

吴俞,李玉梅,李勋,等,2023.海南岛暖季区域数值模式降水精细化预报检验[J].气象,49(2):235-248. Wu Y, Li Y M, Li X, et al, 2023. Verification of precipitation refinement forecast of regional numerical models in the warm season of Hainan Island [J]. Meteor Mon, 49(2): 235-248 (in Chinese).

海南岛暖季区域数值模式降水精细化预报检验^{*}

吴 俞^{1,2} 李玉梅^{1,2} 李 勋^{1,2} 冯 箫^{1,2} 姜小云^{1,3}

1 海南省南海气象防灾减灾重点实验室,海口 570203

2 海南省气象台,海口 570203

3 海南省气象探测中心,海口 570203

提 要: 应用面向降水过程的时空检验方法,评估了中国气象局广东快速更新同化数值预报系统(CMA-GD)、上海数值预报系统(CMA-SH9)和中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)的海南岛暖季(2019—2020 年的 4—9 月)非台风降水日小时降水预报效果,结果表明:三家模式均能捕捉不同流场条件下的降水空间分布形态及降水日变化特征,但 CMA-GD 和 CMA-SH9 的降水频率和强度总体偏多偏强,其中 CMA-GD 降水频率偏多近 10%,CMA-SH9 平均小时雨强偏强近 $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,CMA-MESO 雨强在 $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降水多分布在西南部和中部山区,与实况空间分布差异较大。三家模式降水预报最易开始和降水峰值时间平均偏早 1~3 h,而降水最易结束时间偏晚 1~3 h;模式的大气层高层露点温度和不稳定能量预报值偏大,不稳定能量出现时间偏早,近地层逆温层特征预报失真,降水预报的开始时间倾向于提前、降水持续时间偏长。三家模式的昼间海南岛北部沿海的海陆风辐合带预报偏强,其中 CMA-SH9 尤为明显,与该模式降水强度明显偏强特征相一致;CMA-GD 的夜间南部沿海的海陆风辐合带预报位置偏西,与该模式西南部沿海降水频次预报偏多相对应;CMA-MESO 的海南岛西南部和中部山区的风速辐合预报偏强,其降水预报强度也相应偏强。

关键词: 区域数值模式,海南岛暖季,小时降水,预报偏差

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.110801

Verification of Precipitation Refinement Forecast of Regional Numerical Models in the Warm Season of Hainan Island

WU Yu^{1,2} LI Yumei^{1,2} LI Xun^{1,2} FENG Xiao^{1,2} JIANG Xiaoyun^{1,3}

1 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203

2 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203

3 Hainan Meteorological Observation Center, Haikou 570203

Abstract: Using the spatial-temporal verification method of precipitation process, this paper evaluates the prediction effect of non-typhoon hourly precipitation in warm season (April to September of 2019—2020) of Hainan Island by Guangdong rapid update assimilation numerical prediction system (3 km resolution, CMA-GD), Shanghai numerical prediction system (CMA-SH9) and mesoscale weather numerical prediction system (CMA-MESO) of China Meteorological Administration. The results show that the three models all can capture the spatial distribution of precipitation and the diurnal variation of precipitation under

^{*} 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U21A6001),中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z008)和海南省气象局业务提升项目(hnqxSJ202101)共同资助

2021 年 12 月 18 日收稿; 2022 年 12 月 8 日收修定稿

第一作者:吴俞,主要从事数值模式检验与释用研究. E-mail: wuyyxy1025@163.com

通讯作者:李勋,主要从事热带气旋强度和路径变化研究. E-mail: cyrilpat@sina.com

different flow field conditions. However, the frequency and intensity of precipitation in CMA-GD and CMA-SH9 are generally more and stronger, of which the frequency of precipitation in CMA-GD is more than 10%, the average hourly rainfall intensity of CMA-SH9 is nearly $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ stronger. The precipitation intensity above $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ of CMA-MESO is mostly distributed in the southwestern and central mountainous areas, which is quite different from the observed spatial distribution. The easiest precipitation start time and precipitation peak time of the three models are 1–3 h earlier than the observation, and the easiest precipitation end time is 1–3 h later than the observation; The predicted values of dew point temperature and unstable energy in the upper atmosphere of the model are too large, unstable energy appears earlier, the characteristic prediction of the near-surface inversion layer is distorted, the start time of precipitation forecast tends to be earlier, and the precipitation duration is too long. The sea-land wind convergence zone along the northern coast of Hainan Island is predicted to be strong in the daytime by the three models, especially CMA-SH9, which is consistent with obvious strong precipitation intensity of the model's output. The forecast position of the sea-land wind convergence zone along the southern coast of CMA-GD at night is westward, which corresponds to the higher frequency of precipitation along the southwestern coast of the model. CMA-MESO has strong wind speed convergence in the southwestern and central mountainous areas of Hainan Island, and the corresponding precipitation forecast intensity is stronger than the observation.

Key words: regional numerical model, Hainan Island warm season, hourly precipitation, forecast bias

引 言

随着预报精细化需求日益增长和数值模式分辨率不断提升,亟需开展小时降水特征分析和预报客观检验工作,总结模式小时降水时空偏差特征(Dai et al, 1999; Liang et al, 2004; Li and Yu, 2014),这有助于认识降水分布的精细特征及其演变规律。

近年来,研究逐渐侧重于分析小时降水的频率、强度-频率结构、日变化以及持续时间等特征。我国地域辽阔,不同区域的小时降水特征不尽相同,例如, Li(2018)分析了青藏高原地区夏季的小时降水,发现高原东南侧的小时降水频率和强度较高,高原中南部和东北部降水频率低、强度大,高原南缘降水频率高、强度低,高原上的大多数站点在午后或夜间出现降水高峰,午后(夜间)高峰主要是由持续时间短(长)的降水事件造成; Yu et al(2007a)发现我国中东部地区降水开始至达到峰值的时间普遍短于峰值至降水结束所历经的时间,并指出降水存在过程不对称性; 苏锦兰等(2021)研究云南小时降水时空分布特征,指出云南年降水量自西北向南增加,雨强自北向南增强,降水时长西部大于东部、南部略大于北部,年降水量受降水时长和雨强共同影响,降水时

长影响最强,雨强影响较弱; Yuan et al(2012)发现我国东部降水峰值主要集中在清晨和午后两个时段。

数值模式的小时降水预报能力有所欠缺。例如,高分辨率气候模式系统性低估华南沿海地区的“清晨-午后-清晨”降水日变化峰值,且未合理再现东西两侧多、中间少的“三极型”沿海岸线雨量分布(李妮娜, 2020); 华北区域高分辨率预报系统(RMAPS-ST)尽管可以再现出泰山及周边区域降水的空间分布特征,但倾向于低估泰山清晨的降水频率,该现象与降水事件数预报偏少和平均持续时间预报偏短有关,模式对夜间系统性降水过程发展演变的预报偏差是夜间降水出现漏报的重要原因,而降水空报易发生在午后(甘玉婷, 2020)。

海南岛地处热带,具有特殊的地形地貌特征,在地形特征与多尺度天气系统的相互作用下,暖季(4—9月)降水时空分布不均匀(张振州等, 2014; 王静, 2015; 王莹等, 2018; Zhu et al, 2017; 2020),预报难度较大,限制了海南岛小时降水的精准化预报水平。目前,针对热带岛屿的模式评估检验工作相对较少,缺乏对模式的热带地区小时降水预报能力检验评估。本文将评估中国气象局广东快速更新同化数值预报系统(3 km 分辨率, CMA-GD)、上海数值

预报系统(CMA-SH9)和中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)的2019—2020年海南岛暖季非台风小时降水预报效果,对比分析各家模式的小时降水频率、强度、日变化以及起止和峰值时间等方面的偏差特征及其可能原因。

1 资料和方法

1.1 高分辨率数值模式和实况资料

CMA-GD模式覆盖范围为:16.00°~31.36°N、96.00°~123.36°E,水平格距:3 km,垂直方向分65层,预报时效为96 h(陈子通等,2020);CMA-SH9模式覆盖范围为:5.00°~60.10°N、50.00°~160.10°E,水平格距9 km,垂直方向分51层,预报时效为72 h(徐同等,2019);CMA-MESO模式覆盖范围:10.0°~60.1°N、70°~145°E,水平格距:3 km,垂直方向分50层,预报时效为36~72 h(张小雯等,2020)。评估2019—2020年暖季4—9月(其中剔除了热带气旋影响期)、各模式在08时(北京时,下同)起报的12~36 h逐时地面降水量预报。实况资料选取海南岛417个区域自动站相应时段内的逐时实况降水数据,以及中国气象局陆面数据同化系统CLDAS的14时和02时的10 m风数据,另外探空资料选取海口站08时资料。

1.2 基于降水过程的时空检验方法

有别于传统检验和空间检验方法,根据中国气象局关于区域高分辨率数值预报检验评估的有关业务规定,以及Zhou et al(2008)、Yu et al(2007b; 2014)、Chen et al(2010)等的方法,本文面向海南岛降水过程进行小时尺度预报检验。检验内容主要包含以下几方面。

(1)小时降水频率:针对单站点24 h预报时效,统计检验时段内各个站点位置上模式预报与观测的降水频率(单位:%),频率计算公式如下:

$$RFH = \frac{N_{\text{rain}}(h)}{N_{\text{sample}}(h)} \times 100\%$$

式中: h 为预报时间, $N_{\text{rain}}(h)$ 为统计时段内 h 时刻的有效降水时数(小时降水量 ≥ 0.1 mm), $N_{\text{sample}}(h)$ 为统计时段内 h 时刻的总非缺测样本数。

(2)小时降水强度:针对单站点24 h预报时效,

统计检验时段内各个站点位置上模式预报与观测的有降水时次的平均降水量即为降水强度。强度的计算公式如下:

$$RIH = \frac{A_{\text{rain}}(h)}{N_{\text{rain}}(h)}$$

式中: h 为预报时间, $A_{\text{rain}}(h)$ 为统计时段内 h 时刻累计降水量, $N_{\text{rain}}(h)$ 为统计时段内 h 时刻的有效降水时数(小时降水量 ≥ 0.1 mm)。

(3)降水峰值时间:计算各站点24 h预报在一天中不同时刻降水量的平均时间序列,最大值的时刻即为峰值时刻。

(4)降水日变化:检验各站点24 h预报在一天中不同时刻的平均降水量。

(5)最易降水开始时间:在预报时段内第一个出现有效降水的时次(小时降水量 ≥ 0.1 mm)定义为降水开始时刻,统计检验时段内各站点24 h预报中发生在一天不同时刻降水事件开始频次,并对比实况和模式中降水最易开始时次(一天中出现频次最高的时次)。

(6)最易降水结束时间:在预报时段内最后一个出现有效降水(小时降水量 ≥ 0.1 mm)的时次定义为降水结束时刻,检验方法同开始时间。

模式站点降水通过双线性插值(张宏芳等,2019;曾鹏等,2021)获取。

2 高分辨率数值模式小时降水预报的时空检验

2.1 海南岛暖季非台风降水流场分型

海南岛暖季降水分布与850 hPa环流特征有密切联系(Zhu et al,2017;2020),研究采用REOF和k-means聚类相结合的方法将2019—2020年暖季非台风降水日的850 hPa流场进行分类(李玉梅等,2016;2020),得到影响海南岛的7类主要流场特征(图1和表1),即:东北气流、偏东气流、偏南气流、南西南气流(平均风速 $< 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、西南气流(平均风速 $> 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、西西南气流(平均风速 $< 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)以及偏西气流(平均风速 $> 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。其中偏南气流、南西南气流、西南气流和西西南气流出现天数所占比例高达73%,因此本文重点分析在这4类流场下数值模式降水精细化预报性能。

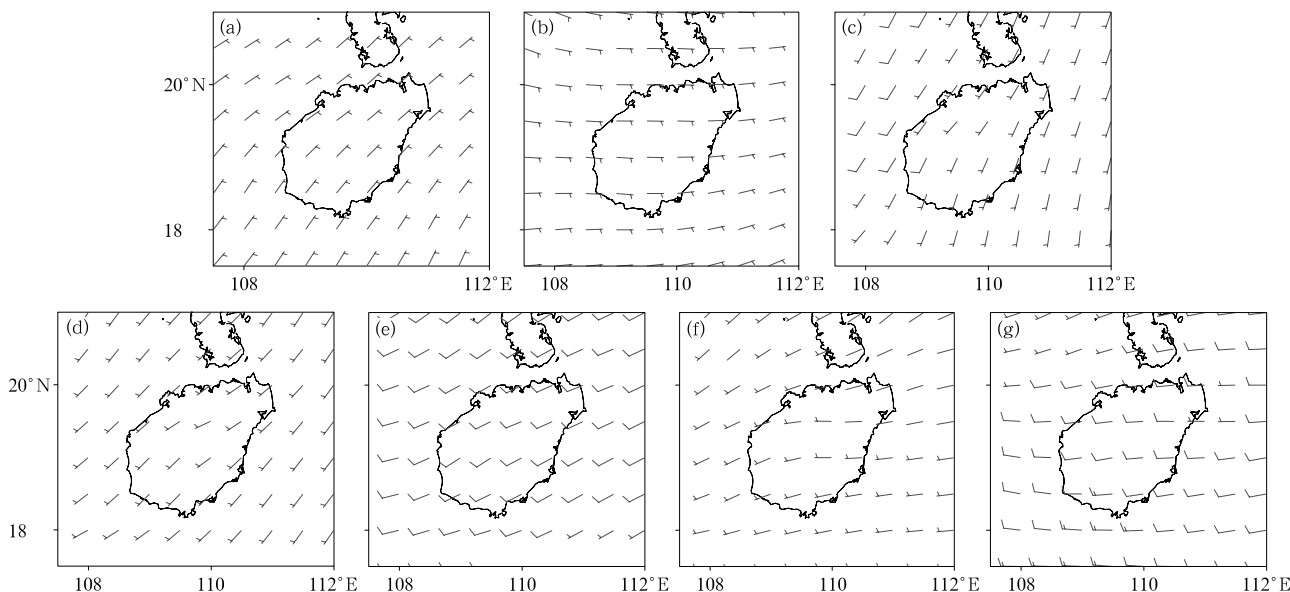


图 1 2019—2020 年海南岛暖季 7 类主要流场特征

(a)东北气流型,(b)偏东气流型,(c)偏南气流型,(d)南西南气流型,
(e)西南气流型,(f)西西南气流型,(g)偏西气流型

Fig. 1 Different flow patterns in the 2019—2020 warm season of Hainan Island

(a) northeast air flow pattern, (b) east air flow pattern, (c) south air flow pattern,
(d) south-southwest air flow pattern, (e) southwest air flow pattern,
(f) west-southwest air flow pattern, (g) west air flow pattern

表 1 7 类主要流场的影响天数

Table 1 Frequency of influence under seven different flow patterns

统计指标	东北气流	偏东气流	偏南气流	南西南气流	西南气流	西西南气流	偏西气流
样本量/d	22	31	47	65	69	60	33
比例/%	7	10	14	20	21	18	10

2.2 基于降水过程的时空检验

2.2.1 降水频率空间分布对比

图 2 反映了在不同流场条件下的实况和模式预报小时降水频率的空间分布差异。其中实况 $>5\%$ 的降水频率在不同流场下有一定的分布特点:即偏南气流背景下,分布在海南岛的西北部和中部;弱的南西南气流背景下,分布在海南岛的西部内陆、中部和东北部;强的西南气流背景下,分布在海南岛的东北部;弱的西西南气流下,分布在海南岛中部、南部和东部。对比三家数值模式的小时降水预报频率分布,可以看出三家模式基本反映了与实况一致的、不同流场下的降水频率空间分布,其中 CMA-SH9 和 CMA-GD 降水预报频率空间分布更加接近实况,但降水频率比实况明显偏多,CMA-GD 降水频率偏多

近 10%,而 CMA-MESO 降水频率与实况基本相当,但空间分布有所偏差。

2.2.2 平均小时降水强度对比

对于不同流场背景下的平均小时降水强度分布(图 3),CMA-GD 在偏南气流、南西南气流和西西南气流下平均小时降水强度预报的空间分布接近实况,对西南气流下的平均小时降水强度分布与实况差异最大,即对西南部和北部的降水预报偏弱,对东南部的降水预报偏强。CMA-SH9 的平均小时降水强度预报的空间分布与实况最相似,但是在南西南气流、西南气流和西西南气流下分别对海南岛的北部、东北部和东南部的降水强度预报偏强。CMA-MESO 平均小时降水强度在 $5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的降水多分布在海南岛西南部和中部山区,与实况空间分布差异较大。

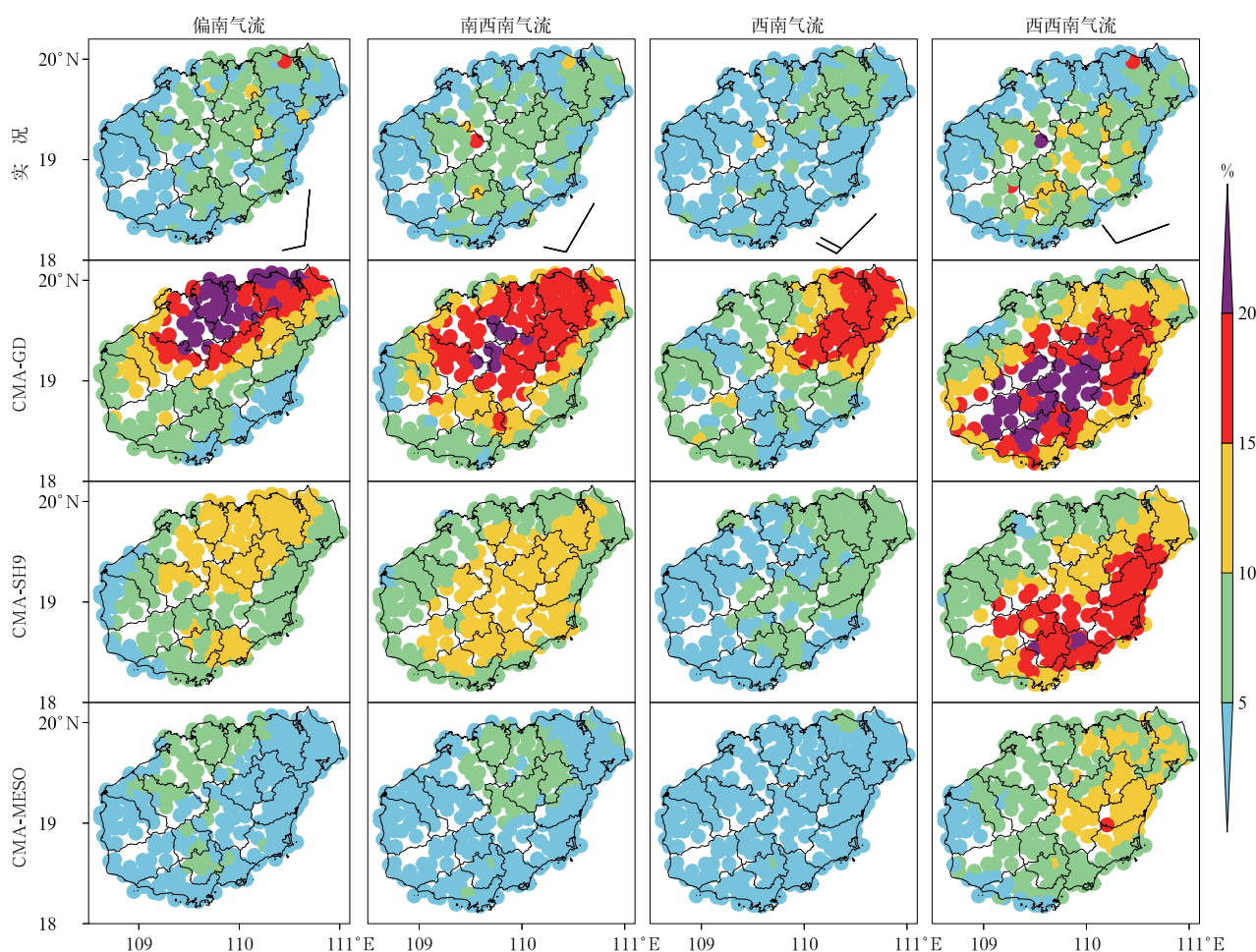


图2 2019—2020年海南岛暖季不同流型下实况、CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO小时降水频率分布对比

(图中,从上到下的四行,分别为实况、CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO模式预报;
从左到右的四列,分别为偏南气流、南西南气流、西南气流、西西南气流;下同)

Fig. 2 Comparison of hourly precipitation frequency distribution of observations, CMA-GD, CMA-SH9, CMA-MESO under different flow patterns in the 2019—2020 warm season of Hainan Island
(In the figure, the four lines from top to bottom are observation, CMA-GD, CMA-SH9 and CMA-MESO respectively; the four columns from left to right are respectively under south air flow, south-southwest air flow, southwest air flow and west-southwest air flow patterns. The same below)

2.2.3 平均降水量日变化对比

降水日变化受大气演变的不同动力和热力过程的共同影响,已成为衡量数值模式模拟性能的重要指标(Slingo et al, 2004; Dai, 2006)。图4反映了不同流型下CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO模式与实况的降水日变化特征,其中图4a是小时平均降水量沿着 109.6°E 的纬向-时间剖面,图4b是沿着 19.3°N 的经向-时间剖面,分别能表征海南岛南北向和东西向的降水日变化。在偏南气流和南西南气

流下,CMA-GD、CMA-SH9和CMA-MESO模式在南北向和东西向上均能预报出与实况相似的降水日变化,但是CMA-GD和CMA-SH9的小时平均降水强度比实况偏强,CMA-MESO在偏南气流下平均降水强度偏弱;在西南气流下,CMA-SH9预报的降水日变化与实况最接近,CMA-GD对海南岛中部地区的平均降水预报比实况偏强,且降水峰值多出现在05—09时,结合图2和图3也反映了该模式容易在海南岛中部地区的降水空报,而CMA-MESO

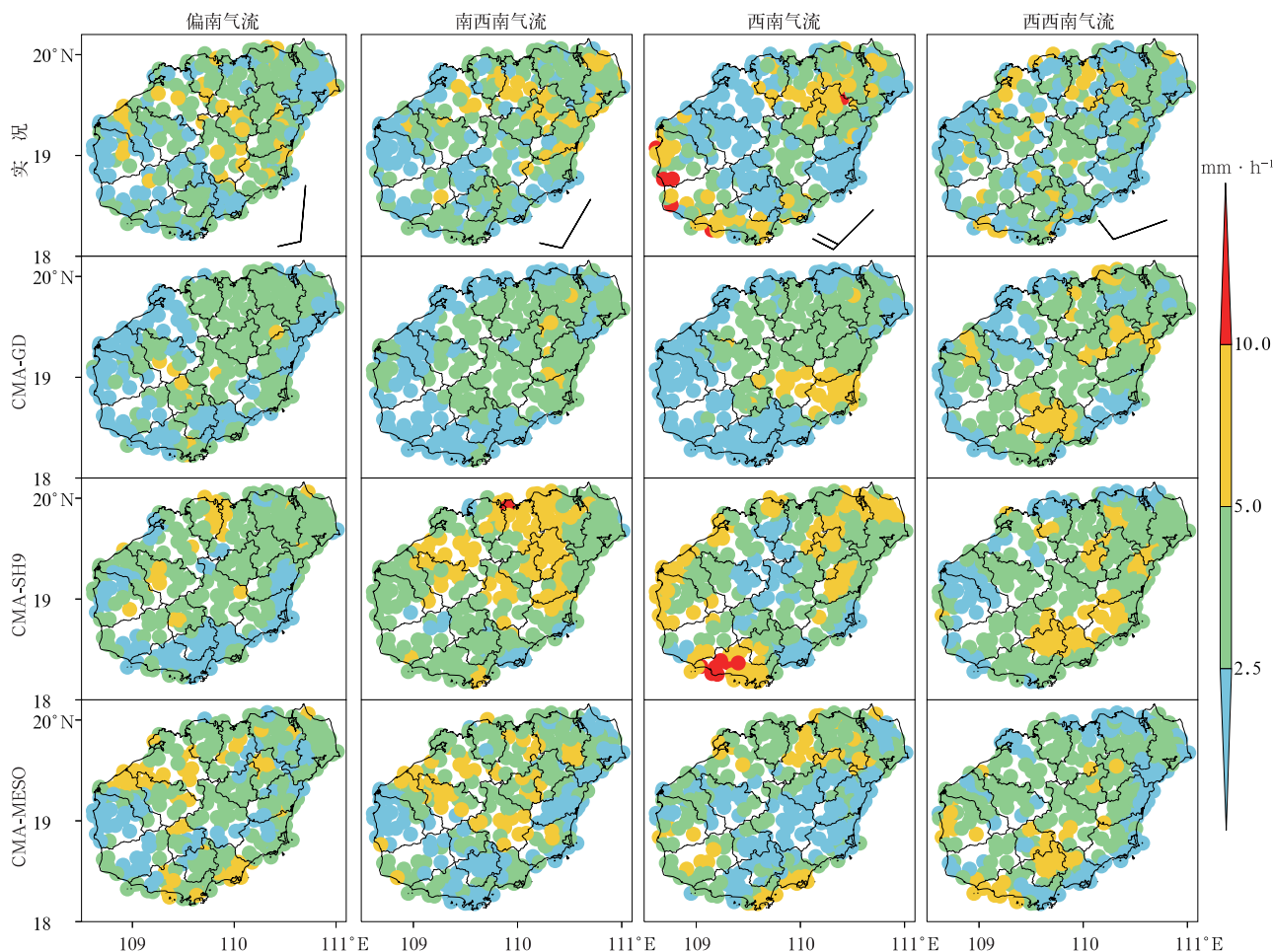


图 3 2019—2020 年海南岛暖季不同流型下实况、CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO 小时平均降水强度分布对比

Fig. 3 Comparison of hourly average precipitation intensity distribution of observation, CMA-GD, CMA-SH9, CMA-MESO under different flow patterns in the 2019–2020 warm season of Hainan Island

在南北向上能反映出海南岛南部的降水日变化,但降水峰值时间比实况提前;在西南气流下,三家数值模式在南北向和东西向上小时平均降水强度均比实况偏强,特别是 CMA-SH9,另外,三家模式在南北向上降水中心较实况偏南,在东西向上较实况偏东,降水峰值时间略偏晚。总体而言,三家数值模式均能反映海南岛暖季的降水日变化,即北部、西部、中部和东部的平均降水峰值时间多分布在 14—20 时,南部的平均降水峰值时间分布在 06—11 时,这种降水日变化分布与海南岛海陆风和背景风场的相互作用密切相关(Zhu et al, 2017; 2020),但是数值模式预报在降水强度、落区和时间上存在一定偏差。

2.2.4 降水起止和峰值时间对比

图 5 是实况降水最易开始时间及其三家模式预报的平均时间偏差对比。可以看出实况降水开始时间的空间分布随背景风场呈现出一定的规律:从偏南气流型逐渐顺转到西西南气流型,海南岛南部降水开始时间多发生在凌晨,北部降水开始时间多发生在中午至傍晚时段,这也和海南岛降水日变化一致。但是由于背景风的差异,在风速较小的偏南和南西南气流型下,凌晨降水的区域主要分布在海南岛东南部;在风速较大的西南气流和偏西气流型下,凌晨降水的区域则分布在海南岛的西南部;在西西南气流型下,南部的降水开始时间相对偏晚,多在中

午时段;对于中午到傍晚时段发生在北部的降水随着背景风的顺转,降水区域也由西北部逐渐转为东北部。对比三家数值模式的平均时间预报偏差,虽然总体上平均比实况偏早1~3 h,但是不同模式在不同流型下偏差幅度有差异。

图6和图7是实况降水峰值时间和降水最易结束时间同三家模式预报的时间偏差对比。同实况降水开始时间分布相似,降水峰值时间多在降水开始后的2~3 h内达到峰值,三家模式的降水预报峰值时间总体比实况略偏早1~2 h,而实况降水结束时

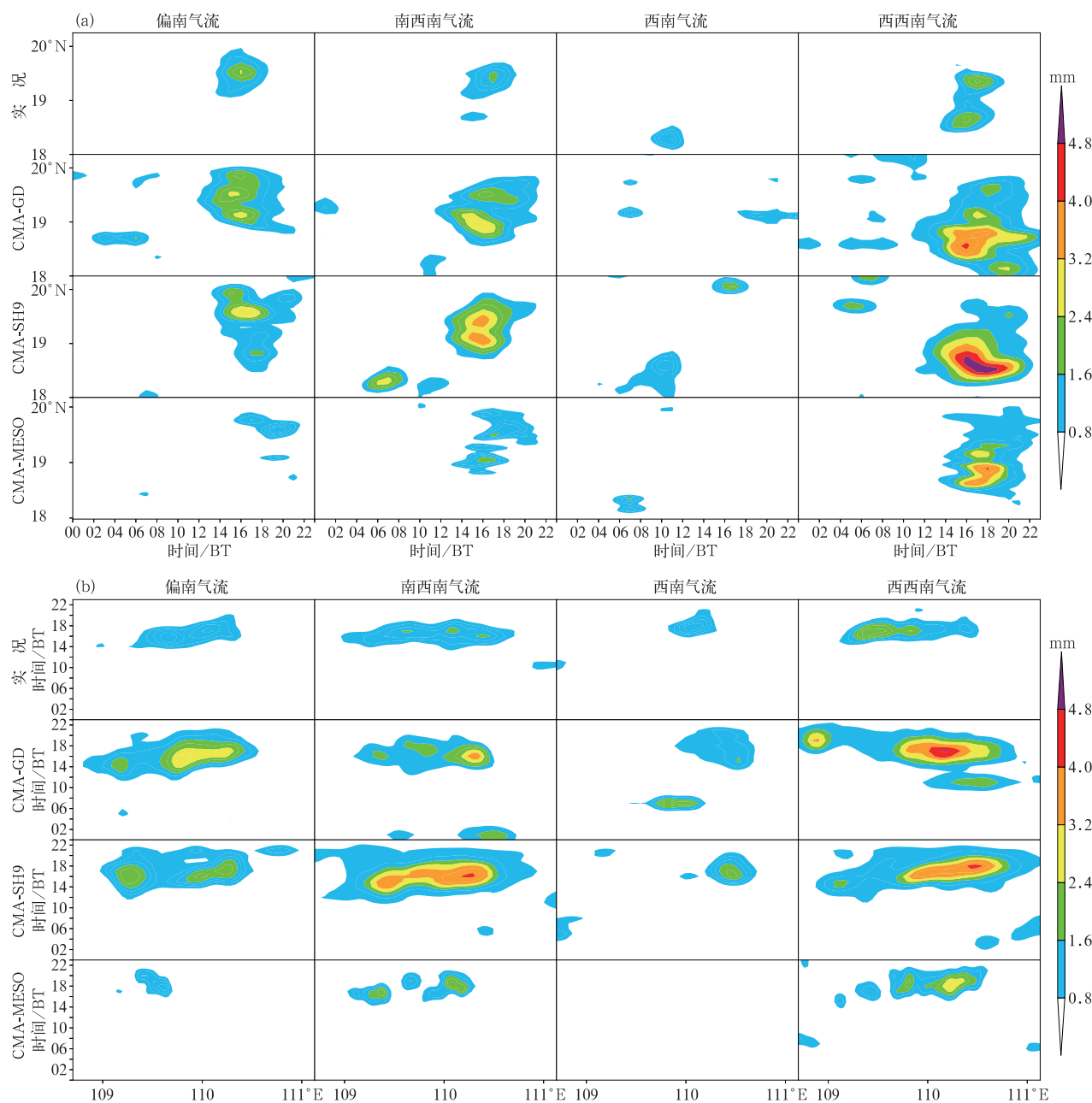


图4 2019—2020年海南岛暖季不同流型下实况、CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO小时平均降水对比

(a)沿109.6°E的纬度-时间剖面,(b)沿19.3°N的经度-时间剖面

Fig. 4 Comparisons of hourly average precipitation of observation, CMA-GD, CMA-SH9, and CMA-MESO under different flow patterns in the 2019–2020 warm season of Hainan Island

(a) latitude-time profiles along 109.6°E, (b) longitude-time profiles along 19.3°N

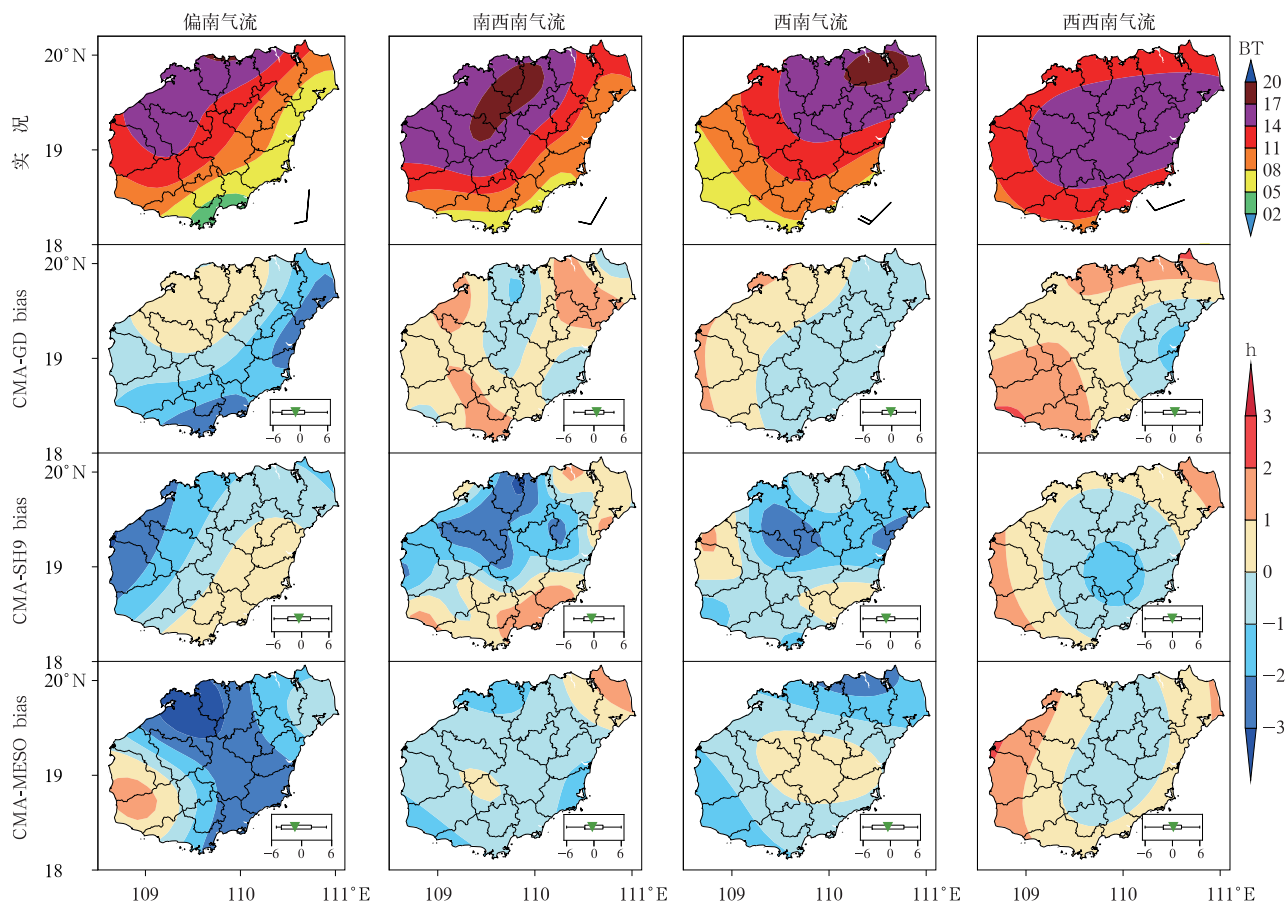


图 5 2019—2020 年海南岛暖季不同流型下实况降水最易开始时间分布
及与 CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO 时间偏差对比

Fig. 5 Distribution of the easiest start time of observed precipitation and
its comparison with the time deviations of CMA-GD, CMA-SH9, and
CMA-MESO under different flow patterns in the 2019–2020
warm season of Hainan Island

间大多数也在降水达到峰值后的 1~3 h 内结束,说明海南岛暖季的降水持续时间多在 3~6 h 内(吴俞等, 2021),三家模式的降水结束时间比实况总体偏晚 1~3 h。

2.3 数值模式在不同流型下要素预报偏差对比

上文分析了模式的小时降水预报偏差时空特征,本节尝试探讨预报偏差的可能来源。针对降水形成的水汽、不稳定和动力抬升等基本条件,侧重于分析 08 时海口站探空观测资料,并对比分析不同流场背景下的 CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO 的探空要素预报偏差(图 8)。

(1)偏南气流型:实况探空在低层存在弱的对流抑制能量(CIN),自由对流高度(LFC)高度接近 800 hPa,抬升凝结高度(LCL)较低(975 hPa 左右),整层大气以偏南风为主,对流有效位能(CAPE)和温度露点差(T_d)较大。对比各家模式预报,发现 CMA-GD 温湿廓线和状态曲线的分布最接近实况,但中高层相对偏湿,500 hPa 以上的风向、风速偏差较大;CMA-MESO 预报性能与 CMA-GD 相似,但更为偏湿;CMA-SH9 的 CAPE 预报值明显偏大,近地层水汽接近饱和,400 hPa 以下的温度露点差预报明显偏小,大气层结更加不稳定,风向预报明显偏西,中高层风向偏差大。

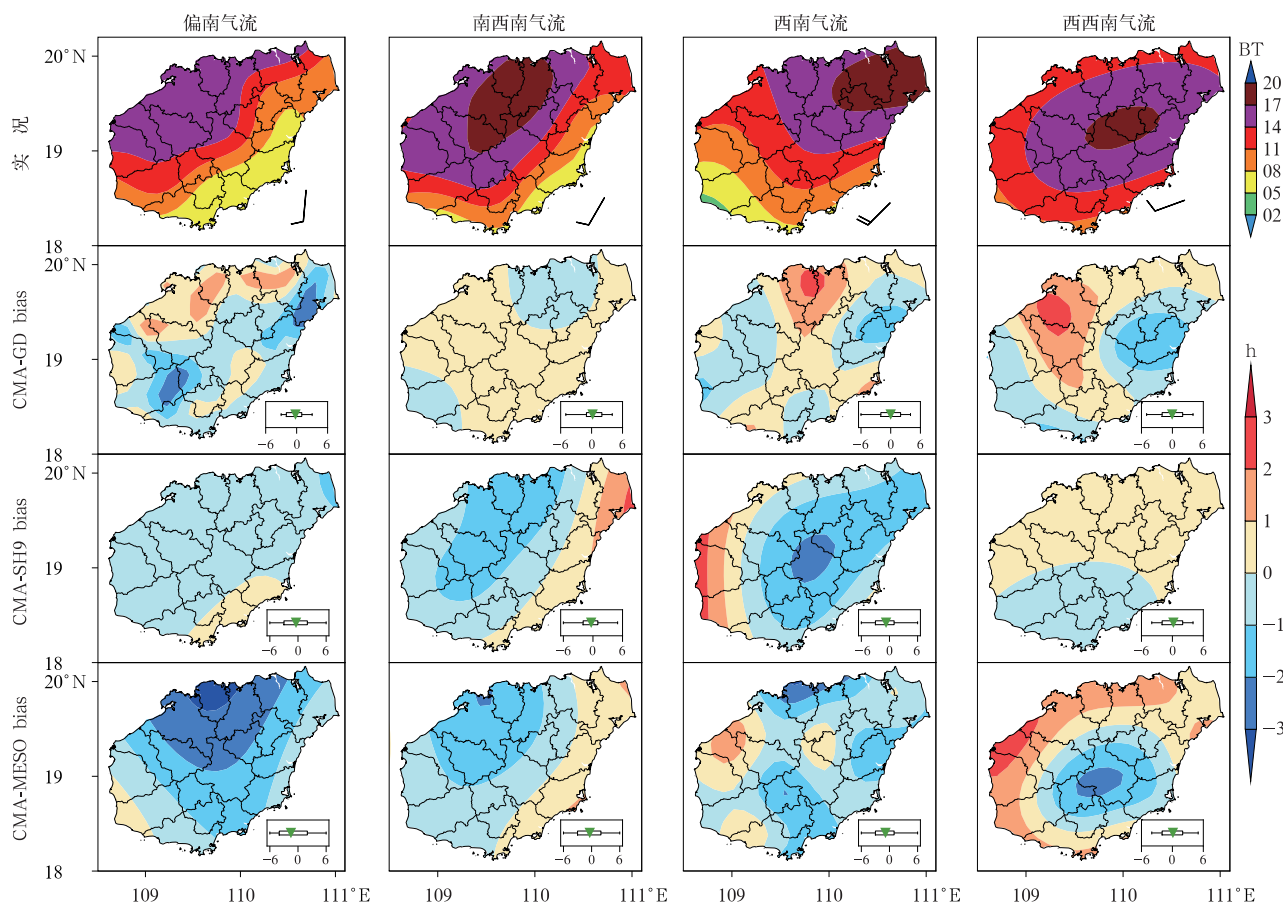


图6 2019—2020年海南岛暖季不同流型下实况降水峰值时间分布及与CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO时间偏差对比

Fig. 6 Distribution of the peak time of observed precipitation and its comparison with the time deviations of CMA-GD, CMA-SH9, and CMA-MESO under different flow patterns in the 2019—2020 warm season of Hainan Island

(2)南西南气流型、西南气流型和西西南气流型:该3类气流型的实况探空廓线较相似,表现为近地层存在逆温,有一定的CIN,CAPE值较小,以及LCL较低。模式探空预报均未反映近地层逆温特征,CMA-GD和CMA-MESO模式的CIN值预报偏小,CAPE值预报偏大,温度露点差预报偏小,高层风预报偏差较大;CMA-SH9的CAPE预报值明显偏大,CIN预报值接近零值,近地层水汽接近饱和,中高层风向预报偏差大。

总体而言,不同的数值模式在不同流型下有各自的预报偏差特点。CMA-GD和CMA-MESO的温度层结曲线和状态曲线预报较为接近实况,但露点温度预报值整体偏大,尤其是CMA-MESO的偏

湿特征更为明显,主要体现在高层露点温度预报值较大;CMA-SH9模式的CAPE预报值明显偏大,且中高层风向预报偏差较大。在暖季的南西南到西西南环境背景风条件下,各家模式均未能反映08时实况近地层逆温层结。各家模式08时即预报了一定的CAPE值,且水汽条件预报偏湿,对应其降水预报总是提前及降水持续时间偏长,与实况海南岛昼间地面加热升温使CAPE升高、降水在午后海陆风辐合触发下发生(张振州等,2014)存在一定的偏差。

海陆风是海南岛暖季降水的主要触发机制,因此,针对模式10 m风场和平均散度预报场进行检验,进一步分析模式昼间和夜间降水预报偏差的原因。

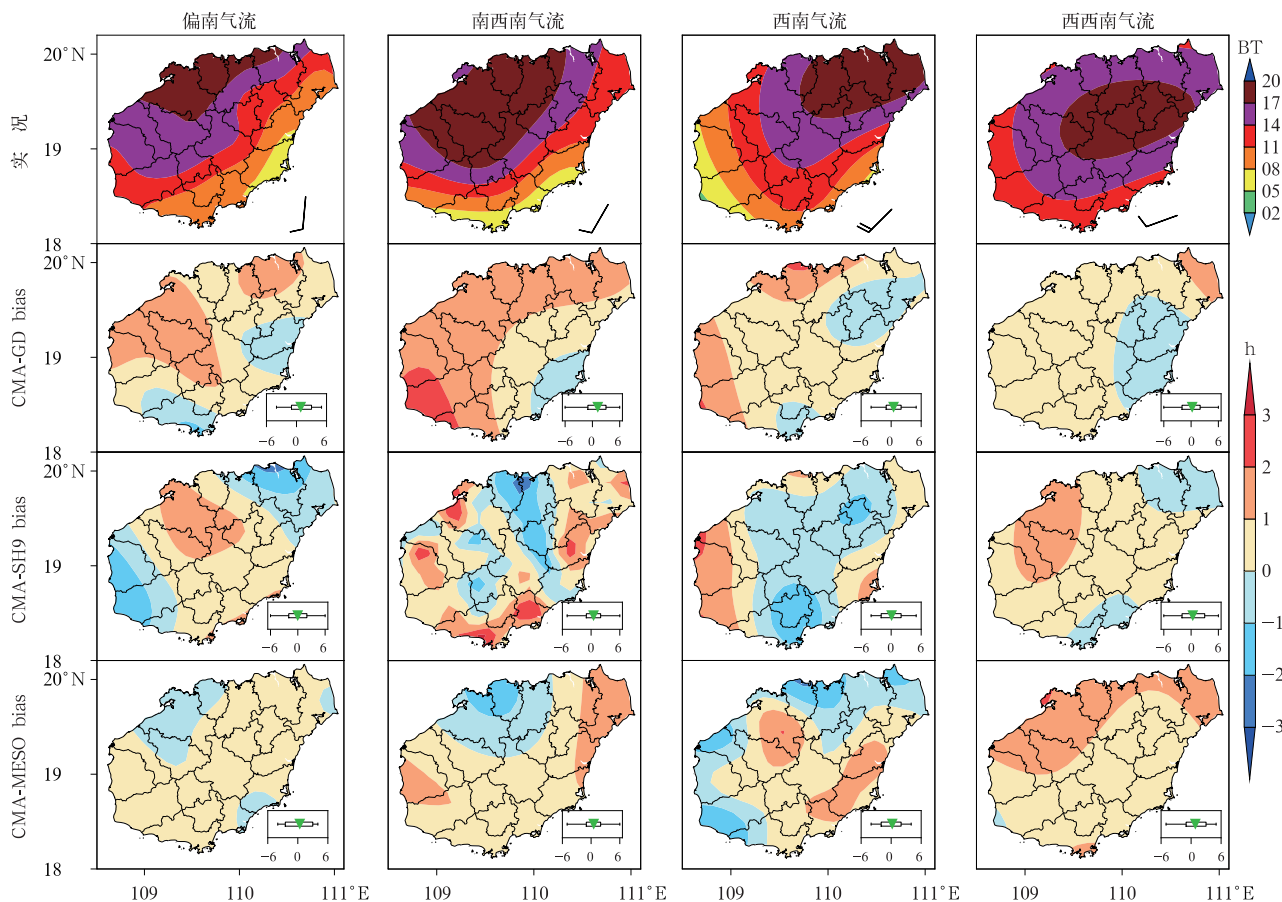


图 7 2019—2020 年海南岛暖季不同流型下实况降水最易结束时间分布及与 CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO 时间偏差对比

Fig. 7 Distribution of the easiest ending time of observed precipitation and its comparison with the time deviations of CMA-GD, CMA-SH9, and CMA-MESO under different flow patterns in the 2019—2020 warm season of Hainan Island

(1)昼间(14时,图9),实况10 m风场海陆风辐合主要分布在海南岛西部和北部沿海,而三家数值模式的北部沿海海陆风辐合强度预报偏强,特别是CMA-SH9模式,与该模式降水强度明显偏强特征一致;在南西南到西西南气流背景下,模式的海南岛东北部海陆风辐合较实况偏强,CMA-GD和CMA-SH9此类偏差特征最为明显,与CMA-GD和CMA-SH9模式的东北部地区降水偏多特征相对应;另外,在西西南气流背景下,尽管实况显示北部地区海陆风辐合强度较弱,但辐合区位置更加深入内陆地区,相比之下,CMA-GD和CMA-SH9因西北部海风预报偏强导致辐合区比实况偏南、偏东,降水预报落区也相应比实况偏南、偏东;CMA-MESO

的10 m风预报偏差主要体现在海南岛西南部和中部山区,在沿背景风方向上,海南岛西南部和中部山区存在偏强的风速辐合,对应该模式在这些地区的降水预报强度比实况偏强。

(2)夜间(02时,图10),实况海陆风辐合带主要分布在海南岛南部沿海,其随着背景风依次顺转,由东南部沿海顺转为西南部沿海。CMA-GD的南部沿海海陆风辐合带强度与实况基本相当,但分布较实况偏西,与该模式西南部沿海降水频次预报偏多相对应;CMA-SH9的南部沿海辐合带分布与实况相对接近,但在偏南和南西南气流背景下,辐合带倾向于分布在东南沿海,近海风向预报较实况偏东,与该模式的东南沿海降水频次偏多相一致;CMA-MESO南

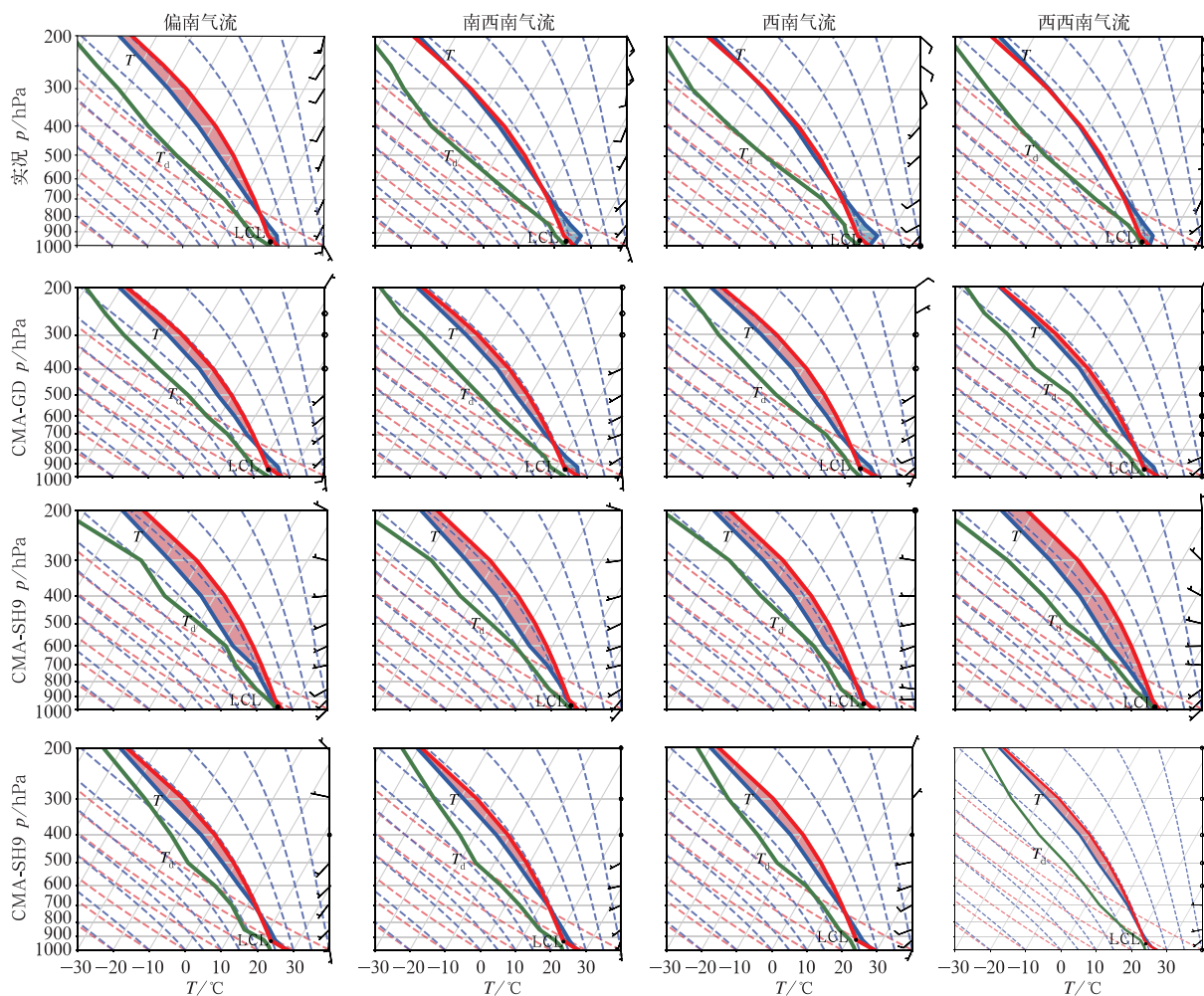


图8 2019—2020年海南岛暖季不同流型下海口站08时的平均实况

探空同 CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO 预报的对比

Fig. 8 Comparison of the average sounding at 08:00 BT at Haikou Station between observations and the CMA-GD, CMA-SH9, CMA-MESO forecasts under different flow patterns in the 2019—2020 warm season of Hainan Island

部沿海辐合带预报总体偏弱,夜间辐合区主要分布在西南部和中部山区,与该模式在这些地区降水偏强相对应。

3 结论与讨论

应用面向降水过程的时空检验方法,评估了 CMA-GD、CMA-SH9 和 CMA-MESO 数值模式对 2019—2020 年海南岛暖季小时降水预报的时空偏差,结果表明:

(1)三家模式均能捕捉不同流场下的降水空间分布形态,但降水频率总体偏多,其中 CMA-GD 的

降水预报偏多近 10%;在平均小时降水强度预报方面,CMA-SH9 的空间分布更接近实况,但降水强度略偏强,CMA-GD 对西南气流下的平均小时降水强度分布与实况差异最大,即对西南部和北部的降水预报偏弱,对东南部的降水预报偏强,CMA-MESO 雨强在 $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的降水多分布在西南部和中部山区,与实况空间分布差异较大。

(2)三家模式均能反映海南岛暖季逐小时降水日变化特征,其中,CMA-GD 和 CMA-SH9 的小时平均降水强度较实况偏强约 $2 \sim 4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;三家数值模式的降水最易开始和降水峰值的时间总体比实况偏早 1~3 h,而降水最易结束时间总体上比实

况偏晚 1~3 h。

(3)考察不同流场背景下模式的海口单点探空气象要素预报性能,CMA-GD 和 CMA-MESO 的温度层结和状态曲线预报最接近实况,但是露点温度层结曲线预报整体大于实况(即偏湿),其中,CMA-MESO 中高层更偏湿,CMA-SH9 的 CAPE 预报值和中高层风向预报偏差偏大;在暖季南西南到西西南风背景下,三家模式均未能反映 08 时实况探空的近地层逆温层结,此外,各家模式 08 时即预报了一定的 CAPE 值,且水汽条件预报偏湿,对应其降水预报总是提前及降水持续时间偏长。

(4)海陆风是海南岛暖季降水发生的主要触发机制,因此主要考察了模式的 10 m 风场预报性能,三家模式的昼间海南岛北部沿海的海陆风辐合带预报偏强,CMA-SH9 尤为明显,与该模式降水强度明显偏强特征一致,在西西南气流型下,CMA-GD 和 CMA-SH9 因辐合带位置偏南、偏东导致降水偏南、偏东;夜间海陆风辐合带主要分布在南部沿海,其中 CMA-GD 预报的辐合带比实况偏长偏西,与该模式西南部沿海降水频次预报偏多相对应;CMA-MESO 在海南岛西南部和中部山区存在偏强的风速辐合,其降水预报也相应偏强。

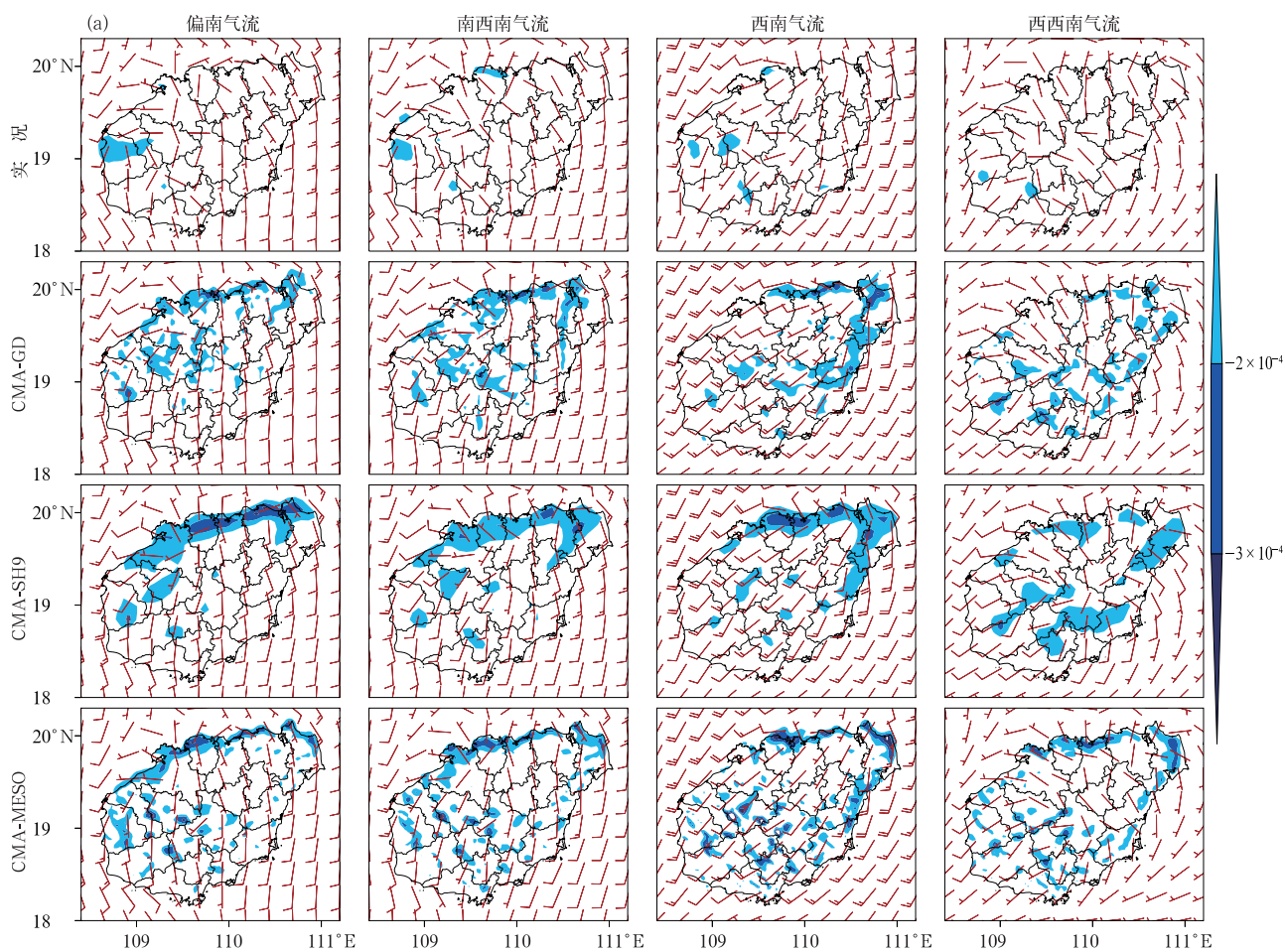


图 9 2019—2020 年海南岛暖季不同流型下 14 时 CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO 模式预报和实况的 10 m 风和散度(填色, $\leq -10^{-4} \text{ s}^{-1}$)平均场分布对比
Fig. 9 Comparison of 14:00 BT forecasted and observed 10 m wind and divergence (colored, $\leq -10^{-4} \text{ s}^{-1}$) mean field distribution of CMA-GD, CMA-SH9, and CMA-MESO models under different flow patterns in the 2019–2020 warm season of Hainan Island

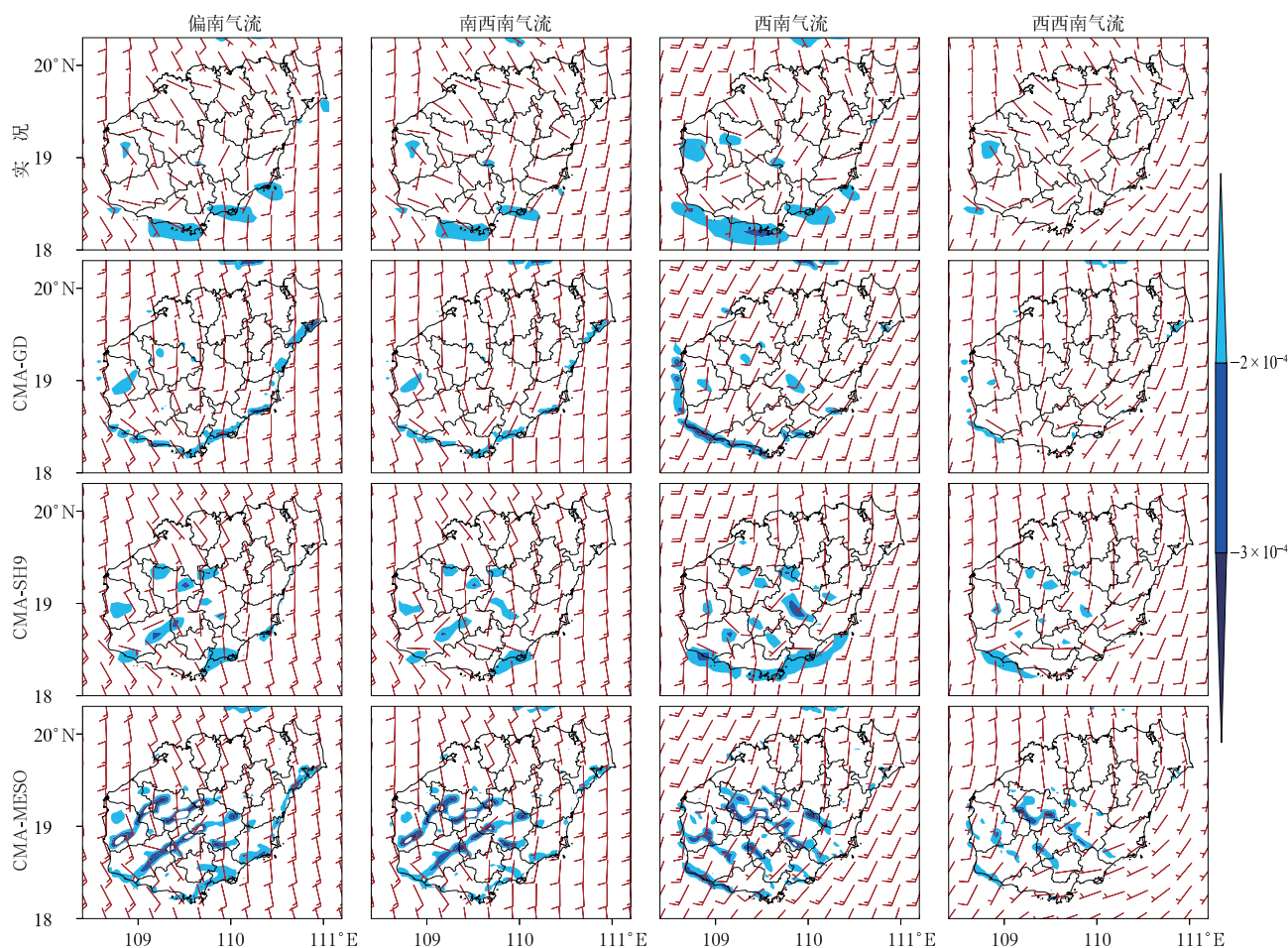


图10 同图9,但为02时

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for 02:00 BT

本文以小时降水为评估对象,针对中尺度高分辨率模式降水预报进行了检验评估,给出了模式日内降水预报的时空偏差特征及误差的可能来源,可为高分辨率数值预报产品应用和偏差订正提供详细的参考依据。未来,将针对地形影响下模式对海南岛小时降水的预报偏差,以及暖季中模式对海南岛小时降水传播、演变等预报偏差进行深入研究。

致谢:感谢中国气象局数值预报中心陈法敬高工提供和处理 CMA-MESO 模式数据。

参考文献

陈子通,徐道生,戴光丰,等,2020. 热带高分辨率模式(TRAMS-V3.0)技术方案及其系统预报性能[J]. 热带气象学报,36(4):444-454. Chen Z T, Xu D S, Dai G F, et al, 2020. Technical scheme and operational system of tropical high-resolution model (TRAMS-V3.0)[J]. J Trop Meteor, 36(4):444-454 (in Chinese).

甘玉婷,2020. 泰山地区暖季小时尺度降水特征及预报评估[D]. 北京:中国气象科学研究院. Gan Y T, 2020. The characteristics of hourly precipitation during warm seasons and its forecast evaluation in Mountain Tai Area[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).

李妮娜,2020. 中国降水模拟的小时尺度精细化评估[D]. 北京:中国气象科学研究院. Li N N, 2020. Hourly-scale evaluation of precipitation simulation in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).

李玉梅,李勋,冯文,等,2016. 秋季西沙非台风强降水天气形势分析[J]. 气象,42(8):934-943. Li Y M, Li X, Feng W, et al, 2016. Investigation of the synoptic situation associated with autumnal Non-TC heavy precipitation in Xisha[J]. Meteor Mon, 42(8):934-943 (in Chinese).

李玉梅,李勋,周方聪,2020. 海南岛冷空气降水天气形势差异分析[J]. 气象与环境学报,36(1):43-50. Li Y M, Li X, Zhou F C, 2020. Analysis of the background differences of precipitation influenced by cold air in Hainan Island[J]. J Meteor Environ, 36(1):43-50 (in Chinese).

- 苏锦兰,张万诚,宋金梅,等,2021. 云南小时降水的时空分布变化研究[J]. 气象,47(2):133-142. Su J L, Zhang W C, Song J M, et al,2021. Temporal and spatial distribution of hourly precipitation in Yunnan[J]. Meteor Mon,47(2):133-142(in Chinese).
- 王静,2015. 海南岛海陆风演变特征的观测分析研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Wang J,2015. The analysis study on characteristics of sea/land breeze over the Hainan Island[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 王莹,苗峻峰,苏涛,2018. 海南岛地形对局地海风降水强度和分布影响的数值模拟[J]. 高原气象,37(1):207-222. Wang Y, Miao J F, Su T,2018. A numerical study of impact of topography on intensity and pattern of sea breeze precipitation over the Hainan Island[J]. Plateau Meteor,37(1):207-222(in Chinese).
- 吴俞,冯箫,李勋,等,2021. GRAPES_GZ 3 km 模式对 2019 年海南岛暖季非台风降水预报的时空检验[J]. 热带气象学报,37(4):633-646. Wu Y, Feng X, Li X, et al,2021. Evaluation of spatio-temporal parameters of forecasts from GRAPES_GZ 3 km model: with specific reference to non-typhoon precipitation during the warm season in 2019 in Hainan Island[J]. J Trop Meteor,37(4):633-646(in Chinese).
- 徐同,杨玉华,李佳,等,2019. SMS-WARMS V2.0 模式对中国西南地区降水预报能力的客观检验[J]. 气象,45(8):1065-1074. Xu T, Yang Y H, Li J, et al,2019. An objective verification of forecasting ability of SMS-WARMS V2.0 model precipitation in Southwest China[J]. Meteor Mon,45(8):1065-1074 (in Chinese).
- 曾鹏,钟利华,郑凤琴,等,2021. 基于智能网格降水产品的降尺度释用技术研究[J]. 气象研究与应用,42(1):74-79. Zeng P, Zhong L H, Zheng F Q, et al,2021. Research on downscaling interpretation technology based on intelligent grid precipitation products[J]. J Meteor Res Appl,42(1):74-79(in Chinese).
- 张宏芳,巨晓璇,卢珊,等,2019. 精细化网格的降水预报解析方法对比[J]. 气象科技进展,9(3):7-14. Zhang H F, Ju X X, Lu S, et al,2019. Comparison of parsing methods for fine grid precipitation forecasting[J]. Adv Meteor Sci Technol,9(3):7-14 (in Chinese).
- 张小雯,唐文苑,郑永光,等,2020. GRAPES_3 km 数值模式对流风暴雨预报能力的多方法综合评估[J]. 气象,46(3):367-380. Zhang X W, Tang W Y, Zheng Y G, et al,2020. Comprehensive evaluations of GRAPES_3 km numerical model in forecasting convective storms using various verification methods[J]. Meteor Mon,46(3):367-380(in Chinese).
- 张振州,蔡旭晖,宋宇,等,2014. 海南岛地区海陆风的统计分析和数值模拟研究[J]. 热带气象学报,30(2):270-280. Zhang Z Z, Cai X H, Song Y, et al,2014. Statistical characteristics and numerical simulation of sea land breezes in Hainan Island[J]. J Trop Meteor,30(2):270-280(in Chinese).
- Chen H M, Yu R C, Li J, et al,2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River Valley[J]. J Climate,23(4):905-917.
- Dai A G,2006. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models[J]. J Climate,19(18):4605-4630.
- Dai A G, Trenberth K E, Karl T R,1999. Effects of clouds, soil moisture, precipitation, and water vapor on diurnal temperature range[J]. J Climate,12(8):2451-2473.
- Li J,2018. Hourly station-based precipitation characteristics over the Tibetan Plateau[J]. Int J Climatol,38(3):1560-1570.
- Li J, Yu R C,2014. A method to linearly evaluate rainfall frequency-intensity distribution[J]. J Appl Meteor Climatol,53(4):928-934.
- Liang X Z, Li L, Dai A G, et al,2004. Regional climate model simulation of summer precipitation diurnal cycle over the United States[J]. Geophys Res Lett,31(24):L24208.
- Slingo A, Hodges K I, Robinson G J,2004. Simulation of the diurnal cycle in a climate model and its evaluation using data from Meteosat 7[J]. Quart J Roy Meteor Soc,130(599):1449-1467.
- Yu R C, Li J, Chen H M, et al,2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. J Meteor Res,28(5):877-902.
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al,2007a. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China[J]. Geophys Res Lett,34(13):L13703.
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al,2007b. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. Geophys Res Lett,34:L01704.
- Yuan W H, Yu R C, Zhang M H, et al,2012. Regimes of diurnal variation of summer rainfall over subtropical East Asia[J]. J Climate,25(9):3307-3320.
- Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al,2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: a comparison of satellite data with rain gauge observations[J]. J Climate,21(16):3997-4010.
- Zhu L, Chen X C, Bai L Q,2020. Relative roles of low-level wind speed and moisture in the diurnal cycle of rainfall over a tropical island under monsoonal flows[J]. Geophys Res Lett,47(8):e2020GL087467.
- Zhu L, Meng Z Y, Zhang F Q, et al,2017. The influence of sea- and land-breeze circulations on the diurnal variability in precipitation over a tropical island[J]. Atmos Chem Phys,17(21):13213-13232.

(本文责编:戴洋)