# AREMS/973 模式系统对 2004 年中国汛期 降水实时预报检验

吴秋霞1 史历1 翁永辉2 杨玉华3 倪允琪1

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081
 2 中国气象局预测减灾司天气处,北京 100081
 3 上海台风研究所,上海 200030

摘 要 2004年夏季5~8月,AREMS/973模式系统投入了业务运行,模式区域主要覆盖了中国大陆及周边临 近地区,该模式系统基于中国气象局 MICAPS/9210 业务数据平台,每天2次、完全自动的实时预报24h累积降 水。作者主要对每日 0000 UTC 时起报的24h累积降水预报场进行综合检验,由此对 AREMS/973模式系统的 24h降水预报能力给予客观的评价。AREMS/973模式系统对于中国汛期降水具有很强的预报能力,其24h累 积降水的月总降水分布很好地反应了汛期各时期主雨带的位置、强度及范围,同时该模式系统能够准确预报出独 立降水事件的发生和发展,其中,长江中下游和东北地区预报降水与观测降水的时间位相吻合最好;除了5月和 8月华北地区、5月西南东部地区、以及5月和6月长江中下游地区,AREMS/973模式系统预报的降水强度总体 上弱于观测降水强度,且对于25 mm以上量级的降水过程,模式预报的降水范围小于观测降水范围。AREMS/ 973模式系统预报降水的能力随着降水量级的增大而减小,降水量级愈大,模式预报技巧愈低,对于50 mm以上 量级的降水过程,模式系统预报降水事件的发生概率类似于随机偶然事件的发生概率。5月,长江中下游地区降 水预报略优于其他地区,其次是华南地区,6月雨带北移至江南和江淮地区,此时,长江中下游地区降水预报显 著优于其他地区,7月末至8月华北雨季开始,降水预报最优区北移至华北地区,即 AREMS/973模式系统降水 预报最优区随着雨带的北移而北移,主雨带所在区域往往也是模式降水预报最优的地区。作者对此进行了初步 探讨。

关键词 AREMS/973 模式系统 24 h 累积降水 降水预报检验 文章编号 1006-9895 (2007) 02-0298-13 中图分类号 P435 文献标识码 A

# Verification for AREMS/973 Real-Time Precipitation Forecasts over China During the Flood Season in 2004

WU Qiu-Xia1, SHI Li1, WENG Yong-Hui2, YANG Yu-Hua3, and NI Yun-Qi1

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Department of Forecasting Services and Disaster Mitigation, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Shanghai Typhoon Institute, Chinese Meteorological Administration, Shanghai 200030

Abstract AREMS/973 (Advanced Regional Eta Model System/973) had been run in real-time for the 2004 summer season (May through August). AREMS/973 covers China and the surrounding areas. The system produces real-time 24 h accumulated precipitation predictions and is automatically run twice daily, initialized at 0000 and 1200 UTC using the China Meteorological Administration's MICAPS/9210 operational data interface. The 24 h real-time

**收稿日期** 2005-09-14, 2005-12-14 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418300,科技部科技平台重点项目 2003DIA6N001

作者简介 吴秋霞,女,1972年出生,博士,研究方向:中尺度数值预报、气候变化。E-mail: halen\_mona@sohu.com

accumulated precipitation forecasts for the 2004 summer season based on 0000 UTC are verified against the observations, for a comprehensive and objective evaluation that tested the 24 h accumulated precipitation forecast skill of AREMS/973.

Based on the Cressman interpolation and the threat, bias and Heidke skill scores, and, at the same time, paying attention to the spatial and temporal characteristics of the 24 h accumulated precipitation, some verification results are as follows: AREMS/973 has shown a surprising skill in forecasting the precipitation of the Chinese flood seasons, and the 24 h accumulated monthly total precipitation forecasts have correctly shown the location, strength and coverage of the main rain belt during the different periods of the flood seasons. At the same time, the model can predict the day-to-day variations of the observed precipitation, although the system cannot produce the details in spatial and temporal variation of the observation. The time series of domain-accumulated daily total precipitation forecasts, especially over the middle and lower Reaches of the Yangtze River and Northeast China, are in very good agreement with the observations. AREMS/973 usually under-predicted precipitation amounts for the China flood season, except for North China in May and August, eastern Southwest China in May, and the middle and lower reaches of the Yangtze River in May and June. Moreover, above the threshold of 25 mm/d, the model produces forecasts predicting rainfall in more limited areas than observation.

The forecast skill scores of AREMS/973 usually decrease from the light to the heavy precipitation categories, that is, the more intense the precipitation events are, the poorer the prediction skill is. For the above 50 mm/d precipitation categories, the forecast is similar to the random control.

For May, the precipitation forecast over the middle and lower reaches of the Yangtze River is the best, but there is little difference in comparison with other areas. The second best-forecast area is South China. In June, the China rainfall belt moves to the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Huaihe River valley, where the system's forecast skill is better than other areas. From the end of July through August, the flood season commences over North China. Simultaneously, the best forecast area moves north to North China. In other words, the best-forecast area usually coincides with the area of the China rainfall belt. Explanations for this result are presented within the body of this paper.

Key words Advanced Regional Eta Model System/973 (AREMS/973), 24 h accumulated precipitation, verification of precipitation forecasts

# 1 引言

AREMS/973 是配有三维变分分析的中尺度暴 雨预报系统的简称,该暴雨预报系统的模式部分主 要是在宇如聪等<sup>[1~6]①</sup>、徐幼平等<sup>[7]②</sup>、XU等<sup>[8]</sup>和 程锐等<sup>[9]</sup>研制的 AREM 模式,以及薛纪善等<sup>③</sup>和朱 国富等<sup>④</sup>研制的三维变分分析系统(GRAPES\_ 3dvar)基础上,由"973 中国暴雨"项目的数值模 式集成小组成员共同努力集成和发展的<sup>⑤</sup>。

AREMS/973 暴雨预报系统,垂直方向为 35 层 η 面,模式顶升至 50 hPa,水平方向分辨率为

37 km,模式变量水平分布格局为E网格分布;模 式侧边界采用倾向订正时变海绵边界;模式降水分 为网格尺度降水和次网格尺度降水,其中,网格尺 度降水为饱和凝结降水,同时,AREMS/973引进 了美国 NOAA 业务 Eta 模式系统中使用的被改进 Betts-Miller-Janjic (BMJ)对流参数化方案<sup>[10~15]</sup>, 以改进 AREMS/973 模式系统对次网格尺度降水 的预报能力。

299

目前,该模式系统已经具备基于 Micaps/9210 业务数据平台、完全自动化的准业务运行功能。 2003 年 6~8 月,该预报系统在湖北、安徽、上海

① Yu Rucong. Documentation of the LASG Regional Eta-Coordinate Model. Technical Report, NO. 1, LASG, IAP, CAS, Beijing, 1994. 37pp

② Xu Youping. The Numerical Study of Local Torrential Rain Process in Ya'an. LASG Annual Report, Beijing, 1996, 134~152

③ 薛纪善,庄世宇,朱国富,等. GRAPES 3D-Var 系统的科学设计方案. 中国气象科学研究院, 2001. 18pp

④ 朱国富. GRAPES 三维变分同化系统 (3Dvar) 使用指南. 中国气象科学研究院, 2003. 22pp

⑤ 史历, 孟智勇, 翁永辉, 等. 中尺度暴雨预报模式系统 (AREMS/973) 用户手册. 中国气象科学研究院, 2004. 47pp

三个省市气象局投入业务试运行,尤其在安徽省经 历了从 1991 年以来江淮流域最大的洪涝考验,取 得了较好的预报效果,在抗洪斗争中发挥了积极作 用。经中国气象局预测减灾司批准立项,自 2004 年汛期开始在湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上 海、浙江、福建等长江中下游 8 个省市气象局以及 陕西、山西省气象局推广并进行业务试验。

本文将对该模式系统 2004 年汛期 24 h 累积降 水实时预报结果,进行综合评估,并在此基础上, 对 AREMS/973 模式系统的 24 h 降水预报能力给 予客观的评价。

# 2 观测资料以及评估方法

基于 Micaps/9210 业务数据平台的观测 24 h 累积降水资料将被用于对 AREMS/973 模式系统 24 h 累积降水预报的评估。此外, AREMS/973 模 式系统预报范围为 (15°N~55°N, 85°E~135°E), 基本覆盖了中国及周边临近地区; 在模式预报范围 内,观测站点数约为 2310 个,图1 显示了这些站点 的分布情况。

同时,基于 Cressman 插值方案<sup>[16]</sup>,AREMS/ 973 模式系统预报的 24 h 累积降水将被插值到这 些不规则分布的站点上。就任何变量 α 而言,对于 每一个站点,围绕其周围总有四个模式格点,通过 对临近四个格点与被插值站点之间的距离权重进行 加权平均,站点周围四个格点的变量值将被插值至 该站点处,得到该站点处模式预报数值。Cressman 插值方案的具体公式如下:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{4} W_i \,\alpha_i}{\sum_{i=1}^{4} W_i},\tag{1}$$

其中, α<sub>i</sub> (i =1, 2, 3, 4) 是临近被插值站点的四 个格点的模式预报值, W<sub>i</sub> (i =1, 2, 3, 4) 为与每 一个格点值相对应的权重系数,它取决于四个格点 与被插值站点距离的相对远近,距离越远,权重越 小,反之亦然。此外,权重系数永远都不可以为负 值。

$$W_{i} = \frac{r_{0}^{2} - r_{i}^{2}}{r_{0}^{2} + r_{i}^{2}},$$
(2)

这里,  $r_0^2 = 2 \times \Delta x^2$ ,  $\Delta x$  为模式水平分辨率,  $r_i$  (*i*= 1, 2, 3, 4) 为四个临近格点中第*i* 个格点与被插值 站点之间的水平距离。也就是说,模式格点预报场 经 Cressman 插值后,将产生一个与观测场相对应 的站点预报场。

为了评估 AREMS/973 模式系统 24 h 累积降 水的预报能力,引进了  $T_s$  (Threat Score)、 $H_s$ (Heidke Skill Score) 及预报偏差  $B_s$ (Bias Score)



等,其中T。定义为

$$T_{\rm s} = \frac{N_{\rm a}}{N_{\rm a} + N_{\rm b} + N_{\rm c}},\tag{3}$$

这里对于给定的降水级别, N<sub>a</sub> 表示模式正确预报 发生降水的事件数(即观测和预报中都存在降水), N<sub>b</sub> 表示空报事件数(即观测中没有降水,而预报 中却有降水), N<sub>c</sub> 为漏报事件数(即观测中存在降 水, 但模式没有预报出来), T<sub>s</sub> 给出了正确预报事 件数占所有发生降水的事件数(即观测或预报中发 生降水事件)的百分比。

 $T_s$ 数值越大,说明模式预报降水的能力越强,  $T_s$ 最佳值为1,即 $N_b = N_c = 0$ 。可以看到, $T_s$ 不 受 $N_d$ (即模式正确预报的非降水事件数)的影响; Marzban<sup>[17]</sup>指出,由于不考虑模式对非降水事件正 确预报能力的影响,常会造成基于 $T_s$ 的评估结果 的偏差,尤其是在强暴雨事件的情况下。

基于此, H<sub>s</sub> 的定义<sup>[18]</sup>如下:

$$H_{\rm s} = \frac{2 (N_{\rm a} N_{\rm d} - N_{\rm b} N_{\rm c})}{(N_{\rm a} + N_{\rm c})(N_{\rm c} + N_{\rm d}) + (N_{\rm a} + N_{\rm b})(N_{\rm b} + N_{\rm d})}.$$
(4)

就随机偶然事件而言,当随机偶然事件发生时,  $N_a N_d = N_b N_c$ ,此时, $H_s = 0$ ;与之相比,当 $H_s$ 数 值为负值时,即 $N_a N_d < N_b N_c$ ,表明模式预报降 水事件的不确定性,比随机偶然事件发生的不确定 性更高; $H_s$ 最优值为1,即 $N_b = N_c = 0$ ,表明模式 的降水预报完全正确。

此外,预报偏差(B<sub>s</sub>)的定义为

$$B_{\rm s} = \frac{F}{O} = \frac{N_{\rm a} + N_{\rm b}}{N_{\rm a} + N_{\rm c}}.$$
(5)

这里,就给定的降水量级而言, $F=N_a+N_b$ 表示模 式预报的总降水事件数, $O=N_a+N_c$ 给出了观测 中出现降水的总事件数。预报偏差定义了模式预报 总降水事件数与观测发生总降水事件数之间的比 率, $B_s>1$ ,表明模式预报的降水范围大于观测的 降水范围,反之,模式预报的降水范围小于观测降 水范围, $B_s$ 最佳值为1,即 $N_b=N_c=0$ ,表明观测 降水范围与模式预报范围正好吻合。

#### 3 统计分析及结果

# **3.1 REMS/973** 模式系统预报的 24 h 累积降水的 *T<sub>s</sub>、H<sub>s</sub>、及 B<sub>s</sub>*

为了计算 AREMS/973 模式系统 24 h 累积降

水的 T<sub>s</sub>、H<sub>s</sub>及 B<sub>s</sub>,依据公式(3)~(5),可以看 到,为了计算它们,首先需要确定 N<sub>a</sub>、N<sub>b</sub>、N<sub>c</sub>及 N<sub>d</sub>。它们的具体定义是:以有降水的观测站点为 中心,寻找相应预报格点,即以有降水的每一个观 测站点为中心,以模式水平格距为半径画圆扫描, 如该圆范围内有任意一个模式格点有降水,就认为 预报正确,反之则认为预报错误。

模式预报的 24 h 累积降水为连续变量,对于 连续变量的评估,可以给定若干阈值,此时,连续 变量可视为离散变量,由此对它的评估,可借助离 散变量的评估方法;对于 24 h 累积降水,给定了 5 个阈值,分别为 0.1、10、25、50、100 mm/d,针对 2004 年中国汛期(即 5、6、7、8 月),就 AREMS/ 973 模式系统 24 h 累积降水的预报结果进行综合 分析。

此外,评估区域被分为 5 个区域,基本覆盖了 中国中部和东部区域,分别为长江中下游(25°N~ 35°N,110°E~123°E),华南(18°N~25°N,105°E ~123°E),华北(35°N~45°N,110°E~123°E),东 北(40°N~53°N,120°E~135°E),及西南东部 (20°N~35°N,100°E~110°E)。图 2 显示了中国汛 期 5 区域的平均  $T_s$ 、 $B_s$ 、 $H_s$ 。

图 2a 分别给出了 2004 年 5 月 AREMS/973 模 式系统 24 h 累积降水的区域平均  $T_s$ 、 $B_s$ 及  $H_s$ ,即 长江中下游地区、华南、华北、东北及西南东部地 区,降水阈值分别为 0.1、10、25、50、100 mm/d。 降水阈值从 0.1 mm/d 至 100 mm/d, T。变化呈下 降趋势,表明模式系统对于24h累积降水的预报 技巧随着降水量级的增大而减弱,其中,对于阈值 0.1 mm/d, 长江中下游地区 T。数值最高, 约为 80% 左右, 华北最低, 约为 55% 左右, 而对于阈 值 50、100 mm/d, T。减少至 20% 以下, 甚至接近 零。此外,华北地区 T。变化略不同于其他地区, 可以看到,  $\bigcup$  0.1~25 mm/d,  $T_s$  变化呈下降趋势, 而从 25~50 mm/d, T<sub>s</sub> 变化反而呈上升趋势,由 18% 变化至 35% 左右, 也就是说, 华北地区量级 大于 50 mm/d 降水预报优于 10~25 mm/d 的降水 预报。同时,比较各区域 T。可以看到,该模式系 统对于长江中下游地区的降水预报是最优的,T。 略高于其他地区。

预报偏差  $B_s$  的变化趋势可以看到,除华北地 区外,从  $0.1 \sim 10 \text{ mm/d}, B_s$  大于 100%,表明对于



图 2 2004 年 AREMS/973 模式系统 24 h 累积降水区域平均 T<sub>s</sub>、B<sub>s</sub>、H<sub>s</sub>: (a) 5 月; (b) 6 月; (c) 7 月; (d) 8 月。横坐标:降水阈值,单位: mm/d

Fig. 2 The domain average threat, bias, and Heidke skill scores for the 24 h accumulated precipitation forecasts of AREMS/973 in (a) May, (b) Jun, (c) Jul and (d) Aug of 2004. *x*-coordinate: precipitation threshold (mm/d)

小至中雨量级的降水,模式预报的降水区域大于观测的降水区域,而对于25~50 mm/d, B<sub>s</sub>呈下降趋势,数值小于100%,也就是说,该模式系统对于

中雨量级以上的降水,模式预报的降水区域小于观测的降水区域。比较各区域 *B*<sub>s</sub>,可以看到,除 10 mm/d 降水阈值外,长江中下游地区的 *B*<sub>s</sub>数值 总是最接近100%,所以,总体而言,AREMS/973 模式系统对于长江中下游地区降水范围的预报是最 好的。此外,华北地区不同于其他地区的是,对于 所有的降水阈值,B。均小于100%,换句话说,模 式对于华北地区降水区域的预报,总是小于观测的 降水区域。

除华北地区外,从 0.1~100 mm/d,  $H_s$  呈现 下降趋势,数值小于 100%,也就是说,对于量级 越大的降水事件,模式预报的准确性概率越低,至 50~100 mm/d阈值, $H_s$ 数值接近零,表明对于 50 ~100 mm/d以上量级的降水事件,模式预报的准 确性概率几乎可视为随机偶然事件。比较各区域, 长江中下游地区  $H_s$ 数值总是最接近 100%,即 AREMS/973模式系统对于长江中下游地区的降水 预报是最好的。同时华北地区不同于其他地区,阈 值大于 25 mm/d以上时, $H_s$ 反呈上升趋势,从图 2a 中可以看到,对于 50 mm/d 降水阈值, $H_s$ 数值 比降水阈值为 25 mm/d时大,约为 37%。

综合以上各参数,可以看到,AREMS/973 模 式系统 24 h 累积降水的预报能力随着降水阈值的 增大而减小,对于 25 mm/d 量级以上的降水,模式 预报的降水区域小于观测的降水区域,同时,对于 50~100 mm/d 以上级别的降水事件,模式预报降 水事件的准确性概率相似于随机偶然事件的发生概 率。此外,比较各区域 *T*<sub>s</sub>、*B*<sub>s</sub>、*H*<sub>s</sub>,模式对于长江 中下游地区 24 h 累积降水的预报是最好的。

图 2b 给出了 2004 年 6 月各区域 T<sub>s</sub>、B<sub>s</sub>、H<sub>s</sub>, 可以看到, 与 5 月各参数的变化趋势相似, 模式对 于 24 h 累积降水的预报能力随着降水阈值的增加 而变弱,同时, 各区域之间的比较表明, 长江中下 游地区各参数值明显优于其他地区,即 AREMS/ 973 模式系统对于长江中下游地区的 24 h 累积降 水预报是最优的。

2004 年 7 月 (图 2c),当降水阈值从0.1 mm/d 增至 100 mm/d 时, *T*<sub>s</sub>、*B*<sub>s</sub>、*H*<sub>s</sub> 各参数有着类似的 变化,呈下降趋势,即模式的预报能力随着降水阈 值的增加而减弱。此外,比较各区域可以看到长江 中下游地区不再是模式预报最优的地区,除 50 mm/d 降水阈值外,模式在华南地区的预报能 力略高于长江中下游地区,同时,对于 100 mm/d 的降水阈值,在西南东部的模式预报明显优于其他 地区。 比较各区 *T*<sub>s</sub>、*B*<sub>s</sub>、*H*<sub>s</sub>(图 2d), 2004 年 8 月华 北地区模式系统 24 h 累积降水的预报效果是最好 的,此时正是华北雨季。

综上所述, AREMS/973 模式系统对于中国汛 期降水具有很强的预报能力,同时,其24h累积降 水的预报能力随着降水阈值的增加而变弱,对于 25 mm/d 以上量级的降水事件,模式预报的降水 区域小于观测的降水区域,对于 50 mm/d 量级以 上的降水事件,模式系统预报降水事件的发生概率 类似于随机偶然事件的发生概率。5月,雨带位于 华南地区, 但模式对于长江中下游地区的 24 h 累 积降水预报效果略优于其他地区,其次是华南地 区;6月,雨带位于长江流域,此时模式对于该地 区的降水预报显著优于其他地区;7月,雨带继续 向北移动,是雨带北移的过渡期,此时,长江中下 游地区不再是预报效果最优的地区,降水阈值不 同,最优预报区也不同:8月,华北雨季,华北地区 亦是模式预报效果最优的地区,即模式 24 h 累积 降水预报的最优区域随着雨带北移而北移。

### 3.2 AREMS/973 模式系统 24 h 累积降水的时空 分布

以上的分析表明,基于 T<sub>s</sub>、B<sub>s</sub>、H<sub>s</sub>,AREMS/ 973 模式系统对于中国汛期 24 h 累积降水具有相 当不错的预报能力。另一方面,比较观测与模式预 报 24 h 累积降水的时空分布,可以较为直观地评 估模式预报 24 h 累积降水的能力。图 3 给出了 2004 年 5、6、7、8 月 24 h 累积降水的月总降水分 布。

从图 3 各月总降水分布可以看到, 5 月主雨带 位于华南地区,模式对于华南地区 200 mm 以上量 级的降水区域的预报,与观测非常接近,但模式没 有准确预报出 400 mm 以上量级的降水区域。从总 体上说,AREMS/973 模式系统对 24 h 累积降水的 月总降水范围及强度的预报与观测比较接近;此 外,32°N 以北地区,模式预报的降水强度大于观测 降水。

6月降水分布表明,6月主雨带移至江淮地区, 模式预报的6月总降水分布很好地抓住了该雨带, 同时,模式预报的200 mm以上量级降水范围小于 观测。

7月雨带北移,华北及东北降水增强,同时, 华南及西南地区降水再次增强,模式很好地预报出



图 3 2004 年累积 24 h 降水的月总降水分布: (a) 观测; (b) AREMS/973 模式系统预报

Fig. 3 The spatial distribution of 24 h accumulated monthly total precipitation of (a) observation, (b) AREMS/973 forecasts in 2004

这一点。此外,可以看到,模式预报的主雨带降水 强度及范围小于观测的降水强度及范围。

8月,除东部、南部沿海地区降水强度较大外, 大陆地区降水中心分散,强度约为200~400 mm/ 月;与观测比较,可以看到对于东部、南部沿海地 区,模式预报的降水强度偏弱,同时,模式预报的 华北地区降水强度显著偏强;此外,就整体而言, 除中西部地区,模式预报降水范围与观测的降水范 围吻合较好。图4给出了各区域总的月总降水。



图 4 显示了各区域总的月总降水,从图中可以 看到,长江中下游地区,5月和6月模式系统预报 的月总降水量值大于观测的月总降水量值,但至7 月、8月,观测的月总降水量值大于模式预报的月 总降水量值,也就是说,在长江中下游地区,AR-EMS/973模式系统预报的累积24 h月总降水强度 5月和6月偏强,7月、8月偏弱。

从 5 月至 8 月, 华南地区, AREMS/973 模式 系统预报的累积 24 h 月总降水量值总是小于观测 的月总降水量值, 其中 5 月两者量值非常接近。华 北地区, 5 月模式系统预报的月总降水强度略强于 观测, 至 6 月、7 月, 模式系统预报的月总降水量 值小于观测, 但 8 月, 模式系统预报的累积 24 h 月



图 4 2004 年观测与 AREMS/973 模式系统预报的累积 24 h 区 域总的月总降水: (a) 长江中下游; (b) 华南; (c) 华北; (d) 东 北; (e) 西南东部

Fig. 4 The observed and forecasted 24 h accumulated monthly domain total precipitation over (a) the middle and lower reaches of the Yangtze River, (b) South China, (c) North China, (d) Northeast China and (e) eastern Southwest China in 2004 总降水量值远大于观测的月总降水量值。东北地 区,从5月至8月,模式系统预报的月总降水强度 小于观测的月总降水强度。在西南东部地区,除5 月模式系统预报的月总降水量值大于观测的降水量 值外,6月至8月,预报月总降水强度小于观测的 月总降水强度。

总之,AREMS/973模式系统预报的汛期不同 时期累积24h降水的月总降水分布特征与观测非 常接近,但与观测相比,除5月和8月华北地区、5 月西南东部地区、以及5月和6月长江中下游地区 外,模式系统预报的降水强度总体偏弱。对于一个 模式系统的评估,除了关心总体的降水空间分布 外,还须关注降水的时间分布特征,即对各单独事 件的预报能力。图 5 给出了长江中下游、华南、华 北、东北及西南东部地区的区域总降水量时间演变 曲线,时间跨度为 5~8 月,其中,由于资料缺测, 时间序列不包含 5 月 1、2 日,6 月 1 日,7 月 4、5、 21 日。

从图 5a 中可以看到,在长江中下游地区,对于 每一次的降水事件,AREMS/973 模式系统相当准 确地预报出降水过程的发生、发展,预报降水量与 观测降水量之间的同期相关系数达 88.01%,此外, 可以看到,预报降水量峰值与观测降水量峰值基本 吻合,除了 8月 9~20 日的降水过程,该过程模式 预报的降水量强度远小于观测强度。



与长江中下游地区类似,对于华南地区(图

图 5 2004 年观测和 AREMS/973 模式系统预报的累积 24 h 区域总降水: (a) 长江中下游; (b) 华南; (c) 华北; (d) 东北; (e) 西南东部 Fig. 5 The observed and forecasted 24 h accumulated domain total precipitation over (a) the middle and lower reaches of the Yangtze River, (b) South China, (c) North China, (d) Northeast China, and (e) eastern Southwest China in 2004





预报降水量峰值与观测降水量峰值基本一致,但预 报降水强度总体弱于观测降水强度,其中,7月16

~24 日的降水过程,观测降水量峰值远大于模式 系统预报的降水量峰值。

在华北地区(图 5c),AREMS/973 模式系统 基本预报出各降水过程的发生、发展,与观测的同 期相关系数达79.6%,同时也是相关系数最小的区 域;但不同于华南地区,在相当多的降水过程中, 模式系统预报的降水强度大于观测降水强度,如5 月10~14日、6月3~7日、6月28~7月3日以及 8月24~31各过程的降水量峰值,均显著大于观测 降水量峰值。

图 5d 显示了东北地区的区域总降水的时间变 化,从图中可以看到,AREMS/973 模式系统对于 各降水过程发生、发展的预报与观测非常吻合,两 者的同期相关系数达 89.89%,与其他区域相比, 同期相关系数最高。同时,就降水强度而言,模式 系统预报降水量峰值小于观测降水量峰值。

图 5e 给出了西南东部的区域总降水变化,从 图中可以看到,AREMS/973 模式系统预报的降水 发生、发展过程与观测比较吻合,两者的同期相关 系数约为 82.89%。除 5 月外,模式系统预报的降 水量峰值小于观测降水量峰值。

综上所述,与观测相比,AREMS/973 模式系 统很好地预报出累积 24 h 降水的时空分布,模式 预报的累积 24 h 降水的月总降水分布特征与观测 的汛期各时期主雨带的位置、强度及范围吻合很 好;同时,AREMS/973 模式系统对各降水过程的 发生、发展的预报与实况非常接近,在长江中下游 和东北地区,预报与观测的同期相关系数达到 88% 左右,同期相关系数最小的区域为华北地区,也达 79.6%。此外,就降水强度而言,AREMS/973 模 式系统预报的降水强度总体上弱于观测降水强度, 但 5 月和 8 月华北地区、5 月西南东部地区、以及 5 月和 6 月长江中下游地区除外。

# 4 结论与讨论

基于 AREMS/973 模式系统实时 24 h 累积降水的预报结果,借助 T<sub>s</sub>、B<sub>s</sub>、H<sub>s</sub>等评分方法,同时 关注降水的时空演变分布特征,本文对 AREMS/ 973 模式系统在中国及临近地区 2004 年汛期(5~8 月)降水的预报能力,进行了综合评估。用于比较 的观测 24 h 累积降水站点资料来源于 MICAPS/ 9210 业务数据平台,观测站点总数约为 2310,主 要分布于中国大陆地区。

由于中国汛期的雨带主要位于中部和东部地 区,所以,本文选择了5个区域进行比较,即长江 中下游、华南、华北、东北及西南东部地区,基本 覆盖了中国中东部地区。本文主要结论如下:

(1) AREMS/973 模式系统对于中国汛期降水 具有很强的预报能力,其 24 h 累积降水的月总降 水分布很好地反应了汛期不同时期主雨带的位置、 强度及范围。

(2) 对于独立的降水事件,模式系统亦能很好 地预报降水过程的发生和发展,其中,长江中下游 和东北地区预报降水与观测降水过程吻合最好,其 同期相关系数最高,达88%左右,相关系数最小的 区域为华北地区,也达79.6%左右。

(3)除了5月和8月华北地区、5月西南东部 地区以及5月和6月长江中下游地区,AREMS/ 973模式系统预报的降水强度总体上弱于观测降水 强度。

(4) 对于 25 mm/d 以上量级的降水过程,模式 预报的降水范围小于观测降水范围。

(5) AREMS/973 模式系统预报降水的能力随 着降水量级的增大而减小,降水量级为 0.1 mm/d 时, T<sub>s</sub> 约为 80%,至 100 mm/d, T<sub>s</sub> 降至 20%以 下,降水量级愈大,模式预报技巧愈低;对于 50 mm/d 以上量级的降水过程,模式系统预报降 水事件的发生概率类似于随机偶然事件的发生概 率。

(6)5月,长江中下游地区降水预报略优于其 他地区,其次是华南地区,6月雨带北移至江南和 江淮地区,此时,长江中下游地区降水预报显著优 于其他地区,7月末至8月华北雨季开始,降水预 报最优区北移至华北地区,也就是说AREMS/973 模式系统降水预报最优区随着雨带的北移而北移, 主雨带所在区域往往也是模式降水预报最优的地 区。

地面总降水可区分为大尺度降水和小尺度的对 流性降水,其中,大尺度降水是与大尺度的天气系 统活动相伴随而发生的;随着主雨带的北移,雨带 所在区域往往出现大范围降水,即与大尺度天气系 统相伴随的大尺度降水将会显著增强,对总降水量 的贡献增大。本文结论中指出,模式预报技巧最优 的区域往往是主雨带所在区域,此时,该区域大尺



图 6 AREMS/973 模式系统预报的 2004 年累积 24 h 区域总的月累积大尺度降水和对流性降水: (a) 长江中下游; (b)华北 Fig. 6 The 24 h accumulated monthly domain total grid-scale and sub-grid scale precipitation of AREMS/973 in 2004 for (a) the middle and lower reaches of the Yangtze River and (b) North China

度降水量增强,对区域总降水量的贡献增大。图 6 给出 AREMS/973 模式系统预报的长江中下游和 华北地区的区域总的月累积大尺度降水和对流性降 水,从图中可以看到,对于长江中下游地区,5、6 月大尺度降水强度最强,至7月明显减弱,同时对 流性降水量值增大,8月大尺度降水强度再次增 强,而对流性降水继续增强,也就是说5、6月雨带 位于长江中下游地区,大尺度降水强度最强,对总 降水的贡献最大,此时,AREMS/973 模式系统预 报技巧最高的地区正位于长江中下游地区。

与长江中下游地区不同的是,华北地区 5、6 月大尺度降水强度最弱,之后,大尺度和对流性降 水强度开始增强,至 8 月强度达到最强,此时,雨 带位于华北地区,正是华北雨季,同时,华北地区 也是 AREMS/973 模式系统预报最优的地区。

综上所述,AREMS/973模式系统预报最优的 区域随着雨带的北移而北移,雨带所在地区往往是 模式预报最优区域的直接原因是,预报最优区域, 也就是雨带所在区域,往往大尺度降水强度最强, 对该区域总降水的贡献最大,由于模式系统对由大 尺度天气系统所引起的大尺度降水的预报能力优于 小尺度的对流性降水,所以,当大尺度降水强度增 强、贡献增大时,模式预报技巧也相应增强。

从以上分析结论可以看到,AREMS/973 模式 系统对于中国汛期降水具有很好的预报能力,但对 于 50 mm/d 以上量级的强降水过程,模式的预报 技巧已经相当低。此外,模式降水预报最优区往往 也是汛期主雨带所在区域,这表明 AREMS/973 模 式系统对网格尺度降水的预报能力强于次网格尺度 降水。一方面,因为强降水过程往往受中、小尺度 过程影响,同时由于受模式分辨率的限制,模式中 对此类过程的描述常采用参数化的方法,不同的对 流参数化方案对次网格尺度降水过程有着不同的解 释,即与实际大气过程存在不同的偏差,所以模式 中选择参数化方案描述次网格尺度过程是一种不得 已而为之的办法,解决这种问题的办法之一就是在 模式动力、热力框架允许的范围内,提高模式分辨 率,减少模式总降水对于次网格尺度降水的依赖, 在一定程度上可以改进模式预报降水的能力。

另一方面, AREMS/973 模式系统是基于静力 平衡假设的, 虽然模式动力框架中考虑了初始场的 静力平衡偏差, 但由于模式本身的静力平衡假设, 使得模式不能充分考虑在强降水过程中起决定作用 的非静力平衡项, 这在一定程度上影响了对流上升 运动的发展, 从而进一步减弱了降水强度。所以, 为了解决 AREMS/973 模式系统预报降水强度偏 弱的问题, 对模式动力框架进行改进, 将原有的静 力平衡假设改为非静力平衡模式, 可能是提高模式 预报降水能力的一个实质性举措。

#### 参考文献 (References)

[1] 宇如聪. 陡峭地形有限区域数值预报模式设计. 大气科学, 1989, 13: 139~149 with a steep topography. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1989, 13: 139~149

[2] 宇如聪. E 网格变量分布下差分格式的性质. 大气科学, 1994, 18: 152~162

> Yu Rucong. Properties of the spatial finite-difference scheme based on the E-grid. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1994,  $18: 152 \sim 162$

- [3] 宇如聪. 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对 1993 年中国 汛期降水的实时预报试验. 大气科学, 1994, 18: 284~292
   Yu Rucong. A test for numerical weather prediction of realtime for China flood season precipitation in 1993 by a regional η coordinate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1994, 18: 284 ~292
- [4] Yu Rucong. Two-step shape-preserving advection scheme. Adv. Atmos. Sci., 1994, 11: 479~490
- [5] Yu Rucong. Application of a shape-preserving advection scheme to the moisture equation in an E-grid regional forecast model. Adv. Atmos. Sci., 1995, 12: 13~19
- [6] 宇如聪,徐幼平. AREM 及其对 2003 年汛期降水的模拟. 气象学报, 2004, 63 (6): 715~724
   Yu Rucong, Xu Youping. AREM and its simulations on the daily rainfall in summer in 2003. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 2004, 63 (6): 715~724
- [7] 徐幼平,夏大庆,钱越英.载水数值模式的实时预报试验. 应用气象学报,1996,7:257~266
  Xu Youping, Xia daqing, Qian Yueying. The real-time forecasting experiments with the water-bearing numerical model. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 1996,7: 257~266
- [8] Xu Liren, Zhao Ming. The influences of boundary layer parameterization schemes on mesoscale heavy rain system. Adv. Atmos. Sci., 2000, 17 (3): 458~472
- [9] 程锐, 宇如聪, 徐幼平, 等. AREM 地表通量参数化的一种 改进方法及其预报试验. 暴雨•灾害, 2004, (1): 12~20

Cheng Rui, Yu Rucong, Xu Youping, et al. An advanced approach for the AREM surface flux parameterization and its forecasting experiment. *Severe Rainfall & Disaster* (in Chinese), 2004, (1): 12~20

- Betts A K. A new convective adjustment scheme. Part I: Observation and theoretical basis. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1986, 112: 677~691
- [11] Betts A K, Miller M J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, **112**: 693~709
- [12] Janjic Z I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev., 1994, 122: 927~945
- [13] Manikin G, Baldwin M, Collins W, et al. Changes to the NCEP Meso Eta runs: Extended range, added input, added output, convective changes. NWS Technical Procedures Bulletin 465, NOAA/NWS, Silver Spring, MD, 2000. 84pp
- [14] Rogers E, Black T, Ferrier B, et al. Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. NWS Technical Procedures Bulletin 488, NOAA/NWS, Silver Spring, MD, 2001. 36pp
- [15] Ferrier B, Lin Y, Parrish D, et al. Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System. Modified cloud microphysics, assimilation of GOES cloud-top pressure, assimilation of NEXRAD 88D radial wind velocity data. NWS Technical Procedures Bulletin (to be numbered), NOAA/ NWS, Silver Spring, MD, 2003
- [16] Cressman G. An observational objective analysis system. Mon. Wea. Rev., 1959, 87: 367~374
- [17] Marzban C. Scalar measures of performance in rare-event situations. Wea. Forecasting, 1998, 13: 753~763
- [18] Wilks D. Statistical Methods in Atmospheric Sciences: An Introduction. Academic Press, 1995. 467pp