

暴雨过程中中尺度地形作用的数值试验

翟国庆 高 坤 俞樟孝 屠彩虹

(杭州大学地理系, 杭州 310028)

提 要

本文利用美国 PSU/NCAR 中尺度模式 (MM4) 对 1991 年 7 月 4—5 日浙西皖南山区的大暴雨过程进行了地形作用的数值模拟对比试验。结果表明, 中尺度地形对强降水区的分布和强度有重要影响, 强降水中心位于山地附近; 地形的动力及屏障作用对气流有明显影响; 山区的水汽和热量对静力不稳定亦具有相当作用。

关键词: 中尺度山地; 数值试验; 地形作用。

一、前 言

暴雨的成因是复杂多样的, 其中之一是与地形有密切关系。一些研究和统计表明, 地形对降水的影响十分明显, 大暴雨中心往往出现在有利的地形区^[1, 2]。然而, 由于中尺度地形引起的暴雨时空尺度较小, 难以用一般的诊断分析探讨中尺度地形对降水的增幅作用及其机制, 为了研究中尺度地形对降水的影响, 本文利用中尺度数值模式对 1991 年 7 月 4—5 日的一次长江中下游暴雨过程进行了数值试验, 在对降水作成功模拟的基础上, 将中尺度地形去除, 探讨地形对降水的影响。

二、模式和试验设计

1. 模式简介

本文使用的模式为美国国家大气研究中心的 MM4 中尺度数值模式^[3]。水平网格距取 90 km, 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^[4]。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^[5]。采用总体边界层方案^[6], 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作出预报。地形采用半度分辨的资料。

2. 试验设计

以 1991 年 7 月 4 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, 我们在控制试验的基础上, 将浙西、皖南的黄山、天目山山地 (图 1 中方框区) 高度削减到环境平均高度

(约 100m) 的办法, 来进行无特定地形的模拟试验 (NHT), 并以控制试验与无特定地形试验之差来揭示中尺度地形对降水的总体影响。

三、试验结果分析

1. 降水实况与试验结果

1991 年 7 月 4 日 20 时至 5 日 20 时, 地面准静止锋上逐渐出现一片雨区。其主要降水时段出现在 5 日 08 时至 20 时之间, 雨区呈东西向带状分布, 其中暴雨中心落在黄山附近, 12 小时降水量达 159 mm (见图 1a)。图 1b 为控制试验积分第 12 小时至 24 小时的降水量预报图。由图可见, 控制试验虽然整体雨量预报略小于实况, 且西部汉口地区雨区偏北, 但整体雨带与实况相似。其中大于 50 mm 的暴雨区亦与实况十分接近, 暴雨中心正好落在黄山附近, 12 小时降水预报达 138 mm。可见, 本次过程的模拟是成功的。

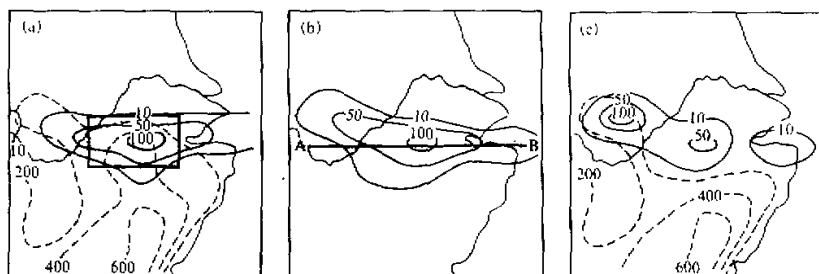


图 1 1991 年 7 月 5 日 08-20 时 12 小时降水量实况及模拟
实线为降水量 (单位: mm), 虚线为地形等高线 (单位: m), 方框为扣除地形的区域
(a) 为实况, (b) 为 CRT 试验, (c) 为 NHT 试验; A、B 线为剖面位置

为了探讨山地对暴雨落区的影响, 我们进行了无特定地形试验 (NHT), 即在相同的初始场、相同的物理模式条件下, 删除了浙西、皖南的山地 (图 1a 中的方框) 之后, 考察其变化。图 1c 给出了 NHT 试验结果。可以看到, 当 NHT 试验 12 小时至 24 小时时, 山区的降水量明显减小且雨带断裂, 原控制试验中黄山附近的暴雨中心减小到 57mm, 而大别山区的雨量则大幅度增加, 达到 112 mm。

海拔 1500 m 的天目山顶测站上的雨量自记资料与 CTR 试验和 NHT 试验中暴雨中心每小时降水量的比较表明 (图 2), 在控制试验中暴雨中心的网格点上, 每小时的降水量曲线上呈现 3 个雨峰 (虚线), 雨峰过程降水分别为 37.2 mm、73.2 mm 和 59.5 mm。距控制试验暴雨中心西北 80 km 处的高山测站每小时降水量也大致能分出 3 个雨峰, 其数值分别为 5.3 mm、85.9 mm 和 4.0 mm。由于测站距试验的暴雨中心格点有一定距离, 其降水值显然存在一定差异, 例如, 天目山测得的第 3 个雨峰为 4.0 mm, 而黄山测得为 20.0 mm。尽管如此, 图 2 中第 2 个雨峰 (虚线) 与实况中主雨峰的对应十分吻合, 其雨量大致相近。去除黄山、天目山地形之后, 原暴雨中心格点上的雨量曲线与 CTR 试验相比, 雨量大幅度减小。由此可见, 中尺度地形对降水及落区有明显的影

响。在本个例暴雨发生时段的 6 小时降水量中地形可引起 71% 的降水增幅。这也证实,浙西、皖南的气候降水大值区及暴雨多发区与该地区的中尺度山地有关。

2. 中尺度地形的动力作用

由于中尺度地形的存在,可在特定地区造成一定的动力作用。图 3 给出黄山、天目山地区出现暴雨之前的近地面(约 300m)风场试验结果。图中箭矢代表风向、风速大小。从图 3a 看到,暴雨区以南盛行西南气流,而暴雨区(黄山、天目山)北侧转为偏南气流且风速减小,减小部位以山地北侧最为明显。这就造成山地地区形成较大风速梯度和风向切变。因而,一旦该地形被去除时,其流场及风速将会出现较大变化。如图 3b 所示的 CTR 与 NHT 试验的差值图(CTR 试验-NHT 试验)表明,围绕山区存在较大的风矢量差,NHT 试验中暴雨区南侧的风速相对减小而北侧则增大。因此,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辐合流场,其风速可达 2 m/s 以上。与此相联系的近地面散度达 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 3c)。相应地在该地区上空,地形可造成中层强上升和高层辐散。如图 4 所示,在经过暴雨中心的東西向垂直剖面上,由于中尺度地形造成的垂直速度可达 $-32 \times 10^{-3} \text{ hPa/s}$,而山区的两侧有明显的下沉气流,构成一个由地形造成的中尺度双圈垂直环流圈。

图 3a 中还给出控制试验积分第 9 小时和第 15 小时的西南大风速中心位置(黑色圆圈),虽然该风速中心随时间向东北推移,中心风速值不断减小,但由于西南气流大风

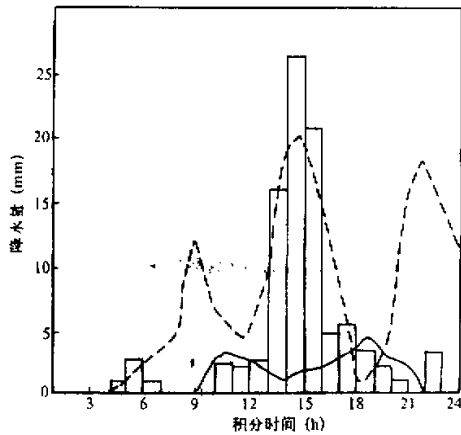


图 2 天目山测站降水实况与模式试验结果
($i=16, j=20$) 的每小时降水量时间曲线
虚线为 CTR 试验, 实线为 NHT 试验,
长方框为天目山顶降水

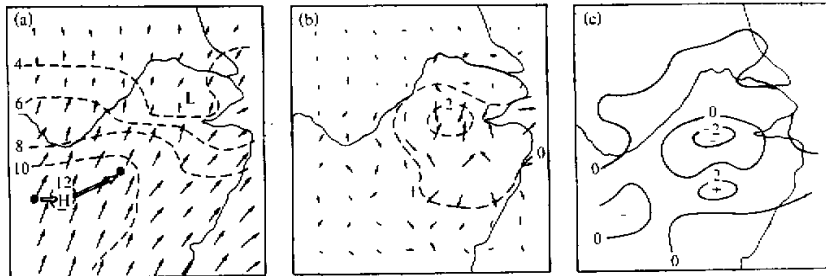


图 3 模式积分第 12 小时的近地面 ($\sigma=0.98$) 风矢场和散度场

(a) 为 CTR 试验, 虚线为等风速线; (b) 为 CTR 与 NHT 试验差值场, 虚线为差值等风速线 (m/s);
(c) 为 CTR 与 NHT 试验差值散度场 ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

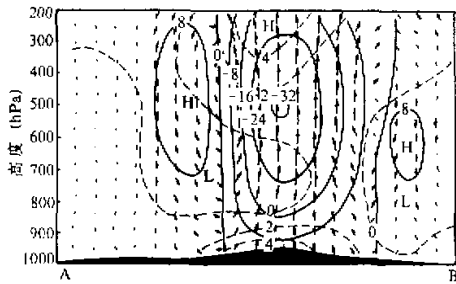


图 4 模式积分第 15 小时 CTR 与 NHT 试验
沿图 1b 中 A、B 剖面差值场
实线为差值 ω 场 ($\times 10^{-3}$ hPa/s),
虚线为差值 θ_e 场 ($^{\circ}\text{C}$)

速中心向暴雨区逐渐靠近,使得暴雨区南侧风速变化并不大。

由表 1 可见,在暴雨时刻(积分第 15 小时)之前,山区南侧西南风速在 9-10 m/s 左右;相反,山区北侧的背风坡偏南风风速减小较快,使得山区南北两侧(约 180 km)的风矢量差增大,最大时可达 8 m/s,从而造成近地面的强烈辐合。

背风坡风速的减小除了与中尺度山脉有关外,与大尺度天气背景也关系密切。由于位于 30°N 左右的暖式切变的发展,使山脉背风坡一侧的气流逐渐转

向东南风。由逐时输出结果可见,风速在逆时针旋转中逐渐减小(图略),而背风坡的小风速区(L)亦向西移(图略),导致积分第 18 小时后的辐合中心向西移到黄山附近。实况降水中,后 6 小时黄山降了 20 mm 雨量。

表 1 控制试验中黄山、天目山南、北两侧风速及差值变化

积分时间 (h)		m / s							
		3	6	9	12	15	18	21	24
地点	山区北侧	7	6	6	4	2	3	3	3
	山区南侧	9	9	10	9	10	7	8	8
	南侧减北侧	2	3	4	5	8	4	5	5

图 5 给出中尺度地形之上的流场随时间变化差值。由图可见,在暴雨发生前期,有无地形的两种试验有明显差别。在控制试验中(图 5a),十分明显地显示出在黄山、天

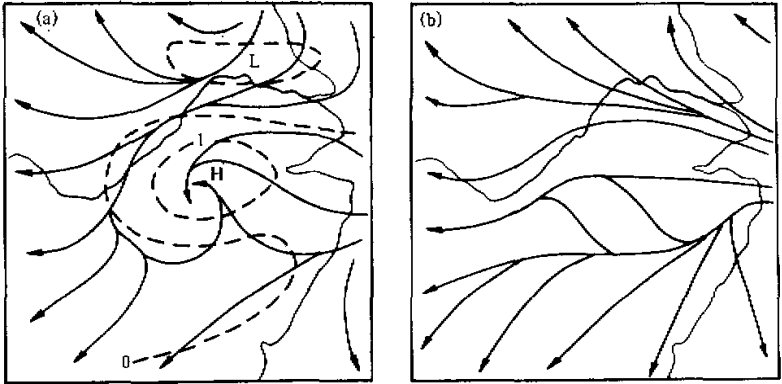


图 5 850 hPa 模式积分第 15 小时与第 12 小时的流场差
(a) 为 CTR 试验,虚线为两时刻的涡度差 ($\times 10^{-3}$ s $^{-1}$); (b) 为 NHT 试验

目山地区气旋性环流得到发展,与其相对应的正涡度增强,这是有利于暴雨发生的动力特征。当去除黄山、天目山地形后(图 5b),气旋性涡旋不再发展,代之以西风减弱或东风减弱,也表明有利于暴雨发生的中尺度动力条件不复存在。因此,由于黄山、天目山中尺度地形的存在,在西南气流下且大尺度暖式切变位于该地区时,可造成该地辐合增强,有利于上升运动的发展、降水的增加。

3. 水汽与热力场对比

图 4 中给出暴雨发生时横切暴雨区的 θ_e 剖面。由图可见,在有无地形试验的对比中,黄山、天目山山地上空至对流层低层出现 θ_e 正值区,而对流层中层为 θ_e 的负值区(该山地对流层高层的高 θ_e 可能为对流向上输送潜热所致)。由此可知,山地的存在有利于对流不稳定的发展,而去除地形后,对流不稳定明显减弱。

从控制试验中近地面($\sigma=0.96$) θ_e 的分析中可以看到,赣西的高能中心逐渐向东北扩展。积分 15 小时时, θ_e 高中心已平流到山区以南,6 小时平流差达 7.6K。有无地形的试验对比表明,位于黄山、天目山地区有一个 θ_e 正值中心且随时间不断增大。图 6 给出了暴雨发生之前有无地形试验的计算差值图。由图可见,黄山、天目山地区为对比高 θ_e 中心(实线)。这表明了由于中尺度地形的存在,有利于在山地地区形成高温和高湿中心。该高温高湿中心的存在则有利于产生对流不稳定层结。图 6 中虚线表示的是潜在不稳定指数

$$P_{SI} = (\theta_{e850} - \theta_{e500}) + (\theta_{e850} - \theta_{es500}),$$

式中 θ_e 为相当位温, θ_{es} 为饱和相当位温。当 $P_{SI} > 0$ 时为不稳定。

可见,在黄山、天目山地区上空存在一个对流不稳定中心。图 4 中的虚线也证实了其空间分布特征。

我们再从暴雨中心($i=16, j=20$)上空相当位温随时间变化进行讨论。图 7 为有无地形试验的 θ_e 差值时空剖面。可以看到,由于中尺度地形的存在,随着模式的向前

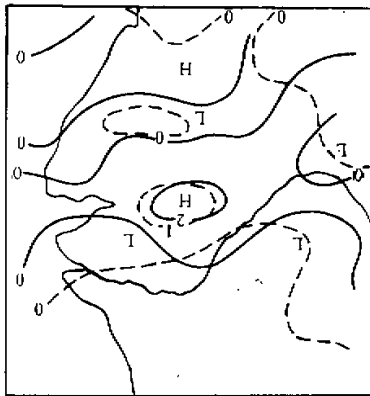


图 6 积分第 12 小时 CTR 与 NHT 试验差值图

实线为 $\sigma=0.96$ 的 θ_e 差值场($^{\circ}\text{C}$),
虚线为潜在不稳定差值场($^{\circ}\text{C}$)

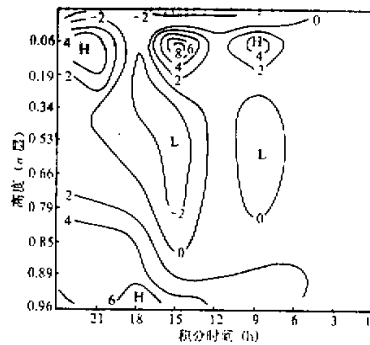


图 7 山地上空($i=16, j=20$) CTR 与 NHT 试验 θ_e 差值时空剖面图

积分, 首先是低层能量逐渐增强, 在降水发生时, 中层相当位温差值减小, 这与低层的增能一起导致中低层大气层结不稳定的加强。

四、结 论

(1) 控制试验能较好地模拟出降水的分布和暴雨区, 特别是发生在黄山、天目山山地的强暴雨中心; 有无中尺度地形的试验表明, 本次个例中尺度地形对降水的增幅可达 70% 以上。

(2) 中尺度地形可引起流场上的涡旋及风速差造成风场上的辐合并导致围绕山脉的垂直双圈环流; 在暖式切变发展过程中, 地形起到明显的增强作用。

(3) 中尺度地形可引起低层静力能量的增加和中层能量的减小; 山区为对流不稳定区, 对暴雨的发生及加强有重要作用。

参 考 文 献

- [1] 陶诗言等, 1980, 中国之暴雨, 科学出版社。
- [2] Zhang Yan, 1982, Topographic effects on heavy rainfall in the Dongting Lake drainage area, *Proc. First Sino-American Workshop on Mountain Meteorology*, The Chinese Academy of Science and the U.S. Academy of Science, 18-23 May 1982, Beijing, Amer. Meteor. Soc., 525-538.
- [3] Anthes, R. A., and T.T. Warner, 1978, Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045-1078.
- [4] Anthes, R. A., 1977, A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 270-286.
- [5] Hsie, E.-Y., and Anthes, R. A., 1984, Simulations of frontogenesis in a moist atmosphere using alternative parameterizations of condensation and precipitation, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2701-2716.
- [6] Deardorff, J.W., 1972, Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models, *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 93-106.

Numerical Simulation of the Effects of Mesoscale Topography in a Heavy Rain Process

Zhai Guoqing, Gao Kun, Yu Zhangxiao and Tu Caihong

(Department of Geography, Hangzhou University, Hangzhou 310028)

Abstract

By use of the mesoscale model (MM4) from PSU / NCAR, a strong rainfall event during 4-5 July 1991 in the mountain area of the Zhejiang-Anhui provinces is simulated. It is found that the mesoscale mountain has significant influence on the location and intensity of the heavy rain area, the center of the heavy rain is located over the mountain area. Analysis of numerical simulation of CTR and NHT shows that the effects of the orographic dynamics and barrier on airflow plays an important role in the development of instability. The moisture and heat in the mountain area play similar roles.

Key words: mesoscale mountain range; numerical simulation; effect of the orographic.