

# $\eta$ 模式边界层方案的优化及其 对暴雨的数值试验

王康康

张维桓

(南京空军司令部气象中心, 南京 210018)

(解放军理工大学气象学院)

张礼平

(湖北省气象局气候中心)

## 提 要

利用 16 层垂直不等距 MEM, 引入高分辨边界层方案, 将模式垂直分层增加至 21 层, 并将改进后的模式用于暴雨的数值模拟。结果表明: 改进后的模式对降水的预报特别是暴雨的预报有了很大的改进, 其降水场的预报 TS 评分、特别是暴雨 TS 评分明显高于以前的模式, 这对模式进一步的业务化具有重要意义。敏感性试验表明: 提高模式的垂直分辨率有益于暴雨预报水平的提高。模式对混合长和湿有效率较为敏感; 模式下垫面特征分类的精确性对模式的预报结果有很大的影响。

**关键词:**  $\eta$  坐标 湍流 边界层 暴雨

## 引 言

暴雨是我国夏季常见的一种灾害性天气, 因暴雨而引发的洪灾, 经常给人民的生命和财产带来严重损失。以 1998 年为例, 6~8 月在长江流域发生了自 1954 年以来的又一次全流域性大洪水, 松嫩流域洪水也超过历史纪录。据统计: 此次洪水受灾面积为  $0.13 \times 10^8 \text{ km}^2$ 、受灾人口近 2.23 亿人、倒塌房屋 479 万间、直接经济损失达 1666 亿元<sup>[1]</sup>。因此加强对暴雨的预报研究具有极其重要的意义。

边界层在通常意义上是指受地面影响最直接、最剧烈的那部分对流层, 它响应于地面作用的时间尺度为 1 小时或更短。从能量的观点看, 整个大气的主要能源是太阳辐射, 而地面吸收了太阳辐射的大部分, 并通过边界层过程传输给其余大气, 为海洋所吸收的大约 90% 的净辐射造成海水蒸发, 贮存在水汽中的潜热约 80% 是驱动大气的燃料; 与此相反, 同时, 约有 50% 的大气动能在边界层内

被耗散, 可见行星边界层实际上是大气运动的重要能量源和能汇区<sup>[2]</sup>。各种通量在边界层内的垂直湍流输送往往是导致中尺度天气系统发生和发展的重要因子, 当然, 边界层过程对暴雨也有着很大的影响。

本文以 16 层不等距、含整体边界层方案的  $\eta$  坐标中尺度数值预报模式<sup>[3]</sup> (Meso-scale Eta-coordinate Model, 以下简称 MEM) 为基础, 着眼于建立一个完善的中尺度暴雨模式。整体边界层方案对边界层物理过程的描述比较粗糙, 不能更好地体现边界层物理过程及其对降水的影响, 本文在 MEM 中引入高分辨边界层方案, 对边界层过程作了优化, 且将模式的垂直分层加密至 21 层。在此基础上, 对 1996、1997 年夏季几个暴雨个例进行了数值模拟, 最后进行了几个有益的敏感性试验。

## 1 模式简介

### 1.1 模式的特点

MEM 采用了 IAP-GCM 的动力框架, 主要是由于 IAP-GCM 动力框架可以保证完全

能量守恒,有较好的稳定性和精度,此外,还对温度和位势作了静力扣除。模式的垂直坐标选用  $\eta$  坐标,避免了  $\sigma$  坐标模式中陡峭地形条件下水平气压梯度力计算误差过大的问题,同时它仍保留了  $\sigma$  坐标系所具有的简单下边界条件<sup>[4,5]</sup>。MEM 的水汽平流采用正定保形方案<sup>[6]</sup>。

MEM 采用 E 网格作为变量的水平分布形式,水平分辨率约为 36km,位势高度和垂直速度与其他预报变量在垂直方向上交错分布,模式顶取为 100hPa。为细致地反映边界层结构,在本模式中将模式顶到海平面按  $\eta$  分段不等距地分成 21 层。考虑到边界层的典型厚度为 1~1.5km,采用 9 层描述边界层,这样使得我国东部地区的近地层大致取为 100m。具体每层  $\Delta\eta$  的分布如下:

$$\Delta\eta_{21} = 0.013 \quad (1)$$

$$\Delta\eta_{20} = \Delta\eta_{19} = \Delta\eta_{18} = 0.022 \quad (2)$$

$$\Delta\eta_{17} = \Delta\eta_{16} = 0.027 \quad (3)$$

$$\Delta\eta_{15} = \Delta\eta_{14} = \Delta\eta_{13} = 0.037 \quad (4)$$

$$\Delta\eta_{12} = \dots = \Delta\eta_1 = 0.063 \quad (5)$$

MEM 采用 Wallace 等提出的包络地形构造法构造模式地形,模式对流参数化是采用的 Betts 方案<sup>[7]</sup>。

## 1.2 高分辨边界层方案

由于  $\eta$  模式边界层方案中近地层的比较处理困难,所以本文尝试性地引入 Blackadar 的高分辨边界层方案<sup>[8]</sup>。

### 1.2.1 地面温度预报及地面各通量的参数化

地面温度预报主要采用强迫-恢复法,它主要考虑土壤薄层以上的通量和进入土壤基层的热流量之间的不平衡,设  $T_g$  是土壤薄层温度,其预报方程如下:

$$\begin{aligned} C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} &= R_n - H_s - H_l - H_m \\ &= Q_s + I_s - H_s - H_l - H_m \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $R_n$  为净辐射通量,其参数化采用 Benjamin 方案。 $Q_s$  为净短波辐射通量,方案中考虑了太阳天顶角随时间的变化,并考虑

了水汽、云层对短波辐射的吸收、透射和散射以及下垫面的反射; $I_s$  为净长波辐射通量,考虑了水汽、云层对它的影响,其中云层根据大气中相对湿度的分布分为低云、中云、高云三类。 $H_m$  是由于分子传导而进入土壤基层的热流量,因本模式为大气模式,土壤深层的温度用参数化方案给出。由于地面报文不含地面温度资料,模式中地面温度的初值计算则通过假设积分初始时刻(北京时 08:00)地面处于热平衡状态,然后经迭代计算而得<sup>[9]</sup>。 $H_s$  为地面感热通量, $H_l$  为地面潜热通量。

地面湍流通量(感热、水汽、动量通量)采用 Monin-Obukhov 相似理论求得。依据总体 Richardson 数  $R_b$  将地面湍流状态分为:稳定、机械驱动湍流、强迫对流不稳定以及自由对流不稳定 4 类,分别用相似理论的参数化公式给出各物理通量,其中所用到的反照率、分子层深度、粗糙度、水汽湿有效率、比辐射率、热惯性等物理参数由下垫面分类特征资料给出。

MEM 原整体边界层方案中的地面温度的预报没有考虑进入土壤层的热流量,地面各通量的参数化没有考虑到大气的稳定度,且在整体边界层参数化方案中,仅把地表简单分成水面、农田绿地、高原、沙漠 4 类,而在高分辨边界层方案中把地表分成城市、农田、大片草地、落叶林地、针叶林地、混合林和湿地、水域、沼泽、沙漠、苔原冻土区、永冻冰面、热带或副热带森林、大草原共 13 类。可见,高分辨率边界层方案的地面温度预报及地面通量的参数化方案比整体边界层的更优,更能体现边界层的细致的物理特征。

### 1.2.2 边界层变量预报

高分辨率边界层模式将大气层归结为夜间和白天自由对流两种体系,模式分别给出这两种体系下的预报方程组。

夜间体系包括稳定、机械驱动湍流、强迫对流不稳定 3 种湍流状态。在该体系下,将大气分为近地层和近地层以上两种情况,近地层变量预报按显式方案给出参数化公式,近地层以上变量的预报则用 K 理论和隐式

扩散方案<sup>[8]</sup>计算而得。白天自由对流体系为自由对流不稳定状态,在该体系下,将大气分为近地层、混合层和混合层以上3种情况。由于白天强烈的太阳辐射加热,使得近地层一般加热最大,从而在该层会出现超绝热现象,结果受热气块上升,并在每个位面上与环境空气发生混合,进而加热环境且交换热量与水汽。因此,在这种状态下要分别对近地层、混合层、以及混合层以上的变量进行预报,其中近地层变量预报均采用解析解形式计算,混合层变量的预报以显式形式进行积分,混合层以上的变量预报则类似于夜间体系近地层以上的变量预报,也用K理论和隐式扩散方案计算而得。

在原整体边界层方案中却没有给出能反映边界层细致过程的变量预报,所以整体边界层方案较对边界层物理过程的描述比较粗糙,不能更好地体现边界层过程对降水的影响。在改进后的数值试验中是将上述高分辨边界层模式并入到MEM中,对每一时间步长、每一格点都采用上述高分辨边界层模式进行计算和变量预报,对质量点和速度点分别采用对应的地表特征分类参数。

## 2 暴雨个例的数值试验

### 2.1 模式积分方案

模式的水平范围取为25~45°N、105~125°E,水平边界条件取简单的固定边界条件。MEM的时间积分方案采用分解算法,这不但节省了计算时间,还为方程组中不同部分选用各自的差分格式提供了方便。

### 2.2 暴雨个例选取

本文选取1996、1997年夏季发生在试验区域的5次暴雨个例,将其用来检验本模式预报效果。将这5次暴雨个例按表1给出简称。天气分析资料来自气象台站业务使用的地面、高空报文资料,经解报、检误、逐步订正客观分析法得到各标准等压面上水平网格点的气象要素值,然后再将标准等压面资料按对数压力线性插值到各模式层。

该5个个例的天气形势分别如下:EX1的降水过程主要是由维持在重庆至江西北部

的一地面准静止锋造成的,受500hPa高空小槽向南移影响,主要雨区位于长江流域;EX2、EX3的降水过程是由700hPa维持在重庆—汉口—南京一线的切变线造成的;EX4、EX5的降水过程是由位于贵阳—洞庭湖—杭州一线的准静止锋造成的。

表1 个例简称

个例简称	起始时间(世界时)	终止时间(世界时)
EX1	1996年6月4日00时	1996年6月5日00时
EX2	1996年7月2日00时	1996年7月3日00时
EX3	1996年7月3日00时	1996年7月4日00时
EX4	1997年7月7日00时	1997年7月8日00时
EX5	1997年7月8日00时	1997年7月9日00时

### 2.3 试验结果及讨论

图1给出了EX1 24小时降水实况、预报图。从图中可以看出,本模式50mm暴雨区在115~120°E与实况非常吻合;图2给出了EX2、EX3、EX4、EX5 24小时降水实况及本模式24小时预报场。从图中可以看出,EX2本模式50mm暴雨区在112~119°E与实况非常吻合,且报出了115°E的100mm暴雨中心;EX3苏北地区的50mm暴雨区与实况较

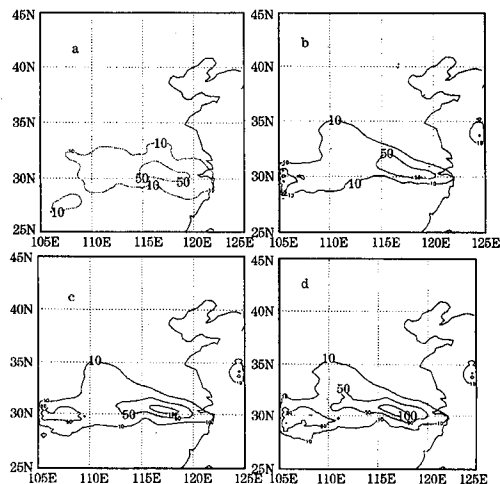


图1 EX1的24小时降水实况及预报

a. 实况 b. 本模式预报 c. 21层整体边界层方案 d. 21层不考虑边界层过程

为接近,且能报出100mm的强降水中心,只是范围偏大;EX4陆地上30°N以南的两片50mm暴雨区与实况比较吻合,且报出了位于29°N、117.5°E的100mm降水中心;EX5陆地上30°N以南的两片50mm暴雨区与实

况比较吻合,只是位于 115°E 的暴雨区报出了 100mm 中心。

由于海上缺乏观测资料,所以对海上的降水不予讨论。

从气压形势预报场来看(图略),本模式均能报出各形势场影响天气的主要系统,

850hPa、700hPa 形势与实况对应较好,500hPa 系统预报位置略偏西,这与模式采用的固定边界条件密切相关,该问题的解决有待于与谱模式嵌套,届时可由其提供时变边界值。

表 2 各个例的数值模拟 TS 评分

	EX1			EX2			EX3			EX4			EX5		
	10mm	25mm	50mm	10mm	25mm	50mm	10mm	25mm	50mm	10mm	25mm	50mm	10mm	25mm	50mm
等距	0.45	0.33	0.28	0.40	0.26	0.18	0.40	0.22	0.14	0.63	0.43	0.28	0.63	0.51	0.21
不等距	0.43	0.29	0.26	0.46	0.35	0.19	0.41	0.29	0.24	0.58	0.43	0.22	0.61	0.51	0.18
本模式	0.46	0.35	0.62	0.41	0.35	0.34	0.46	0.37	0.33	0.55	0.47	0.45	0.74	0.65	0.47

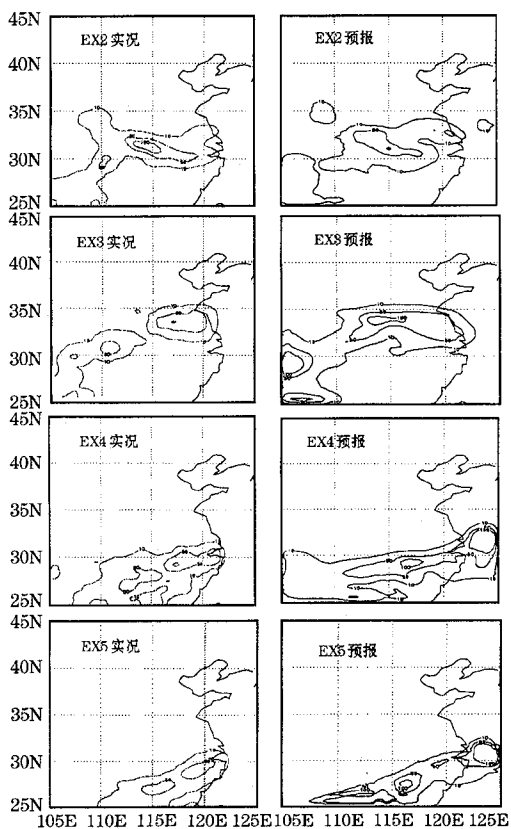


图 2 EX2、EX3、EX4、EX5 24 小时降水实况及本模式 24 小时预报图

表 2 分别给出了 16 层等距含整体边界层的模式、16 层不等距含整体边界层的模式及本模式对这 5 个个例数值模拟的 TS 评分。根据该表,再结合上面的比较可以看出:本模式除了 EX4 的 10mm TS 评分稍偏低外,无论是 10mm 雨区、还是 25mm、50mm 雨区预报都比以前的模式有了显著提高。从表中

可以看出,25mm 降水的 TS 评分提高幅度大于 10mm 的提高幅度,而 50mm 降水的 TS 评分提高幅度远远大于 25mm 的提高幅度。改进后的模式对暴雨的预报能力大大提高,这充分说明本模式中高分辨边界层湍流闭合方案的引入是成功的,而且也可以看出边界层过程对暴雨数值预报的重要意义。

### 3 敏感性试验

为了更深入细致地研究  $\eta$  模式中的高分辨行星边界层方案,本文以 EX1 为例,进行了几个有益的敏感性试验。

#### 3.1 整体边界层与高分辨边界层方案的数值比较

图 1c 是 EX1 21 层不等距整体边界层模式的 24 小时降水量图。该试验的降水 TS 评分为:  $TS_{10mm} = 0.47$ 、 $TS_{25mm} = 0.36$ 、 $TS_{50mm} = 0.41$ ,与图 1a,b 比较可以看出,115~120°E 的 50mm 暴雨区大大扩大,且出现了 100mm 的中心,试验区域西边界的 50mm 虚假中心范围也大大扩大,10mm 的降水区域与高分辨边界层方案相近。可见,高分辨边界层方案对暴雨范围、强度的预报明显优于整体边界层方案。

#### 3.2 不考虑边界层过程的影响

图 1d 给出了 EX1 不考虑边界层过程的 21 层不等距模式的 24 小时降水量场。该试验的降水 TS 评分为:  $TS_{10mm} = 0.47$ 、 $TS_{25mm} = 0.32$ 、 $TS_{50mm} = 0.29$ ,对比可以看出,115~120°E 的 50mm 暴雨区已扩大到与西边界的虚假暴雨区连在一起,且出现了 100mm 的中心,西边界的虚假暴雨强度也增大;而 10mm 的降水区域基本未变。这进一步说明了边界层过程对暴雨的重要性。

### 3.3 模式垂直分辨率的数值比较试验

16层含高分辨边界层方案的不等距模式24小时降水TS评分为:  $TS_{10mm} = 0.52$ ,  $TS_{25mm} = 0.41$ ,  $TS_{50mm} = 0.49$ , 从降水量预报场(图略)和实况的比较可以看出, 10mm、25mm雨区TS评分略有提高, 但115~120°E的50mm暴雨区东扩, 117°E出现了100mm的中心。这说明提高模式的垂直分辨率对暴雨的预报是有益的。特别是在边界层方案中更需要较高的垂直分辨率, 但由于现有计算能力的限制, 所以本工作只将垂直分层提高为21层。

### 3.4 混合长敏感性试验

考虑到模式主要用于我国中部和东部地区, 在这些地区近地层约为100m, 所以在设计边界层程序的时候将混合长简单取为40m(混合长 $\approx$ 卡门常数 $\times$ 近地层厚度)。现将混合长改为68m, 相应的降水TS评分为:  $TS_{10mm} = 0.47$ ,  $TS_{25mm} = 0.36$ ,  $TS_{50mm} = 0.53$ , 从降水量预报场(图略)和实况的比较可以看出虚假降水中心的强度和范围有所缩小, 但115~120°E的50mm暴雨区范围东扩。可以看出模式对混合长的选取是比较敏感的。

### 3.5 水汽湿有效率的敏感性试验

不考虑水汽湿有效率影响的24小时降水TS评分为:  $TS_{10mm} = 0.46$ ,  $TS_{25mm} = 0.36$ ,  $TS_{50mm} = 0.55$ , 从降水量预报场(图略)和实况的比较可以看出115~120°E的50mm暴雨区范围扩大。可见模式对下垫面特征的差异是比较敏感的。由于目前我们缺乏较新的、且适合本模式水平分辨率的下垫面特征分类资料, 所以大大抑制了模式性能的发挥。

## 4 结论

①本模式引入的高分辨边界层方案较细致地描述了边界层物理过程, 详细地考虑了下垫面的特征, 使得雨区和暴雨中心分布较整体边界层方案更合理。改进后的模式的降水TS评分较16层等距、含整体边界层的模式和16层不等距、含整体边界层的模式都有

显著提高; 另外, 本模式对一些著名的暴雨个例的预报也有着非常大的改进, 但因这些个例前人做得较多, 故本文未予涉及。

②本模式25mm降水的TS评分提高幅度大于10mm的提高幅度, 50mm降水的TS评分提高幅度又远远大于25mm的提高幅度, 这说明高分辨边界层方案的成功引入使得模式对暴雨的预报能力大大提高, 同时也说明暴雨对边界层过程是非常敏感的。

③敏感性试验表明: 提高模式的垂直分辨率对模式的暴雨预报是有益的; 模式对混合长的选取比较敏感; 加密边界层内的模式分层、获得合理的近地层对混合长的选取是有利的; 模式降水对下垫面特征的差异反应比较敏感, 如果使用更精确的、且适合模式水平分辨率的下垫面特征分类资料, 将会大大提高模式的预报效果。

## 参考文献

- 1 国家重点基础研究发展规划项目建议书, 项目名称: 我国重大突发性气象灾害的机理和预报理论的研究(中国特大暴雨的机理和预报理论的研究), 1999.
- 2 程麟生. 中尺度大气数值模式和模拟. 北京: 气象出版社, 1994: 231.
- 3 姜勇强, 张维桓, 周祖刚. 不等距分层中尺度坐标暴雨模式的设计及数值试验. 热带气象学报, 2001, 17(3): 301~307.
- 4 周祖刚, 张维桓等. 高分辨率 $\eta$ 模式的数值试验. 大气科学, 1999, 23(5): 597~604.
- 5 宇如聪, 曾庆存等. “雅安天漏”研究, II. 数值预报试验. 大气科学, 1994, 18(5): 535~551.
- 6 Yu Rucong, Application of a shape-preserving advection scheme to the moisture equation in an e-grid regional forecast model, *Advances in Atmos. Sci.*, 1995, 12(4), 13—19.
- 7 Betts, A. K., A new convective adjustment scheme. Part I: observational and theoretical basis. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1986, 112, 677—691.
- 8 Zhang, D. L., and R. A. Anthes: A high-resolution model of planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data, *J. Appl. Meteor.*, 1982, 21, 1594—1609.
- 9 Syukuro Manabe. Climate and the ocean circulation, the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface, *Mon. Wea. Rev.*, 1969, Vol. 97, 739—774.

# The $\eta$ Model with Improved PBL Scheme and Numerical Simulation of Heavy Rain

Wang Kangkang

(Meteorology Center ,The Headquarters of Nanjing Military Command of Air Force , Nanjing 210018)

Zhang Weihuan

(The Meteorology Institute , The PLA's College of Science and Engineer)

Zhang Liping

(Climatic Center, Hubei Meteorological Bureau)

## Abstract

Based on the Mesoscale Eta-coordinate Model (MEM), which contains 16 levels in the vertical with different intervals, a high resolution PBL scheme with 21 levels is introduced. Using the improved model, the numerical simulations of heavy rain case are done. The results show that the improved model has a great progress in the heavy rain forecast, the TS score for the precipitation, especially, for the heavy rain, is obviously higher than the former model. This is very important in the model's operational use in the near future. The sensitivity test shows that it is useful for the heavy rain forecast with increasing the model's vertical resolution. Additionally, the model is sensitive with the mixing length and the moist available quantity, and influence of the features of model underlying on the prediction results is important.

**Key Words:**  $\eta$  coordinate turbulence boundary layer heavy rain