

2016年7月长江中下游一次暴雨过程的诊断分析与数值模拟

袁海翔¹, 许冬梅^{1,2}, 束艾青¹, 沈菲菲^{1,2}, 邓华¹, 王琛¹, 何志新³

1. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044
2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072
3. 安徽省气象台, 合肥 230000

摘要: 使用美国国家环境预报中心 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析FNL资料, 利用中尺度天气预报模式对2016年7月长江中下游地区的一次暴雨过程进行了模拟. 对24 h累积的降水模拟量、 C_{ape} 值、涡度场、相对湿度等有关暴雨诊断分析所需的物理量场进行了分析. 选择MICAPS资料作为实况数据, 与模拟结果进行分析对比. 结果表明, 中尺度天气预报模式能较好地模拟此次降水过程, 模拟雨带与实际位置大致相同, 均在长江中下游, 但遗漏了重庆东北部的暴雨及重庆以西地区的降雨, 且模拟的雨带范围与实况相比较小, 位置有所偏差. 有利的不稳定条件、较好的水汽条件、高层辐合、低层辐散的形势为暴雨的发生提供抬升的动力条件, 是此次暴雨发生的重要原因.

关键词: 中尺度天气预报模式; 数值模拟; 诊断分析; 暴雨

中图分类号: P458.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0455-2059(2020)03-0404-08

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2020.03.016

Diagnostic analysis and numerical simulation of heavy rain process in the middle and lower reaches of the Changjiang River in July

Yuan Hai-xiang¹, Xu Dong-mei^{1,2}, Shu Ai-qing¹, Shen Fei-fei^{1,2},
Deng Hua¹, Wang Chen¹, He Zhi-xin³

1. Key Laboratory of Meteorological Disaster with the Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China
2. Heavy Rain and Drought-flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory, Chengdu 610072, China
3. Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230000, China

Abstract: With the use of the national centers for environmental prediction $1^\circ \times 1^\circ$ reanalyzed final data, a heavy rain case in the middle and lower reaches of Changjiang River in July of 2016 was simulated based on the weather research and forecasting mode. 24 hours accumulated precipitation, cape value, vor-

收稿日期: 2018-12-30 **修回日期:** 2019-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(G41805070, G41805016); 江苏省自然科学基金项目(BK20170940); 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(SZKT201901, SZKT201904); 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学)开放课题项目(KLME201807, KLME201808); 国家重点研发计划项目(2018YFC1506404, 2018YFC1506603); 南京信息工程大学人才启动基金项目(2016R043, 2016R27); 上海台风研究基金项目(TFJJ201909)

作者简介: 许冬梅(1984-), 女, 江苏南通人, 讲师, 博士, e-mail: dmxu@nuist.edu.cn, 研究方向为中小尺度数值模拟与天气诊断, 通信联系人.

ticity field, relative humidity and other related fields were diagnosed. MICAPS data were selected as reference, which were compared with the results from the model. The results showed that, generally, the weather research and forecasting mode could well simulate the process, and the main rain belt was roughly the same in the middle and lower reaches of the Changjiang River. The model simulation missed the rainstorms in northeastern and west Chongqing and other places of rainfall. Compared with the micaps precipitation, the belt range of the rainfall simulated from the weather research and forecasting mode was relatively small. Favorable instability condition, fine moisture condition combining the situation of a high level convergence and low level divergence that could provide a rising dynamic condition were the main reasons for the heavy rain.

Key words: weather research and forecasting mode; numerical simulation; diagnostic analysis; heavy rain

暴雨是中国最主要的灾害性天气之一,多发生于春、夏季,往往会导致建筑受损、洪涝、水土流失以及农作物被毁等一系列灾害,造成严重的经济损失甚至人身伤亡,所以对暴雨天气系统的准确预报具有重要的现实意义.在特定的天气形势下,当天气尺度系统移动缓慢或停滞,很容易形成特大暴雨.单九生等^[1]提出连续大暴雨是在稳定的大气环流形势下产生的,期间再有中小尺度天气系统,如短波槽、低涡、气旋等在大尺度天气背景下的发生、发展,就会形成持续时间长,降雨量较大的暴雨.陶诗言^[2]从东亚大型天气过程和亚洲季风的变化研究了长江流域梅雨的演变、暴雨形成过程中多尺度相互作用的概念及暴雨落区的预报方法.谢义炳等^[3]提出中国暴雨是中低纬环流系统相互作用的产物,强调暴雨不仅受大型环流场,尤其是低纬大型环流的影响,还受此背景下天气尺度、次天气尺度、中尺度等系统的影响.充足的水汽输送是暴雨产生的必要条件之一,对历年不同时期和背景下的暴雨进行分析,可知中国暴雨生成的主要水汽来源为孟加拉湾西南以及南部、东部洋面上的暖湿气流,主要的水汽输送层为对流层中低层.对于暴雨产生时的不稳定层结和上升运动也有较为完善的理论研究^[4-6].随着科学技术的发展,卫星遥感技术越来越多的被应用于气象领域,可利用非常规观测资料,如卫星云图、雷达回波图等更深入的对暴雨系统的尺度特征进行分析,在天气分析的基础上运用动力学分析对暴雨进行研究.还有学者从大尺度环流背景场、形成机制、中小尺度特征、数值模拟、集合预报等方面对暴雨进行了研究^[7-8].Keim等^[9]曾提出,常发生在美国的暴雨“新奥尔良型”是由准定常或移动缓慢的风暴复合体形成,多种尺度系统和中小尺度环流及地形的作用,促进风暴不断形成,最终产生暴雨.

2016年7月1日00:00-2日00:00(协调世界时,下同),中国长江中下游多地产生降雨天气,雨

势较大,包括四川、重庆、湖南、湖北、安徽等地.暴雨带位于重庆东北部、湖北中部、安徽中部,24 h降雨量(以下定义为 R_{24} ,气象学上规定 $R_{24} \geq 50$ mm为暴雨)达到50 mm以上;重庆东北部、湖北中东部有大暴雨, $R_{24} > 100$ mm;湖北局部地区 $R_{24} > 200$ mm,达到特大暴雨量级,其中荆门为271 mm、钟祥为230 mm、黄陂为227 mm、麻城为285 mm,涉及范围广、强度大,因此本研究选择此次暴雨作为研究对象.

1 资料及模拟方案介绍

运用中尺度非静力天气预报(weather research and forecast, WRF)模式进行暴雨过程的数值模拟.采用由美国国家环境预报中心提供的时间间隔6 h,分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 的FNL再分析资料为背景场,网格数为 330×330 ,水平分辨率10 km,网格包含了整个降水落区;高度层从上至下共32层,模式顶层为10 hPa,使用30 s高分辨率地形资料及相应的下垫面特征资料.采用的参数化方案为:Kessler微物理过程, Grell积云对流参数方案, RRTM长波辐射方案和 Dudhia短波辐射方案^[10], MRFPL及 Noahland-surface陆面过程.模拟时间2016年7月1日00:00-2日00:00,共24 h,采用60 s的时间积分步长,每3 h输出一次积分结果.

2 降水模拟结果

图1为使用气象信息综合分析处理系统(meteorological information comprehensive analysis and processing system, MICAPS)资料绘制的2016年7月1日00:00的 R_{24} 及WRF模式模拟的 R_{24} 降水.由图1可见,模拟的结果中降水范围不准确,没有模拟出重庆东北部以及四川东部的暴雨中心,且贵州境内的降雨区模拟结果偏南,降水范围较实况小;关于山东半岛的 R_{24} 及范围模拟不准确,模拟的 $R_{24} = 3.2 \sim 6.4$ mm,但实况普遍 $R_{24} > 10$ mm,存在

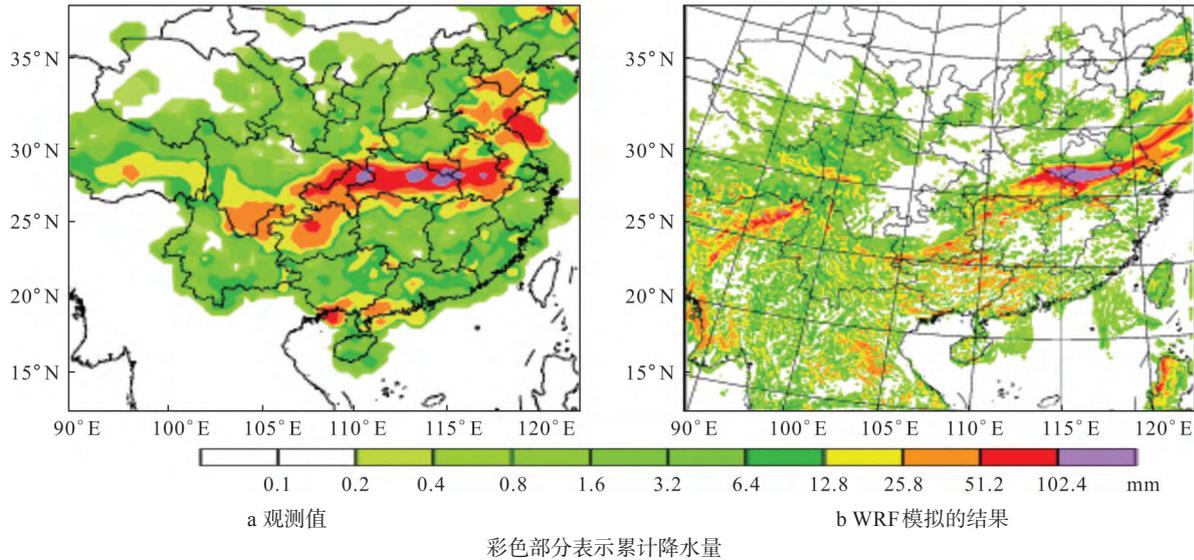


图1 2016年7月1日00:00 MICAPS实测的和WRF模式模拟的 R_{24}
 Fig. 1 MICAPS observed R_{24} , WRF simulated R_{24} at 00:00 on July 1, 2016

较大误差; 此次过程的降水概况模拟, 雨带位置基本准确, 但对于降雨量级与降雨区的模拟出现了误差.

3 天气形势模拟结果

3.1 高空形势分析

2016年7月1日00:00 500 hPa处, 高纬为两槽一脊的环流形势, 乌拉尔山以东有一个低压中心, 由低压中心延伸出一个大槽(图2). 贝加尔湖以东(中国东北偏北)存在一个低压环流, 由中心延伸出的槽线一直穿过中国东北部直至河北省, 系统逐渐向东移动. 1日12:00贝加尔湖以东的低压强度减弱, 位置稍向北移, 穿过东北地区的低压槽减弱; 2日00:00, 槽分裂为两支; 中纬有短波槽脊波动, 青藏高原东部有一个低压系统, 至12:00消失. 1日00:00, 河南、湖北、贵州一带存在低压槽, 黄海以西有一个槽, 至12:00, 位于贵州等地的槽稍向南压, 而黄海以西的槽向北延伸发展, 同时向东移动. 2日12:00槽入海, 低纬副热带高压(以下简称副高)发展强盛, 稳定维持, 一直穿过中国东南部. 此次过程中南京处于槽前脊后的西南气流中, 高空槽前有正的相对涡度平流, 有利于地面减压, 对上升运动有贡献, 因此高空槽前有利于产生降雨. 长江中下游地区处于副高外围, 受到西南暖湿气流控制. 中层700 hPa上, 7月1日00:00中纬地区高原东侧有低涡生成, 云贵高原上有南支槽生成, 由山东半岛穿过湖北直至贵州一带有一个强度较强的槽; 12:00, 高原东侧的低涡东移至

贵州, 南支槽与低涡相接, 向东移动, 强度略有增强, 穿过湖北的槽减弱南压. 至2日00:00, 西南地区的低涡消散, 低涡移动过程中对所经地区产生影响. 850 hPa上, 7月1日00:00, 位于重庆和湖北交界处有一个低压系统, 两条切变线分别位于贵州及江淮地区, 切变线的存在有利于暴雨的触发; 至12:00, 随着系统的演变, 位于贵州境内的切变线向东移动至湖南, 重庆低涡沿贵州切变线稍向西南偏移. 至此, 850 hPa上的切变线位于长江中下游, 中国华北地区有一个高压环流生成, 至2日00:00, 位于长江中下游的切变线依旧稳定维持, 影响范围扩大, 自江苏一直到四川, 且强度不断变大, 对整个降雨区的天气有重大影响. 华北地区高压消散; 至12:00, 维持在长江中下游的两条切变线相接, 切变线以南即为低空急流带, 由此可见此次暴雨过程中切变线为最重要的影响系统.

3.2 地面形势分析

2016年7月1日00:00, 地面形势场上中国东北部有一个低涡系统, 低涡外围的冷锋穿过东北直至山东半岛, 河套地区有低压系统存在, 长江流域大部分地区处于另一个低压系统控制之下, 低压中心强度为1 002.5 hPa; 江淮地区有一个静止锋存在, 长江以南地区均处于南风中. 至06:00, 北部的冷性锋面北缩, 河套低压向南压, 原控制长江中下游的低压系统东移北上至山东半岛. 地面有气旋性辐合, 静止锋强度增强, 山东局地、江淮地区、江汉平原受静止锋影响, 锋面上暖空气有较强的上升运动, 静止锋停滞, 期间江汉平原、江淮

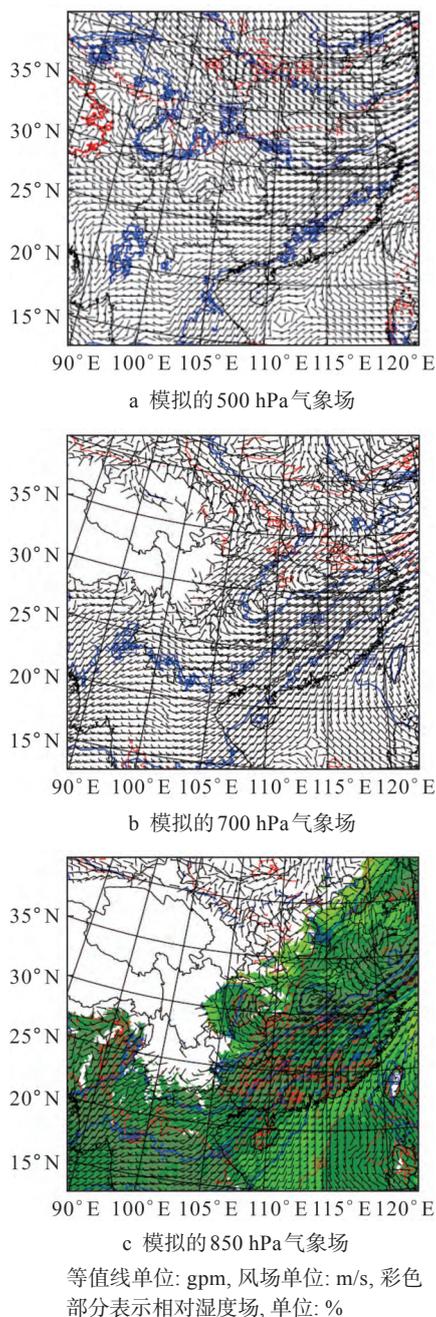


图2 2016年7月1日00:00 500、700 hPa 高度场和风场, 850 hPa 高度场、风场和相对湿度场

Fig. 2 Potential height field and wind field at 500, 700 hPa, potential height field; wind field and relative humidity field at 850 hPa at 00:00 on July 1, 2016

地区、山东局地都将有降水产生. 至12:00, 随着河套低压的南下, 锋面也向南移动, 且由静止锋转变为冷锋, 山东半岛的低压东移入海.

4 水汽条件分析

4.1 相对湿度

暴雨需大气比湿达到相当大的数值以上才能形成, 因此充足的水汽是暴雨发生必不可少的条

件. 选取850 hPa上的相对湿度分析水汽状况. 由图3a可见850 hPa上长江中下游地区水汽含量较高, 相对湿度超过90%. 来自孟加拉湾的西南暖湿气流与来自南海的偏南暖湿气流共同汇聚到整个长江以南地区, 两支水汽通道的供应使得这次暴雨的发生和发展成为可能. 两个水汽辐合中心分别位于湖北、重庆, 对应此次暴雨过程中7月1日的暴雨中心.

暴雨发生时存在低空急流的概率大致为83%, 反之79%的低空急流伴有暴雨, 有低空急流无暴雨或有暴雨无低空急流的情况仅占少数. 绝大部分暴雨发生在低空急流的左侧200 km以内, 其中多数降雨区又位于低空急流中心的左前方,

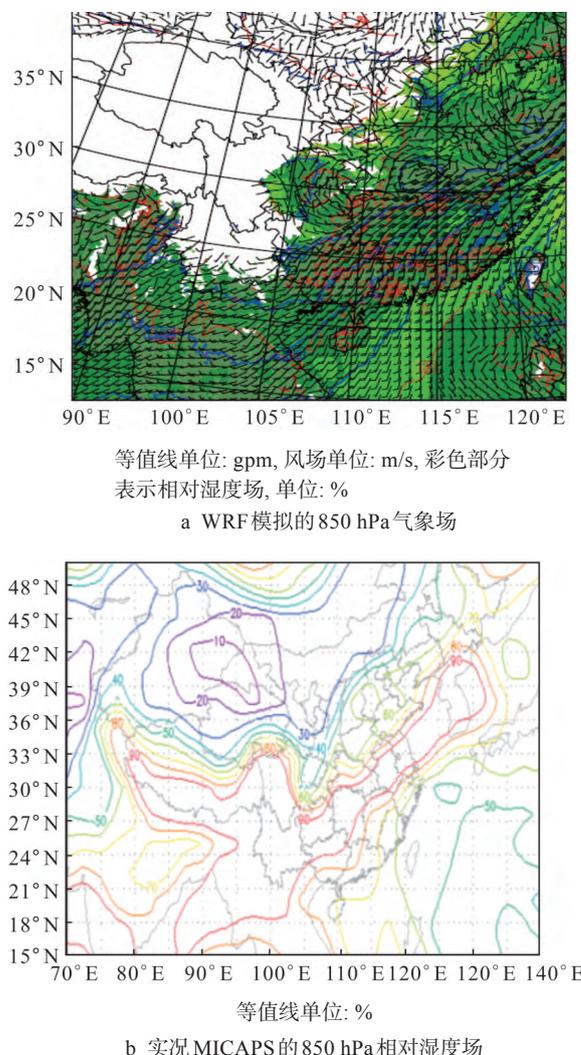


图3 2016年7月1日00:00 WRF模式模拟850 hPa 高度场、风场和相对湿度场, 实况850 hPa MICAPS 相对湿度场

Fig. 3 WRF simulated 850 hPa potential height field, wind field and relative humidity field; observed 850 hPa MICAPS relative humidity field at 00:00 on July 1, 2016

所以低空急流对于暴雨有着重大影响. 此次暴雨过程中低层 850 hPa 上长江以南存在西南旺盛的急流, 中心强度达 20 m/s, 为降雨区输送了充足的水汽与能量. 7月1-2日, 急流带向东移动, 雨带随之逐渐偏东, 急流为降水提供水汽与能量补充, 增加降雨的持续时间, 形成一个完整的水汽输送带, 本地水汽含量高, 加上充足的水汽供应, 有利于暴雨的产生.

由图 3b 可见长江中下游明显处于相对湿度大于 90% 的湿区, 水汽充沛. 模式较好地模拟了相对湿度分布, 湿区与实况相符, 此次过程中对于相对湿度的模拟较为成功.

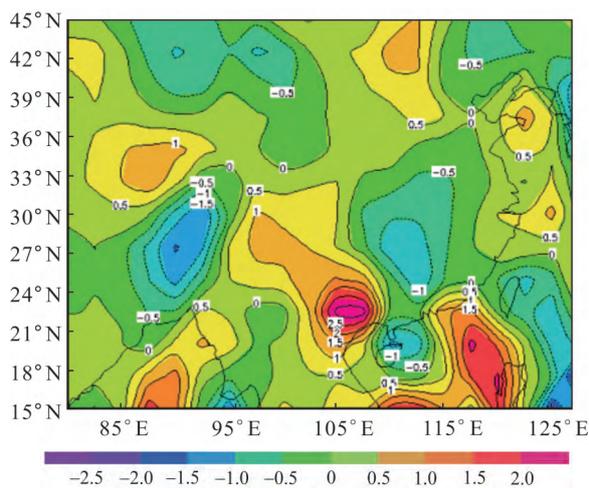
4.2 水汽通量散度

在一次暴雨过程中, 局地的可降水量无法为暴雨的发生提供充足的水汽条件, 因此一次大的降水过程必须要有足够的水汽由源地不断向降水区供应, 特别是在暴雨时更需要有潮湿空气的不断输送. 源地的水汽主要是通过大规模的水平气流被输送至降水区. 图 4 是利用 MICAPS 资料绘制的 00:00 850 hPa 的水汽通量散度. 由图 4 可见, 长江中下游有明显的水汽辐合区, 水汽辐合条件良好. 自 7月1日 00:00 开始, 低层有较明显的辐合区, 水汽通量散度最大值中心位于长江以南, 强度达到 $-1 \times 10^{-8} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$; 至 2日 00:00, 长江中下游降水区辐合越来越显著, 水汽辐合中心最大值增大, 且水汽辐合区向东移动; 自 2日 00:00 起, 降雨区也向东偏移, 暴雨中心由江汉平原转移至江淮地区, 其中安徽中部与江苏西部为暴雨中心.

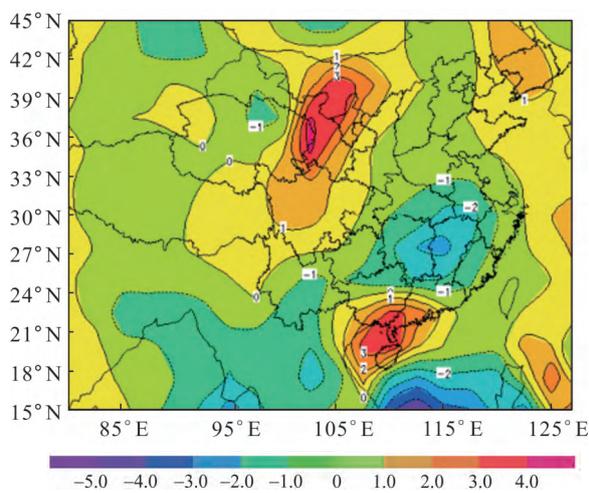
5 动力条件分析

5.1 散度场

大的垂直上升速度是暴雨发生的必要条件, 而大的垂直上升条件多是由中小天气系统所造成的. 中小尺度天气系统的生存时间较短, 一次中、小系统的活动, 大多只能造成一地短时的暴雨, 必须要有若干次中小尺度系统的连续影响, 才能形成时间较长、降雨量较大的暴雨. 暴雨总是发生在大范围上升运动区内, 垂直速度的诊断可以通过高低层散度场的配置来分析. 由连续方程可知, 低层散度为负时有上升运动, 为正时有下沉运动; 高层情况与之相反. 分析上升条件, 图 5 为 MICAPS 资料绘制的 7月1日 00:00 高层 200、925 hPa 散度场, 黄色区域为散度场正值区, 有较



a 7月1日



b 7月2日

单位: $10^{-8} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$

图 4 2016年7月1、2日 00:00 850 hPa MICAPS 实况水汽通量散度

Fig. 4 850 hPa MICAPS observed water vapor flux divergence at 00:00 on July 1 and 2, 2016

明显的辐散, 降水区(长江中下游)在辐散范围之内; 低层选取 7月1日 00:00 MICAPS 实况 925 hPa 散度场, 可见在重庆有一个较显著的辐合中心, 而长江中下游的江淮、江汉等地均处于辐合区域内. 低层辐合、高层辐散, 有较强烈的上升运动.

5.2 垂直速度

P 坐标系下的 Ω 垂直速度 w 可以直观地显示动力条件. 图 6 为 7月1、2日 00:00 700 hPa 垂直速度图, 在降水区 $w < 0$, 长江中下游 $w \approx -3 \times 10^{-3} \text{ hPa/s}$, 此时上升条件得到满足. 2日 00:00 降水区(长江中下游) $w \approx -7 \times 10^{-3} \text{ hPa/s}$, 上升运动极值中心位于长江以南. 垂直速度中心比 1日 00:00 偏东, 至 2日 00:00, 长江中下游暴雨 R_{24} 仍较大且向东移动.

5.3 涡度

图7为基于WRF模式绘制的500 hPa处1日06:00与2日00:00涡度图. 500 hPa处长江中下游

处于槽前的西南风气流中, 槽前有正的涡度平流, 长江流域一带均为正涡度, 正涡度值普遍大于 $30 \times 10^{-5} s^{-1}$, 安徽、江苏中部有正涡度极大值, 超过 $60 \times$

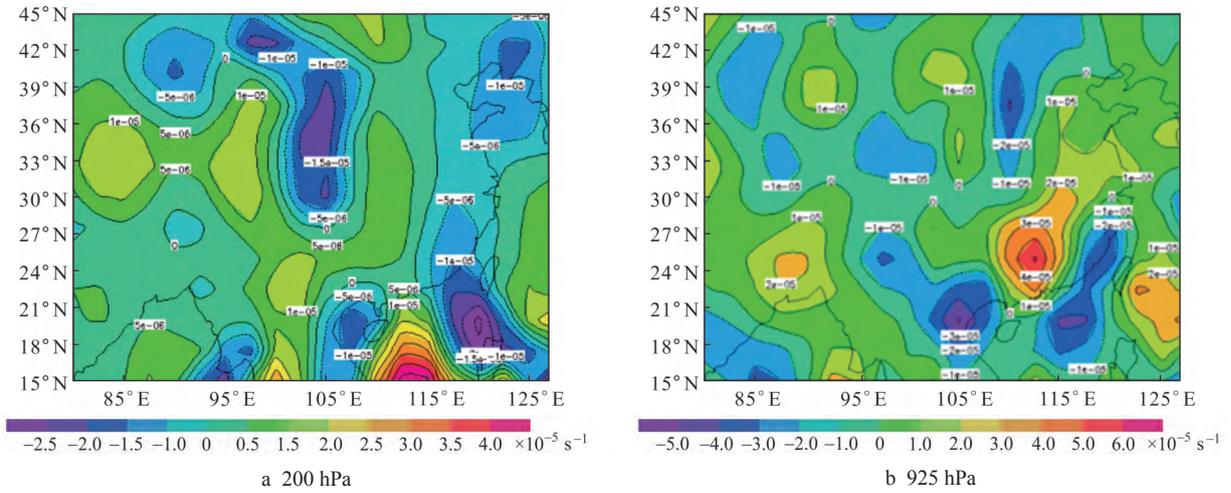


图5 2016年7月1日00:00 200、925 hPa散度场

Fig. 5 Divergence fields at 200 and 925 hPa at 00:00 on July 1, 2016

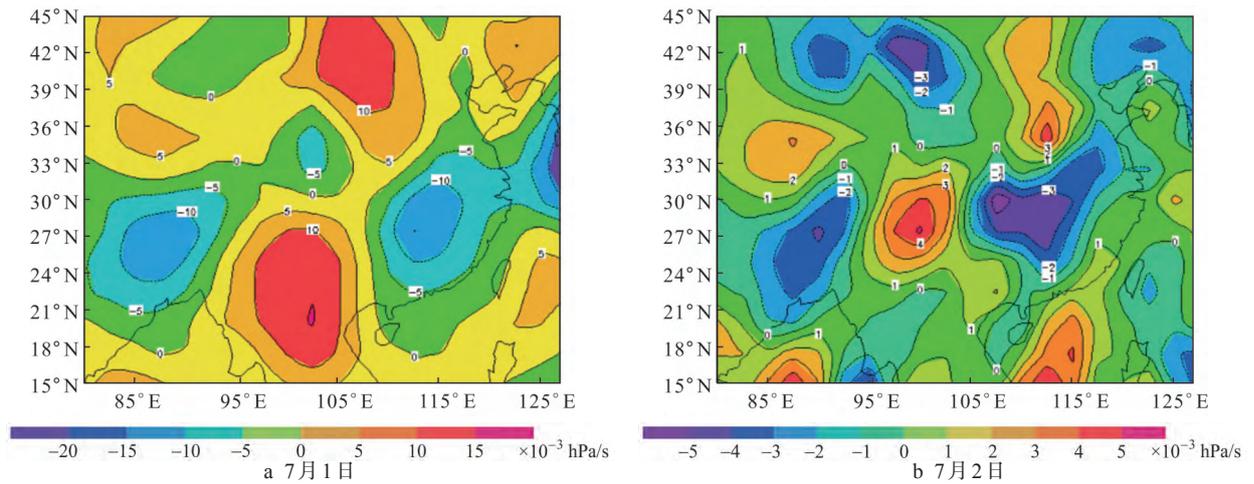


图6 2016年7月1、2日00:00 700 hPa垂直速度场

Fig. 6 Vertical velocity field at 700 hPa at 00:00 on July 1 and 2, 2016

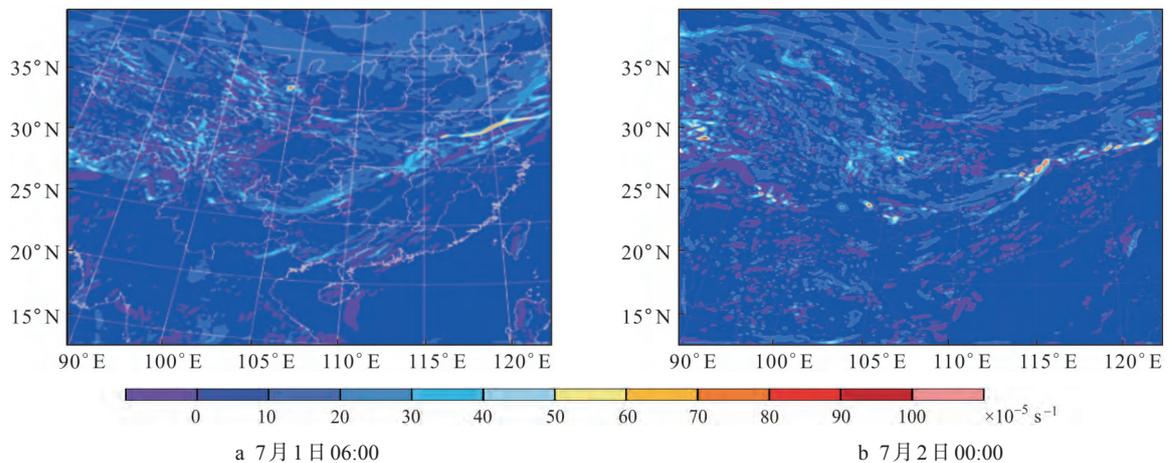


图7 WRF模式模拟2016年7月1日06:00, 2日00:00 500 hPa涡度

Fig. 7 WRF simulated vorticity at 500 hPa at 06:00 on July 1 and 00:00 on July 2, 2016

10^{-5} s^{-1} . 正涡度增加, 有利于地面减压, 上层为高空槽前正涡度平流, 下层地面低压发展, 低压中心附近涡度平流很小, 于是涡度平流随着高度增加, 有上升运动. 此次暴雨过程的降水区均处于相对涡度正值区, 上升条件发展, 有利于暴雨的发生、发展.

6 不稳定条件分析

6.1 对流有效位能

暴雨需要大的垂直运动, 而大的垂直运动只有在不稳定能量释放时才能形成, 因此分析暴雨影响因子时, 必须考虑不稳定能量的储存和释放^[11-12]. 图8为WRF模式模拟的对流有效位能(C_{ape})图, C_{ape} 值表示不稳定能量的大小. 由图8可见, C_{ape} 大值区基本处于长江流域, 其中最大值中心分别在安徽西南、湖北东部、重庆西部, 这些区域 $C_{\text{ape}} > 1000$, 有不稳定能量的积聚, 利于降雨生成.

6.2 温度场

图9为7月1日00:00不同高度层的温度场分

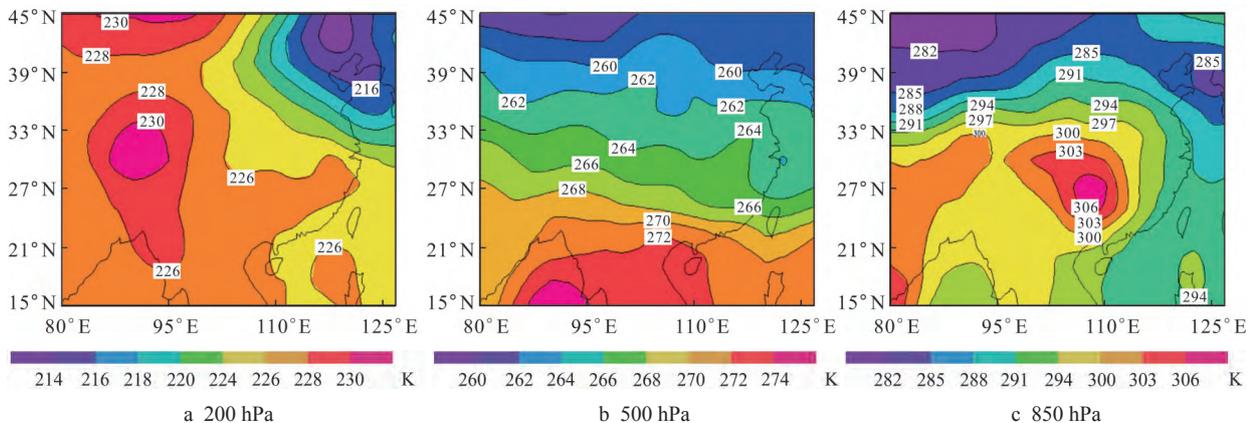


图9 2016年7月1日00:00 200、500、850 hPa高度的温度场
Fig. 9 Temperature field at 200, 500, 850 hPa at 00:00 on July 1, 2016

7 结论

运用WRF模式对2016年7月1-2日的降水过程进行了模拟, WRF模拟的降水落区遗漏了重庆以西的地区, 模拟的 R_{24} 与实况相比差别不大, 模拟的暴雨中心较实况偏东, 且暴雨中心范围偏大, WRF模式对于降水概况的模拟有偏差, 但可尝试其他模式方案设计, 以减小误差.

此次暴雨过程的水汽条件较好, 本地水汽含量高加上充足的水汽输送, 来自孟加拉湾的西南暖湿气流与来自南海的偏南气流共同汇合输送至

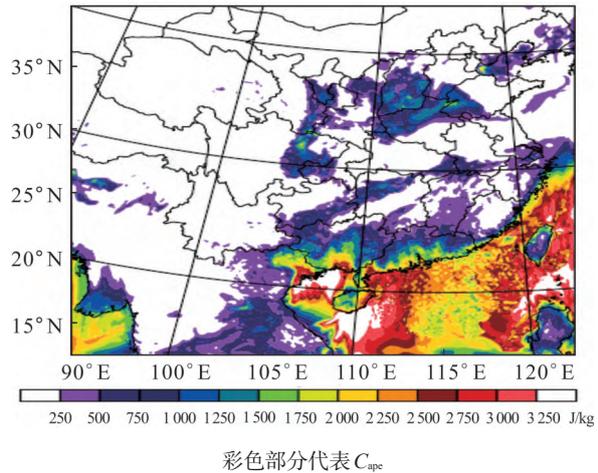


图8 2016年7月1日12:00 WRF模式模拟对流有效位能
Fig. 8 WRF simulated convective available potential energy at 12:00 on July 1, 2016

布. 由图9可见, 温度场的垂直分布由下至上温度递减. 850 hPa在长江中下游的温度约为303 K, 500 hPa处为264 K, 至200 hPa减小至226 K, 因此层结为上冷下暖的不稳定结构. 冷气流下沉, 暖气流上升, 造成垂直剖面上的气流上升运动, 为暴雨提供了充分有利的环境.

长江中下游, 两支水汽通道的建立为暴雨的产生提供了最基本的条件. 2016年7月1日为高层辐散、低层辐合的形势, 上升运动发展, 高空500 hPa长江中下游处于正涡度区中, 有利于上升运动, 且850 hPa垂直速度场显示, 降水区处于 $w < 0$ 的上升区中, 动力条件为这次暴雨过程提供了抬升的条件. 温度场显示此次暴雨过程中上层冷下层暖, 冷空气下沉、暖空气抬升的过程中有对流运动发展, 层结不稳定, 长江中下游多地 $C_{\text{ape}} > 1000$, 表明有不稳定能量积聚.

致谢 对南京信息工程大学高性能计算中心提供的计算支持与帮助表示感谢!

参考文献

- [1] 单九生, 詹丰兴, 曹晓岗. 等. “98·6”江西连续大暴雨过程物理量诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2000, 14(2): 124-125.
- [2] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] 谢义炳, 张镔, 蒋尚城. 低纬环流对中高纬天气的影响: 暴雨中短期预报的观点[J]. 海洋学报, 1981, 3(4), 546-553.
- [4] 钱鹏, 蒋薇, 孔启亮, 等. 一次持续大范围暴雨过程诊断分析[J]. 气象科学, 2012, 32(2): 188-193.
- [5] 王田田, 高晓清, 高艳红, 等. 酒泉地区20120604暴雨的诊断分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 508-510.
- [6] 郑钢, 张铭. 一次切变线暴雨过程的诊断研究与数值试验[J]. 气象科学, 2004, 24(3): 296-302.
- [7] Romero R, Martín A, Homar V, et al. Predictability of prototype flash flood events in the Western Mediterranean under uncertainties of the precursor upper level disturbance: the HYDROTIMET case studies[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, 5(4): 55-63.
- [8] Li Xun-gui, Wei Xia, Wei Ning. Correlating check dam sedimentation and rainstorm characteristics on the Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2016, 265: 84-97.
- [9] Keim B D, Muller R A. Frequency of heavy rainfall events in New Orleans, Louisiana, 1900 to 1991[J]. Southeastern Geographer, 1993, 33(2): 159-171.
- [10] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989, 46(20): 3077-3107.
- [11] 何斌, 何锋, 范晓红, 等. 一次长江中下游梅雨锋暴雨过程的诊断分析[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1074-1083.
- [12] 钟水新, 王东海, 张人禾, 等. 一次冷涡发展阶段大暴雨过程的中尺度对流系统研究[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 435-445.
- (责任编辑: 张 勇)
-
- (上接第403页)
- [13] 彭飞, 王涛, 刘立超, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 593-599.
- [14] 曹晏宁, 史利莎, 韩烁, 等. 科尔沁沙地植被恢复中差不嘎蒿种群不同龄级个体的点格局分析[J]. 植物学通报, 2008, 25(4): 437-442.
- [15] 刘金伟, 李志忠, 武胜利, 等. 新疆艾比湖周边白刺沙堆形态特征空间异质性研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 628-635.
- [16] 刘荣. SAS统计分析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [17] Khalaf F I, Al-Awadhi J M. Sedimentological and morphological characteristics of gypseous coastal nabkhas on Bubiyan Island, Kuwait, Arabian Gulf[J]. Journal of Arid Environments, 2012, 82(246): 31-43.
- [18] 马剑平, 严子柱, 付贵全, 等. 石羊河治理工程对下游地区地下水及其矿化度的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(4): 489-493.
- [19] 詹科杰. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆表面风沙输运特征与沙堆形成发育的关系研究[D]. 兰州: 兰州大学土木工程与力学学院, 2016.
- [20] 张雪蕾, 王万瑞, 王刘明, 等. 石羊河流域干旱变化趋势及气候影响因素[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(5): 598-603.
- [21] 张进虎, 唐进年, 李得禄, 等. 民勤荒漠绿洲过渡带灌丛沙堆形态特征及分布格局[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1141-1149.
- [22] 刘冰, 赵文智. 荒漠绿洲过渡带泡泡刺灌丛沙堆形态特征及其空间异质性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2814-2820.
- [23] 高永, 党晓宏, 虞毅, 等. 乌兰布和沙漠东南缘白沙蒿 (*Artemisia sphaerocphala*) 灌丛沙堆形态特征与固沙能力[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 1-7.
- [24] 王葆芳, 杨晓晖, 江泽平, 等. 不同地区土地沙漠化过程中土壤退化演变规律[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 1-5.
- (责任编辑: 夏志勇)