徐道生,陈德辉,张邦林,等. 2020. TRAMS\_RUC\_1 km 模式初始场和侧边界方案的改进研究 [J]. 大气科学, 44(3): 625-638. XU Daosheng, CHEN Dehui, ZHANG Banglin, et al. 2020. Revised Initial Field and Lateral Boundary Condition Scheme for the TRAMS\_RUC\_1 km Model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 625-638. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19183

# TRAMS\_RUC\_1 km 模式初始场和侧边界 方案的改进研究

徐道生1 陈德辉2 张邦林1 吴乃庚1

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所区域数值预报重点实验室,广州 510640 2 中国气象局国家气象中心,北京 100081

摘 要 本文从垂直分辨率、时间更新频率和要素完整性三个方面,对水平网格距为1km的华南区域短时临近预 报模式(TRAMS RUC 1 km: Tropical Region Assimilation Model for South China Sea The Rapid Update Cycle 1 km) 中的初始场和侧边界方案进行改进研究。首先选择一次华南飑线个例进行敏感性试验,研究结果表明:(1)提 高初始场和侧边界的垂直分辨率以后,模式对飑线内部中小尺度对流系统引起的强降水中心的模拟结果明显更加 接近实况,而增加中低层的垂直分辨率对预报的改进起到了主要作用。(2)将模式侧边界时间更新频率从6h 一次提高到1h一次以后,模式侧边界要素场的逐小时剧烈变化信息可以比较完整的保留下来。在使用高时间分 辨率的侧边界条件进行模拟时,粤西沿海地区的水汽辐合明显加强,这对原来模式预报飑线移速偏慢现象会有改 善作用。(3)当模式侧边界条件具有较高的时空分辨率时,进一步补充垂直速度和云微物理变量的侧边界条件 对于飑线模拟结果的影响并不明显。总的来说,提高初始场和侧边界的垂直分辨率以及增加侧边界更新的时间分 辨率,对于区域高分辨率模式对这次华南飑线预报效果的改进具有重要意义,而忽略垂直速度和云微物理量的侧 边界条件则是一种可以接受的简化。在个例研究的基础上,利用改进后的初、边界条件进行为期一个月(2019 年4月份)的批量试验,评估结果表明新方案对于逐小时降水空间分布和日变化特征的模拟均有明显改善。 关键词 初始场 侧边界 垂直分辨率 时间分辨率 华南飑线 文章编号 1006-9895(2020)03-0625-14 中图分类号 P435 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19183

# Revised Initial Field and Lateral Boundary Condition Scheme for the TRAMS\_RUC\_1 km Model

XU Daosheng<sup>1</sup>, CHEN Dehui<sup>2</sup>, ZHANG Banglin<sup>1</sup>, and WU Naigeng<sup>1</sup>

1 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, China Meteorological Administration, Guangzhou 510640

2 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract In the TRAMS\_RUC\_1 km (Tropical Region Assimilation Model for South China Sea\_The Rapid Update Cycle\_1 km), the initial field and lateral boundary condition scheme, including its vertical resolution, time update frequency, and completeness, were revised and tested with a typical squall line case. Preliminary analysis revealed the

资助项目 国家重点研究发展专项课题 2018YFC1506900,国家自然科学基金项目 41705035,广东省科技计划项目 2017A020219005

收稿日期 2019-07-15; 网络预出版日期 2019-12-20

作者简介 徐道生, 男, 1985年出生, 副研究员, 主要从事数值预报研究。E-mail: dsxu@gd121.cn

Funded by Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant 2018YFC1506900), National Natural Science Foundation of China (Grant 41705035), Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (Grant 2017A020219005)

following aspects: (1) The mesoscale character of precipitation in the squall line was better simulated after increasing the vertical resolutions of the initial field and lateral boundary, with the increase in the vertical resolutions of the middle and low layers playing the most critical role. (2) The diurnal change of lateral boundary forcing became more accurate after increasing its time update frequency. The squall line moved south after using the high update frequency of the lateral boundary condition because of the strengthened convergence of moist flux along the coastline. (3) With the high vertical resolution and high update frequency of the lateral boundary condition, lateral forcing of the vertical speed and cloud particle had no obvious effect on the forecasting of the squall line. In general, the vertical resolutions of the initial field and lateral boundary needed to be increased. The time update frequency also needed to be increased. Meanwhile, the lateral forcing of the vertical speed and cloud particle could be omitted. The effect of the new scheme was verified against observations in April 2019 (which lasted for a month). The distribution pattern and diurnal cycle of the mean hourly precipitation were significantly improved with the revised initial field and lateral boundary condition scheme.

# 1 引言

随着计算机条件的不断提高,区域高分辨率数 值预报模式的预报性能逐渐完善,由它所提供的产 品已经成为强对流天气短时临近预报业务中的重要 支撑。很多研究结果已经表明,优化区域模式的初 始场和侧边界条件对于改善它的预报性能会有重要 影响。Alpert et al. (1996) 在一次背风坡气旋生成 模拟试验中,发现侧边界和初始场之间的非线性相 互作用对于气旋加强过程的模拟结果有重要影响。 赵宗慈和罗勇(1999)发现优化区域气候模式侧边 界方案(从嵌套技术、缓冲区宽带和不同资料方面 进行优化)可以有效改进东亚夏季风的模拟结果。 黄丽萍等(2004)提出一种通过环圈模式预报来诊 断区域气候模拟中侧边界嵌套误差来源的方法,发 现侧边界输入时间间隔对于模式预报结果会有一定 的影响。魏和林等(1998)发现扩大侧边界缓冲区, 既可以避免在模式侧边界附近的要素场出现不连续 现象,同时又增加了侧边界强迫对模式大尺度环流 场的影响。庄潇然等(2016)研究了不同大尺度强 迫条件下初始场和侧边界条件的不确定性,发现利 用不同尺度扰动特征的初始扰动和侧边界扰动相互 作用来构造对流尺度集合预报成员,优于仅仅通过 扰动侧边界扰动来产生集合成员的做法。Chikhar and Gauthier(2017)发现区域模式侧边界附近大 尺度环流的快速调整过程会给模拟结果带来明显的 系统性偏差,而增加侧边界强迫的时间更新频率可 以有效解决这一问题。在空气质量模式(Pendlebury et al., 2018) 和陆面模式(Moufouma-Okia and Rowell, 2010) 中同样发现初始场和侧边界对模拟 结果有重要影响。

华南地区是强对流天气的高发区,而高分辨率 模式是预报这种局地性降水的主要手段。从2017 年开始,中国气象局广东省区域数值预报重点实验 室基于 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System)模式框架,研发和运行了水平 网格距达1km的区域高分辨率模式(后面简称 "1 km 模式"),用于提供强对流天气过程的短 时临近数值预报。大量研究结果表明,初始场的改 进对于强对流过程的短期预报具有明显的改进作用 (李少英等, 2017; 高士博等, 2016), 而关于侧边 界条件对区域模式短时临近预报的影响研究目前仍 然比较少见。由于目前 GRAPES 模式仍然不具备 双向嵌套的功能,所以区域高分辨率模式的初边值 只能通过时空分辨率较低的全球模式或者中尺度区 域模式预报场由 Downscaling 方法来生成。目前 1 km 模式的初始场和侧边界条件主要由网格距为3km 的华南区域中尺度模式(后面简称"3 km 模式") 提供。初始场和边界场由3km模式输出的17层等 压面预报场插值得到(3 km 模式的总垂直层数为 65 层), 侧边界条件每隔 6 h 更新一次。考虑到 1 km 模式范围较小,很多中小尺度对流系统经常从它的 侧边界移入模式范围内部,而其中的气象要素场的 时空变化都非常剧烈,目前使用的初、边界垂直分 辨率和时间更新频率可能不足以精确地描述侧边界 附近区域的天气变化情况,并且这种偏差会随着预 报逐渐影响到模式中心区域。另外在传统的区域模 式侧边界方案中,更新的侧边界变量仅仅包括水平 风场、温度、水汽和高度场,对于垂直速度和云物 理量则不作更新。由于1km模式是非静力模式, 需要对垂直速度进行预报,忽略垂直速度和微物理 量的侧边界信息对于侧边界附近对流系统的模拟效

果到底会有多大影响也有待研究。

本文将从多个方面对1km模式的初、边界条件进行改进研究,为改善该模式在强降水预报方面的业务能力提供技术参考。第2部分具体介绍了初、 边界方案的改进内容,第3部分是试验设计,第4 部分对使用的模式和试验设计作了简单介绍,并开 展个例试验研究,第5部分通过批量试验对技术改 进效果进行验证,最后在第6小节进行总结。

# 2 模式设置和资料说明

本文使用的 TRAMS\_RUC\_1 km 模式是基于 GRAPES 区域模式(陈德辉等, 2008)开发的版本。 该模式是一个非静力经纬网格模式,时间差分格式为 半隐式半拉格朗日方案,水平网格为 ARAKAWA-C 网格,垂直方向使用 Charney-Philips 分层设计,垂 直坐标为高度地形追随坐标。目前 3 km 模式和 1 km 模式使用的物理过程包括:WSM6 云微物理参数 化方案(Hong et al., 2004),RRTMG 长短波辐射 方案(Iacono et al., 2004),RRTMG 长短波辐射 方案(Iacono et al., 2008),MRF 边界层方案(Hong and Pan, 1996)和 SLAB 陆面方案(Grell et al., 1995)。由于模式分辨率较高,所以不再使用对流 参数化方案。模式侧边界通过 Davies 松弛边界条件 (Davies, 1976)来处理。3 km 模式和 1 km 模式 的范围如图 1 所示,两者的垂直层数均为 65 层, 模式顶高度都是 30 km。

在本文模拟试验中,3 km 模式使用 0.125°分 辨率的 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)分析场和预报场提供初始场和 侧边界条件,而1km模式的初、边界条件由3km 模式的预报场提供。降水观测资料来自中国气象局 预报业务平台 MICAPS 的逐小时降水实况。

# 3 试验设计

## 3.1 提高初始场和侧边界场的垂直分辨率

目前在华南区域高分辨率模式的实时业务预报 流程中,1km模式的初始场和侧边界由3km模式 的预报结果进行水平和垂直插值得到。从图2可以 看到,本文1km模式运行所需的初始场由3km模 式的6h预报场提供,并使用松弛逼近(Nudging) 方法对该时刻的观测资料进行快速更新同化。1 km 侧边界也由 3 km 模式的预报场提供,每次总共向 前积分18h,然后进入下一个预报循环(图2红色 线部分)。目前3km模式输出的预报场在垂直方 向仅仅包含17层等压面(而3km模式的原始垂直 层数有 65 层), 其高度分别为 1000 hPa、925 hPa、 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa, 500 hPa, 400 hPa, 300 hPa, 250 hPa, 200 hPa, 150 hPa, 100 hPa, 70 hPa、50 hPa、30 hPa、20 hPa、10 hPa。在启动 1 km 模式的初始化模块时,需要把这 17 层等压面 上的要素场重新插回到 65 层模式面上。由于 3 km 模式输出的垂直层数远远少于模式垂直层数,在将 它从 65 层模式面插值到 17 层等压面的过程中,不 可避免地会丢失很多垂直尺度较小的要素场垂直变 化预报信息,1km模式预报只能使用较低垂直分 辨率的初、边界条件。

为了研究不同垂直分辨率的初、边界条件对飑



图 1 3 km 模式和 1 km 模式的模拟范围。等值线为地形高度(单位: m)

Fig. 1 Simulation domains of the 1- and 3-km (simulation domains of the 1- and 3-km resolution) models. The contours denote the height (units: m) of the topography



大气科学

Chinese Journal of Atmospheric Sciences

图 2 TRAMS\_RUC\_1 km 模式的运行流程示意图

Fig. 2 Operational flow diagram of the TRAMS\_RUC\_1 km (Tropical Region Assimilation Model for South China Sea\_The Rapid Update Cycle\_1 km) model



#### 图 3 三种不同分辨率试验(Test-17L、Test-32L 和 Test-40L 试验) 的初、边界场垂直层分布

Fig. 3 Vertical distributions of the layers of the initial fields and lateral boundaries in three experiments with different resolutions (Test-17L, Test-32L, Test-40L experiments). Test-17L experiment means simulation test with the original 17 vertical model layers. Test-32L experiment increases vertical resolution at low and middle levels based on Test-17L experiment, and Test-40L experiment increases vertical resolution at all levels based on Test-17L experiment

线预报结果的敏感性,以及中低层和高层垂直分辨 率对预报结果影响的差异,下面设计了三组不同垂 直分层特点的初边值驱动1km模式(图3)。试验 Test-17L、Test-32L和Test-40L分别是将3km模式 输出的65层预报场(位于模式面高度上)垂直插 值到17层、32层和40层等压面上,其中,Test-17L 和目前业务流程中使用的垂直分辨率一致,Test-32L 主要是增加了中低层的垂直分辨率(在1000~600hPa 之间每隔25hPa一层;在600~300hPa每隔50hPa 一层;300hPa高度以上和Test-17L一致),而 Test-40L则是对所有高度上的垂直分辨率都做了加 密(在1000~130hPa之间每隔30hPa一层,100hPa 高度以上每隔9hPa一层)。

需要补充说明的是,由于 TRAMS 模式使用的

是地形高度追随坐标,在不同的水平分辨率下,两 者的地形高度差别将导致模式面高度出现差异,所 以如果直接用 3 km 模式面输出来驱动 1 km 模式的 时候需要在所有模式层上进行插值计算,计算量相 对较大,同时考虑到输出所有模式层高度的预报数 据将消耗大量的 CPU (central processing unit)时 间和存储空间,会降低实际业务模式的运行效率, 所以本文采用通过增加等压面垂直分辨率的办法来 开展改进研究。

## 3.2 提高侧边界条件的时间更新频率

为了测试侧边界的时间更新频率对飑线模拟结 果的影响,分别使用每6h、3h、1h更新一次的 侧边界进行对比试验(表1)。在每个更新周期 之内,根据3km模式前后两次预报之差的时间平 均算出:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = M(F) + \frac{F_{t=t_{0+\tau}} - F_{t=t_0}}{\tau}, t_0 \le t \le t_{0+\tau}, \qquad (1)$$

其中, M表示模式框架, F是预报变量,  $F_{t=t0}$ 和  $F_{t=t0+\tau}$ 分别是位于 $t_0$ 和 $t_{0+\tau}$ 时刻 3 km 模式的预报。 从公式(1)可以看出,在同一个更新周期 $\tau$ 之内, 每一步积分时侧边界的倾向值是保持不变的。随着 更新时间频率的提高( $\tau$ 变小),变量F在侧边界 附近的高频率变化信息会保留的更加完整。

**3.3 增加垂直速度和云微物理量的侧边界信息** 为了研究侧边界条件是否完备对飑线预报的影

#### 表1 侧边界时间更新频率的试验

Table 1Test of the time update frequency for lateralboundary

试验名称	试验说明
Test-6hfrq	每隔6小时更新一次侧边界条件
Test-3hfrq	每隔3小时更新一次侧边界条件
Test-1hfrq	每隔1小时更新一次侧边界条件

响,本文利用3km模式预报输出的垂直速度和云 微物理量(包括云水、云冰、雨水、雪、霰五种水 物质),为1km模式中这些变量生成相应的侧边 界信息。通过以下两组对比试验来验证侧边界条件 的完备性对高分辨率模式预报结果的影响:(1) Test-ctl:在预报过程中只更新温度、风、高度和水 汽的侧边界条件;(2)Test-ctl+wcloud:在控制试 验的基础上,进一步更新垂直速度、云微物理量的 侧边界条件。需要指出的是,在以上两个试验中, 1km模式的初始场使用了3km模式预报的垂直速 度和云微物理量。

# 4 个例试验研究

## 4.1 个例简介

2017年5月3日00时(协调世界时,下同), 华南地区位于500hPa高空槽前,高空盛行西南气 流,对流在贵州东南部地区触发,随后加强为飑线, 并从西北向东南移动,于3日夜间移入广东珠三角 地区(图4)。这种"槽前型"天气背景是前汛期 广东省发生飑线时最为典型的环流背景(广东省气 象局《广东省天气预报技术手册》编写组,2006)。 使用1km模式对本次飑线过程进行模拟试验,起 始预报时间分别为2017年5月3日06时,结束时 间为2017年5月4日00时,模拟结果基本包含了 本次飑线从发生到移入南海之间的时间段。

## 4.2 试验结果分析

4.2.1 提高初始场和侧边界垂直分辨率对预报的影响 受复杂下垫面的热力和动力强迫过程影响,低 层大气要素的垂直变化非常显著,提高初始场和侧 边界的中低层垂直分辨率,可以使得模式初、边界 条件能够保留更加细致的中小尺度天气系统垂直结 构信息。比如从图 5 可以看出,当初始场的垂直层 数从 17 层(Test-17L) 增加到 32 层(Test-32L) 以后,850 hPa 高度以下的温度场和湿度场的垂直 结构出现了比较明显的变化。比如,当垂直层数 为 32 层和 40 层时在 23.6°N 附近地面出现了一个 温度低于 298 K,水汽混合比大于 17 g kg<sup>-1</sup> 的冷湿 中心(图 5b、c 黑色三角形标注),而当垂直层数 为17 层时则无法看到这个中心(图 5a)。在850 hPa 以上的中高层这三种不同垂直分辨率的初始场差别 较小,这主要是因为 850 hPa 高度以上的天气系统 尺度相对较大,要素场随垂直高度的变化比较平滑, 所以对于垂直分辨率的变化不太敏感。同理,增加 侧边界的垂直分辨率以后,也可以为1km 模式预 报更精确的提供中低层侧边界强迫场的垂直变化信 息,从而减少模式侧边界附近由于低分辨率插值到 高分辨率过程造成的预报误差。

下面我们通过飑线过程的降水预报结果来检查 提高初、边界垂直分辨率的影响。图 6a 是第 11~ 12 小时的实测一小时累积降水,可以看到在飑线 内部存在三个暴雨中心,分别出现在广西西南部, 广西东北部和湖南东南部与江西交界处。从 Test-17L 试验的降水预报(图 6b)来看,在广西境内 的那一段飑线均出现了 15 mm 以上的降水,雨带 呈线状分布。而增加初、边界场的垂直分辨率以后 (图 6c、d),模式能够比较合理地模拟出广西境



图 4 2017 年 5 月 3 日 23 时(协调世界时,下同)广东省天气雷达回波(单位: dBZ)拼图 Fig. 4 Radar (units: dBZ) mosaic of Guangdong Province at 2300 UTC on 3 May 2017



图 5 2017 年 5 月 3 日 06 时不同垂直分辨率下的初始温度场(等值线,单位: K)和初始水汽混合比(阴影,单位: g kg<sup>-1</sup>)沿着 115.4°E 高度—纬度剖面: (a) Test-17L 试验; (b) Test-32L 试验; (c) Test-40L 试验

Fig. 5 Height–latitude cross sections of the initial temperature field (contours, units: K) and initial mixing ratio of water vapour (shadings, units:  $g kg^{-1}$ ) at 115.4°E under different vertical resolutions at 0600 UTC on 3 May 2017: (a) Test-17L experiment; (b) Test-32L experiment; (c) Test-40L experiment

内的两个暴雨中心,位置大体和实况相符合。对 比Test-32L和Test-40L的模拟结果可以(图6c、d) 看出,两者之间的差别并不明显,说明增加中低层 的垂直分辨率对降水预报的改进起到了主要作用, 而增加中高层的要素场的垂直分辨率的对飑线降水 预报结果影响不大。过去的一些模拟试验结果(徐 道生等,2015,2016)也同样表明:华南地区的降水 预报结果对于 850 hPa 高度以下的初始风场和初始 水汽场非常敏感,其原因可能与热带地区对流系统 主要由低层热力场和动力场控制有关。

4.2.2 提高侧边界时间更新频率对预报的影响

从 2.2 节可知,侧边界倾向是根据前后两次侧 边界条件之差的时间平均计算出来的。如果时间更 新周期取得较长,侧边界场的很多高频时间变化信 息就会被过滤掉。以风场的经向风 v 分量为例 (图 7),在第 10~11 小时内它的侧边界倾向从  $0.06 \,\mathrm{m\,s}^{-2}$  迅速下降到  $0.01 \,\mathrm{m\,s}^{-2}$ ,如果每  $3 \,\mathrm{h}$  更新一次侧边界,那么在这段时间内倾向保持为  $0.03 \,\mathrm{m\,s}^{-2}$  左右,当更新周期为  $6 \,\mathrm{h}$  时,倾向保持在  $0.04 \,\mathrm{m\,s}^{-2}$  不变。

当飑线从1km模式区域外侧移入时,必须依赖侧边界条件来为它提供要素场的变化信息。飑线内部的中小尺度对流系统生命期较短,而且其内部 气象要素随时间的变化非常剧烈。提高侧边界的更 新频率,可以更加准确的描述模式侧边界附近对流 系统的演变特征,从而进一步改善飑线过程的降水 预报结果。

在 Test-32L 的基础上,把侧边界的时间更新 频率分别设置为6h(Test-6hfrq)、3h(Test-3hfrq) 和1h(Test-1hfrq),考察不同侧边界时间分辨率



图 6 2017 年 5 月 3 日 17 时至 18 时累积降水量(单位: mm)比较: (a)实况; (b) Test-17L 试验; (c) Test-32L 试验; (d) Test-40L 试验

Fig. 6 1-h (from 1700 UTC to 1800 UTC) accumulated precipitation (units: mm) on 3 May 2017 from (a) observations, (b) Test-17L experiment, (c) Test-32L experiment, (d) Test-40L experiment



图 7 不同更新频率下风场的经向风v分量侧边界倾向(单位:  $m s^{-2}$ )的时间演变



对飑线降水预报结果的敏感性。从第 17~18 小时 的 1 h 降水观测(图 8a)来看,飑线雨带呈西南— 东北走向分布在粤西海岸线附近。当 6 h 更新一次 侧边界时(图 8b),预报的降水带位置系统性的 偏北大约 60 km 左右。将侧边界更新周期改为 3 h 以后,模式预报的飑线西半段降水向南移到海岸线 附近,但是在 111°E 以东的雨带位置仍然明显偏北 (图 8c)。进一步将侧边界时间更新频率提高到 1 h 一次以后,111°E 到 113°E 之间的雨带也向南移到 海岸线附近,更为符合实际观测结果。

从粤西地区的 850 hPa 水汽通量(图 9)可以 看出,第 17~18 小时的降水主要由来源于广西东 侧西风和雷州半岛东侧东南风的辐合上升气流引起。 当时间更新频率为 6 h 一次时,粤西地区的水汽通 量只出现了一些零散的小块中心(图 9a)。当更



图 8 2017 年 5 月 3 日 23 时至 24 时累积降水量(单位: mm)比较: (a)实况; (b) Test-6hfrq 试验; (c) Test-3hfrq 试验; (d) Test-1hfrq 试验

Fig. 8 1-h (from 2300 UTC to 2400 UTC) accumulated precipitation (units: mm) on 3 May 2017 from (a) observations, (b) Test-6hfrq experiment, (c) Test-3hfrq experiment, (d) Test-1hfrq experiment. Test-6hfrq, Test-3hfrq, Test-1hfrq experiments represent simulation tests with boundary condition updated every 1 h, 3 h, and 6 h, respectively



图 9 2017 年 5 月 3 日 23 时粤西沿海地区的 850 hPa 水汽通量(矢量,单位: kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>): (a) Test-6hfrq 试验; (b) Test-3hfrq 试验; (c) Test-1hfrq 试验。阴影表示水汽通量的大小

Fig. 9 850-hPa water vapor fluxes (vectors, units: kg  $m^{-1} s^{-1}$ ) over the western part of Guangdong Province at 2300 UTC on 3 May 2017: (a) Test-6hfrq experiment; (b) Test-3hfrq experiment; (c) Test-1hfrq experiment. The shaded areas denote the value of water vapor fluxes

新周期为3h时,在112°E附近水汽通量增加到 0.2gm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>左右,同时在111°E附近(阳江地区) 的水汽通量辐合也有所加强(图9b)。将侧边界 更新频率提高到1h一次后,以上两个地区的水汽 通量得到进一步加强(图9c),而且112°E附近 的水汽通量辐合中心明显向南移动。总之,随着侧 边界时间更新频率的提高,1km模式预报结果中 粤西沿海地区的水汽通量明显加强,并且辐合区更 加靠近位于其南侧的海岸线,这是导致Test-1hfrq 试验预报的飑线雨带位置比Test-6hfrq 试验偏南的 主要原因。

从以上试验结果可以看到,提高侧边界时间更 新频率对于改善1km模式对飑线预报移速偏慢的 现象有较为明显的改进。

## 4.2.3 增加垂直速度和云物理量侧边界条件对预报 的影响

在初始场和侧边界垂直分辨率取为 32 层(与 Test-32L 一致)、侧边界时间更新频率为 1 h 一次 的基础上,进一步研究模式侧边界的完整性对飑线 预报的影响。从第 18 小时预报场(参考图 8d)的 侧边界附近(沿着 108°E 作垂直剖面)的对流系统 模拟结果来看,两者的差异比较明显(图 10a、b): 在对流区 Test-ctl 试验预报的低层水物质含量(云 水加雨水)达到 5 g kg<sup>-1</sup> 左右,最大上升速度达到 10 m s<sup>-1</sup> 以上,而 Test-wcloud 试验预报的水物质 含量仅仅达到 2.5 g kg<sup>-1</sup>,而且上升速度只有 1 m s<sup>-1</sup>。 对距离侧边界有一定距离(沿着 110°E 作垂直剖面) 的飑线,侧边界条件是否完备对于模拟结果的影响



图 10 2017 年 5 月 3 日 24 时的垂直速度(黑色线,单位: m s<sup>-1</sup>)和云水混合比加雨水混合比(阴影,单位: g kg<sup>-1</sup>)的高度—纬度垂直剖面: (a) Test-ctl 试验,沿着 108°E 作剖面; (b) Test-wcloud 试验,沿着 108°E 作剖面; (c) Test-ctl 试验,沿着 110°E 作剖面; (d) Test-wcloud,沿着 110°E 作剖面

Fig. 10 Height–latitude cross sections of vertical speed (black lines, units:  $m s^{-1}$ ) and mixing ratio of cloud water and rain water (shadings, units:  $g kg^{-1}$ ) at 2400 UTC 3 May 2017: (a) Test-ctl experiment (ignoring the boundary condition of vertical speed and cloud particle), along 108°E; (b) Test-wcloud experiment (including the boundary condition of vertical speed and cloud particle), along 108°E; (c) Test-ctl experiment, along 110°E; (d) Test-wcloud experiment, along 110°E

并不明显(图 10c、d):两者的云水雨水总量均为3gkg<sup>-1</sup>左右,最大上升速度也都在5ms<sup>-1</sup>附近,而且飑线的位置也一致地位于21.5°N。

综上所述,垂直速度和云微物理量的侧边界信息对于模式边界附近的对流系统模拟结果影响非常明显,但是对于距离侧边界较远处的飑线预报影响不大。其原因一方面可能是因为垂直速度和云微物理量的变化局地性较强,而且本次试验的模拟时间又比较短,所以它对于较远处飑线系统的影响不是很大,另一方面由于使用了较高时空分辨率的侧边界条件以后,Test-ctl和Test-wcloud两个试验中大尺度流场的变化已经基本一致,从而也就基本决定了飑线的移动和强度不会出现明显的差异。因此,在高分辨率模式短时临近模式预报中,为了简化模

式的计算流程而省略垂直速度和云微物理量的侧边 界条件,对于本次飑线预报结果不会造成明显的 影响。

## 5 批量试验分析

为了验证本文改进侧边界方案对 1 km 模式预 报效果的影响,选取 2019 年 4 月 1~29 日期间的 逐日降水预报进行批量试验。每日 00 时起报,预 报试验分为两组,一组使用垂直分辨率为 17 层, 时间间隔为 6 h 的初、边界条件(简称 Test-17L6h), 另一组使用垂直分辨率为 32 层,时间间隔为 1 h 的初、边界条件(简称 Test-32L1h)。批量试验中 的模式设置与第 3 节个例试验完全一致。

首先对逐小时降水的空间分布进行比较(图11):



图 11 2019 年 4 月份平均小时降水量(单位: mm): 每天(a) 11~12 时、(d) 17~18 时、(g) 23~24 时的实测降水; (b、e、h) 对应时刻 Test-17L6h 试验预报的降水; (c、f、i) 对应时刻 Test-32L1h 试验预报的降水

Fig. 11 Mean hourly precipitation (units: mm) in April 2019: Observed precipitation during (a) 1100–1200 UTC, (d) 1700–1800 UTC, (g) 2300–2400 UTC; (b, e, h) corresponding simulated precipitation in Test-17L6h experiment (Initial field with 17 vertical layers and boundary condition updated every 6 hours); (c, f, i) corresponding simulated precipitation in Test-32L1h experiment (Initial field with 32 vertical layers and boundary condition updated every 1 hour)

Test-17L6h 试验的第 5~6 小时降水预报空报现象 非常严重,实况降水中心位置主要分布在粤北地区 (图 11a),而模式在湖南、江西南部地区的预报 出现了大面积的虚假降水,而且其强度已经接近粤 北地区降水的强度(图 11b)。对初、边界进行改 进以后,湖南和江西南部的空报降水平均强度从 1.2 mm 左右减弱到了 0.6 mm 左右,从而使得粤北 地区的降水中心变得更加显著(图 11c)。对于第 11~12小时的降水, Test-17L6h 试验漏报了位于 湖南、广西和广东三省交界处的降水中心(图 9e), 而 Test-32L1h 试验则能够比较正确的预报出这 一块降水中心(图 11f)。对于第 17~18 小时的 降水预报,改进初、边界方案的影响主要体现在对 强度偏强现象的改进方面,在广西东北部地区 Test-17L6h 试验出现了大面积的 2 mm 以上降水预报 (图 11h),而 Test-32L1h 试验的降水强度预报则 为 1.2~1.8 mm 左右 (图 11i), 与实际观测更为 接近(图 11g)。总的来说,改进初、边界方案以 后1km 模式的逐小时降水预报的空间分布和降水 强度都有了一定程度的改进。

进一步对降水的时间变化进行检验,其中使用 的预报降水数据是由模式预报插值到观测站点以后 得到的。图 12 是 2019 年 4 月份的逐日每小时降水 演变,可以看出 Test-17L6h 试验未能报出 15 日 18~ 24 时的 1 mm 以上降水过程(图 12b),而 Test-32L1h 试验的预报和实况比较一致(图 12c)。在 25 日 15~24 时期间实测降水一直维持在 0.6 mm 左右, 而 Test-17L6h 试验的预报只能达到 0.2 mm,Test-32L1h 试验的预报达到了 0.4 mm 左右,与实况更 为接近。从月平均的逐小时降水日变化来看(图 13), 在 12~18 时期间实况降水强度最弱,而且稳定保 持在 0.22 mm h<sup>-1</sup>左右。在这段时间内,Test-17L6h 试验预报的降水强度从 0.53 mm h<sup>-1</sup>下降到 了 0.36 mm h<sup>-1</sup>, Test-32L1h 试验的降水强度从 0.47 mm h<sup>-1</sup>下降到了 0.41 mm h<sup>-1</sup>,可以看出新的 初、边界方案有助于改进 1 km 模式对于降水日变 化特征的模拟。

对 2019 年 4 月份的逐小时降水预报进行评估, 发现 TS 评分有较明显的提高(图 14a),而从 BS 评分来看,两种方案都存在比较明显的降水偏强现 象(图 14b),改进初边值方案以后前期的 BS 评 分有所减小,而后期 BS 评分变大,这与图 13 中 降水日变化曲线的比较结果是一致的。



图 12 2019 年 4 月平均小时降水量(单位: mm)预报和实况的逐日演变:(a)观测;(b) Test-17L6h 试验;(c) Test-32L1h 试验。横 坐标表示预报的时间,纵坐标表示每次预报的日期

Fig. 12 Day-to-day evolutions of the mean hourly precipitation (units: mm) in April 2019: (a) Observations; (b) Test-17L6h experiment; (c) Test-32L1h experiment. *x*-axis denotes the time of forecast, *y*-axis denotes the date of each forecast



3期

No. 3

图 13 观测和模式预报的 2019 年 4 月份平均小时降水量(单位: mm h<sup>-1</sup>)的日变化



Fig. 13 Diurnal cycles of the observed and simulated mean hourly precipitation (units:  $mm h^{-1}$ ) in April 2019

图 14 Test-17L6h 试验、Test-32L1h 试验的 1 km 模式预报的 2019年4月份逐小时降水量(单位: mm)(对1小时降水量大 于1 mm 的站点进行评估)的(a) TS 评分、(b) BS 评分

Fig. 14 (a) TS (Threat score), (b) BS (Bias score) of hourly precipitation (units: mm, evaluations only for the stations with hourly precipitation exceeding 1 mm) simulated using the 1 km model with Test-17L6h experiment, Test-32L1h experiment in April 2019

# 6 总结

本文尝试对 TRAMS\_RUC\_1 km 模式的初、边 界方案进行优化,并通过一次飑线个例模拟和一个 月的华南前汛期降水的预报对改进方案进行效果测 试,主要得到以下结论:

(1)提高初始场和侧边界的垂直分辨率以后, 模式对飑线降水中尺度特征更加接近实况,其中增 加中低层的垂直分辨率对于这种改进起到了主要作用。

(2)将侧边界时间更新频率从6h一次调整到 1h一次,侧边界强迫场可以更加精确的反映日变 化信息,并且进一步影响水汽输送过程的模拟,最 终改善了1km模式对飑线雨带移速偏慢的现象。

(3)在使用较高时空分辨率的侧边界条件下, 增加垂直速度和云微物理变量的侧边界条件只是对 于边界附近的对流系统影响很明显,对于距离边界 一定距离的飑线模拟结果影响很小。

(4)从批量测试结果来看,改进后的初、边 界方案对于逐小时降水的空间分布和日变化特征都 有一定程度的改进。

总的来说,提高初、边界的垂直分辨率和侧边 界时间分辨率对于改善1km 模式飑线模拟效果具 有重要作用,而忽略垂直速度和云微物理变量的侧 边界强迫是可以接受的。从本文的模拟结果可以看 到,1km 模式仍然存在比较严重的空报现象以及 降水预报强度偏强的问题,这是有待将来进一步研 究和改进方向。

## 参考文献(References)

- Alpert P, Krichak S O, Krishnamurti T N, et al. 1996. The relative roles of lateral boundaries, initial conditions, and topography in mesoscale simulations of lee cyclogenesis [J]. J. Appl. Meteor., 35(7): 1091–1099. doi:10.1175/1520-0450(1996)035<1091:TRROLB>2.0. CO;2
- 陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度 统一数值预报模式总体设计研究 [J]. 科学通报, 53(22): 3433-3445. Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al. 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): General scientific design [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 53(22): 3433-3445. doi:10.1007/ s11434-008-0494-z
- Chikhar K, Gauthier P. 2017. Impact of lateral boundary conditions on regional analyses [J]. Mon. Wea. Rev., 145(4): 1361–1379. doi:10.1175/ MWR-D-16-0245.1
- Davies H C. 1976. A lateral boundary formulation for multi-level prediction models [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102(432): 405–418. doi:10.1002/qj.49710243210

- 高士博, 闵锦忠, 黄丹莲. 2016. EnSRF 雷达资料同化在一次飑线过 程中的应用研究 [J]. 大气科学, 40(6): 1127–1142. Gao S B, Min J Z, Huang D L. The simulation of a squall line with Doppler radar data assimilation using the EnSRF method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(6): 1127–1142. doi:10.3878/ j.issn.1006-9895.1601.15216
- Grell G A, Dudhia J, Stauffer D. 1995. A description of the fifthgeneration Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) [R]. No. NCAR/TN-398+STR. doi: 10.5065/D60Z716B
- 广东省气象局《广东省天气预报技术手册》编写组. 2006. 广东省 天气预报技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 216–218. Compilation Team of "Technical Manual of Weather Forecast in Guangdong Province" Guangdong Meteorological Bureau. 2006. Technical Guidance on Weather Forecasting in Guangdong Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 216–218.
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. Mon. Wea. Rev., 124(10): 2322–2339. doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0. CO;2
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. Mon. Wea. Rev., 132(1): 103–120. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. J. Geophys. Res., 113: D13103. doi:10.1029/ 2008JD009944
- 黄丽萍, 颜宏, 赵俊英. 2014. 区域气候模拟中侧边界嵌套误差的研 究 [J]. 应用气象学报, 15(2): 152-161. Huang L P, Yan H, Zhao J Y. 2014. Analysis of lateral boundary nesting errors in regional climate modeling [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 15(2): 152-161. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2004.02.003
- 李少英, 张述文, 毛伏平, 等. 2017. 采用不同样本集合同化地面观测 对一次飑线过程的影响 [J]. 大气科学, 41(2): 236-250. Li S Y, Zhang S W, Mao F P, et al. 2017. Influence of assimilating surface observations on a squall line with different ensembles [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(2): 236-250. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15298

Moufouma-Okia W, Rowell D P. 2010. Impact of soil moisture

initialisation and lateral boundary conditions on regional climate model simulations of the West African monsoon [J]. Climate Dyn., 35(1): 213–229. doi:10.1007/s00382-009-0638-0

- Pendlebury D, Gravel S, Moran M D, et al. 2018. Impact of chemical lateral boundary conditions in a regional air quality forecast model on surface ozone predictions during stratospheric intrusions [J]. Atmos. Environ., 174: 148–170. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.10.052
- 魏和林, 符淙斌, 王纬强. 1998. 区域气候模式侧边界的处理对东亚 夏季风降水模拟的影响 [J]. 大气科学, 22(5): 779-790. Wei H L, Fu C B, Wang W C. 1998. The effect of lateral boundary treatment of regional climate model on the East Asian summer monsoon rainfall simulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22(5): 779-790. doi:10.3878/ j.issn.1006-9895.1998.05.13
- 徐道生, 陈子通, 谢东东, 等. 2015. 地形效应引起的局地扰动对华南 降水预报的影响研究 [J]. 热带气象学报, 31(2): 173-181. Xu D S, Chen Z T, Xie D D, et al. 2015. Influence of local perturbation induced by orographic effect on forecast of precipitation in South China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 31(2): 173-181. doi:10.16032/ j.issn.1004-4965.2015.02.004
- 徐道生, 张艳霞, 陈子通, 等. 2016. 不同水汽分析场对一次华南前汛 期暴雨预报的影响分析 [J]. 热带气象学报, 32(2): 155-162. Xu D S, Zhang Y X, Chen Z T, et al. 2016. Influence of different moisture analysis field to the forecast of precipitation during the preflood season in South China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 32(2): 155-162. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.02.002
- 赵宗慈, 罗勇. 1999. 区域气候模式在东亚地区的应用研究——垂直 分辨率与侧边界对夏季季风降水影响研究 [J]. 大气科学, 23(5): 522-532. Zhao Z C, Luo Y. 1999. Investigations of application for the regional climate model over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23(5): 522-532. doi:10.3878/ j.issn.1006-9895.1999.05.02
- 庄潇然, 闵锦忠, 蔡沅辰, 等. 2016. 不同大尺度强迫条件下考虑初始 场与侧边界条件不确定性的对流尺度集合预报试验 [J]. 气象学 报, 74(2): 244-258. Zhuang X R, Min J Z, Cai Y C, et al. 2016. Convective-scale ensemble prediction experiments under different large-scale forcing with consideration of uncertainties in initial and lateral boundary condition [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74(2): 244-258. doi:10.11676/qxxb2016.019