

# 黄河中游窟野河流域水沙关系变化特征及其成因分析

刘 强<sup>1,2</sup>, 蔡学娅<sup>1</sup>, 刘君怡<sup>1</sup>, 王 姣<sup>1</sup>, 李恺怡<sup>1</sup>, 张倩倩<sup>1</sup>, 尉飞鸿<sup>1</sup>, 穆兴民<sup>2</sup>

(1.天水师范学院 资源与环境工程学院, 甘肃 天水 741000; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为探讨人类活动和气候变化对窟野河流域水沙情势的影响,基于 1956—2019 年窟野河流域降水量、径流量和输沙量等监测数据,运用累积距平法、双累积曲线等方法对窟野河流域水沙变化的特征及其成因进行了分析。结果表明:窟野河流域降水量随时间变化呈不明显减小趋势,而径流量和输沙量随时间变化却呈显著减小趋势,流域水沙减少的因素不是气候变化引起的降水因素;径流量和输沙量年际变化的转折年份为 1979 年和 1997 年;同基准期 A (1956—1979 年)相比,B 时期(1980—1997 年)气候变化对径流量和输沙量的贡献率分别为 14.25%,14.22%,人类活动对径流量和输沙量的贡献率分别为 85.75%,85.78%,C 时期(1998—2019 年)气候变化对径流量和输沙量的贡献率分别为 8.76%,6.65%,人类活动对径流量和输沙量的贡献率分别为 91.24%,93.35%,降水变化和人类活动都是造成窟野河流域水沙减少的影响因素,其中流域内逐年增强的人类活动是窟野河流域径流和输沙减少的主要因素,而气候变化引起的降水减少是次要因素。

**关键词:**水沙变化; 人类活动; 气候变化; 窟野河流域; 黄河中游

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0068-07

## Variation Characteristics and Causes of Runoff-Sediment Relationship in Kuye River Basin in the Middle Reaches of the Yellow River

LIU Qiang<sup>1,2</sup>, CAI Xueya<sup>1</sup>, LIU Junyi<sup>1</sup>, WANG Jiao<sup>1</sup>,

LI Kaiyi<sup>1</sup>, ZHANG Qianqian<sup>1</sup>, YU Feihong<sup>1</sup>, MU Xingmin<sup>2</sup>

(1.College of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University,

Tianshui, Gansu 741000, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to investigate the impact of human activities and climate change on the runoff and sediment regime in the Kuye River Basin, based on the monitoring data of precipitation, runoff and sediment transport in the Kuye River Basin from 1956 to 2019, cumulative anomaly method and double cumulative curve method were used to analyze the attribution of runoff and sediment change in the Kuye River Basin. The results show that the precipitation in the Kuye River Basin did not decrease significantly with time, but the runoff and sediment transport decreased significantly with time, and the decreasing factor of runoff and sediment was not the precipitation factor caused by climate change; the turning point years of runoff and sediment transport were years of 1979 and 1997; compared with baseline period A (1956—1979), climate change contributed 14.25% and 14.22% to runoff and sediment, and human activities contributed 85.75% and 85.78% to runoff and sediment, respectively in B period (1980—1997); in C period (1998—2019), climate change contributed 8.76% and 6.65% to runoff and sediment, respectively, and human activities contributed 91.24% and 93.35% to runoff and sediment, respectively. Precipitation change and human activities are the influencing factors of runoff and sediment reduction in the Kuye River Basin. The increasing human activity is the main factor to reduce runoff and sediment transport in the Kuye River Basin, while the decrease of precipitation caused by climate change is the secondary factor.

**Keywords:** runoff and sediment discharge changes; human activities; climate change; Kuye River Basin; middle reaches of the Yellow River

收稿日期:2021-05-15

修回日期:2021-06-14

资助项目:国家自然科学基金“黄土区地表产流机制变化对植被恢复的响应”(42077075)

第一作者:刘强(1983—),男,甘肃兰州人,博士,副教授,主要从事区域资源与环境研究。E-mail:guangmingliu1983@163.com

通信作者:穆兴民(1961—),男,陕西华阴人,博士,研究员,博士生导师,主要从事生态水文研究。E-mail:xmmu@ms.iswc.ac.cn

气候变化和人类活动一直以来都是影响流域下垫面的主要因素<sup>[1]</sup>,使流域内的水沙关系发生明显变化<sup>[2]</sup>,是判定河流流域健康甚至于生态平衡的重要指标<sup>[3]</sup>。近年来受气候变化以及黄河流域实施退耕还林还草工程<sup>[4]</sup>、修建水库、修建淤地坝和引水引沙等工程措施的影响<sup>[5]</sup>,使得黄河流域水沙关系产生了重大变化<sup>[6]</sup>,这对黄河全流域的生态安全和高质量发展产生重要影响<sup>[7-9]</sup>。20世纪50年代至今,众多学者对水沙变化及其驱动因子进行研究,冉大川<sup>[10]</sup>以黄河中游地区皇甫川、窟野河、无定河和三川河为研究对象,分析了实施水土保持措施前后河流泥沙粒径变化,发现水土保持措施不仅具有减沙作用,而且还具有明显的“拦粗排细”作用。张佳等<sup>[11]</sup>根据1956—2019年黄河支流水沙资料分析了黄河中游各支流变化趋势,发现由于人类活动使得黄河中游各支流径流量和输沙量均呈显著减少趋势,各支流输沙量由20世纪50年代的13.5亿t/a下降到2012年的3.4亿t/a。李二辉等<sup>[12]</sup>通过采用应用Mann-Kendall秩次相关检验、流量历时曲线法和双累积曲线分析法,对黄河干流陕县站和河口镇站1919—2010年径流量演变过程进行了分析,发现人类活动是区间径流减少的主要驱动力。刘强等<sup>[13]</sup>应用水文分析法定量评估了降水变化和人类活动对皇甫川流域径流量和输沙量变化的贡献率,发现流域内逐年增强的人类活动是促使皇甫川流域径流和输沙减少的主要因素。柳莎莎等<sup>[14]</sup>根据1956—2019年年的黄河上、中和下流域实测降水量、径流量和输沙量的月际和年际序列资料,采用水文法和对比分析法,分析了流域内年径流量和年输沙量变化趋势,发现人类活动对流域年输沙量减少的贡献率快速上升,而气候变化引起的降水减少对流域年输沙量减少的贡献率已不足3%。许炯心<sup>[15]</sup>利用1956—2019年黄河中游河口镇至龙门区间水文输沙和降水资料,采用水文法和对比分析法对水沙变化情势进行了研究,发现人类活动已成为影响黄河中游产沙过程的主导因素。赵阳等<sup>[16]</sup>以1956—2019年水沙实测资料为基础,采用双累积曲线等多种统计分析方法,对黄河干流潼关断面以上主要干流水文站的水沙演变规律进行分析,发现人类活动对黄河中游水沙锐减占据主导作用,平均贡献率达到90%以上。而姚文艺等<sup>[17]</sup>采用水文分析法对黄河中游水沙变化特征进行分析,得出气候变化和人类活动对黄河中游输沙量变化的贡献率各为50%。目前分析水沙变化特征的评价体系和技术手段还尚不成熟,对区分气候变化还是人类活动成为影响流域水沙变化的主导因素还存在着较大争议<sup>[18]</sup>。

作为黄河中游主要干流之一的窟野河流域,占黄河流域面积小,仅只是1%,但是每年进入黄河流域的输沙量却占到了6%。近几十年以来,窟野河流域水沙情势发生了巨大的变化,无论是流域径流量还是输沙量都呈现显著下降趋势,特别是从20世纪70年代以后,这种变化尤为明显<sup>[19]</sup>。新时期窟野河水沙将如何变化?引起窟野河流域水沙关系变化的内在驱动因素是什么?这些问题都会对窟野河乃至黄河全流域生态可持续发展和水沙调控决策产生重要影响。基于此,研究基于1956—2019年窟野河流域降水量、径流量、输沙量等监测数据,运用累积距平法、双累积曲线等方法,分析窟野河流域水沙周期演变特征,探讨气候变化和人类活动对窟野河流域水沙变化的贡献率,以期为黄河全流域生态环境恢复和高质量发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

窟野河位于北纬38°28′—39°52′,东经109°00′—110°52′,是黄河中游河龙区间的第二大支流,发源于内蒙古自治区东胜市八定沟,全长242 km,流域总面积为8 706 km<sup>2</sup>,流经伊金霍洛旗、陕西府谷,在神木市与支流悖牛川交汇后,汇入黄河。窟野河流域地貌复杂多样,地势西北高东南低,河道因河流冲刷多形成深度达150 m以上呈树枝状分布的沟谷,地表植被稀少,林草覆盖率低,下垫面条件复杂,兼有荒漠草原、草甸、人工乔灌以及农业等植被,土壤黏粒颗粒含量少,结构松散,侵蚀状况严重,分布具有地域性,东南部为第四纪黄土所覆盖,中部主要为砂岩和砂砾岩分布区域,西部主要为沙质土分布区域。流域气候类型为北温带半干旱大陆季风气候,多年平均降水量为419 mm,年内变化大,最大降水量主要出现在每年的7月和8月,占全年降水量的55%~65%,在空间上呈东南多西北少分布;多年平均气温为8.2℃,最高气温出现在每年的7月。土地利用类型以耕地、林地、草地为主,耕地主要分布在流域中部和东南部地势较低的区域,林地、草地主要分布在流域东南部和西北部地势较高的区域。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

研究用到的主要数据有:(1)水沙数据。径流和输沙数据来自于窟野河流域出口站温家川水文站1956—2019年径流和输沙数据,其中1956—2009年月径流、月输沙、年径流和年输沙数据来自黄河泥沙公报,2010—2019年年径流、年输沙数据来自黄河流

域水文年鉴。(2) 降水数据。降雨数据来自黄河水利委员会榆林水文勘测局温家川水文站。

### 2.2 研究方法

2.2.1 累积距平法 累积距平法通过曲线斜率变化分析在一段时间尺度下发生转折的年份,曲线拐点即为变量阶段性变化的时间点。当水沙只受降水变化影响时,累积曲线应是一条直线;当水沙受到人类活动因素影响时,直线将会发生偏移。

2.2.2 Morlet 的小波分析 小波函数是指能够迅速衰减到 0 的一类函数<sup>[11]</sup>,其表达式为:

$$W_f(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\widehat{\Psi}(\frac{t-b}{a})dt$$

式中: $\widehat{\Psi}(t)$ 为  $\Psi(t)$  的复共轭函数; $W_f(a,b)$  为小波变化系数; $a$  为尺度因子; $b$  为时间因子。

## 3 结果与分析

### 3.1 降水量、径流量和输沙量年际变化特征

窟野河流域多年平均降水量为 439.53 mm,介于 108.40~818.10 mm,变化速率为 0.39 mm/a, $p>0.1$ ,未达到显著性水平,说明窟野河降水量从 1956 年开始呈现不显著增加趋势(图 1A)。

窟野河多年平均径流量为 3.23 亿 m<sup>3</sup>,最大值为 13.68 亿 m<sup>3</sup>,出现在 1959 年,最小值为 1.25 亿 m<sup>3</sup>,出现在 2012 年;径流量年际变差系数为 0.38,属中等尺度变异,极值比为 13.62,其中 1956—1969 年变差系数最大,其值为 0.45,1980—1989 年变差系数最小,其值为 0.26。径流量减少速度为 0.095 3, $p<0.05$ ,达到了显著水平,表明窟野河径流量从 1956 年开始呈现出显著减小趋势(图 1B 和表 1)。

窟野河流域多年平均输沙量为 0.75 亿 t,最大值为 1.35 亿 t,出现在 1959 年,最小值为 0.000 1 亿 t,

出现在 2013 年。输沙量年际变差系数为 0.70,属中等尺度变异,极值比为 14.95,其中 2009—2019 年变差系数最大,其值为 0.83,1970—1979 年变差系数最小,其值为 0.53。输沙量减少速度为 0.023 5 亿 t/a, $p<0.05$ ,达到了显著水平,说明输沙量从 1956 年开始呈现出显著减小趋势(图 1C 和表 1)。

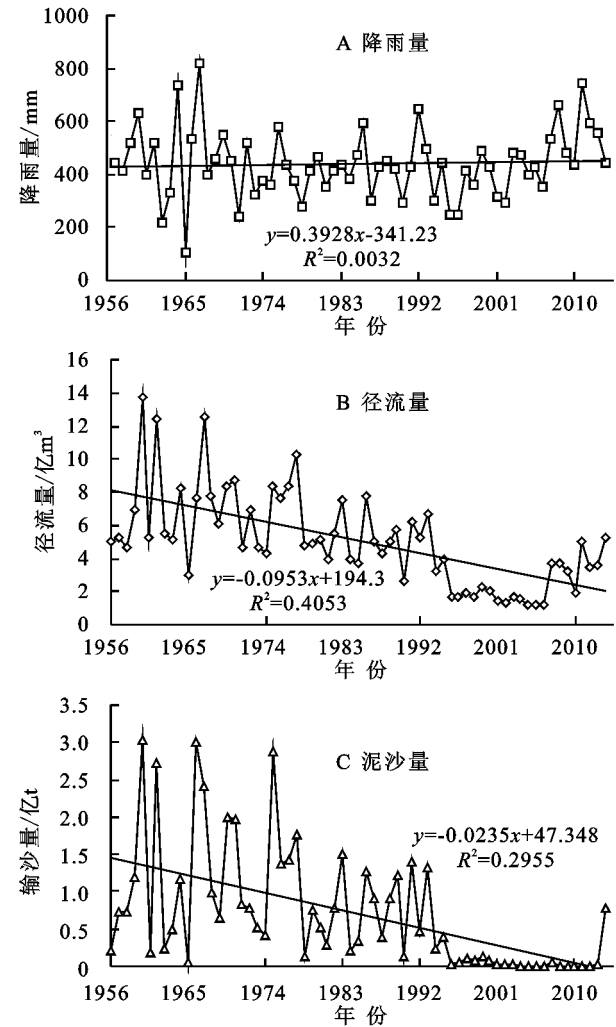


图 1 窟野河流域降水量、径流量和输沙量变化趋势

表 1 窟野河径流量与输沙量年际变化特征值

时期	径流量			输沙量		
	平均值/亿 m <sup>3</sup>	变差系数	极值比	平均值/亿 t	变差系数	极值比
1956—1969 年	7.45	0.45	17.40	1.61	0.74	30.75
1970—1979 年	9.57	0.39	5.74	1.40	0.53	6.81
1980—1989 年	7.23	0.26	21.09	0.67	0.66	10.87
1990—1999 年	4.48	0.35	16.16	0.65	0.76	41.48
2000—2009 年	1.68	0.41	3.47	0.05	0.65	33.85
2009—2019 年	3.23	0.43	17.90	0.09	0.83	33.27
1956—2019 年	5.61	0.38	13.62	0.75	0.70	26.17

### 3.2 径流量和输沙量阶段性变化特征

从图 2 可以看出,径流量和输沙量累积距平曲线具有明显阶段性特征。1956—1979 年累积距平曲线呈上升趋势,表明窟野河流域为丰水(沙)期;1980—1997 年

累积距平曲线呈现出相对平缓趋势,表明窟野河流域为平水(沙)期;1998—2019 年累积距平曲线呈下降趋势,表明窟野河流域为贫水(沙)期。1956—1979 年窟野河径流量和输沙量累积距平曲线在 1979 年之前呈逐渐



增大的趋势,而在 1979 年之后呈相对的平缓趋势,表明径流量和输沙量在 1979 年发生了转折。1997—2019 年窟野河径流量和输沙量累积距平曲线在 1997 年之前呈平缓趋势,1997 年之后呈下降的趋势,表明径流量和输沙量在 1997 年发生了转折。综合分析累积距平曲线变化趋势,得出径流量和输沙量年际变化的转折年份为 1979 年和 1997 年。

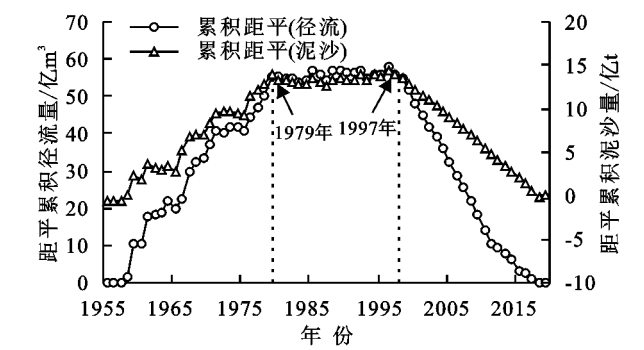


图 2 窟野河年径流量-年输沙量的累积距平检验

3.3 径流量与输沙量的 Morlet 小波分析

取小波系数的实部,以年份为横坐标,时间尺度为纵坐标,绘制窟野河流域径流量与输沙量小波系数实部等值线图。当小波系数实部为正数(实线)时,代表丰水(沙)期,即图中深色区域;小波系数为负数(虚线)时,代表年径流(输沙)枯水(沙)期,即图中浅色区域;小波系数实部为 0 时是转折点,代表由丰水(沙)→枯水(沙)期或者枯水(沙)期→丰水(沙)。

从图 3 可以看出,窟野河流域年径流量存在 35~65 a 和 15~34 a 时间尺度演变规律,其中在 35~65 a 时间尺度上窟野河年径流存在着丰→枯→丰→枯 4 个交替变化过程,具有全域性,且在整个研究时域上表现稳定,对应着年径流变化的第一主周期 41 a。在 15~34 a 时间尺度上存在着丰→枯→丰→枯→丰→枯→丰→枯→丰→枯 10 个交替变化过程,具有全域性,且在整个研究时域上表现稳定。14 a 以下时间尺度的周期变化比较杂乱,这表明在小尺度周期下径流量变化频繁,规律差。

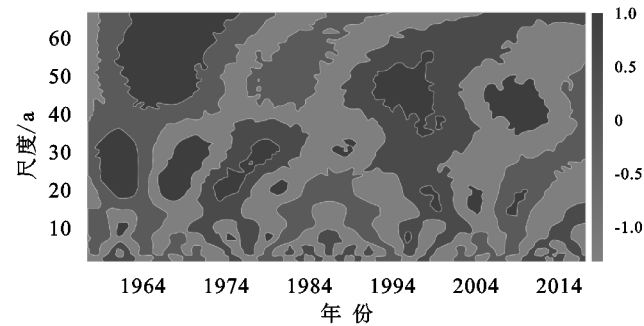


图 3 径流量 Morlet 小波系数实部等值线

从图 4 可以看出,输沙量演变过程中存在 30~65 a,15~29 a 和 6~14 a 共 3 类时间尺度的周期变

化规律。在 30~65 a 时间尺度上存在着少沙→多沙→少沙→多沙→少沙 5 次交替变化过程,具有全域性,且在整个研究时域上表现稳定;在 15~29 a 时间尺度上存在着少沙→多沙→少沙→多沙→少沙→多沙→少沙→多沙→少沙 11 次交替变化过程,具有全域性,且在整个研究时域上表现稳定;在 6~14 a 时间尺度上存在着多沙→少沙→多沙→少沙→多沙→少沙→多沙→少沙→多沙→少沙→多沙→少沙 20 次交替变化过程,具有全域性,且在整个研究时域上表现稳定。5 a 以下时间尺度的周期变化无规律,表明输沙量在小尺度周期下输沙量变化频率高,规律性差。

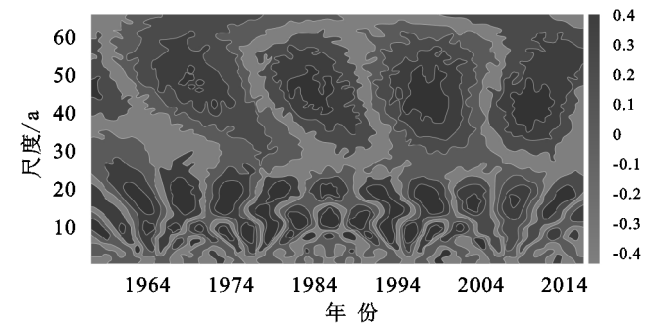


图 4 输沙量 Morlet 小波系数实部等值线

3.4 气候变化和人类活动对径流量和输沙量影响的定量分析

根据累积距平检验结果,可将径流量和输沙量变化分为 3 个时段:A(1956—1979 年)、B(1980—1997 年)和 C(1998—2019 年)。其中,窟野河流域 C(1998—2019 年)时期径流量为 2.489 亿 m<sup>3</sup>,比 B(1980—1997 年)减少 2.582 亿 m<sup>3</sup>,比 A(1956—1979 年)减少 4.859 亿 m<sup>3</sup>。窟野河流域 C(1998—2019 年)平均输沙量是 0.082 亿 t,比 B(1980—1997 年)减少了 0.683 亿 t,比 A(1956—1979 年)减少量为 1.223 亿 t(表 2)。

表 2 窟野河流域径流与输沙的时期变化

时期	径流量/ 亿 m <sup>3</sup>	输沙量/ 亿 t	变化速率	
			径流/%	输沙/%
1956—1979 年	7.348	1.312		
1980—1997 年	5.071	0.765	76.32	62.13
1998—2019 年	2.489	0.082	113.85	123.01

从累积降水量-累积径流量曲线(图 5A)与累积降水量-累积输沙量曲线(图 5B)可以看出,关系点分布在趋势线附近,没有出现明显的偏离。1956—1979 年的分布点在趋势线下侧,表明此时段内同降水量下的产流产沙量相对较少,这可能与当时在窟野河流域修建梯田、拦沙坝、淤地坝等水土保持工程措施有关。1980—1997 年趋势线斜率增加,分布点在趋势线的上侧,表明在此时段内同降水量下的产流产沙量增多,并多于 1956—1979

时段,这可能与 1956—1979 时段内的水土保持工程随时间推移,大部分都发生了破损或淤满而失效,拦沙效益下降,而泥沙产量增多有关。1998—2019 年的

分布点在趋势线下侧,表明此时段内同降水量下的产流产沙量相对较少,这可能与当时在窟野河流域施行退耕还林(草)等水土保持工程有密切关系<sup>[12]</sup>。

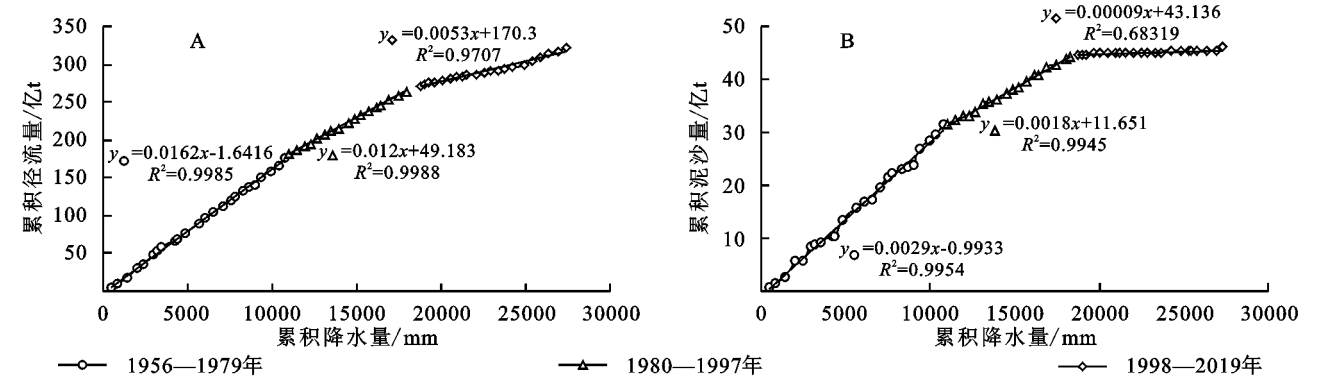


图 5 累积降水量与径流量、输沙量的双累积曲线

利用双累积曲线法<sup>[13]</sup>,绘制累积径流量与累积输沙量关系图(图 6)。根据曲线斜率变化,可以将受人类活动影响较小的 1956—1979 年作为基准期,将 1980—1997 年和 1998—2019 年的径流量与输沙量实测值与基准期实测值之差为各时段的变化量,然后由回归方程计算得出预测值与实测值之差为降水因素导致的减少量,人类活动所造成的减少量为总的减少量减去降水因素导致的减少量<sup>[14]</sup>。

1980—1997 年径流量相比于 1956—1979 年径流量减少量为 2.28 亿 m<sup>3</sup>,其中降水因素导致的年径流减少量为 0.32 亿 m<sup>3</sup>,所占比例为 14.25%,人类活动因素导致的径流减少量为 1.96 亿 m<sup>3</sup>,所占比例为 85.75%。1998—2019 年径流量相比于 1956—1979

年径流量减少量为 4.85 亿 m<sup>3</sup>,降水因素导致的年径流量减少量为 0.43 亿 m<sup>3</sup>,所占比例为 8.76%,人类活动因素导致的径流减少量为 4.42 亿 m<sup>3</sup>,所占比例为 91.24%(表 3)。

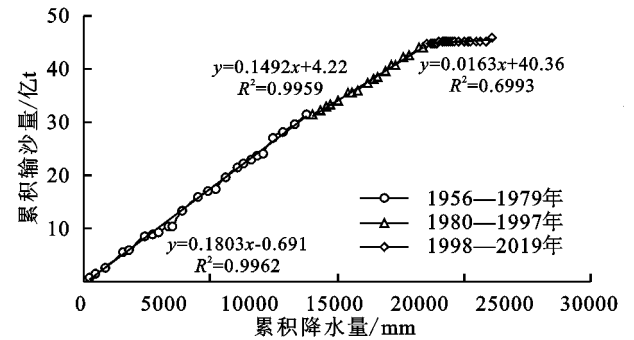


图 6 累积年径流量-输沙量的双累积曲线

表 3 降水与人类活动对径流量影响的定量分析

时段	实测径流量/ 亿 m <sup>3</sup>	计算径流量/ 亿 m <sup>3</sup>	实测年降水量		降水影响		人类活动影响	
			减少量/亿 m <sup>3</sup>	百分比/%	减少量/亿 m <sup>3</sup>	百分比/%	减少量/亿 m <sup>3</sup>	百分比/%
1956—1979 年	7.35	5.07						
1980—1997 年	5.07	7.02	2.28	31.02	0.32	14.25	1.96	85.75
1998—2019 年	2.49	6.92	4.85	95.82	0.43	8.76	4.42	91.24

1980—1997 年输沙量相对于 1956—1979 年输沙量减少量为 0.60 亿 m<sup>3</sup>,其中降水因素导致的输沙减少量为 0.10 亿 t,所占比例为 14.22%,人类活动因素导致的径流减少量为 0.50 亿 t,所占比例为 85.78%。1998—

2019 年相对基准期年径流量减少量为 1.23 亿 m<sup>3</sup>,降水因素导致的年径流量减少量为 0.08 亿 t,所占比例为 6.65%,人类活动因素导致的径流减少量为 1.15 亿 t,所占比例为 93.35%(表 4)。

表 4 降水与人类活动对输沙量影响的定量分析

时段	实测输沙量/ 亿 m <sup>3</sup>	计算输沙量/ 亿 m <sup>3</sup>	实测年降水量		降水影响		人类活动影响	
			减少量/亿 m <sup>3</sup>	百分比/%	减少量/亿 m <sup>3</sup>	百分比/%	减少量/亿 m <sup>3</sup>	百分比/%
1956—1979 年	1.31	1.30						
1980—1997 年	0.71	1.21	0.60	31.02	0.10	14.22	0.50	85.78
1998—2019 年	0.08	1.18	1.23	95.82	0.09	6.65	1.15	93.35

## 4 讨论

本文通过运用线性趋势分析、累积距平法和双累积曲线法等方法,分析了窟野河流域水沙周期演变特征,

得出窟野河流域降水量从 1956 年开始呈现不显著增加趋势,而径流量与输沙量却呈显著减小趋势,降水变化与径流量、输沙量变化特征不一致,表明造成窟野河流域水沙减少的因素不是气候变化引起的降水因素。

人类活动是指人们为了生计改变地表水和地下水的空间分布和水循环过程而采取的各种活动。窟野河流经的区域主要位于半干旱区域,这些地区长期缺水,并随着流域内人口大规模增加,沿河灌溉以及对地下水集中连片开采,造成窟野河地表径流迅速减少<sup>[20]</sup>。20世纪70年代,窟野河流域开始实施了修建水库、灌渠、池塘等多种水利工程<sup>[21]</sup>,以及梯田、淤地坝等多种水土保持工程,这些工程措施对流域水沙的减少起到一定作用<sup>[22]</sup>。20世纪80年代,窟野河流域发现大量煤炭资源,储量占到了全国煤炭储量的20%,当地人们开始了大量的煤炭开采,其开采量始终呈增加趋势。随着煤炭资源的大规模开发,改变了下垫面状况,使地表径流的排泄方式受到影响,改变了输沙方式。从20世纪90年代开始,大规模的煤炭开采受到政府的高度重视,并开始了专项整治措施。此外,窟野河流域大规模退耕、还林还草等生态工程建设,增加了植被的固水保土作用,使受到水土保持效益的面积从1%增长到后来的56%<sup>[23]</sup>,这些人类活动都对流域的水沙减少起到了作用。2000年以来,国家高度重视黄河流域的生态安全和高质量发展,加大在窟野河流域生态保护投入,建成了一定数量水库、淤地坝、塘坝和沟渠,并且这些工程和过去的退耕还林还草等工程一起发挥作用,使得窟野河流域水沙明显减少。李慧娟等<sup>[20]</sup>利用窟野河水文年鉴数据,采用Mann-Kendall非参数检验、突变点检验等统计方法,分析了窟野河流域1956—2015年径流量和输沙量变化,得出气候变化对径流量和输沙量减少的贡献率分别为18.53%,3.59%,而人类活动对径流量和输沙量减少的贡献率分别为81.47%,96.41%,退耕还林草和煤炭开采为主的人类活动是导致该流域径流量和输沙量减少的重要原因。郭巧林等<sup>[21]</sup>利用窟野河1956—2012年降水和水沙等数据,采用线性趋势分析、滑动平均、累积距平等方法,得出降水对径流和输沙变化的影响由1980—1996年的44.85%,45.45%下降到1997—2012年的11.46%,13.54%,而人类活动对径流和输沙的影响由1980—1996年的55.15%,54.55%增加到1997—2012年的88.45%,86.46%,人类活动是导致该流域年径流量和年输沙量减少的重要原因。赵激等<sup>[22]</sup>利用窟野河1980—2013年水文数据,采用双累积曲线法和Mann-Kendall校验法,分析了水沙演变的驱动因子,得出气候变化对径流和输沙减少的贡献率分别为32.3%,42.4%,而人类活动对径流量和输沙减少的贡献率分别为67.7%,57.6%。刘二佳等<sup>[23]</sup>利用窟野河近50a径流和降水数据,采用小波分析法和历时曲线法,分析了气候变化和人类活动对径流变化的影响,

得出气候变化对径流量变化的贡献率为21.75%,而人类活动对径流量变化的贡献率为78.25%。以上相关研究都与本研究结论一致,表明人类活动是窟野河流域年径流量与年输沙量减少最主要的原因,而气候变化引起的降水减少是次要因素。

## 5 结论

(1) 窟野河流域多年平均降水量为439.53 mm,变化速率为0.39 mm/a,多年平均径流量为3.23亿m<sup>3</sup>,减少速率为0.095 3亿m<sup>3</sup>/a。多年平均输沙量为0.75亿t,减少速率为0.023 5亿t/a。

(2) 窟野河流域径流量和输沙量年际变化的转折年份为1979年和1997年。

(3) 径流量存在35~65 a和15~34 a时间尺度变化规律,输沙量存在30~65 a,15~29 a和6~14 a时间尺度变化规律。

(4) 同基准期A(1956—1979年)相比,B时期(1980—1997年)气候变化对径流量和输沙量的贡献率分别为14.25%,14.22%,而人类活动对径流量和输沙量的贡献率为85.75%,85.78%,C时期(1998—2019年)气候变化对径流量和输沙量的贡献率分别为8.76%和6.65%,而人类活动对径流量和输沙量的贡献率为91.24%,93.35%,气候变化是导致窟野河流域水沙趋势变化的次要原因,而人类活动才是导致窟野河流域水沙变化的主要原因。

### 参考文献:

- [1] Guo Q, Su N, Yang Y, et al. Using hydrological simulation to identify contribution of coal mining to runoff change in the Kuye river basin, China[J]. Water Resources, 2017,44(4):586-594.
- [2] 姚文艺,高亚军,张晓华.黄河径流与输沙关系演变及其相关科学问题[J].中国水土保持科学,2020,18(4):1-11.
- [3] 王俊杰,拾兵,巴彦斌.近70年黄河入海水沙通量演变特征[J].水土保持研究,2020,27(3):57-62.
- [4] 赵秀兰,周蕊,张富,等.1957—2016年祖厉河上游降水与水沙变化趋势[J].水土保持研究,2020,27(3):83-90.
- [5] 毕早莹,李艳忠,林依雪,等.基于Budyko理论定量分析窟野河流域植被变化对径流的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(8):61-71.
- [6] 申恋绵,蒋晓辉,雷宇昕.窟野河流域河川基流变化及其驱动因素分析[J].水资源研究,2020,9(4):373-385.
- [7] 刘强,穆兴民,赵广举,等.延河流域水沙变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].干旱区资源与环境,2021,35(7):129-135.
- [8] Zhang M, Wang J, Zhou R. Attribution analysis of hydrological drought risk under climate change and human activities: A case study on Kuye river basin in China[J].



- Water, 2019, 11(10). DOI: 10.3390/w11101958.
- [9] Zhou Y, Shi C, Fan X, et al. The influence of climate change and anthropogenic activities on annual runoff of Huangfuchuan basin in northwest China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 120(1): 137-146.
- [10] 冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 93-100.
- [11] 张佳, 王厚杰, 张勇, 等. 黄河中游主要支流输沙量变化对黄河入海泥沙通量的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 21-30.
- [12] 李二辉, 穆兴民, 赵广举. 1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 155-163.
- [13] 刘强, 尉飞鸿, 常康飞, 等. 皇甫川流域水沙变化特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1506-1513.
- [14] 柳莎莎, 王厚杰, 张勇, 等. 气候变化和人类活动对黄河中游输沙量影响的甄别[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(4): 41-50.
- [15] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区 1997—2007 年的水沙变化趋势及其成因[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 1-7.
- [16] 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.
- [17] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616.
- [18] 穆兴民, 王万忠, 高鹏, 等. 黄河泥沙变化研究现状与问题[J]. 人民黄河, 2014, 36(12): 1-7.
- [19] 蒋晓辉, 高昊祺, 雷宇昕. 近 40 年来窟野河流域土地利用类型变化及驱动因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 17-38.
- [20] 李慧娟, 师长兴, 马小晴, 等. 黄河中游窟野河流域水沙变化影响因素定量评估[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 499-507.
- [21] 郭巧玲, 韩振英, 丁斌, 等. 窟野河流域径流变化及其影响因素研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 75-80.
- [22] 赵激, 王向东, 张晓明, 等. 窟野河流域水沙演变的尺度效应驱动因素研究[J]. 水文, 2016, 36(2): 56-61.
- [23] 刘二佳, 张晓萍, 张建军, 等. 1956—2005 年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1159-1168.

(上接第 61 页)

- [25] Lü Z, Yan D, Qin T, et al. A system framework for spatial allocation of soil management practices (SMPs) in river basins[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104929.
- [26] 乔梅, 王继军, 李玥, 等. 水土保持技术选择的主要驱动要素分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 132-138.
- [27] Wang L, Yan H, Wang X W, et al. The potential for soil erosion control associated with socio-economic development in the hilly red soil region, southern China[J]. Catena, 2020, 194: 104678.
- [28] 李秋艳, 蔡强国, 方海燕, 等. 长江上游紫色土地区不同坡度坡耕地水保措施的适宜性分析[J]. 资源科学, 2009(12): 2157-2163.
- [29] Huang X, Fang N, Shi Z, et al. Decoupling the effects of vegetation dynamics and climate variability on watershed hydrological characteristics on a monthly scale from subtropical China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 279: 14-24.

(上接第 67 页)

- [18] 刘伟, 安伟, 杨敏, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区大宁河流域产流产沙模拟及土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 49-56.
- [19] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 1169-1188.
- [20] 金鑫. 基于 SWAT 模型的土地利用/覆被变化对流域水文过程的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [21] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 15-18.
- [22] 胡胜, 曹明明, 邱海军, 等. CFSR 气象数据在流域水文模拟中的适用性评价: 以灞河流域为例[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1571-1586.
- [23] 田扬, 肖桂荣. 基于 CMADS 驱动下 SWAT 模型的敖江流域径流模拟[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(11): 27-32.
- [24] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 25-33.
- [25] 李佳, 张小咏, 杨艳昭. 基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 119-124, 128, 301.