

华东中尺度地形对浙北暴雨 影响的模拟研究^{*}

高坤 翟国庆 俞樟孝 屠彩虹

(杭州大学地理系, 杭州, 310028)

提 要

以一次梅雨降水为例, 利用中尺度模式进行一系列中尺度地形对降水的增幅影响的敏感性试验。结果表明, 中尺度地形对强降水区域的分布和强度有很大的影响, 强降水中心位于地形附近, 地形引起的 12 小时降水增幅高达总降水的 90% 以上; 中尺度地形作为一种外界迫动, 初始在低层形成气旋性辐合和水汽热量的集中, 然后通过凝结潜热释放所造成的中高层增温和高层辐散, 使得地形垂直环流加强和向上伸展。于是在降水、潜热释放与地形垂直环流之间出现一种正反馈机制, 导致地形对降水的强烈增幅; 同时午后下垫面加热所形成的不稳定层结也有利于地形垂直环流的不稳定发展, 产生新的雨峰; 初始场的中尺度扰动似乎在降水的地形性增幅中并不起明显作用。

关键词: 中尺度扰动, 地形性增幅影响, 敏感性试验。

1 前言

地形对降水的影响十分明显^[1,2], 大尺度地形影响大范围雨带的分布与变化; 中小尺度地形则影响具体降水中心的强度和落区、落点^[3]。二宫洸三曾针对台风系统讨论过在日本四国南部风向随着台风移动发生变化时, 降水中心沿着背棱山脉的南缘移动的现象^[1]。黄安丽等也曾利用 6513 号台风讨论过地形对降水的增幅作用^[4], 指出降水的增强不仅与地形强迫辐合抬升有关, 且与地形造成的地形云系与伴随扰动的系统云系之间复杂的云物理作用有关。上述研究多采用资料分析和诊断方法, 中尺度数值模式的发展, 又为深入研究中小尺度地形对降水的影响提供了一个有意义的工具。

华东地区多丘陵山地, 中尺度地形特征十分突出, 对梅雨期降水中心区的分布和强度影响很大, 为了深入研究该地区中尺度地形对梅雨降水的影响, 本文利用中尺度数值模式对 1983 年 6 月 29 日的一次浙北暴雨个例作了数值试验, 在对降水作了成功模拟的基础上, 通过一系列敏感性试验, 着重探讨了华东中尺度地形的影响和大气中的潜热释放及下垫面加热等非绝热过程在降水的地形增幅中的作用, 最后对初始扰动对地形增幅的影响作了简要的试验分析。

^{*} 1992 年 5 月 3 日收到原稿, 1992 年 10 月 21 日收到修改稿。

1) 国外暴雨专题参考资料, 中央气象局科技情报研究所, 1977。

2 模式和试验设计

2.1 模式简介

利用引进的美国国家大气研究中心的 MM4 中尺度数值模式^[5],水平网格距取 90km,水平格点数为 31×31,垂直方向共分 10 层。对于次网格尺度深对流效应,采用 Kuo-Anthes 对流参数化方案^[6],在可分辨尺度上采用显式水汽方案,即增加云水、雨水两个预报方程,计入凝结蒸发等相变过程^[7],边界层采用总体边界层方案^[8],其中地温由计入辐射和热量交换过程的地面能量收支方程预报。地形采用半度分辨的资料。

2.2 试验设计

以 1983 年 6 月 28 日 20 时(北京时)为初始时刻,采用上述方案进行 24 小时模拟,并以此作为控制试验(CTR)。为了了解地形对降水的增幅,及大气非绝热过程和初始扰动对地形性增幅的影响,我们设计了以下几组试验(见表 1)。

第 1 组为地形试验组,在控制试验的基础上,通过将华东地区东部黄山、天目山及大别山两片特定山地的地形高度分别削减到环境平均高度(约 100m)的办法,进行无特定地形的模拟试验,并以控制试验与无特定地形试验之差揭示各分片地形对降水的总体影响。

由于地形影响不是孤立产生的,而是通过实际大气内部的一系列物理过程而发挥其作用的,因此我们设计了 2、3 两组试验,研究水汽潜热释放和下垫面热通量等非绝热过程在地形降水增幅中的作用。

在第 2 组潜热试验组中,允许水汽饱和凝结并作为降水下落,但在热量方程中不计入潜热释放项(DRY),从而排除潜热释放的反馈作用;同时在该试验的基础上进行排除黄山、天目山地形的试验(DRNH),这一对试验之差可表示不存在潜热释放(即准干大气)的情况下地形的影响。

表 1 敏感性试验分组设计表

组号	试验名	试 验 内 容	试 验 目 的
1	CTR	控制试验	检验中尺度地形对降水的影响
	NHT	无黄山、天目山	
	NDB	无大别山	
2	DRY	被动水汽试验	潜热释放在地形降水增幅中的作用
	DRNH	被动水汽且无黄山天目山	
3	NSF	无地面通量试验	下垫面热通量在地形降水增幅中的作用
	NSNH	无地面通量且无黄山天目山	
4	LAG	大尺度初始场试验	初始场中尺度扰动对地形降水增幅的作用
	LANH	大尺度初始场且无黄山天目山	

在第 3 组下垫面热通量试验组中,无下垫面通量试验(NSF),目的在于去除地气感热潜热通量引起的对低层大气的加热作用,同时在该试验的基础上进行排除黄山、天目山地形的试验(NSNH),这一对试验之差表示没有下垫面加热条件下地形的作用。

地形增幅与初始场中尺度扰动的关系也是一个令人关心的问题,在第 4 组试验中,我们通过初始场进行低通滤波处理,排除中尺度扰动来进行模拟试验(LAG),并进一步去除地形的试验(LANH),两者之差可表示不存在初始中尺度扰动情况下地形的影响。

3 试验结果分析

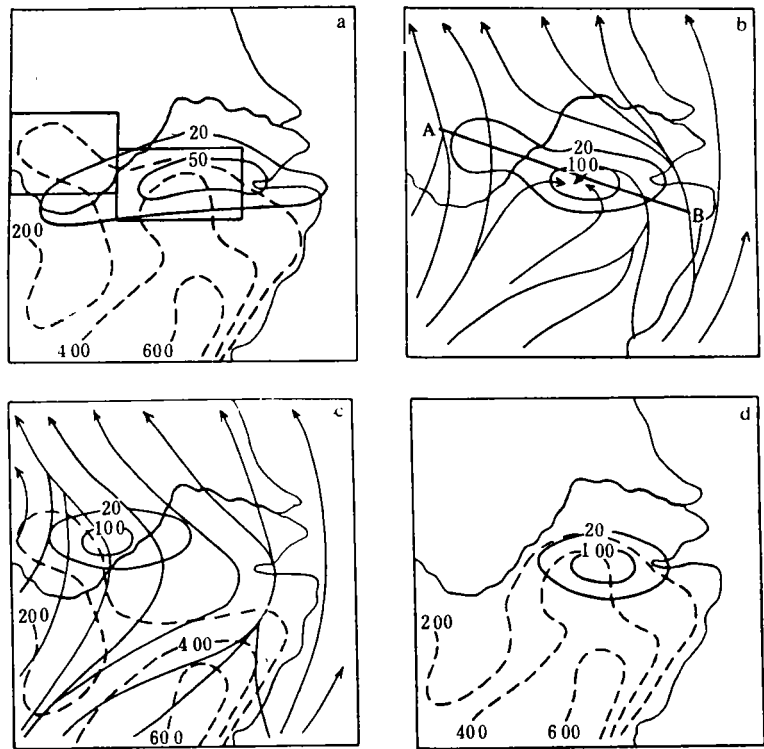


图1 1983年6月29日08时至20时12h降水量实况及模拟
(实线为降水量(单位:mm),虚线为地形等高线(单位:m),箭矢线为模式积分18h最低层($\sigma=0.98$)流线,小方框为两片地形区。a为实况,b为CRT试验,c为NHT试验,d为NDB试验)

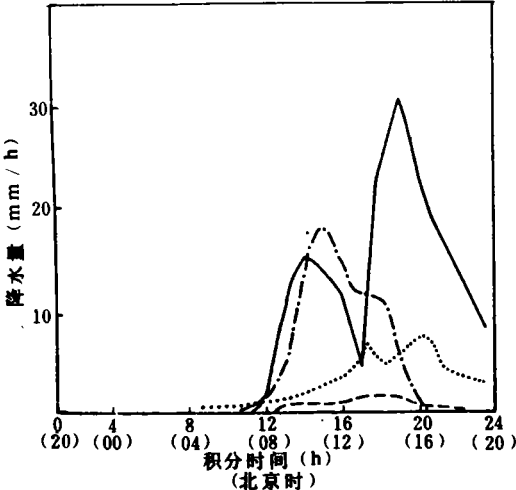


图2 各试验模拟浙北降水中心强度时间变化曲线
(单位:mm/h,实线为CTR试验,虚线为NHT试验,点线为DRY试验,点划线为NSF试验)

3.1 华东分片地形的影响

图1a、图1b分别给出6月29日08时至20时12h降水量的实况和控制试验预报,长江下游雨带的模拟是较为成功的,从大别山区一直伸展到浙江北部,主要降水中心落在黄山、天目山地区,与实况基本相符。去除黄山、天目山后(NHT试验,见图1c),浙北强降水中心消失,而大别山区降水明显加强,中心位于安庆以西;而在去除大别山的NDB试验中(见图1d),则只影响皖南降水,强度明显减小,雨带向东收缩,而对浙北暴雨无明显影响。因此针对浙北暴雨,后面我们只集中讨论黄山、天目山地形的影响。

图2给出各试验所模拟浙北降水中心强度的时间变化曲线,控制试验主要有两个雨

峰(实线),分别在模式积分 15h 和 19h,即北京时 29 日 11 时和 15 时,降水以午后的第 2 个雨峰最强,达 30mm/h;而当削平黄山、天目山后,降水量大幅度减小且无强雨峰出现(虚线)。表 2 给出各组试验所模拟浙北地区 12h 降水量及黄山、天目山地形所引起的增幅,与控制试验相比,黄山、天目山地形所引起的 12h 降水增幅比达 94%(178mm/188mm),显然该中尺度地形对浙北降水起相当强的增幅作用。

表 2 各试验模拟浙北地区 12h 降水中心强度及地形引起的增幅

试验名	12h 降水 中心值(mm)	对比试验	12h 降水 中心差值(mm)	地形增幅比 (%)
CTR	188	CTR-NHT	178	94
DRY	49	DRY-DRNH	33	67
NSF	79	NSF-NSNH	75	94
LAG	200	LAG-LANH	192	96

3.2 中尺度地形引起的动力热力场特征

图 1b 和图 1c 分别给出 CTR 和 NHT 试验中模拟 18h 的近地面($\sigma=0.98$)流线,从天气尺度看,两者很相似,在长江中下游均为一暖式切变,且有一高能舌(θ_e 高值区)与之对应(图略),是有利于东西向雨带形成的形势;而从中尺度看,控制试验(CTR)中,黄山、天目山地区存在明显的气流辐合区,气流汇合点正与强降水中心对应,而无地形试验(NHT)中,则并不存在这一中尺度特征。图 3 是 18h 控制试验与 NHT 试验的对比差值图,由低层差值流场和差值散度场可见(图 3a),由于黄山、天目山地形的存在,围绕该地区产生一个十分清晰的气旋性辐合环流,辐合强度达 $-11\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$;相应地在该地区上空地形造成中层强上升(达 $-40\times 10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)和高层辐散(图 3b)。上述特征的水平范围属中尺度,与相应的地形尺度一致,这表明黄山、天目山的存在,可使低层流场发生明显的变化,并进一步使中高层流场发生相应的变化。

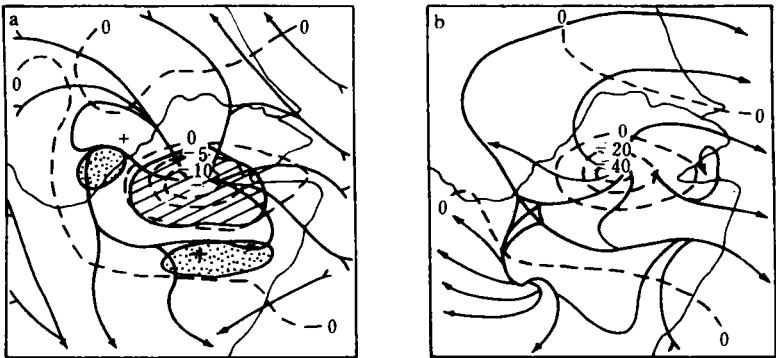


图 3 积分 18h CTR 与 NHT 试验差值场

(a 为 $\sigma=0.98$ 流场和散度场(虚线, $\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)及相当位温场(斜线阴影区为 2K 以上正值区,点阴影为 -2K 以下负值区),b 为 500hPa ω 场(虚线, $\times 10^{-3}\text{hPa s}^{-1}$)和 300hPa 流场)

图 3a 上也给出了低层相当位温差值场,斜线阴影区为+2K 以上的正值区,点阴影区为-2K 以下的负值区,显然低层地形辐合区正对应一增能区,中心值达 7.8K,而其南侧和西北侧则为减能区,低层能量的这一变化是与低层地形性辐合流场引起的热量水汽的

再分布有关,使得黄山、天目山地区热量水汽集中;在地形高能中心的形成中,温度的贡献约 2.5K,占总增值的 1/3,而水汽的贡献则为 2g/kg,占总增能值的 2/3;由此可见,中尺度地形导致产生的高能中心在较大程度上是由于水汽的集中,这一过程对暴雨的产生及落区十分重要。

图 4 给出浙北上空中尺度地形引起的散度和相当位温的时高剖面,可以看到由于中尺度地形的存在,随着模式的向前积分,首先是低层辐合和能量逐渐增强,并通过地形抬升运动将高能空气向上输送,使增能区向对流层中层伸展,到 12h 左右降水开始发生,中层水汽凝结降落使相当位温值趋于减小,这与低层的增能一起导致中低层大气层结不稳定的加强,使对流、低层辐合和降水也获得加强,最强层结不稳定就发生在降水峰值出现之前(约 16h),同时水汽凝结潜热的大量释放使得对流层高层增温增能,这有助高层辐散的迅速加强,这也促使垂直上升运动和降水的加强。

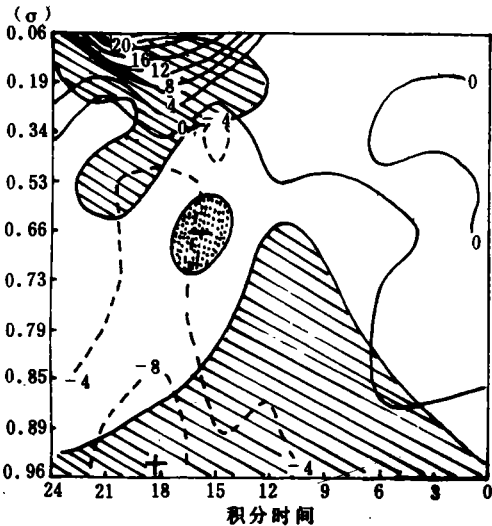


图 4 浙北上空 CTR 与 NHT 试验差值散度场(实线为正,虚线为负,单位: $\times 10^{-5} s^{-1}$)和差值 θ_e 场(斜线阴影区为 +2K 以上正值区,点阴影区为 -2K 以下负值区)的时高剖面

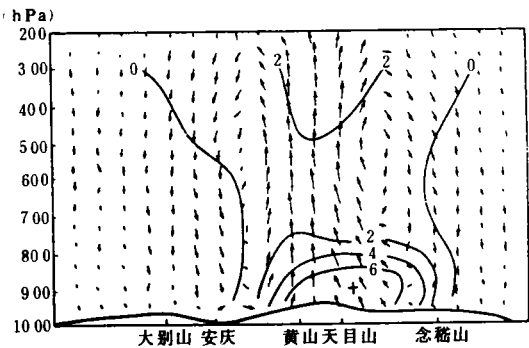


图 5 模式积分 18h,CTR 与 NHT 试验的差值 θ_e (实线,K)和差值垂直环流(箭头)的垂直剖面图(剖面见图 1b 中的 AB)

图 5 是沿雨带所作的强降水时刻(18h)的差值(CTR-NHT)垂直环流和差值相当位温的垂直剖面图(剖面位置见图 1b 中的 AB),显然在黄山、天目山地区存在地形引起的中尺度双圈垂直环流,山地上空为一强上升支,可伸展到对流层顶,在山地上升区两侧是明显的下沉支,且上升支正与地形引起的低层增能($+\Delta\theta_e$)及层结不稳定区相对应。由地形垂直环流强度的时间演变看(图略),在黄山、天目山上空,模式积分 12h,降水开始后,地形上升运动方迅速增强,在短短 6h 内,由小于 $-10 \times 10^{-3} hPa s^{-1}$ 激增到 $-40 \times 10^{-3} hPa s^{-1}$ 以上,而两侧的下沉发展则明显滞后,一直等到上升达最强后,下沉才开始加强,在 21h 达 $+20 \times 10^{-3} hPa s^{-1}$ 以上,这种地形引起的垂直环流的水平尺度约 500—600km 左右。

由上述可知,在有利的天气尺度背景下,中尺度地形首先引起低层水平风场辐合的加强,导致低层水汽和热量的集中和位势不稳定层结的形成,同时地形辐合产生的上升运动

促使不稳定能量释放,对流和降水迅速增强,下面进一步讨论潜热释放和下垫面加热等非绝热过程对地形降水增幅所起的作用。

3.3 潜热释放在降水地形增幅中的作用

从表2可看到,不计潜热释放作用的被动水汽试验(DRY)的降水量远比实况和控制试验小,12h 仅49mm,雨峰强度均小于10mm/h(见图2点线);地形引起的降水增幅,在计入潜热作用时,达178mm/12h;而不计入时则只有33mm/12h,为原地形增幅的18%,显而易见,潜热释放在地形性降水增幅中的重要性。

在 DRY 与 DRNH 的对比试验中,可以看到在不存在潜热释放的条件下,地形作用仍在低层产生一个风场辐合区,其特征与 CTR—NHT 的结果(图3a)十分相似,反映出不论潜热释放机制是否计入,在有利的天气尺度背景下,中尺度地形区仍在低层产生气流辐合,但当潜热释放作用被排除后,地形辐合区上空的垂直环流的强度和伸展高度则大为减小。

图6是浙北上空 DRY 与 DRNH 试验差值散度场和差值能量(θ_e)场的时高剖面图,与图4相比较,可以看到在前12h,降水开始加大前,潜热作用并不明显,地形都能引起低层弱的辐合和水汽热量的集中及上传,但一旦降水开始加大后,潜热作用就变得十分明显,去除凝结潜热释放作用后,在图6上可看到不再出现对流层中高层的增温及相应的高层辐散,因此不利于地形垂直环流的加强和向上伸展,无辐散层始终维持在800hPa 附近,低层辐合也始终较弱,而早先低层增能引起的层结不稳定,也随着降水的产生,而很快趋于稳定。总之潜热释放作用所产生的高层增温和辐散,可使地形在低层产生的影响迅速向对流层中高层传递,对地形性次级垂直环流的加强和上延及相应地形降水的增幅起很明显的正反馈作用。

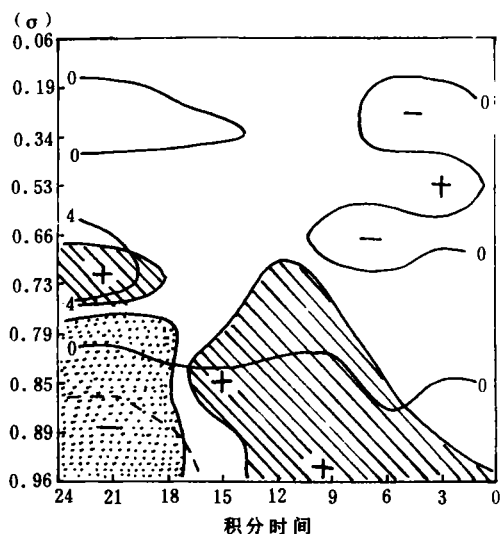


图6 浙北上空 DRY 与 DRNH 试验差值散度场和差值 θ_e 场的时高剖面
(其它说明与图4同)

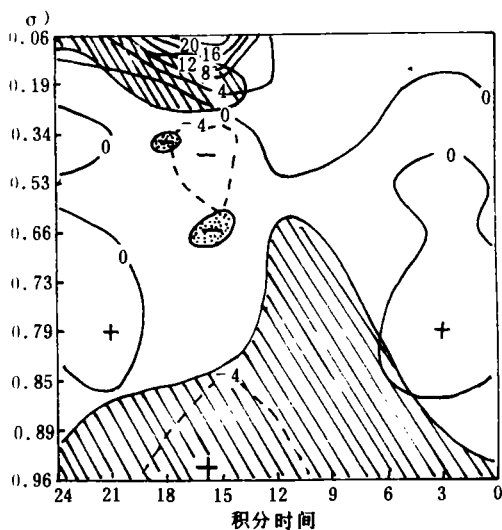


图7 浙北上空 NSF 与 NSNH 试验差值散度场和差值 θ_e 场的时高剖面
(其它说明与图4同)

3.4 下垫面热通量在降水地形增幅中的作用

由图2中点划线可见,不计入地面加热作用的 NSF 试验与控制试验相比,只存在第一

个雨峰,午后3时(积分19h)左右的强降雨峰没有出现,由于无地形的 NHT 试验在该时刻也只出现一个强度约1.5mm/h 的弱降水峰值(见图2的虚线),这表明这场强降水主要是由午后地面加热引起的层结不稳定与地形相互作用而导致的。图7为与图4相似的 NSF 与 NSNH 试验差值散度和差值 θ_e 的时高剖面图,由此图可以看到在午前,地形的影响与计不计入地面加热并无明显关系,可在午后(积分16h 之后),去除地面加热,则使低层的增能中心未能出现,因此相应的低层辐合及高层辐散中心也未出现,降水也就未能增强。因此午后下垫面的加热也可导致地形降水增幅的加强。

3.5 初始中尺度扰动的作用

在用滤除中尺度扰动的初始场所作的模拟试验中,地形引起的降水增幅的强度及分布与控制试验组的非常接近(见表2),地形引起的垂直环流特征及其发展过程也无明显差别。这表明,在这次过程中,初始场上的中尺度扰动对于12h 后地形引起的降水增幅,并不起明显作用,最重要的仍是初始大尺度环境场的特征。

4 结论

本文利用中尺度模式,以一次梅雨降水为例,通过一系列对比模拟试验,研究了华东黄山、天目山中尺度地形对降水的影响,主要结果如下:

(1)大尺度环境条件决定了大范围雨带的形成,而中尺度地形则对强降水中心区的位置和强度有关键影响,强降水中心位于中尺度地形附近,地形引起的12h 降水增幅约占总降水的90%以上。

(2)在有利的大尺度环境条件下,中尺度地形作为一种外界迫动,可造成一系列中尺度动力热力场环境特征:低层气旋性辐合及水汽和热量的集中,形成不稳定层结,并导致深厚中尺度双圈垂直环流的发展,其强上升支正与强降水区相应。

(3)对于降水的增幅而言,地形是通过大气内部的一系列物理过程起作用的。地形所引起的辐合上升,初始仅限于低层,强度也较弱,而通过潜热释放的作用,可使中高层增温和高层辐散加强,这有利于地形垂直环流的向上伸展和加强,从而在降水、潜热释放与地形垂直环流之间出现一种相互促进发展的正反馈机制,最终导致地形对降水的强烈增幅;另外午后下垫面加热所引起的不稳定层结,也有利于地形垂直环流的不稳定发展,出现新的雨峰。

(4)从本个例试验结果看,初始场的中尺度扰动对于后期降水的地形性增幅并无明显影响,重要的仍是大尺度环境流场和热力场条件。

(5)中尺度模式在中尺度地形对降水影响的研究中是一个有效而可行的工具,今后可利用更高分辨的模式和地形资料,对地形性中尺度垂直环流的形成和发展及伴随降水的强烈增幅作更深入的探讨。

参考文献

- [1] 陶诗言等. 中国之暴雨,北京:科学出版社,1980.
- [2] Zhang Yan. Topographic effects on heavy rainfall in the Dongting lake drainage area. Mountain Meteorology, 1982,525—538.

- [3] Ronald B Smith. The influence of mountains on the atmosphere. *Advances in Geophysics*, 1979, 21.
- [4] 黄安丽, 高坤. 地形对台风暴雨降水量的增幅作用. *浙江气象科技*, 1980, (1): 1—6.
- [5] Anthes R A and Warner T T. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon Wea Rev.* 1978, 106: 1045—1078.
- [6] Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon Wea Rev.* 1977, 105: 270—286.
- [7] Hsie E Y, Anthes R A. Simulations of frontogenesis in a moist atmosphere using alternative parameterizations of condensation and precipitation. *J Atmos Sci*, 1984, 41: 2701—2716.
- [8] Deardorff J W. Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models. *Mon Wea Rev.* 1972, 100: 93—106.

THE SIMULATION STUDY OF THE MESO-SCALE OROGRAPHIC EFFECTS ON HEAVY RAIN IN EAST CHINA

Gao Kun Zhai Guoqing Yu Zhangxiao Tu Caihong

(*Department of Geography, Hangzhou University. Hangzhou, 310028*)

Abstract

In order to investigate the meso-scale orographic effects on heavy rain, we conduct a series of sensitivity experiments for a mei-yu case by using of a meso-scale model. It is found that the meso-scale mountain has significant influence on the location and intensity of heavy rain area, the center of heavy rain is located over the mountain area, the orographic increment of 12 hour accumulated rainfall accounts for about 90 per cent of the totals.

The meso-scale mountain, as a foreign forcing, initiates cyclonic convergence and the concentration of heat and moisture in lower layer, then causes middle layer warming through latent heating, and high level anticyclonic divergence, which is favourable for the intensification and upward extension of the orographic vertical circulation. It is the positive feed-back mechanism among precipitation, latent heating and orographic vertical circulation that leads to the intense orographic increment of precipitation. Besides, the instability stratification caused by the afternoon ground heating also contributes to the development of orographic vertical circulation and the generation of new rainfall peak. The meso-scale disturbances on the initial fields seems not to play a significant role in the meso-scale orographic intensification of precipitation.

Key words: Meso-scale disturbance, Orographic intensification effect, Sensitivity experiment.