

# 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

王威娜<sup>1</sup>, 高瑞忠<sup>1</sup>, 王喜喜<sup>2</sup>, 刘廷玺<sup>1</sup>, 白勇<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 美国欧道明大学, 诺福克 弗吉尼亚州 23529)

**摘要:** 多种原因导致内蒙古高原内陆河草原流域草地退化及环境恶化, 定量分析其径流变化规律和影响因素对于流域的生态保护具有重要的意义。基于内蒙古锡林河流域 1963—2015 年水文、气象和社会经济等数据, 采用累积距平法、双累积曲线法、改进的 M-K 趋势检验法和累积量斜率变化率比较法等方法, 从年代、水文年及季时间尺度剖析了锡林河流域径流演变的规律, 定量计算了气候波动和人类活动对锡林河径流变化的贡献。结果表明: 锡林河流域径流量在各时间尺度均为显著 ( $p < 0.05$ ) 减少趋势, 而各气候要素的波动变化趋势不明显, 但流域内社会经济变化显著; 径流量在 21 世纪初达到最小, 相对于 20 世纪 90 年代减少了 54.9%; 流域内降水、径流变化的突变年份均为 1998 年, 1998 年前后气候波动对径流减少的贡献率仅为 30.34%, 而人类活动对径流减少的贡献率达到 69.66%, 人类活动是引起径流量减少的主要驱动因素。

**关键词:** 径流量; 变化规律; 驱动因素; 累积量斜率变化率比较法; 锡林河流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0347-07

## Quantitative Analysis of Runoff Variations as Affected by Climate Variability and Human Activity in the Xilin River Basin

WANG Weina<sup>1</sup>, GAO Ruizhong<sup>1</sup>, WANG Xixi<sup>2</sup>, LIU Tingxi<sup>1</sup>, BAI Yong<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Old Dominion University, Norfolk, Virginia 23529, USA)

**Abstract:** Various factors can be related to grassland degradation and environmental deterioration in the grassland inland river basins of Inner Mongolia Plateau. To protect the vulnerable grassland ecosystem, it is needed to understand the variation mechanisms of runoff and the causal factors. Using data on hydrology, meteorology, and socioeconomics from 1963 to 2015 of the Xilin River basin, we identified runoff variations at various time scales, including age, hydrologic year, and season, and analyzed contributions of climate variability and human activity to the identified variations. The identification was done using four methods, namely cumulative anomaly, cumulative double-mass curve, modified Mann-Kendal (M-K) trend test, and slope inflection of cumulative variable curve. The results showed that regardless of the time scales and at a significance level ( $\alpha = 0.05$ ), the runoff exhibited the significant decreasing trend while the climate variables (e. g., precipitation) did not show any significant trend, but the socioeconomics had the rapid increasing trend. The runoff reached its minimal value in 2000s, which was 54.9% smaller than that in 1990s. Both the precipitation and runoff exhibited the abrupt change around 1998. About 30.34% of the post-versus pre-1998 runoff decrease might be caused by the responding precipitation decrease, while the remaining 69.66% could be attributed to human activity. Thus, for the study basin, human activity was probably the primary driver for the runoff reduction.

**Keywords:** runoff; variation mechanism; drivers; slope inflection of cumulative variable curve; Xilin River Basin

内蒙古中部高原内陆河流域是我国北方重要的能源基地,一直以来都发挥着生态屏障的作用。锡林郭勒盟是我国重要的能源接续地,位于锡林郭勒盟的内陆河对其经济的发展产生了重要的推动作用。近年来,高原内陆河草原流域水资源短缺,生态环境日趋恶化,由于气候变化和人类活动的影响,许多子流域(诸如锡林河流域)的水文过程均发生了不容忽视的变化<sup>[1-5]</sup>。

流域径流量发生变化归因于气候和人类活动综合作用的结果<sup>[6-7]</sup>,因此,定量分析气候变化和人类活动对径流的影响,已经成为当前水文水资源科学家研究的焦点<sup>[8-10]</sup>。众多学者对于径流的变化进行了一系列定性定量研究,马龙等<sup>[1]</sup>对辽河流域 1957—2010 年的径流量变化进行研究发现,径流量多年来呈现减少的趋势,与降水呈正相关,而与平均气温呈负相关;刘贵花等<sup>[2]</sup>对鄱阳湖流域赣江径流影响的定量分析研究指出,降水是影响赣江流域径流变化的主要因素;张利平等<sup>[3]</sup>对滦河流域径流变化的定量影响分析后指出,气候波动和人类活动对径流减少的影响量呈增加趋势,且人类活动一直是径流减少的主要影响因素;胡珊珊等<sup>[4]</sup>利用白洋淀上游水文站 1960—2008 年的水文气象数据分析气候波动和人类活动对研究区径流量的影响,发现年径流量呈显著下降趋势,而人类活动对径流量的减少起主导作用;林凯荣等<sup>[5]</sup>对东江流域径流影响的贡献分解研究发现,不同子流域土地利用及气候波动对径流的改变作用各不相同,均分别起到增加和减少径流作用;刘剑宇等<sup>[6]</sup>对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析后指出,气候波动是流域径流增加的主导因素,而人类活动是径流增加的主要因素,是抚河径流减少的主要原因。

可以看出,虽有很多学者在气候变化和人类活动对流域径流的影响方面做了大量研究<sup>[11-15]</sup>,但是对于内蒙古高原内陆河草原流域生态水文变化原因的定量分析研究却少有文献报道,鉴于此,本文以锡林河流域作为内蒙古高原内陆河草原流域的典型研究对象,基于水文、气象和社会经济等数据,利用累积距平法、双累积曲线法、改进的 M-K 趋势检验法和累积量斜率变化率比较法等方法进行锡林河流域径流演变规律的分析,定量计算气候变化和人类活动对径流变化的贡献,旨在探讨高原内陆河草原地区社会经济发展中的流域水文效应,对于认识变化环境下内陆河流域水文循环及其演变过程具有重要的现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

锡林河流域(115°32'—117°16'E,43°26'—44°39'N)位

于内蒙古锡林郭勒盟中东部,流域面积约 11 000 km<sup>2</sup>,主要分布于锡林浩特市,少部分位于阿巴嘎旗和赤峰市的克什克腾旗,流域高程变化 811~1 604 m。锡林河发源于赤峰市克什克腾旗境内,干流全长 175 km,为我国典型的高原草原型内陆河(图 1)。锡林河流域春季干燥,夏季炎热,雨水集中在 6—9 月,秋季凉爽,冬季漫长干冷,属半干旱大陆性季风气候。流域多年平均降水量为 284 mm,主要为 6—9 月的降雨和 10 月—次年 1 月的降雪,多年平均蒸发量为 1 864 mm。

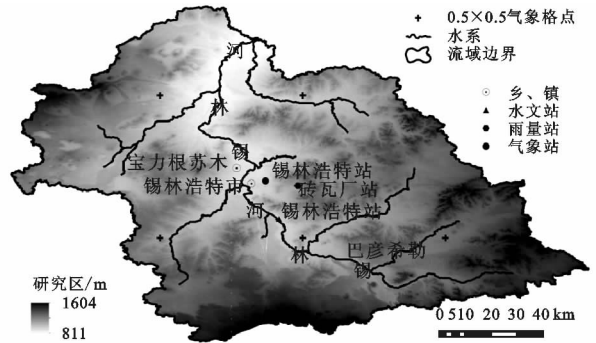


图 1 锡林河流域地理位置及水文气象站点分布

锡林河流域属于我国北方重要煤电基地——锡林郭勒煤电基地的重要组成部分,著名的草原露天煤田——胜利煤田就在其中。锡林浩特市经济快速发展,不断汲取利用水资源,加之过度放牧和超载养畜等,导致流域径流量呈显著减少趋势,对于经济社会发展和生态环境均产生了不利的影响<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2 数据来源

本文主要使用了锡林河流域的气候、水文和社会经济等数据。气候数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),主要为锡林浩特气象站 1963—2015 年的日数据,其中包括气温、相对湿度、降水量、风速、日照时数、蒸发量等,又鉴于研究区具有长序列实测数据的气象站较少,因此,本文又以 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°降水格点的月值数据<sup>[18]</sup>作为补充,以分析区域面降水分布规律,经检验,气候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。水文数据来源于内蒙古自治区水文总局,为 1963—2015 年锡林浩特站的日径流数据和砖瓦厂站的日雨量数据,水文资料时间序列完整,数据可靠。社会经济数据来源于锡林浩特市统计年鉴(1986—2015 年),包括人口、国内生产总值、第一产业产值(PIP)、第二产业产值(SIP)、第三产业产值(TIP)和牲畜数目等。研究区水系、气候站点及水文站点分布见图 1。

### 1.3 研究方法

1.3.1 降水—径流关系分析 在年、季时间尺度上,

利用径流—时间、降水—时间曲线、降水—径流相关图和年代均值来辨识研究区流域降水和径流随时间的变化关系和整体趋势。利用降水—径流双累积曲线来分析整个时段年尺度降水—径流关系是否一致,降水—径流双累积曲线理论上斜率应该恒定,双累积曲线的拐点可以认为是分界点,在分界点处降水—径流关系改变,可归因于流域特性或气候波动的影响。

1.3.2 趋势的检测 Mann-Kendall 检测技术已广泛用于水文气象时间序列的趋势分析中,但为了解决因时间序列的正相关性增加趋势显著性的机率而导致趋势误检测的问题,Hamed 等<sup>[19]</sup>提出了一种考虑时间序列滞后自相关性的改进 Mann-Kendall 趋势检测技术并在实践中证明了有效性,本文采用该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。改进 Mann-Kendall 法的计算流程详见文献<sup>[19]</sup>和<sup>[20]</sup>。

1.3.3 降水和径流序列的突变分析 对于突变点的划分有众多的方法,常用的有累积距平法、有序聚类分析法等。本文采用累积距平法<sup>[21]</sup>来划分降水、径流的突变点。累积距平法可以通过观察径流和降水序列差积曲线的变化来判断数据点的离散程度和变化趋势,计算公式为:

$$\hat{X}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad t=1,2,3\cdots,n \quad (1)$$

式中: $\hat{X}_t$ 为径流或降水序列  $x$  在第  $t$  年的累积距平值; $x_i$ 为径流或降水序列  $x$  在第  $i$  年的数值; $n$ 为序列长度( $a$ ); $\bar{x}$ 为序列  $x$  的径流或降水序列的平均值。

1.3.4 影响径流变化的贡献率计算 对于气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分析,采用累积量斜率变化率比较法<sup>[22]</sup>,计算公式如下:

$$R_{SR} = 100 \times (S_{Ra} - S_{Rb}) / S_{Rb} = 100 \times (S_{Ra} / S_{Rb} - 1) \quad (2)$$

$$R_{SP} = 100 \times (S_{Pa} - S_{Pb}) / S_{Pb} = 100 \times (S_{Pa} / S_{Pb} - 1) \quad (3)$$

$$C_P = 100 \times (R_{SP} / R_{SR}) = 100 \times (S_{Pa} / S_{Pb} - 1) / (S_{Ra} / S_{Rb} - 1) \quad (4)$$

式中: $R_{SR}$ 和  $R_{SP}$ 为累积径流量斜率变化率和累积降水量斜率变化率; $S_{Rb}$ 和  $S_{Ra}$ 为累积径流量表示年份线性关系式的斜率在拐点前后两个时期的径流量; $S_{Pb}$ 和  $S_{Pa}$ 为累积降水量表示年份线性关系式的斜率在拐点前后两个时期的降水量; $C_P$ 计算为降水量变化对径流量变化的贡献率。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流和降水的时间变化

锡林河流域年径流量多年来呈现减少趋势(图 2),

而降水的整体变化趋势不明显(图 3)。在年时间尺度上,流域的径流量多年来呈现显著减少的趋势,但是 2012 年径流量却达到最大值,枯水季径流量明显高于丰水季径流量,具有最大降水量的年份没有最大径流量,而具有最小降水量的年份具有最小的径流量。最大降水量 512.2 mm 发生在 1974 年,而最大径流量 10.084 mm 出现在 2012 年。从年代变化角度看,流域年径流在 20 世纪 90 年代最大,在 21 世纪初最小,除在 20 世纪 90 年代和 21 世纪 10 年代有所增加以外,其余年代均为减少,尤其是 21 世纪初相对于 20 世纪 90 年代减少了 54.90%;丰水季径流在 20 世纪 90 年代达到最大,除了 20 世纪 70 年代和 20 世纪 90 年代增加以外,其余年代均为减少,21 世纪初相对于 20 世纪 90 年代减少了 67.97%;而枯水季的径流变化类似年径流的变化趋势。流域年降水量在 20 世纪 90 年代达到最大,除了 20 世纪 80 年代和 21 世纪初有所减少以外,其余年代均小幅度增加;丰水季降水也是在 20 世纪 90 年代达到最大,其变化类似于年降水量变化;而枯水季降水量在 21 世纪 10 年代达到最大,除了 20 世纪 80 年代和 21 世纪初减少以外,其余年代均为增加。在季时间尺度上,丰水季的径流量明显小于枯水季的径流量,这可能是流域融雪和河网的储冰解冻形成春汛使流域径流增大引起的,而且丰水季的降水远大于枯水季的降水(表 1)。

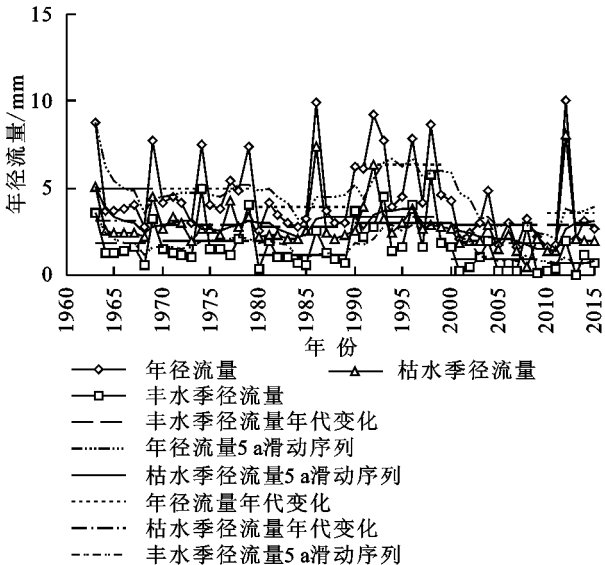


图 2 不同时间尺度下径流量变化及 5 a 滑动序列、年代均值序列变化

对于锡林河流域水文站的径流量及降水量的变化趋势用 Mann-Kendal 秩次相关法进行检验,由检验结果可知: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。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( $p=0.044$ )(表 2)。然而,无论降水波动趋势如何,径流总体呈下降趋势,在 1998 年之后呈现比之前更加显著的下降趋势。降水—径流双累积曲线(图 4)在 1998 年出现拐点,说明 1998 年之前的降水—径流关系与 1998 年之后的降水—径流关系呈现不同,也就是说,研究区的降水—径流关系可能在 1998 年左右改变。在相同的降水量条件下,变化期(1999—2015 年)产生的径流量显然比基准期(1963—1998 年)产生的径流量大(图 5),达到 36.4%(表 3)。对于丰水季,变化期(1999—2015 年)的年平均径流量比基准期(1963—1998 年)的年平均径流量少 30%以上(表 3),这与年尺度变化(36.4%)相符。因此,这种变化意味着自 1998 年以来流域天然径流特征发生改变。

表 1 锡林河流域年、水文季尺度径流、降水年代变化及相对变化率

时间	项目	绝对量/mm			相对变化率/%		
		全年	丰水季	枯水季	全年	丰水季	枯水季
1963—1969 年	径流	4.926	1.844	3.082	—	—	—
	降水	274.671	215.429	59.243	—	—	—
1970—1979 年	径流	4.915	2.018	2.897	−0.230	9.441	−6.015
	降水	305.110	241.150	63.960	11.082	11.940	7.962
1980—1989 年	径流	3.880	1.114	2.767	−21.046	−44.815	−4.489
	降水	245.740	200.710	45.030	−19.459	−16.770	−29.597
1990—1999 年	径流	6.307	2.947	3.360	62.535	164.662	21.432
	降水	314.840	247.600	67.240	28.119	23.362	49.323
2000—2009 年	径流	2.844	0.944	1.900	−54.903	−67.972	−43.439
	降水	225.720	163.570	62.150	−28.306	−33.938	−7.570
2010—2015 年	径流	3.551	0.724	2.827	24.844	−23.334	48.774
	降水	312.267	225.400	86.867	38.342	37.800	39.769

表 2 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	全年	−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	全年	−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, 下表同。

表 3 1963—1998 年与 1999—2015 年年季尺度平均径流量对比

时间 尺度	平均径流量/mm		变化/%
	1963—1998 年	1999—2015 年	
年	5.026	3.195	−36.4
丰水季	1.996	0.918	−54.0
枯水季	3.030	2.277	−24.9

无论年、季尺度,1999—2015 年的平均降水量与 1963—1998 年相当,但 1999—2015 年的年平均径流

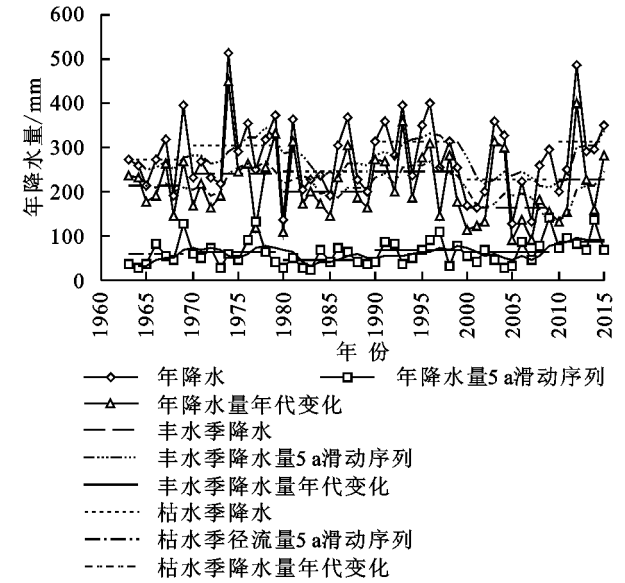


图 3 不同时间尺度下降水量变化及 5 a 滑动序列、年代均值序列变化

量显著小于 1963—1998 年(图 3,图 5)。

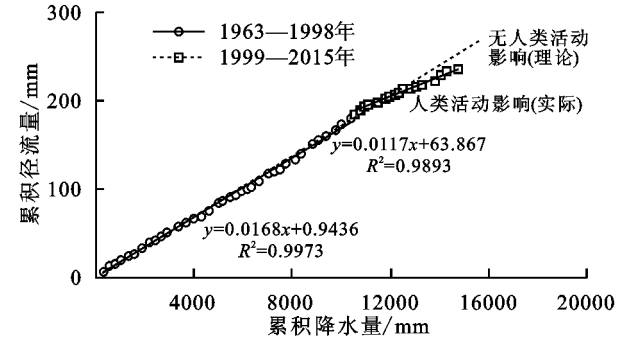


图 4 锡林河流域径流量和降水量双累积曲线

气候波动对于研究区径流的影响是客观存在的,流域径流量随着气候因子的变化体现出相应的变化,这对于没有人类活动参与的阶段来说是明确的,但若有人类活动的参与,人类活动会对径流变化幅度产生一定的贡献,这就需要对径流时段进行划分,区分单纯的气候波动影响阶段及气候和人类活动双重影响阶段。

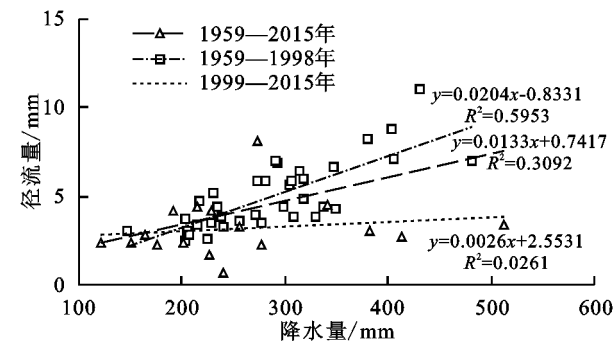


图 5 锡林河流域径流量和降水量散点及线性回归

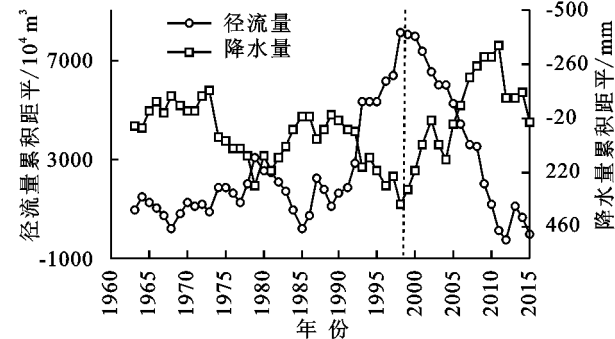
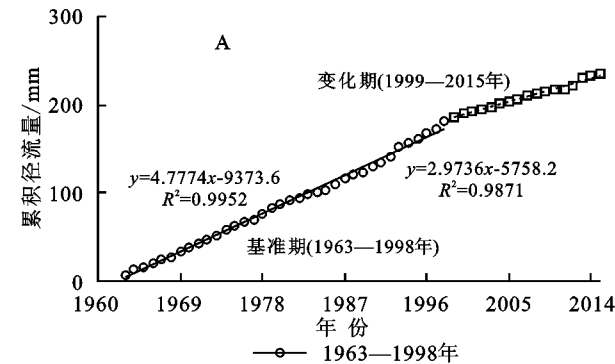


图 6 锡林河流域径流、降水累积距平变化曲线

2.2 径流和降水序列的突变年份分析

累积距平法可以较为直观地反映径流量在不同时代的阶段变化,本文采用该方法来判断降水量和径流量突变年份。初步判断径流突变点在 1979 年、1985 年、1998 年,但是研究区站点在 1998 年前后径流和降水均表现出显著的增大—减小过程(图 6),从流域径流、降水双累积曲线中的拐点可以进一步确定锡林河流域径流



2.4 气候的波动要素影响分析

流域径流受到气候、流域特征和人类活动等因素的影响,这里分析了降水、风速、相对湿度、日照时数、蒸发和温度等气候要素的趋势变化,结果显示相对湿度、日照时数、风速和降水等要素在显著性水平  $\alpha = 0.05$  时呈现不显著的减少或增加趋势,而蒸发和温度却呈现显著的增加趋势(表 5),基准期与变化期温度平均值差异达 40% 以上,其他气候要素在突变点前后两段时期内的差异均小于 20%,说明在全球气

量发生突变的年份是 1998 年(图 4),又由于干旱半干旱区气候因子中,降水对径流的作用占相对较大的比重,因此,确定研究区径流突变点为 1998 年。

在 1998 年之前的阶段可以看作是基准期,径流主要受到气候波动的影响,而在 1998 年之后的阶段可以看做是变化期,径流可以看作是受气候波动和人类活动的双重影响。该阶段气候波动和人类活动对径流变化量的贡献率,是需要定量解决的问题。

2.3 气候波动和人类活动对径流量变化的贡献

变化期(1999—2015 年)与基准期(1963—1998 年)时段相比流域累积径流量一年份关系式斜率减少 694.82 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,减少率为 37.76%。而累积降水量一年份关系式斜率减少 32.68  $\text{mm}/\text{a}$ ,减少率为 11.45%(图 7A—7B,表 4)。变化期与基准期相比,流域气候波动对于径流减少的贡献率为 30.34%,而人类活动对径流减少的贡献率为 69.66%,见公式(2)—(4)。因此,人类活动是导致锡林河流域径流量减少的主要驱动因素。

表 4 锡林河流域累积径流量、降水量斜率及其变化率

时期	时间	累积量斜率/ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	B 与 A 阶段比较	
			变化量/ mm	相对 变化率/%
基准期	1963—1998 年	径流量	4.7774	—
		降水量	285.31	—
变化期	1999—2015 年	径流量	-1.8038	-37.76
		降水量	-32.6800	-11.45

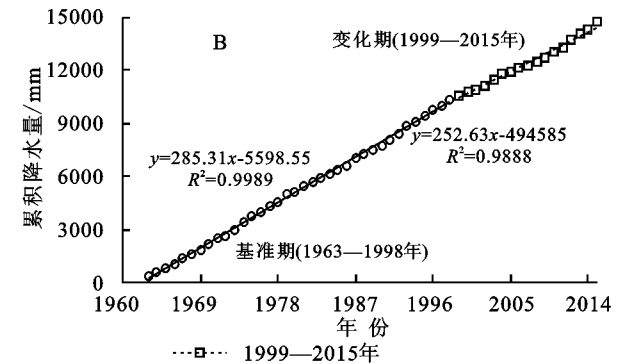


图 7 锡林河流域累积径流量、累积降水量与年份的关系曲线

候变暖的形势下,气温和蒸发对于研究区径流产生一定的影响。

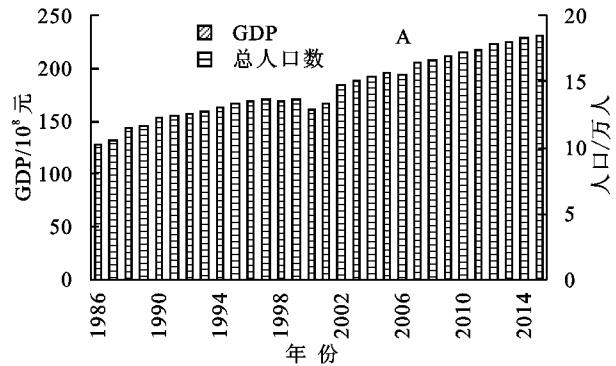
2.5 人类活动驱动因素分析

人类活动是锡林河流域径流减少的主要原因之一,流域主要分布在锡林郭勒盟锡林浩特市,因此选用锡林浩特市的社会经济指标进行人类活动对于径流影响的分析。社会经济指标包括地区生产总值(GDP)、人口数量、第一产业产值(PIP)、第二产业产值(SIP)、第三产业产值(TIP)和牲畜数量。

表 5 气候要素趋势的改进 Mann-Kendall 检验结果

项目	Sen 斜率	S	Z*	趋势	p 值
相对湿度	-0.006	-247	-1.941	↓	0.052
日照时间	2.605	328	1.767	↑	0.077
风速	-0.003	-162	-0.620	↓	0.535
降水	-0.264	-34	-0.260	↓	0.795
蒸发	1.347	258	2.014	↑	0.047*
温度	1.056	176	2.145	↑	0.034*

自 1986—2015 年,地区生产总值及其组成部分、人口



数目呈现连续的增长趋势(图 8A,8B)。除人口和牲畜数目以外,其他社会经济指标 1999—2015 年的平均值是 1986—1998 年的 6 倍以上,尤其 SIP 和 TIP 增加了 10 倍以上,表明锡林河流域在 1998 年后人类活动频繁,分析原因为锡林河流域煤炭资源丰富,以煤炭为主导的工业迅速发展,带动了区域社会经济的发展。对比而言,人口增长相对较小,约 20%以上,说明在经济发展过程中,生产方式不断转变,不再是以劳动力为主的发展模式。

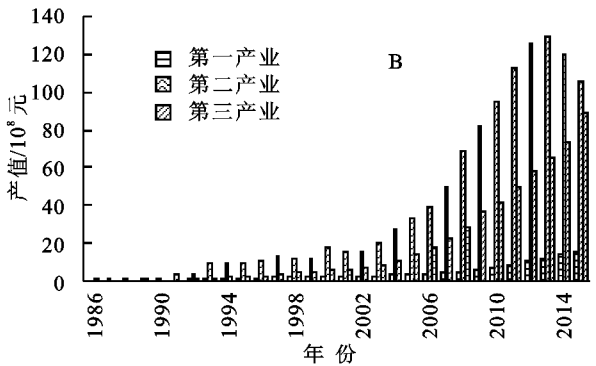


图 8 锡林河流域主要经济指标、人口年变化

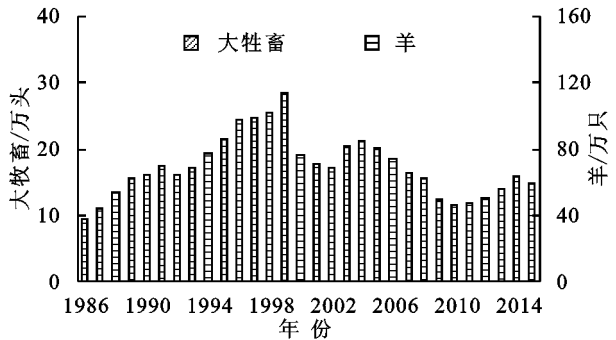


图 9 锡林河流域大牲畜、羊数量的年变化

而各气候要素的波动变化趋势不明显。径流量并没有随着降水量的变化表现出相应的变化,说明降水与径流之间存在复杂的关系,这与地理纬度接近的辽河流域径流变化规律<sup>[23]</sup>具有一致性。降水—径流双累积曲线在 1998 年出现拐点,说明 1998 年之前的降水—径流关系与 1998 年后降水—径流关系呈现不同,也就是说,研究区的降水—径流关系在 1998 年出现改变。在相同的降水量条件下,基准期(1963—1998 年)产生的径流量显然比变化期(1999—2015 年)产生的径流量大,这种变化是由于 1998 年后流域天然径流特征发生改变所导致的结果,这与焦玮等<sup>[16]</sup>研究结果基本一致。

通过累积距平法确认的突变年份与杨力哲等<sup>[17]</sup>关于锡林河流域的研究结果相近,但是杨力哲等仅判断出累积径流量发生拐点的年代,没有查明突变年份,只是定性地分析了气候波动及人类活动对径流的影响。这里确认 1998 年为锡林河流域径流显著突变点,与 Wang 等<sup>[20]</sup>关于巴拉格尔河草原流域的突变年份(1994 年)划分不一致,究其原因一是研究所采用的时间序列长短不一致,二是相似流域人类活动程度不同而产生径流影响不同。

锡林河流域存在多种社会生产活动对于径流变化的影响,各种因素之间的相互作用较为复杂,因此,定量区分各驱动因素对径流的影响有待进一步深入地研究。对于突变年份的划分,应该探寻细划出潜存的多个阶段的突变点,以便更细致地分析各阶段的变化情况<sup>[24-25]</sup>。

3 结论

(1) 从年代尺度看,流域年径流在 20 世纪 90 年

自 1986—1998 年以来,流域范围内牲畜总量呈增长的趋势,实际载畜量远大于正常水平,超过天然草场的承载能力,草原生态环境逐渐恶化,1998 年以后,国家及地方出台系列政策来保护草原生态,流域内养畜总量显著减少并波动变化(图 9)。变化期(1999—2015 年)与基准期(1986—1998 年)相比,大牲畜数量的平均值减少了 35.28%,羊数量的平均值减少了 5.41%。在基准期由于流域内过度放牧和超载养畜等诸多不合理的人类活动导致植被不断退化,水土流失现象日趋严重,进而导致流域的下垫面特征发生改变,径流量发生变化。在变化期,尽管 2000 年开始,锡林郭勒盟实施了一系列如“围封转移”“禁牧轮牧”等生态保护措施,在一定程度上减轻了人类活动对于锡林河流域径流量的影响,但是锡林浩特市第二产业和第三产业的快速发展,不断汲取利用地表水和地下水,导致锡林河流域径流逐年不断减少。

2.6 讨论

锡林河流域的径流量多年来呈现显著减少的趋势,

代最大,在21世纪初最小,尤其是21世纪初相对于20世纪90年代减少了54.90%。在年时间尺度上,流域的径流量多年来呈现显著减少的趋势,2012年径流量达到最大值,在具有最大降水量的年份没有最大径流量,而具有最小降水量的年份具有最小的径流量。在季时间尺度上,丰水季的径流量明显小于枯水季的径流量,但丰水季的降水远大于枯水季的降水,这可能是流域融雪和河网的储冰解冻形成春汛使流域径流增大引起的。总体来看,在变化环境下,无论时间尺度如何,锡林河流域径流在1963—2015年呈现显著的下降趋势;

(2) 累积距平分析和降水—径流双累积曲线分析表明锡林河径流在1998年出现拐点,研究区的降水—径流关系在1998年左右发生改变。在1998年之前径流主要受到气候波动的影响,在1998年之后径流受气候波动和人类活动的双重影响。在相同的降水量条件下,基准期(1963—1998年)产生的径流量显然比变化期(1999—2015年)产生的径流量大,达到36.4%。因此,这种变化意味着自1998年以来由于人类活动进程的加剧改变了天然径流发生的机制和变化规律;

(3) 锡林河流域径流减少的主要原因为人类活动,它对径流减少的贡献率为69.66%,人口增加、畜牧业及工业发展等社会经济因素共同影响着流域的径流。气候波动对于径流减少的贡献率为30.34%,对于研究流域径流的减少趋势贡献相对较小。

研究成果可以作为我国北方半干旱高原草原流域在气候变化和人类活动对流域径流影响下的水资源保护与利用的参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 马龙,刘廷玺,马丽,等. 气候变化和人类活动对辽河中上游径流变化的贡献[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 470-479.
- [2] 刘贵花,齐述华,熊梦雅,等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域赣江径流影响的定量分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 682-690.
- [3] 张利平,李凌程,夏军,等. 气候波动和人类活动对滦河流域径流变化的定量影响分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(4): 664-672.
- [4] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62-70.
- [5] 林凯荣,何艳虎,陈晓宏,等. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1312-1321.
- [6] 刘剑宇,张强,邓晓宇,等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 432-443.
- [7] 姜晔,毕晓丽,黄建辉,等. 内蒙古锡林河流域植被退化的格局及驱动力分析[J]. 植被生态学报, 2010, 34(10): 1132-1141.
- [8] Xu J X. Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Yellow River, China[J]. Environmental Management, 2003, 31(3): 328-341.
- [9] 陈剑霞,黄维东. 祖厉河流域年径流趋势预测分析[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(12): 920-921.
- [10] 邓振镛,张强,王润元,等. 河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1267-1275.
- [11] 牛最荣,赵文智,刘进琪,等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J]. 水文, 2012, 32(2): 78-84.
- [12] 张利平,于松延,段尧彬,等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(6): 391-397.
- [13] Zhang Q, Singh V P, Peng J, et al. Spatial-temporal changes of precipitation structure across the Pearl River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 440/441(3): 113-122.
- [14] 武金慧,李占斌,沈中原. 甘肃省近50年降水量及气候变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11): 24-29.
- [15] 李占玲,徐宗学. 甘肃省40年来气温和降水时空变化[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1877-1882.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 赵煜飞,朱江,许艳. 近50 a中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. 气象科学, 2014, 34(4): 414-420.
- [19] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1/4): 182-196.
- [20] Wang X, Yang X, Liu T, et al. Trend and extreme occurrence of precipitation in a mid-latitude Eurasian steppe watershed at various time scales[J]. Hydrological Processes, 2015, 28(22): 5547-5560.
- [21] 王亮,高瑞忠,刘玉才,等. 气候变化和人类活动对滦河流域内蒙段河川径流的影响分析[J]. 水文, 2014, 34(3): 70-79.
- [22] 王刚,严登华,黄站峰,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 388-397.
- [23] 王国庆,金菊良,王金星,等. 辽河流域径流对气候变化的响应研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 433-440.
- [24] 夏军,刘春泰,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12.
- [25] Wang L, Chen X W. Simulation of hydrological effects on vegetation restoration of degraded mountain ecosystem with SWAT model[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(1): 71-75.