

田畅,隆霄,韩子霏.西藏林芝地区一次暴雨过程的中尺度模拟与分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(2):13-21.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2019.02.003

西藏林芝地区一次暴雨过程的中尺度模拟与分析

田畅,隆霄,韩子霏

(兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:利用常规观测资料、FY-2E卫星观测的TBB资料,对2015年8月19日发生在林芝地区的一次暴雨过程进行天气分析,并利用中尺度数值模式WRF的模拟结果分析此次暴雨过程中尺度系统的结构特征。结果表明,此次暴雨过程发生在高原低涡切变的环流形势下,伴随辐合线发展的线状对流系统是此次暴雨发生的主要原因。WRF模式可较好地模拟出暴雨过程的环流形势和降水的落区、量级。西南风引导的暖湿气流为暴雨的发生、发展提供充沛的水汽条件;对中尺度结构的分析表明,低层辐合、高层辐散的结构以及在降水区存在的正涡度伴随强烈的上升运动为此次暴雨过程提供了有利的动力条件,假相当位温的分布能够为暴雨提供有利的热力条件,垂直螺旋度低层正中心的配置反映出大气的不稳定分布,有利于中尺度对流系统的发展与维持。

关键词:青藏高原;暴雨;数值模拟;对流

中图分类号:P458.121.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2019)02-0013-09

青藏高原平均海拔为4000~5000 m,是世界上面积最大、海拔最高的高原,青藏高原地区的环境变化对高原以及周边其他地区人类的生存环境和经济发展能产生非常重要的影响^[1]。同时由于青藏高原地形复杂,暴雨具有突发性强,时空分布不均匀的特点,因此如何准确预报发生在该地区的暴雨一直是气象工作者面临的难题^[2]。

目前对于高原地区暴雨天气过程已有许多学者进行过研究。屠妮妮^[3]等对高原东侧一次暴雨过程的研究表明,湿位涡的演变与暴雨发展有很好的对应关系,湿位涡最大值与暴雨过程最强时段的出现时间一致;任余龙^[4]等用位涡理论对发生在高原东部的一次暴雨机制进行研究,结果表明:副热带高压边缘充沛的水汽输送,暴雨区上空强烈的水汽辐合是暴雨发生的主要原因,暴雨发生前的不稳定能量

为暴雨的发生提供有利的热力条件;何光碧^[5]等对三次高原切变线过程的研究指出,切变线附近通常伴有 $TBB < -20$ °C的线状或块状区域,对流活动较为旺盛,由于地形的阻挡和加热,高原东坡和南坡是大气不稳定能量聚集地。王志远^[6]对高原东北部一次区域性暴雨的形成机理进行诊断分析,指出高低空系统的合理配置,副高西北侧 β 尺度对流云团发展是造成此次暴雨的主要原因。由于高原地区常规观测资料的时空分辨率较低,不足以分辨中尺度对流系统的发生发展及演变过程,因而高时空分辨率的数值模拟成为研究中尺度运动的一个重要工具。近十几年来,已利用高分辨率数值模式对对流降水进行了大量的研究,取得了许多有意义的成果^[7-12],但对于发生在青藏高原地区的暴雨数值模拟研究还相对较少,陈静^[13]等利用中尺度非静力数值模式MM5,模拟一次青藏高原东侧的大暴雨过程,结果表明高分辨率的数值模式对触发本次暴雨过程的中尺度对流系统具有较好的模拟能力;何光碧^[14]等利用WRF模式引入气象站海拔资料,修改模式局地地形的办法,分析地形因素对数值模式预报效果的影响,得出在模式中引入真实地形可使模拟的降水强度增大、强降水中心落

收稿日期:2018-12-27;修回日期:2019-01-25

基金项目:国家自然科学基金(41375033)资助。

作者简介:田畅(1994-),女,硕士研究生,主要从事中尺度大气动力学及数值模拟研究。E-mail: tianch16@lzu.edu.cn

通讯作者:隆霄(1973-),男,副教授,主要从事中尺度大气动力学及数值模拟研究。E-mail: longxiao@lzu.edu.cn

区和发生时间均有所改善;赵玉春^[15]等利用 WRF 模式和地形上游探空垂直廓线在模式真实地形下开展理想数值模拟试验,得出气流在遇到高原东坡地形后爬坡和阻滞绕流同时存在,爬升和绕流形成的气旋性切变有利于对流暴雨的发生和发展。吴胜刚^[16]等利用中尺度数值模式 WRF 对青藏高原南坡地区降水的模拟分析表明:高原南坡的降水对积云对流参数化方案的选择很敏感,不同方案模拟的结果有显著的差异。

林芝地区位于高原东南部,该地区夏季降水是西藏地区最多的地区^[17],降水强度较大。本文选取发生在 2015 年 8 月 19 日林芝地区的一次暴雨过程,利用中尺度数值模式 WRF 对此次降水过程进行数值模拟,并结合常规观测资料和 FY-2E 卫星产品,分析此次暴雨过程的天气学特征、水汽条件及中尺度特征,以加深对青藏高原地区暴雨机制的认识,从而为该地区的暴雨预报提供理论基础。

1 环流特征及对流云团演变分析

1.1 暴雨过程概述

2015 年 8 月 19 日 00 时至 20 日 00 时(BT,下同),林芝地区出现了一次暴雨天气过程,它具有影响范围大、持续时间长、降水量大等特点。8 月 17 日和 18 日林芝地区已有多个观测站出现了大雨,至 19 日降水量达到最大,由 24 h 降水量分布(图 1a)可看出此次降水范围比较集中,林芝地区有 8 个观测站都达到暴雨级别(西藏气象台给出林芝站暴雨指标为日降水量 ≥ 40 mm),其中墨脱站 53.7 mm,林芝站 66 mm,通麦站 58 mm,波密站达到 75.9 mm,突破了此地的历史极值。6 h 降水量的分析显示,此次暴

雨过程的强降水时段出现在 14:00—20:00(图 1b),最大降水量出现在林芝站,6 h 降水量达到 45 mm。

1.2 环流形势分析

2015 年 8 月 19 日 08 时,在对流层高层 200 hPa,南亚高压中心位于青藏高原的西南侧,其东伸脊点位于 78°E 附近,在其东北侧(30°~45°N,90°~120°E)区域存在高空急流带,中心最大风速可达到 40 m/s,林芝地区位于南亚高压的东北部,高空急流入口区右侧(图 2a)。林芝地区的海拔平均为 3000 m,500 hPa 高度相当于该地区的对流层低层。在该高度层,伊朗高压东伸与西太副高之间形成一条从尼泊尔到西藏东部的横槽切变线,伴随在高原中部形成的低涡发展,低涡东移南压至林芝地区,形成“低涡切变”的天气形势(图 2b),这种高原低涡切变形势有利于此次暴雨过程的形成和发展。

1.3 中尺度对流云团的演变特征分析

由于青藏高原地区的常规观测资料较为稀疏,以下利用高时空分辨率的气象卫星观测资料来分析影响暴雨过程的中尺度对流系统。文中所用的卫星资料为 FY-2E 卫星 9210 格式逐小时 TBB 产品。一般 $TBB \leq -32$ °C 的区域为对流活跃区,TBB 温度越低,对应的云顶高度越高,对流系统的发展越旺盛。从 TBB 随时间的演变图(图 3)上可以看到,在 8 月 19 日的 14:00 时,林芝地区 500 hPa 高度上出现明显的气流辐合,对流云团位于辐合线上(图 3a),其东南部出现 TBB 值低于 -54 °C 的强对流云团 A,此后该强对流云团不断发展,在其西南部有 2 个对流云团(B,C)不断形成发展,它们形成一条东北西南向的线状对流系统,3 个强对流云团 A、B 和 C 的 TBB 值增强到 -58 °C 以下(图 3b、3c);到 17:00(图

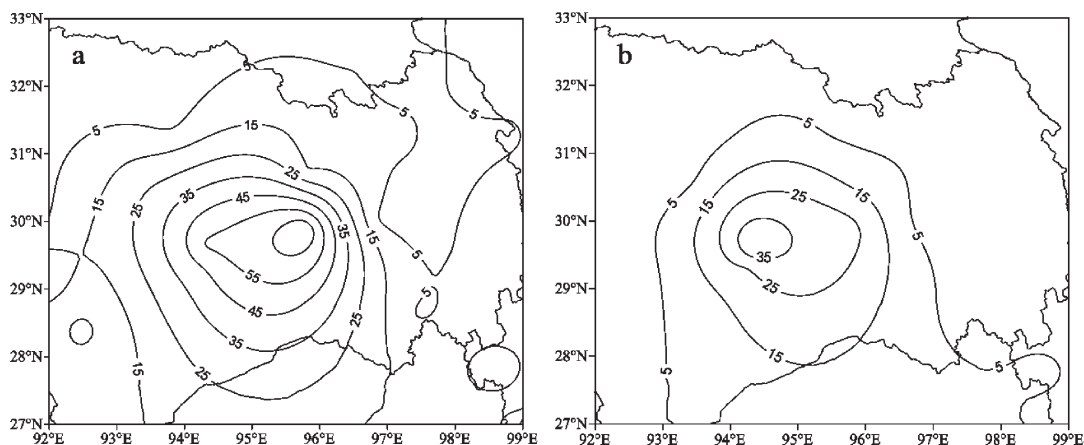


图1 林芝地区 2015 年 8 月 19 日 08:00—20 日 08:00(a)和 19 日 14:00—20:00(b)降水量分布
(单位: mm)

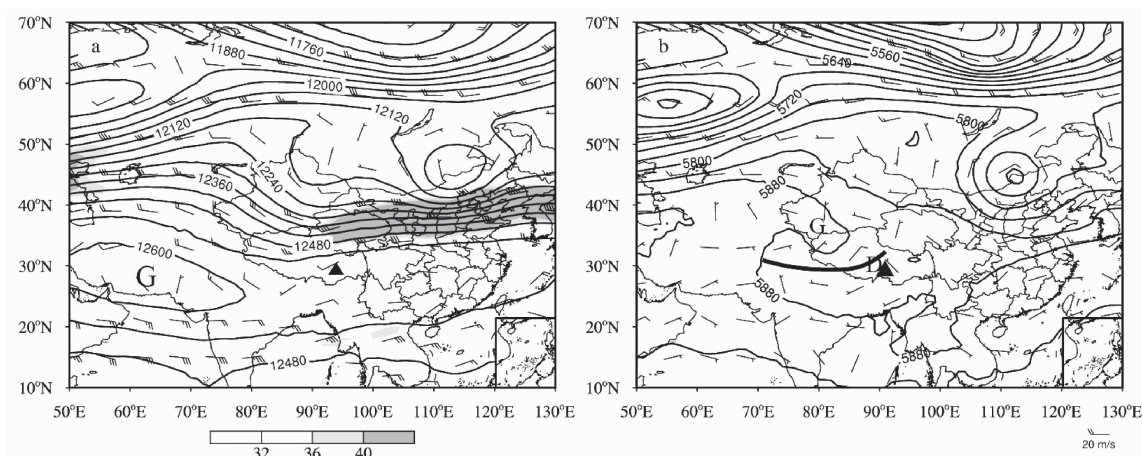


图2 8月19日08:00 200 hPa(a)、500 hPa(b)的环流形势(等值线,单位:gpm)和风场(风羽,单位:m/s)合成
(图a中阴影为风速>32 m/s区域,三角标记为强降水中心)

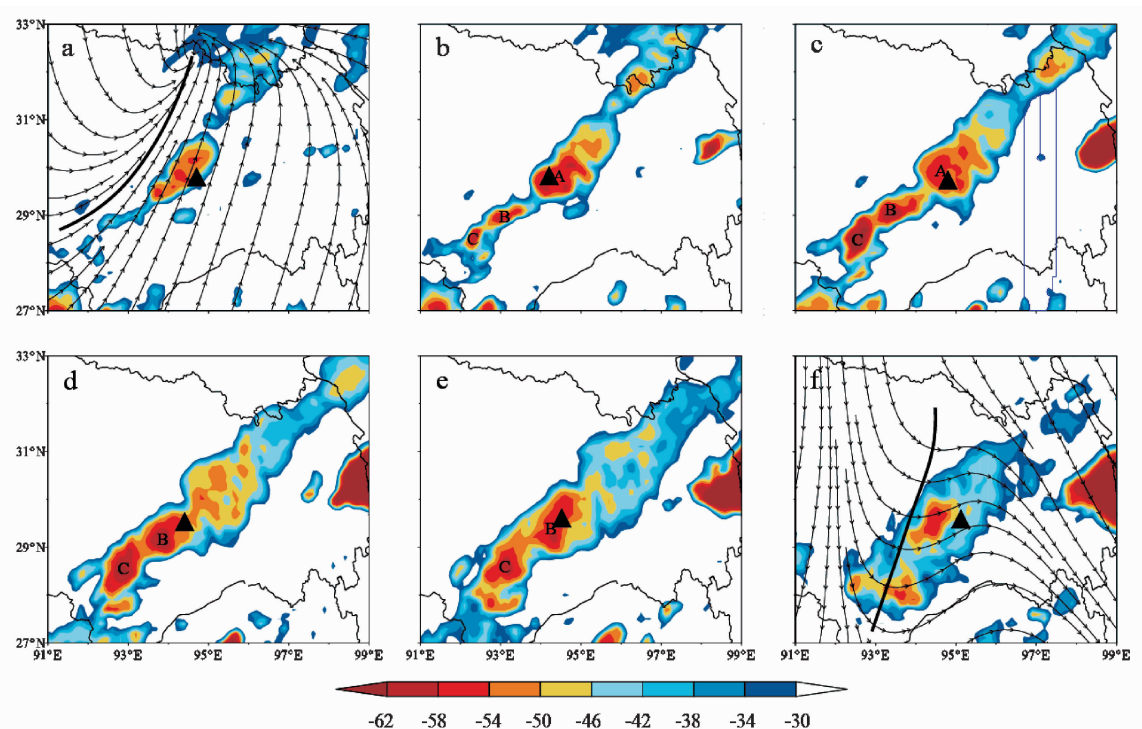


图3 8月19日FY-2E TBB的演变

(a为14:00,b为15:00,c为16:00,d为17:00,e为18:00,f为20:00;图a,f叠加了客观分析的500 hPa流场,三角标记为强降水中心,单位:°C)

3d),对流云团A不断消散,对流云团B和C则不断向东北方向移动并增强,其中心TBB值达-60°C;到18:00,对流云团A几乎完全消失,对流云团B和C范围有所扩大,但强度减弱(图3e);至20:00(图3f),对流云团B和C处于槽前,强度明显减弱。

以上分析表明,此次暴雨与对流层高层200 hPa南亚高压与高空急流及500 hPa低涡横槽切变线的发展密切相关。中尺度对流云团演变特征显示,暴雨

的发生发展过程是线状对流系统中的对流云团不断发展演化的结果。有研究表明线状中尺度对流系统,它是造成暴雨、冰雹、龙卷等灾害性天气的重要系统之一^[17]。

2 数值模拟试验设计及模拟结果检验

2.1 模式方案设计

利用中尺度数值模式WRF进行三重嵌套模拟(图4),模拟中心点设在(29.5°N,94.5°E),格点域为

147×108, 220×175 和 265×220, 对应的格距分别为 45、15 km 和 5 km, 垂直层次分为 30 层, 模式层顶设在 50 hPa, 模式的初始场和边界条件由 NCEP 提供的每 6 h 一次的 FNL 再分析资料(水平分辨率为 1°×1°)产生。模拟方案中微物理过程采用 WSM6 类冰雹方案, 长波辐射和短波辐射采用 RRTM 方案和 Dudhia 方案, 近地面层为 Monin-Obukhov 的 MM5 相似方案, 陆面过程为 Noah 陆面参数化方案, 行星边界层采用 YSU 方案, D01 和 D02 模拟区域采用的积云参数化方案为 Kain-Fritsch(new Eta)积云对流参数化方案, D03 区域没有启动积云对流参数化方案。本次模拟启动时间为 2015 年 8 月 18 日 08 时, 共积分 48 h, 时间步长为 180 s, 模拟结果每 1 h 输出一次。

2.2 模拟结果检验

D03 模拟区域 8 月 19 日 08 时—20 日 08 时的 24 h 降水量分布(图 5a)和 TRMM 卫星观测的 24 h 降水量的分布(图 5b)的对比可以看出, 模拟结果的整体雨带分布与 TRMM 卫星观测降水基本一致。对于此次降水过程, 模拟的降水范围偏大、强度偏小, 而在高原南坡降水的范围和强度都偏大, 高原东北至四川青海一带出现少量虚假降水。考虑到高原地区复杂地形背景, 总体来看降水模拟结果较好。模拟的和客观分析的 8 月 19 日 08 时 500 hPa 环流形势和风场的对比分析也表明, 模式也较好地模拟出此次暴雨过程的大尺度环流背景。

3 水汽条件分析

充足的水汽供应是暴雨的形成和发展的必要条件。图 6 为 D03 模拟域模拟的 500 hPa 的水汽通量

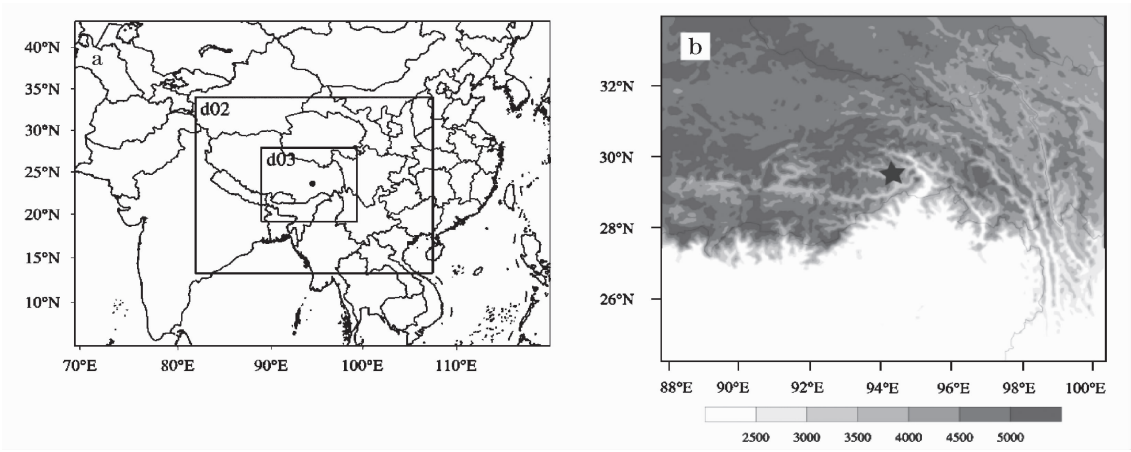


图 4 WRF 模式三重嵌套网格区域(a)和 D03 模拟区域的地形分布(b)
(a 中黑点为模拟区域中心, b 中星号为林芝地区的位置)

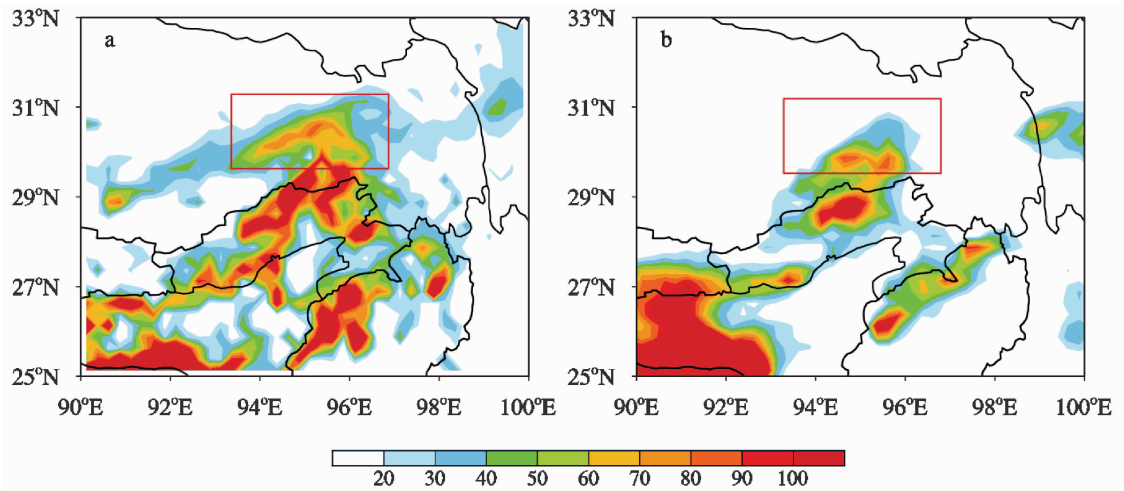


图 5 2015 年 8 月 19 日 08:00—20 日 08:00 24 h 累积降水模拟(a)和 TRMM 卫星观测(b)的 24 h 降水量分布(单位:mm)

及其散度和 3 h 降水量的叠加图,从图中可以看出:在暴雨发生过程中,在低层 500 hPa 存在一条东北—西南向的水汽辐合带,这与 *TBB* 的分布特征非常一致。从图中也可以看出此次暴雨过程的水汽输送主要为西南气流,孟加拉湾暖湿空气被强盛的西南风引导至高原,水汽通量的最大值位于高原东南及东北部,降水量的增加与水汽强度的增强一致。图 7 显示可以看出最强降水区域与 500 hPa 上升运动的大值区吻合,上升运动可以将低层暖湿气流带至高层产生凝结降水,并释放凝结潜热,进一步促使垂直运动的发展,有利于强降水的形成。以上分析说明,充足的水汽输送为暴雨的形成提供了充沛的水汽条件,强烈的垂直上升运动则有利于水汽的抬升凝结,释放潜热可促进上升运动的发展,这样形成的

正反馈机制为暴雨的维持和发展提供有利的条件。

4 中尺度系统垂直结构分析

观测分析显示,此次暴雨过程的强降水时段出现在 8 月 19 日 14—20 时,为研究中尺度系统的垂直结构,沿图 7 黑色实线 AB 模式模拟的强降水中心作散度、涡度、垂直速度以及假相当位温等垂直剖面图(图 8、图 9、图 10),对暴雨形成和发展中的中尺度系统结构进行分析。

强烈的垂直上升运动是暴雨过程发生的必要条件。强降水区位于地形的迎风侧,由于地形的抬升作用,在地形的迎风坡出现明显的上升运动,并在其东南侧出现明显的下沉补偿气流(图 8)。由散度场的垂直剖面结构分布显示,散度场具有低层辐合、高层

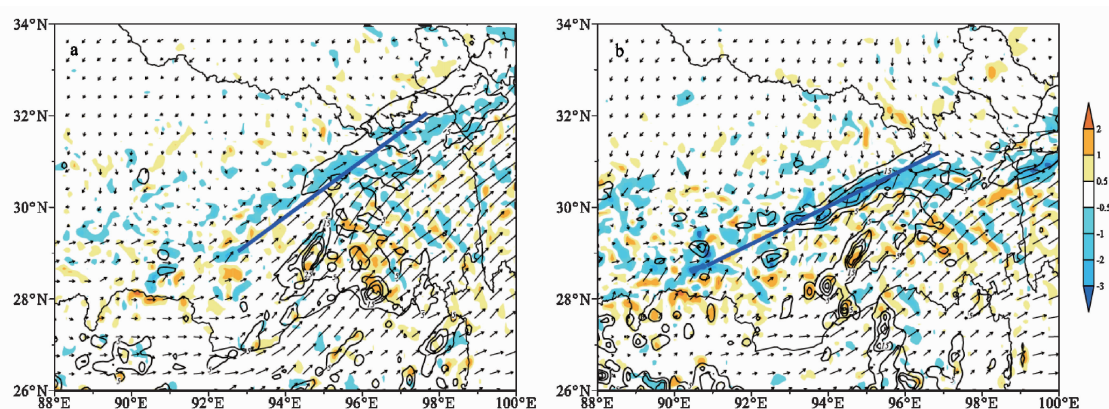


图 6 8 月 19 日 14:00(a)和 18:00(b)500 hPa 水汽通量(箭头,单位: $\text{g}/(\text{hPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、水汽通量散度(阴影, $10^4 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$)和 3 h 降水(等值线,单位: mm)的合成

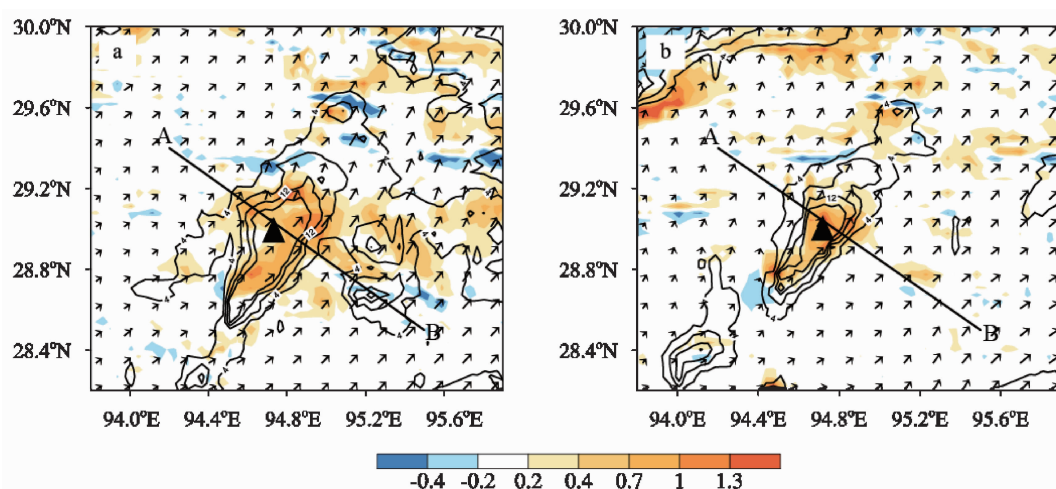


图 7 8 月 19 日 14:00(a)和 18:00(b)500 hPa 风场(箭头,单位: m/s)、垂直速度(阴影,单位: m/s)及 1 h 降水(等值线,单位: mm)的合成
(三角标记为强降水中心)

辐散的特征,500 hPa 以下主要为辐合区域,以上为主要辐散区域。低层辐合、高层辐散所造成的抽吸作用可以增强该区域的垂直上升运动,在上升运动附近伴有下沉补偿气流(图 8a)。由涡度场的分布可以看出,在暴雨区存在明显的正涡度,正涡度区可向高层延伸至 300 hPa,正涡度中心值可达到 $80\times10^{-5} \text{ s}^{-1}$,正涡度与强上升运动相伴,配合迎风坡地形的强迫抬升作用,有利于正涡度区的发展并向高空延伸,为暴雨的发生提供了有利的动力条件。

从垂直速度的分布来看,垂直上升运动区域主要位于 700~300 hPa,最大的上升运动达 1.4 m/s (图 9);假相当位温(θ_{se})是综合表征大气温度和湿度的量,其垂直分布可用来分析大气的垂直热力结

构及垂直稳定度状况,假相当位温等值线斜率大,有利于低层的暖湿空气向高层抬升,与高层的干冷空气相遇,形成等假相当位温线的密集带,促进气旋性涡旋的发展^[9]。由 19 日 14 时(图 9a)的假相当位温的垂直剖面可以看到,在此次暴雨过程的主要降水区,300~600 hPa 等假相当位温线的斜率很大, θ_{se} 密集区在迎风坡的上空向东南方向倾斜分布,在强上升运动区,为假相当位温的高值区,可达 356 K。低层暖湿空气在向高层爬升的过程中释放凝结潜热,从而加强大气的不稳定度,至 19 日 18 时,假相当位温等值线密集带的斜率以及垂直速度都有所加强,假相当位温高值区与垂直速度大值区的位置都向高空延伸,且与图 8 中所示的正涡度区域一致。大

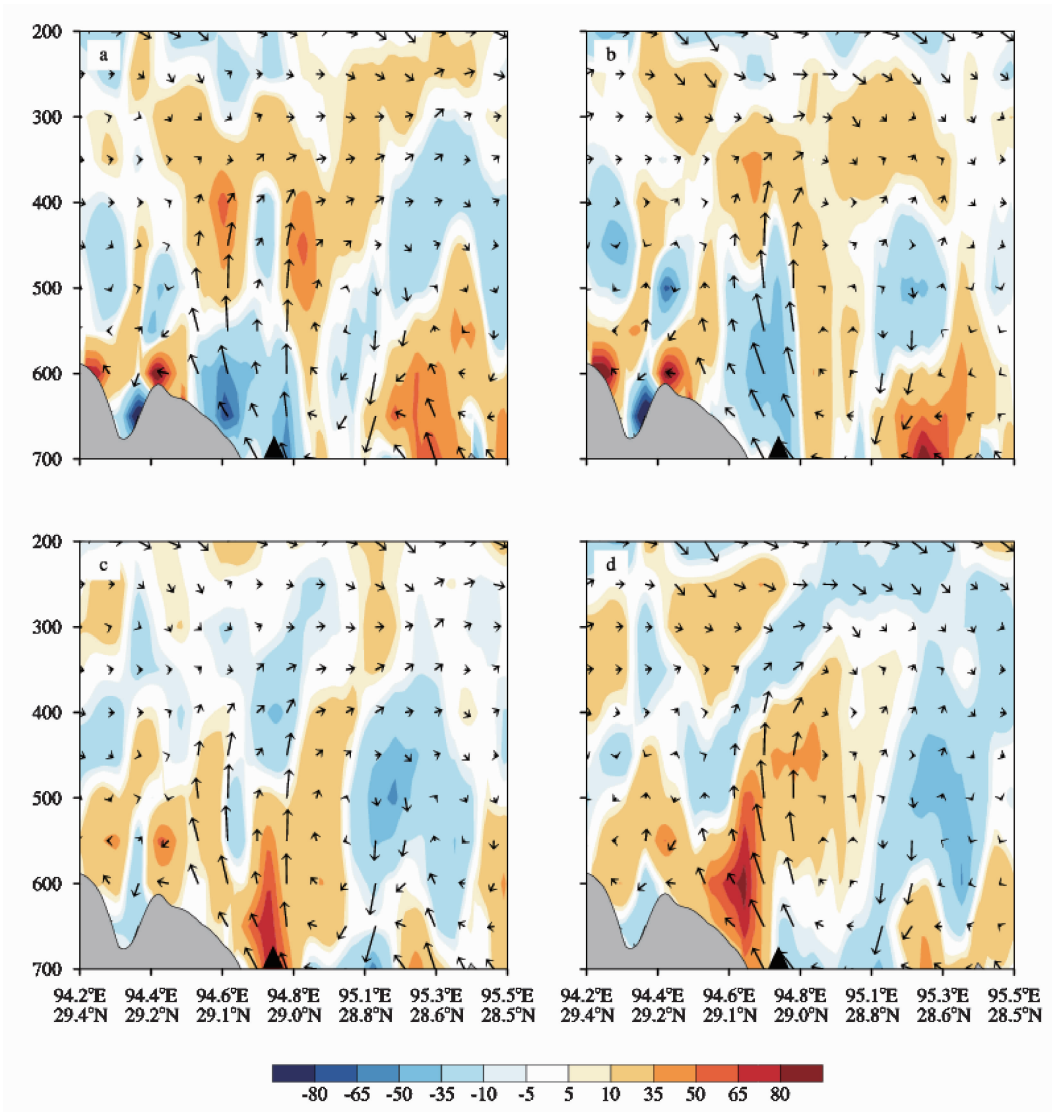


图 8 8 月 19 日 14:00(a、c)和 18:00(b、d)沿图 7 所示直线作散度(阴影,单位: 10^{-5} s^{-1})(a、b)、垂直涡度(c、d)(阴影,单位: 10^{-5} s^{-1})、风场(矢量,单位: m/s)的垂直剖面
(灰色阴影区为地形,三角标记为强降水中心)

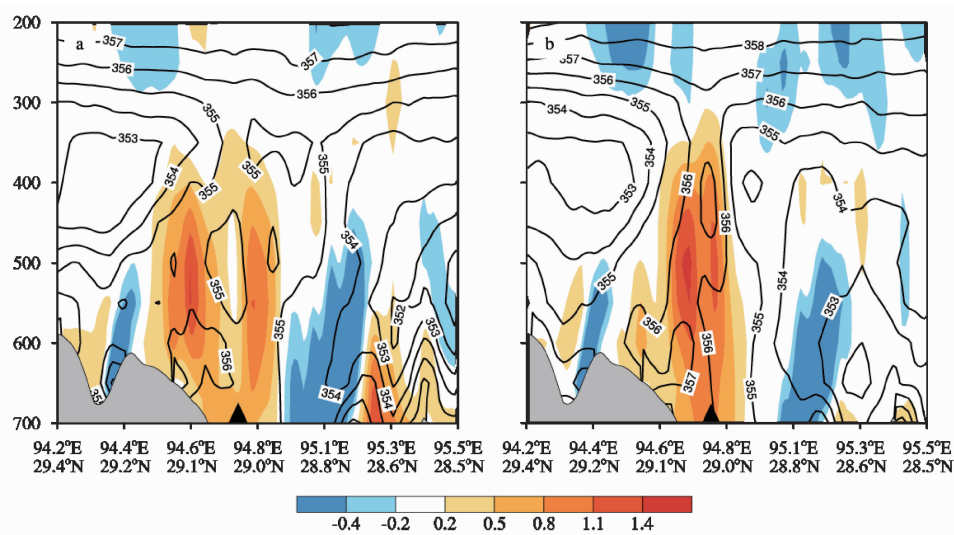


图9 8月19日14:00(a)和18:00(b)沿图7所示直线作假相当位温(等值线,单位:K)和垂直速度(阴影,单位:m/s)的垂直剖面

量的暖湿空气存在于降水区的上空,不稳定层结促进上升运动加强,配合地形的抬升作用,将低层的暖湿水汽带至高层并释放潜热,为此次暴雨过程提供有利的热力条件。

螺旋度的定义式为风速和涡度点积的体积分:

$$H = \iiint \vec{v} \times \nabla \times \vec{v} dt \quad (1)$$

垂直螺旋度为垂直涡度和垂直速度的积,又称k或z-螺旋度。剧烈的天气现象中通常存在垂直涡度大的系统,垂直速度又是造成天气现象的主要原因,垂直速度的大小也反映了天气现象的剧烈程度,因此垂直螺旋度是综合反映垂直涡度与垂直速度配合情况的物理量,它可以反映出天气系统的发展、维持状况,还能表现天气现象的剧烈程度。局地垂直螺旋度计算方法为:

$$H = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) W = W \times \zeta \quad (2)$$

W 为 Z 坐标系中的垂直速度, ζ 为相对涡度的垂直分量^[20-21]。

降雨前期(图10a、10b),可以看到94.8°E附近,对流层低层存在垂直螺旋度正值区,中高层存在垂直螺旋度负值区,至降雨强盛期(图10c、10d)正垂直螺旋度区高度延伸至近300 hPa,且强度增大至 $-70 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。高层辐散促进低层的辐合,配合迎风坡地形的抬升作用,可使低层的正垂直螺旋度区逐渐向高层抬升,并使上升运动加强,有利于暴雨过

程的维持和发展。垂直螺旋度中低层正中心、高层负中心的配置使得低层有正涡度的辐合上升区,高层有负涡度的辐散区,这种结构有利于系统自身的发展与维持,垂直螺旋度正大值区与暴雨的落区也有较好的一致性。

5 结论

受特殊地形的影响,青藏高原地区是我国易发生灾害性天气的地区。本文对2015年8月19日发生在林芝地区的一次暴雨过程的大尺度系统和中小尺度对流云团进行了分析,然后利用中尺度WRF模式对此次暴雨过程进行数值模拟,模拟结果较好地再现了此次暴雨过程,其环流形势和降水的落区、强度与实况较为一致。利用WRF模式输出的高时空分辨率资料对此次暴雨过程的水汽条件以及动力、热力学特征进行了诊断分析,得到如下主要结论:

(1) 天气分析表明,暴雨过程发生在有利的大尺度环流背景下,林芝地区处于伊朗高压东伸与西太副高之间形成的横槽切变线的环流形势下,受东移南压的高原低涡影响,伴随辐合线发展的线状对流系统是此次暴雨发生的主要原因。

(2) 强盛的西南风将孟加拉湾暖湿空气引导至高原东部,形成一条东北—西南向的水汽辐合带;强上升运动将低层暖湿空气向高层抬升释放潜热,为暴雨的发生提供有利的热力条件。

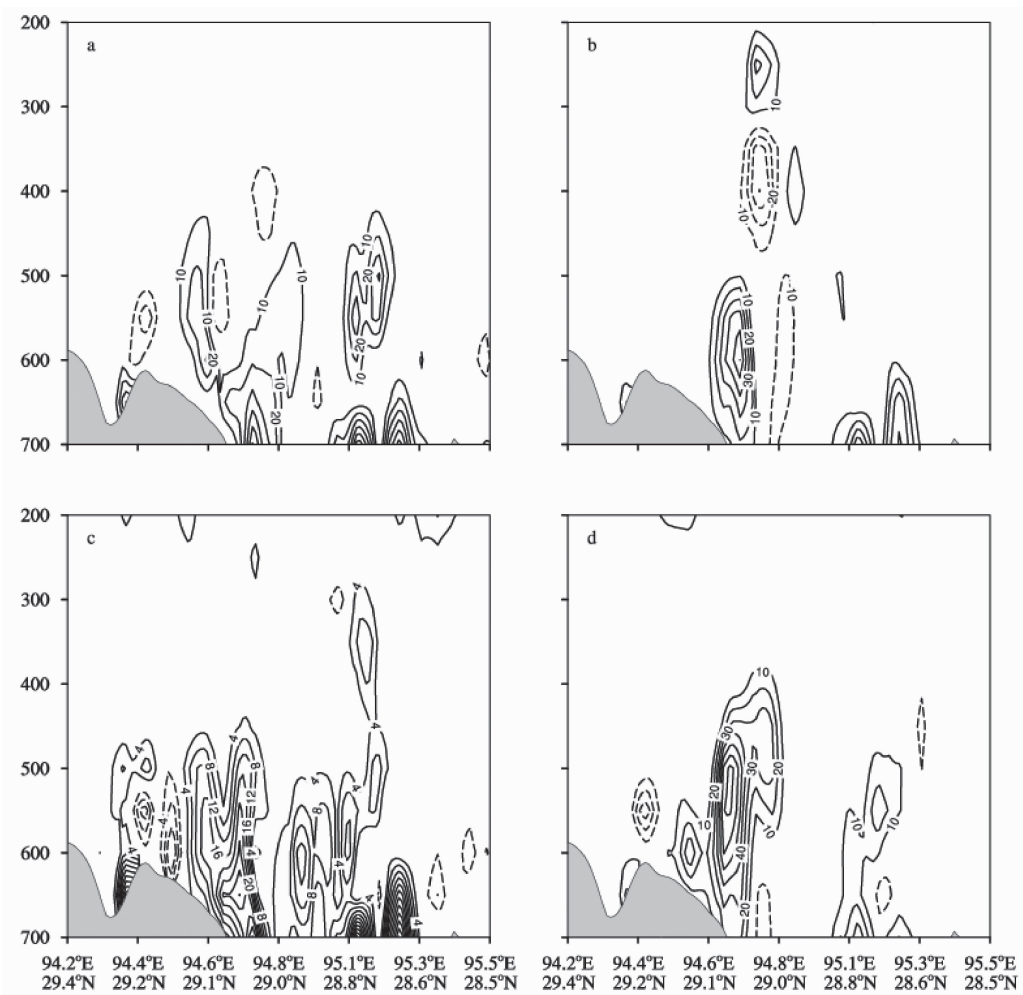


图 10 8月19日14:00(a)、15:00(b)、16:00(c)、18:00(d)沿图7所示直线作垂直螺旋度剖面
(单位: 10^{-5} m/s^2 , 灰色阴影区为地形)

(3)低层辐合、高层辐散并伴有强烈的上升运动的垂直结构特征,以及有利的大气热力结构为此次暴雨过程的发生、发展提供了动力条件。

(4)暴雨过程中垂直螺旋度中低层正中心、高层负中心的结构配置有利于天气系统的维持和发展,垂直螺旋度正大值区可较好的对应强降水的落区。

参考文献:

[1] 姚檀栋,朱立平.青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J].地球科学进展,2006,21(5):459-464.
[2] 马恩点,刘晓莉.一次高原强降水过程及其云物理结构的数值模拟[J].气象科学,2018,38(2):177-190.
[3] 屠妮妮,陈静,何光碧.高原东侧一次大暴雨过程动力热力特征分析[J].高原气象,2008,27(4):796-806.
[4] 任余龙,杨文月,武学琴,等.青藏高原东部边缘一次大暴雨发生机制研究[J].干旱气象,2010,28(3):315-321.
[5] 何光碧,师锐.三次高原切变线过程演变特征及其对降水的影响[J].高原气象,2014,33(3):615-625.
[6] 王志远. 青藏高原东北部一次区域性暴雨天气形成机理

分析[J].青海气象,2012,(4):2-6.

[7] 袁有林,杨必华,周宏,等.WRF模式不同集合预报方案对一次大范围暴雨过程的模拟研究 [J]. 干旱气象, 2016,34(6):1027-1036.
[8] F. Maussion, D. Scherer, R. Finkelnburg, et al.WRF simulation of a precipitation event over the Tibetan Plateau, China – an assessment using remote sensing and ground observations [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011(15): 1795-1817.
[9] 袁有林, 杨秀洪, 杨必华, 等. 不同初始场及其扰动对WRF模拟暴雨的影响[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(1): 67-75.
[10] 王坤,张飞民,孙超,等.WRF-WSM3微物理方案在青藏高原地区暴雪模拟中的改进及试验 [J]. 大气科学, 2014,38(1):101-109.
[11] 赵海英,薄燕青,邱贵强,等.地形对山西暴雨影响的数值模拟研究[J].气象与环境科学,2017,40(2):84-91.
[12] 张钊扬,钱贞成,王春明,等.江苏一次突发暴雨的数值模拟[J].气象与环境科学,2014,37(3):67-75.

- [13] 陈静, 娇梅燕, 李川. 青藏高原东侧一次中尺度对流系统的数值模拟[J]. 高原气象, 2003, 22(增刊 1):90–101.
- [14] 何光碧, 屠妮妮, 张利红, 等. 青藏高原东侧一次低涡暴雨过程地形影响的数值试验[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1546–1556.
- [15] 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 川西高原东坡地形对流暴雨的研究[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(5): 607–616.
- [16] 吴胜刚, 刘屹岷, 邹晓蕾, 等. WRF 模式对青藏高原南坡夏季降水的模拟分析[J]. 气象学报, 2016, 74(5):744–756.
- [17] 杨志刚, 杜军, 刘玲, 等. 西藏自治区气象灾害气候图集 (1961–2008 年)[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [18] 俞小鼎. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. 气象科技进展, 2011, 1(3):31–41.
- [19] 田亚杰, 王春明, 崔强. 2015 年 5 月 19–20 日两广地区暴雨过程数值模拟与诊断分析 [J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1):18–25.
- [20] 岳彩军, 寿绍文. 我国螺旋度的研究及应用[J]. 高原气象, 2006, 25(4):754–762.
- [21] 慕建利, 李泽椿, 寿绍文, 等. 高原东侧突发性大暴雨过程中螺旋度的诊断分析[J]. 气象科学, 2009, 29(2):181–186.

Mesoscale Simulation and Analysis of Rainstorm in Nyingchi Area, Tibet

TIAN Chang, LONG Xiao, HAN Zifei

(College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 73000, China)

Abstract Synoptic analyses on a rainstorm event which occurred in Nyingchi area on August 19, 2015 were conducted using conventional observations and TBB satellite data, and then output of mesoscale model WRF was used to analyze the structural characteristics of the mesoscale system. The results indicates that the rainstorm process formed in the shear line and low vortex over the Tibetan Plateau, mesoscale convective system developed with convergence line and the development of the linear convective system which is the main reason for the rainstorm. Simulated precipitation as well as largescale pattern was quiet well by mesoscale model WRF. Southwest flow provides abundant vapor conditions for the rainstorm and low-level convergence, high-level divergence as well as strong upward motion provide dynamic conditions for the occurrence and development of this rainstorm process, The distribution of pseudo-equivalent temperature can provide favorable thermal conditions for rainstorm. Distribution of vertical helicity can reflect atmospheric instability, which provides favorable condition for the development of the mesoscale convective system.

Key words Tibetan Plateau; rainstorm; numerical simulation; convection