

# 夏季青藏高原地区降水和 低涡的数值预报试验\*

陈伯民 钱正安

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

## 提 要

本文首先分析了1979年6—7月的FGGEIIIb级资料风场和相对湿度场在青藏高原地区的偏差, 指出在高原西部应予以订正。然后利用一有限区域模式, 通过综合订正初始风场和相对湿度场, 改进模式部分物理过程, 并提高其水平分辨率, 共设计了6组预报试验, 对该年的两例高原低涡切变线降水过程进行了24小时预报。结果表明, 利用改进了的初始场和部分物理过程, 可明显改善高原地区的降水预报, 并在一定程度上改善了流场的预报, 即上述改进方案是可行的; 但在高原地区嵌套预报方案尚待修改, 还应继续努力提高模式对高原低涡流场的预报能力。

**关键词:** 青藏高原; 数值预报; 初始场; 物理过程; 水平分辨率。

## 一、前 言

基于青藏高原(下称高原)对东亚乃至北半球大气环流的重要性, 已有许多专著和论文系统地研究了高原地区的天气系统、气候特征、辐射特征及其对大气环流的影响。也提出了一些数值模式中地形处理的方案<sup>[1,2]</sup>。但因地形处理和资料稀少等困难, 专门针对高原地区数值预报的研究则比较少<sup>[3-6]</sup>。

显然, 如何利用现有的资料和研究成果进一步改进该地区数值预报效果, 这对提高我国数值预报的整体水平是不可少的。

本文使用一有限区域数值模式(下称本模式)<sup>[7]</sup>, 试图通过改进初始场、部分物理过程、提高水平分辨率等途径来进一步改善本模式在高原地区的预报, 并分析这几个方面对预报结果的影响。

## 二、模式、资料及个例

本模式为C型跳点网格的原始方程模式, 水平分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ , 垂直方向为6层。模式考虑了水平及垂直扩散、积云与大尺度凝结、辐射、地面过程等较齐全的物理过程。包括了较真实的高原地形(最大地形高度达5200m, 最大坡度达0.0097)。

1992年7月27日收到, 1993年4月20日收到修改稿。

\* 本文系国家气象局青藏高原气象基金资助课题。

针对高原地区地形复杂的特点,还采用了  $p-\sigma$  混合坐标等厚边界层,在陡峭地形区采用了三维插值的气压梯度力计算方法等较好的地形处理技术<sup>[7]</sup>。已有的个例及批量预报试验表明,本模式的预报性能较好<sup>[8]</sup>。

本文使用 1979 年 6—7 月的 FGGE IIIb 级(下称 FGGE)资料,高原及周围测站的实测湿、湿、风等<sup>[9]</sup>和 Tiros-N 卫星云图资料。

高原低涡是夏季活跃在高原边界层内弱而浅薄的低压涡旋,是夏季高原上的主要致雨系统<sup>[10,11]</sup>。本文选取了 1979 年 7 月 30—31 日(个例 1)和 6 月 23—24 日(个例 2)两次高原涡的个例,它们均造成高原中南部的大中雨天气。如个例 1,在 30 日 12 时(GMT,下同),高原地区 500 hPa 为典型的利于产生高原涡的北脊南槽形势(图 1a),24 小时后,在高原中南部已发展成闭合低涡(图 3a),主要降水出现在 32°N 以南地区,特别是高原涡的东南部(图 4a)。

### 三、改进方案及预报试验设计

我们曾指出本模式预报的高原地区降水明显偏大<sup>[12]</sup>,下面就从改进初始场、部分物理过程及水平分辨率等方面入手,进行预报试验。

#### 1. 初始场的偏差分析与订正

在对高原地区 1979 年 6—7 月部分时次的 FGGE 资料和实况场进行对比之后发现,由于 FGGE 资料中未考虑高原西部狮泉河、仲巴、改则和双湖四个临时加密站等的资料,除高度、温度场外,其风场和相对湿度场在高原西部均与实况有相当大的偏差,尽管风场的这种误差主要限于 500 hPa 层。以 7 月 30 日 12 时为例(图 1a, b),FGGE 风场在高原东部与实际较一致,但在西部的风向却与实况呈相反之势,南部也出现了过强的闭合反气旋。同日同时次 500 hPa 的 FGGE 相对湿度场在高原东部与实际基本吻合,但在西部的值普遍大于 0.60,最大达 0.93,而实况值仅介于 0.30—0.69 之间(图 2a, b),可见明显偏大。

显然,若用上述 FGGE 资料直接作初始场便会产生预报误差,应结合实测资料对其风场和相对湿度场进行订正。

罗四维等曾用 Cressman 的逐步订正法和 1979 年高原实验资料订正 FGGE 500 hPa 风场,效果良好<sup>[13,14]</sup>。本文亦延用该方法,其订正过程大致是:先以 FGGE 资料作初估场  $F^{(0)}$ ,然后在以测站为圆心,某一“扫描”半径的圆内将初估值插值到站点上,由站点上插值与实测值间的误差  $E^{(0)}$ 订正初估场;以后不断缩小扫描半径,重复上述步骤……,直至误差  $E^{(n)}$ 达给定精度值。本文选择扫描半径依次为 2000、1500、1000、500 和 250km,也即 5 次迭代。

虽然狮泉河等站的资料在上述订正中起了十分重要的作用,但订正后的风场和相对湿度场在某些局部区域仍存在着一定的偏差,为此还分别参考高原实验期间的实况流场图<sup>[9]</sup>和卫星云图对它们作了综合订正。

如图 1a—c 所示,由 Cressman 逐步订正法订正后的高原西部风场明显好转,但高原西部出现了一小反气旋,高原南部的切变过强,还出现了闭合涡旋,经综合订正后与

实况基本一致了 (图 1d)。经 Cressman 逐步订正法订正后的高原西部相对湿度值大大减小 (图 2a-c), 再配合实况流场和云区位置的综合订正则进一步消除了个别格点上仍偏大的值, 也更接近实况了 (图 2d)。

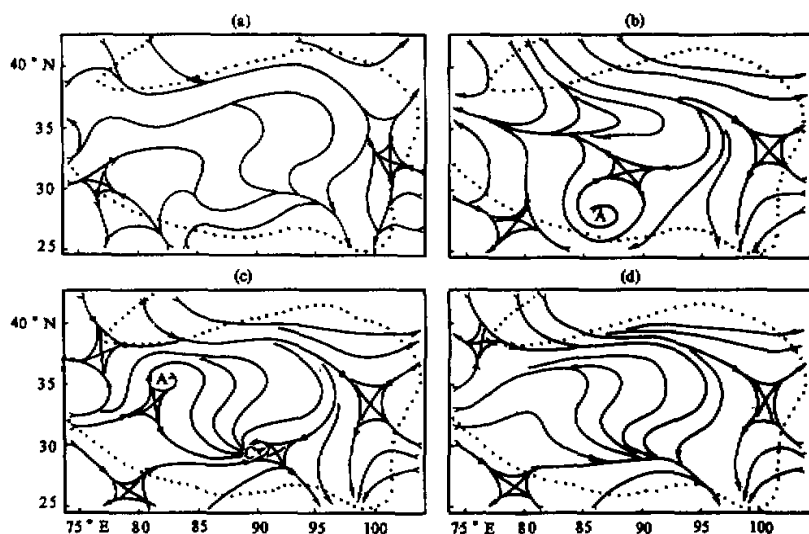


图 1 高原地区 1979 年 7 月 30 日 12 时(GMT, 下同) 500 hPa 实况 (a)、及未订正的 (b)、经 Cressman 逐步订正法订正的 (c)、经综合订正的 FGGE 资料 (d) 流场  
点线表示高原地形廓线, 下同。

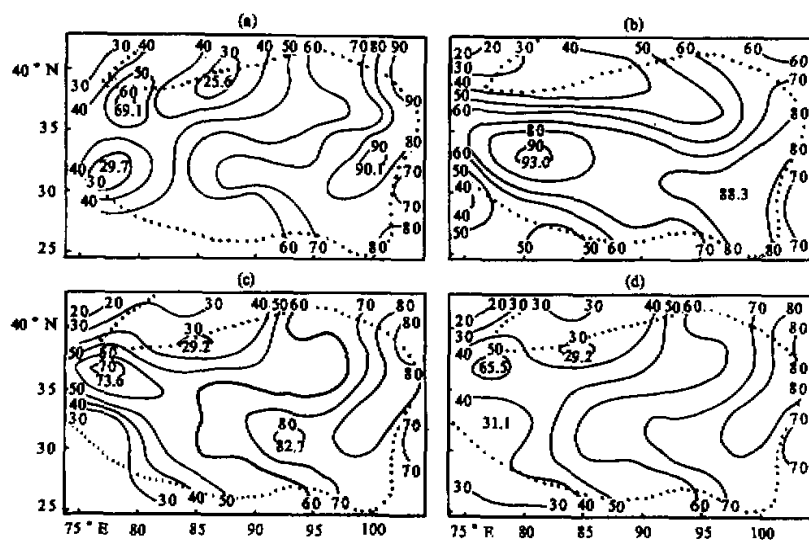


图 2 同图 1, 但为相对湿度场( $\times 10^{-2}$ )

## 2. 部分物理过程的改进

本文仅涉及阻力系数  $C_D$  值、云量参数化和积云参数化的改进。

### 1) 阻力系数 $C_D$

本模式原按总体法计算地气间的动量、感热及潜热交换, 将  $C_D$  值表示成一仅依赖于地形高度的分段线性函数<sup>[7]</sup>。按这种关系, 高原地区的  $C_D$  全为  $5.0 \times 10^{-3}$ 。

为改进高原地区地表通量的计算, 现在高原地区采用由 1979 年高原实验资料得到的 7 月平均  $C_D$  值<sup>[15]</sup>。这使高原东南部, 特别是雅鲁藏布江河谷等区域的  $C_D$  值明显提高, 最大可达  $8.0 \times 10^{-3}$ , 而高原西北部的值还略有减小。

### 2) 云量参数化

本模式原采用修改了的 Slingo 云量参数化方案<sup>[7]</sup>。现采用钱正安等考虑了亚洲地区云及相对湿度分布特征的修正的 ECMWF 方案<sup>[16]</sup>, 以改进辐射的计算。

$$N = \left[ \max \left( \frac{RH - RH_c}{\Delta RH}, 0 \right) \right]^2, \quad \Delta RH = \begin{cases} 0.15 & \text{高云} \\ 0.35 & \text{中、低云} \end{cases}$$

式中  $N$  为云量,  $RH$ 、 $RH_c$  分别为模式某层的相对湿度及其临界值,  $RH_c$  从最上至最下层依次为 0.35、0.35、0.50、0.50、0.70 和 0.80。对比试验表明, 该方案能更好地诊断出云区和高云量<sup>[16]</sup>。

### 3) 积云参数化

本模式积云参数化原采用修改的郭晓岚 (1974) 方案<sup>[7]</sup>。现在模式中的高原地区采用陈伯民和钱正安根据高原积云活动特点修改的 Krishnamurti 多元回归方案<sup>[12]</sup>。考虑了中尺度辐合, 采用了新的  $b$  值计算公式, 但保持垂直加热分布函数不变, 这样积云造成的增温、增湿及降水率为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = g(1-b) \frac{L}{c_p} W_L (1+\eta) \frac{(\theta_{se})_c - \theta_{se}}{\int_{p_T}^{p_B} [(\theta_{se})_c - \theta_{se}] dp},$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = gb W_L (1+\eta) \frac{q_s - q}{\int_{p_T}^{p_B} (q_s - q) dp} + \omega \frac{\partial q}{\partial p},$$

$$R = W_L (1+\eta)(1-b),$$

$$W_L = -\frac{1}{g} \int_{p_T}^{p_B} \omega \frac{\partial q}{\partial p} dp,$$

其中

$$b = \frac{0.640 \times 10^5 D_4 - 0.650 \Delta \theta_{se} + 2.69}{-0.410 \times 10^4 D_4 - 1.404 \Delta \theta_{se} + 4.00},$$

$$\eta = -0.410 \times 10^4 D_4 - 1.404 \Delta \theta_{se} + 3.00,$$

式中  $\eta$  为中尺度水汽辐合参数,  $(\theta_{se})_c$ 、 $\theta_{se}$  分别表示模式某层上云内外的假相当位温,  $q$ 、 $q_s$  分别代表比湿和饱和比湿,  $D_4$ 、 $\Delta \theta_{se}$  分别为模式第 4 层的散度及第 5 层与第 3 层的假相当位温差,  $p_T$ 、 $p_B$  代表云顶、云底处的气压。

高原以外地区仍用原方案。

3. 本模式粗细网格的自嵌套预报

保持本模式的垂直层次不变，而在高原及邻近区域将水平分辨率由原来的  $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ （粗网格）提高到  $0.9375^{\circ} \times 0.9375^{\circ}$ （细网格），以显示其对高原地区预报的影响。相应地，模式细网格部分的时间积分步长由原来的 4min 缩短为 2min。粗网格部分采用实测值侧边界条件，细网格部分采用单向影响侧边界条件，即由粗网格模式每隔 6 小时提供一次预报的侧边界值，两次预报值间每一积分步的侧边界值均由时间线性插值求取<sup>[17]</sup>。

4. 预报试验设计

根据上述改进方案及其组合，连同原模式方案在内，共设计了 6 组预报试验。

试验 I：作为对比，该试验仍用原模式方案，仍以未经订正的 FGGE 资料作初始场，它将反映原模式在高原地区的预报能力。

试验 II：对个例 1 和个例 2 分别采用综合订正后的相对湿度场和风场作初始场，其余同试验 I。

试验 III：对两个例同时采用综合订正后的风场和相对湿度场作初始场，其余同试验 I。试验 III、II 和 I 的对比可显示改进初始风场和初始相对湿度场对预报的影响及其相对重要性。

试验 IV：该试验中在高原地区采用实测阻力系数  $C_D$  值，其余同试验 III。

试验 V：在试验 IV 的基础上进一步采用改进了的云量参数化方案和积云参数化方案。比较试验 V、IV 和 III 可看出改进阻力系数  $C_D$  值、云量与积云参数化的影响。

试验 VI：为试验 V 的嵌套细网格版的预报。对比试验 VI 与 V 可显示嵌套及提高水平分辨率的影响。

这样，分别取两个例中高原涡生成前的 7 月 30 日 12 时和 6 月 23 日 12 时为初始场，对上述预报试验一律积分 24 小时。

表 1 是这 6 组试验及其预报结果的总结。

表 1 6 组试验及预报效果总结

| 试验<br>序号 | 初 始 场   |         | 物 理 过 程 |       |       | 水 平<br>分辨率 | 预 报 效 果    |                 |
|----------|---------|---------|---------|-------|-------|------------|------------|-----------------|
|          | 相对湿度    | 风       | $C_D$   | 积云参数化 | 云量参数化 |            | 降 水        | 500 hPa 流场      |
| I        | 原资料     | 原资料     | 原       | 原     | 原     | 粗          | 雨量、雨区偏大    | 报出高原中部切变线，未报出低涡 |
| II       | 仅订正个例 1 | 仅订正个例 2 | 原       | 原     | 原     | 粗          | 仅对个例 1 有改进 | 改进不明显           |
| III      | 订正      | 订正      | 原       | 原     | 原     | 粗          | 仅对个例 2 有改进 | 改进不明显           |
| IV       | 订正      | 订正      | 改       | 原     | 原     | 粗          | 改进不明显      | 改进不明显           |
| V        | 订正      | 订正      | 改       | 改     | 改     | 粗          | 有改进        | 有改进             |
| VI       | 订正      | 订正      | 改       | 改     | 改     | 细          | 雨量太大       | 有改进             |

注：原资料 = 原 FGGE IIIb 级资料，订正 = 综合订正，原 = 原方案，改 = 改进方案，粗 = 粗网格，细 = 嵌套细网格。

四、试验结果分析

限于篇幅，下面只分析各试验中高原地区降水及 500 hPa 流场的预报结果。

### 1. 原模式原初始场的预报

个例 1 的实况流场上高原 30°N 附近有一切变线, 其西端有一低涡 (图 3a), 实况雨区主要分布在该切变线以南 (图 4a)。试验 I 虽也预报了高原中部的切变线及 35°N 以北的流场, 但未报出低涡, 预报的切变线偏弱, 位置偏北偏西, 南部的反气旋也与实况相差较大 (图 3b)。预报的雨区过大, 高原 35°N 以南几乎全在 10mm 以上雨区内, 西部还出现了 25mm 以上的雨区 (图 4b)。对个例 2 也存在类似的预报偏差 (图 5b、6b)。

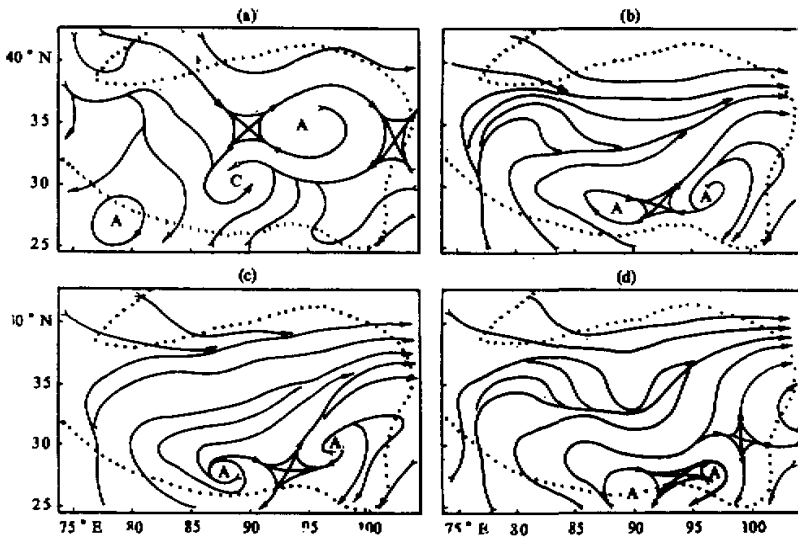


图3 高原地区1979年7月31日12时500 hPa实况 (a) 及试验I (b)、试验III (c)、试验 V (d) 预报的流场

### 2. 改进初始相对湿度场和风场的影响

试验 II 对个例 1 仅订正初始相对湿度场。与试验 I 相比, 高原中西部预报的雨区明显缩小, 也未出现 25mm 以上的雨量 (图 4b, c)。对个例 2, 由于初始风场的订正仅限于 500 hPa 层局部区域, 结果预报的降水无实质性改进 (图 6c)。在同时订正初始湿度场和风场的试验 III 中, 则个例 2 的高原中西部降水预报改进更为显著 (图 6c, d)。因水汽是降水的物质基础, 经综合订正后的初始湿度场纠正了原 FGGE 资料中高原中西部各层均偏湿的误差, 故对降水预报改进明显, 这是容易理解的。但是, 订正初始相对湿度场和风场对流场预报影响不很明显, 如个例 1 (图 3b, c)。

### 3. 改进 $C_D$ 值、云量与积云参数化的影响

改进高原地区 $C_D$ 值的试验 IV 的结果表明, 无论是降水还是流场的预报均无明显变化, 如个例 1 (图 4e, 流场图略)。这和我们的另一研究结果基本相同<sup>[18]</sup>。可能与该试验中高原大部分地区 $C_D$ 值实际改变不大, 加之积分时间短有关。

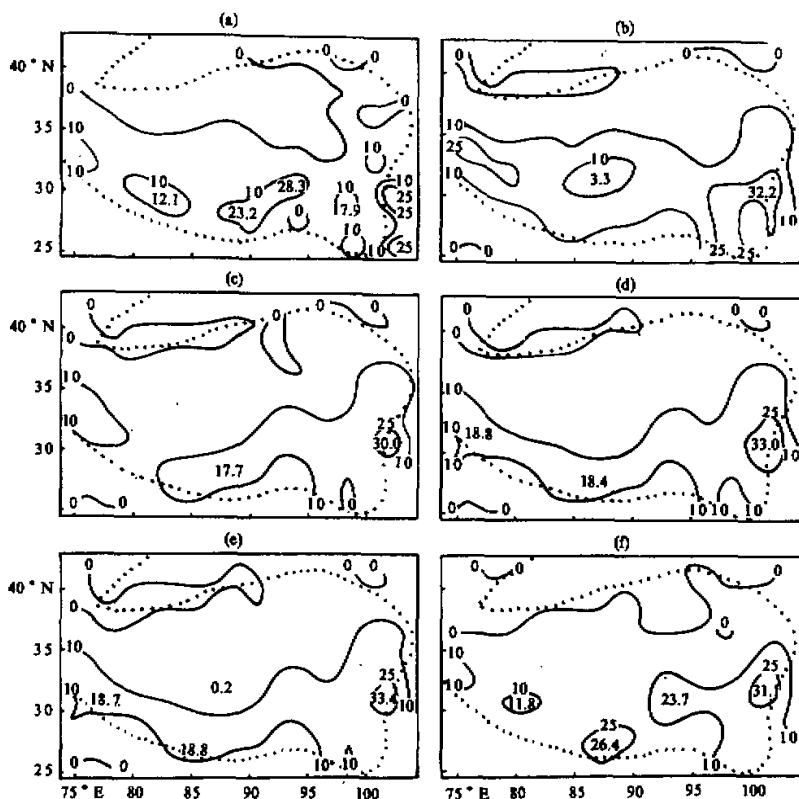


图4 高原地区1979年7月30日12时—31日12时实况 (a) 及试验I (b)、试验II (c)、试验III (d)、试验IV (e)、试验V (f) 预报的雨量

试验 V 中由于进一步改进了云量和积云参数化方案, 两个例预报的流场, 特别是降水都有显著改进。在个例 1 中, 该试验正确地预报了柴达木盆地的无雨区 (图 4a, f)。原在试验 II、III 及 IV 中均出现的高原南边缘东西向狭长伸展的 10mm 以上雨带 (图 4c, e), 已断裂为 4 片雨区, 其位置和中心值相当接近实况 (图 4a, f)。该试验预报的 500 hPa 流场 (图 3d), 与试验 I 和 III 相比 (图 3b, c), 高原中部切变线的位置, 低涡产生区域流线的气旋性弯曲明显加强, 这些都较接近实际 (图 3a), 切变线以南两虚假反气旋南移并减弱了, 只是仍未出现闭合的低涡环流。在个例 2 中, 类似的改进和缺陷也存在 (图 6a, e; 5a, c)。

#### 4. 提高模式水平分辨率的影响

图 5d 是本模式嵌套细网格版预报的个例 2 的 500 hPa 流场。与试验 V 相比, 试验 VI 预报的高原中部切变更清楚了, 实际涡产生区的气旋性环流虽进一步增强, 但仍未出现闭合低涡, 而在切变线东端出现一弱涡旋 (图 5c, d), 即流场预报有改进。细网格版预报的雨区基本合适, 但降水量却倍增了, 明显偏大 (图 6e, f)。对个例 1 的

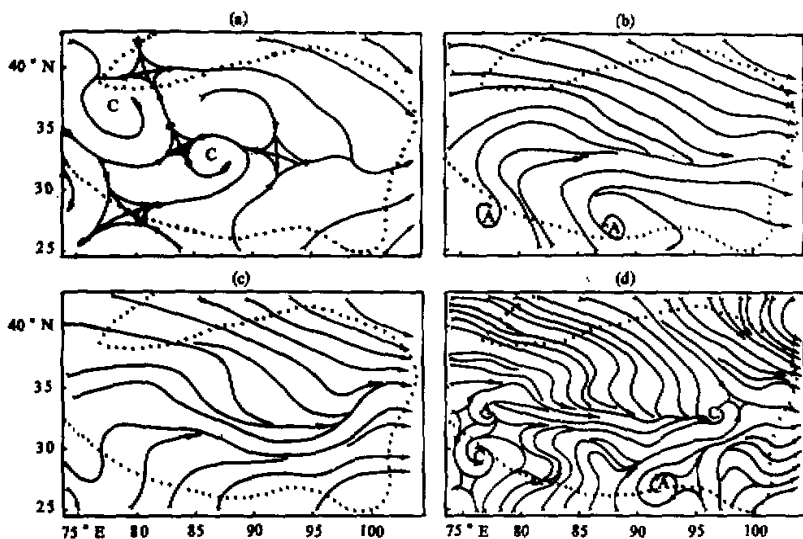


图5 高原地区1979年6月24日12时500 hPa实况 (a) 及试验I (b)、试验V (c)、试验VI (d) 预报的流场

预报也是如此 (图略)。为此我们曾调试积云参数化方案中控制成云条件的有关参数, 也进一步提高了控制大尺度降水的饱和凝结临界相对湿度值, 但收效甚微 (图略)。因高原地区资料稀少, 这限制了我们对本试验预报结果中的细节作更深入的分析。

## 五、讨论和结论

试验 I 的预报说明, 即便使用 1979 年 FGGE 这样高质量的格点资料作初始场, 由于其中未考虑该年高原中西部四个临时加密站的数据, 也会因其本身的偏差而给高原地区的预报带来误差, 这说明加密高原西部资料的重要性。但目前增设测站难以实现, 为此, 本文作者之一曾提出用现有高原中部站资料拟合西部四站资料的方法<sup>[19]</sup>, 也可在高原西部构造人造站, 并利用卫星云图等, 这些均不失为改进高原地区 (特别是其西部) 初始场的方法。

试验 VI 显示, 本模式嵌套细网格版在高原地区的降水预报明显偏大。分析表明, 大尺度和积云降水两分量均增加了。由于 Krishnamurti 多元回归方案的预报性能不仅与地理位置有关, 而且随模式分辨率而变化, 因此, 该试验在模式水平格距缩小的情况下, 积云参数化方案中增湿系数等的计算仍沿用粗网格版公式, 而未采用与细网格相应的新的拟合关系式, 这是影响降水预报的原因之一。

高原低涡因尺度小、浅薄、强度弱, 又是高原复杂地形动力和热力共同影响下的产物, 看来要准确预报它还有一定难度。前述改进预报试验虽未报出闭合的高原低涡环流, 但至少明显地加强了低涡区的气旋性涡度及辐合特征, 这增强了我们利用本模式作进一步改进的信心。

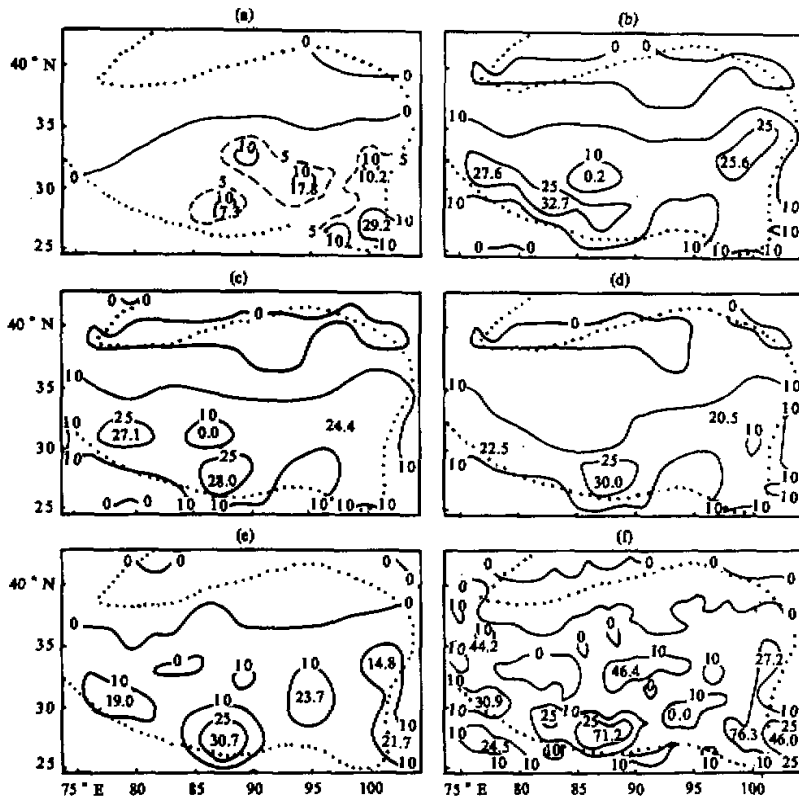


图6 高原地区1979年6月23日12时—24日12时实况 (a) 及试验I (b)、试验II (c)、试验III (d)、试验V (e)、试验VI (f) 预报的雨量

从上面的分析和讨论, 可初步得到以下几点结论:

(1) 1979年 FGGE 资料因未计高原西部实测站资料, 其风场和相对湿度场在高原西部存在着明显的误差, 特别是这一区域各层的相对湿度明显偏高, 应予以订正。

(2) 在高原地区通过综合订正初始相对湿度场和风场, 改进本模式的云量参数化和积云参数化方案, 可明显改善本模式在高原地区的降水预报, 且对夏季高原中西部的典型切变线流场有较好的预报能力, 也能预报出高原低涡区气旋性曲率的增强, 但未报出闭合低涡环流。

(3) 在高原地区采用上述综合订正的初始场, 改进了的云量与积云参数化方案是可行的, 但现行的本模式嵌套方案用于高原地区时仍需修改, 还应继续努力改进高原低涡流场的预报。

**致谢:** 张立盛同志参加了FGGE资料的分析工作, 惠晓英、陈玉春同志分别提供了Cressman客观分析程序和本模式嵌套预报程序, 孙国武副研究员提供了部分卫星云图的分析结果, 在此深表谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 钱永甫、颜宏, 1981, 有地形数值模式中大气动力学方程组计算精度的探讨, 中国科学院兰州高原大气物理研究所集刊, 第一号, 科学出版社, 1—13.
- [2] 颜宏、钱永甫, 1981, 有地形模式中坐标变换和气压梯度力计算问题的讨论, 大气科学, 5, 175—187.
- [3] Shen, R. J. et al., 1986, Numerical simulation of the development of vortices over the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, *Meteor. Atmos. Phys.*, 35, 70—95.
- [4] Dell'osso, L. and S. J. Chen, 1986, Numerical experiments on the genesis of vortices over the Qinghai-Tibet Plateau, *Tellus*, 38A, 236—250.
- [5] Wang, B., 1987, The development mechanism for Tibetan Plateau warm vortices, *J. Atmos. Sci.*, 44, 2978—2994.
- [6] 罗四维、杨洋, 1992, 一次青藏高原夏季低涡的数值模拟研究, 高原气象, 11, 39—48.
- [7] 颜宏, 1987, 复杂地形条件下嵌套网格模式的设计, 高原气象, 6, 第2期(增刊), 1—139.
- [8] 钱正安等, 1994, 复杂地形条件下嵌套网格模式35例数值预报的总结, 高原气象, 13, 144—152.
- [9] 青藏高原气象科学实验领导小组, 1985, 1979年5—8月亚洲高空流线图卷, 第二册, 第三册, 气象出版社.
- [10] 陈产贤, 1984, 1979年5—8月青藏高原降水分析, 青藏高原气象科学实验文集(一), 科学出版社, 279—290.
- [11] 钱正安等, 1984, 1979夏季青藏高原低涡的统计及低涡产生的气候因子探讨, 青藏高原气象科学实验文集(二), 科学出版社, 182—194.
- [12] 陈伯民、钱正安, 1992, 一个适合青藏高原地区的修改了的郭型积云参数化方案, 高原气象, 11, 1—11.
- [13] Cressman, G. P., 1959, An operational objective analysis system, *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367—374.
- [14] 罗四维等, 1990, 青藏高原地区500 hPa FGGE IIb 风场订正方法及其分析, 高原气象, 9, 1—12.
- [15] 章基嘉等, 1988, 青藏高原气象学进展, 科学出版社, 70—77.
- [16] 钱正安等, 1992, 亚洲地区云量参数化的对比试验及云的影响, 气象学报, 50, 50—59.
- [17] 陈玉春等, 1988, 1981年7月四川特大暴雨的数值预报和中尺度系统的分离, 高原气象, 7, 300—311.
- [18] 张立盛、钱正安、陈伯民, 1994, 黑河地区地面阻曳系数的估算及其影响的数值试验, 高原气象, 13, 257—265.
- [19] 焦彦军、吴声金、钱正安, 1991, 青藏高原及其邻近地区温压湿场的时空统计特征及其应用, 高原气象, 10, 13—25.

## Numerical Tests for Predicting the Precipitation and Vortices over the Tibetan Plateau in Summer

Chen Bomin and Qian Zhengan

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

### Abstract

This paper first analyzes the differences of the wind and relative humidity fields of FGGE level-IIIb data set for the period from June to July 1979 over the Tibetan Plateau from the truth and reveals the necessity to revise the data set over the west of the Plateau. Then, the initial wind and relative humidity fields in a regional model is corrected, parts of its physical processes modified, and its horizontal resolution increased. Six predicting experiments are designed. A set of 24-h forecasts of two Plateau vortex/shear line precipitation cases are carried out. The results show that: the precipitation forecast over the Plateau can be clearly improved by modifying the initial field and model physics. The flow field can also be improved to some extent. This shows that the above modification schemes are feasible. However, the nesting scheme of the model over the Plateau remains to be modified. The next efforts should focus on improving the forecast skill for the Plateau vortex flow field.

**Key words:** Tibetan Plateau; numerical prediction; initial field; model physics; horizontal resolution.