

TOVS 资料的变分处理方法在 青藏高原地区的数值试验*

翁永辉 徐祥德

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要 首次在测站稀少的高原地区引入经变分技术处理的 TOVS 资料, 使用 MM5 数值模式对高原地区降水数值预报难点进行了研究。探讨了解决高原地区测站少, 数值预报模式初始场信息误差大的技术关键问题, 提出了采用 TOVS 资料在高原地区增加初始场信息的构思。数值试验结果表明, 应用变分法处理后的 TOVS 资料, 可显著地提高高原初始场信息的可靠性。考虑夏季高原地区是对流多发区特点, 本文采用非静力 MM5 模式, 并在模式初始场中增加了 TOVS 资料, 弥补了测站稀少的高原地区使用非静力模式的不足之处。研究结果表明, 本文采用的 TOVS 资料技术方案可能是高原区域数值模式降水预报的有效途径, 并为开拓卫星资料的应用领域提供了技术思路与理论分析依据。

关键词 高原 变分法 TOVS 资料 MM5 模式

1 引言

青藏高原平均海拔约 4 500 m, 面积 200 多万平方公里, 是世界上最高、最大、地形最复杂的高原。随着高原地区气象台站网的建立, 气象业务现代化的发展, 1972~1978 年间开展的青藏高原气象科研协作研究, 以及 1979 年青藏高原气象科学试验和多次高原地面热源观测的开展以及有地形数值天气预报模式的广泛应用等大大促进了我国青藏高原气象研究工作的发展。当数值模式用于高原时, 会遇到两大难题: 一是资料问题, 二是地形处理问题。对于地形处理问题, 国内外在资料的处理、地形坐标的选取和高原地区模式物理过程的特殊性方面做了许多研究。钱正安等^[1]指出, “目前国内的业务和研究模式中, 高原地形已比较真实 (常达 5 km 以上)”。

数值模式应用于高原的最大难题是资料问题。高原地区测站稀少, 西藏范围只有那曲、拉萨、定日、昌都 4 个站, 且这 4 个站都分布在西藏的东南部, 西藏中、西部地区没有探空站, 所以, 再好的模式同化系统对西藏中、西部地区也无能为力。目前在实践中, 卫星反演温度对北半球业务数值天气预报的负影响难以消失, 这是因为那里有日臻完善的常规观测网, 能够为数值预报提供质量相当高的初值, 其预报精度已经很高 (在 150 hPa 以下的自由大气中误差小于 2 K), 精度相对低的卫星反演资料常常在分析同化中起负作用, 但在高原地区则不同, 高原探空站点分散、稀少, 获取资料困难, 尤其在

1997-12-09 收到, 1999-05-16 收到再改稿

* 国家攀登 B 项目“青藏高原地区-气系统物理过程及其对全球气候和中国灾害性天气影响的观测和理论研究”

资助

高原西部, 资料分辨率极低, 造成客观分析初始场客观性差, 数值预报难度大。对于模式初始场, 在高原地区一般都只限于用 FGGE 资料或再分析资料, 但初始场误差大、客观性差。

TOVS 资料在高原地区具有水平、垂直和时间分辨率高的特点, 如图 1 为高原地区 TOVS 资料卫星星下点分布, 可以看出, 在高原地区 TOVS 资料反演点分布很密集。所以卫星反演资料在高原地区的数值预报中会起到一定的作用。

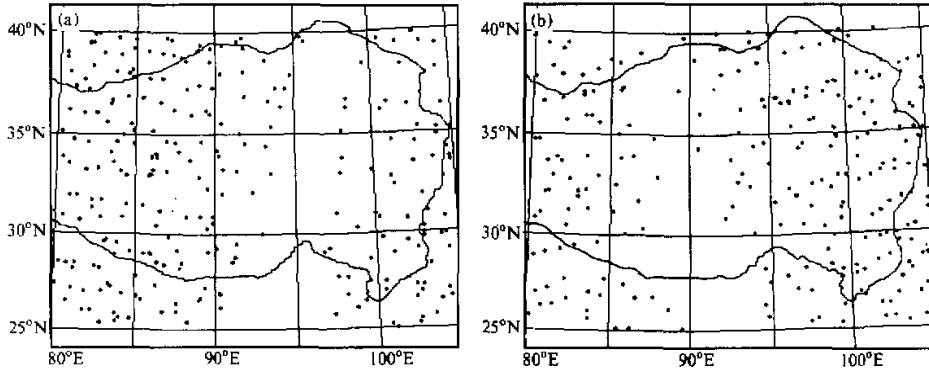


图 1 高原地区 TOVS 资料卫星星下点分布 (1995 年 7 月 5 日)
(a) D、E、F 轨道; (b) A、B、C 轨道

由于青藏高原的特殊地形, 青藏高原整体年平均积雨云出现的次数是我国其他地形区域整体平均的 2.5 倍^[2]。这反映了高原降水多为阵性降水的特点, 表明高原地区的对流性活动比较强。所以用非静力模式来模拟高原地区的降水将大大提高模拟效果。Dudhia^[3]用 MM5 对发生在北大西洋上的爆发性气旋的生成和发展作了模拟, 模拟结果表明, MM5 完全有能力模拟出 MM4 在大尺度方面给出的模拟结果; 采用大尺度模式提供的边界条件, 完成了对冷锋区和锢囚区的模拟, 而且揭示了与冷锋相伴的更细微的结构, 并与观测到的冷锋特征相似。

本文利用 TOVS 反演资料, 大大加密高原地区资料的空间密度, 弥补高原资料的分辨率低的不足, 并用变分法进行订正以提高 TOVS 反演资料的精度, 形成高原地区加密的“人造探空”资料, 参考高原地区云物理过程的特殊性及其显著的对流云团区域性特征, 本文采用具有描述非静力物理过程能力的 MM5 模式, 以提高数值模式高原及其周边地区的降水的预报能力。

2 变分原理

根据变分原理, 依赖于多个自变量的泛函:

$$J(U(x, y)) = \iint_{\Omega} F\left(x, y, U, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}\right) dx dy, \quad (1)$$

$U(x, y)$ 必须满足下列 Euler 方程:

$$Fu - \left(\frac{\partial}{\partial x} Fu_x + \frac{\partial}{\partial y} Fu_y \right) = 0. \quad (2)$$

本文所用的变分方法是徐祥德等^[4]在国家科技攻关 85-906 项目——台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究中用于卫星雷达结合订正暴雨区降雨量的技术。

设 TOVS 反演资料的要素场为 $\tilde{T}^*(x, y)$, 与之相对应的有限点的实测探空资料的要素场为 $R_a(I, J)$, 在实测探空点坐标 (I, J) 上, 上述两者的差值场, 即误差场为 $\tilde{C}_r(I, J)$:

$$\tilde{C}_r(I, J) = R_a(I, J) - \tilde{T}^*(I, J). \quad (3)$$

实际上, 由于探空测站坐标 (I, J) 点数有限, 因此需要构造出全场更广义的订正因子场函数 $C_r(x, y)$, 采用变分方法, 寻求 $C_r(x, y)$ 函数, 需满足如下条件:

$$J^* = \iint_b (C_r - \tilde{C}_r)^2 dx dy \rightarrow \min, \quad (4)$$

即 $\sum_i \sum_j (C_r - \tilde{C}_r)^2$ 达到极小值。

对于上述变分问题, 可假设为构造泛函 J^*

$$J^* = \iint \left\{ (C_r - \tilde{C}_r)^2 + \lambda \left[\left(\frac{\partial C_r}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_r}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy, \quad (5)$$

其中 λ 为约束系数。

上式可改写为

$$\delta J^* = \delta \sum \left\{ (C_r - \tilde{C}_r)^2 + \lambda \left[\left(\frac{\partial C_r}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_r}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} = 0. \quad (6)$$

对应的 Euler 方程为

$$(C_r - \tilde{C}_r) - \lambda \left(\frac{\partial^2 C_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_r}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (7)$$

其中 λ 为形变约束系数。用迭代法求解上述方程的数值解, 得到新的变分订正因子场 $C_r(x, y)$, 于是得到变分订正后的各类 TOVS 反演资料要素场为

$$T(x, y) = \tilde{T}^*(x, y) + C_r(x, y). \quad (8)$$

3 高原地区 MM5 模式降水物理过程方案优选

本文所用的模式是 PSU/NCAR 的 MM5 模式^[5]。本文的流程框图如图 2 所示。

肖庆农等^[6]应用 MM5 模式中的不同的行星边界层参数化、可分辨尺度的湿方案和积云参数化方案来模拟一次大暴雨过程, 同时还比较了静力和非静力试验, 结果指出, 和实况相比, MM5 不但在理论上有所提高, 在模拟结果上也有很大的提高, 但是, 物理

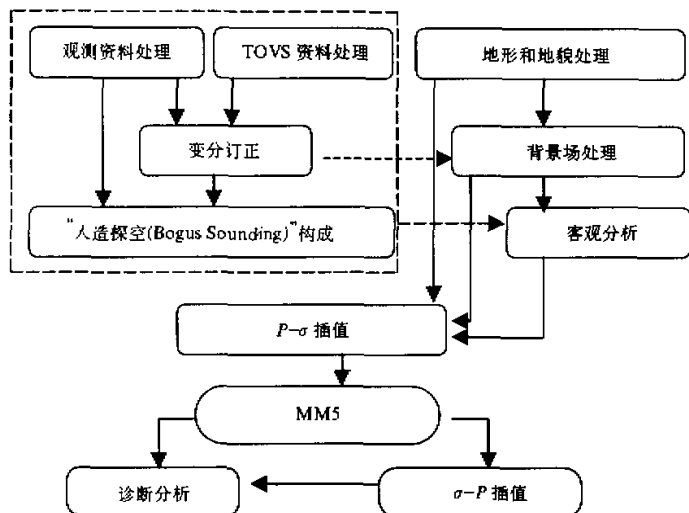


图2 本文数值模式模拟系统流程框图

过程的选择,特别是水循环过程的选择对降水的预报至关重要。由以上可知,MM5对降水处理有显式和隐式方案两大类,这两种方案可同时作用于同一个网格点上。隐式方案提供 Kuo 型、Arakawa-Schubert 型和 Grell 型 3 种积云参数化方案。为了优选出适合青藏高原的降水物理方案,对这 7 种方案进行试验比较,试验所用网格距为 45 km,积分时间为 1995 年 7 月 5 日 08 时~6 日 08 时 24 h 积分,采用 MM5 的非静力模块,初始场和边界为用探空资料分析 T63 分析场后所形成。

从试验结果模拟的 24 h 降水来看,7 种方案模拟的降水区域都接近实况,只有显式方案和“E-AS”方案模拟的降水区域偏小,没有模拟出广西南部的降水。在实况图(图略)上,有三个降水中心:一个是以拉萨为中心的降水中心,最大 24 h 单站降水为 19 mm,另一个是以理塘为中心的降水区,最大降水为 16 mm,还有一个是以云南的元江为中心的降水中心,最大 24 h 单站降水为 81 mm。

由于青藏高原的探空资料缺乏等原因,所用方案模拟的降水均比实况大很多,甚至达到 4~10 倍,相对比较接近实况的是 E-Kuo 型方案的降水物理过程。1979 年青藏高原气象科学试验的结果表明:青藏高原上的降水大多是对流性降水。本文数值试验表明,在这 7 种试验方案中,E-Kuo 方案和 E-Grell 方案模拟的降水主要以对流性降水为主,其余的 5 种方案则以非对流性降水为主。

在流场图(图略)上,7 种方案模拟的 24 h 流场都能模拟出低涡和反气旋,结果都很接近实况,只有 E-Grell 方案模拟的系统效果相对差些,而 E-Kuo 方案对系统与降水模拟效果均为最佳,所以本文选择以 E-Kuo 方案作为高原地区降水物理过程方案。

4 高原地区变分订正 TOVS 资料及 MM5 模式的应用

通过以上的Ⓖ作,可以确定以 MM5 的非静力模块, E-Kuo 型积云参数化方案的高原数值模拟方案。本节用实例模拟变分法订正后的 TOVS 资料中各要素场对高原地区降水的作用及其对高原降水的影响。探空试验 (RAOB), 用探空观测资料、T63 分析场合分析形成初始场和边界条件进行模拟; 对比试验为 TOVS 方案试验, 用探空观测资料和 TOVS 资料、T63 分析场合分析形成的初始场和边界条件进行模拟; C-TOVS 方案试验, 用探空观测资料和变分订正后的 TOVS 资料、T63 分析场合分析后形成的初始场和边界条件进行模拟。

4.1 TOVS 反演的露点温度资料在高原地区数值模式中的应用试验

在试验中,把 TOVS 资料中的露点温度用变分法订正,订正后的露点温度和探空资料一起用 Cressman 方法来作客观分析。试验的时间为 1995 年 7 月 5 日 08 时~6 日 08 时。图 3a 是加入卫星 TOVS 露点温度资料变分订正后的 (C-TD 方案试验) 模拟的 24 h 降水, 和控制试验 (RAOB) 模拟的 24 h 降水 (图 3b) 相比, 降水区域相一致, 但降水强度比 RAOB 方案更为接近客观。在理塘和拉萨附近, 两个试验都模拟出了两个降水中心, RAOB 方案模拟的两个中心强度分别为 114 mm、65.8 mm, 加入卫星变分订正露点温度后的模拟为 38.1 mm 和 35.7 mm, 和实况 16 mm、19 mm 比较, 减小了误差约 76 mm 和 30 mm。在模拟的 24 h 500 hPa 相对湿度场, C-TD 和 RAOB 方案都模拟出了高原南部东西向的水汽饱和区和高原东部、西部两个相对湿度 $\leq 20\%$ 的区域, 模拟的 24 h 流场基本结构一致。

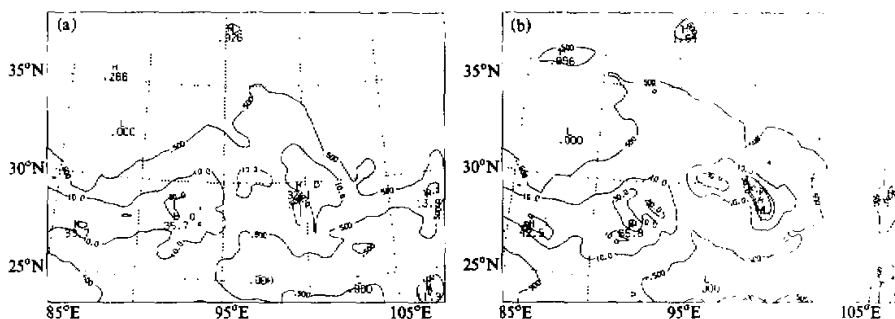


图 3 24 h 降水模拟 (1995 年 7 月 5 日 08 时~6 日 08 时)

(a) C-TD 方案试验; (b) RAOB 方案试验

4.2 TOVS 资料变分订正在高原地区数值模式中的应用试验

试验一

本试验从 1995 年 7 月 5 日 08 时积分 24 h, 网格距为 45 km, TOVS 资料范围为 (80~105°E, 25~40°N)。

图 4 为 TOVS 和 C-TOVS 方案模拟的 24 h 降水。结合图 3b 的 RAOB 方案模拟

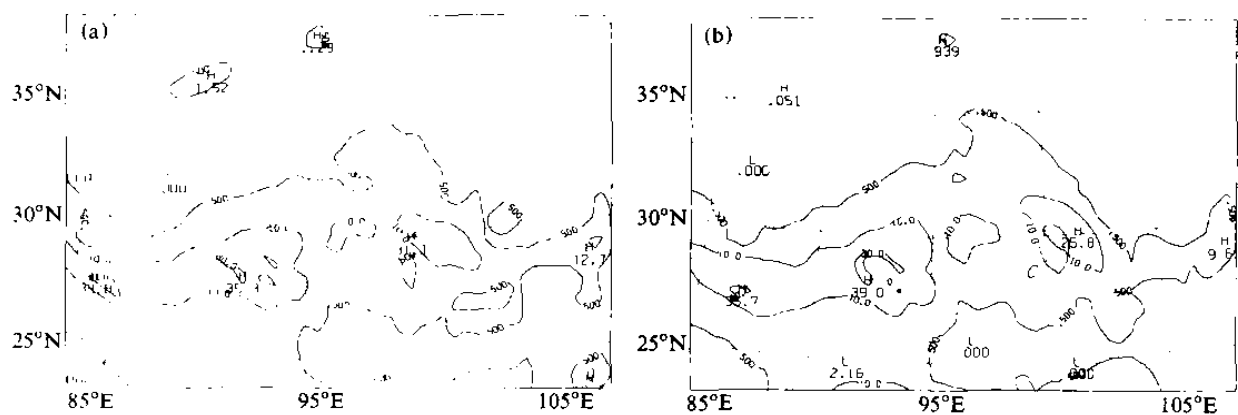


图4 24 h模拟降水(1995年7月5日08时~6日08时)
(a) TOVS 方案试验;(b) C-TOVS 方案试验

24 h 降水, 三个方案所模拟的降水区域基本上一致, 和实况相比较, 都模拟出了高原上东西向的理塘、拉萨、日喀则三个降水中心, 降水强度误差如表 1 所示。

表 1 24 h 降水模拟误差值比较 (1995 年 7 月 5 日 08 时~6 日 08 时)

降水中心	实际降水 / mm	模拟与实际降水误差值 / mm		
		RAOB 方案	TOVS 方案	C-TOVS 方案
理 塘	16	98.0	15.1	9.8
拉 萨	19	46.8	16.3	20.0
日喀则	18	24.5	21.8	17.7

由表 1 可以看出, 应用 TOVS 资料后, 降水区域没有改变, 降水强度得到了很明显的改变, 最大能减小误差 83 mm, 平均误差减小了 38.7 mm, 加入经过变分订正后的 TOVS 资料后, 效果得到了进一步的改变。

在模拟的 24 h 流场 (图略) 上, RAOB 方案模拟出了高原上的暖低涡和反气旋系统, 低涡中心位于 (35°N, 90°E), 反气旋中心位于 (34°N, 101°E), 在理塘 (30°N, 100°E) 有一个很强的辐合中心, 在拉萨附近有弱的辐合。TOVS 方案模拟的反气旋比较弱, 只为一高压脊, 在理塘附近有较弱的辐散。C-TOVS 试验模拟的低涡和反气旋中心比 RAOB 方案稍微偏东, 理塘附近只有很弱的辐合, 拉萨的辐合亦弱。将以上三种情况与卫星云图实况比较, 可发现后两种加入卫星资料的技术方案更接近于高原地区卫星云图上反映的系统特征, 即在静止气象卫星云图 (GMS-5 IRI H 04 JUL 95, 23:32 UTC) 上, (31°N, 91°E) 处有一低涡云系, 理塘地区的辐合也比较弱。由此可以看出, TOVS 资料的加入, 增加了模式初始场的信息, 使数值试验更加客观。

试验二

本试验从 1995 年 7 月 6 日 08 时积分 24 h, 网格距为 45 km, TOVS 资料范围为 (80~105°E, 25~40°N)。

图 5 为 RAOB、TOVS 和 C-TOVS 方案模拟的 24 h 降水。以 24 h 降水 0.5 mm 以上为有降水, 和实况 (图略) 比较可以看出, RAOB 方案没有模拟出昆明附近的降水, TOVS 和 C-TOVS 方案也没有模拟出来, 但无降水区域比 RAOB 方案小且偏

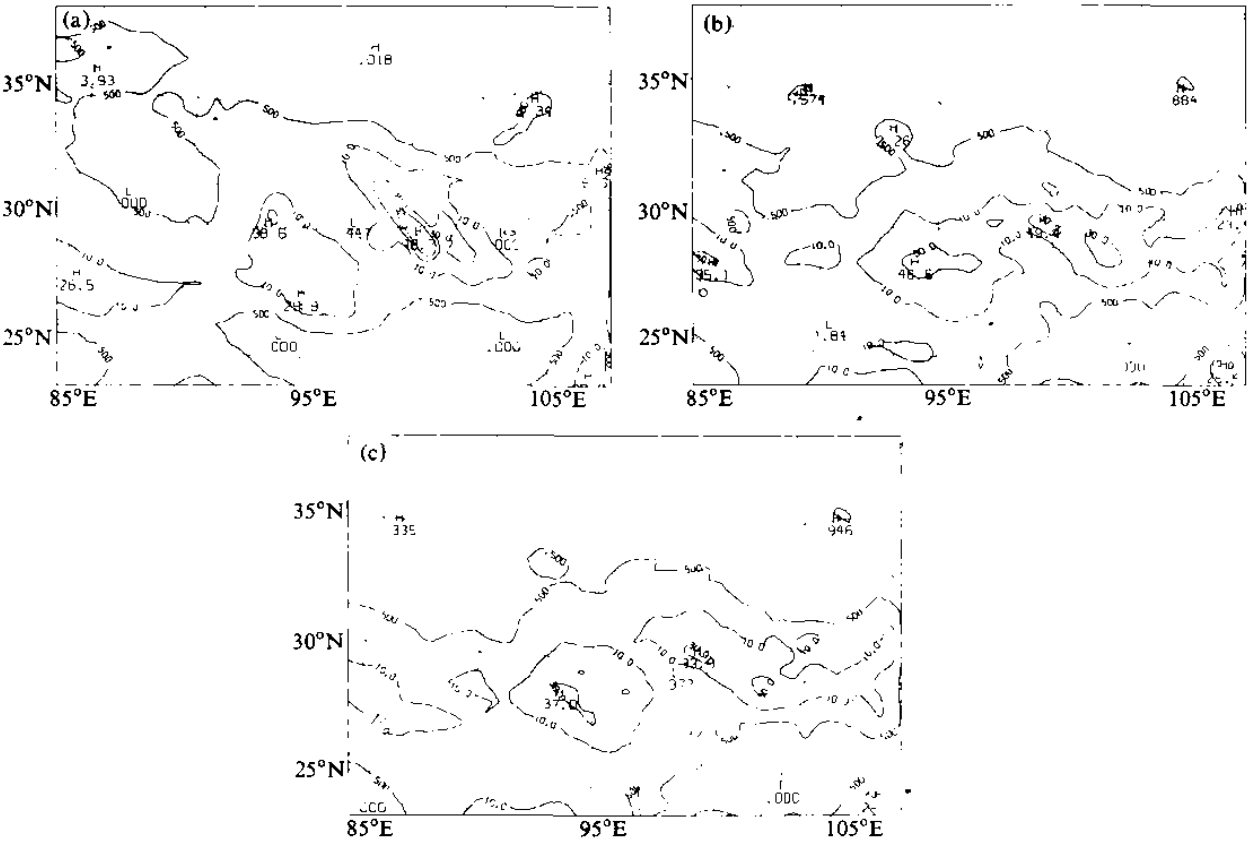


图 5 24 h 模拟降水 (1995 年 7 月 6 日 08 时~7 日 08 时)
(a) RAOB 方案试验; (b) TOVS 方案试验; (c) C-TOVS 方案试验

东, 其余的降水区模拟都一致。在实况上, 高原上有雅安, 拉萨两个降水中心, 三个方案都模拟出了这两个中心, 但模拟雅安的降水中心大约都向西偏 3 个经度, 位于理塘附近。

降水强度误差如表 2。从表 2 可以看出, TOVS 方案模拟的 24 h 降水误差比 RAOB 减小了一半, C-TOVS 方案比 TOVS 方案又减小了一半。

表 2 24 h 降水模拟误差值比较 (1995 年 7 月 6 日 08 时~7 日 08 时)

降水中心	实际降水 / mm	模拟与实际降水误差值 / mm		
		RAOB 方案	TOVS 方案	C-TOVS 方案
雅 安	34	64.7	15.4	5.9
拉 萨	20	18.0	26.6	17.0
平均误差		41.4	21.0	11.5

在 RAOB 方案分析的初始时刻的流场上 (图 6a), 高原中部 (33°N, 93°E) 处有一个很强的低涡, 其西南侧 (31°N, 87°E) 和西侧 (34°N, 83°E) 处还有两个小低涡。高原低涡的活动是这次试验的主要特征, 低涡系统强度及其演变是这次降水模拟客观性的关键。在 RAOB 方案模拟的 24 h 流场上 (图 6b), 高原中部的强低涡已东移到雅安地方, 已经移出了高原, 西南侧的低涡向东移动了 5 个经度, 位于拉萨上空, 强度显著增强。在 TOVS 方案模拟的 24 h 流场上 (图 7a), 高原中部和西南侧的低涡的发

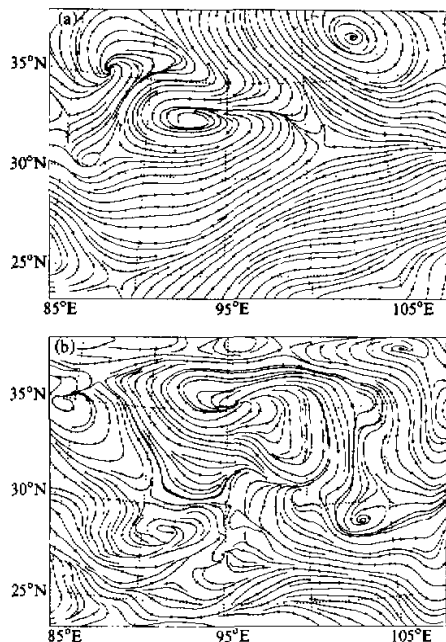


图6 RAOB方案500 hPa流场(1995年
7月6日08时~7日08时)
(a) 00时; (b) 24时

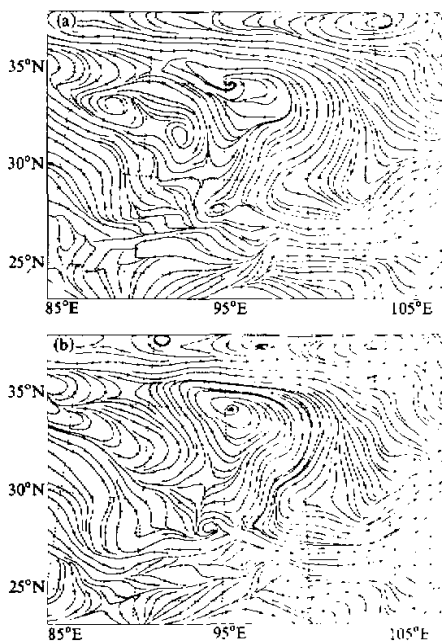


图7 24 h 500 hPa流场模拟(1995年
7月6日08时~7日08时)
(a) TOVS方案; (b) C-TOVS方案

展和RAOB方案一样,中部的低涡经过24 h的演变和发展,已移出高原,移到雅安附近,强度显著减弱,西南部的低涡也已移到拉萨上空,演变为弱的辐合区。C-TOVS方案(图7b)和TOVS方案模拟的24 h流场基本形势相同,高原中部的强低涡在雅安时已消失为弱辐合区,西南侧的低涡移到拉萨的东南侧。因此,由于不同的技术方案,高原低涡的系统强度及其演变的预报误差引起降水预报的显著区别。

RA-TOVS方案试验:将探空和TOVS资料进行Cressman差值形成第一猜值场,再用探空和TOVS资料进行Cressman客观分析。

RA-C-TOVS方案试验:用探空和TOVS资料集成进行以上的试验。

图8a是RA-TOVS方案试验模拟的24 h降水,和实况图相比,高原上的大范围降水区域基本一致。实况图上,雅安附近有一片区域降水在20 mm以上,最大单站降水为34 mm,模拟出的20 mm以上的降水区只有两个网格距,最大降水为22.9 mm。拉萨到日喀则的20 mm的降水区没有模拟出来,只在拉萨东北180 km处模拟出了33.8 mm的降水中心。图8b是RA-C-TOVS方案模拟的24 h降水。和RA-TOVS方案相比,雅安附近的20 mm的降水区域扩大,最大降水为37.0 mm,拉萨的降水为20.5 mm,位置偏北。和实况比较可以看出,RA-C-TOVS方案比RA-TOVS方案更为客观。在24 h的500 hPa模拟流场上(图略),RA-C-TOVS方案和RA-TOVS方案模拟的基本环流形势相同,从东到西,高原上都为反气旋-低涡-反气旋系统,

术。由本文的研究结果可得到以下结论:

(1) 高原地理条件下观测站点稀疏, 资料空间分辨率低, 数值模式初始场“信息”可产生明显“失真”, 其引起高原系统及其动力结构描述的不可靠性。

(2) 高原地区卫星资料存在各种系统误差, 本文采用变分订正技术有效地改进了卫星资料误差, 进一步显著地提高 TOVS 卫星资料应用的客观性与可靠性。

(3) 夏季高原地区属对流云多发区, 应用非静力 MM5 中尺度模式可显著地提高高原地区局地强降水的预报能力, 为发展高原地区降水数值预报业务模式提供理论分析与技术依据。

参 考 文 献

- 1 钱正安, 焦彦军, 1994, 青藏高原气象学研究的简要回顾和展望, *大气情报*, 14(3), 1~12.
- 2 戴加洗, 1990, 青藏高原气候, 北京: 气象出版社.
- 3 Dudhia, J., 1993, A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493~1513.
- 4 徐祥德等, 1996, 关于卫星-雷达-地面雨量计多元探测工具集成估算降水场方法的探讨, *暴雨科学, 业务试验和天气动力学理论的研究*, 北京: 气象出版社, 102~107.
- 5 Georg A. Grell, Jimmy Dudhia and David R. Stauffer, 1994, A Description of the Fifth-Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note, NCAR / TN~398+STR.
- 6 Xiao Qingnong, Guo Weidong and Zhou Xiaoping, 1996: Preliminary results from numerical experiments of a heavy rain process with PENN STATE / NCAR MM5, *Advances in Atmospheric Sciences*, 13(4), 539~547.

Numerical Simulation over the Tibetan Plateau by Using Variational Technique Revised TOVS Data

Weng Yonghui and Xu Xiangde

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract By the mean of introducing TOVS data, corrected by variational method, into the initial field over the Tibetan Plateau region where sparse observations exist, the numerical prediction of precipitation, the most difficult problem, is made the first time by MM5 model on the special region in this study. We investigate that to minimize the large error of initial fields in the numerical prediction model, which caused by the sparse observation on the Plateau. Therefore, we draft the framework in which some bogus soundings are embodied with TOVS data over there in such a way that the dependability of the initial condition increases significantly. In the meantime, we further confirm that TOVS data are beneficial to improving the objectivity of initial fields. Under the consideration of the summer convection features on the Tibetan Plateau, the initial fields of MM5 model are enhanced by TOVS data in the study. The results show that the technical scheme is an efficient way to implement operational precipitation forecast with model on the Plateau region, and the exploration provides some technical methods and theoretical bases on the applications of satellite data as well.

Key words Tibetan Plateau variational technique TOVS data MM5 Model.