

2

p 426.62

120-128

# 一次华南暴雨过程的数值模拟和试验<sup>①\*</sup>

张立凤 查石祥 张 铭  
(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

P437

**摘 要** 本文利用有限区域数值预报模式MM4对一次华南暴雨过程进行了数值模拟和试验。用该模式预报的形势场与实况较一致,预报的暴雨强度、位置也与实况相近。此外由控制试验和敏感性试验可知,该暴雨强度对地形、辐射和下垫面过程比较敏感。

**关键词** 暴雨; 华南地区; 有限区域模式。  
**分类号** P437

数值模拟

## 引 言

暴雨是我国常见的灾害性天气,特别是华南地区,其常常可引起山洪爆发、滑坡、泥石流、江河泛滥等自然灾害,给国民经济和人民生命财产造成巨大损失,了解暴雨形成的机制,提高暴雨预报的准确率是减灾防灾的一项重要措施<sup>[1]</sup>。近年来,应用数值模式进行数值试验是暴雨研究的一个新方向,数值试验成为研究暴雨的一种重要工具正日益到人们的重视<sup>[2]</sup>。其主要表现在两个方面:一是对模式的性能进行检验,以提高暴雨数值预报的准确率;二是在由控制试验接近实况的基础上,对暴雨产生的各种条件进行数值试验,以了解暴雨过程的机理。

1992年5月6日至9日在华南、华东和黄海地区均出现了不同程度的降水,并于7日和8日分别有两次中尺度对流云团生成,造成华南地区出现暴雨天气。在香港地区,这次暴雨过程引发了山洪及泥石流,造成了人员伤亡。此时正值夏季风爆发之际,在5月7日08时(北京时,下同)500hPa的形势图上:高纬度的贝加尔湖以北有一准稳定的横槽;中纬度为较平直西风,其中有一较弱的西风带槽由华北伸展至长江流域;在低纬度,盛行的西南季风穿越中南半岛经华南、华东沿海、黄海直达朝鲜半岛。在中南半岛有一弱南支槽。850hPa上华北到华中有一西风带槽,槽前西南风大于10m/s,在黄海气旋暖区,西南急流大于20m/s。温、湿场上有暖舌、湿舌相配合。海平面气压场上一低压槽由黄海伸展至华南,槽内有一条冷锋,北部湾及其以北陆地有一低压倒槽,华南处于该锋前的暖区(图均略)。从卫星云图上(图略)可见,7日8时在华南有大片云区,其中在北纬25度以南,海岸线以北,东经110度到115度为强对流云团。14时,原云区移向东南,并与北段冷锋前的云系连成一片,其中,沿华南海岸线形成强对流云带。20时,原云带主体已移至海上,到达台湾以东洋面。原存在于台湾东南洋面的孤立强对流云团消失。8日08时,移入海上的云带主体已消失。另外在华南有两对流云团生成,其一在广

① 收到日期:1999-03-18;修改稿日期:1999-06-10。  
\* 国家重点基础研究专项经费(编号G1998040907)资助。

西、广东交界处,另一在海上,其北部边缘在海岸线上(香港等地)。上述暴雨天气即在地面为锋前暖区,低空有急流存在,中高空受南支槽影响的有利大尺度背景下发生。

## 1 试验方案

美国国家气象中心和宾洲大学开发的中尺度数值模式 MM4 是目前国内外气象界中应用得最广泛的模式之一。本文就是利用这个模式对上述发生在华南的该次暴雨过程进行了数值模拟和数值试验。由于该数模式 MM4 在很多文献上均有介绍<sup>[3][4]</sup>,这里不再赘述。

本文采用的 MM4 模式其中心位置是(119.5°E, 24.5°N),水平网格取 31×31,格距为 90km。模式垂直等距分为 10 层,Δσ=0.1,模式层顶气压 P<sub>10</sub>=100hPa。侧边界取海绵边界,模式中物理过程考虑了扩散过程、辐射过程、边界层过程、水循环过程、干对流调整等。试验资料是由香港天文台提供的同化后每 6 小时一次的 1°×1°的球面网络资料,该资料包括 10 个标准等压面(1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100hPa)上的位势高度、风、温度和湿度,将这些物理量内插到该模式网格点上作为模式初值。地面气压 P<sub>0</sub>是利用地形、海平面气压、850hPa、700hPa,和 500hPa 的位高度和温度等因子计算得到。

为讨论各物理过程对该华南暴雨系统的影响,本文设计了七个试验。表 1 列出了每个试验的具体方案。各试验积分起始时间均为 1992 年 5 月 7 日 08 时。为检验模式的计算稳定性,还分别做了 48 小时和 72 小时的积分,其积分均稳定正常。由于资料的缘故,这里仅对 5 月 7 日的暴雨过程作了数值模拟和试验,故积分的时效均取为 24 小时。下面各节中则对这些模拟和试验的结果进行分析。

表 1 试验方案  
Table 1 Experiment scheme

试验	CONF	地形	辐射过程	水循环过程	下垫面过程
exp1	100%	有	有	有	有
exp2	100%	无	有	有	有
exp3	—	有	无云	干	有
exp4	90%	有	有	有	有
exp5	90%	有	无云	有	有
exp6	80%	有	有	有	无
exp7	80%	有	有	有	有

注:CONF 为大尺度凝结阈值

## 2 试验结果的分析 and 讨论

为考察该模式对华南暴雨的预报能力,本文首先做了控制试验 exp1,该试验考虑了所有的物理过程,然后讨论了各物理过程对这次暴雨的影响,即试验 exp2~exp7。

### 2.1 控制试验对形势场的预报

12 小时预报的 700hPa 形势场与实况吻合,其中西风带槽已移至黄海,与实况的移动一致,槽前西南气流的强弱和范围等均与实况相符,只是对西风带槽南伸范围预报得比实况略小,槽后的西风气流预报得略偏弱。此外,南支槽的移动略偏慢。24 小时形势场的预报与实况

相比,各主要系统与实况也基本一致,其中西风带槽已移至朝鲜半岛(参见图 1a、图 1b)。200hPa 上 24 小时风场预报的效果也可令人满意,预报风场与实况均较接近(图略)。

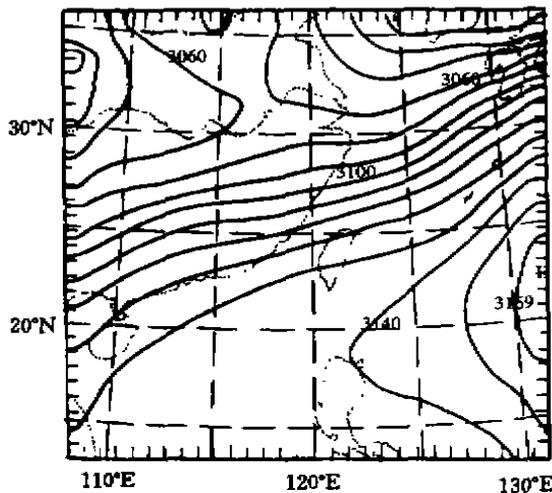


图 1a expl 预报的 700hPa 上 24 小时高度场  
(单位:位势米,等值线间隔,10 位势米)

Fig. 1a The 700hPa height field of 24 hour forecast in expl (Unit: geopotential meter, Contour interval is 10 geopotential meter)

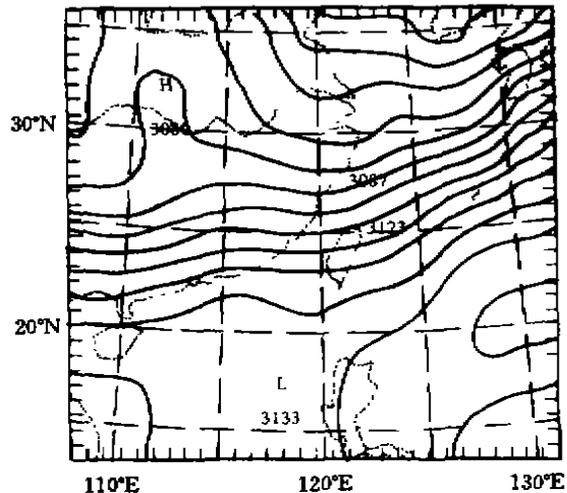


图 1b 相应的 700hPa 高度实况  
(单位:位势米,等值线间隔,10 位势米)

Fig. 1b The corresponding observed 700hPa height field (Unit: geopotential meter, Contour interval is 10 geopotential meter)

各时次和层次的温、湿场的预报与实况相比。在 850hPa 和 200hPa 上,12 小时预报的温度场与实况接近。500hPa 上 12 小时温度场的预报结果在模式区域的南部稍差,主要表现在菲律宾岛的低温区预报成为高温区,这是由于在该处预报出了虚假的降水,有虚假的凝结潜热释放所致(图略)。

## 2.2 控制试验对降水的预报

从 7、8 日的实况降水看(参见图 2,直接从日常天气图上统计的每 6 小时累计降水量),08 时至 14 时,在广西、广东、闽西至浙江南部有~狭长雨带,最大降水中心与强对流云团相对应,在梧州附近,6 小时累计降水达 72mm。14 时~20 时,北段在金华一带有一雨区,极值为 34mm,南段降水主体已移入海上,只有广东沿海少数几个测站有降水记录。20 时~8 日 02 时,在温州附近有降水,达 25mm,同时华南西部重新出现对流降水区,极值在广西融安附近,达 40mm。8 日 02 时~08 时,有两降水区,其中一个在桂林至柳州一带,柳州降水达 77mm,另一个在香港至海丰降水达 62mm。

模式对各主要降水中心均能预报出来,落区也基本一致(参见图 2、图 3)。12 小时降水预报图上(图略),与华南暴雨区对应的降水在广东、福建到浙江有一大于 5mm 的降水区,极值出现在厦门附近,为 24.3mm。与实况比较,实际降水区要比预报的降水区大,向西延伸到了广西境内,且梧州、龙岩、金华等几个站的降水均大于 36mm,其中梧州站达 72mm。由此可见 12 小时预报降水的雨区范围和强度均比实况小,这与该试验中大尺度降水凝结阈值 CONF 过大及模式本身存在的滞后误差有关。24 小时降水预报报出的雨区(>5mm)与实况相近,同时在 (112°E, 25°N) 和 (25°N, 118°E) 分别预报出两个降水中心,其中心值分别为 25.4mm 和

66.6mm(参见图 3a、图 3b)。在降水实况场上,由于其时、空分辨率较差及有不少站记录缺失,故未能得到 24 小时累计降水量的精确分布,但不难发现,实际降水存在多个大于上述预报中心值的降水中心。对预报的降水做进一步的分析可知,在每个降水中心,大尺度降水所占的份额很小。以华南东部降水中心为例,24 小时大尺度降水为 3mm,积云对流降水为 63.6mm。这反映了这次暴雨过程中对流性降水是主要的。

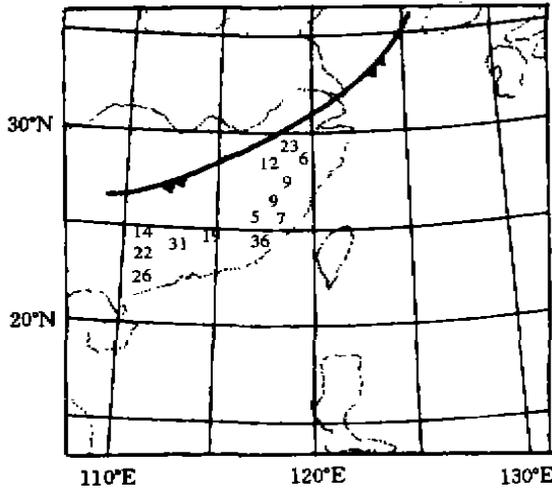


图 2a 7 日 08 时~14 时实况累计降水(单位:毫米)  
Fig. 2a The observed 6 hour precipitation amount; 00 GMT 7 to 06 GMT 7 May 1992(Unit, mm)

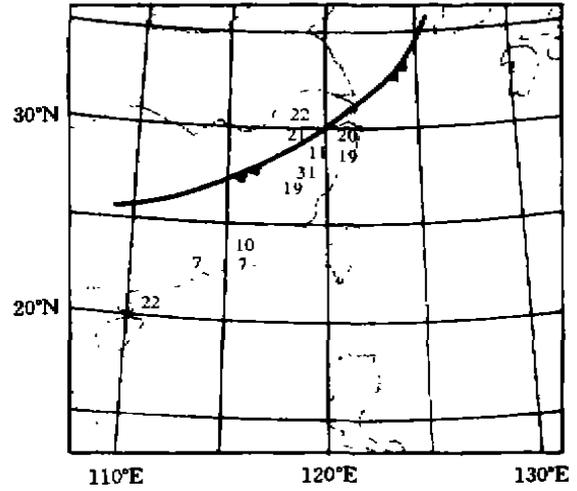


图 2b 7 日 14 时~20 时实况累计降水(单位:毫米)  
Fig. 2b The observed 6 hour precipitation amount; 06 GMT 7 to 12 GMT 7 May 1992(Unit, mm)

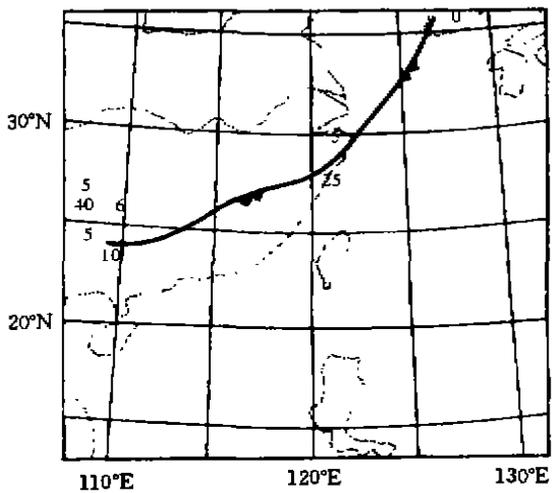


图 2c 7 日 20 时~8 日 02 时实况累计降水(单位:毫米)  
Fig. 2c The observed 6 hour precipitation amount; 12 GMT 7 to 18 GMT 7 May 1992(Unit, mm)

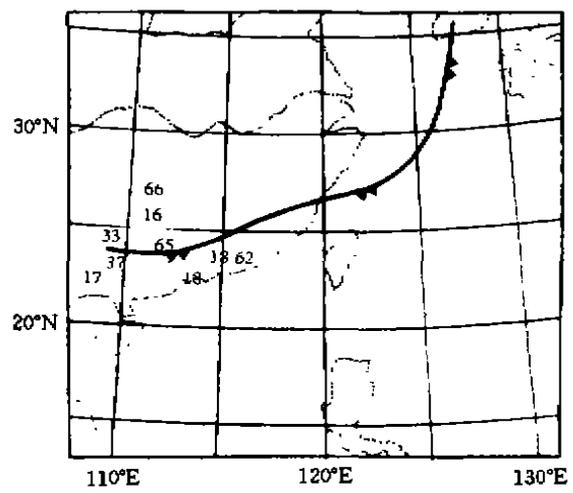


图 2d 8 日 02 时~08 时实况累计降水(单位:毫米)  
Fig. 2d The observed 6 hour precipitation amount; 18 GMT 8 to 08 GMT 9 May 1992(Unit, mm)

此外,在海上预报的降水区(主要是台湾东南洋面)尽管没有实况资料可进行对比,但与卫星云图相对照,可以发现二者配合得很好。在菲律宾北部则预报出了一个虚假的降水区,这或许是 MM4 中的积云对流参数化方案不宜应用到纬度很低的地区且这也与模式对该处地形的处理有关,在无地形的对比试验 exp2 中,这一虚假降水有明显的改善。

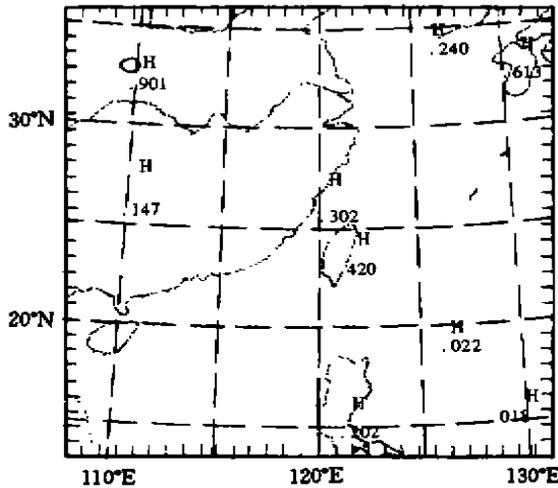


图 3a exp1 预报的 24 小时累计大尺度降水  
(单位:cm,等值线间隔:1cm)

Fig. 3a The forecasted 24 hour large scale rainfall amount in exp1 (Unit:cm, Contour interval is 1 cm)

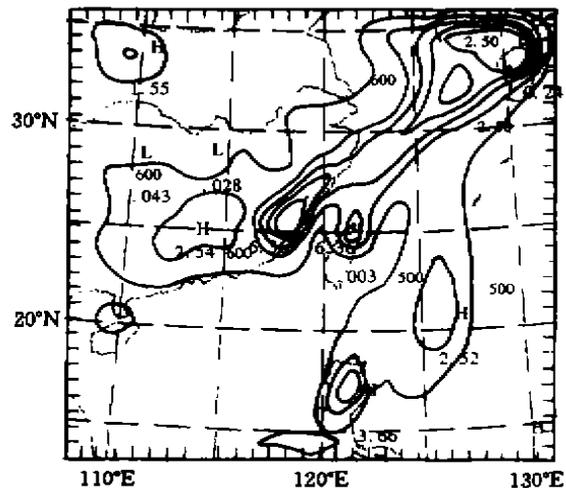


图 3b exp1 预报的 24 小时累计对流降水  
(单位:cm,等值线间隔:1cm)

Fig. 3b The forecasted 24 hour cumulus convective rainfall amount in (Unit:cm, Contour interval is 1 cm)

通过以上分析可知,控制试验对 5 月 7 日天气过程的形势(风场、高度场)预报及降水预报与实况基本一致;但因大尺度凝结阈值 CONF 取得稍大(100%),故预报的降水量略偏小;但从总体上看,该模式对华南暴雨系统具有预报能力,其预报结果也是可信的。

### 2.3 模式中物理过程对暴雨预报的影响

#### 2.3.1 地形的影响

大量研究表明,强降水系统的发生与发展常和特殊的地形条件密切相当。最典型的例证是青藏高原和四川盆地特殊地形诱生的西南涡<sup>[6]</sup>。在华南暴雨过程中,常伴有西南低空急流,西南气流流经南岭山地时,地形的抬升强迫无疑对强对流系统的生成和发展有利。在试验 exp2 中则去掉了模式地形,并将其结果与 exp1 作对比,以了解地形对这次暴雨过程的影响。

12 小时预报的风场和高度场两者相比较后可见,它们很相似;但模式区域北部槽后西北气流 exp2 要比 exp1 预报得强,伸展的范围也大些,这是由于不考虑地形后,削弱了地形对槽后西北气流的阻挡所致(图略)。

对应华南暴雨的东、西两个强降水中心,模式最低层 12 小时预报的上升速度分别由考虑地形的  $-2.12 \times 10^{-2} \text{hPa/s}$ 、 $-1.43 \times 10^{-2} \text{hPa/s}$  减小至不考虑地形后的  $-1.06 \times 10^{-2} \text{hPa/s}$ 、 $-0.74 \times 10^{-2} \text{hPa/s}$ 。且不考虑地形后其位置要略向东至南偏一些。这说明地形抬升作用占最低层总上升速度量的一半,且对系统移动有阻挡作用。

不考虑地形后,预报的 24 小时累计对流降水也减少,西部强降水中心的值由 25.4mm 下降至 22.4mm,东部该值则由 63.6mm 降至 43.0mm。且落区东移明显(参见图 4)。这与上述地形对低层垂直运动的影响是一致的。此外,不考虑地形后,在菲律宾不再有虚假的强降水中心(参见图 3b、图 4)。由此可见,对华南地区的暴雨,地形有使其增强的作用并会阻止雨区东移。

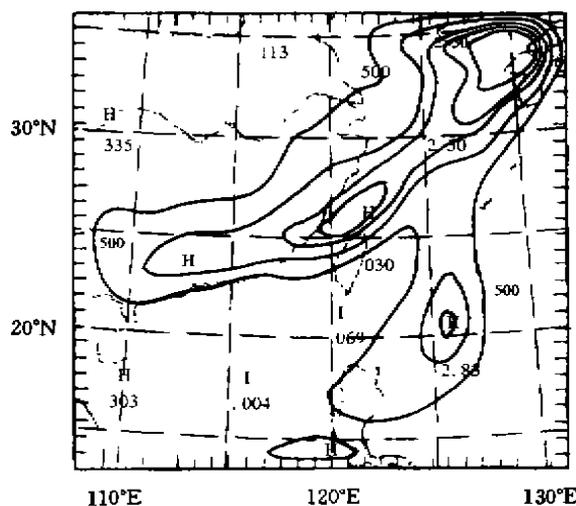


图 4 exp2 预报的 24 小时累计对流降水(单位:cm,等值线间隔:1cm)

Fig. 4 The forecasted 24 hour cumulus convective rain fall amount in exp2(Unit:cm,Contourinterval is 1 cm)

### 2.3.2 凝结加热对温度场的影响

湿物理过程是数值模式中最重要过程之一。这里将不考虑湿物理过程的 exp3 与 exp1 的模拟结果作对比,以讨论凝结加热对暴雨系统温度场的影响,而模式降水对大尺度降水凝结阈值 CONF 的依赖性及其与大尺度降水与积云对流降水之间的相互作用则放在后面讨论。为此,这里将 12 小时 exp1 预报的各层温度场减去 exp3 预报的相应场,可得其差值场。从该场的分布可见,在低层(700hPa),对应于各主要降水中心,均有负值温差中心出现,而对应于华南暴雨区的两个负值温差中心其值最大,分别为 $-2.92$ 度和 $-3.33$ 度(参见图 5a)。在高层(500hPa 和 300hPa),对应于降水区则均为正温差中心(参见图 5b)。在对流层顶附近(200hPa),对应于该暴雨区的是两个负值差中心(图略)。故凝结加热对暴雨系统的总体影响是:大气低层降温,中高层增温,对流层顶附近又降温。这不难从热力学方程中得到解释:在华南暴雨系统中,由于其水平温度梯度小,故热力学方程中的强迫项可归结为绝热项和非绝热项两者总贡献的大小。在低层,绝热项占支配地位,由于湿物理过程的垂直运动 $\omega$ 其值远大于干过程,因而在 exp1 出现更大的绝热冷却量。在中高层,绝热项与非绝热项两者均为大项,因 exp3 中没有考虑非绝热加热项,其温度必然低于 exp1;同时,温度场上二者没有出现悬殊的差别,这也说明在 exp3 中系统要弱一些。在对流层顶及以上,非绝热项同样不占支配地位,而 exp3 中由于系统发展较弱,该处往往有下沉运动,造成绝热增温,所以 exp1 中温度低于 exp3。

### 2.3.3 辐射的影响

太阳短波辐射是大气运动的最终能源,故对气候的研究辐射过程是不能不考虑的。关于辐

射对短生命史的强对流天气系统的影响,已有的研究表明,在强对流的初生期,夜间云覆盖区边界两侧辐射不同导致的温差常能影响大气低层的层结稳定度,导致热力次级环流的出现,从而在晴空一侧触发对流。对于发展成熟的对流系统,虽然因存在深厚的云层,在各层次中对短波辐射的吸收和长波辐射的冷却都比较大,但它们的净贡献比凝结潜热的释放量还要小两个量级,尽管如此,它仍能导致大气层结稳定的降低,并使降水增幅。

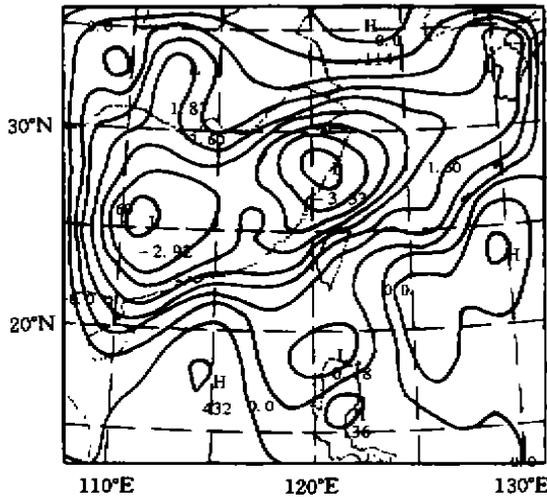


图 5a 预报的 12 小时 700hPa 温差场  
(exp1~exp3,单位:度)

Fig. 5a The forecasted 12 hour 700hPa temperature difference field(exp1-exp3,Unit: °C)

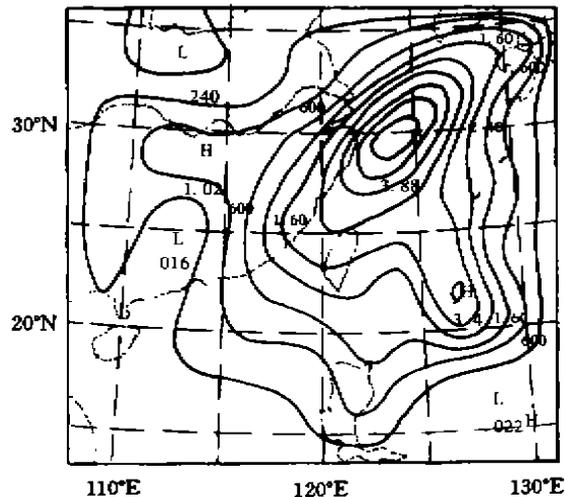


图 5b 预报的 12 小时 500hPa 温差场  
(exp1~exp3,单位:度)

Fig. 5b The forecasted 12 hour 500hPa temperature difference field(exp1-exp3,Unit: °C)

MM4 辐射计算方案分为云天和晴空两种。exp4 和 exp5 分别就这两种不同方案作了数值试验。在试验中发现,云天和晴空这两个试验中各降水中心的雨量均存在不同程度的差异(图略)。考虑云对辐射的影响后,华南东部的降水中心值由 76.3mm 增至 125mm,西部的中心值由 34.2mm 增至 45mm;值得一提的是:台湾东南洋面上的降水中心值反而略有减少,由 86.0mm 减至 69.8mm。在模式最低层的垂直运动场上,对应该降水中心的最大上升速度则略有减少;其产生的原因主要有以下两点:第一,陆地与海洋热容量上的差异,导致洋面上系统对辐射作用的响应慢且弱,陆地则相反;第二,云对辐射的影响与云本身的性质(厚度、云高、云中水物质含量)有关。除台湾东南洋面的降水区外,与其它所有降水区相对应,在温度差值场上(其意义同图 5),850hPa 和 500hPa 为负值温差,700hPa 为正值(图略)。这说明在降水区,exp4 低层比 exp5 暖,700hPa exp4 比 exp5 冷,500hPa exp4 比 exp5 暖,因而考虑云对辐射影响后,大气层结在 850hPa-700hPa 间有失稳效应。这与上述降水的增幅和低层垂直运动的增强是一致的。台湾东南洋面上情形则有较大的不同,温度差值场上 850hPa exp4 和 700hPa 为正值温差,500hPa 为弱负值温差。

#### 2.3.4 下垫面过程的影响

模式下垫面的感热和水汽交换是天气系统最主要及直接的热源和水汽源,对模式降水预报有着直接的影响。试验 exp6 中不考虑下垫面的感热和水汽交换过程。本节将该预报结果与试验 exp7 进行了比较(exp7 与 exp1 全同,仅其 CONF 值取 80%,即与 exp6 中取得相同)。

从 exp6 与 exp7 的 24 小时累计对流降水相比较可见(图略):下垫面的感热和水汽交换对降水影响很大。华南和黄海的降水在不考虑这种作用后,均减小近一半。台湾东南洋面的降水则由 143.0mm 剧减至 27.6mm。这说明海气相互作用对海洋上大气运动的影响比陆气相互作用对陆面上大气运动的影响要大得多。

### 2.3.5 模式降水对大尺度凝结阈值(CONF)的依赖性

在试验 exp1~exp7 中(exp3 除外),大尺度凝结阈值 CONF 分别取了 100%、90%、80%,本文的模拟结果显示,模式降水(包括大尺度降水和对流降水)对该 CONF 的取值有较大的依赖性,大尺度降水与对流降水之间存在较强的相互作用。

表 2 给出了上述试验中的模式降水。分析该表可有以下几点看法:

第一,模式降水对 CONF 的依赖性较强。以华南东部暴雨中心为例,CONF 取 80%、90%、100%,对应的 24 小时累计降水量则为 209.1mm(exp7)、152.0mm(exp4)和 66.6mm(exp1)。

第二,CONF 取值不同,不仅大尺度降水量会变化,积云对流降水量也有变化,且变化更显著。例如,试验 exp1 中 CONF 取 100%,在华南暴雨东部降水中心,预报的 24 小时大尺度降水与积云对流降水分别为 3.0mm 和 63.3mm,试验 exp4 中 CONF 取 90%,上述的对应值则分别为 27.0mm 和 125.0mm。可见大尺度降水增强,通过释放潜热加热大气,导致该区域减压,从而加强低层的辐合和垂直上升运动,有利于对流的发生发展;而积云对流的发生发展加强了水气的垂直输送,使水汽含量更易达到或超过大尺度凝结阈值。

第三,对比表明,大尺度凝结阈值 CONF 以取 80%为宜,该值也是通常所取的,此时模式降水无论在量值上还是在落区上都较合理。

表 2 各试验中主要降水中心预报降水量(单位:mm)

Table 2 Predicted precipitation amount (Unit:mm)

序号	CONF 值	华南西部		华南东部		台湾东南洋面	
exp1	100%	0	15.0	0.3	24.0	0	11.2
		1.5	25.4	3.0	63.6	0.2	25.2
exp2	100%	0	0	0.2	18.3	0	11.1
		0	22.4	0.8	43.0	0	28.3
exp4	90%	3.3	0	2.6	23.2	1.1	12.9
		10.5	45.0	27.0	125.0	6.6	69.8
exp5	90%	3.3	0	2.5	23.0	1.1	12.9
		9.3	34.2	14.5	76.3	7.9	86.0
exp6	80%	11.4	9.4	9.7	22.6	4.4	11.1
		19.4	21.4	40.1	66.7	11.2	27.6
exp7	80%	12.0	10.0	10.3	23.3	6.0	20.3
		24.1	43.2	68.4	140.7	48.3	180.6

注 1,表中数据存放顺序:12 小时累计大尺度降水,12 小时累计对流降水,

24 小时累计大尺度降水,24 小时累计对流降水

注 2,表中“0”表示该项降水中心不存在

## 3 结 语

本文利用有限区域模式 MM4 对一次华南暴雨过程作了数值模拟和试验,并得到以下结论:

(1)有限区域模式 MM4 对华南地区的暴雨是有预报能力的,其预报的形势场和降水区域

与实况较一致。

(2)对该模式中物理过程的强迫响应,华南暴雨系统和台湾东南洋面上的降水系统这两者存在着明显的差异,模式中物理过程的处理直接影响到其预报降水的能力。

(3)对华南暴雨,地形强迫的作用较大,不考虑地形时降水中心的雨量减小一半。

(4)在预报华南暴雨时,模式中辐射的参数化方案必须要考虑云的作用,否则预报的降水量会明显减少。

(5)下垫面的感热和水汽交换也是该模式在预报华南暴雨时必须考虑的物理过程,对海洋上的天气系统海气相互作用更是重要。

(6)模式降水对大尺度凝结阈值(CONF)依赖性较强,积云对流降水和大尺度降水之间存在明显的协同作用。

本文仅对华南地区的一次暴雨过程作了数值模拟和试验,其结果虽有一定的局限性,但以上结论对实现暴雨数值预报的业务化和提高暴雨数值预报的水平均具有现实意义。

### 参 考 文 献

- 1 中科院大气所,东亚季风和中国暴雨—庆贺陶诗言院士八十华诞文集,气象出版社,1998.
- 2 朱翠娟等,‘87.8’济南地区特大暴雨的中尺度数值试验,科学通报,1998,20.
- 3 郑维忠等,中尺度数值模式(MM4)模拟系统介绍,南京大学出版社,1992.
- 4 R. R. Anthes et al, Description of the open state/NCAR Mespscale Model Version 4(MM4),1987.
- 5 Kuo Y-H et al, 中尺度西南涡的模拟, Mon. Wea. Rev., 1998, 126, 116.

## THE NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTS OF A STORM RAINFALL IN SOUTH CHINA

Zhang Lifeng Cha Shixiang Zhang Ming

(The Meteorological Institute of PLAUST, Nanjing 21101)

**Abstract** The numerical simulation and experiments of a storm rainfall in South China are investigated by limited-area model MM4. The weather system and precipitation predicted by the model is close to the real case. The results of control experiment and sensitivity experiments also show that the precipitation is highly sensitive to the physical processes, for example topography, effect of cloud in radiation heating, the exchanges of heat and vapor between ground(or sea surface)and atmosphere.

**Key words** Storm rainfall; South China area; Limited-area model.