

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.016.

魏霞, 杨正华, 张振鹏, 等. 疏勒河流域径流量和输沙量变化规律[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 144-150.

Wei Xia, Yang Zhenghua, Zhang Zhenpeng, et al. Study on the Variation Characteristics of Runoff and Sediment in Shule River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 144-150.

## 疏勒河流域径流量和输沙量变化规律

魏霞<sup>1</sup>, 杨正华<sup>2</sup>, 张振鹏<sup>1</sup>, 路志强<sup>1</sup>, 孙超<sup>3</sup>, 王强<sup>2</sup>, 牟极<sup>2</sup>, 马春霞<sup>2</sup>

(1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2. 甘肃省水利厅 水土保持中心, 兰州 730020; 3. 甘肃省水文站, 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 探索疏勒河流域水沙变化特性, 可为国家实施西部生态安全战略提供科学支撑。[方法] 基于疏勒河流域昌马堡、潘家庄、党城湾 3 个水文站的实测径流量和输沙量序列资料, 运用滑动平均、Mann-Kendall 突变趋势检验和小波分析法等方法, 分析了疏勒河流域径流量和输沙量变化规律。[结果] 疏勒河流域年径流量和年输沙量均呈递增趋势, 且输沙量增大趋势大于径流量, 昌马堡、潘家庄、党城湾 3 个水文站径流量分别在 1999 年、2016 年、1982 年发生突变, 昌马堡和潘家庄年输沙量突变均发生在 1998 年, 党城湾输沙量没有突变; 疏勒河流域 3 个代表站的径流量和输沙量都呈现出多时间尺度的演化特征, 昌马堡径流量主周期为 58 a, 31 a, 14 a, 9 a 和 5 a, 输沙量主周期为 48 a, 23 a, 14 a, 7 a 和 5 a, 潘家庄径流量主周期为 59 a, 32 a, 14 a, 输沙量主周期为 37 a, 14 a, 8 a 和 5 a, 党城湾径流量主周期为 42 a 和 5 a, 输沙量主周期为 16 a 和 8 a。[结论] 疏勒河流域水沙总体呈递增趋势, 且存在明显的周期变化, 除党城湾的输沙量没有突变发生以外, 其余站点水沙均有突变发生, 同一水文站输沙量的突变的发生滞后于径流量的突变。

**关键词:** M-K 检验法; 小波分析; 径流量; 输沙量; 疏勒河

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0144-07

## Study on the Variation Characteristics of Runoff and Sediment in Shule River Basin

Wei Xia<sup>1</sup>, Yang Zhenghua<sup>2</sup>, Zhang Zhenpeng<sup>1</sup>, Lu Zhiqiang<sup>1</sup>,  
Sun Chao<sup>3</sup>, Wang Qiang<sup>2</sup>, Mu Ji<sup>2</sup>, Ma Chunxia<sup>2</sup>

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University,  
Lanzhou 730000, China; 2. Center of Soil and Water Conservation, Gansu Provincial Department of  
Water Resources, Lanzhou 730020, China; 3. Hydrological Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the variation law of the long-term measured runoff and sediment load series, and to provide scientific support for the implementation of the western ecological security strategy by the country. [Methods] The linear trend estimation and moving average, Mann Kendall nonparametric test method, wavelet analysis method, were applied to analyze the measured data of annual runoff and sediment load series at Changmapu, Panjiazhuang, and Dangchengwan stations in the Shule River Basin. [Results] (1) Both the annual runoff and sediment discharge of Shule River basin was increasing, however, the increasing trend of runoff was more significant than sediment discharge. The annual runoff of Changmapu, Panjiazhuang, and Dangchengwan stations had an obvious turning point in 1999, 2016 and 1982, respectively. The annual sediment discharge of Dangchengwan did not have sudden changes, and the sudden changes in the annual sediment discharge of Changmapu and Panjiazhuang all occurred in 1998. (2) The runoff and sediment discharge of the three representative stations in the Shule River basin all

收稿日期: 2023-01-17

修回日期: 2023-03-01

资助项目: 甘肃省水利厅 2022 年度第一批省级水资源费项目“疏勒河干流水循环机理及流域生态健康研究”

第一作者: 魏霞(1980—), 女, 陕西扶风县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文学及水资源学等方面的研究。E-mail: weix@lzu.edu.cn

通信作者: 杨正华(1963—), 男, 甘肃宁县人, 本科, 正高级工程师, 主要从事水土流失综合治理方面的工作。E-mail: 172984025@qq.com

<http://stbcj.paperonce.org>

showed the evolution characteristics of multiple time scales. Wavelet analysis indicated periodicities of 58 years, 31 years, 14 years, 9 years and 5 years for annual runoff and periodicities of 48 years, 23 years, 14 years, 7 years and 5 years for annual sediment load in Changmapu. There were periodicities of 59 years, 32 years and 14 years for annual runoff and periodicities of 37 years, 14 years, 8 years and 5 years for annual sediment load in Panjiazhuang station. There were periodicities of 42 years and 5 years for annual runoff and periodicities of 16 years and 8 years for annual sediment load in Dangcheng station. [Conclusion] The overall trend of water and sediment in the Shule River Basin is increasing, and there is a significant periodic change. Except for the sediment transport in Dangchengwan, all other stations have sudden changes in water and sediment transport. Moreover, the sudden change in sediment transport at the same hydrological station lags behind the sudden change in runoff.

**Keywords:** Mann-Kendall test; wavelet analysis; runoff; sediment load; Shule River

径流和输沙是一种重要的水文现象,径流量和输沙量变化是全球共同关注的问题<sup>[1]</sup>。作为重要地表水资源的径流量是制约西北干旱地区可持续发展的主要瓶颈<sup>[2-4]</sup>。输沙量客观反映流域水土流失强度变化的重要指标<sup>[5]</sup>,是河流健康和水环境影响的重要因素<sup>[6]</sup>。径流量和输沙量主要受流域气候条件、下垫面类型和人类活动强度等因素影响<sup>[5,7]</sup>。近年来,在全球变暖和高强度人类活动影响的大背景下,流域水文气象和下垫面条件发生了剧烈变化,致使一些河流的径流量和输沙量大幅减少,尤其是黄河流域的输沙量从 20 世纪每年 16 亿 t 锐减至 21 世纪的每年 2.5 亿 t 左右<sup>[6-8]</sup>。但内陆河流域水系的径流量和输沙量变化趋势却不相同,比如,石羊河年径流总体呈明显下降趋势,黑河呈略有增加趋势<sup>[9]</sup>。疏勒河位于祁连山西段,是河西走廊第二大内陆河水系<sup>[10-11]</sup>,在我国西部生态安全和发展中有着十分重要的战略地位<sup>[2,12]</sup>。然而,目前,有关疏勒河的研究主要集中在上游出山径流的变化及其对气候变化的影响方面<sup>[13-16]</sup>,对疏勒河流域径流量和输沙量变化规律的系统研究较少涉及。鉴于此,本文分析疏勒河流域径流输沙变化的趋势性、突变性和周期性等规律,研究对区域生态环境修复治理、西部生态安全战略实施具有重要意义。

表 1 疏勒河流域代表水文站特征值

Table 1 Hydrological Characteristic Values of Representative Stations in Shule River Basin

河名	站名	东经	北纬	流域 面积/km <sup>2</sup>	年降雨量/ mm	年均径流量/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	资料系列 长度	年输沙量/ 10 <sup>4</sup> t	资料系列 长度
昌马河	昌马堡	96°51'00"	39°49'27"	10961	95.8	9.91	1956—2016	340.17	1956—2016
疏勒河	潘家庄	96°31'33"	40°33'02"	18496	52.0	2.79	1956—2016	220.30	1959—2016
党河	党城湾	96°19'21"	40°33'29"	14325	158.8	3.66	1966—2016	74.78	1972—2016

## 2.2 研究方法

采用线性趋势分析和 5 a 滑动平均方法,分析年径流和年输沙年际变化趋势并检验其显著性水平,具体方法描述见文献<sup>[1,19]</sup>;采用 Mann-Kendall (M-K)

## 1 研究区概况

疏勒河流域位于祁连山西段,位于东经 96°15'—98°30'E,北纬 39°40'—41°00'N,东起白杨河,西止于党河,是河西走廊三大内陆河流域之一,干流全长 945 km,流域面积 4.13 万 km<sup>2</sup>,党河是其最大的支流<sup>[5]</sup>。流域属典型大陆性荒漠型气候,四季多风,冬季寒冷,昼夜温差大,是我国极度干旱的地区之一。年均降水量为 40.2~57.5 mm,主要集中在 6—9 月<sup>[17]</sup>,年均蒸发量为 2 577.4~2 653.2 mm,年均气温为 6.9~8.8℃<sup>[18]</sup>。植被覆盖差,以戈壁和裸岩石质地为主,生态环境十分脆弱。流域内有世界文化遗产——莫高窟、月牙泉、阳关和玉门关等,是我国“一带一路”生态文明建设实施的重要节点区域<sup>[18]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

根据收集到的径流泥沙资料,本研究选取疏勒河干流的昌马堡站、潘家庄站,党河的党城湾站等 3 个水文站的实测径流泥沙资料进行分析。表 1 为所选水文站详细信息。

非参数突变检验分析法确定年径流量和年输沙量存在的突变点,具体计算方法详见参考文献<sup>[1,20-21]</sup>;采用小波分析法研究径流输沙周期变化特征,具体计算方法详见参考文献<sup>[22-23]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 径流量和输沙量趋势分析

图1和图2分别为所选疏勒河流域3个代表性水文站实测年径流量和年输沙量线性趋势和滑动平均变化图。由图1A可知,1956—2016年昌马堡站的实测年径流量呈明显增大趋势( $p < 0.001$ )。从5a滑动曲线可知,1972—1997年昌马堡年径流量偏小,年平均径流量为 $8.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,1998年后的径流量明显增加,1998—2016年的年平均径流量为 $13.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,相比1972—1997年增加了48.4%。由图1B可知,潘家庄1956—2016年的实测径流量呈现上升趋势,且通过了0.05显著性检验。从5a滑动曲线可知1972—1976年、1983—1998年的径流量偏小,平均径流量分别为 $2.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ , $2.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,2002年后的径流量明显增加,2002年以后的年径流量为 $3.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,相比1972—1976年、1983—1998年分别增加了62.4%和66.2%。由图1C可知,党城湾1966—2016年实测径流量呈现上升趋势,且通过了0.001显著性检验。从5a滑动曲线可知,1971—1976年和1997—2016年的径流量偏小,年径流量分别为 $3.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ , $3.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,1981—1994年径流量偏大,年平均径流量分别为 $3.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,相比1971—1976年、1997—2016年分别增加了26.8%和3.7%。

由图2A可知,昌马堡1956—2016年的实测年输沙量呈现上升趋势( $p < 0.05$ )。从5a的滑动平均

可知,昌马堡的年输沙量在1973—1976年、1982—1994年、2008—2015年偏小,年均输沙量分别为187.2万t,235.1万t,335.6万t,1995—2007年的输沙量明显增加,年均输沙量为492.8万t,相比1973—1976年、1982—1994年、2008—2015年分别增加了163.2%,109.6%,46.8%。由图2B可知,潘家庄1959—2016年的实测年输沙量呈现上升趋势,但是上升趋势不明显,从5a的滑动平均可知,1972—1976年、1982—1994年、2009—2016年的年输沙量偏小,年输沙量分别为132.14万t,123.71万t,221.75万t,1995—2007年输沙量增加,年输沙量333.92万t,相对于1972—1976年、1982—1994年、2009—2016年增加了152.7%,169.9%,50.6%。由图2C可知,党城湾1972—2016年实测输沙量呈现上升趋势,但上升趋势不明显。从5a滑动曲线可知1982—1994年、2001—2005年、2011—2016年的输沙量偏小,分别为58.82万t,68.7万t,1996—2000年、2006—2010年的年输沙量较大,分别为93.38万t,124.54万t。

综上所述,疏勒河流域3个代表水文站的径流量都呈现显著的增加趋势,昌马堡站、潘家庄站和党城湾站的径流量分别通过了0.001,0.05,0.001的显著性检验。疏勒河流域3个代表水文站的输沙量都呈现增加趋势,但仅有昌马堡站的输沙量递增趋势通过了0.05显著性水平检验,其余两站的递增趋势均不显著。此外,由图1A和1B的纵坐标可知,疏勒河干流从上游到下游径流量和输沙量均呈现逐渐减小的趋势。

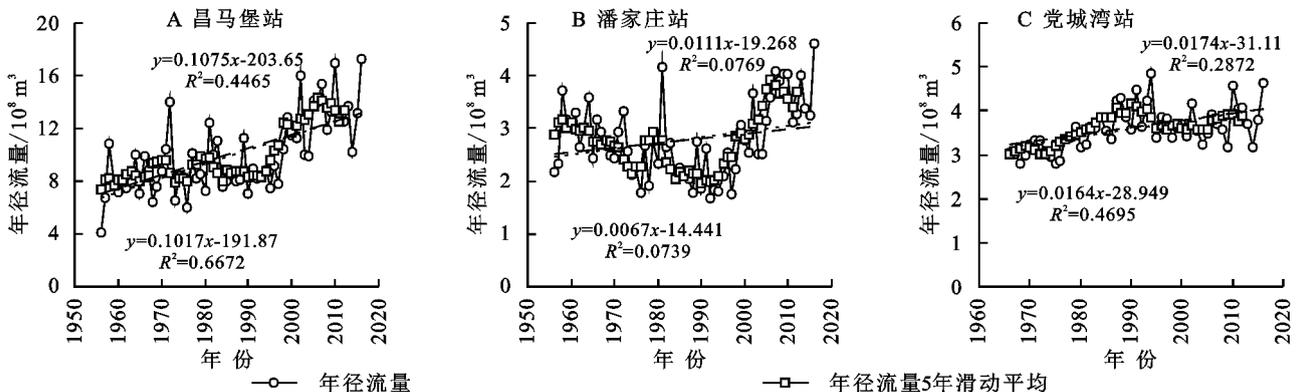


图1 疏勒河流域代表水文站径流量线性趋势和滑动平均

Fig. 1 Linear trend and sliding average of runoff of representative hydrological stations in Shule River Basin

#### 3.2 径流量和输沙量突变分析

图3和图4为3个水文站年径流量和年输沙量的Mann-Kendall(MK)统计量序列图。由图3A可知,昌马堡站年径流量M-K值的UF曲线呈波动递增趋势,1998年后呈现显著直线增大趋势,且这种趋势在2001年以后超过0.05显著水平临界线,此外,根据曲线UF和UB交点可知昌马堡站年径流量突

变发生在1999年。

由图3B可知,潘家庄站年径流量M-K值的UF曲线在1956—1997年呈波动递减趋势,且1975年超过0.05显著水平临界线。1998年后呈明显递增趋势,且在1998—2006年递增趋势超过0.05显著性水平临界线;由曲线UF和UB交点可知,潘家庄站年径流量在2016年发生突变。由图3C可知,党城湾

站年径流量 M-K 值的 UF 曲线在 1968 年后呈递减趋势,这种趋势在 1984 年后超过 0.05 显著水平临界

线;由曲线 UF 和 UB 交点可知,党城湾站年径流量在 1981 年发生突变。

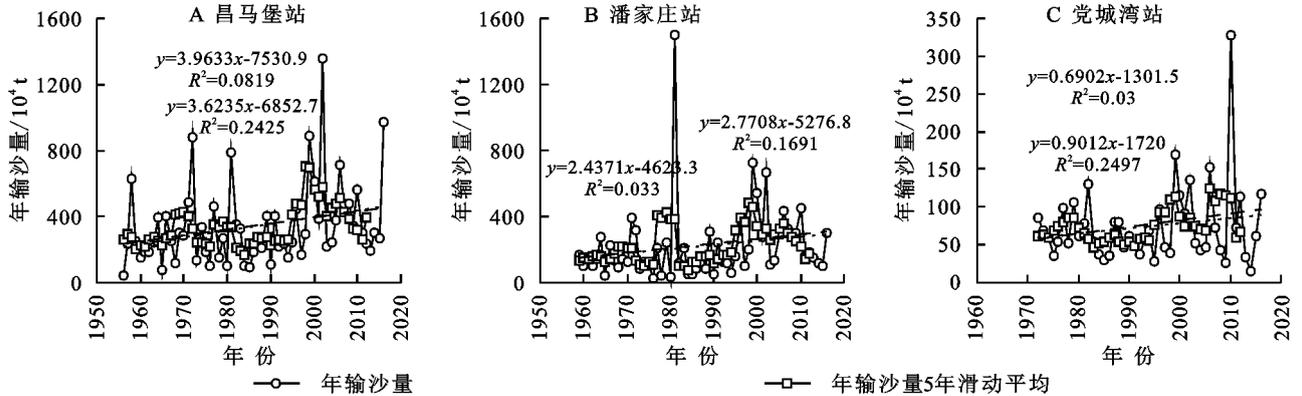


图 2 疏勒河流域代表水文站输沙量线性趋势和滑动平均

Fig. 2 Linear trend and sliding average of sediment discharge of representative hydrometric stations in Shule River Basin

由图 4A 可知,昌马堡站输沙量 M-K 值的 UF 曲线呈波动上升趋势,且这种趋势在 2010—2012 年超过 0.05 显著水平临界线,根据 UF 和 UB 交点可知,昌马堡站输沙量突变发生在 1998 年。由图 4B 可知,潘家庄站年输沙量 M-K 值的 UF 曲线在 1959—1962 年呈显著下降趋势,年输沙量递减,1962 年后呈波动式递增趋势,表明潘家庄年输沙量呈上升趋势,但这种趋势仅在 2010—2012 年超过 0.05 显著水平临界线,由曲线 UF 和 UB 交点可知,潘家庄站年输沙量突变发生在 1998 年。由图 4C 可知,党城湾站年输沙量 M-K 值的 UF 曲线在 1972—1975 年呈递减趋势,这种趋势在 1973—1975 年超过 0.05 显著水平临界线。1975—2016 年呈现递增趋势,但仅

在 1976 年超过 0.05 显著水平临界线。由于曲线 UF 和 UB 无交点,故党城湾站年输沙量无突变发生。

综上可知,疏勒河流域 3 个代表站的年径流量均发生突变,昌马堡站、潘家庄站和党城湾站的径流量发生突变的年份分别为 1999 年,2016 年,1981 年,疏勒河干流昌马堡站和潘家庄站的输沙量在 1998 年发生突变,但是支流党河党城湾站的输沙量未发生突变。突变的发生与流域的气象因素(降雨和温度)和下垫面人类活动(水库水电站的修建、引水工程、河道采砂等)有关,但是由于未收集到流域内水土保持措施的逐年实施资料,故无法深入分析突变发生主要影响因素,但此研究可为该流域的径流输沙变化规律的归因分析提供重要参考。

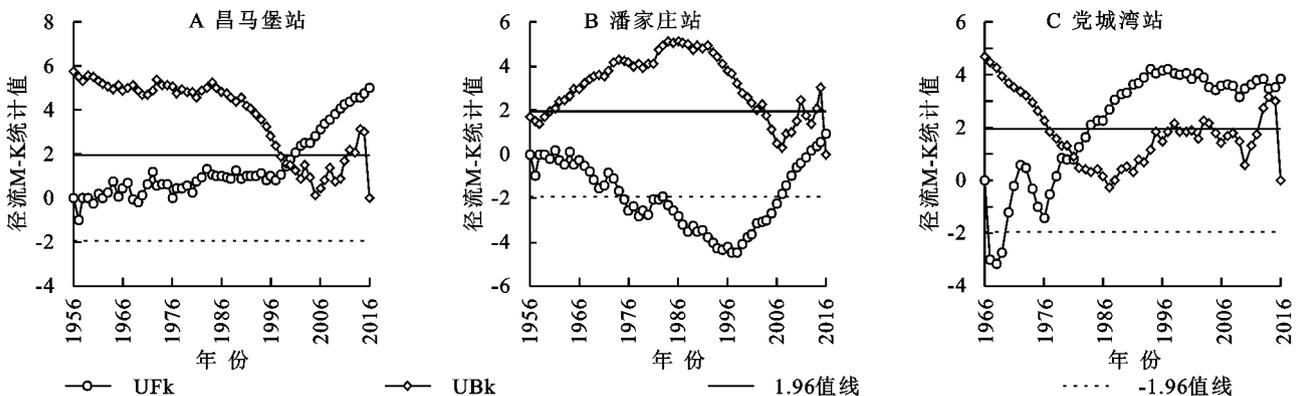


图 3 疏勒河流域代表水文站年径流量 Mann-Kendall 统计值

Fig. 3 Mann Kendall statistical value of annual runoff of representative hydrological stations in Shule River Basin

### 3.3 径流量和输沙量周期分析

通过对 3 个代表性水文站径流量和输沙量小波系数实部等值线分析可得:昌马堡站径流量存在 50~60 a, 25~35 a, 10~15 a, 5~10 a, 0~5 a 共 5 类时间尺度的周期变化。径流在 50~60 a 尺度上经历了由正相位变负相位的循环变化,在 25~35 a 尺度上经历了 5 次振荡,在 10~15 a, 5~10 a, 0~5 a 的

尺度上频繁变化,且具有全局性特征。昌马堡年径流量的主周期为 58 a, 31 a, 14 a, 9 a 和 5 a, 其中, 58 a 主周期的小波方差最大,说明径流在 58 a 时间尺度上周期性最显著, 58 a 时间尺度上的年径流变化周期为 38 a。潘家庄站径流量存在 55~65 a, 30~40 a, 10~15 a 共 3 类时间尺度的周期变化。55~65 a 尺度经历了由正相位变负相位的循环变化,在 30~40 a

尺度经历了5次振荡,在10~15 a尺度具有全局性特征。潘家庄站径流量的主周期为59 a,32 a和14 a,其中,59 a主周期的小波方差最大,说明潘家庄站年径流在59 a时间尺度上周期性最显著,59 a时间尺度上的年径流变化周期为38 a。党城湾实测年径流量变化存在50~60 a,35~50 a,0~8 a共

3类时间尺度的周期变化,党城湾径流量的主周期为55 a,42 a和5 a,其中,55 a主周期的小波方差最大,说明党城湾径流在55 a时间尺度上周期性最显著,但55 a超出了研究时域50 a,故42 a主周期控制着党河径流变化,42 a时间尺度上的年径流变化周期为26 a。

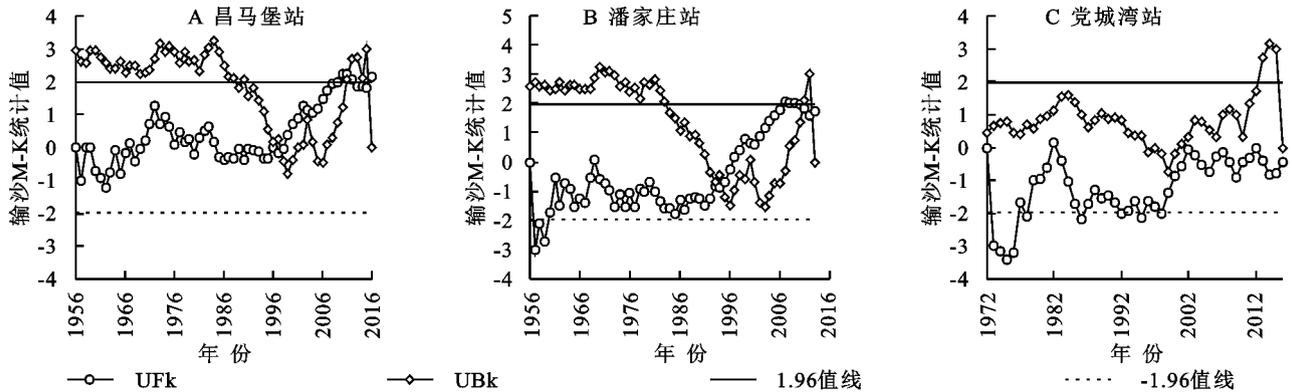


图4 疏勒河流域代表水文站年输沙量 Mann-Kendall 统计值

Fig. 4 Mann Kendall statistical value of annual sediment discharge of representative hydrometric stations in Shule River Basin

输沙量周期特征与径流量周期特征基本一致,存在40~55 a,20~25 a,10~15 a,5~10 a,0~5 a共5类时间尺度的周期变化。10~15 a和0~5 a两个时间尺度具有全局性。输沙量主周期为48 a,23 a,14 a,7 a和5 a,其中,48 a主周期小波方差最大,说明输沙量在48 a时间尺度上周期性最显著,48 a时间尺度上的年输沙量变化周期为32 a。输沙量周期变化与径流量较为一致,存在30~50 a,10~20 a,0~10 a等3类尺度周期变化,其中30~50 a和10~20 a经历了5次振荡,在0~10 a尺度具有全局特征。潘家庄站输沙量的主周期为37 a,14 a,8 a和5 a,其中,37 a主周期的小波方差最大,说明37 a时间尺度上周期性最显著,37 a时间尺度上的年输沙量变化周期为24 a。党城湾实测输沙量变化存在10~20 a,5~10 a的两类尺度的周期变化,党城湾输沙量的主周期为16 a和8 a,其中,16 a主周期的小波方差最大,说明党城湾径流在16 a时间尺度上的周期性最显著,16 a时间尺度上的年输沙量变化周期为10 a。

综上所述,疏勒河流域3个代表站昌马堡站、潘家庄站和党城湾站的径流量和输沙量都呈现出多时间尺度的演化特征,昌马堡站的径流量变化主周期分别为58 a,31 a,14 a,9 a和5 a,第一主周期58 a时间尺度上的年径流变化周期为38 a,输沙量主周期为48 a,23 a,14 a,7 a和5 a,第一主周期48 a时间尺度上的年输沙量变化周期为32 a;潘家庄站流量变化的主周期为59 a,32 a和14 a的周期性,第一主周期

59 a时间尺度上的年径流变化周期为38 a,输沙量主周期为37 a,14 a,8 a和5 a,第一主周期37 a时间尺度上的年输沙量变化周期为24 a;党城湾径流量的主周期为42 a和5 a,42 a主周期时间尺度上的年径流变化周期为26 a,输沙量主周期为16 a和8 a,16 a时间尺度上的年输沙量变化周期为10 a。

## 4 讨论

本研究对疏勒河干流和主要支流党河的3个水文站长时间序列的实测年径流量和年输沙量变化规律特征进行了分析,结果表明年径流量和年输沙量都呈现增加趋势,这主要是因为全球变暖,冰川积雪消融的缘故,因为疏勒河的径流补给一部分来自降雨,一部分来自冰川积雪的消融,研究结果与李培都<sup>[9]</sup>的研究结果一致,均认为疏勒河的径流量存在增加趋势,但有关疏勒河的输沙研究较少,严宇红的研究也认为疏勒河的输沙存在递增趋势<sup>[6]</sup>。

研究表明昌马堡站、潘家庄站和党城湾站实测年径流量突变的分别发生于1999年、2016年和1982年,昌马堡站和潘家庄站的输沙量突变均发生于1998年,党城湾的输沙没有突变。已有关于疏勒河径流泥沙突变的研究有,孙美萍等认为昌马堡站径流量在1999年发生突变<sup>[2]</sup>,郭小琴等认为党城湾站径流量在1977年发生突变<sup>[24]</sup>,孙栋元等认为昌马堡站和潘家庄站年流量分别于1998年、2012年突变<sup>[10]</sup>,李培都等认为昌马堡站、潘家庄站和党城湾站径流量分

别于 2004 年、2010 年、1983 年发生突变<sup>[9]</sup>,严宇红等<sup>[6]</sup>认为昌马堡站、潘家庄站、党城湾站输沙量突变都发生于 1998 年。本研究结果与已有研究结果存在出入的主要原因是所采用的实测径流输沙资料系列长度不同所致,比如严宇红采用的实测资料系列是建站至 2012 年,李培都等<sup>[10]</sup>采用的实测资料系列是 1972—2011 年,孙美萍等<sup>[2]</sup>采用的是 1954—2016 年。

疏勒河流域昌马堡年径流量的主周期为 58 a,31 a,14 a,9 a 和 5 a,潘家庄站径流量存在 59 a,32 a,14 a 的周期性,党城湾径流量存在 42 a,5 a 的周期性。昌马堡年输沙量主周期为 48 a,23 a,14 a,7 a 和 5 a,潘家庄站输沙量存在 37 a,14 a,8 a 和 5 a 的周期性,党城湾输沙量存在 16 a,8 a 的周期性。这个结果与李培都等<sup>[9]</sup>对疏勒河流域径流周期变化的研究所得结论基本一致。存在出入的主要原因还是采用时间系列不同,李培都等采用的实测资料系列是 1972—2011 年。

## 5 结论

(1) 3 个水文站的径流量和输沙量均存在增大的趋势,且径流量增大的趋势均大于相应站的输沙量增加趋势,昌马堡站、潘家庄站和党城湾站的径流量增加趋势分别通过了 0.001,0.05,0.001 的显著性检验。仅有昌马堡站的输沙量递增趋势通过了 0.05 显著性水平检验,其余两站的递增趋势均不显著。

(2) 除支流党河党城湾站的输沙量未发生突变以外,3 个水文站的径流量和输沙量均有突变发生,昌马堡站、潘家庄站和党城湾站径流分别在 1999 年、2016 年和 1982 年发生突变,昌马堡站和潘家庄站的输沙量突变均发生于 1998 年;同一水文站输沙量的突变的发生滞后于径流量的突变。

(3) 疏勒河流域 3 个代表站昌马堡站、潘家庄站和党城湾站的径流量和输沙量都呈现出多时间尺度的演化特征,昌马堡径流量主周期为 58 a,31 a,14 a,9 a 和 5 a,潘家庄径流量的主周期为 59 a,32 a,14 a 的周期性,党城湾径流主周期为 42 a 和 5 a。昌马堡输沙量主周期为 48 a,23 a,14 a,7 a 和 5 a,潘家庄输沙量主周期为 37 a,14 a,8 a 和 5 a,党城湾输沙量主周期为 16 a 和 8 a。

### 参考文献:

[1] 张冠华,丁文峰,王一峰,等.2000 年以来长江流域水沙情势变化及成因分析[J].水土保持学报,2020,34(3):98-104,206.  
Zhang G H, Ding W F, Wang Y F, et al. Analysis on water and sediment variation and the driving factors in

Yangtze River Basin since 2000[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):98-104,206.

[2] 孙美平,张磊,姚晓军,等.1954—2016 年疏勒河上游径流变化特征及影响因素[J].冰川冻土,2022,44(2):657-666.  
Sun M P, Zhang L, Yao X J, et al. Characteristics and influencing factors of runoff changes in the upper Shule River basin from 1954 to 2016[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022,44(2):657-666.

[3] 姚檀栋,刘时银,蒲健辰,等.高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J].中国科学 D 辑:地球科学,2004,34(6):535-543.  
Yao T D, Liu S Y, Pu J C, et al. The recent retreat of glaciers in high Asia and its impact on water resources in the northwest[J]. Chinese Science Series D: Earth Science, 2004,34(6):535-543.

[4] 王玉洁,秦大河.气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J].气候变化研究进展,2017,13(5):483-493.  
Wang Y J, Qin D H. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of northwest China: an overview [J]. Climate Change Research, 2017,13(5):483-493.

[5] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.  
Hu C H, Zhang X M, Zhao Y. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load[J]. Advances in Water Science, 2020,31(5):725-733.

[6] 严宇红,黄维东,吴锦奎,等.疏勒河流域泥沙分布规律及水沙关系研究[J].干旱区地理,2019,42(1):47-55.  
Yan Y H, Huang W D, Wu J K, et al. Sediment distribution and runoff-sediment relationship in the Shule River Basin[J]. Arid Land Geography, 2019,42(1):47-55.

[7] 穆兴民,赵广举,高鹏,等.黄土高原水沙变化新格局[M].北京:科学出版社,2019.  
Mu X M, Zhao G J, Gao P, et al. A new pattern of water and sediment changes in the Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2019.

[8] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.  
Zhao Y, Hu C H, Zhang X M, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the Csa), 2018,34(21):112-119.

[9] 邓振镛,张强,王润元,等.河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J].冰川冻土,2013,35(5):1267-1275.  
Deng Z Y, Zhang Q, Wang R Y, et al. A study on im-

- pacts of climate change on runoff of inland rivers and adaptive water resource managements in Hexi Corridor [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5):1267-1275.
- [10] 李培都, 司建华, 冯起, 等. 疏勒河年径流量变化特征分析及模拟[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2):52-60.  
Li P D, Si J H, Feng Q, et al. Analysis and simulation on annual runoff variation characteristics of Shule River [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(2):52-60.
- [11] 孙栋元, 齐广平, 马彦麟, 等. 疏勒河干流径流变化特征研究[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(3):557-567.  
Sun D Y, Qi G P, Ma Y L, et al. Variation characteristics of runoff in the mainstream of Shule River [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3):557-567.
- [12] 杨春利, 蓝永超, 王宁练, 等. 1958—2015 年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析[J]. *地理科学*, 2017, 37(12):1894-1899.  
Yang C L, Lan Y C, Wang N L, et al. Mountainous Runoff Changes and Climate Factors Analysis of the Shule River Basin in 1958—2015 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(12):1894-1899.
- [13] 蓝永超, 胡兴林, 肖生春, 等. 近 50 年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响[J]. *高原气象*, 2012, 31(6):1636-1644.  
Lan Y C, Hu X L, Xiao S C, et al. Study on Climate Change in Mountainous region of Shule River Basin in Past 50 Years and its effect to Mountainous Runoff [J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(6):1636-1644.
- [14] 徐浩杰, 杨太保, 张晓晓. 近 50 年来疏勒河上游气候变化及其对地表径流的影响[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(4):39-45, 52.  
Xu H J, Yang T B, Zhang X X. Climate change in upstream area of Shule River and its effects on Runoff yield in last 50 Years [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(4):39-45, 52.
- [15] 张鹏, 张钰, 罗颖, 等. 疏勒河出山口径流对上游气候变化的响应[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(5):165-172.  
Zhang P, Zhang Y, Luo Y, et al. Response of runoff at mountainous area of Shule river to climate change of upstream [J]. *Journal of Waterresources & Water Engineering*, 2013, 24(5):165-172.
- [16] 贾玲, 张百祖, 牛最荣, 等. 疏勒河上游径流变化与预测分析[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(5):1588-1597.  
Jia L, Zhang B Z, Niu Z R, et al. Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(5):1588-1597.
- [17] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰. 疏勒河上游径流年内分配变化规律分析[J]. *人民黄河*, 2014, 36(6):58-60.  
Zhang X X, Zhang Y, Xu H Z. Changes of annual runoff distribution on the upper reaches of the Shule River [J]. *Yellow River*, 2014, 36(6):58-60.
- [18] 岳东霞, 陈冠光, 朱敏翔, 等. 近 20 年疏勒河流域生态承载力和生态需水研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(14):5178-5187.  
Yue D X, Chen G G, Zhu M X, et al. Biocapacity and ecological water demand in Shule River Basin over the past 20 Years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(14):5178-5187.
- [19] 姜瑶, 徐宗学, 王静. 基于年径流序列的 5 种趋势检测方法性能对比[J]. *水利学报*, 2020, 51(7):845-857.  
Jiang Y, Xu Z X, Wang J. Performance comparison of five trend detection methods based on annual runoff series [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(7):845-857.
- [20] 史红玲, 胡春宏, 王延贵, 等. 黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J]. *人民黄河*, 2014, 36(4):1-5.  
Shi H L, Hu C H, Wang Y G, et al. Analysis on variation trends of runoff and sediment of the Yellow River Basin and reasons discussion [J]. *Yellow River*, 2014, 36(4):1-5.
- [21] 武旭同, 李娜, 王腊春. 近 60 年来长江干流水沙特征分析[J]. *泥沙研究*, 2016, 61(5):40-46.  
Wu X T, Li N, Wang L C. Characteristics of runoff and sediment discharge in Yangtze River in recent 60 years [J]. *Journal of Sediment Research*, 2016, 61(5):40-46.
- [22] 慕丹丹, 褚金镝, 高博. 基于小波变换的黄河宁夏段水沙变化趋势研究[J]. *人民黄河*, 2021, 43(11):65-68, 75.  
Mu D D, Chu J D, Gao B. Evolution law of the runoff and sediment discharge in Ningxia reach of the Yellow River Based on wavelet transform [J]. *Yellow River*, 2021, 43(11):65-68, 75.
- [23] 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.
- [24] 郭小芹, 李岩瑛, 曹玲. 气候变化对疏勒河流域径流量影响研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(35):17595-17598, 17608.  
Guo X Q, Li Y Y, Cao L. Study on the impact of climate changes on the runoff in Shule River Basin [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2009, 37(35):17595-17598, 17608.