

金沟河流域水文气象要素关系变异诊断

覃 珊, 岳春芳, 何 兵, 李艺珍

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 为了研究全球气候变化背景下金沟河流域水文、气象要素变化特征,选取内陆干旱区金沟河流域八家户水文站 1964-2016 年实测年径流资料和同步实测气象(气温、降水)资料,在采用累积距平法、 R/S 分析法、 $M-K$ 趋势检验法分析水文气象要素序列演变规律的基础上,运用 Pearson 相关系数法分析径流与气温、降水间的相关性,将偏相关系数法与数据滑动窗口技术相结合,分析径流与气象要素(气温、降水)间的相互关系及变异特征,最后采用双累积曲线法对变异点进行验证。结果表明:金沟河流域 1964-2016 年年径流量以极其微弱的趋势波动增加,增加趋势不显著($0 < U = 1.0 < U_{\alpha/2} = 1.96$),并且未来一段时间内年径流量将继续保持上升趋势($H = 0.68 > 0.5$);同时段气温具有极显著的增加趋势($U = 4.33 > U_{\alpha/2} = 2.56 > 0$),未来气温将呈现出明显的持续增加趋势($H = 0.78 > 0.5$);同时段降水具有显著的增加趋势($U = 2.13 > U_{\alpha/2} = 1.96 > 0$),未来降水将持续增加($H = 0.54 > 0.5$);相关性分析表明,气温是影响金沟河流域径流的主要气象因子;滑动偏相关系数法分析表明,径流-气温联合序列变异点为 1985 年,采用双累积曲线法进行验证,结果与其一致。

关键词: 变异诊断; 水文气象要素; 偏相关系数; 数据滑动; 金沟河流域

中图分类号:TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0050-07

Variation diagnosis of the relationship between hydrological and meteorological factors in the Jingou River basin

QIN Shan, YUE Chunfang, HE Bing, LI Yizhen

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to study the change characteristics of hydrological and meteorological factors of Jingou River Basin under the global climate change background, the measured monthly runoff data, and the synchronous measured temperature and precipitation data from 1964 to 2016 of Bajiahu Hydrological Station in Jingou River Basin in inland arid area were selected. Based on the accumulated variance analysis method, R/S method and Mann-Kendall trend test method, we analyzed the evolution law of hydrometeorological elements, and the correlation coefficient between runoff and temperature or precipitation by Pearson correlation coefficient method. By combining partial correlation with data sliding window technology, we analyzed the relationship and variation characteristics between runoff and meteorological elements (temperature and precipitation). Finally, the double cumulative curve method was used to verify the variation points. The results found that: the runoff data from 1964 to 2016 in Jingou River Basin has an increased trend, but not significant ($0 < U = 1.0 < U_{\alpha/2} = 1.96$), and the annual runoff would continue to rise for the foreseeable future ($H = 0.68 > 0.5$). At the same time, the temperature in the interval had a very significant increase trend ($U = 4.33 > U_{\alpha/2} = 2.56 > 0$), and the future temperature would show a significant continuous increase trend ($H = 0.78 > 0.5$). Meanwhile, precipitation in the interval had a significant increase trend ($U = 2.13 > U_{\alpha/2} = 1.96 > 0$), and precipitation would continue to increase in the future ($H = 0.54 > 0.5$). The correlation analysis found that temperature was the main meteorological factor affecting runoff in Jingou River. The sliding partial correlation coefficient method re-

收稿日期:2018-07-08; 修回日期:2018-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51569032)

作者简介:覃珊(1991-),女,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向为干旱区水文过程及水资源利用。

通讯作者:岳春芳(1972-),女,陕西长安人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水资源管理研究工作。

sults showed that the variation point of the runoff and temperature joint sequence was in 1985, and the result was consistent with those verified by the double cumulative curve method.

Key words: variation diagnosis; hydrometeorological elements; partial correlation coefficient; data sliding; Jingou River basin

1 研究背景

IPCC 第五次最新评估报告指出,近百年(1880-2012)来,全球平均气温升高了 0.85°C ($0.65^{\circ}\text{C} \sim 1.06^{\circ}\text{C}$),全球气候快速变暖已经成为一个不争的事实^[1]。河川径流作为水文循环系统的重要组成部分,主要受变化环境的影响,尤其对气候变化的影响表现出明显的脆弱性,特别是针对以融雪水为主要补给水源的西北干旱山区河流^[2]。位于天山北麓中段的金沟河流域,是一条典型的以融雪水为主要补给水源的山区性河流,该流域地处天山北坡经济开发区的核心地带,是新疆开发较早的灌区之一^[3]。近年来,由于环境变化(特别是气候变化)的影响,金沟河流域径流序列演变规律表现出不同程度的变异,如高温热浪、极端水文事件的频繁发生,不仅威胁该流域水安全而且制约着人类生存与发展。因此,研究变化环境下金沟河流域径流序列演变规律与变异特征,对于该流域水资源适应性开发利用、兴利减灾、社会经济发展等具有重要意义。目前对于金沟河流域水文与气象序列演变规律分析与变异特征的研究大多是采用简单的数理统计方法来分析其单一的径流、气象(气温、降水)要素序列的趋势性、相关性以及变异性,而对于多要素组合的水文气象要素关系变异情况及归因分析研究相对较少,如董奎等^[4]采用滑动平均法分析了金沟河流域径流、气温与降水的演变规律,结果表明近 50 年金沟河流域的径流、气温与降水都呈现出增加的趋势;韩舜滨^[5]采用相关系数法分析金沟河流域水文气象要素间相关性,结果表明近 30 年金沟河流域径流与气温表现出正相关性。随着变化环境下水文、气象要素间关系的日益复杂,多要素组合的水文气象序列联合分析成为研究热点^[6-7]。相较于径流、气象单一要素序列的变化特征分析,多要素联合序列分析能更好地揭示水文、气象要素间的相关关系及变异情况,其中偏相关系数法较适宜于分析径流与气象要素间的相互关系及变异特征^[8],其优点在于偏相关系数法充分考虑了径流、降水、气温三者之间的相互影响,且能通过控制一个要素来较准确的识别其他两个要素间的相关关系。基于此,本文选取内陆干旱区金沟河流域为研究对象,在采用累积距

平法^[9]、R/S 分析法^[10]、Mann-Kendall 趋势检验法^[11-12]和 Pearson 相关系数法^[13]对该流域径流、气象要素序列变化特征及相关性分析基础上,将偏相关系数法与数据滑动技术相结合进行水文气象要素序列的变异诊断,并采用双累积曲线法^[14]对诊断结果进行验证,最后进行归因分析。不仅可为径流序列变异诊断提供一种新的思路,并且对于揭示变化环境下水文序列的非一致性变异规律及金沟河流域水资源的合理开发利用具有重要的实际意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

金沟河流域地处天山北麓、准噶尔盆地南缘,位于新疆维吾尔自治区中西部沙湾县境内,东与宁家河为邻,西与八音沟河为伴,南界天山分水岭,北到西岸大渠,是玛纳斯河流域的一级支流,流域全长约 124 km,总面积 $2\,626\text{ km}^2$,其中山区面积(以 800 m 等高线为界) $1\,691\text{ km}^2$,平原区面积 935 km^2 ,流域介于东经 $85^{\circ}03' \sim 85^{\circ}44'$ 、北纬 $43^{\circ}30' \sim 44^{\circ}50'$,该流域发源于依连哈比尔尕山北侧科尔达河源头的 31 号冰川,河流水系发育呈树状水系,源头支流有包尔阔腊、阿克达斯、阿尔恰特、达奴沟等,金沟河流域概况如图 1 所示。金沟河源头共有冰川 210 条,流域多年平均冰川融水量 $1.232 \times 10^8\text{ m}^3$,约占金沟河流域地表总径流的 34%,是该流域的主要补给水源。金沟河属于山溪性多泥沙的内陆河,流域年径流总量约为 $3.83 \times 10^8\text{ m}^3$,径流年际变化较平稳,年内变化差异较大,其中 6-8 月的径流量占年径流量的 69.7%,多年平均降水量约为 389.4 mm,多年平均气温约为 5.6°C ,平均径流深约为 228 mm^[3]。

2.2 数据来源

本文选取金沟河流域八家户水文站 1964-2016 年实测月径流资料,八家户水文站位于金沟河流域中游,海拔 1 208 m,东经 $85^{\circ}25'$,北纬 $43^{\circ}57'$,八家户水文站具体位置如图 1 所示。为了更真实地反映流域内的气候情况,同步气象资料采用金沟河流域周边 4 个不同海拔高度的气象站(沙湾、乌苏、炮台、乌兰乌苏)加权平均而来,径流资料来源于新疆石河子水文水资源勘测局,气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。

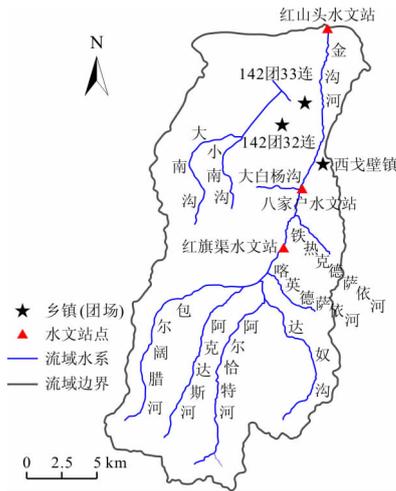


图1 金沟河流域概况图

2.3 研究方法

采用累积距平法、Mann - Kendall 趋势检验法、R/S法分别对金沟河流域八家户水文站 1964 - 2016 年年径流、年均气温、年均降水的阶段性、趋势性及其显著程度进行分析;采用 Pearson 相关系数法分析径流与气温、降水的相关性,以识别影响径流的主要因素;将偏相关系数法与数据滑动窗口技术相结合引入到径流与气象要素关系变异诊断中,进行该研究区径流 - 气象要素内在关系变异诊断,并采用双累积曲线法对其诊断结果进行验证,最后进行归因分析。

2.3.1 累积距平法 累积距平法是一种常见的、通过曲线来直接判断序列变化趋势的方法。对于序列 x ,任意时刻 t 的累积距平表示如下:

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

式中: $\bar{x} = \sum_{i=1}^t x_i$ 。将 n 个时刻的累积距平值全部算出来后便可绘制累积距平曲线。

累积距平曲线呈上升趋势,表示距平值增加,呈下降趋势则表示距平值减小。从曲线明显的上下起伏,可以判断序列的变化趋势及演变规律。

2.3.2 Mann - Kendall 秩次相关检验法 M - K 秩次相关检验法是一种非参数统计检验法,常用来检验水文、气象等序列的变化趋势及显著性,其计算公式为:

$$\begin{cases} U = \frac{\tau}{[\text{Var}(\tau)]^{1/2}} \\ \tau = \frac{4k}{n(n-1)} - 1 \\ \text{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U 为 Kendall 秩次相关系数; τ 为 Kendall 统计

量; k 为系列中所有的对偶观测值; n 为序列长度; $\text{Var}(\tau)$ 为系列样本方差。当 $U > 0$ 时,序列呈上升趋势;当 $U < 0$ 时,序列呈下降趋势。当 U 的值超过某一给定显著水平下的临界值时,说明序列变化趋势显著,且 U 的绝对值越大,序列变化趋势越显著。

2.3.3 R/S 分析法 R/S 分析法是一种用来分析时间序列的分形特征和长期记忆过程的方法,最初是由英国水文学家赫斯特在研究尼罗河水坝工程提出的方法,现在也常被用在时间序列的分析中。其基本原理和方法如下:

对于一个时间序列 $\{T(t)\}, t = 1, 2, 3, \dots$, 对于任意的正整数 $\tau \geq 1$, 定义均值序列:

$$\overline{T\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} T(t), \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

用 $X(t, \tau)$ 表示累积离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^{\tau} (T(u) - \overline{T\tau}), \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (4)$$

极差 R 定义为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

标准差 S 定义为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (T(t) - \overline{T\tau})^2 \right]^{1/2}, \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

将该时间序列的极差与标准差的比值与幂指数函数进行拟合,即:

$$R(\tau)/S(\tau) = (b\tau)^H \quad (7)$$

式中: b 为常数; H 为赫斯特指数。

利用 Hurst 指数 H 可以判断时间序列变化趋势的持续性,当 $0.5 < H < 1$ 时,表明时间序列的变化趋势在未来将呈现出正持续性,即序列未来的变化趋势将与过去保持一致, H 值越大,则正持续性越强;当 $0 < H < 0.5$ 时,表明时间序列具有负持续性,即序列未来变化趋势将与过去相反;当 $H = 0.5$ 时,表明序列的变化趋势不存在持续性,未来变化趋势呈现出随机性。

2.3.4 基于滑动偏相关系数的径流 - 气象要素关系变异诊断 河川径流作为水文循环系统的重要组成部分对气候变化十分敏感,对于有永久性冰川、积雪分布的金沟河流域来说,其径流对气候变化(尤其是气温变化)的响应是一个更为复杂的过程,而径流与气象要素(气温、降水)的演变过程是相互影响的,在分析径流与气象要素联合序列(径流 - 气温或径流 - 降水)关系变异情况时,若只简单计算径流与某一气

象要素间的相关系数,并不能够准确反映两要素间的变异情况,还需要考虑各气象要素间的相互影响^[15]。因此,本文采用偏相关系数法计算径流与气象要素构成的联合序列的净偏相关程度,以此反映两者之间的相互关系;同时,为诊断径流 - 气温联合序列内在关系变异情况,本文在参考郭爱军等^[15]、林学椿^[16]相关研究基础上,将偏相关系数法与数据滑动技术相结合,采用滑动偏相关系数法对径流 - 气温联合序列进行变异诊断。具体计算公式如下:

$$rt(t_0) = \frac{r_{R,T}(t_0) - r_{R,P}(t_0) \cdot r_{P,T}(t_0)}{\sqrt{(1 - r_{R,P}(t_0))^2 \cdot (1 - r_{P,T}(t_0))^2}} \quad (8)$$

式中: $rt(t_0)$ 为径流 - 气温的滑动偏相关系数序列; $r_{R,T}(t_0)$ 为径流 - 气温滑动相关系数序列; $r_{R,P}(t_0)$ 为径流 - 降水滑动相关系数序列; $r_{P,T}(t_0)$ 为气温 - 降水滑动相关系数序列。其中 $r_{R,T}(t_0)$ 计算公为:

$$r_{R,T}(t_0) = \frac{\sum_{t=t_0-W}^{t=t_0+W} [R(t) - \bar{R}(t_0)][T(t) - \bar{T}(t_0)]}{\sqrt{\sum_{t=t_0-W}^{t=t_0+W} [R(t) - \bar{R}(t_0)]^2 \sum_{t=t_0-W}^{t=t_0+W} [T(t) - \bar{T}(t_0)]^2}} \quad (9)$$

$$\bar{R}(t_0) = \sum_{t=t_0-W}^{t=t_0+W} R(t) / (2W + 1) \quad (10)$$

$$\bar{T}(t_0) = \sum_{t=t_0-W}^{t=t_0+W} T(t) / (2W + 1) \quad (11)$$

式中: $R(t)$ 为径流序列; $T(t)$ 为气温序列。其中 $r_{R,P}(t_0)$ 和 $r_{P,T}(t_0)$ 计算过程与 $r_{R,T}(t_0)$ 计算过程类似; W 为滑动窗口大小,则滑动相关值从窗口的第 $W + 1$ 年记起。

最后,为验证该诊断方法对径流 - 气温联合序列关系变异诊断的准确性,采用双累积曲线法对其结果进行对比验证,以提高诊断结果的准确度。

滑动偏相关系数法的具体计算步骤如下:

(1) 确定滑动步长 L 并选取不同的滑动窗口 W , 其中两联合序列(如径流 - 气温序列)滑动窗口长度需保持一致,且滑动过程中也需保持一致;

(2) 根据公式(9) ~ (11),从两联合序列的第一个数据开始以同一滑动步长 L 移动窗口 W ,直至数据序列结束,以此计算不同滑动窗口下径流 - 气温滑动相关系数序列 $r_{R,T}(t_0)$;

(3) 参考计算步骤(1) ~ (2),再分别计算出 $r_{R,P}(t_0)$ 与 $r_{P,T}(t_0)$,然后根据公式(8)计算出径流 - 气温的滑动偏相关系数序列 $rt(t_0)$ 并作图;

(4) 根据步骤(3)所得径流 - 气温滑动偏相关

系数图,判断两联合序列关系变异情况,以此找出关系变异点,同时为保证所得变异点的准确性,采用双累积曲线法进行对比验证。

3 结果与分析

3.1 金沟河水文气象要素特征分析

3.1.1 降水要素序列趋势变化特征 金沟河流域八家户水文站 1964 - 2016 年长系列降水量变化和累积距平变化过程线见图 2。从图 2 中可以看出,1964 - 2016 年金沟河流域降水整体呈上升趋势,其年间间变化率为 10.46 mm/10a;由降水数据序列可以得出,多年平均降水量为 387.3 mm,最大年降水量发生在 1987 年,为 538.6 mm,最小年降水量发生在 1978 年,为 293.8mm。从降水累积距平图可以看出,金沟河流域 1964 - 2016 年降水量序列呈现明显的阶段性变化特征,即 1964 - 1997 年金沟河流域降水量整体呈现出下降趋势,其中,1964 - 1982 年为明显下降阶段,说明此阶段多雨期少于少雨期;1982 - 1997 为波动频繁阶段,说明此阶段为降水平稳期。1997 - 2016 年金沟河流域降水量呈现出明显的上升趋势,说明此阶段金沟河流域多雨期多于少雨期。运用 Mann - Kendall 非参数趋势检验法对年降水序列进行检验(见表 1),年降水量的统计量 $U = 2.13 > U_{\alpha/2} = 1.96 > 0$,满足 $\alpha = 0.05$ 显著性水平要求,说明金沟河流域年降水量增加趋势显著。依据 R/S 法分析得出(见表 1),1964 - 2016 年降水长系列 Hurst 指数 $H = 0.54 > 0.5$,指示年降水序列呈现出微弱的正持续性,说明未来一段时间年降水量将继续保持上升趋势。

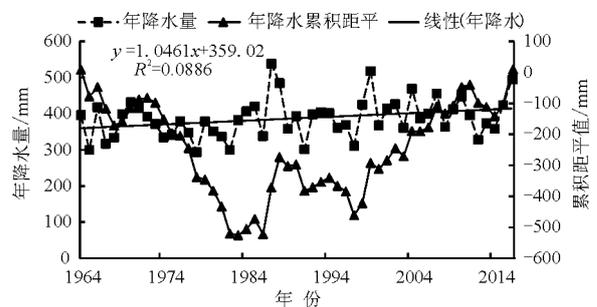


图 2 八家户水文站年降水及累积距平变化过程线

表 1 八家户水文站水文气象要素序列变化趋势表

要素	Mann - Kendall 趋势检验值			Hurst 指数	未来趋势
	U 值	趋势	$U_{\alpha/2} = 0.05$ 显著性		
降水	2.13	增加	± 1.96 显著	0.54	微弱增加
气温	4.33	增加	± 1.96 极显著	0.74	增加
径流	1.00	增加	± 1.96 不显著	0.68	增加

3.1.2 气温要素序列趋势变化特征 金沟河流域八家户水文站 1964 - 2016 年长系列气温变化和累积距平变化过程线见图 3。从图 3 中可以看出, 1964 - 2016 年金沟河流域年均气温整体呈现明显上升趋势, 其年际间变化率为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 由年均气温数据序列可得出, 多年平均气温为 5.6°C , 年均气温最高发生在 2015 年, 为 6.93°C , 年均气温最低发生在 1984 年, 为 4.11°C 。从年均气温累积距平图可以看出, 金沟河流域 1964 - 2016 年年均气温序列表现出明显的阶段性波动变化特征, 其中 1964 - 1996 年呈现出明显的波动下降趋势, 说明在此期间高温期明显少于低温期; 1996 年之后年份里为明显的上升阶段, 说明在此期间高温期明显多于低温期。运用非参数趋势检验法对年均气温序列进行趋势检验 (见表 1), 年均气温的统计量 $U = 4.33 > U_{\alpha/2} = 2.56 > 0$, 满足 $\alpha = 0.001$ 显著水平要求, 说明金沟河流域年均气温增加趋势极显著。依据 R/S 法分析得出 (见表 1), 1964 - 2016 年年均气温长系列 Hurst 指数 $H = 0.78 > 0.5$, 指示年均气温序列呈现出正持续性, 说明在未来气温将呈现出明显的持续增加趋势。

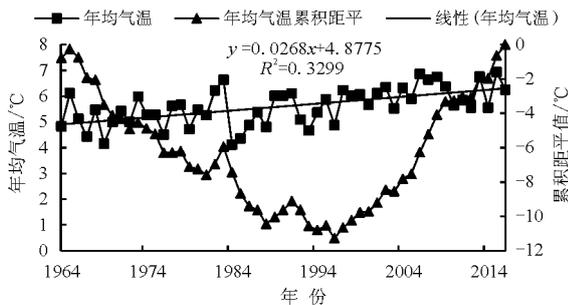


图 3 八家户水文站年均气温及累积距平变化过程线

3.1.3 径流要素序列趋势变化特征 金沟河流域八家户水文站 1964 - 2016 年长系列径流量变化和累积距平变化过程线见图 4, 从图 4 中可以看出, 1964 - 2016 年金沟河流域年径流整体呈极其微弱的上升趋势, 其年际间变化率为 $0.036 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$; 由径流数据序列可得出, 多年平均径流量为 $3.19 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最大年径流量发生在 1999 年, 为 $4.41 \times 10^8 \text{ m}^3$, 最小年径流量发生在 1992 年, 为 $2.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。从年径流量累积距平过程线可以看出, 金沟河流域 1964 - 2016 年年径流序列整呈现出明显的非线性波动变化特征, 其中, 1964 - 1994 年年径流量整体呈现明显的波动下降趋势, 说明该时间段内, 年径流量丰水期少于枯水期; 1994 - 2002

年年径流呈现出明显的近似线性增长趋势, 说明该时间段内, 丰水期多于枯水期; 2002 - 2016 年, 年径流处于频繁的波动阶段, 说明该时间段内, 年径流处于频繁丰枯交替阶段。运用 Mann - Kendall 非参数趋势检验法对径流序列进行趋势检验 (见表 1), 年径流统计量 $U = 1.0 < U_{\alpha/2} = 1.96 > 0$, 不满足 $\alpha = 0.05$ 显著水平, 说明金沟河流域的年径流量增加趋势不显著; 采用 R/S 法分析年径流的持续特征 (见表 1), 结果表明年径流的 Hurst 指数为 $H = 0.68 > 0.5$, 径流序列呈现出正持续性, 未来一段时间内年径流量将继续保持上升趋势。

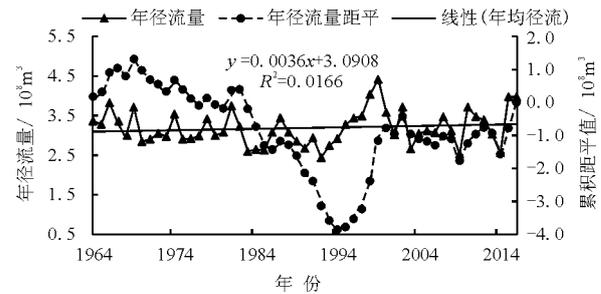


图 4 八家户水文站年径流量及累积距平变化过程线

3.2 金沟河水文气象要素序列变化相关性分析

运用 Pearson 相关分析法对金沟河流域水文气象要素进行相关性分析, 计算八家户水文站年径流序列与降水、气温序列的相关系数, 结果见表 2。通过表 2 可以看出, 年径流与年均气温、春季平均气温、夏季平均气温、秋季平均气温、冬季平均气温都表现为正相关性, 其中与年均气温的相关性最大为 0.62, 并且通过了 $\alpha = 0.001$ 的显著水平检验; 年径流量与春季降水、夏季降水、秋季降水、冬季降水都呈现出正相关性, 而与当年 7 月降水呈现出负相关性, 原因主要归结于金沟河流域发源于永久性冰川, 流域内的径流补给主要来源于冰川融水与季节性积雪消融, 相对于降水, 气温为影响径流变化的主要因子; 气温与降水的相关分析结果显示, 金沟河流域 7 月平均气温与 7 月降水量的相关系数为 -0.47 , 并且通过了 $\alpha = 0.001$ 的显著水平检验, 7 月平均气温与 7 月降水呈现出显著的负相关性, 金沟河流域多年 7 月降水量占全年的 14%, 并且以 $0.9\text{mm}/10\text{a}$ 的趋势增加, 降水量增加, 而气温降低, 从而减少了冰川融水与季节性积雪对径流的补给, 导致径流减少, 所以年径流与 7 月降水呈现出微弱的负相关性。综上所述, 年均气温是影响金沟河径流量最主要的因子, 降水为次要影响因子, 本文结果与董奎^[17]对金沟河流域径流变化影响因素的研究中所得结论一致。

表 2 八家户水文站年径流与降水、气温的相关系数

降水		气温	
降水要素	相关系数	降水要素	相关系数
全年	0.26	年均	0.62**
春季	0.19	春季	0.12
夏季	0.26	夏季	0.51**
秋季	0.06	秋季	0.14
冬季	0.21	冬季	0.09
7 月份	-0.05	7 月份	0.43**
8 月份	0.40*	8 月份	0.29*

注: R** 表示在 0.001 水平(双侧)上显著相关, R* 为表示是在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.3 金沟河径流 - 气温关系变异诊断分析

依据径流与气象要素(降水、气温) Pearson 相关分析结果可知,径流与气温关联性较好。因此,本文

选取金沟河流域八家户水文站 1964 - 2016 年共计 53 a 的逐月径流和气温时间序列并辅以同时段降水时间序列(序列长度均为 636)资料,利用上文提出的滑动偏相关系数法诊断金沟河流域径流 - 气温关系变异情况。考虑到滑动窗口选取的太大会导致变异点遗漏,选取的太小会导致出现的极值点过多,本文选取滑动步长 $L = 1a$ (12 个月),滑动窗口分别为 $W = 1a$ (12 个月), $W = 2a$ (24 个月), $W = 3a$ (36 个月), $W = 4a$ (48 个月)4 种情况来检测检测变异点,结果见图 5。从图 5 中可看出金沟河流域径流 - 气温关系呈现出两个变化阶段,其中 1964 - 1985 年径流 - 气温滑动偏相关系数呈现出波动下降趋势,1985 - 2016 年径流 - 气温滑动偏相关系数呈现出波动上升趋势,由此初步判断,金沟河流域径流 - 气温联合序列在 1964 - 2016 年发生了一次变异,变异年份为 1985 年。

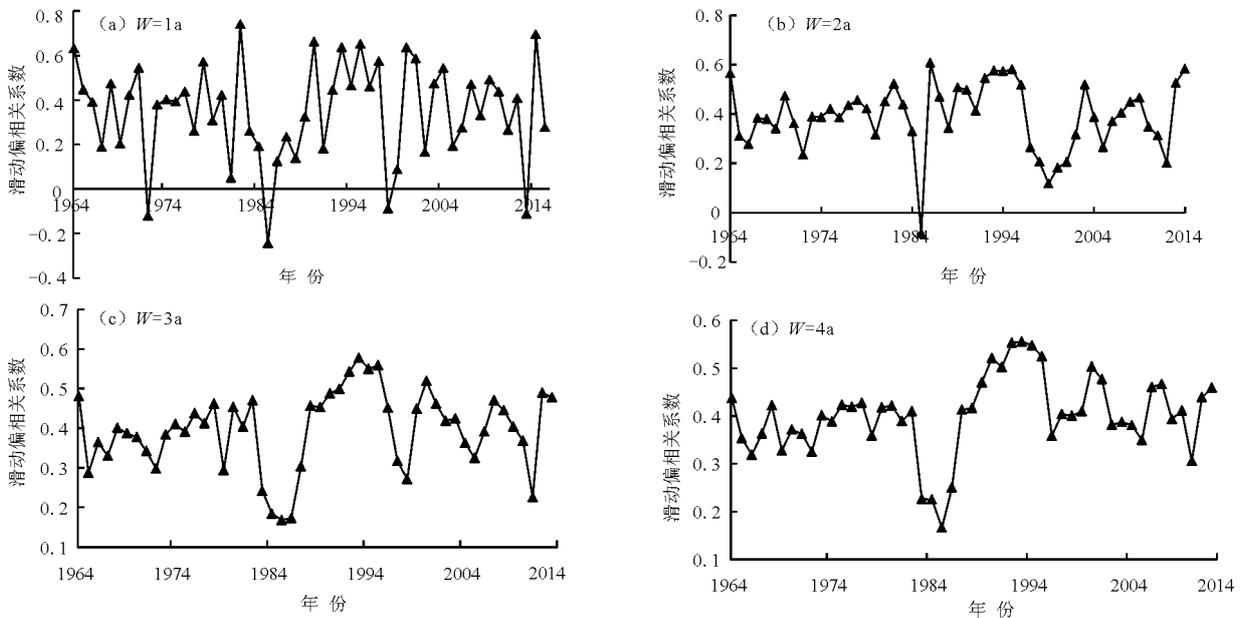


图 5 1964 - 2016 年八家户水文站不同滑动窗口下径流 - 气温偏相关系数图

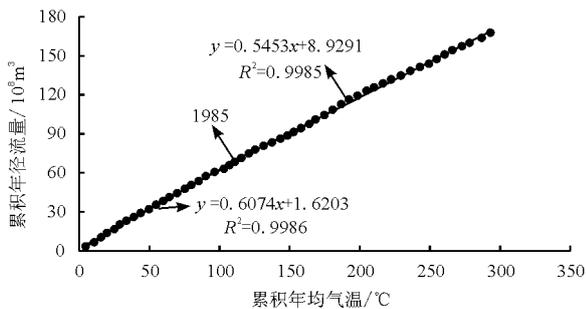


图 6 八家户水文站径流 - 气温联合序列双累积曲线图

为了进一步验证金沟河流域径流 - 气温联合序列关系变异情况,采用双累积曲线法对径流 - 气温

关系进行进一步分析,结果见图 6。从图 6 可以看出,金沟河流域径流 - 气温双累积曲线图在 1985 年发生了偏折,1986 - 2016 年直线斜率较 1964 - 1985 年发生向下偏离,径流与气温之间的相关关系降低,说明径流量受气温变化的影响越来越小,径流在受气温变化影响的同时也开始受到人类活动的影响,因此,金沟河流域径流 - 气温联合序列关系在 1985 年发生变异。归因分析如下:(1)金沟河流域径流主要来源于永久性冰川、积雪融水;根据上文对径流、气温、降水变化特征分析(图 2 - 4 累积距平过程线)可知径流与气温两要素序列整体变化趋势较

为一致。(2)根据相关研究表明,金沟河流域于1985年后共新建3座水电站^[18],改变了原下垫面状况,使得该流域产汇流能力下降及河道上下游径流间的自然相关关系受到破坏,进而对径流过程产生影响;同时由于金沟河流域内农业灌溉面积和用水量的不断增加^[19],也使得流域内径流演变规律发生变化。

通过对比滑动偏相关系数法、双累积曲线法以及金沟河流域人类活动强度变化情况,结果表明流域内径流-气温关系于1985年发生变异,在一定程度上也说明了滑动偏相关系数法对径流-气温关系变异诊断的准确性。

4 结 论

根据金沟河流域1964-2016年实测月径流、气温、径流资料,采用累积距平法、Mann-Kendall趋势检验法、 R/S 法对金沟河流域水文、气象要素演变规律进行研究,在应用Pearson相关系数法分析水文、气象要素相关性的基础上,通过滑动偏相关系数法诊断径流-气温关系的变异情况,并利用双累积曲线法对诊断结果进行验证。主要结论如下:

(1)采用累积距平法、Mann-Kendall趋势检验法、 R/S 法对金沟河流域径流、气温、降水演变规律进行分析,结果表明金沟河流域近50a径流、气温、降水都呈现出增加趋势,其中降水($U = 2.13 > U_{\alpha/2} = 1.96 > 0$)与气温($U = 4.33 > U_{\alpha/2} = 2.56 > 0$)增加趋势显著;在未来一段时间内径流($H = 0.68 > 0.5$)、气温($H = 0.78 > 0.5$)、降水($H = 0.54 > 0.5$)都将继续保持上升的趋势。

(2)采用Pearson相关系数法分析金沟河流域径流与气温和降水之间的相关关系,结果表明气温为影响金沟河流域径流变化的主要因子。

(3)采用偏相关系数与数据滑动窗口技术相结合的滑动偏相关系数法分析径流-气温关系变异情况,结果表明金沟河流域径流-气温关系发生了变异,变异点为1985年,双累积曲线法验证结果与滑动偏相关系数法一致。归因分析表明,该变异主要是由于1985年后金沟河流域上共新建3座水电站、同时金沟河流域内农业灌溉面积和用水量的不断增加等人为活动的加剧造成的。

参考文献:

- [1] 秦大河,周波涛.气候变化与环境保护[J].科学与社会,2014,4(2):19-26.
- [2] 陈亚宁,李 稚,范煜婷,等.西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J].地理学报,2014,69(9):1295-1304.
- [3] 崔师胜.浅析新疆金沟河流域水资源管理现状及存在问题[J].新疆水利,2014(5):10-12.
- [4] 董 奎,刘 兵,郑旭荣.金沟河流域气温、降水与年径流量演变规律研究[J].人民黄河,2010,32(5):32-33.
- [5] 韩舜滨.近30年金沟河流量变化与气候因子相关性分析[J].新疆水利,2017(2):31-35.
- [6] 叶 磊,周建中,曾小凡,等.水文多变量趋势分析的应用研究[J].水文,2014,34(6):33-39.
- [7] 李艳玲,畅建霞,黄 强,等.基于滑动 Copula 函数的降水和径流关系变异诊断[J].水力发电学报,2014,33(6):20-24+60.
- [8] 贡丽洁.基于不同时间尺度的伊犁河谷水面蒸发影响因素分析[J].浙江水利水电学院学报,2014,26(4):20-23.
- [9] 何 兵,高 凡,闫正龙,等.叶尔羌河径流演变规律与变异特征[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):38-43+49.
- [10] 何庆龙,周维博,夏 伟,等.延安市近60年降水时空特征分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):31-37.
- [11] 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河径流量的影响——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.
- [12] 魏天锋,刘志辉,姚俊强,等.呼图壁河径流过程对气候变化的响应[J].干旱区资源与环境,2015,29(4):102-107.
- [13] 汪宝龙,张明军,魏军林,等.西北地区近50a气温和降水极端事件的变化特征[J].自然资源学报,2012,27(10):1720-1733.
- [14] 秦丽欢,周敬祥,李叙勇,等.密云水库上游径流变化趋势及影响因素[J].生态学报,2018,38(6):1941-1951.
- [15] 郭爱军,畅建霞,王义民,等.近50年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J].农业工程学报,2015,31(14):165-171.
- [16] 林学椿.统计天气预报中相关系数的不稳定性问题[J].大气科学,1978(1):55-63.
- [17] 董 奎.金沟河流域气温、降水及径流的变化趋势[J].水利科技与经济,2010,16(5):490-492+497.
- [18] 张 蕾.金沟河流域水资源开发及利用[J].水利科技与经济,2013,19(1):83-86.
- [19] 唐 军.新疆金沟河流域水资源开发利用现状与对策研究[J].水利规划与设计,2012(2):20-22+30.