

基于滑动 Copula 函数的新疆干旱内陆河流 水文气象要素变异关系诊断

何兵, 高凡, 唐小雨, 覃姗

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:选取乌伦古河流域源流区出山口二台水文站 1959—2015 年长系列实测月径流量和同步气象观测资料, 采用累积距平法、R/S 分析法、Mann-Kendall 趋势检验法, 在对水文、气象要素序列演变规律分析的基础上, 运用 Person 相关系数法分析径流与降水、气温的相关性, 将 Copula 函数与数据滑动窗口技术相结合分析了径流与气象要素(降水、气温)的内在关系及变异特征。结果表明: (1) 乌伦古河源流区年径流量以 $0.026 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$ 的微速率波动减少, 减少趋势不显著 ($U_{a/2} = -1.96 < U = -0.15 < 0$), 未来呈增加趋势 (Hurst 指数 $H = 0.36 < 0.5$); 同时段年降水量以 $7.52 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的微弱增长速率波动增加, 且在 1990 年后, 波动较为频繁, 未来呈持续增加趋势 (Hurst 指数 $H = 0.63 > 0.5$), 增加趋势显著 ($U = 2.57 > U_{a/2} = 1.96$); (2) 年降水量是影响乌伦古河源流区径流量的最主要因子; (3) 将年降水作为气象因子与径流量构成联合序列, 进行基于滑动 Copula 函数对乌伦古河流域源流区长系列径流—降水联合序列进行了变异特征分析与变异点诊断, 表明: 其径流—降水关系变异点位是 1979 年, 且由第一阶段 (1959—1979 年) 的 Clayton-Copula 函数分布变异到第二阶段 (1980—2015 年) 的 Gauss-Copula 函数分布。研究结果与实际相符, 造成该研究区径流序列变异的原因主要归结为第一阶段 (1959—1979 年) 降水量和年均气温的显著减小趋势, 以及 1980 年以后由于人类活动强度加大, 二台水文站以上干支流先后修建了库容总量约 $3\,000 \text{ 万 m}^3$ 的水库, 对流域降水产汇流及河道上下游径流间的自然相关关系的改变。

关键词: 变异诊断; Copula 函数; 数据滑动; 乌伦古河

中图分类号: P333.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0155-07

Diagnosis of Variation of the Relationship Between Hydrological and Meteorological Elements in Arid Rnland Rivers of Xinjiang Based on the Sliding Copula Function

HE Bing, GAO Fan, TANG Xiaoyu, TAN Shan

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

Abstract: The monthly runoff and meteorological data covering the years from 1959 to 2015 were collected from the Ertai hydrological station at the mountain-pass of the Ulungur River Basin headstream area to synthetically analyze the period and the trend of hydrological and meteorological elements using the cumulative average deviation, R/S analysis and Mann-Kendall trend test. Furthermore, the correlations between runoff, precipitation and temperature were analyzed using the Pearson correlation method, while the internal relationship and the variation characteristics between runoff and meteorological elements such as precipitation and temperature were analyzed by combining the Copula function with the data sliding window technology. The results found that the annual runoff in the headstream area of the Ulungur River decreased with the micro rate fluctuation of $2.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{decade}$ and the trend would increase (Hurst index $H = 0.36 < 0.5$) with a less significant tendency ($U_{a/2} = -1.96 < U = -0.15 < 0$) in the future; similarly, the annual precipitation during the same period was found to increase with the weak growth rate of $7.52 \text{ mm}/\text{decade}$, and the fluctuation was more frequent after 1990, and the trend would increase (Hurst index $H = 0.63 > 0.5$) in a significant tendency ($U = 2.57 > U_{a/2} = 1.96$) in the future, and annual precipitation was the most important

收稿日期: 2018-04-07

修回日期: 2018-05-08

资助项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目“人类活动与气候变化的流域生态水文响应研究: 以新疆乌伦古河流域为例”(2017D01A43)

第一作者: 何兵 (1992—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 研究方向: 内陆干旱区水文过程及水资源利用。E-mail: 1223215435@qq.com

通信作者: 高凡 (1980—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 长期从事水资源系统工程与河流生态保护研究工作。E-mail:

gutongfan0202@163.com

factor affecting runoff in Ulungur River Basin headstream area. Combining annual precipitation with annual runoff to form joint sequence, we analyzed the variation characteristics and the variation point diagnosis of the long runoff and precipitation joint sequence in Ulungur River Basin headstream area on the basis of sliding Copula function. The variation of runoff precipitation relationship occurred in 1979, while the Clayton-Copula distribution function in the first stage (1959—1979) shifted to the Gauss-Copula distribution function in the second stage (1980—2015). The results of this study can reflect the real-world scenario. The primary reason for the variation in the runoff sequence in the study area was the significant decreasing trend in the precipitation and annual average temperature in the first stage (1959—1979) along with the increase in the intensity of human activities since 1980. The construction of the reservoir with the total volume of about 30 million m^3 on trunk stream and tributaries upper of the Ertai hydrological station changed the natural correlation between the runoff yield and concentration of the basin, and the runoff between the upstream and downstream.

Keywords: variation diagnosis; Copula function; data sliding; Ulungur River

全球气候变化已成为当今社会公众、科学家和各国政府普遍关注的焦点问题。根据 IPCC 第五次评估报告指出,近百年来全球平均地表温度上升 0.85°C ($0.65\sim 1.06^\circ\text{C}$),致使全球范围内流域、陆面、海洋等水文循环系统发生了显著变化^[1-2]。河川径流作为水文循环的基本环节和水量平衡的基本要素,能直接反映气候变化和人类活动对水文循环的影响^[3]。受变化环境影响,径流序列演变规律产生了不同程度变异,突出特征表现为一致性遭破坏,并导致近年来干旱、洪水、高温热浪等极端水文事件的频繁发生,不仅威胁全球水安全,而且制约人类生存与发展。因此,研究变化环境下特别是气候变化下的径流序列变异规律,对于水资源高效持续利用、兴利减灾、经济社会稳定发展等具有重要现实意义。目前水文序列变异研究大多集中在对径流、降水、气温等单一要素的序列变异诊断,且诊断方法主要采用数学统计方法,如 R/S 分析方法^[4]、Mann-Kendall 趋势检验法^[5-6]、滑动 T 检验法^[7]、滑动 F 检验法^[8]等方法,该方法以数理统计为计算基础,从线性变化角度出发,根据要素的均值、方差等特征值随时间变化的过程进行分析检验^[9],缺点为检测结果会因选择的时间序列不同而不同,无法辨识出水文序列是发生了位相或频率变化还是其序列本质发生了变化,并且对于多要素组合的水文气象序列(如径流—降水或径流—气温)状态趋势变化及变异情况不能有效识别,无法揭示多要素间的内在关系及变异特征^[6,10]。随变化环境下水文气象要素研究问题的日益复杂,多要素组合的水文气象序列联合分析成为研究热点^[11-12]。多要素序列联合分析相比单一要素能更好地揭示各要素间的相互关系和内在关系变化规律,其中 Copula 函数理论与方法较适宜多要素序列相互关系及变异特征分析^[11-14],优点在于 Copula 函数形式多样、灵活,可以通过其边缘分布和相关性来构造多维联合分布,并且单要素序列信息都包含在边缘分布中,不会产生信息失真和损失。基于此,本文选取新疆干旱内陆河流乌伦古河流域为研究对象,在采用 R/S 分

析法、累积距平法^[15]和 Mann-Kendall 趋势检验法和 Pearson 相关系数法^[16]对该流域源流区出山口径流、降水、气温等水文要素序列变化特征及其径流—降水、径流—气温相关性进行分析基础上,将 Copula 函数和数据滑动技术相结合进行研究区水文气象联合序列变异诊断,为径流序列变异诊断提供一种新的思路,对于揭示变化环境下的水文序列的非一致性变异规律、重构一致性序列、应对径流变化、科学管理和合理调度干旱区水资源具有重要理论和实践意义。

乌伦古河是新疆阿勒泰地区第二大河流,水源来自高山融雪和降水补给。由于乌伦古河天然的径流量年内季节变化及年际变化特征,加上全球气候变化模式下游流域气候变异的响应,流域天然水系格局及天然绿洲生态环境过程发生了显著改变。自 2002 年至今,以河流断流为标志的河流水文与生态功能受损已危及流域经济社会的可持续发展。目前已有公开发表的文献中,关于乌伦古河的径流序列变化分析多集中于常规水文学统计分析方法对径流的年内、年际变化特征分析方面,关于变化环境下特别是气候变化下乌伦古河径流序列的趋势性、持续性、变异性响应特征和变异诊断研究成果较少^[17-19]。因此,本文研究将有助于揭示变化环境下新疆干旱内陆河流水文过程演变规律和变异特征,指导流域水资源规划与管理,不仅具有理论意义,而且具有实践价值。

1 研究区概况

乌伦古河为新疆阿勒泰地区第二大河流,发源于阿尔泰山东段海拔 3 550 m 的达拉大坂,位于东经 $87^\circ 05'\sim 90^\circ 45'$ 、北纬 $46^\circ 10'\sim 47^\circ 28'$,见图 1,该流域由大、小青格里河、查干河、布尔根河等 4 条河流由北向南流入二台水文站以上合流,沿途再无支流汇入,最后流入福海县的布伦托海。乌伦古河河源至湖口河流总长 821 km,流域面积为 6.14 万 km^2 ,二台水文站以上集水面积(国内)为 1.84 万 km^2 。河水水源

完全靠高山季节性融雪和降水补给,径流量季节变化及年际变化极为明显,多年平均径流量 11.12 亿 m^3 ,是新疆年际变化最大的河流。乌伦古河是流经新疆阿勒泰地区青河、富蕴、福海三县和农十师 182 团、福海监狱的一条重要河流,流域内居住着哈萨克、维吾尔、回、蒙古等少数民族和汉族 15 万余人,目前形成了“三县一团”瓜分乌伦古河水资源的用水格局,同时又是新疆第二大淡水湖泊——乌伦古湖的补水水源。

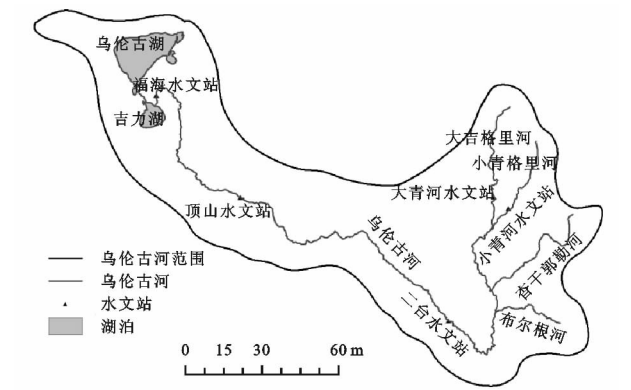


图 1 乌伦古河流域地理位置与水文站点分布

2 数据资料与研究方法

2.1 数据资料来源

选取乌伦古河流域国家基本水文站——二台水文站 1959—2015 年共计 57 a 实测月径流量和同步气象资料,其资料均从新疆阿勒泰水文水资源勘测局获得,该站位于乌伦古河干流出山口位置,地理坐标为东经 $90^{\circ}09'$,北纬 $46^{\circ}03'$,测站高程为 909 m。

2.2 研究方法

运用 R/S 分析法、累积距平法分析乌伦古河流域源流区出山口水文站——二台水文站 1959—2015 年径流、降水、气温变化的趋势性、阶段性;采用 Mann-Kendall 趋势检验法分析长序列径流、降水、气温的趋势性变化及其显著程度;采用 Person 相关系数法分析径流与降水、气温的相关性,识别影响径流的主要因素;将 Copula 函数^[11,14,20-22]与数据滑动窗口技术相结合引入径流与气象要素多要素序列内在关系及变异诊断中,进行该研究区径流序列的变异诊断并进行归因分析。

3 乌伦古河源流区水文气象要素基本特征分析

3.1 径流及其变化特征

乌伦古河源流区出山口二台水文站 1959—2015 年长系列径流量变化和年径流累积距平变化过程线见图 2。由径流数据序列求得多年平均径流量为 9.71 亿 m^3 ;由图 2 可知,最大年径流量发生在 2010

年,为 25.83 亿 m^3 ,最小年径流量发生在 1982 年,为 2.73 亿 m^3 ,年径流量在年际间以 0.026 亿 $\text{m}^3/10\text{ a}$ 的微速率波动减少。依据 R/S 法分析得出,1959—2015 年长系列 Hurst 指数 $H=0.36<0.5$,指示年径流序列具有负持续性,说明年径流量在未来呈波动增加的变化趋势。从图 2 可以看出,乌伦古河源流区 1959—2015 年径流量序列整体呈现阶段性变化特征。其中,1959—1980 年表现出明显的减少阶段,说明该时段年径流量丰水期少于枯水期;而 1981—2015 年,年径流量表现出频繁的波动阶段,说明该时段年径流量处于频繁的丰枯交替特征。运用 Mann-Kendall 非参数趋势检验法对年径流量序列进行趋势检验(表 1),年径流量统计量 $U_{a/2}=-1.96<U=-0.15<0$,不满足 $\alpha=0.05$ 显著水平要求,表明乌伦古河源流区的年径流量在 1959—2015 年呈不显著减少趋势。

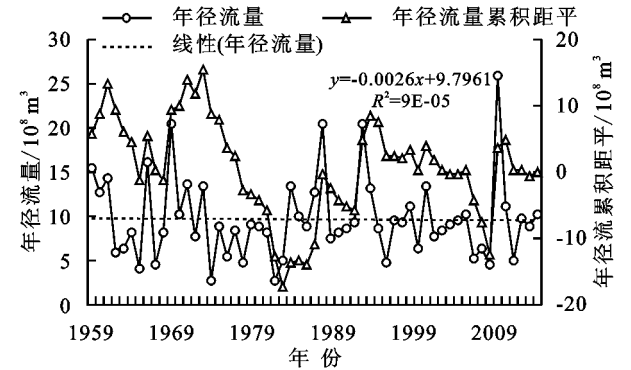


图 2 二台水文站年径流量累积距平变化过程线

表 1 二台水文站水文气象要素 Mann-Kendall 趋势检验

要素	U	变化趋势	$U_{a/2}=0.05$	显著性
年径流量	-0.15	减少	± 1.96	不显著
年降水	2.57	增加	± 1.96	显著
年均气温	5.92	增加	± 1.96	显著

3.2 气候及其变化特征

乌伦古河源流区出山口二台水文站 1959—2015 年长系列降水量变化和年降水累积距平变化过程线见图 3。由降水量数据序列求得,多年平均降水量为 115.74 mm;最大年降水量发生在 1987 年,为 229.9 mm,最小年降水量发生在 1982 年,为 35.1 mm,年降水量在年际间以 7.52 mm/10 a 的微弱增长速率波动增加,且在 1990 年之后,波动较为频繁。依据 R/S 法分析得出,1959—2015 年长系列 Hurst 指数 $H=0.63>0.5$,指示年降水序列呈现出正持续性,即说明年降水量在未来将呈持续增加趋势。乌伦古河源流区 1959—2015 年降水量序列整体呈现出下降—上升的明显阶段变化特征,即 1959—1986 年为明显下降阶段,1986—2015 年为明显上升阶段,但在上升过程中部分年份间(1988—1991 年、1994—2000 年、2006—2008 年、2010—2015 年)出现了平缓波动状

态,说明在 1986 年之前年份里源流区表现出多雨期明显少于少雨期,1986 年之后年份里为多雨期多于少雨期,在平缓波动部分年份间则为降水正常年份的平稳期。运用 Mann-Kendall 非参数趋势检验法对年降水量进行趋势检验,由表 1 可知,年降水量统计量 $U=2.57>U_{\alpha/2}=1.96$,满足 $\alpha=0.05$ 显著水平要求,表明乌伦古河源流区的年降水量在 1959—2015 年有显著的增加趋势。

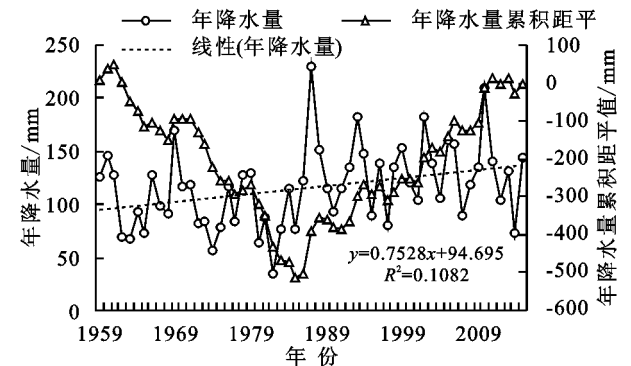


图 3 二台水文站年降水量及累积距平变化过程线

乌伦古河源流区出山口二台水文站 1959—2015 年长系列气温变化和累积距平变化过程线见图 4。由气温数据序列求得,多年年均气温平均为 3.9°C ; 年均气温最高发生在 2007 年,为 6.6°C ,年均气温最低发生在 1965 年,为 0.8°C ,年均气温在年际间以 $0.71^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的微弱增长速率波动增加,且在 1986 年之后,有波动增加趋势。依据 R/S 法分析得出,1959—2015 年长系列 Hurst 指数 $H=0.84>0.5$,指示年均气温序列呈现出强烈的正持续性,即说明气温在未来将呈明显持续增加趋势。乌伦古河源流区 1959—2015 年年均气温序列整体呈现下降—上升的明显阶段变化特征,即 1959—1984 年为明显下降阶段,1984—2015 年为明显上升阶段。运用 Mann-Kendall 非参数趋势检验法对其年均气温进行趋势检验。由表 1 可知,年均气温统计量 $U=5.92>U_{\alpha/2}=1.96$,满足 $\alpha=$

0.05 显著水平要求,说明乌伦古河源流区的年均气温在 1959—2015 年有显著的增加趋势。

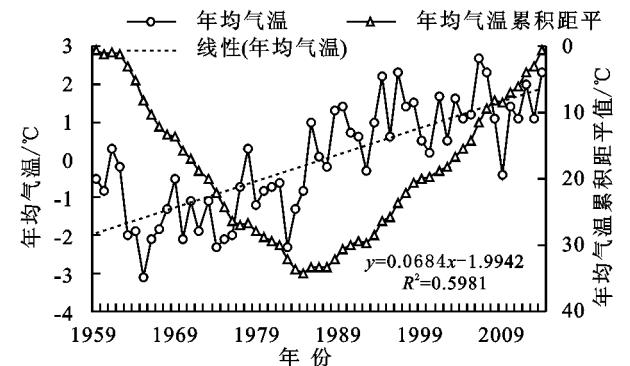


图 4 二台水文站年均气温及累积距平变化过程线

3.3 水文气象要素序列变化相关性分析

运用 Pearson 相关分析法进行研究区水文气象要素序列的关联性分析,表 2 可以看出,在降水要素中,年径流量与年降水、春季降水、夏季降水、秋季降水、冬季降水均表现为正相关性,其中与年降水量的相关系数最大,为 0.61 且通过了 0.01 的显著水平要求,表明年径流量与年降水量之间存在显著的正相关性;径流量与年均气温、春季平均气温、秋季平均气温、冬季平均气温之间均存在着负相关性,而与当年夏季平均气温呈显著正相关性,其中,7 月份和 8 月份气温与径流量的相关系数分别为 0.115,0.058,表现出正相关性,原因主要归结为乌伦古河产流于高寒山区,径流补给主要为季节性积雪和降水,产流区没有较大面积的冰川或永久积雪分布^[17],当气温上升时,季节性积雪覆盖面积呈减少趋势,对径流的补给作用降低;分析结果显示,气温特别是 7 月、8 月气温在某种程度上影响着径流量变化,但相对于 7—8 月份降水量而言较小,仅起辅助影响作用。综合来看,年降水量是影响乌伦古河源流区径流量的最主要的因子,此结果与王振升^[19]、杨霞等^[23]对乌伦古河流域径流影响因素的研究中所得结论较为一致。

表 2 二台水文站年径流与降水、气温的相关系数

降水要素	年降水	春季	夏季	秋季	冬季	七月	八月
与年径流	0.61**	0.341*	0.475**	0.177	0.527*	0.376**	0.213
气温要素	年均气温	春季	夏季	秋季	冬季	七月	八月
与年径流	-0.001	-0.259	0.39	-0.214	-0.073	0.115	0.058

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示是在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

4 基于滑动 Copula 函数的降水—径流联合序列变异诊断

4.1 Copula 函数

Copula 理论最早由 Sklar 在 1959 年提出并引用

于统计学中,随后于 1999 年由 Nelson 在对 Copula 研究领域的主要研究成果作出系统总结基础上给出了严格定义,其基本思想是将服从不同边缘分布的多个变量“连结”而形成的联合分布,可以较好的刻画变量间的相关结构^[12,24]。以二维变量分布为例可表述

为:假设 x, y 为连续随机变量,其边缘分布函数分别为 $F(x)$ 和 $G(y)$,记 (x, y) 的联合分布函数为 $H(x, y)$,则存在唯一 Copula 函数 C ,满足:

$$H(x, y) = C[F(x), G(y)] \quad x, y \in R \quad (1)$$

式中: $C: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ 。

Copula 函数形式多样,常用的有 Archimedean 族 Copula 函数(包括 Frank-Copula 函数、Clayton-Copula 函数和 Gumbel-Copula 函数)、Gauss-Copula 函数、T-Copula 函数^[12, 22],其各类型的分布函数分别为:

$$C_{G\mu}(\mu, v; \theta) = \exp\{ - [(-\ln \mu)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta} \}, \theta \in [1, \infty) \quad (2)$$

$$C_{Cl}(\mu, v; \theta) = \max[\mu^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0]^{1/\theta}, \theta \in [-1, \infty) \quad (3)$$

$$C_{Fr}(\mu, v; \theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta\mu} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)} \right], \theta \in (-\infty, \infty) / \{0\} \quad (4)$$

$$C_{G\mu}(\mu, v; \rho) = \int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(\mu)} \int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi \sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[-\frac{s^2 - 2\rho st + t^2}{2(1-\rho^2)}\right] ds dt \quad (5)$$

式中: $\mu = F(x), v = G(y); \rho$ 是两变量间的相关系数; θ 为 Copula 函数待定参数^[11]; φ^{-1} 是标准高斯分布的逆函数。

$$C_T(\mu, v; \rho, k) = \int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(\mu)} \int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi \sqrt{1-\rho^2}} \left[1 + \frac{s^2 - 2\rho st + t^2}{k(1-\rho^2)} \right]^{-\frac{k+2}{2}} ds dt \quad (6)$$

式中: μ, v, ρ, θ 同上; k 是自由度; t^{-1} 是 T 分布的逆函数。

4.2 滑动 Copula 函数径流变异分析基本思路及步骤

依据径流与主要气象要素 Pearson 相关分析可知,径流与降水关联性较好。因此,本研究选取乌伦古河流域源流区出山口二台水文站 1959—2015 年共计 57 a 的月径流和同步月降水时间序列(序列长度均为 684)进行联合序列的变异特征诊断,其基本思路为:首先对径流、降水两序列以同一步长(L),不同的滑动窗口(W)求 Spearman 秩和 Kendall 秩相关系数^[22]并作图,得到径流—降水联合水文气象序列相关关系变化趋势图;其次,依据趋势变化分析两水文序列可能存在的关系变异点;最后,以该变异点为 1959—2015 年时间序列分割点,引入 Copula 函数,计算各窗口内两序列的 Copula 函数的参数,根据滑动 Copula 函数的参数序列变化情况进行变异诊断,并根据欧式距离大小确定变异前后最佳 Copula 函数类型。具体步骤如下:

(1) 确定滑动步长 L 和不同的滑动窗口 W (其中径流—降水序列窗口长度需保持一致,且滑动过程中需保持不变),从两序列的第一个数据开始以同一滑动步长 L 移动窗口 W ,直到时间序列结束,以此计

算各滑动窗口下 Spearman 秩和 Kendall 秩相关系数并作图;

(2) 根据(1)中所得径流—降水相关系数图,判断两序列关系变异点,并以此变异点为分割点对原时间序列进行分割;

(3) 在(2)基础上引入 Copula 函数,计算变异点(分割点)前后序列的不同模型 Copula 函数的参数,并且为评价模型的好坏,引入经验 Copula 函数,求其不同模型下 Copula 函数的欧式距离 d ;

(4) 根据(3),以欧式距离大小为评判标准(即欧式距离 d 越小,所对应的 Copula 函数模型越合适^[12])确定变异点前后最佳 Copula 函数模型;

(5) 根据变异点前后 Copula 函数类型的变化情况进行径流—降水关系变异诊断。

4.3 滑动 Copula 函数径流变异诊断结果与分析

由于对 Copula 函数进行数据滑动分析时,若滑动窗口长度 W 太短,则会造成检测出的关系曲线波动较为频繁或极值点较多,不宜判断具体变异点;若滑动窗口长度 W 太长,则会造成变异点检测产生遗漏。因此,本研究选取滑动步长 $L=1$ a,滑动窗口 W 分别为 3 a(图 5A),5 a(图 5B),10 a(图 5C),15 a(图 5D),以此有间距变化的逐步扩大滑动窗口,进行精确的检测变异点。

从图 5 中可以看出,在滑动窗口长度 W 分别为 36, 60, 120, 180 下,径流与降水两序列的 Spearman 秩和 Kendall 秩相关系数均呈现出 2 个变化阶段,即 1959—1979 年的增加趋势和 1979—2015 年的减小趋势,由此初步判断乌伦古河流域源流区出山口二台水文站在 1959—2015 年里径流与降水关系发生了一次变异,变异年份为 1979 年。

本研究以变异点 1979 年为分割点,将径流—降水序列分割为两段,即 1959—1979 年和 1980—2015 年,分别计算两个阶段各类型 Copula 函数的参数,结果见表 3。在欧式距离评判标准下得出,Clayton-Copula 函数能更好地拟合第一阶段, Gauss-Copula 函数能更好地拟合第二阶段,结果见图 6—7。从图 6 可以看出,第一阶段(1959—1979 年)径流—降水密度函数呈下尾高上尾低的特点,即此阶段径流—降水序列下尾部相关,上尾部渐进独立,说明只在降水取极小值时对径流有明显影响,在取极大值时降水对径流的影响不明显;从图 7 可以看出,第二阶段(1980—2015 年)径流—降水密度函数呈对称的尾部相关特点,即此阶段径流—降水序列具有明显的尾部相关性,说明在降水取极大值或极小值时,都对径流有明显的影响。

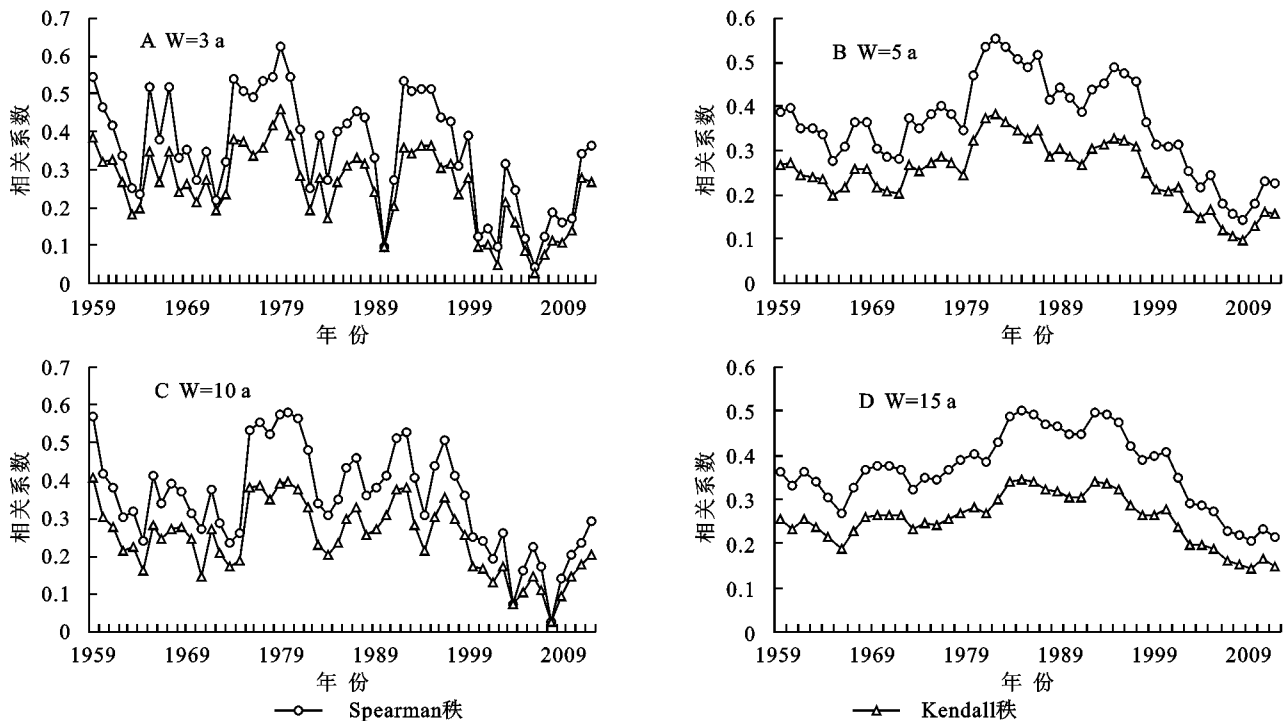


图 5 二台水文站不同滑动窗口下径流与降水相关系数

表 3 各类型 Copula 函数的参数

函数	1959—1979 年	1980—2015 年
Gauss	$\theta=0.79;d=0.176$	$\theta=0.75;d=0.114$
T	$\theta=0.84;d=0.135$	$\theta=0.81;d=0.147$
Gumbel	$k=1$	$k=1$
Clayton	$\theta=2.50;d=0.157$	$\theta=2.26;d=0.134$
Frank	$\theta=2.01;d=0.113$	$\theta=1.80;d=0.139$
最佳 Copula 函数	$\theta=8.52;d=0.165$	$\theta=7.59;d=0.173$
	Clayton-Copula 函数	Gauss-Copula 函数

由此可见,径流—降水的关系在 1979 年发生了变异,即径流—降水序列关系由第一阶段的 Clayton-Copula 函数分布变异到第二阶段的 Gauss-Copula 函数分布,归因分析结果如下:(1) 乌伦古河径流主

要产自源流区二台水文站以上,径流补给来源以山区降水和季节性积雪融水为主。根据上文对降水、气温变化特征分析可知,该联合系列第一阶段(1959—1979 年)降水量和年均气温均表现为显著减小趋势;受极端气候影响^[25],乌伦古河 1960—1979 年出现枯水年 7 次,同期遭受旱灾 7 次,平均三年一旱,对该时段内径流变化产生明显影响;(2) 自 1980 年以来,由于人类活动强度增大,二台水文站以上干支流先后修建了库容总量约 3 000 万 m³ 的水库^[26],增加了地表下垫面截留降水的能力,改变了流域降水产汇流及河道上下游径流间的自然相关关系,进而对径流过程产生影响。

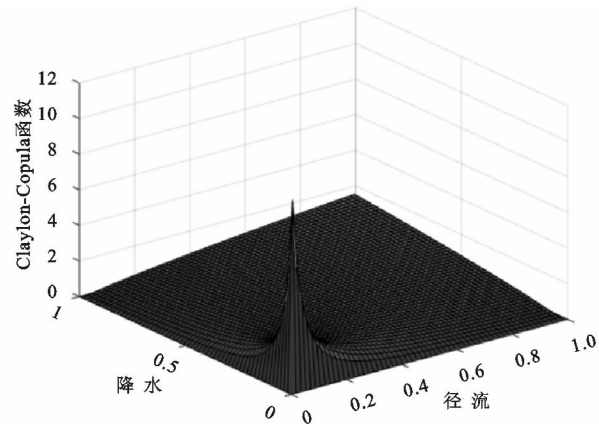


图 6 1959—1979 年径流—降水 Copula 函数

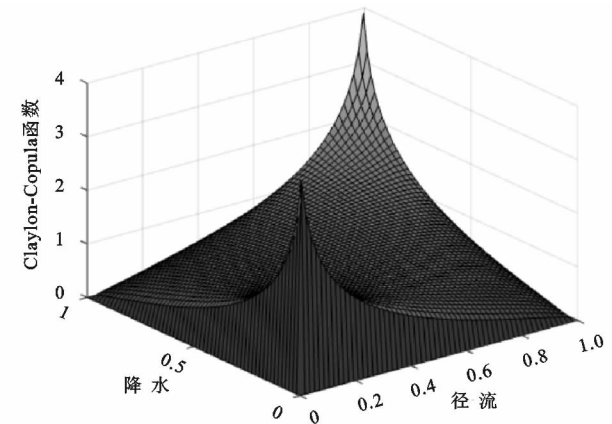


图 7 1980—2015 年径流—降水 Copula 函数

5 结论

(1) 选取乌伦古河流域源流区出山口二台水

文站 1959—2015 年长系列实测月径流量和同步气象观测资料,采用累积距平法、R/S 分析法、Mann-Kendall 趋势检验法对水文及气象要素(降水量、气

温)的阶段性和趋势性进行综合分析,并运用 Pearson 相关分析法进行研究区水文气象要素序列的关联性分析,结果表明:乌伦古河源流区年径流量以 $0.026 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$ 的微速率波动减少,减少趋势不显著 ($U_{a/2} = -1.96 < U = -0.15 < 0$),波动不显著且在未来将呈增加趋势(Hurst 指数 $H = 0.36 < 0.5$);同时段年降水量以 $7.52 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的微弱增长速率波动增加,且在 1990 年后,波动较为频繁,未来呈持续增加趋势(Hurst 指数 $H = 0.63 > 0.5$),增加趋势显著 ($U = 2.57 > U_{a/2} = 1.96$);相关分析表明,年径流量与年降水量、春季降水、夏季降水、秋季降水、冬季降水均表现为正相关性,其中与年降水量的相关系数最大且相关性显著,为影响乌伦古河源流区径流量的最主要的因子,经与研究区实测资料及他人研究成果对照,该结论与实际相符。

(2) 基于滑动 Copula 函数对乌伦古河流域源流区长系列径流—降水联合序列进行变异特征分析与变异点诊断。结果表明,其径流—降水关系变异点位于 1979 年,且由第一阶段(1959—1979 年)的 Clayton-Copula 函数分布变异到第二阶段(1980—2015 年)的 Gauss-Copula 函数分布。

(3) 究其原因,主要归结为气候变化与人类活动的双重影响。造成该研究区径流序列变异的原因主要归结为第一阶段(1959—1979 年)降水量和年均气温的显著减小趋势,以及 1980 年以后由于人类活动强度加大,二台水文站以上干支流先后修建了库容总量约 $3\,000 \text{ 万 m}^3$ 的水库,对流域降水产汇流及河道上下游径流间的自然相关关系的改变造成。

参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [2] 张连鹏,刘登峰,张鸿雪,等. 气候变化和人类活动对北洛河径流的影响[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 55-66.
- [3] 张岩,张建军,张艳得,等. 三江源区径流长期变化趋势对降水响应的空间差异[J]. 环境科学研究, 2017, 30(1): 40-50.
- [4] 王修内,黄强,畅建霞. 新疆叶尔羌河流域径流规律分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(6): 45-47, 50.
- [5] 刘艺,雷晓云,马红刚,等. 巴音沟河近 60 年出山口年径流量演变规律[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 139-142.
- [6] 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.
- [7] 郭彦,侯素珍,林秀芝. 近 51 年西柳沟流域水沙变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 176-183.
- [8] 陈广才,谢平. 水文变异的滑动 F 识别与检验方法[J]. 水文, 2006, 26(5): 57-60.
- [9] 陈广圣,王义民,刘登峰,等. 基于滑动相关系数法的流域径流变异诊断[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(1): 11-18.
- [10] 郭爱军,黄强,王义民,等. 基于 Archimedean Copula 函数的流域降雨—径流关系变异分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 7-13.
- [11] 郭生练,闫宝伟,肖义,等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文, 2008, 28(3): 1-7.
- [12] 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.
- [13] 叶明华,汪荣明,丁越,等. 基于 Copula 相依函数的安徽省气温与降雨量相关性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 110-117.
- [14] Abegaz F, Naik-Nimbalkar U V. Modeling statistical dependence of Markov chains via Copula models [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2008, 138(4): 1131-1146.
- [15] 罗栋梁,金会军. 黄河源区玛多县 1953—2012 年气温和降水特征及突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 185-192.
- [16] 陈青青,陈超群,杨志勇,等. 阿克苏河径流演变及其对气候变化的响应[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 88-93, 99.
- [17] 努尔兰·哈再孜. 乌伦古河流域水文特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 798-802.
- [18] 努尔兰·哈再孜,沈永平,马哈提·穆拉提别克. 气候变化对阿尔泰山乌伦古河流域径流过程的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 699-705.
- [19] 王振升,程同福,刘开华,等. 乌伦古河流域水资源及其特征[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 123-128.
- [20] 蒙坚玲. 相依时间序列的 Copula 分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2004.
- [21] 刁心薇. Copula 函数的非参数估计方法[D]. 长春:吉林大学, 2005.
- [22] 宋松柏,蔡焕杰,金菊良,等. Copulas 函数及其在水文中的应用. [M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [23] 杨霞. 基于 SWAT 模型的乌伦古河流域气候变化对径流影响研究[J]. 新疆环境保护, 2015, 37(1): 45-50.
- [24] Nelsen R B. An introduction to Copulas [M]. New York: Springer, 1999.
- [25] 李疆,加帕尔,卡德尔. 乌伦古河径流及布伦托海湖水位多年变化的初步分析[J]. 新疆地理, 1981(1): 10-18.
- [26] 孟古别克·俄布拉依汗,贾尔恒·阿哈提,程艳,等. 乌伦古河断流原因分析及对策[J]. 水电能源科学, 2014, 32(9): 139-142.