

周雪松, 阎丽凤, 孙兴池, 等. “2007. 8. 17”山东大暴雨的数值模拟和诊断分析[J]. 气象, 2012, 38(8): 960-970.

“2007. 8. 17”山东大暴雨的数值模拟 和诊断分析^{* 1}

周雪松^{1,2} 阎丽凤³ 孙兴池¹ 张 磊¹

1 山东省气象台, 济南 250031
2 山东省枣庄市薛城区气象局, 薛城 277000
3 山东省气象局, 济南 250031

提 要: 利用常规资料、区域自动站、气象卫星、多普勒天气雷达、闪电定位资料以及中尺度数值模式 WRF, 对 2007 年 8 月 16 和 17 日在山东省新泰市发生的大暴雨天气过程进行分析, 并针对中尺度地形对暴雨的影响进行了敏感性试验。研究发现, 此次大暴雨发生于副热带高压边缘切变线附近, 与速度不连续造成的 K-H 不稳定而引起的中小涡旋有密切关系。鲁中山脉地形对大暴雨中心的强度和落区有较大影响, 在对流层低层产生明显的地形性切变线, 加强了偏南暖湿气流的辐合, 使大暴雨强度更大, 位置更加偏南。对强弱两次相似降水过程进行数值模拟对比试验发现, 鲁中山脉地形对两次过程的降水分布、中心强度和落区等影响较为一致, 但是对不同强度降雨增幅的影响差异较大, 地形对强降雨的增幅作用更加明显。进一步研究表明, 地形的抬升作用, 造成暴雨区低层辐合加强和垂直速度增强, 更有利于不稳定能量积累和水汽的辐合, 同时山脉地形在一定程度上还对大气中云水和雨水的分布有较大影响。副热带高压边缘有利的环境背景条件和地形的共同作用是山东局地大暴雨产生和维持的主要物理机制。

关键词: 大暴雨, T_{BB} , 地形影响, 敏感性试验, 控制试验

Numerical Simulation and Analyses on the 17 August 2007 Heavy Rainstorm in Shandong Province

ZHOU Xuesong^{1,2} YAN Lifeng³ SUN Xingchi¹ ZHANG Lei¹

1 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031
2 Xuecheng Meteorological Office of Shandong, Xuecheng 277000
3 Shandong Meteorological Service, Jinan 250031

Abstract: A heavy rainstorm on 17 August 2007 in Shandong Province was studied on the mesoscale characters by the data of conventional and AWS observations, satellite, Doppler radar, lightning location instrument and WRF simulation. And the sensitivity experiment of numerical model was carried out to investigate the influence of topography. The results are as follows. The heavy rainstorm was caused by the K-H instability, wind shear and vortex. Meanwhile, terrain played an important role in the location and intensity of rainstorm, which brought more rainfall and made heavy rain located in the further south area. The numerical simulation comparison test was worked between the two similar rain processes. The result shows that there are more obviously consistences in many ways, including rainfall area, central intensity and distributions except the intensity of heavy rainfall. The terrain has a stronger effect to the heavy rainfall. The wind shear caused by terrain made stronger vapor convergence and vertical velocity. What's

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106006)、国家自然科学基金(41175044)、山东省超级计算科技专项项目精细化集合数值天气预报平台和山东省气象局重点课题(2010sdqx01、2010sdqzx04 和 2008sdqzx10)共同资助
2011 年 4 月 27 日收稿; 2012 年 4 月 18 日收修定稿
第一作者: 周雪松, 主要从事灾害性天气研究. Email: cedarzhou2005@163.com

more, the terrain also affected the distribution of cloud vapor and rain vapor. As a result, the favorable circulation and terrain are the important factors to produce the heavy rainstorm.

Key words: heavy rainstorm, T_{BB} , terrain effect, sensitivity experiment (SE), control experiment (CE)

引 言

暴雨是我国的主要灾害性天气之一,因其时空范围广、强度大,往往给社会经济和人民生命财产安全带来较大影响。近年来不少学者和科研人员对发生在我国各地的暴雨天气过程进行了天气学和动力学方面的研究,并取得大量研究成果^[1-12]。但暴雨落区的预报仍是难点,特别是副热带高压(以下简称为副高)边缘局地大暴雨,由于其局地性、突发性强,对其落区、强度和发生时间的预报难度较大,因而引起越来越多的气象工作者的关注,同时数值模拟的应用使暴雨研究取得很大进展^[13-16]。尹洁等^[17]、谢义明等^[18]、林毅等^[19]和毛冬艳等^[20]应用 MM5 分别对发生在长江流域的大暴雨过程进行了模拟研究,发现高低空急流、中尺度辐合线等天气尺度和中尺度系统在暴雨形成中发挥了重要作用。

预报业务实践发现,尽管天气系统的空间结构在很大程度上决定了天气发生的物理机制和强天气落区,但地形作用在局地暴雨发生过程中仍具有不可忽视的作用,一些研究也对暴雨中地形的影响作了分析^[21-25],认为地形对暴雨有明显的增幅作用。以上研究主要是复杂地形对暴雨影响研究,往往得到的是地形对暴雨影响的综合结果。山东地形比较特殊,地形起伏较大且较为孤立,在日常预报业务中,发现山东鲁中山脉往往造成山脉迎风坡降雨较长时间持续且强度较周围明显增强,表明地形对暴雨影响明显,而地形的敏感性试验能够使预报员充分理解地形在局地暴雨过程中的作用和机制,对形成清晰的暴雨预报思路有更大意义和价值。

本文分析研究中使用的资料主要包括:常规天气图、FY2-D 红外卫星云图、济南多普勒天气雷达、山东闪电定位资料、NCEP 再分析资料及 WRF 中尺度数值模式模拟结果等。文章主要针对 2007 年 8 月 17 日在山东省新泰市局地发生的大暴雨天气过程,在进行中尺度结构特征分析的基础上,通过敏感性试验,对此类暴雨中地形影响进行定量分析,并进一步探讨对暴雨产生影响的可能机制。

1 过程概述

2007 年 8 月 16—17 日,受副高边缘切变线影响,山东新泰附近发生一次局地大暴雨过程。本次降雨范围从鲁南一直延续到半岛北部,呈西南—东北的带状分布,位于降雨中心的新泰市 17 日 08:00 至 18 日 08:00(北京时,下同)降水量最大达 187 mm(见图 1a),而周边区域降水量迅速减小。由于强降雨持续时间长、降水量大、强降雨区域集中,此次大暴雨引起山洪爆发,造成新泰柴汶河河水暴涨,东周水库、金斗水库和光明水库等汛情危急,柴汶河东都河堤被冲垮,河水灌入地势低洼的西都沙井后溃入华源矿业公司三号井井下,造成华源煤矿发生溃水淹井事故,有 172 人被困井下,造成巨大的生命和财产损失。更详细地分析本次降水事件发现,本次大暴雨时空分布都不均匀,强降雨主要集中在 17 日 8:00—14:00,且此时降水具有很强的局地性,降水主要集中在新泰附近,最大 121 mm,而其他区域降雨量很小(见图 1b)。

在暴雨发生过程中,鲁南、鲁中等地区出现大范围闪电,呈西南—东北向带状分布(见图 1c),其中以新泰为中心的区域闪电最为密集,在整个天气过程中,山东省共出现闪电达 13612 次,其中以负闪为主,占 99.6%;从发生时间看,闪电主要发生在 17 日 05:00—10:00,此后闪电次数迅速降低(见图 1d),这表明本次天气过程是一次明显的对流性暴雨天气过程。

2 环流背景

本次大暴雨天气过程发生在经向环流背景下,欧亚区域中高纬度呈一槽一脊天气形势。16 日 08:00 欧亚地区 500 hPa 高度场上,乌拉尔山地区有一个深厚低槽,而在东亚地区中高纬度有一个强盛的阻塞高压存在,西太平洋副高主体呈块状分布,中心位于日本南部,脊线在 33°N 附近,588 dagpm 等高线已到山东半岛青岛—烟台一线(见图 2a)。此时,在中纬度的河套地区有短波槽东移,低槽后部

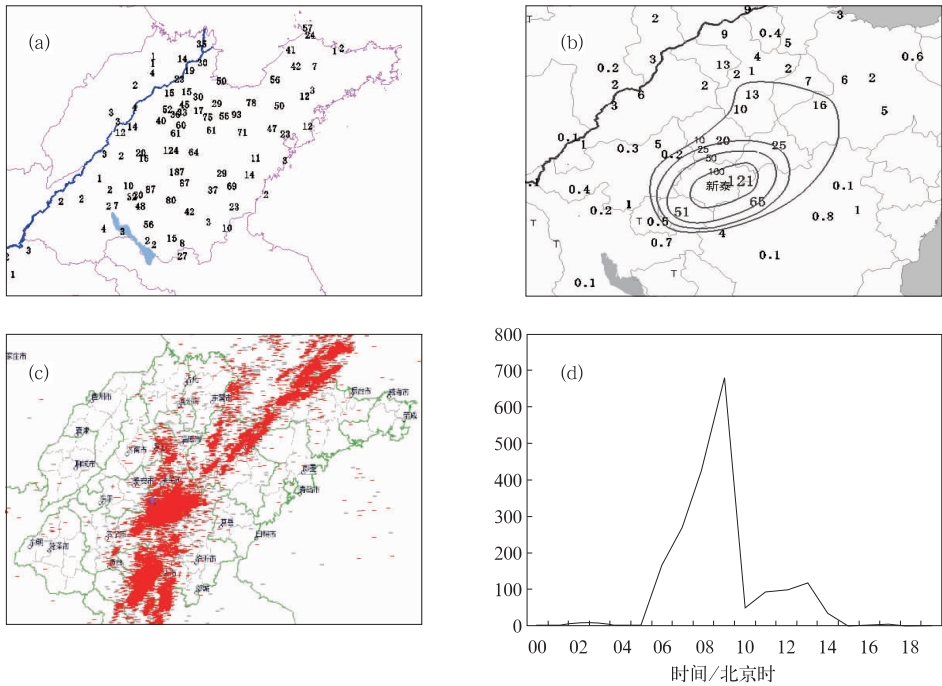


图 1 2007 年 8 月 17 日降水量实况及闪电分布
(a)17 日 08:00 至 18 日 08:00 降水量实况, (b)17 日 08:00—14:00 降水量实况(单位:mm),
(c)8 月 17 日闪电空间分布图, (d)8 月 17 日闪电数量随时间的变化

Fig.1 Distributions of rainfall and lightning for the 17 August 2007 rainstorm
(a) observed precipitation during 08:00 BT 17—08:00 BT 18, (b) observed precipitation during 08:00 BT 18—14:00 BT 18 (unit: mm), (c) lightning spatial distribution on August 17 and (d) variations of hourly lightning frequency on 17 August 2007

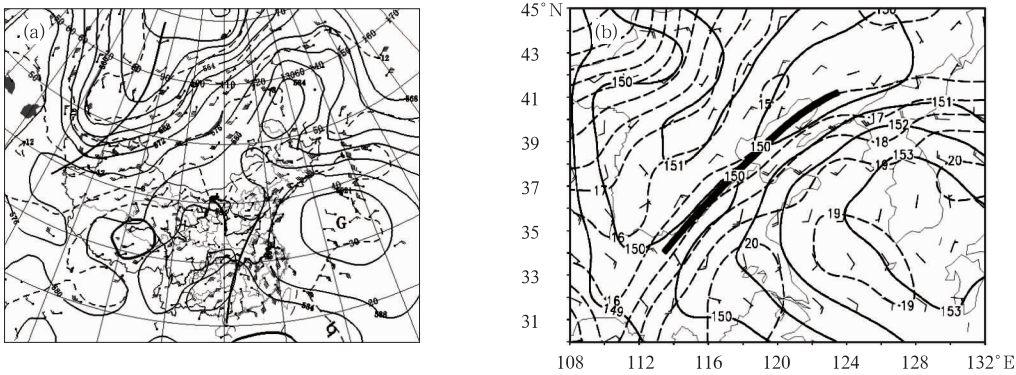


图 2 2007 年 8 月 16 日 08 时 500 hPa 形势场(a)和 17 日 08 时 850 hPa 形势场(b)
(实线为等高线,虚线为等温线,粗实线为切变线)

Fig.2 The 500 hPa synoptic chart at 08:00 BT 16 August 2007 (a) and 850 hPa synoptic chart at 08:00 BT 17 August 2007 (b)
(Solid line for geopotential height, dashed line for temperature, thick solid line for shear line)

有冷空气伴随,冷平流使低槽不断加深东移;副高边缘附近 700 hPa 存在强低空急流,急流中心风速达 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,急流横跨中低纬地区,使南海水汽源源不断向山东附近输送。

从 16—17 日环流形势演变来看,东亚北部阻塞

高压维持,低纬地区台风“圣帕”持续向西北方向移动,使副高一直西进北上。17 日 08:00,随着河套地区低槽东移和冷空气的南下,副高西进趋势有所减弱并停滞,588 dagpm 等高线位于山东中部沿黄河一线。由于副高的阻挡,700 hPa 低槽逐渐由南北

向转为西南—东北向,而在 850 hPa 副高西北边缘和西风带高压之间形成西南风和东北风之间明显的切变线(见图 2b)。同时,冷空气的侵入激发前期不稳定能量释放,沿切变线附近形成多个不稳定的对流性涡旋,触发对流性天气。由于副高稳定少动,其西北边缘偏南暖湿气流不断的水汽输送,造成了此次降水效率高、强降水时间集中的大暴雨过程。

3 中尺度结构分析

天气尺度系统下的中尺度系统是造成暴雨的直接原因。暴雨发生过程中,在对流层中低层副高西北侧存在并维持一条明显切变线。分析本次暴雨过程中的流场和涡度场,发现在 8 月 17 日 08:00,900 hPa 存在的由西南风和东北风构成的速度不连续的切变线特别明显,有对应的正涡度区配合(见图 3a),这一天气系统与实况降雨的分布非常一致。而在最大涡度区有明显风速、风向辐合,这一位置正是产生局地大暴雨的新泰附近。理论研究指出^[26],如果在一条速度不连续的切变线上涡度集中,则线

性气流的不稳定性(即在某处有最大的切变涡度)可能变得特别显著。这种不连续性相联系的不稳定性称为开尔文-赫姆霍茨不稳定(简称 K-H 不稳定),K-H 不稳定往往会引起线对流中出现小涡旋,造成大暴雨天气。

分析多普勒天气雷达,发现造成新泰局地大暴雨的回波是由多个不断从西南向东北移动的对流单体组成。图 3b 和图 3c 分别是 17 日 08:47 济南多普勒天气雷达 0.5°和 3.4°仰角径向速度图,可见在 0.5°仰角速度图上,在新泰偏南位置有正负速度配合的明显气旋性辐合区,直径约 20 km,该气旋式辐合区随时间向东北方向移动;而在 3.4°仰角速度图上,与之对应的为相反的正负速度配置,在高度约为 9 km 位置处是典型高空辐散区。这表明,在暴雨雨团中有中尺度气旋性涡旋结构的存在。

从卫星云图产品分析,降水主要是由不断在鲁南出现并向东北移动的中尺度雨团造成,其中造成本次局地大暴雨的暴雨云团最初出现在 17 日 06:00,开始时在苏鲁边界云团的西北侧生成一个新生对流云团,此时云顶亮温仅为-40℃。至 08:00

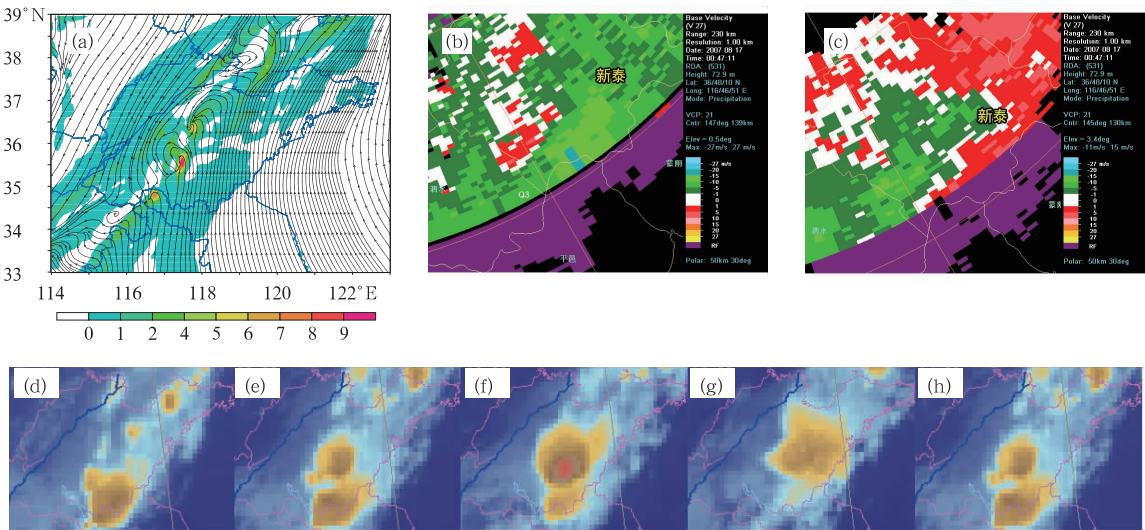


图 3 2007 年 8 月 17 日 900 hPa 流场、济南多普勒雷达产品及 FY-2D 卫星云图
(a)17 日 08 时 900 hPa 流场和涡度场(阴影为正涡度区),(b)17 日 08:47 济南雷达 0.5°仰角径向速度,
(c)17 日 08:47 济南雷达 3.4°仰角径向速度,(d)17 日 06:00 红外云图,(e)17 日 08:00 红外云图,
(f)17 日 10:00 红外云图,(g)17 日 12:00 红外云图,(h)17 日 14:00 红外云图

Fig. 3 The 900 hPa streamlines and vorticity, Jinan Doppler radar products and
FY-2D satellite cloud images on 17 August 2007

(a) 900 hPa streamlines and vorticity at 08:00 BT 17 (shaded area for positive vorticity),
(b) Jinan Radar: 0.5° radial velocity at 08:47 BT 17, (c) Jinan Radar: 3.4° radial velocity
at 08:47 BT 17, (d) IR image at 06:00 BT 17, (e) IR image at 08:00 BT 17, (f) IR image
at 10:00 BT 17, (g) IR image at 12:00 BT 17, and (h) IR image at 14:00 BT 17 August 2007

暴雨云团已经有很大的发展,云团直径为 90 km 左右,云顶亮温进一步降低,云顶亮温降低到 -50°C ,并且与原苏鲁边界雨团分离,形状近似呈圆形,此时对流天气迅速发展。10:00 云团进一步发展,范围更大,直径达 170 km,云顶亮温更低,达 -54°C ,且此时亮温低值中心位于暴雨中心的偏东位置。12:00 以后,云团范围迅速扩大,云顶亮温升高到 -49°C ,表明对流发展已经进入后期,此后降水逐渐结束(见图 3d~3h)。

4 数值试验及结果分析

4.1 敏感性试验

为分析鲁中山脉对此次暴雨的环流形势和物理量场分布等的影响,使用美国新一代中尺度数值模式 WRF(版本 3.1.1)对本次大暴雨天气过程进行了数值模拟和敏感性试验。数值试验共包括控制试验和敏感性试验两部分,其中控制试验中心区域在 36°N 、 106°E ,使鲁中处于模拟区域的中心位置,水

平方向采用单层网格,水平格点为 150×120 ,格距 10 km,模式垂直方向分为 27 层,模式顶气压为 50 hPa。模式初始场和侧边界条件使用 NCEP 再分析资料。初始时间为 2007 年 8 月 16 日 20:00,18 日 08:00 结束,积分步长为 60 s,结果为 1 h 输出一次。选取的参数化方案为:WSM 3 微物理方案、rrtm 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、Monin-Obukhov 近地面层方案、YSU 边界层方案以及 K-F 积云参数化方案。

敏感性试验采用与控制试验相同的区域和参数化方案,但将除半岛丘陵外的鲁中山区地形全部去除($33.0^{\circ}\sim 37.6^{\circ}\text{N}$ 、 $114.2^{\circ}\sim 118.8^{\circ}\text{E}$),即设置上述区域地形高度为 0 m,其他参数与控制试验相同(见图 4)。

同时,为了分析鲁中山脉地形对不同强度降水过程的影响程度,采用与控制试验和敏感性试验相同的设置,对 2007 年 8 月 16 日较弱的一次降水过程进行模拟和对比试验,模拟开始时间为 2007 年 8 月 15 日 20:00,17 日 08:00 结束,以便进一步定量研究鲁中山脉地形的作用。

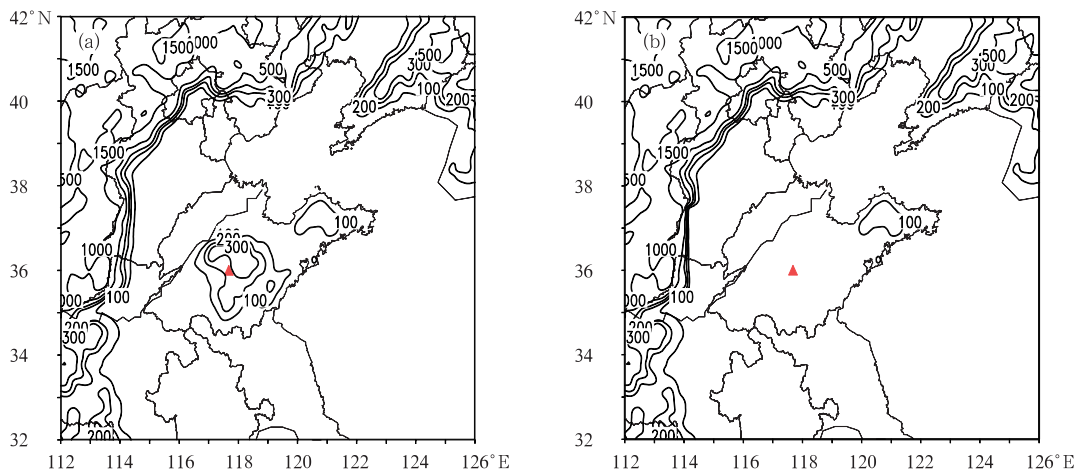


图4 控制实验模式地形(a)和敏感实验模式地形(b)(单位:m)

Fig. 4 The topographic maps for control experiment model (a) and sensitivity experimental model (b) (unit: m)

4.2 降水模拟结果对比

从控制试验模拟的降水来看,8月17日08:00至18日08:00降水区呈西南—东北带状分布,降水主要集中在鲁中和鲁西北部,模拟降水量超过 100 mm(见图 5a);而在强降水时段(17日08:00—14:00,见图 5b),降水最大区域位于新泰区域,降水量也超过 100 mm,而其他区域降水较小。以上结

果表明,模拟结果与实况较为一致,WRF能够很好地重现本次副高边缘大暴雨天气过程。

在敏感试验中,对整个暴雨过程来说,位于 $114^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 范围内的雨带依然呈西南—东北走向,与控制试验相比十分一致;但去除地形影响后,暴雨中心过程降水量明显减少,最大降水量仅有 80 mm,且强降水中心明显偏移到东北方向约 50 km 处(见图 5e);分析还可以发现地形对于鲁西南区域(系统

上游)的降水影响不大,但位于系统下游的莱州湾和半岛北部地区降水量明显增大。特别是在暴雨主要发生时段(17 日 08:00—14:00),在敏感试验中,模拟降水中心降水量与控制试验相比较强度减少 20 mm,位置也偏向东北 50 km,且降雨区形状更为狭

长(见图 5f)。从控制试验和敏感试验模拟的逐小时降水量变化曲线(见图 5g)可以看出,降水均主要发生在 8 月 17 日上午,但是,有地形的控制试验中,降水强度更强,且降水峰值时间相对于敏感试验更为提前,而降水较弱时山脉地形对降水影响不大。

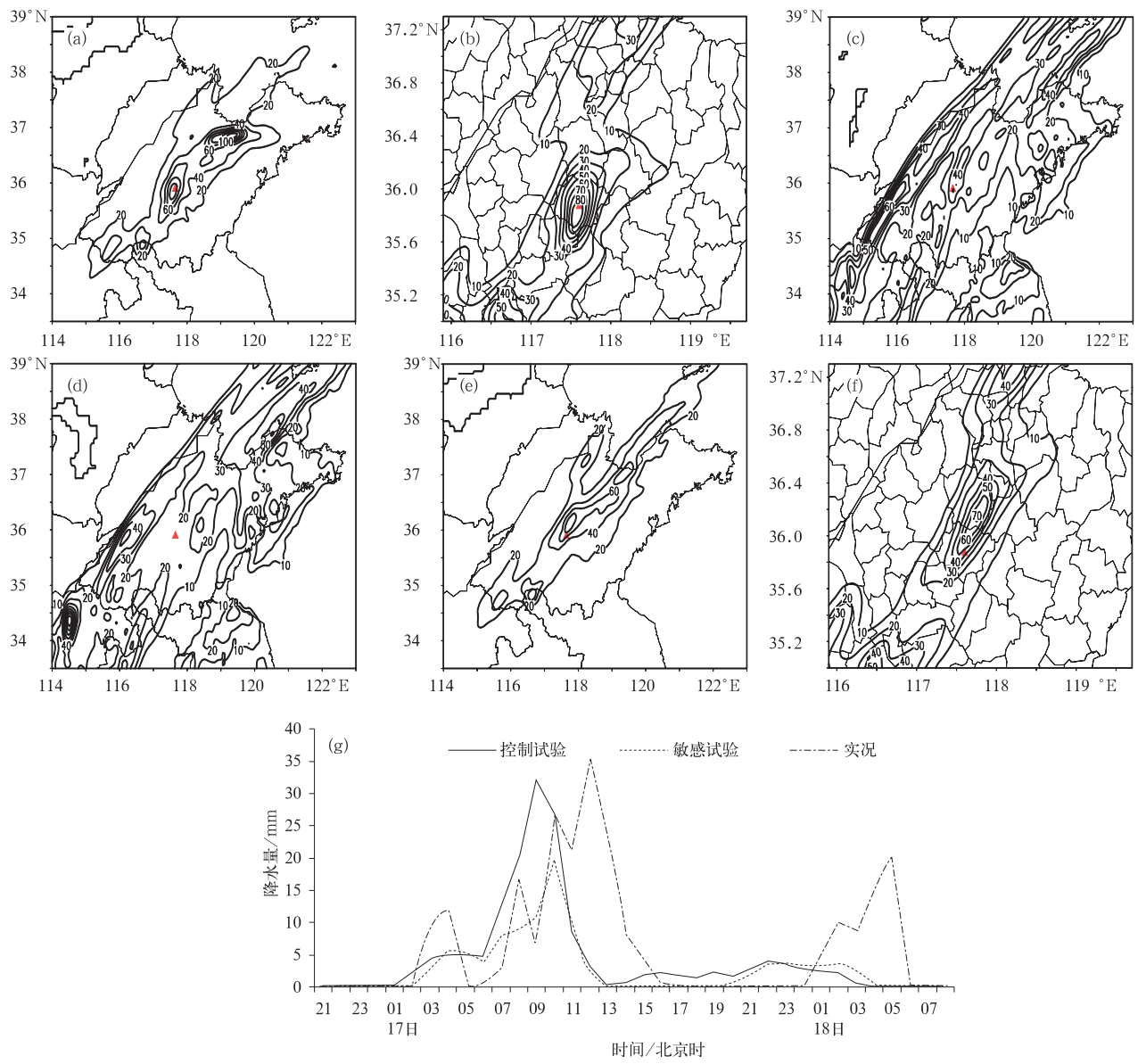


图 5 控制试验及敏感性试验降水量(单位:mm)

(a)控制试验 8 月 18 日 08:00 前 24 小时降水,(b)控制试验 8 月 17 日 14:00 前 6 小时降水,
(c)控制试验 8 月 17 日 08:00 前 24 小时降水,(d)敏感试验 8 月 17 日 08:00 前 24 小时降水,
(e)敏感性试验 8 月 18 日 08:00 前 24 小时降水,(f)敏感性试验 8 月 17 日 14:00 前 6 小时降水,
(g)17—18 日数值模拟暴雨中心逐小时降水量对比

Fig. 5 Precipitation amounts for control experiment (CE) and sensitivity experiment (SE) (unit: mm)
(a) 24 h precipitation of CE before 08:00 BT August 18, (b) 6 h precipitation of CE before 14:00 BT August 17, (c) 24 h precipitation of CE before 08:00 BT August 17, (d) 24 h precipitation of SE before 08:00 BT August 17, (e) 24 h precipitation of SE before 08:00 BT August 18, (f) 6 h precipitation of SE before 14:00 BT August 17, (g) numerical simulation of hourly rainfall at rainstorm center during 01:00 BT 17—05:00 BT 18 August 2007

对比以上试验结果表明,鲁中山脉地形对副高边缘降雨有很大影响,主要表现在三个方面:降水分布、中心强度和中心落区,鲁中山脉地形能够使降水区范围扩大,降水中心雨强加强,强降水中心向系统上游偏移,而且使下游区域降雨减弱;而这些影响在强降雨发生时更加明显。

同时,对降水强度较弱的 2007 年 8 月 16 日降水过程进行模拟和敏感性试验。发现,鲁中山脉地形对降水分布、中心强度和中心落区等同样存在前面所述的影响,但是在程度上较弱,特别是新泰附近地形造成的降雨增幅仅为 10 mm 左右,与 17 日强降水过程中地形对降雨的增幅 30 mm 明显减弱,仅为其三分之一。

5 大暴雨的诊断分析

5.1 动力场分析

为研究山脉地形对动力场的影响,我们分析了 900 hPa 水平流场和垂直上升速度的分布,以此讨论地形对低层流场的影响。地形对气流的动力作用主要取决于气流对地形的爬升和绕流。从高空图分析可见,在 17 日 08:00,850 hPa 鲁南到鲁北沿黄河一线存在一条明显的切变线,在其东南暖湿空气一侧,存在一个风向切变和辐合区。数值模式模拟和敏感性试验高分辨率结果显示,无地形影响时,在

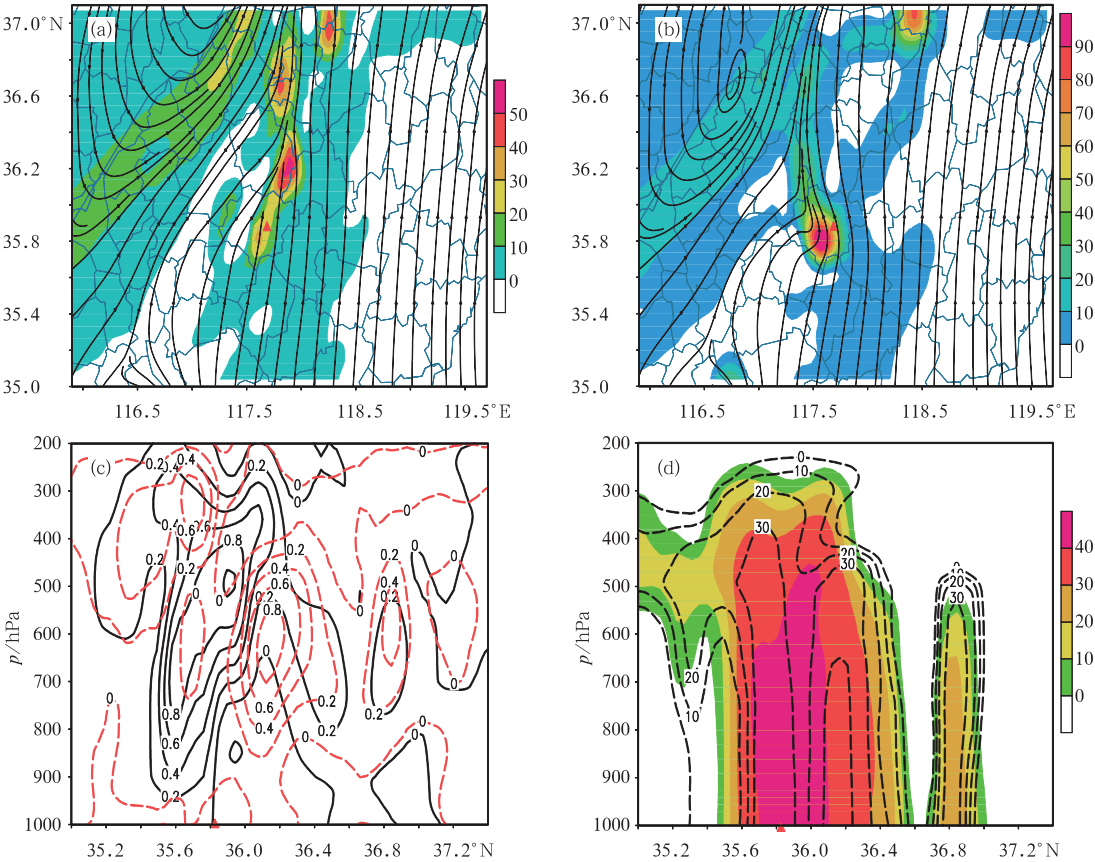


图 6 2007 年 8 月 17 日 08 时 850 hPa 流场、过 117.5°E 垂直速度剖面及模拟雷达回波强度
(a)敏感性试验流场和涡度场(单位: $10^{-5} s^{-1}$), (b)控制试验流场和涡度场(单位: $10^{-5} s^{-1}$),
(c)沿 117.5°E 垂直速度剖面(实线为控制试验,虚线为敏感性试验,单位: $m \cdot s^{-1}$),
(d)反射率因子剖面(阴影为控制试验,虚线为敏感性试验,单位:dBz)

Fig. 6 The 850 hPa streamlines, vertical velocity profile and the simulated radar echo intensity through 117.5°E at 08:00 BT August 17, 2007

- (a) stream and vorticity for SE (unit: $10^{-5} s^{-1}$), (b) stream and vorticity for CE (unit: $10^{-5} s^{-1}$),
- (c) vertical velocity profile through 117.5°E (solid line for CE, dashed line for SE, unit: $m \cdot s^{-1}$),
- (d) radar reflectivity profile (shadow for CE, dashed line for the SE, unit: dBz)

850 hPa 北部区域存在弱的风向切变区(图 6a);而在地形存在情况下,新泰中南部附近气旋性切变明显增强(图 6b),形成一条东南—西北向的中尺度切变线,同时有明显的正涡度高值区与其对应。可见该中尺度切变线的形成与地形关系密切,地形对暴雨过程的动力场有较直接的影响,主要表现在地形的绕流作用使风场切变加强,同时使其位置更趋近于上游方向,使迎风坡降水明显加强。

分析 17 日 08:00 沿 117.5°E 垂直速度剖面(图 6c),表明山脉地形除了对水平气流有较大的影响外,同时也使得垂直速度场有明显的改变。在地形存在情况下,对流发展旺盛,08:00 垂直速度已超过 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且发展高度更高,最大速度中心在 500 hPa;同时,上升速度大值区随高度向北倾斜,这可能与暴雨发展中的对称不稳定有关。而无地形影响时,垂直上升运动相对减弱,最大速度中心高度仅到 600 hPa,且最大值为 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见,在迎风坡附近,随着低层辐合、高层辐散的加强,能明显促使迎风坡附近垂直上升气流的发展,且垂直上升气流位置更偏南,这与水平气流受迎风坡阻挡发生风场辐合的位置相对应。

这也可以从模拟的雷达回波强度剖面图(见图 6d)上得到印证,地形影响主要表现在造成回波强度增大,控制试验中回波强度达 40 dBz,而无地形影响时仅为 30 dBz,但对回波总体形状影响不大。由于低空暖湿急流的影响,降水呈现出低回波强度、高降水效率的热带型降水特征,在地形作用下,更易产生局地大暴雨。

5.2 水汽分析

5.2.1 水汽通量和水汽通量散度

水汽的持续输送和辐合是形成大暴雨的必要条件。在控制试验和敏感性试验中均可以找到较明显的水汽输送通道。从无地形的敏感性试验 900 hPa 水汽通量场(见图 7a)看,暴雨发生期间,在 117°~119°E 之间存在西南—东北向的水汽通量大值区,最大值位于鲁中山区北部,水汽通量相对比较均匀,水汽通量辐合区范围较小,强度较弱,水汽通量散度最大仅为 $-4 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而在控制试验中(见图 7b),900 hPa 水汽通道虽然存在,但是分裂为两个中心,其中,鲁中山区北部的中心强度明显降低,表明向北的水汽输送减弱。而在新泰附近出现一个明显的水汽通量中心,在其左前方有强

的水汽通量辐合中心配合,水汽通量散度中心值达 $-10 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,这一个水汽辐合中心与地形关系密切。由此可见,地形对暴雨过程中的水汽通量分布影响较大,特别是影响水汽通量大值区的分布,这导致水汽通量辐合中心的重新分布,对暴雨落区产生直接影响。

5.2.2 比湿分布

在此次大暴雨过程前期,“圣帕”台风已经发展加强,在副高西北边缘对流层中低层存在宽广的低空急流,形成明显的水汽输送通道。分析可知,本次大暴雨过程水汽主要来自于副高边缘偏南急流,南方暖湿空气在偏南风的承载下向山东半岛输送,造成对流层中深厚的湿区。

暴雨区在 900 hPa 高度上比湿的分布可以反映暴雨发生时对流层低层水汽的水平分布特征。从图 7c 分析可见,水汽大值区主要沿鲁西南至鲁中一线分布,比湿最大达 $17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,当去除地形后,分析敏感性试验,结果发现比湿的水平分布与存在地形时差别不大。而沿 117.5°E 比湿剖面图上同样可以看到水汽大值区主要分布在 34.5°~37.5°N,且主要分布在对流层低层(见图 7d),控制试验的比湿大值区面积超过 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的面积明显较敏感性试验大,这说明地形的存在更有利于水汽的积累。同时也表明,山脉地形对本次暴雨过程水汽水平分布影响较小,而对水汽通量和水汽通量散度的影响较大,而水汽通量及水汽通量散度的差异主要是由于地形造成的风场辐合辐散造成的,水汽分布差异对其贡献较小。

5.3 热力场分析

温度场和湿度场的水平和垂直分布的变化必将导致能量场和大气稳定度发生变化。图 8 分别给出了假相当位温(用 θ_{sc} 表示)的垂直分布和时间演变图,以此来分析暴雨发生期间及发生前后能量和不稳定层结发展情况及地形对其的影响。理论研究可知,如果 $\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial z} < 0$,即表明大气具有对流不稳定性。

在本次过程中,从 θ_{sc} 随时间的演变图(见图 8a)可以看出,暴雨开始前对流不稳定性较弱,17 日 02:00 以后,由于低层暖湿平流输送和中高层冷空气南侵,大气对流不稳定性迅速增强,03:00—13:00,在对流层低层 850 hPa 高度以下存在大面积的 θ_{sc} 大值区,最大值达 350 K;在 09:00 前后,348 K 假相当位温

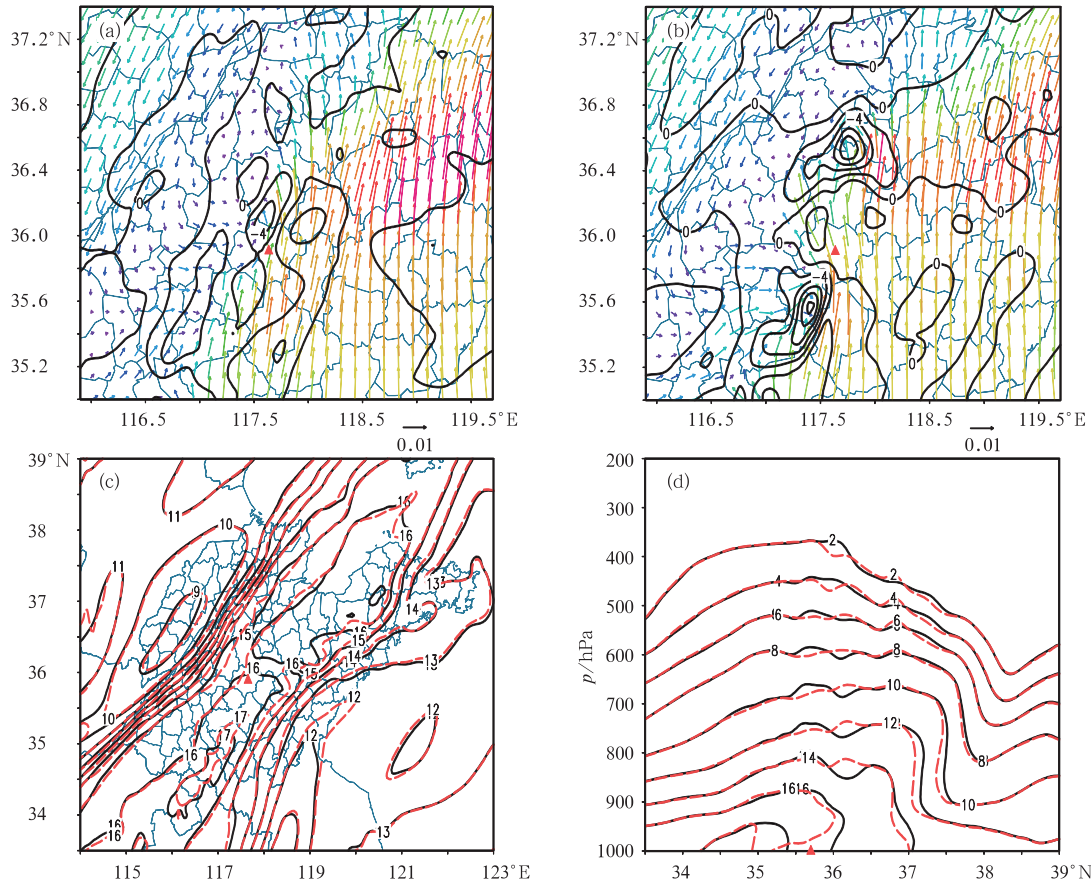


图 7 2007 年 8 月 17 日 08 时 900 hPa 水汽通量、水汽通量散度及比湿分布
(a)敏感性试验中水汽通量和水汽通量散度(单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (b)控制试验中水汽通量和水汽通量散度(单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (c)900 hPa 比湿水平分布(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d)沿 117.5°E 比湿剖面(实线为控制试验,虚线为敏感性试验,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 7 Distributions of 900 hPa moisture flux, moisture flux divergence and specific humidity at 08:00 BT August 17, 2007

(a) water vapor flux and moisture flux divergence of SE (unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) water vapor flux and moisture flux divergence of CE (unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), (c) 900 hPa horizontal distribution of specific humidity (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d) specific humidity profile along 117.5°E (solid line for CE, dashed line for SE, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

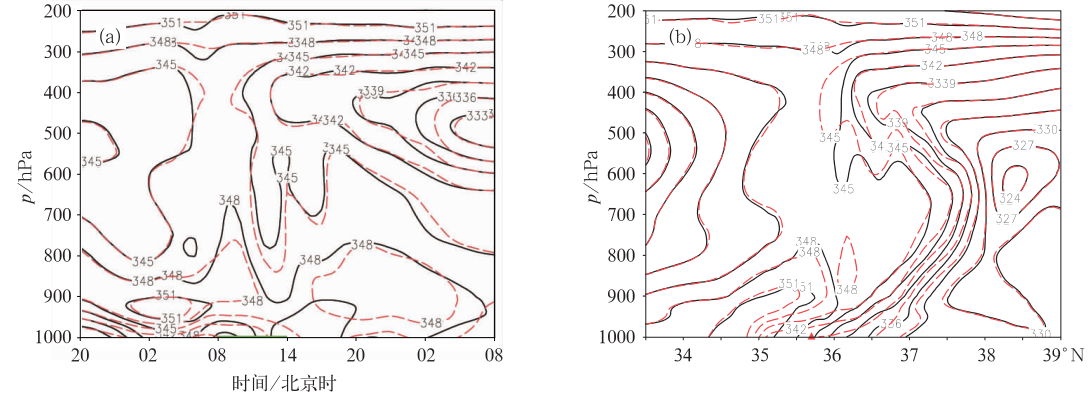


图 8 假相当位温及时间变化

(a)新泰附近 2007 年 8 月 16 日 20 时至 18 日 08 时假相当位温时间变化图, (b)8 月 17 日 08 时沿 117.5°E 假相当位温剖面 (实线为控制试验,虚线为敏感性试验,单位:K)

Fig. 8 The temporal variation of pseudo-equivalent potential temperature near Xintai Station during 20:00 BT 16 August to 08:00 BT 18 August 2007 (a) and its profile along 117.5°E at 08:00 BT 17 August 2007 (b) (Solid line for CE, dashed line for SE, unit: K)

线达到 700 hPa 高度以上,表明对流不稳定层结相当深厚;与对流层中层 θ_{sc} 低值区相对应,使大气处于强的对流不稳定状态,此时对流有效位能(CAPE)也迅速增大,最大达 $1400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在敏感性试验中,对流不稳定的建立和维持时间与控制试验基本一致,而对流不稳定的强度略弱。以上分析表明,地形可以加强大气对流不稳定性的强度,但是对其发生发展时间影响较小。

从沿 117.5°E 的假相当位温经向剖面分布分析(见图 8b),地形对暴雨影响表现在对流不稳定强度上。同时,在经向方向上,由于地形的作用,使不稳定能量区南移,而在山脉的下游 348 K 的 θ_{sc} 大值区消失。表明山脉地形对不稳定能量位置影响更加明显。

5.4 云物理分析

暴雨过程中云体和降水的形成与发生,需具备两个重要的条件,即较强的水汽辐合和较大的垂直上升运动。图 9a 给出了 17 日 08:00 控制试验和敏感性试验中沿 117.5°E 的水凝物中云水含量的南北向垂直分布。总的来看,山脉地形能较明显改变垂直流场的大小和分布,这对云的垂直和水平发展影响都很大,尤其是云的水平位置。从图 9a 中可以看出,在控制试验中,由于山脉地形的作用,气流在地形迎风坡时出现明显的爬升运动,这也有利于云

的形成发展,此时云水含量为 $1 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高度达到约 200 hPa,中心在 35.8°N 附近。而无地形影响时,上升速度中心明显北移,到达 36.2°N 附近,相应的云高也明显偏低,云水含量为 $1 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的等值线仅到 500 hPa。同时还可以发现,在位于远离山脉地形的 36.9°N 附近云水含量与控制试验基本一致,这表明地形对云的影响较为局地,主要对山脉迎风坡云影响较大,而对于远离山脉地形的区域影响较小。

山脉地形对水凝物中雨水的影响较云水更为明显,这主要表现在两个试验中对雨水含量中心的强度差别上。从图 9b 所显示的 17 日 08:00 沿 117.5°E 的雨水含量分布图上分析可知,控制试验中主要有两个雨水含量大值区,中心数值分别达 21×10^{-1} 和 $32 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,中心高度达 450 hPa。而去除地形后,雨水含量尽管还保持两个大值区,但是中心值明显减弱,仅为 12×10^{-1} 和 $9 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但是,雨水含量的大值区的高度和水平位置差异较小。

以上分析表明,山脉地形能明显改变垂直流场的大小和分布,这对云的垂直和水平发展影响都很大,特别是对云的水平分布;进一步分析认为,山脉地形会促进对流云中雨水含量的剧烈增加,对于局地暴雨降水强度影响很大。

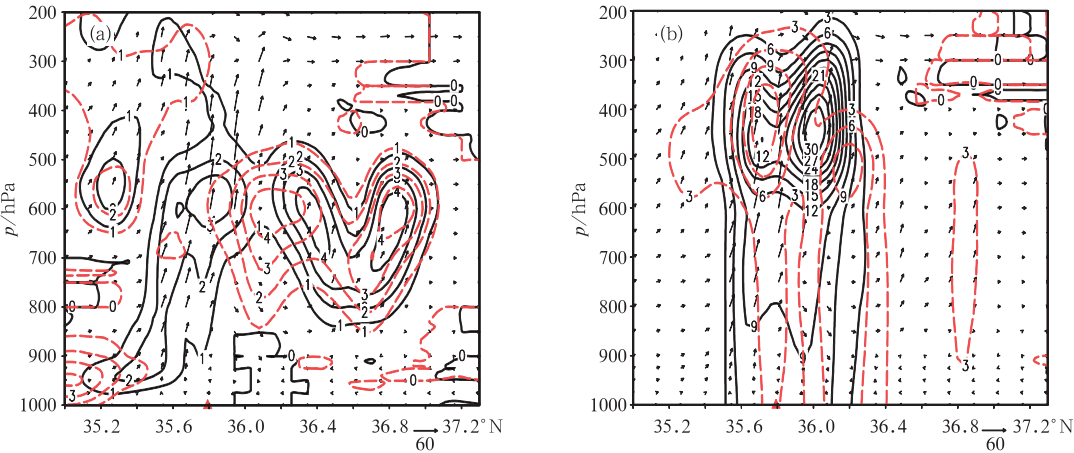


图 9 2007 年 8 月 17 日 08 时沿 117.5°E 云水(a)和雨水(b)混合比剖面
(实线为控制试验,虚线为敏感性试验,单位: $10^{-1} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Fig. 9 The mixing ratio profiles of cloud water and rain water
(a) cloud water mixing ratio profile along 117.5°E at 08:00 BT 17 August 2007,
(b) rain water mixing ratio profile along 117.5°E at 08:00 BT 17 August 2007
(Solid line for CE, dashed line for SE, unit: $10^{-1} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

6 小 结

通过此次副高边缘局地大暴雨过程进行数值模拟和敏感性试验,针对中尺度结构特征、地形对暴雨影响,从动力、热力、水汽和云物理等方面进行深入分析研究。得到以下主要结果:

(1) 本次局地大暴雨是发生在对流层低层风场强的切变区,与 K-H 不稳定和中小尺度涡旋有密切联系。鲁中山脉地形对大暴雨落区、中心强度和位置等影响较大,能够显著加强降水强度,并使降水中心趋于偏南。

(2) 鲁中山脉地形对不同降雨强度的过程影响程度有明显差异,对强降雨增幅的影响更强,而对弱降水影响相应较弱。

(3) 地形增强对流层低层风场切变和辐合,使最大上升速度中心向上风方偏移,强度增大,这有利于局地大暴雨的发生和发展。

(4) 地形对副高边缘大暴雨不稳定能量积累的开始和结束时间影响不大,但可以明显增加不稳定能量的强度,使对流不稳定性明显增强,进而促使对流性暴雨发生发展。

(5) 地形对暴雨天气过程水汽分布影响较小,但对水汽通量及水汽通量散度影响较大,而且主要是通过改变风场散度影响水汽的辐合辐散。同时,地形对空气中的云水影响较为局地,而对雨水含量影响较大,主要表现在可以明显增强雨水含量,有利于暴雨产生。

参考文献

[1] 王晓芳,黄华丽,黄治勇. 2010 年 5—6 月南方持续性暴雨的成因分析[J]. 气象,2011,37(10):1206-1215.

[2] 赵德显,郁红弟,沈桐立. GPS 折射率资料在梅雨锋暴雨数值模拟中的应用[J]. 气象,2011,37(12):1511-1518.

[3] 王令,王国荣,孙秀忠,等. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水[J]. 气象,2012,38(3):281-290.

[4] 张小玲,陶诗言,张庆云,等. 1998 年 7 月 20—21 日武汉地区梅雨锋上突发性中- β 系统的发生发展分析[J]. 应用气象学报,2002,13(4):385-397.

[5] 倪允琪,周秀骥. 中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法研究[J]. 气象学报,2004,62(5):647-662.

[6] 张端禹,张兵,钟敏. 对 2005 年 9 月初鄂东一次连续大暴雨的诊断分析[J]. 暴雨灾害,2007,26(1):52-56.

[7] 宋春远,熊传辉,陈亮,等. 2005 年 7 月清江流域一次连续暴雨的中尺度分析[J]. 暴雨灾害,2007,26(1):63-67.

[8] 高守亭,赵思雄,周晓平,等. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展[J]. 大气科学,2003,27(4):618-627.

[9] 李世刚,梁涛,彭盼盼,等. “07.5”湖北大暴雨的中尺度系统及降水成因分析[J]. 暴雨灾害,2007,26(3):230-235.

[10] 侯瑞钦,景华,张迎新,等. “05.7.23”河北暴雨中尺度分析. 气象,2006,32(7):88-94.

[11] 陈双,王迎春,张文龙,陈明轩. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J]. 气象,2011,37(7):802-813.

[12] 张家国,岳阳,李淑贞,邵木兰. 一次长历时特大暴雨多普勒雷达中尺度分析[J]. 气象,2010,36(4):21-26.

[13] 东高红,何群英,刘一玮,等. 海风锋在渤海西岸局地暴雨过程中的作用[J]. 气象,2011,37(9):1100-1107.

[14] 尹洁,郑婧,张瑛,等. 一次梅雨锋特大暴雨过程分析及数值模拟[J]. 气象,2011,37(7):827-837.

[15] 何群英,解以扬,东高红,等. 海陆风环流在天津 2009 年 9 月 26 日局地暴雨过程中的作用[J]. 气象,2011,37(3):291-297.

[16] 东高红,解以扬,于莉莉. 一次局地大暴雨的落区分析与预报[J]. 气象,2010,36(6):50-58.

[17] 尹洁,郑婧,张瑛,吴琼. 一次梅雨锋特大暴雨过程分析及数值模拟[J]. 气象,2011,37(7):827-837.

[18] 谢义明,周国华,徐双柱,等. 长江下游一次大暴雨的中尺度模拟分析[J]. 气象,2005,31(11):55-60.

[19] 林毅,刘铭,刘爱鸣. 高低空急流在闽西北大暴雨过程中的作用及数值模拟[J]. 气象科学,2006,26(4):449-455.

[20] 毛冬艳,乔林,陈涛,等. 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨数值模拟分析[J]. 2008,34(2):25-32.

[21] 矫梅燕,毕宝贵. 夏季北京地区强地形雨中尺度结构分析[J]. 气象,2005,31(6):9-14.

[22] 崔春光,房春花,胡伯威,等. 地形对低涡大暴雨影响的数值模拟试验[J]. 气象,2000,26(8):14-18.

[23] 陈潜,赵鸣. 地形对降水影响的数值试验[J]. 气象科学,2006,26(5):484-493.

[24] 臧增亮,张铭,沈洪卫,等. 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,2004,24(1):27-34.

[25] 冯强,叶汝杰,王昂生,等. 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,2004,25(4):1-4.

[26] 寿绍文. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社,2003:165-169.