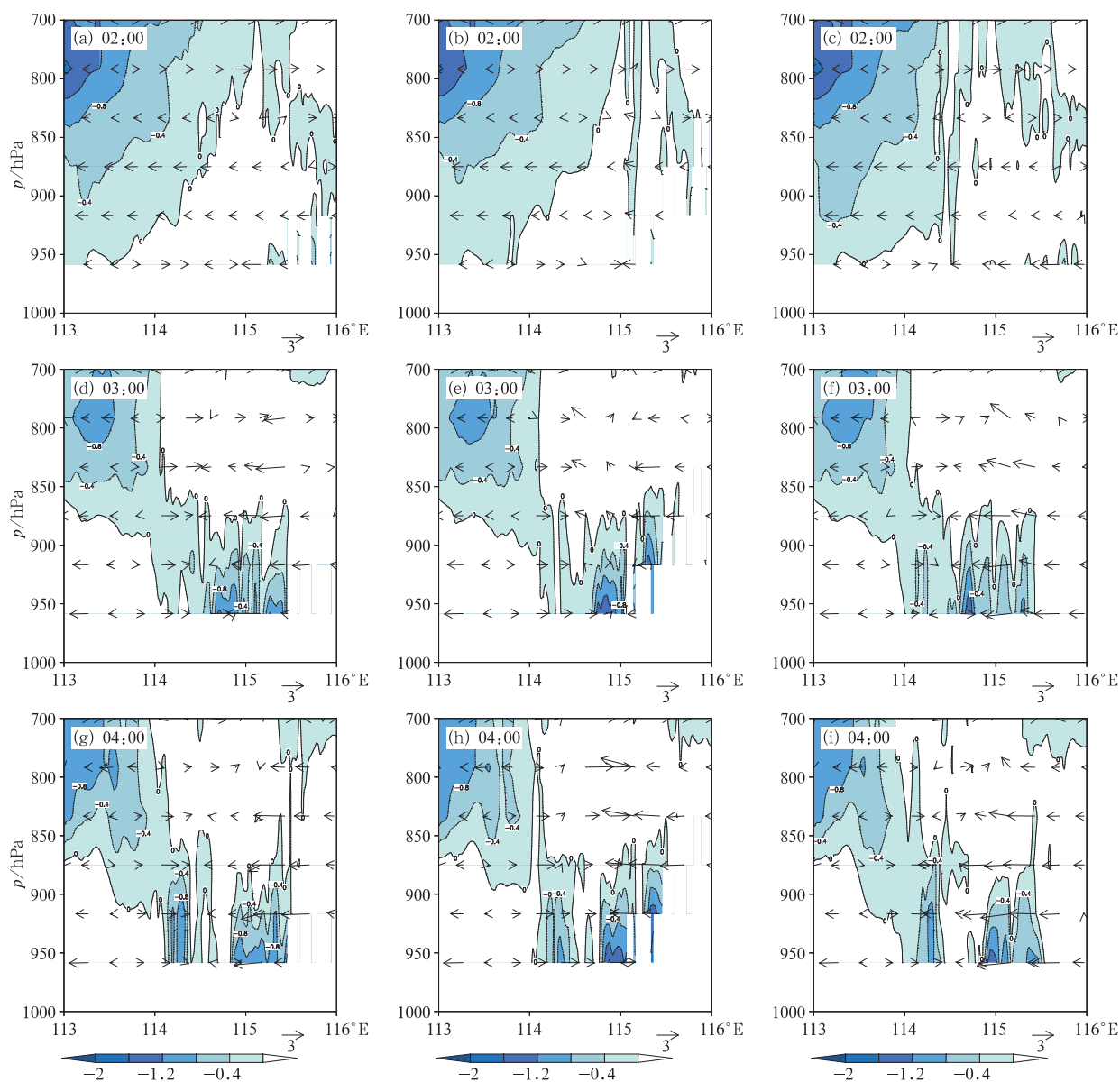


图10 2015年7月23日02:00—04:00期间基于大别山脉不同地形高度的控制试验

与敏感性试验分别对应的扰动温度场和风场沿 31°N 的垂直剖面

(a, d, g)控制试验, (b, e, h)大别山脉地形高度增加1倍的敏感性试验,

(c, f, i)大别山脉地形高度减半的敏感性试验

(填色表示数值小于 0°C 的扰动温度场,单位: $^{\circ}\text{C}$,矢量箭头表示纬向与垂直方向的合成速度,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 10 Perturbed temperature field and wind field vertical distribution of control test and sensitivity test based on Dabie Mountain terrain height across 31°N latitude during 02:00—04:00 BT 23 July 2015

(a, d, g) control test, (b, e, h) sensitivity test of double terrain height of Dabie Mountain,

(c, f, i) sensitivity test of half terrain height of Dabie Mountain

(color area: perturbed temperature below 0°C , unit: $^{\circ}\text{C}$; vector arrow: synthetic wind field of zonal wind and vertical wind, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

心附近的正涡度平流输送显著减弱(图12b与12e),强降水范围缩小(图12c与12f),区域平均的逐小时降水增强幅度减小(图12g),由此看出,幕阜

山脉、皖南山地和大别山脉,以及幕阜山脉和皖南山地之间的河谷地区,构成的类似“喇叭口”地形,作为偏南气流进入地形区的主要通道,对提升局地降水

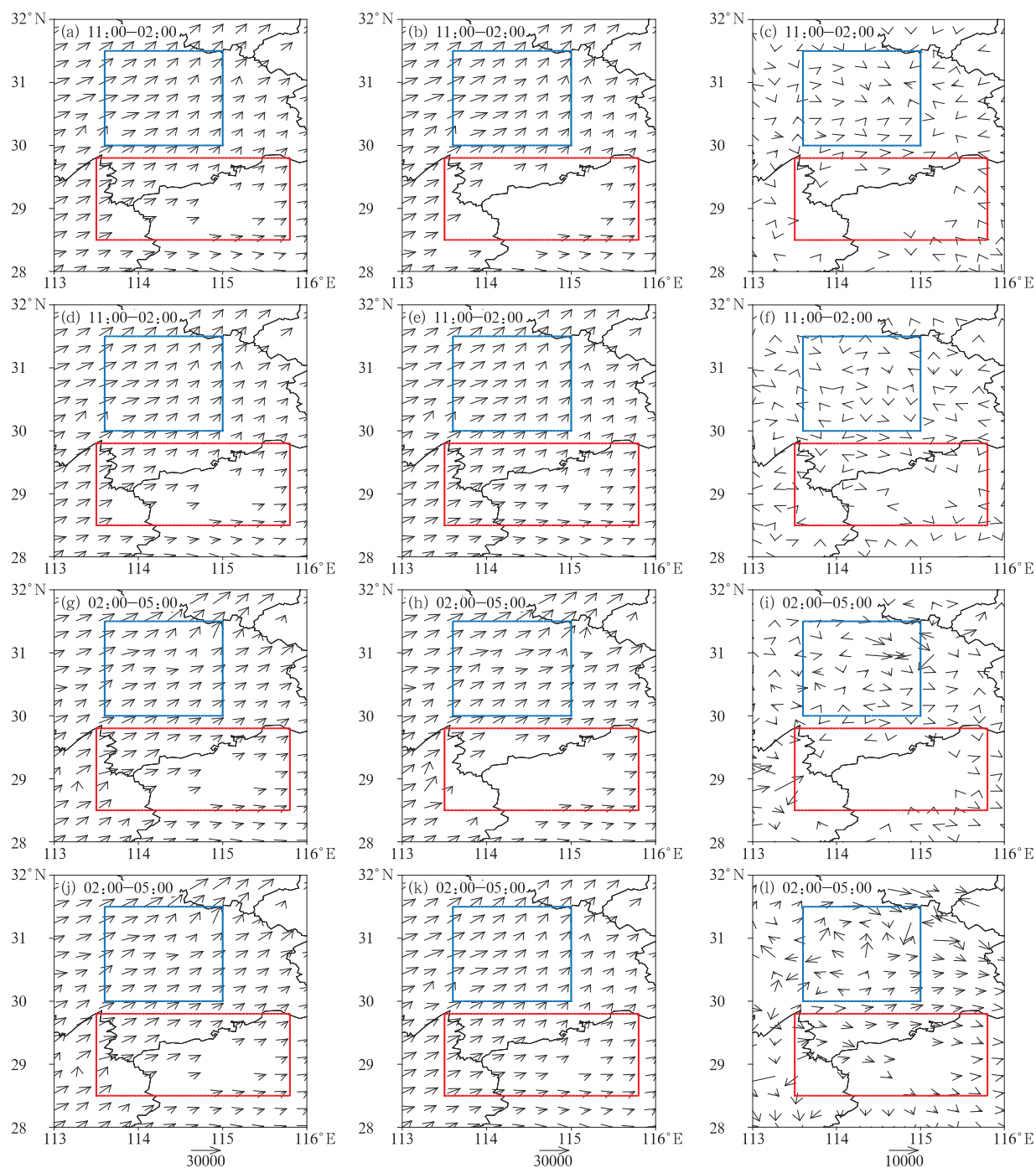


图 11 2015 年 7 月 23 日(a~f)11:00—02:00, (g~l)02:00—05:00 基于幕阜山脉

不同地形高度的控制试验与敏感性试验分别对应的平均水汽通量

(a, d, g, j)控制试验, (b, h)幕阜山脉地形高度增加 1 倍的敏感性试验, (e, k)幕阜山脉地形高度减半的敏感性试验(矢量箭头表示水汽通量,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), (c, i)地形高度增加 1 倍的敏感性试验与控制试验的水汽通量差值, (f, l)地形高度减半的敏感性试验与控制试验的水汽通量差值

(矢量箭头:水汽通量差值,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色方框:幕阜山脉地形区, 蓝色方框:局地强降水区上空的主要水汽输送区)

Fig. 11 The timely mean vapor flux of control test and sensitivity test based on Mufu Mountain terrain height during 02:00—05:00 BT 23 July 2015

(a, d, g, j) control test, (b, h) and (e, k) sensitivity test of double terrain height and half terrain height of Mufu Mountain separately (vector arrow: vapor flux), (c, i, f, l) the

difference between sensitivity test and control test correspondingly (vector arrow: difference of vapor flux, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; red box: the topography of Mufu Mountain, blue box: region of local heavy precipitation)

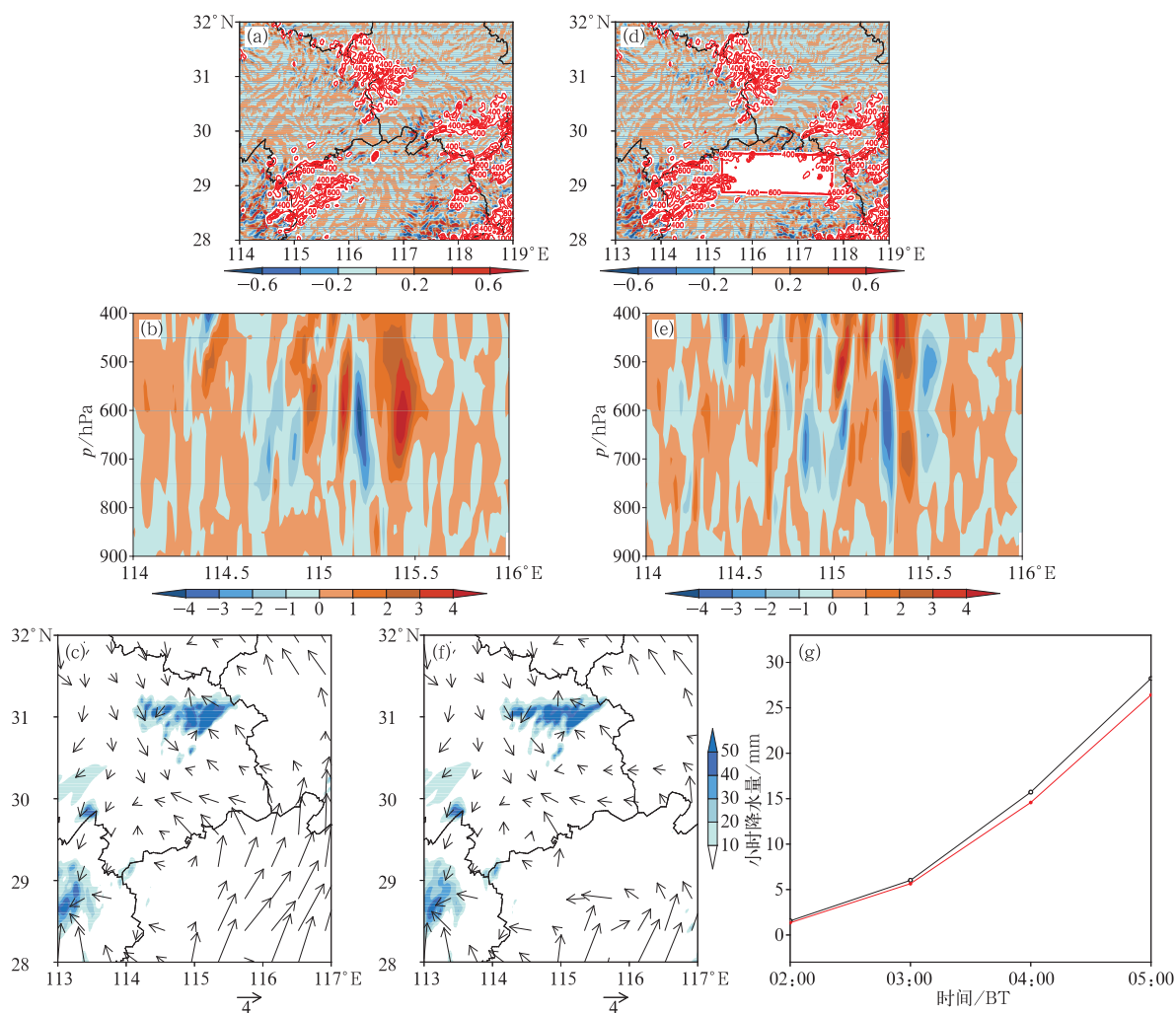


图 12 2015 年 7 月 23 日 02:00—05:00 期间基于开启和关闭幕阜山脉与皖南山地之间气流输送通道的控制试验与敏感性试验对比

(a, d) 04:00 时刻 900 hPa 的水平涡度平流(单位: 10^{-7} s^{-2}), (b, e) 04:00 时刻水平涡度平流沿 31°N 的垂直剖面(单位: 10^{-7} s^{-2}), (c, f, g) 02:00—05:00 期间的 3 h 累积降水场以及降水中心附近区域平均的小时降水对比(单位: mm),

(a, b, c) 控制试验, (d, e, f) 敏感性试验, (g) 降水中心附近区域平均的逐小时降水量(黑色实线: 控制试验, 红色实线: 敏感性试验)

Fig. 12 Comparison of control test and sensitivity test based on state of keeping airflow channel's switch state between Mufu Mountain and Wannan Mountain during 02:00—05:00 BT 23 July 2015

(a, d) horizontal vorticity advection at 900 hPa at 04:00 (unit: 10^{-7} s^{-2}),

(b, e) the vertical distribution of vorticity advection at 04:00 across 31°N latitude (unit: 10^{-7} s^{-2}),

(c, f, g) 3 h cumulative precipitation and hourly regional mean increment of precipitation (unit: mm),

(a, b, c) control test, (d, e, f) sensitivity test,

(g) hourly regional mean increment of precipitation

(black contour: control test, red contour: sensitivity test, unit: mm)

增幅起到了积极的作用。

图 13 可以看出, 通过对比开启和关闭幕阜山脉和大别山脉之间的气流通道后的涡度平流输送和局地降水变化特征, 发现关闭该气流通道后, 削弱了从

幕阜山脉东侧绕流进入江汉平原河谷地区的低层暖湿气流输送(图 13c, 13f), 对应强降水中心附近的正涡度平流输送显著减弱(图 13b, 13e), 强降水范围缩小(图 13c, 13f), 区域平均的逐小时降水增强幅度

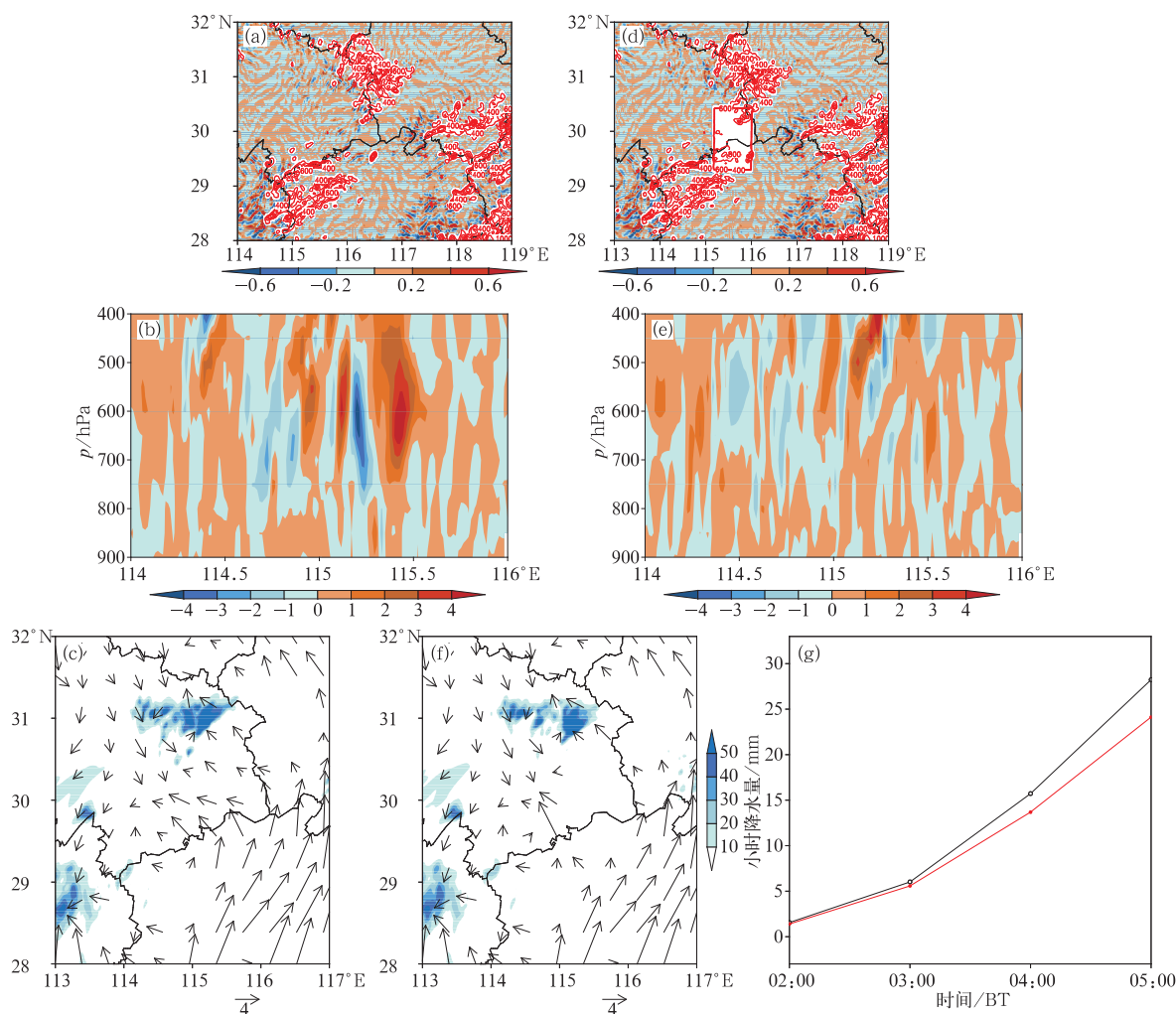


图 13 同图 12, 但为基于开启和关闭幕阜山脉与大别山脉

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for the comparison of control test and sensitivity test based on state of keeping airflow channel's switch state between Mufu Mountain and Dabie Mountain

也减小(图 13g)。因此,幕阜山脉和大别山脉之间的河谷地区,作为偏南气流绕流进入江汉平原河谷地区的重要通道,同样对提升局地降水增强幅度起到了积极的作用。

因此,尽管幕阜山脉对水汽的阻挡,不利于局地降水的增幅,但是其在组合地形中扮演的关键作用,从另一方面提供了促进局地降水增强的有利条件。

上文(图 12、图 13)从组合地形的角度出发,分析了“喇叭口地形”形成的狭管效应和地形绕流效应,对此次局地降水的促进作用。然而,“喇叭口地形”对气流的汇聚加强作用是针对特定气流而言的,例如此次局地强降水期间低涡前侧的偏南气流(郑婧等,2014;盛春岩等,2014)。为了证实这一结论,下文将基于特定的气流场,分析其在特殊地形作用

下对局地降水变化的影响。图 14 为针对特定组合地形,基于对流层低层从南侧进入地形区的气流对应的敏感性试验结果,通过对比控制试验结果(图 14a, 14d)和敏感性试验结果(图 14b, 14e)可以看出,当显著削弱从组合地形区南侧,沿幕阜山脉地形区和皖南山地地形区之间的河谷地区进入地形区的对流层低层南风分量时,降水中心消失,区域平均的逐小时降水相较于控制试验显著减弱(图 14c)。因此,上述试验结果进一步完善了本文研究的“喇叭口组合地形”对于特定气流的作用机制方面的研究,即组合地形对于沿着幕阜山脉地形区和皖南山地地形区之间狭窄河谷地形进入地形区的对流层低层偏南气流,具有强烈的气流辐合增强作用,这对于鄂东北地区形成的局地强降水有重要的意义。

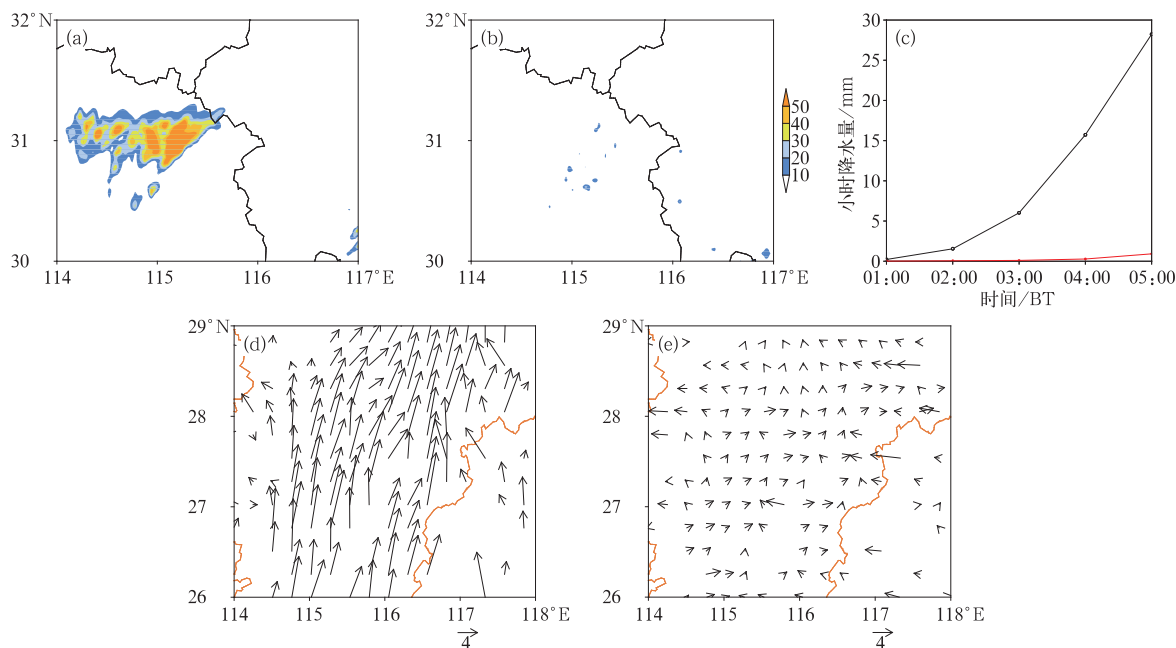


图 14 2015 年 7 月 23 日 02:00—05:00 期间针对特定组合地形对流层低层
气流对累积降水影响的敏感性试验

(a, d)控制试验, (b, e)敏感性试验, (c)降水中心附近区域平均的逐小时降水量
(黑色实线:控制试验, 红色实线:敏感性试验;图 14a 代表长江中下游地形区附近对流层低层风场
保持不变对应的 3 h 累积降水原始模拟结果, 图 14b 代表长江中下游地形区南侧对流层低层风场的
经向分量缩小 10 倍对应的 3 h 累积降水模拟结果, 填色表示降水量, 单位: mm; 图 14d 代表地形区南侧
900 hPa 风场未作改变的原始分布图, 图 14e 代表与控制试验相同区域 900 hPa 风场经向分量
缩小 10 倍的分布图, 矢量箭头表示风场, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 14 Comparison of cumulative precipitation in control test and sensitivity test based
on specific combined terrain during 02:00—05:00 BT 23 July 2015

(a, d) control test, (b, e) sensitivity test;

- (a) original simulative results of 3 h cumulative precipitation corresponding to unchanged wind field
in control test, (b) simulative results of 3 h cumulative precipitation corresponding to southerly
component of wind shrink 10 times in sensitivity test (color area: precipitation);
(c) hourly regional mean increment of precipitation (black contour: control test, red contour: sensitivity test, unit: mm);
(d) the original wind field in control test, (e) the southerly component of wind shrink 10 times in sensitivity test

8 结果与讨论

本文针对 2015 年 7 月 22—24 日期间, 东移西南涡受到长江中下游特殊地形影响, 在鄂东北江汉平原河谷地区诱发生成的一次局地强降水天气过程, 围绕局地地形对降水增幅的作用机制展开深入研究, 得出了以下几点重要的结论:

(1) 此次局地强降水增幅过程是在长江中下游特殊的中尺度地形影响下, 配合东移西南涡前部偏南暖湿气流的输送, 二者共同作用而诱发产生, 局地降水持续时间短, 降水增幅明显。

(2) 通过研究单一地形对局地降水的影响时发现, 大别山脉作为单一地形的作用效果为提升局地降水增幅, 扩大强降水范围; 幕阜山脉作为单一地形的作用效果为削弱降水增幅, 缩小强降水范围。

(3) 进一步深入分析大别山脉地形作用对局地降水发生发展的影响后发现, 大别山脉的地形作用有利于局地强降水区附近层结对流不稳定的增强, 对于降水增强期间对流层低层形成的冷池效应亦有促进作用, 因而提升局地降水增幅。

(4) 与大别山脉对局地降水变化的促进作用效果不同, 就幕阜山脉单一地形而言, 地形对偏南暖湿气流的阻挡作用, 削弱了进入局地降水关键区内的

水汽通量,因而对局地降水增幅有抑制作用。

(5) 通过研究组合地形对局地降水的影响时发现,大别山脉、幕阜山脉、皖南山地,以及幕阜山脉和皖南山地之间的河谷地区形成的“喇叭口”地形,使进入地形区内的偏南气流产生辐合增强,而幕阜山脉和大别山脉之间的河谷地区作为偏南气流,绕流进入江汉平原的重要通道,保证了强降水区域充足的涡度平流输送。

本文围绕2015年7月22—24日东移西南涡大暴雨期间,发生于鄂东北复杂地形区附近一次典型的短时局地强降水过程,重点分析了特殊地形对此次降水增幅过程的作用机制,尽管初步揭示出了一些有意义的事实,然而本文也存在着一些不足,主要有以下两个方面:第一,本文设计的地形敏感性试验主要是基于理想试验,得出的结论以定性分析结果为主;第二,本文研究单一地形对局地降水的影响时,研究重点主要集中于地形高度上,其他参数例如地形走向、地形坡度、地表下垫面类型、组合地形的相对位置等其他参数亦会对局地降水系统产生影响,以上因子在以后的地形作用研究中同样需要得到重视。上述研究中的不足之处,只有等将来相关的研究成果和高分辨率地形降水观测数据进一步丰富后,再对上述研究结论进行订正和完善。

参考文献

- 陈潜,赵鸣,2006.地形对降水影响的数值试验[J].气象科学,26(5):484-493.
- 崔春光,闵爱荣,胡伯威,2002.中尺度地形对“98.7”鄂东特大暴雨的动力作用[J].气象学报,60(5):602-612.
- 冯强,叶汝杰,王昂生,等,2004.中尺度地形对暴雨降水影响的数值模拟研究[J].中国农业气象,25(4):1-4.
- 傅抱璞,1992.地形和海拔高度对降水的影响[J].地理学报,47(4):302-314.
- 郭蕊,2012.长江流域、淮河流域梅雨期暴雨地形敏感性试验对比研究[D].南京:南京信息工程大学.
- 李博,刘黎平,赵思雄,等,2013.局地低矮地形对华南暴雨影响的数值试验[J].高原气象,32(6):1638-1650.
- 刘建文,郭虎,李耀东,等,2005.天气分析预报物理量计算基础[M].北京:气象出版社:3-9.
- 刘璐,冉令坤,周玉淑,等,2015.北京“7.21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析[J].大气科学,39(3):583-595.
- 盛春岩,高守亭,史玉光,2012.地形对门头沟一次大暴雨动力作用的数值研究[J].气象学报,70(1):65-77.
- 盛春岩,李建华,范苏丹,2014.地形及下垫面对渤海大风影响的数值研究[J].气象,40(11):1338-1344.
- 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.
- 王靖羽,崔春光,王晓芳,等,2014.2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J].气象,40(2):133-145.
- 王宛亭,2003.中国中东部地区地形谱解析及大气重力波拖曳[D].南京:南京大学.
- 王宗敏,丁一汇,张迎新,等,2014.副高外围对流雨带中的对流-对称不稳定及锋生的诊断分析[J].大气科学,38(1):133-145.
- 吴翠红,王晓玲,龙利民,等,2013.近10a湖北省强降水时空分布特征与主要天气概念模型[J].暴雨灾害,32(2):113-119.
- 吴涛,张家国,牛奔,2017.一次强降水过程涡旋状MCS结构特征及成因初步分析[J].气象,43(5):540-551.
- 徐昕,王其伟,王元,2010.迎风坡降水对中国东南地区降水贡献的估计[J].南京大学学报(自然科学),46(6):625-630.
- 杨金钊,冯志娟,王东勇,等,1991.中尺度地形对强对流天气影响的数值诊断[J].气象学报,49(3):375-381.
- 叶笃正,1956.小地形对于气流的影响[J].气象学报,27(3):243-262.
- 尹宜舟,沈新勇,李焕连,2009.“07.7”淮河流域梅雨锋暴雨的地形敏感性试验[J].高原气象,28(5):1085-1094.
- 臧增亮,张铭,沈洪卫,等,2004.江淮地区中尺度地形对一次梅雨锋暴雨的敏感性试验[J].气象科学,24(1):26-34.
- 张家国,周金莲,谌伟,等,2015.大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征[J].气象学报,73(2):291-304.
- 赵玉春,王叶红,崔春光,2011.大对流有效位能和条件不稳定下地形降水的三维理想数值研究[J].气象学报,69(5):782-798.
- 郑婧,孙素琴,吴静,2014.梅雨锋短时大暴雨的多尺度环境场分析[J].气象,40(5):570-579.
- 周长艳,唐信英,邓彪,2015.一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析[J].高原气象,34(6):1636-1647.
- 朱素行,徐海明,徐蜜蜜,2010.亚洲季风区中尺度地形降水结构及分布特征[J].大气科学,34(1):71-82.
- Bougeault P, Benesh P, Bessemoulin P, et al, 1997. PYREX: a summary of findings[J]. Bull Amer Meteor Soc, 78(4): 637-650.
- Bougeault P, Binder P, Buzzi A, et al, 2001. The MAP special observing period[J]. Bull Amer Meteor Soc, 82(3): 433-462.
- Gleeson, 1951. On the theory of cross-valley winds arising from differential heating of the slopes[J]. J Meteor, 8: 309-405.
- Grubišić V, Doyle J D, Kuettner J, et al, 2004. T-REX Terrain-induced rotor experiment scientific overview document and experiment design 2004. https://www.researchgate.net/publication/235142086_The_Terrain-Induced_Rotor_Experiment_T-REX?ev=auth_pub.
- Grubišić V, Lewis J M, 2004. Sierra wave project revisited 50 years later[J]. Bull Amer Meteor Soc, 85(8): 1127-1142.
- Prandtl, 1952. Essentials of fluid dynamics[M]. Blackie and Son Ltd, London.
- Whiteman C David, 2000. Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications[M]. New York: Oxford University Press: 355.