

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210352

叶尔羌流域极端气候变化特征及其对径流的影响研究

宋轩宇¹, 许民², 李振中¹, 杨成德²

(1. 兰州交通大学 数理学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:基于1954—2015年叶尔羌流域的气温、降水和径流数据,采用M-K突变检验、距平、趋势分析、Hill估计方法揭示了影响流域水文过程的气候指标,采用主成分回归分析方法探讨了极端气候与极端水文事件之间的关系。结果表明:(1)叶尔羌河流域年平均气温、降水均呈显著上升趋势;年平均气温突变时间为1998年,年平均降水不存在突变。(2)流域径流量、极端径流量呈上升趋势,其中径流量变化显著,极端径流的阈值为148.3 mm,64年间共计发生18次极端径流事件。(3)流域极端降水对径流以及极端径流的变化影响较大,极端气温影响次之。

关键词:叶尔羌河流域;极端水文事件;极端温度和降水;主成分回归

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)02-0052-06

0 引言

近些年,气候异常造成的极端水文事件频发,有必要开展相关研究。目前,叶尔羌河流域的相关研究主要集中与气温、降水以及径流的变化趋势。孙本国等^[1]应用叶尔羌河流域的9个水文、气象站的观测资料,分析了叶尔羌河流域的气温、降水、径流的变化特征,认为1961—2004年叶尔羌河流域平均气温均呈显著的线性增加趋势,年径流量呈不显著的线性增加趋势。高鑫等^[2]利用冰川度日因子融水径流模型重建了叶尔羌河上游流域平均冰川物质平衡、冰川融水径流序列,分析了叶尔羌河上游流域冰川融水径流变化的特征、趋势及其对河流径流的影响。凌红波等^[3]认为1957—2007年叶尔羌河径流量在冬半年增加显著并在1993年发生明显的突变,而降水量在全年呈显著的增加且突变点在1986年;叶尔羌河径流量与降水量集中度指数在总体上皆呈不显著的减少。王鹏赫等^[4]发现1960—2015年叶尔羌河流域气候变化整体呈增暖增湿趋势,以1998年变化最为显著;径流变化整体呈

线性增加趋势且年内变化显著。

本文以叶尔羌流域为研究区,以主成分回归方法为创新点,减少了气温、降水因素的自相关性,分析了该流域1954—2015年极端降水与极端气温的变化趋势以及其对径流和极端水文事件的影响。采用Hill图法对模型进行阈值选取;采用主成分回归先对极端指标进行筛选,然后分别分析极端指标对径流、极端径流的影响,最后进行模型检验得出结论,明晰了该流域多年来的径流和极端径流变化以及与极端气候事件的响应关系,对于提高该流域防灾减灾能力和洪水资源化利用具有重要意义。

1 研究区概况和数据来源

叶尔羌流域^[5]位于新疆,塔里木盆地的西南部(见图1)。该流域主要依靠高山冰雪融水补给,约占径流总补给量的77.4%,其径流量年内分配极不均匀,6—8月约占径流总来水量的77.4%。研究区多年平均降水约30~60 mm,并从山区至平原逐渐减少,气温10.6~11.5℃,干旱少雨,为极端干旱气候区^[6]。

收稿日期:2021-09-04

网络首发日期:2023-04-06

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.p.20230404.1706.009.html>

基金项目:国家自然科学基金(41971094);中国科学院-澳大利亚联邦科学和工业研究组织(CAS-CSIRO)国际合作项目(131B62KYSB20190042);中国科学院青年创新促进会会员项目(2019414)

作者简介:宋轩宇(1998—),男,山东东阿人,硕士研究生,主要研究方向为气候变化与冰冻圈水文过程模拟研究。E-mail:songxuanyu2022@163.com

通信作者:许民(1984—),男,新疆沙湾人,副研究员,主要研究方向为冰冻圈水文与水资源研究。E-mail:xumin@lzb.ac.cn

选取 1954—2015 年莎车站的日降水、气温数据和卡群站的年径流资料,虽然只有一个气象站的数据,但选取的气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/siet/index.html>) 的中国地面气候资料日值数据集 (V3.0),且莎车气象站较流域内其他气象站距离卡群水文站最近,使得出的结论更加准确。

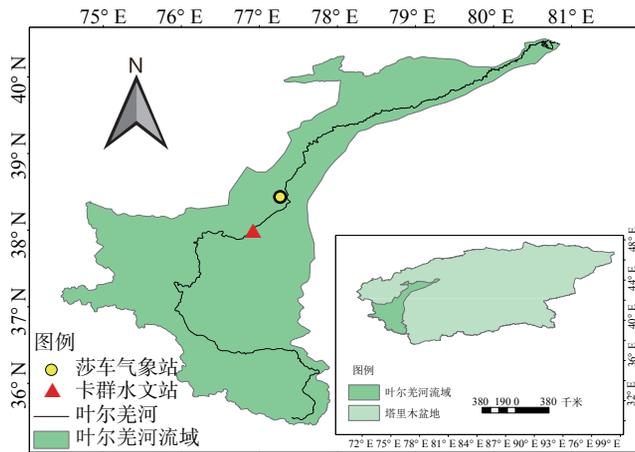


图1 叶尔羌河流域示意图

Fig.1 Schematic diagram of Yarkant River basin

2 研究方法

2.1 极端径流阈值的选取

采用 Hill 图法尾部指数稳定区域(变点)确定极端径流阈值^[5-6],Hill 估计量定义为^[7]:

$$H_{k,n} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ln \frac{x_i}{x_{k+1}} \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

式中: x_i 为从小到大排序的径流量, 阈值选取通过 Hill 图尾部指数稳定区域(变点即斜率最大所在的点)来确定^[5]。

2.2 M-K 突变分析

利用 M-K 方法对叶尔羌河流域年径流、气温和降水进行突变分析, 置信水平取 $\alpha=0.05$, 置信区间为 ± 1.96 。

2.3 主成分回归

主成分回归的原理是用主成分分析提取的主成分与因变量回归建模。由于主成分间具有不相关性, 并且能较好的反映原来众多相关性指标的综合信息, 因此, 用主成分作为新的自变量进行回归分析使得回归方程及参数估计更加可靠。在进行主成分回归之前先将径流、极端径流和极端气候指标进行标准化处理消除由于单位不统一造成的误差。主成分回归的具体步骤为:

(1) 对 p 个主成分进行主成分分析, 取 $m < p$ 个主成分, 其中 m 累计贡献率达到 85% 以上^[8-9], 即:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \geq 85\% \quad (2)$$

(2) 根据主成分分析得到的 m 个主成分, 建立因变量与主成分的回归方程, 即:

$$Y = \beta_1 PC1 + \beta_2 PC2 + \dots + \beta_m PCm \quad (3)$$

式中 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ 为常数。

(3) 每个主成分 $PC1, PC2, \dots, PCm$ 均有自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 的线性组合组成的。将其代入式(5)得到主成分回归方程:

$$Y = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_1 x_1 + \widehat{\beta}_2 x_2 + \dots + \widehat{\beta}_p x_p \quad (4)$$

式中: $\widehat{\beta}_0, \widehat{\beta}_1, \dots, \widehat{\beta}_m$ 为常数。

2.4 极端气候指标

选取 14 个极端气候指数(见表 1)作为主成分回归中的主成分^[10], 这 14 个极端气候指数通过 Rlimdex 将气温、降水等数据转化来的^[11]。

表 1 极端气候指数

Table 1 Extreme climate index

		名称	含义
极端 气 温 指 数		暖昼日数(TX90p)	日最高气温>90%分位数的日数
		暖夜日数(TN90p)	日最低气温>90%分位数的日数
		极端最高气温(TXn)	年、月的最高气温的最小值
		夏日日数(SU)	日最高气温>25℃的天数
		极端最低气温(TNx)	年、月的最低气温的最大值
		霜冻日数(FD)	日最低气温<0℃的日数
		冷昼日数(TX10p)	日最高气温<10%分位数的日数
极端 降 水 指 数		冷夜日数(TN10p)	日最低气温<10%分位数的日数
		持续降水日数(CWD)	最长连续降水日数
		连续无降水日数(CDD)	最长连续无降水日数
		日最大降水量(Rx1day)	日最大降水量
		5日最大降水量(Rx5day)	5日最大降水量
		降水强度(SDII)	年降水量≥1 mm 日数
		极端降水总量(R95p)	超过 95%降水量的总和

3 结果与讨论

3.1 气温与降水年际变化

流域内 1954—2015 年的多年平均气温为 12.90℃。其中 1954—1992 年, 年平均气温基本低于多年平均

值,1993年以后,均高于多年平均值,而且近年来距平值呈增大趋势,升温速率为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ }a)^{-1}$,呈现显著上升趋势,通过0.05显著性检验。通过M-K突变检验分析,叶尔羌河流域气温发生突变的时间为1998年,从突变时间1998年开始年气温呈现上升趋势,而在1954年到1998年年气温变化趋势不明显,1999年以后,通过0.05显著性检验,年气温上升趋势显著。

流域内1954—2015年的多年平均降水量为55.2 mm。降水量呈现波动变化,低于降水量距平值的年份多于高于降水量距平值的年份,近年来降水量高于多年平均降水量,增加速率为 $5.1\text{ mm}/(10\text{ }a)$,呈现上升趋势,通过0.05显著性检验,上升趋势显著。研究区的降水量不存在突变点,62年间的年降水变化未通过M-K突变检验(z 值绝对值小于1.96),变化趋势不明显。

因此,叶尔羌河流域年平均气温上升趋势显著,突变时间为1998年;年平均降水增加趋势显著,不存在突变点。叶尔羌河流域气温降水的相关研究也得到了类似结论,1961—2004年叶尔羌河流域气温降水均显著上升^[1];1957—2015年叶尔羌河流域气温降水均上升,其中气温突变点在1996年,降水不存在突变点^[12]。

3.2 极端气候指数的年际变化趋势

由图2可见,暖夜日数、暖昼日数、夏日日数、

极端最低气温和极端最高气温呈现出显著(通过0.05显著性检验)的上升趋势,年际变化倾向率分别为 $2.67\text{ d}/(10\text{ }a)$ 、 $1.20\text{ d}/(10\text{ }a)$ 、 $1.94\text{ d}/(10\text{ }a)$ 、 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ }a)$ 和 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ }a)$;冷夜日数、冷昼日数和霜冻日数的年际变化倾向率分别为 $-1.41\text{ d}/10\text{ }a$ 、 $-0.74\text{ d}/10\text{ }a$ 和 $-2.40\text{ d}/10\text{ }a$,下降趋势明显(通过0.05显著性检验)。

由图3可见,日最大降水量年际变化倾向率为 $0.3\text{ mm}/(10\text{ }a)$,呈现上升趋势,通过0.05显著性检验,上升趋势显著。连续无降水日数年际变化倾向率为 $-0.55\text{ d}/(10\text{ }a)$,呈现下降趋势,未通过0.05显著性检验,下降趋势不显著;持续降水日数、极端降水总量、5日最大降水量、降水强度年际变化倾向率分别为 $0.04\text{ d}/(10\text{ }a)$ 、 $1.6\text{ mm}/(10\text{ }a)$ 、 $0.4\text{ mm}/(10\text{ }a)$ 和 $0.1\text{ mm}/(10\text{ }a)$,呈现上升趋势,未通过0.05显著性检验,上升趋势不显著。

3.3 径流年际变化

叶尔羌河流域1954—2015年62年间年径流量最大值为190.4 mm,最小值为88.6 mm,平均值为133.2 mm,增加速率为 $4.0\text{ mm}/(10\text{ }a)$,呈现上升趋势,通过0.05显著性检验,上升趋势显著。研究区发生突变的时间为1994年,从1994年开始年径流量呈现上升趋势,而在1954—1994年年径流量变化趋势不明显,2012年以后,通过0.05显著性检验(z 值绝对值大

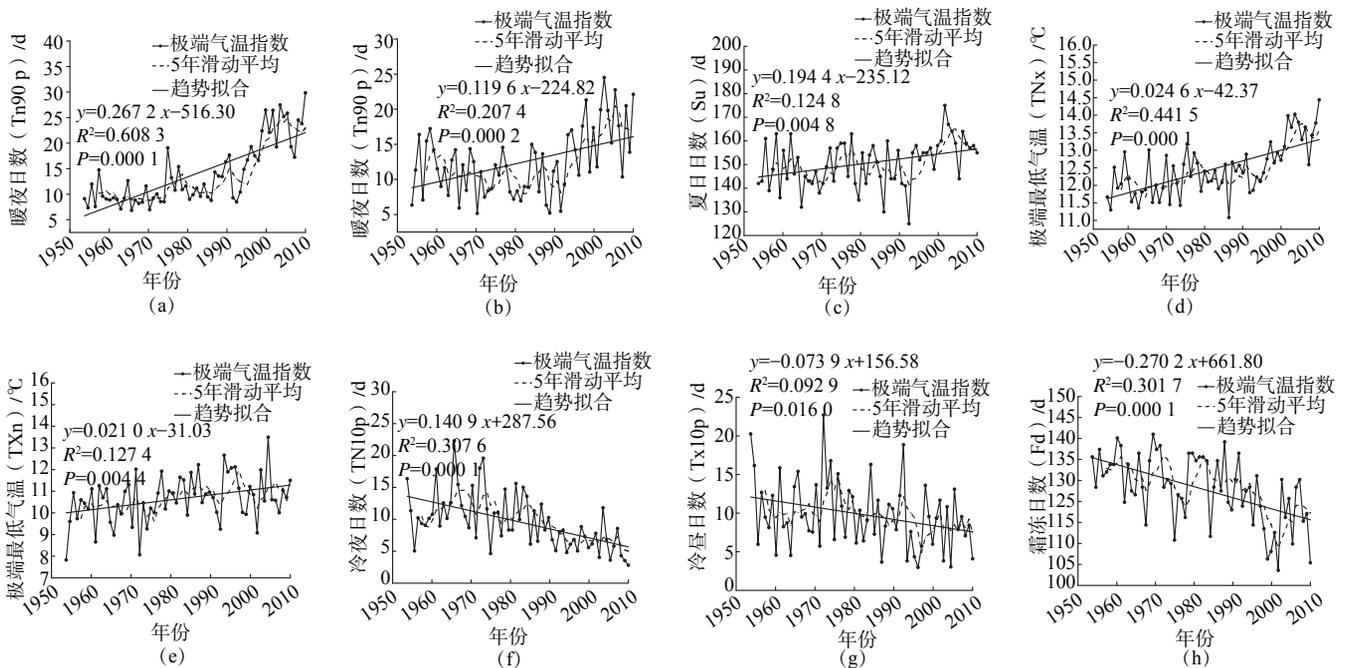


图2 叶尔羌河流域1954—2015年极端气温指数变化
Fig.2 Changes of extreme temperature index of Yarkant River Basin from 1954 to 2015

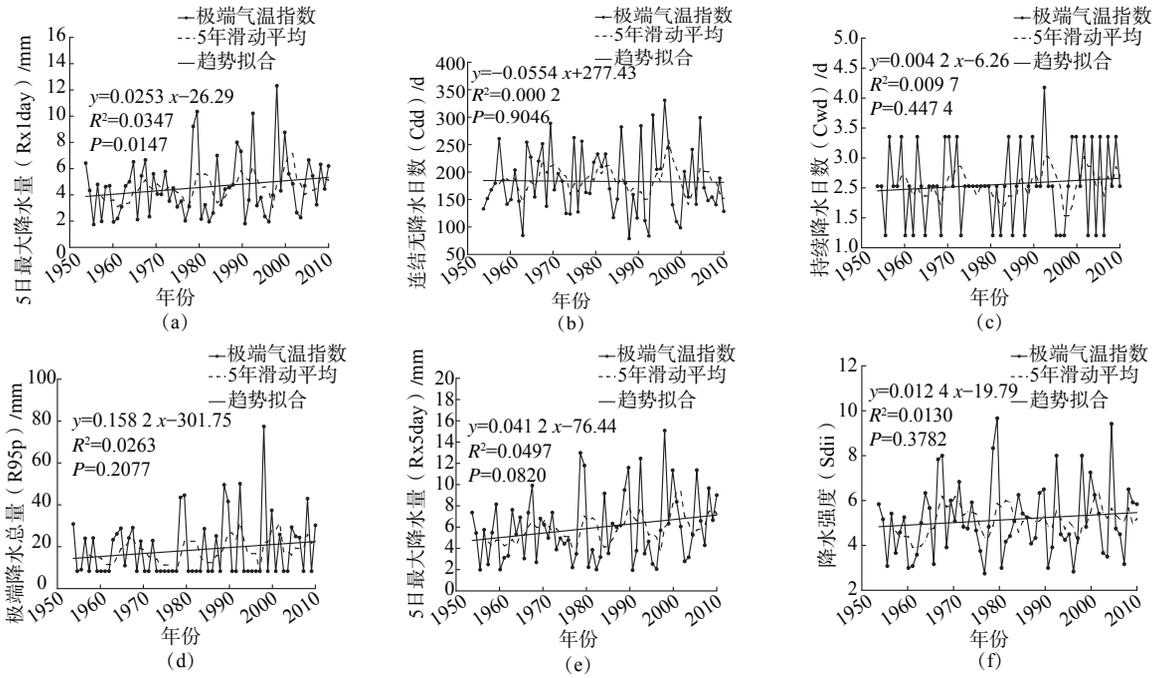


图3 叶尔羌河流域1954—2015年极端降水指数变化
Fig.3 Changes of extreme precipitation index in Yarkant River Basin from 1954 to 2015

于1.96),年径流量上升趋势显著。

3.4 年极端径流量变化趋势以及阈值确定

根据公式(1)得到了1954—2015年年极端径流的变化趋势。如图4(b)所示,变点为75.8%,75.8%,分位数对应的阈值为148.3 mm。故选取阈值为148.3 mm即径流量超过148.3 mm为极端径流。在1954—2015年62年间发生18次极端径流事件,如图7(a)所示,得到了极端径流的变化趋势,最大极端径流量为190.4 mm,增加速率为2.1 mm/(10a),呈现上升趋势,未通过0.05显著性检验,上升趋势不显著。

3.5 主成分回归计算极端气温和降水对径流的影响

对14个标准化后的极端气候指标进行主成分分

析,得到了6个累计贡献率达到85%的主成分(见表2)。

将标准化的径流量与前6个主成分作普通最小二乘回归并将得到的6个主成分代入到其中得到标准化的径流量与极端气候指标的主成分回归方程:

$$y^* = -0.0469 \cdot PC1 + 0.0014 \cdot PC2 - 0.0327 \cdot PC3 - 0.025 \cdot PC4 + 0.0177 \cdot PC5 + 0.0654 \cdot PC6 \quad (5)$$

$$y^* = -0.02 \cdot Fd^* + 0.11 \cdot Su^* - 0.18 \cdot Tn10p^* + 0.11 \cdot Tn90p^* + 0.16 \cdot Tnx^* - 0.09 \cdot Tx10p^* + 0.15 \cdot Tx90p^* + 0.06 \cdot Txn^* - 0.01 \cdot Cdd^* + \quad (6)$$

$$0.02 \cdot Cwd^* + 0.14 \cdot R95p^* + 0.05 \cdot Rx1day^* + 0.09 \cdot Rx5day^* + 0.09 \cdot Sdii^*$$

通过式(6)的回归方程系数判断:径流主要与极

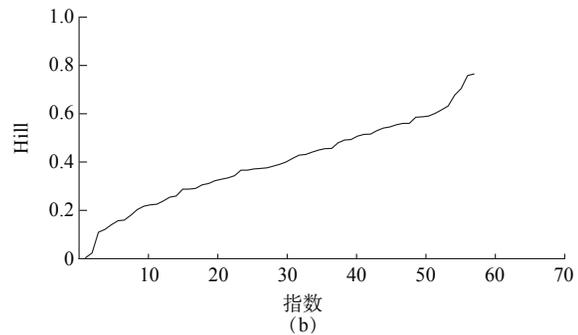
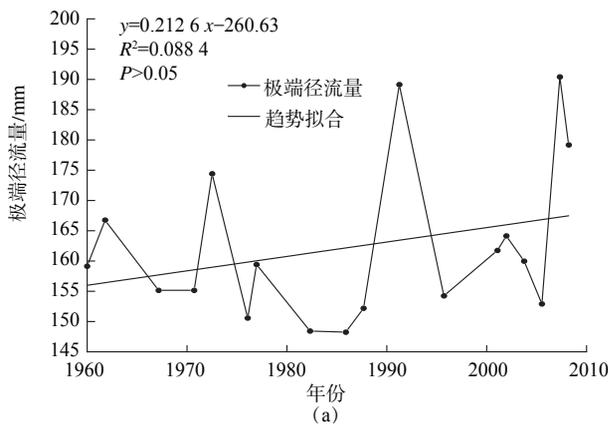


图4 1954—2015年叶尔羌流域年极端径流量趋势变化(a)、Hill图(b)
Fig.4 Trend change of annual extreme runoff in Yarkant basin (a), Hill diagram (b) from 1954 to 2015

表2 主成分特征值和比例

成分	初始特征值		
	总计	方差百分比/%	累积/%
1	2.12	32.00	32.00
2	2.06	30.32	62.32
3	1.28	11.67	73.99
4	0.91	5.96	79.94
5	0.81	4.68	84.63
6	0.70	3.55	88.18
7	0.65	3.00	91.18
8	0.62	2.73	93.91
9	0.54	2.10	96.02
10	0.47	1.58	97.60
11	0.36	0.95	98.55
12	0.33	0.77	99.31
13	0.28	0.55	99.87
14	0.14	0.13	100.00

表3 主成分特征值和比例

成分	初始特征值		
	总计	方差百分比/%	累积/%
1	2.38	40.30	40.30
2	1.68	20.07	60.36
3	1.33	12.56	72.93
4	1.10	8.62	81.55
5	0.88	5.50	87.05
6	0.77	4.22	91.61
7	0.66	3.09	94.35
8	0.60	2.58	96.94
9	0.43	1.33	98.27
10	0.30	0.64	98.91
11	0.28	0.57	99.48
12	0.20	0.28	99.76
13	0.16	0.18	99.93
14	0.09	0.06	100.00

端降水有关,尤其是降水强度,相比极端降水而言,极端气温影响径流较小。除霜冻日数、冷夜日数、冷昼日数和连续无降水日数外,其他因子对径流量均起正向促进作用,影响径流量较大的因子是降水强度、冷夜日数和极端最低气温,这和描述气温与降水年变化特征的距平图得到结果一致。在1954—2015年期间,叶尔羌河流域发生极端水文事件主要是冰川消融型、溃坝型和暴雨型洪水^[13],整个流域气温、降水与冰川融水显著上升,但从总体来看,降水的增加缓解了由于温度升高导致冰川消融^[14],故而冰雪融水对总径流贡献减小,降水对径流的影响大于气温。

3.6 主成分回归计算极端气温和降水对极端径流的影响

本文对14个标准化后的极端气候指标进行主成分分析,得到了5个累计贡献率达到85%的主成分(见表3)。

将标准化的极端径流量与前5个主成分作普通最小二乘回归,并将得到的5个主成分代入到其中得到标准化的极端径流量与极端气候指标的主成分回归方程:

$$y^* = -0.0065 \cdot PC1 - 0.0073 \cdot PC2 - 0.0292 \cdot PC3 - 0.037 \cdot PC4 - 0.075 \cdot PC5 \quad (7)$$

$$y^* = -0.03 \cdot Fd^* + 0.03 \cdot Su^* - 0.01 \cdot Tn10p^* + 0.01 \cdot Tn90p^* + 0.10 \cdot Tnx^* - 0.09 \cdot Tx10p^* + 0.05 \cdot Tx90p^* - 0.02 \cdot Txn^* - 0.10 \cdot Cdd^* + 0.14 \cdot Cwd^* + 0.05 \cdot R95p^* + 0.010Rx1day^* + 0.03 \cdot Rx5day^* + 0.07 \cdot Sdii^* \quad (8)$$

通过式(8)的回归方程系数判断:极端径流主要与极端降水有关,尤其是持续降水日数,相比极端降水而言,极端气温影响极端径流较小。除霜冻日数、冷夜日数、冷昼日数和连续无降水日数外,其他因子对极端径流量均起正向促进作用,影响极端径流量较大的因子是持续降水日数、日最大降水量、连续无降水日数和极端最低气温,这和描述气温与降水年变化特征的距平图得到结果一致:年气温与降水的明显上升,与第五次IPCC报告得出气温明显上升的结论一致。

西北干旱区其它流域的相关研究^[11]也得出了极端气候对极端水文事件相同或者不同的结论,疏勒河流域通过主成分分析得到因子载荷矩阵,对因子载荷矩阵进行分析,得到了极端水文事件主要受控于极端降水事件,特别是极端降水总量,极端高温天气对极端洪水总量的增加也有影响。得到该结论是由于年径流总量与年降水量相关性(0.90)比与年气温的相关性(0.50)大。

同为塔里木河流域的阿克苏流域通过小波分析发现气温升高对径流量的影响高于降水量增加的影响,主要原因是由于气温变化对降水的形态、冰雪消融、蒸发能力起重要的作用,随着年均气温的增加,年径流量增加显著。^[15]

4 结论

(1)叶尔羌河流域的气候经历了变湿变暖的过

程,其中年平均气温呈显著升高趋势($0.29^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$),气温突变时间为1998年;年平均降水呈显著上升趋势($5.1\text{ mm}/(10\text{ a})$),不存在突变点;极端气温指数暖昼日数和暖夜日数上升趋势显著,冷昼日数和冷夜日数下降趋势显著,其他气温指标变化趋势不显著。

(2)叶尔羌河流域的径流呈显著上升趋势($4.0\text{ mm}/(10\text{ a})$),突变时间为1998年;通过Hill图确定叶尔羌流域极端径流的阈值为148.3 mm,在1954—2015年间共发生18次极端径流事件,且极端径流量呈显著上升趋势($2.1\text{ mm}/(10\text{ a})$)。

(3)流域极端降水对径流以及极端径流的变化影响较大,极端气温影响次之。除霜冻日数、冷夜日数、冷昼日数和连续无降水日数外,其他因子对径流量均起正向促进作用,影响径流量较大的因子是降水强度、冷夜日数和极端最低气温;除霜冻日数、冷夜日数、冷昼日数和连续无降水日数外,其他因子对极端径流量均起正向促进作用,影响极端径流量较大的因子是持续降水日数、日最大降水量、连续无降水日数和极端最低气温。

参考文献:

- [1] 孙本国,毛炜峰,冯燕茹等.叶尔羌河流域气温、降水及径流变化特征分析[J].干旱区研究,2006(2):203-209.
[2] 高鑫,张世强,叶柏生等.1961—2006年叶尔羌河上游流域冰川融

水变化及其对径流的影响[J].冰川冻土,2010,32(3):445-453.

- [3] 凌红波,徐海量,张青青等.叶尔羌河年径流量与降水量的集中性及相关性分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1757-1764.
[4] 王鹏赫,赵成义,王丹丹等.气候变化对叶尔羌河流域极端水文事件的影响[J].生态科学,2018,37(6):1-8.
[5] 王芳,门慧.三参数广义帕累托分布的似然矩估计[J].数学年刊A辑(中文版),2013,34(3):299-312.
[6] 宋加山,李勇,彭诚等.极值理论中阈值选取的Hill估计方法改进[J].中国科学技术大学学报,2008(9):1104-1108.
[7] 李占玲,王武,李占杰.基于GPD分布的黑河流域极端降水频率特征分析[J].地理研究,2014,33(11):2169-2179.
[8] 何晓群.现代统计分析方法与应用[M].北京:中国人民大学出版社,2016.
[9] 何晓群.应用回归分析R语言版[M].北京:中国人民大学出版社,2017.
[10] 王琼.1962—2011年长江流域极端气温和降水事件变化研究[D].兰州:西北师范大学,2014.
[11] 程玉菲,程文举,胡想全等.疏勒河流域极端水文事件对极端气候的响应[J].高原气象,2019,38(3):583-592.
[12] 张雪琪,满苏尔·沙比提,刘海涛等.1957—2015年叶尔羌河流域气候变化特征及其径流响应[J].干旱区研究,2019,36(1):58-66.
[13] 阿尼克孜·麦麦提.叶尔羌流域主要洪水类型成因及规律研究[J].地下水,2021,43(2):161-162, 165.
[14] 冯童,刘时银,许君利,等.1968—2009年叶尔羌河流域冰川变化——基于第一、二次中国冰川编目数据[J].冰川冻土,2015,37(1):1-13.
[15] 蒋艳,周成虎,程维明.阿克苏河流域径流补给及径流变化特征分析[J].自然资源学报,2005(1):27-34.

Study on Variation Characteristics of Extreme Climate and Its Impacts on Runoff in Yarkant Basin

SONG Xuanyu¹, XU Min², LI Zhenzhong¹, YANG Chengde²

(1. School of mathematics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the temperature, precipitation and runoff data in the Yarkant Basin from 1954 to 2015, this paper used M-K mutation test, departure, trend analysis and Hill estimation method to reveal the climate indicators that affect the hydrological process of the basin. The relationship between extreme climate and extreme hydrological events was studied by using the principal component regression analysis method. The results showed that: (1) The annual average temperature and precipitation in the Yarkant river basin both showed a significant upward trend; The mutation time of annual average temperature was 1998, and there was no mutation in annual average precipitation. (2) The volume of runoff in the basin showed a significant upward trend, and the threshold of extreme runoff was 148.3mm. 18 extreme runoff events occurred in 64 years. (3) Extreme precipitation had a greater impact on the runoff and the change of extreme runoff, followed by the extreme temperature.

Keywords: Yarkant River Basin; extreme hydrological events; extreme temperature and precipitation; principal component regression