

赵彤,赵梦凡,周秉荣,等.三种再分析气温降水资料在青藏高原的适用性评价[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(3):116-125.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



三种再分析气温降水资料在青藏高原的适用性评价

赵彤^{1,2},赵梦凡^{1,2},周秉荣^{1,2*},申燕玲^{1,2},王晗³

(1.青海省气象科学研究所,青海 西宁 810001;2.青海省防灾减灾重点实验室,青海 西宁 810001;

3.山东省气候中心,山东 济南 250031)

摘要:基于青藏高原61个区域级气象站的气温降水地面观测数据,对CMFD(中国区域高分辨率地区驱动数据集)、CRA(全球大气和陆面再分析资料)以及MERRA-2(大气再分析资料)数据集的日、月、季节以及年气温、降水数据进行精度对比分析,评估3套数据的准确性以及在青藏高原的适用性,结果表明:(1)3套年平均气温资料70%的 $R_{MSE} < 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中CMFD拟合精度最高,2/3的站点 $R_{MSE} < 2\text{ }^{\circ}\text{C}$;CMFD和CRA对年降水的拟合精度较高,MERRA-2低估了高原中部的年降水量。(2)CMFD对季节平均气温整体拟合结果最好,尤其是气温较高的夏季和秋季;CRA在降水较为集中的夏季和秋季拟合结果最接近观测值,而在降水较少的春季和冬季CMFD拟合结果最好。(3)CMFD对月平均气温拟合结果整体最接近观测值;月降水拟合结果与季节降水结果相似,CMFD对降水偏少月份拟合结果较好,CRA在降水偏多月份最接近观测值。(4)对61个区域站进行日尺度平均气温和降水数据精度评估,发现CMFD和CRA拟合效果最好,CMFD拟合趋势一致性好。

关键词:气温;降水;青藏高原;再分析资料;精度验证

中图分类号:P413

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)03-0116-10

气温和降水作为重要的气象因子,不仅是构建陆面过程模型、水文模型的基础数据来源,也是生态要素监测和机理分析的重要参考指标,精确的气象监测资料是开展区域生态环境监测和气候资源开发研究的重要基础^[1-6]。青藏高原西部地区平均海拔在4 000 m以上,自然环境恶劣且地形复杂,导致区域站点分布不均,气象资料匮乏,仅依靠台站数据进行

传统的空间插值,会导致较大误差并且可能模糊部分空间信息,难以全面反映高原气候因子的空间分布规律,严重制约着科学研究的开展和气象服务效益的发挥^[7]。

20世纪90年代中期至今,为满足当代对于高分辨率、广覆盖范围的气候研究需求,美国、欧洲、日本等国家陆续组织开展了再分析资料制备计划,其中主要有美国的NCEP/NCAR计划,欧洲中心研发的ERA-Interim和后续研制的ERA5,日本气象厅联合电力中央研究所研制的JRA-55再分析资料等^[8-11]。2008年以前,因为没有高分辨率气象驱动数据的支撑,我国只能依赖国外开发的上述数据集,由于同类数据产品都有区域性系统偏差问题存在,导致国外数据集在国内外的研究应用上存在不同程度的可信度和质量问题^[12-19]。在此背景下,由中国独立

收稿日期:2021-12-30;修回日期:2022-08-23

基金项目:中国科学院 青海省人民政府 三江源国家公园联合研究专项(LHZX-2020-08);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z093);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK020615)

作者简介:赵彤(1993—),女,助理工程师,主要从事生态气象服务与应用研究。E-mail: taytaycma@163.com

通信作者:周秉荣(1974—),男,正高级工程师,主要从事高寒生态气象与农业气候资源区划方面的研究。E-mail: zbr0515@foxmail.com

研制的中国区域高分辨率地表气象驱动数据集 (CMFD) 和全球大气和陆面再分析资料及产品 (CRA) 应运而生, 填补了国内自主研发区域性高精度数据集的空白^[20]。CMFD 是我国开发的一套高时空分辨率的近地面气象要素再分析数据集, 目前该数据集的数据精度在长江中上游和黑河流域气温降水^[21-22]、青藏高原地区湖泊表面温度^[23]以及拉萨地区水文模型^[24-25]等研究应用方面都得到了一定的验证。CRA 是中国气象局于 2013 年底启动的我国第一代全球大气再分析资料产品, 与国外再分析资料相比, CRA 进一步加强了常规观测数据和风云卫星资料的同化应用, 对于中国地区的气象研究有重大的价值^[26]。针对 CRA 数据精度研究方面的文献并不多见, 且主要集中在云量和湿度^[27-28]。MERRA-2 是由美国宇航局全球模拟和同化办公室 (GMAO) 制作的最新大气再分析资料, 相较于 MERRA, MERRA-2 减少了部分与观测系统变化有关的伪趋势, 且多用于开展臭氧以及气溶胶方面的检验与研究, 针对基础气象要素的检验研究较少^[29-30]。

目前再分析资料在青藏高原的应用及评估并不完善, 部分文献^[31-32]虽然对气温降水的数据质量进行了一定研究, 但验证数据多使用国家站气象资料, 数据集制备过程中包含了国家站气象数据的 CRA 和 CMFD, 可能会影响检验结果准确性。鉴于此, 本研究基于青藏高原 61 个区域级气象站 2016 年 12 月—2017 年 11 月的气温降水地面观测数据, 对 CMFD、CRA 和 MERRA-2 的年、季、月以及日气温降水数据进行精度对比, 评估 3 套数据在青藏高原的适用性, 为青藏高原地区进一步开展精细化生态环境监测和气候资源利用等工作提供科技支撑。

1 研究区概况

青藏高原被称为世界第三极, 地处亚洲内陆, 南起喜马拉雅山脉南缘, 北至昆仑山、阿尔金山和祁连山北缘, 西部为帕米尔高原和喀喇昆仑山脉, 东及东北部与秦岭山脉西段和黄土高原相接, 介于 26°00′~39°47′N, 73°19′~104°47′E, 区域平均海拔在 4 000 m

以上。年平均气温为 -6~20 ℃。青藏高原地区属于高原山地气候, 降水量较少, 平均年降水量为 400 mm 左右, 高原南部受印度洋暖湿气流的影响, 降水量在 1 000 mm 以上, 而高原腹地、西部和北部由于地处内陆降水量较少, 部分地区不足 100 mm^[33]。

2 数据来源与处理

2.1 数据资料简介

2.1.1 再分析资料

选取的再分析数据资料包括: 中国区域地面气象要素数据集 (CMFD)、全球大气和陆面再分析资料 (CRA) 以及 MERRA-2 (The Second Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) 2016 年 12 月—2017 年 11 月的气温、降水要素。3 种数据集基本信息见表 1。

(1) CMFD 数据集是以国际上现有的 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料以及 TRMM 降水资料为背景场, 融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成的^[19-20]。时间分辨率为逐 3 h, 水平空间分辨率为 0.1°, 是一种包括近地面气温、近地面气压、近地面空气比湿、近地面全风速、地面向下短波辐射、地面向下长波辐射、地面降水率共 7 个要素在内的再分析资料^[20, 34]。

(2) CRA 数据集是由国家气象信息中心牵头, 多部门、多单位参与协同创新, 集合同化算法、多源融合方法、Noah 3.3 陆面模式及地表参数优化等核心技术研制的全球大气再分析产品。数据时间分辨率为逐 3 h, 空间分辨率 34 km, 主要包括两类数据集: 大气驱动融合产品 (2 m 气温、2 m 比湿、10 m U 风、10 m V 风、降水) 和陆面产品 (含地表温度、土壤温度、土壤湿度、通量、积雪等在内的约 30 个陆面要素)。

(3) MERRA-2 数据集是由美国航空航天局 (NASA) 全球建模与同化办公室 (GMAO), 在原来的 MERRA 再分析资料的基础上, 使用升级版的戈达德地球观测系统模式 (GEOS-5) 进行同化, 并于 2016 年发布的新一代大气再分析数据。MERRA-2

表 1 再分析数据集基本信息

数据集名称	时间范围	空间分辨率	变量	数据来源
CMFD	1979—2018 年	0.1°	2 m 气温、降水率、风速、气压、比湿、地表向下短波辐射、地表向下长波辐射	国家青藏高原科学数据中心
CRA	1979 年至今	34 km	2 m 气温、2 m 比湿、10 m U 风、10 m V 风、降水	中国气象局
MERRA-2	1980 年至今	0.5°×0.625°	2 m 气温、净辐射、相对湿度、风速、降水	EARTHDATA

数据包括有气温、降水、辐射等 21 类产品,时间跨度是 1980 年至今,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$ [35]。

2.1.2 站点观测资料

由于 CMFD 数据集制备时融合了中国气象局常规气象观测数据(国家级气象站),若观测资料仍使用国家站数据,在开展数据精度分析时则可能影响检验结果准确性,导致数据适用性评价产生偏差。受自然环境恶劣及地广人稀影响,青藏高原区域站建站时间集中在 2015 年以后,数据时间序列较短,且部分站点仅有气温或降水单一要素,为了保证数据质量评价的精度和客观性,选择国家气象信息中心经过数据质控后质量较好的青藏高原 61 个区域自动气象站 2016 年 12 月—2017 年 11 月的气温降水数据(OBS)进行观测对比检验。

2.1.3 其他数据资料

DEM 数据来自地理空间数据云网站(<http://www.gsccloud.cn>),空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。青藏高原地区的边界矢量文件来源于国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.data.ac.cn>)。

2.2 研究方法

2.2.1 数据处理方法

站点数据选择时间序列相对完整、数据质量较好的气温降水双要素的 61 个区域自动气象观测站点 2016 年 12 月—2017 年 11 月的小时观测数据,将所有气温、降水小时尺度数据合成为日平均气温以及日降水量。月、季节、年站点数据由日数据合成得到。

为了分析和检验再分析数据与观测数据的差异,将格点值内插到站点进行精度评价。气温采用双线性插值,降水则使用最邻近插值,最终得到青藏高原地区 61 个站点 3 套再分析资料的气温降水资料。

另外,根据不同月份划分季节,将月数据叠加计算得到季节数据,即:冬季为 12 月—次年 2 月;春季为 3—5 月;夏季为 6—8 月;秋季为 9—11 月。全年平均气温是 1—12 月月平均气温的平均,全年降水量是 1—12 月月降水量的累积。

2.2.2 站点数据插值方法

克里金插值方法[36-37]是根据空间上分布的样点数据,在考虑样点的形状、大小、空间关系和变异函数结构信息的基础上,对空间上其他未观测位置的数据进行估计的方法,该方法可以很好地反映变量的空间结构性,且对估计值的偏差较小,因此本研究选用克里金插值方法对青藏高原气温降水数据进行插值,公式如下:

$$t = \sum_{i=1}^n \lambda_i t(x_i) \quad (1)$$

式中: t 为待估计值, λ_i 为权重系数, n 为待插值站点数的栅格数, $t(x_i)$ 为站点观测值。

2.2.3 数据精度评估方法

本研究采用的精度评价指标有相关系数 R 、均方根误差 R_{MSE} (在泰勒图中表示为 $RMSD$)、偏差 B_{IAS} 以及标准偏差 S_D ,具体计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

$$B_{\text{IAS}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\% \quad (4)$$

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: x 为再分析资料气温/降水, $\bar{x}$ 为再分析资料气温/降水的平均值, y 为第 i 个点的地面实测气温/降水, $\bar{y}$ 为第 i 个点的地面实测气温/降水的平均值, $i=1 \cdots n$,表示样本点的个数,即气象观测站点数。

3 结果分析

3.1 年气温降水精度评估

3.1.1 年平均气温精度评估

将再分析资料与插值后的实测站点数据进行叠置运算,得到观测数据与 3 套再分析资料的年平均气温差值空间分布结果。由图 1 可知,空间分辨率最低的 MERRA-2 差值最小,这可能是因为低分辨率在空间描述上模糊了信息而降低了误差,分辨率较高的 CMFD 和 CRA 则分别在高原西北部和中西部误差较大,3 套数据在站点较为密集的高原西南部及东部误差较小。从再分析资料与对应站点观测值的散点图(图 2a)可以看出,3 套数据均有一定的低估,其中 CMFD 的拟合精度最高,CRA 以及 MERRA-2 精度依次降低。3 套再分析资料的年尺度气温数据均通过 0.01 的显著性检验,但相关性和精度存在差距,其中 CMFD 相关性最强、误差最小($R=0.76, R_{\text{MSE}}=2.91^{\circ}\text{C}$),MERRA-2 次之($R=0.66, R_{\text{MSE}}=3.49^{\circ}\text{C}$),CRA 最差($R=0.52, R_{\text{MSE}}=3.84^{\circ}\text{C}$)(图 2b)。将 61 个站点年平均气温观测值与相对应经纬度的

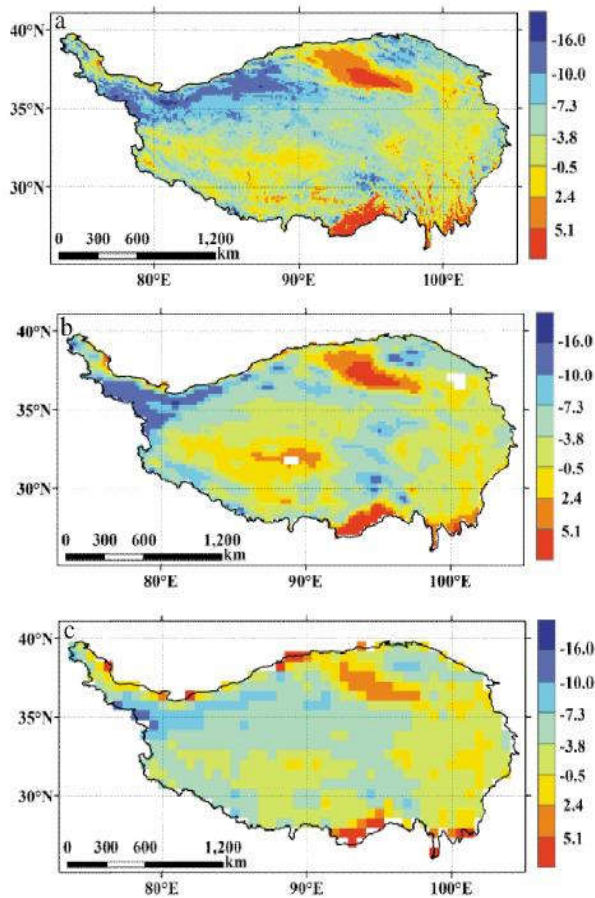


图1 再分析资料与实测值年平均气温差值分布
(a为CMFD,b为CRA,c为MERRA-2)

再分析资料进行相关分析,发现3套数据年平均气温时间相关系数 R 在0.6以上的站点占比均在80%以上,且约70%站点的 R_{MSE} 均低于4℃(表2)。

3.1.2 年降水精度评估

从观测数据以及3套再分析资料的年降水量差值结果来看(图3),3套资料在不同区域差值各异,相比之下CMFD和CRA整体差值较小,误差主要集中在高原东南部,存在一定的高估。MERRA-2在空间上大范围低估了年降水,尤其是在高原中部,部

表2 61个区域站年平均气温分级相关系数及均方根误差占比结果

数据集名称	R			R_{MSE}		
	< 0.4	0.4~0.6	> 0.6	1~2℃	2~4℃	> 4℃
CMFD	0.9%	4.1%	95.0%	66.7%	15.0%	18.3%
CRA	1.3%	12.7%	86.0%	42.6%	31.1%	26.3%
MERRA-2	6.1%	4.5%	89.4%	45.9%	23.0%	31.1%

分地区低估达到150 mm以上。就站点与3套数据年降水量的离散程度进一步分析(图4),3套再分析资料的年降水量较观测值均在不同程度上有所低估,CRA的精度最高,其次是CMFD,MERRA-2最差。CMFD及CRA精度较高,相关系数分别为0.6和0.67,且两者 R_{MSE} 较低,MERRA-2在年降水精度的表现上较差。将61个站点年降水观测值与对应经纬度的再分析资料进行相关分析,结果表明CMFD和CRA的时间相关系数 R 主要集中在0.4~0.6,MERRA-2则有46%的站点 $R<0.4$,各站相关系数整体偏低;受年降水量数量级较大影响,3套数据年降水量 $R_{MSE}>100$ mm的站点占比均超过50%以上,其中青藏高原中东部地区的欧拉秀玛站 R_{MSE} 最大(表3)。

3.2 季节气温降水精度评估

3.2.1 季节平均气温精度评估

通过计算3套数据集与观测资料的相关系数以

表3 61个区域站年降水量分级相关系数及均方根误差占比结果

数据集名称	R			R_{MSE}		
	< 0.4	0.4~0.6	> 0.6	0~50 mm	50~100 mm	> 100 mm
CMFD	29.0%	50.6%	20.4%	23.0%	23.1%	53.3%
CRA	21.2%	57.0%	21.8%	33.1%	16.4%	50.5%
MERRA-2	46.0%	38.4%	15.6%	8.2%	27.9%	63.9%

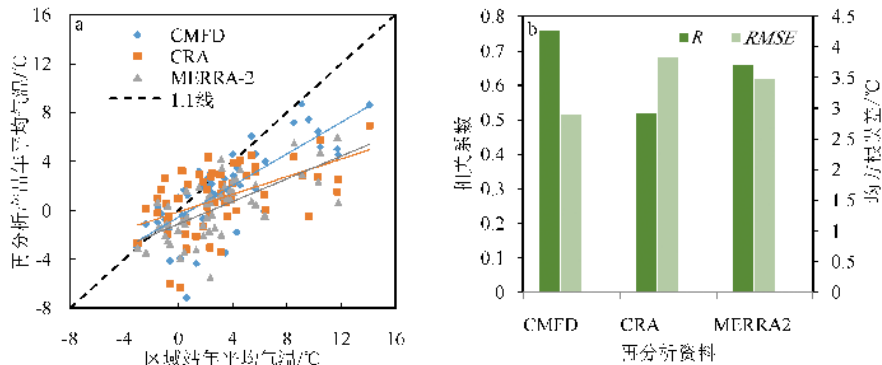


图2 再分析资料与观测值的散点图(a)、相关系数与均方根误差(b)

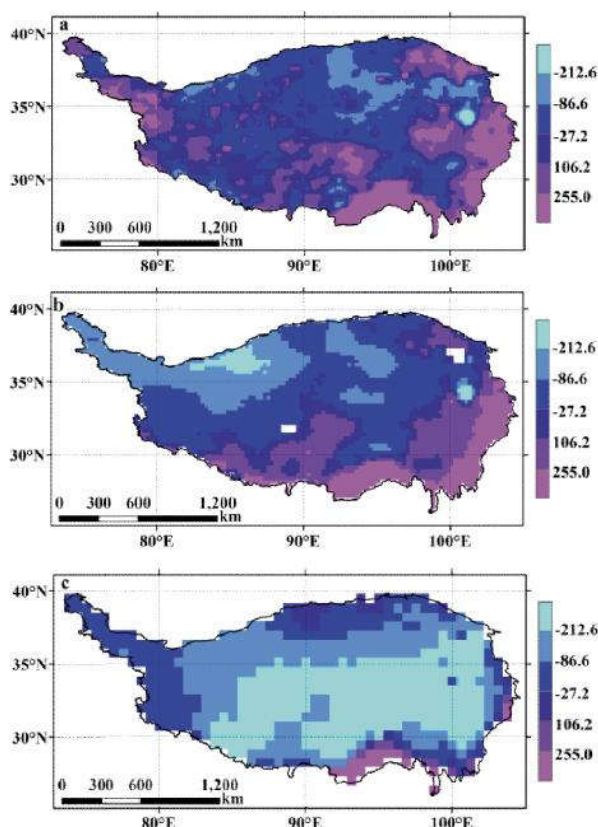


图3 再分析资料与实测值年降水量差值分布
(a为CMFD;b为CRA;c为MERRA-2)

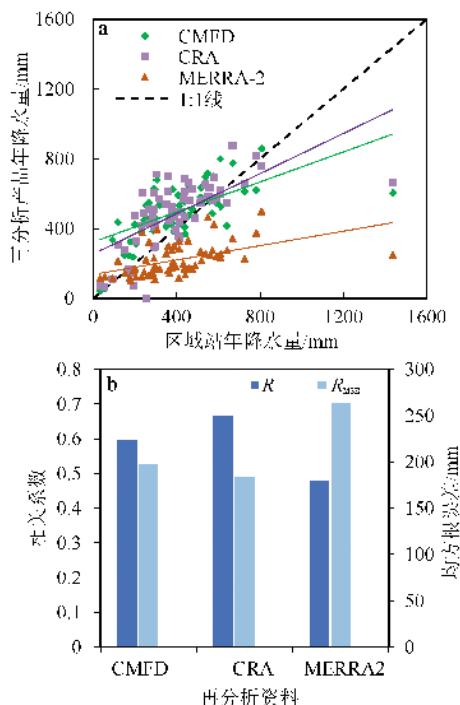


图4 再分析资料与观测数据的散点图(a)、再分析资料与观测值的偏差以及标准偏差(b)

及标准偏差,对季节尺度上的精度进行评价。为了更好的反映数据集与实测数据之间的匹配程度与密切

程度,利用泰勒图^[38]绘制了3套数据集与观测数据之间的相关性与误差(图5),图中3种不同的要素点代表了不同的数据集,辐射线代表 R ,横纵轴代表 SD ,绿色虚线代表 R_{MSE} ,距离观测值越接近的点,说明该产品精度越高。从季节气温整体检验结果来看,4个季节的平均气温与站点观测值的相关系数均 >0.5 ,且全部通过0.01的显著性检验,有较好的准确性和稳定度。其中春季CMFD与观测数据的季节平均气温最为接近($R=0.79, R_{MSE}=2.30^{\circ}\text{C}, SD=3.19^{\circ}\text{C}$);夏季、秋季、冬季整体上CMFD和MERRA-2与观测值的 R 和 R_{MSE} 接近,季节平均气温表现效果均较好, R 约为0.7, R_{MSE} 在 $2.30\sim 2.89^{\circ}\text{C}$,两者相比,CMFD离散程度略大;整体上,不同季节3套数据的整体精度排序依次为:夏季 $>$ 秋季 $>$ 春季 $>$ 冬季。

3.2.2 季节降水量精度评估

由于青藏高原雨热同期,降水时段基本集中在5—9月的汛期,因此3套数据集和观测数据在不同季节之间差距较大。在降水较为集中的夏季和秋季,CRA与观测数据的相关性最高误差最小(夏季 $R=0.72, R_{MSE}=88.68\text{ mm}$;秋季 $R=0.81, R_{MSE}=36.79\text{ mm}$),CMFD次之,MERRA-2最差;在降水较少的春季和冬季,CMFD表现最好,CRA和MERRA-2在相关性和精度上均存在较大误差(图6)。

3.3 月气温降水精度评估

由于不同评价指标往往具有不同的量纲和量纲单位,为了消除指标之间的量纲影响,将3个检验指标体现在同一幅图上,对数据进行归一化处理,以解决数据指标之间的可比性。归一化方法计算公式如下:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

式中: x 为样本数据, x' 为归一化后的样本数据, $x_{\min}$ 为样本数据中的最小值, $x_{\max}$ 为样本数据中的最大值。

3.3.1 月平均气温精度评估

将观测数据与再分析资料1—12月的3个精度评价指标结果归一化到 $[0, 1]$,并绘制在雷达图上。CMFD的相关性最好,各月相关系数均在0.7以上,相比于其他两套数据,CMFD与观测值之间的一致性更好,CRA相关系数均低于0.6,在月尺度上总体表现较差。CRA和MERRA-2在4—11月相对误差较小,在11月—翌年3月存在较大的误差,CMFD在各月的相关系数较高误差较小,这是由于CMFD

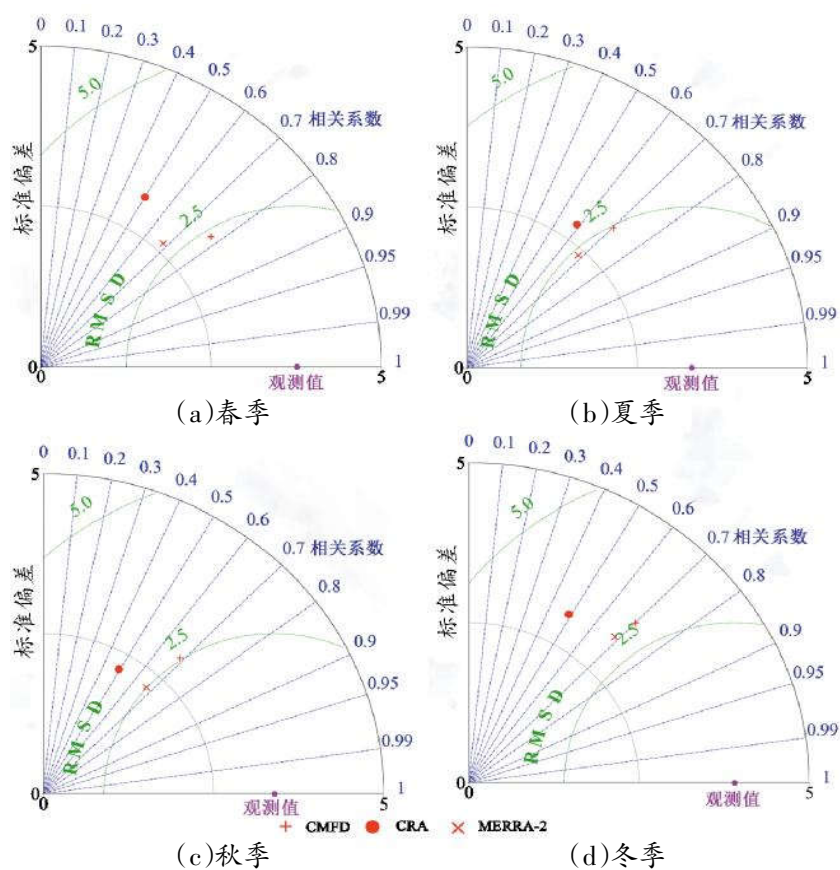


图5 不同再分析气温季节资料与观测数据的泰勒图

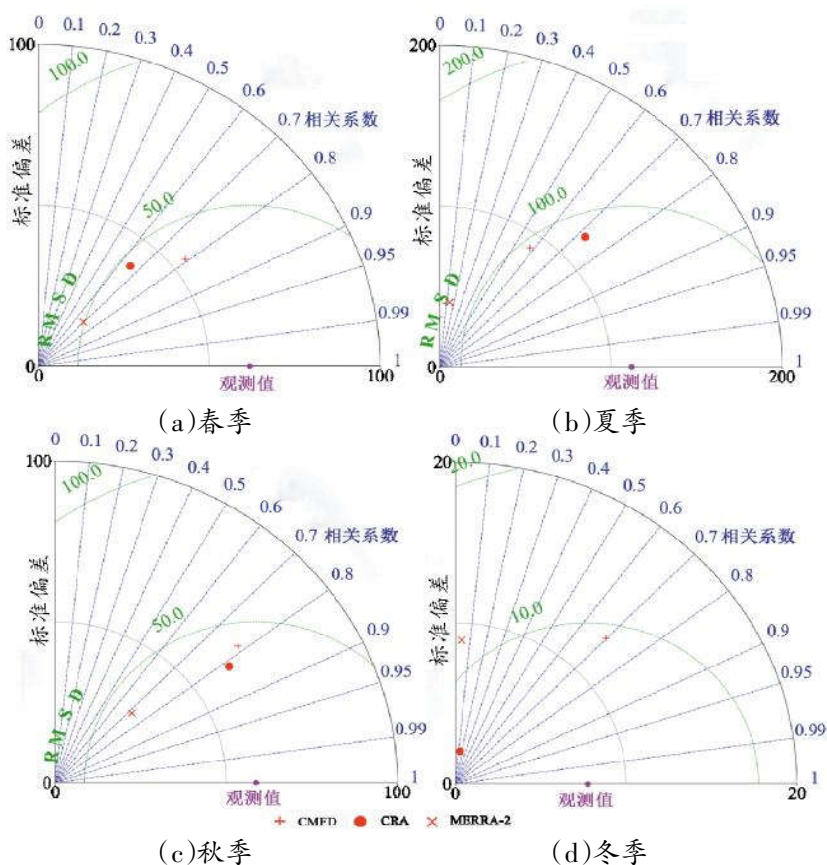


图6 不同再分析降水资料与观测数据的泰勒图

数据在制备过程中引入了大量地面观测资料,能更好地反映地面站气温数据。图7为61个区域站各月再分析资料平均气温与站点观测值相关分析结果,其中50%~70%的站点再分析资料与观测值的 R 值均在0.5~0.8, $R > 0.8$ 的占比最大月份CMFD在7月,CRA在12月,MERRA-2是1月,虽然CRA与MERRA-2相关系数最大值集中在气温较低的月份,但由精度指标结果可知,两者在12、1月拟合结果与观测值波动相似,误差偏大。

3.3.2 月降水量精度评估

由月降水观测资料与再分析资料的精度分析可知,相较于月气温,3套再分析降水资料与观测值之间的一致性较差。其中,CMFD在1—12月相关系数均通过0.01的显著性检验,且拟合结果维持在较高水平,数据准确性较高;CRA在降水较多的6—9月与观测值的月降水相关性很高,误差整体上略小于CMFD,但在降水偏少的月份,相关性较差,误差偏高;MERRA-2的归一化BIAS和 R_{MSE} 在个别月份表现较好,但是其对月降水量的相关性较差,低分辨率数据导致精细化数据表达的困难,使得MERRA-2的月降水拟合精度结果整体准确性偏低。从占比情况来看(图8),站点数据与3套资料之间的 R 总体偏低,各月60%以上的站点 R 低于0.5,其中,降水偏少的11、12、1、2月的 R 显著偏低。

3.4 日气温降水精度评估

3.4.1 日平均气温精度评估

从3套数据与61个区域站观测值日平均气温 R 以及 R_{MSE} 占比的情况可以看出(表4),CMFD和CRA超过90%的站点 R 均在0.8以上,MERRA-2相较于2套数据相关性略偏差。CMFD以及MERRA-2日平均气温与观测值的 R 最高的站点均出现在研究区中部的称多珍秦镇站($R=0.94$);CRA的 R 最高值站点为嘎美乡站($R=0.91$),3套数据相关性最高的站点集中在青藏高原中部。另外,从 R_{MSE} 的占比情况来看,3套数据的 R_{MSE} 均较小,其中,中部平原地区误差较小,站点的 R_{MSE} 在0~2℃,误差较大的站点主要分布于高原的北部以及东南部。

表4 61个区域站日平均气温分级相关系数及均方根误差占比结果

数据集 名称	R			R_{MSE}		
	<0.5	0.5~0.8	>0.8	0~2℃	2~4℃	>4℃
CMFD	0.7%	2.0%	97.3%	83.0%	17.0%	0.0%
CRA	1.6%	7.8%	90.6%	86.9%	13.1%	0.0%
MERRA-2	3.9%	27.0%	69.1%	75.7%	22.9%	1.4%

3.4.2 日降水量精度评估

日降水量相关性分析及误差检验结果显示(表5),CMFD与CRA 50%以上站点的 R 在0.5~0.8,MERRA-2日降水量相关性相对较差,有27个站点

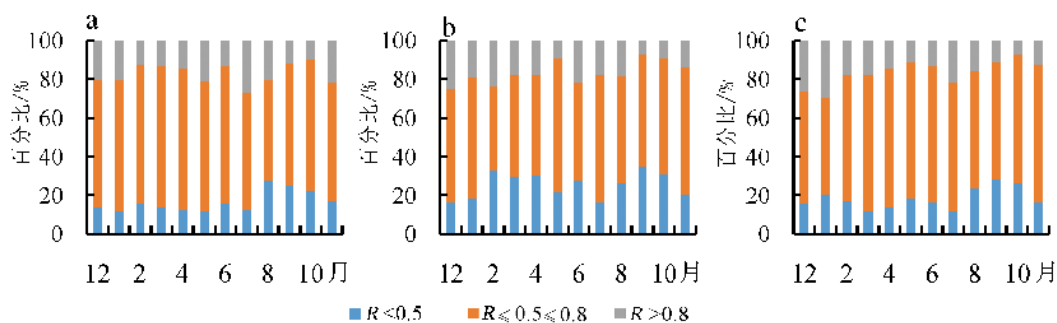


图7 61个区域站月平均气温分级相关系数占比结果
(a、b、c 分别 CMFD、CRA、MERRA-2 数据)

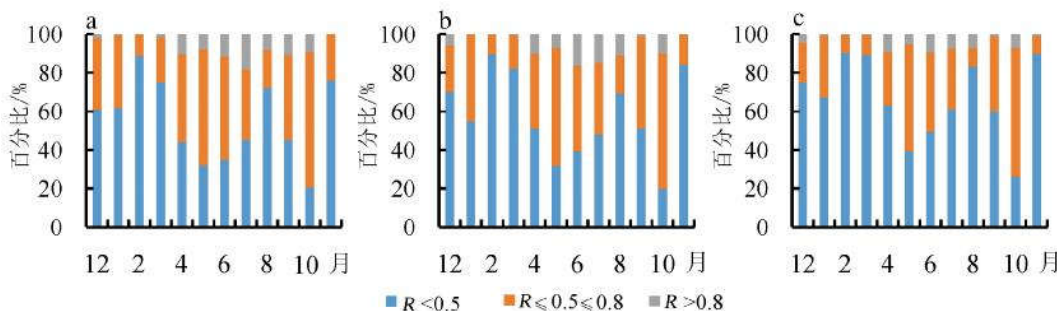


图8 61个区域站月降水量分级相关系数占比结果

的 $R < 0.5$, 占 61 个站点数的 44%。另外, CMFD 与观测值的 R_{MSE} 在 20~40 mm 的站点有 27 个, R_{MSE} 最小的站点为德令哈柯鲁柯镇茶汗沙林管站 ($R_{MSE} = 2.7$ mm); CRA 的整体情况与 CMFD 相似, 25 个站点的 R_{MSE} 在 20~40 mm, 但仍有 13 个站点的 $R_{MSE} > 40$ mm, 其中 R_{MSE} 最大的站点位于高原东南部的排龙站, 为 54.5 mm; MERRA-2 的日降水整体表现为 3 套数据最差, $R_{MSE} > 40$ mm 的站点占有所有站点的 36.8%, 与观测值的误差最大。综合来看, 3 套数据 R_{MSE} 偏大的站点主要集中在高原南部降水较多的地区, R_{MSE} 偏小的站点集中在柴达木盆地及周边站点。

表 5 61 个区域站日降水量分级相关系数及均方根误差占比结果

数据集名称	R			R_{MSE}		
	<0.5mm	0.5~0.8mm	>0.8mm	0~20mm	20~40mm	>40mm
CMFD	23.3%	50.0%	26.7%	30.0%	40.0%	30.0%
CRA	24.1%	51.0%	24.9%	37.2%	41.0%	21.8%
MERRA-2	44.0%	37.0%	19.0%	29.0%	34.2%	36.8%

4 结论与讨论

青藏高原地区生态环境本底敏感而脆弱, 受全球气候变化影响较大。本文基于青藏高原地区地面自动观测站实测数据, 对 CMFD、CRA、MERRA-2 中的气温、降水要素进行了日、月、季以及年数据的适用性评价, 得到如下结论:

(1) CMFD 相较于其他两套资料与实测年平均气温之间有较好的相关性, 整体拟合精度最高, MERRA-2 虽然在空间上与实测数据的偏差最小, 但考虑到 MERRA-2 分辨率较低, 导致数据空间对应性相对较差, 因此检验具有不确定性。CMFD 和 CRA 对年降水的拟合表现出较强的一致性和较高的准确度, MERRA-2 则大范围低估了年降水。

(2) CMFD 对季节平均气温整体拟合结果最好, 不同季节拟合精度从高到低排序依次为: 夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。在降水较为集中的夏季和秋季, CRA 相关性最好、误差最小, CMFD 次之, MERRA-2 最差, 在降水较少的春季和冬季, CMFD 表现最好, CRA 和 MERRA-2 在相关性和精度上均存在较大误差。

(3) 3 套数据在月平均气温较高的月份精度均较高, 其中 CMFD 对月平均气温拟合结果整体上最接近观测值, 且相较其他两套数据对温度较低月份的表达更为准确。整体上, CMFD 对 1—12 月月降水

量拟合结果均维持在较高水平, 其中 CRA 在月降水较多的 6—9 月与观测值的相关性和准确度略优于 CMFD, 但在降水偏低月份拟合精度偏低。

(4) CMFD 和 CRA 拟合的日平均气温与 61 个区域站观测值超过 90% 的站点 R 均在 0.8 以上, 且 CMFD 拟合趋势最接近, MERRA-2 相较于其他两套数据相关性略偏差。3 套数据误差分布较为一致, 误差较小的站点集中在中部平原地区, 误差较大的站点主要集中在青藏高原的北部以及东南部。CMFD 和 CRA 拟合的日降水量与观测值的相关性相对较好, R 在 0.5~0.8 的站点占比超过 50%。 R_{MSE} 偏大的站点主要集中在青藏高原南部降水较多的地区, R_{MSE} 偏小的站点集中在柴达木盆地及周边站点。

CMFD 对气温降水的表现最优, 在不同时间和空间尺度上均能较好地拟合青藏高原站点实测数据, 尤其是在气温较低、降水较少和月数据的细节表现上优于其他两套再分析数据。CRA 对夏季较大量级降水拟合结果最好, 研究结果对于开展青藏高原生态和气候研究时再分析资料的选择具有一定指导意义和参考价值。研究区选择在青藏高原地区, 区域自然环境恶劣, 区域站稀疏且建站时间较晚, 部分站点仅有气温或降水单要素, 为了保证数据检验的精度, 本研究所选数据时间序列较短, 后期将对站点数据进行时间序列扩充, 进一步提高检验精度。在站点数据空间插值方面, 本研究选用了克里金插值方法, 该方法对区域估计的精度较高, 但不同气象要素特征表现仍存在一定的估计误差, 可考虑针对不同气象要素进行详细的插值方法精度比较, 以期优化插值结果。

参考文献:

- [1] HUANG Jianping, YU Haipeng, GUAN Guoyin, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166–171.
- [2] KANG Litai, HUANG Jianping, CHEN Siyu, et al. Long-term trends of dust events over Tibetan plateau during 1961–2010 [J]. Atmospheric Environment, 2016, 125: 188–198.
- [3] TANG Qihong, OKI T, KANAE S, et al. Hydrological cycles change in the Yellow River basin during the last half of the 20th century[J]. Journal of Climate, 2008, 21(8): 1790–1806.
- [4] 罗继, 张莉, 曲良璐, 等. DOGRAFS 模式气温、降水预报产品在阿克苏地区的初步应用与检验[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 4.
- [5] 王秋香, 周昊楠, 陈晓燕. 单站资料均一性对本地气候资

- 料趋势结果的影响[J].沙漠与绿洲气象,2010,4(4):1-5.
- [6] 尹姗,马杰,张恒德,等.ECMWF模式的延伸期日最高气温预报偏差估计及订正分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(6):77-84.
- [7] WILLMOTT C J, ROBESON S M, FEDDEMA J J. Influence of spatially variable instrument networks on climatic averages[J]. *Geophysical Research Letter*, 1991, 18(12): 2249-2251.
- [8] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437-472.
- [9] KOBAYASHI S, OTA Y, HARADA Y, et al. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 2015, 93(1): 5-48.
- [10] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [11] UPPALA S M, DEE D P, KOBAYASHI S, et al. Towards a climate data assimilation system: Status update of ERA-Interim[J]. *ECMWF Newsletter*, 2008, 115: 12-18.
- [12] VOROPAY N, RYAZANOVA A, DYUKAREV E. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 254: 105528.
- [13] LUO Bingkun, PETER J M, MALGORZATA S, et al. Accuracy Assessment of MERRA-2 and ERA-Interim Sea Surface Temperature, Air Temperature, and Humidity Profiles over the Atlantic Ocean Using AEROSSE Measurements[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(16): 6889-6909.
- [14] 程胡华, 闻斌, 王益柏, 等. NCEP/NCAR FNL 资料在强对流天气中可信度的初步分析[J]. *气象与环境科学*, 2018, 41(3): 1-10.
- [15] 王同美, 吴国雄, 应明. NCEP/NCAR (I、II) 和 ERA40 再分析加热资料比较[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(5): 128-134.
- [16] WANG Lei, BAO Qing, LI Jinxiao, et al. Comparisons of the temperature and humidity profiles of reanalysis products with shipboard GPS sounding measurements obtained during the 2018 Eastern Indian Ocean Open Cruise[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2019, 12(3): 177-183.
- [17] 崔洋, 常倬林, 余莲, 等. 青藏高原春季地表非绝热加热异常对东亚夏季风强度的影响[J]. *干旱气象*, 2017, 35(1): 1-11.
- [18] SHU Chen, THIAN Y G, TAN Xuezhi, et al. Assessment of CFSR, ERA-Interim, JRA-55, MERRA-2, NCEP-2 reanalysis data for drought analysis over China[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(1-2): 737-757.
- [19] 刘丽伟, 魏栋, 王小巍, 等. 多种土壤湿度资料在中国地区的对比分析[J]. *干旱气象*, 2019, 37(1): 40-47.
- [20] HE Jie, YANG Kun, TANG Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific data*, 2020, 7(1): 25.
- [21] 王留杰, 张行南, 方园皓, 等. 中国区域地面气象要素数据集在长江上游流域的适用性评估[J]. *水力发电*, 2017, 43(3): 18-22.
- [22] 赵静学, 郭枝虾, 和鑫磊, 等. 黑河流域气温和降水再分析数据的不确定性评估[J]. *干旱气象*, 2019, 37(4): 529-539.
- [23] 张群慧. 湖泊模型的发展及青藏高原湖泊热力过程数值模拟和预测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [24] 谭秋阳, 徐宗学, 赵彦军, 等. CMFD 数据集在雅江年楚河流域的适用性分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(3): 372-379.
- [25] 郭禹含, 王中根, 伍玉良. 多源再分析降水数据在拉萨河流域应用对比研究[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1033-1039.
- [26] 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(2): 138-144.
- [27] YAO Bing, TENG Shiwen, LAI Ruize, et al. Can atmospheric reanalyses (CRA and ERA5) represent cloud spatiotemporal characteristics [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 244, 105091.
- [28] LIAO Jie, WANG Huiying, ZHOU Zijiang, et al. Integration, quality assurance, and usage of global aircraft observations in CRA[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 1-16.
- [29] GELARO, RONALD, Mc CARTY, et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017.
- [30] MAKAMA E K, LIM H S. Inter-annual and seasonal patterns of precipitable water vapour over Malaysia from 1990-2019 based on MERRA-2 reanalysis[J]. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 208-218.
- [31] YANG Jiaxi, HUANG Mengtian, ZHAI Panmao. Performance of the CRA-40/Land, CMFD, and ERA-Interim Datasets in reflecting changes in surface air temperature over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(4): 663-672.
- [32] 除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. MERRA 再分析地面气温产品在青藏高原的适用性分析[J]. *高原气象*, 2016, 35(2):

- 337–350.
- [33] 韩熠哲,马伟强,王炳赞,等.青藏高原近 30 年降水变化特征分析[J].高原气象,2017,36(6):1477–1486.
- [34] YANG Kun, HE Jie, TANG Wenjun, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38–46.
- [35] 庞舒婷. 基于 MERRA-2 再分析和 AERONET 地基遥感的中国地区气溶胶光学特性[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [36] 史建国, 严昌荣, 何文清, 等. 黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(6): 773–778.
- [37] 陆志华, 夏自强, 于岚岚, 等. 1958—2009 年松花江流域降水时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 990–1000.
- [38] TAYLOR, KARL E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2001, 106 (D7): 7183–7192.

Applicability Evaluation for Three Reanalysis Datasets of Temperature and Precipitation over the Tibetan Plateau

ZHAO Tong^{1,2}, ZHAO Mengfan^{1,2}, ZHOU Bingrong^{1,2}, SHEN Yanling^{1,2}, WANG Han³

(1. Qinghai Academy of Meteorological Sciences, Xining 810001, China;

2. Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai, Xining 810001, China;

3. Shandong Climate Center, Ji'nan 250031, China)

Abstract Based on the surface observation data of air temperature and precipitation from 61 regional meteorological stations on the Qinghai–Tibet Plateau, the accuracy of CMFD, CRA and MERRA–2 data sets was compared and analyzed, and the accuracy and applicability of the three data sets were evaluated. The results showed that: (1) *RMSE* of 70% of the three sets of annual mean temperature data was less than 4 °C and less than 2 °C in 2/3 of the stations, and the CMFD data had the highest fitting accuracy. CMFD and CRA showed higher fitting accuracy for annual precipitation, while MERRA–2 underestimated annual precipitation in the central plateau. (2) CMFD performed best in seasonal mean temperature fitting, especially in summer and autumn with higher temperature. In summer and autumn with more concentrated precipitation, the fitting results of CRA were the closest to the observed value, while the fitting results of CMFD were the best in spring and winter with less precipitation. (3) The fitting result of CMFD for monthly mean temperature was the closest to the observed value; CMFD performed better for the months with less precipitation, while CRA performed better for months with more precipitation. (4) The accuracy evaluation of daily scale mean temperature and precipitation data of 61 regional stations revealed that CMFD and CRA performed best, and the CMFD showed better fitting trend consistency.

Key words temperature; precipitation; Tibetan Plateau; reanalysis data; precision evaluation