

殷菲,王磊,王有恒.四川盆地一次暴雨过程的数值模拟及螺旋度分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(5):78–86.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



四川盆地一次暴雨过程的数值模拟及螺旋度分析

殷菲¹,王磊²,王有恒¹

(1.兰州区域气候中心,甘肃 兰州 730020;2.成都信息工程大学大气科学学院,高原大气与环境
四川省重点实验室,四川 成都 610225)

摘要:利用常规观测资料、日本气象厅向日葵8号卫星的相当黑体亮度温度(TBB)资料 and NCEP/NCAR 再分析资料(FNL),对四川省一次暴雨过程进行数值模拟及螺旋度诊断分析。结果表明:中高纬度“两脊一槽”环流形势、副热带高压与大陆高压脊叠加形成的“东高西低”形势,为此次暴雨过程提供了有利的背景场条件;四川盆地中多个中尺度云团的发生、发展与暴雨的发生直接相关;中尺度模式(WRF)较好地再现了四川此次暴雨过程;700 hPa 垂直螺旋度的正值区可以很好地指示降水落区的位置和移动,垂直螺旋度的高低空配置对揭示对流系统的演变起着至关重要的作用。

关键词:螺旋度;四川;暴雨;数值模拟

中图分类号:P456.7

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)05-0078-09

四川省地处我国西南内陆,位于中国大陆地势三大阶梯中的第一级青藏高原和第三级长江中下游平原的过渡地带,具有地貌东西差异大,地势高低悬殊且呈西高东低的地形特点。受西南低涡的影响,四川盆地经常出现持续性大暴雨天气^[1]。关于四川省的暴雨研究,许多气象学者^[2-7]从不同角度用不同方法展开了分析,其中在数值模拟方面,赵大军等^[8]利用 WRF 模式指出西南低涡南北两侧次级环流圈中的上升支在低涡中心附近汇合,激发了强上升运动,有利于低涡的发展。CHEN 等^[9]和 KUO 等^[10-11]的研究指出凝结潜热释放是低涡维持和发展的重要原因之一,并且与积云对流相伴的凝结潜热释放对西南低涡的发展起着重要作用。此外,吴瑞姣等^[12]指出偏东型西南涡有利于沿江地区降水增多;东北型西南

涡使江北大部分地区降水增加;东南型西南涡有利于华南地区降水增加。在动力诊断方面,由于大气的许多运动呈螺旋型,可以将流体力学中研究湍流问题的螺旋度引用到大气科学中来研究强风暴^[13-14],而螺旋度不仅考虑了大气旋转的特性,还综合了水平和垂直方向的输送,可以很好地揭示大气运动的动力学特征^[15],随着螺旋度理论的深入研究^[16-18],它在天气诊断的工作中也逐渐被认可,尤其是在暴雨诊断方面,得出很多指导性的结论。刘晓汝等^[19]对2019年超强台风“利奇马”引发浙江特大暴雨进行分析指出:台风强度大时近中心上升运动强烈,正垂直螺旋度中心值的减小对应强降水的发生。史小康等^[20]、鲁坦^[21]、谭志强等^[22]分别对不同地区的暴雨过程展开针对螺旋度的研究,认为螺旋度对暴雨落区以及降水系统的发展移动都有很好的指示作用。

回顾以上研究发现,螺旋度诊断被广泛应用于暴雨、台风等强对流天气中,但对由西南低涡引起的对流性降水中的研究较少。本文选取了2018年7月2日发生在四川地区的一次局地暴雨过程,将数值

收稿日期:2021-11-09;修回日期:2022-02-18

基金项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J054,CXFZ2021J044);
甘肃省自然科学基金(20JR10RA454)

作者简介:殷菲(1995—),女,助理工程师,主要从事暴雨的数值模拟及诊断研究。E-mail: 727261945@qq.com

模拟和螺旋度诊断相结合,先进行数值模拟得到高时空分辨率的资料,再利用螺旋度进一步分析此次暴雨的发展机制,得到了一些有意义的结论,以期为此类暴雨预报提供参考。

1 数据与方法

1.1 垂直螺旋度方法

在 Z 坐标系下,垂直螺旋度的计算表达式为:

$$H=W\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad (1)$$

式中 W 为垂直速度, $\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right)$ 为相对涡度的垂直分量,从公式(1)可以看出:在上升运动区,若有正涡度,则有正的垂直螺旋度,也就是气旋区有上升运动代表了有正的垂直螺旋度向上输送。

1.2 数据来源

降水实况资料采用中国国家气象自动站的全国降水观测资料,选取时段为:2018年7月2日08时—7月3日08时(北京时,下同)。

卫星资料采用日本气象厅向日葵8号卫星的相当黑体亮度温度(TBB)资料,用于反映中小尺度系统的演变特征。

诊断分析采用 NCEP/NCAR 的全球再分析资料(FNL),水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为 6 h,同时 FNL 资料也为中尺度模式(WRF)提供初始场和边界条件。

2 暴雨过程及观测分析

2.1 暴雨实况

2018年7月2日四川省东部出现了一次短时强降水天气过程,并伴有雷电和阵性大风。陕西汉中和四川绵阳、德阳、成都、内江、泸州等地多个自动站降水量达到暴雨级别,雨带呈东北—西南走向,强降水集中在川西高原的陡峭地形和盆地内较平坦的地形之间,降水空间分布不均匀(图1)。过程雨量超过 140 mm 的大值中心位于成都和绵阳两地,其中成都市双流县 6 h 累积降水量为 140.4 mm,11—12 时的累积降水量达到 90 mm,造成双流国际机场航班大面积延误。成都市降水量最大的 4 个县(区)(蒲江、双流、郫县、龙泉驿)强降水时段主要集中在 11—16 时,17 时后降水逐渐减少,20 时后降水过程结束。其中蒲江县 11 时降水量达到峰值,为 55.5 mm,双流和郫县都在 12 时达到峰值,双流县 12 时降水量为 51.2 mm,仅次于蒲江,郫县 12 时峰值降水量为

35.5 mm,在这轮过程中郫县降水呈现双峰特征,在 07 时出现次高峰,龙泉驿的峰值出现最晚,在 13 时,峰值降水量达到 37.3 mm(图2)。此次降水呈现明显的骤增骤减特征,强度大、持续时间短、局地性强。

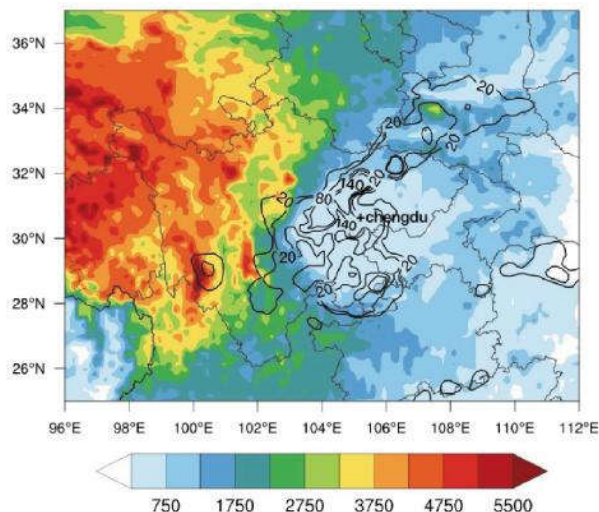


图1 2018年7月2日08时—7月3日08时四川地区 24 h 累积降水量(等值线,单位:mm)和地形高度(彩色填色,单位:km)

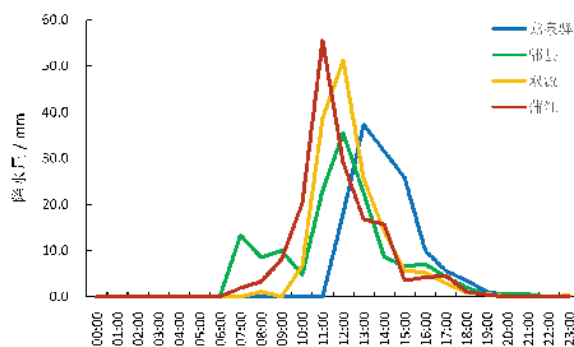


图2 2018年7月2日00—23时成都4站降水量逐小时变化曲线

2.2 大尺度环流背景

此次暴雨过程的有利环流形势基本是在 2018 年 7 月 1 日 08 时建立,7 月 1 日 08 时(图 3a)—7 月 2 日 08 时(图 3b):200 hPa 高空急流主体向东移动,急流中心强度和范围明显增强,强风速带在 500 hPa 低压槽底部附近,四川省位于高空急流入口区的右侧以及南亚高压的辐散气流中。对流层中部 500 hPa 高度场,东亚中高纬的环流形势为“两脊一槽”型,其中东部高压脊位于鄂霍次克海附近,西部高压脊位于乌拉尔山附近,贝加尔湖(以下简称“贝湖”)附近

存在一个低压中心,副热带高压(以下简称“副高”)主体位于海上,经过1 d的发展,大陆高压脊经向性明显增强,形成了“东高西低”的环流形势,使上游低压系统东移受阻,有利于降水在四川地区的维持,贝湖的低压中心面积扩大并且向东南方向移动,使得低槽加强发展,引导槽后冷空气南下,四川地区处于低槽底部,其上空的冷空气不断堆积。700 hPa四川北部存在偏北气流输送槽内冷空气,从孟加拉湾来的西南气流绕青藏高原东南侧向四川地区输送暖湿空气,冷暖空气在此交汇形成明显的风切变,此后这条冷式切变线发展成闭合的气旋式涡旋,并且维持在四川地区稳定少动。这种环流场形势为暴雨提供了有利条件。

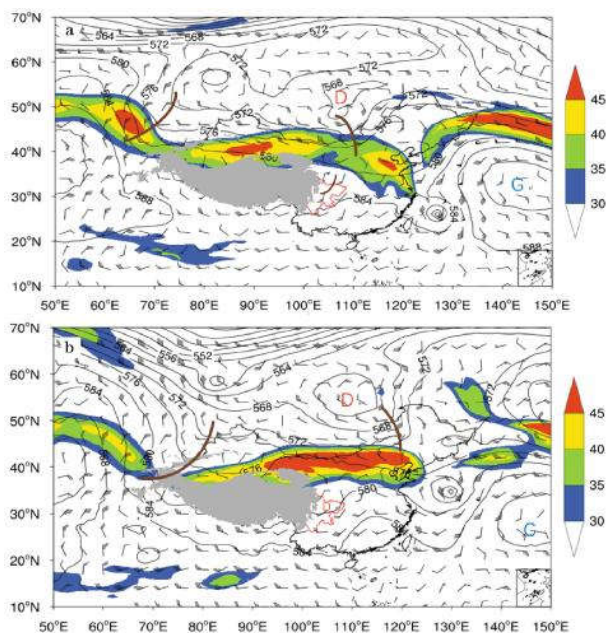


图3 200 hPa 高空急流(彩色填色,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、500 hPa 位势高度(黑色实线,单位: dagpm)及700 hPa 风场(风羽,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布
(a 为7月1日08时;b 为7月2日08时,棕色粗实线表示500 hPa槽线和700 hPa切变线,灰色填色表示地形高度 $>3\ 000\ \text{m}$)

2.3 中小尺度系统卫星云图特征

暴雨的发生与中小尺度系统的发展密切相关,常规观测方法不能很好抓住中小尺度系统及其演变过程,因此利用日本气象厅向日葵8号卫星逐半小时的TBB资料,对此次过程中对流系统的演变特征进行分析。2018年7月2日11:30(图4a)在四川地区有3个中尺度云团分别标记为A、B、C,3个云团位于四川省绵阳、德阳地区(A)、成都地区(B)、雅安地区附近(C),其中云团B发展最旺盛,中心区域

TBB达到 $-72\ ^\circ\text{C}$,其余两地则被 $-62\ ^\circ\text{C}$ 的TBB区域覆盖;30 min后从(图4b)云团A向东南方向移动,离开绵阳接近重庆地区,范围减小、强度减弱(图4c),在13:00(图4d)消失,而云团B加速发展,中心区域进一步向成都地区靠近,云团C范围逐渐缩小,被云团B兼并取代,直到13:30(图4e)云团C消失;此后云团B在成都地区稳定少动,不断发展壮大,云团呈现典型的椭圆形特征,并且边缘光滑,15:00(图4f)达到最强盛时期,同时形成了云团D,在这段时间内,造成成都市辖区内大暴雨,多个站点的降水峰值均出现在这段时间内;从图4g中可以看到,云团B边缘开始松散,成都地区的降水开始有所减弱,在云团B的西南方向形成了云团E;从16:00(图4h)开始,云团B向东移动,范围逐渐缩小,此时云团D、E在逐渐发展,直到17:00(图4i),云团B完全破裂,原本的椭圆结构已经分离,脱离出一个小的云团B1进入云团D,而云团E也在向云团D移动,两者使得云团D强度增加,带来内江、泸州等地的强降水。对流云团的生消演变与此次强降水天气的发生、发展密切相关。

2.4 水汽条件特征分析

由图5a可知,850 hPa四川省东北部和东南部存在明显的水汽辐合,辐合中心强度达 $12\times 10^{-7}\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,盆地东北侧以及陕南陇南地区都存在水汽辐合。7月2日08时(图4b)陕南陇南地区的水汽辐合转为辐散,四川东北地区的最强辐合中心强度减弱,为 $8\times 10^{-7}\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,水汽通量散度的最大辐合中心向东南方向移动。从850 hPa水汽通量上看,四川地区主要水汽来源于西南暖湿气流,孟加拉湾的水汽被夏季风一路向北输送到四川地区,形成气旋式水汽辐合,此外来自我国东海海洋的暖湿气流也可以沿黄淮流域进入四川东北部。

3 数值模拟及验证

3.1 模拟方案设计

直接造成暴雨的中小尺度系统移动速度快、生命期短,现有的观测资料由于时空分辨率较低,对于研究暴雨的发生发展尚有不足之处,为了能更细致地揭示此次降水天气的发展演变过程,本文选用中尺度模式(WRF 3.8.1版本)对此次过程进行高分辨率数值模拟试验。模拟的初始条件和边界条件采用空间分辨率 $1^\circ\times 1^\circ$,时间分辨率每6 h一次的NCEP/NCAR再分析资料(FNL)。模拟采用三层网格嵌套形式,模式中心选为 30.8°N , 105.8°E ,模拟区域如图

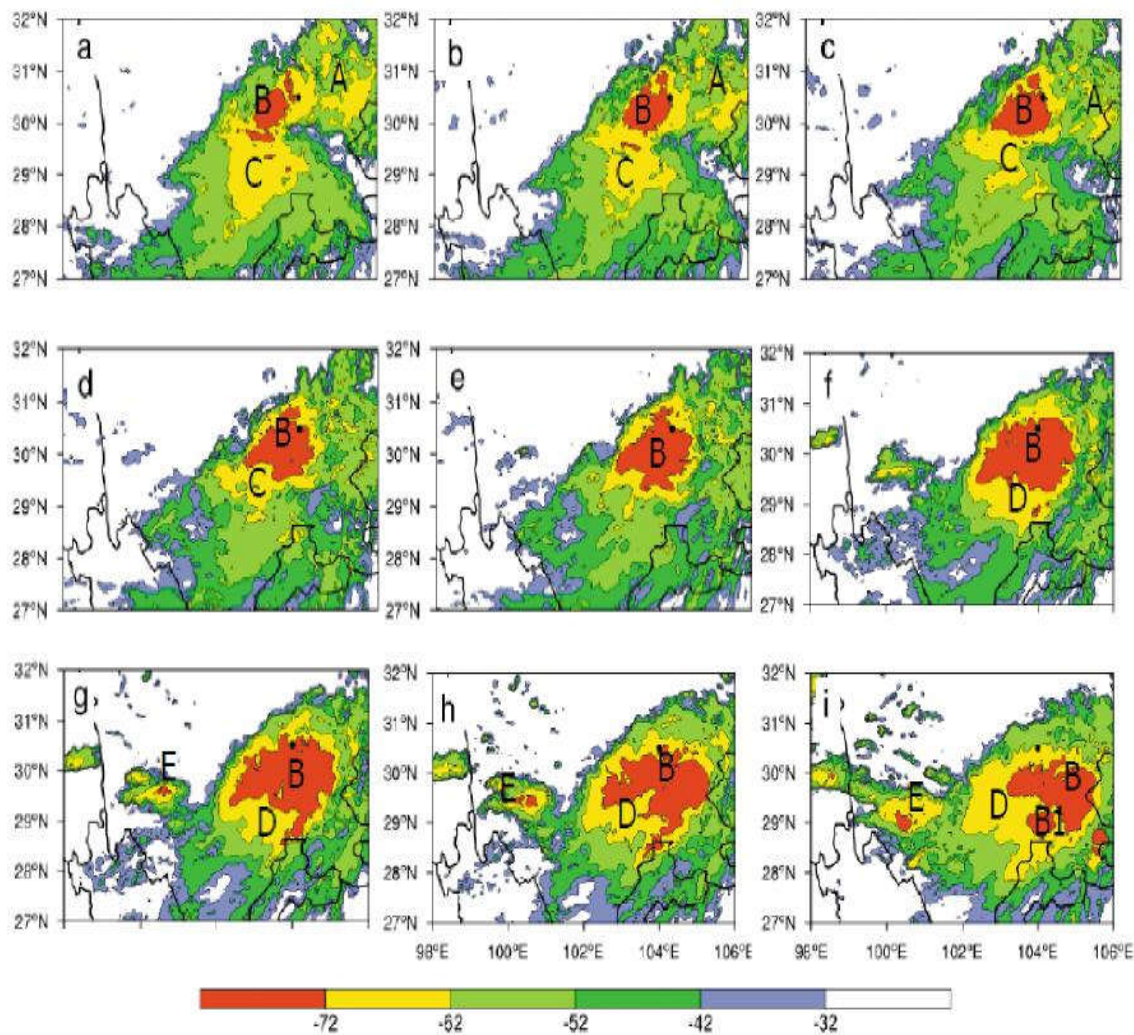


图4 2018年7月2日11:30—17:00向日葵8号TBB(填色,单位:℃)分布
(a为11:30;b为12:00;c为12:30;d为13:00;e为13:30;f为15:00;g为15:30;h为16:00;i为17:00;·表示成都)

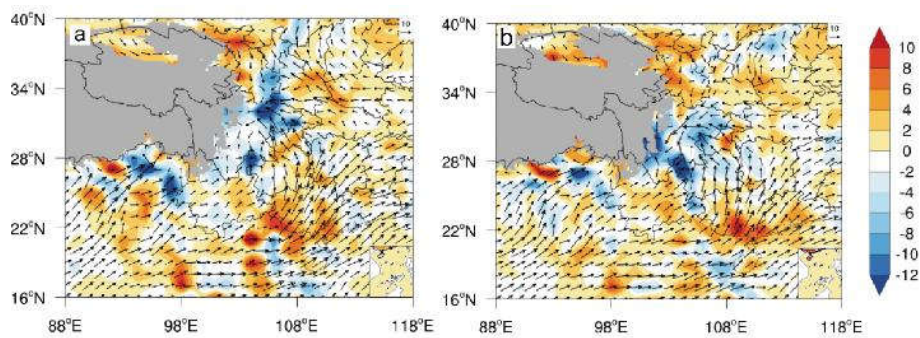


图5 850 hPa水汽通量(矢量箭头,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和水汽通量散度
(彩色填色,单位: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)分布
(a为7月1日08时;b为7月2日08时;灰色填色表示地形高度>3 000 m)

6所示,最外层粗网格区域包括中国整个领土范围,以及贝加尔湖、西太平洋和印度洋部分海域,最内层细网格区域涵盖了四川省,垂直方向向上积分了32层,模式层顶设置在50 hPa。模拟时间从2018年7

月2日08时开始,累积模拟24 h,积分时间步长为180 s,模拟结果每隔1 h输出一次。

此次模拟过程的主要参数化方案设置见表1。微物理过程选用New Eta方案,预报变量包括云

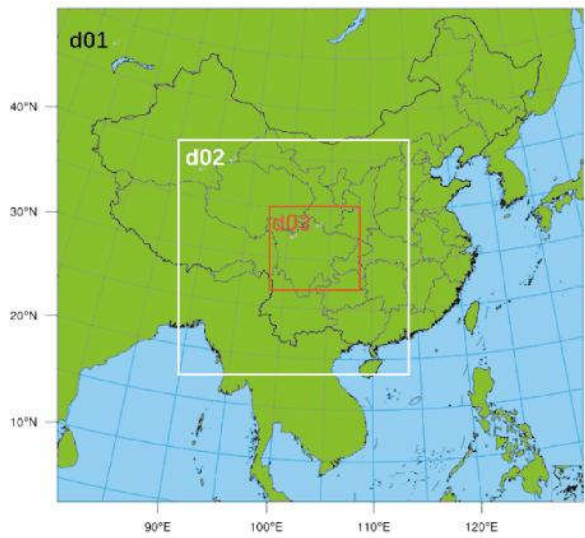


图 6 数值模拟区域

(水、冰)、雨、雪、冰雹和霰, BMJ 积云参数化方案包含了浅对流过程, 只在 d01 和 d02 区域开启, 考虑到 d03 区域分辨率为 3 km、不足 5 km, 所以不调用积云参数化方案, 边界层选用可以预报湍流动能和局部垂直混合强度的 MYJ 方案。

3.2 环流形势对比

图 7 是此次暴雨过程中 14 时的中高空环流形势场, 对比图 7a 和图 7b 可知, 模式对于 200 hPa 高

表 1 模式主要参数

	模拟区域 1	模拟区域 2	模拟区域 3
分辨率/km	27	9	3
格点数	220×207	289×295	337×310
微物理方案	Ferrier(New Eta)	Ferrier(New Eta)	Ferrier(New Eta)
积云参数化方案	Betts-Miller-Janjic	Betts-Miller-Janjic	/
近地面层方案	MYJ	MYJ	MYJ
陆面过程方案	Noah	Noah	Noah
长波辐射方案	RRTM	RRTM	RRTM
短波辐射方案	Dudhia	Dudhia	Dudhia
边界层方案	MYJ	MYJ	MYJ

空急流的强度位置、以及 500 hPa 中高纬“两脊一槽”的环流形势、贝加尔湖低压的位置都模拟得较好, 还清晰地展现了大陆高压脊与西风槽构成的“东高西低”的形势, 使上游低压系统东移受阻, 有利于降水在四川地区的维持。

从对流层中低层的模拟效果来看, 模拟资料的分辨率明显高于实况资料, 由图 8 可知, 模式较好地模拟了 700 hPa 四川盆地附近的风切变现象以及 850 hPa 的低空急流的位置和强度, 从风场可以看出, 在四川地区存在明显的气旋式辐合, 同时北方的

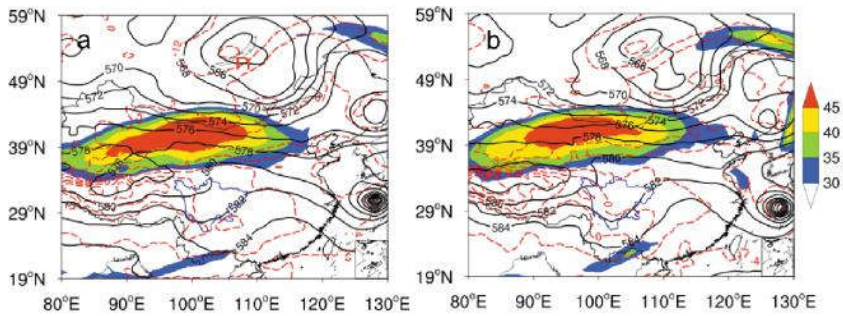


图 7 2018 年 7 月 2 日 14 时 200 hPa 高空急流(彩色填色, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、500 hPa 位势高度(黑色实线, 单位: dagpm)及 500 hPa 温度场(红色虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)对比
(a 为中高空客观分析环流场; b 为中高空 d01 模拟区域环流场)

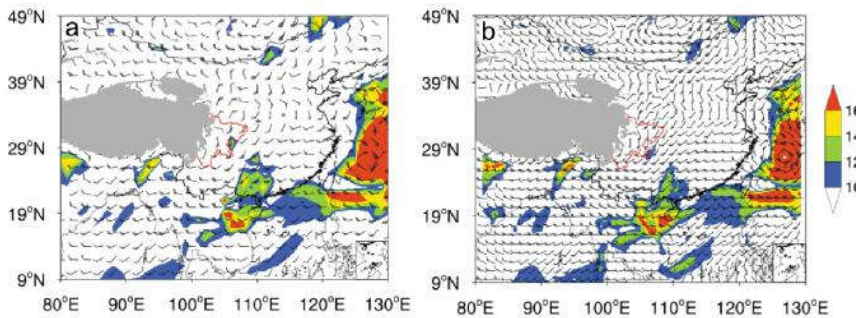


图 8 2018 年 7 月 2 日 08 时 700 hPa 风矢(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、850 hPa 低空急流(彩色填色, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)对比
(a 为低空客观分析环流场; b 为低空 d01 模拟区域环流场, 灰色填色为地形高度 $> 3\,000\text{ m}$)

干冷空气与夏季风输送的暖湿气流在四川地区交汇,副高西侧的低空急流向四川不断输送水汽,为暴雨提供了有利的低空环流形势。模式不仅对于中高层形势模拟得较好,还可再现低层的环流特征,并且能弥补分辨率不足的问题。

3.3 降水结果对比

利用 WRF 模式模拟的 2018 年 7 月 2 日 00 时—7 月 3 日 00 时的 d02 区域 24 h 累积降水量分布(图 9b)和观测资料得到的 24 h 累积降水量分布(图 9a)对比可知,WRF 模式模拟出的雨带位置和东北—西南的雨带走向与观测资料基本对应一致,雨带上降水量为 60 mm 以下的区域强度模拟得较好,80~120 mm 的降水模拟的强度比实况资料强,在(30°N,104°E)出现了一个虚假的降水大值中心(图 9b),雨量较实况偏大 20~40 mm;对于雨带的东南部的降水,模式模拟的雨区范围较小。

成都地区的降水主要集中在 11—16 时,因此重点分析此 6 h 累积降水的模拟结果。对比图 10a 和 10b 可知,模式较好地模拟出了成都地区的雨带位置、走势和范围,但在降水大值区的位置上模拟效果

与实况有差异,这是由于模式地形与实际地形存在一定的差异造成的。

通过对高中低层大尺度环流形势和不同时间不同区域累积降水量的对比分析,认为数值模拟较好地再现了此次暴雨过程,合理的模拟结果是一套时空分辨率更高并且完全连续的气象资料,可以用来进一步剖析此次暴雨天气过程。

4 垂直螺旋度分析

垂直螺旋度是垂直涡度与垂直速度的乘积,其物理意义是,气旋区的上升(下沉)运动和反气旋区的下沉(上升)运动分别意味着正的垂直螺旋度向上(下)输送和负的垂直螺旋度向下(上)输送,而对应此时的垂直螺旋度为正(负)值。一方面垂直涡度大的系统与剧烈天气现象联系密切;另一方面垂直速度是实际大气中造成天气现象的最直接原因。因此,垂直螺旋度充分反映了 2 个与天气现象紧密联系的物理量的配合情况,在一定程度上不仅能反映系统的维持状况,还能反映系统发展、天气现象的剧烈程度^[23]。

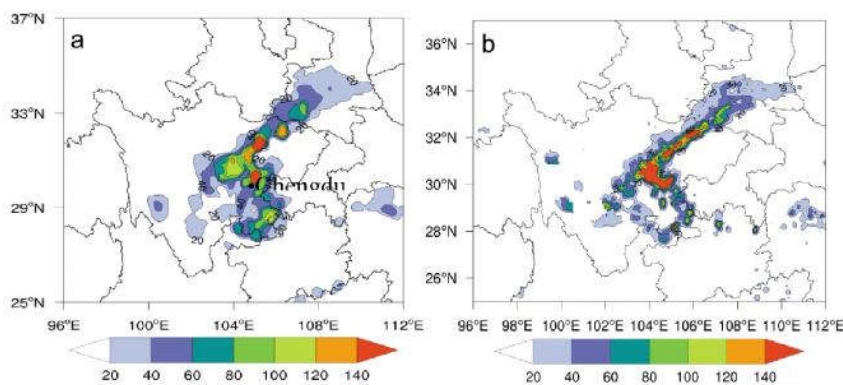


图 9 2018 年 7 月 2 日 08 时—7 月 3 日 08 时四川地区 24 h 累积降水量(填色,单位:mm)对比
(a 为实况,b 为 d02 模拟区域)

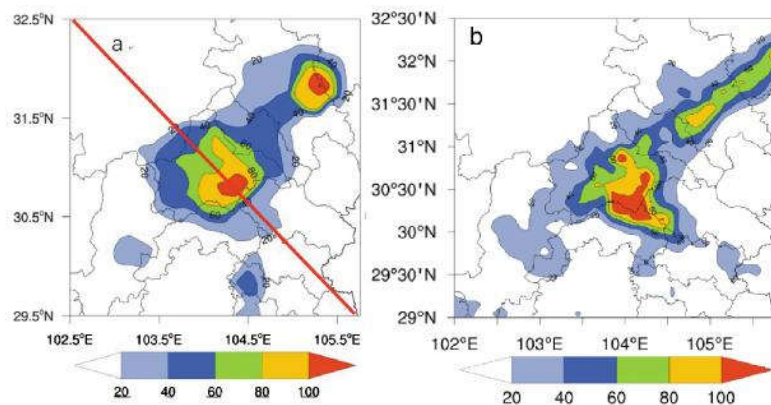


图 10 2018 年 7 月 2 日 11—16 时成都地区 6 h 累积降水量对比(填色,单位:mm)
(a 为实况,b 为 d03 模拟区域,红色实线为经过成都暴雨中心的连线)

图 11 为 2018 年 7 月 2 日 10—20 时垂直螺旋度和垂直速度 W 变化的剖面。7 月 2 日 10 时 (图 11a), 在 104.2°E 附近存在一个垂直螺旋度正值带和上升运动重合的区域, 此区域从对流层低层向上延伸至 600 hPa, 表明此处存在一个正涡度的气旋式对流系统。12 时, 正螺旋度带向东移动并且继续向上伸展, 正值中心由 $8 \times 10^{-4} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ 增加至 $10 \times 10^{-4} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$, 表明对流系统在低层围绕垂直轴线的气旋式旋转运动得以加强, 对流系统两侧开始出现下沉运动, 14 时 (图 11b) 低层垂直螺旋度正值带持续东移并且范围迅速增大, 200 hPa 以下形成一个螺旋度正值柱, 表明垂直方向上的气旋式旋转运动强烈, 垂直涡度向上输送明显增强, 200 hPa 以下均为气旋式辐合运动区, 上升运动的高度随螺旋度正值区的发展延伸到对流层顶, 强烈的上升运动使得对流系统持续发展。16 时 200 hPa 附近由于南亚高压的反气旋环流, 出现垂直螺旋度负值区, 负值中心达到 $10 \times 10^{-4} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$, 并且高空与对流系统西侧的下沉运动打通, 和低层垂直螺旋度正值带的上升运动形成垂直方向的闭合环流, 高层反气旋的辐散气流带来强烈的抽吸作用使得低层对流系统剧烈发展, 对应此时降水也达到峰值。18—20 时 (图 11c, 11d), 低层的垂直螺旋度正值区逐渐被负值所代替

直至近乎消失, 是由于低层出现了下沉运动或者反气旋式环流, 下沉运动的范围逐渐扩大, 气旋式涡旋发展减弱, 向上输送的垂直涡度减小, 对流系统强度减弱, 强降水也趋于停止。

由 2018 年 7 月 2 日 700 hPa 垂直螺旋度和 1 h 降水量分布可知, 垂直螺旋度的水平分布与降水落区的关系。7 月 2 日 10 时为暴雨初始阶段, 在四川盆地东北侧出现部分降水, 盆地其余位置有零星降水, 而垂直螺旋度正值等值线则与降水大值区对应较好。随着降水持续发展到 12 时, 雨区向成都方向移动并且降水量增大, 降水更加集中, 而此时垂直螺旋度正值等值线也随雨区一起移动, 并且与雨区范围重合。垂直螺旋度等值线的大值区一直与 1 h 累积降水量大值区吻合, 雨区的位置和移动方向都与垂直螺旋度正值等值线的位置和移动对应, 700 hPa 上垂直螺旋度的正值区可以指示降水落区的位置和移动。

5 结论

利用常规观测资料、日本气象厅向日葵 8 号卫星的相当黑体亮度温度 (TBB) 资料以及 WRF 模拟的高分辨率数值结果, 研究了 2018 年 7 月 2 日发生在四川地区的一次大暴雨过程, 主要得到以下结论:

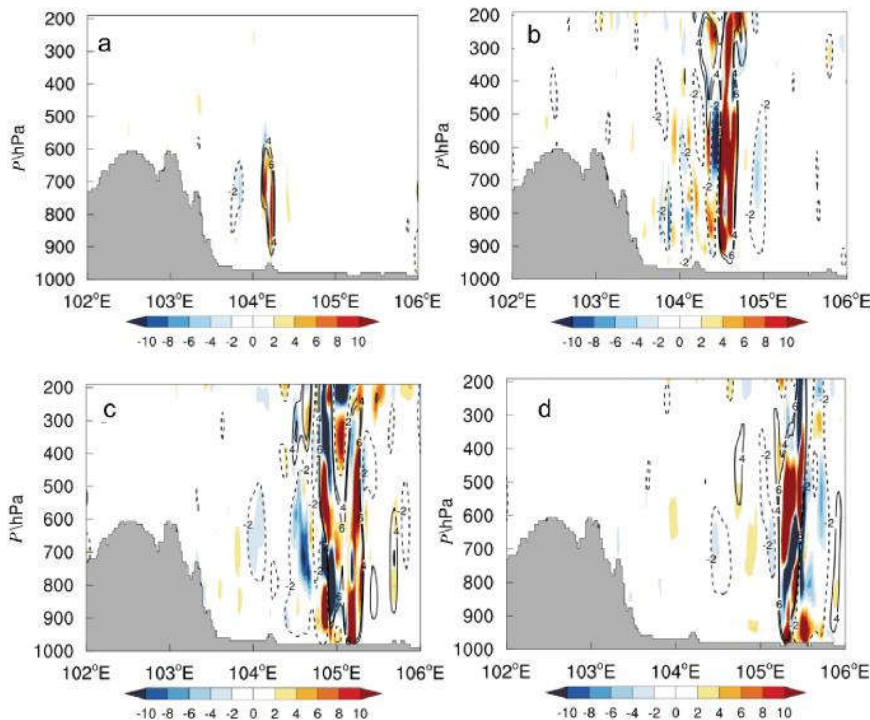


图 11 垂直螺旋度(彩色填色, 单位: $10^{-4} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$)和垂直速度 W (等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)沿着暴雨中心图 10 a 中红线位置的垂直剖面
(a 为 7 月 2 日 10 时; b 为 7 月 2 日 14 时; c 为 7 月 2 日 18 时; d 为 7 月 2 日 20 时; 灰色填色为地形高度 $> 3000 \text{ m}$)

(1)此次暴雨具有空间分布不均匀,降水强度大以及骤增骤减的特征;雨带呈东北—西南走向,强降水发生的时段主要集中在2018年7月2日11—16时。中高纬度“两脊一槽”环流形势以及副高与大陆高压脊形成的“东高西低”的有利环流形势,使上游低压系统东移受阻在四川地区维持;700 hPa四川盆地内闭合性气旋式涡旋稳定少动。

(2)降水大值区被TBB为 $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的云团所覆盖,云团的发生、发展和移动与降水大小和落区关系密切。此次降水过程低层存在明显的水汽辐合,水汽条件较好,水汽主要来源于西南暖湿气流。

(3)WRF模式较好地呈现高中低层大尺度环流形势,对于不同时间不同区域内累积降水量的模拟结果都与实况资料较为吻合。本次数值模拟较好地再现了暴雨过程。合理的模拟结果是一套时空分辨率更高并且完全连续的气象资料,可以用来进一步剖析此次暴雨天气过程。

(4)垂直螺旋度的高低空配置对揭示对流系统的演变起着至关重要的作用。在对流初始阶段,由于气旋式辐合以及上升运动在对流层低层初步建立,存在垂直螺旋度正值区;当对流继续发展时,高层垂直螺旋度的负值区与低层垂直螺旋度正值区密切配合,形成了垂直方向的闭合环流,高层反气旋辐散气流带来的抽吸作用使低层正值螺旋度加强发展,从而持续向上输送垂直涡度,有利于对流系统的强烈发展;在对流消亡阶段,低层垂直螺旋度正值区逐渐被负值所代替,高低层有利配置被打破,对流系统强度减弱,降水逐渐停止。700 hPa上垂直螺旋度的正值区可以很好地指示降水落区的位置和移动。

参考文献:

- [1] 何光碧.西南低涡研究综述[J].气象,2012,38(2):155-163.
- [2] 段海霞,陆维松,毕宝贵.凝结潜热与地表热通量对一次西南低涡暴雨影响分析[J].高原气象,2008,27(6):116-1323.
- [3] 葛晶晶,钟玮,杜楠,等.地形影响下四川暴雨的数值模拟分析[J].气象科学,2008,28(2):176-183.
- [4] 赵玉春,王叶红.高原涡诱生西南涡特大暴雨成因的个例研究[J].高原气象,2010,29(4):819-831.
- [5] 江玉华,杜钦,赵大军,等.引发四川盆地东部暴雨的西南低涡结构特征研究[J].高原气象,2012,31(6):1662-1574.
- [6] 李琴,崔晓鹏,曹洁.四川地区一次暴雨过程的观测分析与数值模拟[J].大气科学,2014,38(6):1095-1108.
- [7] 罗潇,李国平.一次东移型高原切变线过程的扰动动能特征[J].气象科学,2019,39(2):226-236.
- [8] 赵大军,江玉华,李莹.一次西南低涡暴雨过程的诊断分析与数值模拟[J].高原气象,2011,20(5):1158-1169.
- [9] CHEN S J, Lorenzo D. Numerical prediction of the heavy rainfall vortex over the eastern Asia monsoon region [J]. J Meteor Soc Japan, 1984, 62(5): 730-747.
- [10] KUO Y H, CHENG L S, Anthes R A. Mesoscale analyses of Sichuan flood catastrophe 11-15 July [J]. Mon Wea Rev, 1986, 114: 1984-2003.
- [11] KUO Y H, CHENG L S, BAO J W. Numerical simulation of the 1981 Sichuan flood. Part I: Evolution of a mesoscale southwest vortex [J]. Mon Wea Rev, 1988, 116: 2481-2504.
- [12] 吴瑞姣,罗艳,余金龙.移出型西南涡与我国中东部降水的关系[J].气象科学,2019,39(6):818-826.
- [13] MOFFAT H K. The degree of knottedness of tangled vortex lines [J]. J Fluid Mech, 1969, 35: 117-129.
- [14] LILLY D K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms Part II: Helicity and storm stabilization [J]. J Atmos Sci, 1986, 43: 126-140.
- [15] 岳彩军,郭煜,寿绍文,等.螺旋度在我国多种灾害性天气研究中的应用进展[J].暴雨灾害,2011,30(2):107-116.
- [16] TAN Zhemin, WU Rongsheng. Helicity dynamics of atmospheric flow [J]. Adv Atmos Sci, 1994, 11(2): 175-188.
- [17] FEI Shiqiang, TAN Zhemin. On the helicity dynamics of severe convective storms [J]. Adv Atmos Sci, 2001, 18(1): 67-86.
- [18] 陆慧娟,高守亨.螺旋度及螺旋度方程的讨论[J].气象学报,2003,61(6):684-691.
- [19] 刘晓汝,谢作威.2019年超强台风利奇马引发浙江特大暴雨过程分析[J].气象科学,2020,40(1):89-96.
- [20] 史小康,李耀东,刘健文,等.华北一次暴雨过程的螺旋度分析[J].自然灾害学报,2012,21(4):49-56.
- [21] 鲁坦.2011-06-23豫南暴雨成因及完全螺旋度诊断分析[J].气象与环境科学,2012,35(2):50-55.
- [22] 谭志强,王敏,李婷,等.2014年8月15—16日宁夏强对流天气螺旋度分析[J].干旱气象,2015,33(6):926-933.
- [23] 岳彩军,寿亦萱,寿绍文,等.我国螺旋度的研究及应用[J].高原气象,2006,25(4):755-762.

Numerical Simulation and Helicity Analysis of a Heavy Rain Process in the Sichuan Basin

YIN Fei¹, WANG Lei², WANG Youheng¹

(1.Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China;

2.College of Atmospheric Sciences, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract In this paper, we simulated a rainstorm process in Sichuan province using conventional observation data, the equivalent blackbody brightness temperature (*TBB*) data and NCEP/NCAR reanalysis data (FNL). The results show that the circulation pattern of “two ridges and one trough” in the middle and high latitudes and the superposition of subtropical high and continental high ridge formed the situation of “high in the east and low in the west” provided favorable background field conditions for the rainstorm process. The occurrence and development of several mesoscale clouds in the Sichuan Basin are directly related to the occurrence of heavy rain. The mesoscale model (WRF) reconstructed the heavy rain process in Sichuan. The positive area of 700 hPa vertical helicity can be a good indicator of the location and movement of the precipitation area. The high-altitude and high-altitude configuration of vertical helicity play an essential role in revealing the evolution of the convective system.

Key words helicity; Sichuan; rainstorm; numerical simulation