



太行山地形对华北暴雨影响的数值模拟试验

摘要

利用高分辨率区域气候模式 RegCM3 对华北地区 1996 年夏季降水进行了数值模拟,对照中国台站的实测资料,对模拟的夏季降水量日变化特征进行了比较,在此基础上,设计了太行山地形敏感性试验,模拟了太行山脉地形高度变化对 1996 年夏季发生在华北地区的 3 次典型暴雨过程的影响.研究结果认为,RegCM3 模式能够较好地模拟 1996 年夏季华北地区雨带位置及主要降水过程,对 3 次典型暴雨过程中暴雨中心的落区及位置移动均有较好的表现,不足的是模拟的降水量偏大.地形敏感性试验结果发现,太行山地形对华北暴雨天气过程有着重要影响,但是对于不同形态的暴雨过程,地形的影响有不同表现.对于太行山区型暴雨,太行山地形的阻挡和抬升作用导致迎风坡和背风坡降水增加,而去掉地形后太行山两侧降水明显减少;对于回流型暴雨,降水系统从东北地区南部向西南方向移动,低层气流主要为偏东型气流,地形的存在对于降水系统的西移速度及降水落区均有重要影响,去掉地形后太行山东侧降水明显减少;对于东移型暴雨,降水从太行山南麓向东北方向移动,太行山脉对于环流形势的影响并不明显,因而仅影响降水强度,对降水位置影响不大.

关键词

华北暴雨;太行山地形;数值模拟;区域气候模式

中图分类号 P467

文献标志码 A

收稿日期 2014-02-28

资助项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430204);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306065)

作者简介

闫冠华,博士,高级工程师,研究方向为华北暴雨特征及机理.yangh@cma.gov.cn

1 中国气象局气象干部培训学院,北京,100081

2 国家气候中心,北京,100081

3 中国气象局气象探测中心,北京,100081

0 引言

暴雨是在有利的环境背景下各种中小尺度天气系统相互作用的产物,而地形对暴雨的强度和落区有着不可忽视的作用,尤其是特大暴雨往往是在特定的地形下产生的.陶诗言^[1]指出,暴雨与地形有密切的关系,夏季我国各地大到暴雨日频数分布和雨量分布都受到地形的影响.位于山西高原与河北平原间的太行山脉,呈东北西南走向,最高峰(五台山北台)高达 3 058 m,号称华北屋脊,太行山地形对华北地区的气候具有重要影响.王劲峰^[2]指出,华北平原西部和北部的太行山脉和燕山山脉对华北地区区域性干旱气候的形成可能有重要作用.范广洲等^[3]利用 NCAR-RegCM2 模式就地形对华北地区夏季降水的影响进行了数值模拟研究,结果表明,华北地区西部和北部的山脉对华北地区夏季降水有着非常重要的影响,地形高度降低时,华北地区夏季降水将明显减少,主要原因是降低地形高度后,使华北地区迎风坡地散抬升作用减弱,从而减少了山前降水,而降低地形也减弱了背风槽或抑制了背风坡气旋的发展,从而减少了山后降水.另外,地形高度降低后,华北地区 500 hPa 高度场明显减弱,不利于夏季副热带高压的加强北跳,从而使华北地区夏季降水减少.可见,太行山地形对华北地区独特的气候特征形成有着不可忽视的作用.在华北暴雨天气过程中,太行山脉的作用有多大?太行山脉在华北地区不同类型暴雨过程中的作用有无差异?在预报中如何考虑太行山地形的影响?这些问题在实际天气预报工作中无法回避但又很难正确把握.本文利用高分辨率区域气候模式 RegCM3 对华北地区 1996 年夏季降水进行了数值模拟,分析了模式对于降水量日变化特征的模拟性能,在此基础上,设计了太行山地形敏感性试验,模拟了太行山脉地形高度变化对 1996 年夏季的 3 次典型暴雨过程的影响,探讨太行山地形在不同类型暴雨过程的可能作用,为华北暴雨天气预报提供科学依据.

1 模式、试验方案及资料简介

本研究所用的区域气候模式,是意大利国际理论物理中心(ICTP)于近年间研制开发的区域气候模式 RegCM2 的改进版 RegCM3(模式版本及模式的详细说明可在网站 <http://www.ictp.it/~pubregcm> 得到).该模式自开发以来在东亚地区区域气候研究中也得到了广泛的应用^[4-7],这些研究结果表明,RegCM3 能较好地模拟中国

区域降水和气温的时空分布特征.

在本文的模拟研究中,模式的参数化方案选择如下:辐射采用 NCAR CCM3 方案,陆面过程使用 BATS1e(生物圈-大气圈传输方案),行星边界层方案使用 Holtslag 方案,积云对流参数化方案选择 Kuo 方案,边界条件采用了指数松弛边界.模式的初始场和侧边界场由欧洲中期数值天气预报中心(ECMWF)的一日4次再分析资料(ERA40)以及美国海洋大气局(NOAA)的OI.v2周海温资料提供.模式中心点位于(116°E,38°N),水平分辨率为20 km,南北方向65个格点,东西方向85个格点,覆盖了整个华北及周边地区(图略).

为了考察太行山地形对华北夏季不同类型暴雨过程的影响,本文选择1996年夏季作为研究时段,控制试验及敏感性试验中模式积分时间从每年5月1日—8月31日,5月1—31日为模式‘spin up’时间,仅分析6月1日—8月31日的模拟结果.

本文将模式对于1996年华北地区夏季的模拟结果作为控制试验,结果用RCM表示.在进行敏感性试验时,模式区域、模式分辨率、初始场及侧边界资料与前文描述的方案一致,仅将华北区域内(110~120°E,35~42.5°N)高于400 m的地形高度降低为400 m,结果用RCM-T表示,用以区别于模拟试验RCM.

降水个例选择以及与模拟试验进行比较分析时所用的降水观测资料为中国743站台站观测的逐日降水资料.

2 典型个例选择

通过对华北地区台站逐日降水资料的分析,将华北暴雨按照暴雨落区相对于太行山的位置和暴雨中心的移动情况进行分型归类.在分析中发现,华北暴雨存在以下几种主要类型^[8]:一是暴雨落区仅出

现在太行山区,暴雨区位于太行山南北向脊线附近或东西两侧山区内;二是暴雨发生在太行山东侧或东南侧,系统自西向东移动,过山后加强;三是降水发生在山脉东侧,但天气系统及伴随的强降水中心向偏西向移动.本文将以上3种类型的暴雨过程简称为太行山区型暴雨、东移型暴雨及回流型暴雨.1996年夏季(6月1日—8月31日),华北地区发生的主要暴雨过程分别出现在7月9—10日、7月29—31日、8月3—5日,这几次暴雨过程中降水中心落区及移动方向均有不同特征.图1—3分别是这3次主要暴雨过程的降水量空间演变,其中东北—西南向的黑色斜实线粗略地代表太行山脉脊线.第一次降水过程归类为太行山区型暴雨,1996年7月9—10日,降水天气系统位置少动,雨带主要位于太行山脉两侧,10日在太行山中段形成60 mm山区强降水(图1).第二次暴雨过程归类为东侧回流型暴雨,1996年7月29—31日,天气系统从东北方向沿山脉向西南方向移动,29日暴雨中心位于辽宁南部和河北北部,30日下移至河北、河南交界,中心雨量超过80 mm,31日,暴雨中心继续西移至山西南部(图2).第三次过程归类为太行山东侧东移型暴雨,1996年8月3—6日(图3),9608号台风登陆减弱低压外围影响,出现了一次大范围的暴雨过程,其中河北省中南部降了特大暴雨.雨量中心沿着太行山东侧迎风坡自南向北缓慢移动,3—5日分别形成70、90、80 mm暴雨中心.本文第3节主要针对这3次较为典型的暴雨过程进行模拟试验和分析.

3 太行山地形影响的敏感性试验

在进行本研究工作之前,作者利用RegCM3对华北地区夏季气候进行了12 a的模拟试验(1991—2002年),较为系统地评估了该模式对于华北地区夏季降水时空特征的模拟性能,对气候平均场的模

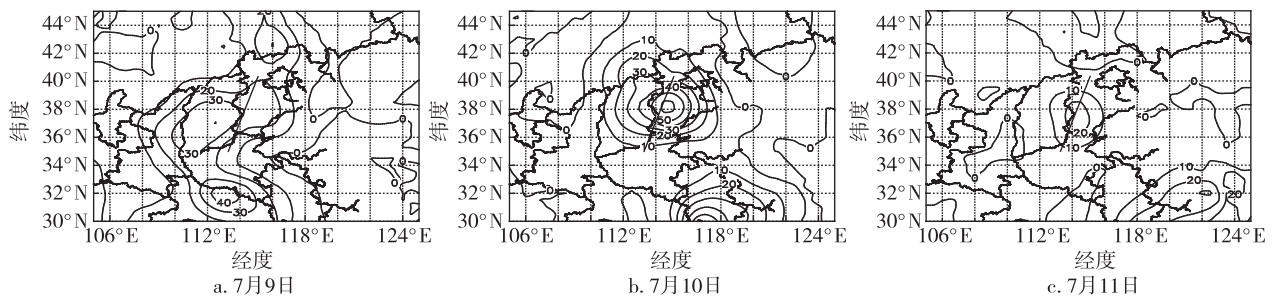


图1 1996年7月9—11日降水量分布(单位:mm/d)

Fig. 1 Distributions of rainfall during July 9—11, 1996 (units in mm/d)

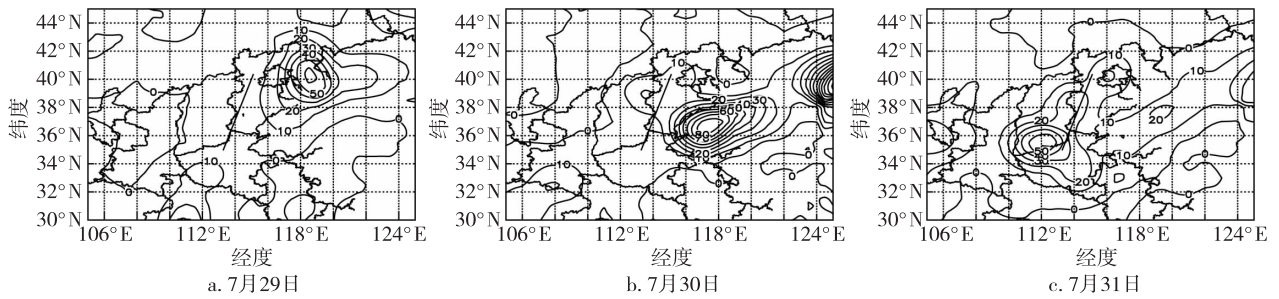


图2 1996年7月29—31日降水量分布(单位:mm/d)

Fig. 2 Distributions of rainfall during July 29—31, 1996(units in mm/d)

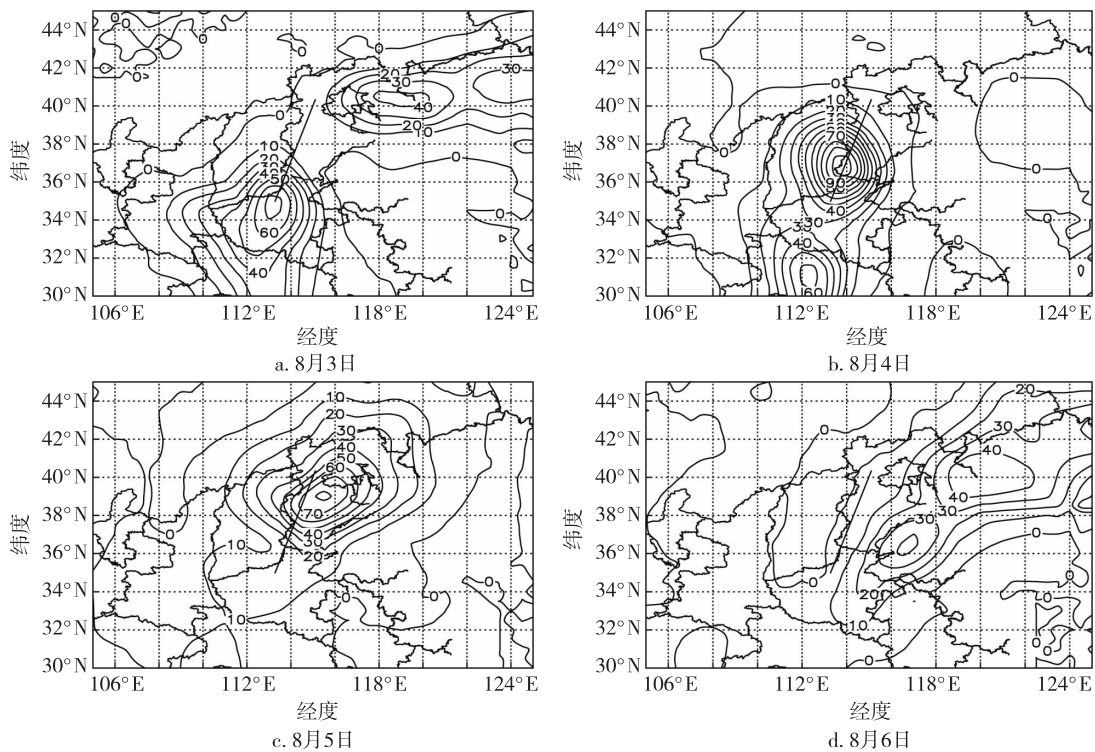


图3 1996年8月3—6日降水量分布(单位:mm/d)

Fig. 3 Distributions of rainfall during August 3—6, 1996(units in mm/d)

拟结果检验认为,RegCM3 能够再现夏季华北地区雨带位置及降水过程,特别是对于逐年夏季的降水日变化过程的峰值和谷值均有成功表现,不足的是模拟的降水量比观测偏大^[9]。

从观测和模拟的夏季平均降水量空间分布来看(图略),观测的1996年夏季降水中心最大值位于山西中南部、北京、河北东南部。控制试验中在山西大部分地区的降水量都超过6 mm/d,东部沿太行山脉自北向南有一个10 mm/d的雨带,太行山以东的河北大部地区降水量与观测一致。去掉太行山地形后,太行山迎风一侧的降水量有所减小,河北地区降水

量与控制试验相比略偏多,较大的地形性降水移至河套偏东地区和燕山山脉附近,这是因为在敏感性试验中,将太行山及山西境内的地形取为平原,使得模式中的地形性降水移至地形梯度较大的华北西部和北部边缘。由此也可看出地形高度的选择和模式中的描述在气候模式中非常重要,对区域降水模拟的结果影响很大。

比较观测、控制试验和敏感性试验中华北地区夏季降水的日变化(图4),可见控制试验中模式能够较好再现1996年夏季的几次主要降水过程,如6月16—17日、7月9—10日、7月28日—8月5日的

降水过程, 不足的是, 模拟的降水量比观测明显偏多, 特别是对7月28日—8月5日的这次强降水过程模拟的中心最大降水量比实况高1倍. 与控制试验相比, 敏感性试验(RCM-T)在第一、第三次降水过程模拟的降水量略偏小, 第二次过程在华北北部模拟的降水量偏大. 以下将分别比较讨论3次典型暴雨过程的控制试验和敏感性试验结果.

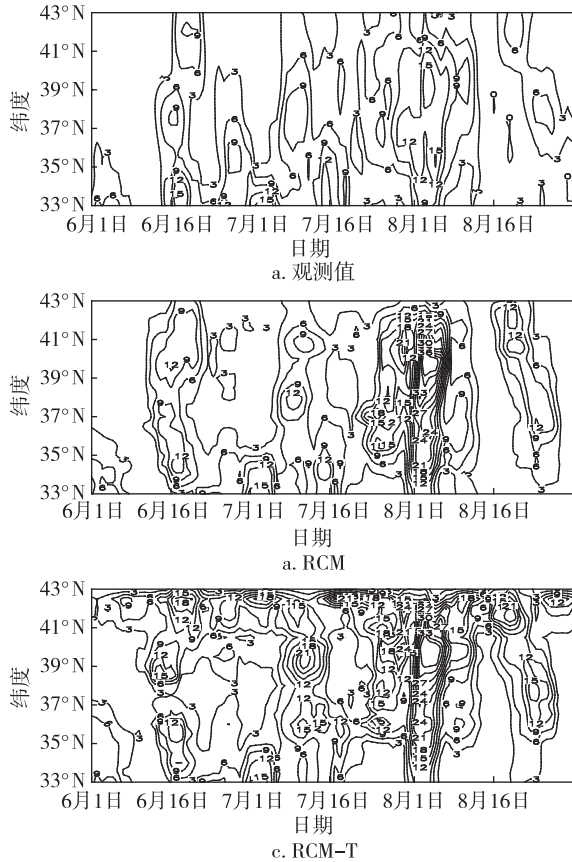


图4 1996年6—8月区域平均降水日变化(单位:mm/d)

Fig. 4 Time-lot section of summer rainfall in observation and simulation (units in mm/d)

第一次降水过程为太行山区型暴雨(1996年7月9—10日), 对比模式结果可见(图略), 与观测相比, 控制试验模拟的9日降水中心略偏东, 中心位于太行山脉背风坡, 模拟的10日暴雨中心位置与观测较为一致. 敏感性试验中, 9日在河套东部边缘模拟出了较大的地形性虚假降水, 而山西境内的降水中心未模拟出, 10日模拟的降水大值中心与观测结果和控制试验相比偏东偏北. 从敏感性试验与控制试验的降水量差值可见(图5), 去掉太行山地形后, 更多的降水出现在地形梯度较大的山西以西的河套边缘、阴山及燕山山脉附近, 太行山区的降水比控制试验明显偏小, 即降水减少不仅表现在山脉的迎风坡, 也表现在山脉的背风坡处. 从图6给出的上升运动垂直剖面上也可看出, 控制试验中太行山脉附近存在较为明显的上升运动区, 而在去掉太行山地形后, 这一上升运动区消失, 而强的上升运动区移至河套附近的较高地形处, 这一现象从另一个侧面体现了高地形对气流的抬升作用. 从图7给出的925 hPa风场上也可清楚地看到太行山地形存在时对山脉西侧的偏东气流和东侧的西南气流的阻挡作用, 这一作用与图6中的强上升运动区的位置相对应. 范广洲等^[3]的研究中也指出, 太行山脉地形存在时, 由于地形的阻挡作用, 夏季在华北地区西部存在一地形脊, 这有利于夏季副热带高压的北上, 从而有利于华北地区降水的发生, 降低地形高度后, 华北地区夏季降水减少, 这主要是由于去掉地形后, 当暖湿空气经过该区时, 由于迎风坡的抬升作用消失, 使迎风坡降水减少, 而在背风坡, 背风槽或气旋也减弱, 从而影响背风坡降水. 去掉太行山地形后, 从内蒙古南下的冷空气与西南气流直接穿过山西, 无论是气流的强度, 还是辐合区的位置, 均发生了明显的改变, 从而导

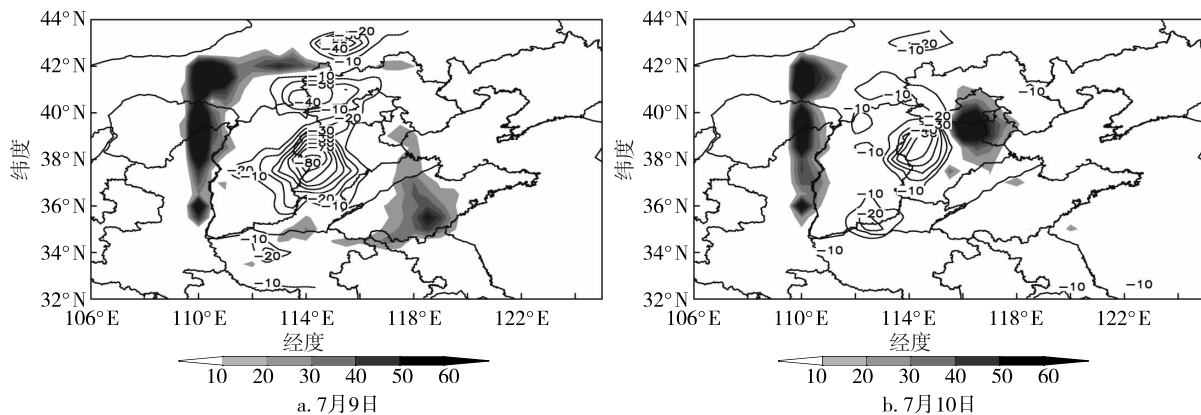


图5 华北地区1996年7月9—10日降水过程雨量差值分布(敏感性试验-控制试验)(单位:mm/d)

Fig. 5 Precipitation difference between RCM-T and RCM during July 9—10, 1996(units in mm/d)

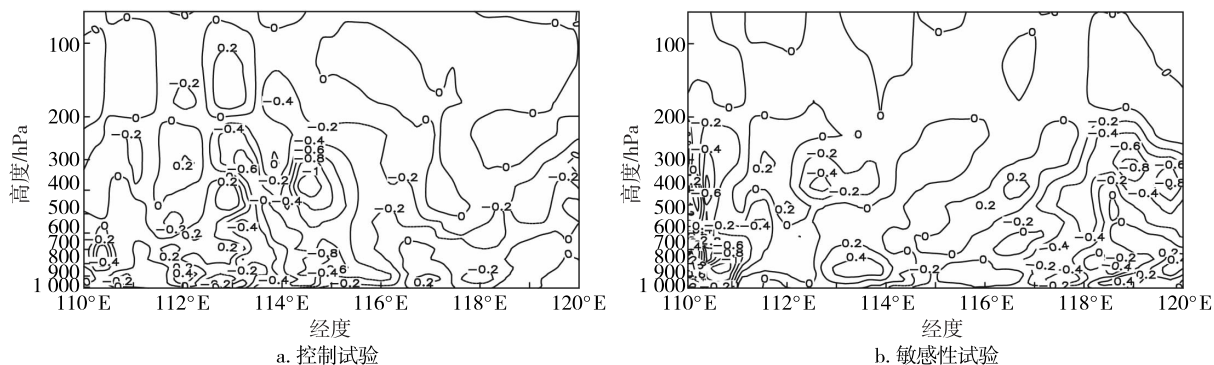


图6 华北地区1996年7月10日垂直速度的经度-高度剖面(单位: 10^{-3} hPa/s)
Fig. 6 Longitude-height section of vertical speed on July 10, 1996 (units in 10^{-3} hPa/s)

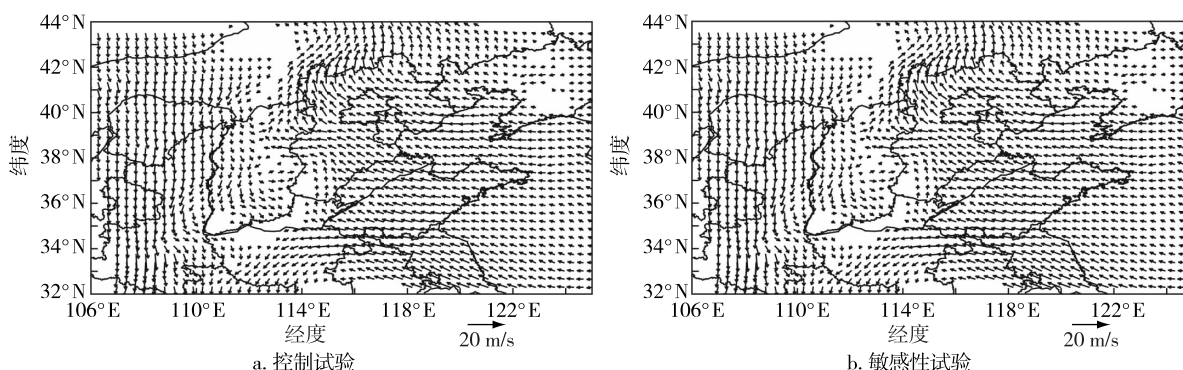


图7 华北地区1996年7月10日925 hPa风场(单位: m/s)
Fig. 7 Wind at 925 hPa on July 10, 1996 (units in m/s)

致了降水位置和降水强度的变化。

对比第二次回流型暴雨过程(7月29—31日)的模式结果(图略),控制试验较好地再现了这次从东北向西南移动的降水天气系统,敏感性试验结果在29日与控制试验比较接近,30日雨强中心西移过程比较零散,31日雨带位置与控制试验一致,但是位于太行山脉东侧的地形性降水减小,而位于河套附近的地形性降水增大.比较敏感性试验和控制试验(图8),7月30日最大的差别是在太行山以东地区的降水减少,31日除山脉东南方存在一个降水减少的中心外,山西南部、河北北部至辽宁一带降水增多.从垂直运动剖面(图9)上也可看到,7月31日在控制试验中位于太行山脉附近的强上升运动中心在敏感性试验中不复存在,敏感性试验中的强上升气流位于河北附近,比控制试验明显偏东.从前一日(7月30日)的低层风场来看(图10),控制试验中一股较强的东北气流从内蒙古东部及辽宁地区向西南方向,沿太行山南下,并与西南气流形成一条东北—西

南向的强辐合带,去掉地形后,这支气流在山西北部南下并分支,一支在北京、天津等地附近与西南气流汇合成一强辐合中心,另一支从山西中部地区向西,从而改变了降水系统的移动方向和位置。

第三次暴雨过程(1996年8月3—5日),从控制试验和敏感性试验的结果来看(图略),控制试验结果成功地再现了这次过程中暴雨中心的位置和移动特征,但模拟的降水量明显偏大.比较控制试验和敏感性试验的降水差异(图11),去掉太行山地行后,降水量明显减少,且负的降水差值中心位置沿太行山脉地形呈东北—西南走向.与前两次暴雨过程不同的是,第三次暴雨过程在去掉地形后,上升运动的中心位置几乎不发生变化,只是强度和影响范围与控制试验相比有些不同(图略).从去掉地形前后的低层风场变化特征来看(图略),环流形势和辐合区的位置也基本一致,仅风场强度有一些差别.可见,在这种暴雨型下,地形存在与否并未改变环流形态和降水位置,仅对降水量的多寡造成一定影响。

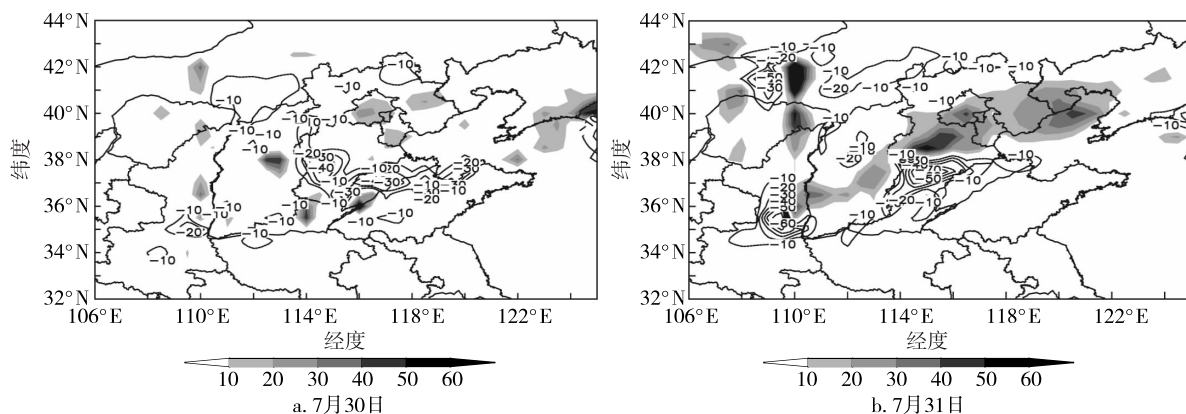


图8 华北地区1996年7月30—31日降水过程雨量差值分布
(敏感性试验-控制试验)(单位:mm/d)

Fig. 8 Precipitation difference between RCM-T and RCM during July 30—31, 1996(units in mm/d)

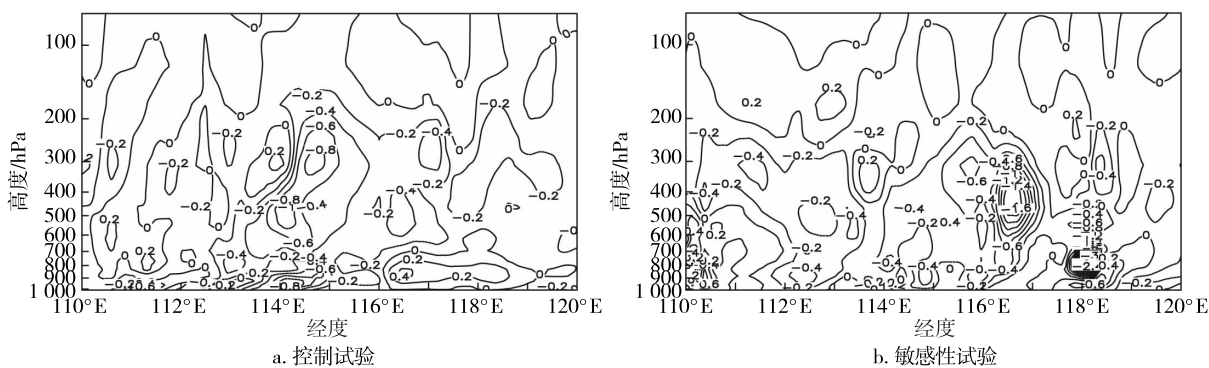


图9 华北地区1996年7月31日垂直速度的经度-高度剖面(单位: 10^{-3} hPa/s)

Fig. 9 Longitude-height section of vertical speed on July 31, 1996 (units in 10^{-3} hPa/s)

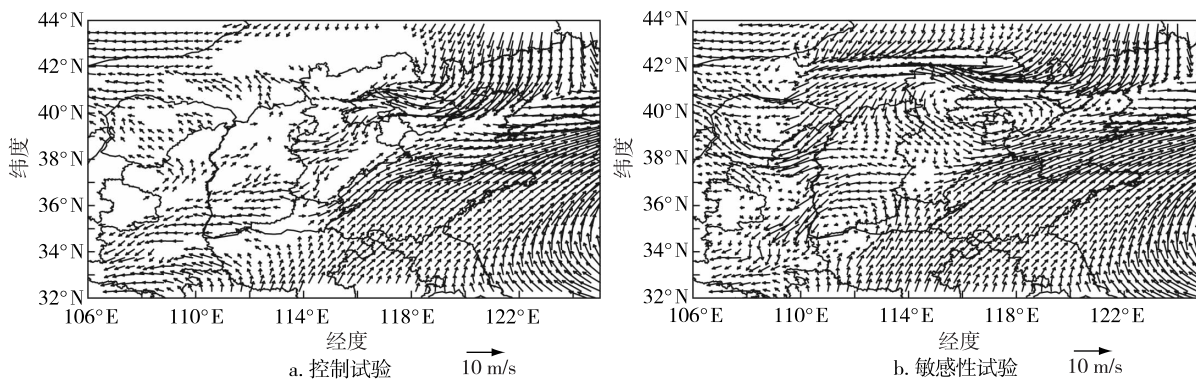


图10 华北地区1996年7月30日925 hPa风场(单位:m/s)

Fig. 10 Wind at 925 hPa on July 30, 1996 (units in m/s)

4 小结

选取1996年夏季发生在华北地区的几次典型暴雨个例,利用高分辨率区域气候模式RegCM3进

行数值模拟试验,考察模式对3次典型暴雨过程的模拟能力,检验模式对于暴雨发生的时间、落区、强度等特征的刻画能力.在此基础上,设计了太行山地

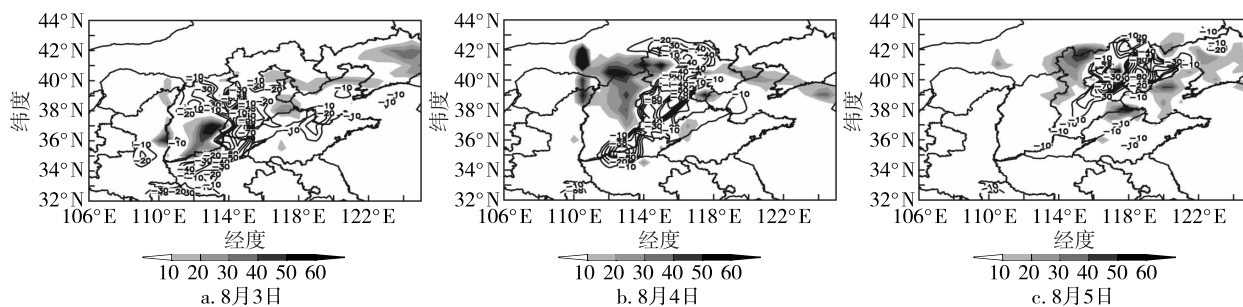


图 11 华北地区 1996 年 8 月 3—5 日降水过程雨量差值分布
(敏感性试验-控制试验)(单位:mm/d)

Fig. 11 Precipitation difference between RCM-T and RCM during August 3—5, 1996 (units in mm/d)

形高度变化的敏感性试验,探讨太行山地形对华北暴雨过程的影响。

1) 分析表明,发生在 1996 年夏季的 3 次华北暴雨过程从暴雨发生、移动和落区上有不同的特征,数值模拟检验结果认为,RegCM3 模式能够较好再现夏季华北地区雨带位置及主要降水过程,不足的是模拟的降水量比观测偏大,对于这 3 次不同类型的暴雨过程中暴雨中心的落区及位置移动均有较好的表现。

2) 太行山地形对华北夏季降水,特别是对暴雨天气过程有着重要影响,但是对于不同类型的暴雨过程,地形的影响也不同。对于太行山区型暴雨,太行山地形的阻挡和抬升作用导致迎风坡和背风坡降水增加,而去掉地形后太行山两侧降水明显减少;对于回流型暴雨,降水系统从东北南部向西南地区移动,低层气流主要为偏东型气流,地形的存在对于降水系统的西移速度及降水落区均有重要影响,去掉地形后太行山东侧降水明显减少;对于东移型暴雨过程,降水从太行山南麓向东北方向移动,太行山脉对于环流形势的影响并不明显,因而仅影响降水强度,对降水位置影响不大。

本文的研究表明,太行山地形对华北暴雨的位置、移动及雨强具有一定的影响,但同时也可看到,模式地形敏感性试验在反映太行山地形对华北暴雨影响结果的同时也反映了模拟结果对于地形较高的敏感性,气候模式中对于地形准确的描述和处理一直是影响区域降水模拟的关键问题和难题,特别是对于东亚地区,由于青藏高原等复杂地形,使得模式对于东亚地区降水的模拟和预测性能都不尽如人意。因此,模式地形对于降水模拟误差的影响需要设计合理的敏感性试验进行研究,还需要研究更加合理的地形参数化方案。另外值得关注的是,对于不同的暴雨类型,地

形的影响也各不相同,这些特征在以往科学家们的研究中也体现^[10-14]。因此,地形对暴雨的影响比较复杂,不能一概而论。针对太行山脉地形对华北地区暴雨的影响,以及如何在强降水天气预报中恰当地考虑太行山脉的作用,还需要进一步研究。

参考文献

References

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 225
TAO Shiyan. Storm in China[M]. Beijing: Science Press, 1980: 225
- [2] 王劲峰. 人地关系演进及其调控: 全球变化、自然灾害、人类活动中国典型区研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995
WANG Jingfeng. The evolution and adjustment of the relationship between human and environment: Case studies of global change, natural disasters and human activities in China's typical areas[M]. Beijing: Science Press, 1995
- [3] 范广洲, 吕世华. 地形对华北地区夏季降水影响的数值模拟研究[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 659-667
FAN Guangzhou, LÜ Shihua. Numerical simulation study for the effect of terrain on north China summer precipitation[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 659-667
- [4] 刘晓东, 江志红, 罗树如, 等. RegCM3 模式对中国东部夏季降水的模拟试验[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 351-359
LIU Xiaodong, JIANG Zhihong, LUO Shuru, et al. A simulation of summer precipitation over eastern China with RegCM3[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(3): 351-359
- [5] 张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 119-121
ZHANG Dongfeng, GAO Xuejie, ZHAO Zongci, et al. Simulation of climate in China by RegCM3 model[J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(3): 119-121
- [6] 周建玮, 王咏青. 区域气候模式 RegCM3 应用研究综述[J]. 气象科学, 2007, 27(6): 702-708

- ZHOU Jianwei, WANG Yongqing. The advance in application and research of regional climate model RegCM3 [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(6): 702-708
- [7] 石英, 高学杰. 温室效应对我国东部地区气候影响的高分辨率数值试验[J]. *大气科学*, 2008, 32(5): 1-13
- SHI Ying, GAO Xuejie. Influence of greenhouse effect on eastern China climate simulated by a high resolution regional climate model[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(5): 1-13
- [8] 闫冠华, 李泽椿, 李巧萍. 太行山脉影响下的华北暴雨分型[J]. *气象科技进展*, 2014, 4(2): 59-61
- YAN Guanhua, LI Zechun, LI Qiaoping. Torrential rains patterns in North China on the impact of Taihang Mountains[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2014, 4(2): 59-61
- [9] 闫冠华, 李泽椿. 华北地区夏季降水模拟研究: 区域气候模式性能评估[J]. *大气科学学报*, 2014, 37(5): 558-567
- YAN Guanhua, LI Zechun. A simulation study on summer rainfall over North China: Evaluation of a regional climate model[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2014, 37(5): 558-567
- [10] 熊秋芬, 胡江林, 张耀存. 梅雨锋暴雨数值模拟中地形的作用[J]. *气象科学*, 2007, 27(6): 591-596
- XIONG Qiufen, HU Jianglin, ZHANG Yaocun. Terrain effects in numerical simulation of Meiyu front heavy rain [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, 27(6): 591-596
- [11] 贝耐芳, 赵思雄, 高守亭. 1998年“二度梅”期间武汉-黄石突发性暴雨的模拟研究[J]. *大气科学*, 2003, 27(3): 399-417
- BEI Naifang, ZHAO Sixiong, GAO Shouting. A numerical simulation of sudden heavy rainfall occurred in Wuhan and Huangshi during July of 1998[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(3): 399-417
- [12] 周晓平, 赵思雄, 张可芬, 等. 一个东亚季风区的暴雨数值预报模式[J]. *大气科学*, 1988, 12(S1): 60-78
- ZHOU Xiaoping, ZHAO Sixiong, ZHANG Kesu, et al. A heavy rainfall numerical prediction model for the East Asian monsoon area[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1988, 12(S1): 60-78
- [13] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M]. 北京: 气象出版社, 2004
- ZHAO Sixiong, TAO Zuyu, SUN Jianhua, et al. Study on the mechanism of Meiyu front heavy rain in the Yangtze River basin [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004
- [14] 熊秋芬, 胡江林, 张耀存. 梅雨锋降水带中不同地域大暴雨成因的对比分析[J]. *气象*, 2006, 32(7): 72-80
- XIONG Qiufen, HU Jianglin, ZHANG Yaocun. Comparison of causes of torrential rain in different areas on Meiyu front precipitation band [J]. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(7): 72-80

Numerical simulation for terrain effects of Taihang Mountain on heavy rainfall over North China

YAN Guanhua¹ LI Qiaoping² LI Ruiyi³

1 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Summer rainfalls over North China in 1996 are simulated using regional climate model (RegCM3), and the simulation results are compared with the observed precipitations to investigate the model's capability to reproduce the daily variation of summer rainfall. Based on that, the terrain effects of Taihang Mountain on three heavy rainfall processes over North China have been investigated by orographic sensitive experiment. Results show that the model can reproduce the spatial distribution of the summer rainfall, which are consistent with the observations in aspects of location and shift of the rainfall belt during three typical heavy rainfall processes. But the model overestimates the quantity of the rainfalls. The orographic sensitive experiments indicate that the topography of Taihang Mountain plays significant but different roles in the three events of heavy rainfall. When the rainstorm mainly occurred over Taihang Mountain, easterly flow is resisted and lifted by the mountain, therefore increase the rainfall over the two slopes of Taihang Mountain; while the rainfall obviously decrease on both sides should the mountain removed. For the returning-flow rainstorm type, the topography significantly influences both the location and westward movement of the rainfall. While for the eastward moving rainstorm type, the topography only changes the intensity of rainfall but has little influence on the rainstorm location and related circulations.

Key words summer heavy rainfall over North China; Taihang Mountain; numerical simulation; regional climate model