

The Multi-Timescale Climate Change and Its Impact on Runoff Based on Cross-Wavelet Transformation

Ying Hou, Fang Zheng, Yi Shao

College of Resources and Environment Sciences, Ningxia (China-Arab) Key laboratory of Resource Assessment and Environment Regulation in Arid Region, Ningxia University, Yinchuan Ningxia
Email: holying@nxu.edu.cn

Received: Dec. 1st, 2016; accepted: Dec. 16th, 2016; published: Dec. 23rd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on meteorological and hydrological data in Shiyang River, climatic change characteristics and its impact on runoff in different time scales were discussed based on Mann-Kendall test, correlation analysis, wavelet analysis and cross-wavelet test methods. The results show that precipitation in the upper reaches decreases significantly during the period from 1956 to 2001, precipitation in the lower reaches decreases after mid-1990s, and temperature and maximum temperature increases significantly ($p < 0.01$) in the entire Shiyang River. There is a good correspondence between frequency domains of annual and summer precipitation and annual runoff in the upper reaches at the scales of 2 - 5 years (1960s, 1980-2005), and there is a significant negative correlation between annual and summer temperature series and runoff at longer-time scales (6 - 8 years, 1970s). The precipitation change plays a major role in runoff change. There are no significant correlations between annual precipitation and temperature series and annual runoff at multi-time scales in the lower reaches, and annual runoff change in the lower reaches is influenced by human activity. However, summer temperature and summer runoff in the lower reaches are significant negative correlated with at the scales of 2 - 4 years during the period from 1978 to 1995, summer runoff change in the lower reaches is affected by the combined impact of human activity and climate change.

Keywords

Climate Change, Runoff, Cross Wavelet Transform, Shiyang River

作者简介: 侯迎(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要从事气候与水资源、气候与环境演变研究。

文章引用: 侯迎, 郑芳, 邵议. 基于交叉小波的多尺度气候变化及其对径流的影响[J]. 水资源研究, 2016, 5(6): 564-572.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.56065>

基于交叉小波的多尺度气候变化及其对径流的影响

侯 迎, 郑 芳, 邵 议

宁夏大学资源环境学院, 宁夏(中阿)资源评价与环境调控重点实验室, 宁夏 银川

Email: holiying@nxu.edu.cn

收稿日期: 2016年12月1日; 录用日期: 2016年12月16日; 发布日期: 2016年12月23日

摘 要

选取石羊河流域代表性的气象站和水文站资料, 利用趋势分析、相关分析及交叉小波分析等多种方法探讨不同时间尺度上气候变化特征及其对地表径流的影响。结果显示: 上游降水量在20世纪后半叶显著减少, 而中、下游降水量在20世纪90年代中期以后呈显著下降趋势。整个流域温度、最高温度均呈极显著的增加趋势。上游降水量与地表径流在2~5 a尺度上(1960s、1980~2005年)正相位关联性强, 上游温度与地表径流在6~8 a时间尺度上(1970s)负相位关联性强, 且上游降水与地表径流的高凝聚性正相关更显著, 降水对上游径流的形成起主导作用。下游年际气候要素与年径流在各时间尺度上基本无显著关联性, 但下游夏季最高温度与夏季径流在20世纪后期呈现2~4 a的显著共振周期, 人类活动与气候要素共同影响着下游夏季径流的短周期振荡。

关键词

气候变化, 地表径流, 交叉小波, 石羊河流域

1. 引言

气候变化及其影响是当今的热点问题, 在分析区域气候变化的成因、影响时用传统的统计学方法, 如相关分析, 峰值、谷值出现的频次等, 存在一定局限性[1]。交叉小波分析方法, 具有精确度高、直观易读, 可用于分析两序列不同时段不同时间尺度上的一致性和相关性[2], 有利于揭示其变化规律及不同尺度受控因素[3] [4], 近年来在气候变化特征、机制、影响的研究中得到较好应用。如探讨气候变化与太阳活动的关系[1] [5], 气候变化与大尺度海-气环流间的关系[6] [7], 夏季风进退的响应[2]等。

地表径流的变化是受气候及下垫面各种因素综合影响的极其复杂的过程。与传统的相关分析相比, 交叉小波变换与小波相干方法适用于水文和气候要素间响应关系的分析[8], 可深层次地揭示两者之间的相关振荡频率和响应时滞方面的联系[9], 有较好的应用效果[10] [11]。如, 刘志方等[12]用交叉小波对黑河上游野牛沟气象站等的年降水和年均温、北极涛动指数进行了多尺度分析, 指出运用交叉小波能较好的分辨出多时间尺度下气象要素与水文间的变换周期和突变年。

石羊河位于甘肃河西走廊东段, 水资源短缺、生态环境脆弱, 水资源开发利用程度高, 水资源突出的供需矛盾引起一系列生态环境问题, 该流域的气候变化[13]、径流变化特征[14]、生态环境监测和生态补偿[15]等问题受到学者关注。本文以该流域典型的气象站和水文站的器测资料为基础, 利用趋势分析、突变分析、相关分析及交叉小波分析等方法, 研究该流域气候变化特征及其在不同时间尺度上对地表径流的影响, 对水资源的优化配置、合理地规划利用有指导意义。

2. 数据和方法

以石羊河流域上游八条主要支流中径流量较大、观测时间较长的西营河为例, 选择该支流上水文站点——

九条岭 1956~2014 年逐月径流量, 代表上游地表径流量。在下游干流上选取代表性的水文站点——蔡旗 1967~2014 年逐月径流量, 代表下游地表径流量, 数据来源于甘肃省水文水资源局。选取 3 个距水文站点较近且能代表上游和中下游气候背景的乌鞘岭、武威和民勤气象站, 气象资料选取 1951~2014 年逐月降水量、平均温度、平均最小温度和平均最大温度, 数据来源于中国气象数据共享服务网(图 1)。

分别利用 Mann-Kendall 趋势分析(检验值为 Z)、小波分析、滑动 t 检验和 YAMAMOTO 突变检验等[16]方法分析地表水资源变化趋势、周期和突变年份等演变规律, 相关分析(相关系数为 r)、交叉小波分析检验不同尺度上气候要素与地表径流的关系。

3. 结果分析

3.1. 气候变化、径流量趋势特征

该流域上游、中游和下游年降水量变化在高频上变化趋势较一致, 波峰和波谷较好的一致。整体而言, 上游年降水量呈微弱的减少趋势, 而中下游年降水量呈增加趋势, 但变化趋势均不显著。上游降水量在 1956~2001 年显著减少($Z = -2.02, p < 0.01$), 2003 年后再次下降($Z = -1.43$), 在 1960 s 和 1990 s 两个时段年降水量较少(图 2)。中下游两个气象站距离较近, 气候背景相似, 年降水量变化趋势一致: 1950 s、1970 s、1980 s 年降水量较少。整体而言中下游年降水量呈现增加的趋势($Z = 1.3/0.85$)。但 1990s 中期以后, 年降水量下降明显($Z = -1.58/-1.94$)。四个季节降水量变化和年降水量变化相似, 但上游冬季降水量增加趋势明显($Z = 1.56$)。

平均温度变化和平均最高温度变化类似, 以平均最高温度变化为例。整个流域年均最高温度均极显著的增加(图 3), 其中下游的年均最高温度增加更显著, Z 值达到 4.33 ($p < 0.01$), 可能和下游较干旱的环境有关。上游春季最高温度升温不明显, 其他季节均显著升温, 而冬季最高温度的增温趋势更显著。中游秋季和冬季升温最显著, 下游四个季节均显著升温, 其中秋季升温最显著, Z 值达到 3.26 ($p < 0.01$)。

3.2. 气候突变和周期特征

滑动 t 检验和 YAMAMOTO 检验显示: 上游年降水量在 1962 年、中游年降水量在 1964 年左右发生突变; 上游年均最高温度在 1987、1997 年, 中游年均最高温度在 1967、1997 年, 下游年均最高温度在 1965、1997 年发生突变。总体而言, 整个流域年降水量的突变年份在 1960 s 初, 年均最高温度的突变年份在 1960s 中期和 1990s 后期, 而年径流量的突变年份在 21 世纪初期(图略)。

小波分析显示: 上游年降水量的周期, 2~3 a (1950s~1980s)、4~6 a (1990~2005 年), 中游 2~3 a (1960s~1970s)、

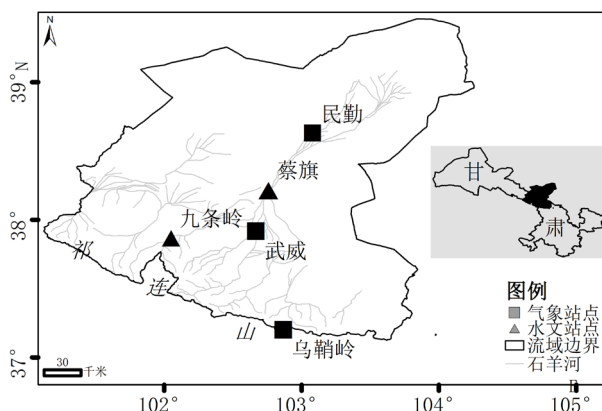


Figure 1. Map of selected meteorological and hydrological stations in Shiyang River

图 1. 石羊河流域及典型气象和水文站点

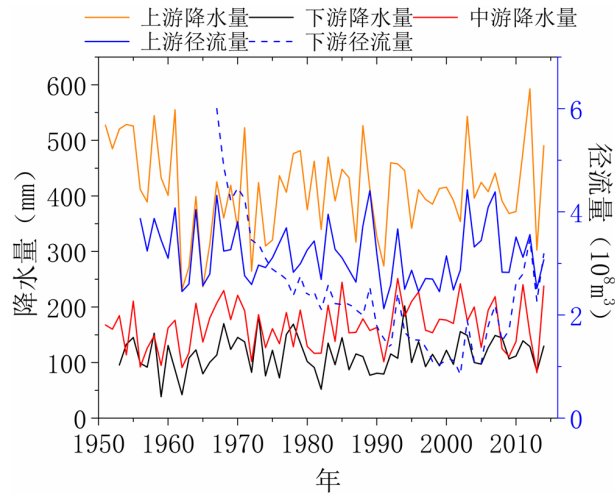


Figure 2. Changing trends of annual precipitation and runoff in Shiyang River

图 2. 石羊河流域年降水量和年径流量变化趋势

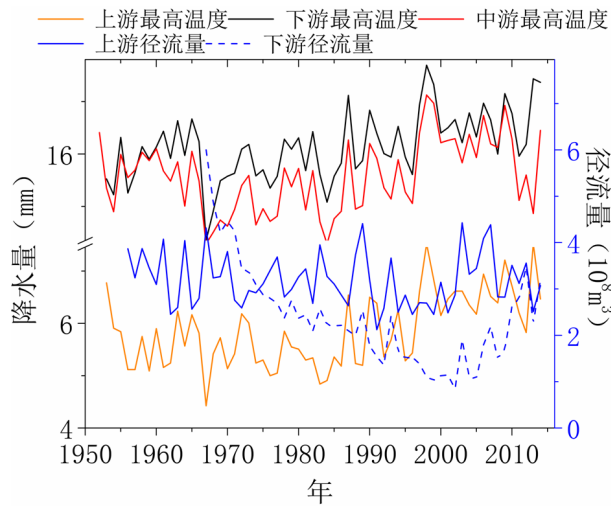


Figure 3. Changing trends of annual average maximum temperature and runoff in Shiyang River

图 3. 石羊河流域年均最高温度和上游年径流量变化趋势

8 a (1970~2000 年), 下游 2~3 a (1960s~1970s)、8 a (1970~2000 年); 上游年均最高温度的周期 2~3 a (1960s)、4 a (1970s~2010 年), 中游 2~3 a (1960s)、8 a (1960s~2010 年), 下游 4 a (1970s~1980s)、8 a (1970~2000 年)。总体而言, 上游的气候变化以短周期为主(2~6 a), 而中下游气候变化的以较长的周期为主(8 a)。

3.3. 气候要素与径流量的相关分析

从图 2 可以看出, 上游年径流量和上游年降水量在低频和高频上均有一致的变化, 对应较好, 相关系数为 0.611, 在 0.001 显著性水平上显著相关, 偏相关系数为 0.422 ($p < 0.001$)。上游年均最高温度与年径流量的相关系数为 -0.289 ($p < 0.05$), 偏相关系数为 -0.25, 弱于降水量与径流量的相关。从图 3 可以看出, 下游年径流量和下游年均最高温度在低频呈一致的反向变化, 但高频上的一致性较差, 波峰、波谷不一致。下游年径流量与下游年均最高温度的相关系数为 -0.682, 在 0.001 显著性水平上显著相关, 偏相关系数为 -0.63 ($p < 0.001$), 其与下游年降水量没有显著的相关性。

4. 气候多尺度变化对径流的影响

交叉小波功率谱重点突出石羊河气候要素与地表径流在时频域中高能区的相关关系,而交叉小波凝聚谱更侧重于两时间序列在低能量区的相关性[11],即这种相关关系对于时间和频率的依赖关系[7]。图4为该流域上游年降水量和年均最高温度与年径流量的交叉小波功率谱和小波凝聚谱。图中黑色细实线为小波边界效应影响锥,粗黑线表示通过显著性水平为 0.05 的红噪声检验。箭头表示两者之间的位相关系,→表示气候要素与径流量之间为同相位,说明二者为正相关关系。←表示气候要素与径流量之间为反相位,说明二者为负相关关系(下同)。

由图4(a)、图4(b)可知,交叉小波功率谱的高能量区与交叉小波凝聚谱的低能量区相吻合的,且两者在低能量区的显著相关强度大于高能区。上游年降水量与年径流量基本同相位变化,两者呈现较强的正相位关联性,主要表现在 0~4 a (1960s)、4~6 a (1980s~2000s)以及 9~11 a (1970s)尺度上。上游年均最高温度与年径流量以反相位变化为主,交叉小波功率谱的高能量区与交叉小波凝聚谱的低能量区基本吻合,且两者在低能量区的显著相关强度大于高能区(图4(c)、图4(d))。较强的反相位关联性主要表现在 0~4 a (1960 s)和 6~8 a (1970 s~1985 年)时间尺度上。年降水量和年均最高温度共同影响石羊河上游年径流变化,在 1960 s 及 1980 s 后以降水的短尺度正向作用为主,而在 1970s 以最高温度的较长尺度(6~8 a)上的负向作用为主。总体而言,年降水量是影响上游年径流量周期变化的主要因素,与上游气候要素与径流量的相关分析结果一致。除此之外,以四季中降水量和径流量所占比例较高的夏季为例,分析季节气候要素与径流量的多尺度相关关系。夏季上游降水量与夏季径流量的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱与两者年际尺度的分析结果基本一致,同样呈现 0~3 a (1960~1967 年)和 3~6 a

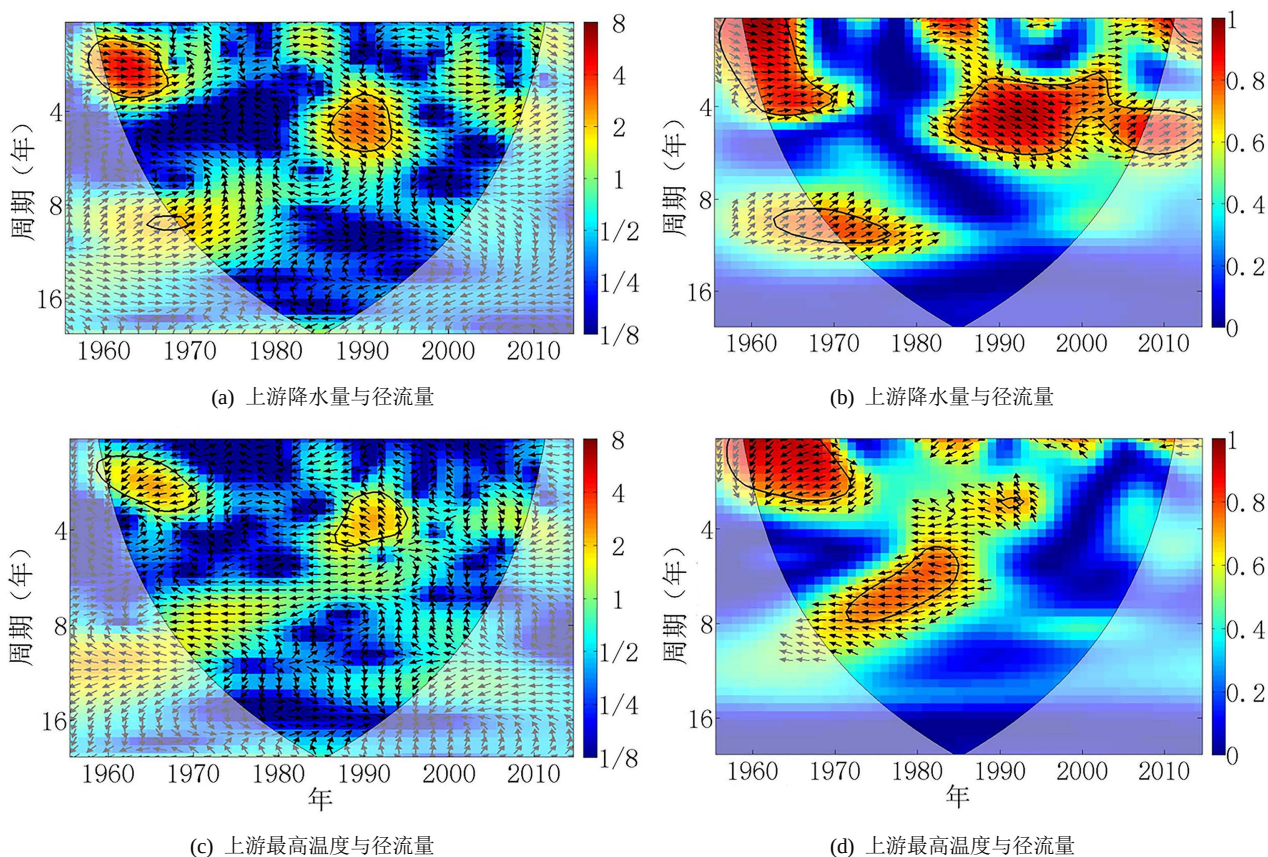


Figure 4. Cross wavelet transform (a, c) and wavelet coherence (b, d) between annual precipitation, annual average maximum temperature and runoff in the upper Shiyang River

图 4. 石羊河上游年降水量和平均最高温度与年径流量的交叉小波功率谱(a, c)和小波凝聚谱(b, d)

(1975~1995 年)的显著共振周期(图略)。上游夏季降水仍是影响夏季径流量变化的主要因素,但夏季温度对夏季径流量的负向作用较年际径流量更显著,即夏季较高的温度对夏季径流量的损耗作用更明显。

图 5 是下游年气候要素与年径流量的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱,两者在低能量区的显著相关强度远大于高能量区。下游年降水量对下游年径流量的影响弱(图 5(a), 图 5(b)),高能量区中小波影响锥区域内几乎没有通过显著性检验,仅有 0~2 a (1990~1995 年)和准 5 a 共振周期(21 世纪初)。下游年最高温度对年径流量的影响同样较弱,仅在 1978~1981 年(1 a 周期)和 1988~1992 年(准 3 a 周期)有较短时间尺度的影响(图 5(c), 图 5(d))。虽然下游年均最高温度和年径流量有显著的负相关关系,但这种显著相关仅是低频上的趋势相关,它们的一阶差分序列几乎无相关性($r = -0.25$),同交叉小波分析的结果相一致。下游夏季气候要素与夏季径流量的关联性明显强于两者年际尺度的关联性,但夏季降水与夏季径流的交叉小波功率谱中仍无通过显著性检验的小波影响锥区域,同样仅在 21 世纪初有准 5 a 的正相位的共振周期(图 6(a), 图 6(b))。下游夏季最高温度与夏季径流量的反相位关联性较强,交叉小波凝聚谱显示,两者之间较好的关联性分布在 2~4 a 的时间尺度上(1978~1995 年)。但在 20 世纪末期以后,发生突变,夏季最高温度与夏季径流量的负相关减弱,转变为以准 5 a 尺度的正相位关联为主(图 6(c), 图 6(d))。

通过以上分析,上游降水量与上游径流量的高凝聚性正相关较温度要素更为显著,表明降水量对径流量的变化起主导作用,并且降水量对径流量有 1~2 个月的持续性。而下游年径流量受下游气候要素的影响较弱,小波影响锥区域内基本没有通过显著性检验。夏季径流受下游夏季降水量的影响同样较弱,但其短周期振荡受最

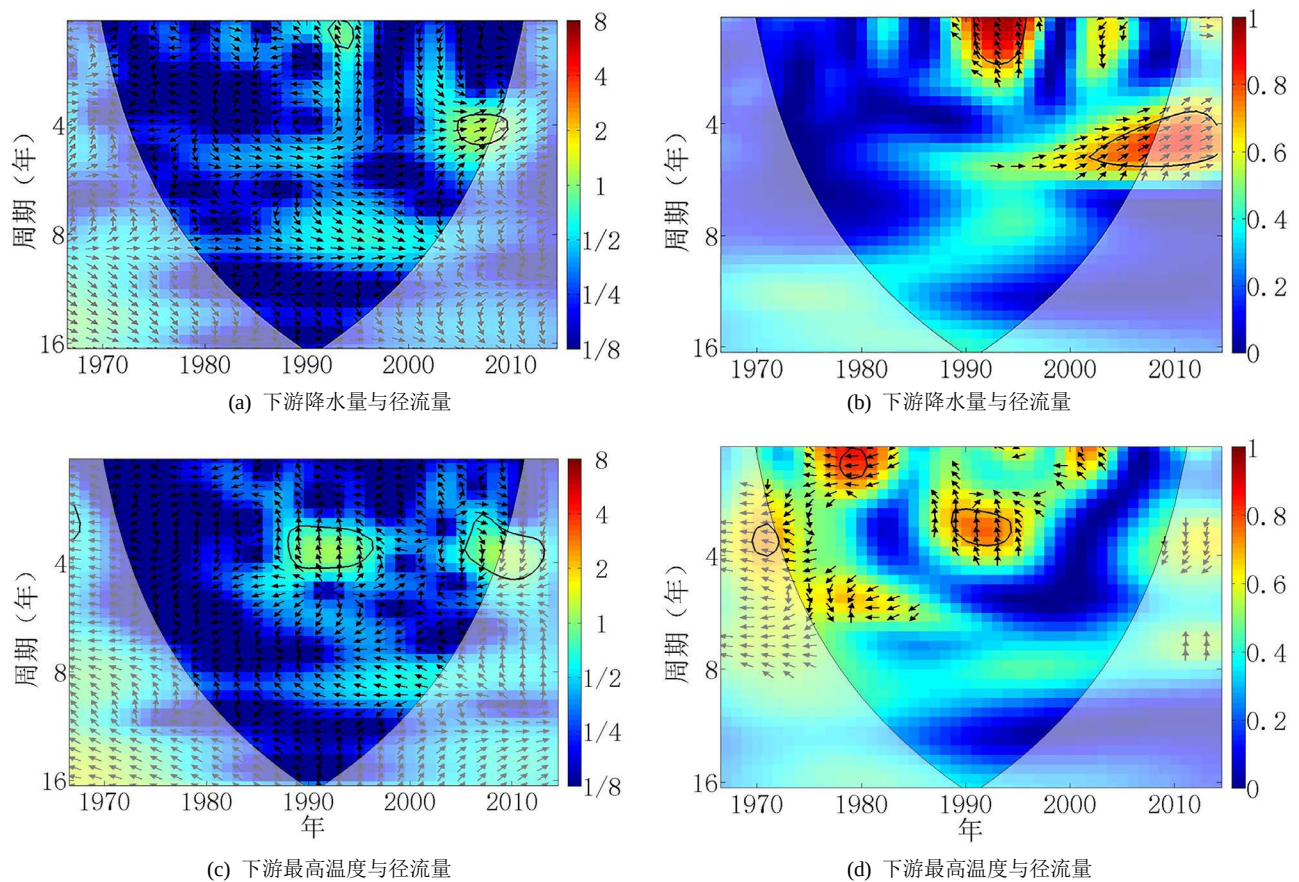


Figure 5. Cross wavelet transform (a, c) and wavelet coherence (b, d) between annual precipitation, annual average maximum temperature and runoff in the lower Shiyang River

图 5. 石羊河下游年降水量和平均最高温度与年径流量的交叉小波功率谱(a, c)和小波凝聚谱(b, d)

高温度的负相位影响，且影响较为紧密。下游年际尺度径流量的受控因素更复杂，在以人类活动的强烈干预下，下游年径流量呈现异常显著的减少趋势(表 1)。相对而言，在 20 世纪后期夏季径流受夏季温度等气候要素的作用更突出，较高的夏季最高温度引起地表径流的过多损耗，但此后夏季径流与温度的关联性减弱，其受到温度、降水及人类活动的共同影响。

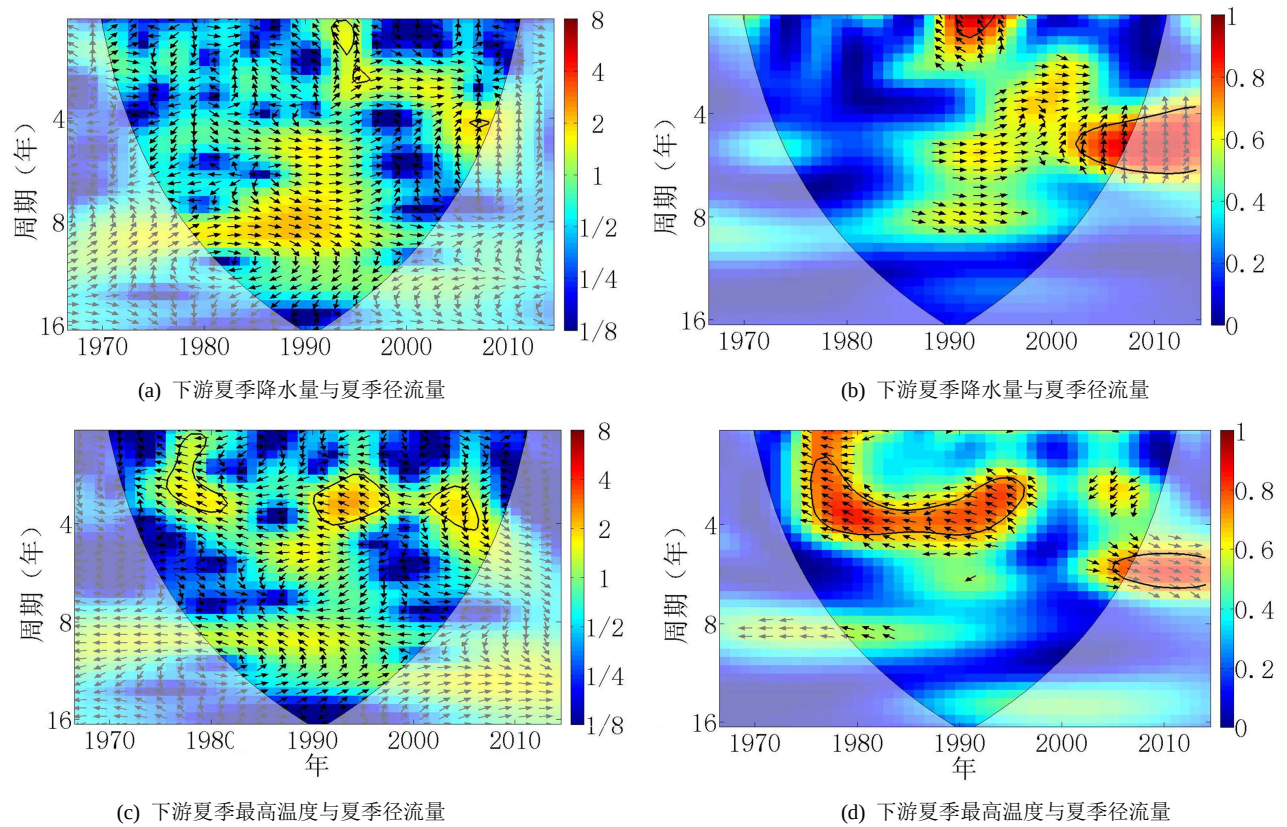


Figure 6. Cross wavelet transform (a, c) and wavelet coherence (b, d) between summer precipitation, summer average maximum temperature and summer runoff in the lower Shiyang River
图 6. 石羊河下游夏季降水量和平均最高温度与夏季径流量的交叉小波功率谱(a, c)和小波凝聚谱(b, d)

Table 1. Statistical results of Mann-Kendall trend test of precipitation, temperature and runoff

表 1. 石羊河降水量、温度和径流量的 Mann-Kendall 趋势检验统计量

		Mann-Kendall 统计量(趋势性)				
		春季	夏季	秋季	冬季	年
上游	降水	-0.82	-0.63	0.92	1.56	-0.55
	最高温度	0.69	2.3**	2.5**	2.73**	3**
	径流量	-0.6	-0.8	0.38	/	-0.8
中游	降水	1.99*	0.77	0.09	0.1	1.3
	最高温度	1.42	0.94	2.59**	2.33**	2.6**
下游	降水	0.8	0	1.28	0.72	0.85
	最高温度	2.78**	2.17*	3.26**	2.21*	4.33**
	径流量	-4.25**	-1.52	-2.44**	/	-4.9**

注: ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$ 。

5. 结论

(1) 上游年降水量在 1956~2001 年降水量减少的趋势显著。中、下游年降水量在 20 世纪 90 中期以后, 整体呈现显著下降的趋势, 1950s、1970s、1980s 年降水量较少。整个流域温度、最高温度均呈极显著的增加趋势, 其中下游的年最高温度增加更显著。

(2) 整个流域年降水量的突变年份在 1960s 初, 年均最高温度的突变年份在 1960s 中期和 1990s 后期。上游的气候以短周期变化为主(2~6 a 周期), 而中下游气候以较长的周期变化为主。

(3) 上游降水量与径流量显著正相关, 温度与径流量显著负相关。降水量和最高温度共同影响石羊河上游径流变化, 在 1960s 及 1980s 后以降水的短尺度正向作用为主, 而在 1970s 以最高温度的较长尺度(6~8 a)上的负向作用为主。上游径流量的周期振荡主要受气候要素的影响, 且响应较为紧密。下游年径流量受下游气候要素的影响弱, 基本没有通过显著性检验的小波影响锥区域, 下游年径流量主要受人类活动的影响。但下游夏季径流变化与夏季最高温度在 2~4 a 的尺度上的反相位关联性较强, 下游夏季径流的短周期振荡表现为人类与气候的共同作用。

基金项目

国家自然科学基金项目(51309134); 宁夏大学人才引进科研启动基金(BQD2012011)。

参考文献 (References)

- [1] 王涛, 霍彦峰, 罗艳. 近 300a 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.
WANG Tao, HUO Yanfeng and LUO Yan. Precipitation and sunspots in the central-west Tianshan Mountains in recent 300 years. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 708-717. (in Chinese)
- [2] 张红丽, 张强. 中国半干旱带干旱变化及其对夏季风进退的响应[C]//中国气象学会. 第 33 届中国气象学会年会. 西安, 2016.
ZHANG Hongli, ZHANG Qiang. Change characteristics of arid and semi-arid region and its response to the advance/retreat of the summer monsoon in China//Chinese Meteorological Society. The 33rd Annual Meeting of China Meteorological Society, Xi'an, 2016. (in Chinese)
- [3] 孙卫国, 程炳岩. 交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 479-487.
SUN Weiguo, CHENG Bingyan. Application of cross wavelet transformation to analysis on regional climate variations. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(4): 479-487. (in Chinese)
- [4] GRINSTED, A., MOORE, J. C. and JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11: 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- [5] 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.
CHENG Guosheng, CANG Zhongya, DU Yajun, et al. Analysis of the long-term vibration of Jianghuai Meiyu in response to solar activity factor. Plateau Meteorology, 2015, 34(2): 478-485. (in Chinese)
- [6] 毕硕本, 瞿颖, 张永华, 等. 1725 年以来北京年降水量年代际变化分析及其与太平洋海表温度关系研究[J]. 热带气象学报, 2016, 23(5): 1-9.
BI Shuoben, JU Ying, ZHANG Yonghua, et al. Decadal variation analysis of the annual precipitation series of Beijing and its relationship with Pacific sea temperature since 1725. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 23(5): 1-9. (in Chinese)
- [7] 苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5467-5475.
SU Hongxin, LI Guangqi. Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5467-5475. (in Chinese)
- [8] 张洪波, 俞奇骏, 陈克宇, 等. 基于小波变换的径流周期与 ENSO 事件响应关系研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 59-66.
ZHANG Hongbo, YU Qijun, CHEN Keyu, et al. Analysis on the responding relationship between runoff period and ENSO events based on cross-wavelet transform. Journal of North China University of Water Resources and Hydropower (Natural Science Edition), 2016, 37(4): 59-66. (in Chinese)
- [9] 邵骏. 基于交叉小波变换的水文多尺度相关分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 22-26.
SHAO Jun. Multi-scale correlation analysis of hydrological time series based on cross wavelet transform. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 22-26. (in Chinese)

- [10] 董煜, 张立山, 陈学刚. 精河流域径流变化特征及其对降水变化的响应[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 60-64.
DONG Yu, ZHANG Lishan and CHEN Xuegang. Runoff characteristic and its responses to precipitation change in Jinghe River. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(4): 60-64. (in Chinese)
- [11] 柏玲. 气候变化对天山南坡典型流域径流过程的影响[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2016.
BO Ling. Climate change and its impacts on runoff process for typical river basin in the southern slopes of Tianshan Mountains. Shanghai: East China Normal University, 2016. (in Chinese)
- [12] 刘志方, 刘永存, 赫永红, 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. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1137-1146. (in Chinese)
- [13] HOU, Y., NIU, Z., ZHENG, F., et al. Drought fluctuations based on dendrochronology since A.D. 1786 for the Lenglongling Mountains at the northwestern fringe of the East Asian summer monsoon region. Journal of Arid Land, 2016, 8(4): 492-505.
<https://doi.org/10.1007/s40333-016-0009-8>
- [14] 郭静, 王宁, 粟晓玲. 气候变化下石羊河流域上游产流区的径流响应研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 1-8.
GUO Jing, WANG Ning and SU Xiaoling. Response of runoff to climate change in upstream generation area of Shiyang River basin. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2016, 44(12): 1-8. (in Chinese)
- [15] SU, X. L., LI, J. F. and SINGH, V. P. Optimal allocation of agricultural water resources based on virtual water subdivision in Shiyang River Basin. Water Resources Management, 2014, 28(8): 2243-2257. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0611-5>
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
WEI Fengying. Modern diagnosis of climate statistics and its prediction. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)