

一次高温事件的GRAPES对流尺度模式预报能力评估

徐璇烨, 蔡宏珂

成都信息工程大学, 四川 成都

收稿日期: 2022年10月6日; 录用日期: 2022年11月7日; 发布日期: 2022年11月15日

摘要

为了评估GRAPES对流尺度模式对高温事件的预报能力, 本文选取成都市及其周边区域(102°E~105°E, 30°N~31.5°N), 7月28日至8月4日的GRAPES 3 km模式温度预报资料、ERA5温度再分析资料和成都市各测站常规资料中的温度资料, 利用图像识别的特征区域提取算法提取出温度高于30°C的区域, 通过计算相关系数等对此次成都市的高温事件进行GRAPES对流尺度模式高温事件预报能力评估。本文从四个方面进行讨论: 高温事件的开始时间、结束时间、高温区域面积和高温强度。结果表明: 1) GRAPES对流尺度模式预报高温区域中心变化趋势与ERA5再分析资料的高温区域中心变化趋势相一致, 但GRAPES对流尺度模式对高温区域中心的预报与ERA5再分析资料相比整体偏北、偏西。2) GRAPES对流尺度模式对高温出现和结束的时段的预报与ERA5再分析资料高温出现和结束时间相比均有所提前, 高温开始时间提前1~2小时, 高温结束时间提前1~3小时。3) GRAPES对流尺度模式预报高温区域面积与ERA5再分析资料相比整体偏大, 二者高温面积相关性较高, 高温区域面积的预报能力较好。4) GRAPES对流尺度模式出现高温时段温度变化趋势与ERA5再分析资料相符合, GRAPES对流尺度模式对高温强度的预报与ERA5再分析资料的高温强度相比整体较弱。

关键词

GRAPES对流尺度模式, ERA5再分析资料, 高温, 评估

Evaluation of the GRAPES Convective Scale Model Prediction Capability for a High Temperature Event

Xuanye Xu, Hongke Cai

Chengdu University of Information and Technology, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 6th, 2022; accepted: Nov. 7th, 2022; published: Nov. 15th, 2022

Abstract

This paper selects the temperature data from the GRAPES 3 km model prediction of temperature data, the ERA5 reanalysis temperature data and the conventional data from Chengdu stations from July 28 to August 4 in Chengdu and its surrounding areas (102°E~105°E, 30°N~31.5°N), to evaluate the prediction ability of the GRAPES convective scale model for high temperature events. By using the feature area extraction algorithm of image recognition to extract the area with temperature higher than 30°C, calculating the correlation coefficient to evaluate the capability of forecasting the high temperature event of the GRAPES convective scale model for this high temperature event in Chengdu. This paper discusses from four aspects: the start time, the end time, the area of high temperature region and the intensity of high temperature region of this high temperature event. Major results are as follows. 1) The prediction trend of the regional center of high temperature by the GRAPES convective scale model is consistent with that by ERA5 reanalysis data, but the prediction trend of the regional center of high temperature by the GRAPES convective scale model is generally more north and more west than that by ERA5 reanalysis data. 2) Compared with ERA5 reanalysis data, the prediction of the onset and end of high temperature by the GRAPES convective scale is earlier. The GRAPES convective scale model predicts that the onset of high temperature is 1~2 hours earlier and the end of high temperature is 1~3 hours earlier. 3) The GRAPES convective scale model has a high correlation with ERA5 reanalysis data, the prediction ability of high temperature area is better. 4) Compared with ERA5 reanalysis data, the GRAPES convective scale model predicted high temperature area is mainly larger than ERA5 reanalysis data. The correlation between the two models is high and the prediction ability of high temperature area is good.

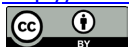
Keywords

The GRAPES Convective Scale Model, ERA5 Reanalysis Data, The High Temperature, Assessment

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. 研究背景及现状

在全球变暖的背景下, 地表温度出现持续增暖的趋势, 在全球范围内, 高温事件频发[1] [2]。持续发生的极端高温给人们的健康和社会的经济带来极大的威胁和损失[3]。例如, 在 2011 年 5 月至 10 月, 河南中部地区、重庆西南部地区、四川东部地区、新疆东部和西北部地区出现一系列的高温天气, 其中 44 个乡镇出现了或打破了记录[4]。2010 年俄罗斯西部地区出现破纪录高温事件, 7 月莫斯科的平均气温比以往记录高 2.5°C [5]。IPCC 第一工作组在报告《气候变化 2021: 自然科学基础》中首次提出, 在今后 20 年内, 全球气温的平均变动将会达到或高于 1.5°C, 热浪会增多, 温暖季节会更长, 而寒冷季节会更少[6]。

由于极端高温事件会带来极大的危害, 评估模式对极端高温等天气事件的预报能力可以有效地减小和避免灾害。模式预报在短期预测的业务中发挥着重要作用[7]。我国作为最早开展数值模式气候预测业务的国家之一, 九五规划的首批气象预报服务是近几年国内气象预报的重要手段[8]。我国的数值预报工作经历了几年的发展, 已基本形成了一个比较完善的数值预报系统。由中国气象局数值预报中心自行开

发的 GRAPES 全球集合预报系统(GRAPES_GEPS)已在业务上获得了认可, 这表明了中国已建立起以 GRAPES 为核心的全球、区域确定性和集中预测系统模型。

此前, 已经有很多学者对 ECMWF、T213、T369 等数值模式对温度的预报能力进行评估。例如, 鲍媛媛等[9]比较了 T213 和 ECMWF 模式表明 T213 模型预测北部 850 hPa 的气温有良好的预测作用, 能够较好的反应出华北温度的主要变化。吴剑坤等[10]通过建立极端温度天气预报指数(Extreme Temperature Forecast Index, 简称 EFI)数学模型, 发现 EFI 对极端温度天气具有较好的识别能力。郑嘉雯等[11]、陈法敬等[12]、夏凡等[13]基于 T639 集合系统, 研究发现 T639 集合系统在全国范围内均表现出良好的预测效果。

对于 GRAPES 模式, 我国学者对于温度的预报能力进行了评估。例如, 康岚等[14]利用 GRAPES 中尺度模式对西南地区夏季 2 m 温度进行预报检验评估, 结果显示对四川多数地区, 模式预报的温度偏高, 而对川西高原以北和西藏地区模式预报温度则较低。任绪伟[15]认为 GRAPES 3 km 模式对西北地区 2 m 温度的预报效果较好。张利红等[16]、庄照荣等[17]利用不同分辨率 GRAPES 模式对 2016 年夏季西北地区 2 m 温度预报效果进行检验, 结果显示 10 km 分辨率模式对西北地区 2 m 温度预报准确率比 3 km 分辨率模式高。黄丽萍等[18]利用 GRAPES 区域中尺度模式对贵州地区温度预报进行检验评估, 结果显示该模式对贵州高温天气的预报能力较差, 对低温天气的预报能力较好。

1.2. 研究意义

目前学者研究主要是利用 GRAPES 中尺度模式对温度预报能力进行评估, 利用 GRAPES 对流尺度模式进行降水预报和对流参数化方面的评估。但是利用 GRAPES 对流尺度模式对高温事件预报能力的评估的研究, 包括对其高温天气的开始时间预报, 结束时间预报, 高温强度预报和高温范围预报等方面预报能力评估还较少。因此, 利用 GRAPES 对流尺度模式对高温事件的预报能力进行评估对于中国数值预报的未来改进和发展以及业务预报有重要意义。

本文计划以 2021 年 7 月 28 日至 8 月 4 日成都市及其周边地区的一次高温天气事件为例, 用全国台站中的成都市温江站的温度观测资料、GRAPES 对流尺度模式预报的温度资料和 ERA5 温度再分析资料为基准, 从此次高温事件的开始时间、结束时间, 高温区域面积和高温区域强度四个方面对 GRAPES 对流尺度模式高温事件预报能力进行评估。

2. 资料和方法

本文选取的研究区域有两个, 其一为成都及其周边地区(102°E~105°E, 30°N~31.5°N), 为大区域。另一个为大区域中的高温中心, 为小区域(104.1°E~104.5°E, 30.5°N~30.7°N)。

2.1. 资料概况

GRAPES 3 km 模式由中国气象局数值预报中心自行开发, ERA5 是由 ECMWF 的集合预报系统(Integrated Forecast System, IFS)的 4D-Var 数据预测和 CY41R2 模型预报产生的, 是一种全面性的再分析数据。

本文选取资料为 7 月 28 日至 8 月 4 日 GRAPES 3 km 模式 00 时(世界时, 下同)起报的水平分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ 的逐小时温度预报资料、ECMWF 水平分辨率 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的 ERA5 温度再分析资料和国家地面自动气象观测站中选取的成都市各测站常规观测资料中的温度资料。

2.2. 研究方法

2.2.1. 高温预报能力评估方法简介

本文通过求取偏差(δ)、平均误差(θ)和相关系数(r) [9] [10] [11]来确定 ERA5 温度再分析资料与 GRAPES 对流尺度模式温度预报资料的相关性。

偏差是指观测值与实际值的平均值之比, 反映预报数据与实况误差的相对程度。其中 F_i 表示预报数据, O_i 表示实测数据, N 表示数据个数。当偏差(δ)越接近 1 时, 说明预报效果较好。

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

平均误差(θ)是观测值与实际值差值的和的平均值, 表示模式预报的误差倾向。当平均误差接近 0 时, 说明预报效果较好。

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

相关系数(r)是研究变量之间线性相关程度的量。其中, $Cov(F_i, O_i)$ 为 F_i 与 O_i 的协方差, $Var(F_i)$ 为 F_i 的方差, $Var(O_i)$ 为 O_i 的方差。相关系数的绝对值变化在 0~1 之间, 即 $|r| \leq 1$ 。 $|r|$ 越大, 相关程度越好; $|r| = 0$ 时相关程度最差。

$$r(F_i, O_i) = \frac{Cov(F_i, O_i)}{\sqrt{Var(F_i)Var(O_i)}} \quad (3)$$

2.2.2. 图像识别的特征区域提取

通常, 我们仅仅关注于一些特定的区域, 要想正确地辨识出这些特定的特征, 就必须对它们进行更深层次的分析, 需要将其进行分类和抽取。特性是对可提取的资料进行测定或加工。图像特征是指每个都图像具备与其它类别图像相区分的特性。特征抽取是指将某些原始资料进行缩减或重组, 以方便以后再利用, 利用电脑对其进行提取, 并对其进行分析与转换, 从而达到所需要的特性。图像识别实际上是一种分类的方法, 把影像与其它种类的影像加以区分, 进而辨识出影像属于哪一种类别, 并需要选择一种可以较好地描绘影像并将各种影像加以区分。

本文则通过图像识别的特征区域提取算法提取出温度高于 30℃ 的区域, 并将其按天按小时储存为不同文件, 便于后续数据处理和绘图。

2.2.3. 地球两点间球面距离

本文通过利用球面距离公式来判断 GRAPES 对流尺度模式对高温区域中心的预报与 ERA5 再分析资料的高温区域中心相差的距离。球面距离计算公式如下:

$$S = R \cdot \arccos [\cos \beta_1 \cos \beta_2 \cos (\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \beta_1 \sin \beta_2] \quad (4)$$

其中设 A, B 两点纬度角为 β_1, β_2 , 经度角为 α_1, α_2 ; S 为 A, B 两点间球面距离; R 为地球半径, 本文取 6371 km。

3. 研究结果

3.1. 成都市高温概况

中国气象学家根据中国的气象条件, 将日最高气温达到或超过 35℃ 称为高温天气。2021 年 7 月 28 日至 8 月 4 日, 成都地区出现大面积持续高温晴热天气, 如图 1 所示为在此期间成都市 14 个测站日最高温度情况, 可以看出 7 月 28 日至 8 月 4 日最高温度普遍达到 35℃~39℃, 达到高温天气标准。如图 2 所示, 温江站 8 月 1 日至 3 日最高温度均达到 37℃。这种连续性极端高温天气在成都市并不多见, 可知此次高温天气过程的严重性。

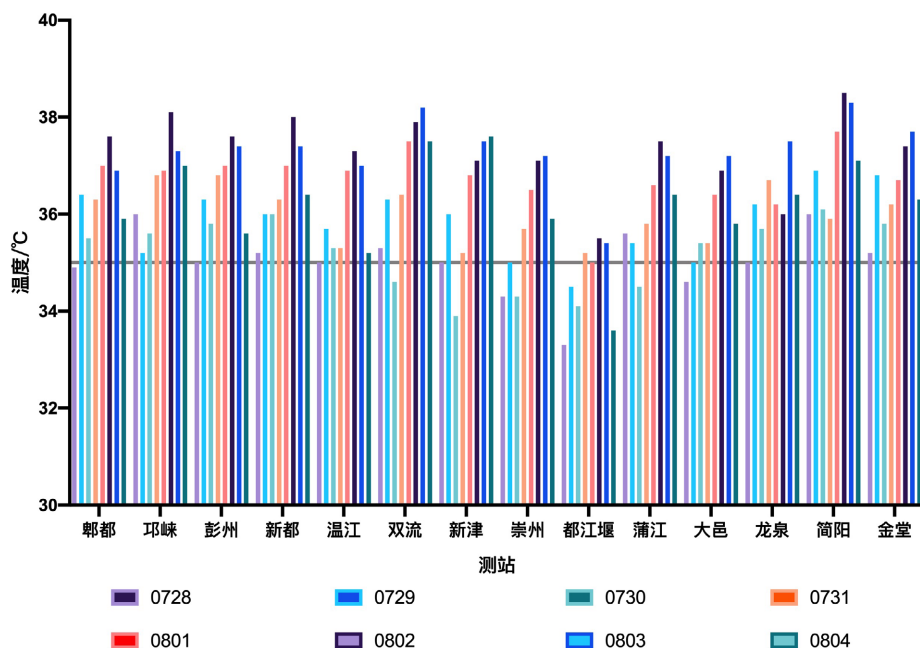


Figure 1. The daily maximum temperature of each station in Chengdu from July 28 to August 4
图 1. 成都市 7 月 28 日至 8 月 4 日各测站日最高温度

由图 2 还可以看出, ERA5 再分析资料体现的温度变化趋势与成都市温江站温度实况的变化趋势一致, 预报的高温强度虽有误差但误差较小, 普遍误差在 $0^{\circ}\text{C}\sim\pm 2^{\circ}\text{C}$, 因此使用 ERA5 再分析资料与 GRAPES 对流尺度模式预报资料进行对比分析是具有可信度的。

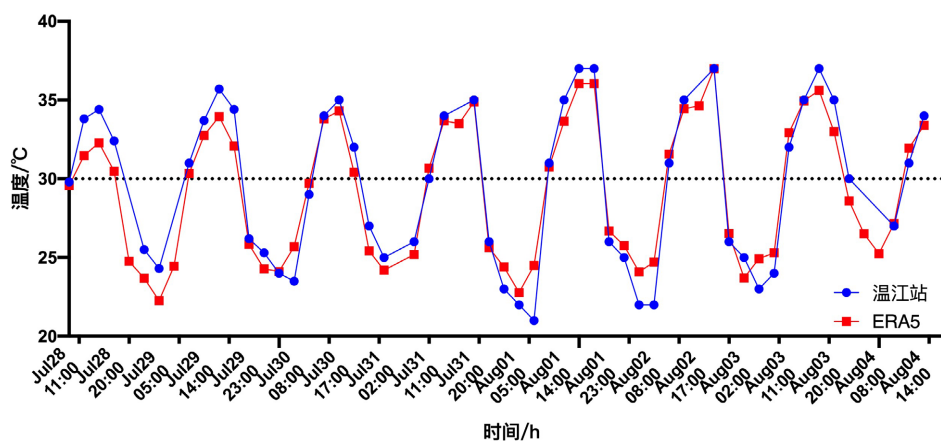


Figure 2. Comparison of temperature changes at Wenjiang Station in Chengdu from July 28 to August 4, 2021 with ERA5 reanalysis temperature data

图 2. 2021 年 7 月 28 日至 8 月 4 日成都市温江站温度变化与 ERA5 再分析温度资料对比

3.2. 模式对高温天气预报位置评估

为判断 GRAPES 对流尺度模式对出现高温区域的中心经纬度的预报评估, 选取 GRAPES 对流尺度模式和 ERA5 再分析资料均出现出现高温的时间段。图 3 为成都高温区域中西经度、纬度的分布散点图。表 1 为 GRAPES 对流尺度模式与 ERA5 再分析资料的高温区域中心经纬度日变化及两个模式对应经纬度相差的距离。

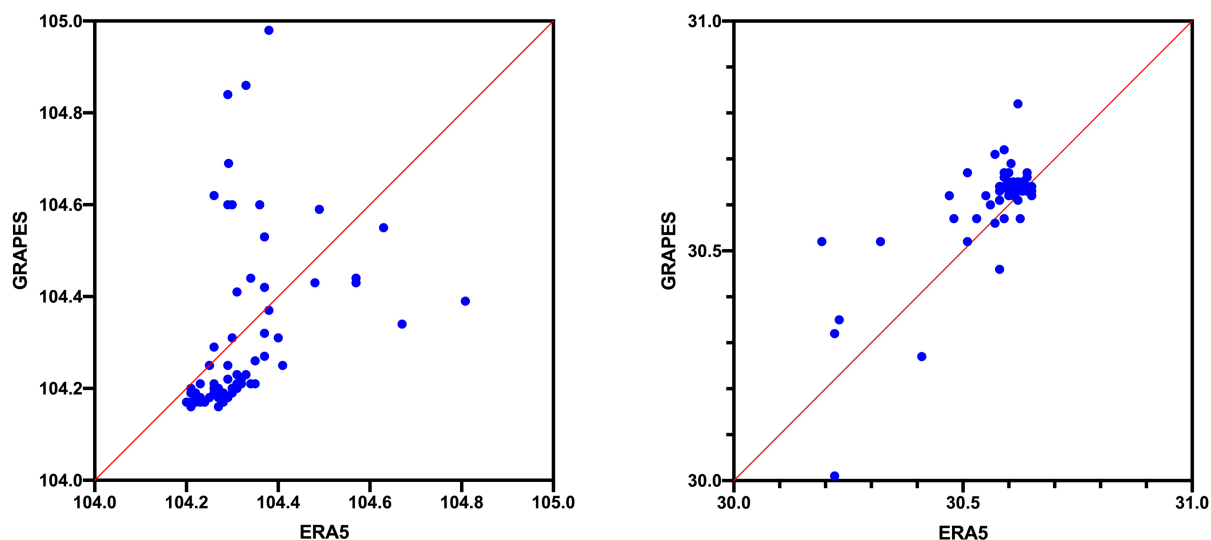


Figure 3. Scatter plot of longitude and latitude distribution of the center of the high temperature area from July 28 to August 4 (longitude on the left, latitude on the right)

图 3. 7 月 28 日至 8 月 4 日高温区域中心经度、纬度分布散点图(左图为经度, 右图为纬度)

Table 1. The distance between latitude and longitude of the center of the high temperature area

表 1. 高温区域中心经纬度相差距离

时间	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
球面距离/km	14.94	8.2	4.54	6.7	6.93	6.37	6.71	6.71	7.43	5.95

由图 3 可以看出散点围绕红色斜线周围分布, 图 3 左图散点主要分布在红线以下说明 GRAPES 对流尺度模式相比 ERA5 再分析资料的中心经纬度偏西, 右图散点主要分布在红线以上说明 GRAPES 对流尺度模式相比 ERA5 再分析资料的中心经纬度偏北。由表 1 可以看出高温区域中心经纬度于 10 时偏离最多, 相差距离为 14.94 Km; 12 时偏离最少, 距离为 4.54 Km; 平均偏离距离为 7.44 Km。

综上所述, GRAPES 对流尺度模式对高温天气的位置预报虽有偏差, 但整体预报效果较好。

3.3. 模式对高温天气预报时间、区域面积评估及误差分析

3.3.1. 模式对高温天气预报时间评估

为了判断 GRAPES 对流尺度模式预报高温天气出现和结束的时间和高温区域面积的能力, 选取 GRAPES 对流尺度模式和 ERA5 再分析资料对 7 月 28 日至 8 月 4 日的成都市及其周边地区温度高于 30℃ 的区域进行分析。如图 4 所示, ERA5 再分析资料的高温开始时间主要在 10 时, GRAPES 对流尺度模式预报高温开始时间主要在 09 时, 相比 ERA5 再分析资料提前 1~2 小时。还可以看出, ERA5 再分析资料的高温结束时间较 ERA5 再分析资料提前 1~3 小时。整体来看, GRAPES 对流尺度模式对高温出现和结束的时段的预报均有所提前。

3.3.2. 模式对高温天气面积预报评估及误差分析

由图 4 可以看出对于成都及其周边地区, GRAPES 对流尺度模式预报高温区域于 09 时出现, 后面积逐渐增大, 12 时开始面积变化较小, 较为平稳, 18 时面积开始减小, GRAPES 对流尺度模式预报的高温区域面积变化趋势与 ERA5 再分析资料的高温区域面积变化情况一致。且由图可以看出 GRAPES 对流模式对面积的预报整体上偏大, 尤其在高温区域面积大于 170 km² 时。

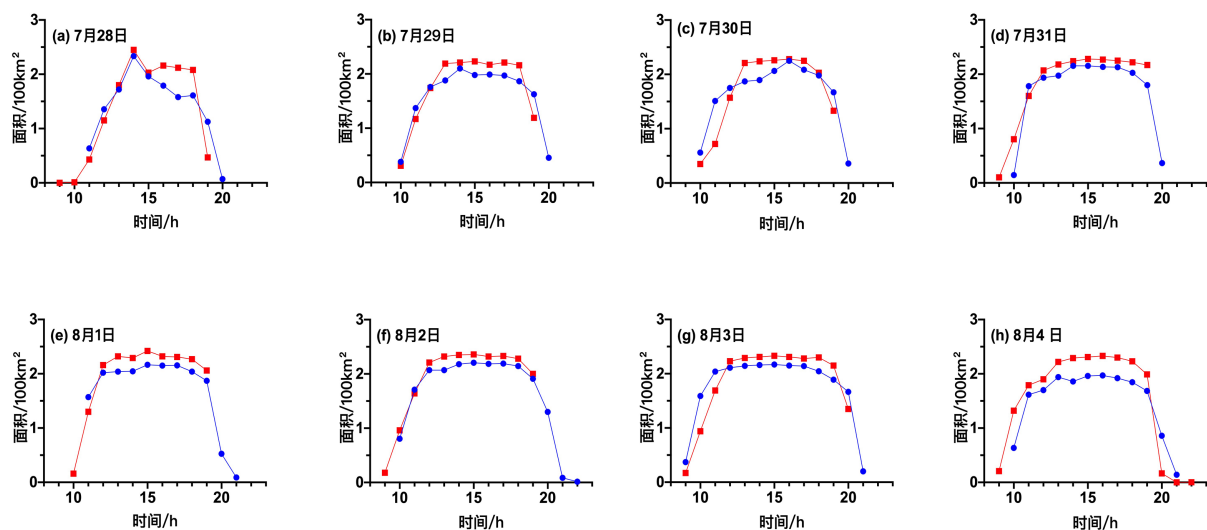


Figure 4. Comparison of area changes during high temperature periods from July 28 to August 4 (red squares for GRAPES convection scale mode, blue dots for ERA5 reanalysis data)

图 4. 7月28日至8月4日出现高温时段面积变化对比(红色方块为 GRAPES 对流尺度模式, 蓝色圆点为 ERA5 再分析资料)

由图 4 还可以看出 ERA5 再分析资料的高温区域面积与 GRAPES 对流尺度模式预报的高温区域面积存在绝对误差, 说明 GRAPES 对流尺度模式对于不同时间段的预报能力有一定差异, 且两者高温区域面积绝对误差存在明显的日变化。如图 5 所示, 一天中从出现高温区域开始, 11 时之前绝对误差主要为正值, 即 GRAPES 对流尺度模式预报高温面积偏小, 12 时至 18 时 GRAPES 对流尺度模式预报高温面积偏大。19 时至 21 时 GRAPES 对流尺度模式预报高温面积偏小。

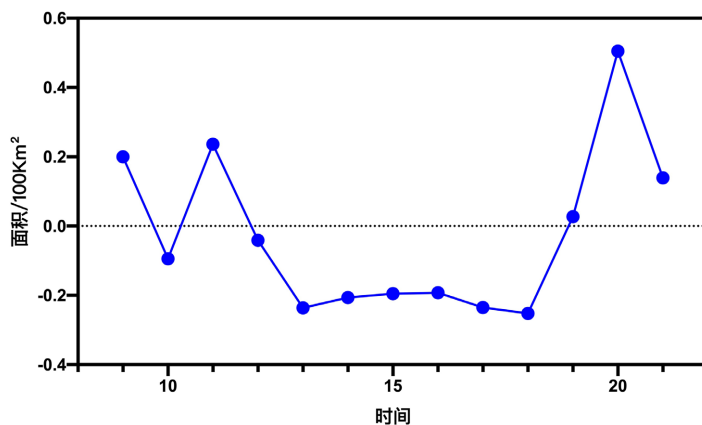


Figure 5. ERA5 reanalysis data predicts the daily variation of absolute error between high temperature region area and high temperature region area in GRAPES convection scale mode

图 5. ERA5 再分析资料预报高温区域面积与 GRAPES 对流尺度模式高温区域面积绝对误差日变化

7月28日至8月4日每天的高温区域面积误差分析统计见表 2。可以看出在此期间 GRAPES 对流模式与 ERA5 再分析资料面积的偏差接近 1, 7月30日和8月3日平均误差接近 0, 8月2日相关系数最高为 0.98, 整体来看 7月28日至8月4日 GRAPES 对流尺度模式预报高温面积与 ERA5 再分析资料面积的总相关系数为 0.91, 二者相关性总体较高, 说明 GRAPES 对流尺度模式对高温面积的预报能力较好。

Table 2. Area error analysis statistics in high-temperature areas**表 2.** 高温区域面积误差分析统计

时间	7月28日	7月29日	7月30日	7月31日	8月1日	8月2日	8月3日	8月4日
偏差(δ)	1.04	1.04	0.98	1.1	1.08	1.07	0.99	1.14
平均误差(θ)	6.42	6.58	-3.95	18.49	15.5	13	-1.04	22.63
相关系数(r)	0.9	0.95	0.9	0.95	0.9	0.98	0.93	0.93

3.4. 模式对高温强度预报评估及误差分析

3.4.1. 模式对高温强度预报评估

为了判断 GRAPES 对流尺度模式对高温强度的预报能力, 选取 GRAPES 对流尺度模式和 ERA5 再分析资料对 7 月 28 日至 8 月 4 日的成都市及其周边地区温度高于 30℃ 的逐小时变化和小区域的 24 小时区域平均温度进行分析。

图 6 中 GRAPES 对流尺度模式对温度日变化趋势与 ERA5 再分析资料温度日变化趋势一致, GRAPES 对流尺度模式对温度的预报与 ERA5 再分析资料的温度相比除 8 月 4 日外均较低。ERA5 再分析资料的该区域最高温度出现在 8 月 3 日 15 时, 为 34.1℃, 而 GRAPES 对流尺度模式对应温度为 33.17℃。8 月 4 日 GRAPES 对流尺度模式高温强度预报在 09 时至 19 时较 ERA5 再分析资料的温度高, 最大差值为 1.95℃。

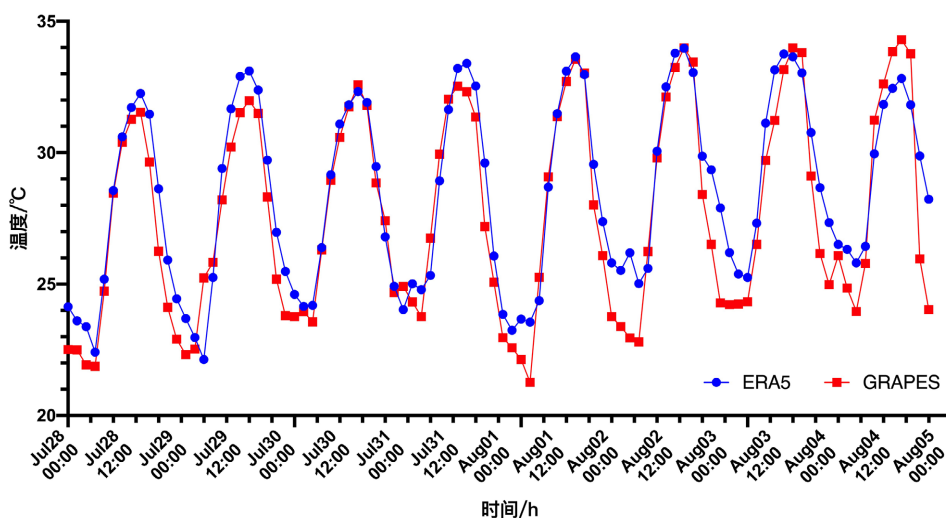
**Figure 6.** Comparison of average temperature changes in small areas from July 28 to August 4**图 6.** 小区域 7 月 28 日至 8 月 4 日平均温度变化对比

图 7 为 7 月 28 日至 8 月 4 日出现高温区域的 GRAPES 对流尺度模式与 ERA5 再分析资料对比, 可以看出 GRAPES 对流尺度模式出现高温时段温度变化趋势与 ERA5 再分析资料相符合。7 月 28 日至 7 月 31 日 GRAPES 对流尺度模式预报温度普遍低于 ERA5 再分析资料, 16 时至 18 时 GRAPES 对流尺度模式预报温度与 ERA5 再分析资料相差较小, 预报效果较好。8 月 1 日至 8 月 4 日在 16 时至 18 时 GRAPES 对流尺度模式预报温度高于 ERA5 再分析资料。7 月 28 日至 8 月 3 日 GRAPES 对流尺度模式预报温度与 ERA5 再分析资料相差较小, 普遍差值为 0℃~±1℃, 8 月 4 日 GRAPES 对流尺度模式从高温天气出现开始, 预报温度均强于 ERA5 再分析资料, 差值在 0.6℃~1.5℃ 范围。

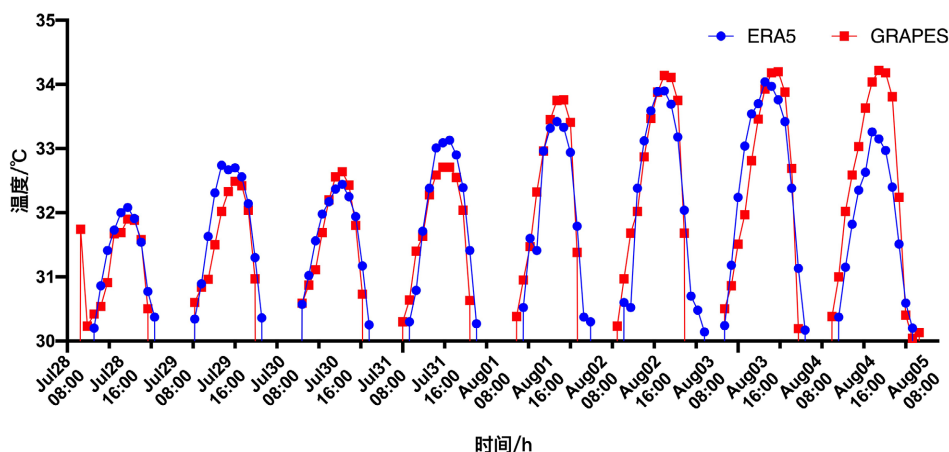


Figure 7. The comparison of regional average temperature changes during the high temperature period from July 28 to August 4

图 7. 7 月 28 日至 8 月 4 日出现高温时段区域平均温度变化对比

3.4.2. 模式对高温强度预报误差分析

GRAPES 对流尺度模式预报温度与 ERA5 再分析资料温度存在着绝对误差, 且呈现出明显的日变化。图 8 为二者绝对误差的日变化分析, 可以看出一天中 7 至 9 时绝对误差为负值, 说明在此时间段内 GRAPES 对流尺度模式预报的温度与 ERA5 再分析资料相比较, 其余时段绝对误差为正值, 说明 GRAPES 对流尺度模式预报的温度与 ERA5 再分析资料相比较低。

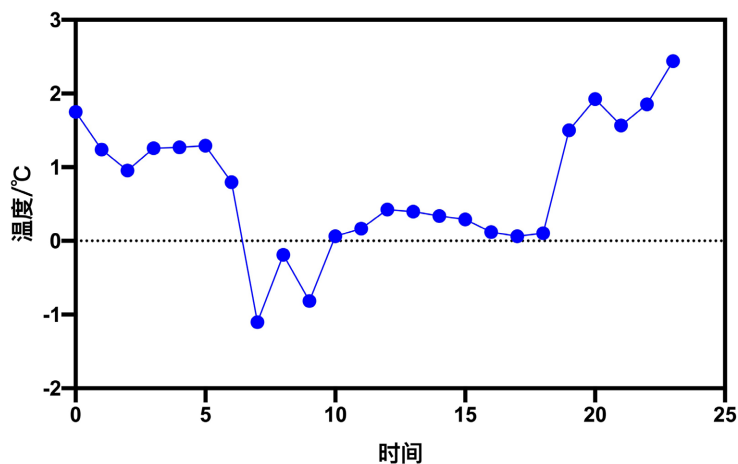


Figure 8. The daily variation of the predicted temperature of the GRAPES convection scale mode in the small region and the absolute error of the temperature of the ERA5 reanalysis data is changed

图 8. 小区域 GRAPES 对流尺度模式预报温度与 ERA5 再分析资料温度绝对误差日变化

Table 3. Statistics of GRAPES convection scale mode temperature forecast error from July 28 to August 4 in small areas
表 3. 小区域 7 月 28 日至 8 月 4 日 GRAPES 对流尺度模式温度预报误差统计

时间	7 月 28 日	7 月 29 日	7 月 30 日	7 月 31 日	8 月 1 日	8 月 2 日	8 月 3 日	8 月 4 日
偏差(δ)	0.97	0.97	0.98	0.99	0.98	0.96	0.96	0.97
平均误差(θ)	-0.89	-0.86	-0.46	-0.38	-0.54	-1.1	-1.07	-0.58
相关系数(r)	0.96	0.96	0.91	0.95	0.97	0.93	0.95	0.93

表3为7月28日至8月4日GRAPES对流尺度模式对每天的温度预报误差统计。可以看出此期间每天的偏差均接近1,7月31日平均误差最接近0,8月1日相关系数最大,为0.97。整体来看,GRAPES对流模式对温度的预报能力较好。

4. 结论

本文利用GRAPES对流尺度模式资料、ERA5再分析资料和成都市各测站常规资料中的温度资料,对7月28日至8月4日成都市及其周边地区发生的一次高温天气事件的预报进行评估,得出如下结论:

1) GRAPES对流尺度模式预报高温区域中心变化趋势与ERA5再分析资料的高温区域中心变化趋势相一致,但GRAPES对流尺度模式对高温区域中心的预报与ERA5再分析资料相比整体偏北、偏西。

2) GRAPES对流尺度模式对高温出现和结束的时段的预报与ERA5再分析资料高温出现和结束时间相比均有所提前,高温出现的时间提前1~2小时,高温结束时间提前1~3小时。

3) GRAPES对流尺度模式预报高温区域面积与ERA5再分析资料高温面积相比整体偏大,且二者绝对误差的日变化为在高温天气刚出现的3小时和高温天气结束前的3小时预报面积普遍偏小,在其余时间预报面积普遍偏大。GRAPES对流尺度模式预报高温区域面积与ERA5再分析资料高温面积的相关性较高,高温区域面积的预报能力较好。

4) 对于小区域来说,GRAPES对流尺度模式对温度变化趋势与ERA5再分析资料温度变化趋势一致,GRAPES对流尺度模式温度预报的强度整体上低于ERA5再分析资料的温度强度。

5) 对于成都及其周边地区,GRAPES对流尺度模式出现高温时段温度变化趋势与ERA5再分析资料相符合。从日变化可以看出7时至9时GRAPES对流尺度模式预报的温度与ERA5再分析资料相比偏高,其余时段GRAPES对流尺度模式预报的温度与ERA5再分析资料相比偏低。

参考文献

- [1] Alexander, L.V., Zhang, X., *et al.* (2006) Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D05109.
- [2] Song, X., Zhang, Z., Chen, Y., *et al.* (2014) Spatiotemporal Changes of Global Extreme Temperature Events (ETEs) since 1981 and the Meteorological Causes. *Natural Hazards*, **70**, 975-994. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0856-y>
- [3] Coumou, D. and Rahmstorf, S. (2012) A Decade of Weather Extremes. *Nature Climate Change*, **2**, 491-496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- [4] 张书娟, 尹占娥, 温家洪, 等. 近60年我国华东地区高温灾害特征分析[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2011, 40(1): 95-101.
- [5] Dole, R., Martin, H., *et al.* (2011) Was There a Basis for Anticipating the 2010 Russian Heat Wave? *Geophysical Research Letters*, **38**, L06702. <https://doi.org/10.1029/2010GL046582>
- [6] IPCC (2013) Summary for Policymakers. In: Stocker, T.F., *et al.*, Eds., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, 3-29.
- [7] 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展[J]. 应用气象学报, 2013, 24(5): 533-543.
- [8] 肖子牛. 我国短期气候监测预测业务进展[J]. 气象, 2010, 36(7): 21-25.
- [9] 鲍媛媛. 2006年6-8月T213与ECMWF模式中期预报性能检验[J]. 气象, 2006, 32(11): 98-104.
- [10] 吴剑坤, 高丽, 乔林, 等. 基于T213集合预报的中国极端温度预报方法研究[J]. 气象科学, 2015, 35(4): 428-444.
- [11] 郑嘉雯, 高丽, 任宏利, 等. 基于T639集合预报的我国2016年极端温度预报检验[J]. 气象, 2019, 45(4): 469-482.
- [12] 陈法敬, 矫梅燕, 陈静. 一种温度集合预报产品释用方法的初步研究[J]. 气象, 2011, 37(1): 14-20.
- [13] 夏凡, 陈静. 基于T213集合预报的极端天气预报指数及温度预报应用试验[J]. 气象, 2012, 38(12): 1492-1501.
- [14] 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.

- [15] 任绪伟. GRAPES_Meso 3km 模式及云分析系统在西北地区天气预报中的应用评估及水汽方案改进[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [16] 张利红, 何光碧. GRAPES_MESO 模式对 2011 年夏季青藏高原东部及周边区域的预报检验[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 14-35.
- [17] 庄照荣, 薛纪善, 李兴良. GRAPES 全球模式的模式误差估计[J]. 大气科学, 2010, 34(3): 591-598.
- [18] 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. GRAPES_MESO V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报, 2017, 28(1): 25-37.