

邓明仔,何清,阿力木·阿巴斯,等.巴基斯坦近 40 a 气温时空变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(2):59-69.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.02.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



巴基斯坦近 40 a 气温时空变化特征

邓明仔^{1,2},何清^{2*},阿力木·阿巴斯^{2,3},金莉莉²

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院,新疆 乌鲁木齐 830054;2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002;3.新疆大学资源与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要:基于巴基斯坦不同气候区 4 个代表站(卡拉奇、雅各布阿巴德、奎达、德罗什)1979—2018 年地面观测资料和 ERA-Interim 气温资料,利用一元线性回归、Mann-Kendall 突变检验和 Morlet 小波分析,分析其气温时空变化特征。结果表明:(1)巴基斯坦过去 40 a 经历了先降温后增温的过程,除北部山区年平均气温增温趋势显著,四季总体都有增温,春秋两季增温趋势显著。巴基斯坦于 1998 年左右发生气温突变,年平均气温存在 4~5、12、20~22 和 32 a 的周期。(2)ERA-Interim 再分析资料与地面观测数据拟合分析显示两者相关性达到极显著水平,除北部山区外,在大部分区域误差较小,能够较好地反映巴基斯坦气温的变化特征。(3)巴基斯坦年、季平均气温空间分布地带性明显,高温区位于南部印度河平原、三角洲地区,低温区分布在北部山区,年、春季、秋季平均气温变化在空间上总体均呈现明显增长趋势。

关键词:巴基斯坦;气温;ERA-Interim 再分析资料;时空变化特征

中图分类号:P468.021

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)02-0059-11

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第五次评估报告中指出,1880—2012 年全球地表平均气温约上升了 0.85 °C,近 30 a 中的每个 10 a 均比 1850 年以来的任何一个 10 a 都暖^[1]。全球变暖的背景下,巴基斯坦过去百年有明显变暖迹象,温度的上升速率达 0.06 °C/10 a^[2-4]。巴基斯坦主要为干旱气候,并处于快速升温地区,对全球变暖的响应更敏感,是全球受气候变化影响最严重的国家之一^[5-6]。研究表明,近年来巴基斯坦极端高温事件发生频率不断增加^[7],干旱加剧^[8-9],对巴基斯坦经济和社会的可持续发展产生了巨大威胁^[10]。对于巴基斯坦的气温变化已有大量研究,但多集中于巴基斯坦的部分

区域^[11-15],对于巴基斯坦全国范围的气温变化亟需开展更为详细的研究。

通常情况下,气温研究依赖于地面气象站点,但其不足之处在于观测站点的分布不均匀,尤其是在高海拔地区,易造成数据的缺测漏测。插值方式由于具有较大的不确定性,易产生误差,于是具有高时空分辨率的再分析资料成为全球地面观测资料的替代品备受欢迎^[16-17]。再分析资料通过资料同化技术同化了数值天气预报、地面观测数据以及卫星遥感资料,虽然与地面站点观测值之间有一定的误差,但对于大区域气温的研究影响不大。Simmons 等^[18]将全球尺度的观测数据与再分析数据进行对比发现,在欧洲与亚洲 2 个区域,两者的相关系数高达 0.997,因此在许多研究中再分析数据可作为真实观测数据运用^[19-20]。ERA-Interim 是 ECMWF 模型经过改进所模拟出的产品,提供自 1979 年以来的再分析资料,并实时更新,在空间分辨率、误差校正、四维变分法等方面也有了很大的提升,在全球不同的区域都能很好地匹配观测数据^[21-25]。学者将 NCEP-

收稿日期:2020-10-20;修回日期:2021-02-20

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目——天山—帕米尔区极端天气气候事件与灾害风险(2019QZKK010206)

作者简介:邓明仔(1995—),女,硕士研究生,主要从事沙漠气象研究。E-mail:d19915069629@163.com

通信作者:何清(1965—),男,主要从事沙漠气候、干旱区气候资源等方面的研究。E-mail:qinghe@idm.cn

CFSR、NCEP-NCAR、ERA-Interim 和 ERA-40 这几种数据与观测资料进行比较,发现 ERA-Interim 在均方根误差和偏差方面更优^[25-27]。本文分别在巴基斯坦 4 个不同气候区选取代表站,基于 ERA-Interim 再分析资料和地面观测资料对过去 40 a 巴基斯坦气温时空变化特征进行分析,探讨其影响机理,能够为再分析资料在巴基斯坦的应用提供借鉴实例,也为今后研究巴基斯坦气候变化趋势和气候资源的开发利用提供参考,保障其经济和社会的可持续发展。巴基斯坦与新疆接壤,位于新疆的西南部,对巴基斯坦气温变化特征的分析还有利于深入了解新疆气候,为“一带一路”倡议下中巴走廊建设提供科学保障^[28-29]。

1 研究区概况

巴基斯坦伊斯兰共和国,简称巴基斯坦,地跨 23°35'~37°05'N,60°57'~77°50'E^[30],东邻印度,东北邻中国,西北与阿富汗接壤,西邻伊朗,南濒阿拉伯海。巴基斯坦属热带和亚热带气候,年平均气温达 27℃,降水多集中于北部,年降水量少于 250 mm 的地区超过全国总面积的四分之三。该国地形从南部平原到北部高山不等,境内五分之三为山区和丘陵,主要河流为印度河及其四条主要支流杰卢姆河、奇纳布河、拉维河和萨特勒季河。

气候区的特征是各种气候要素的相似性,最常用来帮助定义气候区的是温度和降水。根据地形等差异所带来的气温和降水变化,巴基斯坦可分为 4 个气候区,即印度河三角洲、印度河平原、西部俾路支高原和北部高山区^[30]。本文选取 4 个分别位于不同气候区的站点(表 1),能够准确反映巴基斯坦的气温变化特征。并将 3—5 月定义为巴基斯坦的春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。

表 1 巴基斯坦气候分区

气候区	代表站	经纬度	海拔高度/m
印度河三角洲	卡拉奇(Karachi)	24°83'N 67°05'E	7
印度河平原	雅各布阿巴德(Jacobabad)	28°30'N 68°47'E	56
西部俾路支高原	奎达(Quetta)	30°25'N 66°94'E	1 600
北部高山区	德罗什(Drosh)	35°57'N 71°78'E	1 465

2 数据与方法

2.1 研究数据

本文所选用的资料:(1)巴基斯坦地面站点气温

观测资料来源于国际气象组织(<https://climatedata-catalogue.wmo.int/assessed-datasets>),包括卡拉奇、雅各布阿巴德、奎达和德罗什站点 1979—2018 年共 40 a 气温逐月数据。该资料缺测错测等异常数据较少,数据质量良好。(2)欧洲中期天气预报中心 1979—2018 年共计 40 a ERA-Interim 气温再分析资料。网格范围为 20°~40°N,60°~80°E,空间分辨率为 0.125°×0.125°。在进行 ERA-Interim 再分析资料与地面观测数据的对比分析时,根据上述 4 个地面站点的经纬度坐标直接选取对应的 ERA-Interim 网格点数据,可避免多网格空间插值带来的误差。

2.2 研究方法

在分析气温时空变化特征之前,对地面站点逐月气象数据进行预处理,包括数据质量的检验,剔除相应时段内缺测、漏测以及异常的数据,对于空缺的数据采用线性插值方法进行插补,保证数据质量。同时为了消除随机误差的影响,对地面观测数据采取 5 a 滑动平均处理。

基于地面观测资料,通过一元线性回归计算 1979—2018 年巴基斯坦不同气候区年、季的气温变化率,以了解其气温的时间变化特征;同时采用 M-K 突变检验和 Morlet 小波分析对不同气候区气温进行突变检测和周期分析。利用线性拟合方法对 ERA-Interim 资料与地面实测数据进行对比验证,评价其在巴基斯坦的适用性,最后采用回归分析对巴基斯坦 40 a ERA-Interim 资料年、季平均气温空间分布及变化格局进行分析讨论^[31-34]。

3 结果与分析

3.1 基于观测资料的气温时间变化特征

3.1.1 年平均气温变化特征

基于地面观测资料分析巴基斯坦不同区域年平均气温变化如图 1。卡拉奇 1979—2018 年年平均气温为 26.8℃,最高气温出现在 2018 年,为 27.9℃,最低气温出现在 1984 年,为 25.6℃。卡拉奇 40 a 年平均气温整体呈现波动上升趋势,气温变化率为 0.409℃/10 a,增温趋势极显著($P<0.001$)。

雅各布阿巴德 1979—2018 年年平均气温为 27.2℃,最高气温出现在 2010 年和 2018 年,均为 28.3℃,最低气温出现在 1997 年,为 26.6℃。雅各布阿巴德 40 a 年平均气温整体呈现波动上升趋势,气温变化率为 0.222℃/10 a,增温趋势显著($P<0.01$)。

奎达 1979—2018 年年平均气温为 17.0℃,最

最高气温出现在 2016 年,为 18.8 °C,最低气温出现在 1986 年,为 15.7 °C。奎达 40 a 年平均气温整体呈现波动上升趋势,气温变化率为 0.52 °C/10 a,增温趋势极显著($P<0.001$)。

德罗什 1979—2018 年年平均气温为 17.8 °C,最高气温出现在 1999 年,为 19.6 °C,最低气温出现在 1989 年,为 16.5 °C。德罗什 40 a 年平均气温整体呈现波动上升趋势,气温变化率为 0.004 °C/10 a,增温趋势不显著($P>0.05$)。

综上,在卡拉奇、雅各布阿巴德、奎达和德罗什 40 a 年平均气温均呈现先降温后增温的整体趋势,卡拉奇和奎达增温趋势显著,其次为雅各布阿巴德、德罗什增温趋势不明显。分析巴基斯坦不同区域年平均气温的线性趋势变化发现,巴基斯坦年平均气温气候变化率达 0.004~0.52 °C/10 a,远高于巴基斯坦过去 100 a 平均增温速率^[2-4],同全球近 50 a 来加速增温趋势一致^[35-36]。

3.1.2 四季气温变化特征

图 2 为巴基斯坦不同区域四季气温变化趋势。卡拉奇春季、夏季、秋季、冬季平均气温分别为 28.6、30.5、27.7、20.5 °C。四季均呈增温趋势,其中冬季增温最多,其次为春季、秋季,夏季增温最少。春季、秋季、冬季增温趋势极显著($P<0.001$),气温变化率分别为 0.455、0.427、0.656 °C/10 a,夏季增温趋势不明显($P>0.05$),气温变化率为 0.097 °C/10 a。

雅各布阿巴德春季、夏季、秋季、冬季平均气温分别为 30.1、35.0、27.2、16.7 °C。四季均呈增温趋势,

其中春季增温最多,其次为秋季、冬季,夏季增温最少。春季气温变化率达到 0.551 °C/10 a($P<0.01$),夏季仅为 0.048 °C/10 a($P>0.05$)。

奎达春季、夏季、秋季、冬季的平均气温分别为 17.6、27.8、16.6、6.2 °C。四季均呈现增温趋势,其中春季增温趋势最显著($P<0.001$),气温变化率为 0.767 °C/10 a,其次是秋季、夏季($P<0.001$),气温变化率分别为 0.597、0.553 °C/10 a,冬季增温趋势不明显($P>0.05$),气温变化率仅为 0.164 °C/10 a。

德罗什春季、夏季、秋季、冬季平均气温分别为 17.2、29.0、18.6、6.2 °C。四季气温变化趋势不明显($P>0.05$),其中春季、冬季均呈增温趋势,气温变化率分别为 0.262、0.065 °C/10 a,夏季、秋季呈降温趋势,气温变化率分别为 0.184、0.125 °C/10 a。

综上所述,巴基斯坦不同区域四季气温变化趋势表明,春季、秋季气候变暖趋势较明显,与 Rio S D 等^[3]研究得出的 3 月和季风季节(7—9 月)是增温趋势幅度最大时期的结论相符。其中春季增温趋势明显,可能与北大西洋涛动(NAO)、厄尔尼诺现象(ENSO)和北海—里海模式(NCP)运动模式的相关性最大。同时,NAO 可能对季风季节某些月份的温度产生影响,尤其是在 8 月,在季节分辨率上,NAO 和 NCP 可以控制季风季节的温度,而在冬季和季风季节后,控制能力减弱^[37]。

3.1.3 气温的 M-K 检验

利用 M-K 突变检验方法对巴基斯坦不同区域 1979—2018 年年平均气温进行突变诊断和分析得

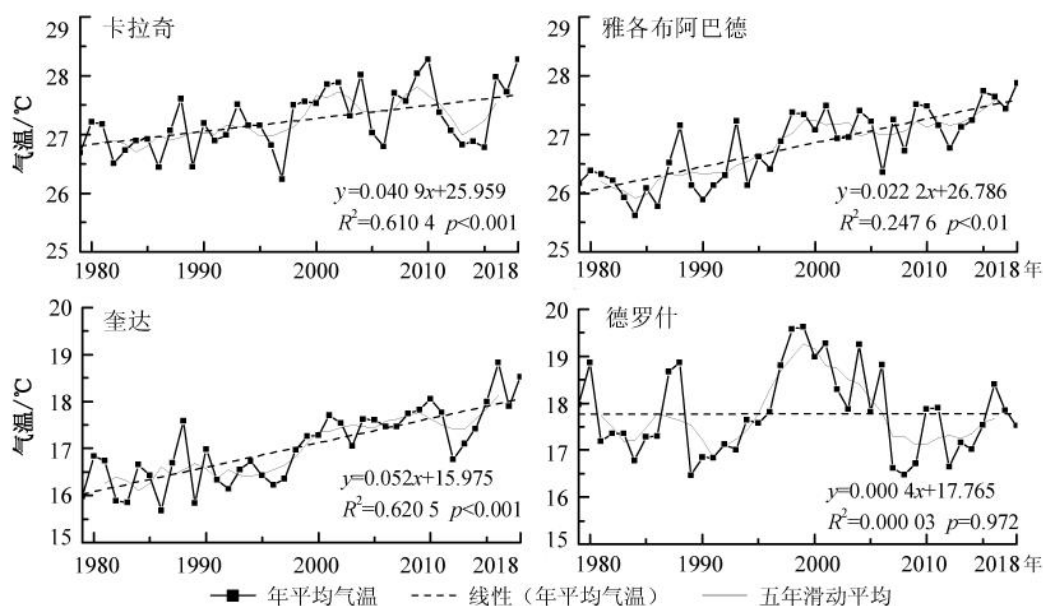


图 1 巴基斯坦 40 a 年平均气温变化趋势

到图3。卡拉奇于1998年发生气温突变,雅各布阿巴德在1998年发生气温突变,奎达在2001年发生气温突变。德罗什年平均气温顺序统计曲线和逆序统计曲线基本都是在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的临界线内,顺序统计曲线和逆序统计曲线有几个交点,分别位于1981、1988、1993、2007、2009、2011和2015年,表示在有交点的年份气温有波动,但其变化趋势不明显,不存在突变现象。

巴基斯坦处于快速升温地区,对全球变暖的响应较敏感,并与全球范围气温的变化趋势较一致。全球气温变化存在着2个气温变暖的阶段,即20世纪20—40年代以及20世纪70年代至今^[38-39],巴基斯坦气温突变发生于1998年左右,正处于全球气温变暖的第二阶段,并且与中亚地区经历的显著增温过

程的时间相符,即20世纪90年代后期和21世纪前期^[40]。虽然气温呈升高趋势是巴基斯坦整体性趋势,但由于纬度、海陆位置不同等原因,不同区域升温的幅度与时间存在区别,造成气温突变发生年份有所差异。北部高山区主要为高海拔的兴都库什山、喀喇昆仑山及喜马拉雅山山区,终年积雪,温度的变化较巴基斯坦其他地区并不明显,未发生气温突变现象^[5,12]。

3.1.4 气温的 Morlet 小波分析

通过观察研究区域气温的小波周期图(图4)中各种尺度正负相间的振荡中心及其闭合曲线的密集区,并计算小波方差,可得到巴基斯坦不同区域的40 a年平均气温多个尺度的变化周期以及准变化周期。卡拉奇除4、9 a气温周期外,还存在20、32 a

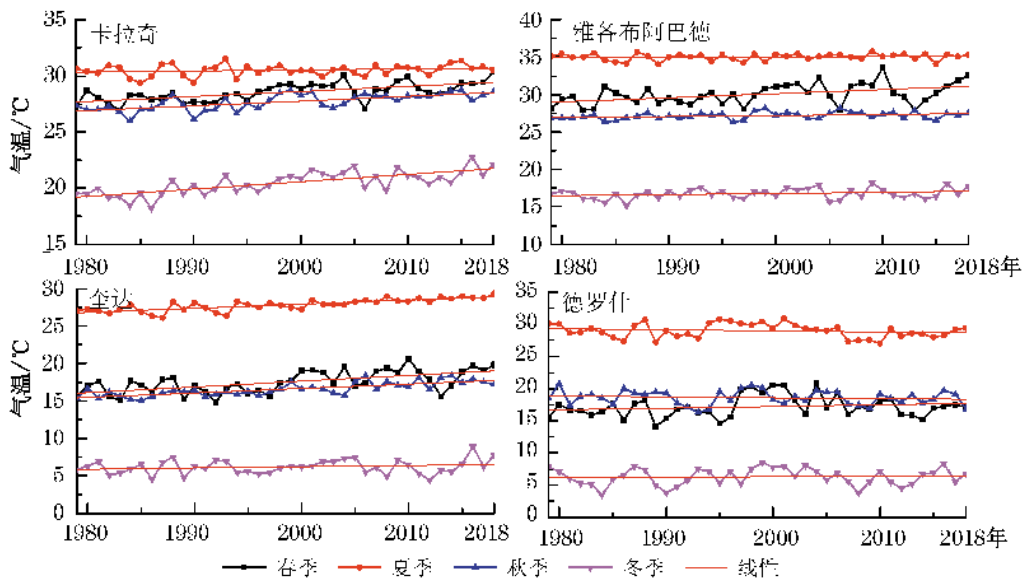


图2 巴基斯坦40 a 四季平均气温变化趋势

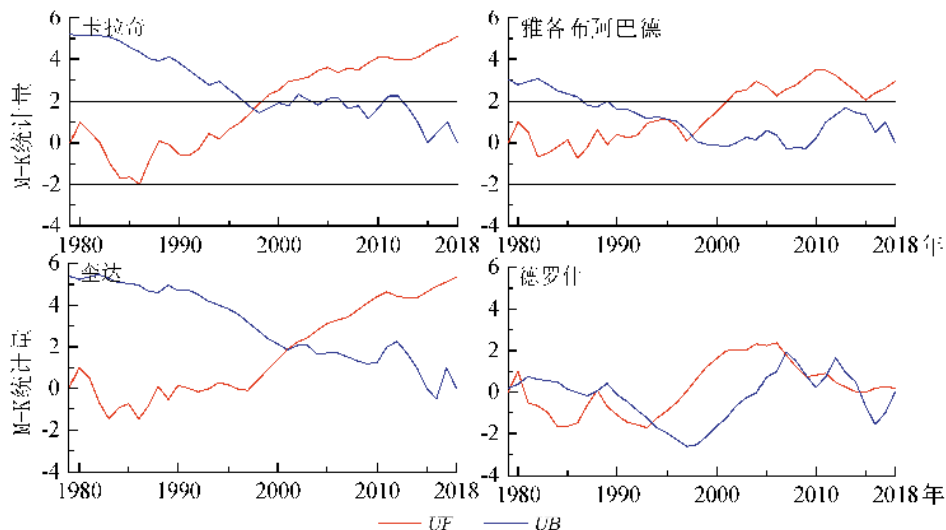


图3 M-K 突变检验曲线

的长周期变化,观察小波方差峰值,以 32 a 为准变化周期。雅各布阿巴德存在 4、12、22 a 的气温周期,根据小波方差峰值,以 12 a 为准变化周期。奎达存在 5、12、21 a 的气温周期,小波方差的结果表明,以 21 a 为准变化周期。德罗什存在 9 a 短周期变化和 32 a 长周期变化,小波方差的结果表明,以 32 a 为准变化周期。

综上所述,巴基斯坦不同区域存在 4~5、12、20~22、32 a 尺度的气温周期变化规律,与巴基斯坦过去百年时间序列上气温存在 5~6、14~50 a 的年际振荡结论相符^[2]。不同区域周期震荡最强时期不同,气温变化准周期有所差异,其中 4~5 a 左右的短气温周期,与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件的变化周期一致,说明巴基斯坦气温周期变化可能与 ENSO 事件存在联系。此外,12、20~22、32 a 尺度的气温周期变化规律,可能是受到太阳黑子 11 a 活动周期的影响^[2,41-42]。

3.2 ERA-Interim 再分析资料在巴基斯坦的适用性分析

为验证 ERA-Interim 再分析资料在巴基斯坦的适用性,挑选 4 个分别位于不同气候区的站点(卡拉奇、雅各布阿巴德、奎达以及德罗什),将 ERA-Interim 再分析资料与相对应的地面站点数据的年平均气温进行对比和拟合分析。从图 5 可以看出,4 个站点再分析数据与观测数据描述的气温年变化趋势一致,都呈增温的趋势($k>0$)。从数值上分析,ERA-Interim 再分析资料对卡拉奇和雅各布阿巴德、德罗什站点气温的模拟存在低估,对奎达站点气温的模拟存在高估。卡拉奇、雅各布阿巴德、奎达站的再分析资料和观测数据接近,差值较小,在 2 °C 左右。德罗什站的再分析资料和观测数据偏差量较大,即北部高海拔山区的再分析资料与地面站点数据之间的误差较大。卡拉奇、雅各布阿巴德、奎达、德罗什站的再分析数据和观测数据的相关系数均为 0.9 以上(图 5b、5d、5f、5h),达到极显著水平($P<0.001$)。

除北部山区外,在巴基斯坦大部分地区,即印度河三角洲、印度河平原、西部俾路支高原,ERA-Interim 资料与地面观测数据相关性良好,能够较好

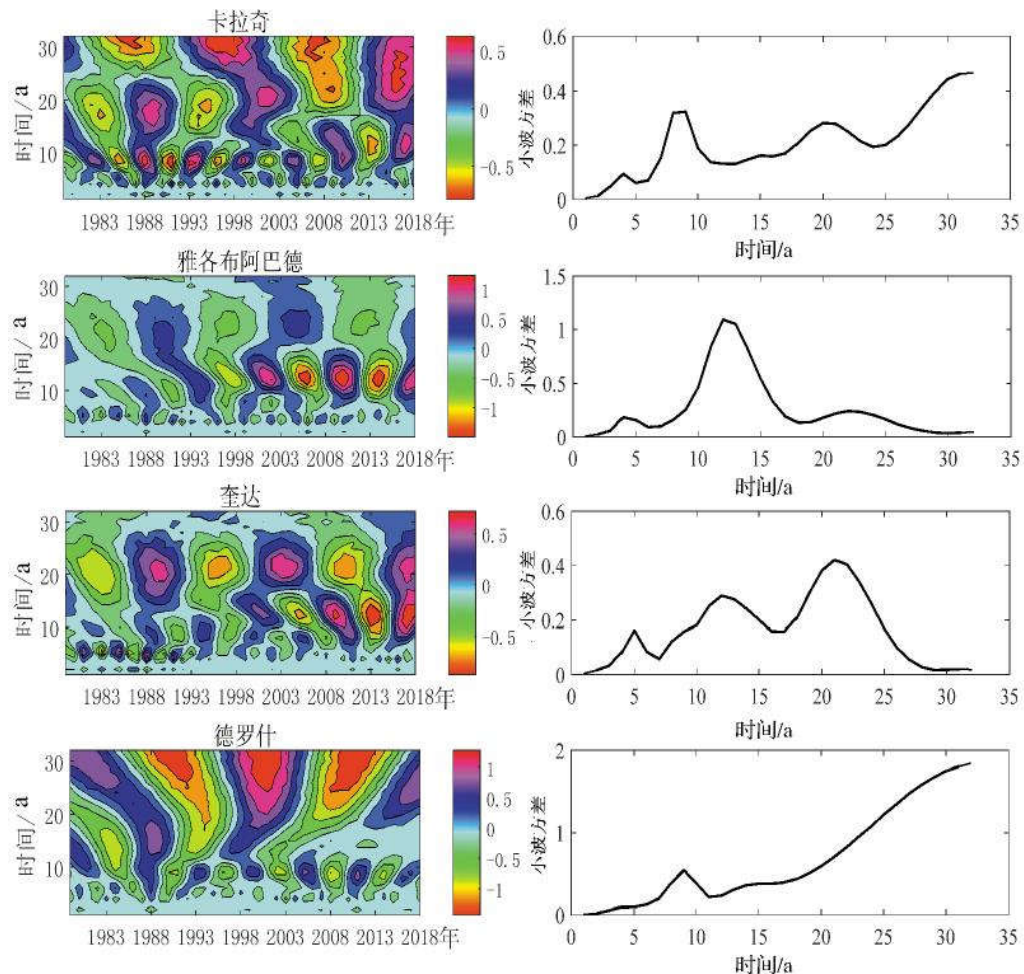


图 4 Morlet 小波功率谱和小波方差

地反映巴基斯坦地面气温的变化特征,适用于进行气温要素的长时间序列分析。

3.3 基于 ERA-Interim 再分析资料的气温空间变化特征

3.3.1 年平均气温空间分布

基于巴基斯坦 1979—2018 年 ERA-Interim 再分析资料,进一步分析巴基斯坦气温的空间分布。从图 6a 可以看出,巴基斯坦年平均气温在 $-10\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,空间上南部气温高于北部。高温区年平均气温在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,主要集中于南部中低海拔的印度河平原和三角洲地区,低温区年平均气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,分布于北部高海拔山区,这是由于南部是河谷平原地形,西部和北部是高山高原地形所导致。巴基斯坦位于低纬,处在热带和亚热带地区,其南部为阿拉伯海,东部为印度河平原,西部是俾路支高原,北部则是高海拔的兴都库什山、喀喇昆仑山及喜马拉雅山山区,地形的巨大差异造成了气温的区域差异,由此呈现出非常明显的水平方向纬度梯度性和垂直方向海拔梯度性分布^[43]。

从图 6b 可知,巴基斯坦 40 a 年平均气温变化率在空间上呈现自西南向北部和东部递减的趋势,其中仅有中部和西北小部分区域气温变化率为负值,是降温区域($P<0.05$),最大降温变化率为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/$

10 a,其他区域呈现出增温趋势($P<0.05$),西部俾路支高原增温趋势最为显著,达到 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。巴基斯坦气温变化率的差异主要是由于纬度的变化以及地形的差异所导致,南部沿海地区升温幅度小于俾路支高原,原因是海洋的缓和作用使其温度变化趋于均匀,北部山区则由于海拔较高,常年积雪覆盖,温度增长趋势不明显或有小幅度降温。Khan 等^[4]研究也表明,与全国其它地区相比,南方高温区的平均气温上升更快,除了北部的喜马拉雅山脉等地区外,整个巴基斯坦每年的冷热日数都在增加,热浪正在上升,特别是在炎热的信德省平原和南部沿海地区,而寒潮在北部寒冷地区正在减弱。

3.3.2 四季平均气温空间分布及变化

巴基斯坦四季气温分布与年平均气温的空间分布相似(图 7),整体上表现为南部气温高于北部的空间特征,呈现出非常明显的水平方向纬度梯度性和垂直方向海拔梯度性分布。春季平均气温在 $-15\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温区域位于南部印度河平原和三角洲的部分地区,向北递减,低温区域位于北部山区。夏季平均气温在 $-5\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温区域位于南部印度河平原和三角洲以及西部俾路支高原的大部分地区,低温区域位于北部山区。秋季平均气温在 $-15\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温区域位于南部印度河平原和三角洲地区,低温区

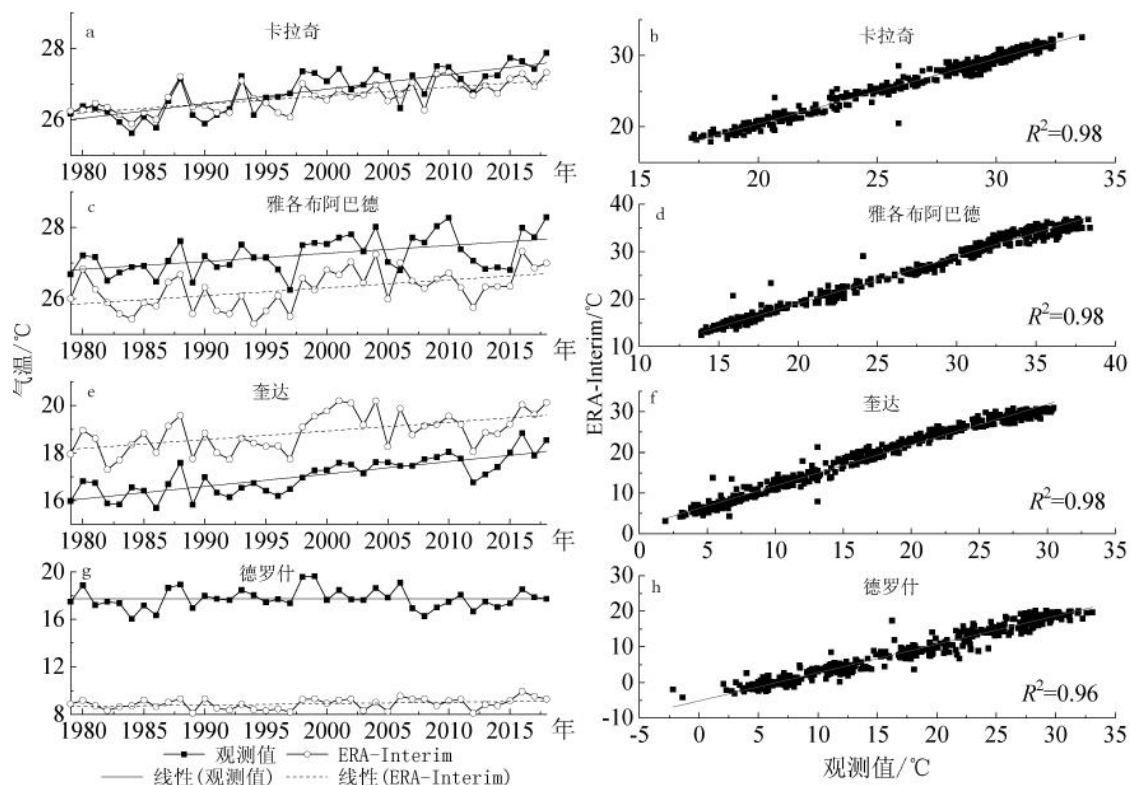


图5 ERA-Interim 再分析资料与地面观测数据比较拟合

域位于北部山区。冬季平均气温在 $-25\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高温区域位于南部印度河三角洲地区, 低温区域位于北部山区。

根据巴基斯坦气温变化率的空间分布(图 8)可知, 春季巴基斯坦大部分区域气温变化率在 $0.4\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($P<0.05$), 气温显著上升, 仅西北小部分区域呈现降温趋势。夏季巴基斯坦西部、南部和北部地区气温上升($P<0.05$), 最大增温速率达 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 中部地区气温呈现降温($P<0.05$), 降温速率为 $-0.4\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。秋季巴基斯坦大部分区域气温显著上升($P<0.05$), 增温速率为 $0.1\sim 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 仅中部小部

分区域呈现降温趋势($P<0.05$)。冬季巴基斯坦大部分区域呈现增温趋势($P<0.05$), 增温速率为 $0\sim 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

4 讨论与结论

4.1 讨论

以往再分析资料适用性研究结果表明, 在模拟区域气候模式时, 将再分析资料作为边界条件进行计算, 与地面观测资料普遍存在 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 偏差^[4]。而本文将 ERA-Interim 再分析资料与相对应的地面站点实测数据 40 a 年平均气温进行对比和拟合分析发

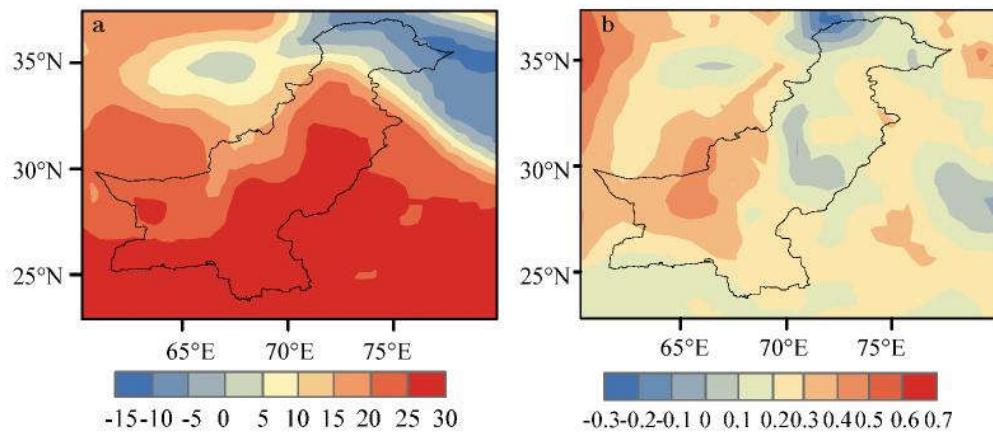


图 6 巴基斯坦 40 a 年平均气温(a, 单位: $^{\circ}\text{C}$)和气温变化率(b, 单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)的空间分布

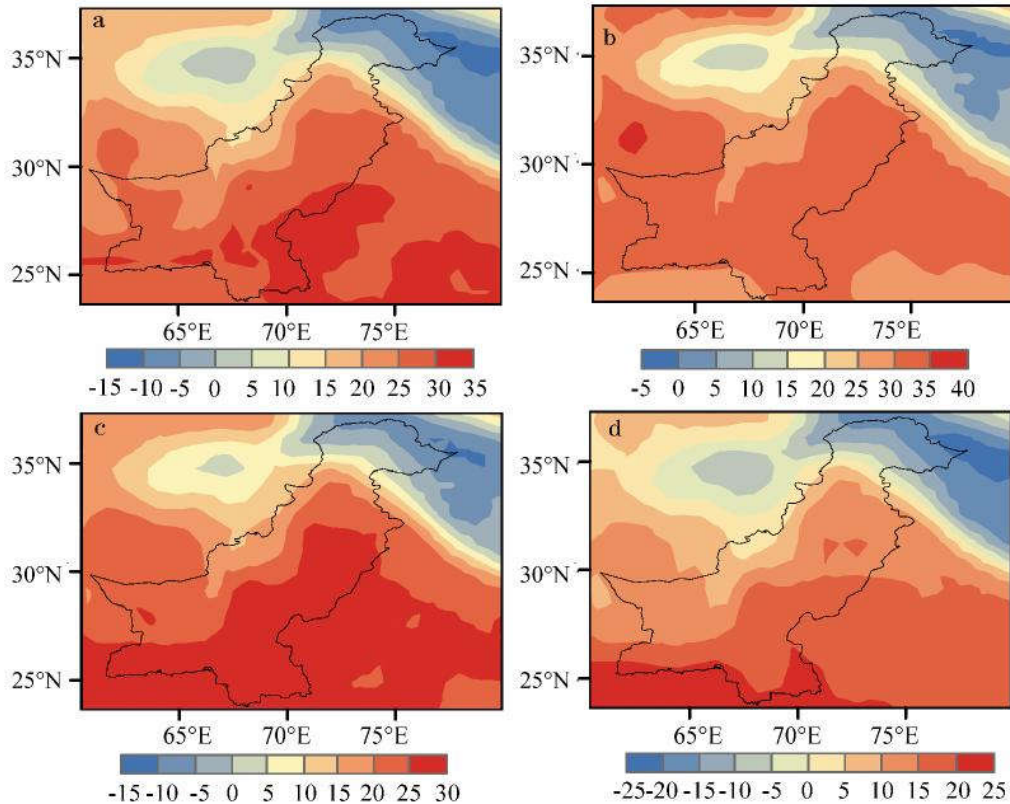


图 7 巴基斯坦 40 a 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)平均气温(单位: $^{\circ}\text{C}$)的空间分布

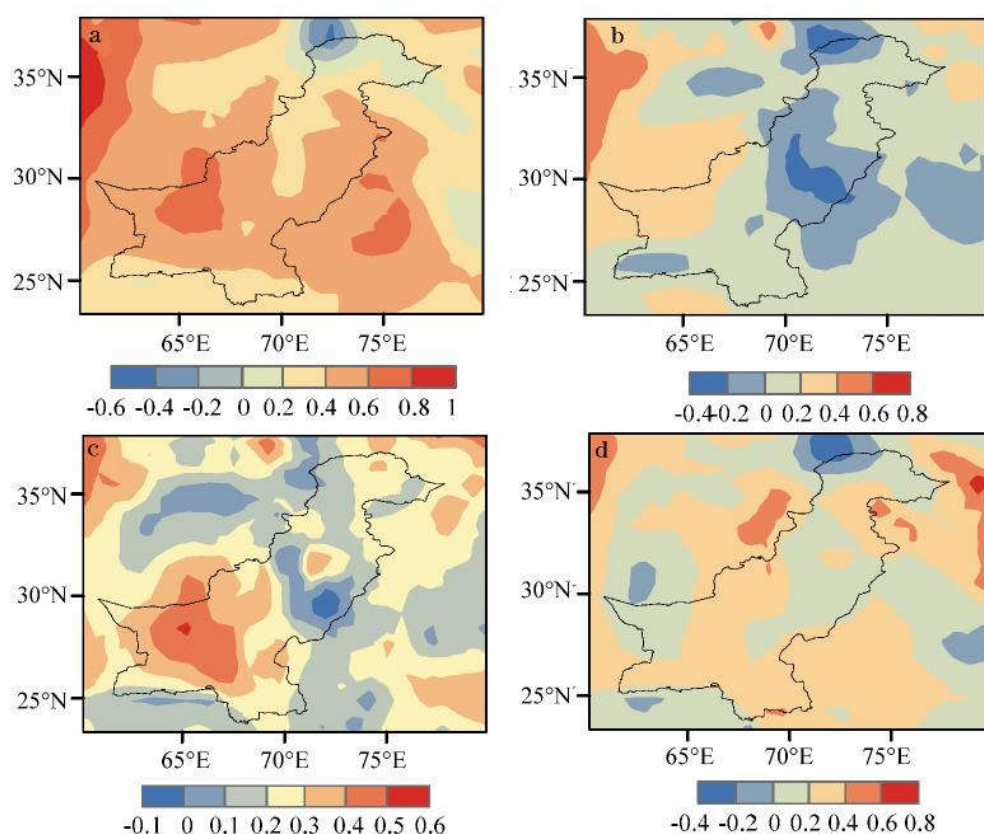


图8 巴基斯坦40 a春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)气温变化率(单位:°C/10 a)的空间分布

现,在卡拉奇、雅各布阿巴德和奎达站点两者数据接近,差值在 2°C 左右,在德罗什站点,即北部高海拔山区,再分析资料与地面站点数据之间的误差较大,超过了正常的误差水平。李川、李瑞青等在青藏高原地区利用再分析资料与实测数据进行对比时也出现较大误差^[23,45],根据程新宇杰、高路等的研究表明地面观测站点和再分析资料格点的高度差是导致误差的重要原因^[24,46-47];同时,由于数值模式的初始场存在误差、模式物理过程的不完美、大气的混沌性导致再分析资料存在不可避免的系统性误差;同化地面资料时不同参数的设置和数值格式也是重要的影响因素,因为不同数值模式对由复杂地形引起的气候差异的捕捉能力不尽相同^[44,48]。结合德罗什站点的实际情况,ERA-Interim资料与地面观测资料的偏差还可能与数据同化时的地面资料不足或不全有关。巴基斯坦北部山区站点相对于南部地区站点较少,且气象站点多位于平原,集中在人类居住地区,在气候环境极端恶劣的山区分布稀疏,并且数据同化过程采用的地面站点数据主要来自世界气象组织国际交换站点数据,所以能够有效利用的站点数据更少^[44]。

本文仅基于1979—2018年ERA-Interim再分析资料和地面站点数据,选取了4个分别位于不同气候区的站点对巴基斯坦气温时空变化特征进行分析,初步得出ERA-Interim再分析资料在巴基斯坦除北部山区外的大部分区域适用性良好。对于ERA-Interim再分析资料在巴基斯坦北部山区的适用性分析中误差的来源与订正,未来还需获取更多站点以及更长时间序列的资料,以期获得更加全面、客观的结论。

4.2 结论

基于巴基斯坦不同气候区4个代表站(卡拉奇、雅各布阿巴德、奎达、德罗什)地面观测资料和ERA-Interim气温资料对1979—2018年巴基斯坦年、季气温的时空分布进行分析后,得出以下结论:

(1)1979—2018年巴基斯坦气温整体呈现波动上升趋势,除北部山区外大部分区域增温显著,四季温度变化中春、秋两季增温显著;巴基斯坦过去40 a气温突变发生在1998年左右,突变后明显增温,并存在4~5、12、20~22和32 a周期变化,不同区域准变化周期有所差异。

(2)ERA-Interim再分析资料与地面观测数据

两者的相关性达到极显著水平,在巴基斯坦大部分区域差值较小,能够较好地反映巴基斯坦地面气温的变化特征,适用于进行气温要素的长时间序列分析。

(3)巴基斯坦年、四季平均气温整体呈现出南高北低的特点,高温区位于南部中低海拔的印度河平原和三角洲地区,低温区分布于北部高海拔山区。40 a 来巴基斯坦大部分区域年、季平均气温呈现明显增温趋势,其中俾路支高原显著增温,南部印度河三角洲和印度河平原次之,北部高海拔山区变化不显著,气温显著变冷区几乎不存在。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Afzaal M, Ma H, Zaman Q. Interdecadal oscillations and the warming trend in the area-weighted annual mean temperature of Pakistan [J]. Pakistan Journal of Meteorology, 2009, 6(11): 13-19.
- [3] Rio S D, Iqbal M A, Cano-ortiz A, et al. Recent mean temperature trends in Pakistan and links with teleconnection patterns [J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(2): 277-290.
- [4] Iqbal M A, Penas A, Cano-ortiz A, et al. Analysis of recent changes in maximum and minimum temperatures in Pakistan[J]. Atmospheric Research, 2016,168(FEB): 234-249.
- [5] Khan N, Shahid S, Bin I T, et al. Spatial distribution of unidirectional trends in temperature and temperature extremes in Pakistan [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 136(3-4): 899-913.
- [6] Khan S. Climate classification of Pakistan [J]. International Journal of Economic and Environmental Geology, 2019, 10(2): 60-71.
- [7] Zahid M, Rasul G. Frequency of extreme temperature and precipitation events in Pakistan 1965-2009 [J]. Science International, 2011, 23(4): 313-9.
- [8] Ahmed K, Shahid S, WANG X J, et al. Spatiotemporal changes in aridity of Pakistan during 1901-2016 [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23 (7): 3081-3096.
- [9] Hassan I, Ghumman A R, Ghazaw Y, et al. Climate change impact on precipitation in arid areas of Pakistan [J]. International Journal of Water Resources and Arid Environments, 2017, 6(1): 80-88.
- [10] Hussain M, Liu G J, Yousaf B, et al. Regional and sectoral assessment on climate-change in Pakistan: Social norms and indigenous perceptions on climate -change adaptation and mitigation in relation to global context[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 200(1): 791-808.
- [11] Bukhari S S B, Bajwa G A. Temporal temperature rise and its effects on other climatic factors in Peshawar - Pakistan [J]. The Pakistan Journal of Forestry, 2008, 58 (1): 1.
- [12] Smiraglia C, Mayer C, Mihalcea C, et al. 26 Ongoing variations of Himalayan and Karakoram glaciers as witnesses of global changes: recent studies on selected glaciers [J]. Developments in Earth Surface Processes, 2007, 10(06): 235-247.
- [13] Sajjad S H, Hussain B, Khan M A, et al. On rising temperature trends of Karachi in Pakistan [J]. Climatic Change, 2009, 96(4): 539-547.
- [14] Abbas F. Analysis of a historical(1981-2010)temperature record of the Punjab province of Pakistan [J]. Earth Interactions, 2013, 17(15): 1-23.
- [15] Jahangir M, Maria Ali S, Khalid B. Annual minimum temperature variations in early 21st century in Punjab, Pakistan [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2016, 137: 1-9.
- [16] Decker M, Brunke M A, WANG Z, et al. Evaluation of the Reanalysis Products from GSFC, NCEP, and ECMWF using Flux Tower Observations [J]. Journal of Climate, 2010, 25(6): 1916-1944.
- [17] 赵天保,符淙斌,柯宗建,等. 全球大气再分析资料的研究现状与进展 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(03): 242-254.
- [18] Simmons A J, Willett K M, Jones P D, et al. Low -frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets[J]. Journal of Geophysical Research. Atmospheres, 2010, 115(D1): 110.
- [19] 高路, Karsten Schulz, 陈兴伟, 等. 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, 2014, 12(2): 75-78.
- [20] 范思睿, 王维佳, 刘东升, 等. 基于再分析资料的西南区域近 50a 空中水资源的气候特征 [J]. 暴雨灾害, 2014, 33(1): 65-72.
- [21] Mooney P A, Mulligan A F J, Fealya R. Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland [J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(4): 545-557.
- [22] 谢潇, 何金海, 祁莉. 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, 2011, 27(5): 58-

- 65.
- [23] 李瑞青, 吕世华, 韩博, 等. 青藏高原东部三种再分析资料与地面气温观测资料的对比分析 [J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1488-1502.
- [24] 程新宇杰, 高路. ECMWF 再分析气温资料在天山山区的可信度检验 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2018, 54(5): 635-644.
- [25] BAO X H, ZHANG F Q. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 Reanalysis Datasets against Independent Sounding Observations over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Climate, 2013, 26(1): 206-214.
- [26] 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.
- [27] 马永锋, 卞林根. ERA-Interim 再分析和 NCEP/FNL 分析资料在东南极中山站至 Dome A 断面的适用性研究 [J]. 极地研究, 2014, 26(4): 469-480.
- [28] Ullah S, YOU Q L, Ali A, et al. Observed changes in maximum and minimum temperatures over China - Pakistan economic corridor during 1980 -2016 [J]. Atmospheric Research, 2019, 216: 37-51.
- [29] Ullah S, YOU Q L, Ullah W, et al. Daytime and nighttime heat wave characteristics based on multiple indices over the China - Pakistan economic corridor [J]. Climate Dynamics, 2019, 53(9-10): 6329-6349.
- [30] Khan F K. Pakistan: Geography, Economy and People [M]. Oxford University Press, 2015.
- [31] 黄秋霞, 何清, 玉努斯, 等. 哈萨克斯坦共和国不同区域降水的变化特征 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(4): 61-68.
- [32] 居丽丽, 史军, 张敏. 1961-2015 年华东地区极端气温变化研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(3): 112-121.
- [33] 沈伟峰, 缪启龙, 魏铁鑫, 等. 中亚地区近 130 多年温度变化特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 32-36.
- [34] 单丹, 朱国光, 胡航菲. 基于 GrADS 的 NCEP/FNL 再分析资料自动化处理程序设计及实现 [J]. 气象与环境科学, 2018, 41(4): 135-141.
- [35] Jones P D, Moberg A. Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update to 2001 [J]. Journal of Climate, 2003, 16(2): 206-223.
- [36] Jones P D, New M, Parker D E, et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years[J]. Reviews of Geophysics, 1999, 37(2): 173.
- [37] WANG S Y, Davies R E, HUANG W R, et al. Changing Monsoon Extremes and Dynamics: Example in Pakistan [C]// Changing Monsoon Extremes & Dynamics: Example in Pakistan. 2011.
- [38] QIAN W H, ZHUY F. Climate change in China from 1880-1998 and its impact on the environmental condition [J]. Climatic Change, 2004, 50(4): 419-444.
- [39] WANG S W, ZHU J H, CAI J N. Interdecadal variability of temperature and precipitation in China since 1880 [J]. Advances in Atmospheric Science, 2004, 21 (3): 307-313.
- [40] 徐婷, 邵华, 张弛. 近 32a 中亚地区气温时空格局分析 [J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 25-35.
- [41] Huber, Matthew, Caballero, et al. Eocene El Nino: Evidence for Robust Tropical Dynamics in the 'Hothouse'. [J]. Science, 2003, 299(5608): 877-881.
- [42] Rittenour, Tammy, Mann, et al. El Nino-Like Climate Teleconnections in New England During the Late Pleistocene[J]. Science, 2000, 288(12): 1039-1042.
- [43] Kattel D B, Yao T, Ullah K, et al. Seasonal near-surface air temperature dependence on elevation and geographical coordinates for Pakistan [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(3-4):1591-1613.
- [44] 白磊, 王维霞, 姚亚楠, 等. ERA-Interim 和 NCEP/NCAR 再分析数据气温和气压值在天山山区适用性分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(3): 51-56.
- [45] 李川, 张廷军, 陈静. 近 40 年青藏高原地区的气候变化——NCEP 和 ECMWF 地面气温及降水再分析和实测资料对比分析[J].高原气象, 2004, 23(增刊): 97-103.
- [46] GAO L, Bernhardt M, Schulz K, et al. Elevation correction of ERA-Interim temperature data in the Tibetan Plateau [J]. International Journal of climatology, 2016, 37(9): 3540.
- [47] GAO L, Bernhardt M, Schulz K. Elevation correction of ERA-Interim temperature data in complex terrain [J]. Hydrology and Earth System Science, 2012, 16(12): 4661.
- [48] 薛湛彬, 陈娴, 张瑛, 等. ECMWF 高分辨率模式 2m 温度预报误差订正方法研究[J]. 气象, 2019, 45(6): 831-842.

Spatiotemporal Variation Characteristics of Air Temperature in Pakistan in Recent 40 Years

DENG Mingzi^{1,2}, HE Qing², Alim Abbas^{2,3}, JIN Lili²

(1.College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2.Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

3.College of Resource and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract Based on ERA-Interim air temperature data and ground observation data of 4 representative stations (Karachi, Jacobabad, Quetta, Drosh) in different climate zones in Pakistan, the characteristics of air temperature change were analyzed by using the methods of linear regression, Mann-Kendall mutation test and Morlet wavelet analysis. The results showed: (1) Pakistan experienced a process of air temperature decreasing at first and then increasing over the last 40 years. Except for the northern mountainous area, the annual mean air temperature increased significantly, and the air temperature increased in all four seasons, especially in spring and autumn. The air temperature mutation occurred around 1998, and the annual mean air temperature experienced the cycles of 4-5, 12, 20-22 and 32 a. (2) The fitting analysis of ERA-Interim reanalysis data and ground observation data shows that the correlation is extremely significant, and the error is small in most areas except the northern mountainous area. Hence, it could reflect the characteristics of air temperature change in Pakistan. (3) The spatial distribution of annual and seasonal mean air temperature in Pakistan shows distinct zonality. The high air temperature zone was located in the Indus Plain and delta area in the south, while the low air temperature area is located in the northern mountainous area. The annual, spring and autumn mean air temperature variation shows an obvious increasing trend in space.

Key words Pakistan; air temperature; ERA-Interim reanalysis data; spatiotemporal characteristics