

近55年渭河流域降雨侵蚀力变化及对输沙量的影响

刘宇林^{1,2}, 赵广举^{1,3†}, 穆兴民^{1,3}, 高鹏^{1,3}, 孙文义^{1,3}

(1. 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, 712100, 陕西杨凌;
2. 中国科学院大学, 100049, 北京; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌)

摘要: 气候变化和人类活动是影响河川径流、输沙变化的主要原因。笔者基于渭河流域23个气象站1961—2015年日降雨量数据和水文站年输沙量资料, 采用Mann-Kendall非参数性检验、双累积曲线和克里金插值等方法, 对近55年以来渭河流域的降雨侵蚀力和输沙量的动态变化进行分析。结果表明: 1) 渭河流域近55年的平均降雨侵蚀力为 $1\ 685.67\ \text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$, 研究时段内的降雨侵蚀力增加趋势不显著。2) 渭河流域降雨侵蚀力的分布范围为 $292.9\sim 4\ 098.9\ \text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$, 降雨侵蚀力的空间差异较大。流域多年平均降雨侵蚀力自东向西, 由南向北呈逐渐减小趋势。3) 渭河流域输沙量受降雨侵蚀力和人类活动共同影响: 张家山站和咸阳站在20世纪90年代以后, 人类活动对输沙量的影响较大, 贡献率均 $>100\%$ 。状头站在1980—1994年期间, 人类活动的贡献率达到 58% , 进入21世纪以来, 人类活动贡献率达到 67% 。本研究定量评价了渭河流域输沙量变化及对降雨侵蚀力和人类活动的响应, 为未来区域水土保持措施配置、流域综合治理提供基础依据。

关键词: 降雨侵蚀力; 输沙量; 变化; 人类活动; 渭河流域

中图分类号: P9 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2019)03-0015-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2019.03.003

Impact of rainfall erosivity variations on sediment load in the Weihe River Basin in recent 55 years

LIU Yulin^{1,2}, ZHAO Guangju^{1,3}, MU Xingmin^{1,3}, GAO Peng^{1,3}, SUN Wenyi^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, 712100, Yangling, Shaanxi, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing, China;
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract [Background] Severe soil erosion in the Weihe River basin has attracted much attention due to its impact on land degradation, river bed siltation and sedimentation in reservoirs. Investigations on variations of sediment load and its response to climate change and human activities may provide good reference for river basin management. [Methods] The present study applied the Mann-Kendall non-parametric test, double cumulative curve method and Kriging interpolation to analyze the dynamic variations of rainfall erosivity and sediment load by using daily precipitation data from 23 climate stations and annual sediment load time series at 3 hydrological stations in Weihe River basin from 1961 to 2015. [Results] 1) Average annual rainfall erosivity was $1\ 685.67\ \text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ in the past 55 years in

收稿日期: 2018-06-06 修回日期: 2019-01-07

项目名称: 国家重点研发计划“黄河流域水沙多时空演变及其分异规律”(2016YFC0402401); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项“黄河水沙多时空演变及驱动机制”(A314021403-Q2)

第一作者简介: 刘宇林(1994—)男, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: yulinliu03@163.com

†通信作者简介: 赵广举(1980—)男, 博士, 研究员。主要研究方向: 流域水文过程与土壤侵蚀模拟。E-mail: gjzhao@ms.

iswc.ac.cn

Weihe River basin. The annual rainfall erosivity showed an insignificant increasing trend of $1.94 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$. The lowest value was $1507.23 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$, occurring in 1990s, which was 10% lower than the annual average. In the 1960s, the rainfall erosivity was $1685.67 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$, which was similar to the average rainfall erosivity in the last 55 years. The average rainfall erosivity in the 1970s was slightly lower than the average. In the 1980s and the first 15 years of the 21st century, the average annual rainfall erosivity was almost the same. 2) The rainfall erosivity ranged from 292.9 to $4098.9 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ in the Weihe River basin with high spatial heterogeneity. The average annual rainfall erosivity in the basin decreased from southeast to northwest. High values occurred in Huashan and Foping station, which were 2980 and $4098.9 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$. 3) Sediment load exhibited significant decrease during the past 55 years in the Weihe River basin. Human activities had a greater impact on sediment load at Zhangjiashan and Xianyang stations after 1990s and the contribution was higher than 100%, which resulted from increasing rainfall erosivity, as well as the vegetation restoration and soil and water conservation. From 1980 to 1994, human activities accounted for 58% of sediment load reduction at Zhuangtuo station, and increased up to 67% during 2000—2015.

[Conclusions] This study investigated the spatial and temporal changes in rainfall erosivity and sediment load, as well the causes of variation in sediment load in the study area. The results may provide scientific bases for the future soil and water conservation in the Weihe River basin.

Keywords: rainfall erosivity; sediment load; variation; human activity; Weihe River Basin

降雨侵蚀力是通用土壤流失方程^[1] (universal soil loss equation, USLE) 的一个最基本构成因子,其定义是指由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,可以用来很好地表征土壤侵蚀。受气候变化(如气温、降水、蒸散发)和人类活动(如退耕还林还草、水土保持措施、农业开垦耕作、大型水利工程建设等)的影响,中国许多河流的径流量和输沙量发生了显著变化^[2-5],降雨侵蚀力和输沙量的研究引发越来越广泛的关注。

黄河是世界上著名的多沙河流,经过近50年来大规模的水土保持生态修复和流域综合治理,黄河流域下垫面产沙和输沙条件已发生显著变化,其干支流的径流量和输沙量均呈现大幅度减小的趋势^[6]。黄河输沙量由上世纪(1958—1979)年均13亿t减少至近10年的不足3亿t,近5年不足1亿t^[7]。渭河^[8-10]作为黄河第1大支流,是黄河流域水土流失较为严重的地区,是黄河泥沙主要来源区。Zhao Guangju等^[11]研究了渭河流域1950—2008年径流量的变化,发现在不同的水土保持措施实施阶段,气候变化与人类活动对径流量减少的贡献不同,总体上,人类活动占主导地位。Wang Houjie等^[12]分析了黄河干流水沙时空演变特征及其对气候变化和水土保持措施的响应,指出黄河流域是气候变化和人类活动背景下,流域—沿海地区相互作用的示例。研究中多以降雨总量指代气候变化,而实际上,

侵蚀性降雨是流域侵蚀产沙的主要动力,以降雨侵蚀力为指标评估河流输沙变化的研究仍比较有限。章文波等^[13]根据区域性降雨侵蚀特点,建立了基于降雨侵蚀力 R 值的简易计算模型,即利用雨量站常规降雨统计资料如日降雨量、月降雨量、年降雨量等雨量参数来估算降雨侵蚀力。钟科元等^[14]分析了1960—2014年松花江流域 R 值的分布特征,得出:其 R 值在 $806.70 \sim 3504.3 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 范围内变化,整体上呈现出自西北向东南递增的趋势;在西北地区 R 值呈现增长趋势,而在中部平原区的东北部和西南部呈现下降趋势; R 值在地形上呈现为东部丘陵山地区>中部平原区>西部山地区。

以上研究都对各自研究区域降雨侵蚀力的时空分布规律做了详细的研究,但定量分析降雨侵蚀力和人类活动对输沙量变化的贡献研究不多。笔者基于渭河流域23个雨量站点1960—2015年日降雨量数据及年输沙量数据,采用Mann-Kendall非参数检验、双累积曲线、克里金插值等方法,分析了渭河流域近55年的降雨侵蚀力和输沙量的动态变化,同时定量计算降雨侵蚀力和人类活动对输沙量变化的贡献率,为今后渭河流域的水土保持工作提供借鉴。

1 研究区概况

渭河作为黄河第1大支流,其源头位于甘肃省渭源县鸟鼠山北侧,流经陕甘宁3省区(图1)。干

流全长 818 km,流域面积 13 万 4 800 km²。渭河流域属典型的大陆性季风气候,多年平均降水量 400~800 mm,年平均气温 7~14 °C,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。北部为黄土高原,南部为秦岭,地势西高东低,流域内土壤侵蚀模数超过 5 000 t/(km²·a)的水蚀面积超过 4.8 万 km²,流域内水土流失面积超过 10 万 km²,占到渭河流域面积的 77%^[15-16]。

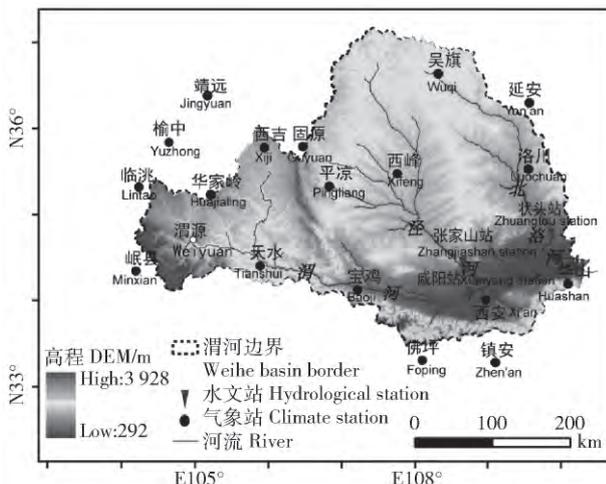


图 1 渭河流域水系、水文站及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of river network, hydrological stations and climate stations in the Weihe River Basin

2 研究方法

2.1 数据来源

笔者选取渭河流域临洮、天水、华家岭、西峰、岷县、平凉、靖远、临夏、榆中、西安、长武、武功、商州、华山、佛坪、铜川、吴旗、宝鸡、镇安、延安、洛川、固原、西吉等 23 个气象站点(图 1) 1961—2015 年近 55 年的日降雨量数据,数据来源于中国气象数据共享网。渭河流域年输沙数据源于《中国河流泥沙公报》《黄河泥沙公报》《黄河水资源公报》。

2.2 降雨侵蚀力计算

降雨侵蚀力的计算采用章文波等^[17]改进的理查德森日降雨侵蚀力计算方法。该模型主要利用日降雨量资料对降雨侵蚀力进行计算,适合应用于黄土高原^[18],其具体计算式如下:

$$R = \alpha \sum_{k=1}^m P_k^\beta; \quad (1)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891}; \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}}. \quad (3)$$

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 为半月内降雨侵蚀力, MJ·mm/(hm²·h·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。

2.3 Mann-Kendall 非参数检验法

Mann-Kendall 检验已被广泛应用于气候、水文时间序列的趋势变化分析^[19]。笔者利用该方法检测降雨侵蚀力及渭河流域输沙量数据的序列变化趋势。该方法的主要优点是样本不需要遵从一定的分布,且样本总体不受部分异常值的扰动,便于计算。

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(X_j - X_k); \quad (4)$$

$$\text{其中, } \text{Sgn}(X_j - X_k) = \begin{cases} +1, & (X_j - X_k) > 0 \\ 0, & (X_j - X_k) = 0 \\ -1, & (X_j - X_k) < 0 \end{cases}; \quad (5)$$

$$V_{ar}(S) = n(n-1)(2n+5)/18. \quad (6)$$

当 $n > 10$ 时,标准的正态系统变量通过下式计算:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_{ar}(S)}}, & S > 0; \\ 0, & S = 0; \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_{ar}(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (7)$$

式中: X_j, X_k 为趋势检验序列的统计值; n 为检验序列统计值的个数; S 为正态分布,其均值为 0; V_{ar} 为方差; Z 为 Mann-Kendall 统计结果。

在双边趋势检验中,给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设是不可接受的,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计量 Z , > 0 时是上升趋势; < 0 时是下降趋势。 Z 的绝对值在 $\geq 1.28, 1.64$ 和 2.32 时,分别表示通过了置信度 90%、95%、99% 的显著性检验。

2.4 双累积曲线法

双累积曲线法^[20]是一种简单而实用的确定水文气象序列数据一致性的方法,广泛应用于水文气象数据的一致性和长期趋势预测研究。双累积曲线的理论基于以下事实: 2 个时间序列之间的比例保持不变,同一时期的二者累积量的曲线呈直线比例。该方法可以平滑时间序列,抑制系列中的随机元素,从而显示时间序列的主要趋势。目前,已有大量研究显示双累积曲线法可用于评估径流/输沙与降雨

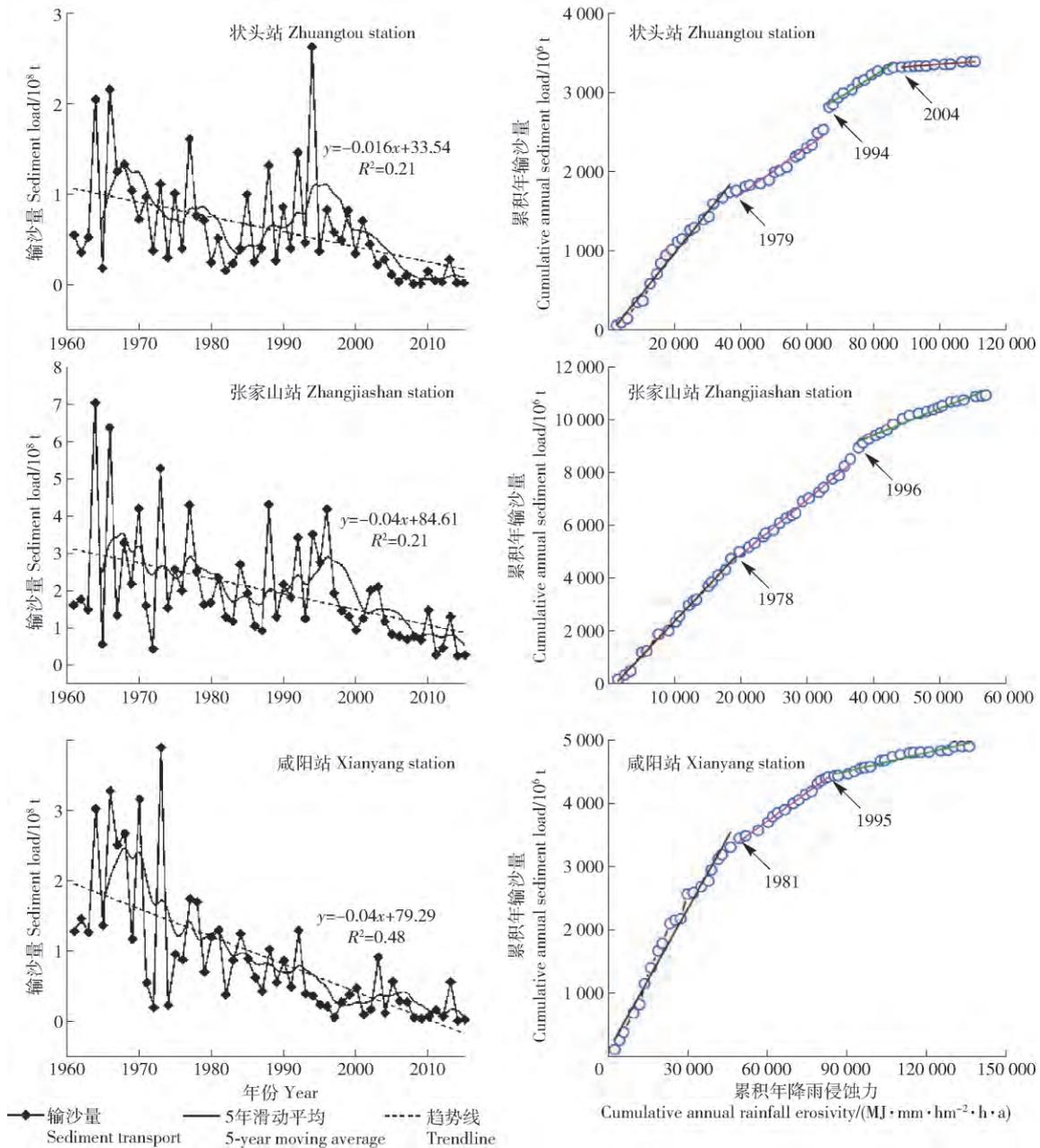


图 5 渭河流域输沙量年际变化与双累积曲线分析

Fig. 5 Interannual variation and double cumulative curve analysis of sediment load in the Weihe River Basin

的输沙量处于自然波动状态,受人类活动影响相对较小。3 个水文站的输沙量在 20 世纪 70 和 90 年代减少均非常显著。20 世纪 70 年代,流域内修建了大量的淤地坝、水库等,大规模的水土保持措施改变了地表的径流输沙过程,其中 2000—2015 年,咸阳站、张家山站、状头站实测输沙量分别较各自基准期减少 29 亿 t、30 亿 t、17 亿 t。进入 20 世纪 90 年代,实施大规模的退耕还林(草)工程,植被盖度显著增加,渭河流域的生态环境以及下垫面状况得到很大改善,这些水土保持措施使地表侵蚀量发生显

著变化,因此流域输沙量急剧减少。资料^[9]显示渭河流域梯田面积从 1970 年至 1998 年,梯田面积增加了 1 万 7 300 km²,还林(草) 3 200 km²,大量泥沙被拦蓄。

3.2.2 降雨侵蚀力与输沙量的双累积曲线 通过绘制输沙量和降雨侵蚀力的双累积曲线(图 5)并建立回归方程(表 3),计算降雨侵蚀力变化和人类活动对渭河流域输沙量变化的影响。由图 5 可知,渭河流域状头站、张家山站和咸阳站的输沙量-降雨侵蚀力累积曲线均在 20 世纪 80 年代左右(1979、1978

和 1981) 和 90 年代中期(1994、1996 和 1995) 出现了较为明显的偏移。80 年代的偏移是由于该时期大规模的水土保持措施引起的输沙量减少,90 年代中期的偏移是由于大规模退耕还林(草)工程的实

施,流域植被覆盖度增加,从而引起了输沙量锐减。在过去的 10 多年里,一系列退耕还林(草)、水土保持等生态修复工程的实施,使区域植被状况和生态环境发生明显改善。

表 3 渭河流域累积年输沙量与累积年降雨侵蚀力的相关关系

Tab. 3 Correlation between cumulative annual sediment load and cumulative annual rainfall erosivity in the Weihe River Basin

站点 Station	年份划分 Year division	线性方程 Linear equation	相关系数 Correlation coefficient
状头 Zhuangtou	1961—1979	$y = 0.052x - 76.7$	0.984
	1980—1994	$y = 0.03x + 531.6$	0.952
	1995—2004	$y = 0.028x + 962.1$	0.970
	2005—2015	$y = 0.003x + 3\ 023.6$	0.972
张家山 Zhangjiashan	1961—1978	$y = 0.26x - 278.4$	0.997
	1979—1996	$y = 0.22x + 389.6$	0.992
	1997—2015	$y = 0.10x + 5\ 383.9$	0.963
咸阳 Xianyang	1961—1981	$y = 0.073x + 141.6$	0.975
	1982—1995	$y = 0.03x + 1\ 866.4$	0.992
	1996—2015	$y = 0.01x + 3\ 611.9$	0.952

注: y 为累积年输沙量, 10^6 t; x 为累积年降雨侵蚀力, $\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。Notes: y represents cumulative annual sediment load, unit is 10^6 t; x represents cumulative annual rainfall erosivity, the unit is $\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。

3.2.3 降雨侵蚀力变化和人类活动对输沙量变化的影响 由表 4 可知,张家山站和咸阳站在 20 世纪 90 年代以后,人类活动对输沙量的影响较大,贡献率均大于 1,这是由于该时期降雨侵蚀力较前期有

所增加,而输沙量减少,计算出的降雨侵蚀力的贡献率为负值。状头站在 1980—1994 年期间,人类活动的贡献率达到 58%,人类活动贡献率总体在增长,进入 21 世纪初,人类活动贡献率达到 67%。

表 4 不同时段降雨侵蚀力变化与人类活动对渭河流域输沙量变化的影响

Tab. 4 Effects of rainfall erosivity variations and human activities on sediment load in the Weihe River Basin

站点 Station	年份划分 Year division	实测输沙量 MST/ 10^8 t	计算输沙量 CST/ 10^8 t	实测减沙量 MSR/ 10^8 t	实测减沙率 MSRR/%	降雨侵蚀力影响		人类活动影响	
						Affected by rainfall erosivity		Affected by human activities	
						减沙量 Sediment reduction/ 10^8 t	贡献率 Contribution rate/%	减沙量 Sediment reduction/ 10^8 t	贡献率 Contribution rate/%
状头 Zhuangtou	1961—1979	17.38	18.40						
	1980—1994	10.58	15.57	6.80	39.13	2.83	41.65	3.97	58.35
	1995—2004	5.06	10.07	12.32	70.91	8.33	67.56	4.00	32.44
	2005—2015	0.08	12.70	17.30	99.54	5.70	32.93	11.60	67.07
张家山 Zhangjiashan	1961—1978	49.91	48.86						
	1979—1996	39.30	46.75	10.61	21.26	2.10	19.83	8.51	80.17
	1997—2015	19.88	49.89	30.03	60.16	-1.03	-3.43	31.06	103.43
咸阳 Xianyang	1961—1981	34.55	37.72						
	1982—1995	9.69	24.44	24.86	71.96	13.29	53.45	11.57	46.55
	1996—2015	4.87	38.95	29.69	85.92	-1.22	-4.12	30.91	104.12

Notes: MST: Measured sediment transport. CST: Calculated sediment transport. MSR: Measured sediment reduction. MSRR: Measured sediment reduction rate.

4 结论与讨论

笔者采用渭河流域 23 个雨量站点 1960—2015

年日降雨数据及 3 个水文站点同期年输沙量资料,分析流域的降雨侵蚀力和输沙量变化,结论如下:

1) 渭河流域 1961—2015 年的降雨侵蚀力均值

为 $1\ 685.67\ \text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。近55年降雨侵蚀力呈非显著增加趋势($1.94\ \text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$)。

2) 降雨侵蚀力的空间差异较大,多年平均降雨侵蚀力从东南向西北逐渐减小。

3) 渭河流域输沙量的变化受降雨侵蚀力和人类活动二者共同影响: 张家山站和咸阳站在20世纪90年代以后,降雨侵蚀力增加,输沙量减少,其对输沙变化的贡献为负值,人类活动对输沙量的贡献率 $>100\%$ 。状头站在1980—1994年期间,人类活动的贡献率达到 58% ;之后,人类活动贡献率增加,在21世纪初,人类活动贡献率达到 67% 。

笔者定量分析了渭河流域降雨侵蚀力与人类活动对输沙量变化的贡献,然而河流输沙变化不仅受降雨影响,其他气候因子如气温、蒸发等变化也是导致河流输沙变化潜在因素;同时也不能明确地表植被变化、梯田建设、坝库工程、灌溉等对输沙变化的影响,未来可以从梯田、坝库等水土保持措施对流域侵蚀产沙的影响做进一步深入研究分析。该研究定量计算了渭河流域降雨侵蚀力和人类活动对输沙量变化的贡献率,为今后该流域水土保持工作的开展提供了指导。

5 参考文献

- [1] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning [M]. Washington, DC: USDA-ARS, 1978: 34.
- [2] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 近60年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1070.
ZHAO Guangju, MU Xingmin, TIAN Peng, et al. The variation trend of streamflow and sediment flux in the middle reaches of Yellow River over the past 60 years and the Influencing factors [J]. Resources Science, 2012, 34(6): 1070.
- [3] LIU Cheng, SUI Jueyi, WANG Zhaoyin. Changes in runoff and sediment yield along the Yellow River during the period from 1950 to 2006 [J]. Journal of Environmental Informatics, 2008, 12(2): 129.
- [4] HE Yi, WAGN Fei, MU Xingmin, et al. Human activity and climate variability impacts on sediment discharge and runoff in the Yellow River of China [J]. Theoretical & Applied Climatology, 2016: 1.
- [5] XU Jiongxin. Plausible causes of temporal variation in suspended sediment concentration in the upper Changjiang River and major tributaries during the second half of the 20th century [J]. Quaternary International, 2009, 208(1): 85.
- [6] 穆兴民, 胡春宏, 高鹏, 等. 黄河输沙量研究的几个关键问题与思考[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 1.
MU Xingmin, HU Chunhong, GAO Peng, et al. Key issues and reflections of research on sediment flux of the Yellow River [J]. Yellow River, 2017, 39(8): 1.
- [7] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 1.
HU Chunhong. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 1.
- [8] 赵俊侠, 王宏, 马勇, 等. 1990—1996年渭河流域水沙变化原因初步分析[J]. 水土保持学报, 2001(增刊2): 136.
ZHAO Junxia, WANG Hong, MA Yong, et al. Preliminary analysis on cause of water and sediment variation from 1960 to 1996 in Weihe watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001(S2): 136.
- [9] 孙悦, 李栋梁, 朱拥军. 渭河径流变化及其对气候变化与人类活动的响应研究进展[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 396.
SUN Yue, LI Dongliang, ZHU Yongjun. Advances in study about runoff variation of the Weihe River and its response to climate change and human activities [J]. Arid Meteorology, 2013, 31(2): 396.
- [10] 来文立, 宋进喜, 章杰, 等. 近60 a渭河流域降水特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1106.
LAI Wenli, SONG Jinxi, ZHANG Jie, et al. Precipitation in the Weihe River basin in recent 60 Years [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 1106.
- [11] ZHAO Guangju, MU Xingmin, TIAN Peng, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: A case study of the Weihe River basin, China [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(26): 3852.
- [12] WANG Houjie, BI Naishuang, SAITO Y, et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(3/4): 302.
- [13] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35.
ZHANG Wenbo, FU Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. Resources Science, 2003, 25(1): 35.
- [14] 钟科元, 郑粉莉. 1960—2014年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 278.

- ZHONG Keyuan , ZHENG Fenli. Spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Songhua River Basin from 1960 to 2014 [J]. *Journal of Natural Resources* , 2017 , 32(2) : 278.
- [15] 陶望雄, 马亚鑫, 张杰, 等. 渭河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J]. *水土保持通报*, 2016 , 36(6) : 110. TAO Wangxiong , MA Yaxin , ZHANG Jie , et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity in Weihe River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* , 2016 , 36(6) : 110.
- [16] 马岚, 黄生志, 黄强, 等. 渭河流域降雨与降雨侵蚀力变化的原因分析[J]. *水土保持学报*, 2018 , 32(1) : 174. MA Lan , HUANG Shengzhi , HUANG Qiang , et al. Causes analyzing of the change of rainfall and rainfall erosivity in Weihe River Basin [J] , 2018 , 32(1) : 174.
- [17] 章文波, 谢云, 刘宝元, 等. 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. ZHANG Wenbo , XIE Yun , LIU Baoyuan , et al. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. *Scientia Geographica Sinica* , 2002 , 22(6) : 705.
- [18] 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) : 1.
- [19] MARDEN J I , KENDALL M , GIBBONS J D. Rank correlation methods (5th ed.) [J]. *Journal of the American Statistical Association* , 1992 , 87(417) : 249.
- [20] 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. MU Xingmin , ZHANG Xiuqin , GAO Peng , et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology [J]. *Journal of China Hydrology* , 2010 , 30(4) : 47.
- [21] LE N D , ZIDEK J V. Statistical analysis of environmental space-time processes [M]. New York: Springer Science & Business Media 2006: 101.