

60多年来车尔臣河流域主要水文要素特征分析

刘锋, 范文晓, 魏光辉

引用本文:

刘锋, 范文晓, 魏光辉. 60多年来车尔臣河流域主要水文要素特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1369-1376.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-1045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174-184 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853>

东北低温农区近四十年气温降水变化及其对面源氮磷输出影响

欧阳威, 徐逸, 黄浩波, 杨万新, 王丽

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1285-1292 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0093>

基于人为氮净输入及入河系数的流域河流氮输出负荷估算

凡翔, 吴凤平, 孟岑, 叶磊, 李希, 张满意, 李裕元, 吴根义, 吴金水

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 185-193 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0762>

不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响

严磊, 邓旭哲, 薛利红, 侯朋福, 徐德福, 杨林章

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2761-2769 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0397>

长江下游“玉米-花菜”轮作模式下旱地降雨产流过程及氮磷输出特征研究

朱文俊, 李金文, 钱晓雍, 沈根祥, 张敏, 付侃, 王振旗, 赵庆节

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2167-2178 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0323>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘锋, 范文晓, 魏光辉. 60多年来车尔臣河流域主要水文要素特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1369-1377.

LIU F, FAN W X, WEI G H. Analysis of altered characteristics of main Che'erchen River Basin hydrological elements over the past 60 years[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(6): 1369-1377.



开放科学 OSID

60多年来车尔臣河流域主要水文要素特征分析

刘锋¹, 范文晓², 魏光辉^{1,3*}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆工程学院土木工程学院, 乌鲁木齐 830091; 3. 新疆塔里木河流域管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:开展河流主要水文要素变化特征分析,可为不同来水情景下水资源配置(农业需水量计算、山区水库调蓄计算、水利规划布局、水资源优化利用等)提供理论依据。以新疆车尔臣河为例,采用Mann-Kendall趋势检验、小波分析等方法对主要水文要素变化特征进行了分析。车尔臣河径流系列变差系数(Cv)为0.34,偏差系数(Cs)为1.14,径流年际变化相对稳定;1957—2021年间径流整体呈显著增加趋势,其中1957—2003年处于上升、下降的波动状态,在2003年后径流整体呈增加趋势,且在2008年发生突变;径流过程存在11 a和19 a的显著主周期,在主周期内还存在7 a和11 a的小周期;基于距平百分率法得到丰水年来水为6.630亿m³,平水年来水量为5.319亿m³,枯水年来水量为4.820亿m³;流域降水呈现显著上升趋势,气温呈先下降后上升波动,整体呈上升趋势。研究表明,1957—2021年,在车尔臣河流域,径流年际变化相对稳定,整体呈显著增加趋势,过程存在11 a和19 a的显著主周期,降水呈波动上升趋势,气温也呈增加趋势,在未来水资源配置规划时应重点关注以上特征。

关键词:水文要素; Mann-Kendall方法; 小波分析; 趋势检验; 车尔臣河

中图分类号: P333 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)06-1369-08 doi:10.11654/jaes.2023-1045

Analysis of altered characteristics of main Che'erchen River Basin hydrological elements over the past 60 years

LIU Feng¹, FAN Wenxiao², WEI Guanghui^{1,3*}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. School of Civil Engineering, Xinjiang Engineering College, Urumqi 830091, China; 3. Bureau of Xinjiang Tarim River Basin Management, Korla 841000, China)

Abstract: To analyze how changes to main hydrological elements can provide a theoretical basis for the allocation of water resources (Calculations of agricultural water demand, calculations of reservoir regulation and storage in mountainous areas, planning and layout of water conservancy projects, optimization and utilization of water resources, etc.) in different inflow scenarios. This article used the Che'erchen River as an example and employed the M-K trend test method, wavelet analysis, and other methods to analyze changes to main hydrological elements. The coefficient of variation of Che'erchen River was 0.34, and the deviation coefficient was 1.14. Interannual variation in run-off was relatively stable. From 1957 to 2021, the run-off exhibited a significant increasing trend, with a fluctuating upward and downward trend from 1957 to 2003. After 2003, the runoff showed an increasing trend, and an abrupt change occurred in 2008. There were significant main cycles of 11 and 19 years in the run-off process, and also smaller cycles of 7 and 11 years within the main cycle; Based on the percentage deviation method, inflow in the year of high water was 6.630×10^8 m³, inflow in the year of low water was 5.319×10^8 m³.

收稿日期: 2023-09-18 录用日期: 2024-02-06

作者简介: 刘锋(1980—),男,新疆乌鲁木齐人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水利教学与科研。E-mail: 23539583@qq.com

*通信作者: 魏光辉 E-mail: 530748965@qq.com

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2021D01A101); 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2023J017); 国家自然科学基金基金项目(U2003204); 国家重点研发计划项目(2023YFC3206804)

Project supported: Natural Science Foundation of Xinjiang Uyghur Autonomous Region (2021D01A101); University Science and Technology Plan of Xinjiang Uyghur Autonomous Region (XJEDU2023J017); National Natural Science Foundation of China (U2003204); National Key Research and Development Program of China (2023YFC3206804)

m^3 , and inflow in the year of low water was $4.820 \times 10^8 \text{ m}^3$; Precipitation in the watershed exhibited a significant upward trend, while the temperature fluctuated downward and upward, it generally demonstrated an upward trend. From 1957 to 2021, the interannual variation of runoff was relatively stable and exhibited a significant increasing trend overall, with a significant main cycle of 11 and 19 years in the process. The precipitation data had a fluctuating upward trend, and the temperature also showed an increasing trend. In future water resource allocation planning, the above characteristics should be given special attention.

Keywords: hydrological elements; M-K method; wavelet analysis; trend testing; Che'erchen River

车尔臣河发源于新疆昆仑山北坡的木孜塔格峰,流经且末、若羌两县,尾间为台特玛湖,是塔里木盆地东南缘产水量最大的河流。车尔臣河流域总面积 4.74 万 km^2 ,多年平均径流量 5.901 亿 m^3 (且末水文站断面)。流域行政区划包括且末县、若羌县以及兵团第二师 37 团。流域内地区生产总值共计 31.23 亿元,总人口 8.43 万人,城镇化率 45.8%,灌溉面积 4.49 万 hm^2 ,主要种植粮食、棉花、油料、蔬菜和瓜果。

在全球气候变暖背景下,气温、降水及径流是反映气候变化的主要水文变量,识别其趋势特征并认识其不同时间尺度上的变化规律是水循环演变研究的重要内容^[1]。径流是气温、降水变化的重要体现,也是自然界中水循环的主要环节。径流量是陆地上最重要的水文要素之一,是水量平衡的基本要素。在西北内陆干旱区,由于降水稀少、蒸发强烈,河川径流主要来自冰川融雪融冰,并通过山区水库、拦河枢纽、输水干渠(管道)等水利工程调蓄,适时、适量地输送到人工绿洲,是绿洲生产、生活与生态的重要水源,是经济社会高质量发展的命脉。任婵月等^[2]采用 Mann-Kendall 趋势分析法,检测了全球 4 469 个水文站点径流变化趋势,结果表明全球径流变化以减少趋势为主;王玉雪等^[3]基于 Mann-Kendall 检验法对北运河流域近 51 a 的降水、径流变化趋势和突变特征进行了分析;韩梅等^[4]基于十字河流域 1961—2008 年降水、径流同期资料,用距平分析法、Mann-Kendall 趋势检验法对研究区降雨及主要河流演变趋势进行了分析;肉孜买买提·阿不来提^[5]基于新疆某河流 1959—2015 年气温、降水和年径流资料,采用累积距平法、M-K 检验以及小波分析等方法分析了其年际变化特征;张琳娜^[6]采用泰森多边形法与 M-K 突变检验法对彬州市降雨径流特征及变化趋势进行探讨;吕乐婷等^[7]基于汤河 1970—2014 年的降水、径流量数据,利用滑动平均、相关分析、累积距平及 M-K 突变检验法,对降水、径流变化趋势以及两者间的关系进行了分析;曹志宏等^[8]根据清源河流域 1956—2016 年观测数据,运用 M-K、线性回归法分析了 61 a 的降水、径流变化特征

和规律;周海鹰等^[9]利用塔里木河流域近 60 a 的地表径流、气温和降水量资料,通过趋势分析、突变检验、年代际分析等方法分析了径流时空变化,探讨了径流变化对气温、降水量变化的响应;王军等^[10]根据锡林浩特市气象站和锡林河水文站实测数据,运用 Mann-Kendall 法和线性回归法分析了锡林河流域 40 a 的降水、径流变化特征和演变规律;黄惠娟等^[11]采用平凉水文站历年实测降水、径流资料,通过基尼系数、Mann-Kendall 检验等数理统计方法对泾河上游降水、径流变化趋势进行了分析;陈玉壮等^[12]以海流兔河为例,利用连续小波变换、多时相趋势分析,并联合利用离散小波变换和 Mann-Kendall 秩次检验法对 1957—2011 年的年均径流分别进行了周期、趋势以及趋势结构分析。

以上研究基于 Mann-Kendall 检验、小波分析、累积距平等方法对气温、降水及径流等主要水文要素在各自研究区的变化趋势及周期等进行了客观分析计算,这一方面说明了上述研究方法的可行性与普适性,可以在其他研究领域与研究区进行尝试使用;另一方面,上述研究主要聚焦于我国中东部季风影响区水文要素变化,但对于西北内陆干旱区来说,虽有研究,但由于西北地区地广人稀、地形条件差异大,各独立流域水文气象各有不同,导致其趋势变化也千差万别。新疆昆仑山北麓的车尔臣河,作为塔里木河流域“九源一干”的重要组成,与塔里木河干流及台特玛湖共同组成了一道绿色屏障,维系着塔里木盆地东南缘绿色走廊生态安全,是塔里木盆地东南缘且末-若羌新楼兰经济带高质量发展的水资源支撑,同时也为流域粮食安全、农业生产、工业园区发展提供水安全保障。迄今为止,关于车尔臣河流域主要水文要素演变、未来趋势发展及周期变化的研究仍处于空白。开展车尔臣河径流及气温、降水趋势、突变检验及周期分析,可了解未来该区域环境变化趋势与原因,为流域水资源高效开发利用提供理论参考与决策依据。如根据河道来水情况开展不同来水频率下水资源优化配置,在丰水年实行弹性配置水量政策,增加粮食作物及荒漠生态植被供水量,为国家粮食安全与重要

农产品供给及流域荒漠生态保护修复提供水资源支撑。在枯水年对荒漠生态供水采取轮灌制度(3 a或者2 a实现荒漠生态植被补水)补水,确保生态植被不退化。车尔臣河流域位置见图1。

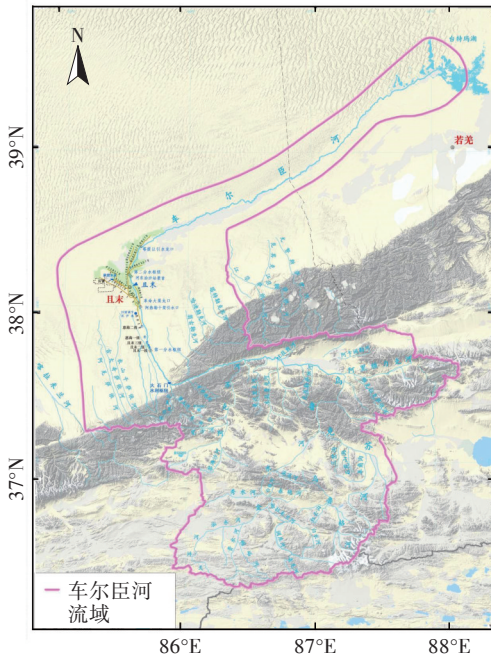


图1 车尔臣河流域示意图

Figure 1 Location of Che'erchen River Basin

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文所用数据主要包括车尔臣河且末水文站(且末县城旁)1957—2021年实测径流资料及同期且末国家气象站(且末县城旁)降水、气温数据。

1.2 研究方法

通过对车尔臣河多年长系列径流量、降水、温度等水文气象要素进行分析,对其年际变化特征、年内变化特征、周期性波动特征以及趋势性特征等进行分析。

1.2.1 趋势分析

Mann-Kendall趋势检验法(以下简称M-K法)是目前水文气象数据分析常用的一种检验时间序列变化趋势、显著性及突变点时间的检验方法^[13]。在检验时间序列的突变特性中,通过M-K法得到 UF_k 和 UB_k 两条统计量序列曲线,置信度 $\alpha=0.05$ 时,将临界值 $U_{0.05}=\pm 1.96$ 的两条临界直线绘制于同一张图上,在临界值内两条统计量曲线的交点即为突变开始时间。

统计量的计算公式为:

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

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

统计量 s 的正(负)值表示序列的上升(下降)趋势。当数据长度 $n > 8$ 时, s 近似服从标准正态分布。其期望 $E(s)$ 和 $Var(s)$ 可表示为:

$$E(s) = 0 \quad (3)$$

$$Var(s) =$$

$$\frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{l=1}^m k_l(k_l-1)(2k_l+5) \right] \quad (4)$$

式中: n 为数据序列内含有的相等数据的组数; k_l 为第 l 组内相等数据的个数。

标准化的统计检验量 Z 按下式计算:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{Var(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{Var(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

显著性水平通常设定为0.05,其统计量 Z 为 ± 1.96 。分别对时间序列 $x(t)$ 的正、逆序列进行分析,得到统计量 Z^+ 和 Z^- ,通过二者交点可判断出 $x(t)$ 变化的突变点。

1.2.2 周期性分析

前人成功将Morlet小波应用在分析水文序列的多时间尺度问题上,其基本形式为^[14-16]:

$$m^3 \psi(t) = e^{ict} \left(e^{-\frac{t^2}{2}} - \sqrt{2} e^{-\frac{c^2}{4}} e^{-t^2} \right) \quad (6)$$

c 为常数且取较大值时,可省略第2项。其子小波为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) \quad (a, b \in \mathbb{R} \text{ 且 } a \geq 0) \quad (7)$$

小波周期 T 表达式为:

$$T = \left(\frac{4\pi}{c + \sqrt{2} + c^2} \right) a = 1.144a \quad (8)$$

当常数 c 取6.2时,伸缩尺度 a 与周期 T 在数值上近似相等,可以利用小波进行周期性分析。

将时域上所有关于 a 的小波变换系数平方并积分,可得小波方差,其表达式为:

$$W_f(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (9)$$

Morlet小波对径流序列小波分解后进行多时间尺度分析。小波分析方法随尺度 a 的变化过程称为小波方差图,其可以反映某一水文序列的多时间尺度波动以及能量随尺度变化的分布。小波方差图中曲

线的局部最优优点反映该序列的主要时间尺度,即主要周期^[17]。

2 结果与分析

2.1 径流年际变化

且末水文站1957—2021年65 a的实测年径流资料显示,多年平均流量为 $18.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,多年平均径流量为5.901亿 m^3 。由图2分析可知,1957—2021年车尔臣河径流量呈现上升趋势。

通过对且末水文站1957—2021年共65 a实测年径流量数据进行分析,得出其主要特征值(见表1)。且末水文站径流系列的变差系数(Cv)较小,为0.34,表明车尔臣河年际变化相对稳定,偏差系数(Cs)为1.14。车尔臣河以冰川积雪融水补给为主,年极值比

为3.8。

2.2 径流趋势特征

利用M-K趋势检验法检验径流时间序列的变化趋势特征、显著性及突变点^[18-19],结果见图3。图3分析表明,1957—2021年车尔臣河径流整体呈显著增加趋势,其中在1957—2003年处于上升、下降的波动状态,且呈下降趋势的径流量居多,而在2003年后径流量整体呈增加趋势,且在2013年开始超过了临界值,表示为显著增加;在2008年UF与UB两条曲线产生了交点,在临界值内两条统计量曲线的交点即为突变开始时间,即径流量在2008年发生了突变。

2.3 径流周期性变化

采用小波分析对车尔臣河1957—2021年共65 a的径流序列进行分析,小波方差图和小波等值线图见

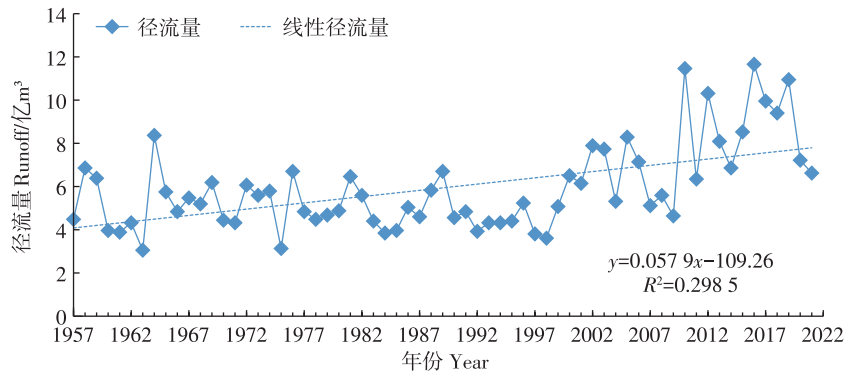


图2 1957—2021年车尔臣河径流变化

Figure 2 Changes in runoff of Che'erchen River from 1957 to 2021

表1 车尔臣河年径流量多年变化特征值

Table 1 Annual runoff characteristic of the Che'erchen River

多年平均年径流量 Average annual runoff/(亿 m^3)	变差系数 Coefficient of variation	最大年径流量 Maximum annual runoff			最小年径流量 Minimum annual runoff			最大与最小年径流比 Ratio of the maximum to the minimum runoff
		时间 Time	径流量 Annual runoff/亿 m^3	与多年平均比 Compared to the annual average	时间 Time	径流量 Annual runoff/亿 m^3	与多年平均比 Compared to the annual average	
5.94	0.34	2016年	11.662	1.96	1963年	3.070	0.52	3.8

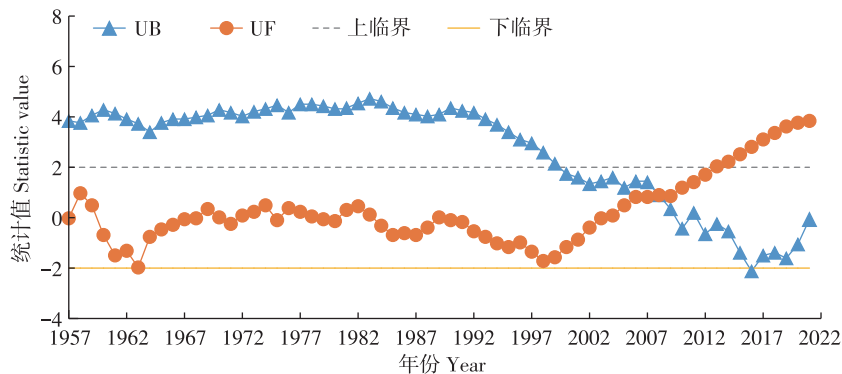


图3 1957—2021年车尔臣河径流M-K趋势检验

Figure 3 M-K trend test of Che'erchen River runoff from 1957 to 2021

图4和图5。从小波方差图分析可以看出,车尔臣河径流过程存在两个主周期,分别为11 a和19 a,通过小波实部图可以看出在11 a和19 a的主周期下还存在7 a和11 a小周期。

2.4 径流丰枯变化

径流丰枯程度的判定一般采用《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)中的划分标准,通常采用距平百分率(P)表示:当 $P>20\%$ 时,为丰水;当 $10\%<P\leq 20\%$ 时,为偏丰;当 $-10\%\leq P\leq 10\%$ 时,为平水;当 $-20\%\leq P<-10\%$ 时,为偏枯;当 $P<-20\%$ 时,为枯水。在指导生产实践时,一般先根据年径流量计算出相应的模比系数(K_r 值),之后依据模比系数判别河流丰、平、枯变化程度。

由表2可见,车尔臣河且末水文站各年径流量中,丰水年占比29%(其中特丰年占20%,偏丰年占9%),平水年占比23%,枯水年占比48%(其中特枯年占34%,偏枯年占14%)。将多年径流量按从大到小排序后,其中丰水年中特丰年临界为2020年,径流量为7.203亿 m^3 ,偏丰年临界为2021年,径流量为6.630亿 m^3 ;平水年临界为2004年,径流量为5.319亿 m^3 ;偏枯年临界为1991年,径流量为4.820亿 m^3 ,特枯年临界为1963年,径流量为3.070亿 m^3 。

综合分析可知,丰水年来水量临界值为6.630亿 m^3 ,平水年来水量临界值为5.319亿 m^3 ,枯水年来水量临界值为4.820亿 m^3 。

2.5 降水和气温变化

基于且末气象站收集的多年气象要素数据,对1957—2016年以来的降水量与气温进行分析,结果见图6与图7。由图分析可知,降水量呈波动增加趋势,其中降水量最大的年份为2007年,降水量为54.3 mm;气温总体也呈现增加趋势。

对且末气象站降水量和气温的长时间序列进行分析,结果见图8和图9。分析表明从1963年开始降水量呈上升趋势,在2010—2016年达到显著性水平,呈现显著上升趋势;气温于1960年呈下降趋势,直到1979年气温开始呈上升趋势,且于1990年超过临界值,表现为显著上升。

2.6 主要水文要素关系分析

1957—2021年,车尔臣河径流量整体呈显著增加趋势,这与降水量和气温的变化趋势表现一致。其中径流系列在1957—2003年间处于上升、下降的波动状态,而在2003年后径流整体呈增加趋势,且在2013年超过临界值,表现为显著增加。由图3分析可

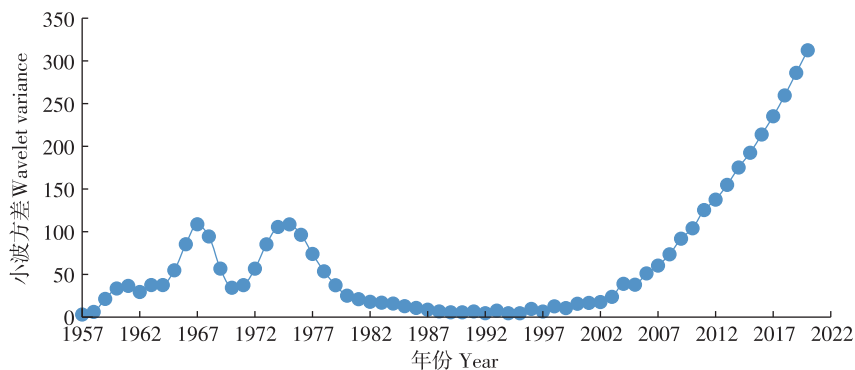


图4 小波方差图

Figure 4 Wavelet variance

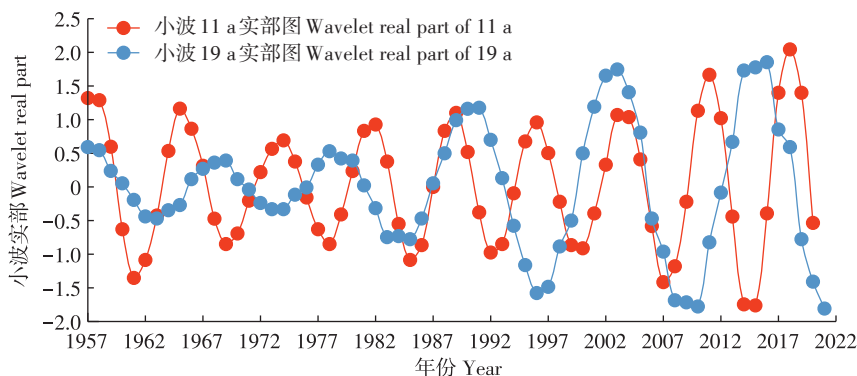


图5 小波11 a和19 a实部图

Figure 5 Wavelet real part of 11 a and 19 a

见,径流系列在2008年与UF和UB两条曲线产生了交点,表明在此时间点发生了突变,即径流量在2008年发生突变,这与降水量在2006年发生显著增加呈现出一致性。根据图3、图8与图9可以看出,车尔臣河流域径流突变发生在2008年,气温突变发生在1993年,而降水突变分别发生在1964年与2012年,三者突变年份均不一致,这表明车尔臣河径流突变原因复杂,除受气候变化影响,人类活动可能对其也产生了重要影响。

通过对流域气候变化与径流进行皮尔逊相关性分析可知,流域年径流量与降水量、温度之间存在显

著相关性,相关系数分别为0.355、0.413(置信度为0.05,样本数量为60)。车尔臣河水主要来源为上游山区冰雪融水,受源流气温升高影响,冰雪融化加快,导致径流增加,这间接证明了气候变化会影响径流从而起到调节作用。

3 讨论

由于车尔臣河流域仅有1个水文站、1个气象站点,且均布设在出山口以下的平原区,缺乏高山区水文气象长期观测资料,站点数据代表性不足,从而导致本研究成果不足以全面反映径流与气温、降水的内

表2 车尔臣河各年径流量丰枯程度
Table 2 Annual runoff range of the Che'erchen River

时间 Time	类别 Type	水平年 Level year
1957年、1960—1963年、1970年、1971年、1975年、1978年、1979年、1983—1985年、1987年、1990年、1992—1995年、1997—1998年、2009年	特枯	枯水年
1966年、1968年、1977年、1980年、1986年、1991年、1996年、1999年、2004年、2007年	偏枯	枯水年
1959年、1965年、1967年、1969年、1972—1974年、1981—1982年、1988年、2000年、2001年、2008年、2011年	平水年	平水年
1958年、1976年、1989年、2006年、2014年、2021年	偏丰	丰水年
1964年、2002—2003年、2005年、2010年、2012—2013年、2015—2020年	特丰	枯水年

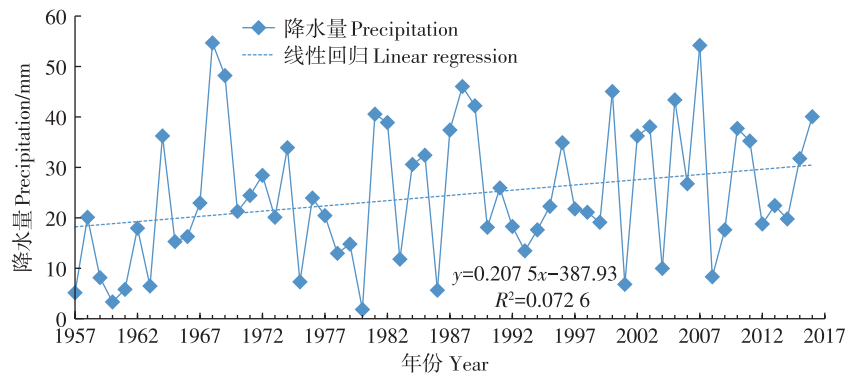


图6 且末气象站降水量变化
Figure 6 Precipitation change at Qiemo meteorological station

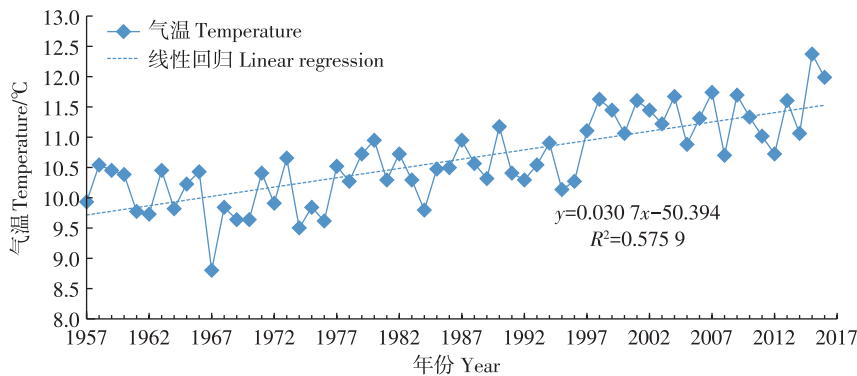


图7 且末气象站平均气温变化
Figure 7 Average temperature change at Qiemo meteorological station

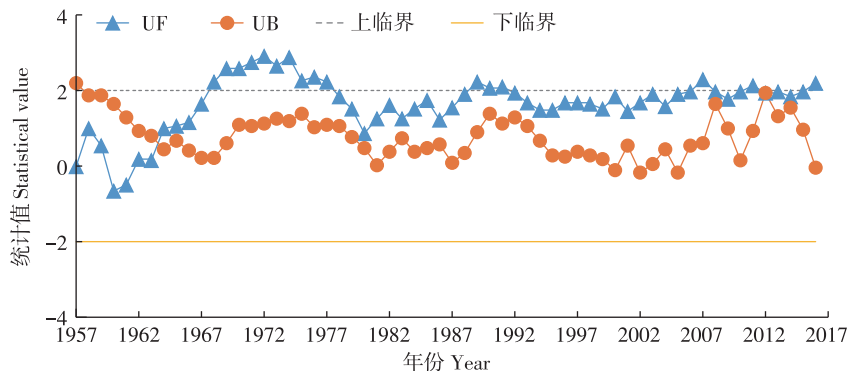


图8 且末气象站降水M-K趋势检验

Figure 8 M-K trend test of precipitation at Qiemo meteorological station

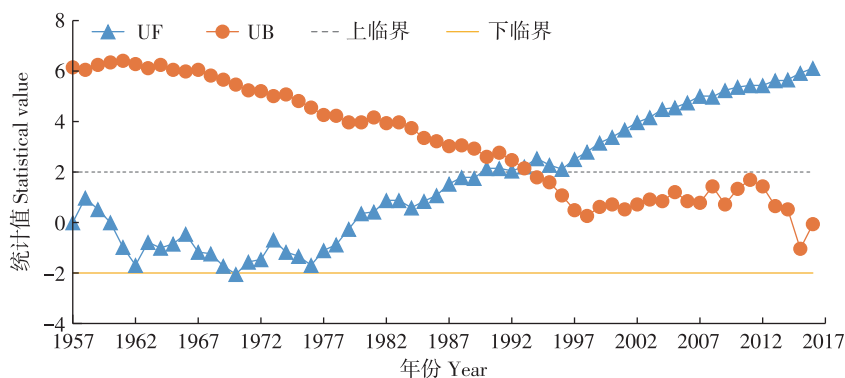


图9 且末气象站平均气温M-K趋势检验

Figure 9 M-K trend test of average temperature at Qiemo meteorological station

在响应关系,下一步应着重开展山区径流与气温、降水的监测与分析^[20],以及气候变化背景下流域生态系统服务价值及生态保护修复相关研究。

本文仅探讨了气候变化对车尔臣河径流变化趋势及演变规律的影响,而径流变化还受到人类活动(如水利工程建设、农业灌溉、水土保持等)的影响,因此考虑气候变化和人类活动叠加对径流变化的综合影响(包括定量分析人类活动、气候变化对径流的影响程度等)也是一个需要开展研究的问题^[21]。

车尔臣河径流组成中,冰川融雪占比较大^[22]。在全球气候变暖、冰川融雪加剧的背景下,未来车尔臣河来水更加具有不确定性。开展源流区冰川融雪调查、建立冰川融雪径流模型、提高模型预报精度,同时规划建设山区水库,增加水库调蓄水量,以实现流域水资源优化配置,为经济社会高质量发展提供水资源支撑,也是亟需开展的一项工作。

4 结论

(1)通过对且末水文站 1957—2021 年 65 a 径流

长时间序列进行年际变化分析,得到径流系列的变差系数为 0.34,表明车尔臣河年际变化相对稳定,偏差系数为 1.14。

(2)车尔臣河 1957—2021 年间径流量整体呈显著增加趋势,其中 1957—2003 年处于上升、下降的波动状态,且呈下降趋势的径流量居多,而在 2003 年后径流量整体呈增加趋势,且径流量在 2008 年发生突变。

(3)通过对小波方差图和小波等值线图分析得到车尔臣河径流过程存在 11 a 和 19 a 的显著主周期,在主周期内还存在 7 a 和 11 a 的小周期。

(4)基于距平百分率法分析得到丰水年来水量为 6.630 亿 m^3 ,平水年来水量为 5.319 亿 m^3 ,枯水年来水量为 4.820 亿 m^3 。

(5)车尔臣河降水呈波动上升趋势,其中降水最大年份为 2007 年,降水量为 54.3mm;气温也呈增加趋势。降水在 2010—2016 年呈现显著上升趋势;气温开始呈下降趋势,直到 1979 年开始呈上升趋势,且于 1990 年超过临界值,表现为显著上升。

参考文献:

- [1] 陈沛源, 俞巧, 李金文, 等. 1957—2016年泾河干流径流量变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 22-27. CHEN P Y, YU Q, LI J W, et al. Changes of runoff in the Jinghe River Basin in 1957—2016[J]. *Yellow River*, 2022, 44(8): 22-27
- [2] 任婵月, 张艺帆, 李正阳, 等. 全球主要流域径流变化趋势分析与定量归因[J]. 地球科学, 2023, 48(9): 3518-3525. REN C Y, ZHANG Y F, LI Z Y, et al. Evaluation and quantitative attribution of streamflow trends over the global major river basins[J]. *Earth Science*, 2023, 48(9): 3518-3525.
- [3] 王玉雪, 李波, 王懂妍, 等. 基于Mann-Kendall检验法的北运河流域降水和径流变化趋势分析[J]. 北京水务, 2022(1): 24-28. WANG Y X, LI B, WANG J Y, et al. Analysis on variation trend of precipitation and runoff in the North Canal Basin based on Mann-Kendall test [J]. *Beijing Water*, 2022(1): 24-28.
- [4] 韩梅, 张海龙, 杜雪梅. 变化环境下枣庄市降水径流演变趋势分析[J]. 治淮, 2021(7): 13-15. HAN M, ZHANG H L, DU X M. Analysis on evolution trend of precipitation runoff in Zaozhuang City under changing environment[J]. *Zhihuai*, 2021(7): 13-15.
- [5] 肉孜买买提·阿不来提. 新疆某河流域气温、降水变化趋势分析及径流响应关系[J]. 陕西水利, 2019(5): 56-58. ROUZIMAIMAITI A B L T. Analysis of the trend of temperature and precipitation changes and runoff response relationship in a certain river basin in Xinjiang[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2019(5): 56-58.
- [6] 张琳娜. 彬州市降雨径流变化趋势分析[J]. 陕西水利, 2022(1): 73-75. ZHANG L N. Analysis of the trend of rainfall runoff changes in Binzhou City[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2022(1): 73-75.
- [7] 吕乐婷, 韩月驰, 高晓琴. 汤河流域降水径流变化趋势分析[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2020, 43(3): 372-380. LÜ L T, HAN Y C, GAO X Q. Trend analysis of precipitation and runoff in Tanghe River basin[J]. *Journal of Liaoning Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 43(3): 372-380.
- [8] 曹志宏, 岳斌. 清源河流域降水与径流变化趋势分析[J]. 地下水, 2018, 40(4): 197-198. CAO Z H, YUE B. Analysis of the trends of precipitation and runoff changes in the Qingyuan River Basin[J]. *Ground water*, 2018, 40(4): 197-198.
- [9] 周海鹰, 沈明希, 陈杰, 等. 塔里木河流域60 a来天然径流变化趋势分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 221-229. ZHOU H Y, SHEN M X, CHEN J, et al. Trends of natural runoffs in the Tarim River Basin during the past 60 years[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(2): 221-229.
- [10] 王军, 李和平, 鹿海员, 等. 典型草原地区降水-径流演变趋势分析[J]. 水文, 2017, 37(4): 86-90. WANG J, LI H P, LU H Y, et al. Variation of precipitation and runoff in typical grassland area[J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(4): 86-90.
- [11] 黄惠娟, 王毓森, 杨勇. 泾河干流上游降水和径流变化趋势分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2017, 53(6): 6-8. HUANG H J, WANG Y S, YANG Y. Analysis of the trends of precipitation and runoff changes in the upstream of the Jing River main stream[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2017, 53(6): 6-8.
- [12] 陈玉壮, 管仪庆, 谢悦波, 等. 海流兔河流域径流变化的周期和趋势分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 45-50. CHEN Y Z, GUAN Y Q, XIE Y B, et al. Period and trend analysis of streamflow change of Hailiutu River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(2): 45-50.
- [13] 刘永国. 清源河流域径流长期演变规律及趋势分析[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(2): 25-29. LIU Y G. Analysis long-term runoff evolution law and trend analysis of in Qingyuan River Basin[J]. *Water Resources Development and Management*, 2022, 8(2): 25-29.
- [14] 可灏, 贾本有, 王文卓, 等. 基于IPTA的黄河流域天然月径流趋势分析[J]. 水文, 2021, 41(6): 18-25. KE H, JIA B Y, WANG W Z, et al. Natural runoff trend analysis of the Yellow River Basin based on IPTA[J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(6): 18-25.
- [15] 赵丽霞, 徐十锋, 赵旭, 等. 黄河伊洛河流域径流变化特性及趋势分析[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(12): 70-73. ZHAO L X, XU S F, ZHAO X, et al. Analysis on runoff variation characteristics and trend in Yiluo River Basin in Henan Province[J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(12): 70-73.
- [16] 曹明军. 石羊河水系红水河径流变化趋势分析[J]. 地下水, 2020, 42(6): 176-177. CAO M J. Analysis of the trend of runoff changes in the Hongshui River of the Shiyang River system[J]. *Ground water*, 2020, 42(6): 176-177.
- [17] 王万祯. 石羊河流域主要河流径流演变特征及趋势分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2020, 56(7): 11-15. WANG W Z. Analysis of the characteristics and trends of runoff evolution of main rivers in the Shiyang River Basin[J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2020, 56(7): 11-15.
- [18] 刘静, 龙爱华, 李江, 等. 近60年塔里木河三源流径流演变规律与趋势分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 10-17. LIU J, LONG A H, LI J, et al. Analysis on runoff evolution laws and trends of three source-streams of Tarim River in recent 60 years[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(12): 10-17.
- [19] 陈立华, 刘为福, 冷刚, 等. 西江干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 74-81. CHEN L H, LIU W F, LENG G, et al. Study on interannual and annual variation characteristics of runoff in the main stream of Xijiang River[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4): 74-81.
- [20] 刘军. 多年气候影响下库山河流域径流演变规律与趋势分析[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(5): 81-88. LIU J. Analysis on the evolution principle and trend of runoff in Kushan River Basin under the influence of climate for many years[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2021, 46(5): 81-88.
- [21] 刘卫国, 常浩娟. 近60年玛纳斯河流域径流趋势分析和流量预测[J]. 陕西水利, 2016(6): 151-153. LIU W G, CHANG H J. Analysis of runoff trends and discharge prediction in the Manas River Basin over the past 60 years[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2016(6): 151-153.
- [22] 邹朝望, 尹耀锋, 孙媛媛. 气候变化下南疆地区径流变化趋势分析[J]. 人民珠江, 2016, 37(1): 60-63. ZOU C W, YIN Y F, SUN Y Y. Analysis on runoff variation trends in south Xinjiang of climate change[J]. *Pearl River*, 2016, 37(1): 60-63.