

文章编号: 1004-4965(2010)01-0001-06

## GRAPES 区域模式水汽平流方案的比较与改进

陈子通<sup>1</sup>, 万齐林<sup>1</sup>, 沈学顺<sup>2</sup>, 黄燕燕<sup>1</sup>,  
张艳霞<sup>1</sup>, 张诚忠<sup>1</sup>, 丁伟钰<sup>1</sup>

(1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080;

2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘 要:** 与欧拉显式时间差分方法相比, GRAPES 区域模式采用半隐半拉格朗日时间差分方案可增加时间步长且不影响稳定性, 而且模式积分可有较高的计算效率和准确性。半拉格朗日法需要用到内插算法来预测下一时刻的值, 对于水汽场的内插值来说, 常常会造成预报值的过饱和或者是负值, 需要进行特殊处理。比较 GRAPES 模式的准单调半拉格朗日方案(QMSL)和高精度正定保形方案(PRM), 分析模式的降水预报、形势预报, 同时初步总结了两方案的优缺点。在参考 LCSL (Linear Constraint Semi-Lagrangian) 方案的基础上, 改进 QMSL 方案, 通过连续试验运行, 表明新方案基本稳定可靠, 对于降水预报、形势预报有一定的改进, 在台风预报试验中也有良好的表现。

**关 键 词:** 区域模式; 水汽平流; 半隐半拉格朗日

中图分类号: P456

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2010.01.001

## 1 引 言

随着数值天气预报技术的发展, 模式预报准确率的不断提高, 数值产品目前已成为日常天气预报中最重要的参考依据之一。大气数值预报模式中的一个重要部分是处理好非线性平流项, 即平流项的数值近似。传统欧拉显式差分方法受 CFL (Courant-Fredrichs-Lewy) 计算稳定度条件的限制, 必须取较短的时间步长, 这对高分辨业务模式来说是个很大的限制。现前大多采用半隐半拉格朗日方案, 这是一种效率高而且准确的平流方案<sup>[1-2]</sup>。半隐半拉格朗日时间差分方法可以取较长的时间步长, 理论上几乎不受 CFL 条件的限制。但在实际应用中, 考虑到计算精度和并行计算会有一定的限制, 但时间步长还是比传统的欧拉显式差分方法长得多。

使用半拉格朗日方法时需要用内插方法来求得预报值, 这些内插法常常会造成预报值的过量或不足, 尤其是在梯度很大或者不连续的地方问题就

更为严重。如果是水汽场, 常常会产生过饱和或者是负值, 导致物理过程产生较大误差, 甚至积分过程出现中断。其解决方法主要有准单调半拉格朗日(QMSL: Quasi-monotone semi-Lagrangian)<sup>[3]</sup>和二阶矩守恒格式<sup>[3]</sup>等方法。通过对 GRAPES 区域模式现有水汽平流方案进行连续一段时间的对比测试, 发现 QMSL 方案比较稳定, 但是降水预报大多偏弱, 而 GRAPES 模式的 PRM(Piecewise Rational Method) 方案预报的降水常常偏大, 积分时间长(大于 72 小时)时会造成形势预报较大的偏差。

水汽平流方案的重要性是不言而喻的, 特别对大多数热带天气系统(台风等), 水汽强烈辐合, 积云对流释放凝结潜热, 是它们获得发展的重要条件。另外像台风这一类系统, 常常有较大的水汽梯度, 这给方案设计提出了很高的要求。研究现有方案, 分析其主要存在的问题, 同时参考国内外的一些研究成果<sup>[4-6]</sup>, 可以对现有方案进行适当改进来获取在热带海洋气象业务预报中比较可行、有效的方

收稿日期: 2009-07-18; 修订日期: 2009-12-26

基金项目: 社会公益研究专项(2005DIB3J110); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706014); “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAC02B)共同资助

通讯作者: 陈子通, 男, 广东省人, 副研究员, 主要从事热带数值天气预报的研究。E-mail: ztchen@grmc.gov.cn

案,以便取得稳定、准确的预报效果。

## 2 GRAPES 区域模式水汽平流方案的对比分析

以 GRAPES 区域模式 3.0 版进行对比试验。模式水平分辨率为  $0.36^\circ$ 。模式预报区域为:  $81.6^\circ \sim 160.8^\circ \text{E}$ ,  $0.8^\circ \sim 50.5^\circ \text{N}$ 。垂直分 31 层。时间步长 100 秒。主要物理方案包括: KFETA 积云对流参数化,云微物理过程选取 WSM6 方案,SLAB 陆面过程, RRTM 长波辐射等。NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  的分析和预

报场分别作为初估场和侧边界。使用相同的 GRAPES\_3DV<sup>[7-8]</sup>同化初值和相同的标准初始化(SI)。方案 1 为 QMSL(准单调半拉格朗日方案),方案 2 为 PRM(高精度正定保形方案)。由图 1 可以看出,方案 1(图 1a)和方案 2(图 1b)大体上相同,24 小时预报与实测分析(图 1c)也大致相同。比较降水量级,方案 2 的预报比方案 1 在多数地区要大一些。500 hPa 高度场预报,对比 584 线和 586 线位置,如华南一带,预报比实测分析要偏南一些,方案 2 则更为严重。

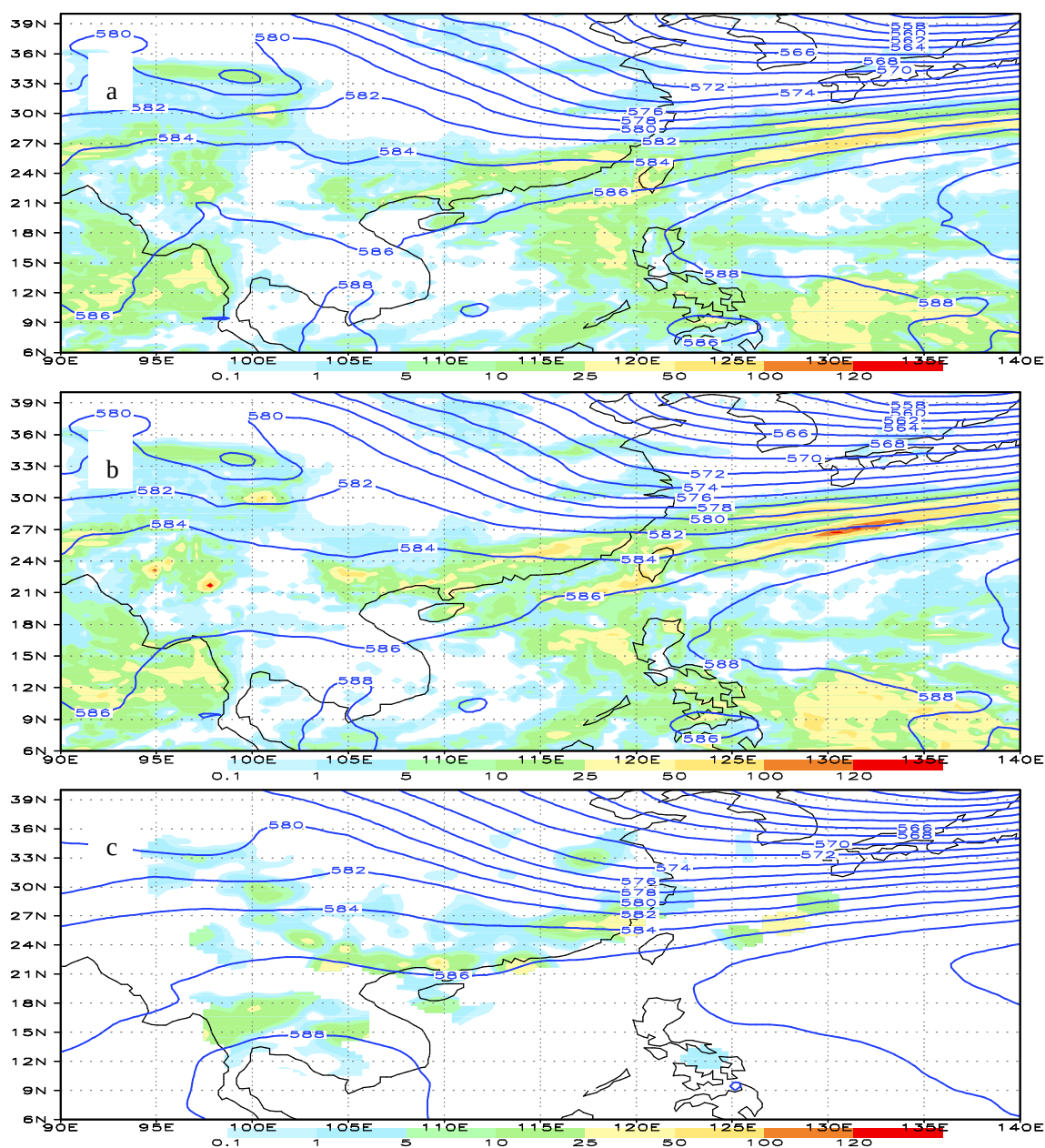
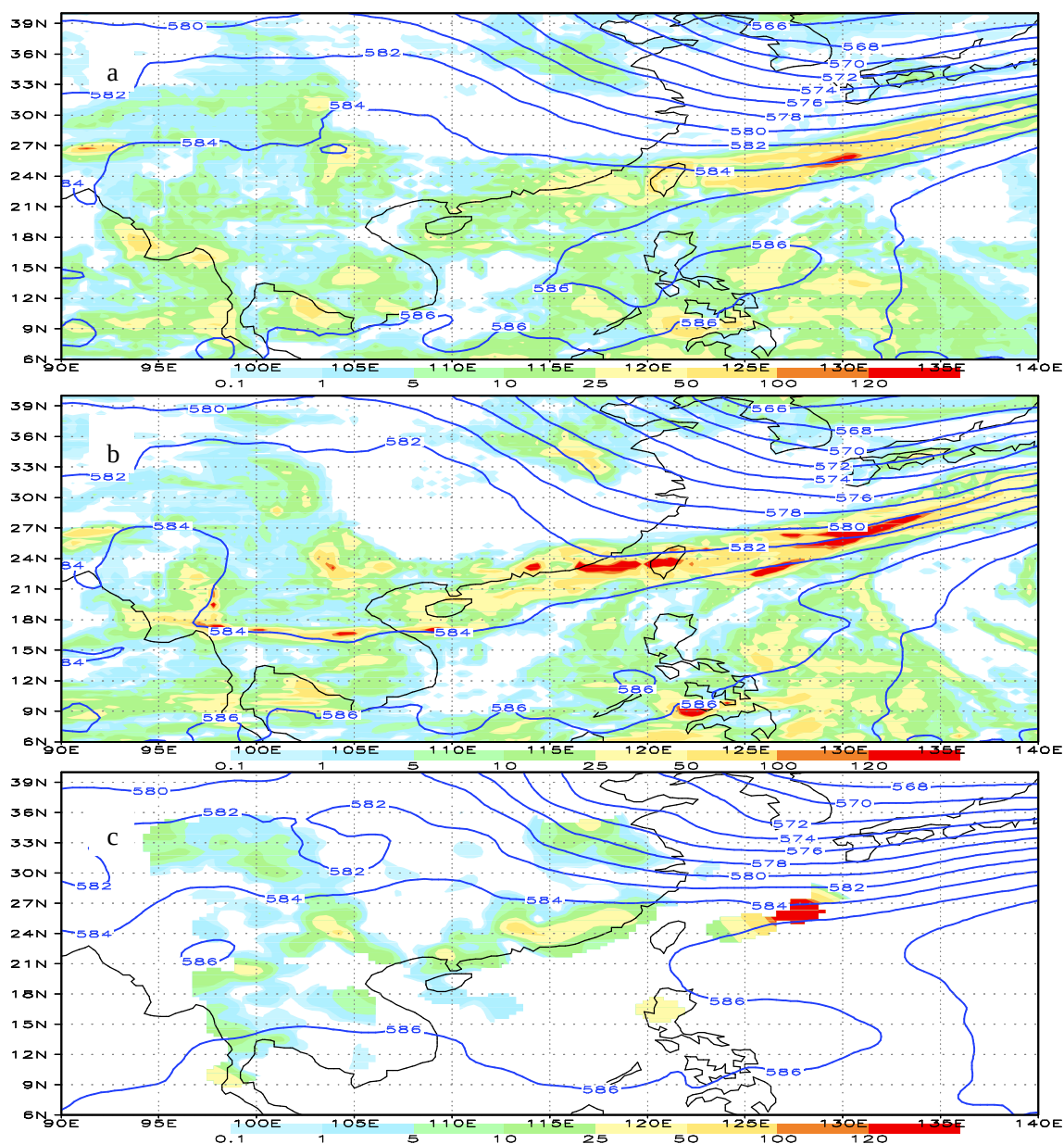


图 1 500 hPa 高度(等值线,单位:位势什米)与 24 小时累积降水(填色,单位:mm) a. 方案 1 的 24 小时预报,起报时间 2009 年 6 月 12 日 00 时; b. 方案 2,说明同图 a; c. 2009 年 6 月 13 日 00 时实测分析(海上降水用船舶资料)。

图 2 是 72 小时预报的情况,可见方案 1(图 2a)和方案 2(图 2b)的差别比较明显了。分析 500 hPa 高度场的预报,如 584 线分布,方案 1 与实测分析(图 2c)比较接近,而方案 2 则差别较大,说明其预报误差较大。分析降水预报,方案 2 预报的降水明显偏大,由于受形势预报的影响,预报雨带(如

华南一带)偏南了。而方案 1 预报的降水,如在粤东地区则明显偏小。连续一段时间的实时预报试验情况基本相同。总的来说,对强降水天气系统,方案 1 的降水预报量级常常偏小,而方案 2 的预报较好,但预报时间较长(大于 48 小时)时,方案 2 对形势预报(如 500 hPa 高度)会有较大误差。





方案 1 总体上比较稳定,故在其基础上改进是比较合适的。

### 3 新水汽平流方案及其预报效果的分析

QMSL 方法<sup>[3]</sup>主要构想是在用半拉格朗日法时要寻找上游点,而上游点一般不在网格点上,要用高阶插值求得上游点。当高阶插值大于(或小于)四周格点的局部最大、最小值时,就用其最大、最小值来作为新的预报值。

线性约束方案 LCSL 是 Pellerin 等<sup>[4]</sup>提出与 QMSL 类似的方案,这个方案不同于 QMSL,是当高阶插值大于(或小于)上游点邻近的局部最大值(最小值)时,就改用低阶线性插值作为新的预报值,对于云边缘处仍有蒸发、冷却等现象,他们提出一种方法称为非线性约束条件(NLSL)。本文参考 LCSL 方案对 QMSL 进行一些改进,改进后得到新方案,称为方案 3。方案 3 的主要思路是,

对于  $n$  时刻变量  $q$  的计算值为  $Q^n$ ,按半拉格朗日方法可求得  $n+1$  时刻的值  $Q^{n+1}$ ,即,

$$Q_k^{n+1} = Q^n |_{x(k)-a(k)} \quad (1)$$

式中下标  $k$  表示第  $k$  个格点,  $x(k)$  表示  $k$  格点的位置向量,  $a(k)$  表示从  $n$  时刻到  $n+1$  时刻质点的位移。 $x(k) - a(k)$  就是所谓的上游点位置。一般来说,上游点不在网格点上,令  $Q^n$  四周的格点值为  $Q_{k1}^n$ 、 $Q_{k2}^n$ 、 $Q_{k3}^n$ 、 $Q_{k4}^n$ , 而且,

$$Q^+ = \max(Q_{k1}^n, Q_{k2}^n, Q_{k3}^n, Q_{k4}^n) \quad (2)$$

$$Q^- = \min(Q_{k1}^n, Q_{k2}^n, Q_{k3}^n, Q_{k4}^n) \quad (3)$$

主要计算步骤为,

(1) 计算上游点位置,并确定其四周的网格点  $Q_{k1}^n$ 、 $Q_{k2}^n$ 、 $Q_{k3}^n$ 、 $Q_{k4}^n$  等。

(2) 用高阶插值求出上游点变量  $q$  的值,记为  $Q_{hk}^{n+1}$ 。

(3) 用低阶线性插值求出上游点变量  $q$  的值,记为  $Q_k^{n+1}$ 。

(4) 计算  $Q^+$  和  $Q^-$ 。

(5) 如果  $Q^- < Q_{hk}^{n+1} < Q^+$ , 则  $Q_k^{n+1} = Q_{hk}^{n+1}$ 。

(6) 如果  $Q_{hk}^{n+1} > Q^+$ , 则,

$$Q_k^{n+1} = a \cdot Q_{hk}^{n+1} + (1-a) \cdot Q^+, \quad a \text{ 为插值权重。}$$

(7) 如果  $Q_{hk}^{n+1} < Q^-$ , 则  $Q_k^{n+1} = a \cdot Q_{hk}^{n+1} + (1-a) \cdot Q^-$ ,  $a$  为插值权重。

为了比较方案 1、方案 2 和方案 3,用相同的计

算环境(预报系统情况如上所述),启用了并行试验。从 2009 年 6 月 13 日 12 时—27 日 00 时,每 12 小时间隔进行一次 72 小时预报,期间正好有 2 个台风(“莲花”和“浪卡”)生成并影响华南地区。分析每次预报,并采用华南区域中心业务评估系统评估了 24、48 小时的预报结果,总体平均情况如表 1。从表 1 可以看出,方案 3 的结果都是最好,方案 1 与方案 3 结果比较接近,而方案 2 则明显不如另外两方案,这与第 2 节中的分析是一致的。

表 1 500 hPa 高度 24、48 小时预报的评估结果

|        | 时间/h | 方案 1  | 方案 2  | 方案 3  |
|--------|------|-------|-------|-------|
| 均方根误差/ | 24   | 6.37  | 6.81  | 6.33  |
| 位势米    | 48   | 9.43  | 11.00 | 9.39  |
| 距平相关   | 24   | 0.990 | 0.990 | 0.990 |
|        | 48   | 0.982 | 0.976 | 0.983 |

图 3 是 2009 年 6 月 14 日 00 时—25 日 00 时的 48 小时 500 hPa 高度逐次预报的均方根误差评估,可见,方案 1 与方案 3 非常接近,方案 3 略有优势,特别是台风影响期间,方案 2 则明显不如方案 3 和方案 1。图 4 是 24 小时降水预报的 TS 评分,可以看出,方案 3 的小雨、中雨预报的效果最好,而方案 2 大雨预报评分稍高。48、72 小时预报(图略)的情况类似,这与前面的分析一致。总体来说,方案 3 的效果比较好。实时试验也表明方案 1 与方案 3 的预报比较稳定,较适合在业务上使用,为此下面进一步分析方案 1 和方案 3 在台风预报试验的情况。

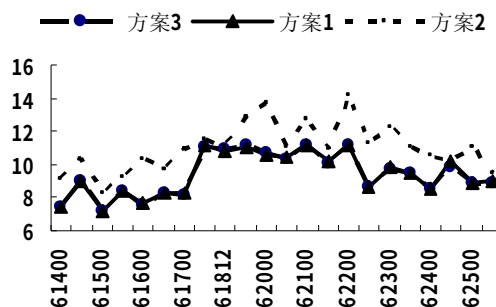


图 3 6 月 14 日 00 时—25 日 00 时的 48 小时 500 hPa 高度逐次预报的均方根误差(单位:位势米)评估

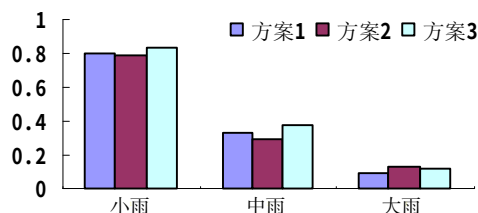


图 4 24 小时降水预报 TS 评估分析

## 4 台风预报试验

连续试验期间正好有两个台风(“莲花”和“浪卡”)由南海登陆华南地区。总体上模式路径预报的效果比较好,而强度预报大多偏弱。图5是“莲花”台风临近登陆时的一次预报情况。图5a和5b分别为方案3和方案1的850 hPa高度和相对湿度的24小时预报的对比情况。可见两方案预报台风中心的位置基本相同,与实况位置都非常接近,预报误差大约仅为20 km。方案3比方案1预报的台风更强一些,高湿区的分布更广,在水汽梯度比较大的地方,两个方案的预报结果差别比较大。总体来说,24小时内两方案的预报结果相差较小,随着预报时间的延长,两方案之间的差别变得越来越大,不仅是台风强度、水汽场不同,降水预报和台风路径也出现了较大差别。

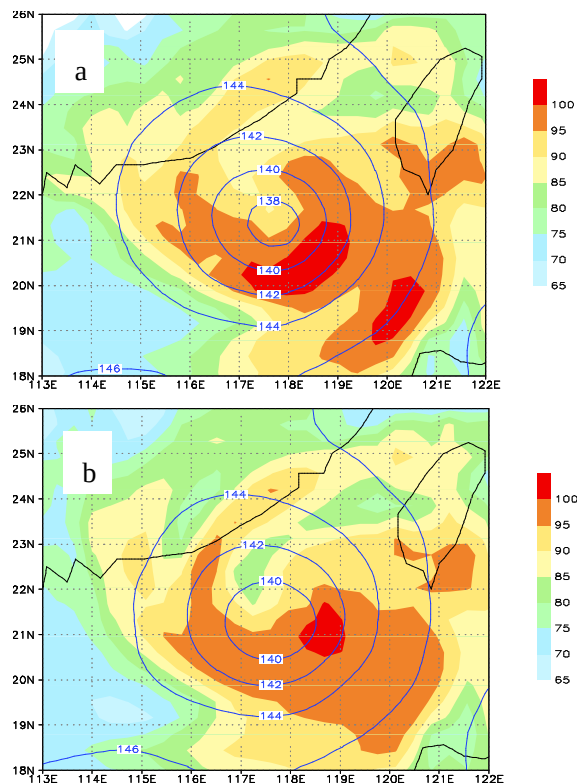


图5 “莲花”台风24小时的850 hPa高度(等值线,单位:位势十米)和相对湿度(填色,单位:%)预报2009年6月19日12时起报。a. 方案3; b. 方案1。

图6是方案3和方案1的路径预报和强度预报的对比,可见随着预报时效的增长两方案的差异逐渐加大,方案3的路径预报效果更好。对于台风强度的预报,两方案的预报比实际观测都偏弱,最大

误差达到14 hPa,方案3预报的台风强度更强些,与图5的分析一致。所以相对来说,方案3更接近实际观测。测试期间对“莲花”和“浪卡”两个台风一共进行14次预报,图7为平均误差。总体上方案3优于方案1,并且时效越长,效果越明显。

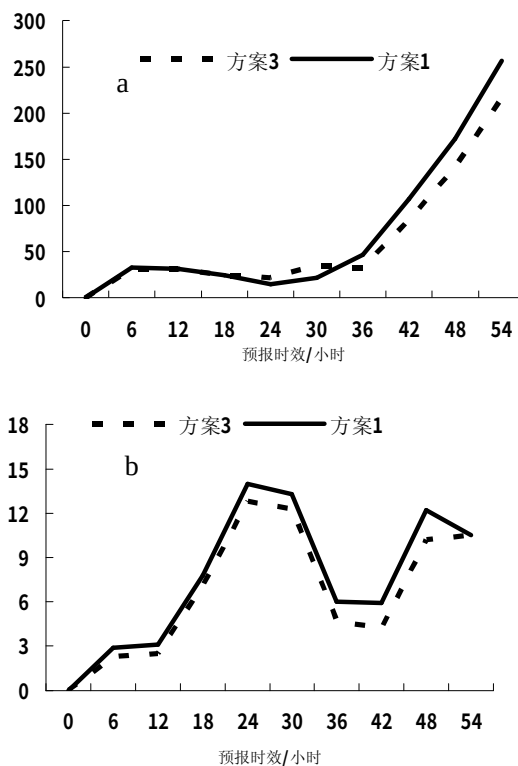


图6 “莲花”台风路径预报误差(a,单位: km)和强度预报误差(b,单位: hPa)两方案的对比2009年6月19日12时起报。

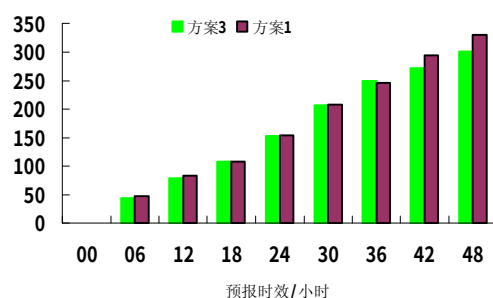


图7 平均路径预报误差(单位: km)对比

## 5 结论与讨论

采取华南区域中心业务数值系统相同的计算环境,通过一段时间的并行对比测试,初步总结了GRAPES模式中原有水汽平流方案的优缺点。根据存在的一些问题,同时参考相关的研究成果,改进GRAPES区域模式中的QMSL方案,通过连续试验

运行,表明改进的方案基本稳定可靠,对于降水预报、形势预报有一定效果,特别是对台风预报,效果更为明显。

LCSL 方案不同于 QMSL 方案是:当高阶插值大于(或小于)四周格点的局部最大、最小值时,就改用低阶插值作为新的预报值,本测试中也曾经直接使用 LCSL 方案,但效果不太理想,因此才改用本文提及的方案 3 作为新方案。通过对比测试发

现新方案的预报效果比较好。

本测试还不太全面,测试时段还有待于进一步地延长,另外方案本身也有待于进一步地完善。提高模式的业务预报水平,需要研究的问题很多,如近年来关于 GRAPES 区域模式的一些研究<sup>[9-11]</sup>,又如业务预报中台风强度的预报,各方案效果均不理想,必须从初值、动力过程和物理过程等方面进行深入的研究才能取得较好的预报效果。

## 参 考 文 献:

- [1] BERMEJO R. On the equivalence of Semi-Lagrangian and particle-in-cell finite-element methods[J]. Mon Wea Rev, 1990, 118(4): 979-987.
- [2] BERMEJO R, STANFORTH A. The conversion of semi-Lagrangian advection schemes to quasi-monotone schemes[J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(11): 2 622-2 632.
- [3] 廖洞贤. 大气数值模式的设计[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [4] PELLERIN P, LAPRISE R, I ZAWADZKI. The performance of a Semi-Lagrangian transport scheme for the advection-condensation problem[J]. Mon Wea Rev, 1995, 123(11): 3 318-3 330.
- [5] 王明欢, 沈学顺. GRAPES 模式中高精度正定保形物质平流方案的研究[J]. 气象学报, 待发表.
- [6] 苏勇, 沈学顺. 考虑相变修正的标量平流方案在 GRAPES 模式中的应用[J]. 气象学报, 待发表.
- [7] 张华, 薛纪善, 庄世宇, 等. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验[J]. 气象学报, 2004, 62(1): 31-41.
- [8] 薛纪善, 陈德辉. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[J]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] 邓华, 薛纪善, 徐海明, 等. GRAPES 中尺度模式中不同对流参数化方案模拟对流激发的研究[J]. 热带气象学报, 2008, 24(4): 327-334.
- [10] 叶成志, 欧阳里程, 李象玉, 等. 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的检验分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(4): 393-399.
- [11] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 773-777.

## COMPARISONS AND IMPROVEMENT OF WATER VAPOR ADVECTION SCHEMES OF GRAPES REGIONAL MODEL

CHEN Zi-tong<sup>1</sup>, WAN Qi-lin<sup>1</sup>, SHEN Xue-shun<sup>2</sup>, HUANG Yan-yan<sup>1</sup>,  
ZHANG Yan-xia<sup>1</sup>, ZHANG Cheng-zhong<sup>1</sup>, DING Wei-yu<sup>1</sup>

( 1. Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080, China;  
2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China )

**Abstract:** Due to the use of the semi- Lagrangian, semi-implicit scheme, the Global/Regional Assimilation PrEdiction System(GRAPES) model can increase the time step without affecting the stability, and model integration may have a higher computational efficiency and accuracy, as compared with Euler explicit time-difference methods. The semi-Lagrangian methods need interpolation algorithms to predict the value of successive time steps. For water vapor, it might be supersaturated or negative, requiring special treatment to solve this problem. In this paper, the schemes of QMSL(Quasi-monotone semi-Lagrangian) and PRM(Piecewise Rational Method) in the GRAPES model were tested and preliminary summaries of the schemes were made from the analysis of the precipitation and situation forecast. Compared to the linearly constraint semi- Lagrangian scheme, the QMSL program was improved. A continuous test run shows that the new program is stable and reliable, precipitation and situation forecasting are improved to a certain degree, and typhoon forecasting experiments also have good results.

**Key words:** regional model; semi-Lagrangian semi-implicit; water vapor advection