

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.025.

马亚丽, 牛最荣, 张芮, 等. 洮河流域径流输沙演变与降雨及降雨侵蚀力的关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 90-97, 109.

MA Yali, NIU Zuirong, ZHANG Rui, et al. Relationship Between the Evolution of Runoff and Sediment and Rainfall and Rainfall Erosivity in the Taohe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 90-97, 109.

洮河流域径流输沙演变与降雨及降雨侵蚀力的关系

马亚丽, 牛最荣, 张芮, 郑志琴, 孙栋元

(甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070)

摘 要: [目的]揭示气候变化、人类活动耦合作用下复杂的水沙变化、水沙关系, 探明降雨侵蚀力的影响及径流输沙变化的响应机理, 为流域水土流失防治和生态建设提供科学参考依据。[方法]基于洮河流域及周边 6 个气象站点逐日降水和下游控制站逐月径流输沙数据, 采用多元统计分析法、水沙曲线、相关系数、灰色关联度、弹性分析法等方法分析了径流、输沙、降雨(P)、降雨侵蚀力(R)演变规律, 及其相互作用关系。[结果]洮河流域 1956—2019 年径流整体呈显著下降趋势, 线性变化率 $-2.8 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$, 1987 年发生突变, 输沙整体呈显著下降趋势, 线性变化率 $-4.61 \times 10^5 \text{ t/a}$, 2003 年发生突变, 降雨、降雨侵蚀力均呈不显著上升趋势, 且未出现明显突变。洮河流域 R 上中游小于下游, 夏季(626.33) > 秋季(125.31) > 春季(122.22) > 冬季(0), 夏季降雨侵蚀力占比 71.67%, 夏季对泥沙侵蚀影响最大。 P 与 R 分布相反, P 相对较小的下游流域 R 较大, P 相对较大的上中游 R 较小, 流域水沙异源, 上中游产水, 下游产沙。对输沙量影响最大的是 R , 对径流量影响最大的是 P , 2003 年后单位降雨侵蚀力输沙水平有所降低。影响输沙量变化人类活动占比 90% 左右, 气候因素占比 10%。[结论]变化环境下洮河流域输沙变化主要受人类活动影响, 流域水沙异源, 与 P 相比, 更应关注 R 对输沙变化的作用。

关键词: 输沙变化; 水沙关系; 弹性系数法; 降雨侵蚀力; 黄河流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0090-08

Relationship Between the Evolution of Runoff and Sediment and Rainfall and Rainfall Erosivity in the Taohe River Basin

MA Yali, NIU Zuirong, ZHANG Rui, ZHENG Zhiqin, SUN Dongyuan

(College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to reveal the complex changes of water and sediment and the relationship between water and sediment under the coupling effect of climate change and human activities, as well as the influence of rainfall erosivity and the response mechanism of runoff and sediment transport changes, and then to provide scientific reference for water and soil loss prevention and ecological construction in the basin. [Methods] The daily precipitation data of six meteorological stations in Taohe River Basin and its surrounding areas and monthly runoff and sediment data of downstream control stations were used. Multivariate statistical analysis method, water-sediment curve, correlation coefficient, grey correlation degree and elastic analysis method were used to analyze and study the variability of runoff, sediment, rainfall (P) and rainfall erosivity (R) and their interaction relationship. [Results] The runoff in Taohe River Basin decreased significantly from 1956 to 2019 with the linear change rate of $-2.8 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ and the abrupt change occurred in 1987. The sediment decreased significantly with the linear change rate of $-4.61 \times 10^5 \text{ t/a}$ and the abrupt change occurred in 2003. The rainfall and rainfall erosivity did not increase significantly without obvious mutation. R in the upper and middle reaches of Taohe River basin was less than that in the lower reaches

收稿日期: 2022-05-16

修回日期: 2022-06-06

资助项目: 甘肃农业大学水利水电工程学院科研团队建设专项资助项目(Gaucwky-04); 甘肃省重点研发计划项目(21YF5NA015); 甘肃省水利科学试验研究与技术推广计划项目(GSAU-JSYF-2021-016); 甘肃省高等学校青年博士基金项目(2022QB-070)

第一作者: 马亚丽(1987—), 女, 河北保定人, 硕士, 讲师, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: gsaumayl@163.com

通信作者: 牛最荣(1964—), 男, 甘肃通渭人, 博士, 教授级高工, 主要从事水文与水资源教学与研究。E-mail: niuzr@gsau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

with R in summer (626.33) $> R$ in autumn (125.31) $> R$ in spring (122.22) $> R$ in winter (0), and R in summer was 71.67% and the influence of rainfall erosivity in summer was the greatest. The distribution of P and R was opposite. R was greater in the lower reaches of the basin where P was relatively little, and R was less in the upper and middle reaches of the basin where P was relatively great. Runoff and sediment were generated in different part of the basin with runoff producing in the upper and middle reaches and sediment producing in the lower reaches. R had the greatest influence on sediment, when P had the greatest influence on runoff. The sediment caused by unit rainfall erosivity had been decreased since 2003. Human activities that affected the sediment accounted for about 90%, and climate factors accounted for 10%. [Conclusion] The sediment in the Taohe Basin is mainly influenced by human activities under the changing environment, and the runoff and sediment in the basin have different sources. Compared with P , more attention should be paid to the effect of R on the sediment change.

Keywords: sediment load change; water-sediment relationship; elastic coefficient method; rainfall erosivity; Yellow River Basin

径流、输沙既可以表征河川径流水文特征,又是衡量区域生态环境变化和水土流失状况的重要指标和依据,尤其对于输沙量巨大的黄河而言,径流、泥沙的重要意义更为突出,是黄河流域水土流失治理成效的重要依据。有研究表明:自21世纪以来,黄河径流量和输沙量呈锐减态势,黄河及其支流径流和输沙的改变受到社会各界的广泛关注^[1]。气候、地质地貌以及人类活动是影响流域内径流、输沙三大主要要素^[2]。在百年时间尺度内,主要体现在气候变化和人类活动两个方面的影响,这两大类影响因素使自然生态环境中陆地水文循环的时空格局发生改变,气候变化通过气温、降水变化直接影响区域水循环,并体现在流域内的径流、泥沙等水文要素改变^[3-4]。黄土高原地区生态环境脆弱,水土流失严重^[5],为了改善黄土高原地区生态环境和区域水土流失状况,开展了流域尺度的水土流失综合治理工作,在一定程度遏制了流域水土流失量,促使径流输沙发生改变。可见,气候变化、人类活动的双重因素耦合作用促使流域水沙变化和水沙关系变得更加复杂^[6-8]。

近年来,在全球气候演变和黄土高原实施退耕还林(草)等政策的背景下,黄河流域各支流水沙量大幅度减少,植被覆盖度明显增加,区域水文情势和生态条件发生显著变化^[9]。气候因子中降水对径流量影响比较显著,人类活动中水土保持措施对减少径流量和输沙量意义重大,降水是水资源的重要补给来源,是水力侵蚀的动力来源,降雨、径流、输沙三者之间存在紧密的联系^[10]。对径流、输沙与降水变化特征、相关关系及响应机制研究,为水资源管理、流域生态建设提供重要理论支撑。刘酌希等^[11]基于水文模拟法对1955—2015年洮河流域径流变化进行归因分析,认为气候变化是径流减少的主要原因。王莺等^[12]构

建多种情景模式模拟洮河流域1976—2013年水文特征,发现上游、中下游地表径流变化分别主要受气候变化的影响、土地利用和气候变化的共同影响。已有研究成果主要针对洮河水文站点径流变化特征及归因分析研究,缺乏对洮河流域输沙演变归因,径流、输沙与降雨侵蚀力之间的关系研究,因此,本研究选取洮河流域径流、输沙与降雨侵蚀力为研究对象,分析径流、输沙与降雨侵蚀力演变规律及三者之间的关系,明确降雨侵蚀力的影响,揭示洮河流域径流输沙变化的响应机理,研究成果对流域水土流失防治和生态建设等具有重要意义。

1 研究区概况

洮河是黄河上游右岸一级支流,地处甘肃省南部,发源于西倾山北麓勒尔当,流经甘南、定西、临夏等地,在临夏州永靖县刘家峡水库大坝上游汇入黄河,干流全长673 km,流域面积25 527 km²^[13],地理位置为101°36′—104°20′E,34°06′—36°01′N。该流域地跨三大地貌单元,上游地区海拔高度在3 000 m以上,草原广布,地势相对平坦,植被情况良好;中游河段海拔高度在2 000 m以上,为高山峡谷地区,坡陡水急,水能资源蕴藏丰富,森林草原覆盖;下游至河口段,为黄土丘陵区,地形支离破碎,植被覆盖较差,水土流失严重。洮河流域中上游产水,下游产沙,水沙异源,河川径流量较大,为黄河流域在甘肃境内水量较丰区^[14]。流域上中游寒冷湿润,下游温暖干旱,多年平均气温从上游的1℃增至下游的9℃,多年平均降水量从650 mm减少至300 mm^[15]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

洮河流域及周边6个气象站点1984—2019年的

逐日降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),流域面降雨侵蚀力采用泰森多边形法加权计算。径流、输沙数据采用洮河流域下游控制站红旗水文站 1956—2019 年的逐月径流、输沙资料,数据摘录于水文年鉴。洮河流域水文气象站点分布见图 1。

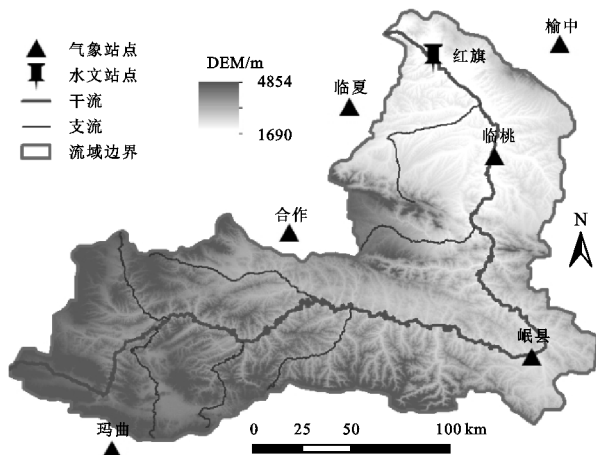


图1 洮河流域水文气象站点分布

2.2 研究方法

2.2.1 降雨侵蚀力计算 降雨侵蚀力的计算采用章文波等^[16]改进的理查德森日降雨侵蚀力计算方法。该模型主要利用日雨量资料对降雨侵蚀力进行计算,适合应用于黄土高原^[17],其具体计算公式如下:

$$R = \sum_{n=1}^{24} R_{\text{半月}}$$

$$R_{\text{半月}} = \alpha \sum_{k=1}^m P_k^\beta$$

$$\text{其中} \begin{cases} \alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \\ \beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为半月内侵蚀性降雨时间(d); m 为半月时段内的时间(d); P_k 为半月内第 k 天 ≥ 12 mm 的日降雨量(mm); $R, R_{\text{半月}}$ 为年、半月内降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; α, β 为模型参数; P_{d12} 为日降雨量 ≥ 12 mm 的日平均降雨量(mm); P_{y12} 为日降雨量 ≥ 12 mm 的年平均降雨量(mm)。将每个半月的降雨侵蚀力(R)累加即可得到年降雨侵蚀力。降雨侵蚀力以站点为单位计算,为了表征洮河流域范围降雨侵蚀力大小,采用泰森多边形内插法得到流域范围平均降雨侵蚀力。

2.2.2 趋势及突变分析 本研究运用滑动平均法、线性回归法、Mann-Kendall 非参数统计检验法,揭示径流、输沙、降雨侵蚀力等时间序列的趋势性变化规律。采用 Mann-Kendall 突变检验进行突变分析,辅以双累积曲线验证突变点。Mann-Kendall 法要求样本数据无需遵从一定分布规律,在非正态分布的水文气象等数据中,适用性良好,计算简便^[18]。

2.2.3 水沙关系曲线 水沙关系曲线(Rating Curve)用来反映流域产沙特征及河流输沙特性^[19],形式为:

$$S_c = aQ^b \quad (2)$$

式中: S_c 为悬移质泥沙输沙率; Q 为流量; a 为系数; b 为指数。

许多研究也常采用其转换式,即:

$$S = aW^{b+1} \quad (3)$$

式中: W 为径流量; S 为输沙量; a 为系数; b 为指数。水沙关系曲线属于“黑箱”模型,参数 a, b 无实际物理意义^[19],人为设定了一些专业解释, a 值越大表示风化沉积物较多,沙源供应越多,受人类活动等外界因素较大^[20]; b 值越大,表明水流侵蚀力越显著^[21],与河床形态、河流剖面有关^[22]。

2.2.4 双累积曲线法 双累积曲线法是目前应用于水文要素一致性或长序列趋势及突变分析中最简单、直观、广泛的方法^[23],通过判定两个变量累积值之间直线斜率发生突变的位置,即可确定二者关系发生突变的时间^[24]。建立突变前基准期累积降水侵蚀力与累积径流量(或累积输沙量)的线性关系式:

$$\begin{aligned} \sum Q &= k \sum R + b \\ \sum S &= k' \sum R + b' \end{aligned} \quad (4)$$

式中: k, k', b, b' 为参数。

目前,有关水沙变化的贡献率计算方法虽各具特色,但是大部分方法的研究思路完全一致,即着眼于基准期(人类活动影响较小)和变化期(人类活动影响较明显)的比较来定量评价驱动因素对水沙的影响^[25],利用突变后变化期的累积降水侵蚀力计算变化期的累积径流量(或累积输沙量),计算出还原后的累积径流量(或累积输沙量),再与同期实测值对比,二者差值即为人类活动影响量。

2.2.5 弹性分析法 气候变化将导致降水及潜在蒸发能力的变化,从而引起径流量和输沙量发生相应变化。通过分析径流对降水及潜在蒸散发的敏感性系数,表征径流量对气候变化的定量响应,可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta Q_C &= (\epsilon_P \Delta P / P + \epsilon_{E_0} \Delta E_0 / E_0) Q \\ \Delta Q &= \Delta Q_C + \Delta Q_H \end{aligned} \quad (5)$$

式中: E_0 为潜在蒸发量; ϵ_P 和 ϵ_{E_0} 分别为径流对于降水和潜在蒸发的弹性系数; ΔP 和 ΔE_0 分别为降水和潜在蒸散发的变化量; ΔQ 为径流变化总量; ΔQ_C 为径流对气候变化响应的变化量; ΔQ_H 为径流对人类活动响应的变化量。

推导输沙公式,需拟合径流与输沙关系式,按照洮河流域 1956—2019 年径流(Q)和输沙(S)数据拟合为二次函数式:

$$S=0.0183Q^2-0.0935Q+188.14 \tag{6}$$

根据流域长时段水量平衡公式以及流域实际蒸散发量(E_a)为干燥指数($\varphi=E_o/P$)的函数, $F(\varphi)$ 函数采用 Zhang 等^[26]的公式,可表示为:

$$Q=P-E_a=P[1-F(\varphi)]$$
$$F(\varphi)=(1+\omega\varphi)/(1+\omega\varphi+1/\varphi),\omega=1 \tag{7}$$

$$\epsilon_P=\frac{\partial S/S}{\partial P/P}, \text{ 且 } \epsilon_P+\epsilon_{E_0}=1 \tag{8}$$

将公式(6)和公式(7)代入公式(8)中,最终得出输沙 ϵ_P 和 ϵ_{E_0} 。

$$\epsilon_P=\frac{P^2(P^2+2E_0P+3E_0^2)(366P^3-935P^2-935E_0P-935E_0^2)}{10000(P^2+E_0P+E_0^2)^3}\cdot\frac{P}{S} \tag{9}$$

输沙量对气候变化的定量响应,可表示为:

$$\Delta S_C=(\epsilon_P\Delta P/P+\epsilon_{E_0}\Delta E_0/E_0)S$$
$$\Delta S=\Delta S_C+\Delta S_H \tag{10}$$

式中: ϵ_P 和 ϵ_{E_0} 分别为输沙对于降水和潜在蒸发的弹性

系数; ΔS 为输沙变化总量; ΔS_C 为输沙对气候变化响应的变化量; ΔS_H 为输沙对人类活动响应的变化量。

3 结果与分析

3.1 洮河流域径流输沙变化

3.1.1 径流变化 洮河流域 1956—2019 年径流整体呈显著下降趋势,线性倾向变化率 $-2.8\times10^7\text{ m}^3/\text{a}$,M-K 统计量为 -2.61 ,达到 0.05 显著性水平,多年平均年径流量为 $4.49\times10^9\text{ m}^3$,其中 1956—1986 年平均值 $5.21\times10^9\text{ m}^3$,高于多年平均 16.04%,1987—2019 年平均值 $3.81\times10^9\text{ m}^3$,低于多年平均 15.15%,1987 年前后下降 26.87%,具体见图 2A。M-K 突变分析显示,年径流在 95% 的置信区间内于 1987 年发生突变,1987 年以前大部分年份 $UF_k>0$,但并未超越临界线,1956—1987 年呈不显著上升趋势,1987 年以后 $UF_k<0$,且 1998 年超过临界线,1987—2002 年呈显著下降趋势,具体见图 2B。

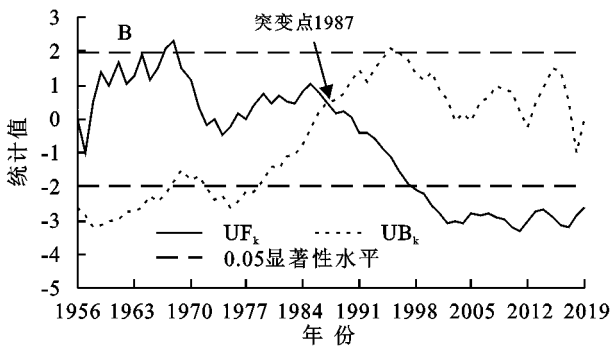
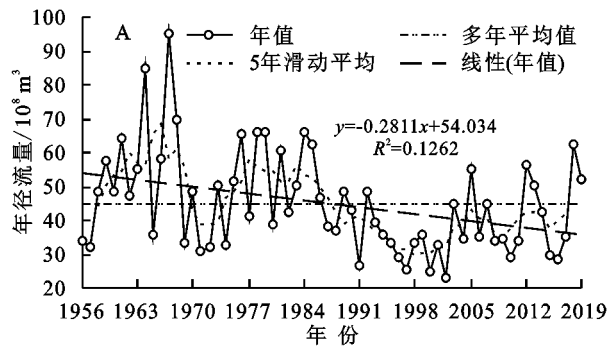


图 2 洮河流域径流年际变化特征

3.1.2 输沙变化 洮河流域 1956—2019 年泥沙整体呈显著下降趋势,线性倾向变化率 $-4.61\times10^5\text{ t/a}$,M-K 统计量为 -5.03 ,达到 0.05 显著性水平,多年平均年输沙量为 $2.04\times10^7\text{ t}$,其中 1956—2002 年平均值 $2.52\times10^7\text{ t}$,高于多年平均 23.53%,2003—2019 年平均值 $7.02\times10^6\text{ t}$,低于多年平均 65.59%,2003

年前后下降 72.14%,具体见图 3A。M-K 突变分析显示,年径流在 95% 的置信区间内于 2003 年发生突变,2003 年以前大部分年份 $UF_k<0$,但并未超越临界线,1956—2003 年呈不显著下降趋势,2003 年以后 $UF_k<0$,且 2004 年超过临界线,2003—2019 年呈显著下降趋势,如图 3B 所示。

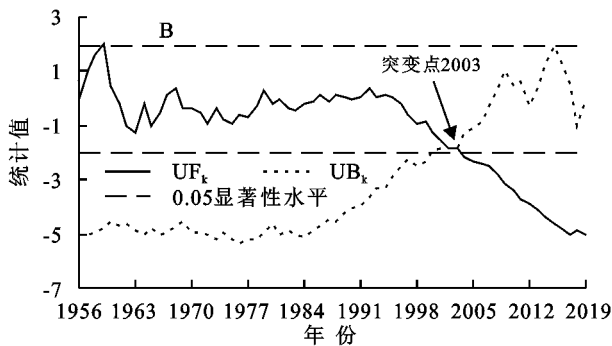
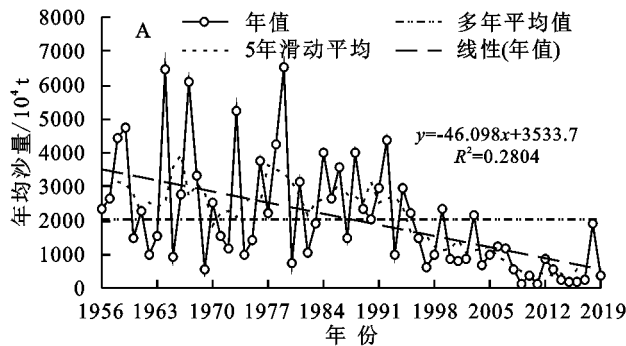


图 3 洮河流域输沙年际变化特征

3.2 洮河流域降雨及降雨侵蚀力时空变化

3.2.1 降雨及降雨侵蚀力年际变化 根据洮河流域 6 个气象站点降雨资料,利用泰森多边形对站点多年

平均年降雨 P (年降雨侵蚀力 R) 进行加权平均计算洮河流域年降雨 P (年降雨侵蚀力 R),发现洮河流域 P, R 均呈现不显著上升趋势,每年平均线性变化分

等地,年降雨量 415.20~490.13 mm。综合看,降雨分布与降雨侵蚀力分布基本相反,降雨量较小的下游地带降雨侵蚀力较大,降雨量相对较大的上中游地带降雨侵蚀力较小,可见洮河流域下游虽然降雨总量小,但降雨强度大且集中,不均匀程度高,同时,下游

为黄土丘陵分布,地形支离破碎,植被覆盖较差,反而造成下游水土流失严重,中上游降雨侵蚀力相对较弱,且为高原和高山峡谷地带,植被情况良好,流域产沙量相对较少,径流量较大,即洮河流域水沙异源,上中游产水,下游产沙。

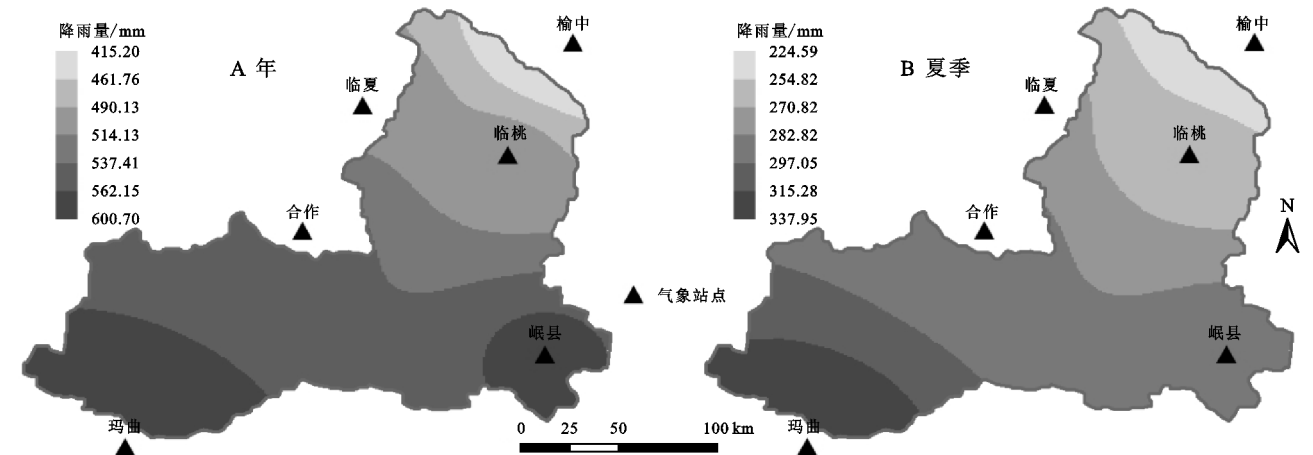


图 5 洮河流域多年平均降雨量空间分布

3.3 径流输沙变化对降雨侵蚀力的响应

3.3.1 相关关系 降雨、降雨侵蚀力、径流、输沙之间存在紧密关系,为了揭示 4 个变量的相互关系,进而厘清水沙关系,采用 Pearson, Kendall, Spillman 三种相关关系系数表征,具体见表 1。

计算结果表明 4 个变量之间存在显著相关关系,与输沙相关性排序为降雨侵蚀力、降雨量、径流量,降雨侵蚀力作为土壤侵蚀破坏的有效动力来源,与输沙量之间联系最为密切,影响最大,有效降雨量越大,降雨集中程度高,输沙量相应增大;与径流量相关程度最高的是降雨量,降雨经产汇流过程,最终汇集出口断面的径流量;对降雨侵蚀力而言,

降雨量与其相关性最密切(0.8~0.9),降雨强度高且降雨量大,直接促使降雨侵蚀力增加。综合看,对输沙量影响最大的是降雨侵蚀力,对径流量影响最大的是降雨量。

灰色关联度体现 4 个变量的变化一致程度,关联度值越接近于 1,表明联系越紧密,相似程度越高,计算结果具体见表 1。影响输沙量的变量中,降雨侵蚀力关联程度最高(0.893),影响径流量变量中,降雨量关联程度较高(0.827),印证相关系数表征的各变量对径流输沙影响大小,解释河道输沙量变化,可以探讨降雨侵蚀力变化,着重考虑降雨强度及降雨不均匀性,分析径流量变化,从降雨总量变化入手。

表 1 水沙变量相关性系数和灰色关联度

相关性及 关联度	输沙			径流			降雨			灰色关联度		
	Pearson	Kendall	Spillman	Pearson	Kendall	Spillman	Pearson	Kendall	Spillman	输沙	径流	降雨
径流	0.566 **	0.605 **	0.808 **							0.855		
降雨	0.595 **	0.649 **	0.854 **	0.688 **	0.502 **	0.704 **				0.849	0.827	
降雨侵蚀力	0.643 **	0.668 **	0.850 **	0.614 **	0.520 **	0.698 **	0.902 **	0.816 **	0.944 **	0.893	0.817	0.762

注: ** 代表 0.05 显著性水平, Pearson, Kendall, Spillman 分别代表皮尔逊相关系数、肯德尔S相关系数、皮尔曼相关系数。

3.3.2 水沙回归关系 依据流域年降雨、降雨侵蚀力、径流、输沙数据序列,分别对年降雨(P)-年径流(W)-年输沙(S)、年降雨(P)-年降雨侵蚀力(R)-年输沙(S)进行回归拟合,具体见图 6。年降雨(P)-年径流(W)、年降雨(P)-年降雨侵蚀力(R)表现出较好的线性关系,回归方程的决定系数 R^2 分别达到 0.61, 0.74, 表明降雨量对径流量和降雨侵蚀力有较大影响,降雨量增大,径流量和降雨侵蚀力相应增大,但前者和后者并非完全同步,降雨量与径流量会因人类活动干扰降

低其相关性,降雨量与降雨侵蚀力会随着极端降雨事件增多而紧密程度减弱。年径流量(W)-年输沙量(S)在 1956—1986 年拟合关系较好, R^2 为 0.55, 1987—2019 年的数据点分布得非常离散,且变换各种形式的拟合曲线拟合,精度均较低, R^2 均未超过 0.10, 说明 1987—2019 年期间水沙关系相关性较弱,难以确定其回归方程,分析是由于水土保持等人类活动削弱了径流输沙相关性。洮河 1956—1986 年水沙关系曲线方程 $S=aW^b+1$ 表示为 $y=4.1938x^{1.6129}$, 其中 a 为 4.193 8, b 为

0.612 9, 1987—2019 年水沙关系曲线方程 $S=a'W^{b'+1}$ 表示为 $y=34.943x^{0.8912}$, 其中 a' 为 34.943, b' 为 -0.108 8, a' 远大于 a , b' 小于 b , 可见洮河 1987—2019 年与 1956—1986 年相比, 人类活动影响更大, 河道固有属性影响较小。年降雨侵蚀力 (R)-年输沙 (S) 在 1984—2002

年、2003—2019 年均表现出较好的线性关系, 决定系数 (R^2) 分别达到 0.60, 0.57, 表明降雨侵蚀力对输沙量产生较大影响, 但第二时期斜率减小, 表明单位降雨侵蚀力输沙水平有所降低, 原因在于人类活动作用不断增加。

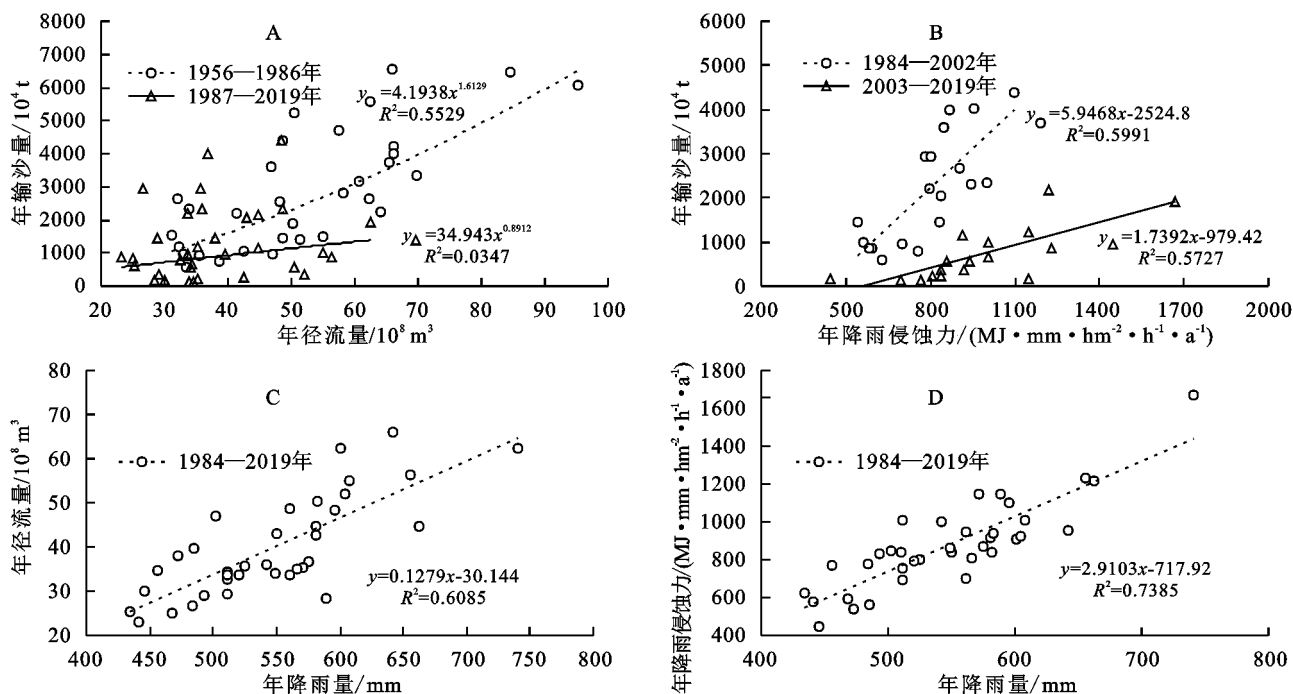


图6 不同时段洮河流域水沙回归关系

3.3.3 气候变化和人类活动对输沙的影响 基于年输沙量 M-K 突变检验, 2003 年为突变年份, 1984—2002 年、2003—2019 年分别划分为基准期 and 变化期。绘制降雨—输沙双累积曲线, 采用线性拟合数据, 拟合曲线决定系数接近 1.0, 基准期、变化期斜率发生突变, 斜率由 4.13 下降为 0.97, 认为单位降雨产沙量减少。基准期输沙量由年均 2.18×10^7 t, 下降为变化期年均 7.02×10^6 t, 下降 67.80%, 输沙量显著下降, 气候变化影响值 1.88×10^6 t, 影响率 12.72%, 人类活动影响值 1.29×10^7 t, 影响率 87.28%, 人类活动是输沙变化的主要影响因素。采用弹性分析法, 结合径流与

输沙关系式、水量平衡公式、Zhang 等^[26] 公式计算降雨、潜在蒸散发对输沙影响, 具体计算过程及公式见 2.2.5 部分 (弹性分析法), 其中, 径流与输沙拟合二次函数式为 $S=0.0183Q^2-0.0935Q+188.14$, 计算结果具体见表 2。弹性分析法表明输沙量多年呈显著下降趋势, 气候变化影响值 1.55×10^6 t, 影响率 10.51%, 人类活动影响值 1.32×10^7 t, 影响率 89.49%, 人类活动是输沙变化的主要影响因素。两种贡献率计算方法, 均得到人类活动是影响 1984—2019 年输沙量变化的主要因素, 且占比 90% 左右, 以降雨为主的气候因素影响占比 10%。

表2 气候变化和人类活动对输沙贡献率

贡献率 计算方法	有关方程及参数	气候变化		人类活动	
		$\Delta S_C/t$	$C_P/\%$	$\Delta S_H/t$	$C_H/\%$
双累积曲线法	基准期回归方程 $S=4.1329P+3823.2$ $R^2=0.974$	1.88×10^6	12.72	1.29×10^7	87.28
弹性系数法	径流与输沙关系式 $S=0.0183Q^2-0.0935Q+188.14$ $\epsilon_P=0.445$ $\epsilon_{E0}=0.555$	1.55×10^6	10.51	1.32×10^7	89.49

注: ΔS_C , ΔS_H 分别代表输沙气候变化和人类活动影响值; C_P , C_H 分别代表气候变化和人类活动对输沙变化贡献率。

4 讨论与结论

洮河流域 1956—2019 年径流整体呈显著下降趋势, 与刘酌希等^[11] 关于洮河流域 1955—2015 年径流下降趋势显著的结论一致, 线性变化率 -2.8×10^7

m^3/a , 多年平均年径流量为 $4.49 \times 10^9 m^3$, 1987 年发生突变, 1987 年前呈不显著上升趋势, 1987—2002 年呈显著下降趋势, 刘酌希等^[11] 认为洮河实测径流系列在 1986 年产生突变, 结论基本一致。1956—2019 年输沙整体呈显著下降趋势, 与张春林等^[27] 1956—2013 年

输沙量显著减少结论一致,线性变化率 $-4.61 \times 10^5 \text{ t/a}$,多年平均年输沙量为 $2.04 \times 10^7 \text{ t}$,2003年发生突变,2003年前呈不显著下降趋势,2003年后年呈显著下降趋势,张春林等^[27]发现洮河输沙量在2003年左右发生了一次减少突变,结论一致。洮河流域1984—2019年 P 、 R 均呈现不显著上升趋势,与张春林等^[27]关于洮河流域年降水量序列较为零乱,不存在明显的变化趋势的结论相同,年平均线性变化分别为 1.43 mm 、 $5.74 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,未出现明显突变点,1984—2001年均存在明显下降趋势,2002—2019年整体呈增加变化。

洮河流域上中游降雨侵蚀力小于下游地带,降雨侵蚀力夏季(626.33)>秋季(125.31)>春季(122.22)>冬季(0),夏季降雨侵蚀力 R_{sum} 占全年(873.86)的71.67%,夏季是泥沙侵蚀影响最大的季节。降雨分布与降雨侵蚀力分布相反,降雨量较小的下游地带降雨侵蚀力较大,降雨量相对较大的上中游地带降雨侵蚀力较小,洮河流域下游降雨强度大且集中,不均匀程度高,水土流失严重,中上游降雨侵蚀力相对较弱,流域产沙量相对较少,径流量较大,即洮河流域水沙异源,上中游产水,下游产沙,与张洪波等^[14]关于洮河流域水量主要产自中上游而沙量主要产自下游的结论一致。

降雨、降雨侵蚀力、径流、输沙四者之间的相关关系系数和灰色关联度结果表明,对输沙量影响最大的是降雨侵蚀力,对径流量影响最大的是降雨量。解释河道输沙量变化,可以探讨降雨侵蚀力变化,分析径流量变化,从降雨总量变化入手。降雨量与径流量会因人类活动干扰降低其相关性,降雨量与降雨侵蚀力会随着极端降雨事件增多而紧密程度减弱,水土保持等人类活动削弱了径流输沙相关性,相比1984—2002年降雨侵蚀力与输沙变化,2003—2019年均单位降雨侵蚀力输沙水平有所降低,在于人类活动作用不断增加。基于双累积曲线法和弹性分析法,发现影响1984—2019年输沙量变化人类活动占比90%左右,以降雨为主的气候因素影响占比10%,人类活动是影响输沙变化的主要因素。结论与张春林^[27]、牛最荣^[28]等有关21世纪以来输沙变化受人类活动影响明显,人类活动是主要影响因素,影响率达到80%~90%的结论一致,也验证了3.3.2部分水沙关系曲线反映出的人类活动影响不断增加的结论。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 穆兴民.黄土高原水土保持对河川径流及土壤水文的影

- 响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2002.
- [3] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [4] 王蕊,姚治君,刘兆飞.西北干旱区气候和土地利用变化对水沙运移的影响:以小南川流域为例[J].应用生态学报,2018,29(9):2879-2889.
- [5] 夏露,马耘秀,宋孝玉,等.黄河中游昕水河流域水沙变化及归因研究[J].水土保持学报,2021,35(6):109-115.
- [6] Shi C X, Zhou Y Y, Fan X L, et al. A study on the annual runoff change and its relationship with water and soil conservation practices and climate change in the middle Yellow River basin[J]. Catena, 2013,100:31-41.
- [7] 姚海芳,师长兴,顾珍逵.气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J].干旱区地理,2018,41(3):472-479.
- [8] Jiao J Y, Wang Z J, Zhao G J, et al. Changes in sediment discharge in a sediment-rich region of the Yellow River from 1955 to 2010: implications for further soil erosion control[J]. Journal of Arid Land, 2014,6(5):540-549.
- [9] 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.
- [10] 赵秀兰.祖厉河上游水沙变化及其对降水与水保措施的响应[D].兰州:甘肃农业大学,2020.
- [11] 刘酌希,陈鑫,管晓祥,等.变化环境下洮河流域径流变化归因[J].水土保持研究,2020,27(5):87-92,100.
- [12] 王莺,张强,王劲松,等.基于分布式水文模型(SWAT)的土地利用和气候变化对洮河流域水文影响特征[J].中国沙漠,2017,37(1):175-185.
- [13] 刘全谔,齐明亮,马啸宙,等.基于遥感和GIS的洮河流域面源污染流域尺度模拟及防治对策研究[J].干旱区地理,2020,43(3):706-714.
- [14] 张洪波,黄强,刘晓黎.甘肃洮河流域水资源可持续利用问题的探讨[J].西北水电,2005(3):7-11.
- [15] 李常斌,杨林山,杨文瑾,等.洮河流域土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究[J].地理科学,2014,34(7):848-855.
- [16] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [17] Wu L, Liu X, Ma X Y. Spatiotemporal distribution of rainfall erosivity in the Yanhe River watershed of hilly and gully region, Chinese Loess Plateau[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4). DOI: 10.1007/s12665-015-5136-6.
- [18] 张艳霞,于瑞宏,薛浩,等.锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应[J].干旱区研究,2019,36(1):67-76.
- [19] Asselman N E M. Fitting and interpretation of sediment rating curves[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(3/4):228-248.

- 速的区域变化特征分析[J].水土保持通报,2011,31(3):40-43.
- [17] 师玮,周俊菊,胡子瑛,等.甘肃省陇东地区近55年风速时空变化特征[J].生态学杂志,2017,36(12):3594-3601.
- [18] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
- [19] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [20] 何毅,杨太保,陈杰,等.1960—2013年南北疆风速变化特征分析[J].干旱区地理,2015,38(2):249-259.
- [21] Xu Xingkui, Levy Jason K, Lin Zhaohui, et al. An investigation of sand-dust storm events and land surface characteristics in China using NOAA NDVI data[J]. Global and Planetary Change, 2006,52(1/4):182-196.
- [22] 毛东雷,蔡富艳,杨余辉,等.新疆策勒4个典型下垫面近地层风速脉动特征[J].干旱区研究,2017,34(1):126-135.
- [23] 郭永强,王乃江,褚晓升,等.基于Google Earth Engine分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J].中国环境科学,2019,39(11):4804-4811.
- [24] 宋永永,马蓓蓓,李武斌,等.黄土高原县域城镇化的地域分异与动因机制[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2019,47(4):9-21.
- [25] 黄晓龙,杨雪,李涛,等.建站至2016年四川气象台站元数据变动特征分析[J].高原山地气象研究,2017,37(4):84-90.
- [26] 刘学锋,梁秀慧,任国玉,等.台站观测环境改变对我国近地面风速观测资料序列的影响[J].高原气象,2012,31(6):1645-1652.
- [27] 王恰.中国风电产业40年发展成就与展望[J].中国能源,2020,42(9):28-32,9.

(上接第97页)

- [20] 丁文峰,张平仓,任洪玉.近50年来嘉陵江流域径流泥沙演变规律及驱动因素定量分析[J].长江科学院院报,2008,25(3):23-27.
- [21] Gao P, Deng J C, Chai X K, et al. Dynamic sediment discharge in the Hekou-Longmen region of Yellow River and soil and water conservation implications[J]. Science of the Total Environment, 2017,578:56-66.
- [22] Hu B Q, Wang H J, Yang Z S, et al. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang(Yangtze River) basin and their implications [J]. Quaternary International, 2011,230(1):34-43.
- [23] Searcy J K, Hardison C H. Double-Mass Curves[M]. Washington D C: United States Government Printing Office, 1960.
- [24] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [25] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, et al. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches[J]. Science of the Total Environment, 2018,639:773-784.
- [26] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation change at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001,37(3):701-708.
- [27] 张春林,凡炳文,刘国华.近58年来洮河流域水沙演变特征与驱动力分析[J].人民黄河,2014,36(8):10-14.
- [28] 牛最荣,崔亮.气候变化和人类活动对洮河输沙量变化的影响分析[J].水利水电技术,2016,47(5):80-83,88.

(上接第102页)

- [11] 孟二浩.基于改进的EMD混合模型月径流预测研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [12] 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.
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998,454(1971):903-995.
- [14] Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1:1-41.
- [15] 高隽.人工神经网络原理及仿真实例[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [16] 茆美琴,龚文剑,张榴晨,等.基于EEMD-SVM方法的光伏电站短期出力预测[J].中国电机工程学报,2013,33(34):17-24,15.
- [17] Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C, et al. Time Series Analysis: Forecasting and Control[M]. John Wiley & Sons, 2015.