

引用格式: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.  
[Li H J, Shi C X, Ma X Q, et al. Quantification of the influencing factors of runoff and sediment discharge changes of the Kuye River catchment in the middle reaches of the Yellow River[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 499-507.] DOI: 10.18402/resci.2020.03.08

# 黄河中游窟野河流域水沙变化影响因素定量评估

李慧娟<sup>1,2</sup>,师长兴<sup>1</sup>,马小晴<sup>1,2</sup>,刘 慰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;2. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**窟野河流域位于黄河中游砒砂岩分布区,生态环境极其恶劣,是黄河中游粗泥沙的主要来源区之一,近几十年来该流域径流和输沙发生了显著变化,因此深入探究窟野河流域产流产沙变化的原因及其影响程度,对推进黄河中游水土保持综合治理具有重要借鉴意义。本文采用 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 1955—2015 年年径流量和输沙量变化。根据水量平衡原理,通过弹性系数法和双累积曲线法,定量估算了不同时期气候变化(降水量和潜在蒸散发)和人类活动对径流量和输沙量变化的贡献程度。结果表明:①61 年间窟野河年径流量和输沙量均呈现显著减少趋势,并在 1996 年发生突变,且自 2012 年以来其水沙关系发生明显变化。②该流域气候变化和人类活动对年径流量减少的贡献率分别为 18.53% 和 81.47%,对年输沙量减少的贡献率分别为 3.59% 和 96.41%。以植被恢复和煤炭开采为主的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。③该流域多年的水土保持和其他人类活动已较大程度地减少了流域产沙,但同时也大幅度地降低了本已短缺的水资源量,未来在全球气候变化背景下,参考之前的治理成效规划未来的水土保持工程和调整流域产业结构,达到生态保护和高质量发展是一个需要认真思考的问题。

**关键词:**Budyko 假设;降水量;潜在蒸散发;人类影响;水沙变化;多沙粗沙区;窟野河;黄河中游

DOI: 10.18402/resci.2020.03.08

## 1 引言

在全球气候变化背景下,由于自然过程和人类活动的共同作用,全球许多河流的径流输沙发生了很大的变化<sup>[1,2]</sup>。Li 等<sup>[2]</sup>研究表明,全球大河 24% 径流量发生了显著变化,40% 输沙量发生显著变化,其中亚洲大河输沙量大部分呈现显著下降趋势,亚马逊河含沙量呈现上升趋势。不仅河流的径流和输沙过程已被明显改变,已有研究发现<sup>[3]</sup>,包括大规模水坝建设、污染、外来物种入侵、挖沙和河岸侵蚀、引水/调水工程、政府管理措施等人为干扰以及气候变化和洪水等自然因素还极大地影响了河流的完整性和未来发展。

20 世纪 60 年代,钱宁先生提出“集中治理黄河中游粗沙来源区”的建议,成为中国治黄史上的一

个重要突变点。自 70 年代起,国家相继采取了一系列措施用于黄河中游粗沙区的治理,其中最为著名的是 70 年代开始实施的小流域水土保持综合治理措施和 90 年代的退耕还林(还草)工程,使得黄河径流输沙呈现显著的下降趋势。窟野河流域是黄河一级支流,其在神木站以上全部分布在砒砂岩区,每年向黄河输入大量粗泥沙(粒径>0.1 mm)。在研究区环境发生显著变化(气候与人类活动)的情况下,尤其是近年来受大规模生态修复措施的影响,该流域的径流输沙规律呈现出较大的变异性。以往很多学者已经对其径流特性及影响因素<sup>[4]</sup>、煤炭开采对水循环的影响<sup>[5,6]</sup>、流域水文特性<sup>[7,8]</sup>等进行了一定研究。Sun 等<sup>[9]</sup>通过对该流域 1953—1989 年和 2008—2015 年 2 个时期的水沙关系曲线( $S=aQ^b$ )对

收稿日期:2019-10-28 修订日期:2020-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41671004;41971008)。

作者简介:李慧娟,女,河南郑州人,博士研究生,主要从事河流地貌和流域输沙研究。E-mail: lihj.17b@igsrr.ac.cn

通讯作者:师长兴,男,河北正定人,研究员,主要从事河流地貌与泥沙输移研究。E-mail: shicx@igsrr.ac.cn

比分析发现,反映流域侵蚀程度的系数 $a$ 呈现下降趋势而表示河流侵蚀力和输送能力的指数 $b$ 呈现上升趋势。在新的水沙关系背景下,气候变化与人类活动对径流量和输沙量的影响有待进一步研究。

本文基于窟野河流域1955—2015年年径流量、年输沙量、年降水量和年潜在蒸散发量等资料,在趋势变化和突变分析的基础上,对这一黄河重要产沙支流的水沙变化特点、趋势及变化原因等进行了研究,定量评价气候变化和人类活动对水沙变化的影响,同时结合植被归一化指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、煤炭开采量等人类活动因子对水沙减少原因进行深入分析,以加强对砒砂岩分布区窟野河流域水资源及产、输沙关系演变的认识,为流域内水土资源合理开发、利用及保护提供科学指导。

## 2 研究区概况

窟野河(109° 28'E—110° 52'E, 38° 23'N—39° 52'N)为黄河一级支流(图1),干流长241.8 km,流域面积8706 km<sup>2</sup>。其最大支流特牛川干流长109 km,流域面积2274 km<sup>2</sup>。窟野河流域属于干旱、半干旱地区,多年平均降水量为410 mm,平均气温为7.9℃,无霜期280 d。受大陆性季风气候影响,降水年内分布极不均匀,多集中于夏季,其多年(1955—

2015)平均径流量为5.10亿m<sup>3</sup>,平均输沙量为0.74亿t,占黄河总输沙量的6.9%。流域内植被稀疏,多以灌丛植被和草本植物为主。地貌类型为风沙区和黄土丘陵沟壑区,处于毛乌素沙地和黄土丘陵沟壑区的过渡地带,水蚀、风蚀交替进行,水土流失剧烈,年均输沙模数为0.862万t/km<sup>2</sup>。窟野河流域地表以砒砂岩、风沙土和黄土为主,根据土壤侵蚀类型划分为砒砂岩丘陵沟壑区、沙化丘陵沟壑区和黄土丘陵沟壑区3类,其中砒砂岩丘陵沟壑区是河流粗泥沙的主要来源<sup>[10]</sup>。

## 3 资料来源与分析方法

### 3.1 数据来源

本文用到的数据主要有:①水沙数据。窟野河流域出口水文站温家川站1955—2015年的年径流与输沙数据,其中1955—1989年、2006—2015年水沙数据来自黄河流域水文年鉴;1990—2005年水沙数据来源于黄河泥沙公报。②降水数据。1955—2015年温家川站年降水数据,其中1955—1989年和2008—2015年间雨量站点数据来自黄河流域水文年鉴,1990—2007年降雨数据由中国科学院资源环境科学数据中心([www.resdc.cn](http://www.resdc.cn))提供。将来自黄河流域水文年鉴和中国科学院资源环境科学数据中心的2组数据进行一致性检验后计算得到1955—2015年统一时间序列年降水量,具体方法详见Li等<sup>[11]</sup>。采用ArcGIS 10.3软件的空间插值功能,对1955—1989年和2008—2015年降水数据进行克里金插值计算流域的年降水量。③气象数据。4个国家气象站(包括东胜、河曲、榆林、兴县)1955—2015年地面逐日气象观测数据,来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),包括平均气压、10 m高处风速、最高气温、最低气温、平均相对湿度和日照时间。1955—2015年流域年潜在蒸散发数据通过对4个国家站采用面积加权平均法计算得到。④NDVI数据。选择1981—2015年AVHRR NDVI数据,取自全球总量检测和模拟研究组(Global Inventory Monitoring and Modeling Studies, GIMMS3g数据集),时间分辨率为15天,空间分辨率为8 km,在ENVI 5.0中采用最大合成法原则(MVC)合成年和月尺度NDVI数据。

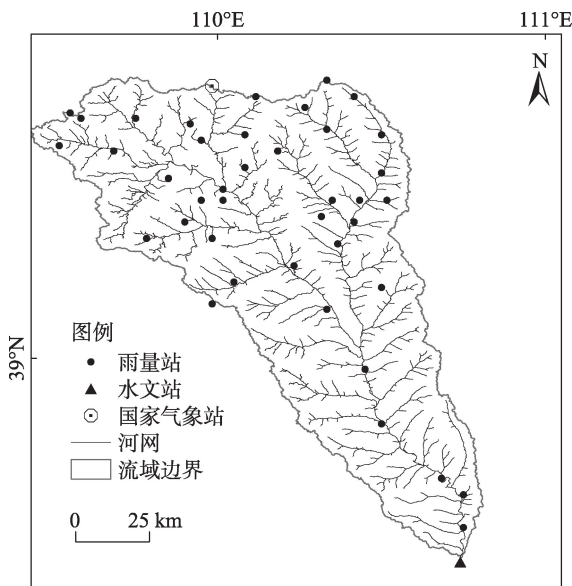


图1 窟野河流域及水位和气象站位置图

Figure 1 The Kuyue River catchment and locations of the hydrological and weather stations

2020年3月

### 3.2 分析方法

#### 3.2.1 Penman-Monteith公式

潜在蒸散量  $ET_0$  的计算采用 MATLAB 2014 中 FAO-56 模块推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[12]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_{\text{net}} - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  为潜在蒸散量 (mm/d);  $R_{\text{net}}$  为作物表面净辐射量 ( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $G$  为土壤热通量 ( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ );  $\Delta$  为饱和水汽压与温度关系曲线斜率 ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $\gamma$  为湿度计常数 ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $T$  为空气平均温度 ( $^\circ\text{C}$ );  $u_2$  为地面以上 2 m 处的风速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $e_s$  为空气饱和水汽压 ( $\text{kPa}$ );  $e_a$  为空气实际水汽压 ( $\text{kPa}$ )。  $R_{\text{net}}$ 、 $G$ 、 $\Delta$ 、 $\gamma$ 、 $T$ 、 $u_2$ 、 $e_s$ 、 $e_a$  可由平均气压、10 m 高处风速、最高气温、最低气温、平均相对湿度和日照时间计算得到。

#### 3.2.2 Mann-Kendall 非参数检验法

Mann-Kendall 法<sup>[13,14]</sup>是一种广泛应用于气象、水文等领域进行趋势分析的非参数检验方法,其不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰。当 Mann-Kendall 标准检验值  $Z$  为正值表示增加趋势,负值表示减小趋势。 $Z$  的绝对值  $\geq 1.28$ 、 $1.64$ 、 $2.32$  时,分别表示通过 90%、95%、99% 显著性检验。

当样本趋势显著时,常采用倾斜度  $\beta$ <sup>[15]</sup> 表示系列的长期单调变化趋势,计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{x_i - x_j}{i - j} \right], \quad j < i \quad (2)$$

式中:  $x_i$ 、 $x_j$  分别是时间序列中编号为  $i$  和  $j$  的数据。当  $\beta > 0$  时,表明时间序列显著上升;  $\beta = 0$  时,表明无趋势;  $\beta < 0$  时,表明时间序列显著下降。

#### 3.2.3 突变分析法

前人已提出了多种突变分析方法,针对同一个时间序列不同方法得到的突变点可能不同。本文拟采用 3 种突变分析方法,相互对比印证,以得到相对可靠的结果。Pettitt 检验法<sup>[16]</sup>是通过检验时间序列要素均值变化的时间以确定突变年份的一种分析方法,其中利用 Mann-Whitney 的统计量  $K_{t,N}$  来对同一个总体的 2 个样本  $(x_1, \dots, x_t)$ 、 $(x_{t+1}, \dots, x_N)$  进行检验,根据  $K$  值及  $P$  值显著性水平检验确定序列突变时间,当  $K$  值最大且  $P \leq 0.05$  时,其对应的年份即为显著突变点。Lee-Heghinian 法<sup>[17]</sup>主要基于贝叶斯理论,假定样本总体为正态分布,可能突变点  $\tau$  的先

验分布为均匀分布,推求  $\tau$  的后验分布  $f(\tau)$ ,当  $f(\tau/x_1, x_2, \dots, x_n)$  最大时对应的  $\tau$  即为可能的突变点,根据  $f$  值确定序列突变时间,当  $f$  值最大时,其对应的年份即为显著突变点。Spearman 秩次相关检验法<sup>[18]</sup>是通过计算水文要素时间序列的秩和秩次相关系数来分析时间序列稳定性及趋势性的一种有效方法,根据秩次相关系数  $r$  确定序列突变时间。

#### 3.2.4 径流量和输沙量变化因素贡献率

气候变化和人类活动是流域产流和产沙过程中的 2 个重要影响因素,阐明气候变化和人类活动对水文状况的影响有利于未来规划水土保持措施。通常情况下,气候变化对径流量和输沙量的影响具有周期性,而人类活动所造成的影响往往具有突发性和方向性,两者对径流量和输沙量的作用都比较复杂,对其作用程度定量评估需要简化处理。其中由于数据缺失,定量评价各种人类活动(特别是不同水土保持措施)对径流量和输沙量变化的影响仍然存在困难,所以通常将人类活动作为一个整体来进行研究。常使用的方法是根据可以忽略人类活动影响时期的降雨(或降雨与蒸发)—径流/输沙关系来估计人类活动影响明显时期的气候变化等所引起的径流与输沙变化,从而对气候变化和人类活动的相对贡献率进行估算。

##### (1) 气候变化与人类活动对产流的定量影响

弹性系数法基于流域水热平衡原理,理论意义明确,被广泛应用于径流变化的归因分析中。根据突变分析,整个研究期可被划分为 2 个时期(基准期  $T_1$ : 1955 年—突变点年份;措施期  $T_2$ : 突变点年份—2015 年)。从  $T_1$  到  $T_2$  时期径流变化量为:

$$\Delta R = R_2 - R_1 \quad (3)$$

式中:  $\Delta R$  表示突变前后年均径流变化量;  $R_1$  为突变前年均径流量;  $R_2$  为突变后年均径流量。径流量以径流深 (mm) 表示。径流变化主要受气候变化和人类活动的共同影响,以下式表示:

$$\Delta R = \Delta R_C + \Delta R_H = \Delta R_P + \Delta R_{E_0} + \Delta R_H \quad (4)$$

式中:  $\Delta R_C$  为气候变化引起的年均径流量变化量;  $\Delta R_H$  为人类活动引起的年均径流量变化量;  $\Delta R_P$  由降水变化引起的年均径流量变化量;  $\Delta R_{E_0}$  由潜在蒸散发引起的年均径流量变化量。  $\Delta R_P$ 、 $\Delta R_{E_0}$  和  $\Delta R_H$  可由下式表示:

$$\Delta R_p = \varepsilon_p \frac{\bar{R}}{\bar{P}} \Delta P \tag{5}$$

$$\Delta R_{E_0} = \varepsilon_{E_0} \frac{\bar{R}}{\bar{E}_0} \Delta E_0 \tag{6}$$

$$\Delta R_H = \varepsilon_H \frac{\bar{R}}{n} \Delta n \tag{7}$$

式中： $\bar{R}$ 、 $\bar{P}$ 、 $\bar{E}_0$ 分别为多年平均年径流量、年降水量和年潜在蒸散发； $\Delta P$ 和 $\Delta E_0$ 分别为降水和潜在蒸散发的变化量(mm)； $n$ 为整个时期流域下垫面参数,计算方法详见文献[19]； $\Delta n = n_2 - n_1$ ， $n_1$ 和 $n_2$ 分别代表 $T_1$ 和 $T_2$ 这2个时期流域下垫面参数； $\varepsilon_p$ 为径流对降水变化的弹性系数； $\varepsilon_{E_0}$ 为径流对潜在蒸散发变化的弹性系数； $\varepsilon_n$ 为径流对流域下垫面变化的弹性系数。弹性系数 $\varepsilon_p$ 、 $\varepsilon_{E_0}$ 和 $\varepsilon_n$ 的计算公式<sup>[19]</sup>分别为：

$$\varepsilon_p = \left\{ 1 - \left[ \frac{(E_0/P)^n}{1 + (E_0/P)^n} \right]^{\frac{1}{n} + 1} \right\} / \left\{ 1 - \left[ \frac{(E_0/P)^n}{1 + (E_0/P)^n} \right]^{\frac{1}{n}} \right\} \tag{8}$$

$$\varepsilon_{E_0} = \left\{ \frac{1}{1 + (E_0/P)^n} \right\} \left\{ \frac{1}{1 - \left[ \frac{1 + (E_0/P)^n}{(E_0/P)^n} \right]^{\frac{1}{n}}} \right\} \tag{9}$$

$$\varepsilon_n = \frac{A - B}{\left[ 1 + (P/E_0)^n \right]^{\frac{1}{n}} - 1}, A = \frac{P^n \ln P + E_0^n \ln E_0}{P^n + E_0^n}, \tag{10}$$

$$B = \frac{\ln(P^n + E_0^n)}{n}$$

(2) 气候变化与人类活动对产沙的定量影响

通过分析流域降水-输沙双累积曲线并拟合其突变前线性回归方程,估算气候变化和人类活动对

输沙量的影响。若流域输沙量仅受降水影响,则双累积曲线基本呈一直线。在突变前后2个时段内年输沙量实测值的差值受到气候变化和人类活动的共同影响。将突变后各年的累积降水数据代入突变前拟合的双累积曲线回归方程,可计算得到同下垫面条件下年输沙量。措施期年输沙量计算值与实测值的差值即为该时期人类活动减少的输沙量。

## 4 结果分析

### 4.1 窟野河流域水沙变化趋势

近61年来,窟野河流域年径流量和输沙量平均值分别为5.223亿 $m^3$ 、0.758亿t,年径流量和输沙量变化情况如图2,两者都存在明显的年际变化,且输沙量年际变率大于径流量。计算得出1955—2015年径流量变差系数(标准差和平均值之比)和极值比(最大值和最小值之比)分别为0.58和10.98,年输沙量变差系数和极值比分别为1.11和5410.7。

窟野河流域年径流量和输沙量存在明显的下降趋势(图2)。按线性回归斜率,1955—2015年间年径流量和输沙量平均每年减少0.113亿 $m^3$ 和0.026亿t。采用Mann-Kendall法对年径流量和输沙量变化趋势进行显著性检验,结果表明(表1)无论是年径流量还是输沙量均在0.01水平上显著下降。年降水量和潜在蒸散发量与之相比变化不显著,进一步计算Sen's  $\beta$ 斜率发现径流量和输沙量对应的 $\beta$ 均小于0,时间序列下降趋势明显。

从图2还可以看出,窟野河流域水沙关系自2012年起发生了明显变化,输沙量处于较低水平,而径流量呈现增加趋势。通过查阅水文年鉴及相

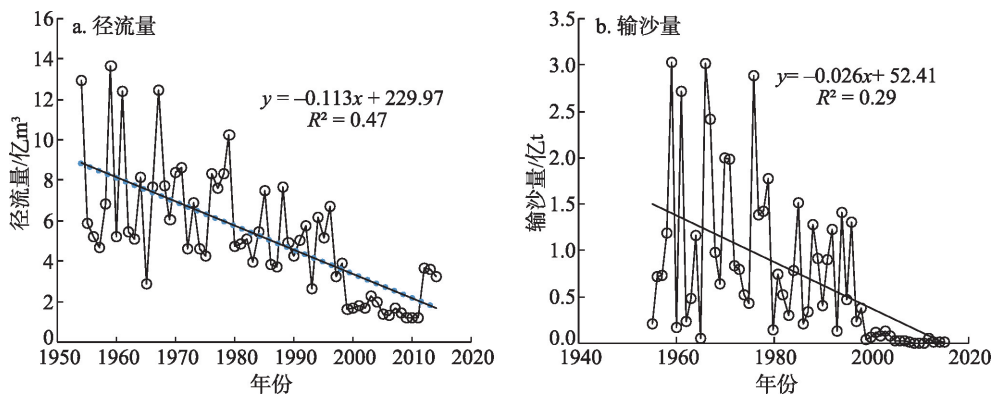


图2 1955—2015年窟野河流域年径流量和输沙量变化趋势

Figure 2 Trends of annual runoff and sediment changes in the Kuye River catchment, 1955-2015

2020年3月

表1 窟野河流域年径流量、年输沙量、年降水量和年潜在蒸散发量趋势分析

水文要素	Z值	显著性水平	Sen's $\beta$ 斜率
年径流量	-5.01	99%	-0.10
年输沙量	-4.55	99%	-0.02
年降水量	-0.85	不显著	—
年潜在蒸散发量	-0.22	不显著	—

关文献<sup>[20]</sup>发现自2010年以来,窟野河流域总降雨量有所增大,加之沿河露天煤矿开采,河道挖沙量大,使得泥沙沉积量增加,最终流域径流量上升,输沙量变化不大。如2012年7月河龙区间北部遭遇大范围暴雨,此次暴雨中心位于窟野河流域上游特牛川,受特牛川流域较大规模的煤矿开采等影响,最终温家川水文站洪峰流量仅为2000 m<sup>3</sup>/s。不过,虽然2012年前后水沙关系明显不同,但是径流和输沙时间序列的突变点分析显示该年的水沙变化在统计上还是不够显著(见下节),因此本文未将2012年以后年份再划为一个阶段加以分析。

## 4.2 窟野河流域水沙突变特征

采用 Pettitt、Lee-Heghinian、Spearman 等3种方法对研究区1955—2015年近60年径流量和输沙量数据进行突变点识别,结果如图3。从图3a可以看出,年径流量 $K$ 值曲线在1996年达到最高点,计算突变点的显著性水平,1996年为 $P=3.72 \times 10^{-7}$ ,远小于0.05,故年径流量显著突变点为1996年。从图3b可以看出,年输沙量 $K$ 值曲线也在1996年达到最大值,对应1996年显著性水平 $P=2.63 \times 10^{-7}$ ,远小于0.05,因此同样年输沙量显著突变点为1996年。

从图3c可以看出,年径流量 $f$ 值曲线在1996年发生明显变化,1992年虽然有变化但不显著,与1996年相比可以忽略。从图3d可以看出,年输沙量 $f$ 值曲线在1979年和1996年均发生明显变化,但1979年不及1996年显著,因此按 Lee-Heghinian 方法检验结果,年径流量和年输沙量的显著突变点也在1996年。

从图3e可以看出,年径流量 $r$ 值曲线在1979年和1996年前后斜率变化明显,故1979年和1996年为年径流量突变点。从图3f看,年输沙量突变点也

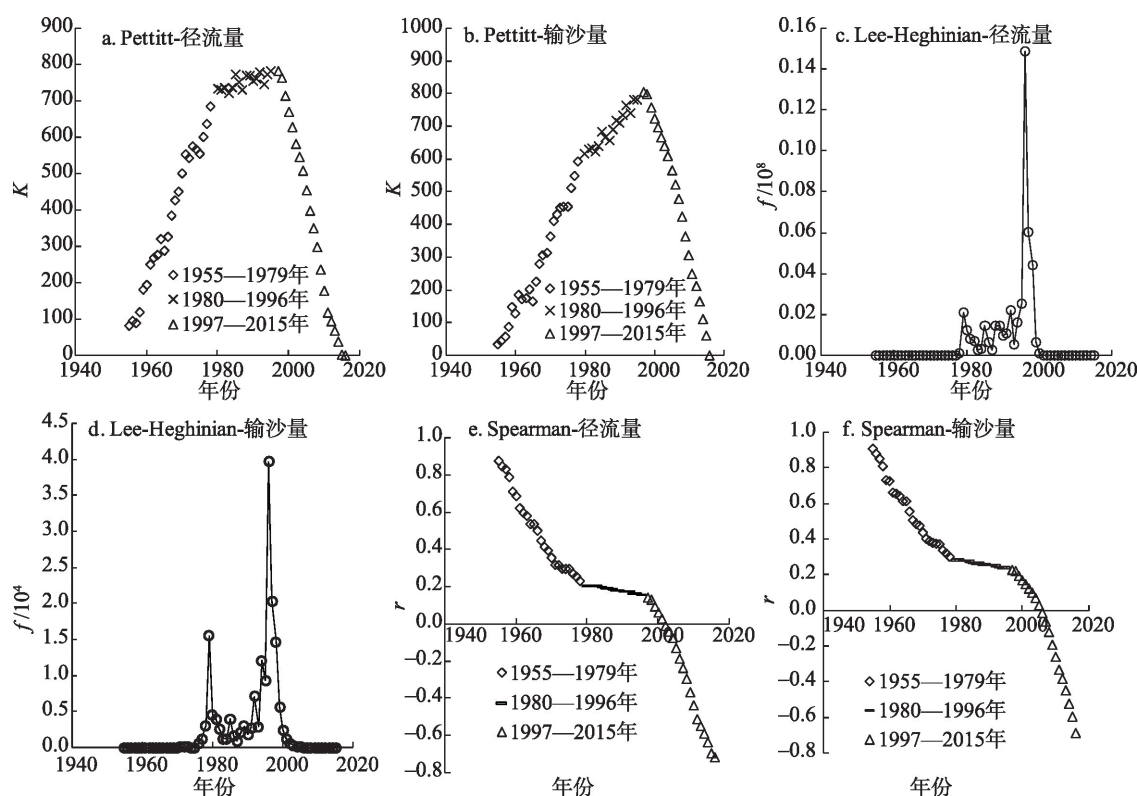


图3 1955—2015年窟野河流域径流量和输沙量突变分析结果

Figure 3 Abrupt change of annual runoff and sediment in the Kuye River catchment, 1955-2015

为1979年和1996年。相比之下,1996年斜率变化更为明显,因此按 Spearman 方法检验结果,也可将1996年作为其径流量和输沙量的显著突变点。

由此确定温家川站1955—2015年年径流量和输沙量共61年长时间序列突变点均为1996年。

### 4.3 气候变化和人类活动对径流量和输沙量影响的定量分析

以径流量和输沙量的突变年份为界将窟野河流域各要素序列划分为2个时期: $T_1$ (1955—1996), $T_2$ (1997—2015)。根据公式(3)–(9)计算了 $T_2$ 时期径流变化量及各因素的贡献量。结果得到降水变化引起年径流减少10.48 mm,潜在蒸散发变化引起年径流减少1.19 mm,人类活动减少年径流51.3 mm(表2)。

为估算 $T_2$ 时期输沙变化以及人类活动和降水变化的贡献量,按上面说明的方法,首先根据流域1955—2015年降水–输沙量双累积曲线(图4)拟合得到突变年份1996年以前累积降水量与累积输沙

量的线性回归方程: $\sum S = 27.946 \times \sum P - 393.284$ ,式中 $S$ 为年输沙量(万t)。然后,将1997年及其以后年份累积降水数据代入该方程,可得到累积年输沙量计算值,进而得到年输沙量计算值。再由 $T_2$ 时期年均输沙量计算值扣除实测值,得到该时期人类活动减少的输沙量。计算结果(表3)表明人类活动对输沙量减少的贡献率为96.41%,降水变化对其减少的贡献率为3.59%。

可见,从 $T_1$ 到 $T_2$ 时期,人类活动是窟野河流域径流量和输沙量减少的主导因素。这可能与以下几个方面的人类活动有关:首先,20世纪70年代以来,开展了包括梯田、淤地坝、植树种草在内的一系列水土保持综合治理工作,以及水库、池塘、灌渠等水利工程建设<sup>[21]</sup>,导致流域产水产沙减少;其次,国家开始实施大规模退耕还林还草和天然林禁伐等人工生态修复工程,造成水沙的进一步减少<sup>[22]</sup>,截至2006年,窟野河整个流域受梯田、淤地坝和植树种草等水土保持措施影响的面积由1%增加到56%<sup>[23]</sup>。

## 5 讨论

### 5.1 植被覆盖和煤炭开采对水沙变化的影响

NDVI是植被生长状态的重要指示因子,与植被覆盖度具有很好的相关性<sup>[24]</sup>。图5显示窟野河流

表2 气候变化和人类活动对窟野河流域径流变化影响

Table 2 Effects of climate change and human activities on runoff in the Kuye River catchment

	$T_1$	$T_2$
降水量/mm	396.47	364.11
潜在蒸散发量/mm	1037.42	1056.07
流域下垫面参数 $n$	1.26	1.85
$\Delta R_p$ /mm		-10.48
$\Delta R_{E_0}$ /mm		-1.19
$\Delta R_H$ /mm		-51.30
$\eta_c$ /%		18.53
$\eta_H$ /%		81.47

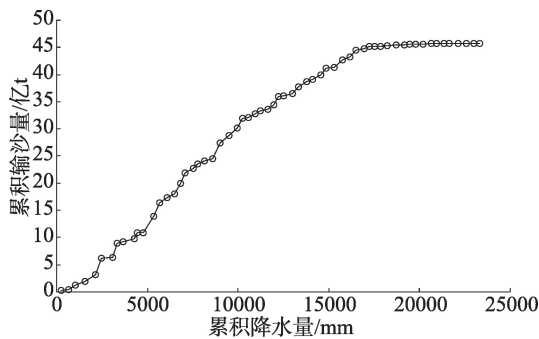


图4 1955—2015年窟野河流域降水量–输沙量双累积曲线

Figure 4 Double mass curve of precipitation–sediment in the Kuye River catchment, 1955–2015

表3 气候变化和人类活动对窟野河流域输沙变化影响

Table 3 Effects of climate change and human activities on sediment in the Kuye River catchment

	实测年输沙量/万t	年输沙量计算值/万t	气候变化减少输沙量/万t	人类活动减少输沙量/万t	气候变化贡献率/%	人类活动贡献率/%
$T_1$	10529.90					
$T_2$	648.19	10175.626	354.289	9527.433	3.59	96.41

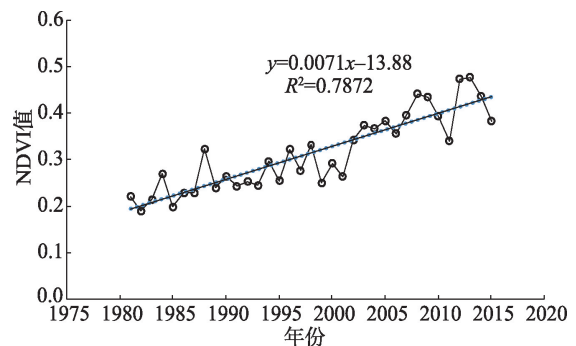


图5 1981—2015年窟野河流域NDVI值

Figure 5 Annual NDVI in the Kuye River catchment, 1981–2015

2020年3月

域 NDVI 值,由 1981 年的 0.22 增加至 2015 年的 0.49,增加趋势明显。植被在有效减少径流泥沙方面起着重要的作用。降水通过林冠层和枯枝落叶层的截留再分配以后,一部分水分进入土壤中贮存,被林木及植物吸收蒸腾,另一部分作为地表径流参与流域的汇流过程形成流域出口的洪峰流量。同时,部分雨量通过树干流到地面,免除了雨滴击溅造成的土壤侵蚀,从而有效减少入河泥沙。再者,进入 20 世纪 90 年代后,窟野河流域煤炭开采显著增加<sup>[5]</sup>。煤炭开采会改变含水层结构,煤炭开采后,上覆岩层失去支撑,引起采空区顶板岩层的变形甚至塌陷,破坏上部含水层结构,降低地下水位,减少水资源,导致区域地表水、地下水资源枯竭,从而影响进入河流汇流量;其次,部分露天开采区及采煤塌陷区变成了蓄水池,使得其以上汇流区的产水产沙难以进入河道,最终造成流域减水减沙。刘二佳等<sup>[6]</sup>粗略估计 1997—2006 年窟野河流域煤炭开采对其径流减少的贡献率为 52.27%;蒋晓辉等<sup>[5]</sup>估测 1997—2006 年煤炭开采的贡献率为 54.8%。根据蒋晓辉等<sup>[5]</sup>统计结果,窟野河流域煤炭开采量自 1996 年以后急剧增加,与水沙突变点相吻合。

## 5.2 与以往研究结果对比

近年来,有关窟野河流域水沙变化的研究大都集中在径流量,对输沙量的研究多着眼于输沙及其侵蚀特性,对影响输沙量变化因子贡献率的研究相对较少,因此本文仅就径流分析结果与以往进行了对比(表 4)。从表 4 中可以看出,与以往研究相比,本文中人类活动影响偏小,考虑可能与采用的径流时间序列不同有关。以往研究大都止于 2010 年前后,考虑到自 2012 年以来降水量变化趋势,随着降水量增加,径流量呈微弱增加趋势,气候变化作用

相对增强,进而人类活动相对减弱。

最后值得说明的一点是本文用弹性系数法估算径流变化因素贡献率可能产生的误差。弹性系数法主要根据泰勒一阶展式进行计算,因此其在应用过程中会对结果带来一定的误差。根据 Yang 等<sup>[27]</sup>的研究,增加的降水量或降低的潜在蒸散发将会低估气候贡献率,降低的降水量或增加的潜在蒸散发将会高估气候贡献率。但是,在窟野河流域降水量呈现不显著微弱下降趋势而潜在蒸散发呈现不显著微弱上升趋势,因此两者产生的误差相互抵消,可忽略不计。

## 6 结论

本文采用弹性系数法和双累积曲线法分析了窟野河流域 1955—2015 年径流量和输沙量的变化趋势及特点。结果显示:

(1)研究期间窟野河流域年径流量和年输沙量均显著减少,且在 1996 年发生明显突变。与不同的是,年降水与潜在蒸散发变化趋势均不显著且没有发生明显突变。表明人类活动改变流域下垫面是该流域水沙变化的主要原因。窟野河流域下垫面主要表现为植被覆盖和煤炭开采量明显增加。其中植被覆盖的增加主要缘于流域内大规模开展了生态修复措施。

(2)在窟野河流域,气候变化和人类活动对年径流减少的贡献率分别为 18.53%和 81.47%,而对年输沙量减少的贡献率分别为 3.59%和 96.41%。人类活动对流域水沙减少的贡献远大于气候变化。流域水土保持措施的开展大量减少了流域输沙量,但同时也减少了产水量,可能会对流域的生态基流与河流健康产生影响。因此,必须综合考虑本流域及其下游的生态保护和经济发展需求开展流域的治理工作。

表 4 窟野河流域径流变化以往研究结果

Table 4 Previous studies on runoff change in the Kuye River catchment

来源	研究时期	突变点	方法	措施期	径流变化贡献率/%	
					气候变化	人类活动
Zhao 等 <sup>[25]</sup>	1954—2010 年	1996 年	基于 Budyko 的水量平衡法	1997—2010 年	10.3	89.7
Zhao 等 <sup>[25]</sup>	1997—2010 年	1999 年	线性回归法	2000—2010 年	15.3	84.7
郭巧玲等 <sup>[26]</sup>	1955—2012 年	1996 年	线性回归法	1997—2012 年	10.4	89.6
本文	1955—2015 年	1996 年	弹性系数法	1997—2015 年	18.5	81.5

## 参考文献(References):

- [1] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1-2): 111-126.
- [2] Li L, Ni J R, Chang F, et al. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(1): 62-69.
- [3] Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 7-21.
- [4] Zhang M, Wang J P, Zhou R J. Attribution analysis of hydrological drought risk under climate change and human activities: A case study on Kuye River Basin in China[J]. *Water*, 2019, DOI: 10.3390/w11101958.
- [5] 蒋晓辉, 谷晓伟, 何宏谋. 窟野河流域煤炭开采对水循环的影响研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(2): 300-307. [Jiang X H, Gu X W, He H M. The influence of coal mining on water resources in the Kuye River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2): 300-307.]
- [6] 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. [Liu E J, Zhang X P, Zhang J J, et al. Variation of annual streamflow and the effect of human activity in the Kuye River during 1956 to 2005[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(7): 1159-1168.]
- [7] Gao G Y, Fu B J, Zhang J J, et al. Multiscale temporal variability of flow-sediment relationships during the 1950-2014 in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 609-619.
- [8] Zhang S Y, Chen D, Li F X, et al. Evaluating spatial variation of suspended sediment rating curves in the middle Yellow River basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(11): 1616-1624.
- [9] Sun P C, Wu Y P, Gao J E, et al. Shifts of sediment transport regime caused by ecological restoration in the Middle Yellow River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134261.
- [10] 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砂砾岩侵蚀机理研究与展望[J]. *人民黄河*, 2018, 40(6): 1-8. [Yao W Y, Li C M, Zhang P, et al. Prospect and research on the erosion mechanism of Pisha sandstone[J]. *Yellow River*, 2018, 40(6): 1-8.]
- [11] Li H J, Shi C X, Zhang Y S, et al. Using the Budyko hypothesis for detecting and attributing changes in runoff to climate and vegetation change in the soft sandstone area of the middle Yellow River basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135588.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [13] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [14] Kendall M G. *Rank Correlation Measures*[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [15] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Publications of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [16] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979, 28(2): 126-135.
- [17] Lee A F S, Heghinian S M. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables: A Bayesian approach[J]. *Technometrics*, 1977, 19(4): 503-506.
- [18] 许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 420-426. [Xu Q X, Shi G Y, Chen Z F. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 420-426.]
- [19] Xu X Y, Yang D W, Yang H B, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 510: 530-540.
- [20] 高文永, 高亚军, 徐建华. 采矿塌陷对窟野河流域水沙的影响[J]. *人民黄河*, 2017, 39(11): 76-80. [Gao W Y, Gao Y J, Xu J H. Influences of mining collapse on water and sediment of Kuye River basin[J]. *Yellow River*, 2017, 39(11): 76-80.]
- [21] Zhang Q, Zhang Z J, Shi P J, et al. Evaluation of ecological in-stream flow considering hydrological alterations in the Yellow River basin, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 160: 61-74.
- [22] Zhang X P, Lin P F, Chen H, et al. Understanding land use and cover change impacts on run-off and sediment load at flood events on the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(4): 576-589.
- [23] Liang W, Bai D, Wang F Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [24] Joiner J, Yoshida Y, Anderson M, et al. Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 339-352.
- [25] Zhao G J, Tian P, Mu X M, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 387-398.
- [26] 郭巧玲, 陈新华, 窦春锋, 等. 近60年来窟野河全流域年径流变化及其影响因素分析研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 90-95. [Guo Q L, Chen X H, Dou C F, et al. Study on the variation of annual runoff and influencing factors in Kuye River during the past 60 years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30



(3): 90–95.]

[27] Yang H B, Yang D W, Hu Q F. An error analysis of the Budyko hy-

pothesis for assessing the contribution of climate change to runoff

[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(12): 9620–9629.

## Quantification of the influencing factors of runoff and sediment discharge changes of the Kuye River catchment in the middle reaches of the Yellow River

LI Huijuan<sup>1,2</sup>, SHI Changxing<sup>1</sup>, MA Xiaoqing<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Kuye River catchment is located in the soft sandstone area of the middle Yellow River where the ecological environment is extremely vulnerable. It is one of the principal sources of coarse sediment in the middle reaches of the Yellow River. The runoff and sediment load of the river have been changing considerably in recent decades. Therefore, it is of great significance for improving the catchment management of the middle Yellow River to explore the impacts of climate change and human activities on runoff and sediment discharge in the Kuye River catchment. In order to reveal the long-term variations of runoff and sediment discharge of the Kuye River, this study analyzed the runoff and sediment discharge series from 1955 to 2015 using non-parametric Mann-Kendall test and three kinds of abrupt change test, and estimated the contribution rates of climate change and human activities, respectively, using elasticity method based on the water balance model and double mass curve method. The results show that annual runoff and sediment discharge had a significant decreasing trend and the jump points occurred in 1996. The relationship between runoff and sediment discharge has changed significantly since 2012. Compared with the reference period ( $T_1$ : 1955-1996), the contribution rates of climate change and human activities to annual runoff reduction are 18.53% and 81.47%, respectively. The contribution rates of climate change and human activities to annual sediment reduction are 3.59% and 96.41%, respectively. Human activities, mainly vegetation restoration and coal mining, are the most important reasons that caused the reduction of annual runoff and sediment load in the Kuye River. Considering that intended and unintended human interferences in the Kuye River catchment have greatly reduced not only the sediment yield but also the inadequate water resource, it is a question of how to achieve ecological protection and high quality development by planning future soil and water conservation projects and adjusting the industrial structure in the context of global climate change with reference to previous governance effects.

**Key words:** Budyko hypothesis; precipitation; potential evapotranspiration; human interference; runoff and sediment discharge change; rich and coarse sediment area; Kuye River; middle reaches of the Yellow River