

内蒙古地区 1960—2016 年气温和降水特征及突变

马梓策¹, 于红博^{1,2}, 张巧凤^{1,2}, 曹聪明¹

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022;

2. 内蒙古师范大学 遥感与地理信息系统重点实验室, 呼和浩特 010022)

摘要: 利用内蒙古地区 1960—2016 年 45 个气象站的逐月气温和降水量数据, 通过线性倾向估计、径向基函数插值法、累积距平、滑动 t 检验、Mann-Kendall 法和小波分析, 研究了内蒙古气温和降水量的时空变化特征和突变现象。结果表明: 内蒙古近 57 年来气温呈显著上升趋势, 明显高于全球年均温增温率, 达 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 且在 1987 年发生增温突变; 四季气温中, 春季和冬季均温升高对年均温上升贡献度最大; 年均温和季均温年代际变化呈明显的增暖趋势, 年均温、季均温在 1990—1999 年开始变暖; 内蒙古年均温和增温率二者分布规律相同, 即: 东部 < 中部 < 西部。内蒙古年降水量呈不显著上升趋势, 年降水量倾向率自西向东呈现出增—减—增的趋势, 降水量最少的年代为 2000—2009 年, 降水量最多的年代为 1990—1999 年, 降水量增率为 $0.47\text{mm}/10\text{a}$, 且在 1999 年发生由丰水到枯水、2011 年发生由枯水到丰水的两次突变; 两季降水量中, 内蒙古雨季降水量呈减少趋势, 非雨季降水量呈增加趋势, 且增加量和减少量均为东部 > 中部 > 西部。小波分析显示, 1960—2016 年内蒙古年均温变化以 15 a 的周期为最强; 年降水量变化以 11 a 的周期为最强。通过以上分析, 1960—2016 年内蒙古气候正在由暖干化向暖湿化转型。

关键词: 气候变化; 气温; 降水; 内蒙古

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0114-08

Characteristics and Abrupt Change of Temperature and Precipitation in Inner Mongolia Area Over the Period 1960—2016

MA Zice¹, YU Hongbo^{1,2}, ZHANG Qiaofeng^{1,2}, CAO Congming¹

(1. College of Geography Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolian Key Laboratory of Remote Sensing and Geography Information System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Based on monthly temperature and precipitation data from 45 meteorological stations in Inner Mongolia from 1960 to 2016, various methods such as Linear Tendency Estimation, Radial Basis Function Interpolation, Cumulative Anomaly, Sliding t-test, Mann-Kendall Method and Wavelet Analysis were used to explore the temporal and spatial variation characteristics related to the abrupt changes of temperature and precipitation in Inner Mongolia over a 57-year period. The results showed that during the 57 year period the temperature in Inner Mongolia had presented the significant upward trend, which was significantly higher than the global average annual temperature increase rate, and reached up to 0.38°C per decade. An abnormal temperature increase occurred in 1987. Of the four seasons, the average temperature rise in spring and winter contributed the most to the annual average temperature rise. The interannual variation of annual average and seasonal average temperature showed a significant warming trend, and the annual and seasonal average temperature began to increase in the period 1990—1999. The average annual temperature and the temperature increase rate in Inner Mongolia followed the same pattern which was the highest in the west, followed by the middle, and the lowest in the east. The annual precipitation showed no significant upward trend in Inner Mongolia. The annual precipitation propensity rate showed the increase-decrease-increase trend from west to east. The periods with the least amount of precipitation were found during the period

收稿日期: 2018-09-03

修回日期: 2018-09-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(41661009); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2017MS0408); 内蒙古自治区高等学校科研项目(NJZY17047)

第一作者: 马梓策(1995—), 男, 黑龙江哈尔滨市人, 硕士研究生, 研究方向: 生物地理学。E-mail: 454048154@qq.com

通信作者: 于红博(1977—), 女(满族), 内蒙古呼和浩特市人, 副教授, 博士, 研究方向: 生态建模及遥感图像处理。E-mail: yuboge2013@sohu.com

from 2000 to 2009, and the periods with the most precipitation were observed in the period 1990—1999. The precipitation increase rate was 0.47 mm per decade and there were two mutations. In 1999, precipitation changed from abundant water to lack of water and in 2011, from lack-of-water to abundant water. The precipitation in the rainy season showed the decreasing trend, and the increasing trend in the dry season. The amounts of increase and decrease were the greatest in the east, followed by the middle, and the lowest in the west. Based on the wavelet analysis, the average annual temperature change in Inner Mongolia from 1960 to 2016 was the strongest in the period of 15 years; the annual precipitation change was the strongest in the 11-year cycle. This study draws the conclusion that the climate was transforming from warm-drying to warming-humidification in Inner Mongolia from 1960 to 2016.

Keywords: climate change; temperature; precipitation; Inner Mongolia

全球气候变化已经受到国际社会的广泛关注。IPCC 第五次评估报告^[1]指出:全球地表温度持续上升,1880—2012 年全球均温已升温 $0.85 \pm 0.20^\circ\text{C}$,1885—1990 年均温和 2003—2013 年均温相差 $0.78 \pm 0.06^\circ\text{C}$,全球均温到 2016—2035 年期间相较于 1986—2005 年,可能增温 $0.3 \sim 0.7^\circ\text{C}$ 。大量研究结果表明,中国地区气候变化与全球气候变化的总体趋势相同,但是气候变化存在明显的区域差异^[2-5]。1961—2010 年中国气温增温率约为 $0.30^\circ\text{C}/10\text{ a}$,约是全球年均温增温率的 2.5 倍,而中国北方地区是近几十年来增温最显著的地区之一^[1-2]。

内蒙古位于中国北部,横跨东北、华北和西北三大区域,全区气候特征具有明显的区域差异,干旱半干旱地区约占全区面积的 80%,是最易受气候变化影响的地区之一^[6]。其次,气温上升和降水的变异性增强,极端干旱事件频繁发生,干旱区域进一步扩大,从而导致草地生产力下降,这对畜牧业的可持续发展显然不利,然而内蒙古蕴含着巨大的畜产资源,是中国最大的畜牧业养殖基地。近些年来,内蒙古气候变化已经展开了不少研究,研究结果显示内蒙古气温呈增加趋势,降水量呈减少趋势^[6-7]。大多数现有研究主要关注气候变化对草原典型植物的物候和生产力的影响、气候变化对农牧业的影响^[8-11]。这些研究对于正确认识内蒙古气候变化规律具有重要意义,然而多数研究均是针对单一气象要素,很少进行区域和季节的划分,此外选择的气象站数和气象要素数据集的长度也不尽一致。

本文以内蒙古 45 个气象站 1960—2016 年的月均温和月降水量数据为基础,采用线性倾向估计、累积距平、滑动 t 检验、Mann-Kendall 法和小波分析等方法,研究内蒙古气温和降水量变化特征和突变现象,并且讨论气候变化对内蒙古地区的影响。这对认识干旱半干旱地区气候变化规律,对保护和建设内蒙古生态环境具有非常重要的现实意义。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古地处中国北部,包括 9 个地级市和 3 个盟(呼和浩特、包头、乌海、赤峰、通辽、鄂尔多斯、呼伦贝尔、乌兰察布、巴彦卓尔、兴安、锡林郭勒和阿拉善),占地面积为 $11.83 \times 10^5\text{ km}^2$ 。地理位置位于 $37^\circ 24' - 53^\circ 23' \text{N}$, $97^\circ 12' - 135^\circ 02' \text{E}$,南北纵跨近 15° ,东西横跨近 38° 。内蒙古气候属于干旱、半干旱气候向东南沿海湿润、半湿润季风气候的过渡带,植被类型从东北到西南依次为森林、草原、荒漠,且该区大部分植被处于干旱、半干旱的农牧交错地区,生态环境十分脆弱,从而成为对全球变化响应最为敏感的地区之一。

1.2 数据来源及处理

气象数据为国家气象科学数据共享服务平台提供的内蒙古 1960—2016 年的月均温和月降水量数据。为保证各气象站点的数据同步性和具有较长的观测,建站时间为 1960 年以后的气象站以及缺测数据太多的气象站点被剔除,最终选取内蒙古地区 45 个气象站点(图 1)。

然后对 45 个气象站的月均温和月降水量数据按照区域、季节和年进行整理,气象站缺失数据采用邻近站点的观测数据用多元线性回归进行插补。根据相关文献^[12-14],按照东部(呼伦贝尔、通辽、赤峰和兴安盟)、中部(乌兰察布、包头、呼和浩特和锡林郭勒盟)和西部(乌海、巴彦卓尔、鄂尔多斯和阿拉善盟)对研究区进行划分;按照春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—翌年 2 月)对气温数据进行划分;按照雨季(6—8 月),其余月份为非雨季对降水量数据进行划分,并分区域对气温和降水量数据进行汇总,分析两种气象要素的年际变化趋势和突变特点。

1.3 研究方法

本文采用多种统计方法分析了内蒙古地区 45 个

气象站 1960—2016 年气温和降水量月、季和年尺度时间序列的变化趋势、突变特点和变化周期。使用方法介绍如下。

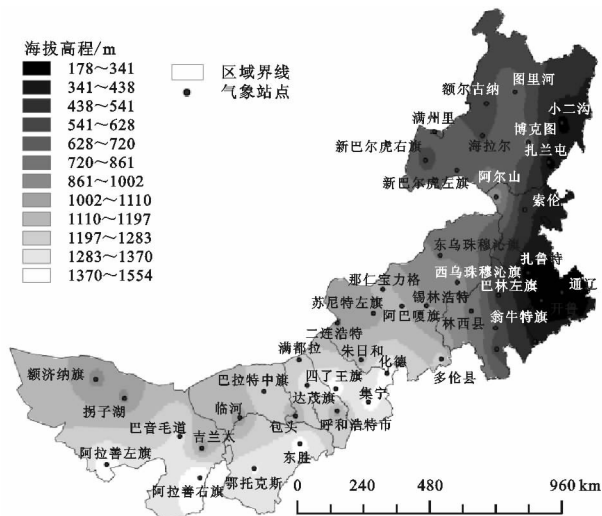


图 1 内蒙古自治区 45 个气象站点分布

趋势分析:采用线性倾向估计和累计距平分析来描述气温和降水的年际变化趋势,利用 SPSS 中的配对样本 T 检验,来判断其变化趋势的显著性。然后通过径向基函数插值法(RBF)来研究内蒙古地区气候变化的空间分异,采用该插值方法的主要原因是该方法比反距离权插值法(IDW)相对稳健,当采样点数据具有很大的确定性时,此方法误差较低;而 IDW 更多情况下适用于山区或者降水站点不是很密集的地区,与研究区实际情况不符,因此选择 RBF 更加适合该地区的研究^[15]。

突变监测:采用 Mann-Kendall 法、滑动 t 检验和累积距平对全区及 3 个子地区年均温和年降水量进行突变检测,3 种方法交叉验证能够提高其检验的精度。当其中一种方法与另外两种方法不一致时,以少数服从多数的原则确定突变年份;当 3 种方法检验结果均不一致时,取中间值作为其突变年份。其中,采用 Mann-Kendall 法和滑动 t 检验时,显著水平均设为 0.05。

变化周期:小波分析是傅里叶分析方法的突破性进展。在气象序列分析中,通过傅里叶变换可以显示出不同时间尺度的气象序列的相对贡献度,而小波变换不仅可以显示出气象序列变化的尺度,还可以显现出变化的时间和位置^[16]。利用 MATLAB 小波工具箱中的复 Morlet 小波分析来分析气温和降水量的周期变化规律,并在小波分析前进行边界效应的消除或减弱,以消除其带来的影响^[17]。

2 结果与分析

2.1 气温与降水量的年际变化

1960—2016 年内蒙古年均温呈增加趋势(表 1,

图 2),配对样本 t 检验结果为 $p<0.01$,说明其增加趋势显著。具体来说,1960—2016 年内蒙古年均温在 2.10~5.82℃,年均温在波动中逐渐上升,增温率为 0.38℃/10 a,明显高于全球年均温增温率 0.12℃/10 a^[1]。内蒙古四季均温均呈上升趋势,其中冬季气温增温率最大;夏季增温率最小。区域上,1960—2016 年东部、中部和西部年均温分别为 2.47℃,3.67℃和 7.91℃;3 个子地区与内蒙古年、四季均温变化一致,呈现上升趋势,其中,东部增温率最小;中部次之,西部增温率最大,主要由于西部冬季增温率最高,对年值增温贡献率最大。

研究区四季均温均呈显著上升趋势,冬季气温增温率最大,对全区年均温上升贡献度最明显,而夏季均温增温率最小,这与人类活动导致温室气体排放量增加息息相关^[13];而内蒙古东部春季气温增暖率高于冬季气温增暖率,其主要原因是与中部和西部相比,东部气温偏低,供暖结束时间和植物返青期推迟,森林的碳汇作用相对较晚^[18-19]。此外,研究区春季和冬季均温升高幅度较大,对研究区降雪日数、积雪日数和积雪深度产生了一定的影响^[20]。

表 1 内蒙古气温年值、四季平均值年际线性变化增温率

地区	年值/ (℃/10 a)	春季/ (℃/10 a)	夏季 (℃/10 a)	秋季/ (℃/10 a)	冬季/ (℃/10 a)
内蒙古	0.38	0.41	0.32	0.32	0.45
东部	0.33	0.42	0.32	0.26	0.32
中部	0.40	0.40	0.34	0.36	0.52
西部	0.42	0.38	0.31	0.39	0.59

注:表中值均为 $P(\text{sig})<0.01$ 极显著相关。

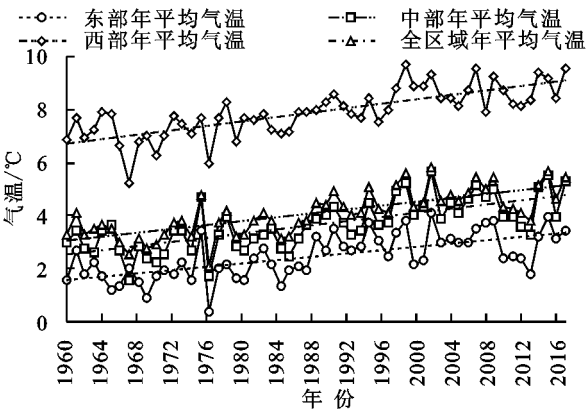


图 2 内蒙古年均温变化趋势

1960—2016 年内蒙古年降水量呈增加趋(表 2,图 3),配对样本 t 检验结果为 $p>0.05$,说明其增加趋势不显著。具体来说,1960—2016 年内蒙古年降水量在 216.30~431.33 mm,年降水量呈现波动上升趋势,倾向率为 0.47 mm/10 a。其中,东部、中部

和西部年均降水量分别为 383.89 mm,271.24 mm 和 162.49 mm;东部降水量呈减少趋势,中部、西部降水量均呈增加趋势,与李鹏飞等^[21]《近 50 a 中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析》研究结果相一致。此外,东部、中部和西部雨季降水量均呈减少趋势,对年降水量减少贡献度最大,其中东部减少量最大;中部次之;西部减少量最小;非雨季降水量均呈增加趋势,对年降水量增加贡献度最大,其中东部增加量最大;中部次之;西部增加量最小。

总之,研究区气候变暖,雨季降水量减少,对内蒙古地区雨季干旱化程度增加、生物多样性减少、草原退化和植被生产力下降等方面产生较大的影响;气候变暖,非雨季降水量增加,导致内蒙古地区植物春季物候期提前,秋季物候期推迟,生长季延长,生长季活动振幅增大^[8-11,22]。

2.2 气温与降水量的年代际变化

1960—2016 年内蒙古年代际变化呈现出明显的增温趋势(表 3),1960—1969 年、1970—1979 年和 1980—1989 年偏冷,但气温已经明显呈现上升趋势,1990—1999 年开始变暖,之后气温逐年升高,且增温

幅度不断增加,直到 2010—2016 年增温幅度略有下降。季节气温年代际变化与全年年代际变化呈现出相同的趋势,偏冷期与转暖的时间相一致。

表 2 内蒙古降雨量年值、季平均值年际线性变化率

参数	内蒙古/ (mm/10 a)	东部/ (mm/10 a)	中部/ (mm/10 a)	西部/ (mm/10 a)
年降雨量	0.47	-0.09	0.57	1.4
雨季降雨量	-3.44	-4.64	-3.58	-0.93
非雨季降雨量	3.91**	4.55*	4.14*	2.33

注: ** 为极显著相关, * 为显著相关,其余为不显著相关。

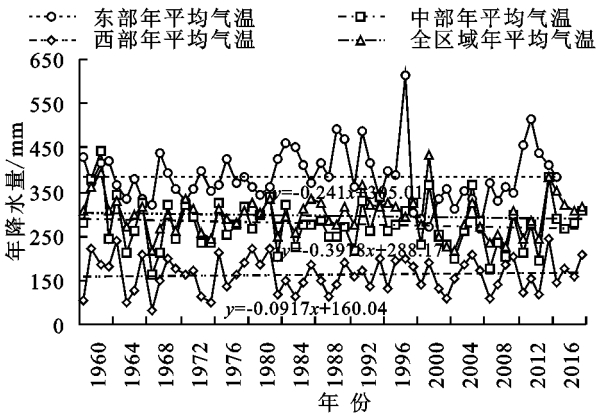


图 3 内蒙古年降雨量变化趋势

表 3 内蒙古季节、年气温累积距平年代际变化

季节	1960—1969 年	1970—1979 年	1980—1989 年	1990—1999 年	2000—2009 年	2010—2016 年
春季	-0.60	-0.88	-0.46	0.43	1.02	0.64
夏季	-0.52	-0.67	-0.28	0.20	0.71	0.79
秋季	-0.80	-0.68	-0.26	0.37	0.71	0.85
冬季	-1.64	-0.30	-0.40	0.97	0.96	0.61
全年	-0.81	-0.62	-0.33	0.49	0.83	0.62

1960—2016 年内蒙古降水量年代际变化趋势不明显(表 4),整体上呈现增加的趋势,其中 1960—1969 年、1980—1989 年和 2000—2009 年属于降水偏枯的年代,1970—1979 年、1990—1999 年和 2010—

2016 年属于降水偏丰的年代;降水最少的年代为 2000—2009 年,降水量最多的年代为 1990—1999 年。雨季降水量呈现出先增加后减少的趋势,而非雨季降水量呈现出先减少后增加的趋势。

表 4 内蒙古季节、年降水量距平年代际变化

季节	1960—1969 年	1970—1979 年	1980—1989	1990—1999 年	2000—2009 年	2010—2016 年
雨季/mm	3.73	3.38	1.42	28.11	-32.13	-6.44
非雨季/mm	-7.91	-1.52	-4.22	-1.20	-4.23	27.25
全年/mm	-4.18	1.86	-2.80	26.91	-36.36	20.81

2.3 气温与降水量的空间变化

采用 ArcGIS 中的 RBF 对内蒙古 45 个气象站的气温和降水量变化的年、季回归系数进行空间插值(图 4,图 5)。由图 4 可知,1960—2016 年内蒙古年均温与秋季、冬季气温增温率的空间变化规律一致:增温率自西向东递减;增温率较大的区域为中部和西部,升温中心

位于巴音毛道和临河;增温幅度较小的区域为东部,其中位于赤峰市和通辽市交界处的宝国图为增温率最小地区。春季、夏季增温率的空间变化特征为自东北向西南呈现波动下降的趋势,且增温率最小的区域均为赤峰市南部。总体来说,内蒙古年均温和增温率二者分布规律大致相同,即:东部<中部<西部。

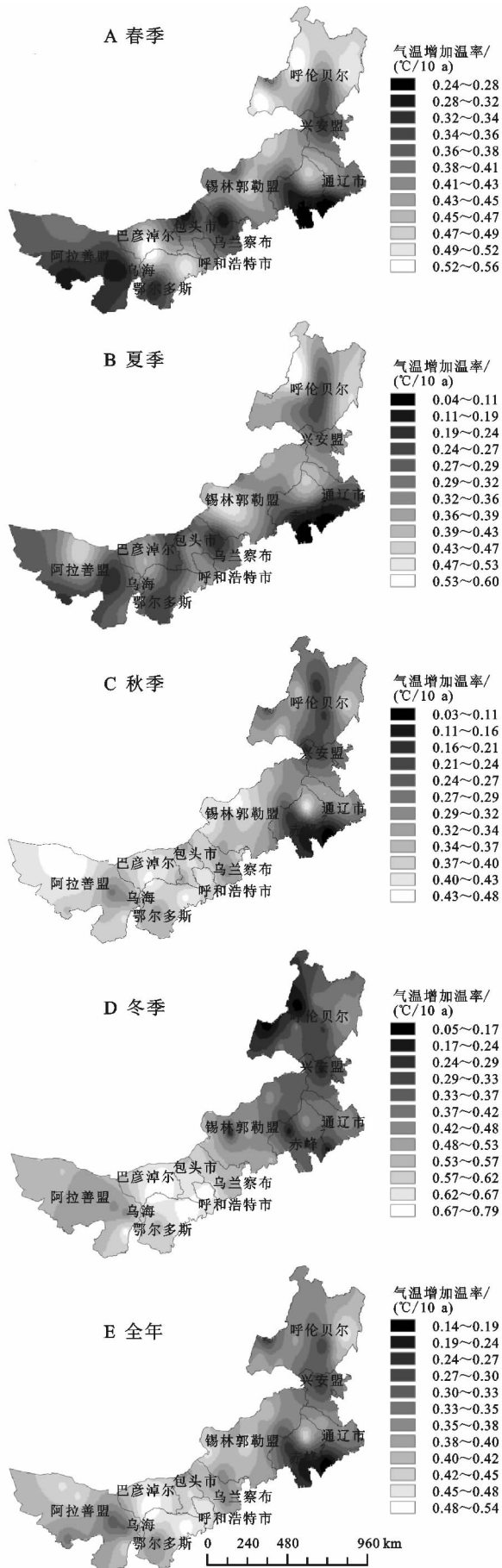


图 4 内蒙古季、年气温增温率的空间分布

由图 5 可知,1960—2016 年内蒙古年降水量与雨季降水量倾向率的空间变化规律基本一致:倾向率自西向东呈现出增—减—增的趋势;倾向率较大的区域为东部的呼伦贝尔和西部,降水量增加幅度最大的区域位于扎兰屯;倾向率较小的区域为东部的赤峰市和通辽市以及中部,其中降水量减少幅度最大的区域位于翁牛特旗。非雨季降水量倾向率没有明显的空间规律;倾向率较大的区域位于呼伦贝尔南部和中部偏南,降水量增加幅度最大的区域位于扎兰屯;倾向率较小的区域为呼伦贝尔北部,其中图 5B 的 45 个气象站降水量倾向率均为正值,降水量增加幅度最小的区域位于满洲里。

2.4 年平均气温和年降水量的突变检测

结合 Mann-Kendall 法、滑动 t 检验和累积距平 3 种突变监测方法的特点,最终确定内蒙古 3 个子地区年均温、四季均温、年降水量和两季降水量的突变年份(表 5, 表 6)。由表 5 可知,用 3 种方法对年均温进行突变检测,得到的年份较为吻合,全区年均温突变发生在 1987 年,3 个子地区中,西部年均温突变年份提前。四季气温突变年份中春季、冬季差异较大,夏季和秋季气温突变年份不尽相同:春季气温突变年份集中在十九世纪 80 年代末到 90 年代中期;夏季突变年份集中在 1993 年和 1996 年;秋季气温突变年份发生在 80 年代中期;冬季气温突变时间较早,集中在 80 年代初到 80 年代中期。

表 5 内蒙古 3 个子地区年均温和四季气温突变年份

区域	全年	春季	夏季	秋季	冬季
内蒙古	1987 年	1991 年 **	1993 年	1987 年	1984 年 **
东部	1987 年 *	1988 年 *	1993 年	1987 年	1986 年 *
中部	1987 年 *	1993 年 **	1993 年 *	1986 年 *	1981 年 *
西部	1986 年 *	1996 年	1996 年 *	1986 年 *	1985 年 *

注: ** 表示 3 种突变检测结果均不同; * 表示两种突变检测结果相同;其他均为 3 种突变检测结果相同。

与气温不同,内蒙古 3 个子地区年降水量和四季降水量均发生由丰水到枯水、枯水到丰水的两次突变(表 6)。由表 6 可知,内蒙古年降水量在 1998—1999 年发生由丰水到枯水、2011—2012 年发生由枯水到丰水的两次突变,该地区降水量的突变年份区域差异比较明显:其中,东部和中部的由丰水到枯水的突变年份与全区一致,西部相对于全区突变年份提前;而西部枯水到丰水的突变年份与全区一致,东部和中部相对于全区突变年份提前。两季降水量突变年份中,雨季降水量由丰水到枯水的突变年份与全区年降水量一致,而枯水到丰水的突变年份除东部外,其余相对于全区均提前;非雨季降水量的两次突变均与全区年降水量突变年份差异较大。

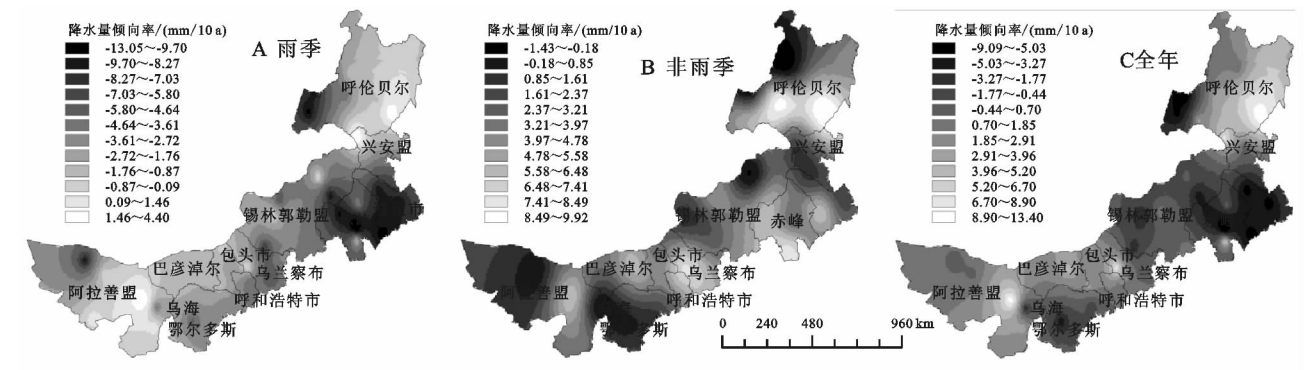


图 5 内蒙古年、季降水量倾向率的空间分布

表 6 内蒙古 3 个子地区年降水量和四季降水量突变年份

区域	全年		雨季		非雨季	
	丰水到枯水	枯水到丰水	丰水到枯水	枯水到丰水	丰水到枯水	枯水到丰水
内蒙古	1998—1999 年*	2011—2012 年*	1998—1999 年	1971—1972 年*	1994—1995 年**	2009—2010 年
东部	1998—1999 年	1982—1983 年*	1998—1999 年	1982—1983 年	1977—1978 年**	1999—2000 年*
中部	1999—2000 年*	1989—1990 年*	1999—2000 年*	1965—1966 年*	1961—1962 年*	1969—1970 年*
西部	1961—1962 年*	2011—2012 年*	1998—1999 年*	1972—1973 年*	1971—1972 年**	2000—2001 年*

注: ** 表示 3 种突变检测结果均不同; * 表示两种突变检测结果相同;其他均为 3 种突变检测结果相同。

2.5 气温和降水的周期变化分析

图 6A 为 1960—2016 年内蒙古年均温小波变换系数的实部等值线图,正值代表气温偏高,负值代表气温偏低,小波系数为 0 时,对应着突变点。由图 6A 可知,内蒙古经历了 5 次冷暖交替过程。由图 6B 可知,年均温的小波方差在 2 a,6 a,10 a 和 15 a 处存在极大值,可以判断内蒙古年均温变化以 15 a 的周期为最强,此外,还存在 2 a,6 a 和 10 a 的尺度变化周期。

提取最强周期 15 a 的小波系数进行作图,得到内蒙古年均温变化的主周期小波系数过程线图 6C。由图 6C 可知,内蒙古年均温相对偏高的年份有:1960—1962 年、1968—1973 年、1979—1982 年、1988—1991 年、1997—2001 年、2006—2010 年和 2016 年;年平均气温相对偏低的年份为:1963—1967 年、1974—1978 年、1983—1987 年、1992—1996 年、2002—2005 年和 2011—2015 年。内蒙古年均温的突变年份为:1962—1963 年、1967—1968 年、1973—1974 年、1978—1979 年、1982—1983 年、1987—1988 年、1991—1992 年、1996—1997 年、2001—2002 年、2005—2006 年、2010—2011 年、2010—2011 年和 2015—2016 年。结合前述 3 种突变检测方法,确定内蒙古年均温的最终突变年份为 1987 年。

图 7A 为 1960—2016 年内蒙古年降水量小波变换系数的实部等值线图,正值代表降水量偏多,负值代表降水量偏少,小波系数为 0 时,对应突变点。由图 7A 可知,内蒙古经历了 8 次丰枯交替过程。由图 7B 可知,年降水量小波方差图显示,在 2 a,8 a 和 11 a 处存在极大值,可以判断内蒙古年降水量变化以 11 a 的周期为最强,此外,还存在 2 a 和 8 a 的尺度变化周期。

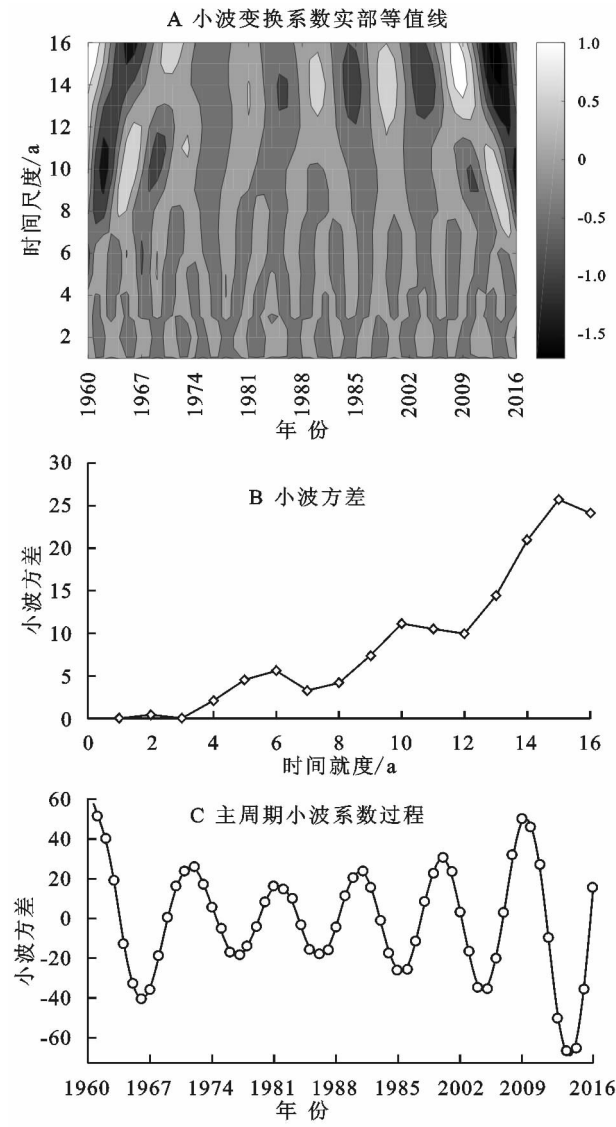


图 6 内蒙古年平均气温小波分析

提取最强周期 11 a 的小波系数进行作图,得到内蒙古年降水量变化的主周期小波系数过程线图 7C。由图 7C 可知,内蒙古年降水量相对偏丰的年份为:1960—1961 年、1966—1971 年、1976—1979 年、1983—1986 年、1990—1992 年、1997—1999 年、2004—2006 年和 2011—2014 年;年降水量相对偏枯的年份为:1962—1965 年、1972—1975 年、1980—1982 年、1987—1989 年、1993—1996 年、2000—2003 年、2007—2010 年和 2015—2016 年。内蒙古年降水量突变年份为:1961—1962 年、1965—1966 年、1971—1972 年、1975—1976 年、1979—1980 年、1982—1983 年、1986—1987 年、1989—1990 年、1992—1993 年、1996—1997 年、1999—2000 年、2003—2004 年、2006—2007 年、2010—2011 年和 2014—2015 年。结合前述 3 种突变检测方法,确定内蒙古年降水量最终突变年份为 1999 年和 2011 年。

3 讨论与结论

3.1 讨论

1960—2016 年内蒙古年均温呈显著上升趋势,年均温以 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率上升,该结果略低于以往研究气温增温率估计值^[6-7],其主要原因可能是不同研究选取的气象站点数不同,选取的气象要素序列的时间段也不一致。

内蒙古年降水量呈不显著上升趋势,年降水量以 $0.47\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率上升,该结果与以往研究结果降水量变化趋势相反,其主要原因可能是选取的气象站点数不同,选取的气象要素序列的时间段也不同^[6-7];从表 4 可以看出,2009 年以前年降水量总体呈减少趋势,2009 年之后年降水量有明显的增加趋势;此外,为进一步证实本研究结果的可靠性,对 1960—2016 年以 10 a 为尺度逐年进行了线性回归分析,发现 1960—2014 年总体呈减少趋势,但是 1960—2016 年总体呈现缓慢增加趋势,可能与近几年的降水有了明显变化的缘故有关。东部降水量呈减少趋势,中部、西部降水量均呈增加趋势,与李鹏飞^[21]等《近 50 a 中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析》研究结果相一致。

气候变暖使得内蒙古自然环境发生了变化。蒸发蒸腾量上升,蒸发蒸腾量远大于降水量,导致湿地整体萎缩和退化^[23]。此外,气候变暖导致黄河内蒙古段开封期提前、封河期推后、凌汛期缩短^[24]。随着气候变暖,内蒙古干旱化程度增加,导致内蒙古荒漠化不断扩大^[25]。本研究主要对 1960—2016 年内蒙古气温和降水量变化特征和突变现象进行详细分析,不仅对深入了解中国北方干旱半干旱地区气候因子变化规律有一定的科学借鉴意义,而且对内蒙古地区生态环境的保护、农牧业可持续性发展和水资源的保护具有一定实践指导意义。

3.2 结论

(1) 内蒙古年均温呈显著上升趋势,增温率自西向东递减,全区增温率为 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,明显高于全球年均温增温率 $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;四季均温也呈显著增加趋势,并且春季和冬季增温率较大,对年均温升高贡献度最大;年均温和增温率二者分布规律相同,即:东部<中部<西部;内蒙古年均温和季均温年代际变化也呈现出增暖的趋势,年均温和季均温均在 1990—1999 年开始变暖。内蒙古年降水量呈不显著增加趋势,倾向率自西向东呈现出增—减—增的趋势,降水

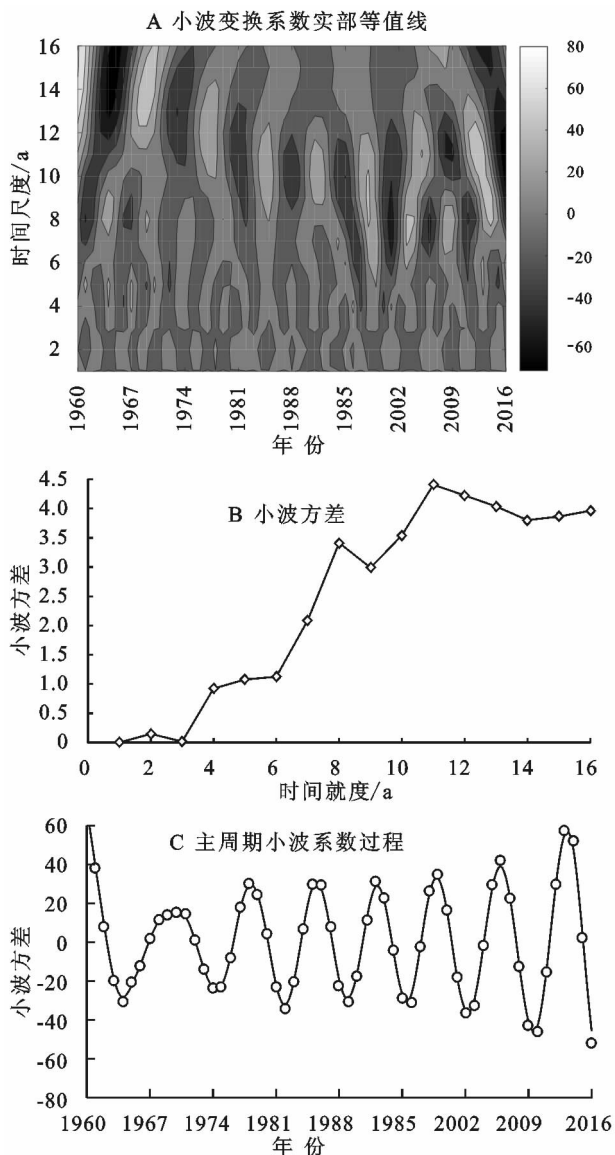


图 7 内蒙古年降水量小波分析

量最少的年代为 2000—2009 年,降水量最多的年代为 1990—1999 年;且中部和西部均呈不显著增加趋势,而东部呈不显著减少趋势;3 个子地区雨季降水量均呈减少趋势,而非雨季降水量均呈增加趋势,且增加量和减少量均为东部>中部>西部。

(2) 内蒙古年均温突变年份为 1987 年;东部和中部年均温突变年份为 1987 年,西部突变年份为 1986 年,突变提前。内蒙古年降水量在 1998—1999 年发生由丰水到枯水的突变,在 2011—2012 年发生由枯水到丰水的突变;其中东部年降水量突变发生于 1998—1999 年和 1982—1983 年,中部发生于 1999—2000 年和 1989—1990 年,西部发生于 1961—1962 年和 2011—2012 年。

(3) 内蒙古增温幅度较大的地区为巴音毛道和临河,增温幅度较小的地区为宝国图。内蒙古年降水量增加较为明显的地区为扎兰屯,年降水量减少较为明显的地区为翁牛特旗。

(4) 小波分析结果表明,内蒙古年均温变化以 15 a 的周期为最强,还存在 2 a、6 a 和 10 a 的尺度变化周期;内蒙古年降水量变化以 11 a 的周期为最强,还存在 2 a 和 8 a 的尺度变化周期。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 史培军,孙劭,汪明,等. 中国气候变化区划(1961—2010 年)[J]. 中国科学:地球科学,2014,44(10):2294-2306.
- [3] 韩翠华,郝志新,郑景云. 1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展,2013,32(6):887-896.
- [4] 范泽孟,岳天祥,陈传法,等. 中国气温与降水的时空变化趋势分析[J]. 地球信息科学学报,2011,13(4):526-533.
- [5] 张晶晶,陈爽,赵昕奕. 近 50 年中国气温变化的区域差异及其与全球气候变化的联系[J]. 干旱区资源与环境, 2006,20(4):1-6.
- [6] 尤莉,沈建国,裴浩. 内蒙古近 50 年气候变化及未来 10—20 年趋势展望[J]. 内蒙古气象,2002(4):14-18.
- [7] 包刚,吴琼,阿拉腾图雅,等. 近 30 年内蒙古气温和降水量变化分析[J]. 内蒙古师范大学学报:自然科学汉文

版,2012,41(6):668-674.

- [8] 侯琼,郭瑞清,杨丽桃. 内蒙古气候变化及其对主要农作物的影响[J]. 中国农业气象,2009,30(4):560-564.
- [9] 顾润源,周伟灿,白美兰,等. 气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响[J]. 生态学报,2012,32(3):767-776.
- [10] 陈辰,王靖,潘学标,等. 气候变化对内蒙古草地生产力影响的模拟研究[J]. 草地学报,2013,21(5):850-860.
- [11] 陈素华,宫春宁,苏日那. 气候变化对内蒙古农牧业生态环境的影响[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(4):155-158.
- [12] 陈少勇,林纾,王劲松,等. 中国西部雨季特征及高原季风对其影响的研究[J]. 中国沙漠,2011,31(3):765-773.
- [13] 孟秀敬,张士锋,张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(11):1482-1492.
- [14] 那音太. 基于 SPI 指数的近 50 a 内蒙古地区干旱特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(5):161-166.
- [15] 赵冰雪王,程东亚. 安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征[J]. 水土保持研究,2017,24(3):141-145.
- [16] 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.
- [17] 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报,2013,33(2):519-531.
- [18] 王奉安. 森林的碳汇作用[J]. 环境保护与循环经济, 2010,30(5):26-27.
- [19] 苗百岭,梁存柱,韩芳,等. 内蒙古主要草原类型植物物候对气候波动的响应[J]. 生态学报,2016,36(23):7689-7701.
- [20] 孙晓瑞,高永,丁延龙,等. 内蒙古积雪时空分布特征及其与气候因子的相关性[J]. 内蒙古林业科技,2017,43(2):10-15.
- [21] 李鹏飞,孙小明,赵昕奕. 近 50 年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012,26(7):57-63.
- [22] 李政海,鲍雅静,张靖,等. 内蒙古草原退化状况及驱动因素对比分析:以锡林郭勒草原与呼伦贝尔草原为研究区域[J]. 大连民族学院学报,2015,17(1):1-5.
- [23] 郑颖,刘华民,刘东伟,等. 内蒙古湿地空间分布格局及动态变化研究[J]. 环境科学与技术,2016,39(12):1-16.
- [24] 顾润源,周伟灿,白美兰,等. 气候变化对黄河内蒙古段凌汛期的影响[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1751-1756.
- [25] 陈宝瑞,辛晓平,朱玉霞,等. 内蒙古荒漠化年际动态变化及与气候因子分析[J]. 遥感应用,2007(6):39-44.