

孔祥宁,刘焕彬,曹洁,等.HRCLDAS与ERA5-Land气温日统计数据在山东地区的对比评估[J].海洋气象学报,2023,43(2):88-99.  
KONG Xiangning, LIU Huanbin, CAO Jie, et al. Comparison and evaluation of HRCLDAS and ERA5-Land daily temperature statistics in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(2): 88-99. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.008. (in Chinese)

## HRCLDAS与ERA5-Land气温日统计数据在山东地区的对比评估

孔祥宁<sup>1,2</sup>,刘焕彬<sup>1,2</sup>,曹洁<sup>1,2</sup>,郑娜<sup>3</sup>

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.山东省气候中心,山东 济南 250031;3.邹平市气象局,山东 邹平 256200)

**摘要:** 基于山东省2021年3月—2022年2月1519个气象观测站2 m气温观测数据,对中国气象局高分辨率陆面数据同化系统(High Resolution China Meteorological Administration Land Data Assimilation System, HRCLDAS)和欧洲中期天气预报中心第五代陆面再分析数据集(ERA5-Land)逐小时2 m气温分析的日统计数据(平均气温、最高气温、最低气温)进行对比评估。结果显示:(1)HRCLDAS/ERA5-Land日统计平均气温、最高气温、最低气温的均方根误差分别为0.1/1.2℃、0.6/1.9℃、0.4/1.7℃,表明HRCLDAS具有更高的精度,且在不同地理区域、不同海拔高度的表现均优于ERA5-Land,大部地区的偏差(-0.5~0.5℃)远低于ERA5-Land(-2.0~2.0℃)。(2)两套数据对高温及寒潮过程的监测能力对比评估表明,HRCLDAS能够捕捉到大部分的高温以及寒潮过程,其与观测的高温日数及寒潮日数空间分布较为相似,但对影响范围存在一定的低估;ERA5-Land则只能监测到部分高温及寒潮过程,并对高温日数与寒潮日数存在严重的低估。

**关键词:** 中国气象局高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS);欧洲中期天气预报中心第五代陆面再分析数据集(ERA5-Land);山东;气温;适用性评估

中图分类号: P423;P413 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2023)02-0088-12

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.008

## Comparison and evaluation of HRCLDAS and ERA5-Land daily temperature statistics in Shandong

KONG Xiangning<sup>1,2</sup>, LIU Huanbin<sup>1,2</sup>, CAO Jie<sup>1,2</sup>, ZHENG Na<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 3. Zouping Meteorological Bureau, Zouping 256200, China)

**Abstract:** Based on the 2-m air temperature data of 1 519 meteorological observation stations in Shandong from March 2021 to February 2022, the applicability of the 2-m temperature daily statistics (mean, maximum, and minimum temperature) from HRCLDAS (High Resolution China Meteorological Administration Land Data Assimilation System) and ERA5-Land (ECMWF Reanalysis v5-Land) in Shandong is compared and evaluated. The results are as follows. (1) The RMSE (root mean square error) of mean, maximum, and minimum temperature from HRCLDAS/ERA5-Land daily statistics is 0.1/1.2℃,

收稿日期:2022-07-11;修回日期:2023-01-10

基金项目:山东省气象局科研项目(2021SDQN04,2021sdqx04)

第一作者简介:孔祥宁,女,硕士,助理工程师,主要从事气候变化评估研究工作,kongxn@qq.com。

通信作者简介:刘焕彬,男,正高级工程师,主要从事气候应用研究工作,hb\_liu@126.com。

0.6/1.9 °C, and 0.4/1.7 °C, respectively, which means that HRCLDAS is more accurate, and HRCLDAS in different geographical areas and at different altitudes performs better than ERA5-Land. The deviation of HRCLDAS in most areas (-0.5 to 0.5 °C) is much lower than that of ERA5-Land (-2.0 to 2.0 °C). (2) The comparison and evaluation of the two datasets on the monitoring ability of high temperature and cold wave show that HRCLDAS can capture most of the high temperature and cold wave processes, and the spatial distribution of the number of high temperature and cold wave days is similar to the observation, but it somewhat underestimates the influence range. However, ERA5-Land can only monitor part of the high temperature and cold wave processes, and the number of high temperature and cold wave days is seriously underestimated.

**Keywords:** High Resolution China Meteorological Administration Land Data Assimilation System (HRCLDAS); ECMWF Reanalysis v5-Land (ERA5-Land); Shandong; air temperature; applicability evaluation

## 引言

在全球气候变暖背景下,各类极端天气事件频发,其中极端高温事件的频率和强度均在增加<sup>[1-3]</sup>,比如2022年夏季中国出现的大范围持续性高温事件,影响人口超过9亿人,多省电网用电负荷创历史新高,部分地区气象干旱持续或发展。日益严峻的天气气候事件需要更高质量的气象服务,但目前的气象服务主要基于站点数据,分布不均的地面观测站点难以准确描述复杂地形地貌下不同区域间的气温要素差异,且对极端冷暖事件的捕捉能力较差<sup>[4-5]</sup>,因此亟需更加精细的气象数据集以了解极端冷暖事件特征,满足高精度、网格化的气象服务需求。

再分析数据是基于历史多源观测,通过数据同化研发的规则网格产品<sup>[6]</sup>,其气温产品较为成熟,用于极端冷暖事件监测的潜力巨大。目前国际主流的全球再分析产品主要有ERA5、NCEP/NCAR再分析产品、JRA-55、MERRA-2等,其中ERA5再分析数据受到广泛认可且空间分辨率最高<sup>[7-9]</sup>。ERA5提供了1950年以来全球大气、地表和海浪的再分析数据,相较ERA-Interim,采用每小时输出,并添加了不确定性估计<sup>[10]</sup>。ERA5-Land数据集与ERA5共享大部分参数化方案,与ERA5(0.25°×0.25°)相比具有更精细的空间分辨率(0.1°×0.1°),并提供更准确的水和能量循环描述。大量学者针对ERA5、ERA5-Land再分析数据开展评估工作。单帅等<sup>[11]</sup>研究指出ERA5气温资料在中国北部积雪区整体表现优于JRA-55、CFSR及MERRA-2。孟宪贵等<sup>[8]</sup>发现ERA5在山东的适用性要优于ERA-Interim资料,其2 m气温与观测资料的相关性较好。Zou等<sup>[12]</sup>对

ERA5-Land气温数据在粤港澳大湾区的表现能力进行了研究,发现ERA5-Land与观测气温存在较好的一致性,且能够较好地捕捉气温日变化与季节性变化,但存在一定的低估,在低温下的表现优于高温,下垫面、离海岸线的距离与海拔高度会影响ERA5-Land数据的准确性。

中国的融合与再分析技术起步较晚,但发展较快。国家气象信息中心先后研制出CRA40、CRA40/Land、中国气象局陆面数据同化系统(China Meteorological Administration Land Data Assimilation System, CLDAS)、高分辨率陆面数据同化系统(High Resolution CLDAS, HRCLDAS)等一系列再分析与融合产品<sup>[9,13-18]</sup>,其中HRCLDAS沿用CLDAS的核心算法,同时结合高分辨率地形参数数据,对气温等要素进行地形调整,空间分辨率可达0.01°×0.01°<sup>[19]</sup>。与国内外再分析产品相比,HRCLDAS系列的陆面融合分析产品在中国区域的时空分辨率更高,能够刻画出中国区域的更多细节,且误差更小,更适合用于中国区域的极端天气事件的研究<sup>[5,20-21]</sup>。刘莹等<sup>[22]</sup>对CLDAS气温数据在中国区域的适用性进行了评估,结果显示,CLDAS气温较好地反映了中国气温的年际变化,东部误差小于西部误差。齐铎等<sup>[23]</sup>与董春卿等<sup>[24]</sup>分别基于CLDAS数据对中国东北地区与山西省的气温预报数据进行了订正。Wang等<sup>[5]</sup>通过评估HRCLDAS与ERA5气温数据在中国的适用性发现,二者均能够还原气温空间分布与季节变化的总体特征,HRCLDAS能够表现出更细致的分布特征,且误差较ERA5更小。

HRCLDAS与ERA5-Land数据集为目前国内国外空间分辨率较高的两类数据,但缺少对两套数据在山

东境内的对比研究,因此本文基于山东2 m气温观测数据,对 HRCLDAS 与 ERA5-Land 逐小时气温的日统计数据对比评估,分析二者的时空分布特征与误差分布特征,并对 HRCLDAS 与 ERA5-Land 数据对高温以及寒潮过程的监测能力进行评估,以为高分辨率气温格点数据在山东的应用提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

采用2021年3月—2022年2月山东省内国家级气象观测站和区域气象观测站逐日2 m观测气温数据作为对比数据,该数据已经过国家气象信息中心的质控,包括气候界限值检查、要素允许范围值检查、时间一致性检查、空间一致性检查和质控综合判断等<sup>[22]</sup>。原始数据共1 776站(含国家级气象观测站123站),本文为减少缺测站点对评估结果的影响,对缺测1个月以上的站点进行去除,并进一步对不可信数据进行人工筛查与去除,主要是通过某日个别站点出现的高温过程以及寒潮过程进行人工核验,如其与地形、天气过程矛盾,则对站点进行去除。经过缺测处理与人工核验后的站点剩余1 519站(含国家级气象观测站123站)。

HRCLDAS数据集由国家气象信息中心研发,利用多重网格变分同化(The Space and Time Mesoscale Analysis System, STMAS)对地面观测数据、卫星观测产品以及数值模式数据进行融合,同时为进一步描述1 km分辨率尺度的细节,尤其是气温、气压等随海拔高度变化较为明显的要素,引入0.01°空间分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)地形参数数据,对气温等要素进行地形调整,从而获取高质量的气温、湿度和风速数据<sup>[19]</sup>。该数据覆盖范围为70°~140°E、15°~60°N,空间分辨率为0.01°×0.01°,时间分辨率为1 h<sup>[5,20]</sup>。目前可下载HRCLDAS 2021年1月21日以来的数据,选取2021年3月—2022年2月整年数据进行评估。

ERA5-Land是通过欧洲中期天气预报中心ERA5再分析数据的陆面部分进行重算得到的,其仅包含陆面变量,空间分辨率较ERA5更高,为0.1°×0.1°,空间覆盖范围为全球,时间范围为1950年1月以来<sup>[25]</sup>。ERA5-Land提供两种时间分辨率数据:逐小时与逐月。为与HRCLDAS进行对比,选取2021年

3月—2022年2月逐小时ERA5-Land气温数据。

为评估格点数据对极端情况的刻画情况,将逐小时HRCLDAS、ERA5-Land气温数据处理为日平均气温、日最高气温、日最低气温,其中日平均气温与观测日平均气温采用相同的统计方法,取每日02时、08时、14时、20时气温的平均值,日最高气温与日最低气温受限于格点数据时间分辨率,取每日20时一次日20时逐小时数据中的极大值与极小值。下文将逐小时HRCLDAS、ERA5-Land气温数据统计的日平均气温、日最高气温、日最低气温简称为HRCLDAS与ERA5-Land平均气温、最高气温、最低气温。

### 1.2 方法

为了方便对比格点数据与气象站点数据,使用反距离权重法将HRCLDAS、ERA5-Land格点数据插值到气象站点上,并将站点气温数据作为真值来评估检验。通过计算站点气温与HRCLDAS、ERA5-Land气温的偏差、均方根误差等指标对比评估两套数据在山东的适用性。

反距离权重插值认为与未采样点距离最近的若干个点对未采样点值的贡献最大,其贡献与距离成反比,未采样点估计值可用下式表示<sup>[26]</sup>:

$$Z = \sum_{i=1}^n W_i Z_i, \quad (1)$$

$$W_i = \frac{D_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n D_j^{-p}}, \quad (2)$$

式中: $Z$ 是估计值; $Z_i$ 是第 $i$ 个样本; $W_i$ 为权重; $D_i$ 是距离; $p$ 是距离的幂,它显著影响内插的结果,通过定义更高的幂值,可进一步强调最近点,一般0.5~3.0的值可获得最合理的结果,本文取幂值为2.0。

采用的评估指标包括平均偏差(bias)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、相关系数(correlation coefficient, CC),计算公式如下:

$$V_{\text{bias}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_i - O_i), \quad (3)$$

$$V_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_i - O_i)^2}, \quad (4)$$

$$V_{\text{CC}} = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}, \quad (5)$$

式中: $V_{\text{bias}}$ 为平均偏差值, $V_{\text{RMSE}}$ 为均方根误差值, $V_{\text{CC}}$ 为相关系数值, $n$ 为样本总数, $O_i$ 为站点观测值, $G_i$

为格点数据插值到站点值,  $\bar{O}$  为站点观测平均值,  $\bar{G}$  为格点数据平均值。

## 2 结果分析

### 2.1 气温的时空分布特征

对 2021 年 3 月—2022 年 2 月站点观测、HRCLDAS 与 ERA5-Land 的年平均气温、年最高气温、年最低气温的空间分布特征(图 1)进行对比。由平均气温来看, 站点观测、HRCLDAS 与 ERA5-Land 均显示, 山东平均气温整体呈现西南高、东北低的分布特征, 鲁西南地区平均气温最高, 泰山以及半岛内陆地区平均气温最低; 相比于 ERA5-Land, HRCLDAS 平均气温分布更加细致, 能够把握更小尺度的空间特

征, 且能够捕捉到更多的极值。由最高气温来看, HRCLDAS 与观测较为相似, 呈现西部高, 东部与中部低的分布特征, 极大值出现在鲁西北, 泰山以及半岛沿海地区最高气温较低; 而 ERA5-Land 最高气温的分布特征与观测存在差异, 其鲁东南的最高气温与观测相差 2 °C 左右, 且极大值出现在鲁西南, 与观测不符。3 套数据最低气温均由中部向四周升高, 鲁中山区与半岛内陆地区最低气温较低, HRCLDAS 与观测数值较为接近, 但 ERA5-Land 较观测整体偏高 2 °C 以上。总体来看, HRCLDAS 气温数据能够很好地再现观测气温空间分布特征, 而 ERA5-Land 最高气温的分布特征与实测较为不符, 最低气温整体偏高, 且 HRCLDAS 空间分布更为精细, 能够更好地反映出地形细节。

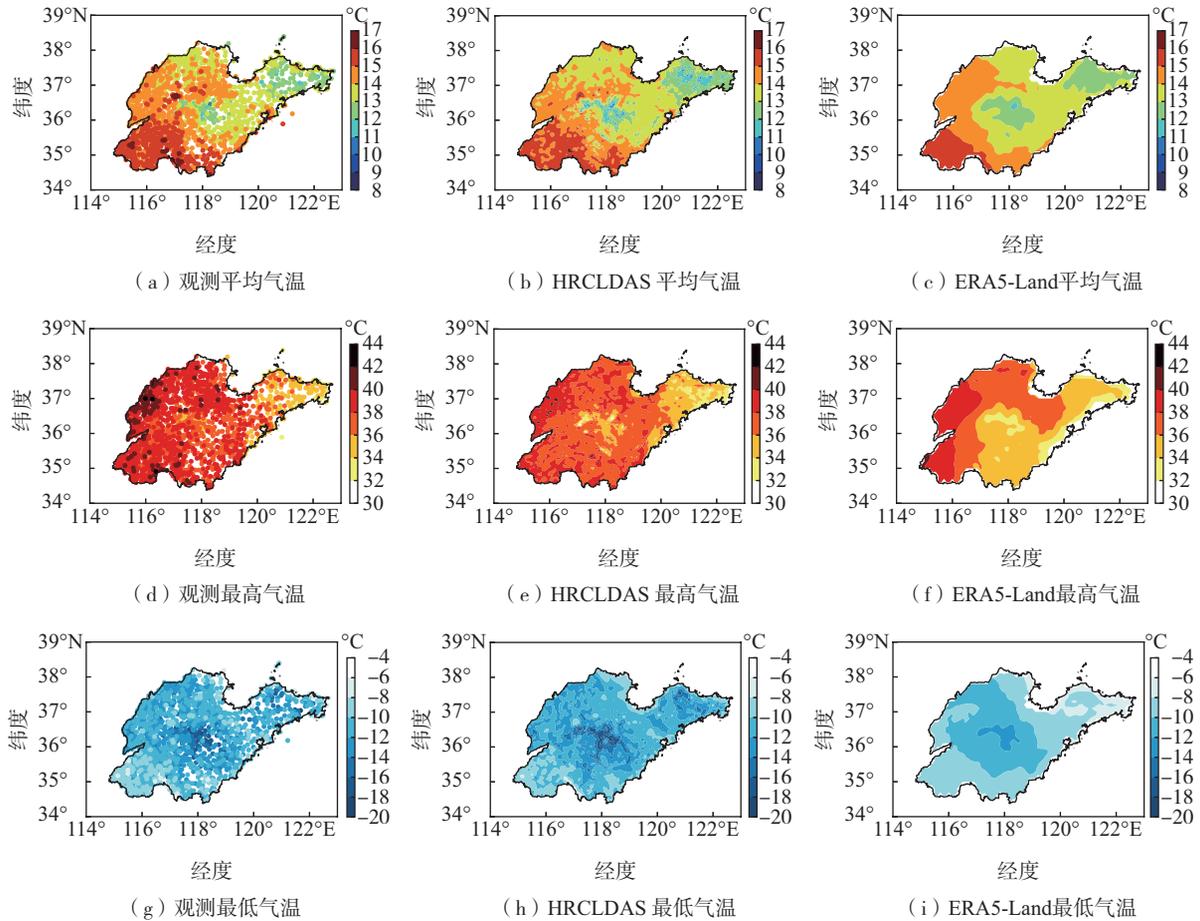


图 1 2021 年 3 月—2022 年 2 月站点观测、HRCLDAS 和 ERA5-Land 平均气温、最高气温、最低气温的空间分布  
Fig.1 Spatial distribution of mean, maximum, and minimum temperature from observation, HRCLDAS, and ERA5-Land from March 2021 to February 2022

为消除气温的月变化, 用逐日气温减去各月平均值后得到观测、HRCLDAS 与 ERA5-Land 的平均气温、最高气温、最低气温逐日变化(图 2)。可以看

到, 观测、HRCLDAS 与 ERA5-Land 的平均气温波动基本一致, 其中 HRCLDAS 与观测吻合程度更高, 相关系数超过 0.99, 只存在较小的偏差, 观测与

ERA5-Land平均气温的相关系数为0.98;3套数据最高气温的变化存在较大差异,其中HRCLDAS与观测相关系数为0.95,ERA5-Land与观测的相关系数为0.88;HRCLDAS与ERA5-Land最低气温的偏差较大,其中HRCLDAS与观测相关系数为0.91,ERA5-Land与观测的相关系数为0.82。整体来看,HRCLDAS可以更好地重现山东地区平均气温、最高气温、最低气温随时间的演变,与观测平均气温、最高气温、最低气温的相关系数均在0.9以上。

图3为站点观测、HRCLDAS与ERA5-Land气温的概率分布图。整体来看,相比于ERA5-Land数据,HRCLDAS的平均气温、最高气温、最低气温概率分布与观测数据更为接近。HRCLDAS与ERA5-Land的平均气温与最高气温均较观测偏小,说明两套格点数据对观测极端高温的还原能力较差;HRCLDAS的最低气温与观测较为接近,而ERA5-Land最低气温整体较观测偏高,在极端最低气温方面表现较差。

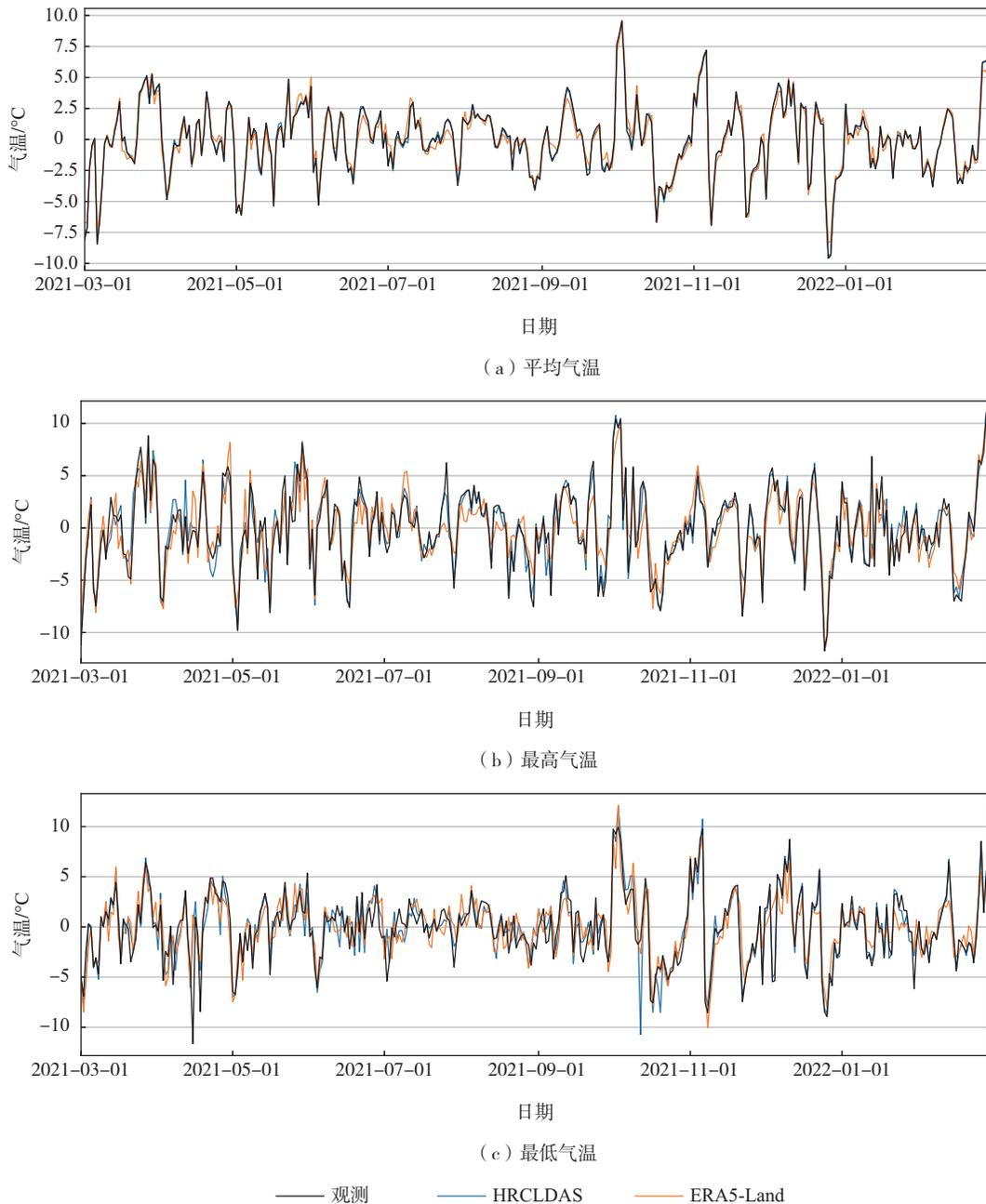


图2 消除月变化的站点观测、HRCLDAS和ERA5-Land平均气温、最高气温、最低气温逐日变化  
Fig.2 Time series of daily mean, maximum, and minimum temperature (minus monthly mean value) from observation, HRCLDAS, and ERA5-Land

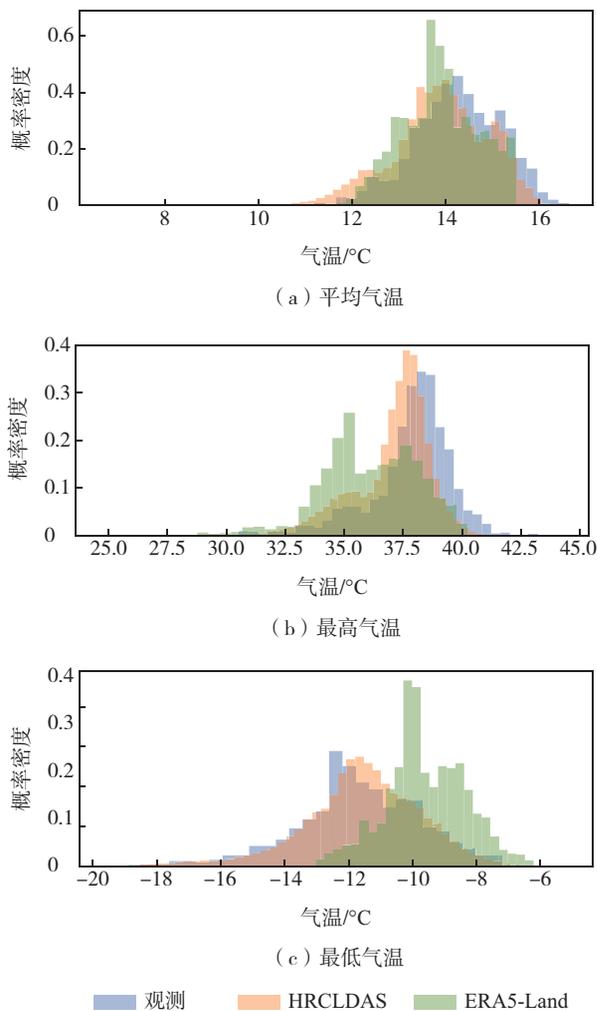


图3 站点观测、HRCLDAS和ERA5-Land平均气温、最高气温与最低气温概率密度分布

Fig.3 Probability density distribution of mean, maximum, and minimum temperature from observation, HRCLDAS, and ERA5-Land

### 2.2 格点数据气温误差分析

进一步分析偏差与均方根误差,比较HRCLDAS、ERA5-Land气温与观测的差异。首先计算RMSE,对两套数据的整体准确性进行评估,HRCLDAS平均气温、最高气温、最低气温RMSE分别为0.1℃、0.6℃、0.4℃,而ERA5-Land的RMSE分别为1.2℃、1.9℃、1.7℃。

图4为HRCLDAS与ERA5-Land平均气温、最高气温、最低气温的偏差空间分布。由平均气温偏差来看,HRCLDAS的正负偏差在山东均匀分布,大部分地区偏差在-0.1~0.1℃,其中鲁中山区、崂山附近正偏差较大,大于0.1℃,说明HRCLDAS平均气温对于山区的低温还原能力较差;大部地区

ERA5-Land平均气温偏差在-1.0~1.0℃,鲁西北与半岛地区ERA5-Land平均气温偏高,鲁中与鲁南地区偏低。由最高气温来看,HRCLDAS在山东大部分地区均偏低,偏差范围在-0.8~0℃;ERA5-Land最高气温在山东西部部分地区偏高,其他地区均偏低,大部地区偏低2.0℃以内,山东东南部、半岛北部偏低2.0~3.0℃。由最低气温来看,HRCLDAS在大部分地区偏高0.4℃以内,山东中西部局部地区偏高0.4℃以上;ERA5-Land最低气温在鲁中山区及南部偏低,其他地区偏高,大部地区偏差在2℃以内,半岛东部偏高2.0~3.0℃。两套数据最高气温在全省主要为负偏差,而最低气温在大部地区为正偏差,这主要是因为HRCLDAS与ERA5-Land时间分辨率较低,难以捕捉极端最高、最低气温,因此最高气温较观测低,而最低气温较观测高。总体来看,HRCLDAS日统计气温数据具有更高的精度。

由HRCLDAS平均、最高、最低气温数据偏差的站点统计(图5a)来看,平均气温偏差总体范围在-0.3~0.8℃,1519个站点中930个站点出现冷偏差,589个站点出现暖偏差,1373个站点的偏差在0.1℃以内,占总数的90.4%,10个站点偏差大于0.3℃,其中只有1个站点(泰山站)偏差大于0.5℃。最低气温偏差总体范围在-0.4~1.0℃,主要集中在0.1~0.3℃(1046站),大部分站点存在暖偏差(1432站),87个站点出现冷偏差。最高气温偏差总体范围在-1.1~0.7℃,主要集中在-0.5~-0.3℃(913站),1514个站点存在冷偏差,5个站点出现暖偏差。

由ERA5-Land平均、最高、最低气温数据偏差的站点统计(图5b)来看,平均气温偏差总体范围在-2.7~6.3℃,1519个站点中899个站点出现冷偏差,620个站点出现暖偏差,1342个站点的偏差在1.0℃以内,占总数的88.3%,12个站点偏差大于2.0℃,其中只有1个站点(泰山站)偏差大于3.5℃。最低气温偏差总体范围在-3.1~4.8℃,主要集中在-2.0~3.0℃(1500站),大部分站点存在暖偏差(933站),586个站点出现冷偏差。最高气温偏差总体范围在-4.7~8.1℃,主要集中在-3.0~1.0℃(1493站),1406个站点存在冷偏差,113个站点出现暖偏差。

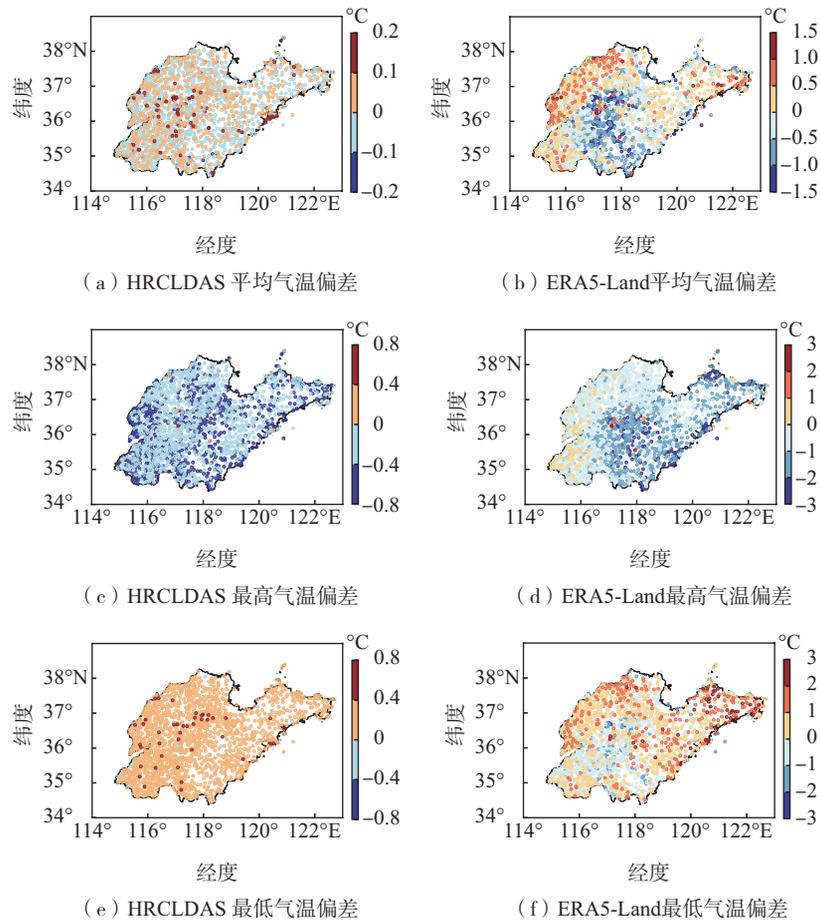


图4 HRCLDAS和ERA5-Land平均气温、最高气温、最低气温偏差空间分布

Fig.4 Spatial distribution of bias of mean, maximum, and minimum temperature from HRCLDAS and ERA5-Land

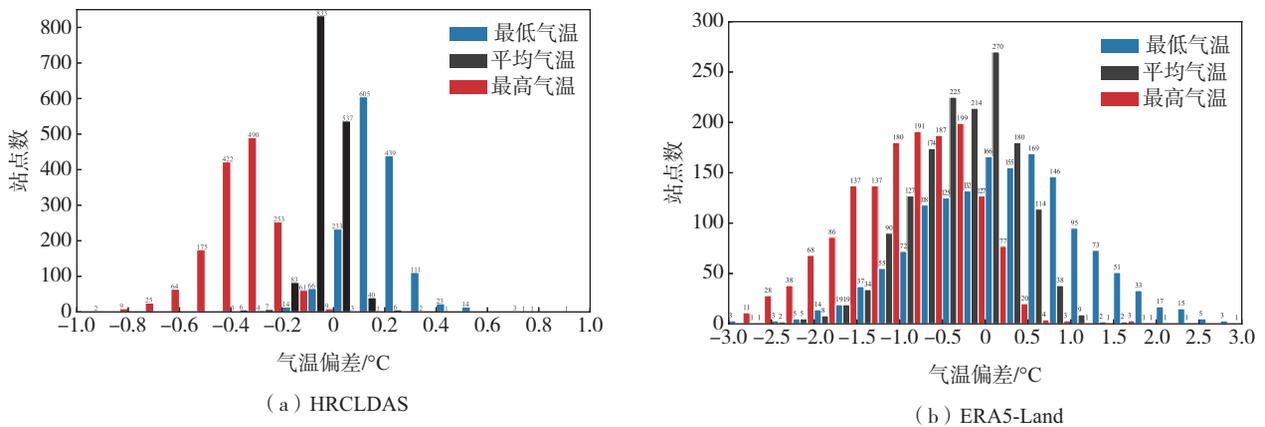


图5 HRCLDAS与ERA5-Land平均气温、最高气温、最低气温偏差的站点统计

Fig.5 Station statistics of bias of mean, maximum, and minimum temperature from HRCLDAS and ERA5-Land

气温受地形影响较大,因此进一步选取5个海拔高度( $h_{alt}$ )区间: $0\text{ m} \leq h_{alt} < 100\text{ m}$ 、 $100\text{ m} \leq h_{alt} < 200\text{ m}$ 、 $200\text{ m} \leq h_{alt} < 300\text{ m}$ 、 $300\text{ m} \leq h_{alt} < 400\text{ m}$ 、 $h_{alt} \geq 400\text{ m}$ 等,计算不同高度的RMSE,在各高度区间的站点数分别为1168站、239站、69站、24站、19站。

在所有海拔区间内,ERA5-Land平均气温、最高气温和最低气温RMSE均大于HRCLDAS。HRCLDAS与ERA5-Land在大部分海拔高度区间均是 $V_{RMSE}(\text{最高气温}) > V_{RMSE}(\text{最低气温}) > V_{RMSE}(\text{平均气温})$ ,并且大体上呈现随海拔高度升高而增加的趋势(表1)。

表 1 不同海拔高度 HRCLDAS 与 ERA5-Land 平均气温、最高气温、最低气温的 RMSE

Table 1 RMSE of mean, maximum, and minimum temperature from HRCLDAS and ERA5-Land at different altitudes

海拔高度 $h_{alt}/m$	站数	$V_{RMSE}/^{\circ}C$					
		平均气温		最高气温		最低气温	
		HRCLDAS	ERA5-Land	HRCLDAS	ERA5-Land	HRCLDAS	ERA5-Land
$0 \leq h_{alt} < 100$	1 168	0.13	1.13	0.55	1.78	0.34	1.62
$100 \leq h_{alt} < 200$	239	0.15	1.31	0.53	2.11	0.35	1.78
$200 \leq h_{alt} < 300$	69	0.18	1.42	0.58	2.25	0.38	2.09
$300 \leq h_{alt} < 400$	24	0.18	1.35	0.57	2.13	0.38	2.09
$h_{alt} \geq 400$	19	0.34	2.08	0.75	2.51	0.61	2.61

图 6 为各市内 HRCLDAS 和 ERA5-Land 所有站 RMSE 的统计分析。HRCLDAS 各市平均气温 RMSE 最小,其中青岛、济南、泰安的 RMSE 较大,大部分地市的 RMSE 在 0.15 °C 以下;各市最高气温 RMSE 均比较大,其中青岛、临沂 RMSE 在 0.6 °C 以上,其他市 RMSE 均在 0.6 °C 以下,日照、德州误差较小;由最低气温来看,青岛、济南、淄博 RMSE 较大,其他各市的 RMSE 均在 0.4 °C 以下,日照、菏泽 RMSE 较小。总体来看,HRCLDAS 的平均气温、最高气温、最低气温在日照表现最好,而在青岛的表现均最差,这可能是由青岛高山与海岸组成的复杂地形导致的。ERA5-Land 各市平均气温、最高气温、最低气温的 RMSE 比 HRCLDAS 更大,基本都在 1~2 °C,综合来看,东营、潍坊、德州等地 ERA5-Land 平均气温、最高气温、最低气温误差较小,济南、泰安、威海等地误差较大。

图 7 为 HRCLDAS 与 ERA5-Land 各月平均气温、最高气温、最低气温的 RMSE,HRCLDAS 平均气温 RMSE 在春夏季较大,秋冬季较小,ERA5-Land 平均气温 RMSE 则在 8、9 月最小,11、12 月最大;HRCLDAS 与 ERA5-Land 的最高气温 RMSE 均在夏半年较大,冬半年较小,而两者最低气温 RMSE 则在冬半年较大,夏半年较小,这是可能因为最高气温在夏半年更易出现极端值,最低气温在冬半年更易出现极端值,而 HRCLDAS 与 ERA5-Land 难以还原极端值。

表 2 为不同观测气温区间内 HRCLDAS、ERA5-Land 与观测平均气温、最高气温、最低气温的相关系数。由于部分站点海拔较高,与其他平原站点温度差异较大,因此平均气温与最高气温分别在 7~9 °C、26~28 °C 存在断档。观测平均气温范围在 6~17 °C,HRCLDAS 与观测平均气温的相关系数大体上随着观测平均气温的增加而增加,在 15~16 °C 区间内相关系数最大,ERA5-Land 与观测平均气温的

相关系数则是随着观测平均气温的增加先增大后减小,在 13~14 °C 区间内相关系数最大,HRCLDAS 在不同区间内与观测平均气温的相关系数均在 0.997 以上,优于 ERA5-Land 数据。HRCLDAS、ERA5-Land 与观测最高气温、最低气温的相关系数大体上均是随着气温升高,先增大后减小,且 HRCLDAS 与观测相关性更好。

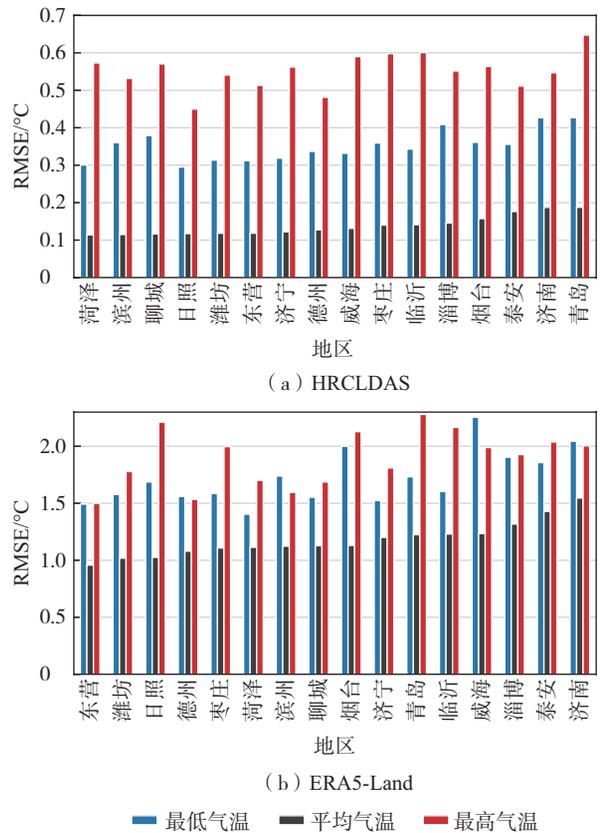


图 6 山东各市 HRCLDAS 与 ERA5-Land 平均气温、最高气温、最低气温的 RMSE

Fig.6 RMSE of mean, maximum, and minimum temperature from HRCLDAS and ERA5-Land in different cities of Shandong

2.3 高温与寒潮事件评估

利用最高气温与最低气温判别高温与寒潮事

件对实际业务有重要意义,因此进一步评估了 HRCLDAS 与 ERA5-Land 对高温以及寒潮天气的监测能力。对比高温日数(日最高气温 35 °C 以上)分布(图 8)可以看到,3 套数据高温日数均呈现西部多东部少的分布特征。观测数据显示,半岛及鲁中山区高温日数较少,为 8 d 以下,鲁西南

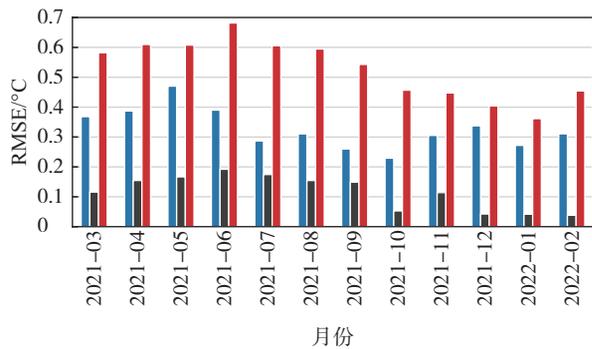
高温日数最多,最多可达 63 d。HRCLDAS 与 ERA5-Land 监测到的高温日数均少于观测,其中 HRCLDAS 更接近观测,其显示半岛及鲁中山区高温日数多为 8 d 以下,鲁西南高温日数最多,最多为 56 d,而 ERA5-Land 高温日数最多仅为 25 d,出现在鲁西南局部。

表 2 不同气温区间内观测平均气温、最高气温、最低气温与 HRCLDAS、ERA5-Land 的相关系数

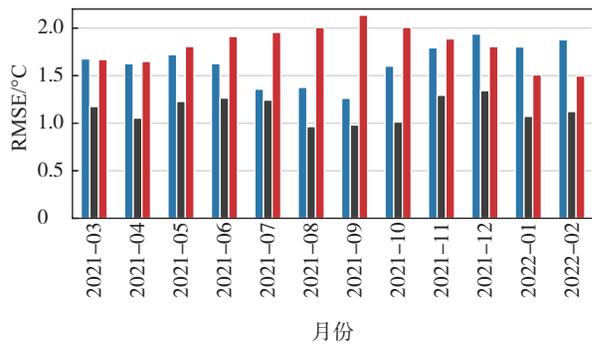
Table 2 Correlation coefficient of mean/maximum/minimum temperature between observation and HRCLDAS/ERA5-Land in different temperature ranges

平均气温			最高气温			最低气温		
气温区间/°C	相关系数		气温区间/°C	相关系数		气温区间/°C	相关系数	
	HRCLDAS	ERA5-Land		HRCLDAS	ERA5-Land		HRCLDAS	ERA5-Land
[6,7)	0.997 3	0.981 8	[24,26)	0.994 5	0.978 9	[-20,-18)	0.999 1	0.980 9
[7,8)	/	/	[26,28)	/	/	[-18,-16)	0.999 3	0.984 0
[8,9)	/	/	[28,30)	0.998 1	0.966 9	[-16,-14)	0.999 4	0.986 8
[9,10)	0.998 4	0.971 7	[30,32)	0.997 9	0.982 0	[-14,-12)	0.999 6	0.990 5
[10,11)	0.999 8	0.988 0	[32,34)	0.998 8	0.987 0	[-12,-10)	0.999 6	0.991 5
[11,12)	0.999 8	0.992 7	[34,36)	0.999 2	0.989 2	[-10,-8)	0.999 5	0.991 0
[12,13)	0.999 9	0.994 4	[36,38)	0.999 4	0.990 9	[-8,-6)	0.999 2	0.990 5
[13,14)	0.999 9	0.995 5	[38,40)	0.999 4	0.989 9	[-6,-4)	0.999 8	0.980 2
[14,15)	0.999 9	0.995 1	[40,42)	0.999 3	0.987 9	/	/	/
[15,16)	0.999 9	0.994 4	[42,44)	0.999 0	0.980 5	/	/	/
[16,17)	0.999 9	0.992 5	[44,46)	0.999 5	0.990 0	/	/	/

注:“/”表示无站点观测气温处于该区间内。



(a) HRCLDAS



(b) ERA5-Land

■ 最低气温 ■ 平均气温 ■ 最高气温

图 7 各月 HRCLDAS 和 ERA5-Land 平均气温、最高气温、最低气温的 RMSE

Fig.7 RMSE of mean, maximum, and minimum temperature from HRCLDAS and ERA5-Land in different months

逐日高温站数(面积)占比(图 9)表示逐日高温过程的影响范围,其中 HRCLDAS 逐日高温面积与观测逐日高温站数(面积)占比的相关系数为 0.97,可以捕捉到大部分的高温天气过程,只有 9 d(2021 年 5 月 9 日、21 日、24 日,6 月 15 日,7 月 16 日、18 日、30 日,9 月 3 日、7 日)的高温过程未能监测到,观测显示,这 9 d 出现高温的站点均少于 7 个,此外,HRCLDAS 低估了每次高温过程的影响范围,这可能是由于 HRCLDAS 对最高气温存在低估,因此对部分弱的高温过程以及影响范围判断有误。ERA5-Land 与观测逐日高温站数(面积)占比的相关系数为 0.86,它对高温过程的识别能力显著低于 HRCLDAS,尤其在 7 月中旬之后,ERA5-Land 对大部分的高温过程均未捕捉到,此外,ERA5-Land 对于高温影响范围也普遍存在低估。总体来看,HRCLDAS 对高温过程的识别判断能力优于 ERA5-Land。

当某地的日最低气温 24 h 内降温幅度  $\Delta t_{24h} \geq 8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,或 48 h 内降温幅度  $\Delta t_{48h} \geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,或 72 h 内降温幅度  $\Delta t_{72h} \geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ ,且日最低气温  $t \leq 4 \text{ }^\circ\text{C}$  时定义为寒潮过程<sup>[27]</sup>,分别利用观测数据、HRCLDAS 与 ERA5-Land 数据计算 2021 年 10 月—2022 年 2 月寒潮日数(图 10)。观测结果显示,山东寒潮日数呈现

中南部多,东北部以及西南部少的分布特征,鲁中山区以及鲁东南寒潮日数最多,最多为 17 d,半岛北部以及鲁西南地区寒潮日数较少,多为 6 d 以下。

HRCLDAS 与观测分布特征基本相同,寒潮日数最大值同样为 17 d,但 ERA5-Land 寒潮日数与观测相差较大,最多只有 10 d。

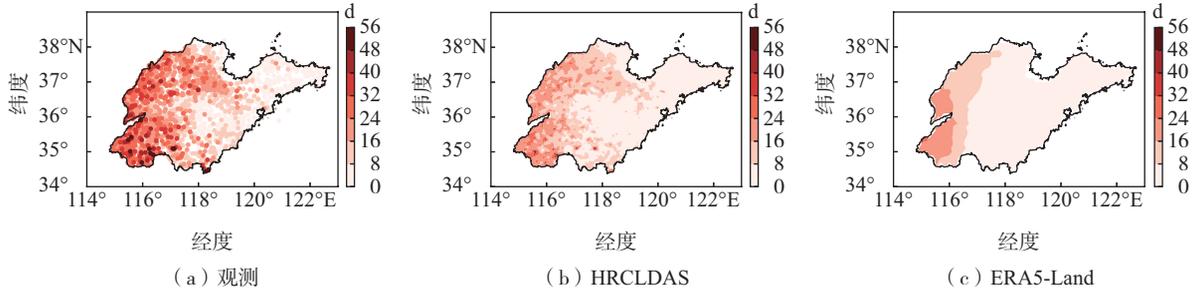


图 8 2021 年 3 月—2022 年 2 月站点观测、HRCLDAS 和 ERA5-Land 高温日数分布

Fig.8 Spatial distribution of high temperature ( $t \geq 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ) days from observation, HRCLDAS, and ERA5-Land from March 2021 to February 2022

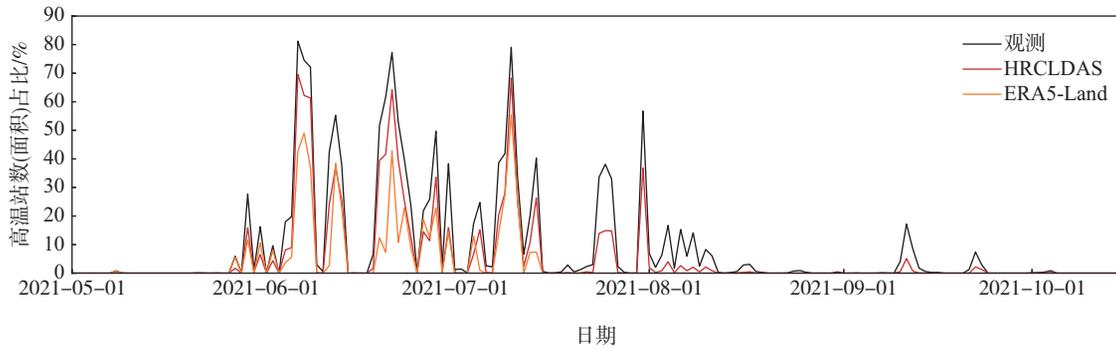


图 9 2021 年 5—10 月站点观测、HRCLDAS 与 ERA5-Land 逐日高温站数(面积)占比变化

Fig.9 Time series of proportion of daily high-temperature stations from observation, HRCLDAS, and ERA5-Land from May to October 2021

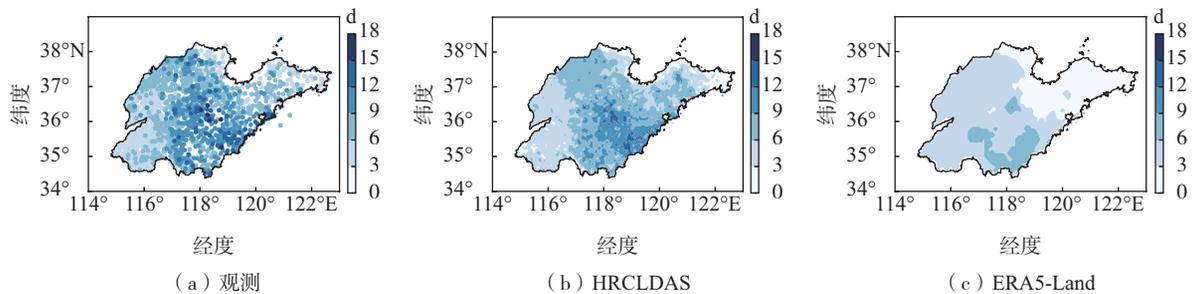


图 10 2021 年 10 月—2022 年 2 月站点观测、HRCLDAS 和 ERA5-Land 寒潮日数分布

Fig.10 Spatial distribution of cold wave days from observation, HRCLDAS, and ERA5-Land from October 2021 to February 2022

观测数据、HRCLDAS 与 ERA5-Land 数据逐日寒潮站数(面积)占比(图 11)显示, HRCLDAS 可以捕捉到大部分的寒潮过程,并且对历次寒潮范围判断较为准确,基本与观测一致,二者相关系数超过 0.99;ERA5-Land 数据同样可以捕捉到大部分的寒

潮过程,且对于 2021 年 10—11 月寒潮事件影响范围判断较为准确,但其在 2021 年 12 月之后的寒潮过程影响范围与观测存在较大差距,ERA5-Land 与观测的相关系数为 0.90。总体来看,HRCLDAS 对于寒潮的监测能力更好。

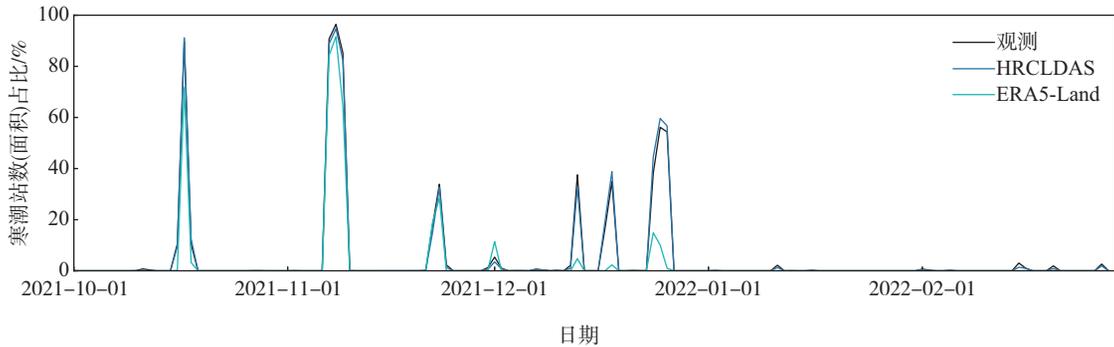


图11 2021年10月—2022年2月站点观测、HRCLDAS与ERA5-Land逐日寒潮站数(面积)占比变化  
Fig.11 Time series of proportion of cold wave stations from observation, HRCLDAS, and ERA5-Land from October 2021 to February 2022

### 3 结论

基于山东省内气象观测站,通过对比HRCLDAS、ERA5-Land日统计气温数据与观测气温的时空分布特征,分析HRCLDAS与ERA5-Land日统计气温数据的偏差、均方根误差,评估二者对高温、寒潮天气的监测能力,对二者进行了适用性评估,评估结果表明:

(1)HRCLDAS与ERA5-Land日统计气温数据均存在一定的误差,其中最高气温在全省大部为负偏差,而最低气温在大部地区为正偏差,且误差均随海拔高度升高而增加。HRCLDAS/ERA5-Land日统计平均气温、最高气温、最低气温的均方根误差分别为 $0.1/1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.6/1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.4/1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,分析表明HRCLDAS气温分析日统计数据具有更高的精度,并且其不同行政区、不同海拔高度的表现均优于ERA5-Land,大部地区的偏差( $-0.5\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )远低于ERA5-Land( $-2.0\sim 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。

(2)HRCLDAS与ERA5-Land的最高气温均方根误差均在夏半年较大,冬半年较小,而两者最低气温均方根误差则在冬半年较大,夏半年较小。与ERA5-Land相比,HRCLDAS可以更好地重现山东省平均气温、最高气温、最低气温随时间的演变,其与观测平均气温、最高气温、最低气温的相关系数均在0.9以上,且误差更小。

(3)HRCLDAS基本能够捕捉到绝大部分的高温以及寒潮过程,与观测的高温日数及寒潮日数空间分布较为相似,但其对高温过程及寒潮过程的影响范围

存在一定的低估。ERA5-Land则只能监测到部分高温及寒潮过程,对高温日数与寒潮日数存在严重的低估。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 周波涛,钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
- [3] 董旭光,周强,刘焕彬,等. 山东夏季极端热事件变化特征分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(3): 60-76.
- [4] YANG F, LU H, YANG K, et al. Evaluation of multiple forcing data sets for precipitation and shortwave radiation over major land areas of China [J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2017, 21(11): 5805-5821.
- [5] WANG Q L, LI W, XIAO C, et al. Evaluation of high-resolution crop model meteorological forcing datasets at regional scale: air temperature and precipitation over major land areas of China [J]. Atmosphere, 2020, 11(9): 1011.
- [6] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2011, 137(656): 553-597.
- [7] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [8] 孟宪贵,郭俊建,韩永清. ERA5再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 91-99.
- [9] 王彩霞,黄安宁,郑鹏,等. 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, 2022, 41(5): 1325-1334.
- [10] DELHASSE A, KITTEL C, AMORY C, et al. Brief communication: evaluation of the near-surface climate in

- ERA5 over the Greenland Ice Sheet [J]. *Cryosphere*, 2020, 14(3):957-965.
- [11] 单帅,沈润平,师春香,等.中国北部积雪区冬季地表温度和2 m气温再分析数据评估[J].*高原气象*, 2020, 39(1):37-47.
- [12] ZOU J, LU N, JIANG H, et al. Performance of air temperature from ERA5-Land reanalysis in coastal urban agglomeration of Southeast China[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 828:154459.
- [13] 师春香,潘旸,谷军霞,等.多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J].*气象学报*, 2019, 77(4):774-783.
- [14] 刘梦杰,张卫星,张镇驿,等.CRA40在中国地区GNSS水汽反演中的适用性评估与分析[J].*南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 13(02):138-144.
- [15] 李施颖,吴薇,黄晓龙.四川省CLDAS和ECMWF再分析数据风速产品评估[J].*高原山地气象研究*, 2020, 40(4):70-76.
- [16] 孙帅,师春香,梁晓,等.不同陆面模式对我国地表温度模拟的适用性评估[J].*应用气象学报*, 2017, 28(6):737-749.
- [17] 韩帅,师春香,姜立鹏,等.CLDAS土壤湿度模拟结果及评估[J].*应用气象学报*, 2017, 28(3):369-378.
- [18] 崔园园,张强,李威,等.CLDAS融合土壤相对湿度产品适用性评估及在气象干旱监测中的应用[J].*海洋气象学报*, 2020, 40(4):105-113.
- [19] 韩帅,师春香,姜志伟,等.CMA高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展[J].*气象科技进展*, 2018, 8(1):108-116.
- [20] JIANG Y, HAN S, SHI C X, et al. Evaluation of HRCLDAS and ERA5 datasets for near-surface wind over Hainan Island and South China Sea [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(6):766.
- [21] 朱文刚,李昌义,车军辉.基于统一高度Cressman方法的地面2 m气温客观分析[J].*海洋气象学报*, 2021, 41(2):138-148.
- [22] 刘莹,师春香,王海军,等.CLDAS气温数据在中国区域的适用性评估[J].*大气科学学报*, 2021, 44(4):540-548.
- [23] 齐铎,刘松涛,张天华,等.基于格点的中国东北中北部2 m温度数值预报检验及偏差订正[J].*干旱气象*, 2020, 38(1):81-88.
- [24] 董春卿,郭媛媛,张磊,等.基于CLDAS的格点温度预报偏差订正方法[J].*干旱气象*, 2021, 39(5):847-856.
- [25] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. *Earth Syst Sci Data*, 2021, 13(9):4349-4383.
- [26] 李新,程国栋,卢玲.空间内插方法比较[J].*地球科学进展*, 2000, 15(3):260-265.
- [27] 新疆维吾尔自治区气象局,国家气象中心,中国国家标准化管理委员会.GB/T 21987—2017寒潮等级[S].北京:中国标准出版社,2017.