

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*

宇如聪

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100080)

提 要

本文通过展示一个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结果, 介绍一个能考虑我国复杂地形的, 适合于我国计算机条件的, 对我国夏季降水有相当预报能力的 η 坐标的有限区域数值预报模式。

从 6 月中旬到 8 月下旬, 连续 50 多天实时降水预报试验的 TS(Threat Score)技术评分(模式范围)平均为: 雨区范围(24 小时降水大于 1mm)预报的 TS 值为 50.2%; 24 小时降水大于 10mm 和 25mm 的 TS 值分别为 28.1% 和 17.3%。优于国内有些已用于业务预报的有限区域数值预报模式的预报结果。模式对 1993 年梅雨、川西暴雨和华北暴雨都有很好的预报。

关键词: 实时数值预报; 降水; η 坐标。

一、引 言

暴雨是我国最多见的一种灾害性天气, 常给人民的生命财产带来巨大损失。影响暴雨的因素很多, 其中地形就是一个非常重要的因素, 它与暴雨有着非常密切的关系, 象青藏高原这样的大地形无疑对我国暴雨天气系统的形成起着重要作用, 而局地中、小尺度地形却直接影响着当地暴雨的强弱。我国各地的气候最大降水中心几乎都出现在某山脉的迎风面。陶诗言等 (1980)^[1]在他们的《中国之暴雨》一书中曾指出: “中国暴雨与地形有密切关系, 夏季我国各地大到暴雨日频数分布和雨量分布都受到地形的影响。…潮湿气流受地形抬升作用, 暴雨日数最多的地区大多位于山脉的东南迎风坡。…我国具有最大的 24 小时降水量地区无一不与地形密切相关”。

近年来, 中国的气象学者对暴雨的发生、发展及其结构特征作了大量的天气分析和数值模拟工作, 但由于缺乏一个能合理考虑我国复杂地形的数值预报模式, 对中国暴雨的数值模拟和数值预报都还不够理想, 特别是受地形影响比较明显的川西暴雨和许多象 75·8 那样的局地性暴雨。为了提高我国的数值预报水平, 作者自 1986 年开始在曾庆

1993 年 11 月 6 日收到, 1993 年 11 月 23 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

存先生的鼓励和指导下开始设计了一个能考虑我国复杂地形的 η 坐标的有限区域数值预报模式,并对青藏高原背风气旋的发生发展^[2],75·8局地大暴雨^[3]和著名的“雅安天漏”^[4]进行了成功的数值模拟。在考虑地形方面,该模式的确较其它的 σ 坐标模式有明显的改进和优势。

为了进一步证实该模式的稳定性和预报能力,使之早日投入业务预报,为经济建设服务,作者在曾庆存先生的鼓励下和大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)及中国科学院大气物理所资料中心的支持下,从1993年梅雨开始前(6月14日)对该模式进行了连续50多天的实时降水数值预报试验。这一期间涉及到了1993年中国汛期的主要降水过程,包括了造成我国长江以南、川西和山东等地严重洪涝灾害的梅雨、川西暴雨和华北暴雨。模式非常成功地预报出了降水的范围、雨带的走向和主要降水日的降水强度和中心位置。

二、模式概述

该模式动力框架的主要特点^[4]是:(1)模式的基本方程组便于构造出完全能量守恒的差分格式;(2)采用了静力扣除;(3)模式的垂直坐标选用了 η 坐标;(4)选用E网格作为变量的水平分布形式;(5)位势高度与其它预报量在垂直方向交错分布;(6)对E网格的波解分离问题采取了特殊的处理技巧;(7)首次采用“半格距”差分解决了矩形E网格及球坐标E网格沿对角线的差分计算^[5];(8)采用显示分解的时间积分方案;(9)保留初始场的静力平衡误差,在静力平衡模式中,同时保留了位势高度和温度场的初值意义;(10)在一定的边界条件下,当时间积分采用梯形隐式方案时,模式有总有效能量守恒和总质量守恒。

模式的物理过程主要包括:(1)大尺度凝结降水;(2)对流调整及对流降水;(3)水平扩散和垂直通量输送;(4)地面辐射收支和边界层参数化。

模式分辨率,在水平方向,注意到模式的水平网格选用的是E网格,对E网格的两个子C网格来说,它的水平分辨率是 $1^\circ \times 1^\circ$ 的经纬格点,实际E网格模式的水平分辨率约为75km。在垂直方向,模式顶取为100hPa,即只考虑对流层范围,从海平面到模式层顶按 η 坐标等分为8层,具体每层的厚度从下往上约为:977m、1083m、1219m、1402m、1661m、2062m、2775m、4498m。

模式初始场是根据自行设计的一个简单易行的加权平均客观分析方案,先把各高空发报气象台的站点观测资料插值至所在标准等压面的水平网格点,然后再把这样的等压面资料线性插值到各模式层。没有其它的初始化过程。

为了更好地保持中小尺度的信息特征,加权的权重取为 $1/r^4$,其中 r 为站点到网格点的距离,按球面三角公式求得。地面要素的客观分析方案是先将台站高度和气象要素同时客观分析到网格点,然后再把网格点上在客观分析所得海拔高度的气象要素值订正到模式地形高度上。

模式目前还没有一个很好的检误系统,只是给出各物理量在各标准等压面的上、下极限控制。当某等压面的某一物理量的观测记录在给定的上、下极限以外时,客观分析系统自动将其视作错误记录处理。

三、对 1993 年中国汛期降水的实时预报试验

1. 试验方案

考虑到计算量和计算速度,模式区域没有包括全国的范围,而是在纬向取 30 个经度,在经向取 20 个纬度。在中国科学院大气物理研究所的 CONVEX 计算机(约三千万次)上,24 小时模式运行的 CPU 时间是 18min。由于我国汛期降水存在着雨带自南往北有规律的跳动,本次试验在 6 月 14 日到 7 月 8 日期间模式范围取在 100°E 和 20°N 之间,7 月 9 日到 8 月 5 日期间模式范围取在 95°E 和 25°N 之间。两个阶段试验模式的其它参数相同。第一个试验阶段的主要关心对象是华东的梅雨,而第二个试验阶段的主要关心对象是华北暴雨和川西暴雨。

为了使模式地形能兼顾我国东部的平滑矮小地形和我国西部的陡峭高大地形, η 坐标取为

$$\eta = \sigma \cdot \eta_s; \quad \eta_s = \frac{p_{\text{rf}}(z_s) - p_t}{p_{\text{rf}}(z_b) - p_t}; \quad \sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}, \quad (1)$$

其中 z_s 是模式中的地形高度; z_b 是用来构造坐标面的平缓地形高度,当原始的地形高度 $z_s^0 < 1000\text{m}$ 时, $z_b = z_s^0 = z_s$, 而当 $z_s^0 > 1000\text{m}$ 时, $z_b = 1000\text{m}$; $p_{\text{rf}}(z)$ 是标准层结大气在 z 高度处的气压; p_t 、 p_s 和 p 分别表示模式层顶气压,地面气压和气压。

这样,在地形海拔高度小于 1000m 的地区,地形不作阶梯处理, η 坐标等同于 σ 坐标,对地形海拔高度大于 1000m 的地区,地形按下列原则作阶梯处理:

对任一网格点的原始高度 z_s^0 , 先求

$$\eta_s^{(0)} = \frac{p_{\text{rf}}(z_s^{(0)}) - p_t}{p_{\text{rf}}(z_b) - p_t}, \quad (2)$$

总存在一个 k (k 为整数,且 $0 \leq k \leq 8$), 使得

$$\eta_{k-1/2} \leq \eta_s^{(0)} \leq \eta_{k+1/2}. \quad (3)$$

如果 $\eta_s^{(0)} \geq \eta_k$ 则令该点的 $\eta_s = \eta_{k+1/2}$, 否则, 即 $\eta_s^{(0)} < \eta_k$, 令该点的 $\eta_s = \eta_{k-1/2}$ 。最后再根据公式 (1) 反算出该点的模式地形高度 (z_s)。

2. 试验情况概述

整个试验期间,除了有时因从国家气象中心到大气物理所资料中心的资料传输线路发生故障外,预报试验都很正常,从未出现因计算不稳定而导致预报失败的情况,只是存在由于因没有被简单的检误系统查出的错误记录导致的空报降水。由于本模式的客观分析方案采用的是以 $1/r^4$ 为权重的加权平均方案,一般错误记录的影响范围不大(比较图 4b 和图 4c)。空缺的预报后来也基本补报了。

表 1 给出了整个试验期间模式范围的降水预报的 TS 技术评分,24 小时降水大于 1mm、10mm 和 25mm 的 TS 平均值分别为 50.2%、28.1% 和 17.3% (由于没有收集到

表 1 预报试验结果 24 小时 (08 时—08 时) 降水的 TS 评分

日 期	1mm	10mm	25mm	说 明	日 期	1mm	10mm	25mm	说 明
6.14—15	58	39	17		7.11—12	48	15	10	华北暴雨
6.15—16	55	25	10		7.12—13	64	32	23	华北暴雨
6.16—17	36	12	11		7.13—14	54	23	21	川西大暴雨
6.17—18	60	24	14		7.14—15	44	27	17	川西大暴雨
6.18—19	79	55	31	梅雨开始	7.15—16	53	24	20	华北大暴雨
6.19—20	76	36	18		7.16—17	44	14	06	
6.20—21	56	26	17		7.17—18	42	13	05	局地降水
6.21—22	64	39	32		7.18—19	45	20	13	
6.22—23	64	20	07		7.19—20	43	22	11	
6.23—24	52	31	09		7.20—21	61	42	20	川西暴雨
6.24—25	43	38	23		7.21—22	60	34	14	
6.25—26	24	00	00	梅雨暂停	7.22—23	44	27	21	
6.26—27	27	29	00	几乎晴天	7.23—24	33	25	18	
6.27—28	46	47	35		7.24—25	32	17	05	模式边界
6.28—29	72	36	24	梅雨继续	7.25—26	33	15	04	附近降水
6.29—30	75	47	23		7.26—27	27	10	08	局地降水
6.30—01	54	59	49		7.27—28	38	23	14	
7.01—02	53	43	33		7.28—29	44	22	16	雅安大漏
7.02—03	68	37	20		7.29—30	44	20	15	川西大暴雨
7.03—04	60	47	41		7.30—31	41	13	12	
7.04—05	69	63	40		7.31—01	33	15	09	局地暴雨
7.05—06	61	31	21		8.01—02	—	—	—	无观测降水
7.06—07	64	44	18		8.02—03	—	—	—	无观测资料
7.07—08	53	19	08	梅雨结束	8.03—04	51	16	11	
7.08—09	42	16	09		8.04—05	44	28	29	华北大暴雨
7.09—10	35	14	14	雅安、华北	8.05—06	39	16	19	
7.10—11	41	13	02	局地降水	平 均	50	28	17	

水文站的降水资料, 仅气象地面发报站的降水资料不能反映暴雨的真实分布, 所以对 24 小时降水大于 50mm 以上的预报评分暂时没有统计)。一般来说, 实际降水的雨带越清楚, 预报的评分越高, 梅雨期间的预报评分明显高于其它的预报评分, 对大范围系统性降水的预报评分明显高于对局地小范围的降水预报评分。50.2% 的 1mm 降水预报评分表明了模式对降水落区有相当的预报能力。

3. 对 1993 年梅雨的预报

尽管 1993 年的入梅形式不是非常清楚, 但降水雨带的特征分布还是存在的, 从 6 月 14 日开始预报试验到 18 日, 这一期间的实况降水和预报降水落区主要在长江以南和华南沿海之间不稳定跳动, 没有明显的规则的稳定雨带, 6 月 18 日的预报降水首次在紧贴长江以南形成了一个东西走向的较强降水带, 这也是 19 日上午大气物理所预报会商时确定 6 月 18 日为入梅的一个理论依据。19 日下午看到的实况降水与预报结果比较

一致(参见图 1a)。后来这一雨带在此稳当了约一个星期。图 1b 到 1d 给出了后来三天的降水预报和实况。模式较好地预报出了自 18 日入梅以后第一个梅雨降水阶段的雨带走向、降水分布和强度的变化情况。特别有趣的是,模式戏剧性地报出了 21 日—22 日在安庆附近的被周围大雨包围着的一个范围不大的降水小值区。这可能是模式对该地区的地形(比如其西部的大别山)反映比较真实所致。梅雨在 25 日到 28 日停了三天。

梅雨从 28 日重新开始,从其前面的降水分布(预报和观测相似)来看,可清楚地看出其雨带是自西北重新移至长江流域而停滞下来的,模式同样也预报出了这一过程(图略)。雨带自 30 日起基本稳定在长江以南。图 1e 到图 1j 给出了 6 月 29 日到 7 月 5 日的降水预报和实况的比较。由图可见,这一阶段的降水强度呈振荡增加,7 月 3 日到 4 日的 24 小时降水强度最大,往后的降水强度逐渐减弱,雨带范围逐渐缩小。模式的预报结果与实况基本一致。

由此可见,模式对象梅雨这一类系统的较大范围的降水有很强的预报能力,能较好地预报出降水的雨带走向、强度变化和中心位置。

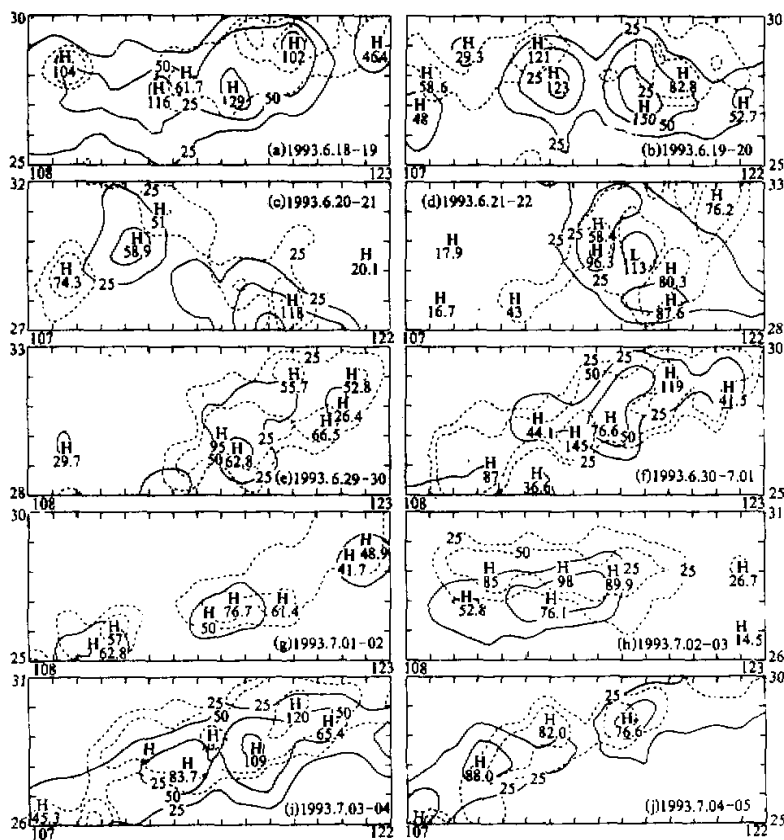


图 1 1993 年梅雨期间主要降水日(08 时—08 时)的降水
实况(虚线)和预报(实线)。最小等值线是 25mm

4. 对华北、川西暴雨的预报

相对于梅雨降水, 对华北、川西降水的数值预报难度要大得多。原因可能有两个。一是降水的天气系统一般不如梅雨那么清楚和稳定, 再就是地形作用显得更为重要。由于本模式在地形考虑上有独到之处, 尽管对这一阶段的预报结果不如对梅雨预报那样满意, 但相对于其它模式还是有相当的优势, 模式还是较成功地报出了 1993 年发生在山东、川西一带造成严重洪涝灾害的主要降水过程。

图 2 给出了自 7 月 10 日到 8 月 6 日以来发生在模式范围内华北和川西的主要降水日的降水实况和预报的对照。图 2a 是 1993 年造成山东洪涝的第一次降水过程的最后一天也是最大的降水日 (7 月 12 日 08 时到 13 日 08 时), 同时也是一次川西暴雨过程的开始日, 接着两天川西连降暴雨, 图 2b 和 2c 是 7 月 13 日到 15 日两天的川西降水实况和预报。图 2d 是山东一带降水停了两天后的又一次较大范围和较强的降水, 降水仅持

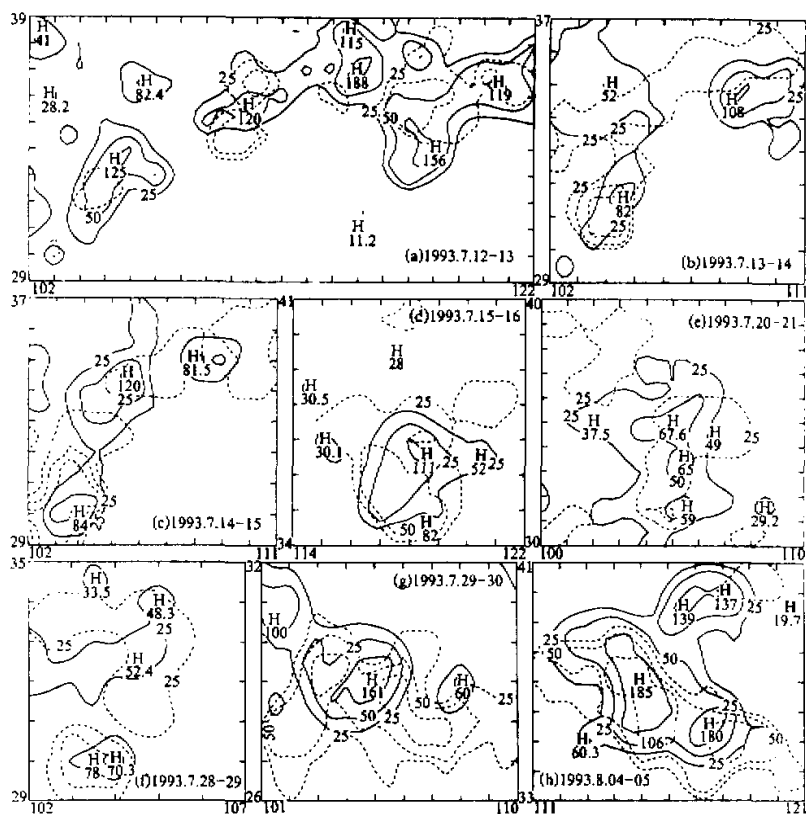


图 2 1993 年 7 月中旬到 8 月上旬华北、川西主要降水日 (08 时—08 时) 的降水实况 (虚线) 和预报 (实线), 最小等值线是 25mm

续一天。图 2e 是又一次川西暴雨过程。图 2f 和 2g 则是 1993 年川西最大的一次降水过程, 7 月 29 日到 30 日乐山某地的 24 小时最大降水达 500mm 以上(水文站)。华北 1993 年最大的一次降水过程发生在 8 月 4 日到 6 日, 图 2h 是 4 日到 5 日的 24 小时降水实况和预报结果。由图 2 可见, 模式基本上报出了降水的落区和强度。

四、需要指出的几个问题

作为首次进行的实时数值预报试验, 并且还是对一个降水缺乏通常规律性的年份, 取得上述预报结果是值得可喜的。但作为这一阶段试验的体会, 有必要指出下面几个问题, 以便提高将来的预报质量。

1. 改进模式的初始场

本模式的初始场只是通过简单的加权平均把观测站点资料插值至网格点, 这当然是很不够的, 仅由加权平均得到的初始场, 可能使得系统的高低中心的位置和强度与实况有明显差异, 这必将会导致预报偏差。另外, 没有一个完备的检误系统, 常常由于保留了一些错误记录, 导致空报、漏报降水, 甚至预报失败。比如, 7 月 29 日 08 时位于 (100°E , 31°N) 的 56146 站的 500hPa 位势为 565, 而其周围站的 500hPa 位势在 584 左右, 图 3c 是将该站的 500hPa 位势改为 585 后重新的预报结果。分别将图 3c 和图 3b (原预报结果, 同图 2g) 与图 3a 比较可知, 原来在雅安西北部的空报降水是由这一错误记录造成的。要使该模式能正式适用于业务化的需要, 改进模式的初始场产生过程, 建立完备的检误系统是必要的。

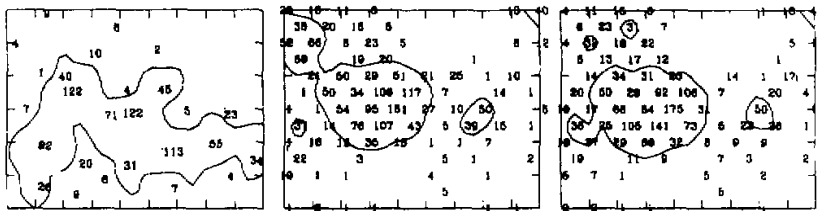


图 3 1993 年 7 月 29 日 08 时—30 日 08 时川西大暴雨
(a) 实况, (b) 原实时预报试验结果, (c) 修改错误记录后的重新预报结果

2. 提高模式的垂直分辨率

由于本模式的垂直坐标是 η 坐标, 地形在模式中是以阶梯状出现, 增加模式的分辨率, 除了有与其它模式同样的意义外, 还可使模式地形的阶梯结构更逼近于真实地形。提高水平分辨率带来的计算量增加是难以接受的, 但垂直分辨率增加一倍只使计算量增加一倍, 这对现在的计算技术和计算机条件还是可以考虑的。图 4c 是将模式垂直分辨率增加一倍后对 8 月 4 日到 5 日的降水预报, 图 4b 是原来 8 层模式实时预报试验的结果, 分别与观测降水图 4a 比较可见, 垂直分辨率增加后对降水预报的改进是明显的。

3. 关心区域应放在模式的中间部位

后来的模拟试验表明, 由于川西和华北地区离模式的边界较近, 也影响了降水预报的质量 (图略), 这是容易理解的。所以, 当把该模式用于对某一地区预报时, 应把该地区置于模式的中心部位。移动本模式的区域, 在程序实现上是非常方便的。

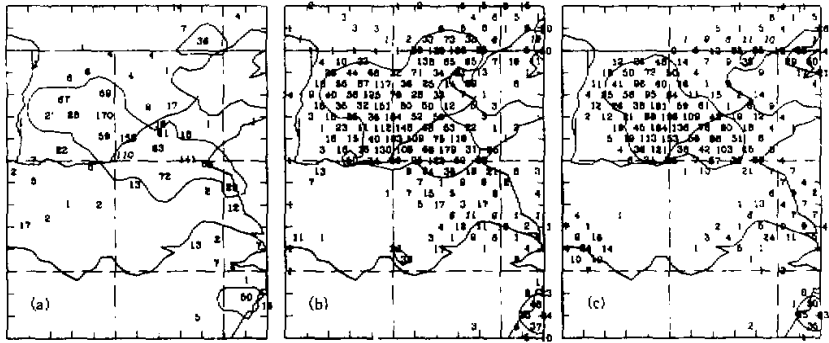


图 4 1993 年 8 月 4 日 08 时—5 日 08 时华北暴雨

(a) 实况, (b) 原实时预报试验结果, (c) 加倍垂直分辨率后的重新预报结果

参 考 文 献

- [1] 陶诗言等, 1980, 中国之暴雨, 科学出版社。
- [2] 字如聪, 1989, 陡峭地形有限区域数值预报模式设计, 大气科学, 13, 139—149。
- [3] Cai Zeyi and Yu Rucong, 1992, A numerical trial—forecasting of the 1975 Henan extraordinarily heavy rainfall with the IAP mesoscale model, *Proceeding of the 11th International Conference in Clouds and Precipitation in Atmospheric Research*, August 17—27, 1992, Montreal, Canada.
- [4] Yu Rucong and Zeng Qingcun, 1992, The design of a limited area model with steep mountains and its application to the heavy rain simulations in the East Periphery of Tibetan Plateau, *22nd International Conference on Alpine Meteorology*, Toulouse (France), 7—11 September 1992, 316—320.
- [5] 字如聪, 1991, E 网格变量分布下差分格式的性质, 大气科学, 18, No.2, 153—163.

A Test for Numerical Weather Prediction of Real-Time for China Flood Season Precipitation in 1993 by a Regional η -Coordinate Model

Yu Rucong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

In this paper, a regional E-grid η -coordinate model has been introduced to Chinese meteorologists by showing its testing real-time numerical weather prediction results for China flood-season precipita-

tion in 1993. The averaged threat scores of three thresholds, 1 mm, 10 mm and 25 mm per day, for about 50 daily succession nowcasting experiments (from Jun 15 to August 6) are 50.2%, 28.1% and 17.3%, respectively. The model has well predicted the plum rains and western Sichuan and North China heavy rains in these periods.

The model might include varied topography, suit China computer condition and have certain prediction ability for precipitation, and keeps the advantage of some operational limited area model in China.

Key words: nowcasting; numerical weather prediction; precipitation; η -coordinate.

书 讯

《中国的季风》(英文版) 出版

《中国的季风 (*Monsoons over China*)》一书(英文版)最近由 Kluwer Academic Publishers 出版公司出版, 该书的著者是丁一汇教授。这是我国第一本在西方出版的专门介绍中国季风的专著。中国的季风是全球大气环流场的主要成员之一, 与世界上其它地区的季风有明显的关系, 但是过去西方国家的学者对中国的季风了解甚少, 这本专著第一次系统而完整地介绍了中国季风的主要问题, 尤其是讨论了各种尺度季风的脉动及青藏高原对季风的影响。全书共分六章。第一章讨论了东亚的夏季风, 第二章讨论了东亚的冬季风, 第三章讨论了季风的短期脉动及其与中国主要天气现象之联系, 第四章讨论了季风的中长期脉动及其与中国旱涝的关系, 第五章讨论了青藏高原对季风的影响, 第六章讨论了中国季风区的热量、水份和能量收支以及某些动力学问题。该书中也包含有许多根据长期历史资料的研究所得到的结果。该专著是历史悠久的 Kluwer Academic Publishers 出版公司出版的大气科学图书丛书第 16 卷, 全书 432 页, 精装本定价 179 美元。该书适用于气象、水文和海洋专业的研究人员及研究生。

(英 辉)