

井宇,徐娟娟,杜莉丽,等. 地形重力波拖曳参数化方案在一次陕西极端性暴雨天气过程中的应用[J]. 陕西气象,2019(5):16-22.

文章编号:1006-4354(2019)05-16-07

地形重力波拖曳参数化方案在一次陕西极端性暴雨天气过程中的应用

井宇,徐娟娟,杜莉丽,王建鹏

(陕西省气象台,西安 710014)

摘要:利用中尺度 WRF 模式进行敏感性试验,分析探讨加入地形重力波拖曳参数化方案(GW-DO)后对 2013 年陕西入夏以来最强的一次暴雨过程的模拟能力和地形影响下强降水的形成机制。本次过程是在高空槽和低涡配合的有利形势下形成的,秦巴山区的地形作用对本次暴雨过程有着重要影响。在引入地形重力波参数化方案后,模式对关中大暴雨中心的模拟能力有所提高,强降水落区及量级与实况更为接近,较为有效地改善了环流形势及主要影响系统的模拟。在引入地形重力波参数化方案后,这一地区环流进行调整,有利的水汽条件和对流不稳定配合强烈的上升运动,是影响关中地区强降水的重要因素。该参数化方案对陕西暴雨预报具有一定的适用性,但是对陕南的暴雨区模拟还具有较大的误差,需要进一步改进。

关键词:地形重力波;拖曳参数;极端性暴雨;地形影响

中图分类号:P435

文献标识码:A

山地通过动力、热力作用使相应空气层中的天气系统和大气环流发生改变,从而引发局地降水和云系的变化^[1],因为山脉迫使气流上升,通过一些机制触发云雨形成^[2]。研究表明,地形的作用是产生强降水的重要原因之一^[3-5]。几十年来,人们一直在研究地形降水系统,以了解它们的形

成机制^[6]。赵玉春等^[7]利用多种观测资料和 NCEP 再分析资料,对 2007 年皖南一次特大暴雨过程中尺度对流系统(MCSs)进行敏感性试验分析后得出,在不同 Fw 数下,地形绕流和山脉波下游的 MCSs 活动具有不同的影响机制,地形有利于 MCSs 的形成和维持,其阻滞效应有利于皖南

收稿日期:2019-04-10

作者简介:井宇(1985—),女,陕西米脂人,硕士,工程师,从事短时天气预报。

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-074)资助;陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM6067)

参考文献:

- [1] 刘勇,王楠,刘黎平. 陕西二次阵风锋的多普勒雷达和自动气象站资料分析[J]. 高原气象,2007,26(2):380-387.
- [2] 张健宏. 一次阵风锋的观测实例和分析[J]. 陕西气象,2009(2):4-8.
- [3] 毕旭,刘慧敏,赵榆飞. 陕北系列阵风锋天气过程分析[J]. 陕西气象,2008(2):23-26.
- [4] 毕旭,刘勇,李强. 一次阵风锋触发的局地强冰雹天气过程分析[J]. 陕西气象,2011(1):11-14.
- [5] 郑永光,陶祖钰,俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象,2017,43(6):641-652.
- [6] 武麦凤,吉庆,武维刚. 一次槽前“干”对流背景下阵风锋天气过程分析[J]. 高原气象,2017,36(3):845-851.
- [7] 庞翻,蔡英,李建芳,等. 宝鸡一次阵风锋天气过程分析[J]. 陕西气象,2013(3):11-15.

特大暴雨的形成。崔春光等^[8]用一个高分辨的 η 坐标模式对1998年7月21日鄂东沿江特大暴雨过程进行数值敏感性试验发现,大别山对边界层南风暖湿气流的阻挡使位于其迎风面上游的暴雨带有所加强,幕阜山对边界层水汽流入的拦截则使位于其背风面下游的暴雨带的初期发展减缓。由于强对流暴雨系统盛期近地层气流转为辐散,使辐合层升高,地形抬高的摩擦辐合恰好叠加其上使之增强,可能是此次鄂东沿江特大暴雨过程持续时间长的一个重要原因。

目前,数值模式已成为大气科学研究和天气预报中极其重要的工具之一。在模式中,对地形描述的准确与否直接决定对降水的模拟和预报准确率,模式中地形重力波拖曳参数化方案就是地形对大气环流影响中的一种,也是最重要的边界层参数化方案之一。重力波在条件不稳定大气中是暴雨的触发机制之一^[9]。引进次网格地形重力波拖曳参数化方案后,在大地形存在的区域,风场会发生变化,大气流场的分布改变,使预报的流场更接近于大气真实状态,从而提高了降水预报的准确率^[10]。钟水新等^[11]在GRAPES_TMM模式中引入KA95(Kim and Arakawa,1995)地形重力波拖曳参数化方案^[12](GWDO)后发现,模式对台风登陆时路径和强度的预报能力均有提高,台风预报时长越长,GWDO的影响也更为显著,其结果可为业务预报提供指导意义。刘雷等^[13]在WRF模式中考虑了GWDO参数化方案后,较好地模拟了广东阳江地区强降水的落区及强度,再现了过程中大尺度环流形势及其演变状况,成功地复制了中尺度低涡的位置及移向,而未考虑此方案的控制试验没能模拟出此次暴雨,其在中心位置和降水强度方面都与实况差别较大。

陕西省位于青藏高原东侧,呈南北向狭长分布,中部受秦岭山脉阻挡,南部受大巴山脉影响,形成了关中平原、陕南盆地的多样地形特征,波状起伏的复杂地形对陕西的天气、气候乃至西北地区东部的大气环流产生显著影响。关于地形对陕西强降水的影响,专家学者已积累了一些研究成果^[14-15],对地形重力波与陕西降水关系的理论研究也有了一些进展^[16],但模式中加入重力波拖曳

参数化方案后,对陕西降水,尤其是大降水的预报模拟能力的研究还较为少见,特别是在如何分析和应用方面还很不足。

2013年5月23日至26日,陕西省出现了当年入夏以来最强的一次大范围降水天气过程,这也是当年陕西省出现的第一场区域性暴雨。该次过程出现时间之早、范围之大、强度之强为历史少见,仅25日全省就出现了22站暴雨,2站大暴雨,最大降水中心位于关中南部的武功、周至附近,武功单站24小时降水量达到123.9 mm。西安、周至、眉县、镇安等14站均突破1961年以来5月日降水量极值。本文以此次极端暴雨过程为例,利用中尺度WRF模式进行敏感性试验,来验证重力波拖曳参数化方案对陕西强降水过程的模拟效果,分析探讨加入地形重力波参数化方案后,地形在本次暴雨过程中的作用,在此基础上,针对加入地形重力波参数化方案后的模式相关输出物理量,提出应用方案,来改进预报效果。

1 天气背景

本次暴雨过程发生前期,500 hPa上东亚中高纬西风气流较为平直,不断有小波动生成东移,高原上不断有低值系统生成消失,气流处于不断的波动阶段。24日20时500 hPa上在青藏高原中部地区形成高原槽,并伴有低涡开始形成并不断东移。25日08时高原槽明显东移加深,陕西位于槽前西南气流中,低涡明显加强,其中心位于四川东北部与陕南交界处。低涡中低层受到四川盆地地形阻挡,移动缓慢,700 hPa低涡右侧沿重庆一线形成最大风速达18 m/s的低空急流轴,水汽输送增强,850 hPa上陕南地区出现 $-20 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 的水汽辐合中心,并在急流轴左前侧500 hPa上形成 $-60 \times 10^{-3} \text{ hPa/s}$ 的最大上升运动中心(图略),在强的水汽辐合与强的上升运动的有利配置下,强降水开始,随后系统不断增强并向东北方向移动,25日白天在关中南部和陕南东部形成区域性暴雨天气,这也是本次过程的降雨最强时段。25日20时500 hPa槽线移至陕西东部地区,700 hPa低涡中心东移北抬至陕西东南部,低空急流轴维持并东移,同时水汽辐合大值区和强上升运动中心也随之东移至重庆

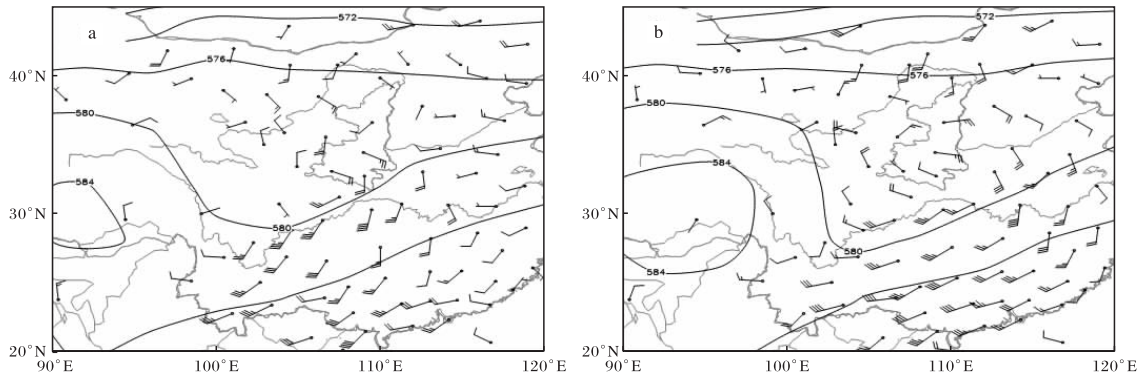


图1 2013-05-25 500 hPa高度场(单位为 dagpm)与700 hPa风场综合图(a 08时;b 20时)

北部地区,影响系统主体大部已移出陕西,受影响的关中东部和陕南东部在25日夜间形成强降水,但强度较白天偏弱。26日08时槽线与低涡移出陕西,降水结束。此外,本次过程中,500 hPa槽线位于700 hPa和850 hPa低涡切变西侧,热力不稳定条件不明显,不稳定能量较盛夏明显偏弱,主要以持续性稳定性降水为主,小时降水量都在20 mm以下。这次暴雨过程在高空槽和低涡的有利配合下形成,影响系统在青藏高原中部生成后,东移北抬的过程中依次翻越巴山、秦岭等高大山脉,地形对本次暴雨过程的影响不可忽视。

2 数值模式和试验方案

2.1 地形重力波参数化方案

由地形激发出的重力波波动能把相当大的水平动量传输到波动被吸收或耗散的区域,这种波动通量的耗散就称为地形重力波拖曳力^[13]。由于地形重力波波长太小,在一般的模式中很难进行合理的数学处理,所以只能采用参数化方案来代表由于地形引起的重力波在垂直方向的传播,以及其对天气系统的影响。现在许多数值模式中都是通过一个参数化的方案来代表地形引起的重力波的传播,以及重力波传播对天气系统的作用。目前WRF模式采用由Kim和Arakawa发展的地形重力波参数化方案(GWDO)^[17],此方案中综合考虑了由于对流层低层的波动通量崩溃所引起拖曳力的增强效应,从而弥补了以前参数化方案中的缺陷。

2.2 试验方案设计

本文数值模拟试验所用的模式是由美国环境预测中心(NCEP),美国国家大气研究中心

(NCAR)等美国科研机构中心共同开发的非静力中尺度模式WRF(Version 3.3版本)。使用6 h间隔水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ FNL再分析资料作为模式初始场。为了使模拟结果更接近实况,同时利用WRF-DA(Version 3.3)三维变分同化系统,对常规探空观测资料、陕西省逐小时地面自动站常规要素观测资料,以及宝鸡、西安、汉中、安康四部CINRAD/CB型号多普勒天气雷达6 min间隔体扫基数据资料进行同化,并分别在5月23日20时进行冷启动运行(预报时效72 h)、24日05时进行暖启动(预报时效39 h)。

为了说明GWDO参数化方案在陕西暴雨中的模拟效果,分别设计了两个模拟方案,控制试验(CTL)和敏感性试验(GWDO)。控制试验方案采用单层无嵌套网格,网格水平分辨率为12 km,格点数 140×160 ,中心位于 $109.5^\circ\text{E}, 37^\circ\text{N}$ 。垂直方向采用37层 η 坐标,积分时间步长为60 s。微物理过程选用Lin方案,长波辐射采用RRTM方案,短波辐射采用Dudhia方案,近地面层选用Monin-Obukhov方案,陆面过程选用Unified Noah方案,边界层过程选用YSU方案。敏感性试验设置与控制试验相同,区别在于敏感性试验使用了地形重力波拖曳参数化方案,作为对照,控制试验未使用地形重力波拖曳参数化方案。

3 数值模拟结果对比分析

图2给出了25日08:00至26日08:00时24 h实况降水量、控制试验和敏感性试验预报降雨量图。在实况降水图上(图2a),主雨区在关中南至商洛地区,雨带呈东西向带状分布,大暴雨中心在西安与咸阳交界处的武功周至一带,雨量

最大为武功 123.9 mm。图 2b 是控制试验模拟的降水量。可以看到控制试验中未能模拟出关中地区的大暴雨中心,量级与实况差别较大,中心降雨量不到 100 mm;并且在陕北和陕南南部地区出现了两个大于 100 mm 的虚假降水中心,与实况差别较大。图 2c 是考虑了 GWDO 参数化方案后的模拟降水量,敏感性试验模拟的大暴雨落区恰好位于关中中部地区,与实况基本一致,特别是

中心降水强度的模拟上,要明显好于控制试验,降水的极端性体现地较为明显些;同时,敏感性试验中还消除了陕北和陕南南部的虚假大暴雨中心。总体而言,增加 GWDO 参数化方案后,较为成功地模拟出了关中地区的强降水量级,但位置略有偏差,说明在模式中考虑 GWDO 参数化方案可以使关中大降水的落区和强度预报效果得以改善。

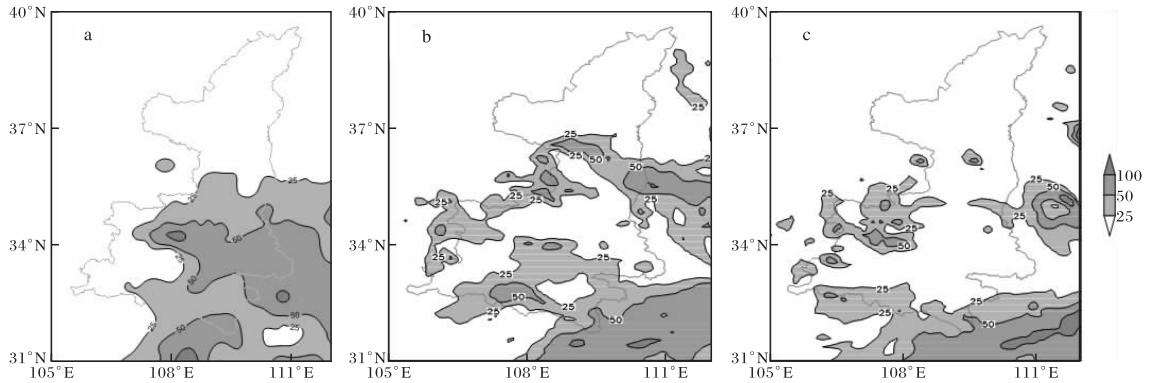


图 2 2013-05-25T08—2013-05-26T08 累计降水量(单位为 mm;a 实况,b CTL,c GWDO)

4 地形重力波对暴雨的影响

4.1 地形重力波对风场的影响

对比暴雨时段 CTL 和 GWDO 试验地面和 700 hPa 流场(图 3 和图 4)可见,在考虑 GWDO 后,模式对近地面及中低层流场的模拟能力均有所改善。对地面流场而言,以暴雨开始时 25 日 08 时为例,GWDO 和 CTL 试验都在关中大暴雨中心模拟出了较为明显的辐合中心,受关中盆地地形影响,沿着盆地回流的偏东气流与偏南气流在武功地区交汇。从 CTL 试验和 GWDO 试验

的模拟差异可以看出,CTL 试验模拟的关中地区地面辐合带(粗实线 A)位置较为偏东,强度偏弱,这也与模拟的降水强度偏弱相对应。相比之下,GWDO 试验模拟的地面辐合带位置(粗实线 B)与实况更为接近,在武功大暴雨地区形成了更强的辐合中心。说明考虑地形重力波拖曳参数化方案后,WRF 模式改进了对地面流场的模拟,对近地面地形对流场作用的描述更加准确,使近地面流场的模拟更符合实况。西南低涡是本次暴雨的直接影响系统。对 700 hPa 流场而言,以 25 日 14 时

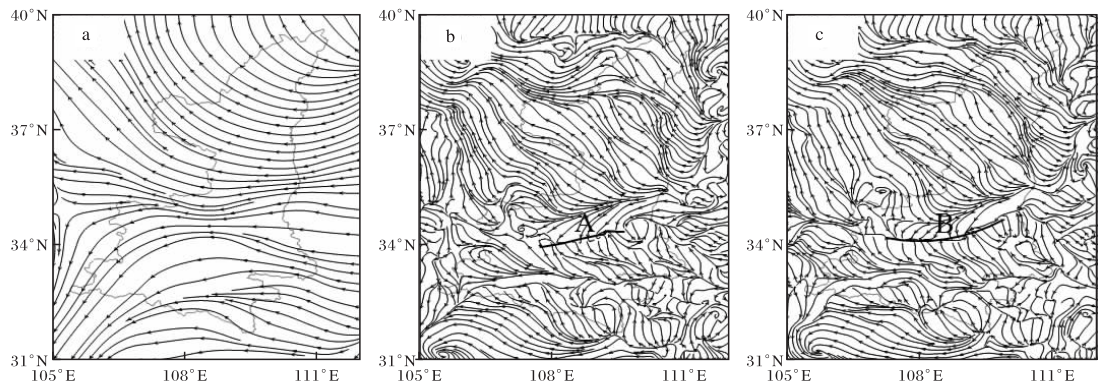


图 3 2013-05-25T08 地面流场(粗实线 A、B 分别为地面辐合带;a 实况;b CTL;c GWDO)

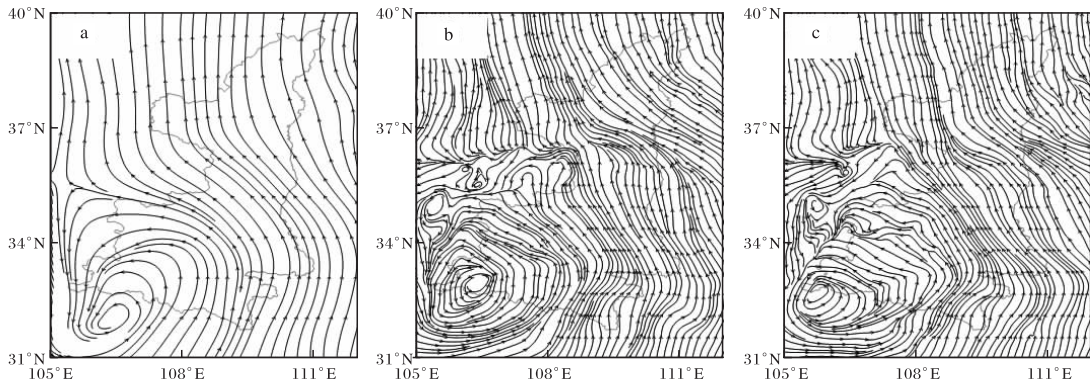


图4 2013-05-25T14 700 hPa 流场(a 实况;b CTL;c GWDO)

为例,GWDO 和 CTL 试验都在四川东北部模拟出了西南低涡,从 CTL 试验和 GWDO 试验的模拟差异可以看出,CTL 试验对于低涡位置的模拟明显偏北,低涡中心位于汉中地区,且强度偏强。GWDO 试验中低涡中心的位置略微偏西,低涡的位置和强度与实况更为接近。说明考虑地形重力波拖曳参数化方案后,模式对中低层低涡系统的位置和强度模拟更符合实况,从而对降水的模拟也更为准确。

4.2 地形重力波对散度、涡度场的影响

有研究表明,在 Fr 数小于 0.5 的条件下,气流往往被山峰阻塞而在迎风坡造成地形强迫和辐合性抬升,在大风或 Fr 数较大的条件下,地形重力波容易在山地下游被激发^[18]。对比暴雨时段 CTL 和 GWDO 试验 700 hPa 上 Fr 数(图略)发现,CTL 和 GWDO 试验中在关中暴雨区中的 froude 数都大于 0.5,因此在本次暴雨过程中,地形重力波极有可能在秦岭下游背风坡一侧被激发。目前判断重力波一般做法是根据某种物理量的水平或垂直分布特征,直观判断重力波参数大小以及重力波传播方向,物理量通常是大气散度、垂直速度或位温扰动等,若物理量在某一平面或剖面上存在正负值中心,且正负交替排列呈链式分布,则认为是重力波^[19]。对比 CTL 试验和 GWDO 试验 25 日 11 时 700 hPa 散度(图 5)可见,CTL 试验和 GWDO 试验都在秦岭背风坡一侧出现了正负交替的散度中心,说明受秦岭地形的阻挡作用,在关中盆地地区的确激发了地形重力波。由 CTL 试验和 GWDO 试验的模拟差异可以看出,CTL 试验中虽然也在秦岭一侧出现

了正负交替的散度中心,有重力波存在,但是由于未考虑重力波的拖曳作用,导致风场的辐合明显偏弱。GWDO 试验中沿秦岭背风一侧产生了更为明显的正负交替水平链式分布的散度中心,说明受秦岭山脉大地形的阻挡作用,不仅使西南涡外围偏南气流在爬坡时激发了中尺度地形重力波,同时由于地形重力波拖曳力的作用,使气流在山区附近辐合增强,最大散度中心达 $-40 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,对应降水增大,与实况更为吻合。

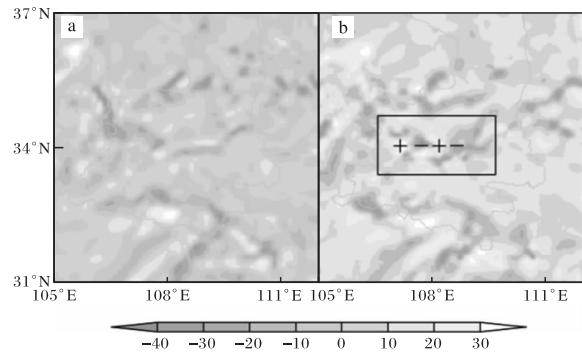


图5 2013-05-25T11 700 hPa 散度
(单位为 10^{-5} s^{-1} ; a CTL 试验;b GWDO 试验)

4.3 地形重力波对动力条件的的影响

以暴雨中心为例,分析重力波拖曳力的影响。CTRL 试验和 GWDO 试验对比可以看出,引入重力波拖曳参数化方案之后,25 日 08:00—26 日 08:00 垂直速度和云中总水含量(图 6)变化明显,云中总含水量^[20]由(QCLOUD+QRAIN+QICE+QSNOW+QGRAUP)计算得出。CTRL 试验低层东风在经过暴雨区山脉上空时增大,而 GWDO 试验低层东风在经过暴雨区山脉上空时先减小后增大,在暴雨区附近形成风速辐合;CTRL 试

验和 GWDO 试验暴雨区上空均是辐合辐散间隔分布,但 GWDO 试验暴雨区上空低层辐合更强,且低层辐合区向上伸展高度更高(图略);CTRL 试验暴雨区上空 500 hPa 以下以下沉气流为主, GWDO 试验暴雨区上空整层均为上升气流,气流的上升运动更为深厚且在 650 hPa 和 350 hPa 附近分别出现了大于 0.15 和 0.1 的高值中心,上升运动与降水的量级配合与实况更为接近。综上所述引入重力波拖曳参数化方案后,对暴雨区附近风场产生扰动,气流在这一地区辐合上升,产生较强的对流运动,从而引发降水,重力波拖曳力的引入有效地改善了气流的垂直运动,从而使降水的模拟与实况更为接近,较大的云中总含水量配合强的上升运动,造成了这一时段强降水。

4.4 地形重力波对温湿条件的影响

暴雨中心上空 CTRL 试验 600 hPa 以下水汽通量显著高于 GWDO 试验(图略)的,但 CTRL 试验 25 日 12:00 之后 700 hPa 以下表现为水汽通量散度辐散区(图 7),GWDO 试验虽然水汽通量小,输送到本地的水汽较少,但 25 日 20:00 之前低层均为水汽通量散度辐合区且辐合较强,模拟与实况更为接近,水汽聚集能力较强且持续时间长。25 日 18:00 之前 600 hPa 以下 CTRL 试验低层水汽含量小于 GWDO 试验(图略)。假相当位温(图略)对比分析显示 CTRL 试验 25 日 08:00—16:00 低层表现为对流不稳定, GWDO 试验在主要降水时段低层均表现为对流不稳定,且对流不稳定区域比 CTRL 试验更深厚。

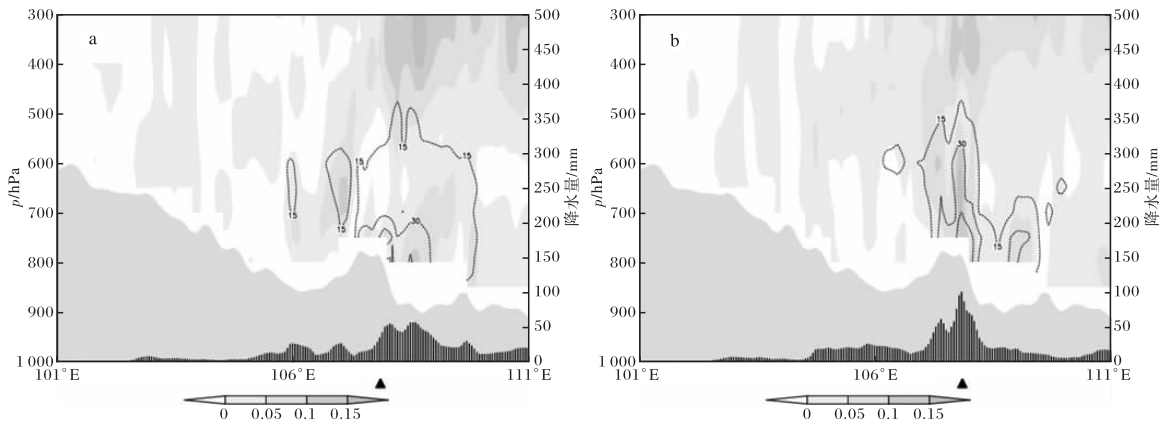


图 6 沿 34°N 平均垂直速度(阴影,单位为 m/s)、总水含量(等值线,单位为 10^{-5} kg/kg)和累计降水量(单位为 mm)剖面(a CTRL 试验;b GWDO 试验)

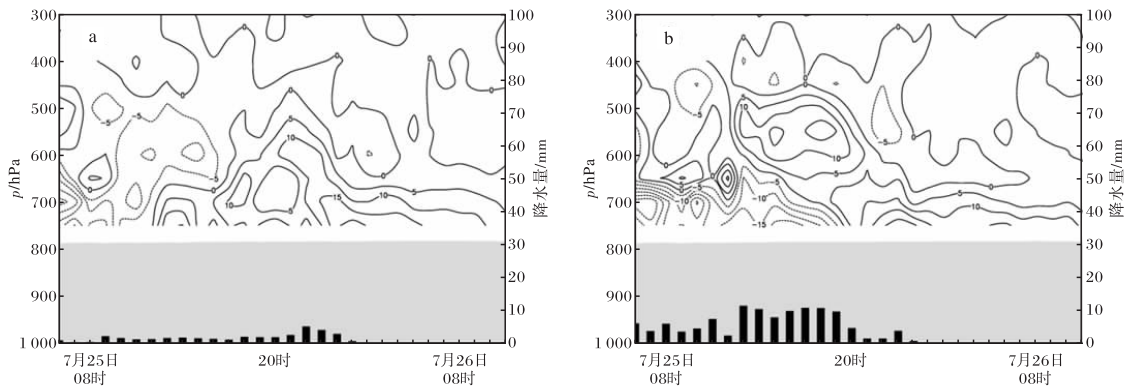


图 7 暴雨中心($34^{\circ}\text{N}, 107.8^{\circ}\text{E}$)水汽通量散度(单位为 $10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)和小时降水量时序图(单位为 mm)(a CTRL 试验;b GWDO 试验)

5 结论

(1)本次过程是在高空槽和低涡有利配合下形成的,秦巴山区的地形作用对本次暴雨过程有着重要影响。

(2)在引入地形重力波参数化方案后,模式对关中暴雨中心的模拟能力有所提高,强降水落区与量级与实况更为接近,较为有效地改善了环流形势及主要影响系统的模拟,说明该参数化方案对陕西暴雨预报具有一定的适用性。但是对陕南的暴雨区模拟还具有较大的误差,需要进一步改进。

(3)在引入地形重力波参数化方案后,对暴雨区附近风场产生扰动,使这一地区环流进行调整,有利的水汽条件和对流不稳定配合强烈的上升运动,是影响关中地区强降水的重要因素。

参考文献:

- [1] 廖菲,洪延超,郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技, 2007, 35(3): 309-316.
- [2] COSMA S, RICHARD E, MINISCLOUX F. The role of small-scale orographic features in the spatial distribution of precipitation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2002, 128(579): 75-92.
- [3] 陈明,傅抱璞,于强. 山区地形对暴雨的影响[J]. 地理学报, 1995, 50(3): 256-263.
- [4] 王鹏云. 台湾岛地形对台风暴雨影响的数值研究[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(3): 235-246.
- [5] 王晓芳,胡伯威. 地形对0604号"碧利斯"登陆台风暴雨的影响[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(2): 97-102.
- [6] LEE K O, SHIMIZU S, MAKI M, et al. Enhancement mechanism of the 30 June 2006 precipitation system observed over the northwestern slope of Mt. Halla, Jeju Island, Korea [J]. Atmospheric Research, 2010, 97(3): 343-358.
- [7] 赵玉春,许小峰,崔春光. 中尺度地形对梅雨锋暴雨影响的个例研究[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1268-1282.
- [8] 崔春光,闵爱荣,胡伯威. 中尺度地形对"98.7"鄂东特大暴雨的动力作用[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 602-612.
- [9] 李麦村. 重力波对特大暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 1978, 2(3): 201-209.
- [10] 徐国强,杨学胜,黄丽萍,等. GRAPES 中地形重力波拖曳物理过程的引进和应用试验[J]. 气象学报, 2010, 68(5): 631-639.
- [11] 钟水新,陈子通,黄燕燕,等. 地形重力波拖曳参数化方案在华南中尺度模式(GRAPES)中的应用试验[J]. 热带气象学报, 2014, 30(3): 413-422.
- [12] KIM Y J, ARAKAWA A. Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model[J]. Journal of the atmospheric sciences, 1995, 52(11): 1875-1902.
- [13] 刘蕾,丁治英,常越,等. WRF 中地形重力波参数化方案在一次华南暖区暴雨形成机制分析中的应用[J]. 气象科技, 2012, 40(2): 232-240.
- [14] 毕宝贵. 中尺度地形对陕南暴雨的影响研究[D]. 南京:南京气象学院, 2004.
- [15] 慕建利,李泽椿,谌芸,等. 一次陕西关中强暴雨中尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 148-161.
- [16] 王文,程攀. "7·27"陕北暴雨数值模拟与诊断分析[J]. 大气科学学报, 2013, 36(2): 174-183.
- [17] KIM Y J, ECKERMANN S, CHUN H Y. An Overview of the Past, Present and Future of Gravity-Wave Drag Parametrization for Numerical Climate and Weather Prediction Models[J]. Atmosphere-Ocean, 2003, 41(1): 65-98.
- [18] 黄倩,田文寿,王文,等. 复杂山区上空垂直速度场和热力对流活动的理想数值模拟[J]. 气象学报, 2007, 65(3): 341-352.
- [19] 邓少格,杨闻,钟中,等. 一种利用温度廓线与风廓线提取大气重力波参数的方法简介[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 630-634.
- [20] 李艳伟,牛生杰,罗宁,等. 积云并合扩展层化型积层混合云的数值模拟分析[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1165-1175.