

钟有亮,李勋,张诚忠,等. NUDGING 方法同化雷达反射率因子个例试验研究[J]. 气象研究与应用,2021,42(3):76–82.

Zhong Youliang, Li Xun, Zhang Chengzhong, et al. A case study of assimilated radar reflectivity factor by NUDGING method [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(3): 76–82.

NUDGING 方法同化雷达反射率因子个例试验研究

钟有亮¹, 李 勋¹, 张诚忠², 陈法敬³

(1.海南省气象台, 海口 570203; 2.中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080;

3.国家数值预报中心, 北京 100081)

摘要:利用 ECMEF 全球高分辨率模式资料,采用松弛逼近方法(Nudging)同化多普勒雷达反射率因子,通过在华南区域 GRAPES_3km 模式中对海南岛降水过程个例进行数值模拟,分析不同 Nudging 方法对模式预报效果的影响。结果表明:(1)采用 Nudging 同化方法可使背景场和观测反演的资料相协调,缩短模式热启动时间,可增加开始时段降水量;(2)同化雷达反射率因子能够提高海南岛 0~6h 逐时降水评分,模拟值更接近实况观测;(3)同化后,华南区域 GRAPES_3km 模式能够捕捉到更多的中小尺度信息,可改善海南岛 24h 强降水的量级;(4)在初始场 Nudging 订正云水、雨水、水汽场等,其水凝物分布合理,降水预报效果最佳。

关键词: 雷达回波;松弛逼近方法(Nudging);云微物理;GRAPES_3km 模式

中图分类号: P456

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.3.13

OSID:



引言

随着高分辨率数值模式技术的迅速发展,数值预报成为预报员及研发人员制作定量化、标准化及客观化天气预报的一种重要手段。常规观测资料因受时间和空间分辨率低限制,无法为高分辨率数值模式提供更多的中小尺度信息;另外模式初始场对云水、雨水及云冰等微物理量信息描述并不完善,即“spin-up”的原因^[1-5],使得模式初期出现降水滞后等现象,导致模式有一定程度预报偏差。多普勒天气雷达资料应用^[6-10],可改善常规观测资料时空分辨率受限的问题,对初始场改善具有重要意义。

近年来,多普勒雷达资料应用已成为同化系统研究的热点方向。施丽娟等^[11]在 2009 年将多普勒雷达资料引入 ARPS-3DVar 同化系统中,发现同化后各物理量空间分布结构有明显中尺度特征;朱丽娟^[12]基于 ARPS 模式云分析系统,研究发现 0~12h 降水均有正技巧,可满足业务上短时临近预报需求;彭菊

香^[13]基于 STMAS 同化雷达资料,直接调整模式湿度,强迫雷达回波高于阈值区饱和,使得初始场水汽更加充沛,对改进暴雨预报能力尤为突出;张兰等^[14]利用 Nudging 同化雷达观测反演的风场和水物质,研究调整初始风场和调整水物质场,结果表明 Nudging 同化水物质对于短临降水预报影响最显著。但基于华南区域 GRAPES_3km 模式中的云分析系统,对海南岛短时临近预报研究较少。为提升 GRAPES_3km 模式对海南岛临近预报能力,本文基于华南区域 GRAPES_3km 模式的云分析系统,研究松弛逼近(Nudging)同化方法对云微物理量信息同化的应用,通过对海南岛降水过程,分别进行不加 Nudging 同化雷达反射率因子、以及在初始场 Nudging 订正云水(qc)、雨水(qr)和 Nudging 订正云水(qc)、雨水(qr)及比湿(qv)的数值试验。讨论云分析对海南岛天气过程的预报性能,以期能在短临降水中提高模式的预报技巧。

收稿日期: 2021-06-02

基金项目: 海南省气象局科研项目(hnqxSJ202110)、国家自然科学基金项目(41365005)

作者简介: 钟有亮(1990—),男,硕士,助理工程师,主要从事数值天气预报研究。E-mail:459361483@qq.com

1 资料与方法

1.1 资料

采用华南区域范围的 GRAPES_3km 模式^[15-16], 模式背景场和侧边界条件由 ECMEF 全球高分辨率模式的分析场提供, 每 6h 提供一次, 其分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。降水观测数据采用国家气象信息中心的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合格点分辨资料, 分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ^[17]。用于分析中尺度系统及模式初始化的观测资料主要为雷达三维反射率拼图, 由华南地区提供 33 部 S 波段多普勒雷达组成, 其水平分辨率为 3km, 垂直高度层数为 18 层, 层顶最高达 16km; 其中海南岛东方多普勒雷达第一次引入华南区域模式中。

1.2 试验设计

基于华南区域 GRAPES_3km 预报模式系统, 时间平流采用半隐式半拉格朗日方案, 水平方向 Arakawa-C 网格, 垂直方向取 Charney-Philips 分层设置, 研究区域包括中国华南地区 ($16^{\circ}\text{N} \sim 31^{\circ}\text{N}$, $96^{\circ}\text{E} \sim 123^{\circ}\text{E}$), 水平分辨率为 $0.03^{\circ} \times 0.03^{\circ}$, 垂直层为 55 层, 模式顶层可至 28km 高度。模式时间积分步长选取 40s, 微物理过程采用 WSM6 类方案(水汽、雨、雪、云水、云冰及霰), 近地面层方案为莫宁-奥布霍夫方案, 边界层参数化方案 MRF 方案, 陆面过程为 Noah 方案, 短波辐射过程为 Dudhia 方案, 长波辐射过程为 RRTM。本文设置 3 组对比试验: (1) 控制试验 (CTRL), 不加 Nudging 同化雷达反射率因子, 直接使用 ECMWF 全球分析场做初始场; (2) 同化试验 1, 模式初始场通过 Nudging 方法订正云水和雨水; (3) 同化试验 2, 模式初始场通过 Nudging 方法订正云水、雨水及比湿。同化时段开始为 7 月 22 日 00 时 00 分, 模式积分 24h。

1.3 Nudging 初始化方法

Nudging 技术是基于动力学的同化方法。为了使多普勒天气雷达资料的信息能融入预报模式, 并且与之在动力、热力结构上相协调, 初始场同化方法采用了 Nudging 技术。Nudging 方法就是在模式积分的同化时段 δt 内, 在预报方程中增加一个线性强迫项, 该项与模式预报和实况值之差成正比, 其作用是使模式预报逐渐向观测逼近, 公式如下:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \sum F_i + a(w_0 - w) \quad (1)$$

其中: W 为模式预报变量, $\sum F_i$ 代表模式中的所

有物理过程变率, $\alpha > 0$, 为张弛逼近系数, W_0 为对应时刻的观测值。将方程(1)进行时间积分, 并采用准隐式分步计算形成离散式, 如:

$$W' = W_m' + a'(W_0' - W_m') \quad (2)$$

其中 a 为时间步长 dt 与同化时段 δt 的比值, W_m' 为模式积分第 t 步的预报值, W_0' 为模式积分第 t 步的反演值(或观测值), W' 为 Nudging 订正后的第 t 步的预报值。

2 降水特征及环流形势

2018 年 7 月 22 日 00 时—23 日 00 时 (UTC, 下同), 受第 9 号热带低压影响, 海南岛西南半部地区出现暴雨至大暴雨, 局地特大暴雨 (300mm 以上), 降水呈西南多东北少分布特征。据统计全岛共有 198 个乡镇(区)雨量超过 50mm, 64 个乡镇(区)雨量超过 100mm, 其中三亚有 3 个区雨量超过 200mm (天涯区加跌村 209.7mm、扎南村 206.7mm 及育才生态区南岛农场红新村 213mm); 降水中心位于东方市板桥镇中沙中学站, 最大降水量达 397.4mm。另外南部和东部沿海陆地普遍出现 7—9 级阵风, 最大阵风为万宁市万城镇 11 级 ($28.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。受热带低压和 850hPa 南海偏南气流影响, 在这种不稳定形势配置下, 海南岛附近区域为强上升运动区; 同时急流为本次暴雨过程提供良好的水汽条件, 低压环流使暖湿气流辐合, 触发不稳定能量释放, 造成此次暴雨的发生。

3 模拟初始场的对比分析

7 月 22 日 00 时 3km 高度上的雷达回波、由雷达回波反演的雨水及控制试验和同化后水汽场分布如(图 1)所示; 雨水(图 1b)与雷达回波(图 1a)及实况观测的降水(图 2a)分布情况十分相似, 主要位于海南岛南半部地区, 可见模式中雨水的计算是相对合理的, 也基本能与初始场雷达回波相对应, 其中强度为 35~40dBz 回波对应雨水含量超过 $0.6\text{g}/\text{kg}$ 。另外, 从控制试验(图 1c)和同化后(图 1d)水汽场对比分析, 通过 Nudging 对初始场湿度的调整, 海南岛地区的水汽含量明显增加, 形成的水汽大值分布更接近于降水落区, 同时与雷达回波和雨水分布形态较一致, 使中尺度信息得以体现。说明 GRAPES_3km 模式的云分析订正, 可以有效地调整初始水汽场分布, 此信息可改善开始时段降水量预报, 能够有效缩短模式的“spin-up”时间, 预报效果显著。

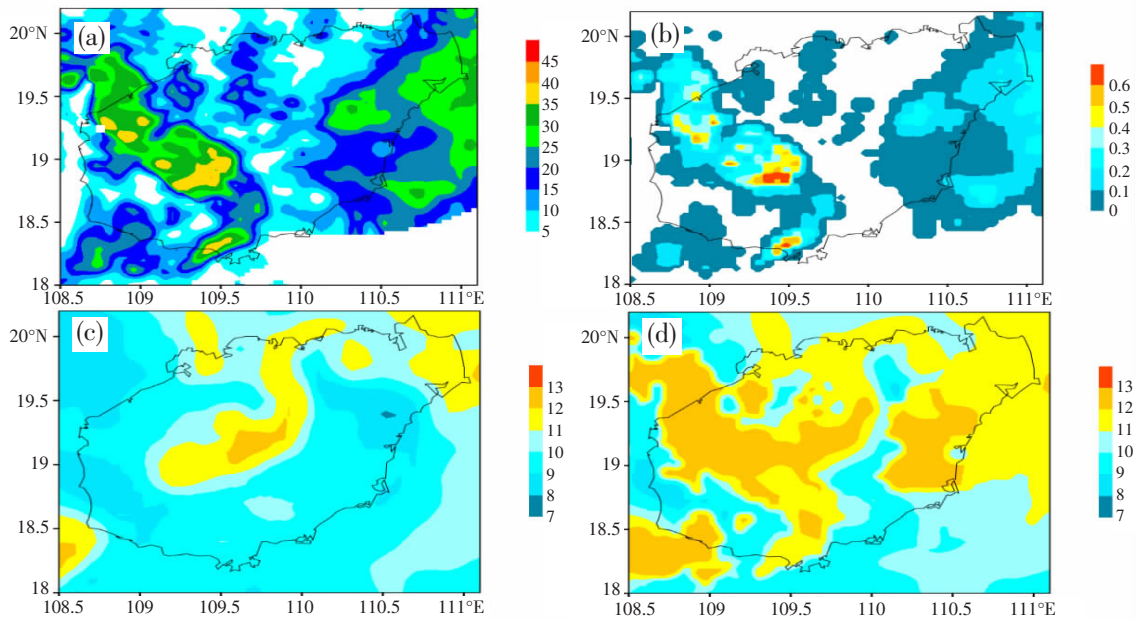


图 1 3km 高度的雷达回波 (a, 单位: dBZ)、雨水 (b, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、控制试验 (c)、同化后水汽场 (d, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

4 模拟结果的对比分析

4.1 对临近降水模拟的改进

图 2 是 0~1h 实况累计降水和试验模拟值。由于第 1 小时模式仍然处于“spin-up”阶段, 控制试验

在西部和东南部地区出现不同程度的漏报, 降水明显偏少 (图 2b); 试验 1 通过 Nudging 调整雨水和云水后, 可改进该地区的漏报现象 (图 2c), 但降水模拟仍然存在一定量级的虚报现象, 如海南岛北部局地出现 15mm 以上量级的降水; 试验 2 通过 Nudging

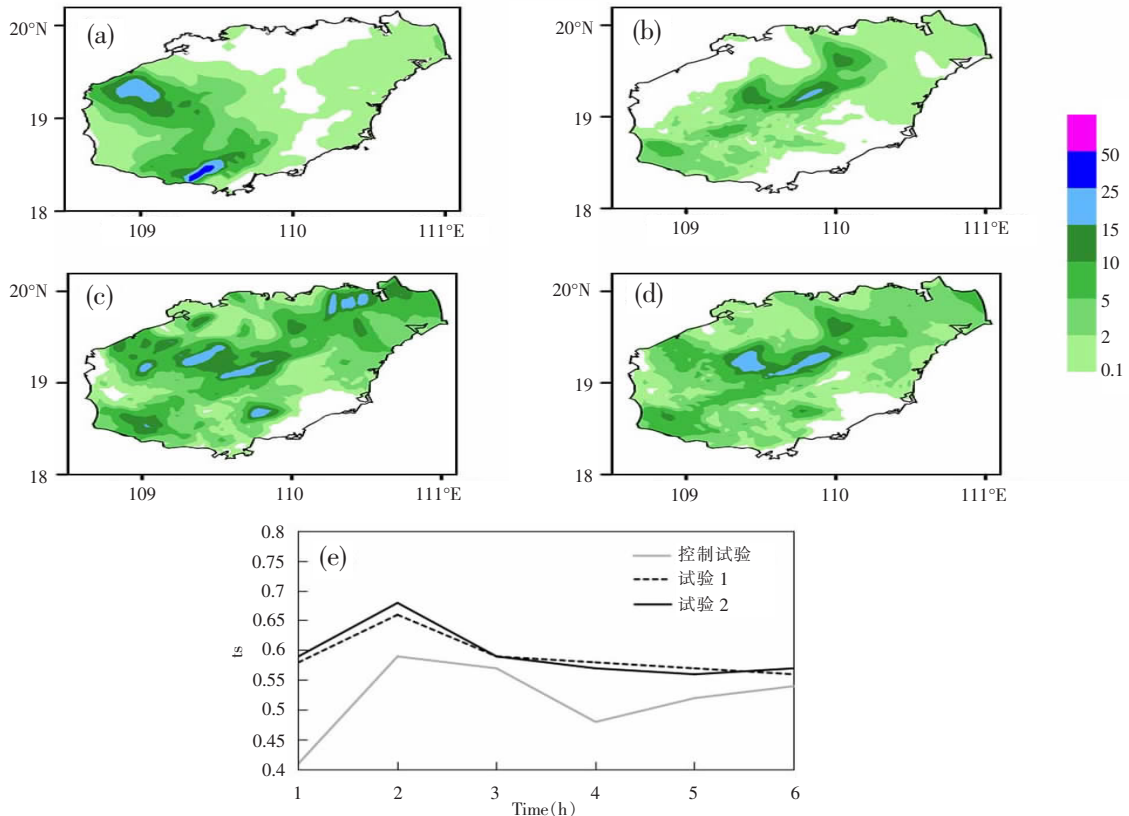


图 2 第 1h 累计降水、模拟值、逐小时 TS 评分

(a) 观测; (b) 控制试验; (c) 试验 1; (d) 试验 2; (e) TS 评分

调整云水、雨水及比湿的模拟值(图 2d),可一定程度改善试验 1 虚报现象,模拟得到的降水强度与实况降水值较为接近。说明 Nudging 调整云水、雨水及比湿的初始场更能反映降水的真实情况,其预报效果最优,试验 1 次之,控制试验则最差。再看 0~6h 逐小时累计降水(>0.1mm)/TS 评分(图 2e),通过在模式中运用松弛逼近方法同化雷达反射率因子,其降水 TS 评分明显优于控制试验;对比两种不同 Nudging 方法,结果表明模式初始场通过 Nudging 方法订正雨水、云水及水汽场,前 3h 逐时降水模拟效果最佳,后 3h 差异不明显。

4.2 对 24h 降水模拟的改进

图 3 是不同试验模拟 24h 累计降水图。模拟 24h 降水分布呈西南-东北递减趋势,与实况观测分布基本一致,同时各试验均有能力模拟出西南部暴雨以上落区及范围;通过分析发现,控制试验(图

3b)对强降水中心(300mm 以上)没有模拟出来,明显出现漏报;而试验 1(图 3c)和试验 2(图 3d)均能模拟出强降水的中心,其中试验 2 模拟强降水位置更接近观测值;另外试验 1 在西部和北部同样出现不同度量级的虚报,而试验 2 可在一定程度上消除其虚报现象。整体而言,试验 2 采用的 Nudging 方法最优,更适合海南岛的强降水预报;同时可知 Grapes_3km 模式不仅能捕捉更多的中小尺度信息,而且对 24h 的降水预报也有一定程度的改善。另外,分析两种不同 Nudging 方法 24h 降水 TS 和 FAR 评分(图略),中雨以下量级,技巧评分差异不是很明显;大雨以上量级,试验 2 技巧评分明显优于试验 1;对比 FAR 评分,试验 1 降水虚报问题较为严重,除了晴雨预报技巧以外,试验 2 虚报率均小于试验 1,各量级虚报率分别降低 3%(中雨)、16%(大雨)、8%(暴雨)及 5%(大暴雨)。

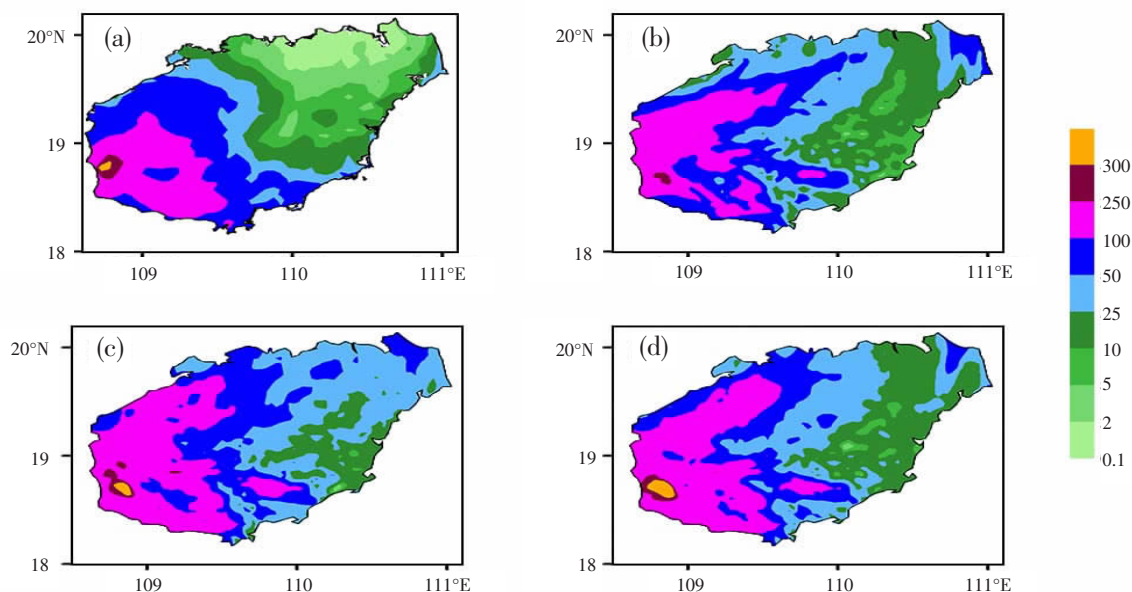


图 3 7 月 22 日 00 时—23 日 00 时 24h 累计降水模拟值

(a)观测;(b)控制试验;(c)试验 1;(d)试验 2

通过前面分析可知,采用 Nudging 方法,对海南岛降水均有一定程度的改进,但改进的效果不同;对比两种 Nudging 方法,试验 1 模拟海南岛西部和北部降水量级均偏大。下面对两种 Nudging 方法不同降水结果分析:图 4 为模拟的水凝物含量垂直廓线图,在第 5min 试验 1(图 4a1)水凝物主要由 qc 和 qi 组成,其中云水的含量最大,在 850hPa 附近达到极值 0.1g/kg;云冰次之,极值均为 0.02g/kg,位于 300hPa 高层附近,然后向下逐渐减少;试验 2 在模

式初始场 Nudging 订正云水、雨水及比湿得到的预报场中(图 4b1),主要存在 qc、qi 及 qr 粒子,其中 qc 含量最大,在地表附近达到极大值 0.18g/kg,同时 500hPa 附近也存在一个极大值 0.11g/kg;由于第 5min 的积分,高空中水凝物还没形成降水到达地面,所以两种试验降水均非常少。在第 15min 的积分,试验 1 和试验 2 中低层水凝物开始增加;试验 1 在 850hPa 附近云水达极值 0.22g/kg(图 4a2),量级明显的增大;试验 2 中低层除了云水和雨水增加外,

高层的固态粒子(q_i 、 q_g)含量也有所增加(图 4b2),模式的预报场降水主要来源于中低层的云水。在第 30min,试验 1 高层的固态粒子进一步增多,冰相过程对降水有一定的促进作用,到达 850hPa 的云水含量增大到 0.35g/kg,另外低层的雨水含量增加至 0.11g/kg;降水主要由 925~500hPa 之间的云水和雨水形成(图 4a3),它形成的降水强度明显偏多,导致试验 1 在模式预报前期中出现一定量级的虚报现象。

接下来对不同高度层水凝物分析,图 4c 为

Nudging 第 30min 后 850hPa 云水和雨水分布图。在西部和北部地区,试验 1(图 4c1、c2)模拟雨水和云水含量明显大于试验 2(图 4c3、c4),尤其是雨水含量,极大值达 1.8g/kg;试验 2 雨水在该区域仅为 0~0.3g/kg;由前面分析可知,此次过程降水过程主要是由于中低层云水和雨水造成,试验 1 水凝物含量明显偏大;试验 2 通过 Nudging 订正水汽场,可消除一定量级及范围虚报;进一步说明试验 2 方法是合理的,预报效果最佳;另外 700hPa 得出的结论一致,这里不再赘述。

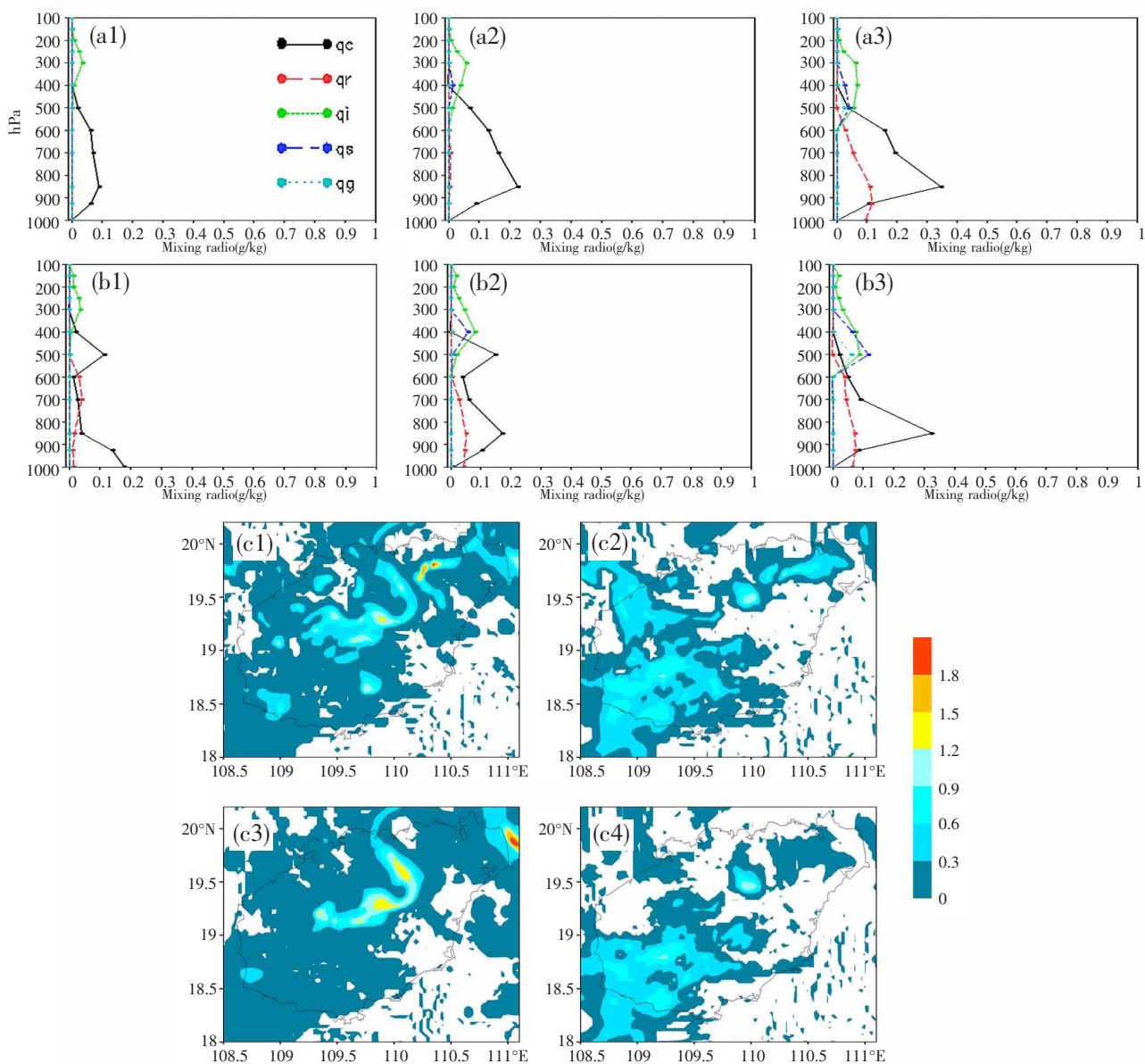


图 4 两种 Nudging 方法水凝物含量垂直廓线(取 108.6°E~111.1°E, 18.2°N~20.1°N)范围区域平均值和模式积分 30min 的 850hPa 雨水和云水分布

a1-a3、c1-c2 为试验 1; b1-b3、c3-c4 为试验 2; 预报结果: a1、b1 为 5min, a2、b2 为 15min, a3、b3 为 30min

5 结论

本文采用华南区域数值预报中心自主研发的 GRAPES_3km 模式系统,对海南岛强降水过程模拟对比试验,分析不同 Nudging 方法对模拟影响,获得结论如下:

(1) 采用 Nudging 方法可以有效地调整初始场的湿度条件,使海南岛水汽有明显增量;能够有效缩短模式的“spin-up”时间,此信息可改善模式在开始时段降水滞后问题,对于改进模式预报效果具有重要意义。

(2) 对比试验表明,采用 Nudging 方法同化雷达反射率因子能够提高 0~6h 的 TS 评分,模拟降水更接近于观测值;Nudging 订正云水、雨水及水汽场对提高海南岛临近预报的效果最佳。

(3) 采用 Nudging 方法同化雷达反射率因子,可模拟出强降水中心;试验表明 GRAPES_3km 模式能够捕捉到更多的中小尺度信息;试验 2 采用 Nudging 方法在 24hTS 评分要优于试验 1,尤其是大雨以上量级的预报有明显正技巧,同时虚报现象也得到一定程度改进。

以上的 Nudging 方法模拟试验表明,利用雷达反射率因子资料不仅能改善短时短临的降水问题,同时也印证了改进初始场可缓解 spin-up 问题,也能较好预报出 24 小时的强降水落区。这些结论具有一定的局限性,要进一步了解初始场对海南岛短时短临降水预报的作用,仍需要进行大量的个例研究,设法找出更好的初始场方案。

参考文献:

- [1] Abhilash S, Sahai A K, Mohankumar K, et al. Assimilation of Doppler Weather Radar Radial Velocity and Reflectivity Observations in WRF-3DVAR System for Short-range Forecasting of Convective Storms[J]. Pure & Applied Geophysics, 2012, 169(11): 2047-2070.
- [2] 陈德辉, 杨学胜, 张红亮, 等. 多尺度非静力通用模式框架的设计策略[J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 452-461.
- [3] Donner L. An Initialization for Cumulus Convection in Nu-

merical Weather Prediction Models [J]. Monthly Weather Review, 1988(116): 377-385.

- [4] 王瑾, 刘黎平. CINRAD/CD 雷达反射率因子同化对中小尺度数值模式云微物理量场调整的分析[J]. 高原气象, 2009, 28(1): 173-185.
- [5] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. CAMS 复杂云微物理方案与 GRAPES 模式耦合的数值试验[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 315-325.
- [6] 林辉, 黄奕丹, 许军辉, 等. 非常规探测资料在一次非典型暴雨过程中的应用[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(1): 68-73.
- [7] 罗思泽, 黄庆国, 杨兰, 等. 梧州前汛期强对流天气多普勒雷达特征分析[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(4): 18-21, 132.
- [8] 陈星登, 郭泽勇, 张弘豪, 等. 不同强度云系的双偏振雷达特征[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(2): 19-23.
- [9] 智协飞, 高洁, 张小玲. 多普勒雷达资料在中尺度模式短时预报中的应用[J]. 气象科学, 2010, 30(2): 143-150.
- [10] 刘永亮, 李强, 於莹. 新一代天气雷达 RDASOT 软件的释用[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(1): 104-107.
- [11] 施丽娟, 许小峰, 李柏, 等. 雷达资料在登陆台风“桑美”数值模拟中的应用[J]. 应用气象学报, 2009, 20(3): 257-266.
- [12] 朱丽娟, 龚建东, 黄丽萍, 等. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 38-51.
- [13] 彭菊香, 谢元富, 康兆萍, 等. 改进的雷达资料同化方案在梅雨期暴雨预报中的应用[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 1007-1022.
- [14] 张兰, 徐道生, 胡东明, 等. 雷达反演资料的 Nudging 同化对华南暴雨过程短临预报的影响[J]. 高原气象, 2019, 38(6): 1208-1220.
- [15] 薛纪善, 陈德辉. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [16] 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.
- [17] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 177-186.
- [18] 苏传程, 师春香, 谷军, 等. 地闪资料在 LAPS 云分析中的应用研究[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(1): 54-60.

A case study of assimilated radar reflectivity factor by NUDGING method

Zhong Youliang¹, Li Xun¹, Zhang Chengzhong², Chen Fajing³

(1. Hainan Meteorological Observatory, Haikou Hainan 570203; 2. Guangzhou Institute of Tropical Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou Guangdong 510080; 3. National Numerical Prediction Center, Beijing 100081)

Abstract: Using the ECMEF global high-resolution model data, the Doppler radar reflectivity factor was assimilated by the relaxation approximation method. Through numerical simulation of precipitation process in Hainan Island by GRAPES_3km model in South China, the influence of different Nudging methods on model forecasting effect was analyzed. The results show that (1) using Nudging assimilation method can coordinate the background field with the observed inversion data, shorten the thermal start-up time of the model and increase the precipitation in the beginning period. (2) Assimilated radar reflectivity factor can improve the hourly precipitation score of Hainan Island from 0 to 6 hours, and the simulated value is closer to the actual observation. (3) After assimilation, the GRAPES_3km model in South China can capture more small and medium-scale information, which can improve the magnitude of the 24-hour heavy rainfall in Hainan Island. (4) Nudging corrects the cloud water, rain water, and water vapor field in the initial field, the hydrometeor distribution is reasonable, and the precipitation forecast effect is the best.

Key words: radar echo; relaxation approximation method (Nudging); cloud microphysics; GRAPES_3km mode