

GRAPES 模式中高精度正定保形物质平流方案的研究 II : 连续实际预报试验^{* 1}

王明欢¹ 沈学顺² 肖 锋³

WANG Minghuan¹ SHEN Xueshun² XIAO Feng³

1. 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉, 430074
2. 中国气象局数值预报中心, 北京, 100081
3. 日本东京工业大学能量科学系, 日本横滨, 226-8502

1. *Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074, China*

2. *Numerical Prediction Center of CMA, Beijing 100081, China*

3. *Department of energy sciences, Tokyo Institute of Technology, Yokohama 226-8502, Japan*

2009-11-13 收稿, 2010-09-15 改回.

Wang Minghuan, Shen Xueshun, Xiao Feng. 2011. A study of the high-order accuracy and positive-definite conformal advection scheme in the GRAPES model II : Continuous actual rainfall prediction experiments. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(1):16-25

Abstract In a series of papers, for the semi-implicit semi-Lagrangian GRAPES model, the high-accuracy and positive-definite advection scheme called the piecewise rational function method (PRM) is developed. First, in Part I of the papers, it was found that this scheme is simple, practical and easy to code and has great ability in treating the variables of large spatial variation. Its feasibility in the GRAPES can also be confirmed by ideal experiments. In Part II, the 24 hour rainfall forecast has been made continuously for one month: July in 2005. Through detailed case analyses based on a comparison of the monthly mean 24 hour rainfall and the calculation of TS (Threat Score), it is found that the spatial distribution of forecasted rainbelts by the PRM is similar to that by the original water substances advection scheme utilized in GRAPES model but the PRM shows obvious advantages over the latter in forecasting the rainfall larger than 25 mm/day both for the rainfall amount and occurring location of heavy rainfall and, is more sensitive to the grid scale precipitation. As a result, the high-order accuracy and positive-definite advection scheme can improve the forecast. Particularly, this scheme has great potentialities to improve the heavy rainfall forecast. The PRM advection scheme is more rational to calculate water substance distribution than the original QMSL. Especially, it also has ability in describing the large horizontal gradient of lower atmosphere moisture field over the East Asian region during the Meiyu season as well as the case of larger small scale variability along the Meiyu front.

Key words Advection, Semi-Lagrangian, High-order accuracy, Positive-definite conformation, PRM, Rainfall forecast, Torrential rain

摘要 针对半隐式半拉格朗日数值预报模式 GRAPES, 研究发展了与之相适合的高精度正定保形的物质平流方案——分段有理函数法 (PRM, Piecewise Rational Method)。文中在进行理想试验验证该方案简单、实用、易于编程对于空间变化幅度大的物理量具有较高的平流计算能力且在 GRAPES 模式中具有可行性的基础上, 对 2005 年 7 月连续 1 个月的 24 小时降水进行实际预报试验。通过细致的个例分析、月平均比较以及 TS 评分计算, PRM 方案实际预报结果与 GRAPES 模式中原来采用的水物质平流方案预报的主要雨带的分布、走向相一致, 但对大雨以上量级的降水预报具有明显优势, 对网格尺度的降水

* 资助课题: 国家 973 项目“我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”第 6 课题(2004CB418306)、国家科技支撑计划“灾害天气精细数值预报系统及短期气候集合预测研究”第 6 课题(2006BAC02B02)和自然科学基金面上项目(40675063)。

作者简介: 王明欢, 主要从事数值模拟研究。E-mail: minghuanw@163.com

通讯作者: 沈学顺, 主要从事数值模拟研究。E-mail: shenxs@cma.gov.cn

的影响比较敏感,进一步验证了高精度正定保形方案对实际降水预报的改进效果,表明该方案对于改进 GRAPES 模式大到暴雨预报能力具有较大的潜力。PRM 平流方案较 GRAPES 原来采用的准单调正定保形的平流方案能够更加合理地计算水物质场的输送,尤其是能够很好地反映出梅雨季东亚大气下层水汽水平梯度大以及沿梅雨锋水汽的小尺度变率较大的特点描写。

关键词 平流;半拉格朗日;高精度;正定保形;PRM;降水预报;暴雨

中图法分类号 P456.7

1 引言

平流计算方案处理的精度对数值天气预报结果有重要的影响,因此一直是研究发展数值模式的重要内容。对于数值模式降水预报而言,如何提高模式中像水物质这样具有不连续分布和强梯度特点的大气物理参量的平流计算精度,是影响降水预报效果的重要因素之一。谢邵成(1991)、宇如聪等(1994)和葛孝贞等(1997)都曾将正定水汽输送算法引入数值模式中改善水汽平流计算当中出现负水汽的问题,使计算更加合理,提高对暴雨的模拟能力。梅雨强降水是中国汛期天气的主要特点,大气下层水汽水平梯度大是梅雨锋的主要特点之一,因此对中国夏季降水的数值预报而言,研究高精度的水物质平流计算方案具有重要意义。另一方面,在未来公里尺度数值预报模式中,水物质不连续、强梯度的问题更加明显,高精度的平流计算方案将会越来越重要。

如何在半拉格朗日模式中发展高阶精度的标量平流计算方案是提高半拉格朗日数值模式精度的重要课题,一直倍受研究者的关注。中国气象局新一代数值预报模式 GRAPES 采用准单调半拉格朗日平流输送方案(QMSL, Quasi-Monotone Semi-Lagrangian scheme)处理水物质的平流计算。该方案本质上混合了高阶与低阶的内插,并在低阶内插中加入修正项。这个修正项在物理场足够光滑的区域使内插值等于高阶内插,具有高阶精度,但在物理量场不够光滑的区域将内插值转化为修正过的低阶内插来近似,精度降低。本研究结合计算流体力学的新研究成果,研究了适合于半拉格朗日模式的高精度正定保形的物质平流方案(Piece-wise Rational function Method; PRM),并在 GRAPES 模式中加以实现。有关理想试验及方案的说明可参考王明欢等(2011)文章。考虑到中国夏季水汽水平梯度大的特点,高精度正定保形的水物质平流方案将很大程度上改进模式对诸如水汽、云水等水物质质量的计算,

进而将改进模式的降水预报。通过两种不同的水物质平流方案(PRM 和 QMSL)对 2005 年 7 月 GRAPES 逐日 24 小时降水预报进行了试验和分析,本文拟验证 PRM 方案对 GRAPES 中尺度模式降水预报的改进,并分析降水预报改进的可能原因。

2 模式及试验方案

试验选用的是 GRAPES_Meso2.5,模式初始场采用国家气象中心全球中期预报模式 T213L31 的 2005 年 7 月逐日分析场,侧边界条件利用 T213L31 模式预报场每 6 小时更新 1 次,模式水平分辨率取 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$,垂直方向 31 层,时间积分步长为 200 s。预报区域范围为 18.5° — 41.3° N、 98.5° — 126.4° E,包含了长江中下游(YZ)、华南(HS)地区,以及华北(HN)大部分地区、西北(WN)和西南(WS)部分地区。试验所选取的物理过程包括:Ncep-3 三类简冰微物理方案、RRTM 长波辐射和 Dudhia(1989)短波辐射方案、Monin-Obukhov 近地面层方案、热扩散 SLAB 陆面过程、MRF 边界层方案、Betts-Miller-Janjic 积云对流参数化方案。模式的水物质平流方案分别采用了 QMSL 方案和高精度正定保形的 PRM 方案(Xiao, et al, 2004),得到两组预报结果,并进行对比分析。

本文中各物理量场实况数据使用的是分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 NCEP/NCAR 再分析资料,实况雨量数据和实况天气图是中央气象台发布的信息资料。

2.1 连续预报试验

2.1.1 2005 年 7 月主要天气过程和强降水事件

2005 年汛期,中国天气具有极端天气事件多、局地强对流天气频繁、灾害重、地域差异大的特点(叶成志等,2006)。全国大部分地区降雨量接近常年同期或偏多(孙建华,2006)。2005 年夏季中国东部的雨带主要在华南和黄淮地区,长江流域出现空梅,但长江流域受西风槽和登陆台风的影响,也出现了一些降雨过程。在长江和黄淮之间,大气的低层存在较强的水汽梯度(图 1)。

7月主雨带位于长江和黄淮之间,最强的降雨发生在湖北和安徽;7月另一个降水中心位于浙江和福建沿海地区,这是由于5号台风海棠(Haitang)登陆造成的。

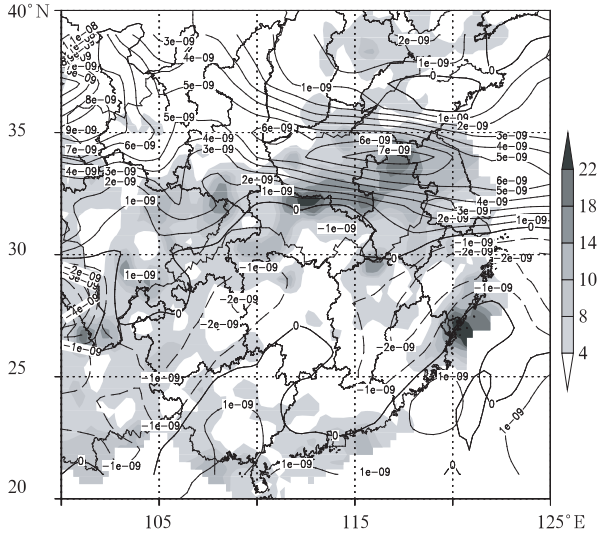


图1 2005年夏季月平均24 h观测累积降雨量(阴影,单位:mm)和700 hPa南北水汽梯度(等值线, $\partial q_v/\partial y$,单位: $\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{m})$)分布
Fig.1 Distributions of the summer monthly mean 24 hour observed accumulative precipitation in 2005 (shaded area, unit:mm) and the vapour gradient at 700 hPa (contour line, $\partial q_v/\partial y$, unit: $\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{m})$)

2.1.2 个例分析

2005年7月6—8日长江流域出现一次降水天气过程,从卫星云图和实况500 hPa高度场(图2)可以看出,2005年7月7日和8日,宜昌以西及长江流域和黄河之间的地区(川东、黔北、陕南、鄂西、

河南中南部、安徽中北部)受到西太平洋副热带高压外围西南气流影响,有发展旺盛的对流云团。

2005年7月6—8日,长江流域上游及其北部地区,受西太平洋副热带高压外围的西南气流和中低层切变共同影响,出现局地性强降雨。6日川东北的万源出现100 mm的大暴雨,鄂西北的老河口出现200 mm以上的特大暴雨,相邻的枣阳地区以及安徽的蚌埠、寿县和滁县都出现100 mm以上的大暴雨,7日川东的宣汉出现178 mm的大暴雨,8日安徽北部的凤台出现158 mm的大暴雨。针对这次降水过程中,选择6日08时和7日08时起报的24 h降水预报结果进行分析。

6日08时到7日08时的24 h降水主要分布在32°N附近,西起四川,东至江苏,其中有3个 ≥ 100 mm的强降水中心,分别位于四川、重庆、陕西交界处,以及安徽中北部、湖北西北与河南西南交界处(图3a)。图3b、3c给出了模式模拟6日08时起报的24 h累积降水。同实况相比较,两种平流方案都没有模拟出大暴雨(≥ 100 mm)和特大暴雨(≥ 200 mm)的降水。但是对于暴雨(≥ 50 mm)的预报,QMSL方案(图3b)的模拟降水显著偏弱,范围偏小,没有捕捉到河南、安徽大于50 mm的暴雨,QMSL方案对于长江流域下游地区预报不出暴雨以上量级的降水;比较而言,PRM方案模拟的降雨量在黄淮以及江淮的东部地区可以超出QMSL方案10—30 mm,局部地区在30 mm以上(图3d),且能捕捉到在陕西、河南、安徽、江苏大于50 mm的降水(图3c),预报的大雨区范围较QMSL大,更接近实况。虽然PRM没有预报出准确的大暴雨落区,但是却能反映暴雨的出现,且位置与实况接近。

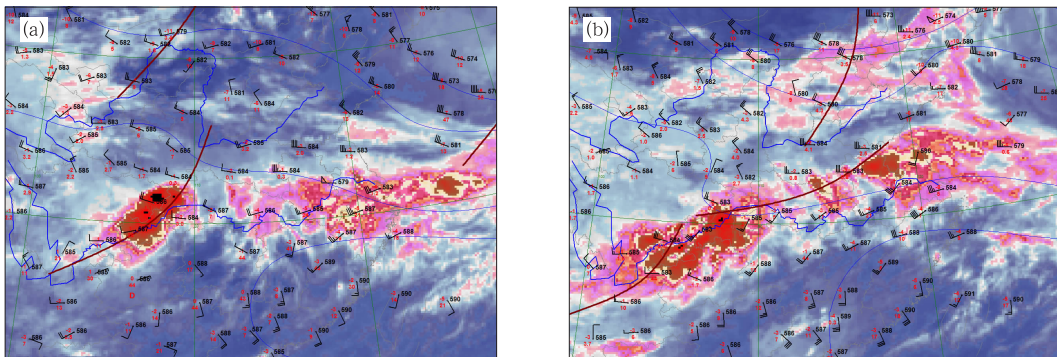


图2 2005年7月7日(a)和8日(b)08时红外云图和500 hPa高度场的叠加(单位:dagpm)
Fig.2 Infrared images with 500 hPa geopotential height field superimposed at 08:00 BT 7 (a) and 8 (b) July 2005 (unit: dagpm)

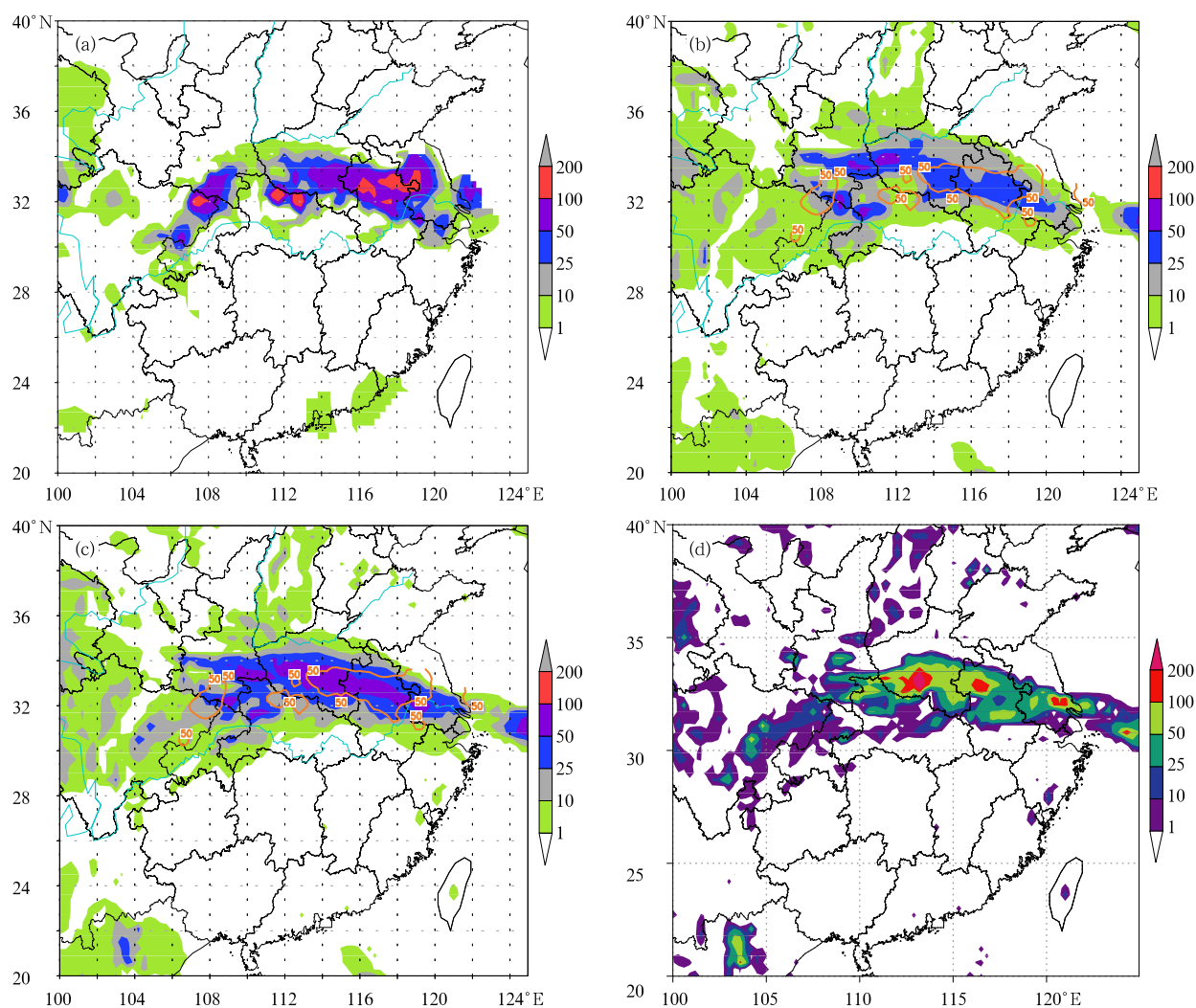


图3 2005年7月6日08时至7日08时24 h累积降雨量(单位:mm)分布
(a. 实况, b. QMSL 方案, c. PRM 方案, d. PRM 与 QMSL 模拟
的雨量差值; b,c 图中给出实况 50 mm 的雨量等值线)

Fig. 3 Distributions of the 24 hour accumulative rainfall forecast from
08:00 BT 7 to 08:00 BT 8 July 2005

(a. the observation, b. the forecast using the QMSL, c. the forecast using the PRM,
d. the difference between the PRM and the QMSL. units: mm.
In (b) and (c) the contour is for the 50 mm rainfall)

进一步考察两种平流方案对模式网格尺度降水和次网格对流降水预报的影响(图4和图5),可以看出,两种水物质平流方案预报的网格尺度降水和次网格对流降水在雨量和落区上都有较明显差异。PRM和QMSL在四川模拟出一个网格尺度降水中心,同时,PRM还模拟出一条从河南东南部、安徽北部到江苏中部中心雨量为6 mm的小雨区,但QMSL没有。这说明PRM一定程度上表现出了江淮流域层云降水和积云对流降水的混合特点,与观

测事实有一定程度的吻合。对于次网格对流降水,两种平流方案模拟的24 h的江淮地区的雨带走势相似,但PRM预报的雨带在南北方向上没有QMSL发散,而且PRM方案模拟的暴雨中心雨量和落区(31°—34°N,108°—114°E)更接近实况(湖北西北与河南西南交界的地区出现了特大暴雨,在34°N、114°E附近)。

另外,为了与卫星云图作比较,将模拟的500 hPa高度以上总水凝物(云水 q_c 和雨水 q_r)随高

度积分(史月琴等, 2008), 得到云带分布, 以 0.2 kg/m^2 作为云区(图 6)。

在 7 日 08 时的云图(图 2)中, 有两个较明显的对流云团, 一个位于川东重庆一带, 呈西南—东北走向; 另一个位于长江中下游地区, 呈东西走向。PRM 和 QMSL 平流方案的模拟结果共同特点是: 模拟云场也呈一西—东分布, 但

与实况相比, 一个位置偏西, 一个西北—东南走向, 都有偏差。与 QMSL 方案模拟结果相比较, PRM 方案模拟的云带范围较大, 强度较大, 云带也较连续

从 7 日 08 时到 8 日 08 点的模拟可以得到类似结果, PRM 方案对暴雨的模拟效果比 QMSL 更接近观测。

从以上个例的分析结果中可以看到 PRM 水物

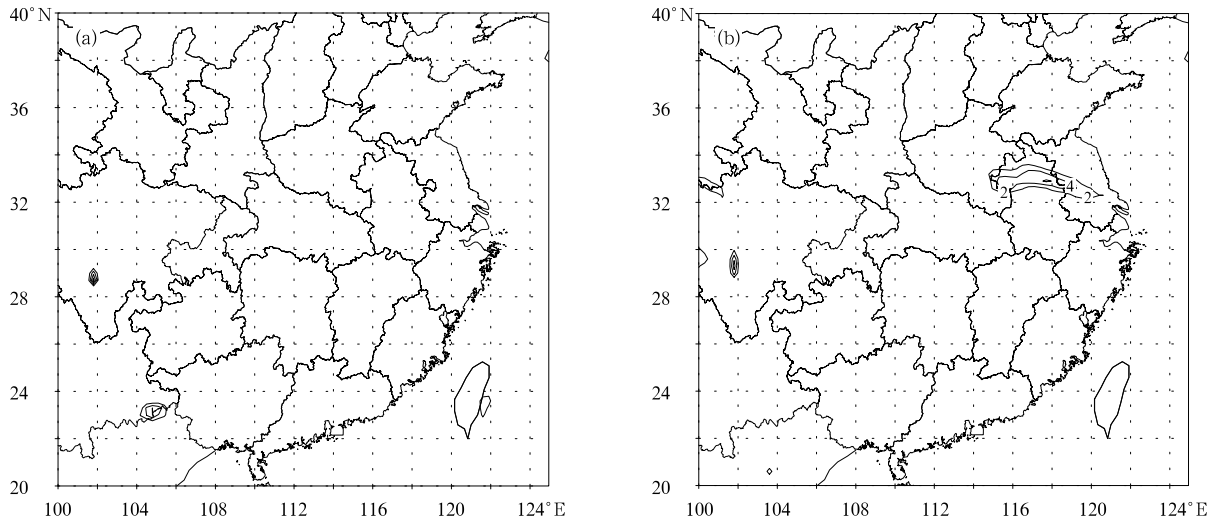


图 4 2005 年 7 月 6 日 08 时至 7 日 08 点 24 h 网格尺度降水量(单位:mm)分布
(a. QMSL 方案预报结果, b. PRM 方案预报结果; 等值线间隔 QMSL 为 0.2, PRM 为 2)

Fig. 4 Distributions of the 24 hour accumulative total grid scale precipitation rainfall forecast from 08:00 BT 7 to 08:00 BT 8 July 2005

(a. the forecast using the QMSL, b. the forecast using the PRM;
the contour interval is 0.2 in the QMSL and is 2 in the PRM; units: mm)

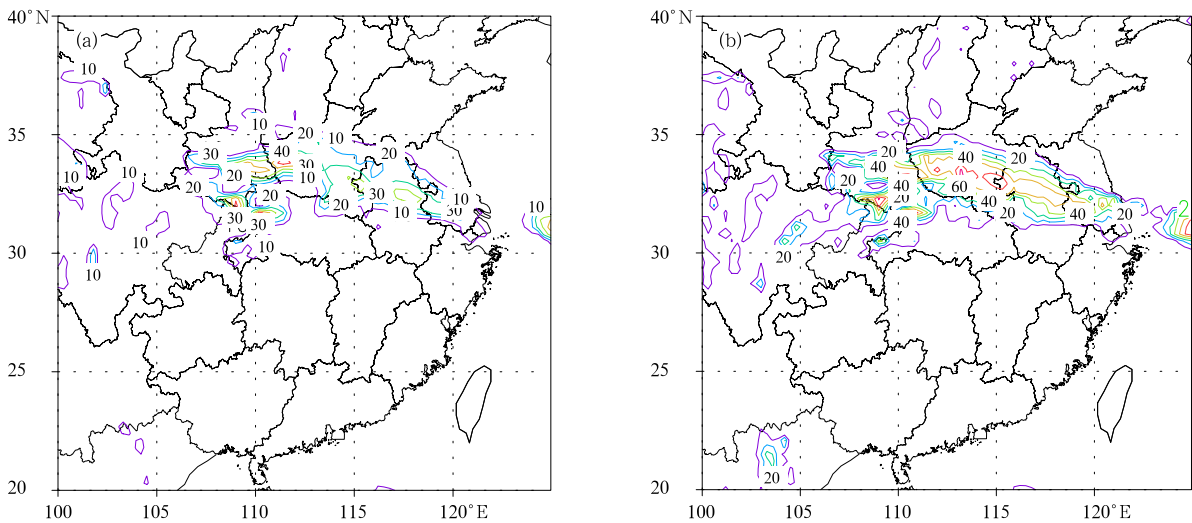


图 5 2005 年 7 月 6 日 08 时—7 日 08 时 24 h 次网格对流降水量(单位:mm)分布
(a. QMSL 方案预报结果, b. PRM 方案预报结果; 等值线间隔 10 mm)

Fig. 5 As in Fig. 4 but for the subgrid scale with the contour interval of 10 mm

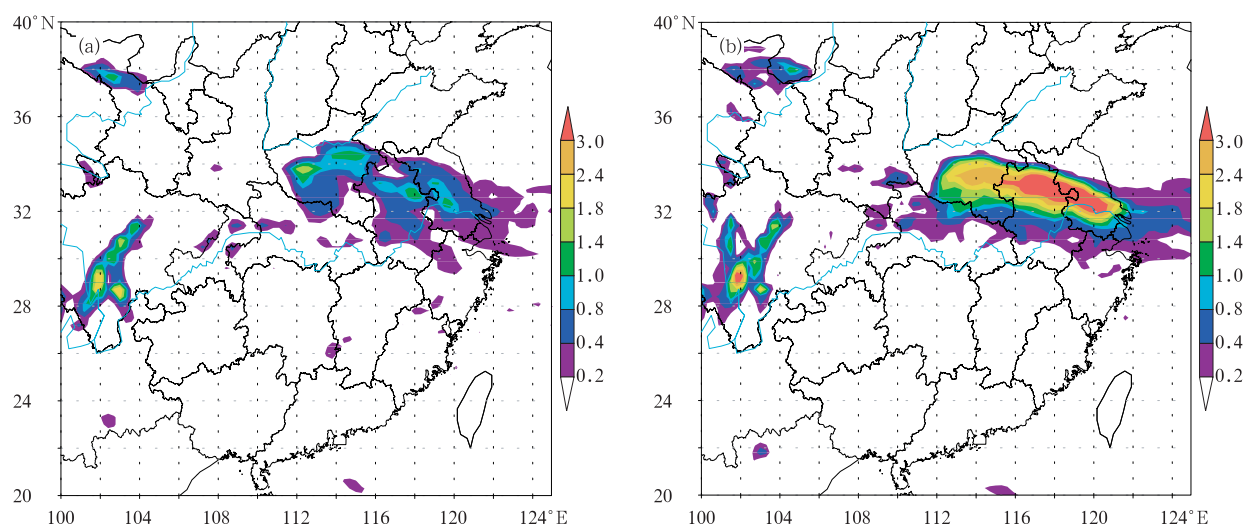


图6 2005年7月7日模拟的云场分布(a. QMSL结果,b. PRM结果;单位:kg/m²)

Fig. 6 Distributions of the simulated cloud fields at 08:00 BT 7 July 2005

(a. the forecast using the QMSL, b. the forecast using the PRM; units: kg/m²)

质平流方案对于模式降水预报有较为明显的优势,下面从月平均的统计情况考察两种平流方案对预报结果的不同影响。

2.1.3 对月平均降水预报效果的统计分析

从2005年夏季7月的逐日24h降雨量月平均实况(图7a)上看出,降水主要集中在黄淮流域。与QMSL方案对比,PRM方案模拟的主要雨带降水有较大的提高(图7b、图7c、图7d)在河南南部、安徽北部和浙江沿海增加了15—20mm的雨量,但同时某些地区存在预报偏大的问题。

进一步统计了7月逐日24h累积降水量大于25、50、100mm的发生次数。图8中的数字标识说明,观测到3次以上的大于25mm的强降水主要发生黄淮地区、长江下游、江汉地区北部、湖北西南和湖南西北部、陕西的南部、四川东部、四川和贵州交界的地方、云南南部、浙江东部沿海、两广南部沿海。从阴影区域可以看出,两种平流方案对于大雨以上量级的降水模拟与实况具有一定的近似。与观测的落区和频次相比,PRM方案的模拟结果更接近实况大于25mm的降水,尤其在黄淮流域。对大于50mm的发生频次进行分析(图9),QMSL方案在黄淮地区的降水出现的漏报情况比较多,但PRM仍能模拟出为数不多几次暴雨过程。两个方案对100mm以上的降水漏报较多(图略)。由于强降水发生的局地性,图8和图9暴露出两个方案都有不同程度的漏报和空报问题,随着关心的降雨量级增大,这样的问题也越来越严重。比如在陕西、四川、重庆、

湖北四省交界一带,以及云南地区,空报现象比较严重,这可能受地形影响较大。

从以上个例及月平均预报效果的统计结果来看,PRM方案在强降水预报方面表现出一定的优势。进一步分析两种平流方案模拟的水汽场的输送特点,能够对造成不同降水预报的原因有所理解。分别给出采用PRM(图10a)和QMSL(图10b)平流方案时模式预报的逐日24h500hPa水汽场月平均

的平均变率 $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(q_{vi} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_{vi} \right)^2}$, q_{vi} 为第 i 天的比湿, N 为天数,本试验为28天(因缺少3天的资料;单位:mm),为了比较也给出了基于NCEP再分析资料的计算结果(图10c)。采用PRM方案时模式能够更加合理地模拟水汽场的变化特点和分布特征(图10),这与PRM平流方案具有高精度且能够分辨被平流场的小尺度变化特征的理论分析相一致(Xiao, et al, 2004)。另外,对两种平流方案模拟的低层水汽场南北梯度的分析表明,采用PRM方案时模拟的南北梯度大值区、梯度值和位置更接近基于NCEP再分析场的分析结果(图1)。

因此,PRM平流方案较GRAPES原来采用的准单调正定保形的平流方案能够更加合理地计算水物质场的输送,尤其是对于梅雨季东亚大气下层水汽水平梯度大以及沿梅雨锋水汽的小尺度变率较大的特点能够很好地描写,这是采用PRM方案后能够改善降水预报的原因。

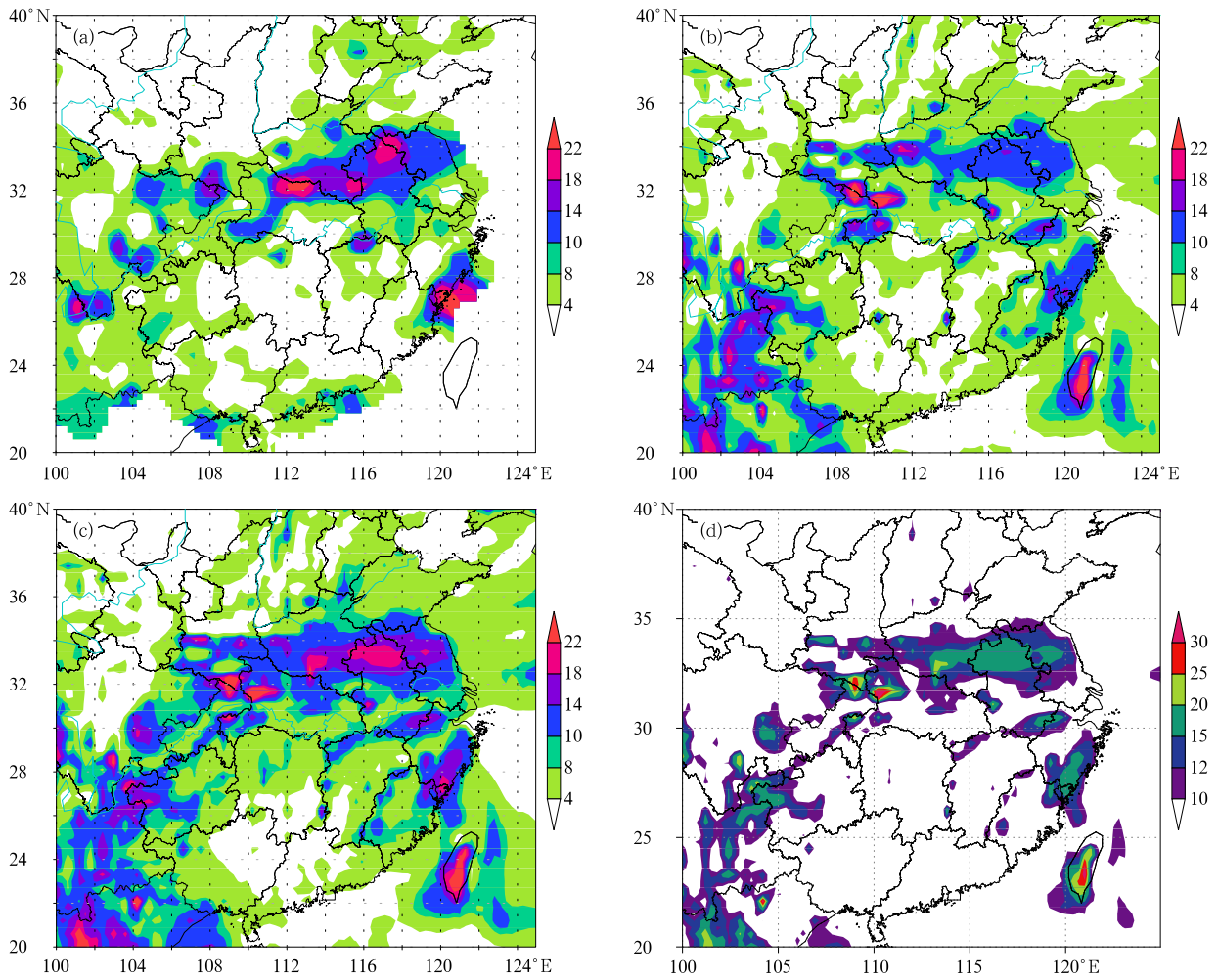


图7 2005年夏季7月逐日24h累积降雨量(单位:mm)月平均值分布
(a. 实况, b. QMSL方案, c. PRM方案, d. PRM与QMSL的雨量差值)

Fig. 7 Monthly mean 24 hour accumulative rainfalls during July (a. the observation, b. the forecast using the QMSL, c. the forecast using the PRM, and d. the difference between the PRM and the QMSL in July; units: mm)

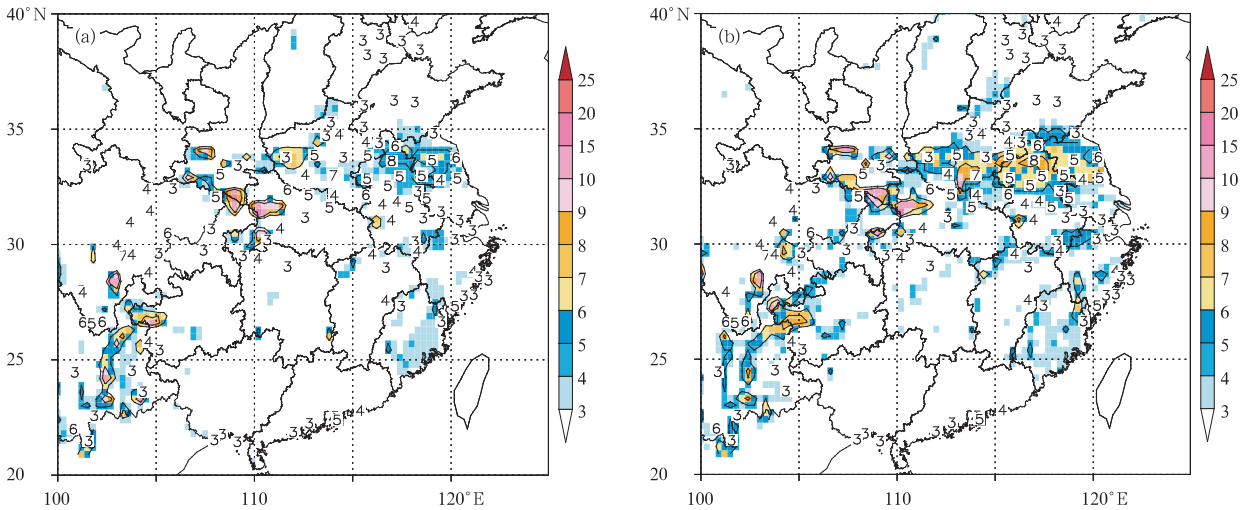


图8 2005年夏季7月统计的逐日24h降水量大于25mm的次数分布
(数字填图为次数 ≥ 3 的观测;等值线分别表示不同方案统计次数为5,8和25; a. QMSL方案, b. PRM方案)

Fig. 8 Distributions of the frequency (≥ 3) of the rainfall larger than 25 mm/d for July 2005
(in each picture, the isolines are for 5,8 and 25 in turn; a. the forecast using the QMSL and b. the forecast using the PRM)

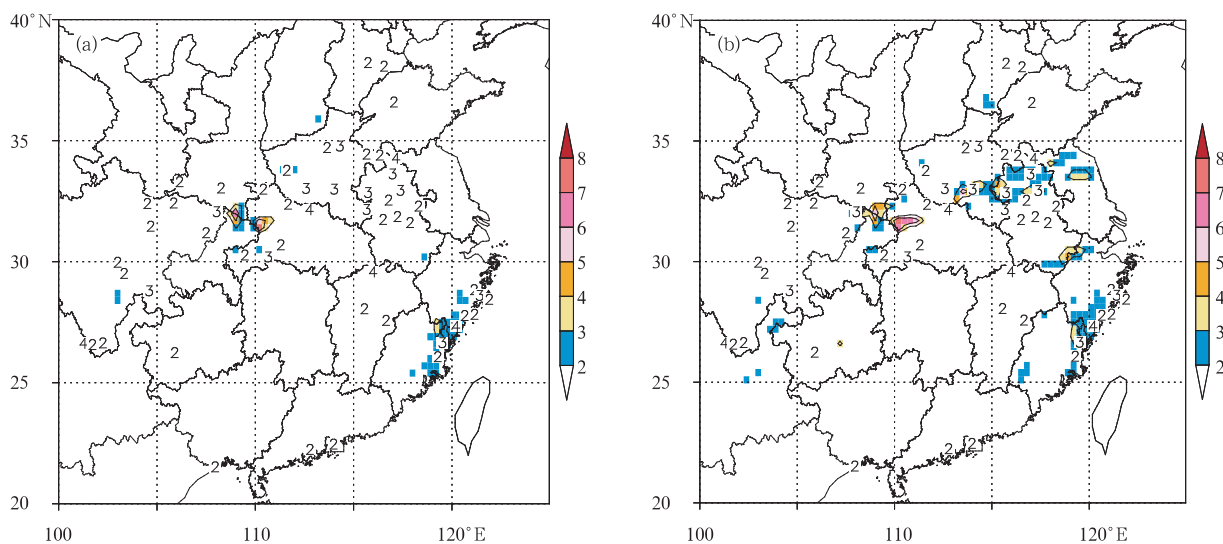


图 9 同上,但为大于 50 mm 的次数分布(数字填图为次数 ≥ 2 的观测。等值线分别表示不同方案统计次数为 3 和 5)
 Fig.9 As in Fig.8 but for the frequency (≥ 2) of the rainfall larger than 50 mm/d (in each picture, the isolines for 3 and 5 in turn)

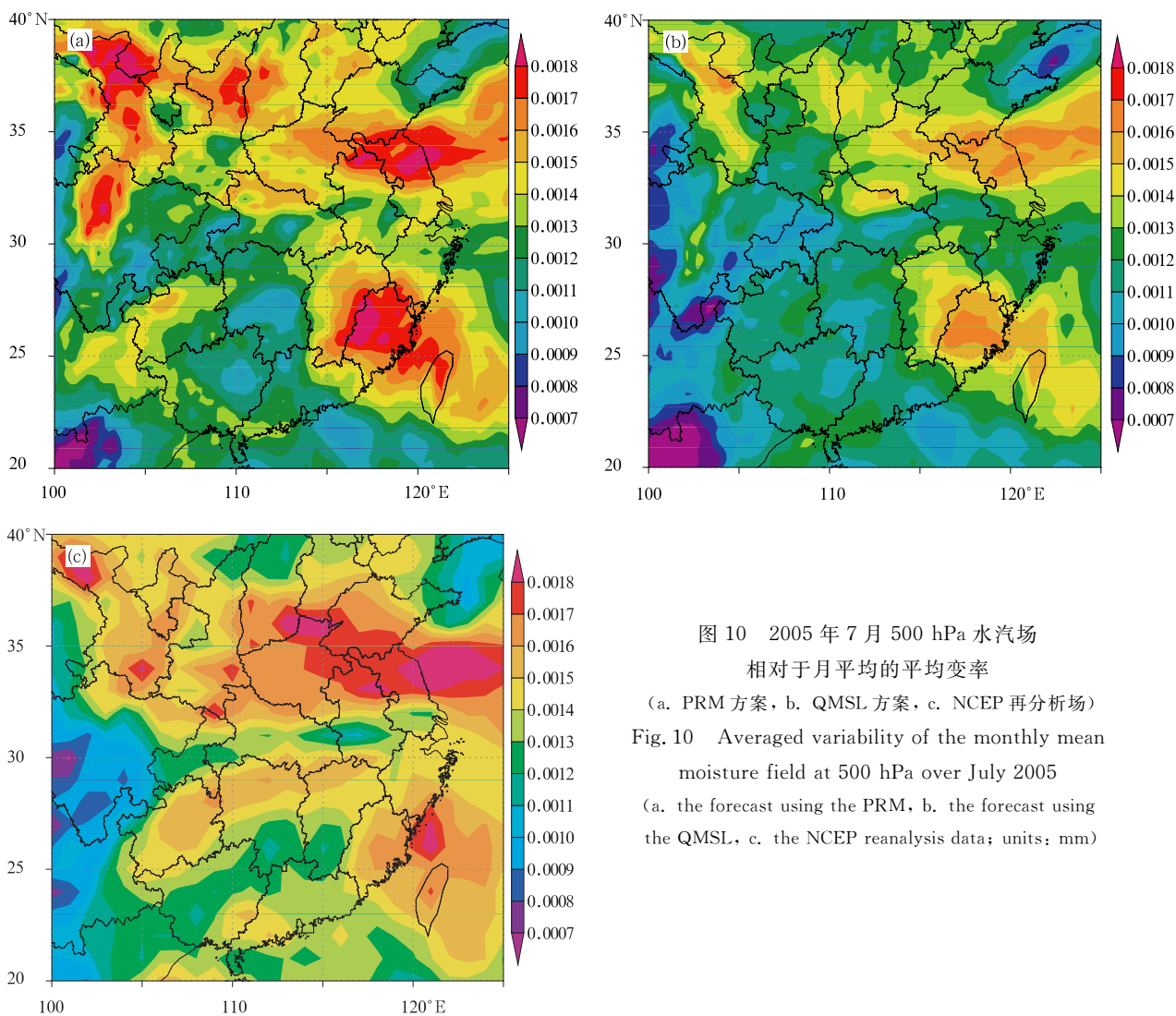


图 10 2005 年 7 月 500 hPa 水汽场
 相对于月平均的平均变率
 (a. PRM 方案, b. QMSL 方案, c. NCEP 再分析场)
 Fig.10 Averaged variability of the monthly mean moisture field at 500 hPa over July 2005
 (a. the forecast using the PRM, b. the forecast using the QMSL, c. the NCEP reanalysis data; units: mm)

2.2 TS 评分

从以上个例和月平均逐日 24 h 降水预报的对比分析,对两种平流方案的效果有大致地了解。以下用业务数值预报中检验降水预报效果的 TS 评分 (Threat Score)和偏差 (Bias)进一步说明两种水物质平流方案对 24 h 降水预报的不同效果。

本文采用累加量级的检验(中国气象局预测减灾司等著,2001),即分别对小雨(0.1—10 mm)、中雨(10—25 mm)、大雨(25—50 mm)、暴雨(50—100 mm)、大暴雨(>100 mm)的预报情况进行检验。累加量级检验就是当对某一降水量级进行检验时,若预报和实况均为大于此量级的降水即为预报正确。

降水评分(TS)和偏差的定义为

$$T_s = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \quad (1)$$

$$B = \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C} \quad (2)$$

式中 N_A 、 N_B 、 N_C 、 N_D 的定义见表 1。

表 1 K 级降水的检验分类表

实况\预报	有	无
有	N_A	N_C
无	N_B	N_D

本研究根据所取预报区域的大小,只给出长江流域(包含了长江中下游、黄淮、江南地区,具体划分见图 11)、华南地区(没有考虑海南岛)以及全区域的 TS 评分、Bias 偏差的比较。

图 12 是各累加量级降水预报的 TS 评分,图 13 是对应的偏差。对小雨以上量级降水检验,无论在长江流域还是在华南地区或是全区域,PRM 方案和 QMSL 方案的月平均 TS 评分差不多,在长江流域的偏差两者都大于 1,即空报大于漏报站点数,且 PRM 大于 QMSL。在华南和全区域的偏差两者都小于 1,但 PRM 比 QMSL 更接近于 1,即预报正确的站点数与实况接近。

对中雨以上量级降水检验,长江流域 PRM 的月平均 TS 评分略高于 QMSL;在华南地区和全区域来讲,PRM 的 TS 略低于 QMSL。相应的偏差,在长江流域两方案的偏差均大于 1,PRM 更大;华南地区两者偏差小于 1,PRM 比 QMSL 稍高一点;全区域的偏差略大于 1,PRM 大于 QMSL。

从 TS 评分和偏差图上分析大雨以上量级的降水检验,PRM 的 TS 评分在长江流域和全区域高于 QMSL,两者在华南的表现相当。从相应的偏差上,

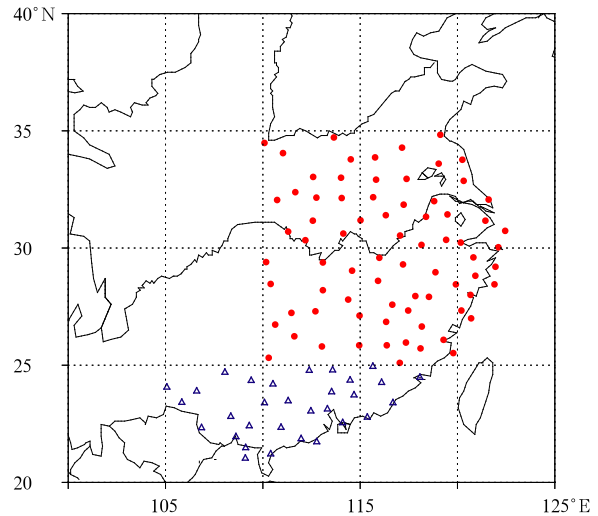


图 11 长江中下游及华南检验区域指标站点的分布 (红色实心圆:长江中下游流域;蓝色三角:华南检验区域)

Fig. 11 Distribution of the index stations in the middle and lower reaches of the Changjiang River and South China (red filled circle; the middle and lower reaches of the Changjiang River; blue triangle; South China)

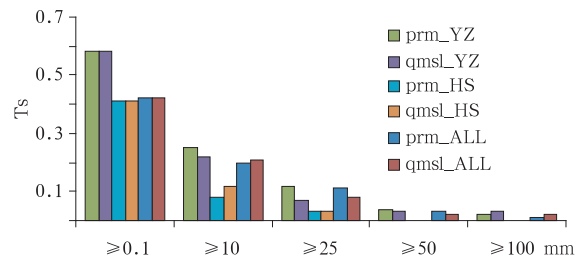


图 12 2005 年 7 月 24 h 降水预报在长江中下游和华南地区以及全区域的月平均 TS 评分

Fig. 12 Monthly mean threat scores for the 24 hour rainfall forecast in the middle and lower Yangtze River basins and South China in July

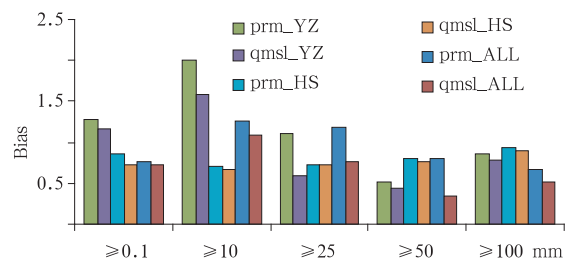


图 13 同上,但为月平均偏差

Fig. 13 As in Fig. 12 but for the bias

可以看出 PRM 在长江流域和全区域的偏差大于 1, QMSL 小于 1,但 PRM 方案的预报偏差更接近 1;在华南地区两者的偏差非常接近,均小于 1。

在暴雨以上量级降水预报检验中,PRM 的长江流域和全区域的月平均 TS 评分比 QMSL 略高。

两个方案对于华南地区暴雨以上量级的预报都没有成功。从相应的偏差上,可以看出在长江流域和华南月平均偏差两个方案都小于 1,但 PRM 比 QMSL 更接近 1;PRM 全区域的偏差明显要高于 QMSL。

在大暴雨以上量级降水预报的检验中,长江流域和全区域 PRM 的 7 月月平均 TS 评分略小于 QMSL。在华南地区,两个方案对 7 月的大暴雨以上量级的降水预报没有表现。从相应偏差上看,无论在长江流域还是华南或者全区域,PRM 和 QMSL 的偏差都小于 1,且 PRM 的偏差比 QMSL 更接近 1。在大雨和暴雨以上量级检验中,PRM 的 TS 评分高于 QMSL,对应的偏差也比 QMSL 更接近于 1,但在大暴雨以上量级检验中,虽然 PRM 月平均偏差比 QMSL 更接近于 1,但 TS 评分却稍显逊色。通过统计比较一个月累加大暴雨的 N_A 、 N_B 、 N_C ,PRM 的空报站点数多于 QMSL,两方案预报正确站点数和漏报站点数分别相当,均为预报正确的站点数很少,漏报站点数相对较多。因为大暴雨发生的局地性强,难于预报,全区域漏报站点数近 30 个,正确预报的站点数仅 1 个。从中可以看出,与观测相比,两个方案漏报的机率都很大,PRM 方案在鄂西又比 QMSL 方案多预报出 2 次暴雨,虽然落区有一定程度的偏差,但是同时也说明 PRM 对大暴雨有一定程度反映,对大暴雨的捕捉比 QMSL 更加敏感。

综上所述,7 月月平均 TS 评分和月平均偏差来看,具有高精度保形正定及守恒特点的 PRM 方案对于 24 h 降水预报,小雨预报的评分和 QMSL 水物质平流方案的预报结果相差不大,中雨预报 PRM 整体上要比 QMSL 略差,而对于大雨、暴雨和大暴雨的预报,PRM 方案显现出了一定的优势,平均效果好于 QMSL。

本研究在预报试验中模式分辨率取 30 km,由于 PRM 方案具有更好的处理大梯度、间断和不连续的能力,该方案应该在高分辨率的情况下更能显出其优势,因此有待进一步在高分辨率模式中进行预报试验考察其对模式预报能力的改进程度。

3 结 论

一个处理水物质平流的方案真正应用于模式业务之前,需要考察方案的连续预报能力,整体的预报水平,不同天气系统形势下的预报能力。

PRM 作为一种新的高精度、正定保形的物质平流方案应用到 GRAPES 模式的水物质输送中,利用 T213L31 分析场作为初始资料,进行了 2005 年夏

季连续 1 个月(7 月)的 24 h 降水预报试验,并与 GRAPES 模式中已有的 QMSL 方案预报结果做了详细的对比。

通过细致的个例分析,整体上来说,PRM 对水汽(q_v)、云水(q_c)和雨水(q_r)模拟的高值中心比 QMSL 要大。PRM 对网格尺度的降水比 QMSL 敏感。从降水预报的月平均比较和 TS 评分结果发现,QMSL 和 PRM 的模拟中都包含了一些误差,预报的结果在很多方面存在着相似的地方,如雨带的分布和走向。但是,与 QMSL 方案相比,PRM 对暴雨量级以上的降水预报能力更强。

连续 1 个月的后报试验表明,PRM 方案较好地改进了 GRAPES 中尺度模式降水预报总体降雨强度偏弱、强降雨中心漏报较严重的问题。

强降水事件的预报是一件非常困难的工作。PRM 作为一个高精度正定保形的水物质平流方案,具有提高模式对大到暴雨的预报能力的潜力。

致谢:衷心感谢中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室的彭新东研究员和中国气象局数值预报中心的李兴良副研究员的建议和帮助。感谢同学丁杨、郑永骏、俞胜斌、上海台风所的谭燕和中国气象局数值预报中心的刘永柱、庄照荣以及重庆市气象局陈晓敏和武汉暴雨研究所赖安伟在程序实现及画图方面的帮助。

参考文献

- 葛孝贞,郑爱军. 1997. 包含正定水汽输送算法改进的 MM4 中尺度模式与暴雨实例数值试验. 气象学报,55(5):573-587
- 史月琴,楼小凤,邓雪娇等. 2008. 华南冷锋云系的中尺度和微物理特征模拟分析. 大气科学,32(5):1019-1036
- 孙建华,卫捷,赵思雄等. 2006. 2005 年夏季的主要天气及其环流分析. 气候与环境研究,2:138-154
- 沈学顺,王明欢,肖锋. 2011. GRAPES 模式中高精度正定保形物质平流方案的研究 I:理论方案设计与理想试验. 气象学报,69(1):1-15
- 谢邵成. 1991. 一种新的正定平流方案及其在水汽预报方程中的应用. 气象学报,49(1):11-20
- 叶成志,欧阳里成,李象玉等. 2006. GRAPES 中尺度模式对 2005 年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能检验分析. 热带气象学报,4:393-399
- 中国气象局预测减灾司,国家气象中心. 2001. 气象预报产品质量评分系统技术手册(移到注示中)
- Bermejo R, Staniforth A. 1992. The conversion of semi-Lagrangian advection schemes to quasi-monotone schemes. Mon Wea Rev, 120:2622-2632
- Xiao F, Peng X D. 2004. A convexity preserving scheme for conservative advection transport. J Comput Phys,198:1-14
- Yu Rucong. 1994. A two-step shape-preserving advection scheme. Advances in Atmospheric Science,11:479-490