

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0128

JIANG Junxin, CAI Ming, XU Yongjun, et al. Evolution trend of flood in the Aksu River basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4):1200-1209. [蒋军新, 蔡明, 徐永军, 等. 新疆阿克苏河流域洪水演变趋势研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4):1200-1209.]

## 新疆阿克苏河流域洪水演变趋势研究

蒋军新<sup>1</sup>, 蔡明<sup>1</sup>, 徐永军<sup>1</sup>, 方功焕<sup>2</sup>, 李稚<sup>2</sup>, 陈永金<sup>3</sup>

(1. 新疆塔里木河流域阿克苏管理局, 新疆阿克苏 843000; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011; 3. 聊城大学 环境与规划学院, 山东聊城 252059)

**摘要:** 全球气候变暖将加剧水循环, 增大洪水风险。阿克苏河流域位于天山南坡, 是北半球中纬度典型的高山流域。本流域不仅有暴雨洪水、冰川和积雪融水造成的洪水, 而且还有冰川溃决突发洪水。以阿克苏河的两条支流库玛拉克河和托什干河为研究对象, 利用块最大值抽样方法(block maximum)和超定量阈值(peak over threshold, POT)抽样方法提取出1958—2011年的洪水事件, 其中基于POT方法在两条支流分别提取106次和112次洪水事件, 主要集中在6月、7月和8月份。研究表明: 阿克苏河的两条支流库玛拉克河和托什干河的年最大洪水强度分别以 $8.48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率增加; 在洪水发生时间上, 以冰川融水补给为主的库玛拉克河, 洪水发生时间有提前的趋势, 而以降雨和融雪水补给为主的托什干河, 洪水发生时间变得更加分散, 表现为春季最大洪水提前、秋季最大洪水推后。

**关键词:** 洪水特征; 变化趋势; POT方法; 阿克苏河流域

**中图分类号:** P954 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)04-1200-10

## 0 引言

洪水灾害是一种突发性强、发生频率高、危害严重的气候灾害<sup>[1]</sup>。在过去几十年, 世界各地因洪水造成的损失多达数百亿美元, 造成几千人死亡<sup>[1]</sup>。因此, 洪水变化研究成为水文学中的热点, 如洪水频率与演变分析、洪水工程设计、洪水预估与预警等<sup>[2-5]</sup>。

在气候变化背景下, 天山山区水循环与水文过程发生了改变, 洪水的发生特征与演变趋势也相应发生了变化<sup>[4,6]</sup>。阿克苏河发源于天山南坡, 由高山区冰川融水、积雪融水和降水共同补给, 对气候变化响应敏感<sup>[7]</sup>, 是北半球中纬度高山区最具代表性的河流。理解阿克苏河流域洪水变化对于理解气候变化背景下中纬度高山山区的洪水演变过程具有重要意义。

阿克苏河担负着850万亩农田的灌溉, 养育了阿克苏地区维吾尔族、汉族、回族、蒙古族、哈萨克

族、柯尔克孜族等150万人口<sup>[8]</sup>。近300年来旱洪灾害呈增加趋势, 且洪水事件较干旱事件明显<sup>[9]</sup>。洪水的发生频率和强度增强, 有记录的3次最强洪水均发生在1990年以来<sup>[10-11]</sup>。毛炜峰等<sup>[12]</sup>指出阿克苏河的洪水与 $0^\circ\text{C}$ 层高度密切相关; 沈永平等<sup>[13]</sup>分析了近百年来阿克苏河流域麦茨巴赫冰川湖溃决突发洪水的演变, 发现冰湖溃决突发洪水的总量由20世纪70年代的 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到1990年代以来的 $3 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。随着气候变化, 阿克苏河流域的洪水变的更加复杂, 暴雨洪水和融冰融雪洪水发生了改变。同时, 随着冰川加速融化, 末端退缩或平均冰川厚度减薄, 导致冰川作用区的冰湖面积增大, 冰湖溃决灾害事件增多<sup>[14]</sup>, 严重威胁下游公路、桥梁、水电站、水库等水利工程及工农业发展<sup>[15-16]</sup>。在气候变化背景下, 研究阿克苏河流域的洪水变化趋势及形成机制对下游绿洲环境及财产安全保护有重要意义。

收稿日期: 2019-09-19; 修订日期: 2020-03-25

基金项目: 新疆维吾尔自治区创新环境(人才、基地)建设专项项目(2018Q083)资助

作者简介: 蒋军新, 工程师, 主要从事水资源管理研究. E-mail: jiangjunxin88@126.com

通信作者: 方功焕, 副研究员, 主要从事干旱区水文过程与水资源研究. E-mail: fanggh@ms.xjb.ac.cn

本文基于长时间序列的阿克苏河流域逐日出口流量数据,利用块最大值抽样方法和超定量阈值(POT)抽样方法提取了有器测资料以来阿克苏河流域两条支流的洪水事件,分析了洪水强度和发生时间的变化趋势,并解析了年和季节最大洪水与气候变化的关系。研究成果不仅可服务于地方防洪与社会经济发展规划,而且对理解天山洪水演变趋势及灾害评估可以提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 阿克苏河流域

阿克苏河属于典型的北半球中纬度高山河流,流域总面积 $5\times 10^4\text{ km}^2$ 。阿克苏河有两条支流,其中,西支为托什干河,北支为库玛拉克河,两条支流的多年平均径流量分别为 $26.63\times 10^8\text{ m}^3$ 和 $47.88\times 10^8\text{ m}^3$ (图1)。阿克苏河是唯一一条常年向塔里木河输水的河流,多年平均下泄塔里木河水量为

$35.61\times 10^8\text{ m}^3$ ,占塔里木河干流补给量的70%~80%,是塔里木河干流最大的补给来源<sup>[17]</sup>。

阿克苏河主要由降水、冰川与积雪融水和基岩裂隙水补给<sup>[18]</sup>。由于补给类型的多样性,阿克苏河流域的洪水类型也复杂多样,不仅包括暴雨洪水,还有冰川积雪融水产生的洪水和冰川湖溃决突发洪水。其中,冰湖溃决突发洪水主要发生在库玛拉克河上的麦兹巴赫冰川湖。麦兹巴赫湖位于中国—吉尔吉斯斯坦边界的天山托木尔—汗腾格里山区,在北伊尔切克冰川表面,受阻于南伊尔切克冰川并接受来自两支冰川的融水蓄积而成<sup>[15,19-20]</sup>(图1)。麦兹巴赫湖是天山山区典型的冰川堵塞湖,长3.4 km,宽1.2 km,面积4 km<sup>2</sup>,平均水深44 m<sup>[19]</sup>。麦兹巴赫湖的排水机制主要为冰内和冰下水道扩大排水<sup>[13,21-23]</sup>。只有温度上升到0℃以上时才能产生消融。冰湖溃决突发洪水受水位和入湖水温度的双重影响,当达到一定条件时便发生溃决。

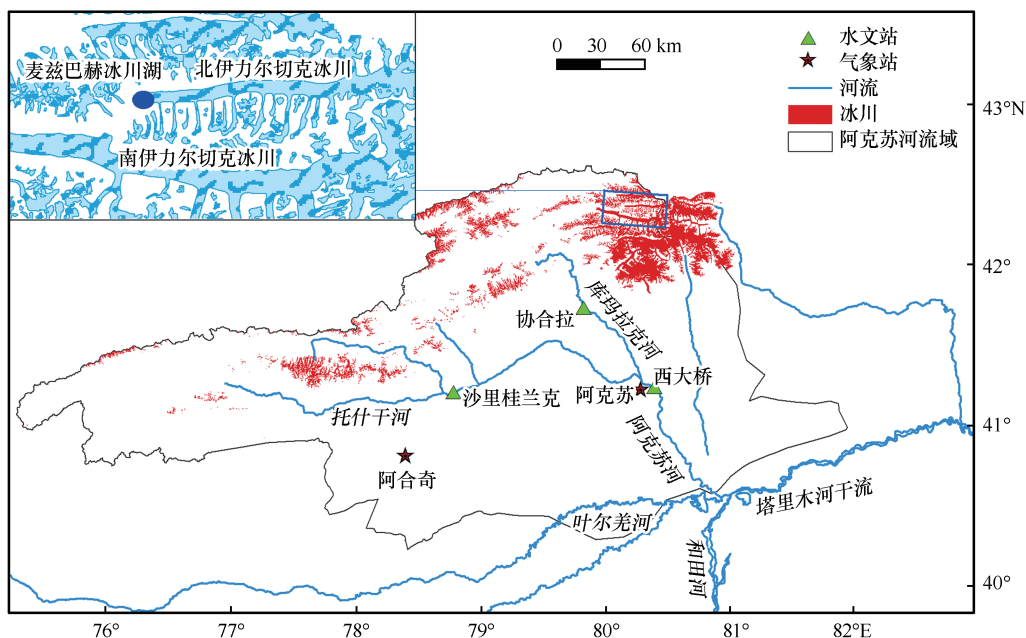


图1 阿克苏河流域水系分布与麦兹巴赫冰川湖位置

Fig. 1 The hydrological system of the Aksu River and the location of the Metzbach Lake

本文用到的水文数据是库玛拉克河协合拉水文站和托什干河沙里桂兰克水文站的1958—2011年的日流量数据(图1),用来提取阿克苏河两条支流的洪水事件。由于阿克苏河的西大桥水文站受人类活动影响较大,人为调控因素较强,本文仅分析两条支流的洪水变化特征,不考虑干流的洪水变化。本文用到的气象数据是有长时间序列的阿克苏气象站和阿合奇气象站的1958—2011年的日气

温和日降水数据(图1),分别代表库玛拉克河和托什干河的气候情况。

### 1.2 阿克苏河流域洪水提取方法

块最大值采样方法就是取一个时间步长(如年、季节、月份等)内的最大日流量作为洪水事件(公式1),但是该方法容易忽略该步长内发生的低于最大洪水事件的其他较大洪水信息,而且对于没有发生洪水的时间步长,块最大值法同样采集了样

本数据<sup>[24]</sup>。为了克服块最大值抽样所具有的缺陷,本文同时利用POT采样方法对块最大值采样进行补充,例如洪水发生次数、相应量级以及峰现时间等信息。本方法在干旱区内陆河流域得到了较好的应用<sup>[11,25]</sup>。

$$Q_i = \max(q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_n) \quad (1)$$

式中: $Q_i$ 为第*i*个时间步长(如第*i*年,第*i*个春季等)内提取的洪水事件, $q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_n$ 为第*i*时间步长内的日流量序列。

POT方法通过选取超过某一阈值的流量,组成洪水极值序列。阈值的选取非常重要,但是目前还缺乏公认的客观方法<sup>[26]</sup>。选择洪峰的主要思路是:在连续的峰值流量过程中,只能选择一个最大的峰值。由于阿克苏河属于典型的季节性河流,夏季流量高,冬季低,本文分别考虑不同季节的流量特征,通过测试不同的阈值,以 $E(Q) + \sqrt{\text{Var}(Q)}$ 逐渐增加到 $E(Q) + 3\sqrt{\text{Var}(Q)}$ 作为洪水发生阈值的备选值<sup>[27]</sup>。另外,两个洪峰还必须满足洪峰独立性标准。结合年平均洪水发生次数,选择满足平均发生次数在1.60~3.00范围内的较大流量作为阈值<sup>[28]</sup>,最终选取 $E(Q) + 2\sqrt{\text{Var}(Q)}$ 作为不同季节的阈值,进而选取出阿克苏河流域洪水极值事件的序列<sup>[24,29-30]</sup>。在形成序列前,采用美国水资源协会提出的判别标准对洪峰独立性进行判别[式(2)]。

$$\begin{cases} D > 5 + \ln(A) \\ Q_{\min} < 3/4 \times \min(Q_1, Q_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D$ 为连续两个洪峰的间隔时间; $A$ 为两条支流的汇流面积,单位为平方英里,合2.59 km<sup>2</sup>;  $Q_1$ 和 $Q_2$ 分别为连续两个洪峰的量级,单位为m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>。考虑到不同流域的汇流时间,两条支流的两次洪水事件的时间应该不小于13 d。不满足上述条件的连续洪峰中,只取其中最大一次洪峰。

### 1.3 洪水变化趋势检验方法

本研究利用非参数Mann-Kendall秩次统计方法来分析阿克苏河两条支流的年和季节最大洪水的变化趋势。非参数Mann-Kendall趋势检验方法广泛的应用于水质、径流、温度、降水等水文气象时间序列的趋势变化检验中,其特点是不必先假定样本的统计分布,在趋势分析中具有广泛的应用<sup>[31-32]</sup>。Mann-Kendall秩次统计方法可用下式表示:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n-1)/18 \quad (6)$$

式中: $x_k, x_i$ 为连续的数据值; $n$ 为数据资料的长度,本文为年数。在Mann-Kendall检验中,当 $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,拒绝零假设。其中, $Z_{1-\alpha/2}$ 为标准正态方差; $\alpha$ 为显著性检验水平; $Z_c$ 为正值表示增加趋势。当 $Z_c$ 的绝对值大于1.28、1.64、2.32时分别表示通过了信度90%、95%、99%的显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于POT方法的洪水事件选取

根据阿克苏河两条支流的年内分布特征(图2),11月—翌年4月为库玛拉克河的干季,5—10月为湿季。对于托什干河,由于融雪水占比较高,4月份流量较高,春季洪峰明显,因此,本文将11月—翌年3月定义为托什干河的干季,4—10月为湿季。利用POT采样方法,确定协合拉干季和湿季的阈值均为 $E(Q) + 2\sqrt{\text{Var}(Q)}$ ,即77 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>和730 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>。在1958—2011年,基于此阈值选取的洪水事件在库玛拉克河共出现106次,其中干季17次,湿季89次。托什干河沙里桂兰克站干季和湿季的阈值分别为40 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>和360 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,在1958—2011年共出现112次洪水事件,其中干季14次,湿季98次,平均每年发生洪水次数为2.07次。

根据利用POT方法提取的库玛拉克河的106次洪水过程和托什干河的112次洪水流量过程,两条河流的洪水平均持续时间(从开始上涨到完全消退)分别为10.4 d和8.8 d,上涨时间分别为5.8 d和4.1 d,下降时间分别为4.6 d和4.7 d。其中,库玛拉克河的最高洪水持续时间可达26 d,从1988年11月26日起涨,在12月12日达到洪峰,12月22日结束;托什干河的最高洪水持续时间为21 d,从1967年4月11日起涨,在4月26日达到峰值,5月2日结束。

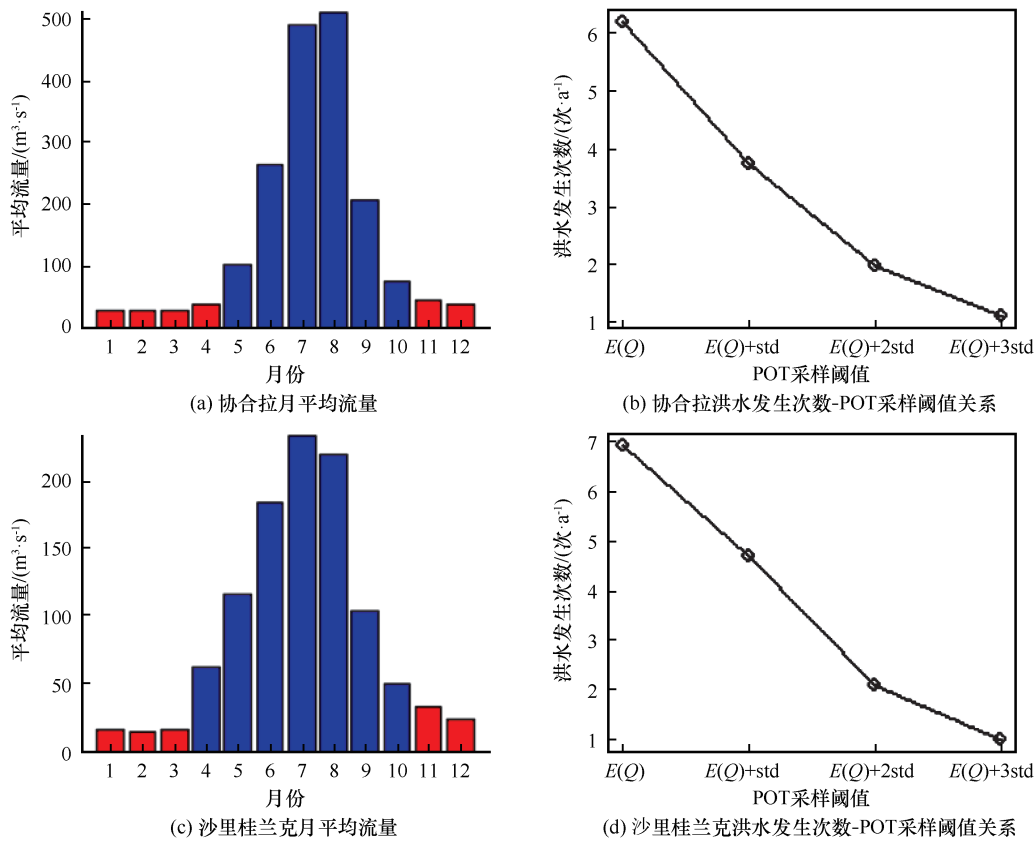


图2 库玛拉克河协合拉水文站和托什干河沙里桂兰克水文站年内流量分布(a)、  
(c)和年洪水发生次数-POT采样阈值关系图(b)、(d)

Fig. 2 The intra-annual distribution of streamflow (a), (c) and the relationship between the POT thresholds and flood times (b), (d) of the Xiehela station of the Kumarak River and the Shaliguilank station of the Toshgan River

不同补给类型河流的洪水的年内分布不同。以融冰融雪水补给为主的库玛拉克河,洪水主要发生在7—8月,其中7月和8月的洪水发生次数分别为37和42次,占洪水总发生次数的74.5%。对于托什干河,洪水主要发生在6—8月,分别发生了27、32和20次洪水事件,占洪水总发生次数的

70.5%(图3)。

**2.2 基于POT方法的阿克苏河洪水变化特征分析**

阿克苏河流域两条支流库玛拉克河和托什干河的洪水对降水的响应过程可见图4。由于库玛拉克河和托什干河的洪水主要发生在夏季,图4仅给出第180~240 d的降水和洪水关系。协合拉水文站

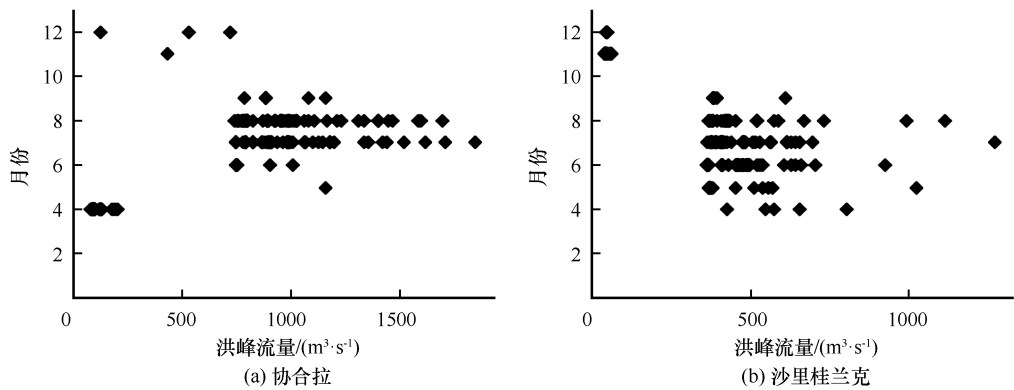


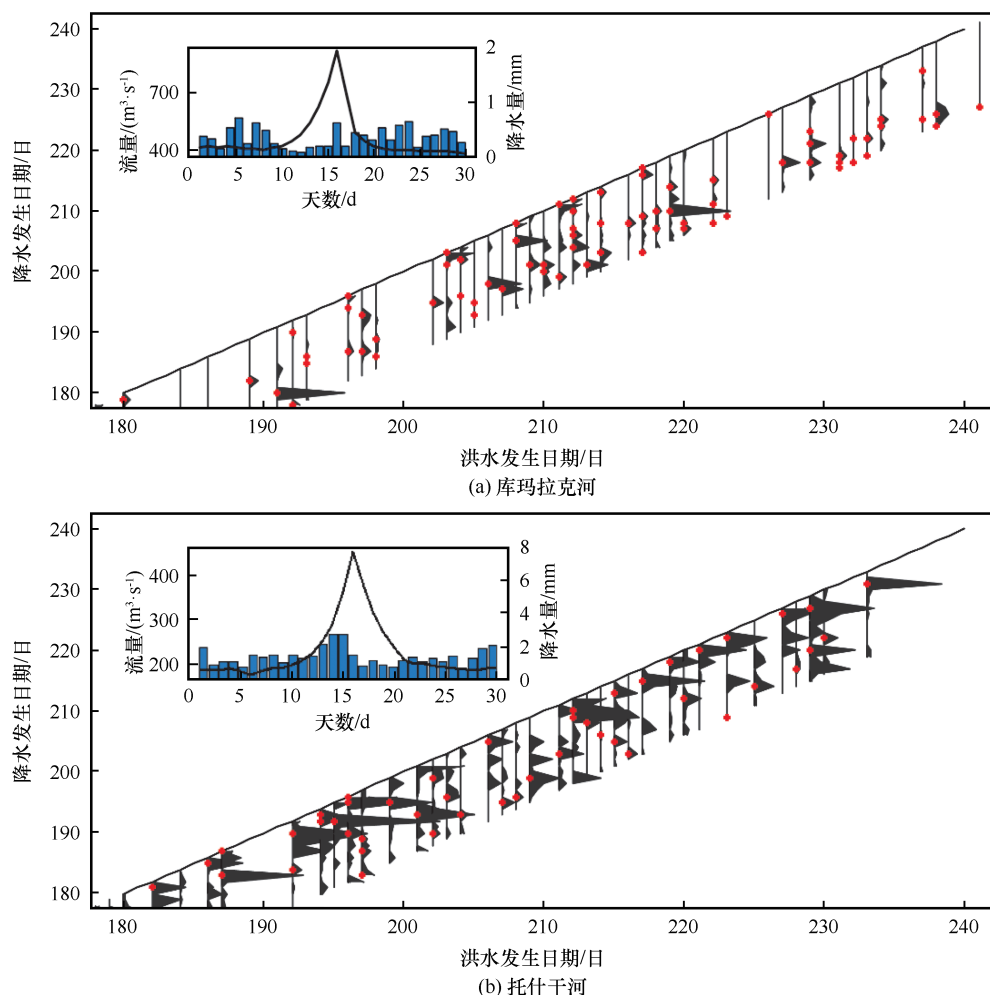
图3 库玛拉克河协合拉水文站和托什干河沙里桂兰克水文站洪水发生年内分布

Fig. 3 Intra-annual distribution of flood occurrence at the Xiehela station of the Kumarak River and the Shaliguilank station of the Toshgan River



洪水发生前 15 d 降水相对较小,洪水受暴雨影响较小,而对于托什干河,洪水发生前的降水频率和强度均较高。由此表明,托什干河更容易形成暴雨洪水,这与库玛拉克河和托什干河的径流补给特点相

关。库玛拉克河主要是冰川融水补给,而托什干河主要是降雨和融雪水补给,库玛拉克河的洪水对气温变化更为敏感<sup>[33-35]</sup>。



注:其中阴影部分表示降水发生时间和大小(为了方便显示,用实际降水量的15%显示),红色圆点表示洪水发生时间(横坐标)和最大降水发生时间(竖坐标)。左上角的子图为1958—2011年洪水发生前后15 d的平均流量和平均降水量

Note: The shaded area indicates the precipitation amount, and the red dot indicates the timing of flood and the maximum precipitation.

The subgraphs in the upper left corner are the average flow and the average previous following 15 days precipitation

图4 库玛拉克河和托什干河的洪水与降水关系

Fig. 4 Relationship between the timing of floods and precipitation of the Kumarak River and the Toshgan River

### 2.3 基于块最大值法方法的阿克苏河洪水变化趋势

对于库玛拉克河,年最大洪水表现出总体增加趋势,增加速率为 $8.48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,Mann-Kendall趋势检验的 $Z_c$ 值可达3.425,显著性水平为 $P < 0.01$ 。对于春季最大洪水,同样表现为增加趋势, $Z_c$ 值为2.104,显著性水平为 $P < 0.05$ 。夏季最大洪水的变化特征与年最大洪水变化特征类似。对于秋季最大洪水, $Z_c$ 值为-1.388,表现为不显著下降趋势(表

1和图5)。

对于托什干河,年最大洪水表现出总体不显著增加趋势,增加速率为 $3.40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,Mann-Kendall趋势检验的 $Z_c$ 值为1.567。虽然四个季节的洪水均表现为增加趋势,但是只有春季、秋季和冬季的洪水表现为显著增加趋势, $Z_c$ 值分别为2.328、2.209和4.619。夏季最大洪水虽然也表现为增大趋势,但是没有通过显著性检验。

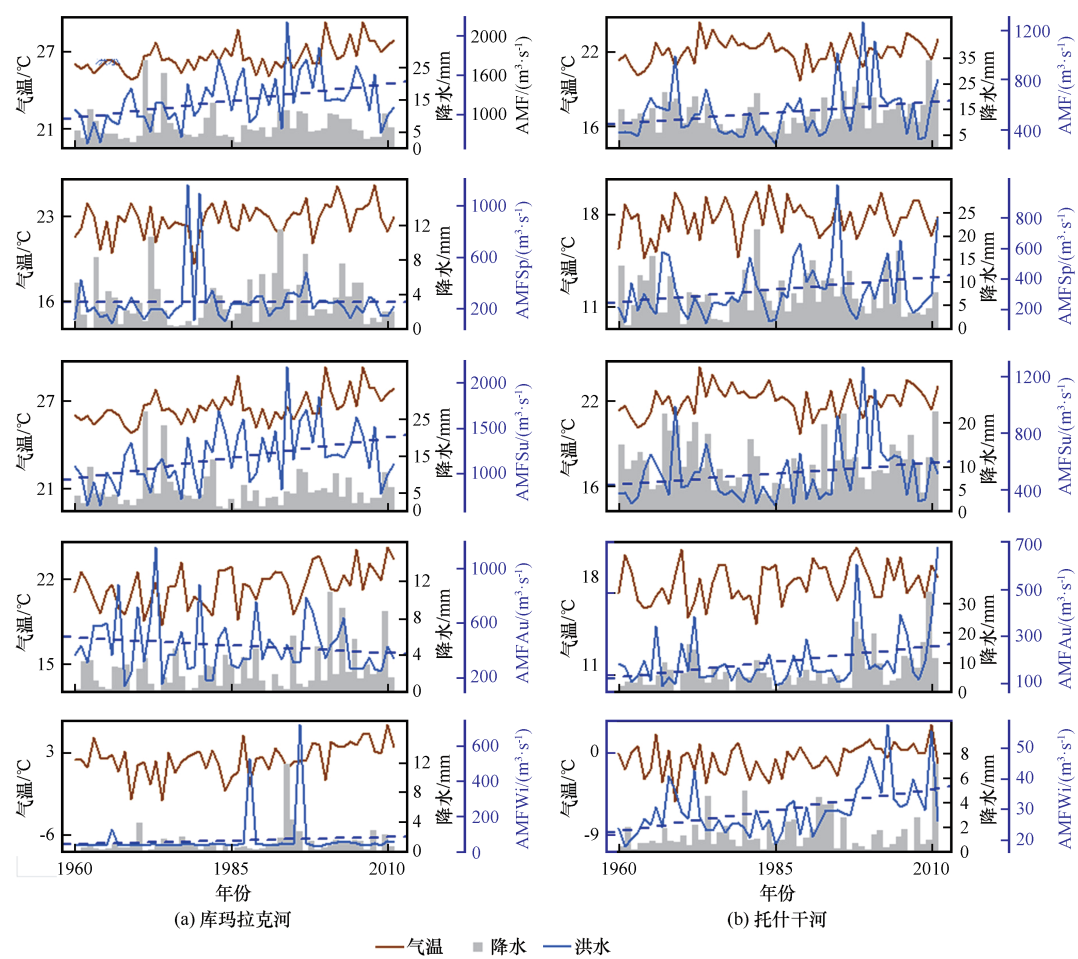
分析库玛拉克河和托什干河的洪水与气候因

表1 库玛拉克河和托什干河最大洪水变化的 Mann-Kendall 检验结果,以及洪水与最高连续 7 d 气温(T7)和最高连续 3 d 降水(P3)之间的相关系数

Table 1 Trend analysis of the annual and seasonal maximum floods of the Kumarak River and the Toshgan River based on the Mann-Kendall test. The correlation coefficients between flood magnitude and seven-day maximum temperature, three-day maximum precipitation were shown. The superscript star (\*) and (\*\*) represent the p-value of the trend analysis or the correlation are less than 0. 01 or 0. 05, respectively

流域	指标	线性趋势/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Mann-Kendall			与 T7 间的 相关系数	与 P3 间的 相关系数
			$Z_c$	趋势	显著性 $\alpha$		
库玛拉克河	年最大洪水(AMF)	8. 48	3. 425**	增加	99%	0. 32*	0. 06
	春季最大洪水(AMFSp)	-0. 01	2. 104*	增加	95%	0. 44**	-0. 01
	夏季最大洪水(AMFSu)	8. 96	3. 701**	增加	99%	0. 30*	0. 00
	秋季最大洪水(AMFAu)	-2. 29	-1. 388	减少	90%	0. 24	-0. 06
	冬季最大洪水(AMFWi)	0. 76	3. 664**	增加	99%	0. 16	0. 37**
托什干河	年最大洪水(AMF)	3. 40	1. 567	增加	90%	-0. 23	0. 38**
	春季最大洪水(AMFSp)	3. 28	2. 328**	增加	99%	0. 03	0. 31*
	夏季最大洪水(AMFSu)	3. 06	1. 231	增加	不显著	-0. 23	0. 19
	秋季最大洪水(AMFAu)	2. 63	2. 209*	增加	95%	0. 27	0. 41**
	冬季最大洪水(AMFWi)	0. 27	4. 619**	增加	99%	0. 42**	-0. 06

注: 其中, \*代表 0.05 显著性水平, \*\*代表 0.01 显著性水平。



注: 虚线为洪水变化趋势线, 其中 AMF 为年最大洪水, AMFSp、AMFSu、AMFAu 和 AMFWi 分别是春季、夏季、秋季和冬季的最大洪水量  
Note: The dashed line is the trend of flood magnitude. AMF is the annual maximum flood and AMFSp, AMFSu, AMFAu and AMFWi are the maximum floods in spring, summer, autumn and winter, respectively

图5 库玛拉克河和托什干河年际和各季节洪水、最高连续 7 d 气温(T7)和最高连续 3 d 降水(P3)的变化趋势  
Fig. 5 The annual and seasonal variations of flood magnitude, seven-day maximum temperature, and three-day maximum precipitation in the Kumarak River and the Toshgan River

子的关系发现,库玛拉克河的春季洪水与最高连续7 d气温具有相同的变化特征,二者的相关性较强,Spearman 相关系数为0.44(图5和表1),推测库玛拉克河春季洪水主要是由融雪水补给为主。夏季、秋季和冬季洪水大小也与7 d最高气温呈正相关关系,并且夏季的洪水大小与气温的相关性通过了显著性检验( $P<0.05$ )。这主要是由于库玛拉克河夏季径流由冰川融水补给为主,冰川融水补给比例高达60%<sup>[36]</sup>。值得注意的是,冬季最大洪水在1988年和1996年分别达到了 $528 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $720 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,远大于冬季最大洪水的中位数值 $38.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,这是由于在1988年和1996年的12月份发生了冰湖溃决突发洪水,导致河道流量骤增。由于库玛拉克河的洪水大部分与麦兹巴赫冰川湖的溃决相关,而本冰川湖的溃决与气温和降水没有直接关系<sup>[22,37]</sup>,而与冰坝的稳定性、湖面温度、补给速度、冰川内部储存水的快速释放有关<sup>[23]</sup>,具有非常强的随机性,因此,洪水的变化规律与最高连续7 d气温和最高连续3 d降水的变化规律不甚一致。托什干河的冰川面积相对较小,仅占流域面积的3.43%,冰川融水径流不

足出山口径流量的20%<sup>[33]</sup>。总体来看,托什干河的洪水增加与气温关系微弱,而受最高连续3 d降水量影响较大。秋季洪水的增加主要是由于最高连续3 d降水增加所致。

#### 2.4 基于POT方法的阿克苏河流域洪水发生时间变化特征

库玛拉克河和托什干河的洪水发生次数有增加的趋势,并且有略提前的趋势(图6)。对于库玛拉克河,1958—2011年共发生7次10年一遇的洪水,发生日期分别为1983年8月21日、1987年8月19日、1994年7月23日、1996年8月14日、1997年7月31日、1999年7月31日和2005年7月15日,对应的最高洪峰流量分别为 $1700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1590 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1710 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1850 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1620 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。对于托什干河,1958—2011年共发生5次10年一遇的洪水,分别发生在1969年8月3日、1995年5月10日、1995年6月8日、1999年7月31日和2001年8月17日,对应的最高流量分别为 $989 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1020 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $922 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应的重现期分别为20年、23年、15

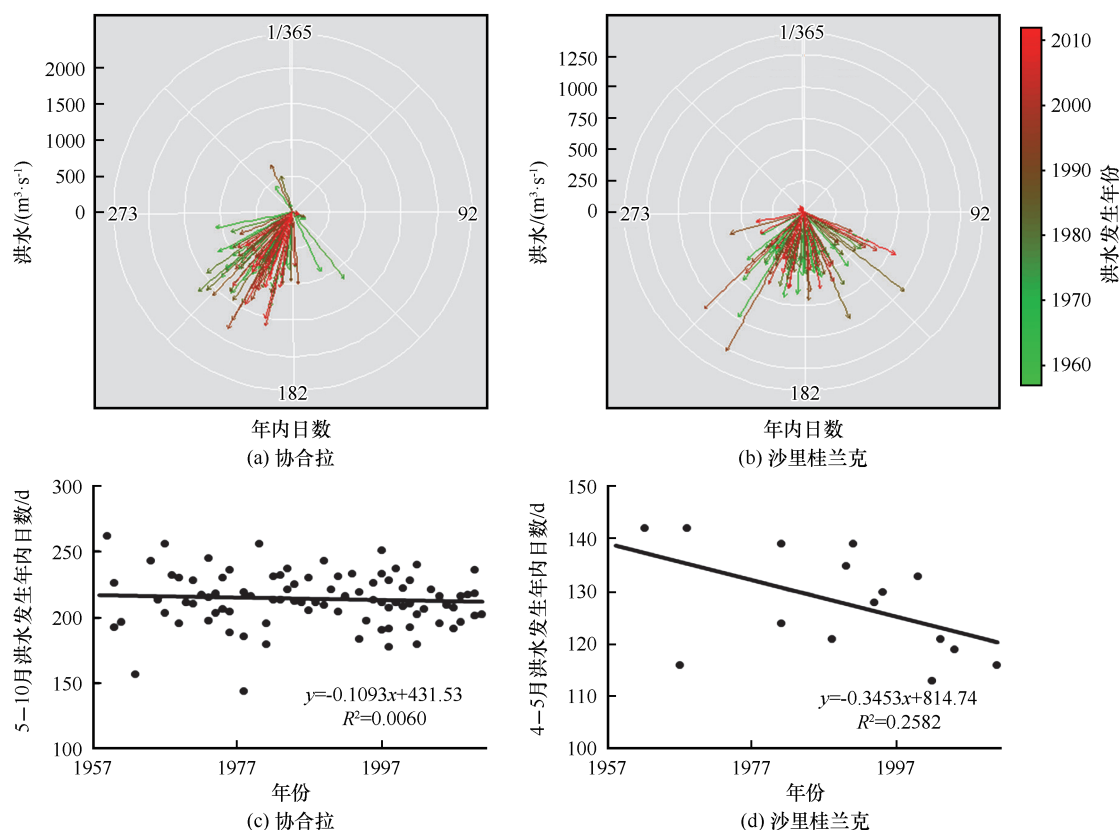


图6 阿克苏流域洪水发生时间变化特征

Fig. 6 Variations of flood magnitude and timing of the Kumarak River(a) and the Toshgan River(b) from 1958 to 2011.

The flood timings of the Kumarak River and the Toshgan River of specific period were shown in subplot (c) and (d)

年、58年和33年。可以看出,库玛拉克河和托什干河高强度洪水事件在20世纪90年代以来频繁发生,分别占有器测资料以来总发生次数的71%和80%。

在年内分布上,以冰川融水补给为主的库玛拉克河的洪水事件趋向于提前发生,而以积雪融水洪水和暴雨洪水为主的托什干河的洪水发生时间变得更加分散,表现为春季洪水发生提前而秋季洪水发生推迟。这主要是由于在全球变暖背景下,阿克苏河流域的温度不断上升,库玛拉克河的冰川融化速度加快,融水增多,导致夏季洪水提前,湿季洪水事件的平均发生时间约提前了6 d[图6(c)]。而对于托什干河,主要是4—5月份的洪水有提前趋势,主要是由于春季融雪水增加所致,平均洪水发生时间提前了18 d[图6(d)]。

### 3 结论

阿克苏河流域的产汇流机制复杂,多数洪水属于混合型洪水。通过分析1958年以来的洪水变化趋势,可以得出以下结论:

(1)阿克苏河流域的库玛拉克河和托什干河季节性较强,当用POT方法提取洪水事件时,分枯水期和丰水期采用不同的洪水阈值 $[E(Q) + 2\sqrt{\text{Var}(Q)}]$ 可以更加实际的提取出洪水事件。在1958—2011年,库玛拉克河和托什干河分别提取出洪水事件106次和112次,其中干季分别为17和14次,湿季分别为89和98次。

(2)1958—2011年库玛拉克河和托什干河的洪水均表现出增加趋势。除了库玛拉克河的秋季最大洪水表现出降低趋势外,两河的季节洪水均表现为不同程度的增加态势。10年一遇洪水事件绝大多数发生在20世纪90年代以后。

(3)在洪水发生时间上,库玛拉克河的湿季洪水发生时间有提前趋势,而对于以暴雨产流和融雪产流为主的托什干河,春季洪水的发生时间有提前趋势而秋季洪水发生时间有推后现象,洪水发生时间更加分散,为水资源管理者带来挑战。对于以冰川融水补给为主的库玛拉克河,春季、夏季洪水发生与最高连续7 d气温相关,而托什干河年洪水以及春季和秋季洪水的发生与最高连续3 d降水量相关。

### 参考文献(References):

[1] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2013,

3(9): 816-821.

- [2] Choubin B, Moradi E, Golshan M, et al. An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2087-2096.
- [3] Groisman P Y, Knight R W, Karl T R. Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: Trends in the twentieth century[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(2): 219-246.
- [4] Mallakpour I, Villarini G. The changing nature of flooding across the central United States[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(3): 250-254.
- [5] Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. *Nature*, 2002, 415(6871): 514-517.
- [6] Wang H, Chen Y, Deng H, et al. Detecting changes in extreme streamflow in the Tarim River, Northwest China[J]. *Quaternary International*, 2015, 380: 149-158.
- [7] Duethmann D, Menz C, Jiang T, et al. Projections for headwater catchments of the Tarim River reveal glacier retreat and decreasing surface water availability but uncertainties are large[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(5): 054024.
- [8] Xinjiang Tarim River Basin Aksu Management Bureau. Aksu River basin chronicles[M]. Beijing: Fangzhi Press, 2006. [阿克苏河流域管理处. 阿克苏河流域志[M]. 北京: 方志出版社, 2006.]
- [9] Ye Baisong, Zhao Chengyi, Jiang Fengqing, et al. Characteristics of the flood and drought disasters in the Tarim River basin in recent 300 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 173-182. [叶柏松, 赵成义, 姜逢清, 等. 近300年来塔里木河流域旱涝灾害特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 173-182.]
- [10] Gu Xihui, Zhang Qiang, Sun Peng, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River, Xinjiang: characteristics, causes and impacts[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1390-1401. [顾西辉, 张强, 孙鹏, 等. 新疆塔河流域洪水量级, 频率及峰现时间变化特征, 成因及影响[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1390-1401.]
- [11] Zhang Q, Gu X H, Singh V P, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River basin, China: changes, causes and implications[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 139: 44-55.
- [12] Mao Weiyl, Wu Jun, Chen Chunyan. Relationship of 0 °C level height and summer flood of Aksu River, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 697-704. [毛伟峰, 吴钧, 陈春艳. 0 °C层高度与夏季阿克苏河洪水的关系[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 697-704.]
- [13] Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, et al. Changes in Merzbacher Lake of Inylchek Glacier and glacial flash floods in Aksu River Basin, Tianshan during the Period of 1903-2009[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(6): 993-1002. [沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害[J]. 冰川冻土, 2009, 31(6): 993-1002.]
- [14] Wang X, Ding Y J, Liu S Y, et al. Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(4): 575-591.
- [15] Liu Shiyin, Cheng Guodong, Liu Jingshi. Jokulhlaup characteristics of the Lake Mertzbakher in the Tianshan Mountains and



- its relation to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 30-35. [刘时银, 程国栋, 刘景时. 天山麦兹巴赫冰川湖突发洪水特征及其与气候关系的研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 30-35.]
- [16] Chen Yaning, Yang Siqun, Li Weihong. A study of the fractal characteristics of Jokulhlaups from the Lake Mertzbakher, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(3): 253-256. [陈亚宁, 杨思全, 李卫红. 天山麦兹巴赫冰川湖突发性洪水分形特征研究[J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 253-256.]
- [17] Chen Yaning. Hydro-ecological processes of the Tarim River Basin in Xinjiang [M]. Beijing: Scientific Press, 2010. [陈亚宁, 新疆塔里木河流域生态水文问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [18] Ji H, Fang G, Yang J, et al. Multi-objective calibration of a distributed hydrological model in a highly glacierized watershed in Central Asia [J]. *Water*, 2019, 11(3): 554.
- [19] Xie Zunyi. Remote sensing monitoring and early-warning of glacier lake outburst flood of Merzbacher Lake, Tianshan Mts., Center Asia [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute (CAREERI), Chinese Academy of Sciences (CAS), 2012. [谢遵义. 中亚天山麦兹巴赫冰川湖突发洪水遥感监测与预警研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2012.]
- [20] Li Da, Shangguan Donghui, Huang Weidong. Study on the area change of Lake Merzbacher in the Tianshan Mountains during 1998—2017 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1126-1134. [李达, 上官冬辉, 黄维东. 天山麦兹巴赫冰川湖 1998—2017 年面积变化相关研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1126-1134.]
- [21] Liu J. Jökulhlaups in the Kunmalike River, southern Tien Shan Mountains, China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, 16: 85-88.
- [22] Ng F, Liu S. Temporal dynamics of a Jökulhlaup system [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(192): 651-665.
- [23] Shangguan D, Ding Y, Liu S, et al. Quick release of internal water storage in a glacier leads to underestimation of the hazard potential of glacial lake outburst floods from lake Merzbacher in central Tianshan mountains [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(19): 9786-9795.
- [24] Bezak N, Brilly M, Šraj M. Comparison between the peaks-over-threshold method and the annual maximum method for flood frequency analysis [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(5): 959-977.
- [25] Ma Y, Huang Y, Liu T. Change and climatic linkage for extreme flows in typical catchments of middle Tianshan Mountain, northwest China [J]. *Water*, 2018, 10(8): 1061.
- [26] Guo Shenglian, Liu Zhangjun, Xiong Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 302-314. [郭生练, 刘章君, 熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314.]
- [27] Lang M, Ouara T B M J, Bobée B. Towards operational guidelines for over-threshold modeling [J]. *Journal of hydrology*, 1999, 225(3/4): 103-117.
- [28] Cunnane C. A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction [J]. *Journal of Hydrology*, 1973, 18(3/4): 257-271.
- [29] Fischer S, Schumann A. Robust flood statistics: comparison of peak over threshold approaches based on monthly maxima and TL-moments [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, 61(3): 457-470.
- [30] Petrow T, Merz B. Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951 – 2002 [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 371(12/3/4): 129-141.
- [31] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann – Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3/4): 350-363.
- [32] Li Z, Chen Y, Shen Y, et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2205-2212.
- [33] Fang G, Yang J, Chen Y, et al. How hydrologic processes differ spatially in a large basin: multisite and multi-objective modeling in the Tarim River Basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(4): 7098-7113.
- [34] Duethmann D, Bolch T, Farinotti D, et al. Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4727-4750.
- [35] Shen Y J, Shen Y, Fink M, et al. Trends and variability in streamflow and snowmelt runoff timing in the southern Tianshan Mountains [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 173-181.
- [36] Chen H, Chen Y, Li W, et al. Quantifying the contributions of snow glacier meltwater to river runoff in the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 174: 47-57.
- [37] Kingslake J, Ng F. Quantifying the predictability of the timing of Jökulhlaups from Merzbacher Lake, Kyrgyzstan [J]. *Journal of Glaciology*, 2013, 59(217): 805-818.

## Evolution trend of flood in the Aksu River basin, Xinjiang

JIANG Junxin<sup>1</sup>, CAI Ming<sup>1</sup>, XU Yongjun<sup>1</sup>, FANG Gonghuan<sup>2</sup>, LI Zhi<sup>2</sup>, CHEN Yongjin<sup>3</sup>

(1. Xinjiang Tarim River Basin Aksu Management Bureau, Aksu 843000, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and

Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

3. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong, China)

**Abstract:** Global warming has accelerated water cycling and increased flood risk. The Aksu River basin, located on the southern slope of the Tianshan Mountains, is an important tributary of the Tarim River basin. Floods in the Aksu River basin is not only caused by storm, glacier and snow melt water, but also glacial-lake outburst floods (GLOF). Based on the long-term daily streamflow data of the Kumarak River and the Toshgan River, two headwaters of the Aksu River, this study investigated the changing nature of flood events from 1958 to 2011. In addition to the bulk maximum method, this work also applied the Peak Over Threshold (POT) method to extract flood events and 106 and 112 flood events were identified in the Kumarak River and the Toshgan River, concentrated in June, July and August. The flood intensity of the Kumarak River and the Toshgan River both increased based on the two flood-identification methods. The occurring time of flood of the glacier-melt water dominated Kumarak River has pushed forward, while that of the rainfall and snowmelt recharged Toshgan River has become more dispersed as the spring flood being pushed forward while the autumn flood being postponed.

**Key words:** flood characteristics; trend; POT method; Aksu River basin

(责任编辑: 上官冬辉; 编辑: 庞瑜, 周成林)