

黑河流域 1960—2015 年气温时空变化特征

郭昆明, 颀耀文, 王晓云, 邱天

(兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:在全球气温升高的背景下,为了解黑河流域过去几十年的气温变化情况,选择黑河流域及周边 20 个气象站点 1960—2015 年的月平均资料,综合利用线性倾向率、滑动平均、Mann-Kendall 检验、滑动 t 检验、小波分析和样条函数等方法,分析了黑河流域 1960—2015 年不同时间尺度上平均气温的时空分布特征。结果表明:(1) 黑河流域近 56 a 的逐年和各季节平均气温均呈显著上升趋势,在季节尺度上,冬季的增温幅度最大,秋季次之。(2) 黑河流域年和秋、冬两季的最冷平均气温出现在 20 世纪 60 年代,而春、夏两季的最低值则出现在 70 年代。(3) 黑河流域平均气温突变时间除春季发生在 21 世纪初,年和其他 3 季平均气温的突变则均发生在 20 世纪 90 年代。(4) 在年际和季节尺度上,黑河流域的平均气温在 26~32 a 时间尺度上均发生了冷暖交替变化,除冬季气温变化的第一主周期为 30 a 外,年和其他 3 季的第一主周期均为 29 a,且黑河流域的气温在未来几年还会持续升高。(5) 除冬季外,黑河流域年和其他 3 季平均气温均随海拔升高而降低;且除冬季的马鬃山站外,其他时间各站点均增温显著($p < 0.05$)。就不同季节而言,冬季对增温趋势的贡献最大,其次为秋季。

关键词:时空分布; Mann-Kendall 检验; 小波分析; 黑河流域

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0253-08

Characteristics of Spatiotemporal Distribution of Temperature in the Heihe River Basin During the Period 1960—2015

GUO Kunming, XIE Yaowen, WANG Xiaoyun, QIU Tian

(School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In the context of rise of global temperatures, in order to understand the temperature changes in the Heihe River Basin over the past few decades, the monthly average data of 20 meteorological stations in and around the Heihe River Basin during the period 1960—2015 were used to analyze the temporal and spatial distribution characteristics of mean temperatures over different time scales in the Heihe River Basin from 1960 to 2015 by applying the methods of linear tendency rate, moving average, Mann-Kendall test, sliding t test, wavelet analysis and spline function. The results showed that: (1) the annual and the seasonal temperature of the Heihe River Basin showed the significant increase, on the seasonal scale, the temperature increase in winter was the largest, followed by the fall; (2) the annual average lowest temperature and the average lowest temperatures of autumn and winter in the Heihe River Basin appeared in the 1960s, while the average lowest temperatures of spring and summer appeared in the 1970s; (3) the sudden changes in the average temperature of spring in the Heihe River Basin occurred in the early 21st century, while the sudden changes in the annual average temperature and the sudden changes in the average temperatures of the other three seasons occurred in the 1990s; (4) on the interannual and seasonal scales, the average temperature of the Heihe River Basin had alternated between the cold and the warm on the scale of 26~32 years; the first main period of annual temperature change and the first main period of temperature change of the other three

收稿日期:2019-05-14

修回日期:2019-06-04

资助项目:国家自然科学基金(41471163,41530752);科技基础资源调查专项(2017FY101003);中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzu-jbky-2017-it105)

第一作者:郭昆明(1995—),女,河北沧州人,硕士在读,研究方向为资源环境与 3S 技术应用。E-mail:guo_kunming@163.com

通信作者:颀耀文(1969—),男,甘肃甘谷人,博士,教授,主要从事地图学与环境遥感研究。E-mail:xieyw@lzu.edu.cn

seasons were 29 years except that the first main period of temperature change in winter was 30 years; the temperature in the Heihe River Basin will continue to rise in the next few years; (5) in addition to winter, the annual average temperature and the average temperatures of the other three seasons in the Heihe River Basin gradually decreased with increase of altitude except winter; the temperatures of the other stations increased significantly in other seasons ($p < 0.05$) except the Mazongshan station around the Heihe River in winter; in terms of different seasons, winter contributed the most to the trend of warming, followed by autumn.

Keywords: spatiotemporal; Mann-Kendall test; wavelet analysis; Heihe River Basin

气候变化影响着全球的自然生态系统,受到全世界各界人士的广泛关注^[1]。IPCC 第 5 次评估报告指出,1983—2012 年可能是自 1400 年以来最热的 30 年;1980—2012 年全球地表平均温度升高 0.85℃;2003—2012 年平均温度比 1850—1900 年上升 0.78℃^[2]。近 100 a 中国平均地表温度上升约 0.5~0.8℃,尤以西北干旱半干旱地区的变化比较显著^[3-4]。气候变化会改变水资源量的时空分布,影响生态环境并制约社会经济发展,气温作为最基本的气候要素,对生态环境的变化起着决定性作用^[5-7]。众多研究表明,全球气温变化区域差异明显^[8-11]。黑河流域处于丝绸之路经济带的核心地段,地处我国西北干旱区,是对全球气候变化响应最为敏感的地区之一^[12-13],研究该区域的气温变化对黑河流域的生态建设具有重要意义。目前,已有很多学者对黑河流域的地质地貌^[14]、气候^[15-16]、水文^[17]、土壤^[18]、土地利用/覆盖变化^[19]、植被^[20]、景观^[21]、冰川^[22]和同位素^[23]等进行了大量研究。已有文献中,单纯研究黑河流域气温变化的相对较少。

为了解黑河流域多年来气温变化的趋势和特征,本文拟采用线性倾向率、滑动平均和 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验法分析黑河流域平均气温在不同时间尺度上的总体变化趋势;应用 M-K 突变检验和滑动 t 检验法分析黑河流域平均气温的突变性;通过小波分析法分析黑河流域平均气温的周期性;并利用样条函数法分析黑河流域平均气温的空间分布特征,以期深入认识黑河流域的气温变化状况,所得结果对未来气温变化预测和生态环境建设具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

黑河流域(98°00'—101°30'E, 38°00'—42°00'N)是我国西北第二大内陆河,发源于祁连山北麓,流经青海、甘肃和内蒙古 3 省(区),东邻石羊河流域,西接疏勒河流域,北至内蒙古自治区额济纳旗境内的居延海,与蒙古人民共和国接壤,全长 821 km,流域面积 14.29 万 km²(图 1)。黑河流域位于欧亚大陆中部,

气候干燥,降水稀少,昼夜温差大^[24]。莺落峡以上为上游,地势高峻,气候严寒湿润,是主要产流区,多年平均气温低于 2℃,以牧业为主。莺落峡和正义峡之间为中游,地势平坦,光热资源充足,昼夜温差大,多年平均气温为 6~8℃,是灌溉农业区。正义峡以下为下游,地势平坦开阔,气候干燥,是生态环境最脆弱的地区,偶有极端天气,极端最低气温低于 -30℃,极端最高气温超过 40℃,多年平均气温为 8~10℃^[25-26]。黑河流域植被类型的垂直分异明显,自上游至下游可划分为森林、灌丛、草原及荒漠 4 个植被带。

1.2 数据来源

本文基于“中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)”,选择黑河流域内(额济纳旗、鼎新、金塔、酒泉、高台、临泽、托勒、肃南、野牛沟、张掖、民乐、祁连、山丹)及周边(马鬃山、拐子湖、玉门镇、阿拉善右旗、永昌、刚察、门源)共 20 个气象站点 1960 年 1 月—2015 年 12 月的月平均资料(图 1)。四季划分如下:12 月—次年 2 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季。

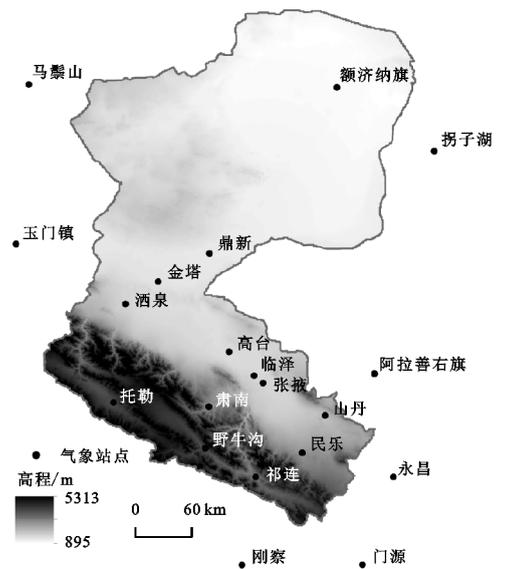


图 1 研究区气象站点分布

1.3 研究方法

本文利用线性倾向率、滑动平均、M-K 检验、滑动 t 检验、小波分析和样条函数等方法,分析黑河流域 1960—2015 年的年和各季节平均气温的时空分布特征。

线性倾向估计方法通过建立线性回归方程,根据回归系数确定气温变化的趋势与大小。滑动平均法对数据进行平滑和滤波处理,是一种通过平均方式消除序列中异常波动以显示序列变化趋势的方法^[27]。M-K 检验法是一种非参数统计检验方法,既可进行趋势检验,又可进行突变检验,其主要优点是样本可不服从正态分布^[28-29]。M-K 趋势分析中,统计量 $Z > 0$,表明统计变量呈增加趋势,反之则呈减少趋势;M-K 突变检验中,若正曲线 $UF_{(k)}$ 和反曲线 $UB_{(k)}$ 在置信曲线内有且仅有一个交点,则说明此交点所对应的年份为突变年份;若两曲线在置信曲线内有多个交点或交点在置信曲线外,则不能确定其是否为突变点^[29]。经过 M-K 检验后,对其不能判断是否为突变点的点,则用滑动 t 检验法^[28] 进行验证以进一步确定其是否为突变点。小波分析法是一种具有信号、时频多分辨率功能的方法,它可揭示在时间序列中的变化周期,反映在不同时间尺度上系统的变化趋势,并对系统未来趋势进行预测^[30]。样条函数差值在进行空间插值分析时可准确通过样本点拟合连续光滑的表面,该方法在对气候空间分异变化研究中已被国内外许多学者使用^[9,31]。

2 结果与分析

2.1 年际和季节变化特征

1960—2015 年,黑河流域的逐年和四季平均气温均呈上升趋势,且均通过置信度为 99% 的 M-K 显著性检验(图 2)。黑河流域多年平均气温为 5.14℃,年平均最高和最低气温分别为 13.09, -1.57℃(表 1),气温倾向率为 0.354℃/10 a(图 2A)。近 56 年来,黑河流域的年平均气温升高了 1.59℃。由 5 a 滑动平均结果可知,黑河流域 20 世纪 60 年代初—80 年代,平均气温先有一段小幅上升期,后呈“降—升—降—升”的变化趋势,且波动程度较大,在 1967 年达到最低值;90 年代初,平均气温呈现小幅下降趋势,90 年代中后期平均气温大幅上升,增温显著;2000 年之后,平均气温处于不断波动变化的状态,平均气温变化不大。

黑河流域春、夏、秋、冬四季多年平均气温分别为 6.63, 18.20, 4.93, -9.20℃(表 1),气温倾向率分别为 0.319, 0.311, 0.358, 0.430℃/10 a(图 2),其中,冬季的增温幅度最大,秋季次之。由 5 a 滑动平均结果可知,黑河流域春季平均气温在 20 世纪 60—70 年代初呈小幅波动变化,整体上变化不大;20 世纪 70 年代中后期,平均气温先大幅下降后上升;20 世纪 80—90

年代中期,平均气温先缓慢下降,后缓慢上升,整体变化不大,90 年代中后期,平均气温大幅上升;2000 年之后平均气温波动上升。黑河流域夏季平均气温在 20 世纪 60 年代初呈下降趋势,60 年代中后期—80 年代中期,气温不断波动但变化微弱,80 年代后期气温呈上升趋势;20 世纪 90 年代初,平均气温处于小幅波动状态,整体呈下降趋势,90 年代中后期增温显著;2000 年后,平均气温波动变化,但变化较小。黑河流域秋季平均气温在 20 世纪 60—70 年代初,先小幅上升,后显著下降,之后又呈显著上升趋势;在 20 世纪 70 年代中后期—80 年代中期,平均气温呈小幅波动变化,80 年代后期气温突然升高后显著下降;20 世纪 90 年代初,气温基本不变,90 年代中后期,气温呈波动上升趋势;2000 年之后,气温呈“降—升—降—升”的变化趋势。黑河流域冬季平均气温在 20 世纪 60 年代初平均气温先降后升,在 60 年代中后期呈现一个大的“降—升”变化;20 世纪 70 年代初平均气温缓慢下降;70 年代中后期呈小幅波动上升趋势;20 世纪 80 年代初,平均气温先下降后显著升高;20 世纪 90 年代,平均气温呈“降—升—降—升”变化;2000 年之后,平均气温呈波动下降趋势。

表 1 近 56 a 黑河流域多年年平均和多年季节平均温度 ℃

项目	年	春	夏	秋	冬
平均气温	5.14	6.63	18.20	4.93	-9.20
平均最高气温	13.09	14.55	25.41	13.09	-0.71
平均最低气温	-1.57	-0.51	11.31	-1.34	-15.75

2.2 年代际变化特征

距平分析结果表明,黑河流域的年平均气温持续升高,20 世纪 60 年代—80 年代,气温的年代距平值为负,气温低于近 56 a 的气温均值;90 年代后,其年代距平值为正,气温高于 56 a 的气温均值;其中,1990s 较 1980s 气温增幅最大,达到 0.605℃(表 2)。20 世纪 60—80 年代,黑河流域四季气温的年代距平值均为负,气温低于近 56 a 的气温均值;90 年代后,其年代距平值均为正,气温高于 56 a 的气温均值。其中,秋季气温的年代际变化同年平均气温趋势一致,2000—2009 年较 1990s 气温增幅最大。春季和夏季气温的距平值均呈现先下降后上升的变化特征,最低值均出现在 70 年代,2000—2009 年较 1990s 的温度增幅最大,分别为 0.684, 0.726℃。冬季气温距平值在 21 世纪前一直上升,进入 21 世纪后则缓慢下降,1970s 较 1960s 气温增幅最大。

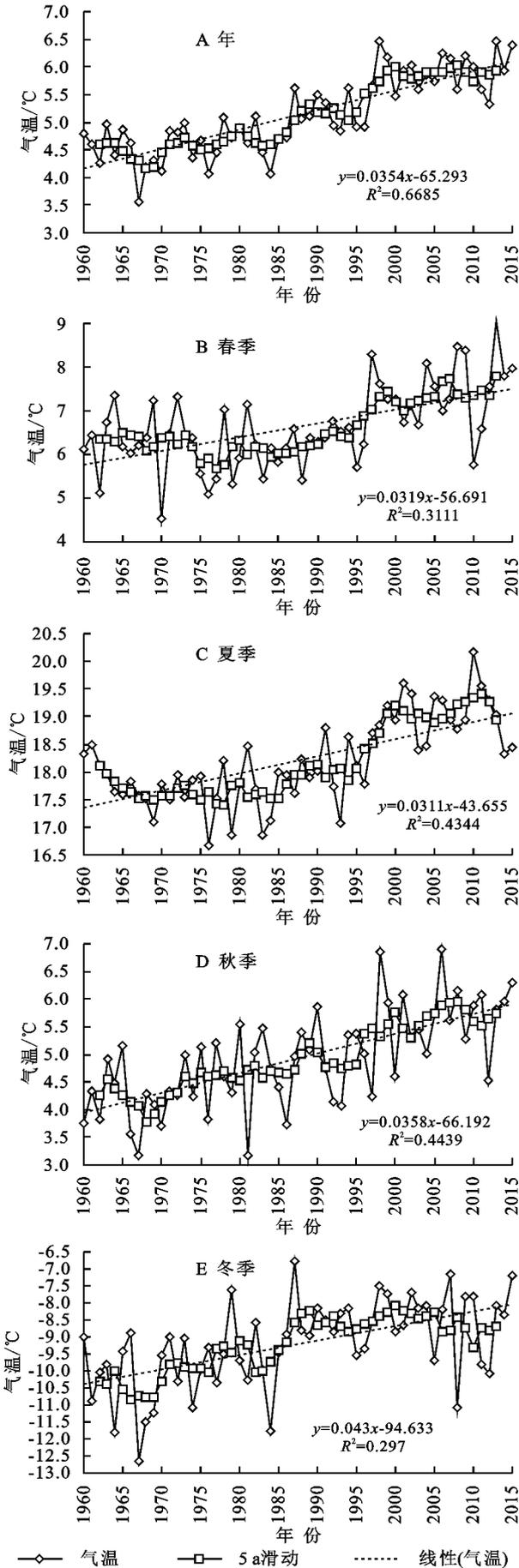


图 2 黑河流域年和四季平均气温的年度变化

表 2 黑河流域年和四季年代际平均气温距平 $^{\circ}\text{C}$

年代	年	春季	夏季	秋季	冬季
1960s	-0.684	-0.255	-0.389	-0.770	-1.323
1970s	-0.532	-0.674	-0.625	-0.471	-0.356
1980s	-0.309	-0.512	-0.439	-0.171	-0.115
1990s	0.295	0.134	0.083	0.228	0.736
2000—2009 年	0.744	0.818	0.809	0.686	0.662
2010—2015 年	0.810	0.816	0.937	0.829	0.659

2.3 气温突变时间分析

黑河流域的年平均气温(图 3A)在 1960—1980 年有下降趋势但不明显,自 1980 年之后呈现升高趋势,在 1992 年与 0.05 显著水平线相交,表明年平均气温在 1992 年后升高显著;UF_(k) 曲线和 UB_(k) 曲线在整个时间序列中虽有交点(1993 年),但此交点不在置信区间内,经滑动 t 检验确定 1993 年是黑河流域的年平均气温突变点,通过 0.01 显著性水平检验。黑河流域春季(图 3B)平均气温在 1960—1975 年不断波动,1976—1997 年 UF_(k) 曲线小于 0,表明春季平均气温呈下降趋势;1998 年之后气温呈升高趋势,且在 2005 年超过 0.05 显著性水平,增温趋势显著;UF_(k) 曲线和 UB_(k) 曲线在置信区间内有 3 个交点(2003 年、2004 年和 2005 年),根据累积距平分析中极值的 t 检验确定春季平均气温在 2003 年发生突变。黑河流域夏季(图 3C)平均气温在 1960—1996 年呈下降趋势,1964—1981 年和 1983—1986 年,统计值超过 0.05 显著水平的临界线,下降趋势显著;1997 年气温发生突变呈上升趋势且在 2002 年后超过 0.05 显著性水平,表明夏季平均气温在 2002 年后升高显著。黑河流域秋季(图 3D)平均气温在 1960—1964 年和 1967—1977 年呈下降趋势但不显著,1978 年之后气温呈上升趋势,且在 1999 年超过 0.05 显著性水平,表明秋季平均气温在 1999 年后升高显著;UF_(k) 曲线和 UB_(k) 曲线在置信区间内有 3 个交点(1996 年、1998 年和 1999 年),根据累积距平分析中极值的 t 检验确定秋季平均气温在 1998 年发生突变。黑河流域冬季(图 3E)平均气温在 1960—1980 年呈下降趋势但不显著,1980 年后气温呈上升趋势且在 1991 年超过 0.05 显著性水平,表明冬季平均气温在 1991 年后升高显著;其气温突变点在 1988 年。

2.4 周期分析

采用 Matlab 软件,对黑河流域近 56 a 的年和四季平均气温进行小波分析,结果见图 4—5。小波系数实部图可以反映气温序列在不同时间尺度上的周期及其在时间域中的分布,进而判断不同时间尺度上气温的未来变化趋势。小波系数值为正,表示气温升高;反之表示气温降低。黑河流域近 56 a 的年平均气温在 6, 12~15, 22, 26~32 a 左右尺度上存在震荡周期(图 4)。

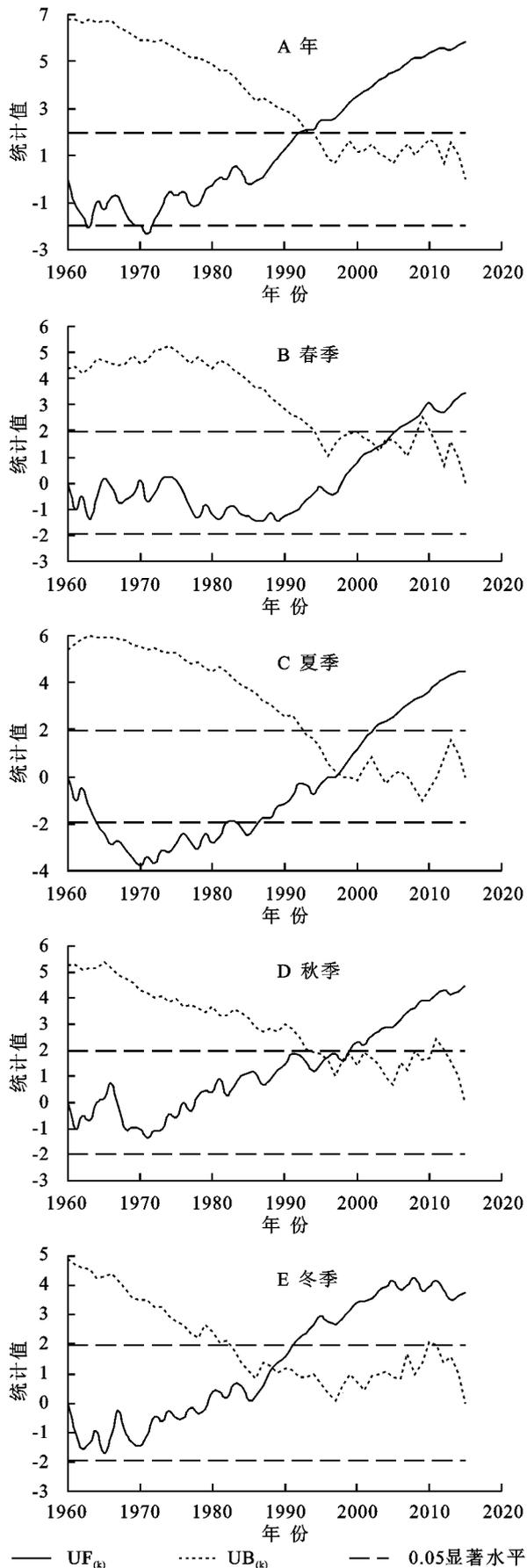


图3 黑河流域年和四季平均气温的M-K突变检验

在26~32 a时间尺度上,气温发生了“升高—降

低—升高”的7次冷暖交替变化,2015年后,黑河流域处于气温升高阶段,表明未来几年内黑河流域的气温将会升高。小波方差图能反映气温信号的波动能量随尺度的分布,可用来确定气温变化过程中存在的主周期。黑河流域年平均气温存在2个峰值,依次对应6 a和29 a的时间尺度(图4)。其中,最大峰值对应着29 a的时间尺度,说明29 a时间尺度对小波的方差贡献率最大,为黑河流域年气温变化的第1主周期;6 a时间尺度为第2主周期。

在26~32 a时间尺度上,黑河流域近56 a的春季(图5A)、夏季(图5C)和秋季(图5E)平均气温均发生了“升高—降低—升高”的7次冷暖交替变化,与年平均气温(图4)的变化一致。黑河流域近56 a春季平均气温在6,12,26~32 a左右尺度上存在震荡周期,小波方差图(图5B)存在3个峰值,依次对应6,12,29 a的时间尺度。其中,最大峰值对应29 a的时间尺度,说明29 a时间尺度为黑河流域春季气温变化的第1主周期,12 a为第2主周期。黑河流域近56 a夏季平均气温在26~32 a左右尺度上存在震荡周期,小波方差图(图5D)只存在1个峰值,对应29 a的时间尺度,说明29 a时间尺度为黑河流域夏季气温变化的第1主周期。黑河流域近56 a秋季平均气温在6,10~20,26~32 a左右尺度上存在震荡周期,小波方差图(图5F)存在2个峰值,依次对应16 a和29 a的时间尺度。其中,最大峰值对应29 a的时间尺度,说明29 a时间尺度为黑河流域秋季气温变化的第1主周期,16 a为第2主周期。黑河流域近56 a冬季(图5G)平均气温在6,12~15,18~20,26~32 a左右尺度上存在震荡周期。在26~32 a时间尺度上气温发生了“降低—升高—降低”的7次冷暖交替变化。黑河流域冬季平均气温的小波方差图(图5H)存在4个峰值,依次对应6,14,19,30 a的时间尺度。其中,最大峰值对应30 a的时间尺度,说明30 a时间尺度为黑河流域冬季气温变化的第1主周期,19 a为第2主周期,14 a和6 a分别为第3和第4主周期。

2.5 空间变化特征

利用ArcGIS软件中的空间分析工具箱,对黑河流域的年和四季的平均气温和气温倾向率进行样条函数插值,结果显示:黑河流域年平均气温从下游到上游随海拔升高而逐渐降低(图6A),最低值为 -6.86°C ,最高为 10.45°C ,温较差 17.31°C 。春季(图6B)、夏季(图6C)和秋季(图6D)平均气温的空间分布与年平均气温的空间分布基本一致,温较差分别为 $18.15, 21.29, 16.75^{\circ}\text{C}$ 。其中,春季和秋季平均气温与年平均气温差异较小,均在 1°C 以内。冬季(图6E)平均气温最高的地区在中游的张掖、临泽和中游的地区,其次为黑河流域的下游地区。

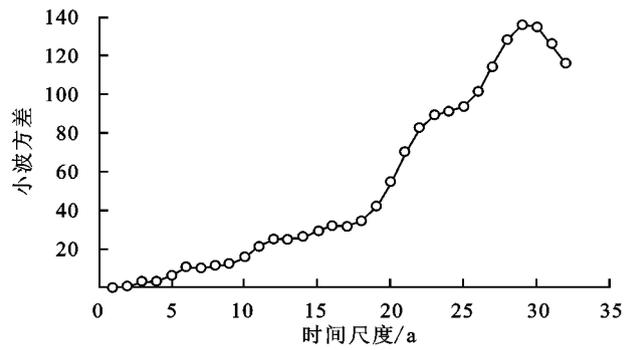
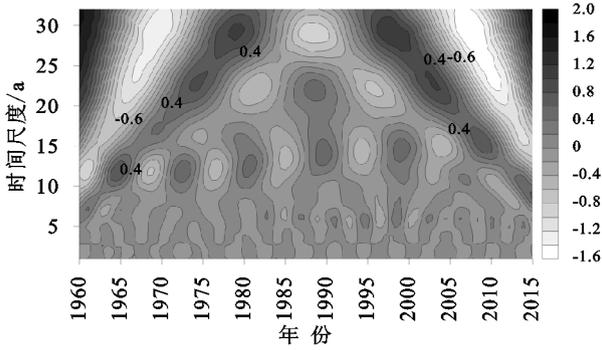


图 4 黑河流域年平均气温的小波系数实部等值线及小波方差

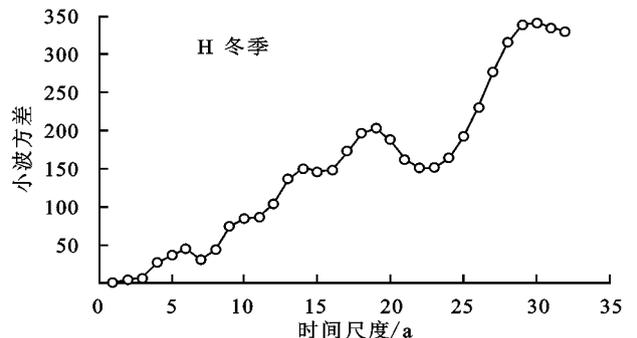
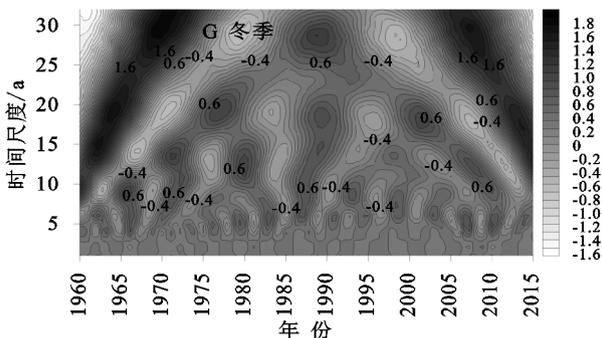
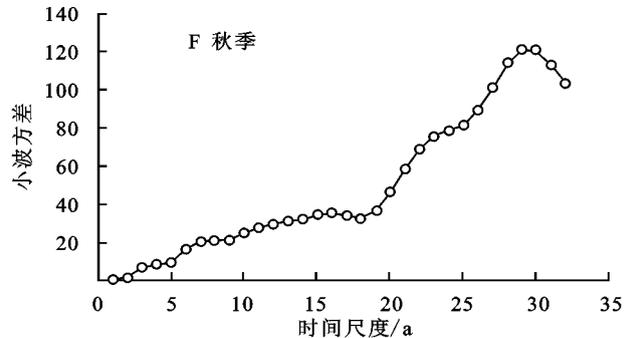
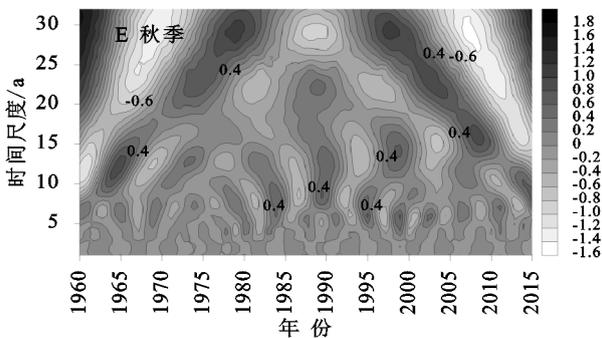
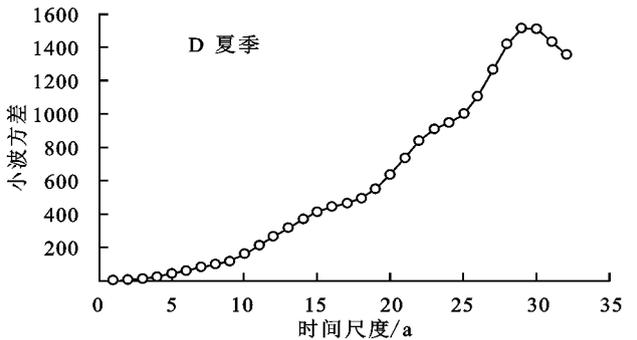
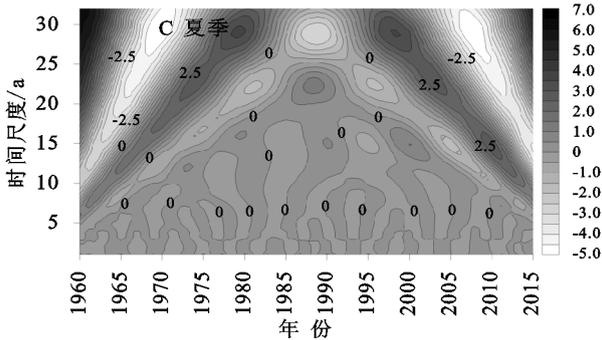
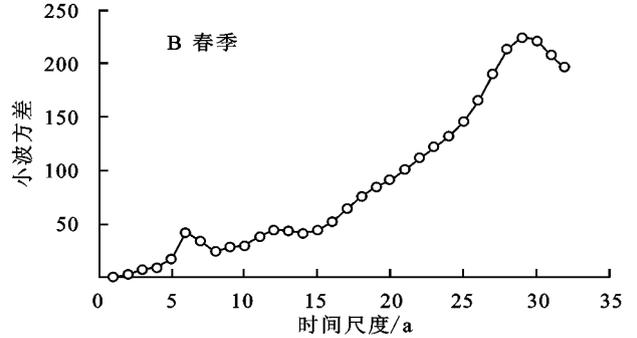
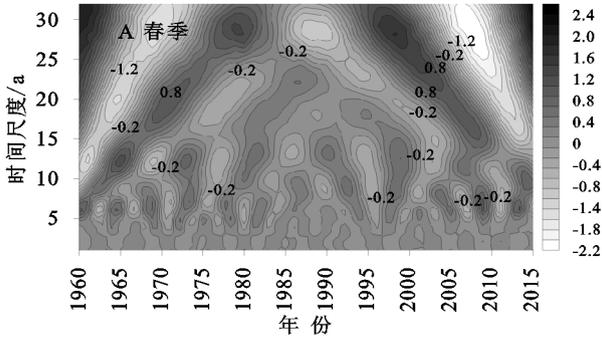


图 5 黑河流域各季节平均气温的小波系数实部等值线及其小波方差

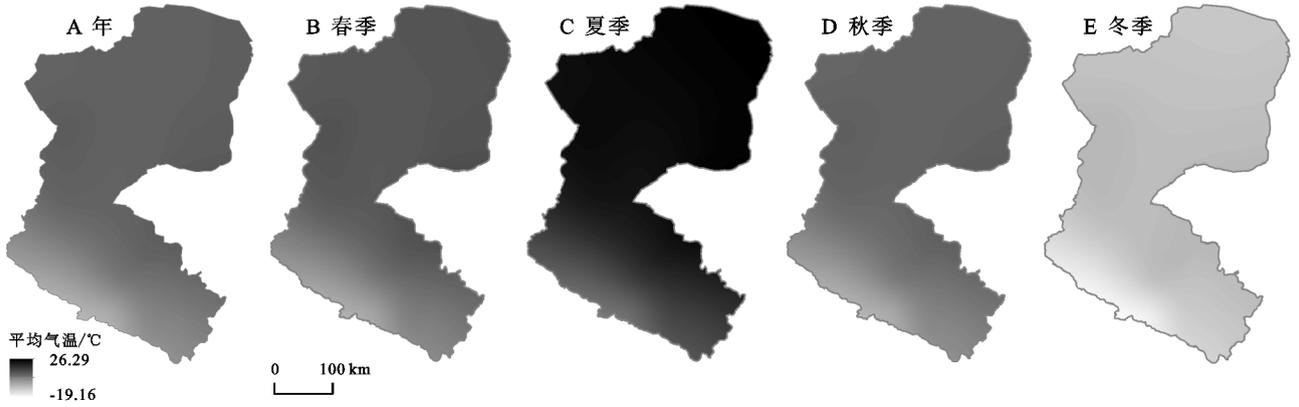


图 6 黑河流域年和四季平均气温空间分布

1960—2015 年,黑河流域年和四季的平均气温均呈上升趋势(图 7)。黑河流域年平均气温倾向率为 $0.354^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,所有站增温均较显著($p < 0.05$)。从空间分布上来看,整体上由西向东气温增幅越来越大,增长趋势最明显的区域为中游的民乐和下游的额济纳旗附近,气温倾向率为 $0.505^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;最小增幅出现在中游的肃南和酒泉附近,气温倾向率为 $0.242^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。黑河流域春季的平均气温倾向率为 $0.319^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,所有站点均增温显著($p < 0.05$)。总体上,由西南向东北,气温增幅越来越大,增长趋势最明显的区域为中游的临泽,气温倾向率为 $0.481^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其次为黑河流域下游地区;上游地区的生长趋势最小,气温倾向率为 $0.190^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。黑河流域夏季的平均气温倾向率为 $0.311^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,所有站点均增温显著($p < 0.05$),除中游地区的张掖、下游的西北和东北地区气温增幅较大外,其他地区的气

温增幅均较小。黑河流域秋季的平均气温倾向率为 $0.358^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,所有站点均增温显著($p < 0.05$)。整体来看,由西向东,气温增幅越来越大,增长趋势最明显的区域在中游的民乐和下游的额济纳旗附近,气温倾向率为 $0.551^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;增幅较小的地区为中游的肃南、高台和酒泉,气温倾向率为 $0.247^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。黑河流域冬季的平均气温倾向率为 $0.430^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,除黑河流域周边的马鬃山站外,其他站点均增温显著($p < 0.05$)。整体而言,由西向东,气温增幅越来越大,增长趋势最明显的区域在中游的民乐和下游的额济纳旗附近,气温倾向率为 $0.780^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;增幅较小的地区为中游的肃南和酒泉,气温倾向率为 $0.290^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。综上所述,冬季的平均气温倾向率最大且其气温变化趋势与年气温变化趋势基本一致,表明冬季对全年气温增温趋势的贡献最大,其次为秋季。

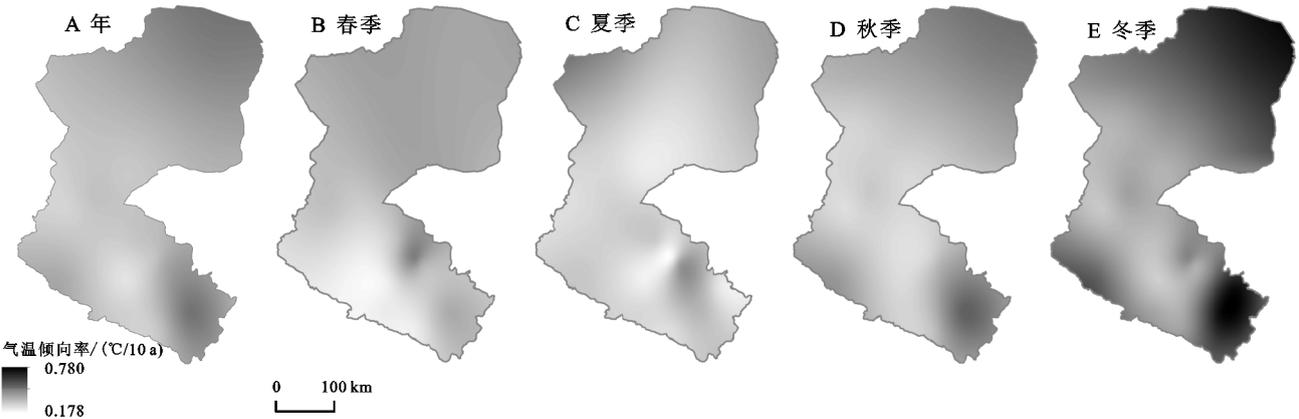


图 7 黑河流域年和四季平均气温的气温倾向率空间分布

3 结论

(1) 黑河流域近 56 a 逐年和四季平均气温均呈显著升高趋势,在季节尺度上,冬季增温幅度最大,秋季次之。除春、夏两季的最冷平均气温出现在 20 世纪 70 年代外,年和秋、冬气温的最低值出现在 60 年代。

(2) 黑河流域气温突变时间除春季发生在 21 世纪初,年和其他 3 季平均气温的突变则均发生在 20

世纪 90 年代,通过 0.01 显著性水平检验。

(3) 黑河流域年平均气温在 1960—2015 年发生了“升高→降低→升高”的 7 次冷暖交替变化,且黑河流域的气温在未来几年还会持续升高,29 a 时间尺度为黑河流域年气温变化的第 1 主周期;6 a 时间尺度为第 2 主周期。黑河流域春季、夏季和秋季平均气温在 26~32 a 时间尺度上与年平均气温变化一致,且均以 29 a 时间尺度为第 1 主周期。冬季平均气温在

26~32 a 时间尺度上则发生了“降低→升高→降低”的 7 次冷暖交替性变化。

(4) 黑河流域除冬季外,年和其他 3 季平均气温从下游到上游均随海拔增高而逐渐降低。除冬季黑河流域周边的马鬃山站外,其他时间各站均增温显著($p < 0.05$)。就不同季节而言,冬季对增温趋势的贡献最大,其次为秋季。

本文中气温变化的主周期和突变年份与赵一飞等^[32]的研究略有差异,其主要是由于研究所用的时间序列和气象站点数目不同所致。此外,黑河流域气温变化既受其地理位置和地形等因素的影响,也受人类活动影响,如土地利用方式的变化和温室气体的排放等^[33]。今后应增加对影响气温变化的因素的研究,以期对未来生态环境建设做出更好规划。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [3] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [4] 王鹏祥, 杨金虎, 张强, 等. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 649-656.
- [5] 殷雪莲, 代德彬, 褚超. 张掖市农业生产对气候变暖的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 115-120.
- [6] 宁惠芳, 林婧婧, 陈佩璇. 甘肃省气候暖干化与农业干旱灾害的联系[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 198-201.
- [7] 唐红玉, 杨小丹, 王希娟, 等. 三江源地区近 50 年降水变化分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 47-54.
- [8] 陈效迷, 彭嘉栋, 李慧敏. 内蒙古地区气温变化的季节和区域差异[J]. 地理研究, 2009, 28(1): 27-35.
- [9] 李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等. 我国横断山区 1960—2008 年气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 563-579.
- [10] 王少鹏, 王志恒, 朴世龙, 等. 我国 40 年来增温时间存在显著的区域差异[J]. 科学通报, 2010, 55(16): 1538-1543.
- [11] 尹云鹤, 吴绍洪, 陈刚. 1961—2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2147-2157.
- [12] 彭红春. 黑河流域生态系统动态模拟研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.
- [13] 宋鹏飞, 白利平, 王国强, 等. 黑河流域地下水埋深与气候变化对植被覆盖的影响研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2014, 50(5): 549-554.
- [14] 王庆峰, 张廷军, 吴吉春, 等. 祁连山区黑河上游多年冻土分布考察[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 19-29.
- [15] 李卓仑, 王乃昂, 李育, 等. 近 50 年来黑河出山径流对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 7-11, 16.
- [16] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 黑河中上游地区最高、最低气温非对称变化的时空特征分析[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2011, 32(1): 78-82.
- [17] 尹振良, 肖洪浪, 邹松兵, 等. 祁连山黑河干流山区水文模拟研究进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 438-446.
- [18] 高婵婵, 赵传燕, 王超, 等. 黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 117-121, 126.
- [19] 李传哲, 于福亮, 刘佳, 等. 近 20 年来黑河干流中游地区土地利用/覆被变化及驱动力定量研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 353-363.
- [20] 彭小梅, 肖生春, 程国栋, 等. 胡杨(*Populus euphratica*) 树轮记录的 20 世纪 40 年代前后黑河下游分水过程及其生态影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 206-215.
- [21] 赵锐锋, 姜朋辉, 赵海莉, 等. 黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4436-4449.
- [22] 别强, 强文丽, 王超, 等. 1960—2010 年黑河流域冰川变化的遥感监测[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 574-582.
- [23] 胡玥, 刘传琨, 卢粤晗, 等. 环境同位素在黑河流域水循环研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2014, 29(10): 1158-1166.
- [24] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 41-44.
- [25] 李占玲, 徐宗学. 黑河上游山区径流变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9): 51-56.
- [26] 刘进琪, 牛最荣. 内陆干旱区土地利用及覆被变化对水资源影响研究[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 2009.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [28] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [29] 柴小军, 齐广平. 黑河流域中上游张掖市 1960—2016 年气温和降水特征及突变分析[J/OL]. 水利规划与设计, 2019(4): 59-63[2019-11-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5014.TV.20190329.1535.034.html>.
- [30] 冯禹昊, 朱江玲. 基于 Morlet 小波的辽河径流量变化及其成因分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 208-215.
- [31] Thornton P E, Running S W, White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain[J]. Journal of Hydrology, 1997, 190(3): 214-251.
- [32] 赵一飞, 张勃, 张亚宁, 等. 近 50 a 来黑河流域气候变暖对农业生产的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 130-136.
- [33] 丁一汇, 张锦, 徐影, 等. 气候系统的演变及其预测[M]. 北京: 气象出版社, 2003.