

范娇,曾小团,林振敏,等. 高分辨率区域模式不同时间步长对一次强降水预报的影响[J]. 气象研究与应用,2023,44(1):33-38.
Fan Jiao,Zeng Xiaotuan,Lin Zhenmin,et al. Influence of different time steps of high resolution regional model on heavy precipitation forecast[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2023,44(1):33-38.

高分辨率区域模式不同时间步长对一次强降水预报的影响

范 娇, 曾小团*, 林振敏, 黄荣成

(广西壮族自治区气象台, 南宁 530022)

摘要: 使用华南短临预报模式本地化改造后的广西对流尺度数值预报模式系统,对 2022 年 6 月 3—4 日广西强降水过程进行数值模拟,研究不同时间步长对模式预报效果的影响。结果表明:(1)时间步长对位势高度、温度场和地面要素场的影响较小,对风场影响较大;(2)强降水区中低层物理量、 $t2m$ 、 $u10m$ 预报误差较小,模式预报偏差主要来源于高层物理量和 $v10m$;(3)时间步长对模式降水预报有较大影响,时间步长越小(大),降水预报敏感度越大(小),大暴雨以上量级和范围预报越大(小);(4)无论 24h 还是逐小时 ETS 评分都反应出小时间积分步长对大量级降水的预报效果更好,且对强对流天气发展趋势有一定指示作用,大的时间积分步长预报效果则相反。

关键词: 数值模拟;时间步长;强降水;预报检验

中图分类号: P457.6

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.06

引言

在全球气候变暖影响下,极端天气事件不断增多增强。2022 年 6 月广西发生连续性大暴雨过程,过程持续时间长、累积雨量大、暴雨范围广、强降雨区高度集中、局地雨强刷新历史记录,是新中国成立以来广西最强“龙舟水”。面对此类极端强降水天气过程,如何通过数值模式特别是国产模式实现提前精准预测,一直是我国气象行业研究的重点难点。

随着国内数值天气预报水平的提高,中国气象局自主研发的区域中尺度数值预报系统(GRAPES_MESO)于 2006 年正式投入业务运行,经过不断优化改进,至 2020 年 6 月 25 日升级至 V5.0,水平分辨率提升至 3km,实现了逐 3h 快速循环同化预报,在天气预报中展现出较好的预报性能^[1],能够较好地刻画雨带细致结构,对高度场、温度场、风场也有着一定的预报能力^[2-3],被广泛应用于区域降水和局地天气系统预报中^[4-5]。目前国内已有不少有关该模式的检验评估研究,结果表明,模式模拟性能受空间分辨率、模

拟时长、参数化方案、不同区域等^[6-10]诸多因素影响。实际强降水模拟中,究竟采取哪一种方案的结果会更理想,在不同情况下仍需深入研究。随着数值天气预报的不断发展完善,中国气象局广州热带海洋气象研究所区域数值天气预报重点实验室基于现有的中尺度华南模式,结合局地资料同化、模式动力过程和模式物理方案多年研究成果,逐渐形成具有区域特色的华南短临预报模式^[11],其水平分辨率可精细到 1km,使得模式可以解析较小尺度的物理现象。在其技术支持下,广西壮族自治区气象局 2021 年完成了华南短临预报模式的本地化改造,建立了广西对流尺度数值预报模式系统。目前对该系统的研究主要在产品应用^[12]和效益评估^[13]方面,降水预报性能方面的研究较为缺乏,因此,本文采用不同时间步长方案模拟广西 2022 年 6 月 3 日 20 时—4 日 20 时的一次“龙舟水”暴雨过程,研究模式时间步长对大暴雨过程预报效果的影响,以期模式有效积分和模拟方案改进提供参考。

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 广西自然科学基金项目(2022GXNSFAA035482)、广西气象科研计划青年人才培养项目(2022QN05)

作者简介: 范娇(1993—),女,工程师,主要从事天气预报工作。E-mail:742895059@qq.com

* 通讯作者: 曾小团(1971—),男,正研级高级工程师,主要从事天气预报技术与预报系统开发工作。E-mail:158083890@qq.com

1 模拟试验设计

1.1 个例简介

受冷空气和切变线共同影响,2022 年 6 月 3 日 20 时—4 日 20 时(本文中时间如无特别说明均指北京时)广西北部发生一次暴雨到大暴雨,局地特大暴雨天气过程,过程降水集中、极端性强,部分地区累积雨量超过 300mm,最大降水量 364mm 出现在融水安陞气象观测站。在此期间,龙胜国家气象观测站 24h 累计雨量 166.9mm,超过日最大降雨量历史极值 162.0mm(1976 年 5 月 15 日)。

1.2 资料说明

文中所用资料有三种:①6 月 3 日 20 时起报的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)空间分辨率 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的 24h 预报场资料,作为模式初始场和侧边界条件;②6 月 4 日 08 时和 20 时 ECMWF 空间分辨率 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率 12h 的高空、地面分析场资料,用于模式物理量检验;③中国气象部门气象预报业务系统(MICAPS)提供的 2022 年 6 月 3 日 20 时—4 日 20 时自动站逐小时降水资料,用于模式降水检验。

1.3 模式设置和方案设计

模式从 6 月 3 日 20 时起报至 4 日 20 时结束,模拟范围 $18^\circ\text{N} \sim 28^\circ\text{N}$, $102^\circ\text{E} \sim 114^\circ\text{E}$,使用的物理方案包括:WSM6 云微物理参数化方案、RRTMG 长短波辐射方案、MRF 边界层方案、SLAB 陆面方案。由于模式分辨率较高,不采用对流参数化方案,其侧边界通过 Davies 松弛边界条件来处理^[14]。实验中,模式水平分辨率 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,垂直分层 65 层,模式顶高度 60km,结果每小时输出一次。为了探讨在给定

物理过程条件下,时间步长对预报效果的影响,本文选用四个时间步长($dt=10\text{s}, 15\text{s}, 20\text{s}, 30\text{s}$)进行模拟试验。

1.4 检验方法

在进行模拟效果检验时,采用均方根误差(RMSE)和公平风险评分(ETS)方法对模式产品进行客观检验。其中,RMSE 用来表征各变量预报场和分析场之间的偏差程度。公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (1)$$

其中, M_i 代表第 i 个格点的预报结果, O_i 代表第 i 格点的分析场变量值, N 为总的格点数。RMSE 范围为 $0 \sim \infty$,值越小,表示预报与实况越接近。

TS 评分是衡量降水预报水平的重要指标,但容易忽略降水的空报、漏报现象,导致不能准确描述模式降水预报能力^[15]。ETS 评分是对传统 TS 评分的改进,能对空报、漏报进行惩罚,使评分更公平,因此本文选用 ETS 评分方法对地面降水场进行检验评估。公式如下:

$$\text{ETS} = \frac{N_A - E}{N_A + N_B + N_C - E} \quad (2)$$

$$E = \frac{(N_A + N_B)(N_A + N_C)}{(N_A + N_B + N_C + N_D)} \quad (3)$$

其中, N_A 、 N_B 、 N_C 分别为降水预报正确、空报和漏报站(次)数, N_D 为无降水预报正确的站(次)数。ETS 值在 $-1/3 \sim 1$ 之间,分值越高表示预报效果越好。24h 累积降水等级和 1h 累积降水等级的划分参照《降水等级标准-国标》(表 1)。由于本次过程降水较为集中,下文若无特别说明,均以主要降水区($23.5^\circ\text{N} \sim 26.5^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 112^\circ\text{E}$)作为定量检验对象。

表 1 降雨量的等级划分标准(单位:mm)

等级 时段	零星小雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
1h	< 0.1	0.1 ~ 0.5	0.6 ~ 6.9	7.0 ~ 14.9	15.0 ~ 39.9	40.0 ~ 49.9	≥ 50.0
24h	< 0.1	0.1 ~ 9.9	10.0 ~ 24.9	25.0 ~ 49.9	50.0 ~ 99.9	100.0 ~ 249.9	≥ 250.0

2 结果与分析

2.1 物理量检验

2.1.1 高空要素检验

不同时间步长模拟方案下,4 日 08 时和 4 日 20 时位势高度场 h 、温度 t 、风场纬向分量 u 和经向分

量 v 预报场 RMSE 随高度的演变如图 1 所示。可以看到,四组试验对高度场和温度场的预报效果较为接近,两个时次位势高度场 RMSE 值均在 $1 \sim 4\text{gpm}$ 范围内,主要呈现出随高度升高不断增大的趋势,到 300hPa 左右达到最大;两个时次温度场 RMSE 值小于 0.35k ,预报误差随高度的变化趋势与位势高度相

似。从风场 RMSE 随高度的演变来看, 不同时间步长对风场的改进效果相差较大。 u 分量 RMSE 显示, 4 日 08 时低层 15s 和 20s 时间步长对 u 分量的预报效果较好, 中高层 30s 时间步长预报效果最好, 300hPa 以下各组试验 u 分量 RMSE 均在 600hPa 附近达到极小值, 即在中层预报偏差最小。4 日 20 时, 不同时间步长对 u 分量影响不大, 其预报偏差在低层相对较小。 v 分量 RMSE 显示, 4 日 08 时各组试验

预报偏差最小值仍处于低层, 其中 15s 时间步长在 925hPa 的 RMSE 接近 0, 对 v 分量的预报有明显正技巧, 往上 600~300hPa 高度 10s 试验 RMSE 最小, 预报效果相对最好。到 20 时 v 分量 RMSE 大于 08 时, 预报能力显著下降。整体来看, 不同时间步长对位势高度和温度场的预报影响较小, 对风场影响较大。相较高层, 各组试验对中层低层物理量刻画更好, 4 日 08 时 15s、20s 试验低层风场预报偏差最小。

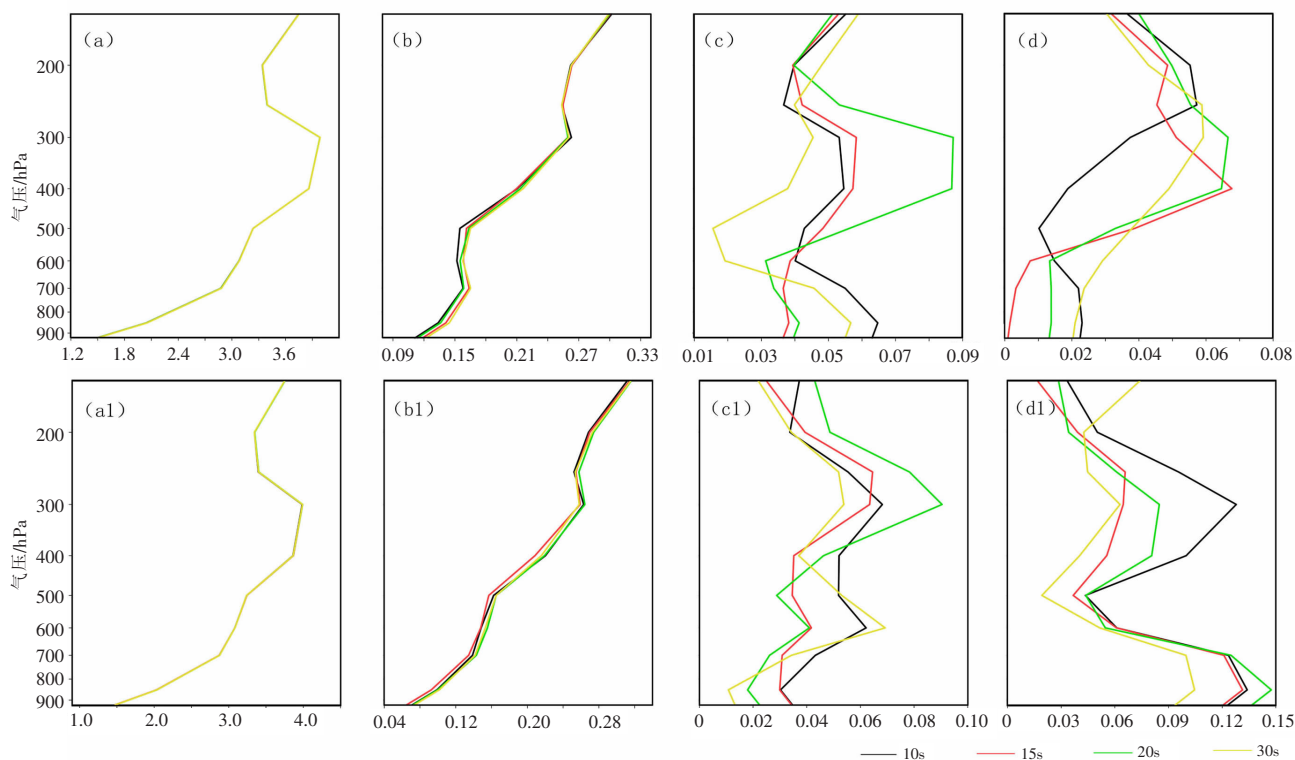


图 1 不同时间步长条件下 4 日 08 时(a—d)和 4 日 20 时(a1~d1)位势高度场 H (单位:gpm)、温度场 T (单位:k)、风场纬向分量 u (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和经向分量 v (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)预报场和分析场的 RMSE 随高度的演变

2.1.2 地面要素检验

对预报场和分析场的地面 2m 温度、地面 10m 风场进行差值分析, 检验不同模式对地面要素的预报效果。结果显示, 从 12h 预报来看, 不同试验对各地面要素的预报能力较为接近。 $t2\text{m}$ 全区预报偏差在 $-3.5\sim 1\text{k}$ 之间, 桂北偏差相对更小, 在 $-1.5\sim 1\text{k}$ 之间。 $u10\text{m}$ 全区预报偏差在 $-2.5\sim 2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 其中桂东北大部地区预报偏差为 0, 与实况接近。 $v10\text{m}$ 预报能力较 $u10\text{m}$ 弱, 全区预报偏差在 $-3\sim 4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 桂西北预报效果较好, 大部地区偏差为 0, 与实况接近。从 24h 预报来看, 几组试验对各地面要素的预报能力均有不同程度的下降。 $t2\text{m}$ 全区预报偏差为 $-3.5\sim 2\text{k}$, 四组试验中 15s、20s 预报效果较好。

$u10\text{m}$ 预报偏差为 $-2.5\sim 3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 桂东北至沿海一带大部地区偏差为 0, 与实况接近。 $v10\text{m}$ 偏差范围则增至 $-2\sim 5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见, 四组试验对桂东北强降水区的 $t2\text{m}$ 和 $u10\text{m}$ 均有较好的表现, 地面 10m 风场的预报偏差主要来源于 10m 风场 v 分量。

2.2 降水预报检验

降水预报检验是考察模式综合性能的关键要素之一, 目前业务中对高分辨率数值模式降水预报的检验评估依然主要关注 24h 的累积降水, 从短临预报来看, 逐时降水预报检验等精细化预报评估也尤为重要。因此本节分别对模式 24h 累积降水和逐时降水进行预报检验。

2.2.1 降水空间分布

从实况降水来看,本次过程降水落区位于桂北一带,暴雨量级以上的强降水区主要集中在河池东北部以及柳州、桂林两市北部,呈东西向带状分布。对比模式预报发现,四组试验均能较好的模拟出100mm以上强降水落区的位置和形态,但强降水落区的范围和强度有不同程度的偏差。10s试验能较好的预报出融水特大暴雨(250mm以上降水),落区和位置都与实况较为一致,但大暴雨(100mm以上)的预报范围偏大。15s试验在一定程度上也能预报出融水特大暴雨,但范围较实况偏小。20s试验报出桂林市北部强降水落区和降水量级偏小,没有报出融水特大暴雨。30s试验大暴雨以上落区预报明显偏小,并且同样未能预报出融水的特大暴雨。这说明时间步长对模式降水预报有较大影响,时间步长越小,降水预报敏感度越大,大暴雨以上量级和范围预报越大;时间步长越大,大暴雨以上降水预报能力下降越显著,预报的强降水量级和范围偏小。

2.2.2 24h 累积降水 ETS 评分

为了客观分析不同试验对降水过程模拟结果的影响,现计算降水关键区的 ETS 评分,定量检测模式降水预报的准确率。图2为试验24h累积降水量 ETS 评分情况,可以看到试验对大雨和暴雨量级的降水预报效果最好,ETS 评分呈现为“中间高两头低”。从不同量级来看,中雨到大雨 30s 试验 ETS 评分均为最高或最高之一,10s 试验评分为最低;而暴雨到大暴雨量级的预报则相反,30s 试验 ETS 评分最低,10s 试验评分为最高或最高之一;特大暴雨预报 10s 和 15s 试验 ETS 评分在 0.1 以上,20s 和 30s 评分均为 0,未能有效预报出局地特大暴雨。由此可见,大的时间积分步长对暴雨以下量级的预报效果较好,对暴雨及以上量级的降水预报效果较差,小的

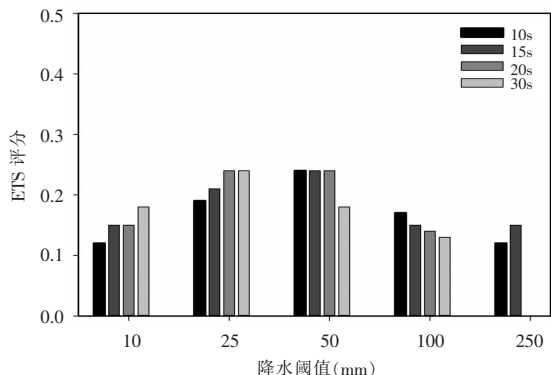


图2 不同时间步长条件下 24h 累积降水 ETS 评分

时间积分步长预报效果恰好相反。另外,对比发现,并非时间步长越小,暴雨及以上量级的降水预报评分越高,比如,250mm 以上降水预报中 15s 试验 ETS 评分为 0.15,高于 10s 试验。综合以上分析可知,10s、15s 试验均能有效预报出各量级降水,其中 15s 试验对小量级和大量级降水预报效果优于 10s,整体来说对 24h 累积降水预报能力优于其他三组试验。

2.2.3 逐小时降水 ETS 评分

业务中短时强降水对短临预报尤为重要,因此有必要对小时雨量进行定量评估。由于模式在初始阶段一般有个预热过程即存在“spin-up”问题,需要在初始阶段进行自身的调整,经过一段时间的积分后得到所需要的中小尺度环流及降水信息^[16]。为避免模式“spin-up”带来的预报误差,本节去掉前 3h 的“spin-up”阶段,选取主要降水时段(4 日 00 时—4 日 09 时)进行逐小时降水 ETS 评分计算。考虑到本次过程单时次达到大暴雨量级的站点较少,进行 ETS 评分计算将缺乏代表性,因此,本节只对中到暴雨进行评分。

图3显示,中雨 ETS 评分在模式初期不断增加,预报准确率不断提升,到 4 日 06 时,20s 和 30s 试验 ETS 超过 0.3 达到最大,预报效果最好,之后 ETS 值有所降低,但一直到 09 时评分均维持在 0.2 左右,可见主要降水时段试验对中雨的预报能力较为稳定且一直保持在较高水平。大雨 ETS 评分除 20s 试验在 09 时超过 0.2 以外,其他时次各试验 ETS 值均低于 0.2,波动范围较小,模式初期其评分显著高于中雨,10s 试验评分显著高于其他试验。暴雨 ETS 评分特征与大雨相似,但 10s、20s、30s 试验 ETS 评分在 04 时均有极小值,只有 15s 试验在主要降水时段一直保持稳定偏高的 ETS 评分。综上可知,模式初期大雨、暴雨的预报能力较中雨偏强,10s 试验预报能力较其他试验偏强,整个检验阶段 15s 试验对暴雨量级的预报能力最为稳定。对比四组试验主要降水时段不同量级的平均 ETS 评分可知,各试验中雨平均 ETS 值相差不大,大雨和暴雨平均 ETS 值随时间步长增大而减小,即不同时间步长对大雨及以上量级的影响较中雨更为显著。同时发现,同一试验 ETS 值随量级增大而不断减小,这表明模式对大量级降水的预报能力远低于小量级。

2.2.4 小时最大降雨量检验

从卫星云图(略)可知,受同一流云团影响,本次过程日降水量超过 250mm 的 13 个自动站均出现

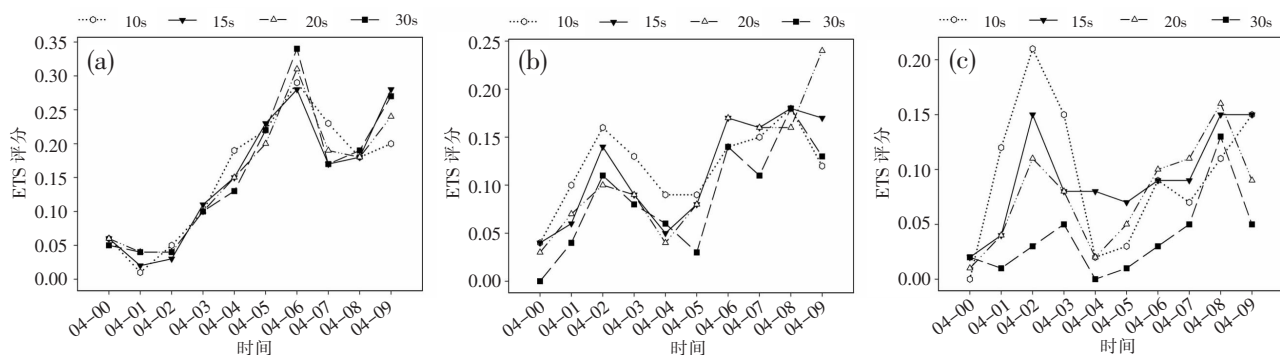


图3 不同时间步长主要降水时段(4日00时—4日09时)不同量级降水逐小时 ETS 评分

(a)中雨;(b)大雨;(c)暴雨

在柳州市融水县,其中融水安陞气象观测站和融水大浪气象观测站降水量超过300mm,是此次特大暴雨过程最大日降水量基本站,降水阶段性特征明显。因此本文选取包含融水安陞和融水大浪观测站在内的东西向各25km、南北向各15km范围(25.19°N~25.61°N, 109.08°E~109.69°E),对其最大小时降水量与模式预报的同区域最大小时降雨量(图4)进行比较,从短临预报的角度,评估模式对极端降水的指示作用。图4显示,10s、15s试验预报的逐时最大小时降雨量多数时刻与实况偏差在10mm以内,预报效果较好,且两组试验能预报出主要降水时段内最大(02时)、最小(06时)小时降水量出现时刻,对强对流天气发展趋势也有一定的指示作用。相较之下,20s、30s试验预报效果偏弱,无论是小时雨量偏差抑或是小时雨量增减趋势均与实况偏差较大。由此可知,小时间步长对强对流的预报效果优于大时间步长。

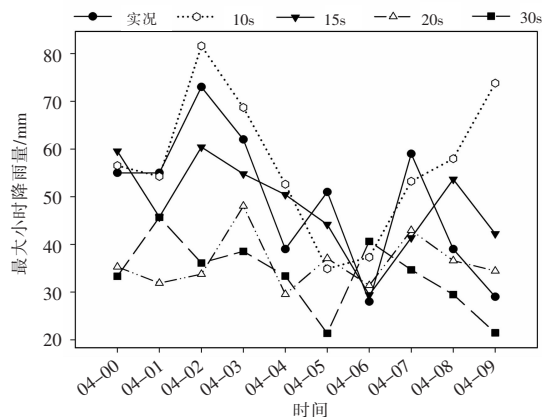


图4 不同时间步长下强降水区域逐小时最大降雨量和实况对比图(单位:mm)

3 结论和讨论

基于广西对流尺度数值预报模式,用不同时间步长方案对2022年广西“龙舟水”期间的一次典型强降水过程进行了数值模拟试验,并分析了时间步长对模式预报的影响。得到以下主要结论:

(1)模式对强降水区中低层位势高度、温度、风场以及地面t2m、u10m模拟较好。时间步长对位势高度、温度、t2m、u10m、v10m影响较小,对高空风场影响较大。

(3)时间步长对模式降水预报有较大影响,时间步长越小(大),降水预报敏感度越大(小),大暴雨以上量级和范围预报越大(小)。

(4)从24h累积降水ETS评分来看,大时间积分步长对暴雨以下量级的预报效果较好,小时间积分步长预报效果恰好相反。10s、15s试验能有效预报出各量级降水,其中15s试验对小量级和大量级降水预报效果优于10s,整体来说对24h累积降水的预报能力最强。

(5)从小时ETS评分来看,10s、15s试验分别对大雨、暴雨量级降水预报效果最好,两组试验对强对流天气发展趋势有一定的指示作用。从小时ETS平均值来看,试验对大量级降水的预报能力远低于小量级,但时间步长对大量级降水的影响较中雨更为显著。

参考文献:

- [1] 许晨璐,王建捷,黄丽萍.千米尺度分辨率下GRAPES_Meso40模式定量降水预报性能评估[J].气象学报,2017,75(6): 851-876.
- [2] 万子为,刘鑫华.华东地区弱天气背景下强对流过程的GRAPES_Meso模式模拟分析[J].气象科技,2018,46(2): 282-291.

- [3] 叶朗明, 陈明惠, 夏冠聪. 华南一次特大暴雨诊断及数值模拟[J]. 气象研究与应用, 2014, 35(3): 20–26.
- [4] 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.
- [5] 陈晓燕, 孔祥伟, 彭筱, 等. 全球和区域数值模式在甘肃 2020 年汛期降水预报中的检验评估[J]. 干旱气象, 2022, 40(3): 524–535.
- [6] 刘德强, 冯杰, 李建平, 等. GRAPES-MESO 中时间步长和空间分辨率对于预报效果的影响[J]. 大气科学, 2015, 39(6): 1165–1178.
- [7] 于翡, 黄丽萍, 邓莲堂. GRAPES_MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析[J]. 大气科学, 2018, 42(5): 1146–1156.
- [8] 沈新勇, 施义舍, 王宏, 等. GRAPES_Meso 模式中两种双参数云微物理方案对冷云过程模拟的比较研究[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(3): 336–347.
- [9] 谢漪云, 王建捷. GRAPES 千米尺度模式在西南复杂地形区降水预报偏差与成因初探[J]. 气象学报, 2021, 79(5): 18.
- [10] 彭筱, 陈晓燕, 黄武斌. 2016 年夏季不同分辨率 GRAPES_MESO 模式的西北地区预报效果检验[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(4): 6–11.
- [11] 林晓霞, 冯业荣, 陈子通, 等. 华南区域高分辨率数值模式前汛期预报初步评估[J]. 热带气象学报, 2021, 37(4): 656–668.
- [12] 苏兆达, 潘杰丽, 梁岱云, 等. 广西对流尺度数值预报模式产品在南宁的应用初探[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(1): 66–72.
- [13] 林振敏, 黄荣, 戚云枫, 等. 广西对流尺度数值天气预报模式系统建设与效益评估[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(2): 105–110.
- [14] 徐道生, 陈德辉, 张邦林, 等. TRAMS_RUC_1km 模式初始场和侧边界方案的改进研究[J]. 大气科学, 2020, 44(3): 625–638.
- [15] 管成功, 王克敏, 陈晓红. 2002—2005 年 T213 数值降水预报产品分析检验[J]. 气象, 2006, 32(8): 70–76.
- [16] 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.

Influence of different time steps of high resolution regional model on heavy precipitation forecast

Fan Jiao, Zeng Xiaotuan*, Lin Zhenmin, Huang Rongcheng
(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China)

Abstract: The Guangxi convective scale numerical prediction model system which was localization reconstructed by the South China Short-term approach Prediction Model (CMA_GZ_R1) is used to simulate a heavy rainfall process in Guangxi on June 3–4, 2022, during the dragon-boat rainy period, and the effects of different time steps on the model prediction are also studied. The results show that: (1) The time step has less influence on the geopotential height, temperature and surface element field, but a greater influence on the wind field; (2) The prediction errors of the physical quantities in the middle and lower layers, t_2 and u_{10m} in the heavy precipitation area are small, and the model prediction errors mainly come from the high-level physical quantities and v_{10m} ; (3) The time step has a greater influence on the model precipitation forecast, the smaller (larger) the time step, the greater (smaller) the precipitation forecast sensitivity, and the larger (smaller) the magnitude and range forecast above large rainstorms; (4) Both 24-hour and hourly ETS scores reflect that the small time integration steps are more effective in forecasting large-magnitude precipitation, and are indicative of strong convective weather trends, while large time integration steps have the opposite effect.

Key words: numerical simulation; time step; heavy precipitation; forecast test