

毛乌素沙地 1960—2018 年气候变化特征及影响因子分析

方欣¹, 刘小慷^{1,2}, 岳大鹏¹

(1.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2.陕西师范大学 行星风沙科学研究院, 西安 710119)

摘要: 为了解毛乌素沙地近年气候变化特征, 以期为区域沙漠化防治和灾害预警提供参考, 基于毛乌素沙地及其周围邻近地区 10 个气象站点 1960—2018 年的逐月气温和降水资料, 采用线性倾向估计、Anusplin 空间插值、Mann-Kendall 突变检验、Morlet 小波分析、R/S 分析和 Pearson 相关分析等方法对毛乌素沙地近 59 a 的气候变化特征、未来气候变化趋势和主要影响因素进行了探究。结果表明: (1) 毛乌素沙地近 59 a 的年平均气温呈显著上升趋势, 增温速率达到 $0.35^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。其约在 1996 年发生突变, 主要存在 4 a 左右的短变化周期, 且增温速率随地区海拔的升高而加快。 (2) 毛乌素沙地近 59 a 的年降水变化速率为 $2.88\text{ mm}/10\text{ a}$, 夏季降水增速较快, 但变化趋势均不显著且无明显的降水突变时间点和显著的振荡周期。 (3) 未来毛乌素沙地的年、季节平均气温和秋季降水均呈现持续性较强的上升趋势。总体而言, 毛乌素沙地的气候呈现暖湿化趋向, 厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)事件对其冬季气温影响较大, 北极涛动(AO)和北大西洋涛动(NAO)对其冬夏季节降水影响较显著。

关键词: 气象学; 气候变化; M-K 突变检验; 毛乌素沙地; ENSO 事件

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)02-0163-07

Analysis of Climate Change Characteristics and Influencing Factors in Mu Us Sandy Land from 1960 to 2018

FANG Xin¹, LIU Xiaokang^{1,2}, YUE Dapeng¹

(1.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2.Planetary Aeolian Research Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to study the characteristics of climate change in Mu Us Sandy Land and provide references for regional desertification prevention and disaster warning, based on the monthly temperature and precipitation data from 1960 to 2018 of 10 meteorological stations in Mu Us Sandy Land and its surrounding areas, the climate variation characteristics, the future trend and main influencing factors of climate change in Mu Us Sandy Land were explored by the method of linear tendency estimate, Anusplin spatial interpolation, Mann-Kendall mutation test, Morlet wavelet analysis, R/S analysis and Pearson correlation analysis. The results indicated that: (1) the annual average temperature of Mu Us Sandy Land showed a significant upward trend in recent 59 years, with an annual warming rate of $0.35^{\circ}\text{C}/\text{decade}$; the abrupt time point of annual average temperature was about in 1996 and it fluctuated in 4-year cycle; in addition, the increase rate of the temperature accelerated with the increase of altitude; (2) in recent 59 years, the change rate of annual precipitation in Mu Us Sandy Land was $2.88\text{ mm}/\text{decade}$, and the summer precipitation increased rapidly; however, these variation trends were not significant and there were no obvious abrupt time points of precipitation and significant oscillation periods; (3) in the future, both the average temperature of annual and each season will have a tendency to continuously increase, so does the autumn precipitation. In general, the climate in Mu Us Sandy Land is warming and getting wet. And the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events had a significant effect on the average temperature of winter in Mu Us Sandy Land, while the Arctic Oscillation (AO) and the North Atlantic Oscillation (NAO) had a relatively remarkable effect on the precipitation of winter and summer in Mu Us Sandy Land.

收稿日期: 2020-12-07

修回日期: 2021-03-02

资助项目: 国家自然科学基金(41901094, 41930641)

第一作者: 方欣(1999—), 女, 陕西商洛人, 硕士研究生, 研究方向为环境演变。E-mail: fangxin@snnu.edu.cn

通信作者: 刘小慷(1989—), 男, 陕西榆林人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事风沙地貌和环境演变研究。E-mail: xiaokangliu@snnu.edu.cn

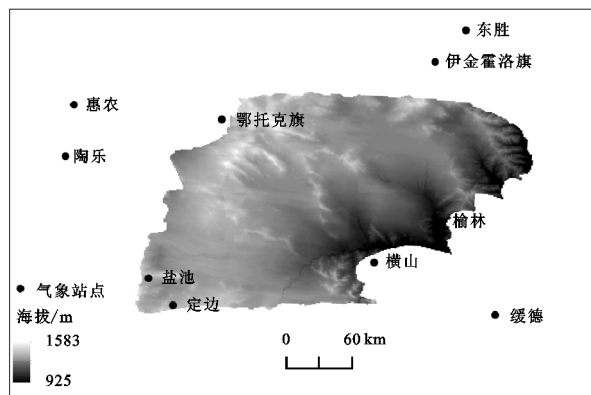
Keywords: meteorology; climate change; M-K mutation test; Mu Us Sandy Land; ENSO events

地球是人类赖以生存栖息的家园,但近年其环境温度不断攀升导致各类气象灾害频频发生,这给人类的生命安全、生产生活等各方面带来一系列问题与挑战。IPCC 第 5 次报告指出,在 1983—2012 年期间,北半球的气温可能达到近 1 400 a 以来的气温最高值^[1]。国内外学者在此背景下从不同时空尺度视角对全球各区域的气候变化情况进行分析研究,研究发现:亚太地区的极端气温事件与近期平均温度上升之间存在着季节性和日不对称性的变化^[2];伊朗近 50 a 的平均气温不断上升,降水量逐渐减少^[3];马尔马拉地区在 1975—2006 年的春夏秋季节气温显著上升^[4];半干旱区博茨瓦纳的降雨量与南方涛动指数(SOI)呈正相关,与海表温度(SSTs)呈负相关^[5]。中国近 59 a 的气候也呈现暖湿化趋势,年平均气温的增速达到 0.278℃/10 a,其中北方地区的增温幅度大于南方地区的增温幅度^[6];西北地区近 52 a 的年降水量呈略微增加趋势,增速为 1.73 mm/10 a^[7];蒙古高原近 54 a 的降水整体呈减少趋势,其中夏秋季节降水不断减少,而冬春季节降水逐渐增加^[8];罗布泊地区的气温和降水均呈现增加趋势,冬季温度增速最快,夏季降水增幅最为显著^[9]。综上可见,中国整体的近现代气候变化与全球气候变化方向保持一致,但区域内部的气候变化却存在着明显的时空差异性特征。

毛乌素沙地地处东亚夏季风的尾闾区,对全球气候变化响应较为敏感,且其又位于北方农业区与牧区交错过渡地带,南部与黄土高原相连,生态环境脆弱^[10],是研究气候变化的理想区域。有研究显示毛乌素沙地是世界沙漠暴雨中心^[11],这意味着毛乌素沙地内部的降水虽多,但大都以短时强降水的方式呈现,变率大且不稳定,因此十分有必要对其近几十年的气候变化特征进行分析研究。目前与毛乌素沙地气候有关的研究,一方面集中于对区域气候变化与沙漠化、沙漠植被关系的研究^[12-13],另一方面集中于对区域古气候或局部区域气候变化特征的研究^[14-16]。相对来说,对毛乌素沙地整个区域近现代气候变化特征进行系统讨论的研究较少。因此本文选取毛乌素沙地及其周边地区 10 个气象站点 1960—2018 年的逐月气温和降水资料,运用线性倾向估计、Anusplin 插值、Mann-Kendall 突变检验、Morlet 小波分析和 R/S 分析等方法对沙地近 59 a 的气候变化特征和未来气候变化趋势进行分析预测,以期得到较为详细系统的毛乌素沙地气候变化规律,为区域土地沙漠化防治、气候灾害预警提供科学依据。

1 研究区域概况

毛乌素沙地主体包括内蒙古自治区鄂尔多斯市南部和陕西省榆林市北部(37°30′—39°22.5′N,107°20′—110°30′E),总面积约 4 万 km²(图 1)。且其处于鄂尔多斯高原向黄土高原过渡的区域,地势呈现自西北向东南倾斜的趋势,整体海拔处于 1 300~1 600 m。此外,沙区位于北半球中纬度西风带,在我国四大沙区中属于受东亚夏季风影响较大的东部沙区。区域多年的平均温度为 6.0~8.5℃,多年平均降水量自东南部(440 mm)向西北部(250 mm)呈现梯度式递减,区域内 70%以上的降水由 6—9 月的夏季风所带来^[17]。



注:图中 DEM 数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。

图 1 毛乌素沙地地形及气象站点分布

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本文所使用的各气象站点的数据资料均源于中国气象科学数据共享服务网。考虑到数据时间序列的完整性,剔除掉缺测时段较多的气象站点,最终选取了毛乌素沙地及其周围邻近地区 10 个气象站点(榆林、绥德、横山、定边、东胜、伊金霍洛旗、盐池、惠农、陶乐、鄂托克旗)的逐月降水和平均气温数据。另外,对于这 10 个气象站点中的缺测数据,运用区域内多年同月平均值进行插补。

本文所使用的北极涛动指数(AO)、北大西洋涛动指数(NAO)和表征厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)事件的各个指标数据均来自于美国国家海洋大气局(NOAA)。选取用于表征 ENSO 事件的指标有 Niño3.4 区(5°S—5°N,170°—120°W)的海表温度距平指数(SSTA)、多变量厄尔尼诺指数(MEI)和南方涛动指数(SOI)。对于研究区域的季节划分,采用气象季节划分法,即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,

9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。

2.2 研究方法

本文运用线性倾向估计法^[18]研究毛乌素沙地年、季节气温和降水的变化趋势;运用 Anusplin 模型进行空间插值^[19-20]以得到毛乌素沙地气温和降水多年变化的空间分布格局;运用 Mann-Kendall 突变检验法^[18]分析毛乌素沙地气温和降水的突变情况,同时辅以累积距平法^[18]和滑动 t 检验法^[18]对突变点进行核实检验;采用 Morlet 连续小波分析法^[21]研究毛乌素沙地气温和降水的周期变化状况;运用 R/S 分析法^[21]预测毛乌素沙地气温和降水的未来变化趋势;最后基于 Pearson 相关分析法^[18]分析毛乌素沙地近几十年气温和降水变化的影响因素。

本文在运用 Anusplin4.2 软件对年平均气温变化率和年降水变化率数据进行插值时,使用的是三变量局部薄盘光滑样条函数,即自变量为经度和纬度,协变量为海拔高度。此外,插值中所使用的 DEM 数据分辨率为 1 km×1 km,样条次数设置为 3。

3 结果与分析

3.1 气温和降水的变化趋势

根据毛乌素沙地及其周围邻近地区气象站点的数据计算得出,在 1960—2018 年,毛乌素沙地的多年平均温度为 8.27℃,增温速率为 0.35℃/10 a,其略高

于黄土高原地区的增温速率(0.31℃/10 a)^[22],略低于内蒙古地区的增温速率(0.38℃/10 a)^[23]。在 20 世纪 60 年代—80 年代中期,毛乌素沙地年平均温度的累积距平值不断下降,最低温度值出现在 1967 年,为 6.71℃,此时沙地气候偏冷。但自 90 年代中期以来,特别是在近 10 a,沙地气候迅速转暖,且在 1998 年,沙地的年均温达到最高值,为 9.76℃,详见图 2A。而同在 1998 年,距毛乌素沙地较近的内蒙古^[23]、山西^[24]也出现了有观测以来的温度最高值。

毛乌素沙地的季节增温速率分别为 0.40℃/10 a(春季),0.21℃/10 a(夏季),0.29℃/10 a(秋季)和 0.48℃/10 a(冬季),均通过了 0.01 显著性水平检验,详见表 1。沙地四季增温显著,尤其是在冬春季节,增温速率非常快,明显地高于中国中部地区[春季(0.29℃/10 a)、冬季(0.28℃/10 a)]的增温速率^[25]。这与全球的“暖冬化”趋势是基本保持一致的。

在 1960—2018 年,毛乌素沙地的多年平均降水量为 325.07 mm,年降水量的变化速率为 2.88 mm/10 a(未通过 0.05 显著性水平检验),整体呈现略微的增加趋势,但增加趋势并不显著。自 20 世纪 80 年代—21 世纪初,毛乌素沙地的年降水量累积距平值不断波动下降,沙地处于偏干旱时期,年降水量谷值出现于 1965 年,为 159.36 mm。但自 2010 年以来,沙地的降水开始明显增多,气候开始转湿,详见图 2B。

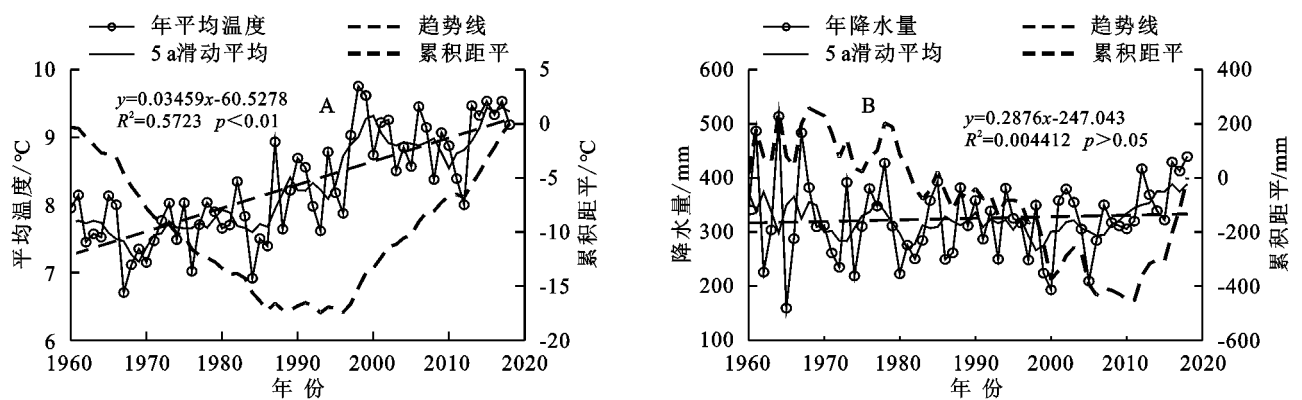


图 2 毛乌素沙地年平均气温和年降水量变化趋势

毛乌素沙地四季降水量的变化速率分别为-0.02 mm/10 a(春季),1.68 mm/10 a(夏季),0.67 mm/10 a(秋季)和 0.54 mm/10 a(冬季),其中夏季降水的增速最快,但也未通过 0.05 显著性水平检验,详见表 1。可见,沙地的季节降水变化趋势并不显著。

近 59 a,毛乌素沙地年平均温度的变化速率处于 0.10~0.65℃/10 a 范围内。其中沙地东北部和西北部地区的增温速率较快,特别是在沙地东北部的神木地区,增温速率最快,而在沙地的中部和南部地区,增

温速率相对较慢。此外,毛乌素沙地的温度变化速率随地区的海拔升高而加快。毛乌素沙地近 59 a 的年降水变化速率处于-1.03~16.25 mm/10 a 范围内,其中沙地中部的大部分地区年降水呈增加趋势,增加速率较快,但西北部和东南部地区的年降水变化并不明显,且沙地的年降水变化速率与地区海拔无明显相关性,详见图 3。

3.2 气温和降水的突变性检验

根据毛乌素沙地年平均气温的 M-K 突变检验结

果来看(图 4A),UF 和 UK 时间序列曲线出现交点的时间为 1994 年,且此交点处于两条 0.05 置信水平线间,可认定其为突变点。在 1978—1994 年,UF 序列曲线值大于 0,毛乌素沙地的年平均气温缓慢上升,自 1994 年之后,UF 序列曲线值逐渐开始超过 0.05 置信水平线,甚至越过 0.001 置信水平线,沙地的年平均气温显著上升,据此可初步判断毛乌素沙地近 59 a 的年平均气温在 1994 年迅速转暖。但这与前文中毛乌素沙地年平均气温累积距平图(图 1)显示的结果(年平均气温在 1996 年发生突变)并不一致,为进一步确定毛乌素沙地年平均气温的突变时间,于是对其进行了 10 a,15 a 步长的滑动 t 检验,结果分别显示沙地的年平均气温可能在 1986 年、1996 年发生突变,详见图 5A。综合 3 种检验方法的结果来看,可判定毛乌素沙地的年平均气温在 1996 年发生突

变,这与我国中部地区安徽的年平均气温突变时间^[25]是一致的。同样综合分析毛乌素沙地各季节平均气温的累积距平、M-K 突变检验和滑动 t 检验结果,可得到毛乌素沙地季节平均气温的突变时间点分别在 1996 年(春季、夏季),1986 年(秋季、冬季),详见表 2。

表 1 毛乌素沙地气温和降水季节变化趋势

季节	平均气温			降水量		
	平均值/ ℃	倾向率/ (℃/10 a)	p	平均值/ mm	倾向率/ (mm/10 a)	p
春	9.89	0.40	**	51.06	-0.02	—
夏	21.85	0.21	**	192.51	1.68	—
秋	8.17	0.29	**	74.95	0.67	—
冬	-6.85	0.48	**	6.56	0.54	—

注:“**”表示通过了 0.01 显著性水平检验;“—”表示未通过 0.05 显著性水平检验。

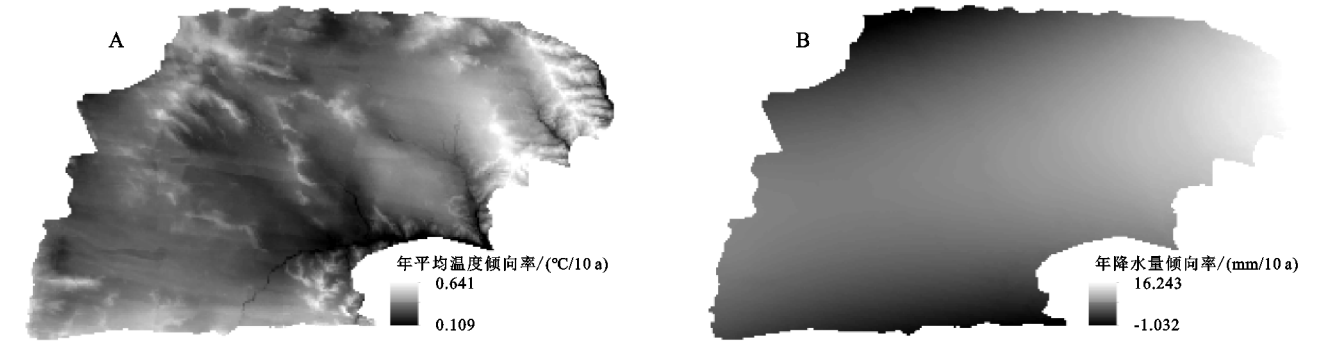


图 3 毛乌素沙地年平均气温和年降水量多年变化的空间分布格局

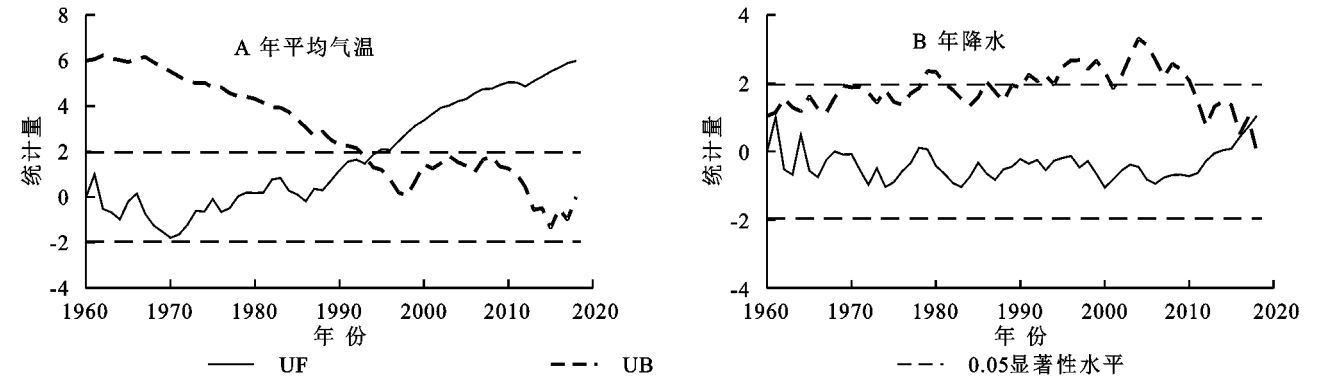


图 4 毛乌素沙地年平均气温和年降水的 M-K 统计曲线

表 2 毛乌素沙地气温和降水的突变年份分析

气象要素	季节	累积距平	M-K 突变检验	滑动 t 检验		综合分析 结果
				n = 10	n = 15	
平均气温	春	1996	2001	1996	1988,1993,1996	1996
	夏	1996	1996	1993,1996	1990,1993,1996	1996
	秋	1986,1997	1993	—	1986,1993,1995	1986,1993
	冬	1986	1987	—	1977,1986	1986
	春	—	—	1982	—	—
降水量	夏	—	—	—	—	—
	秋	2006	2010	2000,2006	2000	2000,2006
	冬	—	—	—	—	—

注:“—”表示未发现突变年份。

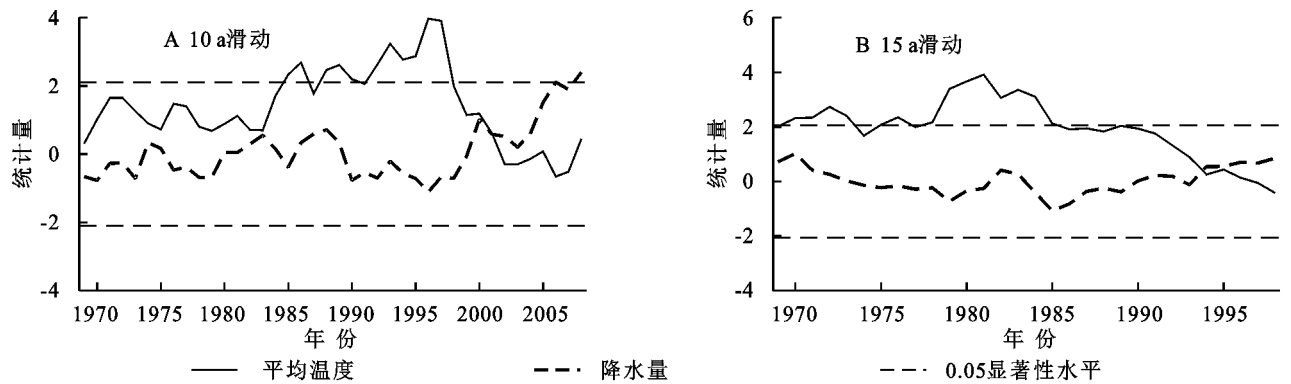


图 5 毛乌素沙地年平均气温和年降水的滑动 t 检验曲线

根据毛乌素沙地近 59 a 的年降水 M-K 突变检验结果来看,UF 和 UK 时间序列曲线交点出现的时间为 2016 年。在 2016 年以前,毛乌素沙地的年降水不断减少,自此之后沙地的年降水量开始不断增加,但在这两段时间序列内,UF 时间序列的曲线值一直未突破 0.05 置信水平线,意味着在此期间沙地年降水的下降和上升趋势并不显著。并且此交叉点出现在研究时段的尾期,交叉点后的数据时间序列过短,因此认为得到的结果可信度不高,详见图 4B。同样根据累积距平和滑动 t 检验的结果来看,毛乌素沙地的年降水变化也未呈现出明显的突变时间点,详见图 5B,三者综合分析可判断毛乌素沙地的年降水在近 59 a 内无明显突变,这与张雪琴等^[26]的研究结果是一致的。同样综合分析可得到近 59 a 内毛乌素沙地春、夏、冬季的降水无明显突变,秋季降水可能在 2000 年、2006 年发生突变,详见表 2。

3.3 气温和降水的周期变化

对于毛乌素沙地的年平均温度时间序列,其滞后自相关系数为 0.68,因此采用红噪音标准谱进行显著性检验。而对于毛乌素沙地的年降水时间序列,其滞

后自相关系数为 -0.01,是负值,因此采用白噪音标准谱进行显著性检验。当所研究时间序列的小波功率谱值大于标准谱值(本研究选取 0.05 置信水平值)时,所研究的结果是可信的,即对应本文小波功率谱图中黑色粗线圈起来的区域^[18]。

毛乌素沙地年平均温度存在 4 a, 7 a, 16 a 左右的周期变化,其中 4 a, 7 a 左右的振荡周期存在于整个时间序列,但在 20 世纪 80—90 年代,4 a 左右的振荡周期较为显著,且通过了 95% 的红噪音标准谱检验,因此认为其是年平均温度时间序列的主周期,详见图 6A。

毛乌素沙地的年降水主要存在 3~4 a, 8 a, 12 a 左右的振荡周期,其中 3~4 a 的短振荡周期存在于整个时间序列。在 20 世纪 70—80 年代主要存在 8 a 左右的振荡周期,而在 20 世纪 90 年代主要存在 12 a 左右的振荡周期。图中虽存在一个通过 95% 白噪音标准谱检验的 4 a 左右的显著振荡周期,但由于其位于受边缘效应影响较大的区域,因此认为该结果不可信,详见图 6B。综上所述,近 59 a 来,毛乌素沙地的年降水不存在显著振荡周期变化。

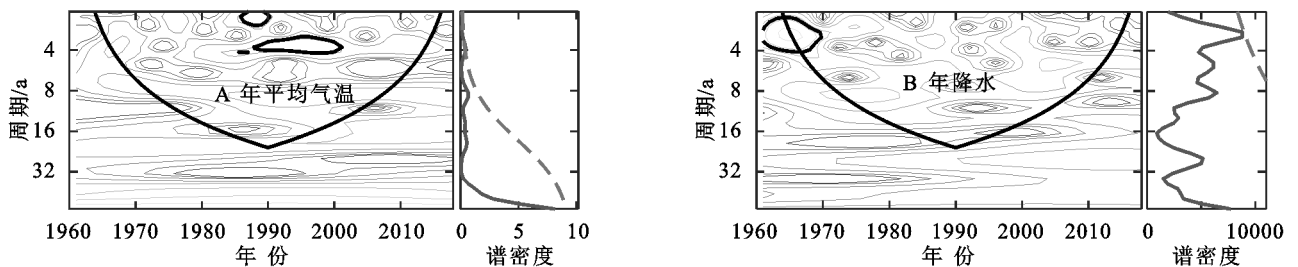


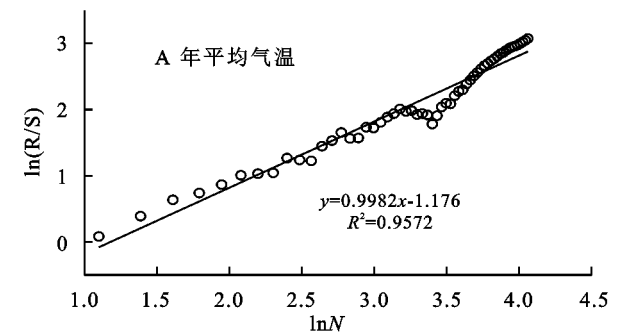
图 6 毛乌素沙地年平均气温和年降水的小波功率谱和小波方差

3.4 气温和降水的未来变化趋势预测

毛乌素沙地年平均气温和年降水的 Hurst 指数均大于 0.5,说明二者未来均会持续增加。尤其是年平均气温的 Hurst 指数为 0.998,非常接近于 1,表明毛乌素沙地未来的年平均温度会呈现持续性较强的上升趋势,详见图 7。

毛乌素沙地四季平均温度的 Hurst 指数分别为 0.86(春季), 0.84(夏季), 0.90(秋季)和 0.96(冬季),均大于 0.8,表明沙地未来各季节的平均温度均会呈现强持续性上升趋势,尤其是冬季平均气温持续性上升的趋势最强。未来毛乌素沙地的春、夏季降水会逐渐减少,而冬季降水会持续增加,但因其 Hurst 指数

均接近于 0.5,所以减少和增加趋势的持续性均较弱。秋季降水的 Hurst 指数为 0.89,远高于其他各季节,



表明沙地秋季未来降水会呈现持续性很强的增加趋势,详见表 3。

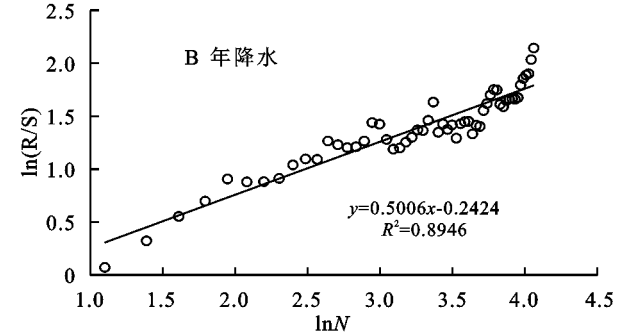


图 7 毛乌素沙地年平均气温和年降水的 Hurst 指数

气候因子	平均温度				降水量			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
历史趋势	上升	上升	上升	上升	减少	增加	增加	增加
Hurst 指数	0.86	0.84	0.90	0.96	0.59	0.42	0.89	0.64
未来趋势	上升	上升	上升	上升	减少	减少	增加	增加
持续强度	很强	很强	很强	很强	较弱	较弱	很强	较弱

3.5 气温和降水变化的影响因素分析

ENSO 与毛乌素沙地冬季气温、秋季降水的相关性较强。其中 MEI,SSTA 与沙地冬季温度呈显著正相关($p<0.05$),与沙地秋季降水呈负相关。SOI 与

沙地冬季温度呈负相关,与沙地秋季降水呈正相关,但其相关性均未通过 0.05 显著性水平检验。所以总的来看,ENSO 对毛乌素沙地冬季气温有较为显著的影响。

AO 和 NAO 对毛乌素沙地的降水影响较为明显。其中 AO 与毛乌素沙地春、夏、冬季的降水呈显著正相关($p<0.05$),尤其是与冬夏季节降水的相关性通过了 0.01 显著性水平检验。NAO 与毛乌素沙地冬、夏季节降水呈显著正相关($p<0.05$)。综合可见,AO 和 NAO 对毛乌素沙地冬夏季节的降水影响比较显著,详见表 4。

表 4 毛乌素沙地气温和降水变化与大气环流指数的相关性

影响因子	平均温度					降水量				
	全年	春	夏	秋	冬	全年	春	夏	秋	冬
SOI	-0.15	-0.12	0.05	0.09	-0.21	0.13	-0.08	0.15	0.22	0.03
SSTA	0.23	0.10	0.03	-0.06	0.30*	-0.15	0.14	-0.19	-0.19	-0.12
MEI	0.31*	0.16	0.06	-0.03	0.35**	-0.16	0.17	-0.20	-0.26	-0.05
AO	0.22	0.17	0.08	0.09	0.16	0.21	0.26*	0.39**	0.22	0.40**
NAO	0.11	0.19	-0.14	-0.11	0.15	0.20	0.24	0.27*	0.09	0.32*

注:**表示通过了 0.01 显著性水平检验;*表示通过了 0.05 显著性水平检验。

4 结论

- (1) 毛乌素沙地近 59 a 来的年平均气温显著上升,增温速率达到 0.35℃/10 a。在冬春季节,升温现象最为显著,且毛乌素沙地的增温速率随地区海拔升高而加快。年降水变化整体呈上升趋势,变化速率为 2.88 mm/10 a,其中夏季降水的增速相对较快,为 1.68 mm/10 a,但变化趋势均不显著。总体来看,毛乌素沙地近 10 a 气候呈现较明显的暖湿化趋势。
- (2) 近 59 a 来,毛乌素沙地的年平均温度约在 1996 年发生突变,其主要存在 4 a 左右的短变化周期。其中春、夏季节的平均温度约在 1996 年发生突变,而秋、冬季节的平均温度约在 1986 年发生突变。

- 对于年降水而言,其在近 59 a 无明显的突变时间点,且无显著的变化周期,秋季降水可能在 2000 年、2006 年发生突变。
- (3) 未来毛乌素沙地的年和各季节平均温度依然会呈上升趋势,且持续性较强。年降水未来变化也基本呈现增加趋势,其中秋季降水持续性增加的趋势较强。
- (4) ENSO 事件对毛乌素沙地冬季温度影响较大,北极涛动(AO)和北大西洋涛动(NAO)对毛乌素沙地冬夏季降水影响较为显著。
- 近年来,毛乌素沙地的生态环境不断得到改善,特别是榆林地区的森林覆盖率达到了 34.8%^[27],昔日的滚滚黄沙如今已绿树成荫。本文通过对毛乌素沙地近 59 a 平均气温和降水的变化规律进行定量分

析,有助于甄别分析区域近年植被覆盖度发生变化的原因。同时区域植物群落、植被覆盖度发生变化又会影响到该地气温和降水的变化,因此准确把握毛乌素沙地近年气候变化与植被变化之间的关系对推进区域沙地治理、促进区域可持续发展具有重要意义。此外,区域气候变化是多要素综合作用的结果,其不仅会受到地形地势、植物群落变化等外部因素的影响,也会受到各气象因子内部间相互作用的制约,如何综合且定量地分析各要素对毛乌素沙地气温和降水变化的作用程度,并基于此对该区域未来气候变化进行精准预测,仍待日后进一步深入研究与完善。

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] Choi G, Collins D, Ren G, et al. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955—2007[J]. International Journal of Climatology, 2009,29:1906-1925.
- [3] Mianabadi A, Shirazi P, Ghahraman B, et al. Assessment of short-and long-term memory in trends of major climatic variables over Iran: 1966—2015[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019,135(1):677-691.
- [4] Karaburun A, Demirci A, Kara F. Analysis of spatially distributed annual, seasonal and monthly temperatures in Marmara region from 1975—2006[J]. Ozean Journal of Applied Sciences, 2012,5(2):131-149.
- [5] Byakatonda J, Parida B P, Kenabatho P K, et al. Analysis of rainfall and temperature time series to detect long-term climatic trends and variability over semi-arid Botswana[J]. Journal of Earth System Science, 2018, 127(2):1-25.
- [6] 赵东升,高璇,吴绍洪,等.基于自然分区的 1960—2018 年中国气候变化特征[J].地球科学进展,2020,35(7):750-760.
- [7] 靳立亚,符娇兰,陈发虎.近 44 年来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应[J].地理科学,2005,25(5):567-572.
- [8] 那音太,秦福莹,贾根锁,等.近 54 a 蒙古高原降水变化趋势及区域分异特征[J].干旱区地理,2019,42(6):1253-1261.
- [9] 李晴.罗布泊地区 1957—2017 年气温和降水量时空变化特征[D].石家庄:河北师范大学,2019.
- [10] 孙继敏,丁仲礼,刘东生.50 万 a 来沙漠—黄土边界带的环境演变[J].干旱区地理,1995,18(4):1-9.
- [11] 贺勤,刘正奇.毛乌素沙漠—世界沙漠暴雨中心[J].内蒙古气象,1996(3):5-15.
- [12] 张洁林.毛乌素沙地气候变化对参考作物蒸散量的影响[D].北京:中国地质大学,2016.
- [13] 郑玉峰,焦志荣,于泽民.毛乌素沙地气候分析及沙地面积变化[J].环境与发展,2015,27(5):19-21.
- [14] 杨帆,靳鹤龄,李孝泽,等.中晚全新世毛乌素沙地东南部气候变化过程[J].中国沙漠,2017,37(3):431-438.
- [15] 刘宇峰,杜忠潮,原志华,等.近 60 a 毛乌素沙地东缘主要气候要素的多时间尺度变化特[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):121-127.
- [16] 韩瑞,苏志珠,李想,等.粒度 and 磁化率记录的毛乌素沙地东缘全新世气候变化[J].中国沙漠,2019,39(2):105-114.
- [17] 刘小楝.毛乌素沙漠全新世古湖沼演变研究[D].北京:北京师范大学,2018.
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [19] 刘志红,McVicar T R, Van Niel T G,等.专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J].气象,2008,34(2):92-100.
- [20] 孟清,白红英,郭少壮.基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化[J].水土保持研究,2020,27(2):206-212.
- [21] 陈彦光.基于 Matlab 的地理数据分析[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [22] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等.1961—2014 年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(3):136-143.
- [23] 马梓策,于红博,张巧凤,等.内蒙古地区 1960—2016 年气温和降水特征及突变[J].水土保持研究,2019,26(3):114-121.
- [24] 杨军,李高磊,丛建辉,等.近 60 年山西省气候变化趋势及其对粮食作物产量的影响[J].资源开发与市场,2018,34(10):1389-1396.
- [25] 刘永婷,徐光来,尹周祥,等.全球变化背景下安徽近 55 a 气温时空变化特征[J].自然资源学报,2017,32(4):680-691.
- [26] 张雪琴,刘树林,冯坤,等.毛乌素沙区 1961—2016 年降水特征[J].中国沙漠,2019,36(6):141-150.
- [27] 梁娟,姜辰蓉,毛海峰.毛乌素绿了被人类缚住的“沙漠”[J].科学大观园,2020(15):66-71.