

卫星资料反演湿度场改变模式初值对降水预报的影响*

齐艳军¹⁾ 王汉杰²⁾ 程明虎¹⁾

¹⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

²⁾(空军第七研究所,北京 100085)

摘 要

为探讨初始场资料在数值预报中的重要性,用高分辨率卫星 T_{BB} 资料反演的云内湿度场来改进模式初值,初步研究分析了改进的模式初值对降水预报的影响。以湿绝热过程的变态方程为积分方程,由卫星 T_{BB} 资料反演出大气中各等压面层湿度场。通过对比分析反演的湿度场与客观分析(T106)的水汽场,发现两者有较大区别,前者更加合理地反映出降水区域高空湿度场的分布。利用中尺度模式 MMS 将有限区域的常规探空资料和非常规资料进行同化,并对暴雨两个例进行预报对比试验。不同初值的对比试验表明,在模式的初始场中引入卫星资料反演的湿度场后,明显地改善了模式降水预报的强度和落区,比仅使用常规探空资料更接近于实况。

关键词:卫星资料 反演湿度场 数值模式 初始场 控制试验

引 言

中尺度大气数值模式 MMS 已被广泛用于对热带风暴、暴雨、锋面气旋、中尺度对流系统等重要天气过程的数值模拟和研究,并能成功地模拟出一些天气事件的发生、发展^[1-4]。许多研究考察了中尺度模式对初始条件、边界条件和物理过程等方面变化的敏感性试验,结果表明,在其他模拟条件不变的情况下,初值质量对暴雨中尺度系统结构与演变以及降雨量的模拟结果有决定性的影响^[5]。Zhang 等^[6]在模拟中- β 系统时发现,当模式初始场中缺乏重要的中尺度信息时,模拟的中尺度现象的时间、落区和幅度将会有很大误差。因此,初值的不精确、不客观往往影响预报效果,甚至导致预报的失败。

由于目前常规探空站网的时空局限性,在对一些强对流天气过程进行数值模拟时,这些常规资料不能分辨中- β 尺度环流系统,对模式的初始场质量会有一定影响。因此,采用适当的方法将非常规观测资料同化到模式初始场中,有效地改善初始场资料的质量和密度是提高中尺度预报模式水平的有效途径之一。

用卫星资料反演的云内湿度场改进数值预报模式的初始场,并应用到暴雨预报中已有过研究。朱民等^[7]通过对卫星图像进行降水概率和降水强度的分析,揭示大气中高湿区的分布范围,并对卫星测值与各标准等压面层的相对湿度进行逐步回归分析。闵锦忠

* 由中国科学院知识创新工程项目 ZKCX2-SW-210 和空军专项 KJ02253 课题共同资助。

2002-09-17 收到,2003-04-17 收到再改稿。

等^[8]利用改进的统计反演方法求出温度和湿度估计场,并对反演出的温度和湿度场采用变分方法与常规观测资料进行同化。两种方法都不同程度的提高了降水预报的准确性。而利用简单经验方法估算云内湿度、液态水含量的研究很多^[9,10],但是随着卫星探测技术及穿云飞行的普及,这种经验方法逐渐被新的研究方法所取代。本文利用中尺度模式 MM5,以湿绝热过程的变态方程为积分方程,将卫星 T_{BB} 资料反演的云内湿度场代替大尺度背景场中的水汽场做初值,对有限区域的常规探空资料和非常规资料进行同化和数值模拟,对暴雨个例进行预报对比试验,探讨使用卫星资料提高暴雨数值预报水平的可能性。

1 资料和方法

本文使用的卫星资料取自 GMS-5 的红外 1 通道的云图灰度值资料,灰度等级分为 256 级(-128~127),时间间隔为 1 h 一次,分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (约 10 km)。根据该通道的云图灰度值与温度换算表,将灰度值转换成温度值,在本文中把此温度值作为云顶温度(T_{BB})处理。 T_{BB} 越低,表明云顶越高,对流层中的水汽分布也越高。

要根据 T_{BB} 资料反算出大气中各等压面层上的湿度场,需首先确定云底高度和云顶高度。由地面抬升一个气块到达饱和高度,则可得到抬升凝结高度(LCL),这个高度一般接近对流云底的高度,用迭代法可求出抬升凝结高度处的温度和气压。设抬升凝结高度处的相应变量为: $p_L, T_L, q_L, e_L, \theta_L$ 。

在地面,气压、温度和比湿是已知的,即

$$p = p_s, T = T_s, q = q_s$$

相应地面的位温为

$$\theta_s = T_s \left| \frac{1000}{p_s} \right|^{R/c_p} \quad (1)$$

其中 R 和 c_p 分别是气体常数和定压比热。在气块达到饱和之前的上升过程中,下列一些量是保守的:

$$\theta_L = \theta_s, q_L = q$$

为求出 p_L ,首先对气压 p_L 给出一个初值 p_L^1 ,由泊松方程可求出温度初值^[11]:

$$T_L^1 = \theta_s \left| \frac{p_L^1}{1000} \right|^{R/c_p} \quad (2)$$

由水汽压方程可求得比湿

$$q_L^1 = \frac{0.622 e_L^1}{(p_L^1 - 0.378 e_L^1)} \quad (3)$$

其中,

$$e_L^1 = 6.11 \exp \left| \frac{a(T_L^1 - 273.16)}{T_L^1 - b} \right|$$

式中 a 和 b 是常数,对于水面饱和情况取 $a = 17.26, b = 35.86$ 。

比较 q_L^1 与 q_s 的大小,如果 $(q_L^1 - q_s) < 0$,则继续对 p_L 给出一个新的估值,即

$$p_L^2 = p_L^1 + 1$$

然后重复上述过程,再比较 $(q_L^n - q_s) < 0$,直到迭代 n 次后,此时有 $(q_L^n - q_s) > 0$,则此时的气压 p_L^n 即抬升凝结高度被求出。此高度可近似视为云底高度。

云顶高度的计算方法有多种。如果对云顶高度的要求不是很精确,则可近似取为 200 hPa;或者可通过云底的 γ_m 线与环境曲线 γ 的交点来计算云顶高度。但当环境大气有一定的湿度时,这样计算的云顶高度会有误差。本文采用湿绝热过程(以可逆凝结绝热过程为依据)的变态方程来计算云顶高度及各等压面层各格点的温度值。

可逆凝结绝热过程的变态方程^[12] :

$$\ln \frac{p - E}{p_0 - E_0} = \frac{c_{pd} + w_0 c_w}{R_d} \ln \frac{T}{T_0} + \frac{1}{R_d} \left| \frac{L w_s}{T} - \frac{L_0 w_{s0}}{T_0} \right| \quad (4)$$

式中 E 是饱和水汽压, w_0 是空气微团内液态水和水汽的质量总和, w_s 是饱和混合比, L 是凝结潜热, c_{pd} 为干空气定压比热, R_d 为干空气比气体常数, c_w 由水汽比热求得, T_0 , p_0 , E_0 , L_0 和 w_{s0} 表示初值。

由克拉贝龙-克劳修司方程 E 为 T 的函数 $E = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T}{237+T}}$, 又 $w_s = 0.622 \frac{E(T)}{p}$, 故上式是以 p 、 T 为独立变量的函数关系。

为了将卫星 T_{BB} 资料同化到模式中去(即与模式的格点相匹配),先将以经纬度为坐标的灰度值按照 GMS-5 红外 1 通道的云图灰度值和温度对照表转换成温度值,并插值到模式中兰勃脱投影的相应格点(i, j)上,然后围绕格点做网格平均。

模式中垂直方向 p 分为 25 层(1000、975、950、925、900、850、800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300、250、200、150、100、70、50、30、10 hPa),积分方程(4)是关于 p 、 T 的函数,由此方程可以算出对流层各层各格点的温度值。在具体计算过程中,只有有云的情况下(约束条件设为 $(T_s - T_{BB}) \geq 20$ °C, T_s 是地面温度),才计算对流层各层各格点的温度值 T 。当 T 与相应格点的 T_{BB} 接近时(控制 $|T - T_{BB}| < 1$ °C),此时的高度 p 即为云顶高度。自抬升凝结高度至云顶这一区域内,湿空气是饱和的,相对湿度达到 90% 以上,本例中取此区域的各等压面层的各格点的相对湿度 f 为 95%,并用该格点的相对湿度代替 T106 客观分析场中相应时次、相应层次和相应格点的相对湿度。将经过湿度场订正的初始场作为模式初值对个例进行数值模拟。

为了了解卫星 T_{BB} 资料反演的湿度场对模拟结果的影响,以初始时刻(1998 年 7 月 20 日 00:00 UTC)的 850、700 和 500 hPa 的相对湿度场为例,给出订正前后初始场中各等压面层上相对湿度的分布。我们分别分析比较了 850、700 和 500 hPa T106 客观分析的相对湿度场、T106 加入常规探空资料的相对湿度场、以及相应时刻经 T_{BB} 订正后(包括常规探空资料)的相对湿度场分布(图略)。结果发现:加入探空资料的相对湿度场分布与以 T106 为背景场的相对湿度场分布一致,加入探空资料的相对湿度场丰富了暴雨区的水汽信息,在 500 hPa 高度上尤为明显。而将卫星反演的湿度场资料引入初始场,较之前两者仅使用大尺度资料、稀疏站点探空资料能够更好地反映出湿度场的水平中尺度结构特征,尤其是合理地增强了对降水有重要影响的高湿区的湿度。如中层 500 hPa 位于两湖盆地和长江中下游地区的高湿中心,低层 850 hPa 位于河南、山西交界处的高湿中心等。

2 数值试验

2.1 试验设计

本文选取的个例是 1998 年 7 月 20 ~ 22 日的湖北区域特大暴雨过程。采用双向嵌套的非静力中尺度数值模式(MM5 V2)对此个例进行数值模拟试验研究。

模拟区域的中心位置定于武汉($31^{\circ}\text{N}, 114^{\circ}\text{E}$), 母域和子域是同一中心。水平网格点数均为 61×61 , 粗细网格的水平分辨率分别为 60 km 和 20 km, 模式的地形和下垫面资料使用了 $30' \times 30'$ 地形资料和 13 类地表特征资料。垂直方向为 σ 坐标, 共有 26 层。初始场资料来源于国家气象中心全球谱模式 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ 的 T106 分析场, 该资料包括 16 层标准等压面上的位势高度场、温度场、湿度场、风场、地面温度和海平面气压等要素。常规资料使用了每隔 12 h 的实时探空资料和地面观测资料, 共 5 个时次, 即从 1998 年 7 月 20 日 08:00 至 22 日 08:00(北京时)。非常规资料使用了卫星 T_{BB} 资料反演的湿度场。

物理过程采用显式水汽(混合冰相)方案, 该方案考虑了冰相过程, 允许过冷水的存在。在该方案中包括了水汽、云水、雨水、云冰和雪的预报方程。对次网格尺度降水方案采用 Grell 对流参数化方案。侧边界条件采用时变流入流出方案。行星边界层过程用高分辨率 BLACKADAR 参数化方案。地面温度考虑了辐射和热交换过程, 从地面能量方程中计算得到。大气辐射采用简单辐射冷却方案。积分时间为 48 h, 积分起始时间为 1998 年 7 月 20 日 00:00 UTC, 结束时间为 7 月 22 日 00:00 UTC。积分步长为 120 s。

2.2 初始场方案设计

为了能够清楚地说明使用高分辨率的卫星反演资料对降水预报的影响, 在模拟过程中设计了两套初始场方案:(1) 以国家气象中心提供的 T106 全球分析场作为第一猜测值, 通过 CRESSMAN 客观分析方案进行再分析, 由最后的客观分析场产生初估值, 同时使用常规探空资料(方案 1); (2) 在方案 1 的基础上, 在模拟区域内引入模式初始时刻(7 月 20 日 00:00 UTC) 的卫星反演湿度场资料, 即把云的信息加入初始场(方案 2)。在方案 2 中引入了除背景场外的两种不同来源的资料, 但试验表明在模式的计算中未发生任何的计算不稳定现象。

本文分别采用这两种方案对 1998 年 7 月 20 ~ 22 日的湖北特大暴雨进行数值模拟, 并对两种方案模拟结果进行对比分析。

2.3 模拟结果分析

(1) 水汽条件

将卫星反演的各等压面层的湿度场引入模式初始场后, 对模式输出的相关物理量分析看出, 暴雨区的水汽信息比仅用常规探空资料模拟的水汽场要丰富。从 7 月 22 日 00:00 UTC 850、700 和 500 hPa 等压面上的相对湿度场分布可以看出, 从 850 hPa 到 700 hPa, 90% ~ 100% 的相对湿度范围逐渐缩小, 直到 500 hPa, 水汽集中地区是一条东北—西南向的南北约 200 km 的狭长区域带(图略), 这和 7 月 22 日 00:00 UTC 的 24 h 雨带分布(图 7) 形状非常相似。

对比两种方案的相对湿度沿经度 114°E 的剖面图, 方案 2 的水汽通道(图 1b) 比方案

1 的水汽通道(图 1a) 深厚。尤其 22 日 00:00 UTC,在武汉及其周围地区上空是强的上升运动区(图 2),最大上升速度为 0.3 m/s,其高度分别达到 450 hPa 和 600 hPa。伴随强上升气流,引入卫星反演的湿度场资料后,100%的水汽饱和线上升到了 350 hPa(图 2),而仅用常规资料的 100%水汽饱和线在 500 hPa(图 1)。

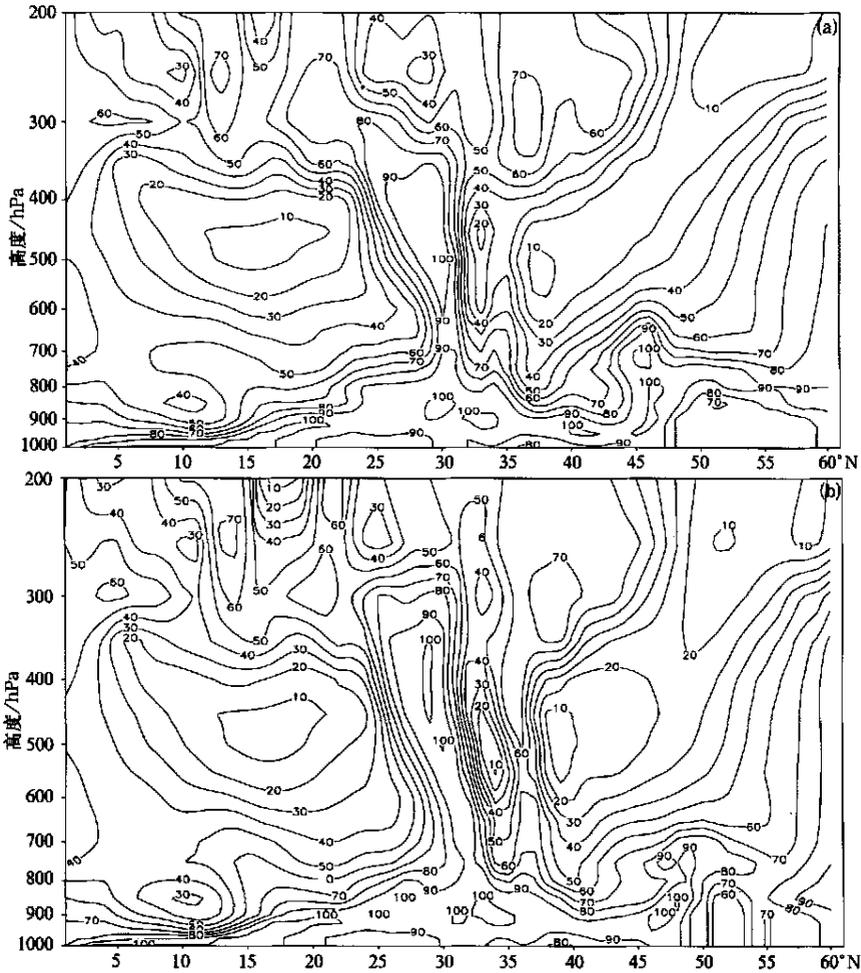


图 1 1998 年 7 月 22 日 00:00 UTC 相对湿度沿 114°E 的剖面图
(a) 方案 1, (b) 方案 2

(2) 低涡及切变线附近的涡度、散度特征和不稳定条件

由诊断分析表明,长江流域的低涡及切变线是产生 7 月 20~22 日长江中下游地区大暴雨的重要系统。同时,方案 1 对中尺度低压系统的模拟^[13]也说明了此低涡在暴雨中的重要影响。根据模式采用方案 2 输出的一些物理量,给出了散度、涡度、水汽及假相当位温在低涡及切变线附近的分布,以更进一步了解产生该特大暴雨的动力、热力条件。

从与垂直速度(图 2)相应的散度垂直剖面(图 3)和 700 hPa 的涡度场(图 4)分布图上,可以看出,暴雨地区高空辐散,低空辐合;中尺度低涡正好对应正涡度区。

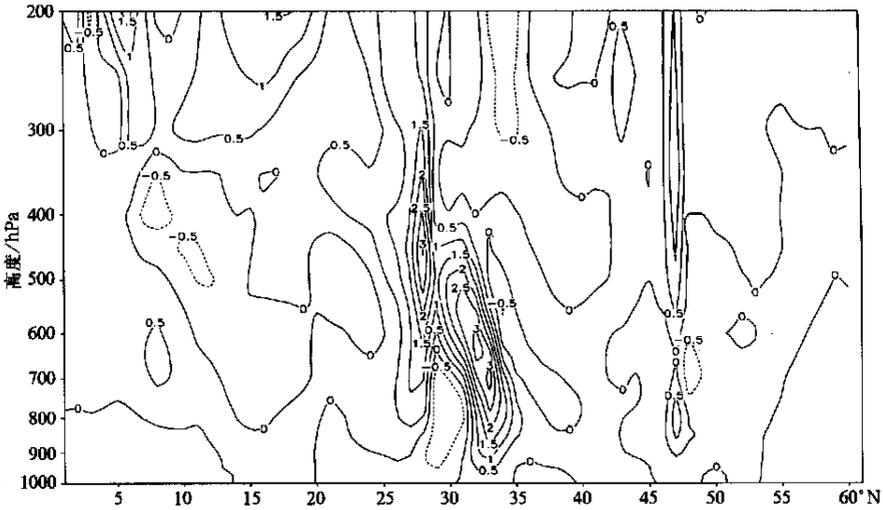


图2 7月22日00:00 UTC沿114°E的垂直速度剖面图(单位: 10^{-1} m/s)

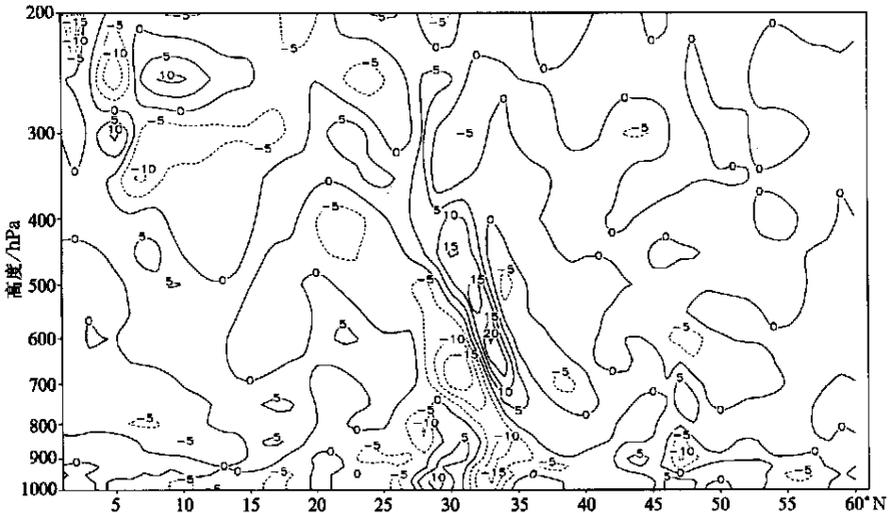


图3 7月22日00:00 UTC沿114°E的散度剖面图(单位: 10^{-5} /s)

在暴雨期间的7月21日00:00 UTC,低涡及切变线附近存在湿对流不稳定,如图5所示的相当位温垂直剖面图。在近地面层相当位温的值最大,对流层下层是高温高湿(图5和图1)的不稳定层,即 $-\frac{\partial \theta_e}{\partial p} < 0$;在850~600 hPa之间,大气层结是湿中性层结,即 $\frac{\partial \theta_e}{\partial p} \approx 0$;到22日00:00 UTC,低涡附近仍维持较强的不稳定性,但略有减弱。湿对流不稳定的这种热力-动力结构可能是暴雨湿对流运动强烈发展的一种重要特征。

(3) 降水模拟

从粗网格模拟的降水结果看,预报的24 h和48 h降水的雨带分布与实况(图6)一致,方案2(图7a,7b)模拟的降水分布比方案1(图8a,8b)似乎更合理一些,虚报的降水中

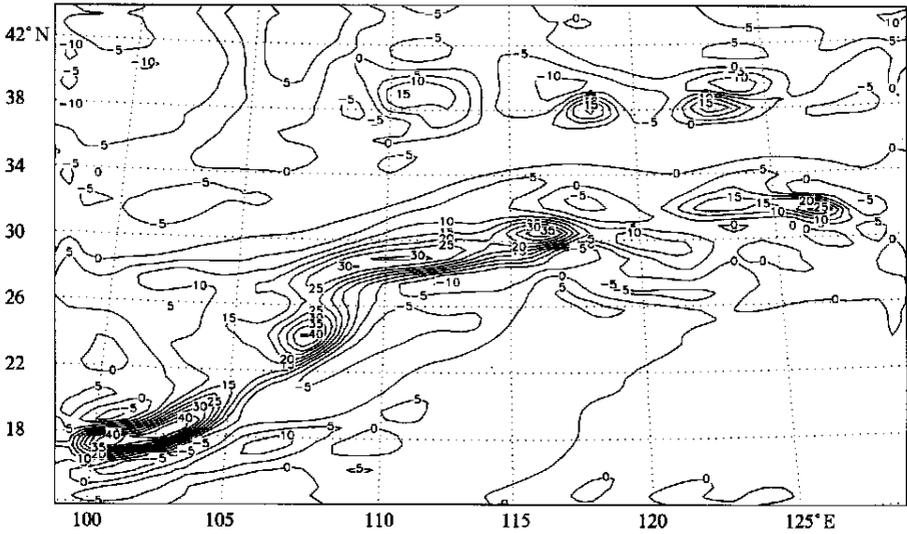


图4 7月22日00:00 UTC 700 hPa上的涡度场分布(单位:10⁻⁵/s)

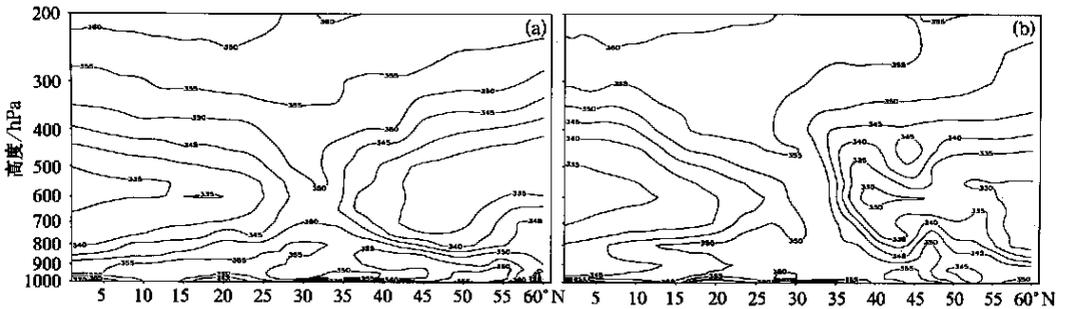


图5 7月21~22日相当位温的垂直剖面图
(a) 21日00:00 UTC, (b) 22日00:00 UTC

心有所减弱。例如,在7月21日的24 h降雨量图上,鄂西南和湖南西北部地区的降水中心强度为150 mm,而在方案1中的相应时段粗网格的降水中心最大值为200 mm,实际观测值为166 mm(湖北来凤)。3个强降水中心的位置与观测的更加接近。中心雨强比方案1的模拟结果有所提高。

在细网格模拟的降水分布图上可看出,方案2和方案1的24 h降水分布略有不同。在方案2中,≥50 mm的雨量范围扩大,雨强中心突出,尤其是武汉的降水中心位置就落在武汉地区(30.5°N,114.1°E)。鄂西南和湖南西北部地区的降雨中心也向东移动了约一个经度,与实况更接近。此中心的雨量明显比方案1模拟的大,100 mm的雨量范围相当于方案1中50 mm雨量的范围,且位置北移。

从48 h的细网格模拟降水分布图(图7b)上可以看出降水仍然很大,这和实况是一致的。在22日武汉市周围汉阳市的日降雨量达185 mm,模拟的中心位置和雨强都比较接近实况。湖北东部的降水中心向东推进,直到安徽,雨量中心最大值较方案1的小。

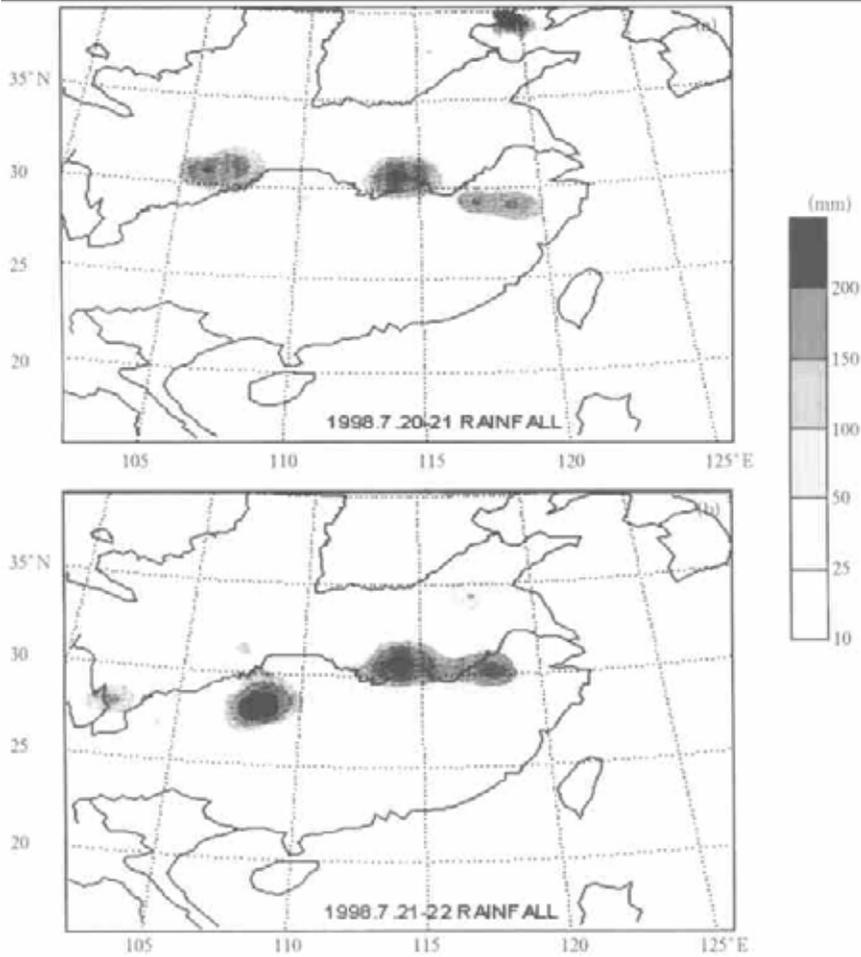


图 6 1998 年 7 月 20 ~ 21 日(a) 和 21 ~ 22 日(b) 的 24 h 降水实况(mm)

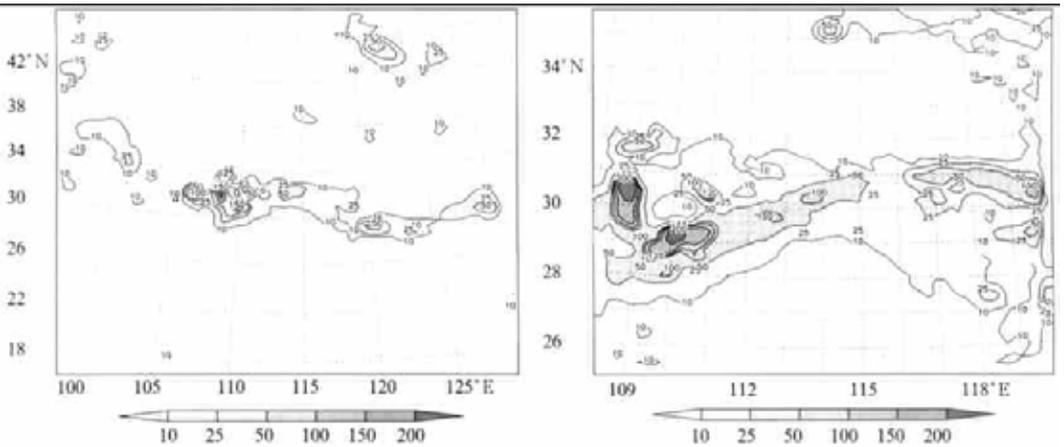


图 7a 1998 年 7 月 21 日 24 h 的粗(左图)
细(右图) 网格降水模拟(方案 2)

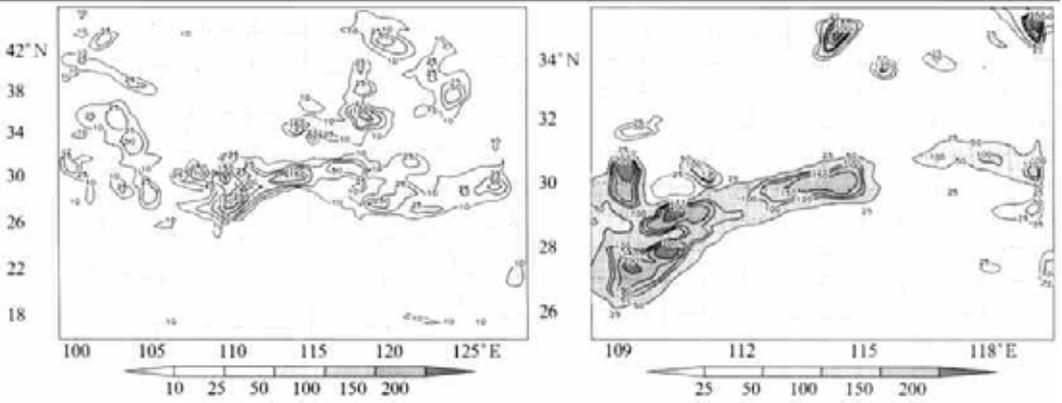


图 7b 1998 年 7 月 22 日 24 h 的粗(左图)
细(右图)网格降水模拟(方案 2)

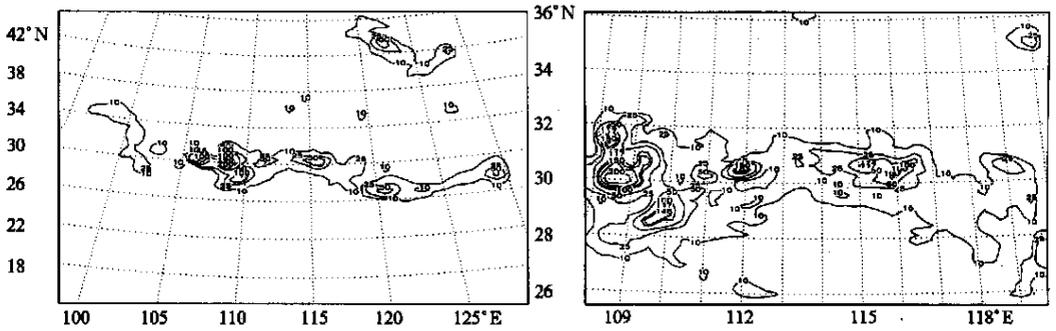


图 8a 1998 年 7 月 21 日 24 h 的粗(左图)
细(右图)网格降水模拟(方案 1)

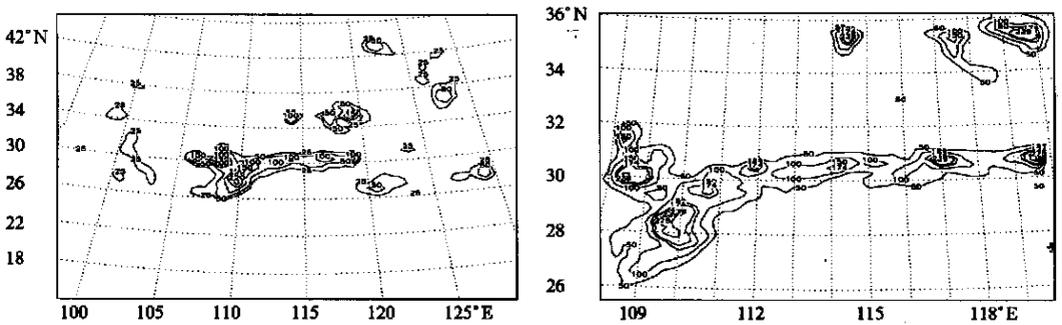


图 8b 1998 年 7 月 22 日 24 h 的粗(左图)细(右图)网格降水模拟(方案 1)

3 小结与讨论

用湿绝热过程的变态方程为积分方程,将卫星 T_{BB} 资料反演的云内湿度场代替大尺

度背景场中的水汽场做模式初值对暴雨个例进行预报对比试验,对有限区域的常规探空资料和非常规资料进行了同化和数值模拟。初步研究表明,模式初值质量对模拟的结果有直接的影响。用 T_{BB} 资料反演的云内湿度场与客观分析场有较大区别。用 T_{BB} 资料反演的大气中各层湿度场和用客观分析的大尺度背景场相比,前者合理地增强了对降水有重要影响的高湿区的湿度,可以为模式提供较好的初始场信息。由于需要抬升凝结高度到云顶之间各等压面层的相对湿度分布来丰富模式初始场中的水汽信息,故这一做法只限于对流云的情况。

对降水的模拟结果分析表明,粗、细网格均能较好地模拟出雨带的分布和变化,以订正过的湿度场为初始场模拟显示,降水的强度和落区比仅使用常规探空资料的结果与实况更加接近,尤其是在模拟区域的中心,降雨中心位置更精确。在强度上,细网格的模拟结果较粗网格有明显的提高。两种方案的模拟过程中,在对流参数化、侧边界条件、大气辐射方案等物理过程以及模拟区域、格点大小、格距等不变的情况下,仅改变模式初始场,且初始场中包含有更丰富的水汽信息时,在模拟的中心——武汉地区的降雨位置和强度更接近实际观测值,这说明在中尺度模式中同化卫星信息的重要性。

致谢:中国气象科学研究院朱蓉研究员提供了降水实况图,特此致谢。

参考文献

- 1 Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR Mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 1493 ~ 1513.
- 2 Kuo Y-H, Cheng L, Anthes R A. Mesoscale analyses of the Sichuan flood catastrophe 11-15 July 1981. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 1984 ~ 2003.
- 3 Chen S J, Kuo Y H, Wang W, et al. A modeling case study of heavy rainstorms along the Meiyu front. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 2330 ~ 2351.
- 4 张庆红,刘启汉,王洪庆,等.华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟.科学通报,2000,45(18).
- 5 程麟生, Kuo Y H, 彭新东.中国暴雨中尺度系统发生与发展的诊断分析和数值模拟, II: 数值模拟.应用气象学报,1993,4(3): 269 ~ 277.
- 6 Zhang D L, Fritsch J M. A case study of the sensitivity of numerical simulation of mesoscale convective system to varying initial conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 2418 ~ 2431.
- 7 朱民,郁凡,郑维忠,等.卫星反演湿度场及其在暴雨预报中的初步应用分析.气象学报,2000,58(4): 470 ~ 478.
- 8 闵锦忠,沈桐立,陈海山,等.卫星云图资料反演的质量控制及变分同化数值试验.应用气象学报,2000,11(4): 410 ~ 418.
- 9 王鹏飞,李子华.微观云物理学.北京:气象出版社,1989.163 ~ 169.
- 10 邹进上,刘长盛,刘文保.大气物理基础.北京:气象出版社,1982.115 ~ 117.
- 11 丁一汇.天气动力学中的诊断分析方法.北京:科学出版社,1989.44 ~ 46.
- 12 杨大升,刘余滨,刘式适.动力气象学.北京:气象出版社,1983.20 ~ 23.
- 13 齐艳军,仪清菊,程明虎.1998年长江嫩江流域特大暴雨的成因及预报应用研究.北京:气象出版社,2001.192 ~ 202.

THE INFLUENCE OF INITIAL CONDITION ADJUSTMENT USING SATELLITE DERIVED HUMIDITY ON PRECIPITATION FORECASTING

Qi Yanjun¹⁾ Wang Hanjie²⁾ Cheng Minghu¹⁾

¹⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*Climate and Environmental Research Center, Beijing 100085*)

Abstract

To improve the accuracy of model initial field, a preliminary analysis of the impact of initial condition adjustment using satellite-derived humidity on the precipitation forecasting is carried out. Taking the wet-adiabatic equation as integral equation, the humidity field on each standard isobaric surface derived from satellite TBB data is used to improve the model initial conditions. An inter-comparison study is carried on between the satellite-derived humidity and T106 objective analyzed humidity. It is found that there is a big difference between the model outputs driven by two different humidity fields. The simulation results driven by satellite-derived humidity depict the upper air humidity distribution above the precipitation region very well. Thus, a data assimilation technique based on the meso-scale model MM5 is performed to assimilate the conventional observation data and the high-resolution satellite-derived data. A rainstorm case is simulated in order to compare the precipitation forecast capability with different initial fields. The experiments show that when the satellite-derived humidity is assimilated into the initial condition, both the intensity and the area of simulated precipitation are more close to the measured precipitation as compared with those only using the conventional observations.

Key words: Satellite data Derived humidity MM5 Initial field Control experiment