

变化环境下半干旱草原流域径流变化特征及其影响因子定量分析

于 婵¹, 王威娜², 高瑞忠², 刘廷玺², 白 勇², 王喜喜³

(1.内蒙古自治区水文总局, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古农业大学水利与土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

3.美国欧道明大学, 弗吉尼亚州 诺福克, 23529)

摘 要:地表水文过程在气候波动和人类活动的作用下发生了不可忽视的变化,这种变化对于内蒙古半干旱草原流域来说更为显著。采用改进的 M-K 趋势检验法、双累积曲线法、累积距平法和小波变换法对典型半干旱草原流域——锡林河流域 1963~2015 年径流序列的变化特征进行了剖析,并以社会经济指标量化流域内人类活动影响及细化降水特征因素,运用统计检验和主成分分析进行了变化环境下流域径流主要影响因素的定量分析。结果表明,锡林河流域径流量在水文年、季尺度呈现显著($p < 0.05$)减少趋势;流域径流的突变年份为 1998 年,在其前后影响径流变化的主导因素发生变化,1998 年以后径流受到人类活动和气候变化的双重影响;水文年和枯水季径流序列均存在 6 年、25 年左右的周期,而丰水季径流不存在显著周期变化;尽管气候因素中的降水、蒸发、相对湿度及所有人类活动因素与径流显著相关而影响径流,但其中人类活动为径流变化的主导因素。

关键词:径流;变化特征;影响因子;定量分析;半干旱草原流域;锡林河流域

中图分类号:K901

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)01-0078-07

内蒙古中部半干旱草原流域是我国北方重要的能源基地,并且一直以来发挥着生态屏障作用,其中锡林郭勒盟是重要的能源接续地,位于其境内的锡林河、巴拉格尔河、高力罕河和彦吉嘎河等草原内陆河对区域经济发展起到水资源支撑作用,但近年来,水资源短缺问题日益严重,生态环境日趋恶化,连续的气候波动和人类活动对草原流域水文循环产生了一定的影响。环境变化对于水文循环的影响已经成为国内外关注的重要课题^[1-3,5]。

径流是水文循环的关键环节,为流域水资源评价和发展规划的重要要素,径流的变化规律错综复杂,主要是气候和人类活动综合作用的结果^[4],因此,径流的时序变化特征及气候波动和人类活动对径流的影响分析,已经成为当前水文水资源领域科学家研究的焦点^[4,8-11],而多数学者对于径流变化特

征及影响因素分析是集中在我国主要河流及其支流,对于半干旱内陆河草原流域径流变化的深入研究较少,主要原因是该区域具有长序列实测数据的气象站、水文站较少,难以支持分布式水文模型的建立,难以进行较高精度的水文过程的定量分析,鉴于此,本文以锡林河流域作为内蒙古半干旱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,利用改进的 M-K 趋势检验、累积距平分析、小波变换、统计检验和主成分分析等方法对锡林河流域径流演变规律及其影响因素进行定量分析,旨在探讨半干旱内陆河草原流域社会经济发展中的流域水文效应,对于认识变化环境下半干旱内陆河草原流域水文循环及其演变过程具有重要的现实意义,成果可为变化环境下的锡林河流域水资源综合管理规划提供参考。

收稿日期:2017-10-26

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

作者简介:于婵(1980-),女,内蒙古锡林郭勒盟人,博士,主要从事水文站网规划与管理、水文分析等工作。E-mail:yuchan00_00@163.com

通讯作者:高瑞忠(1977-),男,内蒙古阿拉善盟人,博士,教授,主要从事水资源评价、生态水文过程模拟等教学与科研工作。E-mail:ruizhonggao@qq.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

锡林河流域(E115°32'~117°16', N43°26'~44°39')位于内蒙古锡林郭勒盟中东部,面积 11 000km²,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,高程变化 811m~1 604m(见图 1)。

锡林河发源于赤峰市克什克腾旗,全长 175km,为我国典型的半干旱草原型内陆河。流域多年平均降水量 284mm,主要为 6~9 月的降雨和 10 月至次年 1 月的降雪,多年平均蒸发量为 1 212mm。

锡林河流域是我国北方煤电基地(锡林郭勒煤电基地)的重要组成部分,我国著名的草原露天煤田——胜利煤田就在其中。流域内经济快速发展,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,对生态环境产生了诸多的不利影响^[12-14]。

1.2 数据来源

本文主要使用了锡林河流域的气象、水文和社会经济等数据。气候数据(1963~2015 年)来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),鉴于研究区气象站点少,以国家气象信息中心气象资料实验室建立的0.5°×0.5°降水格点数据^[15]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。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(GDP)、第一产业产值(PIP)、第二产业产值(SIP)和第三产业产值(TIP)等。研究区水系、气象站点及水文站点分布见图 1。

1.3 研究方法

1.3.1 径流演变的趋势检测

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 和 Rao^[16]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,本文采用该法来检测研究区径流序列在显著水平 $\alpha=0.05$ 时的趋势性,主要计算过程可以参见文献^[14]和^[16]。

1.3.2 径流演变的突变点检测

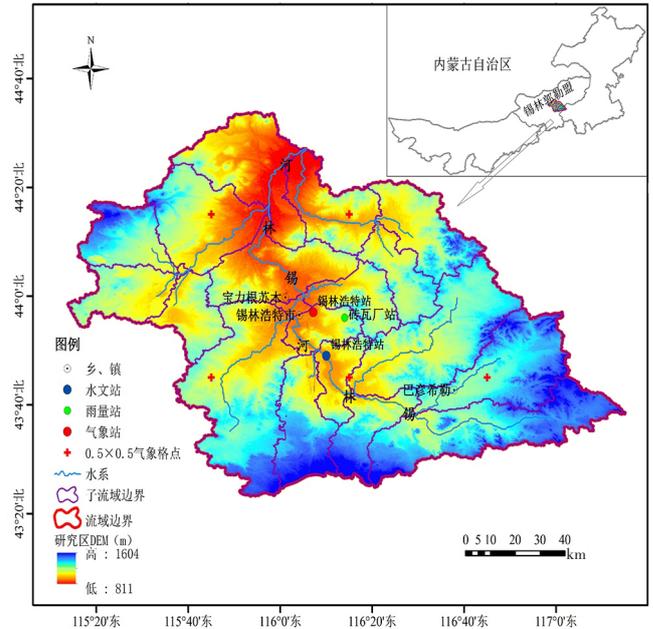


图 1 锡林河流域地理位置及水文气象站点分布图

Fig.1 Location of hydro-meteorological stations in the Xilin River basin

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。本文采用双累积曲线法和累积距平法来划分径流序列的突变点,主要计算过程可以参见文献^[4]。

1.3.3 径流演变的周期性分析

小波变换是序列时频分析的一种重要手段,能够有效地识别、判断和提取水文时序中的周期成分^[14-16]。小波变换系数计算出小波方差,并绘制出小波方差图,确定径流序列的周期,主要计算过程可以参见文献^[17]和^[18]。

1.3.4 影响径流的环境要素关系分析

为了进一步理解气候和人类活动的各种因素对径流的影响,对径流影响因素进行主成分分析(PCA),合成具有较高依赖性的因素,进而分析各主要环境要素之间的关系。主成分分析是一种降维的方法,可以找出几个综合因子来代表原来的变量,并尽可能地反映原来变量的信息,而且彼此之间互不相关。这里使用数据处理系统(DPS)软件^[19]进行径流影响因素的PCA分析。

2 结果与讨论

2.1 径流的趋势变化特征

对锡林河流域径流量的变化趋势进行改进的 Mann-Kendal 秩次检验,在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平下,

年径流量($p=0.018$)及枯水季的径流量($p=0.005$)下降趋势显著,而丰水季的径流量($p=0.096$)呈不显著的下降趋势(见表1)。因此,无论时间尺度如何,锡林河流域径流总体呈现下降趋势。

表1 年季尺度径流趋势的改进Mann-Kendall检验结果

Table1 The modified Mann-Kendall test results of runoff trends at annual and seasonal scales

时间尺度	Sen 斜率	S	Z*	趋势	p
全年	-15.258	-310	-2.370	↓	0.018*
丰水季	-7.324	-264	-1.666	↓	0.096
枯水季	-7.724	-368	-2.815	↓	0.005*

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

2.2 径流序列的突变特征

累积距平法可以较为直观地反映径流量的不同阶段变化,初步判断锡林河流域径流突变点在1979年、1985年和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(见图2),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量发生突变的年份是1998年(见图3),又由于干旱半干旱地区气候因子中,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。

气候波动对于研究区径流的影响是客观存在的,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,通过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。累

积距平曲线确定了1998年为锡林河流域径流突变年,表明1998年之前的径流主要受到气候波动的影响,而在1998年之后的阶段径流受气候波动和人类活动的双重影响。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,意味着自1998年以来流域天然径流特征发生改变。

2.3 径流序列周期变化特征

对锡林河流域水文年、季径流量进行小波变换分析,发现流域年径流量序列存在6年、25年左右的周期(见图4a),其中25年的频率方差极值表现最为显著,对于径流序列的方差贡献最大,因此说明该流域径流存在一个25年左右的大周期(即流域的第一主周期),而年径流量频率方差在6年存在不十分明显的波峰,说明存在弱周期,即存在一个6年左右的小周期(即流域的第二主周期);锡林河流域丰水季径流量序列没有显著的频率方差极值,因此说明该流域丰水季径流在分析序列中不存在显著周期,但从方差曲线的上升趋势来看,实测径流应该遵循一个更大的周期变化,决定着锡林河流域丰水季径流在整个时间域内变化的特性(见图4b);类似于年尺度,流域枯水季径流量序列存在6年、25年左右的周期,其中6年左右尺度的频率方差的极值较25年左右尺度的频率方差的极值表现略微显著,对于径流序列的方差贡献较大,因此,枯水季径流量变化的第一主周期为周期震荡最强的最大峰值所对应着的6年时间尺度,径流量变化的第二主周期则为对应着第二峰值的25年时间尺度(见图4c),这些周期的波动,决定着锡林河流域年季尺度下径流量在整个时间域

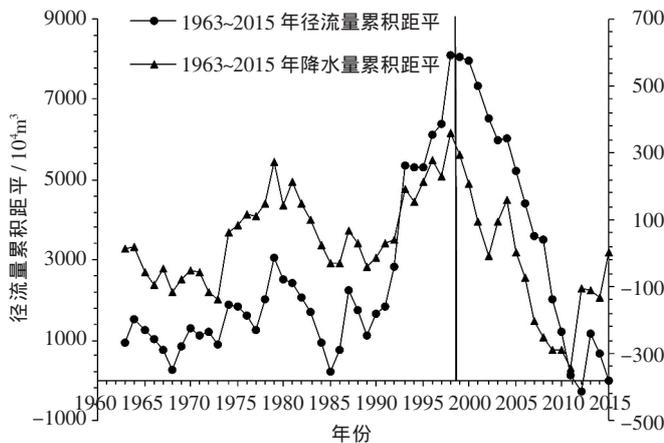


图2 锡林河流域径流、降水累积距平变化曲线

Fig.2 The cumulative anomaly variations of runoff and precipitation in the Xilin River basin

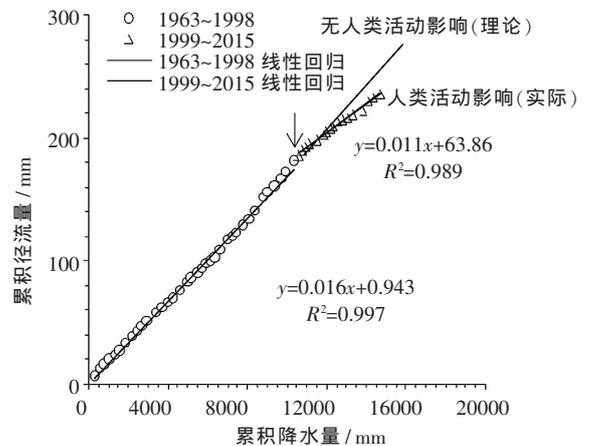


图3 锡林河流域径流量和降水量双累积曲线

Fig.3 The double cumulative curves of runoff-precipitation in the Xilin River basin

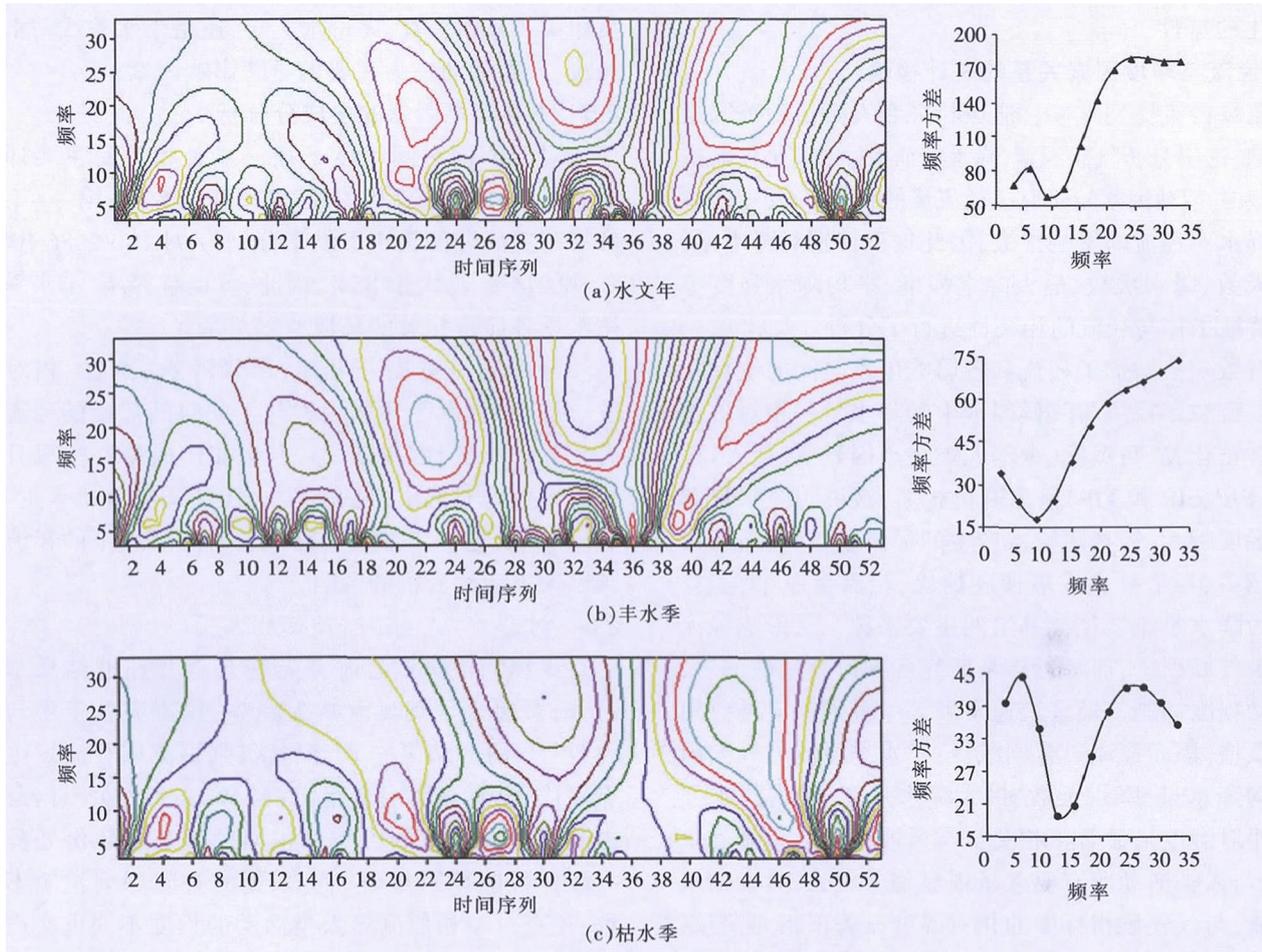


图4 年、季尺度径流序列的小波变换系数及方差图

Fig.4 The wavelet transform coefficients and wavelet variance of runoff series at annual and seasonal scales

表2 研究区径流和气候因素、人类活动因素的相关分析表

Table2 The correlation analysis between runoff and affecting factors like climate and human activities

指标类型	指标	全年		丰水季		枯水季		
		Q	LnQ	Q	LnQ	Q	LnQ	
气候因素	降水量	0.498*	0.465*	0.568*	0.636*	0.112	0.075	
	降水天数	0.196	0.116	0.486*	0.511*	0.260	0.151	
	降水次数	0.013	-0.082	0.249	0.277	0.309	0.229	
	最大降水强度	0.194	0.284	0.210	0.380*	0.015	-0.059	
	平均降水强度	0.273	0.346	0.445*	0.532*	0.038	0.010	
	蒸发	-0.453*	-0.547*	-0.435*	-0.275	-0.060	-0.226	
	相对湿度	0.570*	0.555*	0.721*	0.758*	0.436*	0.472*	
	其他气候指标	风速	-0.175	-0.265	-0.196	-0.361*	-0.108	-0.217
	日照时间	0.132	0.189	-0.288	-0.259	0.060	0.154	
人类活动因素	温度	-0.239	-0.195	-0.477*	-0.528*	-0.407*	-0.346	
	社会指标	人口	-0.451*	-0.498*	-0.404*	-0.491*	-0.291	-0.423*
	GDP	-0.317	-0.456*	-0.403*	-0.475*	-0.105	-0.369*	
	经济指标	PIP	-0.296	-0.414*	-0.364*	-0.448*	-0.136	-0.373*
	SIP	-0.330	-0.435*	-0.399*	-0.441*	-0.116	-0.386*	
TIP	-0.313	-0.491*	-0.387*	-0.527*	-0.124	-0.356		

注:* 表示在 $\alpha=0.05$ 水平下显著相关,其中 $|r_{0k}|_{\min} = 0.360$ 。

内变化的特性。

2.4 径流与环境因素关系的统计检验

流域径流受到气候、流域特征和人类活动等因素的影响,这里分析气候因素(降水特征指标和其他气候指标)和人类活动因素与研究区径流量的相关性(见表2)。由于降水对径流的影响很大,因此这里特别对降水量、降水天数、降水次数、最大降水强度、平均降水强度等降水特征指标与径流的相关性进行了分析。

对数变换增加了径流和各影响因素之间的统计相关性,流域年径流与气候因素中的降水量和相对湿度呈显著正相关,与蒸发、全部人类活动因素(包括人口、GDP、PIP、SIP和TIP)呈显著负相关,这说明降水量和相对湿度越大,锡林河流域产生的径流量越大,而人口数量越多,经济社会发展速度越快,径流量越小,主要原因为降水是流域径流补给的主要来源,是影响径流的关键气候因子,而且近年来研究区人口数量激增、人类活动程度加剧、经济快速发展等一系列因素导致用水量猛增,因而径流量急剧减少;丰水季径流与气候因素中的降水量、降水天数、最大降水强度、平均降水强度和相对湿度呈显著正相关,与风速和温度呈显著负相关,与人类活动所有要素呈现显著负相关;对于枯水季径流,与仅气候指标中的相对湿度显著正相关,与温度呈近负相关,与人类活动中人口、GDP、PIP和SIP呈

负相关。总体来看,无论水文年,还是丰水季或枯水季径流,人类活动均为主要的显著影响因素。

2.5 主要环境因素的主成分分析

对于不同时间尺度下径流显著相关的主要环境要素进行主成分分析(见表3),可以看出,第一、第二和第三主成分的累积贡献率分别为94.190%、86.108%和99.214%,均大于85%,因此,可以解释年、丰水季和枯水季各显著相关的环境要素关系。

分析第一主成分可知,尽管降水、蒸发、相对湿度、风速和温度等气候因素与不同时间尺度的径流具有较高的相关性(见表2),但是在构成第一主成分的权重系数绝对值中(见表3),人类活动要素比重更大,所以,可以进一步推断研究区各时间尺度下的径流受到以人类活动为主的影响。

2.6 讨论

锡林河流域的径流量与焦玮等^[12]研究结果基本一致,多年来呈现显著减少趋势;径流突变年份与杨力哲等^[13]研究结果一致,但其仅判别流域径流发生拐点年代,没有查明突变年份;与Wang等^[14]关于内蒙古内陆河草原流域的巴拉格尔河径流突变年份划分不一致,可能原因是研究所采用的时间序列长短不一致,还有对于相似流域人类活动的程度不同也会产生不同的径流影响。

表3 影响径流主要环境因素的主成分分析表

Table3 The principal component analysis of the main environmental factors affecting runoff

指标类型	指标	全年			丰水季			枯水季			
		FPC1	FPC2	FPC3	FPC1	FPC2	FPC3	FPC1	FPC2	FPC3	
气候因素	降水量	-0.065	0.740	-0.521	-0.271	0.393	0.096				
	降水特征指标	降水天数				-0.249	0.291	-0.423			
		最大降水强度				-0.151	0.381	0.395			
		平均降水强度				-0.200	0.348	0.486			
	蒸发	-0.363	-0.045	0.526							
	其他气候指标	相对湿度	-0.182	0.648	0.558	-0.306	0.274	-0.277	-0.128	0.988	0.066
		风速				0.197	0.037	0.497			
温度					0.300	-0.242	0.202				
人类活动因素	社会指标	人口	0.411	0.076	-0.087	0.332	0.284	-0.096	0.494	0.062	-0.590
		GDP	0.414	0.090	0.184	0.347	0.273	-0.090	0.501	0.091	0.018
	经济指标	PIP	0.405	0.076	0.175	0.338	0.272	-0.090	0.493	-0.011	0.782
		SIP	0.407	0.098	0.209	0.343	0.273	-0.044	0.497	0.112	-0.189
		TIP	0.402	0.026	0.156	0.342	0.235	-0.165			
特征值累计贡献率 / %		5.662	1.518	0.355	6.162	3.254	0.917	3.935	0.959	0.066	
		70.776	89.753	94.190	51.353	78.466	86.108	78.704	97.887	99.214	

流域内的径流与气候因素中的降水、蒸发、相对湿度和全部人类活动因素相关性显著。降水与径流相关性显著这一结论与刘洪兰等^[20]关于黑河流域的分析结果具有一致性,但其仅对气候因素与径流的关系进行了相关分析,没有将气候和人类活动要素与径流之间的相关性进行分析,而本次研究将气候和人类活动要素与年、季不同时间尺度下的径流进行了统计相关分析。

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,而基于径流机理机制的分布式水文模型(如SWAT、HESS、MIKE SHE等模型)是半干旱地区草原流域径流变化归因定量分析的关键方向。

3 结论

变化环境下锡林河流域年径流及枯水季径流在1963~2015年呈现显著的下降趋势;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,自1998年以来由于人类活动进程的加剧改变了天然径流的机制和变化规律;年径流量和枯水季径流量存在6年和25年左右的变化周期,丰水季径流在分析序列中不存在显著周期,遵循一个更大的周期变化。

人类活动主要影响着不同时间尺度(水文年或季)的半干旱草原流域径流的变化特征。锡林河流域年径流与气候因素中的降水量、相对湿度呈显著正相关,与蒸发、全部人类活动因素呈显著负相关;丰水季径流与气候因素中的降水量、降水天数、最大降水强度、平均降水强度和相对湿度呈显著正相关,与风速和温度呈显著负相关,与人类活动所有要素呈现显著负相关;对于枯水季径流,与仅气候指标中的相对湿度显著正相关,与温度呈近负相关,与人类活动中人口、GDP、PIP和SIP呈负相关。

半干旱草原流域径流在各种因素之间的相互作用下而变化较为复杂,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,而基于径流机理机制的SWAT、HESS、MIKE SHE等分布式水文模型是半干旱草原流域径流变化归因定量分析的关键方向。研究成果对于我国北方半干旱草原流域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具有一定的实际意义,为进一步探讨半干旱内陆河草原流域气候变化特征和水文循环提供参考依据。

参考文献:

- [1] 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.(WANG Liang, GAO Ruizhong, LIU Yucui, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in Neimeng reach of Luanhe river[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3):70-79.(in Chinese))
- [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.(LIU Guihua, QI Shuhua, XIONG Mengya, et al. Quantitative estimation of runoff changes in Ganjiang River, Lake Poyang basin under climate change and anthropogenic impacts [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3):682-690.(in Chinese))
- [3] 崔新华.神经网络模型在淮滨站天然径流量计算中的应用初探[J].水文,2008,28(2):55-59.(CUI Xinhua. Application of neural network BP model in calculating annual natural runoff at Huaibin station[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(2):55-59.(in Chinese))
- [4] 高瑞忠,白勇,刘廷玺,等.内蒙古高原典型草原内陆河流域径流的时序演变特征[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):10-17.(GAO Ruizhong, BAI Yong, LIU Tingxi, et al. Evolution characteristics of runoff in the typical grassland inland river basin of Inner Mongolia Plateau [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 10-17.(in Chinese))
- [5] 邵月红,林柄章,刘永和,等.基于径流分类的流域降雨-径流过程动态神经网络建模[J].地理科学,2012,32(1):74-80.(SHAO Yuehong, LIN Bingzhang, LIU Yonghe, et al. Rainfall-runoff simulation based on runoff classification using dynamic artificial neural networks [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(1): 74-80.(in Chinese))
- [6] 吴梦莹,王中根,党素珍,等.基于HIMS的黑河上游山区径流模拟与分析[J].资源科学,2012,34(10):1913-1921.(WU Mengying, WANG Zhonggen, DANG Suzhen, et al. Simulation and analysis based on HIMS of runoff in the upper reaches of the Heihe River basin [J]. Resources Science, 2012, 34(10):1913-1921.(in Chinese))
- [7] 刘兆飞,王翊晨,姚治君,等.太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析[J].自然资源学报,2011,26(9):1575-1584.(LIU Zhao-fei, WANG Yi-chen, YAO Zhi-jun, et al. Trend and periodicity of precipitation, air temperature and runoff in the Taihu Lake basin [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9):1575-1584.(in Chinese))
- [8] Xu, J. X. Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Yellow River, China [J]. Environ. Manag. 2003, 31(3), 328-341.
- [9] 陈剑鑫,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.(CHEN Jianxia, HUANG Weidong. Forecast and analysis of annual runoff trend in Zuli River basin [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2007, 13(12):920-921.(in Chinese))
- [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.

- (DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Runyuan, et al. A study on impacts of climate change on runoff of inland rivers and adaptive water resource managements in Hexi corridor [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5):1267-1275.(in Chinese))
- [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.(NIU Zuirong, ZHAO Wenzhi, LIU Jinqi, et al. Study on change characteristics and tendency of temperature, precipitation and runoff in Weihe River basin in Gansu [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(2):78-84. (in Chinese))
- [12] 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.(JIAO Wei, ZHU Zhongyuan, SONG Xiaoyuan, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff yield of the Xilin River basin over nearly 50 years [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(6):904-909.(in Chinese))
- [13] 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.(YANG Lizhe, QIAN Hong, HAO Lu. Analysis of runoff variations and impact factors in Xilinhe River basin in recent 50 years [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(3):303-310.(in Chinese))
- [14] Xixi Wang, Xiaomin Yang. Trend and extreme occurrence of precipitation in a midlatitude Eurasian steppe watershed at various time scales [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(22) : 5547-5560.
- [15] 赵煜飞, 朱江, 许艳. 近 50a 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.(ZHAO Yufei, ZHU Jiang, XU Yan. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for recent 50 years [J]. Pratacultural Science, 2014, 34(4):414-420.(in Chinese))
- [16] Hamed K.H., Rao. A modified Mann-Kendall trend test for auto-correlated data [J]. Hydrology, 1998, 204, 182-196.
- [17] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析 [J]. 干旱区地理, 2014, 37(6) :1137-1146.(LIU Zhifang, LIU Youcun, HAO Yonghong, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1137-1146.(in Chinese))
- [18] 高瑞忠, 冯国华, 朝伦巴根, 等. 黄河内蒙古段冰情变化特性的统计分析 [J]. 人民黄河, 2010, 32(04):53-58.(GAO Ruizhong, FENG Guohua, CHAOLUN Bagen, et al. Statistical analysis on characteristics of ice regime variation at Inner Mongolia section of the Yellow River [J]. Yellow River, 2010, 32(04):53-58.(in Chinese))
- [19] 唐启义. DPS 数据处理系统-实验设计、统计分析及模型优化 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.(TANG Qiyi. DPS Data Processing System for Experimental Design, Statistical Analysis and Model Optimization [M]. Beijing: Science Press, 2006.(in Chinese))
- [20] 刘洪兰, 张强, 郭俊琴, 等. 黑河流域春季降水空间分异性特征及其与黑河流量的相关分析 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(06):1633-1640.(LIU Honglan, ZHANG Qiang, GUO Junqin, et al. Spatial differentiation of spring precipitation in the Heihe River basin and its correlation with the river flow [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1633-1640.(in Chinese))

Variation Characteristics of Runoff and Quantitative Analysis of Its Affected Factors under Changing Environment in Typical Steppe Basin of Semiarid Region

YU Chan¹, WANG Weina², GAO Ruizhong², LIU Tingxi², BAI Yong², WANG Xixi³

(1. The Hydrological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. Old Dominion University, Norfolk 23529, USA)

Abstract: The climate fluctuation and human activities have significant effects on the changes of surface hydrological processes in the basin, especially for the semiarid steppe basin. This paper chosen the Xilin River basin to analyze the variation characteristics of its runoff series from 1963 to 2015 by using the improved M-K trend test method, the double accumulation curve method, the cumulative anomaly method and the wavelet transform method. The main influencing factors were analyzed by the statistical correlation test and the principal component analysis at hydrological year and seasonal scale. The results show that the runoff decreased significantly at all time scale in the Xilin River basin in the past years; the mutation year of it was in 1998, and the dominant factors affecting runoff were changed after that year; the cycles of the hydrological year and dry season runoff were 6 and 25 years while there were no significant cycle changes in the wet season runoff. The factors like precipitation, evaporation, relative humidity, and human activities have significant impacts on runoff, but the human activities are the dominant ones.

Key words: runoff; variation characteristics; affecting factors; quantitative analysis; semi-arid steppe basin; the Xilin River basin