

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.009

中亚瓦赫什河上游源区气候水文要素演变特征

岳伟鹏¹, 张合理^{2,3}, 陈峰^{1,2,3}, BAKHTIYOROV Zulfiyor^{1,4}, 陈友平⁵

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500; 2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4. 塔吉克斯坦共和国科学院胡占德科学中心, 索格特 胡占德; 5. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:为研究全球变化背景下中亚河流源区气候水文变化, 基于中亚跨境河流瓦赫什河上游源区1955—2017年气象水文数据, 分析了流域内气候水文要素演变特征及流量变化主要控制因子。结果表明: 瓦赫什河上游源区近1955—2017年气候呈现暖湿化趋势; 瓦赫什河上游源区气温在1994年发生突变现象, 降水在2007年与2012年发生突变现象, 流量则在2003年发生突变现象; 小波分析显示瓦赫什河上游流域气温、降水、流量的第一主周期分别为28 a、20 a、28 a, 周期性振荡明显; 瓦赫什河上游源区在气候水文要素关联上, 气温与流量变化相较于降水紧密, 但受全球升温停滞影响, 温度对于流量作用并没有持续增强。

关键词: 气温; 降水; 流量; 气候变化; 中亚; 瓦赫什河

中图分类号: P932 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2020)05-0057-08

Evolution characteristics of climatic and hydrological elements in the upper source area of the Vakhsh River, Central Asia // YUE Weipeng¹, ZHANG Heli^{2,3}, CHEN Feng^{1,2,3}, BAKHTIYOROV Zulfiyor^{1,4}, CHEN Youping⁵
(1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 3. Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China; 4. Khuj and Science Center Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Khujand, Tajikistan; 5. School of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: In order to study the climatic and hydrological changes in the source area of Central Asian rivers under the background of global climate changes, the evolution characteristics of climatic and hydrological elements and the main controlling factors of discharge variation in the basin were analyzed based on the meteorological and hydrological datas of the upper source area of the Vakhsh River from 1955 to 2017. The results show that the warming-wetting trend occurred in the upper source area of the Vakhsh River from 1955 to 2017. Abrupt changes of temperature, precipitation and discharge in the upper source area of the Vakhsh River occurred at 1994, 2007 and 2012 as well as 2003, respectively. Wavelet analysis shows that the first main cycles of temperature, precipitation and discharge in the upper Vakhsh River basin are 28 a, 20 a and 28 a, respectively with obvious periodic oscillations. With regard to the correlation of climate and hydrological elements in the upper source area of the Vakhsh River, the correlation of temperature and discharge variation was closer than precipitation. However, due to global warming hiatus, the influence of temperature on discharge did not continue to enhance.

Key words: temperature; precipitation; discharge; climate change; Central Asia; Vakhsh River

伴随人类影响不断增强, 近百年来全球温度呈现明显的上升趋势, 第四次 IPCC 报告指出 20 世纪中后期全球的升温率处于有气候观测历史记录以来

最高水平^[1-3]。温度升高导致区域水循环发生变化, 进而对河川径流变化产生重要影响^[4-5]。因此, 区域气候变化及其对流域水循环的影响已成为当前水文

基金项目: 国家自然科学基金(U1803341); “十三五”国家重点研发计划(2018YFA0606401)

作者简介: 岳伟鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为气候变化与水文水资源。E-mail: yueweipengpeng@163.com

通信作者: 陈峰, 研究员。E-mail: feng653@163.com

前沿研究的热点。“西风模式”影响下的中亚^[6-7], 千年来总体气候组合特征为暖干-冷湿,但最新研究发现中亚地区在过去几十年气候组合发生显著变化,主要表现为暖湿化趋势^[8-9]。中亚冰川补给型河流在径流量与流量等水文要素上是否存在一定的响应需要进一步研究。

中亚地处亚洲内陆干旱区,水资源短缺一直是制约中亚经济社会发展的主要因素。与此同时,中亚地区也是我国“丝绸之路”经济带建设的核心区,水安全是经济带建设过程中重点关注的问题^[10-11]。因此,研究中亚地区的水文变化有助于中亚各国制定相关水政策,以维护国家内部及国家间政治安全与社会稳定,同时也能为我国在中亚地区合作开展“丝绸之路”经济带建设提供相应的科学支撑。

瓦赫什河(Vakhsh River)上游源区位于中亚腹地,生态脆弱的高海拔山地与冰川区是该流域主要的下垫面条件^[12],这导致该区地理环境易受到高原山地的气候变化影响。长期气候变化影响了河流源区的水汽形成及运移、降水时空分布、产汇流等环节,使瓦赫什河中下游区域的水资源分配和生态环境格局发生变化,特别是对跨境河流国家间水资源利益共享产生重要影响。近年来,中亚跨境河流国家间围绕水权分配、水资源共享等方面已经发生多起摩擦冲突事件,为此开展中亚地区跨境河流气象水文研究具有较强的现实意义^[13]。以往该区的水文研究多聚焦在水文水资源的开发与管理、冰川变化监测与评估等方向,气候变化背景下的水文要素变化方面研究相对较少,同时该流域的地理要素组合与中亚多条大河源区地理要素组合相似,对中亚地区开展相关研究具有一定的借鉴意义。

1 研究区概况

瓦赫什河发源于吉尔吉斯斯坦南部的达乌穆鲁克山,流经吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦,并汇入阿姆河。在吉尔吉斯斯坦境内称为克孜勒苏河(Kyzyl-Suu River),并成为瓦赫什河上游^[14]。河道全长524 km,流域面积3.91万km²,其中吉尔吉斯斯坦境内7900 km²。上游源区位于吉尔吉斯斯坦东南部,与中国、塔吉克斯坦接壤,地理位置为39°N~40°N、72°E~74°E(图1)。源区内平均海拔在3000 m以上,高山林立,峡谷纵横,以温带大陆性气候为主,并具有典型的高原气候特征,多年平均气温为-3.5℃,年均降水量为494.37 mm。

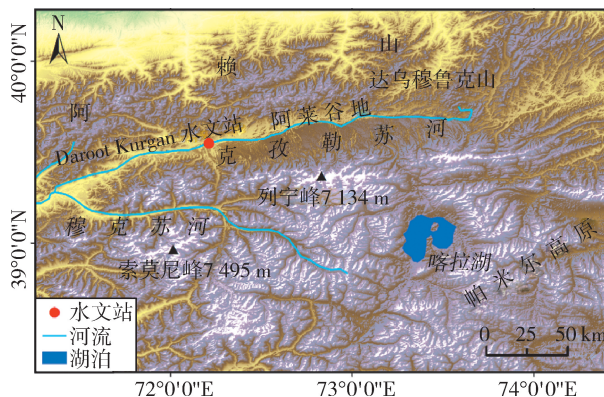


图1 瓦赫什河上游流域及水文站位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the upper source area and hydrological station in the Vakhsh River

2 资料来源与研究方法

2.1 资料来源

由于瓦赫什河上游源区内气象站少,有些年份器测数据缺测,现有观测气象资料用于长时间序列研究的可靠性较低,为此本文使用的气象资料为英国 East Anglia 大学 Climatic Research Unit(CRU)提供的1955—2017年CRU TS4.02气象格点数据集,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,选取范围为 $39^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $72^{\circ}\text{E} \sim 74^{\circ}\text{E}$ 。CRU气象格点数据采用多个知名气象数据库作为源数据,使用数学方法对数据源进行整合和插值,具有时间尺度长、分辨率高、严格的时间均一性检验过程、在地表气候要素数据上无时序中断等优点。同时,该数据结合了中亚地区高海拔特点,进行高度订正,在中亚地区应用有比较大的可信性,相关研究也验证了自1930年以后的中亚地区CRU资料具有较高的可靠性和适用性^[15-20]。本文所使用的水文资料来源于吉尔吉斯斯坦境内瓦赫什河上游 Daroot Kurgan 水文站1955年1月至2017年12月逐月流量实测值。

2.2 研究方法

针对气候水文数据的长时间观测序列特征,利用线性回归方法检验趋势变化^[19],并结合 Mann-Kendall 秩次相关检验法^[21]、Spearman 秩次相关检验法^[21-22]等方法,综合分析和检验源区气候水文要素演变趋势;利用滑动 t 检验法与 Mann-Kendall 突变检验法对比综合识别源区气候水文要素演变中的突变现象^[23];利用 Pearson 相关分析法探究气候水文要素之间关联及流量演变主要驱动因子^[24-28];利用 Morlet 小波变换分析法,诊断分析源区气候水文要素序列的周期变化^[26];利用滑动相关分析方法探讨气候要素在年际尺度上如何影响流量变化趋势,选用21 a为时间窗口。

3 结果与分析

3.1 源区气候水文变化趋势

a. 气温。瓦赫什河上游源区 1955—2017 年平均气温为 $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中气温变化倾向率为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$,年平均最高温度出现在 2004 年,最低温度出现在 1957 年。如图 2 所示,在研究时间段内虽然气温变化的波动性较大,但年平均气温总体上呈现出明显的上升的趋势,其中在 1997—2011 年和 2015—2017 年两个时间段内年均气温均高于平均值,距平值保持 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。Mann-Kendall 秩次相关检验、Spearman 秩次相关检验和线性回归检验分别检验出全年及季节总体趋势均保持显著上升趋势,达到 99% 的置信水平,其中夏秋两季的趋势特征值在 4 个季节中最大,为显著的上升趋势,具体各季节和全年检验特征值和变化趋势见表 1。

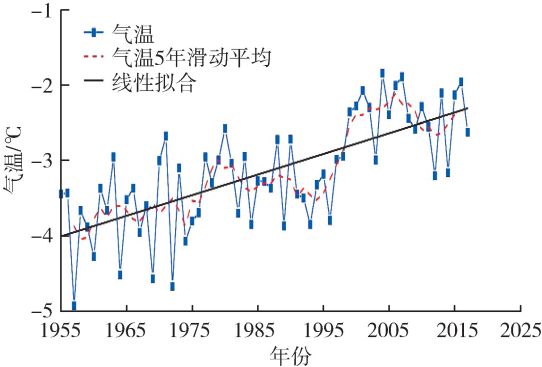


图 2 年平均气温变化趋势

Fig. 2 Annual average temperature change trend

b. 降水。瓦赫什河上游源区 1955—2017 年平

均降水量为 513.2 mm ,其中降水变化倾向率为 $1.34\text{ mm}/\text{a}$,年平均降水量最高出现在 2003 年,最低降水量出现在 1983 年。如图 3 所示,瓦赫什河上游源区在研究时间段内降水总体上波动较小,呈现出平缓的上升趋势,但在 20 世纪 60 年代后期与 21 世纪初期均出现时序较长、峰值较高的波动。由表 1 可知,3 种检验方法在瓦赫什河上游源区 1955—2017 年年均降水量上,一致检验出呈平缓上升趋势,且达到 95% 的置信水平;从季节上来看,春秋冬 3 季年平均降水量均无明显变化趋势,在选定的置信区间内不显著,夏季降水呈平缓上升趋势,3 种方法中大部分检测统计值达到 95% 的置信水平。

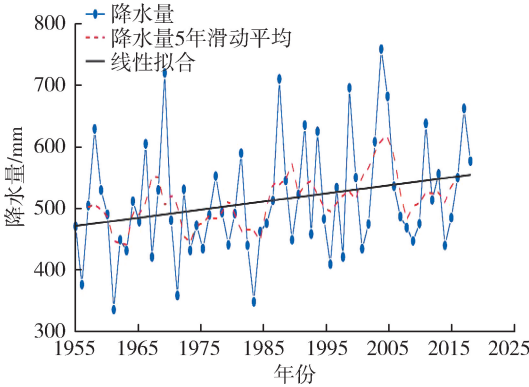


图 3 年平均降水量变化趋势

Fig. 3 Annual average precipitation change trend

c. 流量。如图 4 所示,瓦赫什河上游源区 1955—2017 年年均流量为 $42.0\text{ m}^3/\text{s}$,其中 2006 年年均流量为研究时段最高值,达到 $62.6\text{ m}^3/\text{s}$,为多年均值的 1.46 倍,最低流量出现在 1974 年,年均流量为 $28.6\text{ m}^3/\text{s}$ 。瓦赫什河上游源区年均流量总

表 1 各气候水文要素检验特征值及变化趋势

Table 1 Inspection characteristic values and change trends of various climatic and hydrological elements

检验项目	时间	置信检验值			Mann-Kendall 秩次相关检验法		Spearman 秩次相关检验法		线性回归检验法	
		$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	统计值	趋势	统计值	趋势	统计值	趋势
气温	春季	1.67	2.00	2.65	3.82	↑ ***	4.53	↑ ***	4.66	↑ ***
	夏季	1.67	2.00	2.65	4.49	↑ ***	5.38	↑ ***	5.01	↑ ***
	秋季	1.67	2.00	2.65	4.24	↑ ***	4.96	↑ ***	5.25	↑ ***
	冬季	1.67	2.00	2.65	2.78	↑ ***	2.89	↑ ***	3.05	↑ ***
	全年	1.67	2.00	2.65	5.51	↑ ***	7.36	↑ ***	7.50	↑ ***
降水量	春季	1.67	2.00	2.65	0.13	→	0.19	→	0.14	→
	夏季	1.67	2.00	2.65	2.35	↑ **	2.41	↑ **	2.87	↑ ***
	秋季	1.67	2.00	2.65	0.60	→	0.67	→	0.93	→
	冬季	1.67	2.00	2.65	1.48	→	1.53	→	1.62	→
	全年	1.67	2.00	2.65	2.02	↑ **	2.04	↑ **	2.16	↑ **
流量	春季	1.67	2.00	2.65	4.77	↑ ***	5.67	↑ ***	6.88	↑ ***
	夏季	1.67	2.00	2.65	3.10	↑ ***	3.40	↑ ***	3.84	↑ ***
	秋季	1.67	2.00	2.65	4.37	↑ ***	4.75	↑ ***	5.18	↑ ***
	冬季	1.67	2.00	2.65	4.69	↑ ***	5.34	↑ ***	6.34	↑ ***
	全年	1.67	2.00	2.65	4.21	↑ ***	4.63	↑ ***	5.76	↑ ***

注: ↑ 表示上升趋势; → 表示无明显变化趋势; ↓ 表示为下降趋势。* 表示 90% 置信水平; ** 表示 95% 置信水平; *** 表示 99% 置信水平。

体保持上升趋势,其中 20 世纪 60 年代中后期至 21 世纪初,年均流量低于均值,保持低位增长。特别是在 20 世纪 60 年代中期出现一次波动,达到峰值后便开始急剧降低,直至 1974 年触底,达到最低值。从季节变化上看,瓦赫什河上游源区各个季节流量变化基本保持一致,夏冬两季波动幅度较春秋大,年均流量高。3 种检验方法一致检验出瓦赫什河上游源区年均流量在全年及季节上均为上升趋势,且达到 99% 以上的置信水平。

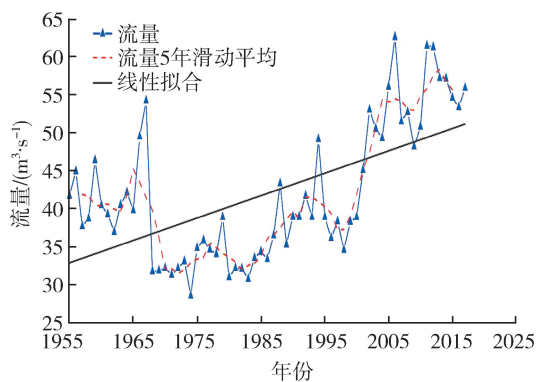


图 4 年平均流量变化趋势

Fig. 4 Annual average runoff change trend

总体来看,瓦赫什河上游源区 1955—2017 年气候逐渐呈现暖湿化趋势,这与中亚相关区域气候变化研究结果一致^[29],表明中亚不同地域气候变化特征存在一定的一致性。其中气温变化倾向率为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C/a}$,高于同期中亚地区 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 的平均水平。导致中亚地区出现暖湿化趋势原因,施雅风等^[30]认为气温上升的原因是 CO_2 的温室增温效应;王劲松等^[31]认为气温上升是与北极涛动、太阳活动有关,而导致降水增多的原因则是西风带纬向环流增强,侧重从地气相互作用的角度来阐述其对增温增湿的影响。与此同时,在全球尺度上 Dai 等^[4]通过对 1900—1995 年全球帕尔默干旱指数 (PDSI) 变化研究发现,ENSO 活动是 1976 年以来干湿变化的重要驱动因子。对气温、降水和流量进行 5 年滑动平均后,在变化趋势对比中发现,三者之间在 20 世纪 70 年代后期有较好的趋同性,其中气温与流量在趋势变化上表现为更相近。

3.2 源区气候水文突变识别

a. 气温。对于长时间气温观察序列,需采用多种突变检测方法进行比较。本文采用滑动 t 检验、Mann-Kendall 突变检验法检测气温序列的突变现象。如图 5(a) 所示,当子序列为 $n = 10$ 时,滑动 t 检验分析发现,瓦赫什河上游流区气温序列突变点发生在 1993—2001 年,并通过 0.01 的显著水平检验。与此同时,如图 5(b) 所示,采用 Mann-Kendall

突变检验法检验得到 UF 及 UB 统计值的变化线相交于 1994 年,通过 0.05 的显著性检验。两种测方法得到的结果类似,可以判定该流区的气温在 1994 年发生突变,且由低温向高温突变并整体呈现增高趋势。

b. 降水。当子序列为 $n = 10$ 时,滑动 t 检验(图 5(c))分析发现,瓦赫什河上游源区降水序列突变发生在 1983—1985 年,通过 0.01 的显著性检验;同时采用 Mann-Kendall 突变检验法检验得到 UF 及 UB 统计值的变化线分别在 1988 年、1990 年、1994 年、1995 年、2007 年、2012 年相交,其中 2007 年与 2012 年超过 0.1 的显著水平,呈显著性上升趋势(图 5(d))。分析两种检测方法得到的结果,可以判断瓦赫什河上游源区 1955—2017 年降水量保持缓慢上升,其中在 2007 年与 2012 年发生突变现象。

c. 流量。滑动 t 检验(图 5(e))分析可知瓦赫什河上游源区年均流量分别在 1982—1989 年、1997—2005 年发生突变,并通过 0.01 的显著性检验,这与上文对流量趋势进行 5 年滑动平均分析中发现的在 1997 年开始呈上升趋势的结果一致。Mann-Kendall 检验时发现 UF 与 UB 统计值的两条数值线在 2003 年处相交且通过显著性检验(图 5(f)),两种检验方法结果表明流量序列在 2003 年左右发生突变。

综合来看,突变现象均发生在 20 世纪后期,并都呈上升趋势,其中气温增温趋势与中东干旱区近百年气候变化趋势呼应。王劲松等^[31]认为这主要是冰岛低压异常加深,北大西洋亚速尔高压显著增强、乌拉尔高压脊异常增强以及赤道中东太平洋海表温度异常增暖所导致的。而降水趋多,陈发虎等^[7]认为是与西风环流增强及西伯利亚高压的位置和强弱变化有关。

3.3 源区气候水文变化周期

a. 气温。利用 Morlet 小波变换分析方法,对瓦赫什河上游源区气温时间序列变化进行周期性分析,利用计算结果绘制小波系数实部等值线图(图 6)和气温小波方差图(图 7),以反映瓦赫什河上游源区气温周期变化和位相特征,并识别气温时间序列中尺度对应的扰动强度与周期变化特征。由图 6 可见,气温序列能量中心频域尺度主要集聚在 14 a 和 28 a,显示为比较明显的两个主要周期;从图 7 可见,曲线两个波动峰值对应的横坐标主要时间尺度为 14 a 和 28 a,该对应尺度下的信号较为强烈,所以 14 a 和 28 a 是主要周期,其中 28 a 为第一主周期。时间尺度上 4 a 对应峰值较为弱,可视作微小波动,

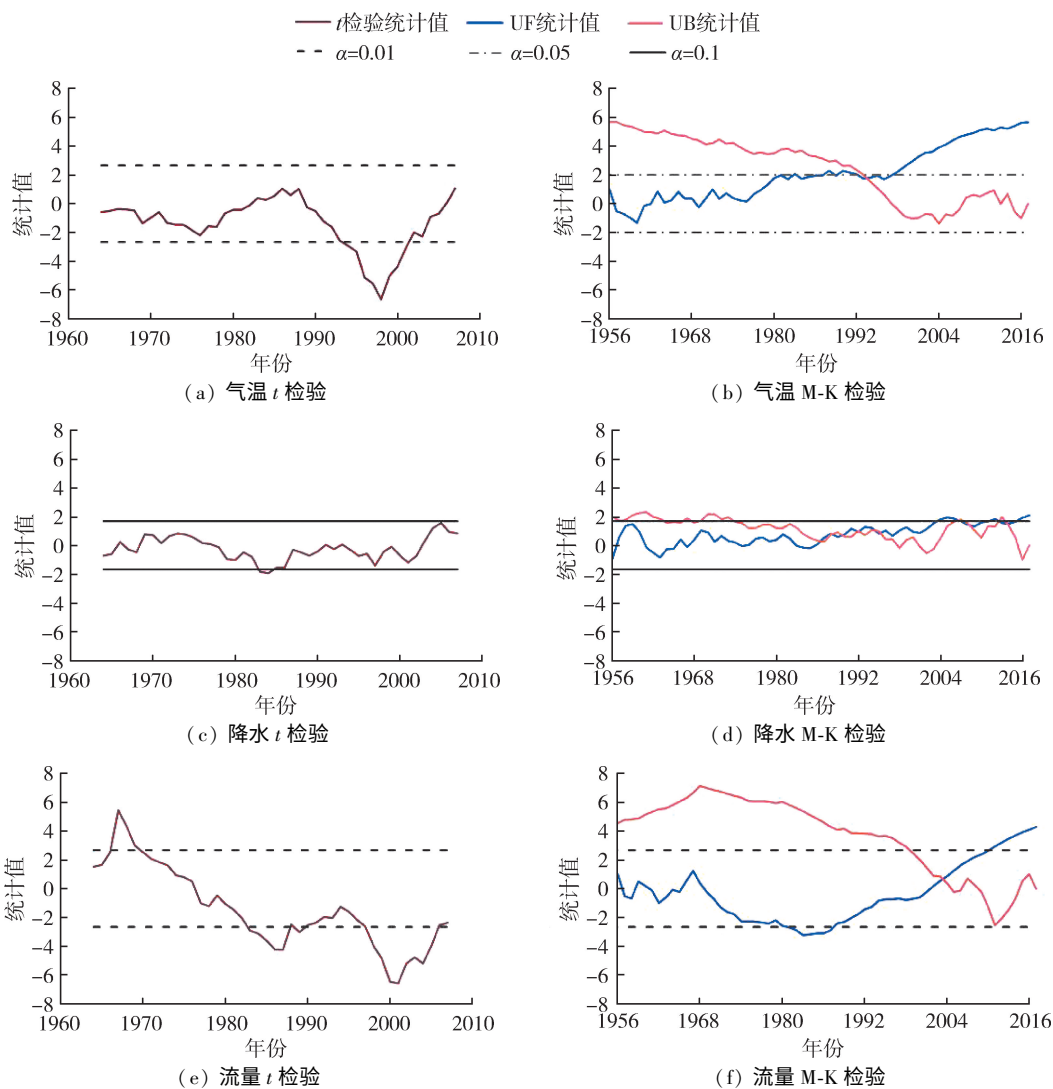


图5 气候水文要素突变检验

Fig.5 Climatic and hydrological factors abrupt change point test

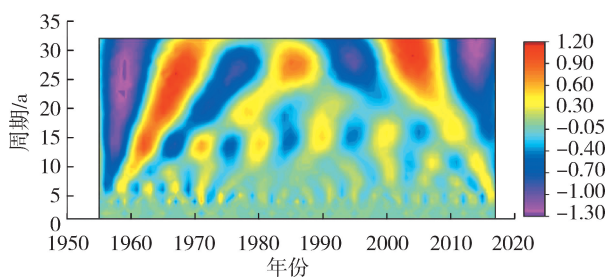


图6 气温序列小波系数实部等值线

Fig.6 Wavelet contour map of the temperature series

忽略不计。

b. 降水。分析可知瓦赫什河上游源区降水序列能量中心频域尺度主要集聚在 10 a 和 20 a, 显示为比较明显的两个主要周期;从降水小波方差分析结果可知,曲线两个波动峰值对应的横坐标主要时间尺度为 10 a 和 20 a, 该对应尺度下的信号较为强烈,所以 10 a 和 20 a 是主要周期,20 a 为第一主周期。

c. 流量。瓦赫什河上游源区年平均流量序列

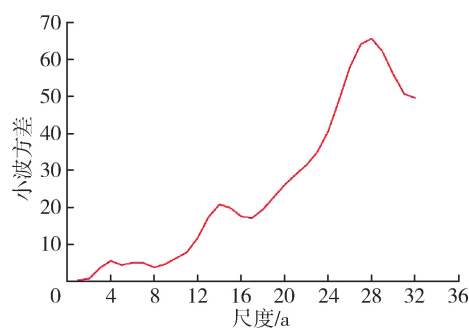


图7 气温序列小波方差图

Fig.7 Wavelet variance figure of the temperature series

高值能量中心频域尺度主要集聚在 15 a 和 28 a, 显示为比较明显的两个主要周期;从流量小波方差分析结果可知,曲线两个波动峰值对应的横坐标主要时间尺度为 15 a 和 28 a, 该对应尺度下的信号较为强烈,所以 15 a 和 28 a 是主要周期,以 28 a 为第一主周期。同时,在时间尺度为 10 a 处,流量小波方差出现较小幅度变化和峰值,峰值较为微弱,忽略不计。

瓦赫什河上游源区气候水文的准周期性振荡现象主要是自然外力作用和气候系统内部相互作用并叠加的结果,综合 Mann-Kendall 的突变检验结果,可以较为准确判定以上信号强烈且产生振荡的频域尺度第一主周期。比较降水与流量、气温与流量的第一主周期发现,气温与流量的周期在年际变化上具有较高的相似性,正负变化为 $0 \sim 1$ a,这说明气温与流量具有较相近的周期变化趋势。

3.4 源区气候水文要素关联及流量驱动要素

影响流量变化的因素主要包括气候因素与人为活动,其中气候因素又以气温和降水为主,而人为活动主要为人类改变流域环境和下垫面基础等。为探究瓦赫什河上游源区流量驱动因素,采用双累积曲线识别气候因素与人为活动对流量驱动的影响,结果如图 8 所示。由图 8 可见,瓦赫什河上游源区降水与流量的双累积曲线拟合程度较好, R^2 高达 0.99,且无明显的转折点;同时气温与流量的双累积曲线拟合也表现出较好一致性, R^2 为 0.97,这表明流量驱动基本无人工活动的影响。瓦赫什河上游源区位于高海拔地区,土地贫瘠,农垦和水电开发等人类活动极少,说明气候因素是驱动流量变化的主要因素。

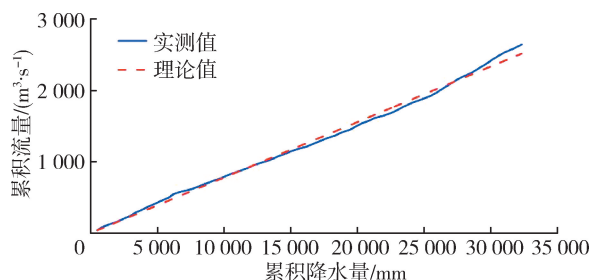


图 8 源区降水量与流量双累积曲线

Fig. 8 Double accumulation curve of precipitation and runoff in the upper source area

进一步辨析,气候因素中降水与气温是与流量变化相关的主要因素。采用年内相关普查分析法,进行不同时间段气温降水组合,并与年均流量进行相关分析,结果见图 9。由图 9 可见,在所有气温降水组合当中,上一年夏秋季节和当年夏秋季节月份的气温均与流量有显著的相关关系,其中当年的 6—10 月气温与流量相关性最高,相关系数为 0.554,通过 99% 的置信检验;降水与流量相关性最高的为当年 2 月,相关系数为 0.316,通过 95% 的置信检验;其中上一年 8 月与当年 8 月的降水与径流也表现出一定的显著关系。这表明瓦赫什河上游源区升温趋势与源区内流量增加趋势关系密切,且不同时间段内相关性的差异较大,6—10 月为北半球夏秋季节,这一时段气温上升趋势促使冰川积雪融

化加速,造成区域水循环加快,加之源区内冰川广布,集水面广,汇水量大,进而使河流流量增加;同时降水与流量相关性最高的时间段为当年 2 月,说明瓦赫什河符合中亚地区大多河流具备的“冬雨型”河流特征^[11],因受制于下垫面的调蓄和滞留作用,径流对降水与气温有一定的“滞后效应”,从而上年气温和降水与径流具有一定的显著关系。尽管气温变化是瓦赫什河年平均流量变化的主导因素,但这种相关关系并不稳定,采用年际滑动相关分析法进一步分析,结果见图 10。由图 10 可见,气温在 1987—2009 年与流量呈显著正相关,在 1958—1986 年呈不显著负相关;降水在此区间内与流量均保持正相关,1999 年后转为负相关。以上分析说明 1989—1999 年降水和气温均对流量变化有促进作用,1999 年后降水转为负相关。这种关系说明了气候变暖对于中亚冰川补给型河流有着重要影响,并在过去 40 年里对于流量变化起到了主导作用。可能受到了 1998/1999 年以来全球变暖停滞影响,流域内温度并没有持续上升。

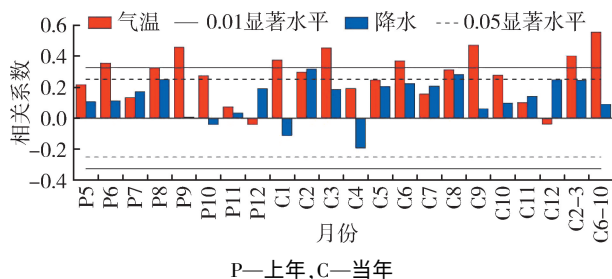


图 9 瓦赫什河上游源区年平均流量与气候因素相关系数

Fig. 9 Correlation coefficient between annual average runoff and climatic factors in the upper source area of the Vakhsh River

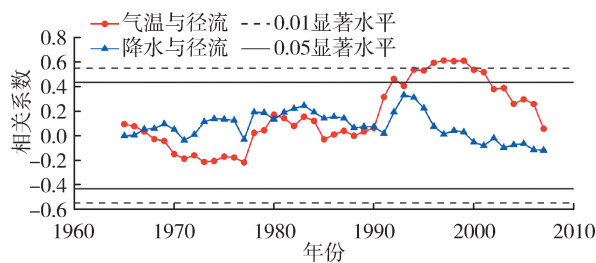


图 10 瓦赫什河上游源区气候因素与流量 21 年滑动相关

Fig. 10 Climatic factors and runoff of 21-year sliding correlation in the upper source area of the Vakhsh River

4 结 论

a. 瓦赫什河上游源区 1955—2017 年气候逐渐呈现暖湿化趋势,这与中亚相关区域研究结果一致,表明中亚各地气候变化特征存在一定的一致性。

b. 瓦赫什河上游源区气温在 1994 年发生突变现象,降水在 2007 年与 2012 年发生突变现象,流量

则在 2003 年发生突变现象。

c. 周期分析发现气温序列能量中心频域尺度主要集聚在 14 a 和 28 a,降水序列能量中心频域尺度主要集聚在 10 a 和 20 a,流量序列高值能量中心频域尺度主要集聚在 15 a 和 28 a。

d. 相关分析表明瓦赫什河上游源区流量变化的主要因素为气候因素,而气候因素中气温起主导作用。但受全球变暖停滞影响,这种关系没有进一步增强。

参考文献:

- [1] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883. (QIN Dahe. Climate change science and sustainable development[J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 874-883. (in Chinese))
- [2] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] MANN M E. Climate over the past two millennia [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35: 111-136.
- [4] DAI A G, TRENBERTH K E, KARL T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900—1995 [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25: 3367-3370.
- [5] 刘春葵, 占车生, 夏军, 等. 关于气候变化与人类活动对径流量影响研究的评述[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 379-385. (LIU Chunzhen, ZHAN Chesheng, XIA Jun, et al. Review on the influences of climate change and human activities on runoff [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 379-385. (in Chinese))
- [6] 陈发虎, 陈建徽, 黄伟. 中纬度亚洲现代间冰期气候变化的“西风模式”讨论[J]. 地学前缘, 2009, 16(6): 23-32. (CHEN Fahu, CHEN Jianhui, HUANG Wei. A discussion on the westerly-dominated climate model in mid-latitude Asia during the modern interglacial period [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(6): 23-32. (in Chinese))
- [7] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1647-1657. (CHEN Fahu, HUANG Wei, JIN Liya, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(11): 1647-1657. (in Chinese))
- [8] 陈峰. 中纬度中国—塔吉克斯坦东西向树轮气候研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [9] 王豪杰, 左其亭, 郝林钢, 等. “一带一路”西亚地区降水时空特征及空间均衡分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 35-41. (WANG Haojie, ZUO Qiting, HAO Lingang, et al. Anglysis of spatial-temporal characteristics and

spatial equilibrium of precipitation in West Asia area of “Belt and Road” [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 35-41. (in Chinese))

- [10] 郭利丹, 周海炜, 夏自强, 等. 丝绸之路经济带建设中的水资源安全问题及对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 114-121. (GUO Lidan, ZHOU Haiwei, XIA Ziqiang, et al. Water resources security and its countermeasure suggestions in building Silk Road Economic Belt [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 114-121. (in Chinese))
- [11] 郝林钢, 左其亭, 刘建华, 等. “一带一路”中亚区水资源利用与经济社会发展匹配度分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 42-48. (HAO Lingang, ZUO Qiting, LIU Jianhua, et al. Analysis of matching degree between water resource utilization and economic-social development in Central Asia area of “Belt and Road” [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 42-48. (in Chinese))
- [12] 穆振侠, 吴万虎, 姜卉芳, 等. 冬雨型河流河川径流量对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 111-116. (MU Zhenxia, WU Wanhua, JIANG Huifang, et al. Response of the runoff of winter rain type of rivers to the climate change [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12): 111-116. (in Chinese))
- [13] 杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 79-93. (YANG Shengtian, YU Xinyi, DING Jianli, et al. A review of water issues research in Central Asia [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 79-93. (in Chinese))
- [14] KURE S, JANG S, OHARA N, et al. Hydrologic impact of regional climate change for the snowfed and glacierfed river basins in the Republic of Tajikistan hydrological response of low to climate change [J]. Hydrological Processes, 2013, 27: 4057-4070
- [15] 张东, 宋献方, 张应华, 等. 基于 CRU 格点数据集的近百年渭河流域降水变化[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 142-148. (ZHANG Dong, SONG Xianfang, ZHANG Yinghua, et al. Variation characteristics of precipitation over Weihe River basin based on CRU Grid Dataset during last 100 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2): 142-148. (in Chinese))
- [16] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于 CRU 资料的中亚地区气候特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396-403. (HUANG Qiuxia, ZHAO Yong, HE Qing. Climatic characteristics in Central Asia based on CRU data [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 396-403. (in Chinese))
- [17] JONES P D. Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and update to 1993 [J]. Journal of Climate, 1994, 7: 1794-1802.
- [18] JONES P D, Moberg A. Hemispheric and large-scale

- surface air temperature variations; an extensive revision and an up date to 2001[J]. Journal of Climate, 2003, 16: 206-223.
- [19] HULME M A. 1951-1980 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models [J]. Climate Dynamics, 1992, 7: 57-72.
- [20] PETERSON T C, VOSE R, SCHMOYER R, et al. Global historical climatology network (GHCN) quality control of monthly temperature data [J]. International Journal of Climatology, 1998, 18: 1169-1179.
- [21] 何自立. 气候变化对流域径流量的影响研究: 以美国加州圣华金河上游源区为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [22] 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.
- [23] 李珍, 姜逢清. 1961—2004 年新疆气候突变分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 351-359. (LI Zhen, JIANG Fengqing. A study of abrupt climate change in Xinjiang region during 1961—2004 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 351-359. (in Chinese))
- [24] 赵娜娜, 王贺年, 张贝贝, 等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 40-47. (in Chinese))
- [25] HAMED, K H, RAO, A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. Journal of Hydrology, 1998, 204: 182-196.
- [26] 夏伟, 周维博, 何庆龙, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域输沙量影响的定量评估[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 51-56. (XIA Wei, ZHOU Weibo, HE Qinglong, et al. Quantitative evaluation on impact of climate change and human activities on sediment discharge in Bahe River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4): 51-56. (in Chinese))
- [27] 陈峰, 袁玉江, 喻树龙. 闽中北柳杉树轮指示的气候信号与季风区不同地域干湿变化关系[J]. 山地学报, 2015, 33(6): 690-695. (CHEN Feng, YUAN Yujiang, YU Shulong. Drought signals in the tree-ring width record of Cedar (Cryptomeria fortunei) trees from North Central Fujian: linkages to the monsoonal regions [J]. Mountain Research, 2015, 33(6): 690-695. (in Chinese))
- [28] GRINSTED, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11: 561-566.
- [29] CHEN Fahu, WANG Jinsong, JIN Liya, et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years [J]. Frontiers of Earth Science in China, 2009, 3(1): 42-50.
- [30] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, HU Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226. (in Chinese))
- [31] 王劲松. 近 100 年来中东干旱区对全球变暖的区域气候响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.

(收稿日期: 2019-10-11 编辑: 王 芳)

· 简讯 ·

《水资源保护》刊发论文被评为第五届中国科协优秀科技论文

根据《第五届中国科协优秀科技论文遴选计划实施方案》, 经学科集群专家推荐、牵头单位组织遴选、中国科协终审认定等程序, 于 2020 年 9 月 11 日公示了入选论文名单。《水资源保护》2017 年 33 卷 1 期《海绵城市建设中若干水文学问题的研讨》(作者: 夏军, 石卫, 王强, 邹磊)一文入选。该论文针对海绵城市建设面临的问题和挑战, 提出了以水循环为纽带、将城市暴雨—径流、水污染治理和城市生态绿地、湿地建设与市政建设(排水、排污)规划管理联系为一体的“城市水系统”的概念与方法。基于水文学原理, 分析了目前海绵城市建设中最为关键、也是质疑较多的年径流总量控制率概念, 指出现行的年径流总量控制率的计算实质是年降水总量控制率。如果回归到水文学概念, 年径流总量控制率就必须与水文系统响应的增益因子, 即径流系数建立内在的联系; 需要研究径流系数并非常数, 而是与土壤湿度、降水强度和下垫面组合的时变非线性理论问题。此外, 对比分析了现行海绵城市建设低影响开发措施和改进后的年径流总量控制率之间的关系, 深入剖析了“城市看海”发生的条件与风险。最后, 就海绵城市建设与规划的水文学基础亟待改进的方面: 径流系数非线性、区分自然条件和城市化后的蓄水量变化的差别、考虑河湖水系调蓄和陆地蒸散发、与流域大海绵调控结合、风险管理等进行了研讨, 并提出了未来我国海绵城市建设的若干建议。

(本刊编辑部供稿)