

2021—2022 年夏季中国区域 2 m 温度再分析产品检验评估*

李怡辛^{1,2,3} 徐枝芳^{3,4,5} 华维² 王吉麟^{3,4} 张舒雨^{3,6} 李泽椿⁷

1 广州市黄埔区气象局, 广州 510700

2 成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225

3 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

4 中国气象局地球系统数值预报重点开放实验室, 北京 100081

5 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081

6 中国气象科学研究院, 北京 100081

7 国家气象中心, 北京 100081

提 要: 大气再分析产品在极端天气风险评估、可再生能源规划、天气气候研究以及人工智能等领域具有重要应用价值, 系统评估 2 m 温度再分析产品准确性和适用性有利于后续针对数据的正确使用以及研究工作的开展。利用 2021—2022 年中国地面自动观测站逐时 2 m 温度资料, 评估了中国区域大气再分析产品(CMA-RRR)、欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料(ERA5)及现代研究和应用回顾性分析第 2 版(MERRA2)三种再分析 2 m 温度产品。研究结果表明: 2021 年和 2022 年夏季中国区域高温主要集中在江淮流域(6 月)、华南地区和四川盆地(7—8 月), 但 2021 年强度偏弱; CMA-RRR 均方根误差(RMSE<2℃)最小, 相关系数最高, 能较准确捕捉高温时空分布, 但轻微低估极端高温频率; ERA5 高温时空分布与观测同样较为一致, 但存在高估高温(≥40℃)覆盖范围和高温时段提前的问题; MERRA2 在高温时长、强度和覆盖范围上系统性偏弱, 且显著低估极端高温。三种再分析产品均在东部地区表现优于西部, 而 CMA-RRR 更适用于四川盆地等复杂地形区域, 研究结果可为极端高温事件研究的数据选择提供一定参考。

关键词: 高温, 2 m 温度, 评估, 中国区域大气再分析

中图分类号: P413, P426 DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.073101

Assessing the 2 m Temperature Reanalysis Products in China in the Summer of 2021—2022

LI Yixin^{1,2,3} XU Zhifang^{3,4,5*} HUA Wei² WANG Jilin^{3,4} ZHANG Shuyu^{3,6} LI Zechun⁷

1 Huangpu District Meteorological Station of Guangzhou, Guangzhou 510700

2 School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology/ Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225

3 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre (CEMC), Beijing 100081

4 CMA Key Laboratory of Earth System Modeling and Prediction, Beijing 100081

5 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology (LaSW), Beijing 100081

6 Chinese Academy of Meteorological Sciences, CMA, Beijing 100081

7 National Meteorological Centre, Beijing 100081

*四川省科技计划(2025YFNH0006)和国家重点研发计划(2022YFC3004000)共同资助

2025 年 5 月 20 日收稿; 2026 年 7 月 31 日收修订稿

第一作者: 李怡辛, 主要从事气候变化与数值模式研究. Email: 2113182492@qq.com

通讯作者: 徐枝芳, 主要从事数值模式与资料同化研究. Email: zhifang@cma.gov.cn

Abstract: Reanalysis products hold significant application values in extreme weather risk assessment, renewable energy planning, climate research, and artificial intelligence. Systematically assessing the accuracy and applicability of 2 m temperature reanalysis products is conducive to the reliable utilization of data and the scientific research. By using the 2021-2022 hourly 2 m temperature observations from China's automatic weather stations, this paper evaluates three reanalysis products—CMA Regional Re-Analysis (CMA-RRA), ECMWF Reanalysis v5 (ERA5), and Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, v2 (MERRA2). The results show that in the summer of 2021-2022, high-temperature events in China were mainly concentrated in the Yangtze-Huaihe River basin (June), and the South China and Sichuan Basin regions (July-August), with the 2021 events exhibiting lower intensity than those in 2022. CMA-RRA reanalysis product demonstrates superior performance with the smallest root mean square error ($RMSE < 2^{\circ}C$) and highest correlation coefficient. It accurately captures the spatio-temporal characteristics of high-temperature events, though it slightly underestimates the frequency of extreme high temperatures. The ERA5 reanalysis data also shows reasonable consistency with observations in temporal-spatial distribution of high temperatures, but represents high-temperature periods to come earlier and overestimates the spatial extent of temperatures exceeding $40^{\circ}C$. The reanalysis product of MERRA2 systematically underestimates the duration, intensity and spatial coverage of high-temperature events, showing the most significant underestimation of extreme high temperatures. In general, all three reanalysis products perform better in eastern China than in western regions. In particular, the CMA-RRA product exhibits better adaptability in complex terrain areas like the Sichuan Basin. These findings could provide references for data selection when studying extreme high-temperature events.

Key words: high temperature, 2 m temperature, assessment, CMA regional reanalysis product

引 言

随着全球变暖加剧,极端高温事件的频率和强度均显著增加(IPCC, 2023),给生态系统和社会经济带来了长久且深远的影响。持续的高温天气将导致电力需求急剧增加,并给水电资源造成巨大压力(Liu et al, 2015)。同时,农业生产受到干旱和热浪的双重打击,作物减产和水资源短缺问题会更加突出(Ding et al, 2024; Kamatchi et al, 2024)。上述影响都凸显了提升高温事件监测预警能力的紧迫性和必要性。作为能够表征近地表热力状况的重要指标之一,2 m 温度数据的准确性对人民生活、农业生产有着重要影响(王婧等, 2015),且直接影响极端高温事件的监测精度与归因研究,其数据质量评估已成为天气、气候研究的关键基础。

在高温事件诊断中,地面观测资料虽具有较高可靠性,但其时空覆盖率深受自然条件和地理位置的制约,难以满足连续性空间分析的需求。再分析数据集通过融合多源观测数据与数值模式输出(赵天保等, 2010; Wahl et al, 2017),在保持物理一致性的同时显著提升了时空分辨率,为气象要素的连续诊断提供了重要支撑。然而,再分析产品的质量受到输入数据不同、观测系统演变、数值模式和同化方案差异及模式物理参数化等多重因素制约,还可能在气候趋势分析中引入虚假信号(Smith et al, 2001)。我国国土辽阔且地形复杂,2 m 温度数据的应用存在一定局地性(蔡怡等, 2023)。因此,对比 2 m 温度再分析数据与观测数据的差异,并系统评估 2 m 温度再分析产品的区域准确性和适用性,是正确使用该数据研究高温的必要前提(Lan et al, 2023)。

已有研究表明,再分析资料中高空温度场、位势高度场和旋转风等动力场(A类变量)因受观测约束较强而可信度较高;而湿度、地表温度等近地面参数(也称为B类变量)质量除受到观测资料影响外,还显著受到模式参数化影响,存在着更大不确定性(Kalnay et al, 1996; Kistler et al, 2001)。针对2 m温度再分析产品,朱智等(2015)、谢潇等(2011)研究发现其质量在我国呈现显著时空异质性:空间上普遍表现为中国东部优于西部、低纬地区优于高纬地区;季节变化方面暖季表现通常优于冷季(芒苏尔·艾热提等, 2024);多数产品存在系统性低估现象,其中地表温度在东北地区偏差较小,而在北疆等特殊下垫面区域偏差显著增大(单帅等, 2020)。此外,全球多套再分析数据集在我国的温度评估工作亦取得重要进展。研究表明,ERA-Interim的极端高温和极端低温在大部分区域可信度较高(高路等, 2014); ERA5和CRA40在月平均气温时空表征方面具有突出优势(王彩霞等, 2022);而JRA-55在地表温度再现方面表现较优(朱智等, 2015),但不同产品在区域适用性上仍存在差异。

不难发现,上述研究多聚焦于全球大气再分析资料展开。全球大气再分析产品时空分辨率相对较低,在研究区域中小尺度的天气、气候特征和反馈机制时存在一定局限。针对这一需求,中国气象局地球系统数值预报中心基于自主研发的中国区域大气再分析系统(CMA-RRR)研制中国区域大气再分析产品,该产品水平分辨率为 $0.03^{\circ} \times 0.03^{\circ}$,时间分辨率为1 h,较全球再分析产品时空分辨率更高,且同化了更多的中国局地特色资料如天气雷达径向风、三维组网反射率产品、地面自动站等稠密观测数据。理论上可改善局地气候特征的刻画,但目前针对其2 m温度资料性能评估仍较为匮乏,且在极端高温事件中的适用性尚未得到充分验证。

四川盆地是气候变化影响的敏感区和脆弱区(陈超等, 2010),其独特的封闭地形导致夏季高温事件频发。已有研究表明,四川盆地高温发生日期提前、强度逐渐增强(于浩慧等, 2023),为再分析资料适用性带来特殊挑战。2021—2022年,四川盆地接连发生区域性极端高温过程(陈峪等, 2022; 周春花和吴薇, 2023),尤其2022年,夏季平均气温为历史最高(罗娟等, 2023; 章大全等, 2023),对人类生活和社会经济造成严重威胁。根据中央气象台业务规定,当最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 即称为高温天气,24 h内最高气温 $\geq 37^{\circ}\text{C}$ 则达到橙色预警标准,该高温划分标准已广泛应用于中国地区高温天气研究(黄卓等, 2011; 张玉霞等, 2024)。在此背景下,本文沿用该高温标准,选取CMA-RRR、ECMWF ReAnalysis 5(ERA5; Hersbach et al, 2020)及The Modern-ERA retrospective analysis for research and applications version 2(MERRA2; Gelaro et al, 2017)再分析数据集,首先系统评估再分析资料对2021—2022年中国区域2 m温度的表现能力。并进一步针对四川盆地极端高温事件,通过双阈值体系($\geq 35^{\circ}\text{C}$ 高温天气和 $\geq 37^{\circ}\text{C}$ 严重高温)分别验证,详细对比三种再分析资料的高温适用性。研究结果拟为再分析产品科研和业务应用提供参考,同时为中国区域大气再分析系统优化改善提供一定依据。

1 资料与方法

1.1 资料

1.1.1 观测资料

地面观测资料为国家气象信息中心发布的6万余个中国地面加密自动气象观测站的2 m温度数据($^{\circ}\text{C}$),本文使用的时段为2021—2022年夏季(6—8月),采样间隔为1 h。本研究用于评估的地面观测资料共6万余个站,其中约1万个站参与了CMA-RRR系统同化。

1.1.2 再分析资料

本文主要评估三种再分析资料的2 m温度数据。包括(1)中国气象局地球系统数值预报中心研制的中国区域大气再分析产品(CMA-RRR);(2)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代全球大气再分析数据(ERA5);(3)现代研究和应用回顾性分析第2版(MERRA2)。

CMA-RRR 是中国气象局地球系统数值预报中心基于中国气象局自主研发区域模式系统 CMA-MESO(沈学顺等, 2020; 黄丽萍等, 2022)构建的逐小时 3 km 中国区域大气再分析系统, 每小时同化分析探空、地面(徐枝芳等, 2021; Xu et al, 2023)、雷达径向风、风廓线雷达(王丹等, 2019)、飞机报(王瑞文等, 2016)、云导风(万晓敏等, 2017)、全球导航卫星系统大气可降水量 (GNSS/PWV)、船舶、掩星、洋面散射风等资料, 生成大气再分析产品, 采用云分析系统(朱立娟等, 2017)应用三维雷达组合反射率、FY-2 系列卫星黑体亮温(TBB)和云分类 (CTA) 等生成水凝物产品。CMA-RRR 提供了自 2010 年来大气再分析资料, 覆盖范围为 10° ~60° N、70° ~140° E, 水平空间分辨率为 0.03° ×0.03° , 时间分辨率为 1 h。

ERA5 是 ECMWF 在 ERA-Interim 基础上构建的改进产品, 是目前应用最广泛的全球再分析产品之一, 采用的是 4D-Var 同化系统 (Hersbach et al, 2020), 提供了自 1951 年以来、水平分辨率为 0.25° ×0.25° 、时间分辨率为 1 h 的大气、陆地和海洋气象数据。

MERRA2 是美国国家航空航天局全球建模和同化办公室开发的全球大气再分析数据集, 是首个长期同化了气溶胶遥感观测的全球再分析产品 (Gelaro et al, 2017; 曲学斌等, 2022), 覆盖时段自 1980 年至今, 水平分辨率为 0.5° ×0.625° , 时间分辨率为 1 h。

1.2 研究方法

1.2.1 统计方法

统计方法包括偏差 (Bias)、均方根误差 (RMSE) 和皮尔逊线性相关系数 (R)。其中, Bias 表示再分析 2 m 温度产品与观测资料之间的平均差异, RMSE 计算 2 m 温度再分析产品与观测资料之间的离散程度, 反映 2 m 温度再分析产品的变异性, 对数据中的异常值十分敏感。Bias 和 RMSE 越接近 0, 说明再分析值与观测值越接近; R 表示 2 m 温度再分析数据与观测数据之间的线性相关性, 取值为-1~1, 负值代表负相关, 正值代表正相关, 绝对值越接近 1 说明相关性越好。使用上述三个方法, 评估 2 m 温度再分析产品与观测数据的整体一致性, 其计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2)(\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2)}} \quad (1)$$

式中, A 表示再分析产品, B 表示观测数据, n 为相应的样本量, $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$ 分别表示再分析数据和观测数据的平均值。

1.2.2 伽马分布

伽马 (Gamma) 分布 (Aksoy, 2000) 是一种常用于气象数据分析的概率密度函数 (Feng et al, 2024), 其形状由两个参数 α (形状参数) 和 β (尺度参数) 决定, 且 $\alpha > 0$, $\beta > 0$ (吴子君等, 2017)。 α 决定高温的集中程度, 值越小表示集中程度越低; β 则反映了分布的尺度, 值越大表示高温的变异性越大。

1.2.3 二分类方法

二分类方法用于评估 2 m 温度再分析产品的高温探测能力, 包括临界成功指数 (CSI)、命中率 (POD)、空报率 (FAR) 和频率偏差指数 (FBI)。CSI 值可视为对命中高温的条件概率的抽样估计 (Schaefer, 1990)。POD 表示再分析产品在所有高温事件中正确探测到高温的概率, FAR 表示再分析产品出现高温而观测未达到高温的事件数占再分析产品所有高温事件数的比例, FBI 反映再分析产品和观测高温事件出现的偏差。

本文对高温和严重高温进行二元分类 (表 1), 其中 a 表示在观测和再分析产品都是高温事件次数, 即命中数; b 表示在再分析产品为高温而观测不是高温事件次数, 即空报数;

162 c 表示观测为高温而再分析产品不是高温事件次数，即漏报数；d 表示观测和再分析产品都
163 不是高温事件次数，即正确否定数。
164

165

表 1 高温的二分类法

166

Table 1 Binary classification method of high temperatures

		观测		
		发生高温	未发生高温	全部事件
再分析产品	发生高温	a (命中)	b (空报)	a + b
	未发生高温	c (漏报)	d (正确否定)	c + d
	全部事件	a + c	b + d	a + b + c + d

167

168

CSI、POD、FAR 和 FBI 是根据二元分类的结果用以下公式计算出来的：

169

$$CSI = \frac{a}{a + b + c}, \quad (5)$$

170

$$POD = \frac{a}{a + c}, \quad (6)$$

171

$$FAR = \frac{b}{a + b}, \quad (7)$$

172

$$FBI = \frac{a + b}{a + c}, \quad (8)$$

173

174

175

CSI 值、POD 值和 FAR 值的取值从 0 到 1。CSI 和 POD 值越接近 1，而 FAR 值越接近 0，表示再分析产品越接近观测，性能越好，即漏警和空警越少。FBI 值范围从 0 到正无穷，大于 1 表示再分析产品高估了高温频率，小于 1 则表示低估了高温频率。

176

1.2.4 半变异函数

177

178

179

180

半变异函数是地质统计学中用于描述两个空间位置之间随距离变化而导致的相关性变化的工具(Song et al, 2018)，已经在气候学和气象学领域得到了广泛应用(Chen et al, 2007)。鉴于高温也会在空间上呈现出不同方向的变化差异，本文采用各向异性半变异函数评估观测数据与不同再分析产品在空间相似性上的差异。

181

2 高温分布特征

182

183

184

185

186

187

188

189

190

图 1 展示了基于观测资料的 2022 年夏季中国区域在两种阈值（35℃和 37℃）下的高温时长空间分布。高温时长定义为逐小时测站发生高温总次数减去高温发生日数。数值越大，表明站点的日均持续高温时间越长。由图 1 可见，2022 年夏季高温时长的高值区主要集中在中国东部地区 and 新疆。具体而言，6 月的高值中心位于江淮流域，7 月至 8 月则转移至华南地区与四川盆地，其影响范围更广、持续时间更长。2021 年的观测（图略）同样显示出高温集中于东部及四川盆地的类似空间分布，但强度与范围不及 2022 年。四川盆地（28°~33° N、103°~109° E）在 2021—2022 年夏季连续经历了区域性高温过程，且 2022 年强度达到历史性极端水平（周春花和吴薇，2023），这为检验再分析产品在不同强度高温事件中的性能提供了连续案例。因此，本文后续选取该区域进行高温个例的对比分析。

191

192

193

分析结果表明，CMA-RRR 和 ERA5 在刻画 2022 年高温空间分布上与观测结果较为一致，基本能够再现上述高温时长的空间分布特征（图略）。MERRA2 则对高温时长的刻画整体偏弱（图略）。

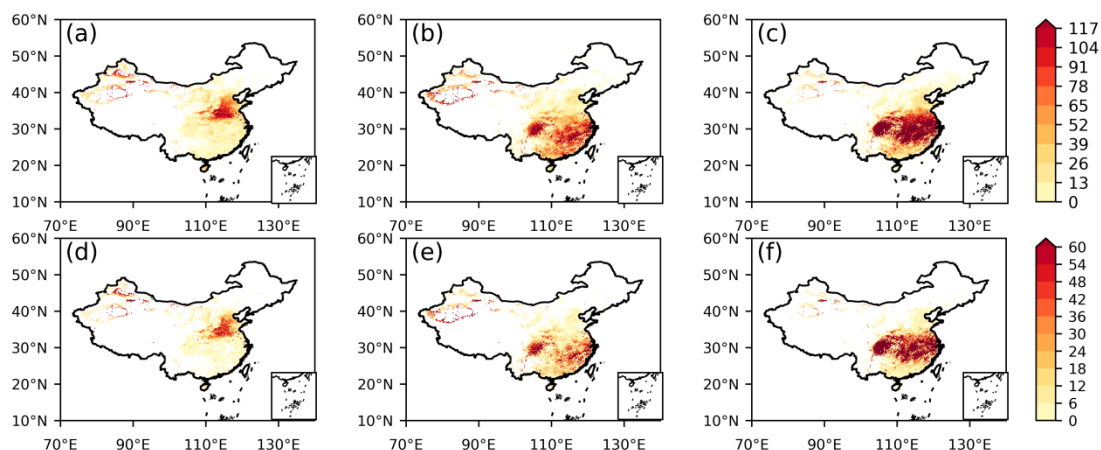


图 1 基于观测资料的 2022 年中国夏季 (a, b, c) 35°C 和 (d, e, f) 37°C 两种阈值下的高温时长空间分布 (a, d) 6 月, (b, e) 7 月, (c, f) 8 月

Fig. 1 Spatial distribution of high-temperature duration under the two thresholds of (a, b, c) 35°C and (d, e, f) 37°C in China in (a, d) June, (b, e) July and (c, f) August 2022 based on observation

图 2 展示了 2022 年夏季观测及三种再分析产品 (CMA-RRA, ERA5, MERRA2) 在中国区域两种阈值下的高温站数时间序列。观测结果表明, 2022 年高温站数存在明显波动: 6 月整体较少, 自 7 月中旬至 8 月中旬, 高温站数大幅增加并在 8 月达到峰值。这一时间变化特征与图 1 中 2022 年的高温时长空间分布演变相符。

与观测对比, 三种再分析产品对高温站数均存在不同程度低估。其中, CMA-RRA 和 ERA5 的结果与观测最为接近, 能较好地再现高温站数随时间的变化趋势。MERRA2 则存在较大偏差, 尤其在 7—8 月对高温站数有明显低估。2021 年高温站点数时间序列分析 (图略), 三种再分析产品表现和 2022 年相似, 但高温强度弱于 2022 年, CMA-RRA 和 ERA5 接近观测, MERRA2 低估。

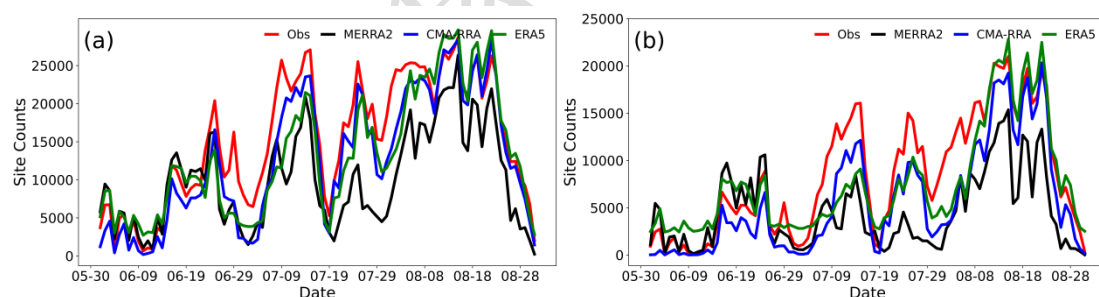


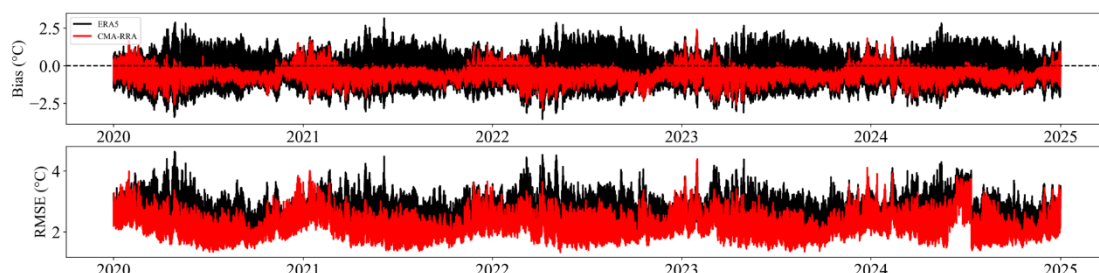
图 2 观测资料、CMA-RRA、ERA5、MERRA2 在中国 2022 年夏季 (a) $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 高温站数时间序列以及 (b) $\geq 37^{\circ}\text{C}$ 高温站数时间序列 (单位: 个)

Fig. 2 Time series of high-temperature station counts in China in summer 2022 under (a) the $\geq 35^{\circ}\text{C}$ threshold and (b) the $\geq 37^{\circ}\text{C}$ threshold based on observation, and the CMA-RRA, ERA5 and MERRA2 reanalysis data

3.2 m 温度再分析产品评估

在深入评估再分析产品性能前, 首先对再分析资料与观测的 Bias 和 RMSE 长期趋势进行评估 (图 3, 无高程订正)。以 CMA-RRA 和 ERA5 结果为例, 五年尺度上, CMA-RRA 与 ERA5 的 Bias 和 RMSE 表现出一定重复性、周期性的年际变化特征。CMA-RRA 的 Bias

和 RMSE 在冬季大,夏季小,而 ERA5 则相反。CMA-RRA 的 Bias 在正负 2.5℃ 范围内波动, Bias 值较 ERA5 更接近 0,且 RMSE 值一直小于 ERA5(基本不超过 4℃)。CMA-RRA 2 m 温度产品整体比观测小(负偏差),而 ERA5 相对观测偏差有正有负。总体而言,CMA-RRA 和 ERA5 的 2 m 温度产品表现不受个别年份异常气候事件显著影响。



注:黑色线: ERA5,红色线: CMA-RRA。

图 3 2020—2024 年中国再分析资料与观测资料 2 m 温度产品的逐小时 Bias 和 RMSE 时间序列

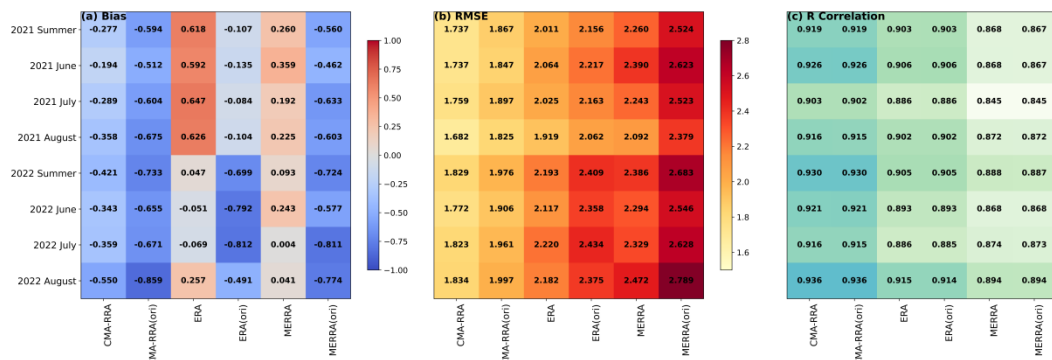
Fig. 3 Time series of hourly Bias and RMSE for 2 m temperature products between reanalysis data and observation data in China from 2020 to 2024

3.1 统计结果分析

在深入分析 2021—2022 年再分析产品对高温事件描述准确性前,先对 2 m 温度再分析产品进行统计方法评估。由于模式地形相对平滑,与实际观测站存在一定高程差异,本文采用高程校正方法,根据气温垂直递减率($0.65^{\circ}\text{C} \cdot 100\text{m}^{-1}$)将 2 m 温度再分析产品统一校正至各观测站点的实际海拔高度。其中,(1)高程校正公式为:校正后温度 = 模式原始温度 + (模式海拔高度 - 观测站海拔高度) $\times 0.0065$;(2)观测站点高程数据源于国家气象信息中心发布的中国地面加密自动观测站资料;(3)模式地形高度为各再分析产品自带的地形高度数据。

图 4 为中国区域夏季 2 m 温度再分析产品(高程校正前后)与观测的平均 Bias、RMSE 和相关系数(R)。由图 4 可见,未进行高程校正前,所有 2 m 再分析产品均低于观测(平均偏差为负)。校正后,CMA-RRA 的 2 m 温度产品仍低于观测,而 ERA5 和 MERRA2 则大部分转为高于观测。2 m 温度再分析产品订正前后,CMA-RRA 的 2 m 温度产品 RMSE 值均最低、R 值最大,更接近观测,明显优于 ERA5 和 MERRA2 的 2 m 温度分析产品。表 2 显示,校正后三种再分析资料绝对偏差基本小于 1°C ,RMSE 不超过 2.5°C ,相关系数均达到 0.85 以上。

由于高程校正有效改善了再分析数据与观测数据的系统性偏差,本文后续所有分析(除图 10 外)均基于高程校正后的数据展开。



注:不带 / 带(ori)的代表高程校正之后 / 前的结果;所有结果通过 0.05 显著性水平检验。

图 4 2021—2022 年中国夏季再分析资料与观测资料 2 m 温度产品的 (a) Bias, (b) RMSE 和 (c) R
Fig. 4 (a) Bias, (b) RMSE and (c) R of 2 m temperature products between reanalysis data and observation data in
China in the summer of 2021-2022

表 2 2021—2022 年高程校正后中国夏季再分析资料与观测资料 2 m 温度产品的 Bias, RMSE 和 R
Table 2 Bias, RMSE and R of 2 m temperature products between reanalysis data and observation data in China in
the summer of 2021-2022 after elevation correction

	Bias		RMSE		R	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
CMA-RRR	-0.28	-0.42	1.73	1.83	0.92	0.93
ERA5	0.62	0.05	2.01	2.20	0.90	0.91
MERRA2	0.26	0.10	2.26	2.39	0.87	0.89

进一步对高程校正后的 3 种再分析产品的 Bias 和 RMSE 值的空间分布进行分析, 2021 年和 2022 年分布类似, 下面分析以 2022 年为例。首先分析 2 m 温度再分析产品与观测偏差空间分布 (见图 5)。由图 5 可见, CMA-RRR 2 m 温度再分析产品呈较好稳定性, 其大部分站点偏差在夏季较小, 整体呈现正负偏差交替分布的空间模态。ERA5 和 MERRA2 偏差相对较大, 尤其 ERA5 在四川盆地周边地区表现出明显正偏差, 8 月华南地区正偏差范围进一步扩大, 这也是 ERA5 平均偏差较小的原因 (正负偏差抵消)。3 种再分析产品中, MERRA2 偏差最大, 在西部和北部地区形成明显的带状正偏差区。

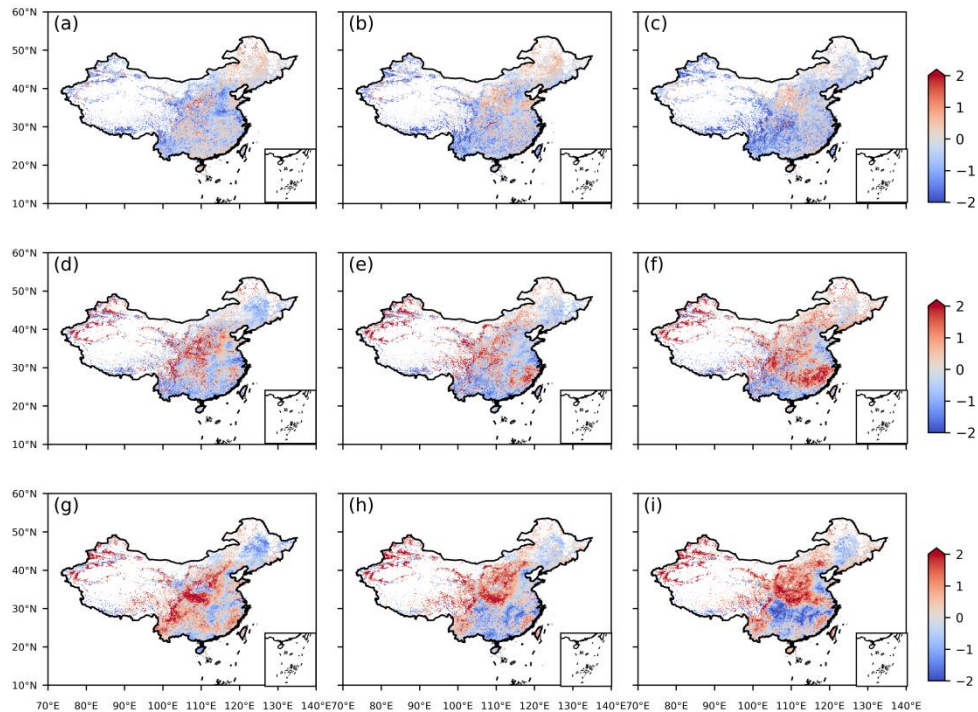


图 5 2022 年夏季 (6 月为第一列; 7 月为第二列; 8 月为第三列) 中国再分析资料与观测资料 2 m 温度产品的偏差空间分布 (单位: °C)
(a~c) CMA-RRR, (d~f) ERA5, (g~i) MERRA2

Fig. 5 Spatial distribution of Bias for 2 m temperature products (unit: °C) between the reanalysis data of (a, b, c)

CMA-RRA, (d, e, f) ERA5 and (g, h, i) MERRA2 and the observation in China in (a, d, g) June, (b, e, h) July and (c, f, i) August 2022

图 6 为再分析资料与观测资料 2 m 温度的均方根误差 (RMSE) 空间分布。与偏差结果相似, CMA-RRA 全国范围内表现出较低且空间分布均匀的 RMSE 值, 中国区域的 RMSE 值稳定在 1~2℃。ERA5 和 MERRA2 的 RMSE 值呈现出东部低-西部高、南部低-北部高的特征, 在四川盆地及其北部过渡带 (特别是西北干旱区) 均形成高 RMSE 中心, 且 MERRA2 整体 RMSE 更大。

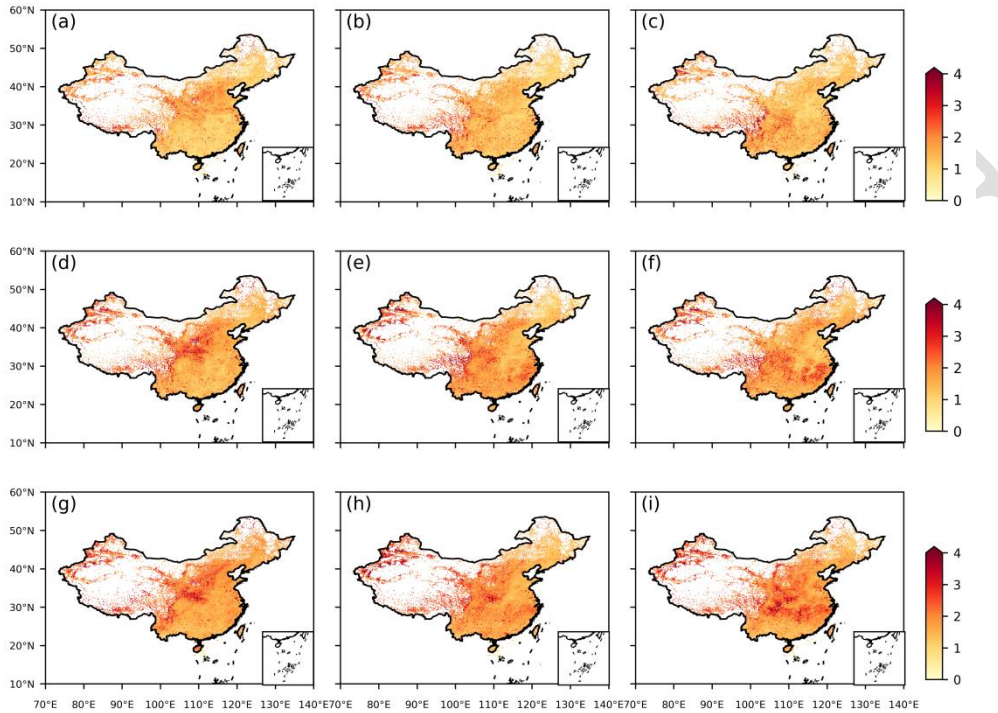


图 6 2022 年夏季 (6 月为第一列; 7 月为第二列; 8 月为第三列) 中国再分析资料与观测资料 2 m 温度产品的均方根误差空间分布 (单位: °C)

(a~c) CMA-RRA, (d~f) ERA5, (g~i) MERRA2

Fig. 6 Spatial distribution of RMSE for 2 m temperature products (unit: °C) between the reanalysis data of (a, b, c) CMA-RRA, (d, e, f) ERA5 and (g, h, i) MERRA2 and the observation in China in (a, d, g) June, (b, e, h) July and (c, f, i) August 2022

3.2 高温概率密度函数

使用 Gamma 分布对观测和再分析高温数据进行拟合, 评估 2 m 温度再分析产品对高温的描述能力。结果如图 7 所示, 2021—2022 年夏季中国观测高温数据的 α 值为 1.37, CMA-RRA、ERA5 和 MERRA2 的 α 值分别为 1.21、1.18 和 1.11, 表明三种再分析数据均低估极端高温的频率, CMA-RRA 结果最接近观测。CMA-RRA 的 β 值低于观测 6.34%, 而 ERA5 和 MERRA2 的 β 值较观测值分别高出 2.82% 和 19.01%, 表明 CMA-RRA 2 m 温度产品高估了高温的时空波动, 而 ERA5 和 MERRA2 则低估了高温波动, MERRA2 低估较多, 这可能与分辨率较低相关。

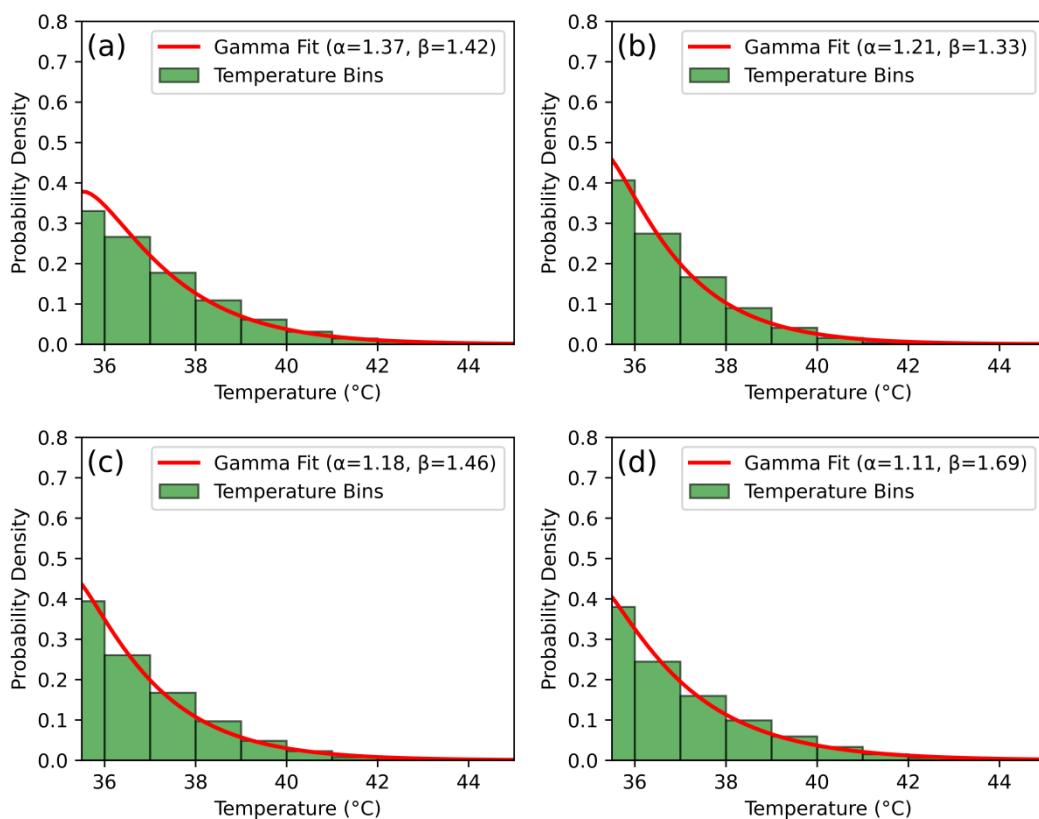


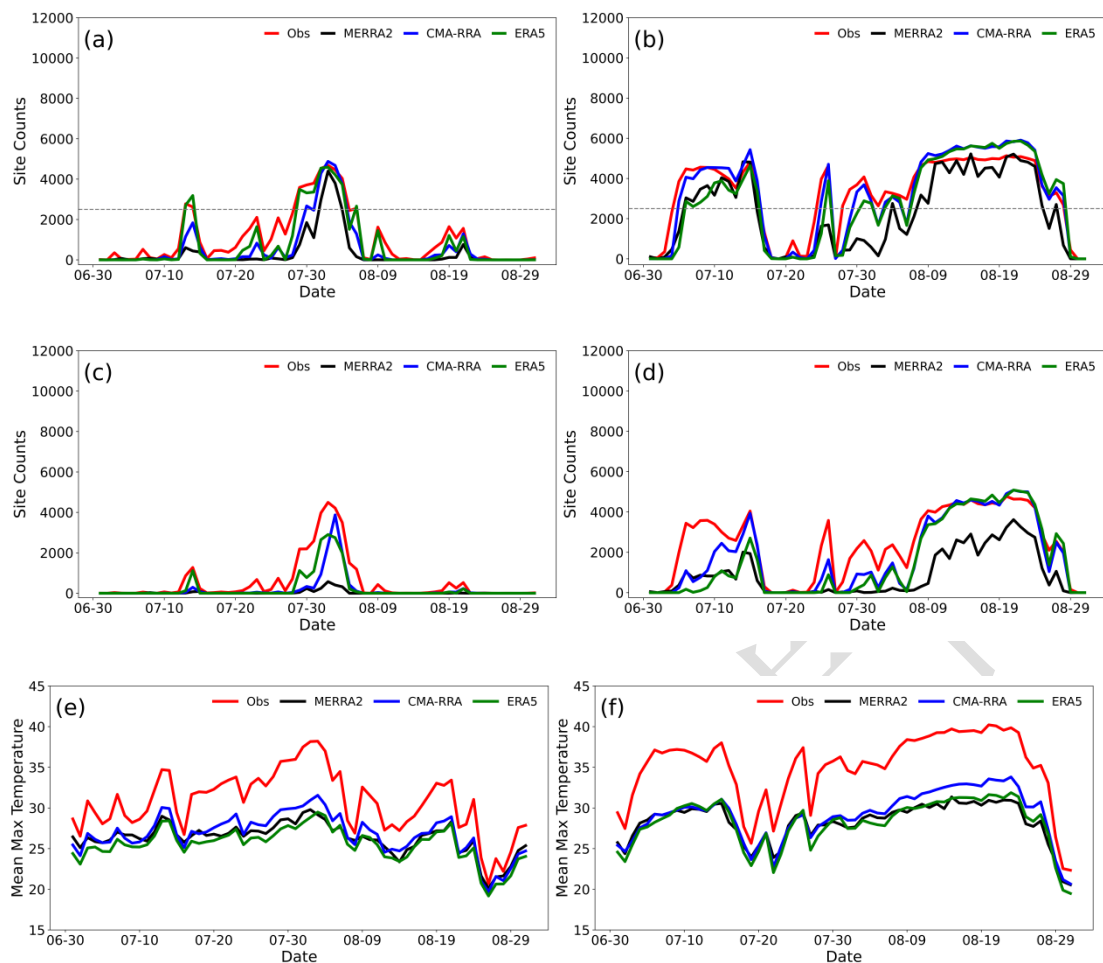
图 7 2021—2022 年夏季中国区域 Gamma 分布拟合的 **平均** (a) **平均** 观测, (b) CMA-RRA, (c) ERA5 和 (d) MERRA2 高温概率密度函数

Fig. 7 High-temperature probability density functions fitted by Gamma distribution for (a) observation, and (b) CMA-RRA, (c) ERA5 and (d) MERRA2 reanalysis data in China during the summer of 2021-2022 (根据关于该图的文字描述, 我没找到关于 **平均** 的内容, 所以在英中把 **average** 去掉了)

4 四川盆地高温过程中三种再分析资料的对比

图 8 展示了观测和三种再分析数据在 2021 年和 2022 年夏季四川盆地两种阈值下的高温站数和日均最高温度时间序列。由图 8a~8d 可见, 2022 年四川盆地的高温站数显著高于 2021 年, 尤其是在 8 月达到峰值。结合图 8e~8f, 按照 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 高温站数超过区域内总站数的一半 (灰虚线), 且平均最高温度均 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的标准, 筛选出四川盆地三次区域性高温过程: 2021 年 7 月 29 日至 8 月 3 日 (21SC)、2022 年 7 月 5—15 日 (22SC1) 和 2022 年 8 月 6—25 日 (22SC2)。

CMA-RRA 和 ERA5 再分析资料在四川盆地的高温站数及最高温度与观测资料较为接近, 但对严重高温 ($\geq 37^{\circ}\text{C}$) 站数略有低估。MERRA2 再分析资料在高温站数上存在较大偏差。



注：灰虚线为区域总站数的一半。

图 8 观测资料、CMA-RRR、ERA5、MERRA2 在四川盆地 (a、c、e) 2021 年和 (b、d、f) 2022 年 (a, b) 夏季 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 高温站数时间序列、(c, d) 夏季 $\geq 37^{\circ}\text{C}$ 高温站数时间序列 (单位: 个) 以及 (e, f) 日均最高温度时间序列 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 Time series of high-temperature station counts in Sichuan Basin with summer temperature (a, b) $\geq 35^{\circ}\text{C}$ threshold in (a) 2021 and (b) 2022, and (c, d) $\geq 37^{\circ}\text{C}$ threshold in (c) 2021 and (d) 2022, as well as (e, f) time series of daily maximum temperatures in the summer of (e) 2021 and (f) 2022 based on observation data and the CMA-RRR, ERA5 and MERRA2 reanalysis data (unit: $^{\circ}\text{C}$)

从 2021—2022 年四川盆地三次高温过程高温站点平均温度日变化图 (图 9) 可见, 三次高温事件中, 21SC 强度最弱, 观测最高 2 m 温度在 38°C 以下, 高温持续约 6 h。22SC1 强度居中, 观测最高气温接近 38°C , 高温时长约 7 h。22SC2 强度最强, 观测最高温度接近 39°C , 高温时长约 8 h, 严重高温 (37°C) 持续约 6 h。三次高温过程中, 三种 2 m 温度再分析产品最高值均低于观测, 相对而言, CMA-RRR 的最高温和高温时长最接近观测, ERA5 在 22SC2 高温过程出现高温时段较观测提前, MERRA2 则三次高温过程的高温时长均小于观测。

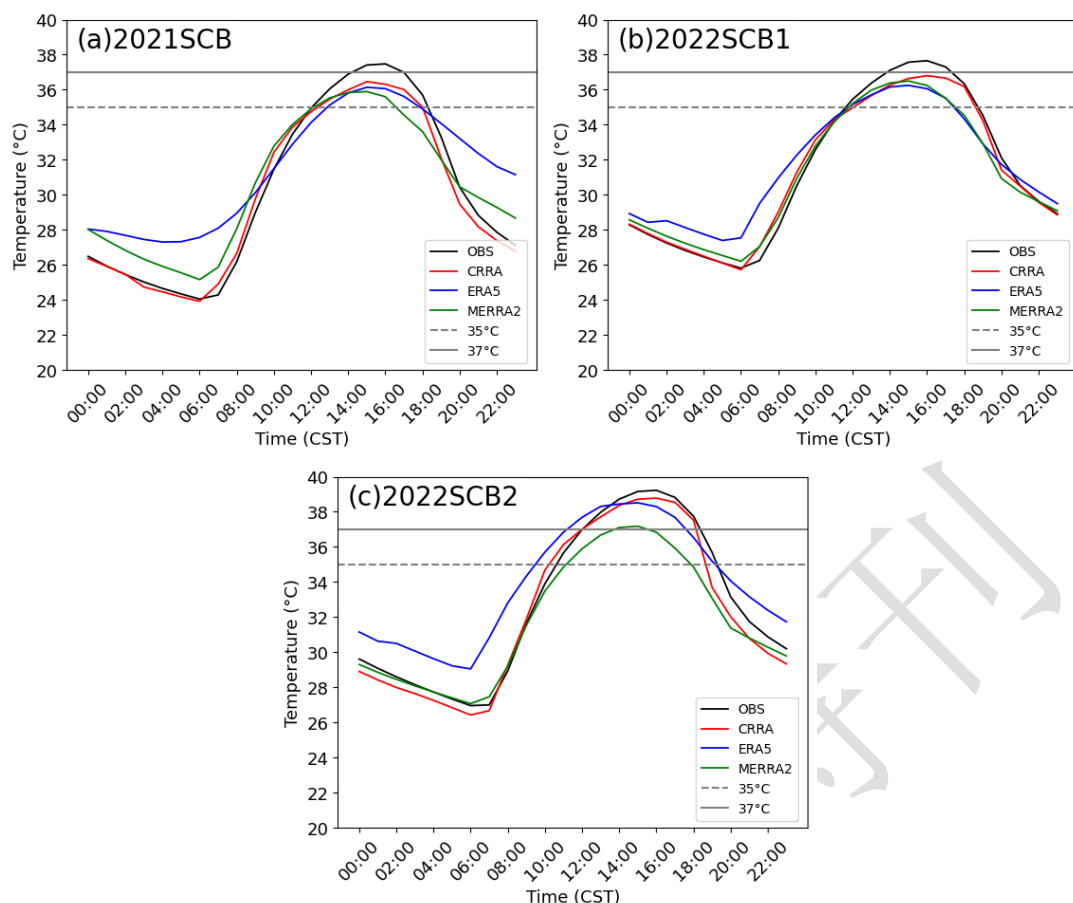
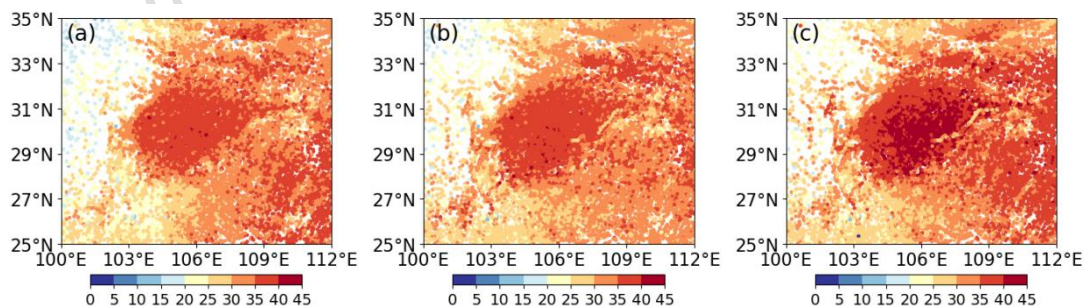


图 9 (a) 21SC, (b) 22SC1 和 (c) 22SC2 高温事件的高温站点日变化曲线 (单位: °C)

Fig. 9 Daily variation curves of high-temperature stations for (a) 21SC , (b) 22SC1 and (c) 22SC2 high-temperature events (unit: °C)

从2021—2022年三次四川高温事件日均最高气温的空间分布图(图10)可见,CMA-RRA显示了其高分辨率优势,细节特征明显,与观测接近,尤其在 103°E 以西的地形复杂川西地区,与观测地形分布有很好的对应关系。与观测相比,CMA-RRA和ERA5有效识别了高温落区,但在22SC2事件中,ERA5高估了 40°C 以上高温范围,CMA-RRA则略低估 40°C 以上高温范围。MERRA2的2 m温度空间分布则与观测差异较大。



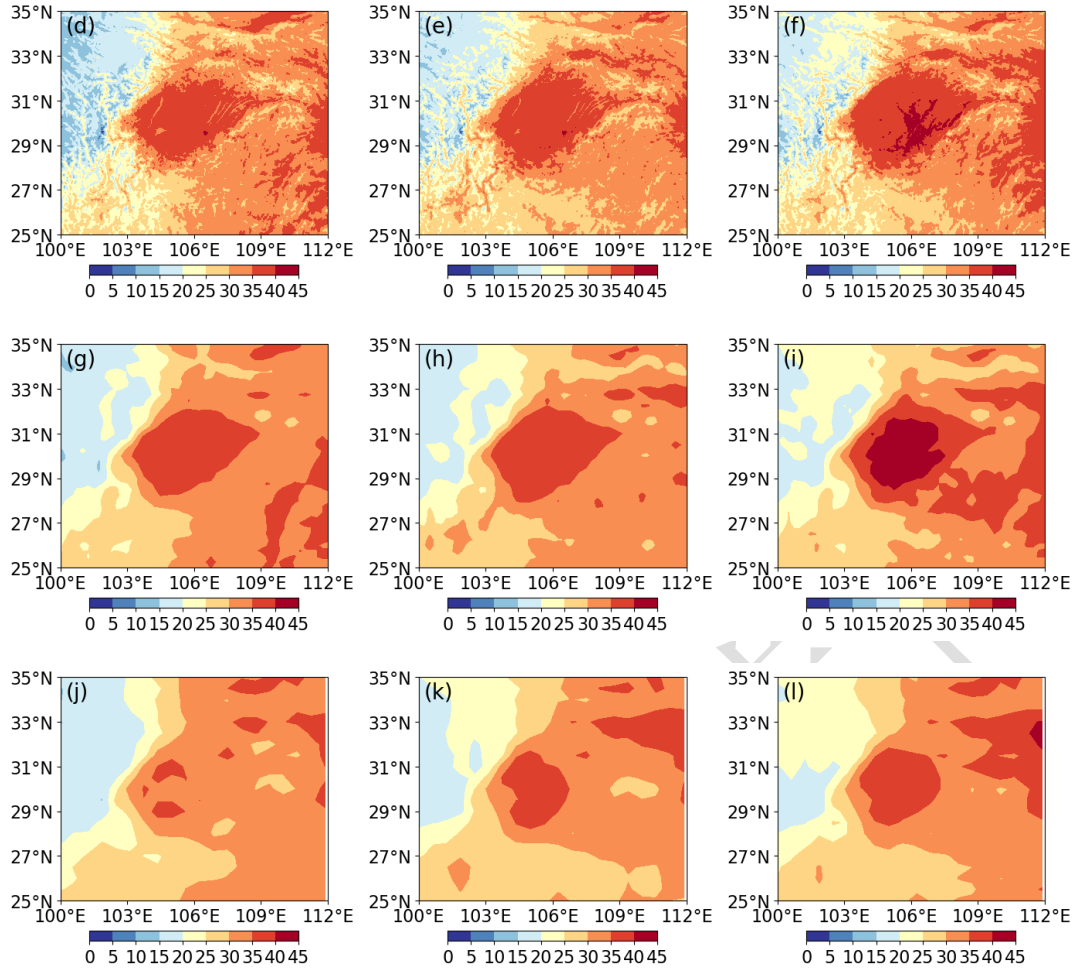


图 10 基于 (a~c) 观测, (d~f) CMA-RRA, (g~i) ERA5 和 (j~l) MERRA2 的(a, d, g, j) 21SC, (b, e, h, k) 22SC1 和(c, f, i, l) 22SC2 的日均最高温度分布 (单位: °C)

Fig. 10 Distributions of average daily maximum temperatures (unit: °C) in the high-temperature events of (a, d, g, j) 21SC, (b, e, h, k) 22SC1 and (c, f, i, l) 22SC2 based on (a, b, c) observation, and (d, e, f) CMA-RRA, and (g, h, i) ERA5 and (j, k, l) MERRA2 reanalysis data

基于三次四川盆地高温事件温度均由东南向西北递减的特点,沿西北-东南和西南-东北两个方向计算三次四川盆地高温过程的半变异函数,结果如图 11 所示。三次四川盆地高温事件均表现为沿西北-东南方向的空间变异性较大,尤其是在盆地内部。这是由于高温极大值区主要落在盆地内东南缘(图 10),导致沿东南-西北方向的温度梯度变化较大。CMA-RRA 除 21SC 过程的东北-西南方向与观测偏差略大外,所有结果均和观测比较接近,表现出更好的空间分布特征。ERA5 在西北-东南方向接近观测, MERRA2 则在两个方向上都和观测差异较大。CMA-RRA 和 ERA5 能较为准确地捕捉高温空间特征,而 MERRA2 则欠缺。

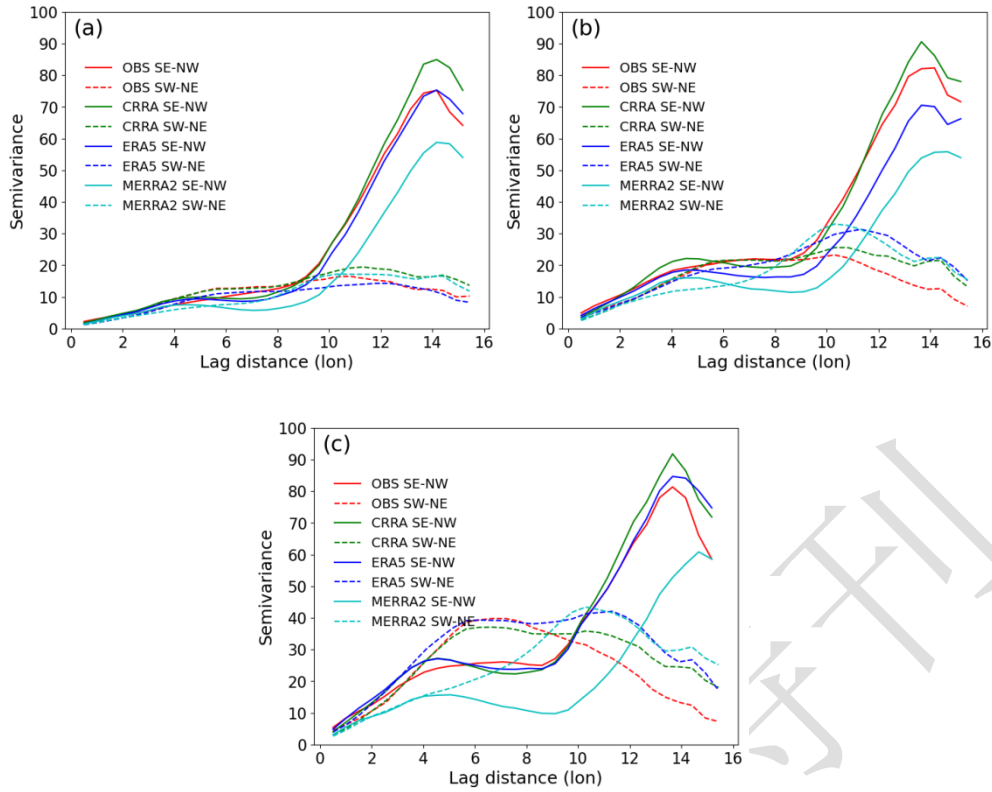


图 11 21SC (a) , 22SC1 (b) 和 22SC2 (c) 高温事件沿东南-西北方向和东北-西南方向半变异函数分布
Fig. 11 Semi-variogram distributions along the southeast-northwest and northeast-southwest directions for the high-temperature events of (a) 21SC , (b) 22SC1, and (c) 22SC2

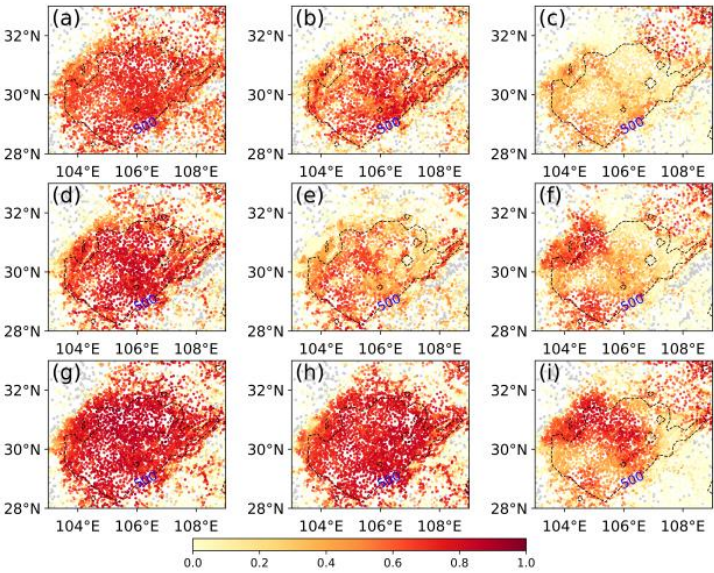
为详细比较 2 m 温度再分析产品对四川高温和严重高温事件的表现准确性, 计算三次四川盆地高温事件的 CSI、FAR、POD 和 FBI, 结果如表 3 所示。CMA-RRA 在 35℃、37℃ 阈值下的 CSI 和 POD 普遍高于 ERA5 和 MERRA2, 尤其 22SC2 高温过程, CMA-RRA 的 CSI 达到 0.59 (35℃) 和 0.53 (37℃)。22SC2 中的 ERA5 高温 FBI 值大于 1, 说明 22SC2 事件中 ERA5 空警较多, 这和图 9c 相应, ERA5 高温提前造成比较多的空警。MERRA2 在 3 次高温过程 FBI 值小于 1, 说明漏警比空警多, 这主要是再分析高温时长低于观测 (图 9), 漏警较多。CMA-RRA 的 FBI 值在三种再分析产品中更接近 1, 表明其预报频率与实际观测较为一致, 高温时段和观测较为一致 (图 9)。三种资料的 FAR 均集中在 0.5 以下, 但 2022SCB1 中的 MERRA2 在 37℃ 阈值下达到 0.44, 说明其空警较高。

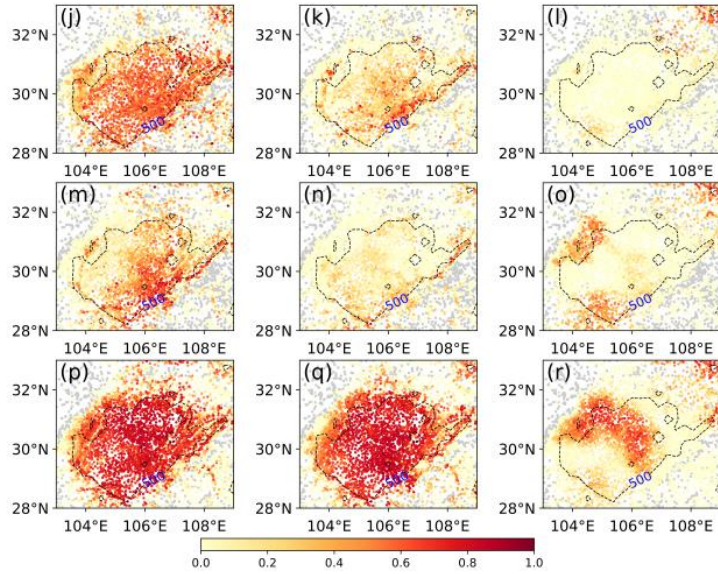
表 3 再分析资料在四川盆地三次高温事件中的 CSI, FBI, POD 及 FAR

Table 3 CSI, FBI, POD, and FAR of CMA-RRA, ERA5 and MERRA2 reanalysis data for the three high-temperature events in Sichuan Basin

	CSI			FBI			POD			FAR		
	CMA	ERA5	MERRA	CMA-	ERA5	MERRA	CMA-	ERA5	MERRA	CMA-	ERA5	MERRA
	-RRA		2	RRA		2	RRA		2	RRA		2
21SC(35℃)	0.51	0.44	0.25	1.08	0.74	0.44	0.70	0.53	0.29	0.35	0.29	0.35
21SC(37℃)	0.39	0.21	0.03	0.87	0.35	0.07	0.53	0.24	0.03	0.39	0.33	0.52
22SC1(35℃)	0.54	0.36	0.35	0.92	0.56	0.61	0.67	0.41	0.42	0.27	0.26	0.32
)												
22SC1(37℃)	0.33	0.13	0.14	0.50	0.18	0.27	0.37	0.13	0.15	0.26	0.25	0.44
)												
22SC2(35℃)	0.59	0.57	0.40	0.97	1.21	0.62	0.73	0.80	0.46	0.24	0.34	0.26
)												
22SC2(37℃)	0.53	0.52	0.23	0.87	1.05	0.35	0.65	0.70	0.26	0.25	0.33	0.27
)												

从四川盆地三次高温事件在两种阈值下（35℃和 37℃）的关键成功指数（CSI）空间分布图(图 12)可见，35℃阈值的高温 CSI 值普遍高于 37℃阈值严重高温（和表 3 结果一致）。CMA-RRA 在核心高温区，尤其是盆地内部东南缘表现出较高 CSI，特别是 22SC2 高温事件。ERA5 整体也能捕捉高温区域，除 22SC2 外，其 37℃阈值严重高温 CSI 值较低。除在盆地西南、西北角和中部外，大部分区域 MERRA2 高温 CSI 值低于 CMA-RRA 和 ERA5。2022SCB1 严重高温（超 37℃），MERRA2 在盆地西北角和南部 CSI 值较大，与其平均最高温度大值区分布一致，从而平均 CSI 值略高于 ERA5（见表 3）。

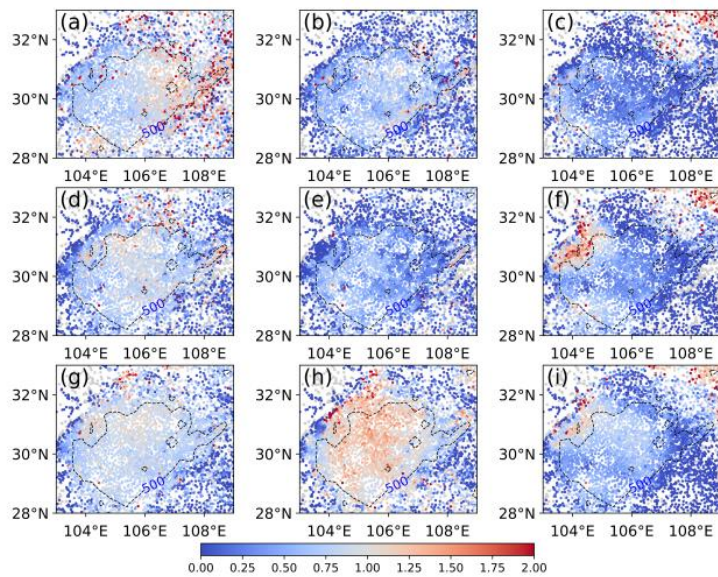




注：灰色虚线为地形高度 500 m 等值线。

图 12 两种阈值下 (35°C 为上子图, 37°C 为下子图) CMA-RRA (第一列)、ERA5 (第二列) 和 MERRA2 (第三列) 在 21SC (第一行), 22SC1 (第二行) 和 22SC2 (第三行) 的 CSI 空间分布
Fig. 12 Spatial distributions of CSI under two thresholds of (a-i) 35°C and (j-r) 37°C for (a, d, g, j, m, p) CMA-RRA, (b, e, h, k, n, q) ERA5, and (c, f, i, l, o, r) MERRA2 reanalysis data in the high-temperature events of (a, b, c, j, k, l) 21SC, (d, e, f, m, n, o) 22SC1, and (g, h, i, p, q, r) 22SC2

四川盆地三次高温事件在两种阈值下 (35°C 和 37°C) 的频率偏差指数 (FBI) 空间分布图 (图 13) 显示, 大部分站点表现为漏警多于空警。CMA-RRA 在 21SC 事件中盆地东部有部分站点空警多于漏警。除此之外, 盆地内部大部分站点的 FBI 值都接近 1, 表明 CMA-RRA 在这些站点空警和漏警的比例接近。而对于 ERA5, 在 22SC2 事件中, 盆地内大部分站点有明显的空警大于漏警的情况。MERRA2 在大部分站点漏警较其他两种再分析资料更加严重, 而在盆地西北缘部分站点出现空警多于漏警的情况。



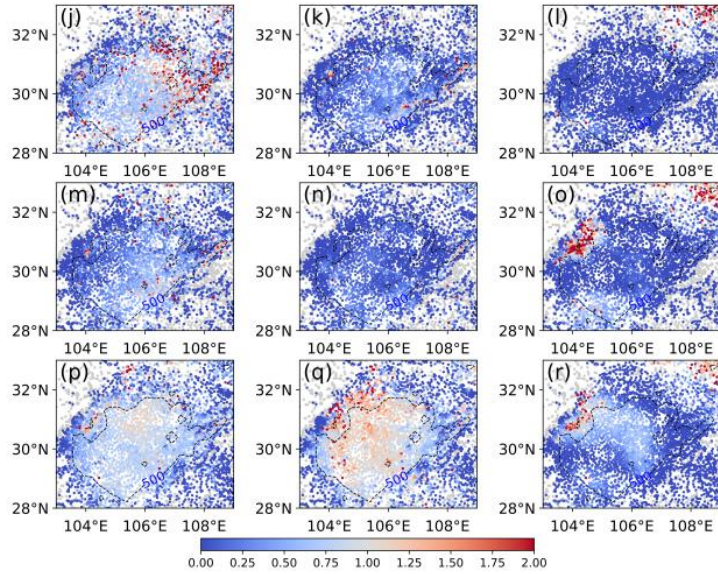


图 13 两种阈值下 (35°C 为上子图, 37°C 为下子图) CMA-RRA (第一列)、ERA5 (第二列) 和 MERRA2 (第三列) 在 21SC (第一行), 22SC1 (第二行) 和 22SC2 (第三行) 的频率偏差指数 (FBI) 空间分布

Fig. 13 Spatial distributions of FBI under two thresholds of (a-i) 35°C and (j-r) 37°C for (a, d, g, j, m, p) CMA-RRA, (b, e, h, k, n, q) ERA5, and (c, f, i, l, o, r) MERRA2 reanalysis data in the high-temperature events of (a, b, c, j, k, l) 21SC, (d, e, f, m, n, o) 22SC1, and (g, h, i, p, q, r) 22SC2

5 总结与讨论

本文对 2021—2022 年夏季 CMA-RRA、ERA5 及 MERRA2 再分析产品 2 m 温度资料开展系统评估, 并分析了其在四川盆地极端高温事件的表现, 得到主要结论如下:

(1) 2021—2022 年高温主要集中在我国东部地区 and 新疆, 2021 年较 2022 年强度偏弱。高温时长大值区主要在江淮流域 (6 月)、华南地区和四川盆地 (7—8 月)。高温站数在 6 月较少, 7 月中旬到 8 月中旬大幅增加。CMA-RRA 和 ERA5 基本能反映高温时空分布格局, 而 MERRA2 在高温时长及站数的表现偏弱。

(2) 高程校正前后, CMA-RRA 的 Bias 和 RMSE 基本均为最小、相关系数最高。而 ERA5 在 2022 年 Bias 低至 0.05, 这是由于 ERA5 正负 Bias 分布较为均匀, 使平均结果较小。ERA5 和 MERRA2 的 RMSE 表现为东部低-西部高、南部低-北部高, 尤其在四川盆地及其北部偏高。而 MERRA2 在 35° N 以南区域相关系数较低, 仅有部分站点为 0.80~0.85。此外, Gamma 分布拟合表明, 三种再分析数据均低估极端高温的频率 (α 值低于观测), 而 CMA-RRA 结果最接近观测。同时, CMA-RRA 对高温时空波动情况略为高估 (β 值低于观测), 而 ERA5 和 MERRA2 则低估, MERRA2 低估程度更显著。

(3) 对于四川盆地三次高温事件, 21SC 为强度最弱, 而 22SC2 强度最强, 严重高温事件时长约 6 h。三种再分析资料最高温度均低于观测, CMA-RRA 的最高温度和高温时长最接近观测, 高温覆盖范围更接近观测。ERA5 也能较准确识别高温范围, 但在 2022SCB2 高温过程出现高温时段较观测提前的现象, 且高估了 40°C 以上高温范围。MERRA2 高温时段、高温强度及范围均较观测低估。

(4) CMA-RRA 在两阈值下 (35°C 和 37°C) 的 CSI 和 POD 普遍高于 ERA5 和 MERRA2, 尤其是在盆地内部东南缘。而 FBI 值较接近 1, 表明其高温出现频率及高温时段和观测较为一致。ERA5 在 2022SCB2 事件中 FAR 较多。MERRA2 整体漏警率较多, CSI 值低, FBI

值基本小于 1。

本文首次系统评估了 CMA-RRA 的 2 m 温度资料在中国及四川极端高温事件中的表现, 并发现三种再分析产品 2 m 温度的表现同样呈现东部优于西部的特征, 这与前人的结论一致 (朱智等, 2015; 王彩霞等, 2022)。而 CMA-RRA 在华南地区 (图略) 和西部复杂地形区 (四川盆地) 均表现出优于 ERA5 和 MERRA2 的性能, 这一优势在西部的数据稀缺区尤为突出, 可能由以下三点原因造成: (1) CMA-RRA 同化了地面自动站、天气雷达等中国区域局地高分辨率观测, 而 ERA5 和 MERRA2 则没有同化这些资料; (2) CMA-RRA 具有更高的水平分辨率 (3 km) 和时间分辨率 (逐 1 h 同化), 能够更精细地刻画复杂地形, 从而在动力和热力过程上更好地模拟近地表天气特征; (3) CMA-RRA 采用了逐小时直接同化的分析循环, 使得观测增量对分析场的更新贡献更为直接和显著, 从而能更及时地反映快速变化的近地表热力状况; (4) 同化系统与数值模式物理过程的差异。CMA-RRA 中的云分析有效应用了雷达和卫星等观测信息, 水物质信息更接近观测, 从而改善了模式中云微物理过程的表征, 可能对提高 2 m 温度在复杂天气下的分析精度有积极作用。这可能也是导致再分析产品差异的原因之一。

值得注意的是, 尽管西部区域再分析数据不确定性较高, 但该地区正是我国可再生能源和重大基础设施建设的关键区域, 对高质量气象数据需求迫切。本研究证实 CMA-RRA 在复杂地形下的相对优势, 可为西部高风险气象灾害评估提供更可靠的数据支持。然而, 所有再分析产品在西部高海拔地区的精度仍受限于观测稀疏性和地形复杂性, 且本文评估时段较短。未来研究需结合长时间序列数据进一步诊断评估, 深入分析不同再分析产品差异的产生机制, 为最终提升区域再分析产品在关键地区的应用性能提供支撑。

参考文献

- 蔡怡, 徐枝芳, 朱克云, 等, 2023. CMA-MESO 3 km 系统 2 m 温度预报诊断[J]. 气象, 49(4): 400-414. Cai Y, Xu Z F, Zhu K Y, et al, 2023. Diagnosis of 2 m temperature prediction by CMA-MESO system with 3 km resolution[J]. Meteor Mon, 49(4): 400-414 (in Chinese).
- 陈超, 庞艳梅, 张玉芳, 2010. 近 50 年来四川盆地气候变化特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 32(9): 115-120. Chen C, Pang Y M, Zhang Y F, 2010. On the characteristics of climate change in Sichuan Basin in the recent 50 years[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 32(9): 115-120 (in Chinese).
- 陈峪, 王凌, 赵俊虎, 等, 2022. 2021 年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J]. 气象, 48(4): 470-478. Chen Y, Wang L, Zhao J H, et al, 2022. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2021[J]. Meteor Mon, 48(4): 470-478 (in Chinese).
- 单帅, 沈润平, 师春香, 等, 2020. 中国北部积雪区冬季地表温度和 2m 气温再分析数据评估[J]. 高原气象, 39(1): 37-47. Shan S, Shen R P, Shi C X, et al, 2020. Evaluation of land surface temperature and 2 m air temperature from five reanalyses datasets across North China in winter[J]. Plateau Meteor, 39(1): 37-47 (in Chinese).
- 高路, Schulz K, 陈兴伟, 等, 2014. 基于 ERA-Interim 再分析资料的中国极端气温分析[J]. 南水北调与水利科技, 12(2): 75-78, 106. Gao L, Schulz K, Chen X W, et al, 2014. Analysis of extreme temperatures in China based on ERA-interim reanalysis data[J]. South-to-North Water Transf Water Sci Technol, 12(2): 75-78, 106 (in Chinese).
- 黄丽萍, 邓莲堂, 王瑞春, 等, 2022. CMA-MESO 关键技术集成及应用[J]. 应用气象学报, 33(6): 641-654. Huang L P, Deng L T, Wang R C, et al, 2022. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 33(6): 641-654 (in Chinese).
- 黄卓, 陈辉, 田华, 2011. 高温热浪指标研究[J]. 气象, 37(3): 345-351. Huang Z, Chen H, Tian H, 2011. Research on the heat wave index[J]. Meteor Mon, 37(3): 345-351 (in Chinese).
- 罗娟, 邓承之, 朱岩, 等, 2023. 2022 年盛夏重庆不同阶段高温特征及成因对比[J]. 气象, 49(9): 1108-1118. Luo J, Deng C Z, Zhu Y, et al, 2023. Comparison on characteristics and causes at different stages of the extreme heat event in Chongqing in the 2022

midsummer[J]. Meteor Mon, 49(9): 1108-1118 (in Chinese).

芒苏尔·艾热提, 肖俊安, 孙鸣婧, 等, 2024. ERA5 和 FNL 资料在新疆的适用性对比分析[J]. 高原山地气象研究, 44(4): 142-150.

Aireti M, Xiao J A, Sun M J, et al, 2024. Comparative analysis on the applicability of ERA5 and FNL data in Xinjiang[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 44(4): 142-150 (in Chinese).

曲学斌, 林聪, 辛孝飞, 等, 2022. ERA5-Land、MERRA2 再分析资料在呼伦贝尔地区的适用性研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 16(5): 24-30. Qu X B, Lin C, Xin X F, et al, 2022. Applicability of ERA5-land and MERRA2 temperature and precipitation data in Hulun Buir Region[J]. Desert Oasis Meteor, 16(5): 24-30 (in Chinese).

沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等, 2020. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. 气象学报, 78(3): 451-476. Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al, 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 451-476 (in Chinese).

万晓敏, 田伟红, 韩威, 等, 2017. FY-2E 云导风的算法改进及其在 GRAPES 中的同化应用研究[J]. 气象, 43(1): 1-10. Wan X M, Tian W H, Han W, et al, 2017. The evaluation of FY-2E reprocessed IR AMVs in GRAPES[J]. Meteor Mon, 43(1): 1-10 (in Chinese).

王彩霞, 黄安宁, 郑鹏, 等, 2022. 中国第一代全球陆面再分析(CRA40/Land)气温和降水产品在中国大陆的适用性评估[J]. 高原气象, 41(5): 1325-1334. Wang C X, Huang A N, Zheng P, et al, 2022. Applicability evaluation of China's first generation of global land surface reanalysis (CRA40/Land) air temperature and precipitation products in China Mainland[J]. Plateau Meteor, 41(5): 1325-1334 (in Chinese).

王丹, 阮征, 王改利, 等, 2019. 风廓线雷达资料在 GRAPES-Meso 模式中的同化应用研究[J]. 大气科学, 43(3): 634-654. Wang D, Ruan Z, Wang G L, et al, 2019. A study on assimilation of wind profiling radar data in GRAPES-Meso model[J]. Chin J Atmos Sci, 43(3): 634-654 (in Chinese).

王瑞文, 万晓敏, 田伟红, 等, 2016. AMDAR 温度观测的误差统计特征分析[J]. 气象, 42(3): 330-338. Wang R W, Wan X M, Tian W H, et al, 2016. Statistical characteristics analysis for AMDAR temperature observation error[J]. Meteor Mon, 42(3): 330-338 (in Chinese).

王婧, 徐枝芳, 范广洲, 等, 2015. GRAPES_RAFS 系统 2 m 温度偏差订正方法研究[J]. 气象, 41(6): 719-726. Wang J, Xu Z F, Fan G Z, et al, 2015. Study on bias correction for the 2 m temperature forecast of GRAPES_RAFS[J]. Meteor Mon, 41(6): 719-726 (in Chinese).

吴子君, 张强, 石彦军, 等, 2017. 多种累积降水量分布函数在中国适用性的讨论[J]. 高原气象, 36(5): 1221-1233. Wu Z J, Zhang Q, Shi Y J, et al, 2017. The applicability of several distribution functions which used to describe the characteristics of cumulative precipitation in China[J]. Plateau Meteor, 36(5): 1221-1233 (in Chinese).

谢潇, 何金海, 祁莉, 2011. 4 种再分析资料在中国区域的适用性研究进展[J]. 气象与环境学报, 27(5): 58-65. Xie X, He J H, Qi L, 2011. A review on applicability evaluation of four reanalysis datasets in China[J]. J Meteor Environ, 27(5): 58-65 (in Chinese).

徐枝芳, 吴洋, 龚建东, 等, 2021. CMA-MESO 三维变分同化系统 2 m 相对湿度资料同化研究[J]. 气象学报, 79(6): 943-955. Xu Z F, Wu Y, Gong J D, et al, 2021. Assimilation of 2 m relative humidity observations in CMA-MESO 3DVar system[J]. Acta Meteor Sin, 79(6): 943-955 (in Chinese).

于浩慧, 周长艳, 陈超, 等, 2023. 2021 年 7—8 月四川盆地高温热浪大气环流背景及影响分析[J]. 干旱气象, 41(6): 923-932. Yu H H, Zhou C Y, Chen C, et al, 2023. Analysis of atmospheric circulation background and main impacts of heatwave in Sichuan Basin from July to August 2021[J]. J Arid Meteor, 41(6): 923-932 (in Chinese).

章大全, 袁媛, 韩荣青, 2023. 2022 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象, 49(1): 110-121. Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q, 2023. Characteristics and possible causes of the climate anomalies over China in Summer 2022[J]. Meteor Mon, 49(1): 110-121 (in Chinese).

张玉霞, 孙颖, 胡婷, 2024. 不同温升水平下中国极端高温预警指标的变化[J]. 中国科学: 地球科学, 54(6): 1923-1936. Zhang Y X, Sun Y, Hu T, 2024. Changes in extreme high temperature warning indicators over China under different global warming levels[J]. Sci China Earth Sci, 67(6): 1895-1909 (in Chinese).

赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 等, 2010. 全球大气再分析资料的研究现状与进展[J]. 地球科学进展, 25(3): 242-254. Zhao T B, Fu C B,

Ke Z J, et al, 2010. Global atmosphere reanalysis datasets: current status and recent advances[J]. *Adv Earth Sci*, 25(3): 242-254 (in Chinese).

周春花, 吴薇, 2023. 2022 年夏季四川盆地区域性极端高温天气特征及成因分析[J]. *中国防汛抗旱*, 33(8): 29-35. Zhou C H, Wu W, 2023. Characteristics and causes of extreme high temperature weather in Sichuan Basin in the summer of 2022[J]. *China Flood Drought Manag*, 33(8): 29-35 (in Chinese).

朱立娟, 龚建东, 黄丽萍, 等, 2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. *应用气象学报*, 28(1): 38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al, 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 38-51 (in Chinese).

朱智, 师春香, 张涛, 等, 2015. 多种再分析地表温度资料在中国区域的适用性分析[J]. *冰川冻土*, 37(3): 614-624. Zhu Z, Shi C X, Zhang T, et al, 2015. Applicability analysis of various reanalyzed land surface temperature datasets in China[J]. *J Glaciol Geocryol*, 37(3): 614-624 (in Chinese).

Aksoy H, 2000. Use of gamma distribution in hydrological analysis[J]. *Turkish J Eng Environ Sci*, 24(6): 419-428.

Chen D L, Gong L B, Xu C Y, et al, 2007. A high-resolution, gridded dataset for monthly temperature normals (1971-2000) in Sweden[J]. *Geogr Ann Ser A, Phys Geogr*, 89(4): 249-261.

Ding B B, Zhang J M, Zheng P F, et al, 2024. Water security assessment for effective water resource management based on multi-temporal blue and green water footprints[J]. *J Hydrol*, 632: 130761.

Feng Y Q, Qi Y C, Chen D L, et al, 2024. Multi-scale analysis of satellite, reanalysis and multi-source precipitation estimates over the Tibetan Plateau[J]. *Atmos Res*, 309: 107484.

Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al, 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2)[J]. *J Climate*, 30(14): 5419-5454.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(730): 1999-2049.

IPCC, 2023. Climate change 2021-the physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-472.

Kamatchi K A M, Anitha K, Kumar K A, et al, 2024. Impacts of combined drought and high-temperature stress on growth, physiology, and yield of crops[J]. *Plant Physiol Rep*, 29(1): 28-36.

Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al, 2001. The NCEP - NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(2): 247-268.

Lan H T, Guo D L, Hua W, et al, 2023. Evaluation of reanalysis air temperature and precipitation in high-latitude Asia using ground-based observations[J]. *Int J Climatol*, 43(3): 1621-1638.

Liu G, Wu R G, Sun S Q, et al, 2015. Synergistic contribution of precipitation anomalies over northwestern India and the South China Sea to high temperature over the Yangtze River Valley[J]. *Adv Atmos Sci*, 32(9): 1255-1265.

Schaefer J T, 1990. The critical success index as an indicator of warning skill[J]. *Wea Forecasting*, 5(4): 570-575.

Smith S R, Legler D M, Verzone K V, 2001. Quantifying uncertainties in NCEP reanalyses using high-quality research vessel observations[J]. *J Climate*, 14(20): 4062-4072.

Song W Z, Jia H F, Li Z L, et al, 2018. Using geographical semi-variogram method to quantify the difference between NO₂ and PM_{2.5} spatial distribution characteristics in urban areas[J]. *Sci Total Environ*, 631-632: 688-694.

Wahl S, Bollmeyer C, Crewell S, et al, 2017. A novel convective-scale regional reanalysis COSMO-REA2: improving the representation of precipitation[J]. *Meteor Z*, 26(4): 345-361.

Xu Z F, Zhang L, Wang R C, et al, 2023. Effect of 2-m temperature data assimilation in the CMA-MESO 3DVAR system[J]. *J Meteor Res*, 37(2): 218-233.