

基于GRAPES对流尺度模式一次低温事件的预报能力评估

吴沧锐, 蔡宏珂

成都信息工程大学, 四川 成都

收稿日期: 2022年10月10日; 录用日期: 2022年11月11日; 发布日期: 2022年11月18日

摘要

为评估GRAPES对流尺度模式资料对于低温事件的预报能力, 本文选择2021年1月4日至1月12日我国黄山及周边区域, ERA5的2 m温度再分析资料、GRAPES对流尺度3 km的2 m温度资料, 并使用图像识别的特征区域提取算法, 将低于5℃的区域提取出来, 作为本文的主要研究对象, 通过分析GRAPES模式预报的低温及其分布、面积、区域平均温度, 与ERA5的比较以评估其预报能力, 结果表明: 1) GRAPES对于所选个例预报较为准确, 在个别时间有一定偏差, 对于个例的位置和时间变化特征预报较好; 2) GRAPES预报相对于ERA5资料, 低温区域的位置分布比较一致, 部分时间段预报偏南; 3) 低温区域的面积, 在个例出现时其相关系数较高, 预报较为准确; 4) 区域平均温度预报效果较好, 且整体的变化趋势一致, 区域平均温度的误差在2℃以内; 5) 区域最低温度的位置GRAPES预报相较ERA5偏南, 在寒潮过程中, 预报的最低位出现的位置一致, GRAPES对于最低温的预报值整体偏低; 6) GRAPES模式和ERA5的日变化特征比较显示, GRAPES预报的升降温时间比ERA5落后1小时。

关键词

低温事件, 预报能力评估, 图像特征提取

Assessment of Prediction on a Low Temperature Event Based on the GRAPES Convection-Scale Model

Cangrui Wu, Hongke Cai

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 10th, 2022; accepted: Nov. 11th, 2022; published: Nov. 18th, 2022

文章引用: 吴沧锐, 蔡宏珂. 基于 GRAPES 对流尺度模式一次低温事件的预报能力评估[J]. 自然科学, 2022, 10(6): 1077-1088. DOI: 10.12677/ojns.2022.106120

Abstract

In order to evaluate the prediction ability of GRAPES convective scale model data for low temperature events, this paper selects the 2 m temperature reanalysis data of ERA5 and the GRAPES convective scale 3 km temperature data from January 4 to January 12, 2021 in Huangshan Mountain and its surrounding areas in my country. And we use the feature area extraction algorithm of image recognition to extract the area below 5°C, as the main research object of this paper, analyze the low temperature predicted by GRAPES model and its distribution, area, and regional average temperature. Assessing its forecasting ability, the results show that: 1) GRAPES is more accurate for the selected individual cases, although there are certain deviations in individual times, but the location and time variation characteristics of individual cases are better predicted. 2) Compared with the ERA5 data, the GRAPES forecast is relatively consistent in the location distribution of the low temperature area, and some time periods are forecast to be southerly. 3) For the area of the low temperature area, the correlation coefficient is higher when a single case occurs, and the forecast is more accurate. 4) The regional average temperature forecast effect is good, and the overall change trend is consistent. From the appearance of the individual cases to the disappearance, the error of the regional average temperature is within 2°C. 5) The location of the regional minimum temperature in the GRAPES forecast is more southerly than that of ERA5, but during the cold wave process, the forecasted minimum location is relatively consistent, but the GRAPES forecast value for the minimum temperature is generally lower. 6) The comparison of the diurnal variation characteristics of the GRAPES model and ERA5 shows that the warming and cooling time predicted by GRAPES is 1 hour behind that of ERA5.

Keywords

Low Temperature Event, Prediction Ability Evaluation, Image Feature Extraction

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

上世纪中叶,我国开始研究数值预报,但由于缺乏计算机,所以只能用图解法,很多资料需要大量的人工处理[1]。随着数学和计算机的发展,本世纪初,为完善我国的数值预报系统,并且在各种国家项目的支持下[2],新一代全球/区域多尺度统一的同化与数值预报系统(global/regional assimilation and prediction system,缩写为GRAPES)已在中国气象局研究建立。该系统的核心技术包括:资料变分同化;半隐式-半拉格朗日差分方案和全可压/非静力平衡动力框架;可自由组合的、优化的物理过程参数化方案;全球、区域一体化的同化与预报系统;标准化、模块化、并行化的同化与模式程序[3]。

低温过程在我国的实际业务预报中,多以寒潮的标准评估,寒潮天气也是我国越来越关注的极端天气事件之一[4]。但是对于国标中的低温事件研究并不多,低温寒冷预警信号分三级,分别以蓝色、黄色、橙色表示。其中低温寒冷橙色预警信号:24小时内最低气温将要小于等于5°C;或最低气温已经小于等于5°C,并可能持续[5]。

1.2. 研究背景

2006年,水平分辨率为30 km的GRAPES-MESO投入使用,并且于2007年,分辨率提升至15 km,分辨率提升后的模式,各项预报能力均有所提高[6]。2014年,有研究发现GRAPES-REPS的降水预报优于WRF-REPS [7]。2020年,我国参与S2S计划唯一的BCC-CSM1.2模式有一定的季节性预报能力[8]。Durai表示网格点偏差的大小取决于地理位置和季节[9] [10]。

基于模式预报产生的误差,对不同的模式进行检验评估以及误差订正,在2010年,对MM5、WRF-RUC和T639进行误差订正,除沿海地区2 m最高温度预报MM5模式较优,其他均是WRF-RUC预报效果最好[11] [12]。

要进行模式的检验评估,就要将模式预报数据插值到气象站点上,2005年有研究使用最优插值法,分别将日本模式、德国模式、MM5、T213插值到华中区域五省全部的气象站点,作为降水预报的资料[13]。2014年,中国气象局北京城市气象研究所引进了BJ-RUC模式,并且用双线性差值法将模式预报的格点数据插值到站点上[14]。2018年也有使用“邻近点代替”方案,即选择距离观测站点最近的格点预报作为该点预报值,对降水和温度预报进行检验评估[15]。

插值后的数据用不同的检验方法进行检验,对于对流风暴的检验有传统点对点检验、时空邻域TS检验等方法[16]。对于时空检验有空间(MODE)方法和时空(MTD)方法,利用箱型图、散点图、折线图等可视化方法更加直观的可以看出预报的准确性[17] [18]。

1.3. 研究意义

目前GRAPES对流尺度的预报主要针对局地对流风暴等进行检验评估,或者选择固定区域,多模式进行检验订正,对于低温事件,从低于5℃为低温事件的研究较少。

因此,本文重点研究GRAPES模式对于单个低温事件的预报能力评估,选择一个范围较小的区域,分辨率为3 km的模式资料进行针对研究,由于分辨率较细,可以更好地分析较小尺度的预报能力,以及2 m温度的小时变化。

2. 资料和方法

2.1. 资料概况

2.1.1. 实况资料

Micaps4中的全国站点资料,研究区域内特殊单站的气温变化;另一部分使用ECMWF对全球气候的第五代大气再分析的ERA5数据。选择2021年北纬5°至55°,东经70°至120°,2 m温度数据进行分析。研究所应用的数据两米温度为四维变量,四个维度分别是日期、时次、纬度、经度,其分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

2.1.2. 模式资料

模式资料为GRAPES-3km对流尺度模式资料,数据存储主要有三个变量,分别为两米温度、经度、纬度,其中两米温度为二维变量,其维度分别是经度和纬度,其分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ 。

2.2. 研究方法

2.2.1. 图像特征提取

特征提取是计算机视觉和图像处理中的一个概念,使用计算机提取图像信息,决定每个图像的点是否属于一个图像特征。本文则是通过图像特征提取,将低于5℃的地区提取出来,存储成不同的文件,再将本文所选个例进行分析。

2.2.2. 球面距离

在评估最低温度的位置偏差中, 应用球面距离计算公式设点 A , 纬度角 β_1 , 经度角 α_1 ; 点 B , 纬度角 β_2 , 经度角 α_2 , 则两点距离 S 为:

$$S = R \cdot \arccos[\cos \beta_1 \cos \beta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \beta_1 \sin \beta_2] \quad (1)$$

2.2.3. 评估方法

F_i 表示每小时预报数据, O_i 表示每小时实测数据, N 表示数据的个数。

偏差一般可以反映预报数据与实况误差的相对程度。公式为:

$$\delta = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \quad (2)$$

平均误差反映了预测值和观测值相比与平均值偏离的程度, 也可以用于订正模式产品。公式为:

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (3)$$

当平均误差越接近 0, 预报更准确, 但是不能测量误差的量级; 不衡量预报值和观测值之间的对应关系。

平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)可以衡量预测误差的平均大小。公式为:

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (4)$$

当 MAE 接近 0 时, 预报更加准确, 但是不能了解偏差的正负情况。

均方误差(Mean Square Error, MSE)可以衡量预测值和观测值之间的均方差。公式为:

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \quad (5)$$

均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)可以衡量预测误差的平均大小。公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (6)$$

相关系数可以衡量预测值与观测值的相关程度。公式为:

$$r = \frac{\sum (F - \bar{F})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum (F - \bar{F})^2} \sqrt{\sum (O - \bar{O})^2}} \quad (7)$$

当 r 越接近 1 时, 预报效果更好。

3. 研究结果

3.1. 单个区域低温事件概况

本文研究的单个低温区域, 其主体主要位于黄山附近。

见图 1, 黄山相对于其他平原地区有大片山脉, 地形相对比较复杂, 地势也相对较高, 所以出现低温的情况也会比其他的方多[19]。

此次寒潮过程影响范围广, 强度强。本文主要研究重点是区域内模式资料的检验评估, 而所选区域

正是我国的黄山, 因此选择特殊的黄山站点, 绘制温度的实况折线图。

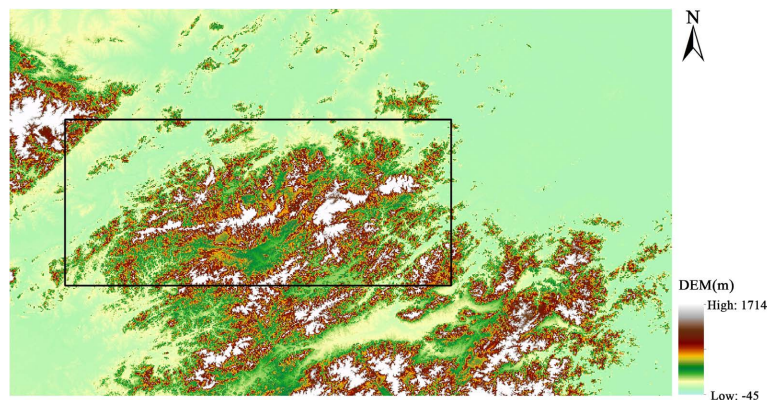


Figure 1. Topographic map of Huangshan Mountain
图 1. 黄山区域地形图

见图 2, 黄山站相对周围平原海拔较高, 此次寒潮过程从 1 月 5 日开始降温, 至 1 月 7 日达到最低温度 -20°C , 之后开始回温, 1 月 8 日虽然寒潮有所北移, 夜间还降温, 最低温达到 -16°C 。

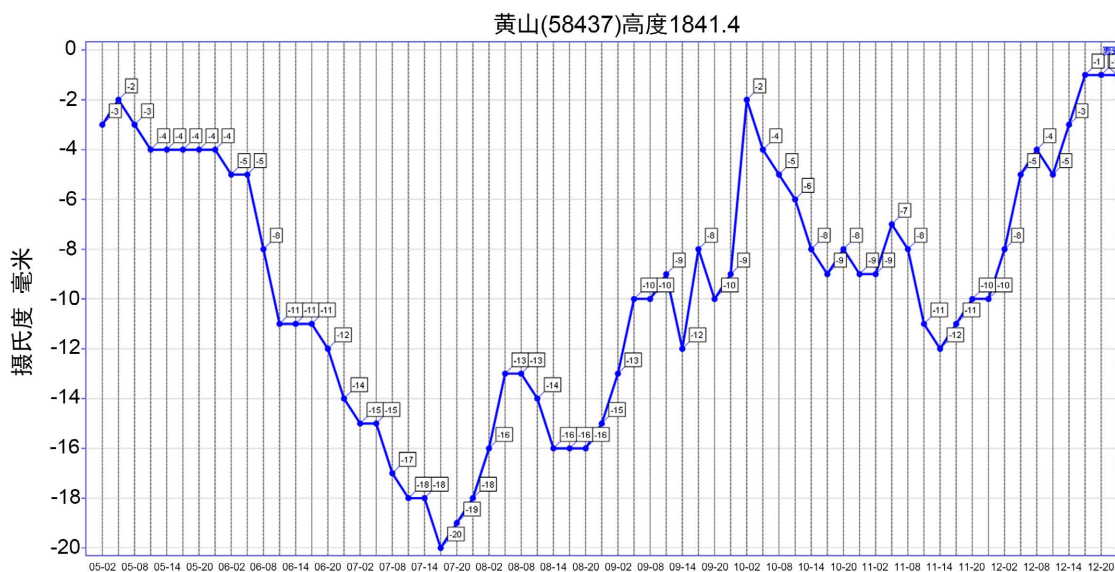


Figure 2. Temperature change of single station in Huangshan Station
图 2. 黄山站单站温度变化

图 3 为北京时间 1 月 5 日 00 时(a)、03 时(b)、06 时(c)、09 时(d), 个例是从西北大片冷空气中分离出, 并在 5 日凌晨整个冷空气还是比较强盛, 这也与后续 1 月 5 日~1 月 9 日的全国大范围寒潮相对应。

图 4 为 1 月 5 日至 1 月 12 日每天 12 时低于 5°C 的 2 m 温度分布, 1 月 6 日, 见图 4(b), 寒潮天气开始, 1 月 7 日至 8 日, 此次寒潮过程达到最强, 整个区域温度降低至 0°C 以下, 9 日开始回温, 黄山的高海拔区温度仍在 0°C 以下, 10 日之后只有黄山海拔较高的区域, 其温度在 5°C 以下, 11 日与 5 日类似, 整体强度较强, 12 日个例消失。

综上, 此次所选的个例没有大的位置移动, 主体主要在黄山的海拔较高处, 所以此次个例的出现与太阳辐射、大的环流背景、以及海拔高度联系密切。

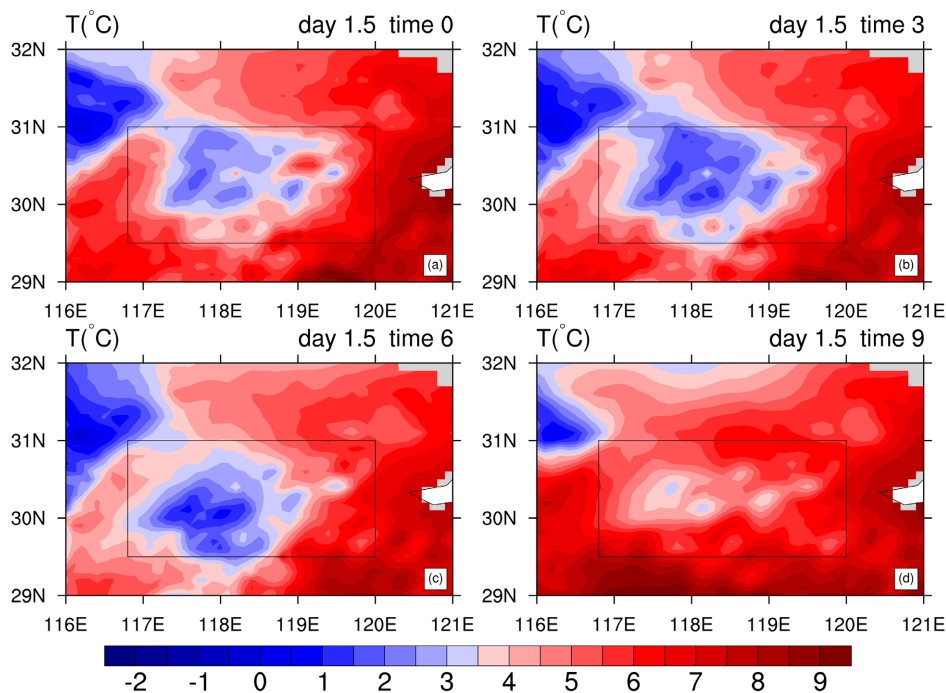


Figure 3. ERA5 2 m temperature distribution on January 5 (unit: °C)

图 3. 1 月 5 日 ERA5 2 m 温度分布(单位: °C)

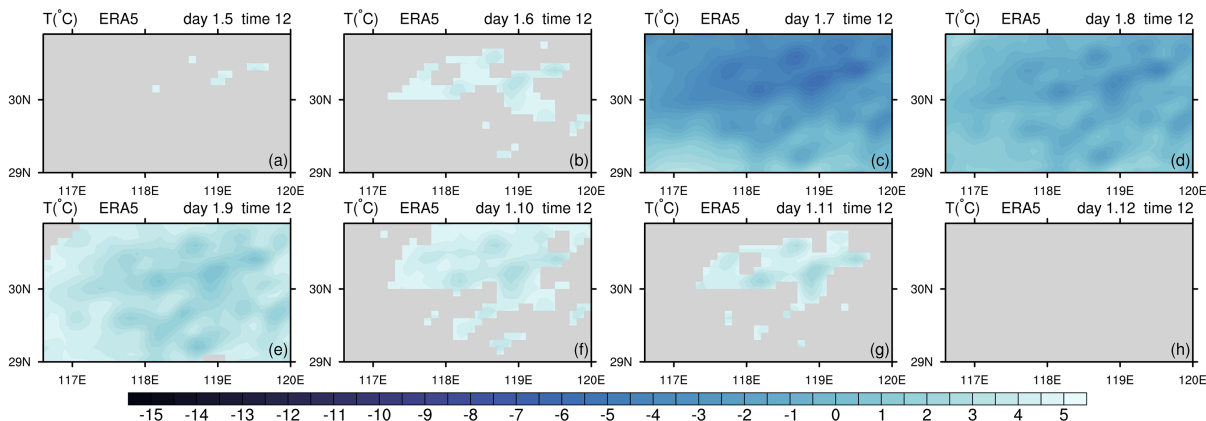


Figure 4. ERA5 2 m temperature distribution at 12:00 every day from Jan 5 to 12 (unit: °C)

图 4. 1 月 5 日至 12 日每天 12 时 ERA5 2 m 温度分布(单位: °C)

3.2. 模式资料评估

3.2.1. 低温区域分布

图 5 为 1 月 5 日 08 时(a)、09 时(b)、10 时(c)、11 时(d), GRAPES 资料与 ERA5 资料对比。

由于 GRAPES 模式资料相对于 ERA5 分辨率更高, 因此 GRAPES 细节更多; 相对于 ERA5, GRAPES 个例第一次形成面积较大, 最低温度的区域也比 ERA5 偏南, 10 时图 5(c), ERA5 的大片低温区还是在区域西部, 而模式资料偏东, 11 时图 5(d)模式的主体都在东北部, GRAPES 的范围更广。

初步对比 GRAPES 模式资料通常比 ERA5 预报的范围大和强度要强。GRAPES 对于个例整体的变化演变预报与 ERA5 类似, 其低温区均位于黄山高海拔区, 这一点 GRAPES 预报较好。

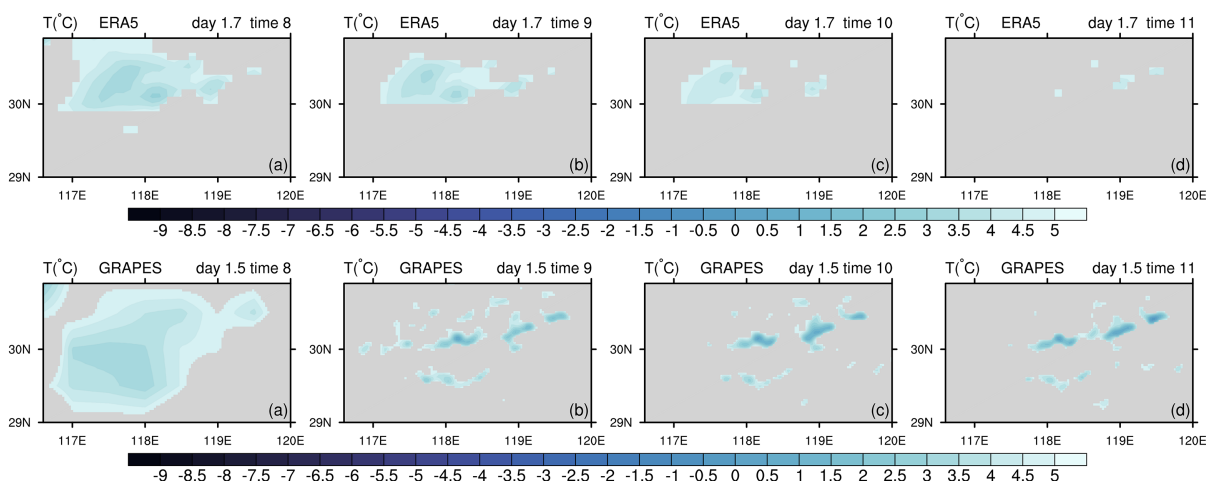


Figure 5. ERA5 (top) and GRAPES (bottom) 2 m temperature distribution (single temperature: °C)
图 5. ERA5 (上)和 GRAPES (下) 2 m 温度分布(单温: °C)

3.2.2. 低温区域面积

图 6 为计算整片区域低温事件的面积变化, 计算模式的差值, 分析模式预报的能力。

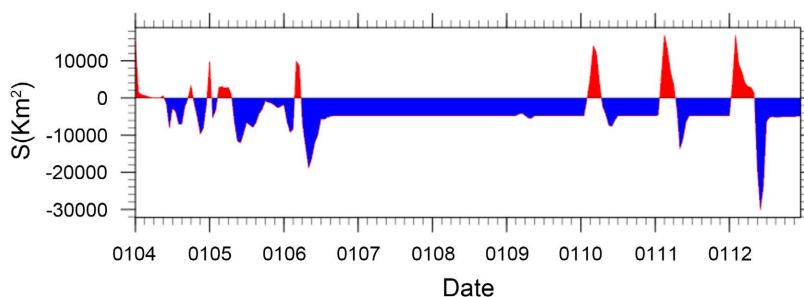


Figure 6. Difference of area change between GRAPES and ERA5 in areas below 5°C
图 6. GRAPES 与 ERA5 低于 5°C 的区域面积变化之差

寒潮 7 日至 8 日, 整个区域温度均低于 5°C 的, ERA5 与 GRAPES 由于分辨率产生误差; 回温后, 预报偏高, 个例消失或者由于夜间降温与周围地区连接成片时, 普遍预报偏低。

因为此次过程中有寒潮时间, 降温幅度较大, 所以选择 0°C 冰点温度以下区域, 再次进行计算。

见图 7, 寒潮开始前没有低于 0°C 以下的区域, 从 1 月 5 日夜间开始出现冰点以下区域, 寒潮期间, 二者差值不大, 开始回温后, 预报整体偏高, 误差最大普遍出现在一天中刚开始升温的情况。

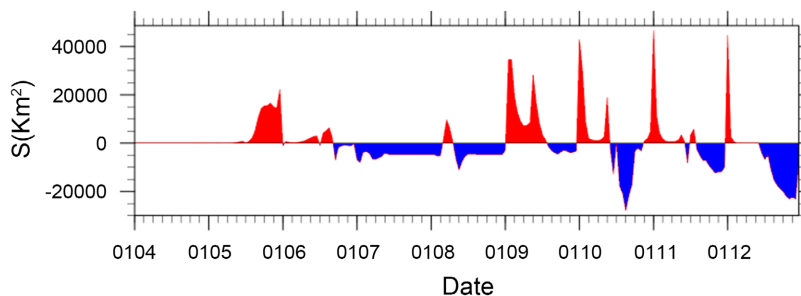


Figure 7. Difference of area change between GRAPES and ERA5 in areas below 0°C
图 7. GRAPES 与 ERA5 低于 0°C 的区域面积变化之差

将1月5日至12日每小时低温区域面积进行平均,可以得出平均日变化。见图8,ERA5和GRAPES模式预报,对于一天中低温区域的总面积变化趋势配合较好,其中GRAPES模式预报的面积减小要晚于ERA5,夜间的总面积也较低;7时开始,气温逐渐升高,低温面积开始减小,ERA5面积最小出现在13时,GRAPES出现在14时,且GRAPES的面积要大于ERA5的面积;之后开始降温,面积逐渐增大。

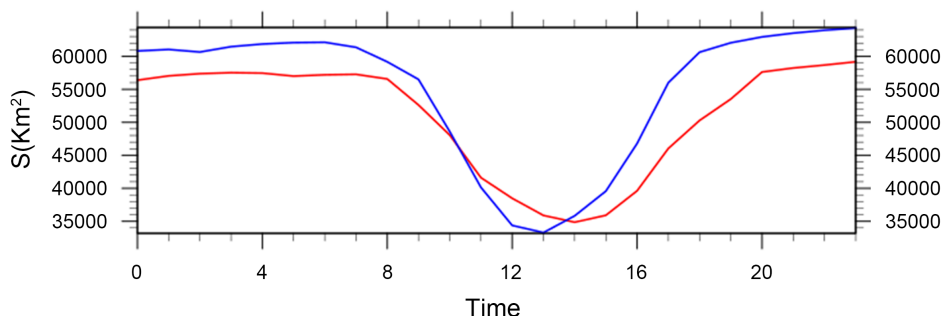


Figure 8. Daily change of area below 5°C (GRAPES (red) ERA5 (blue))
图8. 低于5°C的区域面积日变化(GRAPES (红) ERA5 (蓝))

综上,GRAPES对于面积预报在温度相对稳定时预报较好,在温度变化时误差较大,相比ERA5会落后一些,在面积预报中,除去分辨率带来的误差,整体相对偏大。

3.2.3. 区域平均温度

由于所选区域在黄山附近,且1月4日至1月12日,从个例出现到个例消失,没有明显位移,计算区域平均温度可以更好的衡量模式预报的平均水平。

见图9,计算二者的差值,区域平均温度相差在±2°C以内,所以整体的预报水平较好。对于1月7日和8日两天的寒潮过程,差值不到2°C,回温开始后1月9日至1月10日,区域平均温度GRAPES相对于ERA5预报整体偏低,从1月11日开始,白天GRAPES相对于ERA5的区域平均温度预报都偏低,夜间偏高。

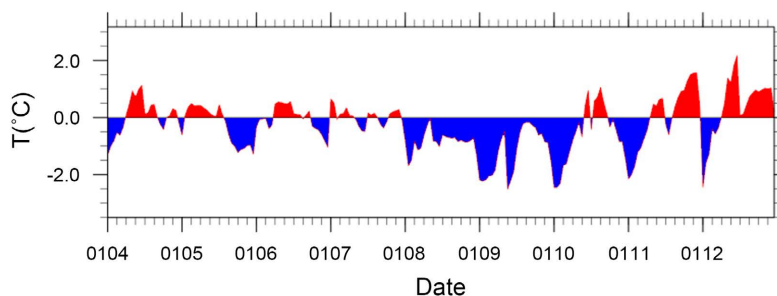


Figure 9. Difference of average temperature between GRAPES and ERA5
图9. GRAPES与ERA5区域平均温度之差

计算1月5日至1月12日逐小时的区域平均温度,为日变化,见图10。

模式预报与ERA5逐小时平均后,白天整体偏低,15点之后几乎重合,预报较好。且ERA5每日升温时间在早上7时,GRAPES模式资料是在8时,落后一小时,对应降温也晚了一小时,ERA5是从13时开始降温,模式是从14时开始降温。但整体预报能力还是较好的。

计算1月5日至12日,偏差、平均误差、平均绝对误差、均方误差、均方根误差、相关系数。

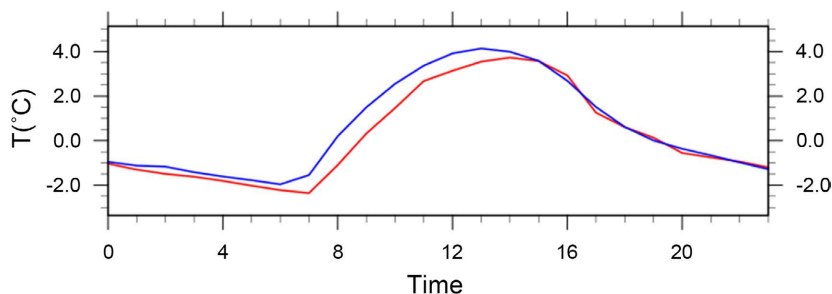


Figure 10. Daily variation of regional average temperature (GRAPES (red) ERA5 (blue))
图 10. 区域平均温度日变化(GRAPES (红) ERA5 (蓝))

见表 1, 每日偏差在 1 月 9 日、10 日、11 日相对较大, 也就是刚回温的三天, 预报能力没有其他时间段评分好; 平均误差、平均绝对误差、均方误差和均方根误差均是 1 月 9 日较高, 对应回温的第一天, 其次是 1 月 12 日, 对应个例消失的第一天; 区域平均温度的相关系数均在 0.9 以上, 说明预报能力较好。

Table 1. Analysis and statistics of regional average temperature error
表 1. 区域平均温度误差分析统计

	δ	θ	MAE	MSE	RMSE	r
1 月 5 日	1.02	0.09	0.27	0.10	0.32	0.98**
1 月 6 日	0.91	-0.26	0.55	0.47	0.69	0.94**
1 月 7 日	1.03	-0.09	0.32	0.17	0.41	0.98**
1 月 8 日	1.15	-0.56	0.63	0.59	0.77	0.98**
1 月 9 日	2.16	-1.27	1.27	2.12	1.46	0.97**
1 月 10 日	-0.15	-0.66	0.97	1.40	1.18	0.94**
1 月 11 日	0.65	-0.45	0.73	0.87	0.93	0.96**
1 月 12 日	1.20	0.45	1.00	1.44	1.20	0.96**

注: *表示在 0.05 水平上显著相关; **表示在 0.01 水平上显著相关。

见图 11, 模式预报效果较好, 几乎所有的点都围绕在 45°线附近, 且平均温度较低时, 效果更佳。

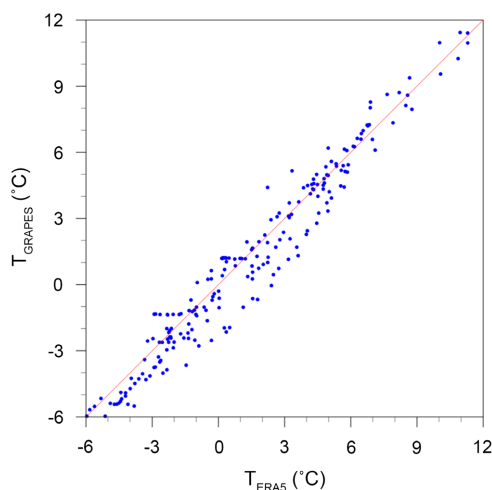


Figure 11. Scatter plot of average temperature in GRAPES and ERA5 regions
图 11. GRAPES 与 ERA5 区域平均温度散点图

综上, GRAPES 模式对于区域平均温度的预报能力较好, 其误差主要集中在每日升温时, 预报偏低; 回温时的预报能力也相对较差; 但是对于整个低温过程的变化趋势预报能力较好。

3.2.4. 区域最低温度

根据 GRAPES 和 ERA5 的最低温位置的经纬度, 使用球面距离计算公式, 计算两点之间的距离。

见图 12, 最低温位置误差最大在 6 km 以上, 有个别点重合, 且相差 2 km 的点较多, 初步分析是由于模式分辨率造成的, 故忽略分辨率带来的影响, 整体预报位置较好, 有个别时段预报较差。

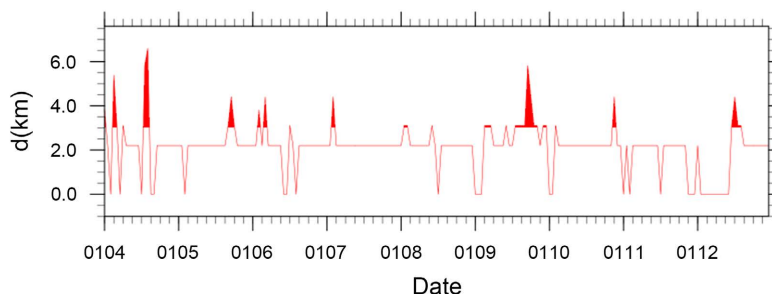


Figure 12. Difference distance of the lowest temperature between GRAPES and ERA5
图 12. GRAPES 与 ERA5 区域最低温相差距离

绘制 1 月 4 日至 1 月 12 日的每小时最低温的变化趋势, 见图 13。

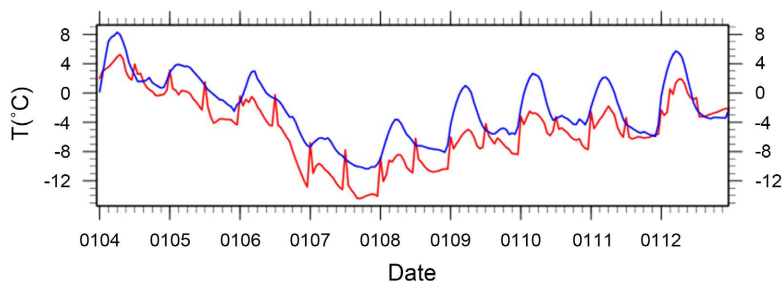


Figure 13. Area minimum temperature (GRAPES (red) ERA5 (blue))
图 13. 区域最低温度(GRAPES (红) ERA5 (蓝))

可以看出模式预报逐小时区域最低温变化普遍低于 ERA5 资料, 且 ERA5 升温 and 降温相对更加平缓, 而模式资料的波动更多; 但是整个过程的最低温的变化, 整体趋势预报较好的。

计算 1 月 5 日至 12 日, 偏差、平均误差、平均绝对误差、均方误差、均方根误差、相关系数。

见表 2, GRAPES 对于最低温度整体的预报效果没有像区域平均温度预报效果好, 其中偏差最大出现在 1 月 6 日, 偏差整体为负值, 即预报的最低温度低于 ERA5 资料的温度; 在寒潮过程中, 1 月 7 日达到 -3.87 以下; 平均绝对误差、均方误差和均方根误差最大值也是在 1 月 7 日; 相关系数只有 1 月 12 日在 0.9 以上, 1 月 5 日只有 0.49。

Table 2. Analysis and statistics of regional minimum temperature error
表 2. 区域最低温度误差分析统计

	δ	θ	MAE	MSE	RMSE	r
1 月 5 日	-0.17	-2.42	2.48	7.82	2.80	0.49**
1 月 6 日	11.33	-2.70	2.81	8.98	3.00	0.64**

Continued

1月7日	1.58	-3.87	4.03	17.57	4.19	0.70**
1月8日	1.50	-3.66	3.76	15.68	3.96	0.80**
1月9日	1.82	-3.47	3.54	15.70	3.96	0.79**
1月10日	2.34	-2.95	2.98	11.18	3.34	0.86**
1月11日	2.34	-2.84	2.91	10.16	3.19	0.81**
1月12日	3.05	-1.69	1.88	6.62	2.57	0.92**

注: *表示在 0.05 水平上显著相关; **表示在 0.01 水平上显著相关。

见图 14, 模式大部分点落在 45°线的下方, 也就是说, 对于最低温度 GRAPES 比 ERA5 整体偏低, 但是相关性还是比较好的, 整体趋势预报较好。

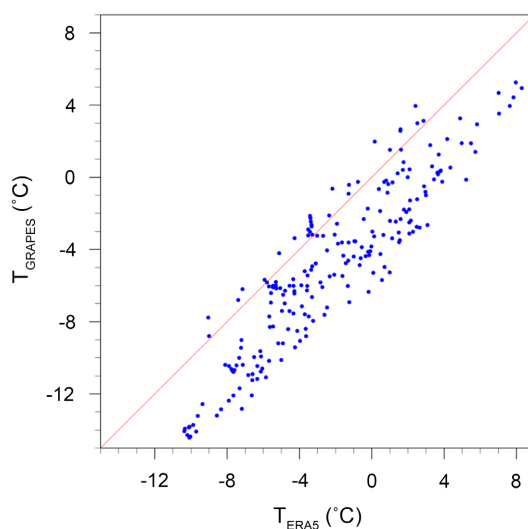


Figure 14. Scatter map of minimum temperature distribution in GRAPES and ERA5 regions

图 14. GRAPES 与 ERA5 区域最低温分布散点图

综上, 对于最低温度的预报, GRAPES 预报的较低, 且在小时平均的 8 时和 20 时出现陡增的情况, 初步认为是在每天 08 时和 20 时对应世界时的 00 时和 12 时, 这两个时次均为起保时间, 也就是说, 模式普遍将最低温度预报较低。

4. 主要结论

本文利用图像特征提取, 将 GRAPES 模式与 ERA5 资料 2021 年 1 月 5 日至 12 日我国黄山附近的低温区域提取出来, 将两个模式进行比较评估, 得到如下结论: 1) GRAPES 模式对于本文所选个例的位置、变化趋势以及强度预报效果整体较好; 2) GRAPES 对于低温区域位置预报与 ERA5 对比, 整体没有太大偏差, 在寒潮开始前, 与寒潮消失后, 低温区域的预报比 ERA5 偏南; 3) GRAPES 对于区域低温面积偏差较大, 其主要是由于 GRAPES 与 ERA5 分辨率引起的, 除了分辨率引起的误差, 部分时间段 GRAPES 的低温区域面积高于 ERA5 资料数据。4) 对于区域平均温度, GRAPES 和 ERA5 几乎一致, 其区域平均温度相差 2°C, 误差较小, 预报的平均水平良好。5) GRAPES 对最低温的预报普遍偏低, 且最低温的位置偏南, 但是低温的变化趋势 GRAPES 与 ERA5 比较吻合。6) GRAPES 预报与 ERA5 的低温区域面积、区域平均温度、区域最低温度的日变化, GRAPES 普遍比 ERA5 落后 1 小时。

参考文献

- [1] 张宇, 陈德辉. 谈谈高性能计算机对数值天气预报发展的重要技术支持作用[J]. 科研信息化技术与应用, 2010, 1(4): 9-19+8.
- [2] 陈德辉, 薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与展望[J]. 气象学报, 2004(5): 623-633.
- [3] 陈德辉, 薛纪善, 杨学胜, 等. 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, 2008(20): 2396-2407.
- [4] 陶亦为, 代刊, 董全. 2016年1月寒潮天气过程极端性分析及集合预报检验[J]. 气象, 2017, 43(10): 1176-1185.
- [5] 河南省气象灾害预警信号发布与传播办法[J]. 河南省人民政府公报, 2010(2): 3-16.
- [6] 王丹, 戴昌明, 娄盼星, 等. 陕西 ECMWF、GRAPES_Meso 和 SCMOC 气温预报的对比检验及订正[J]. 干旱气象, 2021, 39(4): 697-708.
- [7] 康岚, 冯汉中, 屠妮妮, 等. Grapes 模式预报西南地区夏季 2m 温度的检验评估[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(2): 26-32+40.
- [8] 陶潘虹, 张耀存, 孙风华. BCC 第二代气候预测模式系统对 2015 年一次寒潮过程的预报能力评估[J]. 气象科学, 2020, 40(2): 191-199.
- [9] Durai, B. (2014) Evaluation of Statistical Bias Correction Methods for Numerical Weather Prediction Model Forecasts of Maximum and Minimum Temperatures. *Natural Hazards*, **73**, 1229-1254.
<https://doi.org/10.1007/s11069-014-1136-1>
- [10] Miglietta, M.M., et al. (2012) Evaluation of WRF Model Performance in Different European Regions with the Delta-Fairmode Evaluation Tool. *International Journal of Environment and Pollution*, **s50**, 83-97.
<https://doi.org/10.1504/IJEP.2012.051183>
- [11] 刘冀彦, 毛龙江, 牛涛, 等. 地形对 2011 年 9 月华西致灾暴雨强迫作用的数值模拟研究[J]. 气象, 2013, 39(8): 975-987.
- [12] 肖明静, 隋明, 范苏丹, 等. 3 种数值模式温度预报产品在山东应用的误差分析与订正[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 472-477.
- [13] 顾永刚, 王丽, 徐双柱. 2005 年夏季华中地区四种数值预报模式的预报效果评估[J]. 湖北气象, 2006(2): 13-16.
- [14] 万夫敬, 赵传湖, 马艳, 等. ECMWF 模式气温预报在青岛地区的检验与评估[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 112-120.
- [15] 闵晶晶. BJ-RUC 系统模式地面气象要素预报效果评估[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 265-273.
- [16] 韦青, 代刊, 林建, 等. 2016-2018 年全国智能网格降水及温度预报检验评估[J]. 气象, 2020, 46(10): 1272-1285.
- [17] 张小雯, 唐文苑, 郑永光, 等. GRAPES_3km 数值模式对流风暴预报能力的多方法综合评估[J]. 气象, 2020, 46(3): 367-380.
- [18] 吴俞, 冯箫, 李勋, 等. GRAPES_GZ3km 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, 2021, 37(4): 633-646.
- [19] 黄山风景区管委会官网. 黄山概况[EB/OL]. <https://hsgwh.huangshan.gov.cn/zjhs/hsjs/hsgk/index.html>, 2022-04-15.