

张帅,吴捷,陈敏,等,2024. CMA-BJ 系统总云量预报性能检验评估[J]. 气象,50(9):1057-1070. Zhang S, Wu J, Chen M, et al, 2024. Verification and evaluation of total cloud cover prediction performance of CMA-BJ[J]. Meteor Mon, 50(9):1057-1070 (in Chinese).

CMA-BJ 系统总云量预报性能检验评估*

张 帅^{1,2} 吴 捷^{3,4} 陈 敏^{1,2} 仲跻芹^{1,2} 黄向宇^{1,2} 卢 冰^{1,2} 杨 扬^{1,2}

1 北京城市气象研究院,北京 100089

2 中国气象局城市气象重点开放实验室,北京 100089

3 中国气象局气候预测研究重点开放实验室,国家气候中心,北京 100081

4 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

提 要: 云是天气气候中最重要、最活跃的因子之一,对大气系统的辐射能量平衡和水分循环起到重要调制作用。对总云量进行有技巧的预报也为更好把握天气现象、预测光伏发电等新能源出力提供客观依据。中国气象局北京快速更新循环数值预报系统(CMA-BJ)可提供我国逐小时高分辨率总云量预报产品,本文采用时间尺度分离的方法对其预报性能开展系统性评估,并对误差来源进行分析,从而为产品释用和模式改进提供参考。结果表明,CMA-BJ 总体能够抓住总云量的空间分布以及日变化强度特征,在 1~24 h 时效预报和观测的总云量空间相关系数在各月均超过 0.6,但在冬季(1 月)对总云量和日变化强度存在较为明显的低估,全国平均云量负偏差达-0.133。随着预报时效的延长,模式对云量逐时变率的预报能力有所下降,预报第 1 至第 4 天的平均 TCC 分别为 0.470、0.409、0.355、0.315,有技巧的预报可维持至 48~72 h。诊断分析表明,模式中相对湿度偏小可能是造成总云量预报负偏差的主要来源之一,垂直速度预报偏差也是影响云量预报误差的重要原因。

关键词: 总云量, CMA-BJ, 性能评估

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.063001

Verification and Evaluation of Total Cloud Cover Prediction Performance of CMA-BJ

ZHANG Shuai^{1,2} WU Jie^{3,4} CHEN Min^{1,2} ZHONG Jiqin^{1,2}

HUANG Xiangyu^{1,2} LU Bing^{1,2} YANG Yang^{1,2}

1 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

2 CMA Urban Meteorology Key Laboratory, Beijing 100089

3 CMA Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Centre, Beijing 100081

4 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD),

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Cloud is one of the most important and active factors in weather and climate, and plays an important role in modulating the radiation-energy balance and water cycle of atmospheric system. The effective forecast of total cloud cover can lay a basis for better grasp of weather phenomena and prediction of new energy output such as photovoltaic power generation. The model CMA-BJ (Beijing Rapid Update Cycle System) can provide hourly high-resolution total cloud cover prediction products. In this paper, the prediction

* 国家重点研发计划(2021YFC3000901)、国家自然科学基金项目(42175052)、中国气象局重点创新团队(CMA2022ZD09)、中国气象局青年创新团队(CMA2024QN06)和北京市自然科学基金项目(8212027)共同资助

2023 年 10 月 14 日收稿; 2024 年 5 月 29 日收修定稿

第一作者:张帅,主要从事短期数值天气预报、陆面资料同化研究. E-mail:szhang@ium.cn

通讯作者:吴捷,主要从事短期气候预测研究. E-mail:wujie@cma.gov.cn

performance of CMA-BJ is systematically examined and evaluated by the time scale separation method, and the error sources are analyzed, so as to provide a reference for product interpretation and model improvement. The results show that the spatial distribution characteristics and diurnal variation intensity of total cloud cover can be well predicted by CMA-BJ. The pattern correlation coefficients between the CMA-BJ forecasted and observed total cloud cover with 1–24 h lead time are all greater than 0.6 in each month. However, the total cloud cover and diurnal variation intensity are significantly underestimated in winter (January), with the deviation of CMA-BJ reaching -0.133 . As the forecasting time increases, the prediction ability of CMA-BJ decreases, with the averaged TCC skills being 0.470, 0.409, 0.355 and 0.315 for the 1–4 d forecast, which means the skillful prediction can be maintained up to 48–72 hours. The diagnostic analysis shows that the low relative humidity in the model may largely contribute to the negative deviation in total cloud cover prediction. Besides, the bias of vertical velocity prediction is also an important reason for the cloud cover prediction error.

Key words: total cloud cover, CMA-BJ, performance evaluation

引 言

云是天气气候中最重要、最活跃的因子之一,它通过多种物理、化学和热力动力学过程,调节地球大气系统内部的辐射能量平衡(汪宏七和赵高祥,1994),并对水分循环起重要作用(王旻燕和王伯民,2009)。云的形成、演变及其在全球的分布决定着温度、水汽和降水等变量气候特征,在气候学研究中占有非常重要的地位(刘瑞霞等,2009;刘柏鑫和李栋梁,2018)。除此之外,当前精细化的天气预报和光伏等新能源发电对高分辨率精细化总云量的预报需求日益增长。因此,面向巨大的科学和经济社会需求,开展业务系统的总云量预报和性能检验(Mu-neer and Gul,2000)具有十分重要的意义。

数值模式作为云量模拟和预测的有力手段,相关学者基于数值模式在云量参数化方案优化(钱正安等,1992;钱云和钱永甫,1994;郑晓辉等,2013;赵晨阳等,2020)、非线性预测模型建立(赵文婧等,2016;熊秋芬等,2007;胡邦辉等,2009)、预报方法研发(赵中军等,2019)以及系统性误差诊断(王咏青等,2010)等多个方向进行了探索和研究。Smagorinsky(1959)首次提出基于云量与相对湿度的云量预报方法。Slingo(1980)根据大西洋地区的统计事实提出了云量和相对湿度的二次方关系式。钱正安等(1992)对 Slingo 的方案进行了修正,考虑了云量的纬度变化。钱云和钱永甫(1994)进一步研究指出,云的形成离不开大气的上升运动,通过相对湿度

初步确定云量还需考虑大气的垂直情况。但是,上述云量诊断方案中,并未把云的生成和演变纳入模式的动力框架作为一个整体考虑,云的形成、发展以及云的相态变化都缺乏相应的物理基础(谭超等,2013)。

近年来,新一代云量参数化方案将云微物理过程耦合到动力框架内进行显式预报,可直接模拟云物理过程的时空分布,具有较好的物理基础。其中, Xu and Randall(1996)基于 CRM(Cloud Resolving Model)模拟结果提出了 Xu-Randall 方案,该方案中云量通过云凝结水混合比(云水、云冰)、相对湿度等变量的函数计算得出,得到广泛应用。Lazarus et al(2003)以及 Chen et al(2023)指出 Xu-Randall 方案存在低估低云(<2 km)、高估高云的情况。郑晓辉等(2013)评估了 GRAPES_Meso(Global/Regional Assimilation and Prediction System)模式中基于 Xu and Randall(1996)修订的一种格点云量诊断方案,发现该方案主要针对层状云进行模拟,但对次网格尺度的对流云无法得以描述,导致总云量中积云量模拟偏少。上述工作大多聚焦于模式云量参数化方案的模拟性能分析,但对模式云量实际预测能力的检验和分析工作尚有不足。因此,亟待对模式的高分辨率云量预报性能进行全面检验评估,分析模式对各个时间尺度的预报能力,明确模式误差的来源,这对模式的改进和产品应用具有重要意义。

中国气象局北京快速更新循环数值预报系统 CMA-BJ(文中均指 CMA-BJ 2.0 版系统)提供中国区域近地面温度、降水、大风、辐射、总云量等变量的

高分辨率预报。诸多研究成果表明, CMA-BJ 对气温、降水等具备较好的预报效果(齐亚杰等, 2020; 甘玉婷等, 2021; 杨扬等, 2021; 张鑫宇等, 2021; 王在文等, 2023)。CMA-BJ 基于中尺度数值天气预报模式(WRF)开发, 云量诊断采用 Xu-Randall 方案, 其总云量预报产品的预测准确率尚未经过系统性评估, 其误差分布和可能成因也有待深入研究。因此, 有必要对该模式云量预报性能进行全面检验, 分析其误差来源, 为云量预报改进提供依据, 同时也为 CMA-BJ 近地面温度、辐射等变量的改进提供参考。

本文以站点观测和欧洲中期预报中心第五代大气再分析(ERA5)的云量数据为参考, 对 CMA-BJ 2020 年 1、4、7、10 月 20 时(北京时, 下同)起报 96 h 时效、空间分辨率 9 km 的总云量预报产品进行评估检验, 对比不同季节代表月中国范围内模式对总云量空间分布的把握能力, 具体讨论 CMA-BJ 对总云量日变化和变率的预报技巧, 并进一步通过对环流和水汽等要素的诊断分析, 揭示可能的误差来源。

1 资料与方法

1.1 站点观测验证数据

总云量是指各种高度和类型的云遮蔽天空的成数, 0 表示无云, 10 成表示完全云覆盖。目前, 总云量常见的观测手段包括基于全天空成像仪等仪器的自动观测和人工目视观测等。本文用于检验的总云量站点观测采用中国气象局国家级地面气象观测站逐小时总云量资料, 该观测资料由多源观测数据综合判识得到(中国气象局, 2020; 余万明等, 2022)。本文对观测数据进行严格的质量控制, 剔除时间不连续、观测次数稀疏的站点, 选取了 845 个稳定站点作为检验数据(图 1), 对 CMA-BJ 预报的 2020 年 1、4、7、10 月 20 时起报 96 h 时效逐小时总云量进行检验。本文涉及的地图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为 GS(2017)3320 的世界地图制作, 底图无修改。

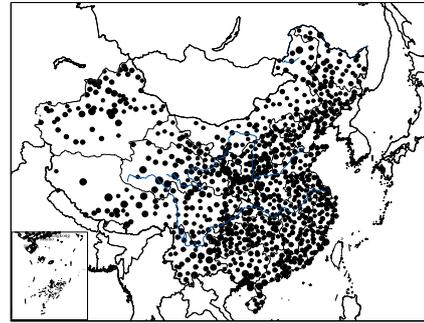


图 1 中国观测站点分布

Fig. 1 Distribution of observation stations in China

1.2 ERA5 再分析数据

为保证检验结果的可靠性以及便于开展进一步的误差诊断分析, 本文选取 ERA5 中的总云量数据作为对比验证数据。许启慧等(2023)验证了 0.25° 分辨率 ERA5 再分析云量数据在大气环境评估中的适用性, 认为该精度的 ERA5 数据可以用来替代实测云量进行大气环境评估的相关计算。同时, 张德杰等(2022)的分析也表明 ERA5 总云量与地面观测有较高的一致性。因此, 本文采用 ERA5 云量逐小时再分析资料作为检验的参考数据, 数据的空间分辨率为 0.25° × 0.25°, 通过双线性插值方法得到对应 845 个站点的 ERA5 云量值。此外, 本文还选取 ERA5 的 500 hPa 相对湿度、垂直速度作为诊断数据, 数据空间分辨率均为 0.25° × 0.25°。

1.3 CMA-BJ 云量预报方法

CMA-BJ 是基于 WRF 发展的区域数值天气预报系统, 具有 9 km 和 3 km 两种空间分辨率(陈敏等, 2023), 在北京降水以及温、湿度的精准预报中发挥了重要作用。系统物理过程方案采用 Thompson 云微物理方案(Thompson et al, 2008)、RRTMG 短波和长波辐射方案(Iacono et al, 2008)、YSU 边界层方案(Hong et al, 2006)、Noah 陆面模式(Chen and Dudhia, 2001)以及积云参数化方案 New Tiedtke scheme。

CMA-BJ 总云量预报采用由 Xu and Randall (1996)提出的云量计算方案[式(1)], 该诊断方法曾用于改进 NCEP 业务预报系统。该方案是一种云量诊断方案, 通过相对湿度和云凝结水混合比(云水、云冰)计算云量。具体公式如下:

$$C = \max \left\{ R^{0.25} \left[1 - \exp - \frac{2000(q_c - q_{\min})}{\min \{ \max \{ [(1-R)q^*]^{0.25}, 0.0001 \}, 1.0 \}} \right], 0.0 \right\} \quad (1)$$

式中: C 代表云量, q_c 代表云水或云冰, 其相态取决于局地温度和云顶温度。 q_{\min} 是 q_c 的最小阈值; R 为相对湿度, q^* 为饱和比湿。 q_c 主要受到平流、对流过程、降水以及蒸发速率等要素的影响。总云量叠加方法采用最大随机重叠, 该方案假定相邻两层云是最大重叠的(郑晓辉等, 2016)。经过 Lazarus and Krueger(1999; 2000)对 Xu-Randall 云量诊断方案的验证, 发现云凝结水混合比的偏差对云量诊断的影响较小, 而相对湿度偏小则是引起云量低估的潜在原因, 即云量对相对湿度比对云水云冰更加敏感。

1.4 数据预处理与评估指标

对 CMA-BJ 在 2020 年 1、4、7、10 月 20 时起报的 96 h 时效, 空间分辨率为 9 km 的总云量预报产品进行评估检验。当进行站点检验时, 将 CMA-BJ 总云量预报值双线性插值到对应的 845 个站点的经纬度上, 以此得到数值模式在站点位置的总云量值。

逐小时的云量数据包含多时间尺度的变率信息, 既包含较长时间尺度的平均态, 也包含日循环、小时变率等快变的时间尺度的信息。为了深入分析模式对各个尺度的把握和预测能力, 厘清模式误差的来源, 对小时云量按照式(2)进行了时间尺度分离, 并分别分析了各个尺度云量变化特征和模式预报能力。式(2)如下:

$$Y(h, d) = Y_M + Y_{DI}(h) + Y_{VA}(h, d) \quad (2)$$

式中: $Y(h, d)$ 代表某个站点的小时云量, h 代表小时, d 代表日期。以 2020 年 1 月为例, Y 共有 $24(h) \times 31(d)$ 个数值, h 取值 $1 \sim 24$, d 取值 $1 \sim 31$ 。 Y_M 代表月平均的云量(下标 M 代表 Mean), 即 $Y_M = \frac{1}{31 \times 24} \sum_{d=1}^{31} \sum_{h=1}^{24} Y(h, d)$, 由该月的整体气候特征决定, 也是最具可预报性的部分。 $Y_{DI}(h)$ 代表平均的云量日循环特征(下标 DI 代表 Diurnal), 即 $Y_{DI}(h) = \frac{1}{31} \sum_{d=1}^{31} [Y(h, d) - Y_M]$, 这部分由地域差异和大尺度环流背景决定, 也是可预报性相对较高的部分。 $Y_{VA}(h, d)$ 代表小时云量异常变率(下标 VA 代表 Variability), 即 $Y_{VA}(h, d) = Y(h, d) - Y_M - Y_{DI}(h)$, 这是由快变的天气系统决定的, 是预报最为重要和相对困难的部分。

为全面定量检验 CMA-BJ 总云量的预报性能, 参考世界气象组织(WMO)推荐的标准和方法, 本文选取偏差(BIAS)、均方根误差(RMSE)、空间距平相关系数(ACC)和时间相关系数(TCC)作为指

标进行客观评估。ACC 和 TCC 的取值范围均在 $-1 \sim 1$, 越接近于 1 表明技巧越高(吴捷等, 2017; 赵俊虎等, 2020)。评估指标的具体公式见式(3)~式(6)。

$$BIAS_n = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (X_{n,k} - Y_{n,k}) \quad (3)$$

$$RMSE_n = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (X_{n,k} - Y_{n,k})^2} \quad (4)$$

$$ACC_k = \frac{\sum_{n=1}^N (X_{n,k} - \bar{X}_k) \times (Y_{n,k} - \bar{Y}_k)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (X_{n,k} - \bar{X}_k)^2} \times \sqrt{\sum_{n=1}^N (Y_{n,k} - \bar{Y}_k)^2}} \quad (5)$$

$$TCC_n = \frac{\sum_{k=1}^K (X_{n,k} - \bar{X}_n) \times (Y_{n,k} - \bar{Y}_n)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (X_{n,k} - \bar{X}_n)^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^K (Y_{n,k} - \bar{Y}_n)^2}} \quad (6)$$

式中: n 为站点, N 为站点总数, $n=1, 2, \dots, N$; k 为预报样本, K 为预报总样本数, $k=1, 2, \dots, K$; $X_{n,k}$ 为第 n 个站点在第 k 次预报的模式预报值, $Y_{n,k}$ 为第 n 个站点在第 k 次预报的观测值; \bar{X}_k 和 \bar{Y}_k 分别为在第 k 次预报和观测所有点的空间平均值, \bar{X}_n 和 \bar{Y}_n 代表格点 n 的多次预报和观测的时间平均值。

为进一步厘清模式对云量的预报能力, 分析误差特征, 本文从月尺度总云量、云量日变化和云量小时变率三个方面进行检验, 分别评估模式对云量的基本态、日循环特征的把握能力和对逐时变率的预测技巧。检验内容包括:

(1) 检验模式对月平均总云量的刻画能力。选取每日 20 时起报的时效为 $1 \sim 24$ 、 $25 \sim 48$ 、 $49 \sim 72$ 和 $73 \sim 96$ h 的 24 h 平均值分别作为预报第 1、2、3、4 天的日平均总云量, 再对该月的各次预报进行月平均, 反映模式对月尺度总云量的刻画能力。

(2) 检验模式对云量日变化的反映能力。我国不同地区的云量变化具有明显的日循环特征, 本文采用各季节代表月(1、4、7、10 月)平均小时总云量的标准差计算云量日变化强度(刘奇和傅云飞, 2009), 如式(7)所示:

$$STD = \sqrt{\frac{1}{23} \sum_{h=1}^{24} [Y_{DI}(h) - Y_M]^2} \quad (7)$$

式中 STD 代表小时总云量的标准差, 其他符号意义同式(2)。分别对每日 20 时起报的时效为 $1 \sim 24$ 、 $25 \sim 48$ 、 $49 \sim 72$ 和 $73 \sim 96$ h 的结果进行计算, 作为模式在预报的第 1、2、3、4 天对云量日变化特征的反映。

(3) 检验模式对云量逐时变率的预报能力。按照式(2)计算云量的小时异常变率,其主要受到快变的天气系统影响。可通过 TCC、ACC 等指标反映模式对云量逐时变率的预报能力。

2 2020 年 CMA-BJ 总云量预报性能检验

2.1 模式对月尺度总云量预报能力和偏差

首先分析模式在不同季节和预报时效下对月尺

度平均总云量的把握能力和预报偏差。如图 2 所示,观测中不同月份云量的空间分布具有明显的季节特征,模式基本能够把握云量整体的空间分布和季节性差异,各季节代表月在 1~24 h 预报时效的日平均总云量和观测的 ACC 均超过 0.6。同时,模式误差也具有季节性差异,1、4、7、10 月的云量偏差分别为 -0.133、0.002、0.046 和 -0.051。具体而言,1 月模式能够刻画出长江流域云量较多的特征,但较大幅度地低估了东北、华南以及西部地区的云量;4 月模式较好地反映了西南地区云量较多的特征,且整体偏差较小,与观测的 ACC 技巧超过 0.84;

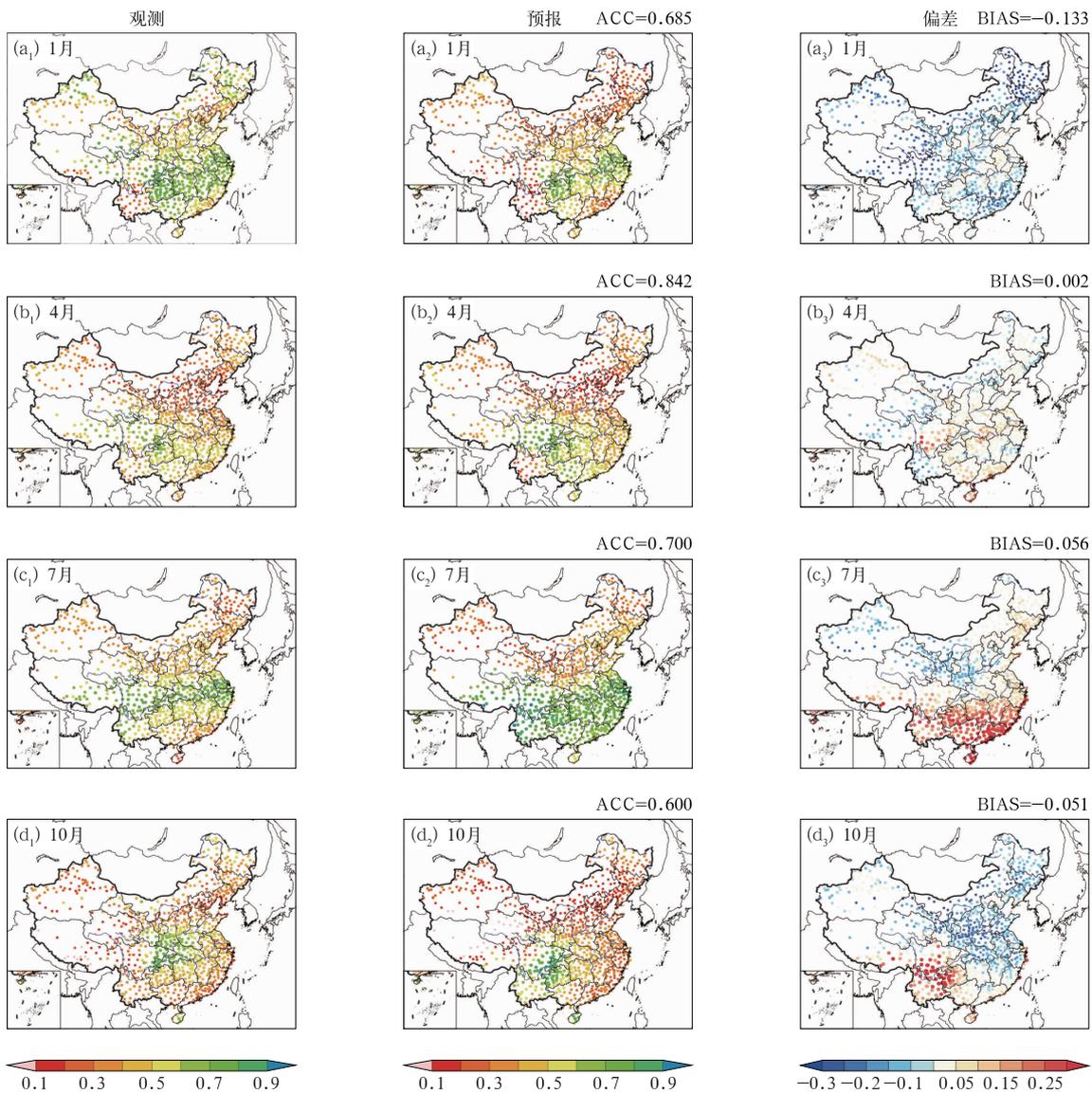


图 2 2020 年 1、4、7、10 月 ($a_2 \sim d_2$) CMA-BJ 20 时起报 1~24 h 预报和 ($a_1 \sim d_1$) 对应的站点观测日平均总云量以及 ($a_3 \sim d_3$) 二者偏差的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the daily total cloud cover ($a_2 \sim d_2$) forecasted by CMA-BJ with 1-24 h lead time initiated at 20:00 BT, ($a_1 \sim d_1$) observed by corresponding stations, and ($a_3 \sim d_3$) BIAS between the two in January, April, July and October 2020

7 月观测显示总云量在长江流域较大,反映出梅雨后期的特征,CMA-BJ 预报结果的大值区位置与观测接近,但范围偏大,特别是高估了长江以南地区的云量;10 月观测华西地区总云量较多,体现了华西秋雨的特征,模式中总云量大值区位置较观测更为偏西。综上所述,CMA-BJ 预报结果能够较好地把握

月尺度上云量大值和低值区的位置,在春季技巧更高,但云量大值区的范围和大小与观测略有差异。此外,随着预报时效的延长,模式预报结果和观测的 ACC 逐渐减小(表 1),反映出模式预报对初值的依赖性。基于 ERA5 的检验结果与站点观测基本一致(图略)。

表 1 2020 年 1、4、7、10 月 CMA-BJ 20 时起报第 1~4 天模式预报日平均总云量和观测空间距平相关系数

Table 1 ACC of spatial anomalies between daily average total cloud cover forecasted by CMA-BJ with 1-4 d lead time initiated at 20:00 BT and observations in January, April, July and October 2020

预报时效	1 月	4 月	7 月	10 月
第 1 天(1~24 h 平均)	0.685	0.842	0.700	0.600
第 2 天(25~48 h 平均)	0.607	0.778	0.633	0.582
第 3 天(49~72 h 平均)	0.604	0.747	0.604	0.568
第 4 天(73~96 h 平均)	0.581	0.736	0.575	0.563

2.2 云量日变化预报检验

云量日变化作为云属性短期变化中最基本的特征要素之一,也常常作为评估天气和区域气候模式预报能力的重要指标。图 3 是 2020 年 CMA-BJ 20 时起报 1~24 h 预报总云量日变化强度和对应观测的空间分布。如图所示,1 月总云量观测的云量日变化强度明显大于模式预报,而模式对于青藏高原地区较强的云量日变化预报得较好。4 月观测和模式均反映出在东北和青藏高原地区较强的日变化特征,但模式低估了西南地区的日变化强度,在长江流域则有所高估。7 月观测和模式均显示在青藏高原东部和北部、华北地区等地有着较强的日变化,但模式对华南地区的云量日变化强度有所低估。10 月观测的总云量在西南地区日变化较强,而模式总云量日变化强度整体偏小。检验结果说明,CMA-BJ 很好地反映了青藏高原地区等云量日变化较强的特征,但对于西南和华南地区的变化强度预报偏小,同时高估了长江流域地区的日变化强度。

进一步选取云量日变化较为明显的区域,检验 CMA-BJ 对云量日变化特征的把握能力。图 4 为 2020 年 1 月总云量观测日变化强度较大的青藏高原、华南、新疆和东北区域,第 1~24、25~48、49~72、73~96 h 预报和观测总云量距平的时间序列(横坐标为北京时)。图 4 显示,1 月模式在青藏高原、新疆地区预报的效果较好,在青藏高原地区较好地预报了云量在中午及下午偏高的情况,这与刘瑞霞等(2002)对于青藏高原绝大部分地区总云量夜间

少、白天多的研究结果是相符的。同时模式也预报出了新疆地区云量在中午及下午偏低的情况。但是,模式在华南和东北地区没有很好地描述云量的变化趋势,在华南地区观测显示云量高峰期出现在午后,而模式预报结果显示在凌晨。同时,观测显示东北地区云量高峰出现在凌晨且云量变化幅度较大,而模式显示云量高峰出现在上午且云量变化幅度较小。从定量的 TCC 检验上看,新疆地区模式预报的 TCC 最好,可以达到 0.64。通过不同时效的预报与观测相关系数 TCC 的对比,发现有的区域在预报第 2 天技巧最高,这种情况可能和初始场、或者模式误差原因导致的系统“预报不一致”问题有关(郭换换等,2016)。

图 5 为 2020 年 7 月总云量观测日变化强度较大的西藏、华南、新疆、西北区域,第 1~24、25~48、49~72、73~96 h 预报和观测总云量距平的时间序列。图 5 显示,7 月在西藏区域模式预报的日变化效果较好,对于西藏午后云量偏多,上午云量偏少的情况预报较为准确。对于西北区域(本文主要讨论青海、甘肃区域)云量白天偏多,晚上偏少的情况,模式预报对于白天的云量变化趋势和峰值预报较好(TCC 达到 0.85),但是对凌晨云量偏少的情况预报偏高。同时,模式未能较好把握在新疆、华南地区的云量特征。

2.3 云量逐时变率预报检验

进一步对 CMA-BJ 云量逐时变率预报进行检验。图 6 为 2020 年 1、4、7、10 月 CMA-BJ 20 时起报

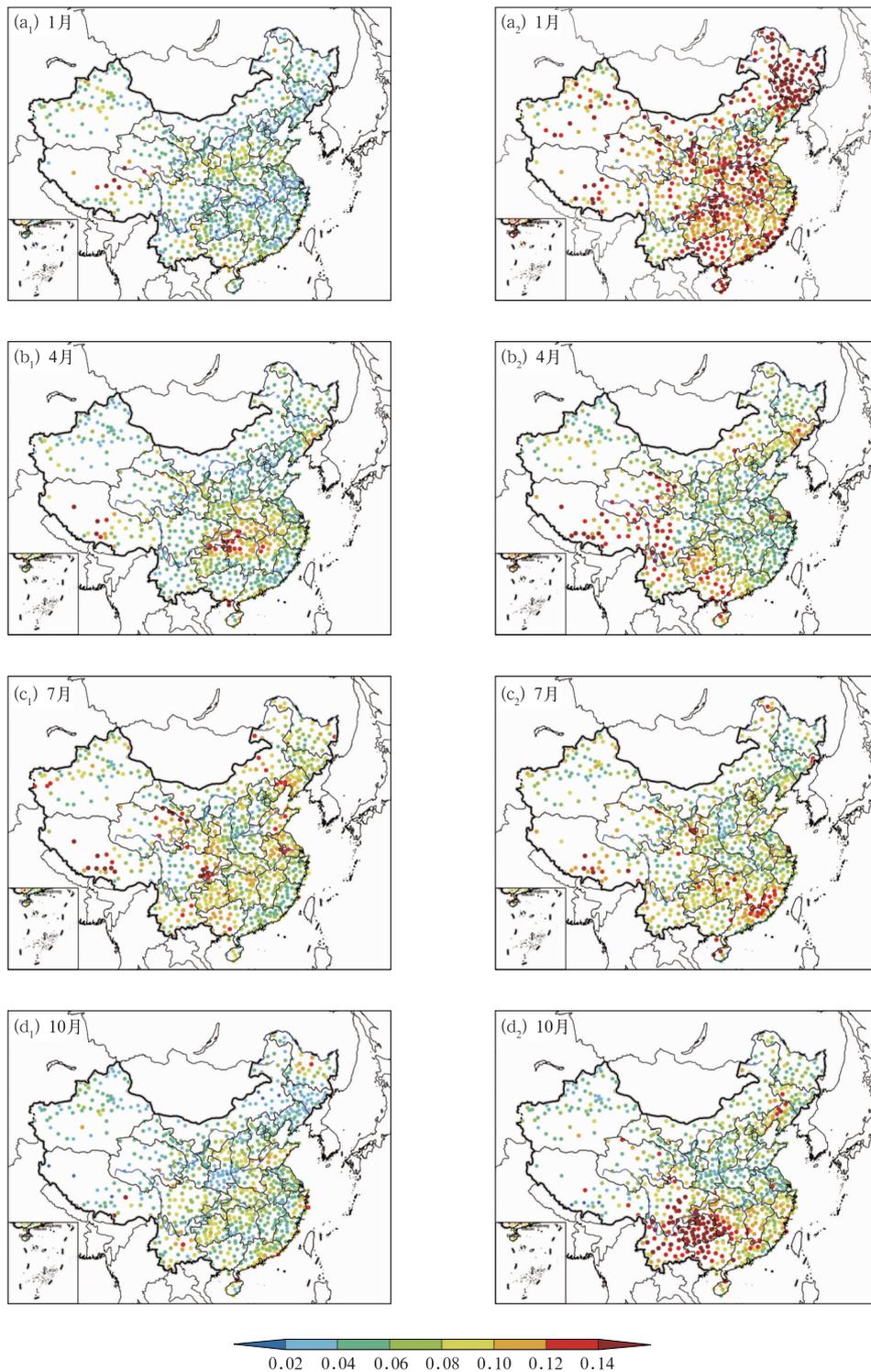


图 3 2020 年 1、4、7、10 月 (a₁~d₁)CMA-BJ 20 时起报 1~24 h 预报和 (a₂~d₂) 观测总云量日变化强度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of diurnal variation intensity of the total cloud cover (a₁~d₁) forecasted by CMA-BJ with 1~24 h lead time initiated at 20:00 BT and (a₂~d₂) observed by corresponding stations in January, April, July and October 2020

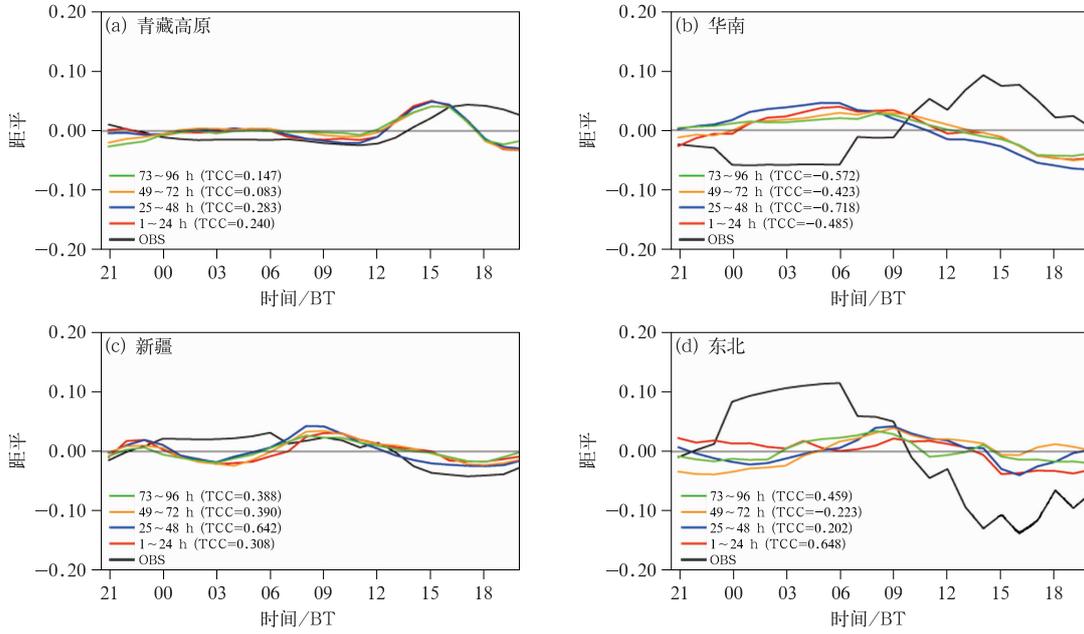


图 4 2020 年 1 月总云量观测标准差较大区域第 1 天(1~24 h)、第 2 天(25~48 h)、第 3 天(49~72 h)、第 4 天(73~96 h)预报和对应观测总云量距平变化的时间序列

Fig. 4 Time series of the first, second, third and fourth day's forecast and correspondingly observed total cloud cover anomaly changes in regions with large standard deviation of total cloud cover observation in January 2020

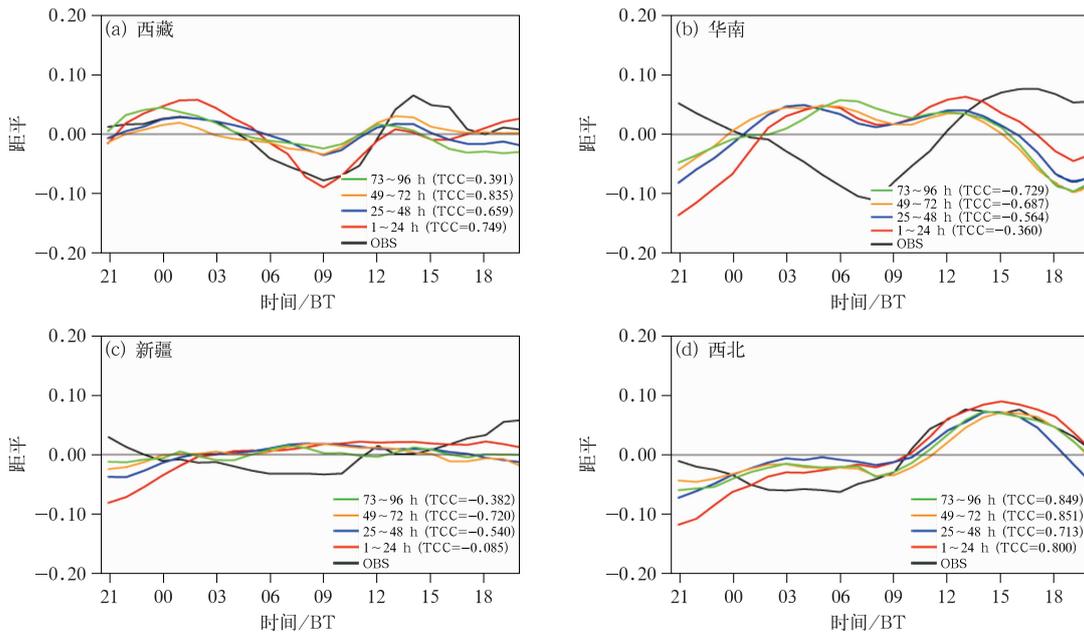


图 5 2020 年 7 月总云量观测标准差较大区域第 1 天(1~24 h)、第 2 天(25~48 h)、第 3 天(49~72 h)、第 4 天(73~96 h)预报和对应观测总云量距平变化的时间序列

Fig. 5 Time series of the first, second, third and fourth day's forecast and correspondingly observed total cloud cover anomaly changes in regions with large standard deviation of total cloud cover observation in July 2020

预报云量与观测逐时变率第 1 天(1~24 h),第 2 天 (25~48 h),第 3 天(49~72 h),第 4 天(73~96 h)

的 TCC 空间分布。检验结果显示模式在华北、东北地区对云量逐时变率的预报能力较好,对华南以及西南地区的预报效果略差,预报技巧也存在一定季节性差异。其中冬季,模式在华北、华东地区预报技巧较高,而在东北、西南、华南地区的 TCC 较低;春季,模式在东北、华北地区对云量变率预报较好,在华南地区较差;夏季,模式对北方云量变率把握较好,对长江流域及其以南区域把握较差;秋季,模式在华中、华东地区技巧较高,在西南、华南地区较低。

从全国平均 TCC 技巧上看,以 1 月为例,模式预报第 1 至第 4 天的 TCC 分别为 0.470、0.409、

0.355、0.315,即随着预报时效的增加,预报技巧也明显减小。以 30 个预报样本为例,通过 0.5 显著性水平检验的 TCC 阈值是 0.36。因此,CMA-BJ 对云量逐时变率预报的显著技巧时效约为 48~72 h。

图 7 为模式预报未来 1~4 d(1~24、25~48、49~72、73~96 h)总云量逐时变率的 TCC、ACC 以及 RMSE 技巧的时间序列。从每个月不同预报时效的 TCC 和 ACC 的变化可以发现,随着预报时效的不断增长,总云量预报与观测变率的 TCC 和 ACC 都是逐渐减小的,而 RMSE 逐渐增大。从时间依赖性上,发现 08—15 时时段,该时间段的模式预报和观测的 TCC 和 ACC 比较高;然而起报后

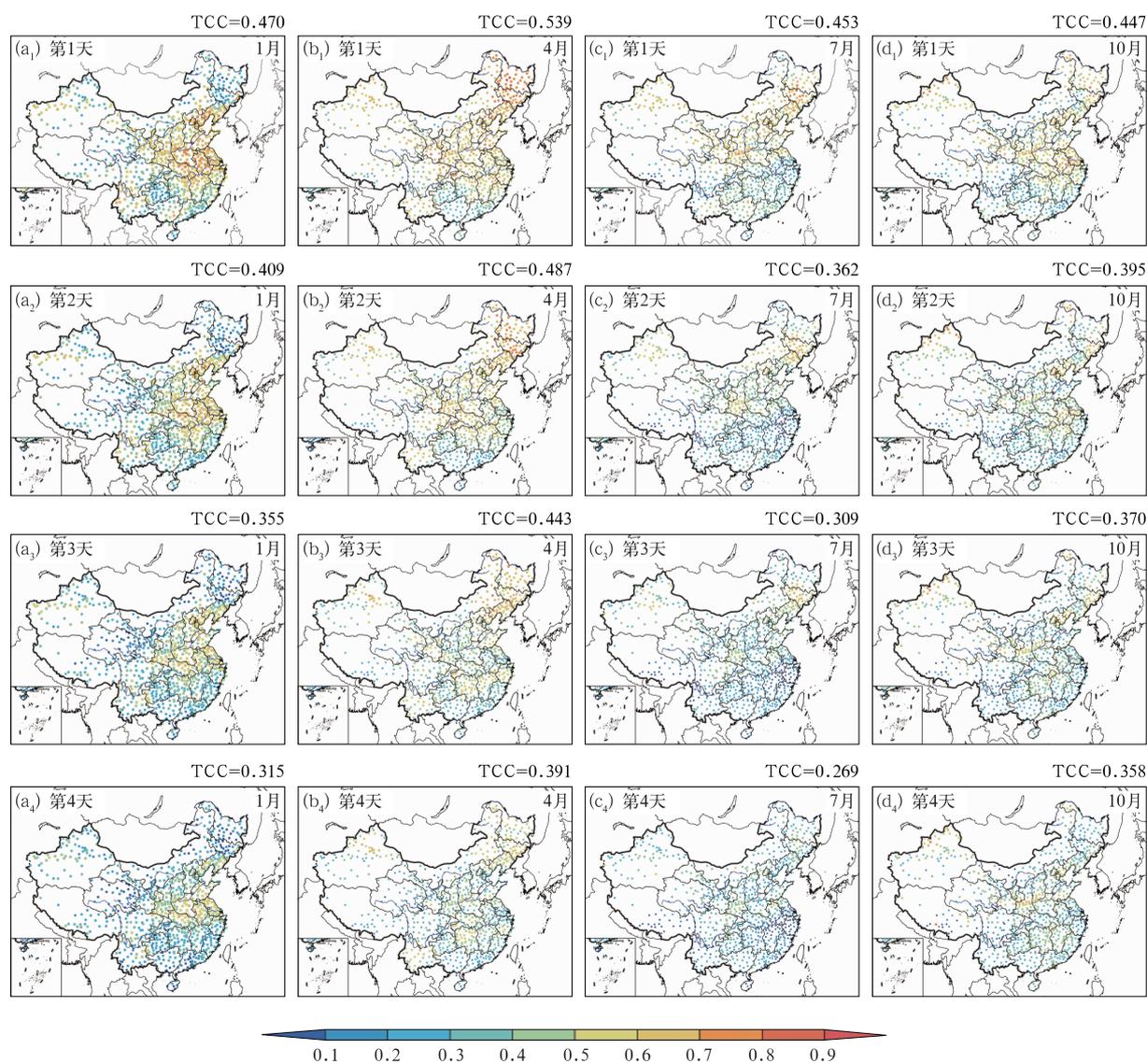


图 6 2020 年(a~d)1、4、7、10 月 CMA-BJ 20 时起报预报云量与观测逐时变率 TCC 的空间分布

Fig. 6 (a~d) TCC spatial distribution of hourly variability of total cloud cover forecasted by CMA-BJ initiated at 20:00 BT and observed in January, April, July and October 2020

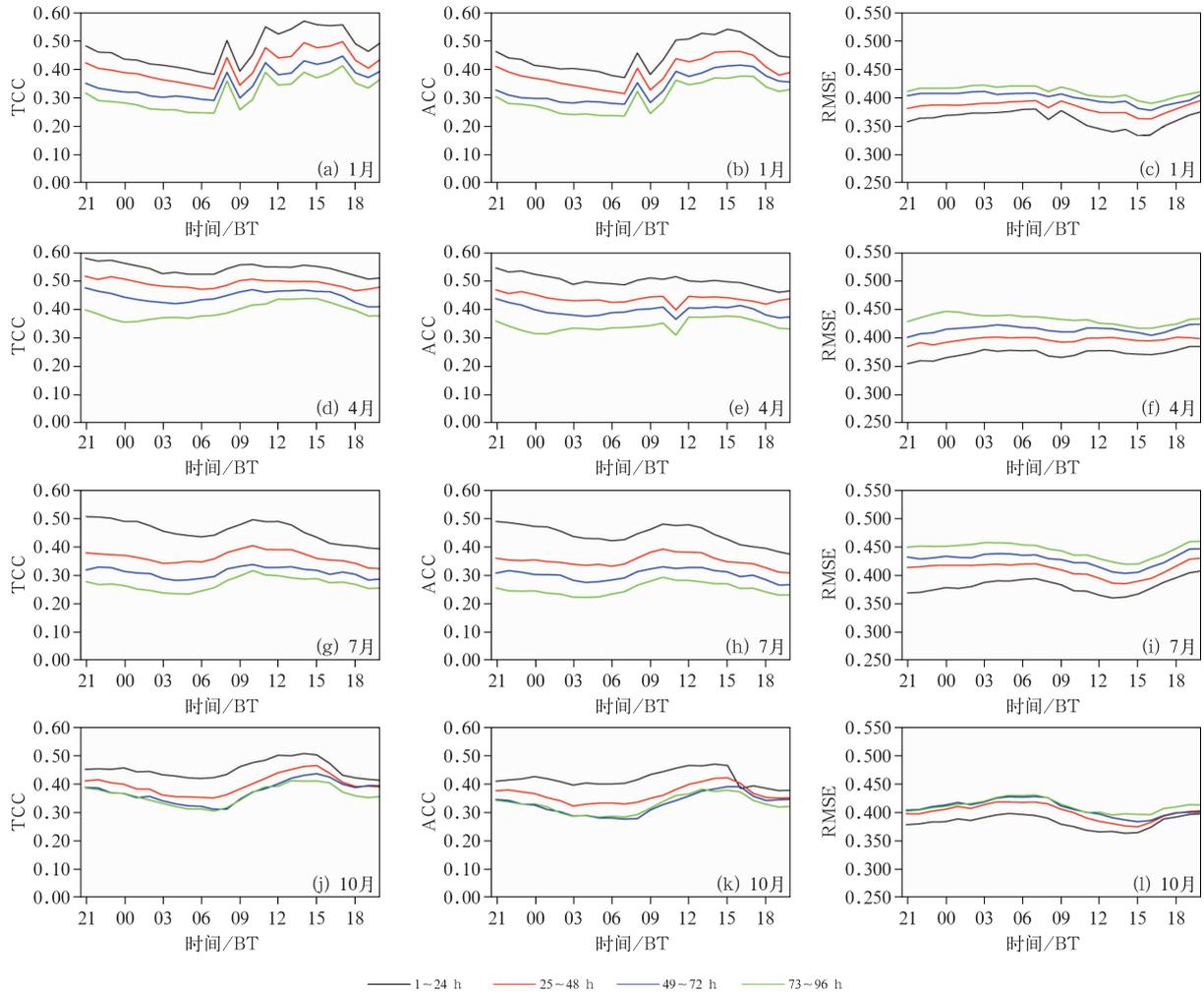


图 7 2020 年 1、4、7、10 月 CMA-BJ 20 时起报预报与观测总云量逐时变率的

(a, d, g, j) TCC, (b, e, h, k) ACC, (c, f, i, l) RMSE 时间序列

Fig. 7 (a, d, g, j) TCC, (b, e, h, k) ACC and (c, f, i, l) RMSE time series of hourly variability of total cloud cover forecasted by CMA-BJ initiated at 20:00 BT and observed in January, April, July and October 2020

8—11 h, 对应 04—07 时, 为 TCC 和 ACC 比较小的时间段。从季节差异上看, 4 月较其他月份 TCC 和 ACC 更高, 预报时效到了第 4 天, TCC 和 ACC 仍可达到 0.3 以上。

3 总云量预报误差来源分析

钱云和钱永甫(1994)认为, 从成云的机理考虑, 无论是持久性斜升运动导致空气膨胀冷却成云, 还是空气对流上升导致的绝热膨胀冷却成云, 或者是大气波动导致成云, 都离不开大气的上升运动。因此, 通过相对湿度初步确定云量还需考虑大气的垂直运动情况。后续相关研究在对原有的云量方案进

行修订时, 也都考虑到了垂直速度对云量的影响。如许建勋等(2012)将垂直速度引入 Slingo 方案; 孙国荣等(2016)也认为在诊断云量时增加垂直速度对云量的直接影响, 可能会提高模式对云的模拟能力。同时, Lazarus and Krueger(1999; 2000)对 Xu-Randall 云量诊断方案的验证发现, 相对湿度和云量之间是凹函数, 云量对相对湿度比对云水云冰更加敏感。因此, 本文采用 500 hPa 垂直速度、500 hPa 相对湿度等变量进行进一步诊断, 分析 CMA-BJ 模式总云量预报的误差成因。

图 8 分别表示 2020 年 1 月(图 8a, 8c, 8e, 8g)、7 月(图 8b, 8d, 8f, 8h) ERA5、站点观测、CMA-BJ 预报总云量分别与 500 hPa 垂直速度、500 hPa 相对湿

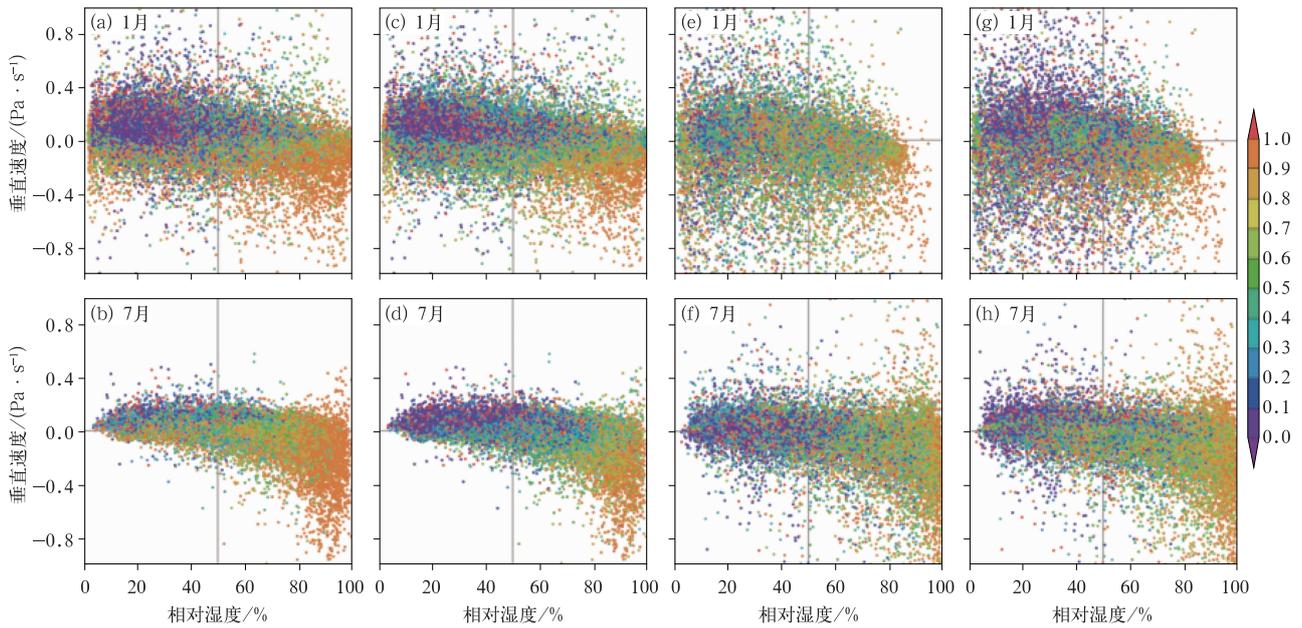


图8 2020年1月、7月(a,b)ERA5的总云量与ERA5的垂直速度、相对湿度,(c,d)站点观测的总云量与ERA5垂直速度、相对湿度,(e,f)站点观测的总云量与CMA-BJ预报的垂直速度、相对湿度,(g,h)CMA-BJ预报的总云量与CMA-BJ预报的垂直速度、湿度的关系

Fig. 8 Scatter diagram of the relationship between (a, b) the total cloud cover of ERA5 and the vertical velocity and relative humidity of ERA5, (c, d) the total cloud cover of the station observation and the vertical velocity and relative humidity of ERA5, (e, f) the total cloud cover of the station observation and vertical velocity and relative humidity of CMA-BJ, (g, h) the total cloud cover of CMA-BJ and the vertical velocity and relative humidity of CMA-BJ

度的关系散点图。如图8所示,1月CMA-BJ预报的相对湿度较ERA5资料明显偏小,这可能是1月总云量负偏差(图2)的误差来源之一[式(1)]。由图8a~8d可见,在1月和7月,ERA5和站点观测的总云量均对ERA5的相对湿度和垂直速度存在一定的依赖关系,表现为相对湿度越大,上升运动越强,总云量越大;其中7月观测的上升运动更强,垂直速度和相对湿度表现出一定的一致变化特征,即在湿度更大的区域上升运动更强,云量更多,表明水汽的垂直平流起到更大的作用。而CMA-BJ预报的总云量对相对湿度和垂直速度的依赖关系在7月(图8h)与观测(图8b,8d)相比明显减弱,且存在不真实的下沉运动情况。因此,CMA-BJ预报的云量偏差可能来源于模式未能准确刻画云量和垂直速度的关系,同时相对湿度(主要在1月)和垂直速度(主要在7月)的预报偏差可能也是影响CMA-BJ总云量预报准确性的原因之一。

4 结论与讨论

基于我国站点观测的逐小时云量数据以及

ERA5提供的云量、相对湿度、垂直速度等再分析场,从月尺度云量平均、云量日循环和云量小时变率等多个时间尺度,系统检验了CMA-BJ业务预报系统的2020年1、4、7、10月逐日起报的总云量预报效果,得到以下结论:

(1)CMA-BJ基本能够再现月尺度平均的总云量空间分布和季节性差异,各季节代表月在1~24 h预报时效的日平均总云量和观测的ACC均超过0.6。CMA-BJ预报结果较好地把握了西南等云量大值和我国北方等低值区的位置,但区域的范围、云量的大小与观测略有差异。随着预报时效的延长,预报结果和观测的ACC逐渐减小,表明模式对月尺度平均云量分布状况的预报也存在较强的初值依赖性。从各个季节的差异上看,CMA-BJ在1、4、7、10月云量预报偏差分别为-0.133、0.002、0.046和-0.051,即在1月对全国大部分的云量存在低估,在7月则高估了长江以南地区的总云量。

(2)对CMA-BJ云量日变化的预报能力分析表明,模式能够较好地把握全国大部分地区云量日变化强度特征和空间分布。特别是能够较好抓住青藏高原上午云量偏少、午后云量增多特征,在7月模式

预测的云量日循环的相关系数 TCC 可超过 0.7;但是对华南云量日循环预报不佳。通过预报与观测相关系数 TCC 的对比,发现有的区域预报第 2 天的相关系数最高,这种情况可能和初始场、或者模式误差原因导致的系统“预报不一致”问题有关。

(3)通过对 CMA-BJ 云量逐时变率预报能力检验可知,模式对我国华北、东北和长江部分地区预报技巧较高,而对江南、华南预报技巧不足。从季节差异上看,模式在春季预报技巧较高(预报第 1 天 TCC 为 0.539),秋季预报技巧较低(预报第 1 天 TCC 为 0.447);随着预报时效的不断增长,TCC 和 ACC 技巧均逐渐减小,以 1 月为例,模式预报第 1 至第 4 天的 TCC 分别为 0.470、0.409、0.355、0.315, RMSE 随着预报时效增加而增大,通过显著性检验的预报技巧可到 48~72 h。此外,预报技巧存在一定的日变化特征。

(4)CMA-BJ 与观测相比,总云量对 500 hPa 相对湿度和垂直速度依赖关系减弱可能是造成云量预报偏差的重要原因。1 月模式预报的相对湿度偏小,可能是总云量预报负偏差的误差来源之一,7 月模式中的垂直速度预报偏差也可能是影响 CMA-BJ 总云量预报准确性的原因之一。

本文检验了 CMA-BJ 业务预报系统的总云量预报效果,并进一步分析了系统预报云量误差来源,为未来近地面温度、辐射等变量的预报性能改进提供了依据。但目前只检验了 2020 年不同季节代表月 20 时起报的云量预报,由于样本量的原因,结果可能还有一定的局限性,后续可以针对更多年份以及不同起报时间的云量预报结果开展系统性研究,对比不同年份、起报时间云量预报误差的相似性和差异。同时,也可开展和辐射、降水评估进一步联合分析,研究不同层次的云量预报性能对辐射、降水预报效果的影响,从而进一步为模式改进提供参考。

参考文献

陈敏,仲跻芹,卢冰,等,2023. CMA-BJ 2.0 版逐时快速更新追赶循环同化预报系统研发及应用 I:资料同化及系统构建[J]. 气象学报,81(6):911-925. Chen M, Zhong J Q, Lu B, et al, 2023. On the CMA-BJ v2.0 hourly rapid update catch-up cycling assimilation and forecast system. Part I: data assimilation and system attributes[J]. Acta Meteor Sin, 81(6):911-925(in Chinese).

甘玉婷,陈昊明,李建,2021. 千米尺度数值预报模式对泰山地区暖季降水预报性能的评估[J]. 气象学报,79(5):750-768. Gan Y T, Chen H M, Li J, 2021. Evaluation of the performance of kilometer

scale numerical operation forecast model for warm season precipitation forecasting in Taishan Region[J]. Acta Meteor Sin, 79(5):750-768(in Chinese).

郭换换,智协飞,段明镗,等,2016. 数值天气预报中的不一致性问题综述[J]. 气象科学,36(1):134-140. Guo H H, Zhi X F, Duan M K, et al, 2016. Review on the inconsistency of numerical weather prediction[J]. J Meteor Sci, 36(1):134-140(in Chinese).

胡邦辉,张惠君,杨修群,等,2009. 基于非参数回归模型的局部线性估计云量预报方法研究[J]. 南京大学学报(自然科学),45(1):89-97. Hu B H, Zhang H J, Yang X Q, et al, 2009. A cloud amount forecasting method based on local linear estimation of non-parametric regression model[J]. J Nanjing University (Natural Sciences), 45(1):89-97(in Chinese).

刘柏鑫,李栋梁,2018. 我国云量时空变化特征及其与副热带夏季风北边缘带关系研究[J]. 气象,44(3):382-395. Liu B X, Li D L, 2018. Spatio-temporal variation features of cloud cover in China and its correlation to north boundary belt of subtropical summer monsoon[J]. Meteor Mon, 44(3):382-395(in Chinese).

刘奇,傅云飞,2009. 热带地区云量日变化的气候特征[J]. 热带气象学报,25(6):717-724. Liu Q, Fu Y F, 2009. The climatological feature of diurnal variation of cloud amount over the tropics[J]. J Trop Meteor, 25(6):717-724(in Chinese).

刘瑞霞,陈洪滨,郑照军,等,2009. 总云量产品在中国区域的分析检验[J]. 应用气象学报,20(5):571-578. Liu R X, Chen H B, Zheng Z J, et al, 2009. Analysis and validation of total cloud amount data in China[J]. J Appl Meteor Sci, 20(5):571-578(in Chinese).

刘瑞霞,刘玉洁,杜秉玉,2002. 利用 ISCCP 资料分析青藏高原云气候特征[J]. 南京气象学院学报,25(2):226-234. Liu R X, Liu Y J, Du B Y, 2002. Cloud climatic characteristics of the Tibetan Plateau from ISCCP data[J]. J Nanjing Inst Meteor, 25(2):226-234(in Chinese).

齐亚杰,陈敏,仲跻芹,等,2020. RMAPS-ST 耦合城市冠层模式后对华北地面气象要素的短期预报评估[J]. 干旱气象,38(5):859-868. Qi Y J, Chen M, Zhong J Q, et al, 2020. Effect evaluation of short-term forecast of surface meteorological elements by using RMAPS-ST coupled urban canopy model in North China[J]. J Arid Meteor, 38(5):859-868(in Chinese).

钱云,钱永甫,1994. 区域气候模式中云量参数化方案的研究[J]. 热带气象学报,10(4):342-348. Qian Y, Qian Y F, 1994. Study of cloudiness parameterization scheme in regional climate model[J]. J Trop Meteor, 10(4):342-348(in Chinese).

钱正安,刘明,衣育红,1992. 亚洲地区云量参数化的对比试验及云的影响[J]. 气象学报,50(1):50-59. Qian Z A, Liu M, Yi Y H, 1992. Comparison tests of parameterization schemes for cloud cover over Asia and the effect of cloud cover[J]. Acta Meteor Sin, 50(1):50-59(in Chinese).

余万明,叶成志,杨晓武,等,2022. 地面“云能天”自动化观测进展[J]. 气象科技进展,12(5):19-26. She W M, Ye C Z, Yang X W, et al, 2022. Current situation and development trend of automatic weather observation system for cloudy, visibility and weather

- phenomena[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 12(5):19-26 (in Chinese).
- 孙国荣,李昉英,寇雄伟,等,2016.不同分辨率 BCC_AGCM 模式对东亚区域垂直云量的模拟[J]. *气候与环境研究*, 21(2):175-187. Sun G R, Li Y Y, Kou X W, et al, 2016. Vertical cloudiness over East Asia simulated by different BCC_AGCM models[J]. *Climatic Environ Res*, 21(2):175-187 (in Chinese).
- 谭超,刘奇俊,马占山,2013. GRAPES 全球模式次网格对流过程对云预报的影响研究[J]. *气象学报*, 71(5):867-878. Tan C, Liu Q J, Ma Z S, 2013. Influences of sub-grid convective processes on cloud forecast in the GRAPES global model[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(5):867-878 (in Chinese).
- 汪宏七,赵高祥,1994.云和辐射——(I)云气候学和云的辐射作用[J]. *大气科学*, 18(S1):910-932. Wang H Q, Zhao G X, 1994. Cloud and radiation——I: cloud climatology and radiative effects of clouds[J]. *Sci Atmos Sin*, 18(S1):910-932 (in Chinese).
- 王旻燕,王伯民,2009. ISCCP 产品和我国地面观测总云量差异[J]. *应用气象学报*, 20(4):411-418. Wang M Y, Wang B M, 2009. Total cloud amount difference between ISCCP product and ground observation over China[J]. *J Appl Meteor Sci*, 20(4):411-418 (in Chinese).
- 王咏青,张楠,刘敏,等,2010.大气模式中云量诊断的系统性误差研究[J]. *气候与环境研究*, 15(1):83-88. Wang Y Q, Zhang N, Liu M, et al, 2010. A study of systematical error about cloud cover diagnosis scheme in general circulation model[J]. *Climatic Environ Res*, 15(1):83-88 (in Chinese).
- 王在文,全继萍,张鑫宇,2023.基于 CMA-BJ 数值预报模式产品的复杂地形下冬奥站点地面气温和风速预报方法研究[J]. *气象学报*, 81(6):926-942. Wang Z W, Quan J P, Zhang X Y, 2023. Forecasting surface temperature and wind speed at Winter Olympics stations over complex terrain based on the CMA-BJ model products[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(6):926-942 (in Chinese).
- 吴捷,任宏利,张帅,等,2017. BCC 二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析[J]. *大气科学*, 41(6):1300-1315. Wu J, Ren H L, Zhang S, et al, 2017. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model[J]. *Chin J Atmos Sci*, 41(6):1300-1315 (in Chinese).
- 仵建勋,杨海龙,李振峰,2012.基于 WRF 模式的云量诊断方法研究[C]//第 29 届中国气象学会年会.北京:中国气象学会. Wu J X, Yang H L, Li Z F, 2012. Research on cloud cover diagnosis methods based on WRF model[C]//Proceedings of 29th Chinese Meteorological Society Annual Conference. Beijing: Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 熊秋芬,顾永刚,王丽,2007.支持向量机分类方法在天空云量预报中的应用[J]. *气象*, 33(5):20-26. Xiong Q F, Gu Y G, Wang L, 2007. Application of SVM method to cloud amount forecast[J]. *Meteor Mon*, 33(5):20-26 (in Chinese).
- 许启慧,张金龙,许康,等,2023. ERA5 再分析云量在大气环境评估中的适用性研究[J]. *气象科技*, 51(2):183-191. Xu Q H, Zhang J L, Xu K, et al, 2023. Research on applicability of ERA5 reanalysis cloud cover in assessment of atmospheric environment[J]. *Meteor Sci Technol*, 51(2):183-191 (in Chinese).
- 杨扬,卢冰,王薇,等,2021.基于 WRF 的积云对流参数化方案对中国夏季降水预报的影响研究[J]. *气象学报*, 79(4):612-625. Yang Y, Lu B, Wang W, et al, 2021. Impacts of cumulus parameterization schemes on the summertime precipitation forecast in China based on the WRF model[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(4):612-625 (in Chinese).
- 张德杰,师春香,张涛,等,2022.多种资料的总云量产品在中国区域的对比分析[J]. *高原气象*, 41(3):803-813. Zhang D J, Shi C X, Zhang T, et al, 2022. Comparative analysis of the total cloud cover products of various data in China[J]. *Plateau Meteor*, 41(3):803-813 (in Chinese).
- 张鑫宇,陈敏,孙娟珍,等,2021. WRF-DA 中地面观测资料同化方案的改进与应用[J]. *气象学报*, 79(1):104-118. Zhang X Y, Chen M, Sun J Z, et al, 2021. Improvement and application of the ground observation data assimilation scheme in WRF-DA[J]. *Acta Meteor Sin*, 79(1):104-118 (in Chinese).
- 赵晨阳,徐国强,黄守友,2020.应用卫星资料改进云计算过程的初步试验研究[J]. *气象*, 46(12):1586-1595. Zhao C Y, Xu G Q, Huang S Y, 2020. Preliminary experimental study on improving cloud computing process with satellite data[J]. *Meteor Mon*, 46(12):1586-1595 (in Chinese).
- 赵俊虎,熊开国,陈丽娟,2020.东北夏季降水预测技巧偏低的原因探讨[J]. *大气科学*, 44(5):913-934. Zhao J H, Xiong K G, Chen L J, 2020. The causes of low predictive skills of precipitation in flood season in Northeast China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(5):913-934 (in Chinese).
- 赵文婧,赵中军,汪结华,等,2016.基于支持向量机的云量精细化预报研究[J]. *干旱气象*, 34(3):568-574, 589. Zhao W J, Zhao Z J, Wang J H, et al, 2016. A study on refined forecast of cloud cover based on support vector machine[J]. *J Arid Meteor*, 34(3):568-574, 589 (in Chinese).
- 赵中军,靳双龙,刘晓琳,等,2019.环渤海地区云量的精细化预报方法[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 55(4):541-548. Zhao Z J, Jin S L, Liu X L, et al, 2019. A fine method forecasting cloud cover around the Bohai Sea[J]. *J Lanzhou Univ (Nat Sci)*, 55(4):541-548 (in Chinese).
- 郑晓辉,徐国强,魏荣庆,2013. GRAPES 新云量计算方案的引进和影响试验[J]. *气象*, 39(1):57-66. Zheng X H, Xu G Q, Wei R Q, 2013. Introducing and influence testing of the new cloud fraction scheme in the GRAPES[J]. *Meteor Mon*, 39(1):57-66 (in Chinese).
- 郑晓辉,徐国强,贾丽红,等,2016. GRAPES_Meso 区域模式积云计算方案引进及预报效果检验[J]. *大气科学*, 40(5):907-919. Zheng X H, Xu G Q, Jia L H, et al, 2016. Incorporation of a cumulus fraction scheme in the GRAPES_Meso and evaluation of its performance[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(5):907-919 (in Chinese).
- 中国气象局,2020.地面气象自动观测规范[M].北京:气象出版社.

- China Meteorological Administration, 2020. Specifications of Surface Meteorological Automatic Observation [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. *Mon Wea Rev*, 129(4): 569-585.
- Chen G X, Wang W C, Yang S X, et al, 2023. A neural network-based scale-adaptive cloud-fraction scheme for GCMs[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 15(6): e2022MS003415, doi: 10. 1029/2022MS-003415.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J, 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Mon Wea Rev*, 134(9): 2318-2341.
- 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 Atmos*, 113(D13): D13103.
- Lazarus S M, Krueger S K, 1999. An evaluation of the Xu-randall cloud fraction parameterization using ASTEX data[C]// Ninth ARM Science Team Meeting Proceedings. San Antonio, Texas.
- Lazarus S M, Krueger S K, 2000. Evaluation of a cloud fraction parameterization using observations and model data[C]// Tenth ARM Science Team Meeting Proceedings. San Antonio, Texas.
- Lazarus S M, Krueger S K, Pan H L, 2003. Evaluating the performance of the MRF Subgrid-scale cloud fraction parameterization: examination of two significant stratiform cloud events over the ARM SGP[C]// Thirteenth ARM Science Team Meeting Proceedings. Broomfield, Colorado.
- Muneer T, Gul M S, 2000. Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data[J]. *Energy Conv Manag*, 41(5): 461-482.
- Slingo J M, 1980. A cloud parametrization scheme derived from GATE data for use with a numerical model[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 106(450): 747-770.
- Smagorinsky J, 1959. On the dynamical prediction of large-scale condensation by numerical methods[C]// *Physics of Precipitation: Proceedings of the Cloud Physics Conference*, Woods Hole, Massachusetts. Woods Hole, Massachusetts: American Geophysical Union: 71-78.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al, 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization[J]. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5095-5115.
- Xu K M, Randall D A, 1996. A semiempirical cloudiness parameterization for use in climate models[J]. *J Atmos Sci*, 53(21): 3084-3102.

(本文责编:俞卫平)