

# 无定河流域径流侵蚀功率时空变化特征

王伟<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 杨瑞<sup>3</sup>, 贾路<sup>1</sup>, 任宗萍<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

**摘 要:**不同尺度的径流侵蚀输沙关系尚未明确,亟待深入研究。为了探究流域径流侵蚀输沙的时空变化特征,基于水蚀动力过程的径流侵蚀功率理论,运用 Mann-Kendall 法和线性回归法分析了无定河流域 1956—2010 年年径流侵蚀功率和年径流量的时空变化;利用 Mann-Kendall 突变点检验,识别出径流的突变年份,对比分析突变年份前后的年径流侵蚀功率和年径流量变化,分析建立了年径流侵蚀功率—输沙相关模型。结果表明:1956—2010 年,无定河流域年径流量与年径流侵蚀功率有显著减小趋势,径流突变年份在 1971—1985 年。突变年份之前流域年径流侵蚀功率平均标准差高于突变年份后;突变年份之后年平均径流侵蚀功率比突变年份前平均减少  $1.05 \times 10^{-4} \text{ m}^4 / (\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ;年径流侵蚀功率随流域面积的增大而减小。流域径流侵蚀功率—输沙相关模型相关性显著 ( $p < 0.01$ )。研究阐明了无定河流域年径流侵蚀功率具有减少趋势,在空间上随流域面积增大而减少,在流域年尺度上径流侵蚀功率理论能够较好的表征径流侵蚀输沙关系。

**关键词:**径流侵蚀能量; 侵蚀输沙; 尺度效应; 径流侵蚀功率

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0026-07

## Temporal and Spatial Variation Characteristics of Annual Runoff Erosion Power in Wuding River Basin

WANG Wei<sup>1</sup>, LI Zhanbin<sup>1,2</sup>, YANG Rui<sup>3</sup>, JIA Lu<sup>1</sup>, REN Zongping<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.College of Architecture Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

**Abstract:** The relationship between runoff erosion and sediment transport at different scales is not clear and needs to be studied deeply. In order to study the temporal and spatial characteristics of runoff erosion and sediment transport, we analyzed the annual runoff erosion power and annual runoff in the Wuding River Basin from 1956 to 2010 based on the Mann-Kendall method and the linear regression method. The Mann-Kendall mutation test was used to identify the year of runoff and the annual runoff erosion power, and to analyze the annual runoff before and after the mutation year. The annual runoff erosion-power correlation model was established. From 1956 to 2010, the annual runoff and annual runoff erosion power of the Wuding River Basin decreased significantly, and the runoff mutation years were between 1971 and 1985. The average standard deviation of annual runoff erosion power before the mutation year was higher than that after the mutation year. The average annual runoff erosion power was  $1.05 \times 10^{-4} \text{ m}^4 / (\text{s} \cdot \text{km}^2)$  before the mutation year, and the annual runoff erosion power decreased with the increases of the watershed area. The correlation between the runoff erosion power and sediment transport model was significant ( $p < 0.01$ ). This study shows that the annual runoff erosion power in the Wuding River Basin has the decreasing trend and decreases

收稿日期:2019-02-18

修回日期:2019-04-02

资助项目:国家重点研发计划(2016YFC0402404);国家自然科学基金“基于能量过程的沟道工程侵蚀阻控机理研究”(51779204);国家自然科学基金“黄土高原流域植被空间分布量化与侵蚀产沙关系研究”(51609196)

第一作者:王伟(1986—),男,陕西延安人,博士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:360007519@qq.com

通信作者:任宗萍(1982—),女,山东潍坊人,博士,讲师,主要从事流域水沙过程方面的研究。E-mail:renzongping@163.com

with the increase of the basin area. The runoff erosion power theory can predict the runoff erosion and sediment transport relationship on the annual scale.

**Keywords:** runoff erosion energy; erosion sediment transport; scale effect; runoff erosion power

流域尺度上,径流不仅是泥沙的输移媒介,而且是能量传递、转化的纽带和载体。因此,径流侵蚀能量的传递过程、空间尺度效应及其与输沙之间的响应关系是流域侵蚀研究的薄弱环节,亟待对其进行定量研究<sup>[1]</sup>。研究人员<sup>[2]</sup>尝试采用径流能耗理论对侵蚀产沙过程进行了模拟和分析,得到了较好的结果。Yang C T<sup>[3]</sup>审查了常规泥沙输送方程推导中所用的基本假设,提出径流功率理论。同时为了进一步确定总含沙量,杨志达<sup>[4]</sup>提出了包括有关变量的函数关系。崔文滨等<sup>[5]</sup>应用这一理论对不同坡度和流量条件下的侵蚀产沙特征进行了分析和比较,发现径流功率理论能够较好地表征侵蚀产沙。以上研究说明,侵蚀能量理论能够较好的描述土壤侵蚀。尺度问题在流域水沙模拟中具有非常重要意义,不同时空尺度的水沙响应关系十分复杂,还需要科研人员不断地进行研究和探索。鲁克新等<sup>[6-7]</sup>基于次暴雨洪水过程中径流深、洪峰流量模数两个水文参数,提出了径流侵蚀功率的概念,表明径流侵蚀功率在次暴雨尺度可以更好地表征坡面和流域尺度的水力侵蚀动力。程圣东<sup>[8]</sup>首次提出了计算年功率、月功率的理论和计算方法。研究表明,在不同尺度坡面侵蚀产沙中,表明径流侵蚀功率与坡面次暴雨侵蚀模数之间存在极显著的幂函数相关关系,径流侵蚀功率可以较好地表征坡面次暴雨水力侵蚀动力<sup>[9]</sup>。

本文基于水蚀动力过程的径流侵蚀能量理论,将其运用到年尺度,首先采用 Mann-Kendall 法和线性回归法分析无定河流域 1956—2010 年年径流量和年径流侵蚀功率的时空变化规律;利用 Mann-Kendall 突变点检验,识别出径流的突变年份,对比分析突变年份前后的年径流侵蚀功率和年径流量的时空变化规律,并建立无定河流域不同空间尺度的年径流侵蚀功率—输沙相关模型。

## 1 研究区概况

无定河是黄河河口至龙门区间最大的支流,发源于陕西白于山(37°00′00″—39°0′0″N, 107°47′48″—110°24′21″E)。无定河流域面积 30 261 km<sup>2</sup>,流域干流全长 491 km,主河道平均比降为 1.97%,植被覆盖率,垦殖指数高达 60%,沟壑纵横,地形破碎、林木稀少,水土流失严重,为泥沙的主要来源区<sup>[10]</sup>。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源与处理

本文所用的水文资料来源于黄河水文年鉴中 1956—2010 年的水文资料,选取无定河流域 5 个代表水文测站李家河站、绥德站、赵石窑站、丁家沟站和白家川站(图 1),各代表站分别控制小理河流域、大理河流域、无定河赵石窑站以上流域、无定河丁家沟站以上流域、无定河流域,控制流域面积分别为 807 km<sup>2</sup>, 3 893 km<sup>2</sup>, 15 325 km<sup>2</sup>, 23 422 km<sup>2</sup>, 29 662 km<sup>2</sup>。

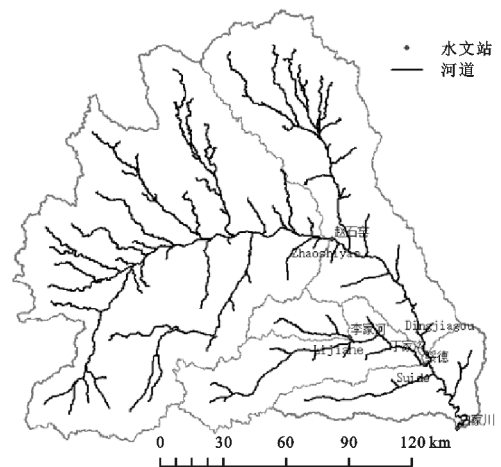


图1 无定河流域位置及水文站点分布

### 2.2 研究方法

目前,在研究径流侵蚀方面主要有剪切力模型和侵蚀能量模型两大类<sup>[11-14]</sup>,本文采用侵蚀能量模型中的径流侵蚀功率理论。

通过以下公式计算出径流侵蚀产沙的侵蚀动力指标:

$$\begin{aligned} E &= Q'_m H = \frac{W Q_m}{A A} = \frac{W}{A^2} A' \frac{Q_m}{A'} \\ &= \frac{A'}{A^2} W V = \frac{A'}{\rho g A^2} \rho g W V = \frac{A'}{\rho g A^2} F V \end{aligned} \quad (1)$$

令  $\text{Con} = \frac{A'}{\rho g A^2}$ , 则:

$$E = \text{Con} \cdot F \cdot V \quad (2)$$

式中:  $W$  为径流总量(m<sup>3</sup>);  $A$  为流域面积(m<sup>2</sup>);  $Q_m$  为洪峰流量(m<sup>3</sup>/s);  $A'$  为与  $Q_m$  对应的流域出口断面的过水面积(m<sup>2</sup>);  $V$  为流域出口断面与  $Q_m$  对应的平均流速(m/s);  $\rho$  为水的密度(kg/m<sup>3</sup>);  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>);  $F$  为作用力(N)。

可以看出,指标  $E$  具有功率的量纲。本文将径流年内分配试作一次径流过程<sup>[15]</sup>,通过使用径流侵蚀功率的计算公式,计算出年径流侵蚀功率,从年尺度上研究流域径流侵蚀功率的时空变化特征。

则以下式中:各项含义分别为:

$$E_a = Q'_m \cdot H \quad (3)$$

式中: $E_a$  为年径流侵蚀功率 $[\text{m}^4/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$ ;  $H$  为月平均径流深 $(\text{m})$ ;  $Q'_m$  为最大月平均流量模数 $[\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)]$ ,其大小等于最大月平均流量与流域面积的比值。

本文采用 Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法<sup>[16]</sup>来进行水沙变化趋势分析。可构造统计量:

$$U = \frac{\tau}{\sqrt{\text{var}(\tau)}} \quad (4)$$

式中:

$$\tau = \frac{4 \sum_{i=1}^n p_i}{n(n-1)} \quad (5)$$

$$\text{var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (6)$$

统计量  $U$  称为 Kendall 秩次相关系数,当  $n$  增加时, $U$  将很快收敛于标准正态分布。给定显著性水平  $\alpha$ ,其双尾检验临界值为  $U_{\alpha/2}$ ,当  $|U| < U_{\alpha/2}$  时,系列趋势不显著,资料一致性较好;当  $|U| > U_{\alpha/2}$  时,系列趋势显著,如  $U > 0$ ,系列呈上升趋势,如  $U < 0$ ,系列呈下降趋势。

线性回归法通过建立年径流序列  $y_t$  与相应的时序  $t$  之间的线性回归方程来检验时间序列的线性变化趋势<sup>[17-18]</sup>。线性回归方程为:

$$y_t = at + b \quad (7)$$

式中: $y_t$  为实测序列; $t$  为时序( $t=1,2,\dots,n$ ;  $n$  为序列长度); $a$  为斜率,表征时间序列的平均趋势变化率; $b$  为截距。

Mann-Kendall 突变点诊断法被用于进行突变年份的检验。当 Mann-Kendall 法用于检验序列突变性时<sup>[19]</sup>,需构造一个秩序列  $d$ :

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (k=2,3,4,\dots) \quad (8)$$

式中:

$$m_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1,2,\dots,i) \quad (9)$$

在时间序列随机独立的假定下, $d_k$  的均值和方差可由下边两个式子计算:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (10)$$

$$\text{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (11)$$

定义统计变量

$$\text{UF}_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{E(d_k)}} \quad (12)$$

按时间序列逆序,再重复上述过程,同时使  $\text{UB}_L = -\text{UF}_K$  ( $L = n+1-k$ ),由  $\text{UF}_K$  绘制出曲线  $C_1$ ,由  $\text{UB}_L$  绘制出曲线  $C_2$ 。若  $\text{UF}_K$  或  $\text{UB}_L$  的值超过临界直线,表明序列上升或者下降趋势显著。如果  $C_1$  或  $C_2$  出现交点,且交点在临界线之内,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

## 3 结果与分析

### 3.1 流域水沙趋势分析

通过运用 M-K 非参数秩次相关检验,计算 5 个代表水文站径流变化趋势特征,见表 1。可以看出,无定河流域空间内各小流域径流量均发生了显著变化。径流量秩检验系数都为负数,径流量呈下降趋势,且绝对值随流域面积逐渐增大:白家川 > 丁家沟 > 赵石窑 > 绥德 > 李家河,无定河干流水文站显著水平 0.001,支流水文站显著水平 0.05,干流下降趋势比支流更显著。

表 1 年径流量变化趋势 M-K 非参数秩次相关检验

站名	年份	年径流量/亿 $\text{m}^3$	
		系数	显著水平
白家川	1957—2010	-7.06	* * *
丁家沟	1959—2010	-6.05	* * *
赵石窑	1965—2010	-5.34	* * *
绥德	1960—2010	-2.57	*
李家河	1959—2010	-2.52	*

注: \* \* \* 双尾检测变化趋势为 0.001 水平显著; \* 双尾检测变化趋势为 0.05 水平显著。

使用 M-K 检验法对无定河流域白家川站、丁家沟站、赵石窑站、绥德站、李家河站等 5 个水文站的年径流系列进行突变点检验,检验结果见图 2。5 个水文站的径流变化呈减小趋势,趋势明显超过  $\alpha = 0.05$ 。由图中选取第一个交点作为突变点进行分析,可以看出,白家川站年径流系列突变点在 1985 年左右,丁家沟站年径流系列突变点在 1979 年左右,赵石窑站年径流系列突变点在 1978 年左右、绥德站年径流系列突变点在 1974 年左右,李家河站年径流系列突变点在 1971 年左右;说明大理河流域最早受人类活动影响,大理河一级支流小理河流域受人类活动影响更早。

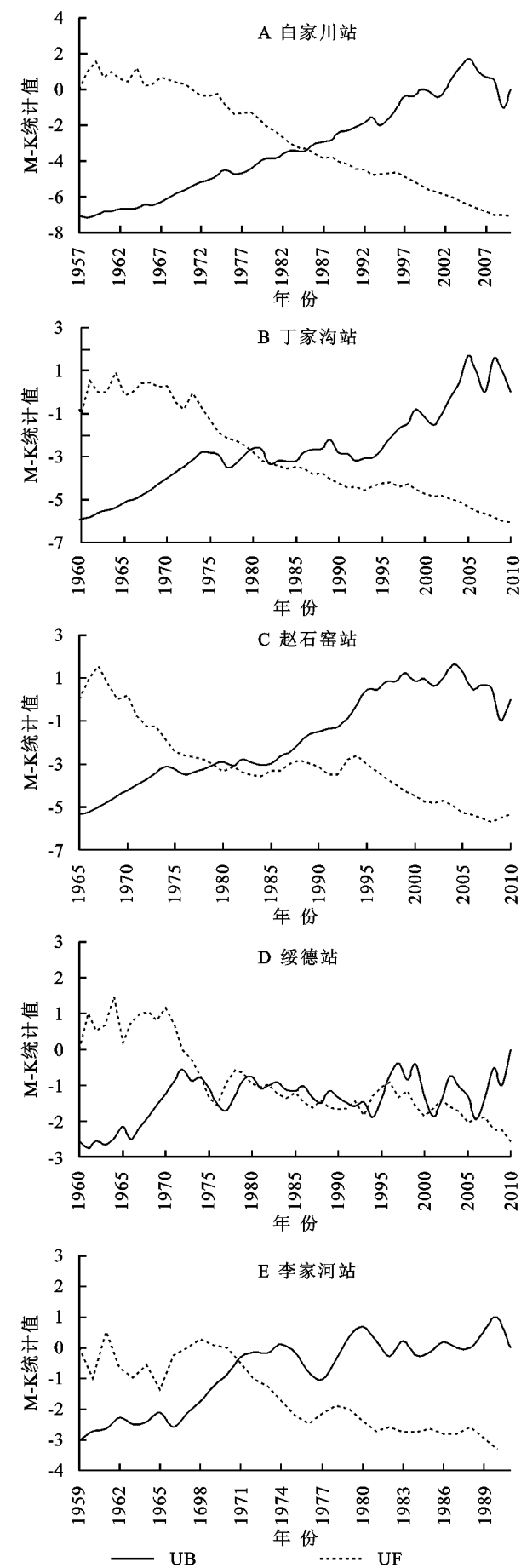


图 2 年径流量 M-K 统计量时程变化

通过统计无定河流域 5 个代表水文站的水沙特征,同时统计出 5 个水文站的年径流量在各自突变年份前后的统计特征值,见表 2 和表 3;通过表 2 中可以看出,无定河流域内控制面积逐渐增大的 5 个水文站李家河站、绥德站、赵石窑站、丁家沟站、白家川站的年径流量、年输沙量的平均值、变异系数等统计特征都随着水文站控制的流域面积增大而有减少,说明流域面积越小径流与输沙年系列变化越不稳定,流域面积越大径流与输沙的年系列变化幅度越小,变化越稳定。研究表明,在小尺度上人类活动的影响可能更加明显、强烈。

表 2 无定河流域各水文站水沙特征

项目	站名	平均值	变异系数
年径流量/亿 m <sup>3</sup>	白家川	11.32	0.31
	丁家沟	9.72	0.32
	赵石窑	4.61	0.36
	绥德	1.40	0.34
	李家河	0.27	1.55
年输沙量/亿 t	白家川	1.04	0.97
	丁家沟	0.17	0.93
	赵石窑	0.08	0.76
	绥德	0.35	0.30
	李家河	0.02	0.85

表 3 突变前后径流量和径流侵蚀功率

突变时间	站名	径流量 平均值/ 亿 m <sup>3</sup>	径流量 变异 系数	径流侵蚀 功率平均值/ (10 <sup>-5</sup> m <sup>4</sup> · s <sup>-1</sup> · km <sup>-2</sup> )	径流侵 蚀功率 变异系数
突变前	白家川	13.67	0.22	1.05	0.74
	丁家沟	11.13	0.28	1.49	0.55
	赵石窑	5.10	0.19	0.75	0.38
	绥德	1.70	0.32	2.48	0.93
	李家河	0.36	0.35	3.01	0.81
突变后	白家川	8.79	0.19	0.60	0.66
	丁家沟	7.23	0.15	0.58	0.42
	赵石窑	3.78	0.18	0.32	0.30
	绥德	1.28	0.31	1.05	0.73
	李家河	0.34	0.33	0.73	0.55

由表 3 可以分析出,突变年份后无定河流域白家川站、丁家沟站、赵石窑站、绥德站、李家河站等 5 个水文站径流量的平均值、变异系数等统计特征值基本小于突变年份之前,说明突变年份后的径流系列更为稳定,同时与表 2 对比,发现突变年份之前的水文要素统计特征指标值比总体统计特征指标值大,突变年份之后的水文要素统计特征指标值比总体统计特征指标值小。

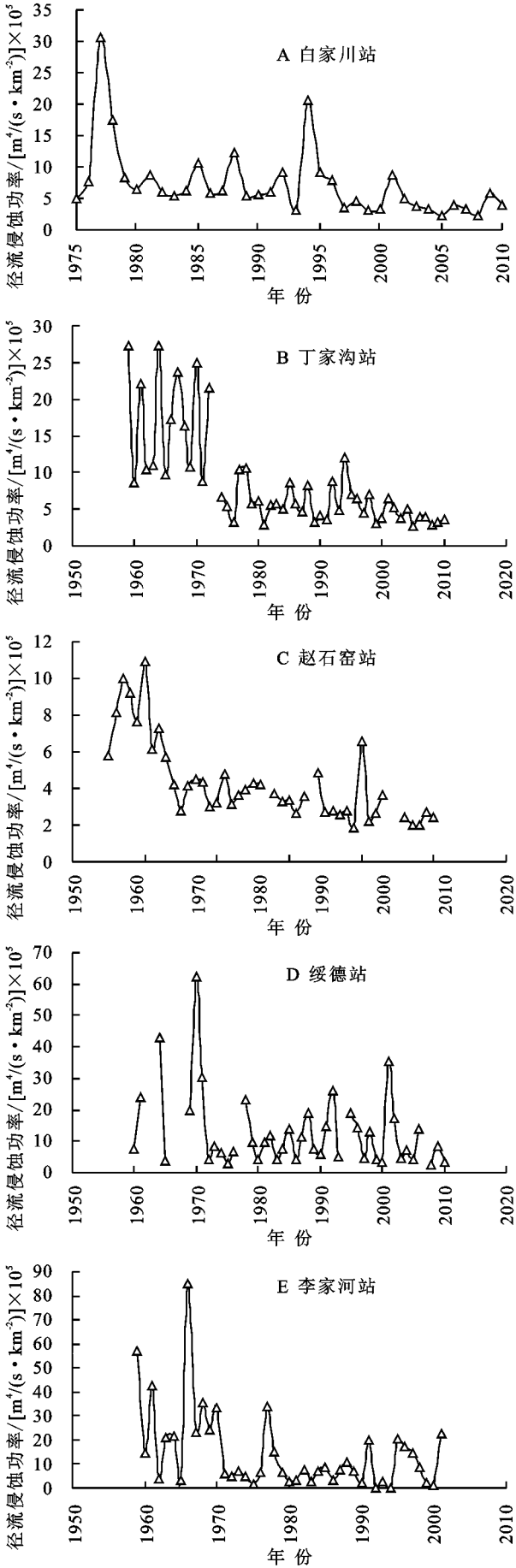


图 3 1959—2010 年长时间序列年径流侵蚀功率

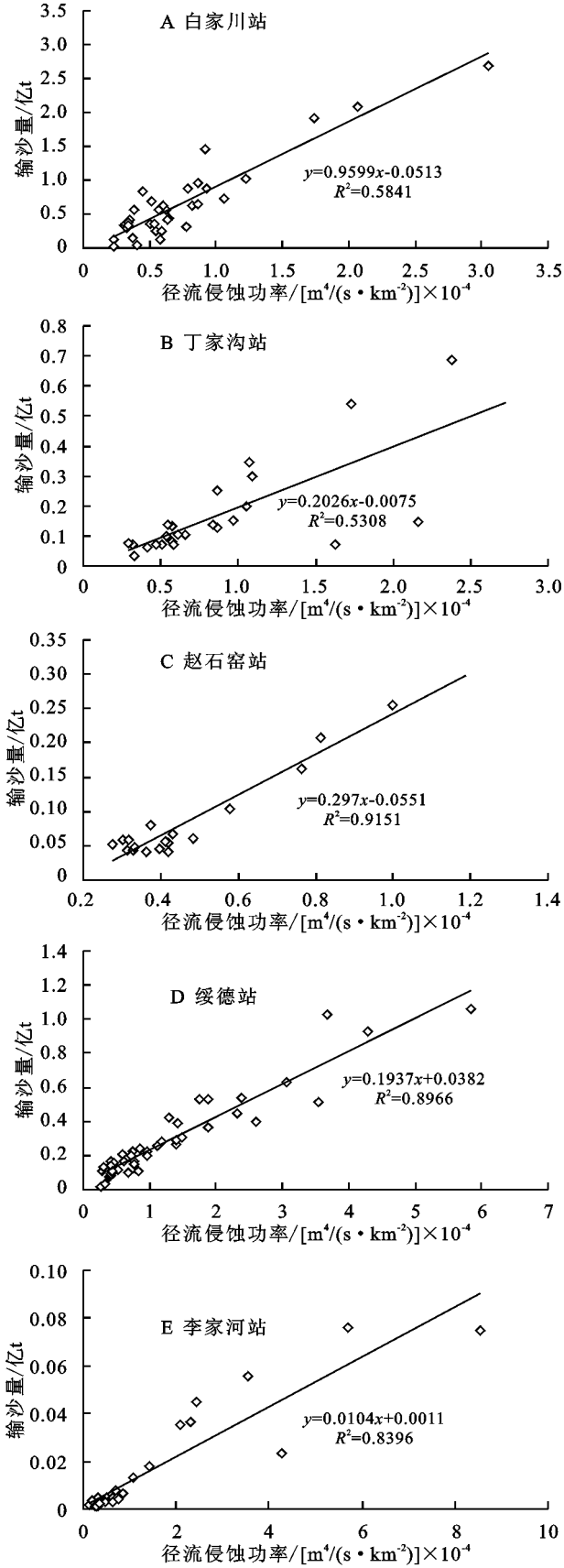


图 4 径流侵蚀功率—输沙关系

3.2 流域径流侵蚀功率的时空变化特征分析

通过使用径流侵蚀功率理论,计算出了无定河流域 5 个水文站 1956—2010 年的年径流侵蚀功率,见



图 3。由图 3 可以看出,5 个站点的径流侵蚀功率时间序列都呈下降减小趋势;通过统计发现白家川站、丁家沟站、赵石窑站、绥德站、李家河站的 5 个水文站控制流域的径流侵蚀功率的标准差等统计值,在各自径流量突变年份之前都大于突变年份后,突变年份之前流域年径流侵蚀功率平均标准差高于突变年份后,这说明突变后的侵蚀功率更为稳定。

通过对白家川站、丁家沟站、赵石窑站、绥德站和李家河站 5 个水文站 1959—2010 年长时间序列径流侵蚀功率取平均值,以及在各自突变年份之前取平均值和突变年份之后取平均值,可以分析出,无定河流域白家川站、丁家沟站、赵石窑站、绥德站和李家河站的平均径流侵蚀功率分别为 0.73,1.03,0.68,2.50,18.73。随着控制流域尺度的增加呈递减小趋势,无定河支流大理河流域绥德站和小理河流域李家河站的平均径流侵蚀功率大于干流;流域平均径流侵蚀功率随着控制流域尺度的增加呈递减小趋势。突变年份之后年平均径流侵蚀功率比突变年份前平均减少  $1.05\times 10^{-4}\text{ m}^4/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ ,且支流径流侵蚀功率大于干流,干流侵蚀功率变化基本趋于稳定,突变年份前无定河流域白家川站、丁家沟站、赵石窑站、绥德站和李家河站的年平均径流侵蚀功率随着流域尺度增大而逐渐减小的变化规律比较明显,突变年份后无定河流域白家川站、丁家沟站、赵石窑站、绥德站和李家河站的年平均径流侵蚀功率均有所减少,随着流域尺度增大变化规律比较不明显。

3.3 径流侵蚀功率—输沙相关模型分析

通过对无定河流域 5 个代表水文站的年输沙量与年径流侵蚀功率线性拟合,结果见图 4。根据曲线分析,无定河流域白家川站、丁家沟站、赵石窑站、绥德站、李家河站径流侵蚀功率与输沙量相关关系如图 4,可以看出,径流侵蚀功率与输沙量呈线性关系,输沙量随着径流侵蚀功率的增大而增大,5 个代表水文站大部分径流侵蚀功率与输沙量的关系点均密集分布在相关线左右,可以看出径流侵蚀功率与输沙量关

系没有出现系统性的偏离,线性相关方程  $R^2$  分别为 0.85,0.53,0.92,0.90,0.89,说明了径流侵蚀功率理论在流域年尺度上能更好的表征径流侵蚀输沙关系。

4 讨论

径流侵蚀功率理论最早是由鲁克新等人针对岔巴沟流域次暴雨洪水尺度上提出的,该理论外推到其他时空尺度需要进一步研究。研究和表征径流侵蚀输沙的理论有多种,如剪切力模型和侵蚀能量模型。本文在流域年尺度上使用了径流侵蚀功率理论,建立了无定河流域不同空间尺度的年径流侵蚀功率—输沙相关模型,可以较好的表征了径流侵蚀输沙关系,但是由于国内外在降雨侵蚀力理论上有很丰富的研究成果<sup>[20-29]</sup>,不同时空尺度皆取得了一系列重要成果,但径流侵蚀功率和降雨侵蚀力两者的相关研究较为薄弱,需要进一步对其进行深入研究。

通过突变点检验,可以发现白家川站年径流系列有一个突变年份在 1985 年左右,所以将白家川站的年径流系列分为 1957—1985 年,1986—2010 年两个时段进行对比分析,分析气候变化与人类活动对无定河流域径流变化的影响大小。

通过表 4 可以看出,无定河流域实测径流量在 1986—2010 年的年均值比基准年减少 4.85 亿  $\text{m}^3$ ,其中降水减少影响占—66.96%,人类活动影响减少占 166.96%;分析减少的原因可以看出,在 1986—2010 年降雨量实际上是在增加的,水土保持等人类活动对径流的减少具有重要的影响,从而可以看出人类活动的影响占主导地位。同时,无定河流域实测输沙量在 1981—2010 年的年均值比基准年减少 1.03 亿 t,其中降水减少影响占 2.68%,人类活动影响减少占 97.32%;分析减少的原因可以看出,在 1981—2010 年降雨量和水土保持等人类活动对输沙的减少均具有重要的影响,但人类活动的影响占主导地位。研究表明,水土保持等人类活动可能是造成无定河流域径流侵蚀功率变化的主导因素。

表 4 白家川站控制流域径流输沙变化

水文要素	年份	实测值	预测值	年均实际减少 减小量/%		降水影响 减小量/%		人类活动的影响 减小量/%	
径流/亿 $\text{m}^3$	1959—1985	13.54	13.54						
	1986—2010	8.68	16.79	4.85	35.85	—3.25	—66.96	8.1	166.96
输沙/亿 t	1959—1980	1.60	1.60						
	1981—2010	0.56	1.57	1.03	64.73	0.03	2.68	1.01	97.32

5 结论

(1) 无定河流域 1956—2010 年年径流量有显著

减小趋势;径流与输沙均随流域面积的增大流域逐渐增大;径流突变年份在 1971—1985 年,突变年份后径流离散程度变小。

(2) 无定河流域 1956—2010 年年 5 个代表水文站年径流侵蚀功率呈下降减小趋势,线性回归系数均为负数,突变年份之前径流侵蚀功率平均标准差高于突变年份后;年平均径流侵蚀功率随流域面积的增大而减小;突变年份之后年径流侵蚀功率平均减少  $1.05 \times 10^{-4} \text{ m}^4/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ,且突变年份之前径流侵蚀功率递减趋势与总体保持一致。

(3) 无定河流域 5 个代表水文站径流侵蚀功率—输沙相关模型相关关系均显著 ( $p < 0.01$ ),线性相关方程  $R^2$  分别为 0.85, 0.53, 0.92, 0.90, 0.89, 径流侵蚀功率理论在流域年尺度上能较好的表征径流侵蚀输沙关系。水土保持等人类活动可能是造成无定河流域径流侵蚀功率变化的主导因素。

#### 参考文献:

- [1] 张乐涛.基于侵蚀能量的径流输沙尺度效应研究[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [2] Zhanbin L I, Kexin L U, Wen F D. Study on the dynamic process of rill erosion of loess slope surface[J]. International Journal of Sediment Research, 2001, 16(2): 308-314.
- [3] Yang C T. Incipient motion and sediment transport[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99(10): 1679-1704.
- [4] 杨志达.泥沙输送:理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [5] 崔文滨,李鹏,李占斌,等.径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用[J].西北农林科技大学学报自然科学版,2005,33(9):103-107.
- [6] 鲁克新,李占斌,鞠花,等.不同空间尺度暴雨径流侵蚀功率与降雨侵蚀力的对比研究[J].西北农林科技大学学报自然科学版,2009,37(10):204-208.
- [7] 鲁克新,李占斌,李鹏,等.基于径流侵蚀功率的流域次暴雨输沙模型研究:以岔巴沟流域为例[J].长江科学院院报,2008,25(3):31-34.
- [8] 程圣东.黄土区植被格局对坡沟—流域侵蚀产沙的影响研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [9] 鲁克新,李占斌,鞠花.径流侵蚀功率理论在不同尺度坡面侵蚀产沙中的应用[J].水资源与水工程学报,2009,20(4):70-73.
- [10] 徐建华.黄河中游河口镇至龙门区间水利水电工程对暴雨洪水泥沙影响研究[M].郑州:黄河水利出版社,2009.
- [11] 吴卿,杨春霞,甄斌,等.草被覆盖度对黄土坡面径流产沙影响的试验研究[J].中国水土保持,2010(9):56-58.
- [12] 杨春霞,王丹,王玲玲,等.草被覆盖度对坡面流水动力学参数的影响[J].中国水土保持,2008(9):36-38.
- [13] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等.黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J].土壤学报,2010,47(2):223-228.
- [14] 李鹏,李占斌,鲁克新,等.黄土坡面径流能耗与侵蚀产沙过程模拟研究[C]//全国泥沙基本理论研究学术讨论会,2005.
- [15] 龚珺夫,李占斌,李鹏,等.基于 SWAT 模型的延河流域径流侵蚀能量空间分布[J].农业工程学报,2017,33(13):120-126.
- [16] 王小军,蔡焕杰,张鑫,等.皇甫川流域水沙变化特点及其趋势分析[J].水土保持研究,2009,16(1):222-226.
- [17] 陈忠升,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河干流径流损耗及其人类活动影响强度变化[J].地理学报,2011,66(1):89-98.
- [18] 钟永华,鲁帆,易忠,等.密云水库以上流域年径流变化趋势及周期分析[J].水文,2013,33(6):81-84.
- [19] 范利杰,穆兴民,赵广举.近 50 a 嘉陵江流域径流变化特征及影响因素[J].水土保持通报,2013,33(1):12-17.
- [20] 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 II:降雨侵蚀力指标 R 值的探讨[J].水土保持通报,1983,3(5):7-13.
- [21] 周伏建,陈永葆.福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨[J].亚热带水土保持,1989(2):58-60.
- [22] 杨子生.滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究[J].地理科学,1999,19(3):265-270.
- [23] 刘文耀.云南昭通盆地降雨侵蚀性与土壤可蚀性的初步研究[J].云南地理环境研究,1999,11(2):76-82.
- [24] 陈法扬,王志明.通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用[J].水土保持通报,1992,12(1):23-41.
- [25] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I)[J].水土保持学报,1995,9(4):7-18.
- [26] Lee J, Shin J, Jung Y, et al. Estimation of Rainfall-runoff Erosivity for Individual Storm Events[C]//Agu Fall Meeting, 2011.
- [27] Óscar F. Storm groups versus extreme single storms: Predicted erosion and management consequences[J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(2): 221-227.
- [28] 章文波,谢云,刘宝元.用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J].地理研究,2002,21(3):384-390.
- [29] 李静,刘志红,李锐.黄土高原不同地貌类型区降雨侵蚀力时空特征研究[J].水土保持通报,2008,28(3):124-127.