

卫星亮温资料四维同化方案及其对 “7·20”武汉特大暴雨的模拟试验*

孟智勇 徐祥德 陈联寿

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

P426 A

摘要 作者首次把与云参数相关的云顶亮温(T_{BB})资料直接用于中尺度模式 MM5V2 的牛顿张弛逼近 (nudging) 四维同化过程, 提出了一种通过分析场的 nudging 四维同化来确定云顶高度的方法, 并利用 1 h 间隔的 T_{BB} -nudging 方案成功地模拟了“7·20”武汉大暴雨过程。 T_{BB} -nudging 试验的模拟结果表明对流层低层中尺度低涡和低空西南急流是“7·20”大暴雨的主要影响系统, 这预示着把卫星遥感资料 (例如 T_{BB} 等) 用于中尺度模式的同化过程有可能提高中尺度暴雨的预报能力。

关键词: 云顶温度; 四维资料同化; 暴雨

1 引言

提高数值预报水平的途径一般有两个: (1) 改进模式物理过程; (2) 改进模式初始场。在过去的 30 年中, 人们不断在数值模式初始场的优化方面做工作, 发展了复杂程度不同的把观测资料加入数值模式的方法, 其中, 比较流行的两种四维资料同化方法为牛顿张弛逼近 (nudging) 和变分同化。四维变分同化是一种比较严谨的资料同化方法, 是四维同化发展的方向。然而, 四维变分同化因其计算量非常大, 世界上仅有少数几个国家实现了业务化。而 nudging 四维同化方法比较简单, 易于实现, 而且许多研究结果都证明其有一定的改善预报的作用^[1~4]。

所谓 nudging 就是一种连续性的动力同化方法, 它通过对模式控制方程的强迫使模式值逐步逼近观测值。这种修正过程中每一时间步长模式都保持各要素场之间的平衡。前人的研究表明^[5~9], nudging 可用来同化任何时空分布的与模式变量相对应的资料。常用的 nudging 方法有两种。其中一种为格点分析场的 nudging, 这种方法比较适用于空间分辨率较高的情况。另外一种为站点资料的 nudging, 这种方法可用于时间分辨率较高及非常规资料的情形。本文所用的方法即为站点 nudging 方案。这种方案不仅可同化非常规资料, 而且因其提供平衡较好的模式初始场而显著减小模式初始时的 spin-up 效应。

由于观测手段的日益改进, 我们已能得到各种各样的非常规资料。具有较高时空分辨率的非常规资料已成为科研业务领域重要的资料来源。人们正逐渐尝试把这些非常规资料用于数值模式。Davidson^[10]及周霞琼^[11]等通过分析卫星反演的云顶亮温资料 (T_{BB}) 来改进模式物理过程参数化的加热廓线的分布, 从而成功地模拟了热带气旋的

2000-12-20 收到, 2001-03-22 收到再改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040911 资助

运动。 T_{BB} 资料长期以来一直被用来分析天气系统的位置、活动以及相应的天气现象及其强度^[12,13]，然而至今尚无人尝试把 T_{BB} 资料直接同化到模式中。本文将利用适于同化高时空分辨率的站点 nudging 四维同化方案把 T_{BB} 资料直接用于中尺度模式 MM5V2 的四维同化过程，并利用该方案对 1998 年夏季一次暴雨过程作了模拟试验。

T_{BB} 是气象卫星在大气窗区的红外探测通道获取的云顶和无云或少云区地球表面的向外辐射，以相当黑体温度 (Black-Body Temperature, 缩写为 T_{BB}) 表示，并且又被称为“亮度温度”或简称为“亮温”，它是形成云图和多种增强显示云图最原始的观测资料。在无云或少云区， T_{BB} 是地表黑体辐射温度，其值一般为大于 0 的较高值，且高值区常常与高压系统相对应。云区中的情况则相反， T_{BB} 是云顶的辐射温度，其值较低，一般小于 0。并且 T_{BB} 越低，表明云顶越高，对流越旺盛，故 T_{BB} 低值区一般为云区。尤其在夏季和热带地区更是如此，比如“ITCZ”通常与 -10°C 对应^[13]。因此，可以根据 T_{BB} 的这些特征推断天气系统的位置、活动以及相应的天气现象及其强度。

无论是从时间平均^[14]还是短时效应^[15,16]来讲，云顶温度与降水均有较好的对应关系。云顶温度可认为与其高度处的环境温度相等^[11]，如果把与降水有较好对应关系的云顶温度作为云顶高度处的大气温度观测同化到模式中，使同化后的初始场中包含有云团的热力结构演变特征，则有可能会提高模式对暴雨的模拟能力。

2 模式和资料介绍

本文所用模式为 PSU/NCAR 的 MM5V2，中心经纬度为 (110°E , 30°N)，格点数为 61×88 ，水平格距为 45 km，垂直方向为 23 层 σ 坐标。

积云对流参数化方案为 Grell 方案，显式方案为混云 (mixed cloud) 方案，辐射方案为云方案，无浅对流，PBL 采用 Blackadar 方案，侧边界采用 12 h 时变边界。

本文所用资料为国家气象中心提供的 T106 全球分析场资料，水平分辨率为 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ ，垂直方向为 11 层 (1001, 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 hPa)，所同化的卫星遥感资料为国家卫星气象中心提供的每小时的 ($0^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$) 区域内 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的 T_{BB} 资料。

3 牛顿张弛逼近四维同化方案的基本思路

所谓牛顿张弛逼近技术，就是在预报开始之前的一段时间内，通过在一个或几个预报方程中增加一个与预报和实况的差值成比例的虚假倾向项 [见公式 (1) 中的 N]，在可使用观测资料的时段内，使模式解逼近实测资料，并使变量之间达到动力协调。然后用这样的模式解作为预报初值，以提高模式预报效果。这可使多时刻的观测资料用于初始场的优化过程，从而提高了观测资料的分辨率。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = F(\alpha, X, t) + N. \quad (1)$$

牛顿张弛逼近四维同化方案包括两种方式：其一是分析场的 nudging，另一种是站

点资料的 nudging。

3.1 分析场的 nudging 方法

在分析场的 nudging 方案中, 对所要同化的具有 Δt 时间间隔的分析场资料, 设其时次分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 。假定模拟起始时为 t_2 。分析场 nudging 的时间间隔取为 Δt 。于是, 模式要首先完成从 t_1 到 t_2 时段内的同化过程。先是把 t_2 时刻的分析场内插到 t_1 到 t_2 之间每个时间步上得到分析内插值 $\bar{\alpha}_0$, 这样在每个时间步的每个格点上都有一个模式积分值 α 和分析场的内插值 $\bar{\alpha}_0$ 。在修正某一格点某一时刻的倾向值时, 对于一个给定的预报变量, 只要在其预报方程中加入一个分析逼近项, 此逼近项与该变量在每个网格点上的模式计算值和分析值的差成正比, 即把 $(\bar{\alpha}_0 - \alpha)$ 乘上一个适当的系数, 该系数包括逼近因子、四维权重因子及分析场的质量因子。这样, 在每个时间步上对每一个格点值进行修正, 使模式值逼近分析值。

设预报变量为 $\alpha(X, t)$, 适于有限区模式预报方程的分析场牛顿张弛逼近的计算公式为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = F(\alpha, X, t) + G_\alpha \cdot W_\alpha \cdot \varepsilon_\alpha(X) \cdot (\bar{\alpha}_0 - \alpha), \quad (2)$$

其中 X 是空间变量, t 是时间。 α 是模式的积分变量, 式 (2) 右端 $F(\alpha, X, t)$ 为物理强迫项 (平流、科里奥利力、物理过程等), 第二项为同化项, 其中 G_α 代表逼近因子, 它决定了模式中同化项相对于物理强迫项中所有模式物理过程的大小, 逼近因子 G_α 的量纲为 s^{-1} , 它的选择必须使同化项与模式中最慢物理过程调整的时间尺度相当, 并且要满足数值稳定性判据 $G_\alpha \leq 1/\Delta t$ 。对于气象系统, 其经验值为 $10^{-5} s^{-1} \sim 10^{-3} s^{-1}$, 一般取为 $10^{-4} s^{-1}$ 。 W 为四维权重函数, 它决定着同化的空间、时间的变化; ε 为分析值质量因子, 取决于分析所用数据的质量和分布, 取值在 0~1 之间, 本文取为 1。 $\bar{\alpha}_0$ 是变量 α 的观测资料经客观分析所得到的网格点值, 其数值由相邻时刻的观测分析值内插得到。

3.2 站点 nudging 方案

站点 nudging 方案与分析场的 nudging 方案类似, 只是不需要观测资料在模式格点上的值, 而是利用落在以每一时间步为中心点的提前确定的时间窗口内的观测值。模式值与观测值之间的差是在观测点上计算, 然后把它分析到观测点周围的格点上去。

对某一变量 α , 倾向方程为

$$\frac{\partial p \cdot \alpha}{\partial t} = F(\alpha, X, t) + G_\alpha \cdot p \cdot \frac{\sum_{i=1}^N W_i^2(X, t) \cdot \gamma_i \cdot (\alpha_0 - \hat{\alpha})_i}{\sum_{i=1}^N W_i(X, t)}, \quad (3)$$

其中, F 和 G_α 同式 (1), 下标 i 为距某一个格点一定距离内的所有观测点数 N 中的第 i 个观测点, α_0 是变量 α 的观测值, $\hat{\alpha}$ 是模式诊断变量在三维空间中插值到观测点位置处的值, γ 为观测资料的质量因子, 本文中设其为 1。

4 T_{BB} 资料 nudging 四维同化方案

T_{BB} 资料是分析到经纬网格点上的资料, 其时间分辨率较高, 可作为站点资料同化

到模式中，以得到一个较好的初始场。

MM5 模式站点 nudging 同化过程的一个重要步骤就是同化资料输入文件的产生。该文件依时间顺序把每一个观测值在 σ 坐标系中的三维空间分布列出来。该文件的具体构造如下：

时间：把观测时间换算成模式时间。

格点值 i, j ：把所有资料的经纬度坐标通过坐标变换得到其在正方形网格中的格点值。

变量值：所要同化的要素必须与某一模式量对应， T_{BB} 即作为某一高度处的温度值进行同化。

云顶高度 k ：由于从卫星中心得到的 T_{BB} 资料没有对应于每小时亮温资料的云顶高度。于是如何得到每小时的对应每一个 T_{BB} 的高度便成了问题。本文提出了一种通过分析场的 nudging 来得到每小时间隔的云顶温度对应高度的方法。

本文的思路即利用分析场的 nudging 方案在较强的强迫项的作用下仅对温度场从一个时刻向另一个时刻逼近。这样可得到每小时间隔的三维温度场，然后利用该温度场中各个温度值所在的高度来求得云顶温度的近似高度。

本文的分析场 nudging 的逼近因子 $G_x = 6 \times 10^{-4} s^{-1}$ ，从 7 月 20 日 00 时（世界时，下同）开始用 MM5 对温度场作 12 h 的 nudging 同化，对 7 月 20 日 12 时的 T106 温度分析场作逼近。这样得到的各时次的温度分布与分析场是比较接近的，误差一般在 $1^\circ C$ 左右（图 1、2）。接着对每个温度场进行水平插值得到各个

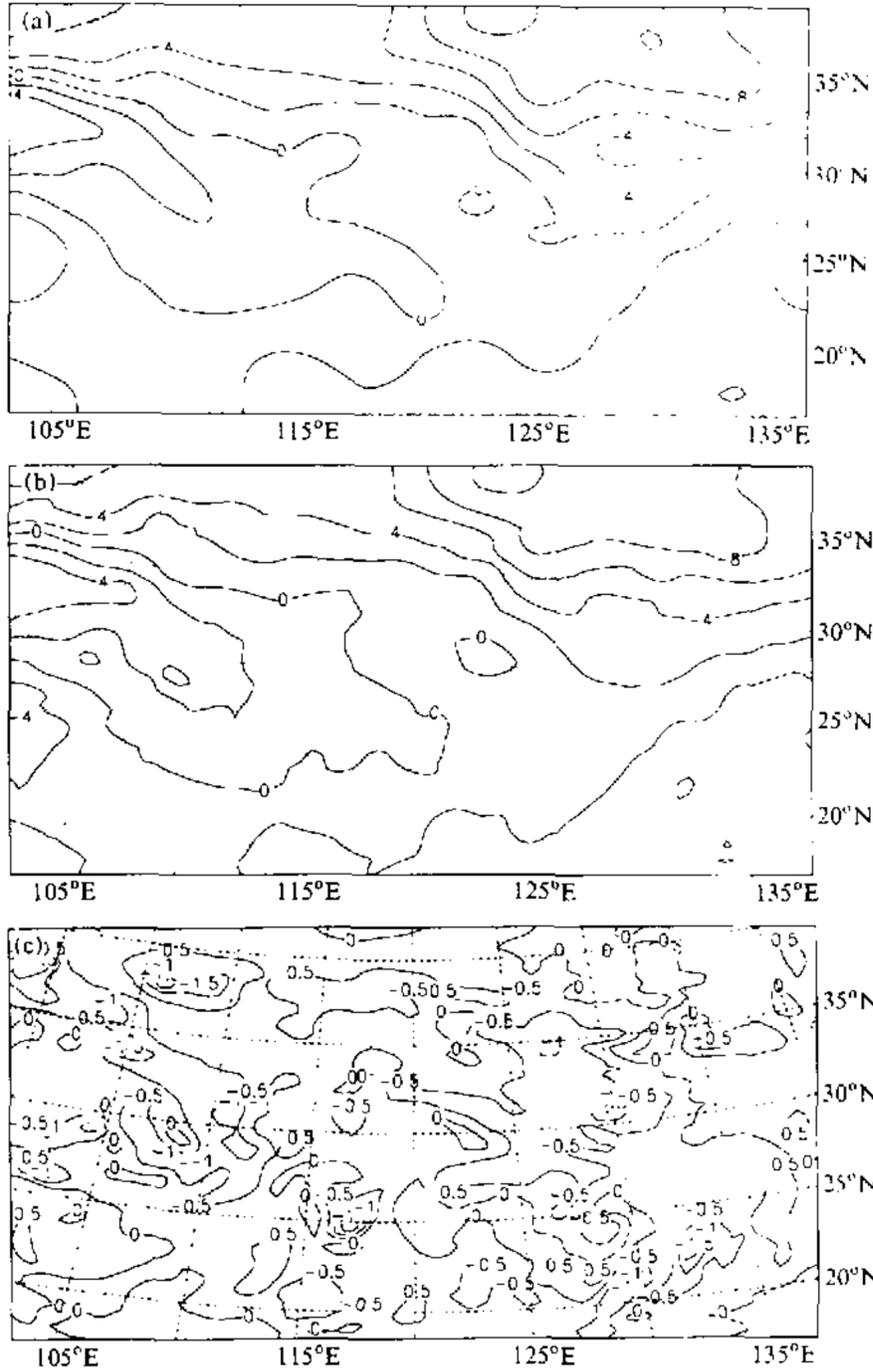


图 1 1998 年 7 月 20 日 12 UTC 的 500 hPa 温度场 ($^\circ C$)
(a) T106 分析场；(b) 分析场的 nudging 结果；(c) 图 a 与 b 的差

T_{BB} 观测点上的温度垂直廓线 T_k 。对某一云顶温度 T_i ，首先在其所在位置的温度垂直廓线中找到两层温度值 T_k 和 T_{k+1} ，使得 $T_k \leq T_i \leq T_{k+1}$ ， T_k 和 T_{k+1} 代表 σ_k 与 σ_{k+1} 层上的气温，然后由下面的经验公式即可得到对应于云顶温度 T_i 的 σ 坐标

$$\sigma_i = \sigma_k \exp\left(\frac{T_i - T_k}{T_{k+1} - T_k} \ln \frac{\sigma_k}{\sigma_{k+1}}\right), \tag{4}$$

由 σ_i 即可插值得到其所在的层数 k 。这样得到的云顶高度虽依赖于分析场的质量，但下面的试验证明，这种方法确实能改善暴雨的预报效果。

得到亮温的相应高度以后，即可把云顶温度由 3.2 节介绍的同化方法用于站点 nudging 四维同化试验。站点 nudging 四维同化的逼近因子 G_x 取为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

本文用此方案来同化每小时间隔的低于 -10°C 的 T_{BB} 资料（引言已提到 -10°C 以下的 T_{BB} 区与云区对应较好）。

5 1998年“7·20”大暴雨降水过程及相应的 T_{BB} 分布特征

1998 年 7 月 20~23 日，湖北省南部发生了一次持续特大暴雨过程，其主要暴雨时段集中在 7 月 20 日 12 时到 22 日 12 时。这次暴雨过程主要由两场暴雨组成，第一场暴雨发生在 20 日夜间到 21 日午后，第二场暴雨发生在 22 日凌晨至午后。本文所要研究的是第一场暴雨。图 3a 为 1998 年 7 月 20 日 12 时到 21 日 12 时鄂东南雨量分布图，雨量大于 100 mm 的暴雨区长约 200 km，宽约 80 km，日雨量大于 200 mm 的地区就在武汉市及周围的 4 个县市。强暴雨中心在武汉市为 286 mm。

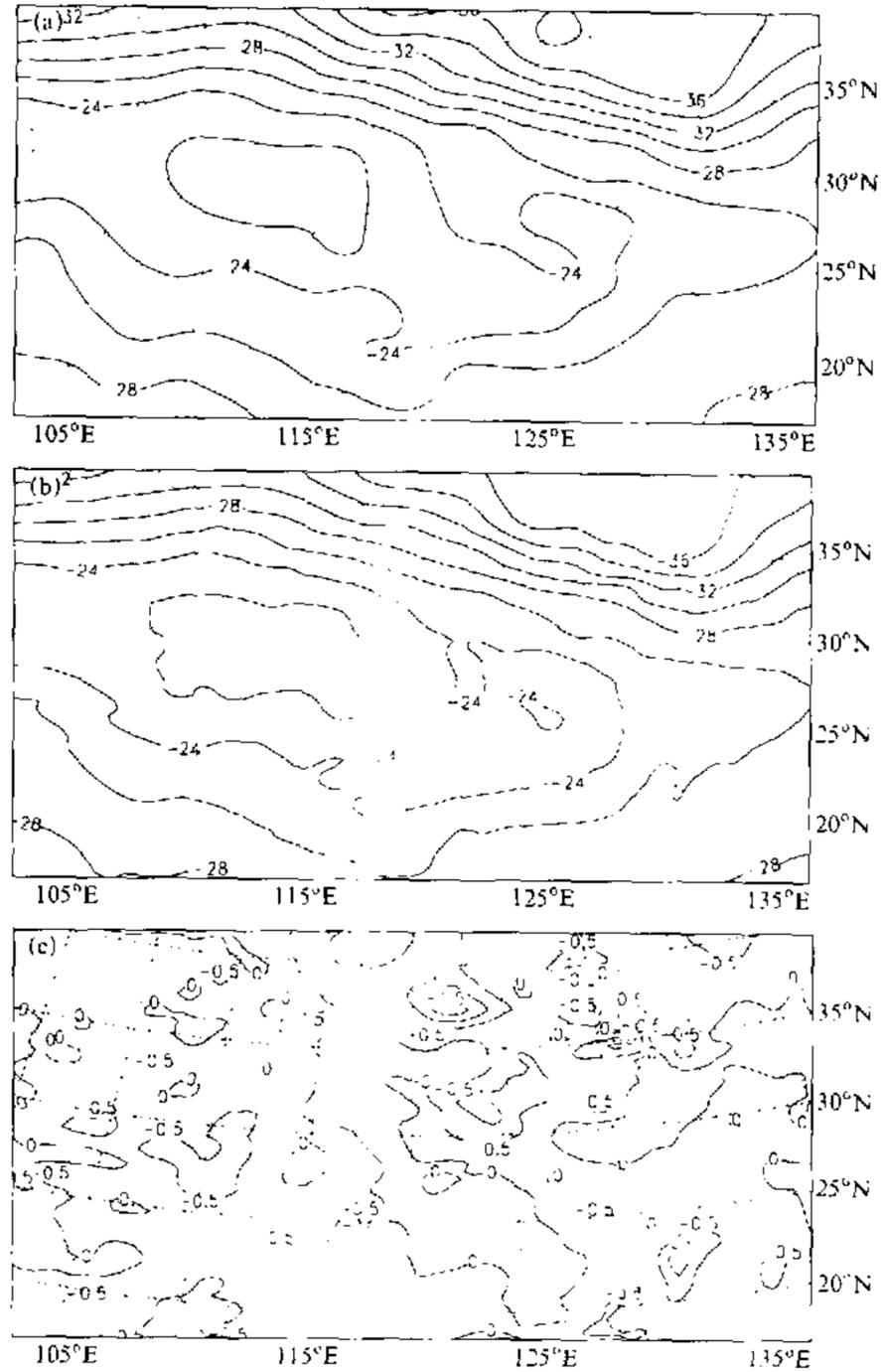


图 2 1998 年 7 月 20 日 12 UTC 的 300 hPa 温度场，其余同图 1

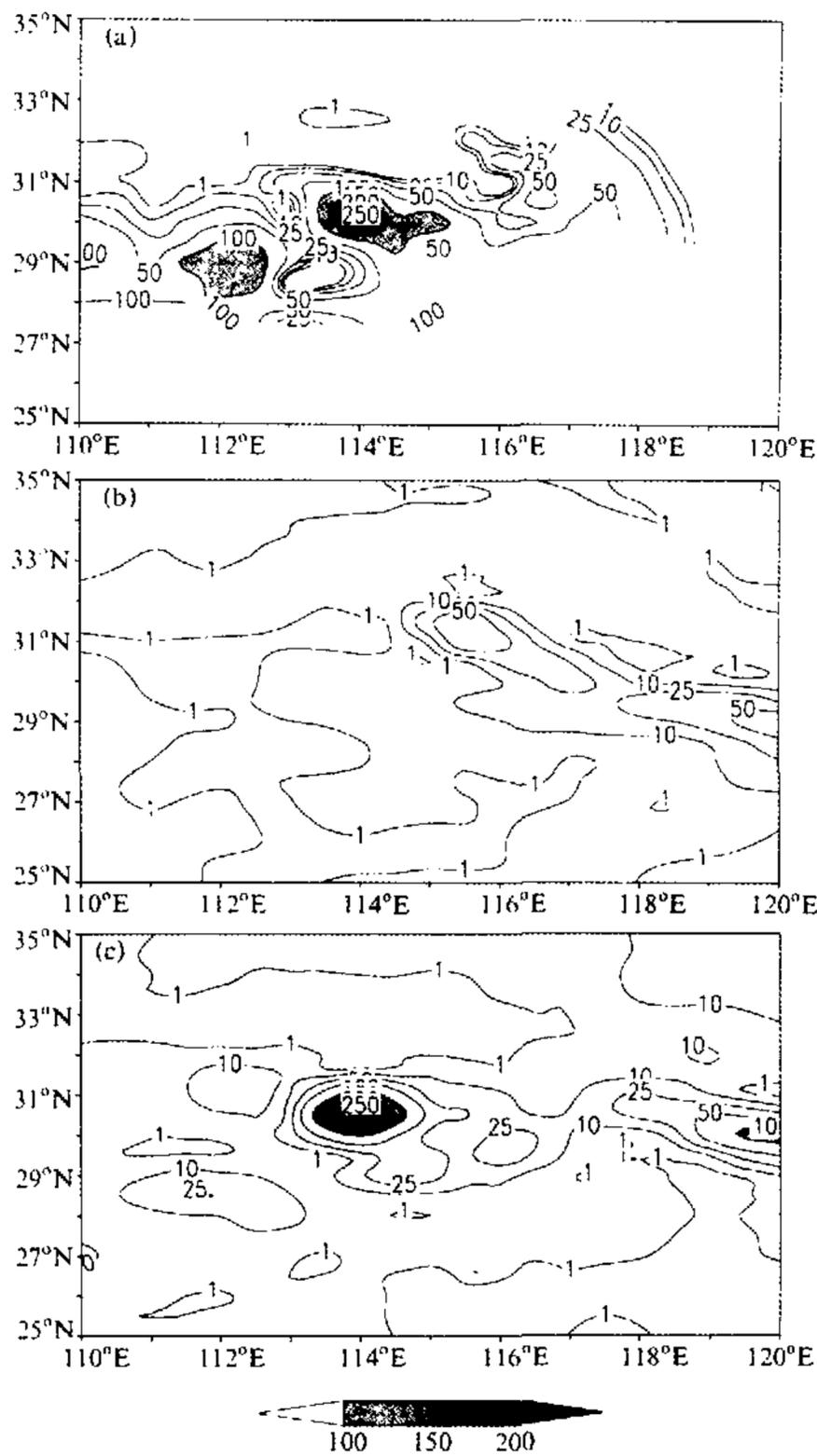


图3 实况及两种方案的24 h (7月20日12时~7月21日12时) 模拟降水
(a) 实况降水; (b) 对照试验; (c) T_{BB} -nudging

始作12 h的 T_{BB} 四维同化, 形成一个比较好的初始场, 然后从正式模拟起始时7月20日12时做24 h积分。

6.2 模拟结果分析

6.2.1 雨量分析

图3b、c为两种方案的24 h (7月20日12时~7月21日12时) 模拟降水, 该图清晰地显示出两种方案明显不同的结果, 对照试验(图3b)所模拟的降水位置误差约

天气分析表明, 这场暴雨的主要影响系统为对流层低层的切变线和切变线上低涡东移及低空西南急流(图略)。四川盆地一直有一个低涡, 从低涡向东伸展的切变线横贯湖北省。700 hPa切变线上宜昌市到武汉市有一闭合气旋式环流并不完整的低涡, 低涡区气压场和风场均较弱, 暴雨盛期, 低层不完整的低涡沿切变线东移到武汉东侧, 同时, 低涡区弱气压场仍维持, 风场加强得比较明显。

从7月20日23时的 T_{BB} 分布(图4a)来看, 武汉上空有一块降雨云团, 中心灰度值在 -60°C 以下, 该云团与武汉地区20日18时~21日00时的6 h降水(图4b)是对应的。这预示着在模式中如果以某种方式把云团的某种特征考虑进去, 对暴雨的模拟结果势必有一定的改善。

6 “7·20”大暴雨模拟试验

6.1 试验方案

对照试验: 不做 nudging 同化, 以7月20日12时为起始时, 把MM5模式积分24 h。

T_{BB} -nudging 试验: 对MM5模式从7月20日00时开

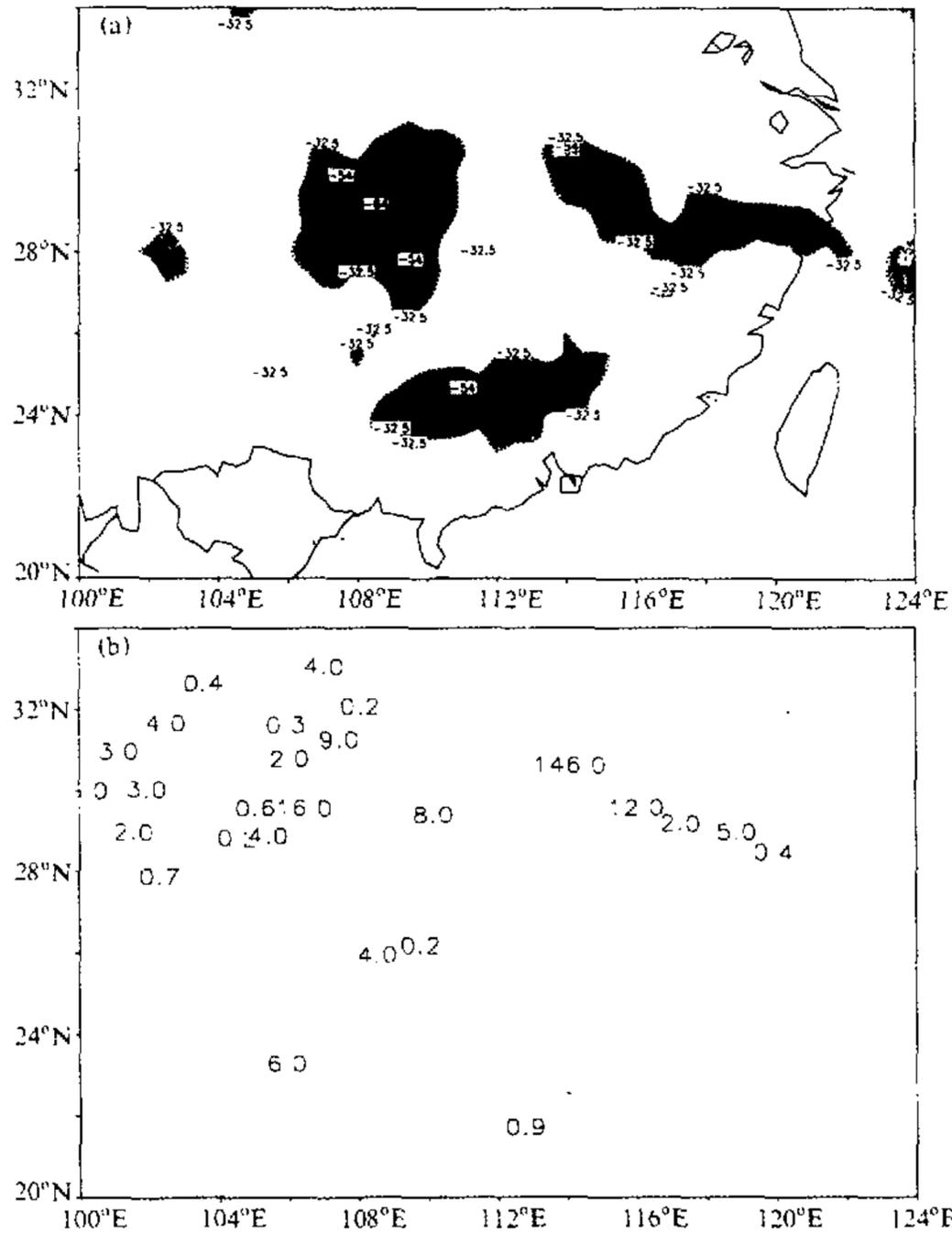


图4 (a) 7月20日23时的 T_{BB} 分布; (b) 7月20日18时~21日00时的6h降水实况

为 200 km, 而且雨量明显偏小, 武汉地区几乎没有降水, 而 T_{BB} -nudging 方案的 24 h 模拟降水的中心位置 (图 3c) 和数量与实况 (图 3a) 均十分吻合, 实况降水中心为 286 mm, 模拟的降水中心为 286.9 mm。另一方面, 衡量模拟降水不但要看落区和雨量, 还要看其降水随时间的分布。为此, 我们分析了武汉站的 6 h 降水的演变 (图 5)。对照试验中武汉站仅在 21 日 00 时到 06 时下了 3.4 mm (图 5c), T_{BB} -nudging 的分布 (图 5b) 与观测的 6 h 雨量 (图 5a) 分布比较接近, 其最大 6 h 雨量均发生在 21 日 18 时至 21 日 00 时之间, 雨量仅差 10 mm, 分别为 157.1 mm 和 146.0 mm。但降雨时间稍有提前。由此可见, T_{BB} -nudging 方案较好地模拟了“7·20”武汉大暴雨过程。

6.2.2 暴雨影响系统分析

如第 5 节中所述, “7·20”武汉大暴雨主要影响系统为对流层低层的切变线和切

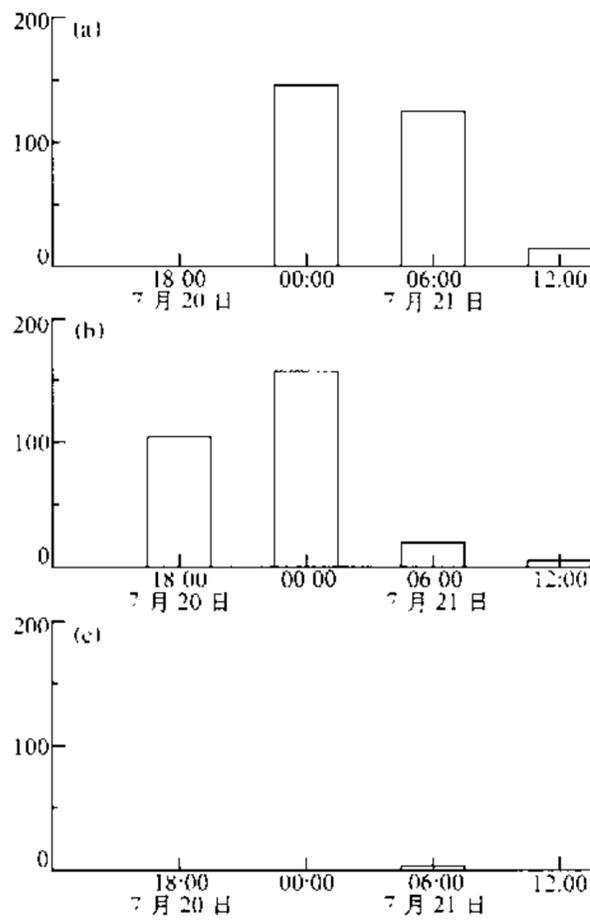


图5 武汉站的6 h(所标时刻前6 h)降水的分布
横坐标表示时间(世界时),纵坐标表示雨量(mm)
(a) 实况; (b) T_{BB} -nudging; (c) 对照试验

25点低通滤波算子将模式输出场的2、3、4、5倍格距波滤掉,得到平滑的背景场,由原场减去平滑场得到包含所有2、3、4、5倍格距波的扰动场。由于我们模式的格距是45 km,而我国夏季暴雨通常是由200~500 km的中尺度或次天气尺度系统造成的。于是我们又把上面得到的扰动场的2倍格距波滤掉从而得到包含200~500 km波长的中尺度波动。滤波响应函数见图10。图11为经此滤波方案得到的中尺度流场。该图表明中尺度场上的涡旋与雨区基本是重合的,而原场上的涡旋中心与雨区位置有着相当的距离(图6b)。这说明这场暴雨主要是由中尺度涡旋造成。

6.2.4 暴雨垂直结构特征

T_{BB} -nudging 试验中,武汉降雨区上空,出现了比较强的上升运动(图12),最大上升区位于对流层中层,对涡度和散度的垂直剖面的分析表明,正涡度中心(图13a)和辐合中心(图13b)出现在700 hPa,负涡度中心(图13a)和辐散中心(图13b)出现在250 hPa。而这些特征在对照试验中均无表现。

由此可见, T_{BB} 资料的四维同化过程对“7·20”武汉大暴雨的成功模拟起到了十分关键的作用。

7 结论

本文首次把 T_{BB} 资料直接用于中尺度模式的 nudging 四维同化过程,并初步研究

变线上低涡东移及低空西南急流。下面的分析表明 T_{BB} -nudging 试验成功地模拟出了这些影响系统。

通过对 T_{BB} -nudging 试验模拟流场的分析(图6)发现,7月20日12时到18时,切变线上的低涡出现在武汉地区,这个低涡比较浅薄,仅出现在对流层中下部,700 hPa上低涡最明显。在850 hPa上,低涡的南侧出现了中心风速大于 16 m s^{-1} 的西南低空急流(图7)。该急流对低涡的形成起着十分重要的作用。同时,200 hPa模拟流场武汉地区辐散气流较显著(图8b),降水就出现在700 hPa低涡和850 hPa低空急流之间。而对照试验(图9)中,根本就没出现对流层低层低涡和低空急流,高层也无明显辐散区(图8a),因而也没出现较强的降水。

6.2.3 暴雨中尺度特征

本文通过对模式结果的滤波分析,得到了暴雨系统的中尺度结构特征。所用的滤波方法是首先利用夏大庆等^[17]设计的

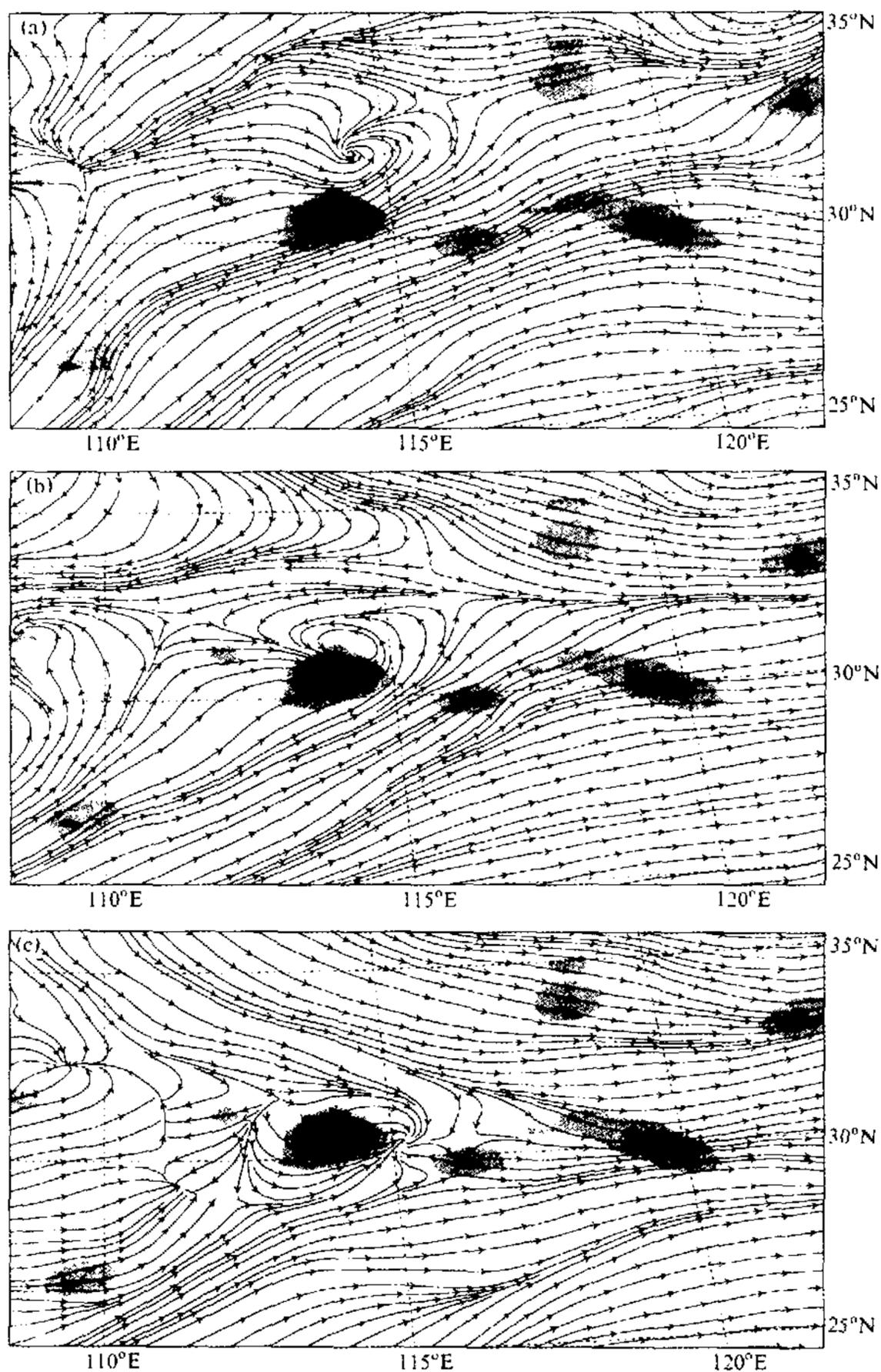


图6 T_{BB} -nudging 方案模拟出的7月20日18时的流场分布,
阴影区为7月20日18时到21日00时的6h降水
(a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa

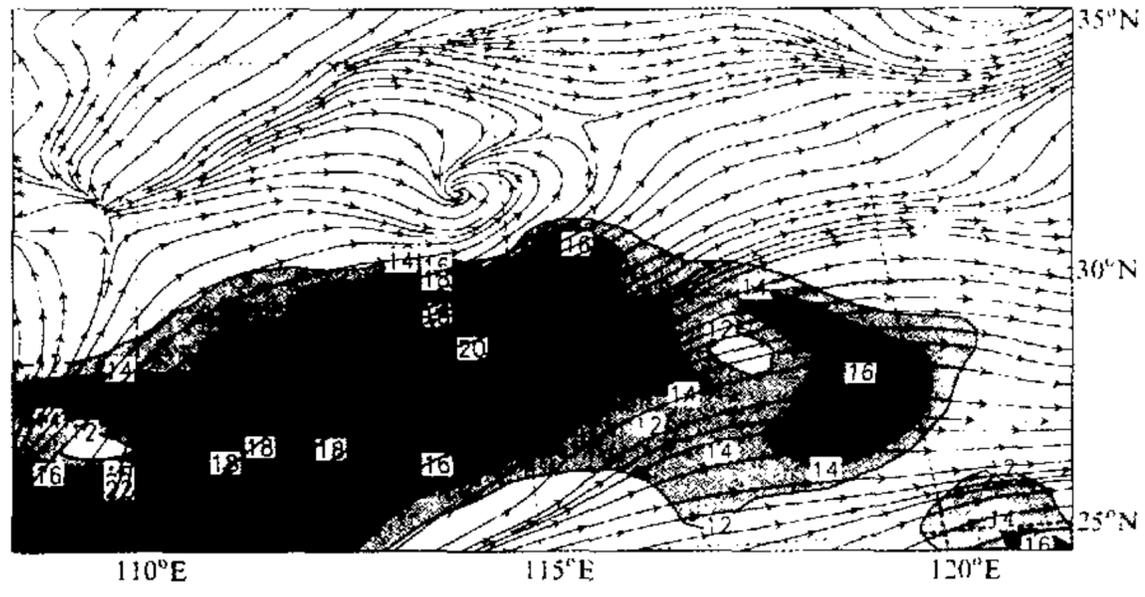


图 7 T_{BB} -nudging 方案模拟出的 7 月 20 日 18 时的 850 hPa 流场和风速分布 (阴影区)

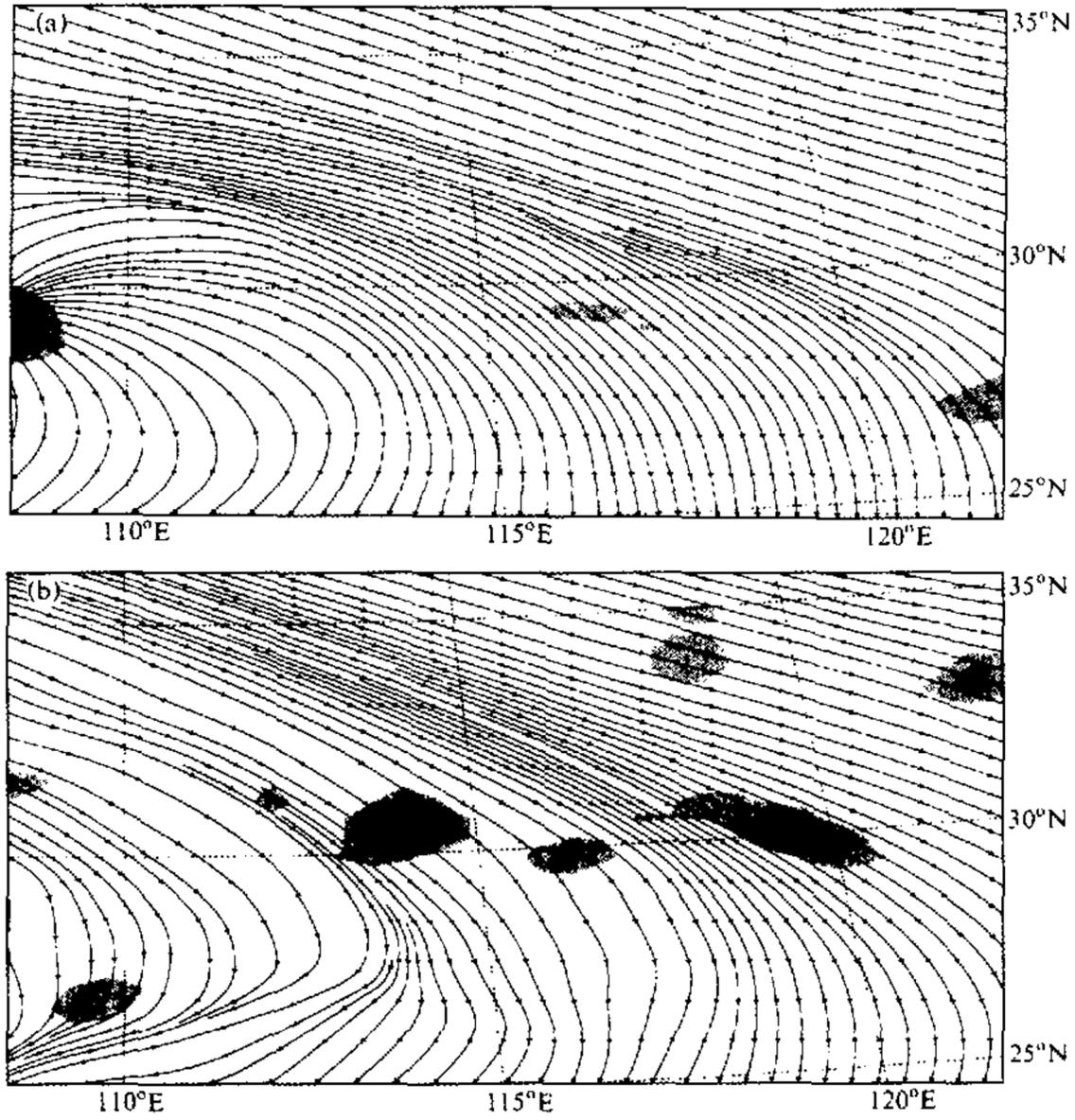


图 8 7 月 20 日 18 时 200 hPa 模拟流场, 阴影区为该时刻后 6 h 的降水
(a) 对照试验; (b) T_{BB} -nudging 试验

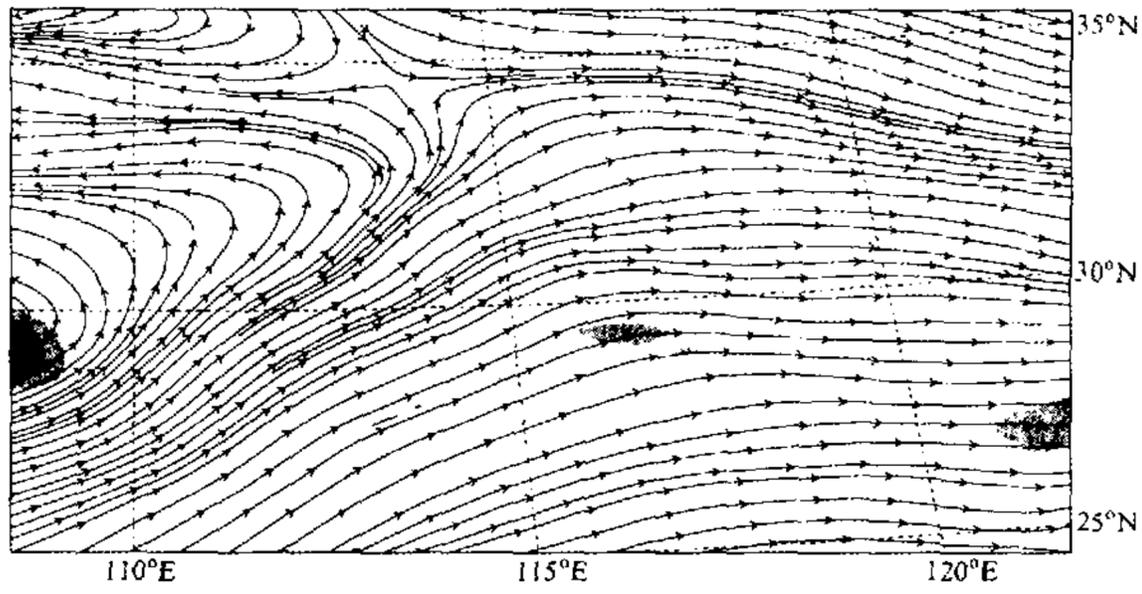


图9 对照试验7月20日18时700 hPa 模拟流场, 阴影区为该时刻后6 h的降水

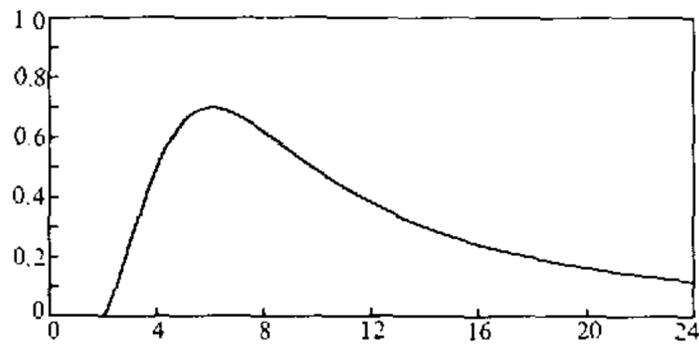


图10 本文的滤波响应函数, 横坐标表示波长对格距的倍数, 纵坐标表示响应函数

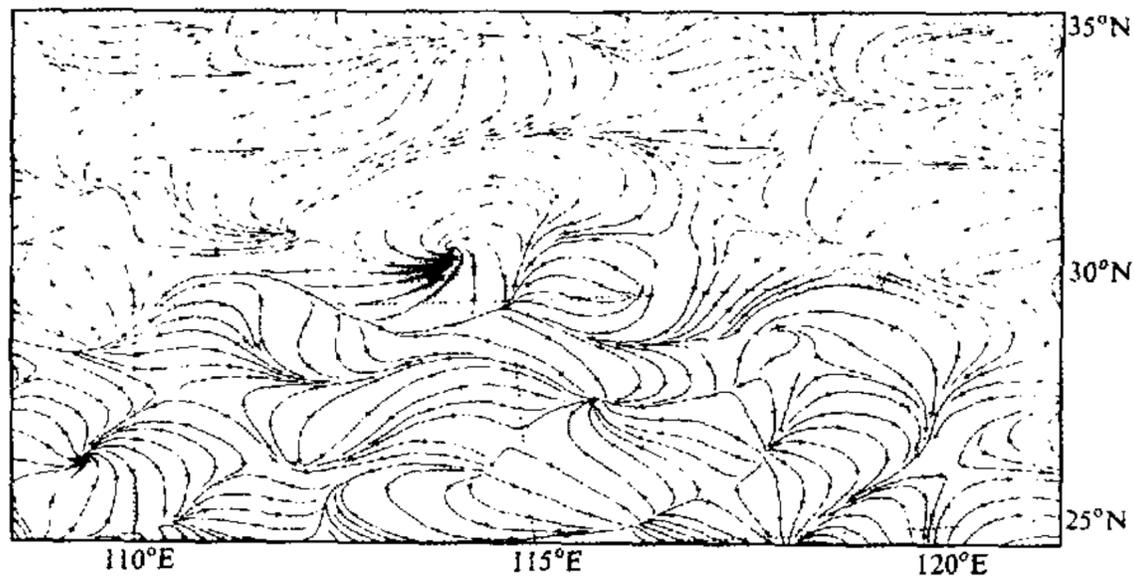


图11 滤波后 T_{BB} -nudging 试验的20日18时的700 hPa 中尺度流场分布

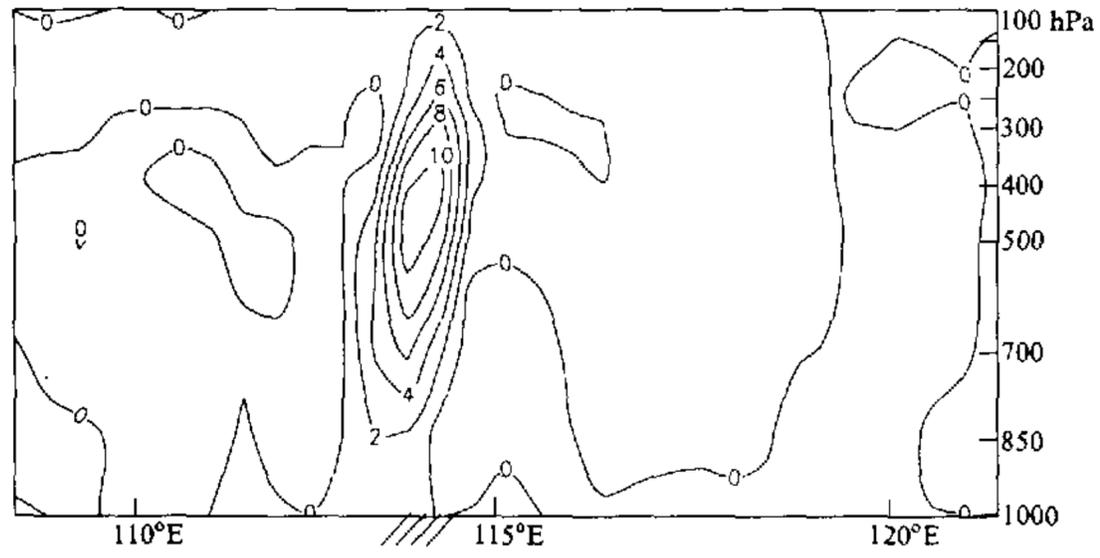


图 12 T_{BB} -nudging 方案模拟出的 7 月 20 日 18 时沿 30.3°N (武汉所处纬度) 的垂直速度 (单位: 10^{-1} m s^{-1}) 垂直剖面图
下边界的斜线表示武汉雨区位置

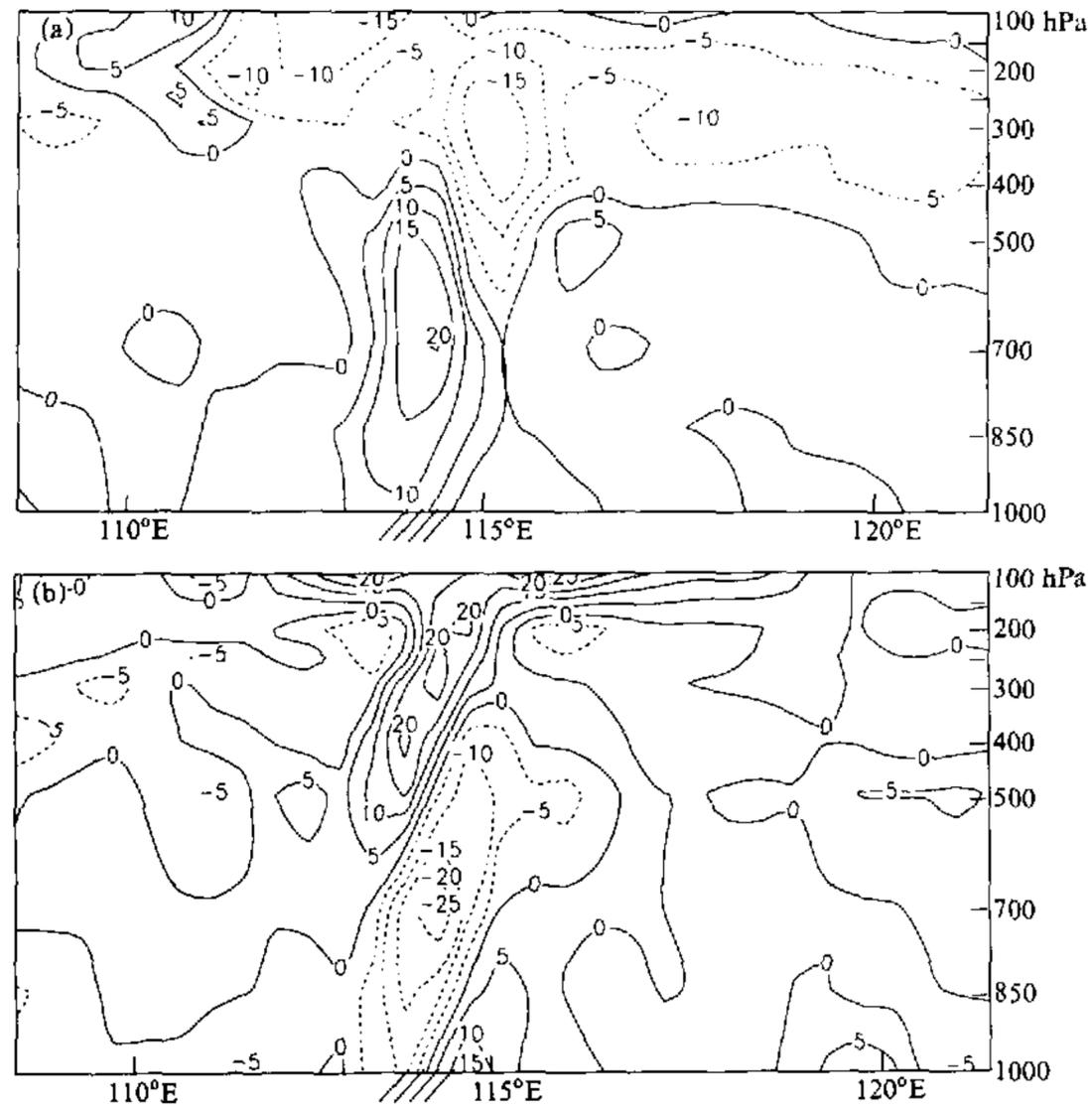


图 13 T_{BB} -nudging 方案模拟出的 7 月 20 日 18 时的相对涡度 (a) 和散度 (b, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 沿 30.3°N (武汉所在纬度) 的垂直剖面图, 下边界的斜线表示武汉雨区位置

了 1 h 间隔的 T_{BB} -nudging 方案对 1998 年夏季一次暴雨过程模拟的作用。得到了如下主要结论:

- (1) 提出一种通过分析场的 nudging 四维同化来确定云顶高度的方法。
- (2) 调通了站点 nudging 方案, 并首次把 T_{BB} 资料直接用于 MM5 模式的四维同化过程, 成功地模拟了“7·20”武汉大暴雨过程。
- (3) T_{BB} -nudging 试验的模拟结果表明对流层低层中尺度低涡和低空西南急流是“7·20”大暴雨的主要影响系统。

参 考 文 献

- 1 Anthes, R. A., Data assimilation and initialization of hurricane prediction models, *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**, 702~719.
- 2 Kistler, R. E., A study of data assimilation techniques in an autobarotropic primitive equation channel model. M. S. thesis, The Pennsylvania State University, [Available from the Dept. Of Meteorology, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802], 1974, 84 pp.
- 3 Davies, H. C. and R. E. Turner, Updating prediction models by dynamical relaxation: An examination of the technique, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1977, **103**, 225~245.
- 4 Hoke, J. E. and R. A. Anthes, The initialization of numerical models by a dynamical initialization technique, *Mon. Wea. Rev.*, 1976, **104**, 1551~1556.
- 5 Stauffer, D. R. and N. L. Seaman, Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part-I: Experiments with synoptic-scale data, *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**, 1250~1277.
- 6 Stauffer, D. R., T. T. Warner and N. L. Seaman, A Newtonian “ nudging ” approach to four-dimensional data assimilation: Use of SEAME-IV data in a meso-scale model. Preprints, Seventh Conference on Numerical Weather Prediction, Montreal, Amer. Meteor. Soc., 1985, 77~82.
- 7 Bell, R. S., The meteorological office fine-mesh data assimilation scheme, *Meteor. Mag.*, 1986, **115**, 161~177.
- 8 Stauffer, D. R. and N. L. Seaman, Aal-data numerical study and four-dimensional data assimilation application for mesobeta-scale flow in complex terrain, Proc. Symp. Mesoscale Analysis and Forecasting, Vancouver, ESA, 1987, 533~538.
- 9 Kuo, Y. H. and Y. R. Guo, Dynamic initialization using observations from a hypothetical network of profiles, *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117**, 1975~1998.
- 10 Noel E. Davidson and K. Puri, Tropical prediction using dynamical nudging, satellite-defined convective heat sources, and a cyclone bogus, *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**, 2501~2522.
- 11 周霞琼, 朱永提, 非对称的非绝热加热对热带气旋移动影响的数值研究, *应用气象学报*, 1999, **10**(3), 283~291.
- 12 杨祖芳, 李伟华, 一种运用云顶亮温确定热带气旋海面大风区的方法, *热带气象学报*, 1999, **15**(1), 71~75.
- 13 江吉喜, 范梅珠, GMS T_{BB} 揭示的1998年长江大水的异常天气成因, *南京气象学院学报*, 1999, **22**(3), 331~337.
- 14 国家气象中心, 国家卫星气象中心, '98 中国大洪水与天气预报, 北京: 气象出版社, 1999, 274pp.
- 15 Arkin, P. A. and R. Xie, The global precipitation climatology project, First algorithm intercomparison project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1994, **75**, 401~419.
- 16 Scofield, R. A., The NESDIS operational convective precipitation estimation technique, *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**(8), 1773~1792.
- 17 夏大庆, 郑良杰, 董双林, 宋丽, 气象场的几种中尺度分离算子及其比较, *大气科学*, 1983, **7**(3), 303~311.

T_{BB} -Nudging Four-Dimensional Data Assimilation Method and Simulations on Heavy Rain Process in Wuhan on 20 July, 1998

Meng Zhiyong, Xu Xiangde and Chen Lianshou

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract The T_{BB} data are directly adopted in nudging four-dimensional data assimilation process of meso-scale model MM5V2. A technique to calculate the height of cloud top through analysis nudging process is put forward. With the hourly T_{BB} -nudging method, the heavy rainfall process happening in Wuhan on 20 July, 1998 is successfully simulated. Result shows that the meso-scale vortex and lower level southwest jet are the main systems causing Wuhan July 20 heavy rain. These results suggest that the accuracy of heavy rain forecast may be improved with remote sensing data such as T_{BB} assimilated into numerical model.

Key words: cloud top temperature; four-dimensional data assimilation; heavy rain