

玛纳斯河流域上游融雪洪水序列变化特征分析

何朝飞¹, 陈伏龙¹, 张志君¹, 杨宽¹, 何新林¹, 龙爱华^{1,2}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2. 中国水利水电科学研究院
流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038.)

摘要: 为了探究融雪洪水流域环境变化下的趋势性,以玛纳斯河流域上游肯斯瓦特水文站年融雪洪水序列为例,利用 Pettitt 法和里海哈林(Lee-Heghinian)法检验洪水峰量年际变化中的突变现象,利用 R/S 法探究序列变异程度,所得到的突变点将历年洪水过程划分为两个阶段,并采用了加权滑动平均法及 Mann-Kendall 法分析了洪水时间序列的趋势变化。结果表明:在人类活动及气候变化影响下,玛纳斯河流域 1957-2014 年洪水特征序列发生了中等变异,变异点前序列波动幅度较为明显,而变异点后整体变化呈下降趋势但并不显著。

关键词: 融雪洪水; 突变分析; 变化特征; 滑动平均; M-K 检验; R/S 分析; 玛纳斯河流域

中图分类号:TV121⁺.6; P333 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2020)01-0109-06

Analysis of variation characteristics of snowmelt flood sequence in the upper Manas River Basin

HE Chaofei¹, CHEN Fulong¹, ZHANG Zhijun¹, YANG Kuan¹, HE Xinlin¹, LONG Aihua^{1,2}

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to explore the trend of environmental changes under the snowmelt flood basin, the annual snowmelt flood sequence of the Ken Swart hydrologic station in the upper Manas River Basin was used as an example to test the interannual variation of peak volume by the Pettitt method and the Lee-Heghinian method. The mutation phenomenon was explored by R/S method, and the obtained mutation points divided the flood process into two stages. The weighted moving average method and Mann-Kendall method were used to analyze the trend of flood time series. The results showed that under the human activities and climate change, the flood signature sequence of the Manas River Basin has undergone moderate variation during 1957-2014, and the amplitude of the pre-mutation sequence is more obvious, while the overall change after the mutation point is decreasing but not significantly.

Key words: snowmelt flood; mutation analysis; variation characteristics; moving average; M-K testing; R/S analysis; Manas River Basin

1 研究背景

冰川、积雪作为淡水资源的储备,在河川径流补给以及经济建设中具有重要的意义,特别是在西北干旱区,春季融水对缓解绿洲生态系统水资源短缺的矛盾具有重要作用^[1]。同时,冰川和积雪的融化,也时常伴有洪水灾害的发生,这将直接导致人、

财、物不计其数的直接损失,严重影响了经济社会的发展。近年来,随着人类活动的影响和环境气候的变化,加剧了干旱半干旱地区生态水循环的敏感度^[2],从而使洪水序列的随机独立同分布假设面临极大的挑战。

洪水趋势性演变特征规律直接影响到区域防洪安全,探究洪水变化规律就成为必不可少的工作,但

收稿日期:2019-07-16; 修回日期:2019-10-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51769029); 国家重点研发计划项目(2017YFC0404301); 石河子大学高层次人才科研启动基金项目(RCZK2018C23)

作者简介:何朝飞(1992-),男,新疆博湖人,硕士研究生,研究方向为水文学水资源。

通讯作者:陈伏龙(1978-),男,湖南东安人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水文学水资源。

由于水文序列的破坏,加剧了其演变的不确定性。陈伏龙等^[3]通过对玛纳斯河流域上游径流特征进行分析,得到了气候变化是影响其变化的主要因素;在此因素的影响下,郑锦涛等^[4]采用 Mann-Kendall 及滑动 t 检验法确定了玛纳斯河流域径流的变异年份;凌红波等^[5]分别就玛纳斯河流域各水文因素进行了非参数检验,诊断了其跳跃性变异特征,并用 R/S 分析预测了其未来一段时间的变化趋势;丁文学等^[6]在玛纳斯河流域基于条件概率分布模型的基础上,分析了年径流量的变化趋势。而这些研究大部分是基于气候变化对玛纳斯河径流变化的影响研究,而极少涉及到对洪水演变分析。特别是近年来,新疆洪水频率及洪水灾害呈上升趋势^[7],这将严重威胁到人们的生产生活。因此,在气候变化背景下研究玛纳斯河流域洪水序列变化规律也显得尤为重要。

本文针对环境变化下的融雪性洪水^[8],综合运用 Pettitt 法、Lee-Heghinian 法、加权滑动平均法和 Mann-Kendall 法分析水文时间序列趋势特征,可为玛纳斯河水利工程防洪度汛安全、防洪管理及工程设计建设提供一定的理论依据。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

玛纳斯河流域位于中纬度欧亚大陆中心(43°27'~45°21'N,85°01'~86°32'E),地处新疆天山北麓,准噶尔盆地南部,具有明显的大陆性干旱气候特征。干流全长 324 km,流域面积 33 500 km²,平均气温为 4.7~5.7℃。河流属于冰雪融水和雨水混合补给型,具有显著的垂直地带性,其中现代冰川主要分布在海拔 3 600 m 以上的天山山脉,冰川面积多年维持在 608.25 km² 左右,对河流的补给可以占到径流量的 35.3%^[9]。

2.2 数据来源及预处理

本文水文数据选取玛纳斯河流域出山口肯斯瓦特水文站(85°57'E,43°58'N)1957-2014 年间的流域逐日径流量。经计算整理选取 1957-2014 年玛纳斯河肯斯瓦特水文站控制流域年最大洪峰流量(Q)以及年最大 1、3、7 d 洪量(W₁、W₃、W₇)为数据支撑进行研究。

3 研究方法

3.1 突变点检测

采用 Pettitt 法和 Lee-Heghinian 法,揭示洪水峰量年际变化中的突变情况。Pettitt 检验法^[10]主要

基于 Mann-Whitney 统计量 $U_{t,N}$, 检验同一个序列 $x(t)$ 的两个样本,其公式为:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{i=1}^N \text{sgn}(x_t - x_i) \quad (1)$$

$$(t = 2, 3, \dots, N)$$

假设:

$$\text{sgn}(x_t - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_t - x_i > 0) \\ 0 & (x_t - x_i = 0) \\ -1 & (x_t - x_i < 0) \end{cases} \quad (2)$$

既“0”假设表示水文时间序列满足于同一分布,无变异点;非“0”假设表示在时间 t 前后子序列服从不同的分布模式,有变异点 t 。利用 K_N 来代表显著变点 t 的最大值,并确定变异点的位置; P 值为显著性相关概率,其公式为:

$$K_{t,N} = \max_{1 \leq k \leq b} |U_{t,N}| \quad (3)$$

$$P \cong 2\exp(-6K_{t,n}^2/n^3 + n^2) \quad (4)$$

Lee-Heghinian 检验法^[11]是 Lee 和 Heghinian 在假定水文时间序列总体呈正态分布以及变异点 τ 的先验分布为均匀分布的情况下,推得其 τ 的后验分布为:

$$f(\tau | x_1, x_2, \dots, x_n) = k[n/\tau(n-t)]^\Phi [R(\tau)]^{-(n-2)/2} \quad (5)$$

$$(1 \leq \tau \leq n-1)$$

$$R(\tau) = \left[\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - x_\tau)^2 + \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - x_{n-\tau})^2 \right] / \sum_{i=1}^n (x_i - x_n)^2 \quad (6)$$

式中: $x_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x_i, x_{n-\tau} = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=\tau+1}^n x_i, x_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; k 为比例常数; n 为样本容量。由后验分布,以满足 $\max_{1 \leq \tau \leq n-1} \{f(\tau | x_1, x_2, \dots, x_n)\}$ 条件的 τ 记为 τ_0 , 作为最可能的变异点。

3.2 趋势性检验

距平是常用的表示时间序列变量偏差的统计量^[12]。将距平时间序列代替洪水流量要素本身的观测数据,即某一要素 x_i 与多年平均值 \bar{x} 之差即为该要素的距平值。为了表述水文要素变化趋势,将洪水变量序列做距平处理,得到平均值为 0 的序列,由曲线直观进行判断。对于序列 x , 其某一时刻 t 的累积距平 x_t 表示为:

$$x_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

为了更加明显地判断时间序列的变化趋势,利用滑动平均法,绘制滑动曲线,从而直观地表示序列

的变化趋势。

$$\hat{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1} \quad (8)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n - k + 1)$$

式中: k 为滑动长度。在滑动过程中,由于滑动长度的设定,从而削弱了较短周期序列的变化幅度,进而体现出其整体趋势。本研究采用了 13 a 加权滑动平均,即为不同时间的要素值分配不同的权重,其滑动平均序列为^[13]:

$$\hat{x}_i = \frac{1}{576}(x_{i-6} + 6x_{i-5} + 19x_{i-4} + 42x_{i-3} + 71x_{i-2} + 96x_{i-1} + 106x_i + 96x_{i+1} + 71x_{i+2} + 42x_{i+3} + 19x_{i+4} + 6x_{i+5} + x_{i+6}) \quad (9)$$

采用 Mann - Kendall (M - K) 非参数检验^[14],给定置信水平 α ,利用 Kendall 秩次相关系数 (U) 为数值依据,定量的分析序列在某一时间段内上升或下降趋势,并根据设定的临界值判断其是否显著。

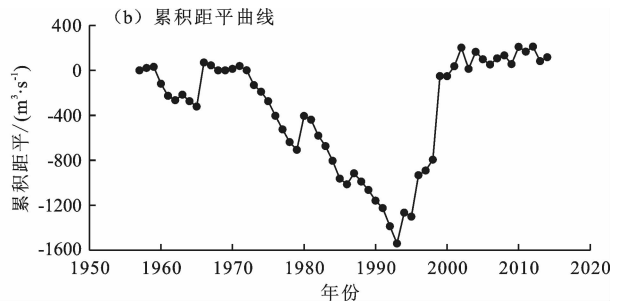
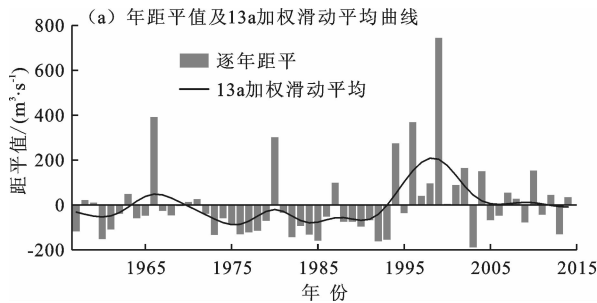


图 1 1957 - 2014 年玛纳斯河肯斯瓦特控制流域年最大洪峰流量距平变化

图 2 为玛纳斯河肯斯瓦特控制流域 1957 - 2014 年最大 1、3、7 d 洪量距平的时间序列。由图 2 (a) 可看出,年最大 1、3、7 d 洪量在 1957 - 1998 年也整体表现出明显的上升趋势,但自 1999 起有较为明显的下降趋势且在本年出现了最大距平值。不容忽视的是,年最大 1、3、7 d 洪量距平值在近两年有所降低,说明玛纳斯河流域的洪量将面临着下降的可能。滑动平均曲线表明:年最大 1、3、7 d 洪量总体可分为 4 个阶段,在 1971 年之前较为平稳,1971 - 1991 年有所下降但是趋势并不明显,从 1992 - 1998 年有较为明显的上升趋势,随后从 1999 - 2014 年期间稍有波动但整体趋于平稳。

从图 2 (b) 中可以很直观的看出年 W_1 在 1993 年与 1995 年处均出现转折,而 W_3 、 W_7 这个转折变异点发生 1995 年。从总体来说洪量的累积距平曲线大致可分为 4 个阶段。1957 - 1971 年为平稳波动期; 1972 - 1995 年呈现出明显的下降趋势,其中在 1987 - 1988 年略显平缓,以 W_7 尤为明显,而 W_1 则在 1995

4 结果与分析

4.1 峰量趋势变化分析

1957 - 2014 年玛纳斯河肯斯瓦特控制流域最大洪峰流量 Q 的距平时间序列如图 1 所示。由图 1 (a) 可看出,玛纳斯河流域 Q 的距平值在 1994 年以前大多为负值;1994 - 2004 年这 11 年,除了 1995 年和 2003 年以外,其余均连续出现正距平值。距平序列的最大值出现在 1999 年,高出基准期洪峰值 743.79 m^3 。从距平值的滑动平均曲线可以看出,玛纳斯流域 Q 在 1970s 到 1990s 中期经历了一个由下降到突增的过程后,开始呈现出明显下降趋势,且进入 2000 - 2005 年,下降幅度尤为明显。图 1 (b) 表明,在 1957 - 2014 年间玛纳斯流域 Q 值整体呈现上升趋势但并不明显,同时可将其分为 3 个阶段:1957 - 1992 年为下降期;1993 - 2005 年为上升期,期间稍有波动;2006 年之后为平稳期。

年出现较为明显的上升现象;1996 - 2003 年为直线上升趋势;2004 - 2014 年总体呈上升趋势但波动较大,值得注意的是最后两年均呈现明显下降趋势。就整体水文序列而言,运用 M - K 法求解其 U 值,见表 1。M - K 法统计量 U 值均小于 1.96,说明了洪峰洪量序列的上升趋势并不明显。

表 1 整体水文序列 M - K 统计值

趋势特征	Q	W_1	W_3	W_7
$U(U_{0.05/2} = 1.96)$	1.16	0.99	1.12	0.99

4.2 变异点检测

采用 Pettitt 统计检验方法,分析玛纳斯河肯斯瓦特控制流域融雪洪水特征序列发生的突变年份如图 3 所示,概率 P 值超出 0.95 的年份,可认为是突变年份。 Q 的可能变异年份为 1992、1993、1994 和 1995 年; W_1 可能在 1992、1993、1995 年发生变异; W_3 可能在 1993、1994、1995 和 1996 年发生变异; W_7 可能在 1994 和 1995 年发生变异。

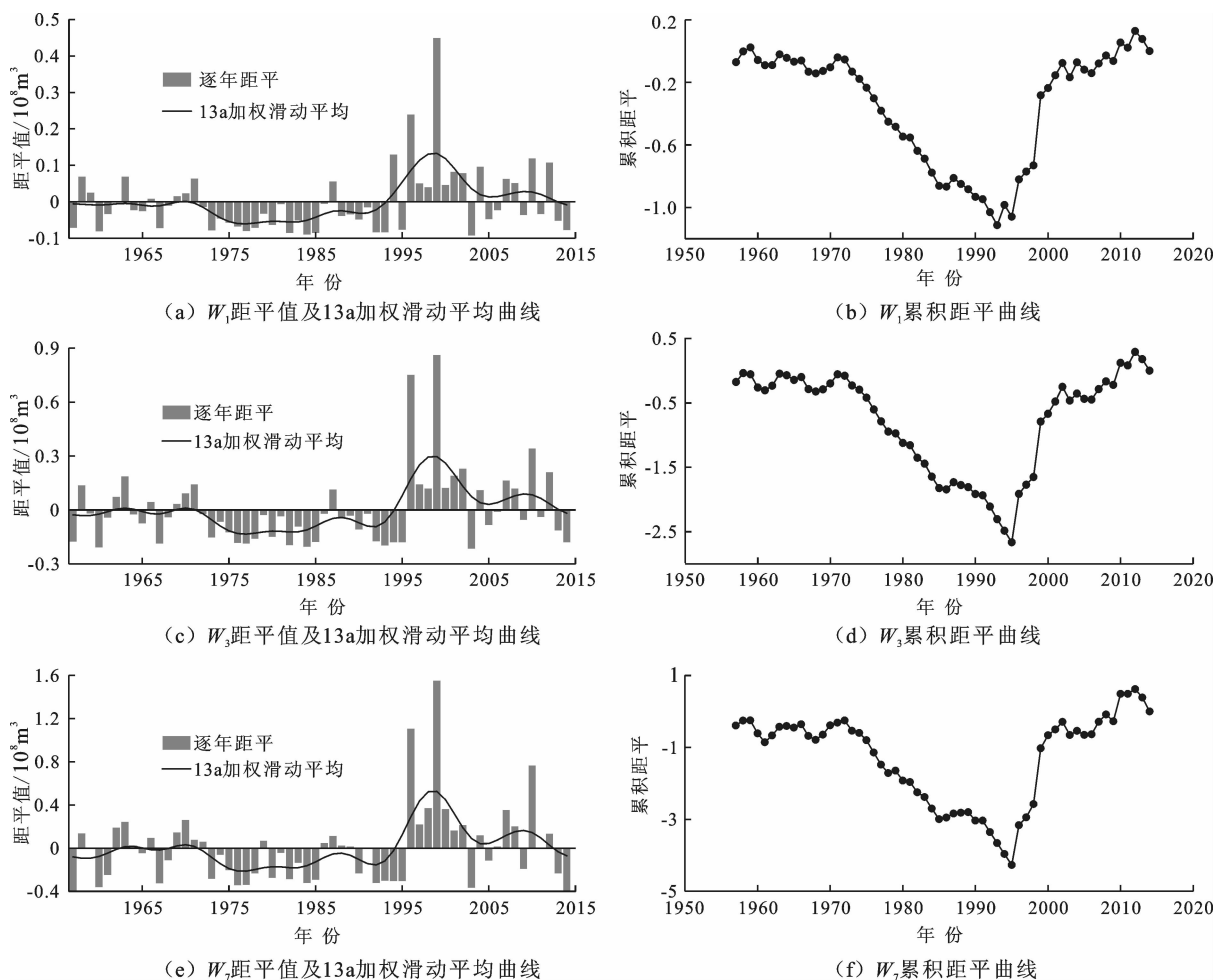
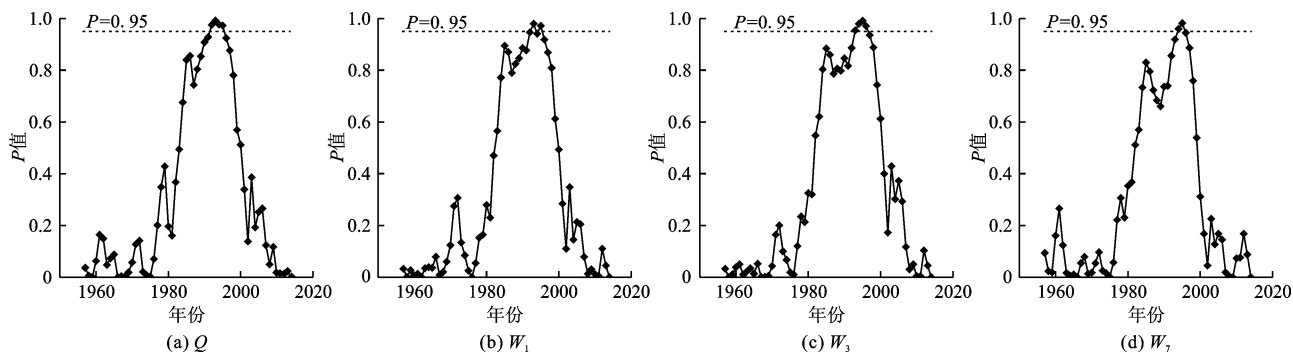
图2 1957-2014年玛纳斯河肯斯瓦特控制流域 W_1 、 W_3 、 W_7 距平变化

图3 1957-2014年玛纳斯河肯斯瓦特控制流域洪水特征序列 Pettitt 变异点检验

为了进一步检验突变点的位置,采用 Lee - Heghinian 法。由 $f(t)$ 值的趋势变化,得到的结果如图4所示,分割点 f 值所对应的年份与 Pettitt 统计检验方法相同。从图4中可以看出 Q 序列和 W_1 序列均在1993年与1995年出现峰值,而 W_3 、 W_7 在1995年出现峰值。由于全球气候变暖特征越发显著,IPCC第5次评估报告显示在1980-2012年间全球气温升高了 0.85°C [15]。而对于受冰川补给影响的玛纳斯河,1996-2014年流域气温较1956-1995

年气温均值增加 2.13°C ,使得流域冰川总储蓄量减小 [16-18]。因此,气温变化对玛纳斯河流域序列变化产生了重要影响,结合两种突变点检验结果,最终确定峰量序列的变异点发生在1995年,这与累积距平法所得出的变异点一致。

选用 R/S 分析的赫斯特指数 (H) 及分数布朗运动相关函数 [19] 判断序列变异程度,见表2。其 H 值均大于0.5,结合相关函数 $C(t)$ 可知,洪水各序列均存在中变异,但 W_1 达到了强变异。

表 2 水文序列变异程度分析表

项目	Q	W_1	W_3	W_7
H 值	0.76	0.84	0.84	0.81
相关函数 $C(t)$	0.44	0.61	0.60	0.53
变异程度	中变异	强变异	中变异	中变异

4.3 阶段变化趋势性分析

由于环境的变化导致了玛纳斯河流域已不满足一致性要求,则以变异点为节点将时间序列分为前后两个阶段,即 1957 - 1995 年和 1996 - 2014 年。

1957 - 1995 年 Q 的距平时间序列如图 5(a) 所示,距平值在此阶段总体上较为平稳,但中间有所波动,其最大距平值发生在 1966 年,但从距平值的滑动平均曲线可以看出此阶段总体呈下降趋势。1996 - 2014 年 Q 距平时间序列由图 5(b) 所示,此阶段相对于上一阶段增幅为 33.65%,但从 2002 年以后仅有两年出现正距平值,且数值均偏小。从距平值的滑动平均曲线可已看出,1998 - 2004 年 Q 有较为明显的下降趋势,但 2004 年以来洪峰虽有下降但趋势并不明显。

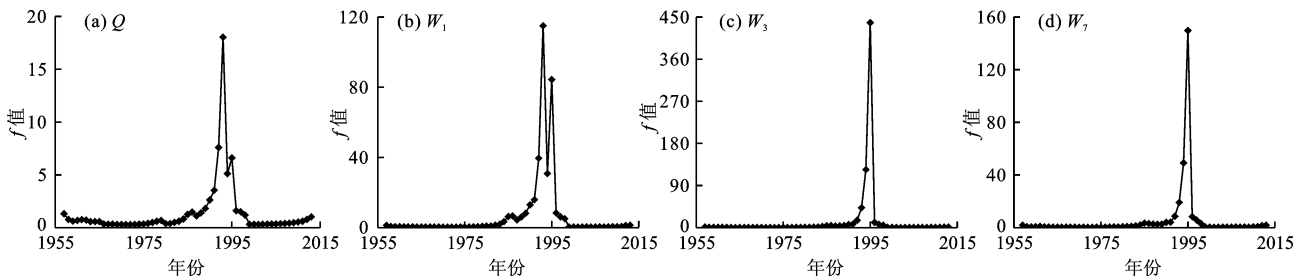
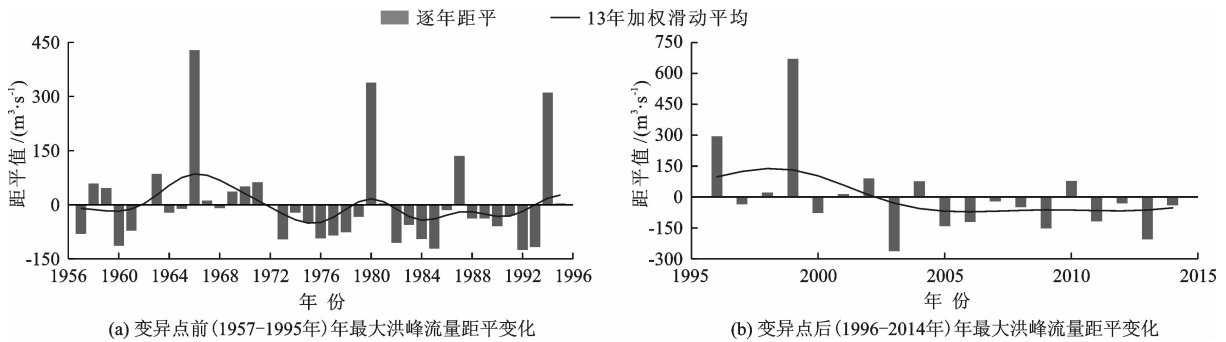


图 4 1957 - 2014 年玛纳斯河肯斯瓦特控制流域洪水特征序列 Lee - Heghinian 变异点检验



(a) 变异点前(1957-1995年)年最大洪峰流量距平变化

(b) 变异点后(1996-2014年)年最大洪峰流量距平变化

图 5 1957 - 2014 年年最大洪峰流量阶段性距平变化

图 6 为玛纳斯河流域 1957 - 2014 年两个阶段年最大 1、3、7 d 洪量距平值的趋势变化。图 6 表明,后一阶段的流量距平值明显大于前一阶段,其增幅分别为 40.22%、39.14%、30.54%。可见近年来玛河流量值发生了巨大的变化,且在前一阶段年最大洪量距平值均有较大的变化幅度,而后一阶段均出现了下降的趋势。

1996 - 2014 年进行定量趋势分析,结果见表 3。由表 3 可看出,其变异点后序列统计量 U 值均为负值,且绝对值总体小于 1.96,则变异点后峰量两子序列均表现下降趋势,其中 W_3 与 W_7 在变异点后出现了显著性下降趋势。

滑动平均曲线表明:可将前一阶段分为 4 个变化过程,1957 - 1970 年流量较为平稳,且滑动平均曲线在坐标上方浮动;1971 - 1976 年出现了明显的下降趋势;1977 - 1987 年开始上升,其中 1983 年以前上升较为缓慢,而后曲线有较为明显的上升趋势;从 1988 年又出现了明显的下降趋势。后一阶段较前一阶段总体上波动幅度较小,以 1998 - 2004 年为下降趋势,之后下降趋于平缓。

根据 M - K 法分别对峰量 1957 - 1995 年与

表 3 变异点前后 M - K 统计值

趋势特征值	年份	$U(U_{0.05/2} = 1.96)$
Q	1957 - 1995	-1.49
	1996 - 2014	-1.82
W_1	1957 - 1995	-1.85
	1996 - 2014	-1.61
W_3	1957 - 1995	-2.13
	1996 - 2014	-1.99
W_7	1957 - 1995	-1.67
	1996 - 2014	-2.87

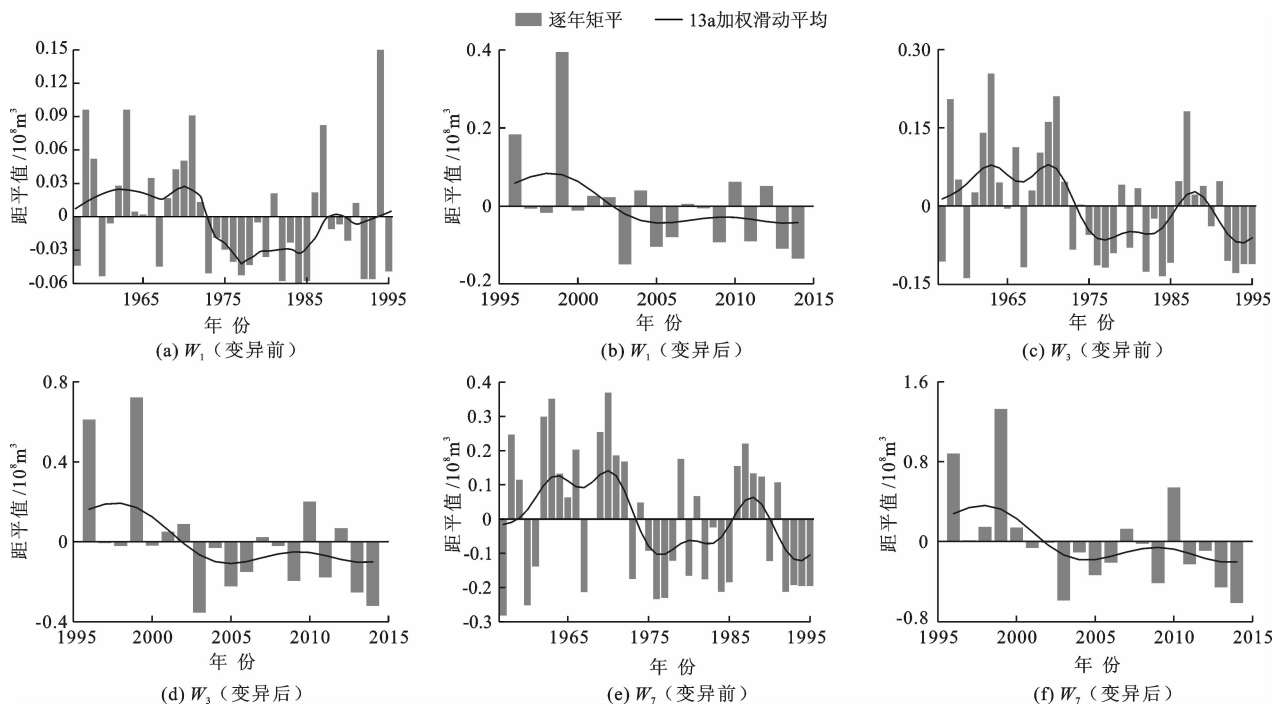


图6 1957 - 2014年玛纳斯河肯斯瓦特控制流域 W_1 、 W_3 、 W_7 距平阶段性变化

5 结论

根据玛纳斯河流域出山口肯斯瓦特水文站1957 - 2014年逐日径流资料,采用 Pettitt 法、Lee - Heghinian、加权滑动平均法、R/S 法、M - K 趋势检验法对玛纳斯河流域上游融雪洪水演变规律进行研究,结果表明:

(1)对玛纳斯河肯斯瓦特控制流域1957 - 2014年洪水序列进行滑动分析并通过累积距平曲线及M - K 趋势定量分析,发现了峰量序列前后存在较大的差异,从而指出了由于气候变化和人类活动的影响,水文序列的一致性遭到了破坏,传统的水文序列已经不能满足水文研究的内在要求。

(2)本文有效地利用R/S法和分数布朗运动分析了水文时间序列的变异程度。对于玛纳斯河流域峰量序列均呈现中等变异,其中年最大1d洪量发生了强变异。

(3)鉴于融雪洪水特征序列年限长度的限制,以及在相关检验概率 P 值最大的情况下,选取1995年为洪峰、洪量最可能发生变异的年份,其变异点后峰量平均增长幅度为35.89%。在1957 - 1995年间,洪峰洪量各子序列均产生了较大的波动,而1996 - 2014年洪水序列呈现下降趋势。

参考文献:

[1] 阿依努尔·买买提,邱玉宝. 近20年和田绿洲水资源

变化及其驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(4):117 - 122.

- [2] 李峰平,章光新,董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学,2013,33(4):457 - 464.
- [3] 陈伏龙,王怡璇,吴泽斌,等. 气候变化和人类活动对干旱区内陆径流量的影响——以新疆玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站为例[J]. 干旱区研究,2015,32(4):692 - 697.
- [4] 郑锦涛,陈伏龙,张鑫厚,等. 新疆玛纳斯河年径流频率分析[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):68 - 74.
- [5] 凌红波,徐海量,张青青,等. 1956 - 2007年新疆玛纳斯河流域气候变化趋势分析[J]. 冰川冻土,2011,33(1):64 - 71.
- [6] 丁文学,陈伏龙,吴泽斌,等. 基于条件概率分布的玛纳斯河年径流序列频率分析[J]. 灌溉排水学报,2017,36(8):103 - 108.
- [7] 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II):灾害效应[J]. 冰川冻土,2013,35(6):1355 - 1370.
- [8] 樊晓兵,彦立利,徐京华,等. 基于多源数据的近50a玛纳斯河流域冰川变化分析[J]. 冰川冻土,2015,37(5):1188 - 1198.
- [9] 邹全,王国亚,贺斌,等. 1957 - 2010年天山玛纳斯河流域夏季径流及洪水过程对极端气候事件的响应[J]. 冰川冻土,2013,35(3):733 - 740.
- [10] VILLARINI G, SERINALDI F, SMITH J A, et al. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century[J]. Water Resources Research, 2009, 45(8):2263 - 2289.

(下转第123页)

- 程学报,2017,28(6):232 - 238.
- [12] 毕博,陈丹,邓鹏,等. 区域水资源 - 能源 - 粮食系统耦合协调演化特征研究[J]. 中国农村水利水电,2018(2):72 - 77.
- [13] WANG Qiang, LI Siqi, HE Gang, et al. Evaluating sustainability of water - energy - food (WEF) nexus using an improved matter - element extension model: A case study of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 1097 - 1106.
- [14] 鲍淑君,贾仰文,高学睿,等. 水资源与能源纽带关系国际动态及启示[J]. 中国水利,2015(11):6 - 9.
- [15] 刘渝,张俊飏. 中国水资源生态安全与粮食安全状态评价[J]. 资源科学,2010,32(12):2292 - 2297.
- [16] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报,2014,22(8):880 - 885.
- [17] 彭少明,郑小康,王煜,等. 黄河流域水资源 - 能源 - 粮食的协同优化[J]. 水科学进展,2017,28(5):681 - 690.
- [18] 《甘肃年鉴》编委会. 甘肃统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2017.
- [19] 李二玲,崔之珍. 中国区域创新能力与经济发展水平的耦合协调分析[J]. 地理科学,2018,38(9):1412 - 1421.
- [20] 钟霞,刘毅华. 广东省旅游 - 经济 - 生态环境耦合协调发展分析[J]. 热带地理,2012,32(5):568 - 574.
- [21] 赵丽平,李邦熹,王雅鹏,等. 城镇化与粮食生产水土资源的时空耦合协调[J]. 经济地理,2016,36(10):145 - 152.
- [22] PEREIRA L S. Water, agriculture and food: challenges and issues [J]. Water Resource Management, 2017, 31 (10): 2985 - 2999.
- [23] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理,1999,19(2):171 - 177.
- [24] 张玉萍,瓦哈甫·哈力克,党建华,等. 吐鲁番旅游 - 经济 - 生态环境耦合协调发展分析[J]. 人文地理,2014,138(4):140 - 145.
- [25] 杨丽霞,杨桂山,姚士谋,等. 基于 ESDA - GWR 的粮食单产及其驱动因子的空间异质性研究[J]. 经济地理,2012,32(6):120 - 126.
- [26] 赵静,蒲越. 混合地理加权回归模型的两步法估计及其应用[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学·医学版),2017,38(2):20 - 27.
- [27] 《甘肃年鉴》编委会. 甘肃统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2005.
- [28] 赵荣钦,李志萍,韩宇平,等. 区域“水 - 土 - 能 - 碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报,2016,71(9):1613 - 1628.
- [29] 张慧,王洋. 中国耕地压力的空间分异及社会经济因素影响——基于 342 个地级行政区的面板数据[J]. 地理研究,2017,36(4):731 - 742.

~~~~~

(上接第 114 页)

- [11] 滕杰,郭明,周政辉. 汉江上游径流非一致性演变特征及频率分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):106 - 112 + 126.
- [12] 覃姗,岳春芳,何兵,等. 金沟河流域水文气象要素关系变异诊断[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):50 - 56.
- [13] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [14] 张波,谷晓平,古书鸿,等. 近 55 年贵州省潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):20 - 26.
- [15] IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [ M ]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 37.
- [16] 郑锦涛. 气候变化驱动下玛纳斯河山区径流演变规律研究[D]. 石河子:石河子大学,2018.
- [17] 徐春海,王飞腾,李忠勤,等. 1972 - 2013 年新疆玛纳斯河流域冰川变化[J]. 干旱区研究,2016,33(3):628 - 635.
- [18] 韩蓉. 气候变化对玛纳斯河流域积雪消融的影响研究[D]. 石河子:石河子大学,2017.
- [19] 牛奉高,刘维奇. 分数布朗运动与 Hurst 指数的关系研究[J]. 山西大学学报(自然科学版),2010,33(3):380 - 383.