

LASG η 坐标有限区域数值预报模式对 一次登陆台风特大暴雨的数值试验*

蔡则怡 宇如聪

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

摘要 本文用LASG η 坐标有限区域数值预报模式, 对1975年8月河南地区登陆台风特大暴雨进行了数值试验。这次暴雨有很强的局地性, 主要表现在水文站的雨量极值远超过气象站的最大雨量值, 为3~16倍。一般有限区域数值预报模式预报的雨量都比气象站的最大雨量值小。与水文站的雨量极值相差更远。LASG η 坐标有限区域数值预报模式考虑了我国复杂的地形作用, 具有能量和质量守恒的动力框架, 考虑了与降水有关的主要物理过程。用该模式对著名的“75·8”特大暴雨5~7日3天3次暴雨作了24小时数值试验, 取得了较好的预报结果: 其预报最大雨量为气象站的最大雨量值的1~5倍, 达水文站的雨量极值的34%~49%, 为模式网格面积平均的最大深度的54%~98%。预报最大雨量中心位置偏离气象站雨量中心的距离约为0.67~1.47个网格距, 偏离雨量极值的水文站的距离为0.23~1.07个网格距。这3次特大暴雨的强度、位置和其变化趋势的预报都与实况相近。同时, 模式对暴雨系统和大尺度形势的预报也都与实况基本一致。该模式之所以对这种局地性很强的突发性特大暴雨有较好的预报能力, 是由于它有较强的地形处理能力。还有, 由控制试验和4种地形敏感性试验的结果可见, 山脉的相对高度和陡峭程度, 以及山脉与暴雨系统的相对位置等对暴雨的强度是非常敏感的, 对地形稍有改变, 其暴雨强度将减少3/4以上。这次数值试验为今后提高登陆台风特大暴雨预报水平, 以及用数值模式探讨登陆台风造成的特大暴雨的物理机制, 提供了良好的条件。

关键词 登陆台风 特大暴雨 η 坐标 地形影响 有限区域数值预报模式

1 引言

台风是自然界中最强的造雨系统。自6小时到7天的雨量世界记录都是由热带气旋(台风)暴雨创造的, 我国也如此, 我国第一、第二和第三(也是大陆第一)大暴雨都是由台风造成的。我国近海17省市的24小时最高雨量记录有近80%是由台风暴雨创造的^[1]。

台风暴雨雨强, 常常引起山洪爆发、滑坡、泥石流、水库垮坝、江河泛滥等严重的自然灾害。台风暴雨大多是在台风登陆前后, 在登陆地区因受台风直接影响造成。如1974年6月13日海南暴雨, 1972年7月27日北京暴雨^[2]和1956年8月1日浙江暴雨。台

1994-06-10收到, 1996-04-15收到再改稿

* 本文是“八五”国家重点科技攻关课题85-906-07课题和国家自然科学基金支持的成果

风暴雨有时也出现在远离台风的地区,受中高纬度天气系统与台风的共同影响造成,如1976年10月17日台湾暴雨^[3],1974年8月12日山东暴雨,1977年8月21日上海暴雨^[4]等。另外,台风登陆后已减弱,在台风低压附近形成突发性特大暴雨,如1975年8月5~7日河南暴雨^[5],1975年8月8日湖北暴雨^[6],1965年8月21日江苏暴雨等。这些台风暴雨都创了该省市24小时最高雨量记录。对这些台风暴雨,特别是台风低压内形成突发性特大暴雨,目前尚缺乏有效的预报方法,对其物理机制也还不清楚,这是目前台风研究领域中的重大难题之一。

国内外一些有限区域数值预报模式对小雨(雨量 1mm/d)和中雨(雨量 10mm/d)的降水区域预报取得了较好的结果。如武汉暴雨所用中国科学院大气物理研究所(σ 坐标)有限区降水数值预报模式,对江淮流域降雨进行了7年(1987~1993)汛期的业务预报,大雨(雨量 25mm/d)的降水区其技术评分(TS)^[1]达34.5%,然而对暴雨(雨量 50mm/d)的预报TS值迅速下降,而且最大中心雨量偏小35%^[7]。目前对大暴雨乃至特大暴雨则无法报出。

“75·8”河南大暴雨在70年代后期到80年代初曾做过很多天气动力分析研究工作^[5,8,9]。近年来,应用数值模式进行数值试验是暴雨研究的一个新方向。一方面对不同数值模式的性能进行检验,另一方面在控制试验的计算雨量比较接近实况的基础上,对各种物理条件进行数值试验,以了解暴雨过程的机理。

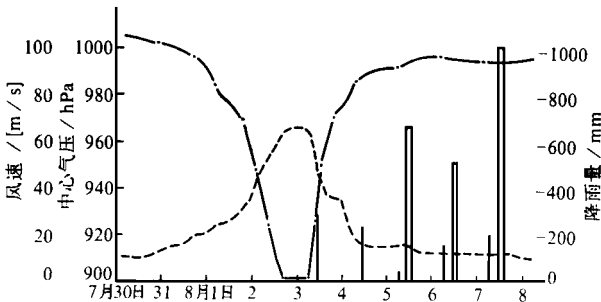


图1 1975年7503台风中心气压(实线)、风速(点线)(按每日4次观测值)变化曲线与最大日雨量图
垂直线为气象站雨量,空心柱为水文站雨量

由图1可见,7503号台风生成后,其中心气压,中心附近最大风速和雨量的演变情况。7503号台风,于1975年7月30日08时(北京时),在西太平洋17.6°N,138.2°E生成一个热带低压,31日20时加强为热带风暴,并于8月1日08时和2日02时先后达到强热带风暴和台风强度,以后继续加强,2日20时~3日08时中心气压降低到最低值900hPa,中心附近最大风速升到65m/s,3小时后(11~12时)在台湾花莲登陆。这种在登陆前几小时强度迅速加强的台风,常常造成严重灾害,7503号台风就是一例。这台风登陆后强度迅速减弱,12小时内气压上升了70hPa,中心附近最大风速减小了30m/s。3日最大雨量中心在台湾中部为292mm,后台风继续西行,穿过台湾海峡,于8月4日凌晨3~4时至福建晋江再次登陆,这时台风强度已大大减弱,中心气压升至985hPa,中心附近最大风速减为20m/s,4日最大雨量中心在江西西部为238mm,暴雨强度也趋于减弱。但是,5日在台风强度继续减弱的情况下,其北侧河南省中部出现了672mm的特大暴雨,6日雨强又稍有减弱,为514mm,7日又突然增强到1005mm²⁾(图1)。这样巨大的雨强变化,根据目

速升到65m/s,3小时后(11~12时)在台湾花莲登陆。这种在登陆前几小时强度迅速加强的台风,常常造成严重灾害,7503号台风就是一例。这台风登陆后强度迅速减弱,12小时内气压上升了70hPa,中心附近最大风速减小了30m/s。3日最大雨量中心在台湾中部为292mm,后台风继续西行,穿过台湾海峡,于8月4日凌晨3~4时至福建晋江再次登陆,这时台风强度已大大减弱,中心气压升至985hPa,中心附近最大风速减为20m/s,4日最大雨量中心在江西西部为238mm,暴雨强度也趋于减弱。但是,5日在台风强度继续减弱的情况下,其北侧河南省中部出现了672mm的特大暴雨,6日雨强又稍有减弱,为514mm,7日又突然增强到1005mm²⁾(图1)。这样巨大的雨强变化,根据目

1) TS值=正确预报面积/(正确预报面积+空报面积+漏报面积)

2) 水利电力治淮委员会,1979,淮河流域洪汝河、沙颍河水系1975年8月暴雨洪水调查报告

前暴雨预报情况,无论是主观定性的预报方法,或者客观定量的预报方法都无法预报。本文应用LASG η 坐标有限区域数值预报模式对这次历史上罕见的特大暴雨进行数值试验,为这类暴雨的数值预报寻找合适的数值预报模式,并在取得较好的雨量预报基础上,探讨台风登陆减弱后造成的突发性特大暴雨的物理机制。

2 模式概述

模式动力框架的主要特点^[10]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^[11];

这里 $\eta = \sigma \times \eta_k$, $\eta_k = (p_{ref}(z_s) - p_i) / (p_{ref}(z_b) - p_i)$, $\sigma = (p - p_i) / (p_s - p_i)$, $p_{ref}(z)$ 为标准大气 z 高度上的气压, $z_b = 0$, z_s 为模式的地形高度, p , p_s 和 p_i 分别表示气压, 地面气压和模式层顶气压 (= 100 hPa)。

(4) 选用 E 网格作为变量的水平分布形式 (图 2);

(5) 位势高度和垂直速度与其他预报量在垂直方向交错分布;

(6) 对 E 网格的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;

(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) 用 Betts^[12]的对流调整方案计算对流降水;
- (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。

该模式主要特点在于对地形的处理。众所周知,地形对气流和天气,特别是暴雨有很重要的影响。目前大多数的数值预报模式选用 σ 坐标作为垂直坐标,将地表面处理成一个坐标面,从而,无论地形如何复杂,其下边界条件总是一样简单,不会出现坐标面与地面相截的问题。但是 σ 坐标系并没有完全解决复杂地形的问題,因为它将复杂的下边界条件问题转化为方程组中气压梯度力等项的结构问题。如水平气压梯度力变成了两项之

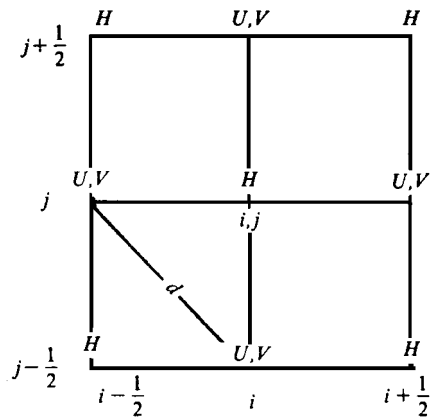


图 2 E 网格作为变量的水平分布图

和的形式, 其中一项是沿等 σ 面的位势梯度, 而另一项是沿等 σ 面的地面气压梯度, 这项作为对前一项坐标面倾斜的修正。在有地形的情况下, 两项的量级相同, 符号相反, 水平气压梯度力成为两个大项的小差, 地形越陡, σ 面越倾斜, 计算误差也越大。即使改进差分方案也不能避免大项小差的计算误差。这种计算误差大大地影响了数值预报的正确度, 乃至造成数值预报的失败。

在 η 坐标下, 地形表示为由三维网格块构成的阶梯状。在模式内部形成刚体的侧边界, 使坐标面保持准水平状态, 避免了在陡峭地形情况下, σ 面过于倾斜的缺点。同时也保持了 σ 坐标具有简单的下边界条件这一优点。为此, 1986年初大气物理研究所新研制了 η 坐标E网格有限区域数值预报模式, 对青藏高原背风气旋的发生发展^[13]和著名的“雅安天漏”^[10]进行了数值模拟, 取得了成功的结果。现在对“75·8”河南大暴雨作了数值试验, 说明由于该模式有效地考虑了陡峭复杂地形的影响, 所以不仅对地形高度超过1 500 m的我国西部地区的天气系统和降水量的计算, 有了很好的结果。而且, 对地形高度较低的我国东部丘陵地区的暴雨系统和降雨量的计算, 也有较好的结果。为证实该模式的稳定性和预报能力, 使之早日投入业务预报, 在1993年汛期进行了准业务试报, 在降雨范围, 雨带走向, 降水强度和中心位置等方面取得了较好的结果^[14]。

模式分辨率, 在水平方向, 网格选用的是E网格, 它对两个子网格来说, 水平分辨率是 $1^\circ \times 1^\circ$ 的经纬格点, 模式实际的水平分辨率约为75 km。模式水平范围为 30×20 经纬度。在垂直方向, 只考虑对流层范围, 模式顶取为100 hPa, 从地面到模式层顶按 η 坐标等分为8层, 具体每层的厚度从下往上约为977 m、2 060 m、3 279 m、4 681 m、6 342 m、8 404 m、11 179 m、15 677 m。

模式初始场是根据 $95 \sim 135^\circ\text{E}$, $20 \sim 50^\circ\text{N}$ 范围内139个探空站原始资料, 用加权平均的客观分析方案, 先将各站点的观测资料插值到各标准等压面的水平网格点, 然后再把各等压面资料线性插值到各模式层。没有其他的初始化过程。

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的地面气象要素值订正到模式地形高度上。

该模式在中科院大气物理研究所的CONVEX计算机(约3 000万次)上制作24小时预报, 运行的CPU时间约16分钟。

3 试验结果

3.1 暴雨雨量预报的检验标准与24小时雨量预报

暴雨雨量预报正确程度的检验标准是一个值得讨论的问题。目前, 对数值模式预报降水场的评定以实际气象站观测到的降雨图上, 雨区(1 mm)、小雨(10 mm)、中雨(25 mm)和大雨(50 mm)等的等雨量线的面积作为各级降雨评分的标准, 再采用TS技术评分办法评定。所得分数的高低作为数值模式降雨预报正确程度的标准。一般, 它只适用于日常天气预报中降水预报。对暴雨过程而言, 日降雨量达到暴雨(50~100mm)、

大暴雨 (100~250 mm) 或特大暴雨 (>250 mm)¹⁾ 的测站常常只有一、二个站, 在日降雨量图上无法画出 100 和 250 mm 的等雨量线, 和确定其范围和面积, 这样就很难采用 TS 评分。因此, 人们对暴雨雨量预报只能将计算雨量的最大值与实测的最大点雨量进行比较, 气象台站经常用发报气象站的实测的最大点雨量作为对比的标准。然而, 像“75·8”这样的特大暴雨发生时, 天气图上的最大雨量并不大, 如 5 日为 43 mm, 仅达大雨标准。6 日为 159 mm, 仅达到大暴雨标准。7 日只有驻马店一个气象站为 216 mm, 仍未达到特大暴雨标准。假如这次暴雨过程中的雨强仅此而已, 就不会造成如此大的洪涝灾害^[15], 但是, 实际上, 这次暴雨雨量远超过日常业务降雨量图上的最大值, 按测站分布更稠密的气候站和水文站, 尤其是水文站的雨量极值分别为: 5 日的日降雨量为 674 mm, 是气象站最大值的 16 倍, 6 日为 514 mm, 为气象站最大值的 3 倍, 7 日为 1005 mm, 为气象站最大值的 5 倍。

同样, 由气象站, 气候站和水文站等全部测站网的雨量图 (图 3) 可见, 这 3 天最大雨量中心附近的最大雨量梯度都达到 145 mm/10 km。目前, 气象站的平均间隔为 200~300 km, 显然, 这样稀疏的气象站网是不能显示这样大的雨量梯度的, 也就不能测出这次特大暴雨的极值。因此, 对具有很强的突发性和局地性的大暴雨和特大暴雨来说, 不同的测站网的最大点雨量值本身就有很大差异, 这种差异是由暴雨天气系统本身的时间空间尺度特征所决定的。

表 1 中分别列出了 5~7 日 3 天的气象站的最大雨量和雨量极值 (水文站的最大雨量, 下文相同), 以及 90 km, 75 km 和 45 km 3 种网格面积的平均最大雨深, 并给出了各种最大雨量与气象站的最大雨量的比值。由表可见, 6、7 两日水文站的最大雨量约为气象站的最大雨量的 3~5 倍, 而这三种中尺度网格面积的平均最大雨深约为气象站的最大雨量的 2~3 倍, 在 5 日这种极端的情况下, 前者可达到 16 倍, 后者可达到 8 倍。

表 1 气象与水文测站网 24 小时最大点雨量值, 3 种网格距面积平均 24 小时最大雨深, 及其与气象站最大点雨量值的对比

日期	台站网 24 小时最大雨量		面积平均 24 小时最大雨深			M_h	M_{a1}	M_{a2}	M_{a3}
	气象 M_m /mm	水文 M_h /mm	75 (km) M_{a1}	90 (km) M_{a2}	45 (km) M_{a3}	M_m	M_m	M_m	M_m
5 日	43	674	295	210	325	15.7	6.9	4.9	7.6
6 日	159	514	325	285	380	3.2	2.0	1.8	2.4
7 日	216	1005	535	470	680	4.7	2.5	2.2	3.1

图 4a 给出了“75·8”特大暴雨时全部测站网 5~7 日的暴雨极值附近的面积-面积平均雨深的曲线。由图可见, 平均雨深随面积增大而减小, 6 日曲线坡度较平缓, 5 日和 7 日坡度较陡, 尤其在 500 km² 以内坡度更陡, 这相当于直径为 45 km 停滞性降雨系统的尺度, 在天气系统的尺度分类中, 属于中- β 尺度系统, 它是目前天气学和天气预报中的重要难题之一。

1) 按“台风现场科学业务试验实施方案”确定特大暴雨选例标准

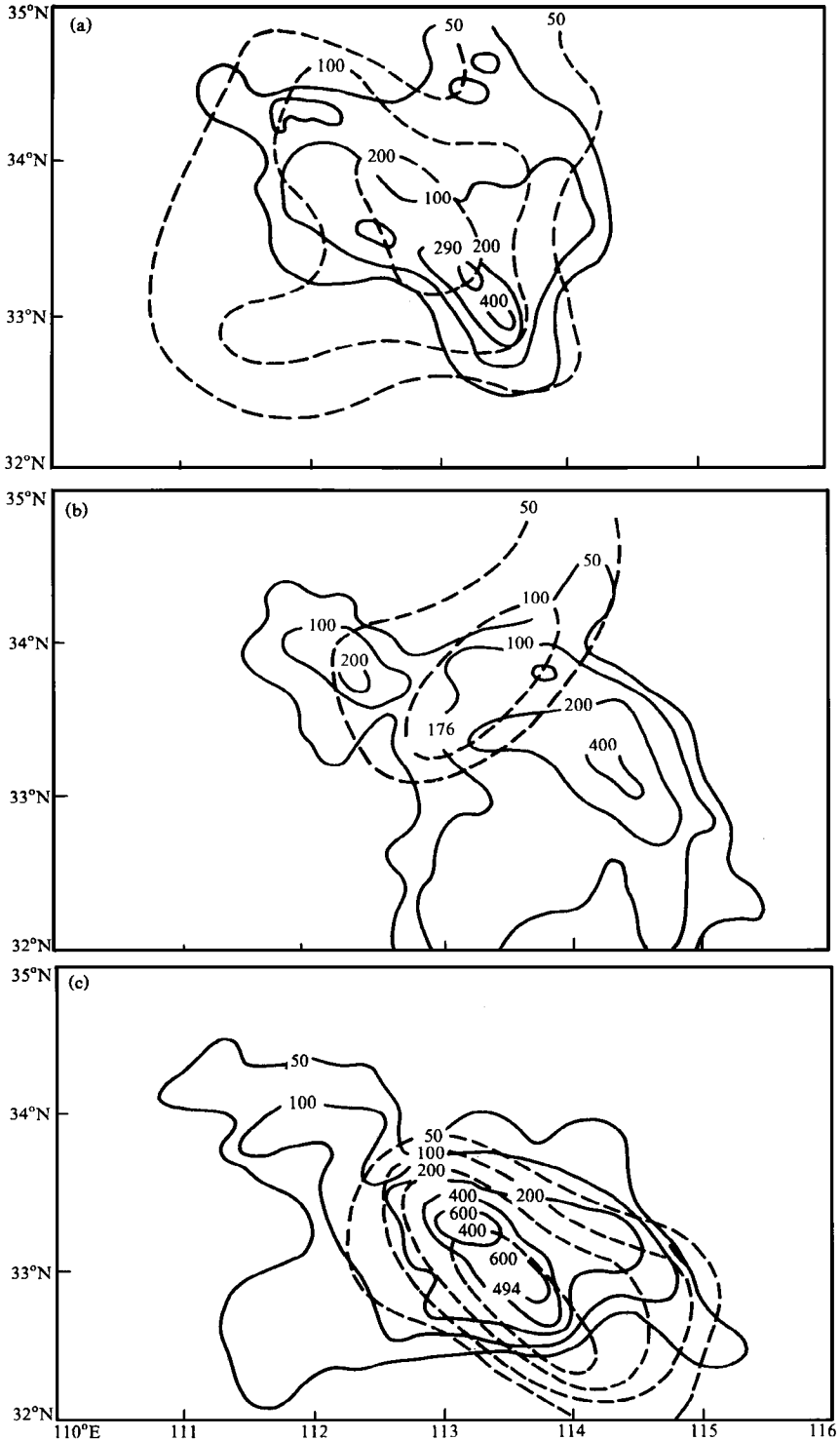


图3 1975年8月5日(a), 6日(b)和7日(c)3天计算得到的24小时雨量分布(虚线)与实际雨量(实线)的综合图

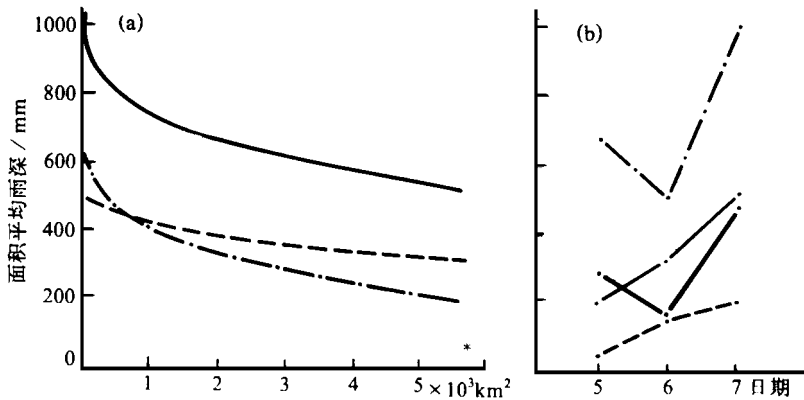


图4 (a) 1975年8月5日(点划线)、6日(虚线)和7日(实线)面积-相应面积平均24小时最大雨深曲线。为MM4模式45 km 网格距面积,* 为LASG η 坐标模式75 km 网格距面积;(b) 5~7日24小时预报最大雨量(粗实线)、相应网格面积的平均雨深(细实线)、气象站的最大雨量(虚线)和雨量极值(点划线)的演变曲线

在 500 km^2 以外曲线坡度趋于平缓。因此, 对大暴雨来说, 最大雨量中心附近巨大雨量梯度使不同的测站网的最大点雨量值产生很大的差异, 其代表性较差。而中尺度网格面积平均雨深似乎比点雨量具有更好的稳定性和代表性。其次, 考虑到数值计算得到的预报雨量值应是一个所取网格面积上的平均值, 而不是点雨量值。同时, 暴雨造成洪涝灾害的严重程度与面积平均雨深有更密切的关系。还有, 虽然在气象实况资料里没有中尺度网格面积平均雨深的资料, 但在一般情况下, 根据表1的数据, 可用气象站最大雨量的2至3倍来粗略地估计这种特大暴雨的中尺度网格面积平均雨深。

表2给出了5~7日3天的预报的最大雨量值, 并分别与气象站的最大雨量和雨量极值, 以及LASG η 坐标模式网格面积的平均最大雨深作了比较, 由表2可见, 数值预报雨量值是气象站的最大雨量的1~7倍, 是雨量极值的34%~49%。是模式网格面积的平均最大雨深的54%~98%。因此, 更接近较合理的相应网格面积的平均雨深, 尤其以5日与7日的预报结果为最好, 误差仅为2%~7%。

从这模式预报的这3天最大雨量值看, 不仅其预报的雨量值接近于相应网格面积的平均雨深。更有意思的是, 其预报的最大雨量变化趋势与实测雨量极值的变化趋势相一致。也就是说, 在6日暴雨雨强已减弱的情况下, 这数值模式具有预报出7日暴雨强度突然增大(图4b)的能力。

这3天预报暴雨中心位置与天气图上实况暴雨中心偏差都小于或等于110 km, 不超过1.5网格距, 更接近于雨量极值中心, 约为0.2~1.1网格距。其中, 也以具有最大雨强的7日偏差距离最小, 偏离出现最大雨量的气象站与雨量极值的水文站分别为0.67(50 km)和0.23(17 km)个网格距, 都不到一个网格距(图3), 它与实况暴雨中心位置的偏差相当小。

表2还给出了用PSU/UCAR模式MM4版本对“75·8”特大暴雨7日的计算雨量, 其粗网格(90 km 格距)和细网格(45 km 格距)的暴雨中心预报值分别为154 mm和291 mm, 为气象站实测最大雨量的0.71和1.35, 为水文站雨量极值的0.15和0.29, 为相应

网格面积平均雨深的 0.33 和 0.43。预告暴雨中心位置实况暴雨中心偏差, 粗网格和细网格分别为 1.56(140 km) 和 0.89(40 km) 个网格距, 约为 0.9~1.6 网格距。由此可见, 用 MM4 预报最大雨量值比较接近气象站实测最大雨量值, 比雨量极值和相应网格面积的平均雨深两个实况值偏小较多。然而, 预报的暴雨和特大暴雨的范围都比实况明显的偏大^[16]。这是一般数值模式制作降水预报的通病。

表 2 1975 年 8 月 5~7 日 24 小时预报暴雨中心雨量、位置等与实况的对比表

起报日期		75- 08- 05	75- 08- 06	75- 08- 07		
预报模式		大气所(LASG) η 坐标			PSU /UCAR MM4	
网格距离/km		75			90	45
网格面积/km ²		5625			8100	2025
预报最大雨量值/mm		290	176	494	154	291
气象站最大雨量中心	实况最大雨量值/mm	43	159	216		
	预报/实况	6.74	1.11	2.29	0.71	1.35
	暴雨中心预报位置误差*(网格距)	WNW 1.47	WNW 1.47	W 0.67	NNE 1.56	NE 0.89
水文站最大雨量中心	实况雨量极值/mm	672	514	1005		
	预报/实况	0.43	0.34	0.49	0.15	0.29
	暴雨中心预报位置误差*(网格距)	NW 0.73	WNW 1.07	WSW 0.23	NNE 1.39	ENE 1.44
网格面积平均最大雨深	实况最大雨深/mm	295	325	535	470	680
	预报/实况	0.98	0.54	0.92	0.33	0.43

* 暴雨中心预报位置误差, 即预报暴雨中心相对于实测暴雨中心的方位及距离

这里用 LASG η 坐标模式计算的最大雨量值与相应网格面积的平均雨深相当一致, 较接近实况的雨量极值, 比 MM4 模式两种网格计算雨量大 2~3 倍, 同时其暴雨和特大暴雨的范围却不比实况大。它与实况暴雨中心位置的偏差也比较小。在这些方面 LASG η 坐标有限区域数值预报模式的预告结果明显优于一般数值模式的预告结果。

3.2 天气系统预报

这里主要给出 7 日 08 时(北京时)作为初值的 12 小时(图 5) 与 24 小时(图 6) 天气形势预告图和实况图。图 5a、b 分别为 7 日 20 时对流层低层 700 hPa 实况与 12 小时预告的高度场和风场, 大范围形势十分相似, 在预告图上出现一支与暴雨发生密切有关的低空东风急流^[17], 这与实况非常一致, 只是风速比实况稍偏小。就 7503 号台风残余低压这一暴雨天气系统而言, 低压中心强度和位置都与实况相近, 只是预告低压近于圆形, 实况的低压近于椭圆形。低压中心的涡度预告值与实况诊断值¹⁾ 分别为 12.7 和 $11.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略), 这两值非常接近。

图 5c、d 分别为 7 日 20 时对流层中层 500 hPa 实况与 12 小时预告的高度场和风场, 与暴雨有关低压中心强度和位置均与实况相近。只是预报的低压近于圆形, 而实况的低压轴向接近于东北西南向, 低压中心的涡度值预告值与实况诊断值分别为 11.4 和 $6.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 预告低压涡度场稍偏深。

图 5e、f 分别为 7 日 20 时对流层高层 200 hPa 实况与 12 小时预告的高度场和风

1) 诊断分析网格为 90 km, 比模式网格(75 km)大, 仅作参考

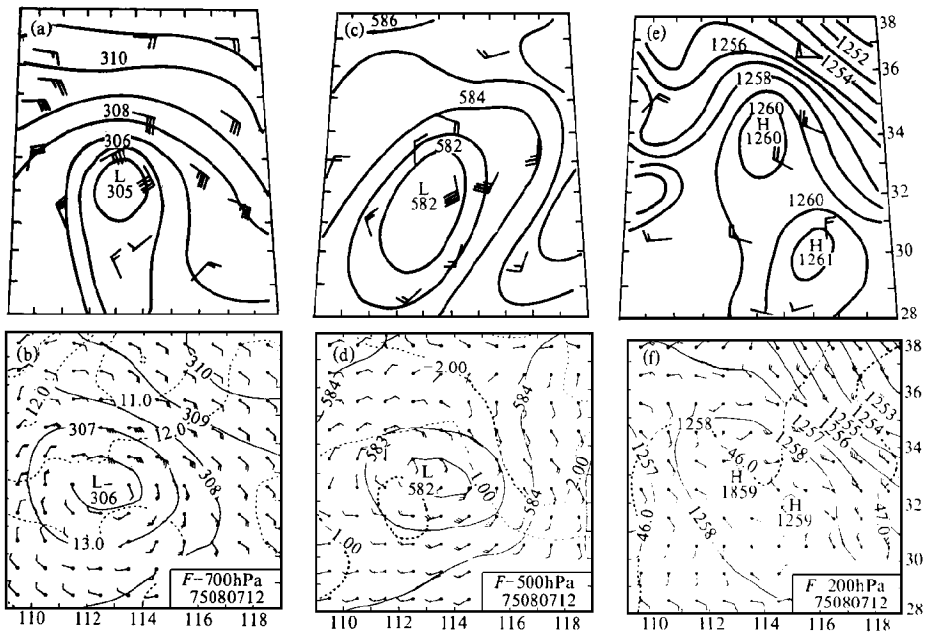


图5 1975年8月7日12小时形势预告和实况图

(a) 和 (b) 分别为 700 hPa 的形势预告和实况, (c) 和 (d) 分别为 500 hPa 的形势预告和实况, (e) 和 (f) 分别为 200 hPa 的形势预告和实况

场, 有意思的是在暴雨最强时刻(7日20时)的预告图上, 在暴雨区上空报出了一个大范围的高压区, 其中有二个高压中心, 分别与实况二个高压中心相对应。在北方高压中心的北侧有一支强的流出的西南气流, 这与实况非常一致, 只是高压中心位置分别向西和向北偏一个网格距, 中心强度偏弱 10 gpm。它反映了暴雨区潜热反馈对环境场的影响, 过去曾对这高层中尺度反气旋环流作过详细讨论^[18]。

图 6a、b 分别为 8 日 08 时对流层低层 700 hPa 实况与 24 小时预告的高度场和风场, 在预告图上仍维持一支低空东风急流, 这与实况相一致。7503 号台风残余低压中心强度继续减弱, 实况比 12 小时前填塞了 20 gpm, 预报低压却稍有加深, 这样预报低压比实况偏深 30 gpm, 这差值对 24 小时预告来说不算大, 其中心位置与实况相近。低压中心的涡度值预告值与实况诊断值分别为 15.8 和 $10.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 预告低压涡度场稍偏深。

图 6c、d 分别为 8 日 08 时对流层中层 500 hPa 实况与 24 小时预告的高度场和风场, 与暴雨有关低压中心强度与实况相近。其位置比实况偏东两个网格距。低压中心的涡度值预告值与实况的分别为 12.7 和 $5.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。预告低压涡度场也稍偏深。

图 6e、f 分别为 8 日 08 时对流层高层 200 hPa 实况与 24 小时预告的高度场和风场, 在预告图上, 暴雨区上空的高压中心强度与实况相近, 其位置比实况偏北 3 个网格距, 主要由于 12 小时内高压中心实际向西南移, 预报却向西北移造成。

总之, 在暴雨天气系统预报方面, 12 小时预告与实况比较一致, 24 小时预告稍差, 主要是强度和位置的变化趋势与实况有些不一致, 但对暴雨系统强度和位置的预报

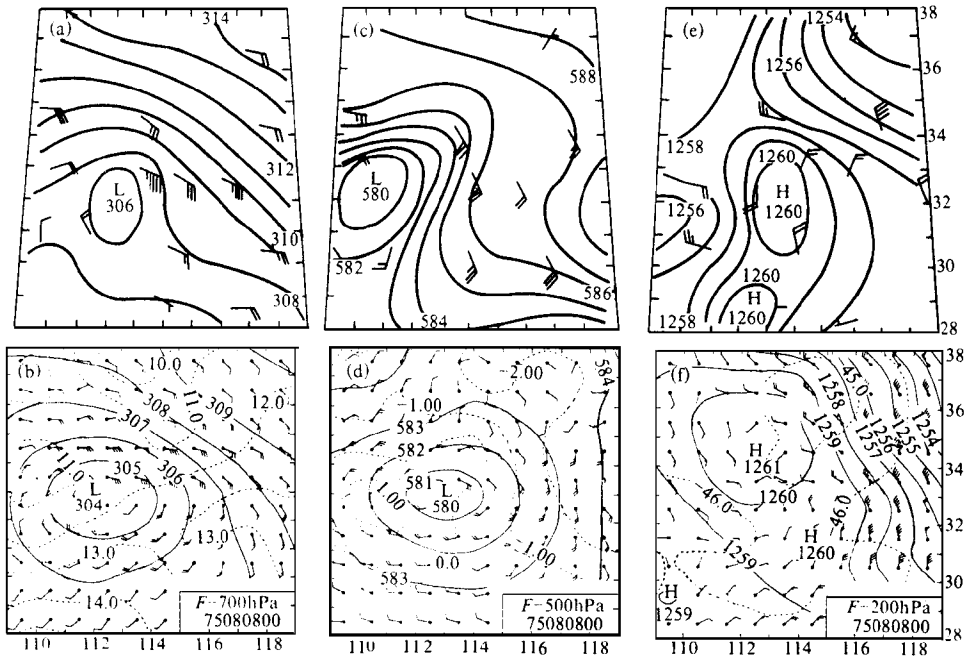


图6 1975年8月7日24小时形势预告和实况图
说明同图5

与实况的具体差别仍小于MM4的相应差别^[16]。在大尺度形势预报方面,在中、低层,暴雨系统的北方报出一个高压坝,强度稍偏弱。在这暴雨系统的南方,实际天气图上为偏东气流,预报图却为偏西气流。在高层,与暴雨有关的高压区东侧的低压槽的强度和位置与实况比较一致,而其西侧的天气系统与实况不很一致。这些问题在MM4试验也存在,将在今后工作中进行深入分析研究。

3.3 地形影响

地形对暴雨有明显的增幅作用,过去的研究工作曾从暴雨的气候资料统计和暴雨的天气分析揭示了大暴雨的中心大多集中在有利地形区域这一事实,如迎风坡,喇叭口地形等,并给以地形对气流的强迫抬升和辐合作用等物理解释。这次特大暴雨中心也出现在伏牛山脉东边的迎风坡,和林庄板桥水库的喇叭口的有利地形内^[19]。本文利用LA SG η 坐标模式能充分有效考虑地形对各种气象要素的影响的特点,对地形作了敏感性试验。

我们进行了如表3中方案编号2~5的4种试验。这些试验都是以1975年8月7日

表3 1975年8月7日5种试验方案的24小时预报暴雨中心雨量及其比较

方案编号	地形处理	预报暴雨中心雨量	与方案1之比
1	控制试验	494	
2	去伏牛山脉地形	38	0.077
3	将伏牛山脉西移一个经度	74	0.150
4	将伏牛山脉作一次平滑	108	0.219
5	将伏牛山脉东移一个经度	111	0.225

08 时作为初始场, 进行 24 小时积分。

由表 3 可见, 降水强度与地形有着密切的关系, 如在初始条件时刻, 去掉暴雨区西边的伏牛山脉地形, 其预报暴雨中心雨量仅为控制试验的 8%, 如将伏牛山脉西移一个经度, 则预报暴雨中心雨量为控制试验的 15%, 如将伏牛山脉作一次平滑, 或将伏牛山脉东移一个经度, 则预报暴雨中心雨量为控制试验的 22% ~ 23%。由此可见, 山脉的相对高度和陡峭程度, 以及山脉与暴雨系统的相对位置等对暴雨的强度是非常敏感的, 对地形稍有的改变, 其暴雨强度将减少 3/4 以上。

4 总结

(1) 采用 LASG η 坐标模式对“75·8”这样局地性很强的极端暴雨作数值试验取得了较好的预报结果。其 24 小时预报雨量更接近实况的网格面积平均雨深和雨量极值, 这一试验说明该模式为今后暴雨特别是特大暴雨的客观定量预报提供了有效的工具。

(2) 这次数值试验也初步证实了, 在局地性强降水的预报方面, LASG η 坐标模式具有比 MM4 更为优越的性能, 由于模式具有较好的动力框架, 并考虑了降雨主要的物理过程, 因此, 没有出现暴雨范围偏大, 而暴雨中心雨量偏小的一般缺陷, 而取得了比 MM4 更接近实况的雨量预报结果。

(3) 在暴雨系统的预报方面, 不存在 MM4 试验中那种最大雨量预报偏小而暴雨系统强度太深的情况。12 小时预告, 暴雨区内, 中、低层低压天气系统强度与位置, 以及低压北侧的一支低空东风急流都与实况相近。在暴雨区的高空也报出了一个范围的高压区和其北侧的一支强的流出的西南气流, 这与实况非常一致。即使是 24 小时预告的暴雨系统强度与位置的偏差与其他模式相比仍不算太大。

(4) 在大尺度形势预报方面, 在中、低层暴雨系统的北方报出一个高压坝, 但强度稍偏弱。在这暴雨系统的南方, 实际天气图上为偏东气流, 预报图却为偏西气流。在高层, 与暴雨有关的高压区东侧的低压槽的强度和位置与实况比较一致, 而其西侧的天气系统与实况不很一致。这些问题在 MM4 试验也存在, 将在今后工作中进行深入分析研究。

(5) 由控制试验和 4 种地形敏感性试验的结果可见, 山脉的相对高度和陡峭程度, 以及山脉与暴雨系统的相对位置等对暴雨的强度是非常敏感的, 对地形稍有的改变, 其暴雨强度将减少 3/4 以上。

(6) LASG η 坐标模式在中科院大气物理研究所的 CONVEX 计算机 (约 3 000 万次) 上制作 24 小时预报, 模式运行的 CPU 时间约 16 分钟, 这对暴雨和特大暴雨的数值预报业务化, 提高暴雨和特大暴雨的预报水平具有重要的现实意义。

参 考 文 献

- 1 陶诗言等, 1980, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 225p.
- 2 丁一汇、蔡则怡、白珊, 1976, 一次北京地区台风特大暴雨的分析, 台风会议文集, 上海: 上海科学技术出版社, 147~ 152

- 3 Tao Shiyan and Cai Zeyi, 1982, Severe rainstorm caused by typhoon in China, Invited Lecture of International Assembly of Typhoon, Shanghai, 1980, *Annual Report*, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy Sciences, **1**, 242~ 250
- 4 蔡则怡、李玉兰, 1980, 1977年8月上海特大暴雨的初步分析, 大气物理研究所集刊, 北京: 科学出版社, **9**, 60~ 69
- 5 丁一汇、蔡则怡、李吉顺, 1978, 1975年8月上旬河南特大暴雨研究, 大气科学, **2** (4), 276~ 289
- 6 湖北宜昌气象台, 1981, 宜昌地区一次特大暴雨的回波分析, 雷达气象文集, 北京: 气象出版社, 57~ 62
- 7 胡伯威、匡本贺, 1986, 1986年汛期暴雨数值试验, 气象, **12** (1), 14~ 15
- 8 758暴雨会战北京组, 1979, 758河南特大暴雨的动力分析, 气象学报, **37** (4), 45~ 55
- 9 赵思雄、周晓平, 1984, 风场在预报暴雨发生中的作用——1975年8月上旬特大暴雨的数值实验, 大气科学, **8** (1), 1~ 6
- 10 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 Sept 1992, 316~ 320
- 11 Mesinger, F., 1983, A blocking technique for representation of mountain in atmospheric models, *Rev. Meteor. Aeronautica*, **43**
- 12 Betts, A. K., 1986, A new convective adjustment scheme, Part I: Observational and theoretical basis, *Quarterly J. Roy. Met. Soc.*, **112** (2), 677~ 691
- 13 宇如聪, 1989, 陡峭地形有限区域数值预报模式设计, 大气科学, **13** (2), 139~ 149
- 14 宇如聪, 1994, 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对1993年中国汛期降水的业务化预报试验, 大气科学, **18** (3), 284~ 292
- 15 蔡则怡、徐良炎、徐元太, 1994, 我国热带气旋灾害分析研究, 大气科学, **18** (增刊), 826~ 836
- 16 Cai Zeyi, Wang Zuoshu and Pan Zaitao, 1992, A numerical study on forecasting the Henan extraordinarily heavy rainfall event August 1975, *Advances in Atmospheric Science*, **9** (1), 53~ 62
- 17 丁一汇、蔡则怡、李吉顺, 1980, 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究(一), 大气物理研究所集刊, 北京: 科学出版社, **9**, 25~ 38
- 18 蔡则怡、丁一汇、李吉顺, 1980, 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究(三), 大气物理研究所集刊, 北京: 科学出版社, **9**, 47~ 59
- 19 Cai Zeyi and Li Jishun, 1984, Some observational evidence of the influence of topography, in: *Proceeding of the First Sino-American Workshop on Mountain Meteorology*, Beijing, 18~ 23, May 1982, 457~ 472

A Numerical Simulation of an Extraordinary Storm Rainfall Caused by a Landing Typhoon with LASG Mesoscale Model

Cai Zeyi and Yu Rucong

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

Abstract The numerical simulation of the extraordinary storm rainfall during August 1975 in Henan Province is investigated by the LASG η -coordinate limited-area mesoscale model (LASG η MM). The precipitation in this event is very localized and the distribution over the whole area is not uniform. The 24-hour extremum rainfall recorded by the hydrological stations which are more densely distributed in this area is about 3~ 16 times of the maximum rainfall. Generally, the rainfall calculated by the limited-area numerical models is less than the observation by meteorological stations and much less than that by hydrological stations. The LASG η MM is characterized by the η vertical coordinate, which is suitable to the complicated topography of China. The basic equations in this model are the dynamic structure with the perfect energy and mass conservation and include all main physical processes of the precipitation. For this well-known extraordinarily storm rainfalls during August 5~ 7, 1975, the maximum rainfalls predicted by the LASG η MM are about, 1~ 5 times of that observed by the meteorological stations, 34%~ 49% of that observed by the hydrological stations, and 54%~ 98% of the maximum depth averaged over areas corresponding to the model grid size. The deviations of the location of the predicted rainfall centers are 0.67~ 1.47 and 0.23~ 1.07 grid size compared with the observational results by meteorological stations and by the hydrological stations respectively during these three days.

The forecast results for the weather system with the storm rainfall and the large scale systems by the LASG η MM are also very similar to by the two kinds of stations. The further experiments of effect of topography show that the maximum precipitation is highly sensitive to the relative height and slope of the mountain, and relative positions of the storm rainfall weather system and the mountain. A small change in the topography will result in a great change in the 24-hour maximum precipitation.

Key words landing typhoon storm rainfall η coordinate effect of topography
limited-area numerical forecast model

《长江黄河流域旱涝规律成因研究》评介

干旱和洪涝灾害是我国自然灾害中造成经济损失最严重的气候灾害。长江、黄河流域是旱涝频繁发生的主要区域,为此中国科学院大气物理研究所联合有关高校和中国气象局的科研人员,在叶笃正、黄荣辉两院士的领导下开展了对长江、黄河流域旱涝规律及其成因和预测的研究,做出了系统而有创新性研究。《长江黄河旱涝规律成因研究》一书系统地反映了这些研究成果。该书的出版不仅在关于灾害性气候的研究方面具有重要科学意义,而且对于提高我国旱涝预测水平、防灾减灾也具有广泛而重大的应用价值。

该书是国内外系统论述旱涝灾害的第一本书,它具有明显的特点:

(1) 该书系统分析了我国长江、黄河流域旱涝发生的历史、年代际、年际和季节内变化规律和发生的环流条件,深入地阐述了长江、黄河流域不同时间尺度旱涝发生规律与它们的空间分布类型和变化特征;该书利用各种诊断结果和理论分析系统地论述了此两流域的旱涝成因,并提出了有物理依据的看法;该书还阐述了对影响此两流域发生的东亚季风环流和降水的数值模拟结果以及对此两流域夏季旱涝的预测方法。(2) 该书既有观测事实的分析,又有动力理论而且还有数值模拟结果,问题论述全面、充分。(3) 该书章节结构严谨,文字通顺,书中包括了四部分内容:长江、黄河流域旱涝发生规律,此两流域旱涝发生的大尺度环流条件,此两流域旱涝灾害产生的成因,旱涝的数值模拟和预测。书中的章节安排严格围绕此两流域旱涝,互相呼应,由浅入深。因此,该书是一部关于长江、黄河流域旱涝规律和成因的系统性论著。

该书内容具有明显的创新性,该书从气候系统中各圈层相互作用的新观点来论述长江、黄河流域旱涝成因,书中不仅提出了此两流域旱涝形成的物理模型,而且从观测事实、动力理论和数值模拟等方面提出热带太平洋热力状态,特别是西太平洋暖池热状态及其上空对流活动,青藏高原热源、季风及其低频振荡、西风带的瞬变扰动对此两流域旱涝形成的作用及其理论。该书还给出了关于东亚季风变化及早涝的数值模拟和预测试验结果,这也是国际上领先的研究成果。因此,该书在学术上具有很高水平。该书论述全面、系统,印刷质量高,装帧精美。

综上所述,无论从内容还是从出版质量来看,该书都是一本非常精美的科技专著。

(丑纪范)