

近 50 年半干旱典型草原区域不同时间尺度上的 降水、径流研究

张阿龙, 高瑞忠, 刘廷玺, 秦子元

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要:以内蒙古锡林河流域典型草原区域为研究区,采用 1963—2015 年气温、相对湿度、降水量、风速、日照时数、蒸发量、径流日数据,应用统计分析、趋势检验和 Spearman 相关分析等方法对研究区区域 7 项水文气象要素的平均最高值、平均值、平均最低值突变前后变化及突变后停滞特征进行了分析,结果表明:(1) 内蒙古锡林河流域典型草原区域的降水量最大月(7 月)与径流量最大月(4 月)不同,降水天数明显小于径流天数,且降水量远大于径流深,多年丰水季降水总量近似于枯水季的 3 倍,而多年枯水季径流总量是丰水季的 2 倍;(2) 径流量多年来呈现显著减少的趋势,而降水的整体变化趋势不太明显,存在 1998—2011 年处于由丰变枯阶段,2011 年后有由枯转丰的迹象;(3) 年、丰水季、枯水季径流发生突变年份均为 2004,同一时期发生突变,年、枯水季径流天数发生突变年份为 2007 年、2004 年,丰水季在此期间未发生突变;(4) 该区年径流天数枯水季所占比例居多,径流量年、丰、枯水季突变年限一致,造成突变的驱动因数接近,枯水季径流天数相对于年径流天数突变年份较早,枯水季对引起突变的驱动因数更为敏感;(5) 影响该区降水大小的主要气象因素依次为日照时数>相对湿度>平均风速>平均气温>降水量=蒸发,影响该区径流大小的主要气象因素依次为蒸发>相对湿度>平均风速>平均气温=降水量>日照时数。

关键词:径流量;降水量;气候变化;锡林河流域

中图分类号:P426.6;P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0080-07

Study on Precipitation and Runoff at Different Time Scales in Semi-Arid Grassland Basin over the Past 50 Years

ZHANG Along, GAO Ruizhong, LIU Tingxi, QIN Ziyuan

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The Xilin River basin in Inner Mongolia steppe area was selected as the study area. Based on the daily data of air temperature, relative humidity, rainfall, wind speed, sunshine time, evaporation, and runoff from 1963 to 2015, the maximums, minimums and averages before and after the abrupt points and the stagnation characteristics after this time point were analyzed by using the statistical method, the M-K inspection method, and the Spearman method. The results showed that: (1) the maxima of precipitation and runoff aroused in different months, the maximum precipitation occurred in July and maximum runoff occurred in April; the number of precipitation day was much less than that of runoff day. The days of precipitation were more than those of the runoff; the amount of precipitation in wet seasons was 3 times of that in the dry season, but the volume of runoff in dry season was 2 times of that in the wet season; (2) the runoff presented the significant decreasing trend over the past years, while the trend of precipitation change was not significant; the precipitation pattern changed from abundance to scarcity between 1998 and 2011, while it changed from scarcity to abundance after 2011; (3) the abrupt year, wet season and dry season of runoff occurred in 2004, the abrupt change of runoff days in a year and dry season occurred in 2007 and 2004, and the change of runoff days in wet season was not found during the period; (4) the number of runoff days in the dry season was majority proportion in whole year; there were the same abrupt years of annual runoff and runoff in wet

收稿日期:2018-09-21

修回日期:2018-10-23

资助项目:内蒙古自然科学基金(2018MS05006);国家自然科学基金(51469019);内蒙古科技计划项目(201701025)

第一作者:张阿龙(1992—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为干旱、半干旱地区气候—水文—土壤特征解析与诊断。

E-mail:562061251@qq.com

通信作者:高瑞忠(1997—),男,内蒙古阿拉善人,教授,博士,主要从事水资源评价、生态水文过程模拟研究。E-mail:ruizhonggao@qq.com

season and dry season, and their driving factors were similar; (5) the orders of meteorological factors influencing the precipitation followed the sequence: sunshine time, relative humidity, average wind speed, average temperature, precipitation and evaporation; The orders influencing the runoff followed the sequence: evaporation, relative humidity, average wind speed, average temperature, precipitation and sunshine time.

Keywords: runoff; precipitation; climate change; Xilin River basin

水文气象要素之间的关系及其相互作用十分复杂,其中周期性和突变性是两个重要的特征^[1-3]。近年来,由于气候变化和人类活动的影响,半干旱区内陆河草原流域水资源短缺,生态环境恶化^[4],水文过程发生了不容忽视的变化^[5-7]。气候波动(如极端降水事件的发生,温度的时空分布变化等)导致空间水资源的重新分布,增加旱涝灾害发生的几率。众多学者对流域温度、降水量和径流量的周期变化、趋势分析和突变分析进行割裂研究^[8-13],对水文要素的相关分析局限在年数据相关^[10-14],未考虑温度、降水、径流间复杂的相互作用,缺乏对气象要素的日数据分析研究。

本文以内蒙古锡林河流域为研究对象,基于多年水文、气象要素日数据的基础上,对降水天数与降水量、径流天数与径流量的多年日数据统计分析和长序列水文年、丰、枯水季的 Mann-Kendall 突变分析研究,降水、径流与其他水文要素日数据非线性 Spearman 相关分析,系统分析锡林河流域气温、降水和径流影响因素与演变规律。旨在探讨以锡林河流域为代表的半干旱地区流域气候是否持续趋于极端化,为北方半干旱地区发展过程中生态水文变化分析、生态环境保护和水资源合理利用提供基础依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

锡林河是内蒙古典型的草原型内陆河,发源于赤峰市克什克腾旗境内,绕锡林浩特市而过,锡林河全长 268 km,其中自锡林浩特水库以下近 124.7 km 的河流已断流^[14],位于 115°32'—117°16'E, 43°26'—44°39'N,流域面积多达 11 000 km²。属于半干旱大陆性季风气候。春季干燥少雨,夏季炎热,雨水多集中在 7—9 月,秋季凉爽,冬季漫长寒冷^[5]。据锡林浩特市气象站的资料统计,多年平均降水量为 282.5 mm,多年平均蒸发能力为 1 862.89 mm。

1.2 数据来源

本文数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。取锡林浩特气象站 1963—2015 年的日数据,其中包括降水量(mm)、蒸发量(mm)、相对湿度(%)、平均气温(°C)、日照时数(h)、风速(m/s)等,降水数据选用 1963—2015 年国家气象信

息中心气象资料实验室建立的 0.5°×0.5°降水格点日值数据,经检验,该气象站点的气象数据没有随机变化和明显的突变点,可以代表该流域的气候状况。锡林浩特站 1963—2015 年日径流实测数据来源于内蒙古自治区水文总局,该站水文观测资料时间序列较长且完整,数据来源也比较可靠。研究区气象站点及水文气象测站分布见图 1。

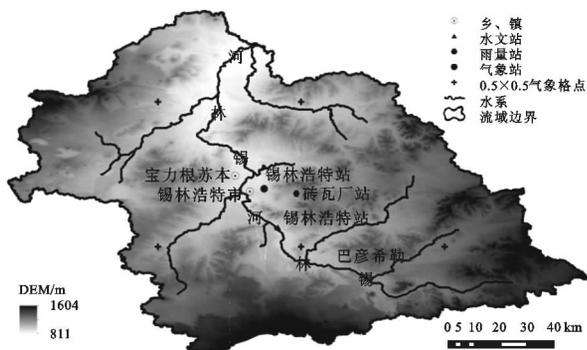


图 1 锡林河流域地理位置及水文气象站点分布

1.3 研究方法

趋势变化使用线性趋势法将序列表示为时间 t 的函数: $y=at+b$, 其中 a, b 为常数, 用最小二乘法通过各要素时间序列计算出 a 与 b , a 为要素的线性趋势, b 为正(负)表示该要素随时间变化有线性增加(减少)趋势^[15]。

改进 Mann-Kendall 检验方法来检测研究区径流和降水序列在显著水平 $\alpha=0.05$ 时的趋势性, 降水或径流序列趋势判定: 当 Z^* 为正值时, 说明降水或径流序列为增加趋势; 当 Z^* 为负值时, 说明降水或径流序列为减少趋势。 Z^* 大于标准正态 95% 分位数时, 表明降水或径流序列在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时存在显著趋势^[1,5]。

2 结果与分析

2.1 降水、径流和径流系数的统计特征

锡林河流域多年降水总量最大月、多年降水量最大月均出现在 7 月, 分别占多年(水文年)降水总量、多年(水文年)最大降水量的 28.89%, 55%, 多年径流深总量最大月、多年径流深最大月出现在 4 月, 分别占多年(水文年)径流总深和多年(水文年)最大径流深的 35.69%, 57.74%, 平均降水最小月出现在 1 月, 占多年(水文年)平均降水量的 0.7%, 平均径流

深最小月出现在12月、1月、2月,占多年(水文年)平均径流深的0%;降水和径流标准差最大月分别出现在7月、4月,降水和径流最小月均出现在冬季;降水、径流偏度和峰度最大月均分别出现在4月和6月;降水、径流变异系数最大月均分别出现在4月和3月;多年(水文年)最大降水、最小降水和平均降水天数和降水量分别为106 d,57 d,78.52 d,512.2 mm,126 mm,276.17 mm,最大径流、最小径流、平均径流天数和径流深分别为263 d,71 d,207.88 d,10.08 mm,1.58 mm,4.47 mm;多年丰水季最大降水、最小降水、平均降水天数和降水量分别为56 d,27 d,41.56 d,451.6 mm,89.9 mm,213.68 mm,最大径流、最小径流、平均径流天数和径流深分别为112 d,0 d,99.75 d,5.79 mm,0 mm,1.67 mm;多年枯水季最大降水、最小降水、平均降水天数和降水量分别为57 d,21 d,36.96 d,141.5 mm,24.1 mm,62.49 mm,最大径流、最小径流、平均径流天数和径流深分别为141 d,32 d,108.13 d,8.12 mm,0.49 mm,2.8 mm;多年丰水季降水总天数和枯水季降水总天数分别占多年降水总天数的52.9%,47.1%,多年丰水季径流总天数和枯水季径流总天数分别占多年径流总天数的48%,52%,多年丰水季降水总量和枯水季降水总量分别占多年降水总量的77.4%,22.6%,多年丰水季径流深总量和枯水季径流深总量分别占多年径流深总量的37.3%,62.7%(表1)。

综上所述表明该区降水量最大月与径流量最大月存在差异,除4月外,降水量与径流量的变化是一一对应的,4月北方径流主要来源于山丘区融冰雪水,而7月径流主要来源于降水,且夏季地表地下水开采量较大,取水耗水量较多,造成径流4月份大于7月份的现象;丰枯季明显,降水天数明显小于径流天数,且降水量远大于径流深,丰水季降水天数略小于枯水季降水天数,多年丰水季降水总量近似于枯水季的3倍,而多年枯水季径流总量是丰水季的2倍。

2.2 降水和径流的趋势变化

锡林河流域年径流量多年来呈现显著减少的趋势(表2,图2),而降水的整体变化趋势不太明显(表2,图3)。流域年降水量在2010s达到最大,除了1960s,1980s,2000s有所减少以外,其余年代均小幅度增加;丰水季降水是在1950s达到最大,而枯水季降水量在2010s达到最大,除了1960s,1980s,2000s减少以外,其余年代为增加(表2,图3)。

流域年径流在1990s最大,在2000s最小,除在1990s和2010s有所增加以外,其余年代均为减少。尤其是2000s相对于1990s减少了54.90%;丰水季径流在

1990s达到最大,除了1970s和1990s增加以外,其余年代均为减少,2000s相对于1990s减少了67.97%;而枯水季的径流变化类似年径流的变化趋势(表2)。

从图2可以看出,降水量、降水天数变化不明显,年降水量与丰水季降水量波动较大,具有相似的变化规律,突变现象不明显。年降水天数周期性较明显,存在约30a的大周期,降水天数与降水量相呼应,降水天数多的年份,降水量较大,降水天数少的年份,降水量较小,丰水季降水天数与枯水季降水天数接近,但总体上大于枯水季降水天数,5年滑动平均值可看出降水天数与降水量自1998—2011年均处于减少趋势,2011年后略有增加;如图3所示,径流天数与径流量整体呈现出明显递减趋势,突变现象明显,突变年份为2001年,年径流量变化起伏较大,呈现出5~7a的小周期,枯水季径流量明显大于丰水季径流量,且丰水季存在断流现象,径流天数2001年以前基本处于稳定状态,2001年后变化起伏较大。且径流天数减少速度较快,丰水季径流天数接近于枯水季径流天数,但存在枯水季径流天数大于丰水季径流天数的现象,5年滑动平均值可看出径流天数与径流量自1998—2011年均处于下降趋势,2011年后略有增加,与降水趋势一致。该区1998—2011年处于由丰变枯阶段,2011年后有由枯转丰的迹象。

径流与径流天数变化总体趋势呈下降趋势,径流水文年下降趋势(-0.0129)大于丰水年下降趋势(-0.0162)大于枯水年下降趋势(-0.0291),且水文年相关系数大于丰水季相关系数大于枯水季相关系数;径流天数水文年呈显著下降趋势,年径流天数下降趋势最为显著,下降趋势为-2.151,相关系数高达0.586,丰水季径流天数次之,下降趋势为-1.2652,相关系数为0.529,枯水季径流天数下降趋势相对较弱(-0.8858),相关系数为0.565(表3)。

降水与降水天数趋势变化较小,年降水量、丰水季呈下降趋势,下降趋势分别为-0.782,-0.6454,相关系数分别为0.171,0.133,而枯水季降水量却存在0.1366的上升趋势,显著系数为0.087;降水天数年、丰水季变化呈微弱减小趋势,变化趋势分别为-0.2059,-0.2289,相关系数分别为0.287,0.499,枯水季降水天数呈0.023的微弱上升趋势,相关系数为0.046(表3)。

枯水季降水、降水天数整体呈微弱的上升趋势,径流与径流天数下降趋势相对年、丰水季较低,该区径流变化显著,存在突变,但降水变化相对较弱,突变现象不明显,说明该区径流受到人类活动扰动较大。

表1 多年降水量、降水天数、径流量、径流天数和径流深统计分析

项目	时间	最小值	最大值	总和	平均数	标准差	偏斜度	峰度	变异系数/%
降水量/mm	1月	0.00	8.80	108.30	2.08	1.75	1.91	4.74	84.0
	2月	0.00	8.80	104.00	2.00	1.75	1.70	3.85	87.6
	3月	0.00	18.70	257.10	4.94	4.32	1.15	1.20	87.5
	4月	0.20	49.60	398.30	7.66	8.35	2.99	12.36	109.0
	5月	1.30	94.80	1321.80	25.42	22.55	1.50	2.13	88.7
	6月	12.30	108.00	2460.70	47.32	24.33	0.79	0.19	51.4
	7月	9.90	281.80	4147.70	79.76	48.64	1.66	4.67	61.0
	8月	5.90	163.20	3257.10	62.64	41.12	0.91	0.03	65.6
	9月	0.80	66.60	1245.60	23.95	18.03	0.74	-0.60	75.2
	10月	0.00	68.00	616.80	11.86	11.92	2.48	8.95	100.5
	11月	0.00	27.90	261.60	5.03	5.68	2.15	5.59	112.8
	12月	0.00	7.30	141.10	2.71	1.97	0.47	-0.76	72.7
	水文年(天数)	57.00	106.00	4083.00	78.52	10.42	0.37	-0.21	13.3
	丰水季(天数)	27.00	56.00	2161.00	41.56	7.38	-0.29	-0.82	17.8
	枯水季(天数)	21.00	57.00	1922.00	36.96	8.24	0.54	-0.08	22.3
	水文年	126.00	512.20	14360.70	276.17	83.33	0.58	0.45	30.2
	丰水季	89.90	451.60	11111.10	213.68	80.20	0.76	0.37	37.5
	枯水季	24.10	141.50	3249.60	62.49	29.64	0.96	0.53	47.4
径流深/mm	1月	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	—	—
	2月	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	—	—
	3月	0.00	1.74	8.37	0.16	0.30	3.41	14.37	187.9
	4月	0.49	5.82	83.62	1.61	0.99	2.87	8.97	61.5
	5月	0.00	1.57	33.35	0.64	0.26	1.20	3.07	41.1
	6月	0.00	2.32	22.31	0.43	0.33	3.77	19.98	77.9
	7月	0.00	2.84	24.25	0.47	0.58	2.28	5.90	123.4
	8月	0.00	3.16	27.50	0.53	0.75	2.10	3.99	141.9
	9月	0.00	1.85	12.70	0.24	0.36	2.69	8.67	146.2
	10月	0.00	0.80	14.66	0.28	0.22	0.46	-0.36	77.1
	11月	0.00	0.41	6.07	0.12	0.11	0.88	0.16	91.8
	12月	0.00	0.11	0.11	0.00	0.01	—	—	—
	水文年(天数)	71.00	263.00	10810.00	207.88	55.62	-1.35	0.58	26.8
	丰水季(天数)	0.00	122.00	5187.00	99.75	36.49	-1.42	0.69	36.6
	枯水季(天数)	32.00	141.00	5623.00	108.13	23.75	-1.25	1.01	22.0
	水文年	1.58	10.08	232.55	4.47	2.27	1.04	0.15	50.7
	丰水季	0.00	5.79	86.76	1.67	1.32	1.28	1.30	79.2
	枯水季	0.49	8.12	145.79	2.80	1.39	2.18	5.69	49.4

注:“—”代表未发现,下表同。

表2 流域年径流、丰水季、枯水季径流年代变化及相对变化率

气象要素	年份	全年变化量/	丰水季/	枯水季/	年相对变化率/	丰水季相对	枯水季相对
		mm	mm	mm	%	变化率/%	变化率/%
降水量	1952—1960	312.156	237.144	75.011	—	—	—
	1961—1970	268.730	211.000	57.730	-13.912	-11.025	-23.038
	1971—1980	308.933	245.230	63.703	14.960	16.223	10.346
	1981—1990	245.740	200.710	45.030	-20.455	-18.154	-29.313
	1991—2000	300.430	231.500	68.930	22.255	15.341	53.076
	2001—2010	228.940	165.270	63.670	-23.796	-28.609	-7.631
	2010—2015	330.775	235.725	95.050	44.481	42.630	49.285
径流深	1963—1969	4.926	1.844	3.082	—	—	—
	1970—1979	4.915	2.018	2.897	-0.230	9.441	-6.015
	1980—1989	3.880	1.114	2.767	-21.046	-44.815	-4.489
	1990—1999	6.307	2.947	3.360	62.535	164.662	21.432
	2000—2009	2.844	0.944	1.900	-54.903	-67.972	-43.439
	2010—2015	3.551	0.724	2.827	24.844	-23.334	48.774

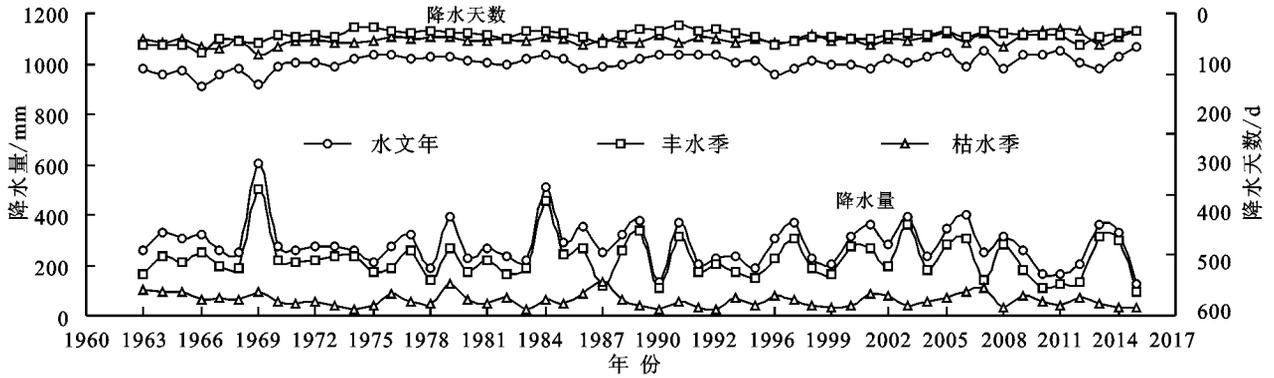


图2 水文站点降水天数与降水量变化趋势

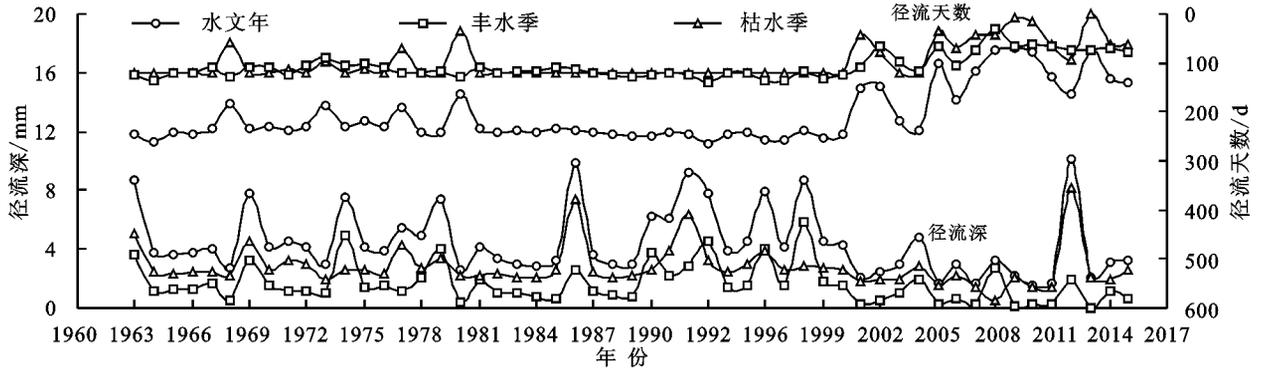


图3 水文站点径流天数与径流深变化趋势

表3 锡林河流域降水径流变化趋势的拟合关系式及相关系数

项目	趋势拟合关系式	相关系数 R	
径流	枯水季	$y = -0.0129x + 28.359$	0.140
	丰水季	$y = -0.0162x + 33.911$	0.186
	水文年	$y = -0.0291x + 62.27$	0.194
	水文年(天数)	$y = -2.151x + 4485.2$	0.586
	丰水季(天数)	$y = -1.2652x + 2615.6$	0.529
	枯水季(天数)	$y = -0.8858x + 1869.6$	0.565
降水	枯水季	$y = 0.1366x - 206.7$	0.087
	丰水季	$y = -0.782x + 1769.2$	0.171
	水文年	$y = -0.6454x + 1562.5$	0.133
	水文年(天数)	$y = -0.2059x + 490.06$	0.287
	丰水季(天数)	$y = -0.2289x + 497.13$	0.499
	枯水季(天数)	$y = 0.023x - 7.0722$	0.046

对于锡林河流域水文站的径流量及降水量的变化趋势用坎德尔秩次相关法进行检验,由检验结果可知(表4):年径流量($p=0.018$)及枯水季的径流量($p=0.005$)下降趋势显著,说明流域的径流整体上呈明显下降的趋势。而年降水的整体下降趋势不太明显($p=0.795$),同时丰水季的下降趋势也不明显($p=0.215$)。但是枯水季降水的上升趋势比较显著($p=0.044$)。

2.3 径流和降水序列的突变年份分析

图4为研究区1962—2015年年(丰枯季)区域径流、降水要 Mann-Kendall 突变检验,年、丰水季、枯水季径流发生突变年份均为2004年,同一时期发生突变,年、枯水季径流天数发生突变年份为2007年、2004年,丰水季在此期间未发生突变,说明该区年径

流天数枯水季所占比例居多,径流量年、丰、枯水季突变年限一致,造成突变的驱动因数接近,枯水季径流天数相对于年径流天数突变年份较早,枯水季对引起突变的驱动因数更为敏感。

表4 年季尺度径流和降水趋势的改进

Mann-Kendall 检验结果

项目	时间尺度	Sen 斜率	S	Z*	趋势	p
径流量	年	-15.258	-310	-2.37	↓	0.018*
	丰水季	-7.324	-264	-1.666	↓	0.096
	枯水季	-7.724	-368	-2.815	↓	0.005*
降水量	年	-0.264	-34	-0.26	↓	0.795
	丰水季	-0.946	-158	-1.239	↓	0.215
	枯水季	0.494	256	2.012	↑	0.044*

注:*为在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下趋势显著,↓为下降趋势。

年、丰水季、枯水季降水发生突变年份分别为1997年、1998年、2009年,年降水与丰水季降水突变年份接近。与枯水季降水突变年份较远,丰水季、枯水季降水天数发生突变年份为1987年、2009年,年降水在此期间未发生突变,且丰水季降水天数从1987年开始处于减少趋势,枯水季降水天数从1998年开始处于增加趋势,降水量年、丰、枯水季突变年限年早于丰水季早于枯水季,造成突变的驱动因数年与丰水季接近,而与枯水季突变的驱动因素可能不同,丰水季降水天数相对于枯水季降水天数突变年份较早,丰水季对引起突变的驱动因数更为敏感。

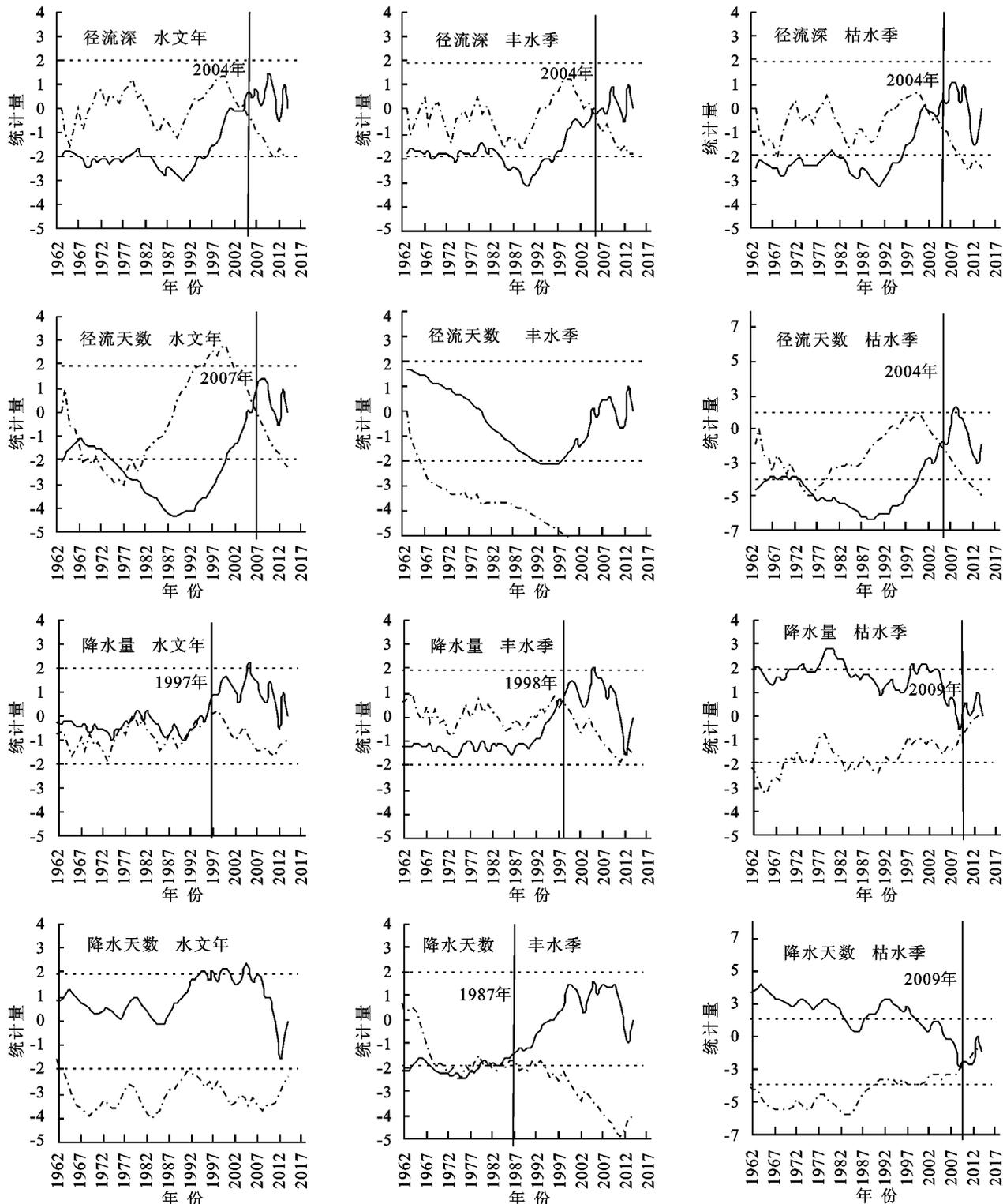


图 4 研究区 1962—2015 年年(丰枯季)区域径流、降水的 Mann-Kendall 突变检验

2.4 气候要素日数据相关分析

1963—2015 年的气候要素日数据 Spearman 相关, 与降水量日数据呈正相关的气象数据相关系数大小依次为: 平均相对湿度(0.338) > 平均风速(0.128) > 平均气温(0.099) > 径流(0.019), 呈负相关的气象数据相关系数大小依次为: 日照时数(-0.400) > 小型蒸发量(-0.019), 影响该区降水大小的主要气象因素依次为日

照时数 > 相对湿度 > 平均风速 > 平均气温 > 降水量 = 蒸发; 与径流日数据呈正相关的气象数据相关系数大小依次为: 平均相对湿度(0.047) > 平均风速(0.029) > 20—20 时降水量(0.019), 呈负相关的气象数据相关系数大小依次为: 小型蒸发量(-0.068) > 平均气温(-0.019), 影响该区径流大小的主要气象因素依次为蒸发 > 相对湿度 > 平均风速 > 平均气温 = 降水量 > 日照时数。

表 5 1963—2015 年的气候要素日数据 Spearman 相关

项目	平均气温	平均风速	小型蒸发量	平均相对湿度	日照时数	20—20 时降水量	径流
平均气温	1.000	0.057**	0.893**	-0.411**	0.383**	0.099**	-0.019**
平均风速	0.057**	1.000	0.165**	-0.202**	-0.116**	0.128**	0.029**
小型蒸发量	0.893**	0.165**	1.000	-0.600**	0.483**	-0.019**	-0.068**
平均相对湿度	-0.411**	-0.202**	-0.600**	1.000	-0.526**	0.338**	0.047**
日照时数	0.383**	-0.116**	0.483**	-0.526**	1.000	-0.400**	0.004
20—20 时降水量	0.099**	0.128**	-0.019**	0.338**	-0.400**	1.000	0.019**
径流	-0.019**	0.029**	-0.068**	0.047**	0.004	0.019**	1.000

注:**表示相关性在 0 上显著,*表示相关性在 0.05 以上显著。

3 讨论

内蒙古锡林河流域典型草原区域 4 月北方径流主要来源于山丘区融冰雪水,而 7 月径流主要来源于降水,且夏季地表地下水开采量较大,取水耗水量较多,造成径流 4 月份大于 7 月份的现象与文献^[4-5,14-17]研究结论相似;年降水天数存在约 30 a 的大周期,降水天数与降水量自 1998—2011 年均处于减少趋势,2011 年后略有增加,与宋小园^[17]、焦玮^[18]等的研究成果接近;径流天数与径流量整体呈现出明显递减趋势,突变现象明显,突变年份为 2001 年,年径流量变化起伏较大,呈现出 5~7 a 的小周期,枯水季径流量明显大于丰水季径流量,且丰水季存在断流现象,径流天数 2001 年以前基本处于稳定状态,2001 年后变化起伏较大;径流天数减少速度较快,丰水季径流天数接近于枯水季径流天数,径流天数与径流量自 1998—2011 年均处于下降趋势,2011 年后略有增加,与降水趋势一致。年、丰水季、枯水季降水发生突变年份分别为 1997 年、1998 年、2009 年,年降水与丰水季降水突变年份接近;枯水季降水突变年份较远,丰水季、枯水季降水天数发生突变年份为 1987 年、2009 年,年降水在此期间未发生突变,且丰水季降水天数从 1987 年开始处于减少趋势,枯水季降水天数从 1998 年开始处于增加趋势,降水量年、丰、枯水季突变年限年早于丰水季早于枯水季。

4 结论

(1) 内蒙古锡林河流域典型草原区域的降水量最大月(7 月)与径流量最大月(4 月)不同,丰枯季明显,降水天数明显小于径流天数,且降水量远大于径流深,丰水季降水天数略小于枯水季降水天数,多年丰水季降水总量近似于枯水季的 3 倍,而多年枯水季径流总量是丰水季的 2 倍。

(2) 径流量多年来呈现显著减少的趋势,而降水的整体变化趋势不太明显,1998—2011 年处于由丰

变枯阶段,2011 年后有由枯转丰的迹象。

(3) 年、丰水季、枯水季径流发生突变年份均为 2004 年,同一时期发生突变,年、枯水季径流天数发生突变年份为 2007 年、2004 年,丰水季在此期间未发生突变。

(4) 该区年径流天数枯水季所占比例居多,径流量年、丰、枯水季突变年限一致,造成突变的驱动因数接近,枯水季径流天数相对于年径流天数突变年份较早,枯水季对引起突变的驱动因数更为敏感。

(5) 影响该区降水大小的主要气象因素依次为日照时数>相对湿度>平均风速>平均气温>降水量=蒸发;影响该区径流大小的主要气象因素依次为蒸发>相对湿度>平均风速>平均气温=降水量>日照时数。

研究成果可以作为我国北方半干旱流域气候变化和人类活动对流域径流量影响的水资源保护利用的参考依据。

参考文献:

- [1] 黄星,马龙,刘廷玺,等.近 60 年黄河流域典型区域气温突变与变暖停滞研究[J].中国环境科学,2016,36(11):3253-3262.
- [2] 高彦春,王金凤,封志明.白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J].中国生态农业学报,2017,25(4):467-477.
- [3] 梁珑腾,马龙,刘廷玺,等.1951—2014 年中国北方地区气温突变与变暖停滞的时空变异性[J].中国环境科学,2018,38(5):1601-1615.
- [4] 郝祥云,朱仲元,宋小园,等.近 50 a 锡林河流域极端天气事件及其与气候变化的联系[J].干旱区资源与环境,2017,31(7):114-120.
- [5] 王威娜,高瑞忠,王喜喜,等.锡林河流域径流变化规律及气候波动和人类活动影响的定量分析[J].水土保持研究,2018,25(2):347-353.
- [6] 牛赞,刘贤德,敬文茂,等.祁连山大野口流域气温、降水、河川径流特征分析[J].干旱区地理,2014,37(5):931-938.

- combined influence of solar activity and El Niño on streamflows across Southern Canada [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(5): W05507-W05525.
- [16] 曹永强,刘佳佳,高璐. 近 54 年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J]. *地理科学*, 2015, 35(8): 1027-1032.
- [17] 唐洁. 基于 EEMD 的陕西降水量与太阳黑子活动关系分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(4): 154-159.
- [18] 王涛,霍彦峰,罗艳. 近 300 a 来天山中西部降水与太阳活动的小波分析[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(4): 708-717.
- [19] 张肖南,史兴民,杨尚英. 西安夏、秋季降水与太阳黑子的关系[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(3): 485-490.
- [20] 程国生,苍中亚,杜亚军,等. 江淮梅雨长期变化对太阳活动因子的响应分析[J]. *高原气象*, 2015, 34(2): 478-485.
- [21] 王胜,谢五三,唐为安,等. 1961—2009 年淮河流域昼夜降水变化特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2881-2887.
- [22] 张正涛,高超,刘青,等. 不同重现期下淮河流域暴雨洪涝灾害风险评价[J]. *地理研究*, 2014, 33(7): 1361-1372.
- [23] 高超,陈实,翟建青,等. 淮河流域旱涝灾害致灾气候候值[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 36-44.
- [24] 杜鸿,夏军,曾思栋,等. 淮河流域极端径流的时空变化规律及统计模拟[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 398-409.
- [25] 崔玉娟,张玉洁,方修琦,等. 1644—1949 年长江三角洲地区 5 种洪涝致灾因子组合特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(4): 697-704.
- [26] Li X, Jiang F, Li L, et al. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(11): 1679-1693.
- [27] 李鹏飞,刘文军,赵昕奕. 京津冀地区近 50 年气温、降水与潜在蒸散量变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 137-143.
- [28] 刘晓婉,徐宗学,彭定志. 雅鲁藏布江流域 NDVI 与降水量时空分布特征及其相关性分析[J]. *中国农村水利水电*, 2018(1): 89-95.
- [29] 姚梦婷,高超,陆苗,等. 1959—2008 年淮河流域极端径流的强度和频率特征[J]. *地理研究*, 2015, 34(8): 1535-1546.
- [30] 徐宗学,张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. *地理研究*, 2006, 25(1): 27-34.
- [31] 赵丽娜,宋松柏,郝博,等. 年径流序列趋势识别研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(3): 194-198, 205.
- [32] 徐超,吴大千,张治国. 山东省多年气象要素空间插值方法比较研究[J]. *山东大学学报: 理学版*, 2008, 43(3): 1-5.
- [33] 蔡福,于贵瑞,祝青林,等. 气象要素空间化方法精度的比较研究: 以平均气温为例[J]. *资源科学*, 2005, 27(5): 173-179.
- [34] 姜晓艳,刘树华,马明敏,等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析[J]. *地理研究*, 2009, 28(2): 354-362.
- [35] 李淼,夏军,陈社明,等. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(6): 1001-1011.
- [36] 邹春霞,申向东,李夏子,等. 小波分析法在内蒙古寒旱区降水量特征研究中的应用[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(4): 113-116.
- [37] 郑晓东,鲁帆,马静. 近 50 年淮河流域旱涝与太阳黑子的关系研究[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(2): 1-4.

~~~~~

(上接第 86 页)

- [7] 任立良,沈鸿仁,袁飞,等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. *水科学进展*, 2016, 27(4): 492-500.
- [8] 李玉平,韩添丁,沈永平,等. 天山南坡清水河与阿拉沟流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 127-135.
- [9] 韩知明,贾克力,杨芳,等. 基于 Morlet 小波的呼伦湖流域降水多时间尺度分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 160-166.
- [10] 康磊,刘世荣,刘宪钊. 岷江上游水文气象因子多尺度周期性分析[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1253-1262.
- [11] 张健,李同昇,张俊辉,等. 1933—2012 年无定河径流突变与周期特征诊断[J]. *地理科学*, 2016, 36(3): 475-480.
- [12] 张晓晓,张钰,徐浩杰. 1961—2010 年白龙江上游水文气象要素变化规律分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(2): 172-178.
- [13] 高亚军,赫晓慧,张展,等. 1956—2009 年皇甫川流域不同历时最大暴雨量周期性和趋势性分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 251-253.
- [14] 杨立哲,钱虹,郝璐. 锡林河近 50 年径流变化特征及其影响因素分析[J]. *草业科学*, 2015, 32(3): 303-310.
- [15] 李永格,李宗省,冯起. 1956—2013 年曹家湖流域径流深变化[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(1): 200-209.
- [16] 张洪波,李哲浩,席秋义,等. 基于改进过白化的 Mann-Kendall 趋势检验法[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(6): 34-46.
- [17] 宋小园,朱仲元,张圣微,等. 锡林河流域气候变化特征诊断分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 151-158.
- [18] 焦玮,朱仲元,宋小园,等. 近 50 年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 904-909.