

文章编号: 1008-2786-(2018)6-867-11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000382

塔吉克斯坦帕米尔高原源区水文变化 ——以贡特河为例

陈友平^{1,2}, 张合理², 陈峰^{2*}, 范子昂², 刘蕊^{1,2}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054;

2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所 树木年轮理化研究重点开放实验室/新疆树木年轮生态实验室, 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 在中亚地区水资源匮乏、水资源安全问题突出背景下, 进一步了解该区水文变化有利于科学制定水资源调配政策。基于塔吉克斯坦贡特河(Gunt river)霍罗格水文站数据和霍罗格气象站数据, 使用不均匀系数、线性趋势法、Mann-Kendall 检验法、R/S 分析法和小波分析法等方法, 分析了 1940—2017 年贡特河流量变化特征及其对气候变化的响应, 结果表明: (1) 贡特河流量年内分配不均匀, 6—9 月占全年平均流量的 75%, 汛期集中在 7 月 19 日前后, 无明显提前或延后特征。(2) 贡特河流量年际变化总体呈减少趋势, 但趋势不显著, 年际变化率为 $-5.75 (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/10 \text{ a}$, 在 1940—1946 年呈增加趋势, 1947—1958 年呈减少趋势, 1959—1960 年呈增加趋势, 1961—2017 年呈减少趋势, 在 1946 年存在突变; 共经历了 4 次丰—枯期: 丰水期(1940—1959 年)—枯水期(1960—1976 年)—丰水期(1977—1995 年)—枯水期(1996—2017 年)。趋势分析表明流量在未来一段时间内可能存在增加趋势; 小波分析表明流量存在 23~34 a, 9~22 a, 4~8 a 的准周期变化。(3) 降水对贡特河径流年内补给具有明显滞后效应, 平均气温与径流年内变化具有同步性; 流量年际变化主要受降水影响; 周期相关表明, 年平均流量与降水量、平均气温在 1960—1980 年同时存在的 8~12 a 时间尺度的显著周期变化, 而在整个时间域中则同时存在 2~5 a 时间尺度的显著周期变化。

关键词: 中亚; 帕米尔高原源区; 贡特河; 水文变化; 气候变化

中图分类号: P333; P337; P339

文献标志码: A

中亚地处内陆干旱区, 水资源匮乏, 空间分布不均, 供需矛盾突出, 是国际上水问题十分严重的地区, 被列为世界上七大水资源争端高发区之一^[1]。例如: 塔吉克斯坦与其余中亚四国多年来一直主要围绕阿姆河和锡尔河的水资源利用和水坝建设问题争论不止^[2]。另外, 中亚地区同时为我国丝绸之路经济带核心区, 水资源安全问题是我国在建设丝绸之路经济带过程中高度重视的问题之一^[3]。因此,

研究中亚帕米尔高原源区水文变化有助于中亚各国科学制定水资源政策和维持政治稳定, 同时可为我国科学决策丝绸之路经济带水资源安全问题提供依据。

塔吉克斯坦水资源丰富, 主要的河流有锡尔河(Syr Darya)、阿姆河(Amu Darya)、泽拉夫尚河(Zeravshan River)、喷赤河(Pyanj River)和瓦赫什河(Vakhsh River), 年平均可再生水资源总量为 63.46

收稿日期(Received date): 2018-06-20; **改回日期**(Accepted date): 2018-09-24

基金项目(Foundation item): 中央级公益性科研院所基本科研业务费(IDM2017002); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100306)。
[Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund (IDM2017002); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA20100306)]

作者简介(Biography): 陈友平(1994-), 男, 福建福清人, 硕士研究生, 主要研究方向: 树木年轮与气候水文变化。[CHEN Youping (1994-), male, born in Fuqing, Fujian province, M. Sc. candidate, research on tree-ring and climate/hydrology change] E-mail: ChenYP007@163.com

* **通讯作者**(Corresponding author): 陈峰(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 树木年轮与气候水文变化。[CHEN Feng (1982-), male, Ph. D., professor, research on tree-ring and climate/hydrology change] E-mail: Feng653@163.com

亿 m^3 , 位列世界第八位, 被称为中亚国家中的“水塔”。依托丰富水资源, 该国 95% 以上的电量来自水力发电, 极大带动了国家经济发展^[4]。近年来, 学术界主要运用统计分析方法和水文模型法对塔吉克斯坦河流水文变化进行研究。其中, 阿姆河径流量年际变化 1951 年来呈递减趋势^[5]; 喷赤河 1960 年以来呈递增趋势^[6]; 而瓦赫什河径流量变化则相对稳定^[7]。另外, 这些河流变化的主要气候驱动因子也不尽相同。其中, 阿姆河径流量减少主要气候驱动因子为年际降水量^[5]; 而喷赤河与瓦赫什河径流量变化则主要取决于温度对冰川的影响^[8]。并有研究预测指出, 在 2060 年前, 喷赤河与瓦赫什河径流量将持续增加; 而在 2080 年后随着冰川面积的减少, 流域径流量也将相应呈减少趋势^[8]。这些研究有助于我们科学认识中亚流域的水文变化, 并可能在气候变化的大背景下对制定相应政策提供参考。

贡特河发源于塔吉克斯坦帕米尔高原, 流量和流域面积仅次于喷赤河, 对了解帕米尔高原源区的水文变化具有很强的代表性。遥感资料研究表明, 贡特河流域 80% 降水于冬夏两季以积雪形式储存, 而后在夏季以融水方式补给径流量, 这一过程具有滞后性^[9]; 而冰川消融导致帕米尔地区夏季径流增加 30%^[10]。以上研究中, 利用长期实测水文资料分析塔吉克斯坦帕米尔高原源区水文变化的研究十分稀少。因此, 文章以塔吉克斯坦帕米尔高原源区贡特河月平均流量数据为基础, 使用不均匀系数、线

性趋势法、Mann-Kendall 检验法、R/S 分析法和小波分析法等统计方法, 分析贡特河流量年内、年际变化特征并探讨其驱动机制, 以期合理调度该地区水资源提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

帕米尔高原主要由多条高峻山脉和山脉之间宽阔的谷地和盆地构成。山脉多以东西走向并行, 山高谷深。土地覆盖类型主要以贫瘠或稀疏植被 (67.6%) 和草地 (24.0%) 为主^[9]。研究区贡特河流域 (图 1) 位于塔吉克斯坦帕米尔高原中部, 属于塔吉克斯坦东南部戈尔诺-巴达赫尚自治州南部, 由帕米尔高原边缘的雅什库勒湖西边流出; 流域面积为 14 000 km^2 , 平均海拔为 4300 m, 最高海拔卡尔·马克思峰 6700 m, 最低海拔 2080 m 位于出水口; 流域属典型的大陆性气候, 春冬两季雨雪较多, 夏秋季干燥少雨。霍罗格气象站和水文站地处河谷, 位于贡特河与喷赤河的交汇处。

1.2 数据资料

水文数据为贡特河霍罗格水文站 (37.49°N, 71.53°E) 1940—2017 年器测月平均流量。气象数据为霍罗格市气象站 (37.50°N, 71.50°E) 同时期的器测数据, 要素为月平均气温和月降水量, 数据来源于美国国家环境信息中心 (<https://www.ncdc.noaa.gov/>)。其中降水量在 1946 年 3—5 月, 1968

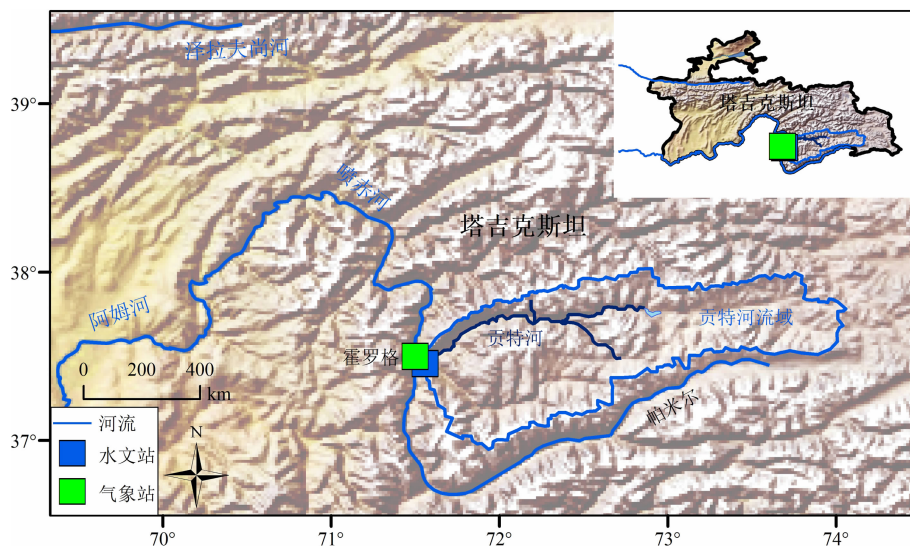


图 1 贡特河流域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Gunt River Basin

全年和1969年1—8月缺测;月平均气温在1945年4—9月,1968全年和1969年1—8月缺测。由于只在4个年份出现异常,文章选用线性插值法获取缺测月份气象数据近似值,并同时利用相对完整的CRU(Climatic Research Unit)气象数据进行对比验证,结果相对一致。

1.3 研究方法

文章所使用方法如表1所示,首先使用不均匀系数(Coefficient of Variance, C_v)、集中度(Runoff Concentration Degree, C_{RCD})、集中期(Runoff Concentration Period, C_{RCP})分析径流年内分配特征^[11];再使用线性趋势法^[12]、Mann-Kendall 检验法^[13]、累积距平法^[14]、R/S 分析法^[13]、小波分析法^[15]分析径流年际变化特征。而对于径流与气候变化的响应分析,首先使用双累积曲线法^[16]探讨径流的驱动因素,再使用相关普查法^[17]分析径流与气候因素年内相关,接着使用滑动相关法^[18]分析径流与气候因素年际相关,最后使用交叉小波变换^[19]探讨径流与气候要素的周期关联。

2 结果分析

2.1 径流年内分配特征

贡特河流量年内分配特征(图2)可以看出,在各个年代年内流量均呈明显的“单峰型”分布,在

1—4月份处于全年低值,5月份开始缓慢增多,6—7月份急剧增多并达到年内最大值,后8—12月份流量一直处于减少状态,并再次达到全年低值。其中,8—10月份减少速率大于11—12月份。计算1940—2017年各月平均流量占比得出,6—9月份流量为932.92 m³/s,占多年平均流量1245.63 m³/s的75%,10月份—次年5月份流量为312.71 m³/s,占年总流量的25%。以上分析表明,贡特河径流年内分布十分不均匀且主要集中在汛期6—9月份。

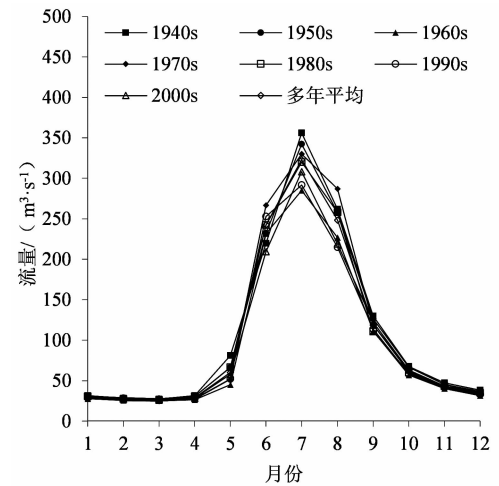


图2 贡特河平均流量年内分配特征
Fig.2 Distribution characteristics of annual discharge of the Gunt River

表1 本研究所用方法一览表
Tab.1 Methods to be used in this study

方法	基本含义	判断标准
不均匀系数(C_v)	分析流量年内分配特征	C_v 值越大说明流量年内分配越不均匀。
集中度(C_{RCD})	衡量流量年内集中程度	C_{RCD} 值介于0~1之间,越接近1说明年内分配越不均匀。
集中期(C_{RCP})	计算流量年内集中月份	流量向量合成后方位为年内最大流量时段。
Mann-Kendall	判断流量变化趋势和突变时间	统计量 U 值为正代表流量呈上升趋势,反之呈下降趋势;曲线 UF 和 UB 在置信区间内的相交点为流量突变时间点。
累积距平法	判断径流丰-枯变化	累积距平持续增大代表丰水期,反之为枯水期。
R/S	判断径流序列持续性	$H=0.5$ 表明该序列为随机序列, $H<0.5$ 表明未来趋势与过去相反, $H>0.5$ 表明未来趋势与过去一致。
小波分析	诊断流量变化周期	结合小波方差变化特征得出流量变化主周期。
降水-流量双累积曲线	判断径流驱动因素	曲线没有出现明显拐点,表明无人类等因素对径流产生影响。
Pearson 相关	分析降水、温度与流量年内相关性	相关系数最大的时间段为降水与温度对径流变化影响最强的区间。
滑动平均相关	分析降水、温度与流量年际相关性	滑动平均序列曲线图来诊断其相关性呈上升或下降趋势。
交叉小波变换	研究两个时间序列在时频域中的相互关系	小波功率谱图箭头向右说明两时间序列同位相变化,箭头向左说明两时间序列为反位相变化。

贡特河径流年内分配特征统计表(表2)可以看出,流量在20世纪70年代和21世纪10年代不均匀系数(C_v)和集中度(C_{RCD})最大,分别为1.03和0.60,说明在此期间流域流量相对于其他年代最多且各月间波动最大;而在21世纪初不均匀系数为0.95,集中度为0.56,为各年代中最小,说明在此时间段内,流域流量偏少且变化比较平稳。从径流集中期可以看出流量主要集中在7月18—20日,集中月份与上文分析结果一致,说明径流汛期集中在7月份并且多年来无明显提前或延后特征。

表2 贡特河径流年内分配统计特征
Tab.2 Statistic characteristics of annual discharge distribution of the Gunt River

年代/年	C_v	C_{RCD}	C_{RCP}
1940—1949	0.98	0.57	7月20日
1950—1959	0.98	0.57	7月20日
1960—1969	0.97	0.57	7月20日
1970—1979	1.03	0.60	7月19日
1980—1989	1.00	0.58	7月19日
1990—1999	0.98	0.57	7月19日
2000—2009	0.95	0.56	7月20日
2010—2017	1.03	0.60	7月18日

2.2 径流年际变化特征

贡特河年平均流量变化曲线(图3a)可以看出,

流域年平均流量为864.30~1867.20 m^3/s ,平均流量为1245.63 m^3/s ,最少出现在1962年,最多出现在1978年。年平均流量总体减少,年际变化率为 $-5.75(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/10 \text{ a}$ ($R^2=0.003$)。Mann-Kendall 突变检验法(图3b)可以看出,贡特河流量在1940—1946年呈增加趋势,1947—1958年呈减少趋势,1959—1960年呈增加趋势,1961—2017年呈减少趋势,在1965年减少趋势显著,通过了0.05的置信水平。UB和UF曲线交点位置得出,贡特河流量在1946年发生突变,年际变化率从229.44减少为 $3.50(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/10 \text{ a}$ 。结合下文年降水量变化特征(图9c)分析,降水在1945—1948年持续呈减少趋势,并在1947年减少趋势最明显。因此,贡特河径流在1946年发生突变可能与同时期降水持续减少有关。

径流累积距平曲线(图4)可以看出,1940—2017年贡特河流量共经历了4次丰—枯期:丰水期(1940—1959年)—枯水期(1960—1976年)—丰水期(1977—1995年)—枯水期(1996—2017年)。

2.3 径流变化趋势分析

Mann-Kendall 趋势检验得出Z值为-0.62,绝对值小于1.64,说明年平均流量呈减少趋势但减少趋势不明显。R/S分析法得出Hurst指数为0.21,小于0.5,说明将来总的趋势与过去相反。因此,若径流变化影响因素仍然按照现有趋势发展,未来一

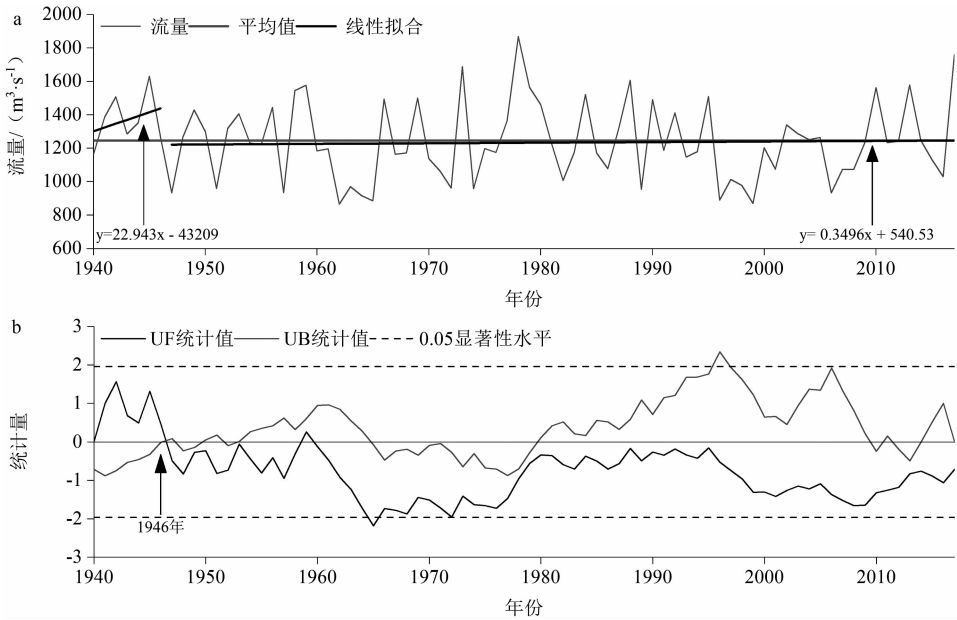


图3 1940—2017 贡特河年平均流量变化趋势(a)及 Mann-Kendall 趋势显著性检验(b)图
Fig.3 Trends of discharge (a) and Mann-Kendall trend test (b) of the Gunt River from 1940 to 2017

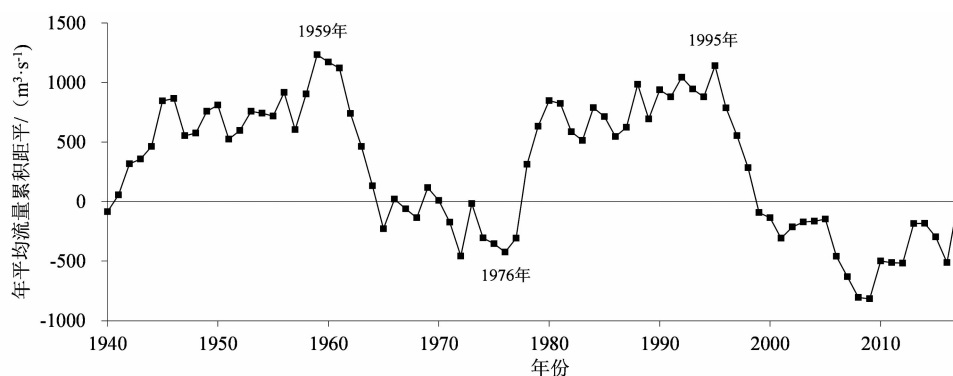


图4 贡特河年平均流量累积距平曲线图

Fig. 4 The accumulative departure curve of annual mean discharge of the Gunt River

段时间内径流将有增加趋势。

2.4 径流变化周期分析

小波系数实部等值线反映径流序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布。小波系数实部值为正代表径流丰水期,为负时代表枯水期。贡特河径流小波系数等值线(图5)可以看出径流演化过程中存在多时间尺度特征,分别存在23~34 a, 9~22 a, 4~8 a的准周期变化。其中在23~34 a出现准9次震荡;在9~22 a尺度上出现准13次震荡。

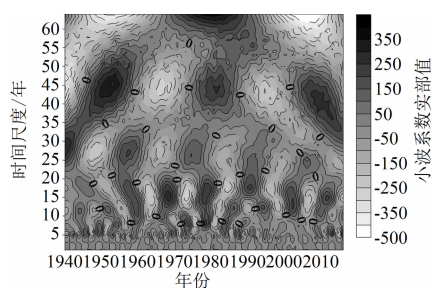


图5 年平均流量小波系数实部等值线图

Fig. 5 Wavelet coefficient real part isoline of annual mean discharge of the Gunt River

小波系数模值是不同时间尺度变化周期所对应的能量密度在时间域中分布的反映,系数模值越大表明所对应时段周期性越强。贡特河径流小波系数模(图6)可以看出,14~18 a时间尺度模最大,说明该时间尺度周期变化最明显,其他时间尺度的周期性变化较小。

小波方差图反映径流时间序列的波动能量随尺度的分布情况,可以用来确定径流演化过程中存在的主周期。贡特河径流的小波方差图中(图7)存在

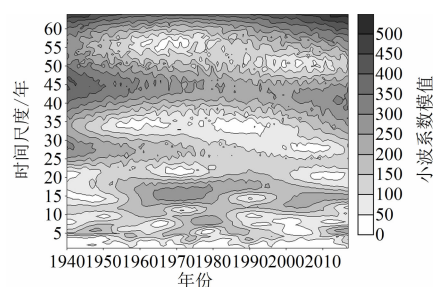


图6 年平均流量小波系数模图

Fig. 6 Wavelet coefficient modulus isoline of annual mean discharge of the Gunt River

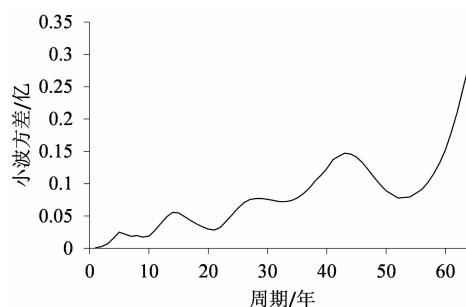


图7 1940—2017年贡特河年平均流量小波方差图

Fig. 7 Wavelet variance of annual mean discharge of the Gunt River from 1940 to 2017

3个较为明显的峰值,依次对应5 a、14 a和27 a的时间尺度。其中,最大峰值对应在27 a的时间尺度,说明27 a左右的周期震荡最强,为流域年径流变化的第一主周期;14 a时间尺度对应在第二峰值,为径流变化的第二主周期,5 a时间尺度对应在第三峰值,为径流变化的第三主周期;以上分析表明5 a、14 a和27 a这3个周期的波动控制着流域径流在整个时间流域内的变化特征。

3 讨论

3.1 径流驱动因素

径流的驱动因素主要包括气候因素与人类活动。其中,气候因素主要包括降水 and 气温;而人类活动因素主要包括人类对流域下垫面的改变和对水资源的开发利用等^[20]。贡特河累积年平均流量与累积年降水量曲线(图 8)可以看出,年平均流量与年降水量的双累积曲线拟合度很好($r^2 = 0.99$),没有出现明显拐点,表明无人类等因素对径流产生影响。

同时,研究区处于平均海拔 4300 m 之上,气候寒冷,空气稀薄,土地贫瘠,无农作物和水电站等,说明具有人类活动可能性极小。

3.2 气候变化特征

前文分析得出气候为径流变化主要驱动因素。因此,有必要分析贡特河流域气候变化特征,以期揭示径流变化的主要气候驱动因子。贡特河降水变化特征分析(图 9a)可以看出,1940—2017 年贡特河流域年降水量为 85.20 ~ 500.70 mm,年均降水量为 288.85 mm。其中最少降水量出现在 1971 年,最大降水量出现在 2013 年。近 78 年来流域总降水量呈

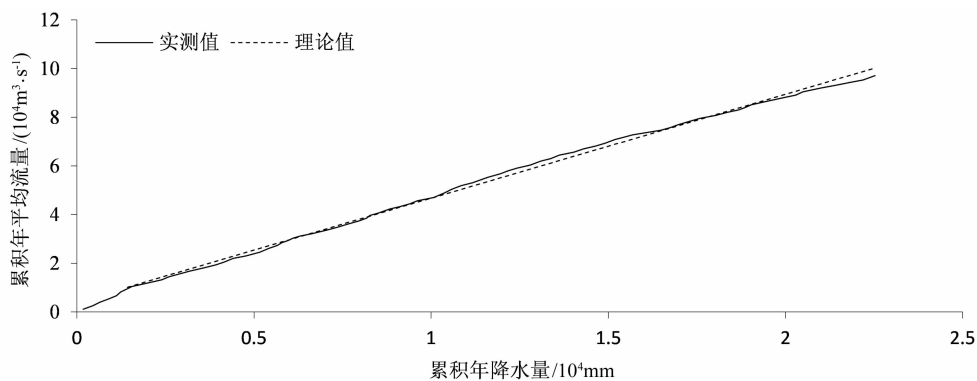
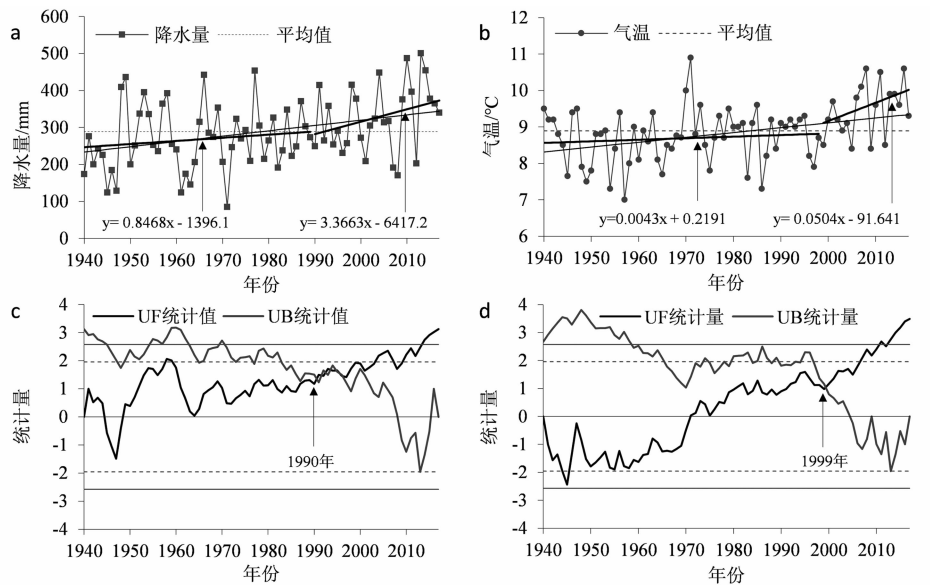


图 8 贡特河累积年平均流量与累积年降水量双累积曲线图

Fig. 8 The double mass curve for annual precipitation and annual mean discharge of the Gunt River from 1940 to 2017



(图 c、图 d 虚线为 0.05 显著性水平,实线为 0.01 显著性水平。)

图 9 贡特河年降水(a)(c)、年平均气温(b)(d)变化特征及 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 9 Characteristics and the Mann-Kendall mutation test of annual precipitation (a) (c) and annual average temperature (b) (d) of the Gunt River

显著增多趋势,线性倾向率为 $12.94 \text{ mm}/10 \text{ a}$,通过了 0.01 的显著性检验水平。Mann-Kendall 突变分析(图 9c)可知降水量在 1945—1948 年呈减少趋势,在其他年份均呈增多趋势;其中 2004—2007 年和 2010—2017 年呈显著增多趋势,均通过 0.05 显著性水平检验,2014—2017 年增多趋势更明显,通过了 0.01 显著性水平检验。 UB 和 UF 曲线交点位置表明降水量在 1990 年发生突变,年际变化率从 8.47 增加到 $33.66 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。

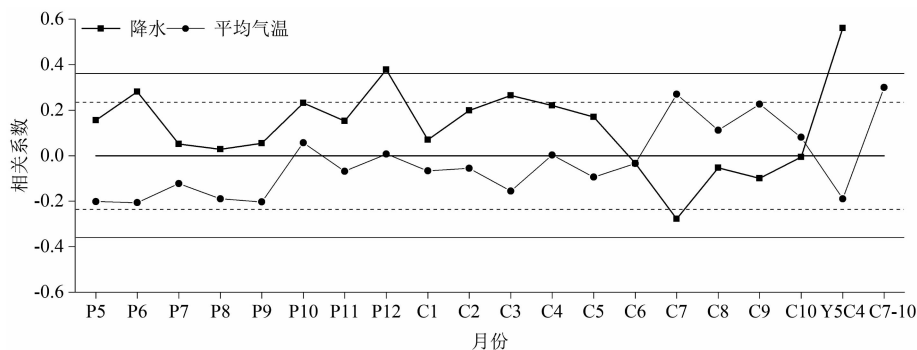
1940—2017 年贡特河流域年平均气温(图 9b)在 $7^{\circ}\text{C} \sim 10.90^{\circ}\text{C}$ 波动,最低出现在 1957 年,最高出现在 1971 年。近 78 年来贡特河流域年均气温呈升高趋势,年平均气温线性倾向率为 $0.13^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$,通过 0.05 显著性检验水平。Mann-Kendall 突变分析(图 9d)可知平均气温在 1940—1970 年呈减少趋势,其中 1944—1945 年呈显著减少趋势,通过 0.05 显著性水平检验;1971—2017 年呈增温趋势,其中 2007 年后增温趋势显著,通过 0.05 显著性水平检验,在 2011 年增温趋势更显著,通过 0.01 显著性水平检验。 UB 和 UF 曲线交点位置得出平均气温在 1999 年发生突变,年际变化率从 0.04 增加到 $0.50^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 。

20 世纪 70 年代至今全球升温趋势明显,迪丽努尔·托列吾别克等人^[21]指出近 115 年来中亚气候呈“暖湿化”趋势,而加速增暖出现在 70 年代末;80 年代初期和中后期温度突变在空间上传至中亚北部、中部和西部;而降水则是在 70 年代中后期从中亚西部开始增多,而后于 80 年代传至中亚东部。以上研究结果与本文发现的气候变化特征一致。章名立与江志红等人研究指出,增暖原因很大程度上

与温室气体的增加有关^[22-23]。而王劲松等人探究了大气环流与太阳活动变化,认为大气环流与太阳活动是该时期增暖一方面的原因;同时认为温室气体与下垫面的变化引起的地气相互作用的变化也对增暖有所影响^[24]。Dai A 等^[25]对 1900—1995 年全球 PDSI 研究发现,ENSO 诱导 PDSI 变化在 1979—1995 年比在 1900—1978 年更加强烈,而且 ENSO 活动在 1976 年后转向更加“暖湿化”的阶段。因此,研究区暖湿化的趋势可能是由 ENSO 活动、大气环流变化、太阳黑子活动、温室气体增多和下垫面变化引起。

3.3 径流与气候因素年内相关分析

为探究影响贡特河流量最为重要的气象因子,文章将上年 1 月至当年 12 月所有气象数据顺序组合与年平均流量进行相关普查分析(图 10),发现上年 5 月至当年 4 月降水量与年平均流量相关性最强,相关系数为 0.56 ,通过了 0.01 显著水平检验。而平均气温在当年 7 月至 10 月与年平均流量相关性最强,相关系数为 0.30 ,通过了 0.01 显著水平检验。贡特河降水主要集中在冬季、春季和夏季(上年 12 月至当年 8 月),占全年总降水量的 96.70% 。结合贡特河流量年内分配特征(图 2)分析,年平均流量与降水量存在以上显著相关性可能是因为贡特河降水量转化为流量具有滞后性造成的。降水从上年 5 月开始对当年径流一直具有促进作用,而后在冬季以冰雪固态水资源储存。春季气温升高和降水增多,冰雪融水和降水大部分通过地表径流和地下径流补给贡特河河水,这一过程具有滞后性,进而使贡特河流量在 7 月份达到最大。贡特河流域年内平均气温特征同样呈“单峰型”分布,在 7—8 月达到



(P、C 分别表示上年、当年;虚线为 0.05 显著性水平;实线为 0.01 显著性水平。)

图 10 贡特河年平均流量与气候因素相关系数图

Fig. 10 The correlation coefficient between the annual mean discharge and the Horog climate factors of the Gunt River

年内最高。7—10 月平均气温与年平均流量相关性最高是因为该时段月平均温度基本上为全年温度最高时段,高温利于冰雪消融,进而补给径流,使流量在夏季达到峰值。

3.4 径流与气候因素年际相关分析

贡特河径流年际变化具有明显特征。为探讨气候因素如何在年际尺度上影响径流,文章采用滑动相关法分析贡特河径流与降水、气温相关性的变化趋势,时间窗口为 15 年。

贡特河年平均流量与气候要素 15 a 滑动相关(图 11)可以看出,在 1992—1999 年间流量与降水量存在负相关,而在其余年份则一直保持与降水正相关。其中,流量与降水在 1965—1970 年与 2006—2009 年正相关通过了 0.05 的显著性水平检验,在 2008 年与 2009 年通过了 0.01 显著性水平检验,为多年来相关性最高区间。以上分析表明,降水对贡特河流量一直具有促进作用。1992—1999 年流量与降水之间存在负相关,而在同时期分析发现流量与温度呈显著正相关关系,通过 0.05 的显著性水平检验。平均气温 Mann-Kendall 突变检验(图 9d)表明 1992—1999 年气温呈上升趋势,因此,1992—1999 年流量与降水量呈负相关关系可能是该时期历史高温导致冰雪消融加快,进而补给径流。另外,降水量 Mann-Kendall 突变检验(图 9c)表明,1992—1999 年降水量同样呈增多趋势,因此 1992—1999 年流量增大是降水量与气温共同作用的结果,而气温的促进作用比降水量强。

年平均流量与平均气温的相关分析表明,1953—2004 年流量与平均气温总体保持正相关关

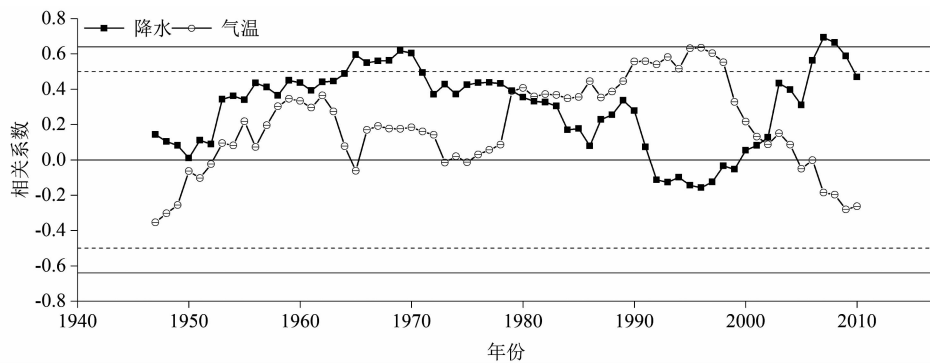
系,说明该时期温度对径流为促进作用;而在 2005 年后流量与平均气温呈负相关关系。结合上文平均气温 Mann-Kendall 突变检验(图 9d)分析结果:平均气温在 1999 年开始突变并且在 2007 年开始呈显著升高趋势,因此,2005 年后流域流量减少有可能是高温加快冰雪消融的同时增大了流域的蒸发量。以上分析表明,贡特河年际变化受到降水与温度的共同影响,不同时段主导气候因素不一,但总体上以降水为主导因素。

3.5 径流与气候因素周期相关分析

交叉小波变换方法可以从多时间尺度研究两个时间序列在时频域中的相互关系。贡特河年平均流量与区域降水量、平均气温交叉小波功率谱(图 12)表明,年平均流量与降水量基本同位相变化,而与平均气温则不稳定。因此,交叉小波分析同样佐证了降水对贡特河径流变化的主导作用。另外,贡特河年平均流量与降水量、平均气温在 1960—1980 年同时存在的 8 ~ 12 a 时间尺度的显著周期变化,而在整个时间域中则同时存在 2 ~ 5 a 时间尺度的显著周期变化。2 ~ 5 a 的周期变化与气象学上“准两年周期振荡”相一致,而 8 ~ 12 a 周期活动有可能受太阳活动影响。

4 结论

文章基于贡特河霍罗格水文站流量数据和霍罗格气象站降水量、平均气温数据,分析了 1940—2017 年贡特河流量变化特征及对气候变化的响应,结果表明:



(虚线为 0.05 显著性水平;实线为 0.01 显著性水平。)

图 11 贡特河年平均流量与气候要素 15 a 滑动相关图

Fig. 11 15a moving correlation changes between the annual mean discharge and the climate factors of the Gunt River

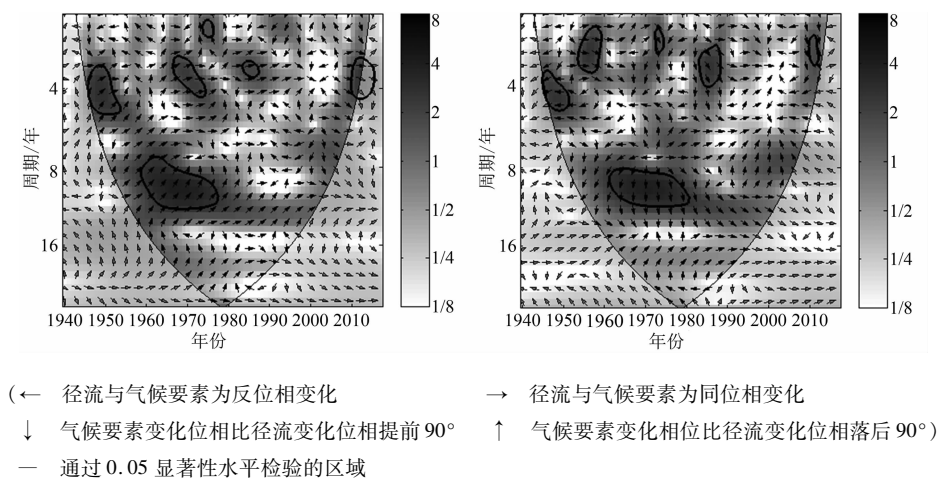


图 12 贡特河年平均流量与区域降水量(a)、平均气温(b)交叉小波功率谱

Fig. 12 Cross wavelet transform between the annual mean discharge and the annual precipitation (a), average temperature (b) of the Gunt River

(1) 贡特河流量年内分配不均匀, 6—9 月占全年流量的 75%, 汛期集中在 7 月 19 日前后, 无明显提前或延后特征。

(2) 贡特河流量年际变化总体呈减少趋势, 但趋势不显著; 在 1940—1946 年呈增加趋势, 1947—1958 年呈减少趋势, 1959—1960 年呈增加趋势, 1961—2017 年呈减少趋势, 在 1946 年发生突变; 共经历了 4 次丰—枯期: 丰水期(1940—1959 年)—枯水期(1960—1976 年)—丰水期(1977—1995 年)—枯水期(1996—2017 年)。趋势分析表明径流在未来一段时间内可能存在增加趋势。小波分析分析表明流域存在 23 ~ 34 a, 9 ~ 22 a, 4 ~ 8 a 的准周期变化。

(3) 径流驱动因素主要为气候变化, 无人工因素影响。降水对贡特河径流年内补给具有明显滞后效应, 平均温度与径流年内变化具有同步性; 流量年际变化受到降水和气温的共同影响, 不同时段主导气候因素不一, 总体上以降水为主导因素。周期相关表明, 年平均流量与降水量、平均气温在 1960—1980 年同时存在 8 ~ 12 a 时间尺度的显著周期变化, 在整个时间域中则同时存在 2 ~ 5 a 时间尺度的显著周期变化。

贡特河为中亚塔吉克斯坦帕米尔高原源区重要河流, 科学合理利用该流域水资源对中亚水资源安全 and 经济政治稳定等非常重要。因此如何根据流域气候变化制定相应的水资源分配使用政策可在未来进一步重点研究。

参考文献 (References)

- [1] 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]
- [2] 李志斐. 水资源安全与“一带一路”战略实施[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2017, 17(3): 45–53 [LI Zhifei. Water security and the implementation of “One Belt-One Road” strategy [J]. Journal of China University of Geosciences, 2017, 17(3): 45–53]
- [3] 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]
- [4] 刘启芸. 列国志: 塔吉克斯坦[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2006: 20–21 [LIU Qiyun. Guide to the world states: Tajikistan [M]. Beijing: Social Science Literature Press, 2006: 20–21]
- [5] WANG X L, LUO Y, SUN L, et al. Attribution of runoff decline in the Amu Darya River in Central Asia during 1951–2007 [J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(5): 1543–1560.
- [6] 鲜丽菊, 穆振侠, 姜卉芳, 等. 气候变化对喷赤河径流过程的影响研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(3): 20–23 [XIAN Liju, MU Zhenxia, JIANG Huifang, et al. Study on impact of climate change on runoff in Pyandj River Basin [J]. Yellow River, 2017, 39(3): 20–23]
- [7] 吴万虎. 塔吉克斯坦国水资源及其径流对气候变化的响应[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013, 23–24 [WU Wanhui. The Water resources of TAJIKISTAN and runoff response to climate change [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013, 23–24]

- [8] KURES, 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 flow to climate change[J]. *Hydrological. Processes*, 27: 4057–4070.
- [9] POHL E, KNOCH M, GLOAGUEN R, et al. Sensitivity analysis and implications for surface processes from a hydrological modelling approach in the Gunt catchment, high Pamir Mountains[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2015, 3:333–362.
- [10] POHL E, KNOCH M, GLOAGUEN R, et al. The hydrological cycle in the high Pamir Mountains: how temperature and seasonal precipitation distribution influence stream flow in the Gunt catchment, Tajikistan[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2014, 2: 1155–1215.
- [11] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法[J]. *地理学报*, 1984, 39(2): 218–227 [YANG Yuandong. Calculation method of river runoff annual distribution[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1984, 39(2): 218–227]
- [12] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2002: 44–46 [SHI Neng. Multivariate analysis method in meteorological research and forecast[M]. Beijing: Meteorological Press, 2002: 44–46]
- [13] 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: 69–71 [WEI Fengying. Modern Climatological Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 69–71]
- [14] 丁晶, 刘权授. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 17–27 [DING Jing, LIU Quanshou. Stochastic hydrology[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1997: 17–27]
- [15] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 115–130 [WANG Wensheng, DING Jing, LI Yueqing. Hydrologic Wavelet Analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 115–130]
- [16] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. *水文*, 2010, 30(4): 47–51 [MU Xingmin, ZHANG Xiuqin, GAO Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. *Hydrology*, 2010, 30(4): 47–51]
- [17] 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]
- [18] 杨春利, 蓝永超, 王宁练, 等. 1958~2015年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析[J]. *地理科学*, 2017, 37(12): 1894–1899 [YANG Chunli, LAN Yongchao, WANG Ninglian, et al. Mountainous runoff changes and climate factors analysis of the Shule River Basin in 1958–2015[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(12): 1894–1899]
- [19] 孙卫国, 程炳岩, 李荣. 黄河源区径流量与区域气候变化的多时间尺度相关[J]. *地理学报*, 2009, 64(1): 117–127 [SUN Weiguo, CHENG Bingyan, LI Rong. Multitime scale correlations between runoff and regional climate variations in the source region of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(1): 117–127]
- [20] 张士锋, 华东, 孟秀敬, 等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 13–24 [ZHANG Shifeng, HUA Dong, MENG Xiujing, et al. Climate change and its driving effect on the runoff in the “Three-River Headwaters” region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 13–24]
- [21] 迪丽努尔·托列吾别克, 李栋梁. 近115a中亚干旱气候气候变化研究[J]. *干旱气象*, 2018, 36(2): 185–195 [DILINUER Tuoliewubieke, LI Dongliang. Characteristics of the dry/wet climate change in central Asia in recent 115 years[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, 36(2): 185–195]
- [22] 章名立, 曾昭美, 季劲钧. 全球变暖过程中亚洲东部区域气候的特点[J]. *地理学报*, 1996, 51(6): 518–526 [ZHANG Mingli, ZENG Zhao mei, JI Jingjun. Characters of regional temperature in east Asia during global warming period[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(6): 518–526]
- [23] 江志红, 丁裕国, 金莲姬. 中国近百年气温场变化成因的统计诊断分析[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(2): 175–185 [JIANG Zhihong, DING Yuguo, JIN Lianji. Statistical diagnostic analysis of cause for the change of China's temperature field during the last 100 years[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8(2): 175–185]
- [24] 王劲松, 陈发虎, 靳立亚, 等. 亚洲中部干旱区在20世纪两次暖期的表现[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 224–233 [WANG Jinsong, CHEN Fahu, JIN Liya, et al. The response to two global warming periods in the 20th century over the arid central Asia[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 224–233]
- [25] DAI A, TRENBERTH K E, KARL T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900–1995[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(25): 3367–3370.

Hydrological Changes in Source Region of Pamirs Plateau: A Case Study in the Gunt River Basin, Tajikistan

CHEN Youping^{1, 2}, ZHANG Heli², CHEN Feng^{2*}, FAN Ziang², LIU Rui^{1, 2}

(1. School of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration/ Xinjiang Laboratory of Tree Ring Ecology, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: To better address water scarcity and water security issues in Central Asia, careful and prudent water resources allocation planning and management requires detailed and reliable knowledge of hydrological changes. Based on the runoff and meteorological records from Khorugh during the period of 1940 – 2017, the runoff variations of the Gunt River and its response to the climate change was analyzed using the non-uniform coefficient, linear trend method, Mann-Kendall test, R/S and wavelet analysis in this paper. The main results were obtained as follow: (1) the seasonal distribution of runoff was quite uneven, and 75% of runoff was occurred at June-September (around 19th July), and the peak periods showed no significant advance or delay. (2) Annual runoff series showed a decreasing trend which was not remarkable. High runoff occurred during 1940 – 1959 and 1977 – 1995. Low runoff occurred during 1960 – 1976 and 1996 – 2017. According to the results of R/S analysis, annual runoff will increase in the future. Wavelet analysis showed that the remarkable 23 – 34 year, 9 – 22 year and 4 – 8 year periodicities were found in annual runoff series. (3) The intra-annual precipitation had some significant effects on the runoff variations of the Gunt River, and the average temperature was synchronous with the seasonal variation of discharge. The annual runoff variation was controlled by precipitation. The cross wavelet showed that 2 – 5 year cycles were occurred in the whole time domain, and 8 – 12 year cycle was found during the period 1960 – 1980.

Key words: Central Asia; Pamirs; Gunt River; hydrological change; climate factor