

近 55 年来渭河流域输沙变化及驱动因子分析

白云鹏¹, 赵广举^{1,2}, 张丽梅¹, 穆兴民^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 孙文义^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,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;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 根据渭河流域水文站点分布特征,将流域划分为 15 个子流域,结合 1961—2015 年输沙资料和气象站日降雨量资料,采用 Mann—Kendall 检验、双累积曲线、相关性分析及偏最小二乘回归等方法,定量分析渭河流域输沙时空变化特征及其主控因子。结果表明:渭河流域 1961—2015 年输沙量呈显著减少趋势,渭河干流咸阳站、北洛河状头站和泾河张家山站年输沙量分别以 0.039 0、0.017 4、0.041 4 亿 t/a 的速率减少。15 个水文站中,北洛河的张村驿站年输沙量呈显著增加趋势($P < 0.05$),洪德、雨落坪和庆阳站呈不显著减小趋势,其余各站的输沙均显著减小($P < 0.05$)。主要通过对输沙驱动因子和渭河流域输沙模数 2 个方面进行纵横方向上的综合分析对比,最终得到的相关数据结果表现出渭河输沙变化与降雨集中度指数、植被覆盖指数、草地面积比例、最小高程、平均坡度等因子具有良好的相关关系($R^2 > 0.7$)。

关键词: 渭河流域; 输沙模数; 主控因素; 输沙—驱动因子关系模型

中图分类号:S157.1; P333.5 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)04-0091-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.014

Spatiotemporal Variation of Sediment Load in the Weihe River Basin in Recent 55 Years and the Driving Factors

BAI Yunpeng¹, ZHAO Guangju^{1,2}, ZHANG Limei¹,

MU Xingmin^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, SUN Wenyi^{1,2}

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

Abstract: In recent years, sediment load in many rivers around the world has undergone significant changes, which may greatly affect ecological environment and economic development of the basin. Exploring the evolution of sediment load in the Weihe River will provide a theoretical basis for the comprehensive management of the Weihe River Basin and the regulation of water and sediment relations. This study attempted to investigate the spatial and temporal variation of sediment load in 15 hydrological stations in the Weihe River basin during the period of 1961—2015. The results showed that the average sediment load in the Weihe River Basin from 1961 to 2015 showed a significantly decreasing trend. The annual sediment load at Xianyang, Zhuangtou and Zhangjiashan stations decreased at a rate of 0.039 0 billion t/a, 0.017 4 billion t/a, and 0.041 4 billion t/a, respectively. Among the 15 hydrological stations, the annual sediment load at Zhongcun station showed a significant increasing trend, while Hongde, Yuluoping and Qingyang stations showed no significant decreasing trend, and the remaining stations showed significant decreasing trends ($P < 0.05$). Both correlation analysis and partial least squares regression were applied to quantify the relationship between sediment load and potential driving factors. The sediment load had good correlations with the Precipitation Concentration Index, Vegetation Coverage Index, Grassland Area Ratio, Minimum Elevation, and Average Slope.

Keywords: Weihe River Basin; sediment load; controlling factors; correlation analysis

黄河是我国也是世界上著名的多沙性河流,水少沙多、水沙关系不协调等问题深刻影响区域的社会经济发展^[1]。自 20 世纪 50 年代以来,我国在黄河流域实施大

规模的生态保护、水土保持措施及水利工程建设。上游修建了众多大型水利工程,中游实施了以梯田和淤地坝及退耕还林草为主的水土保持措施,下游以整治河道、

收稿日期:2019-12-20

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402401);中国科学院“西部之光”项目(XAB2017A03)

第一作者:白云鹏(1995—),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:nwafubyp@163.com

通信作者:赵广举(1980—),男,河南驻马店人,研究员,博士,主要从事流域水沙过程与水土保持研究。E-mail:gjzhao@ms.iswc.ac.cn

河槽减淤和水资源合理配置为主的防洪减灾体系基本建成,河道萎缩态势初步得到遏制,流域生态环境持续向好,水土流失综合防治成效显著,入黄泥沙急剧减少^[2-5]。研究黄河及其支流水沙变化及其驱动因素对区域生态保护、水沙关系调控及水利工程合理布局具有重要的科学意义^[6],是实现流域高质量发展的基础。

渭河流域地处黄土高原南端,是黄河支流中面积最大、来水量最多的一级支流。近年来,从相关数据^[7-8]可以得知,输沙量与河川径流量正在明显地逐年呈现出递减的趋势,渭河流域水文环境的差异性也十分明显,从而导致在不同区域间的水资源分布差异,进而使河流下游更多的泥沙淤积,使河道的活动性和输送性逐渐减小,对经济发展和生态文明的发展造成了很大挑战。通过对人为因素以及渭河自然因素的定量研究,探讨其对相关流域水沙的影响,便于进一步探讨环境要素和输沙之间的联系。已有研究多从水沙变化趋势和归因分析两方面开展相关研究。陈广圣等^[9]分析了渭河流域 1956—2010 年输沙变化趋势性发现,渭河流域输沙量呈现逐渐减少趋势,且该趋势将持续一段时间;张丽梅等^[10]采用 Budyko 假设,定量评价了渭河近 60 年来径流量变化对人类活动与气候变化(降雨变化)等其他因素的影响,通过研究的相关结果显示,导致渭河流域径流减少的主要原因是人类活动引起的下垫面变化,贡献率超过 60%。

大多研究分析了渭河水沙多时空变化特征,但对

其变化的控制因素研究较少。本文拟采用 Mann—Kendall 检验、相关性分析等数理统计方法,阐明渭河流域近 55 年来的输沙时空变化特征,同时基于研究区土地利用、植被、降雨和其他一些相关因素的研究,从而最终得到 27 个对输沙具有影响的相关影响因子,量化其与输沙的非线性关系,探讨渭河流域输沙变化的主控因素,以期为流域综合治理及水沙关系调控提供科学基础。

1 研究区概况

渭河是黄河的第一大支流(33°—38°N, 104°—110°E),其发源地为甘肃省鸟鼠山(图 1),经陕、甘、宁三省(区),从西向东流,最终在潼关县境内和黄河交汇。其干流长大约 818 km,全流域面积 134 767 km²^[11],下游华县站以上集水面积为 10.6 万 km²。渭河支流较多,其中泾河与北洛河 2 个支流较大,泾河和北洛河流域控制面积分别为 4.54, 2.70 万 km²,分别占流域总面积的 33.7%和 20.0%^[10,12]。流域多年平均降水量为 550 mm,降雨主要集中在 6—9 月,降雨南多北少、西多东少,时空差异显著。流域土壤以黄褐土、黄壤和棕壤为主,地貌以黄土高原丘陵沟壑区(主要分布在各支流中上游)和关中盆地为主。由于黄土土质疏松、流域内大多数地区植被稀少,土壤抗侵蚀能力较差,以水力侵蚀为主,属于极严重土壤侵蚀区,流域多年平均输沙模数为 4 459.2 t/(km²·a)^[13-14]。

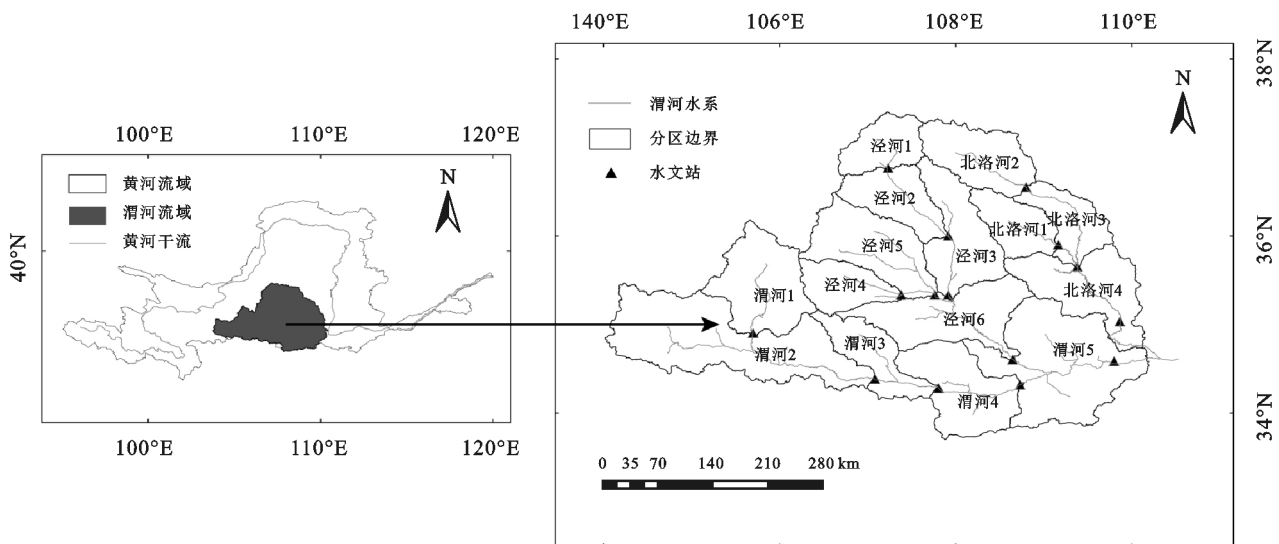


图 1 研究区地理位置

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

试验获取了渭河流域华县站、状头站、张家山站等 15 个具有代表性的水文站 1961—2015 年的输沙数据(表 1),以及 1961—2015 年渭河区域内具有完整资料的 64 个气象站的日降雨数据。研究区 15 个水文站点的输沙资料来源于《黄河泥沙公报》和《中华人民共和国水文

年鉴》。日降雨数据从中国气象数据网获取,获取的气象水文数据均经过相关部门质量检验,符合本研究的要求。归一化植被指数(NDVI)从 2000—2015 年的 MODIS 月最大合成数据产品(MOD13A3)与 1981—1999 年的 AVHRR 数据产品中对其进行相关的提取,栅格精度分别为 8 km 和 500 m。

DEM 数据(100 m×100 m),用于子流域的划

分,获取流域地形和水系参数。土地利用数据包括 1990 年、2000 年、2005 年、2010 年共 4 期,栅格精度为 30 m,数据获取于“黄土高原水土保持数据库”。

表 1 流域水文站数据信息

所属河流	多年平均输沙量/ (10 ⁴ t · a ⁻¹)	站名	控制 面积/km ²	东经	北纬
渭河干流	9041.7	华县	106498	109°46'	34°35'
		咸阳	46827	108°42'	34°19'
		魏家堡	37006	107°42'	34°18'
		林家村	30661	107°03'	34°23'
		秦安	9805	105°40'	34°54'
		张家山	43216	108°36'	34°38'
泾河	18847.2	杨家坪	14124	107°44'	35°20'
		泾川	3145	107°21'	35°20'
		雨落坪	19019	107°53'	35°20'
		庆阳	10603	107°53'	36°00'
		洪德	4640	107°12'	36°46'
北洛河	5986.9	状头	20826	109°50'	35°02'
		交口河	17180	109°21'	35°39'
		张村驿	4715	109°08'	35°54'
		刘家河	7325	108°46'	36°33'

流域输沙量主要由影响坡面土壤颗粒剥蚀和沟道泥沙运移的相关因子控制^[15-16]。土壤颗粒剥蚀主要受

岩性、植被和气候变量的影响;降雨是影响土壤剥蚀和泥沙输移的主要气候变量。地形地貌及水系参数,如高程、坡度等通过调控地表水流流速和挟沙能力来影响河流输沙。基于以上考虑,选择包括降雨、植被、地形、水系、土地利用等共 27 个影响因子(表 2)。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann—Kendall 趋势检验 主要通过利用 M—K 趋势检验法,从而对输沙、渭河流域降雨等相关因素进行综合性分析,得到其长期变化的特性及趋势^[17]。该方法通常可以有效地给呈现出较为直观的变化趋势,所以在相关的水文趋势检验中被相关研究人员广泛使用^[18-19]。M—K 统计检验公式为:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k), k < j < n \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, (x_k - x_i) > 0 \\ 0, (x_k - x_i) = 0 \\ -1, (x_k - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:sgn($X_j - X_k$)为符号函数; n 为时间序列长度; X_k 和 X_j 分别为时间序列上相应年份数据值。当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 的平均值等于 0,且其变异程度接近正态分布,其方差为:

表 2 影响输沙的主要指标因子

类别	指标名称	代码	单位	序列	备注说明
输沙	输沙模数	S_m	t/(km ² · a)		
降水	年降水量	P	mm		
	年降雨侵蚀力 ^[17]	R	MJ · mm/(hm ² · h · a)		
	年大雨量	R_{25}	mm		
	年暴雨量	R_{50}	mm	1961—2015 年	1981—2015 年
	汛期降雨量	FSP	mm		
	年降雨强度	$SDII$	Mm/d		
	年降雨集中度指数	PCI	—		
	季节性指数	SI	—		
植被	归一化植被指数	$NDVI$	—	1981—2015 年	1981—2015 年
地形	高程平均值	H_{mean}	m		
	高程最大值	H_{max}	m		
	高程最小值	H_{min}	m		
	高差最大值	Hd	m		
	高度积分	HI	10 ⁻² m ⁻¹		
	高宽比	RR	m ⁻¹		
	平均坡度	S	%		
水系	流域周长	Lb	km		
	最高点出水口的距离	$DIST$	km		流域地形、水系短时间变化较小,1981—2015 年各指标赋相同
	形状指数	SF	—		
	河流长度	Lr	km		
	河网密度	Rd	Km/km ²		
土地利用	草地	GR	%		
	林地	FL	%		
	耕地	CL	%	1990 年、2000 年、	1981—1990 年、1990 年、
	水域	WA	%	2005 年、2010 年 4 期土	1991—2000 年、2000 年
	建筑用地	BL	%	地利用数据	2001—2005 年、2005 年
	未利用地	UL	%		2006—2015 年、2010 年

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

Z 检验的常态统计公式为:

$$Z = \frac{S}{[\text{var}(S)]^{0.5}} \quad (4)$$

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{x_j - x_k}{j - k} \right], \forall k < j \quad (5)$$

当 $\beta > 0$ 时,说明随着时间的变化,其呈现出上升的潜能;相反,则说明随着时间的变化,呈现出下降的潜能。

2.2.2 相关性分析 采用皮尔逊相关系数法来度量输沙模数与各驱动因子之间的相关性程度。相关系数 r ($-1 < r < 1$) 的大小可以用来判断 2 个变量之间的线性相关性大小,2 组变量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 和 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 之间相关系数的计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (6)$$

式中:相关性系数 r 的范围为 $-1 \sim 1$,若 $r > 0$,则 X 、 Y 呈正相关;反之, X 、 Y 呈负相关。 $|r|$ 的大小反映了 2 个变量间线性相关程度, $|r|$ 越大,则说明这 2 个变量具有较强的相关性。本研究采用 R3.6.1 软件进行相关性分析^[20]。

2.2.3 分区输沙量统计 为了更好地揭示渭河流域输沙时空变化规律,根据渭河 15 个水文站点的分布情况,将渭河流域分为 15 个集水区间(图 1)。各区间对来沙量主要的确定原则为:该水文站的输沙量可以认为是上游无水文站同时由单一水文站对其进行控制的集水区的来沙量,上游水文站和下游水文站输沙量两者的差值可以认为是相邻水文站间的集水区间的来沙量,通过将下游水文站输沙量与上游和支流水文站的输沙量相减,可以得到干流水文站集水区间相应的来沙量^[21]。为确定输沙量与各驱动因子之间的关系,采用偏最小二乘回归法构建输沙与各驱动因子之间的定量关系模型。

2.2.4 偏最小二乘回归 偏最小二乘回归是一种研究 2 组变量之间关系的多元统计方法,最早由 Wold 等^[22]提出,因为其很好地解决了变量之间多重相关以及变量个数大于样本数等问题,被广泛应用在各种领域。本研究在 SPSS 22 软件中实现偏最小二乘回归方法^[23]。

3 结果与分析

3.1 渭河输沙量的时间变化特征

3.1.1 输沙量年际变化特征 由咸阳站(渭河干流控制站)、状头站(北洛河控制站)和张家山站(泾河控制站)3 个水文站点的年输沙线性变化趋势(图 2)可知,渭河流域年输沙量整体呈显著减少趋势,其中张家山站年均输沙量的减少速率最高(0.041 亿 t/a),咸阳站和状头站输沙量分别以 0.039,0.017 亿 t/a 的速率减少,该结果与以往研究^[9,11,24-25]结果基本一致。

根据干支流水文站空间分布,选择咸阳站、状头站 2 个水文站年输沙进行突变分析,咸阳站和状头站的年输沙变化趋势分别在 1996 年和 1994 年出现了拐点,咸阳站 1956—1996 年平均输沙量为 $1\ 310 \times 10^4$ t/a,变化率为 -430×10^4 t/a,1997—2015 年平均输沙量为 $2\ 700 \times 10^4$ t/a,减少趋势与 1996 年之前相比较平缓,变化率为 180×10^4 t/a。与咸阳站相比,状头站在整个研究期间年输沙量呈现先缓后急的递减趋势,1956—1994 年年平均输沙量为 $8\ 500 \times 10^4$ t/a,年均变化率为 70×10^4 t/a,1995—2015 年均输沙量为 $2\ 400 \times 10^4$ t/a,输沙量急剧下降,减少速率为 390×10^4 t/a。

3.1.2 输沙量趋势性特征 图 3 为渭河干流及支流 15 个水文站点 1961—2015 年输沙时间序列的 M—K 趋势检验。结果显示,张村驿站输沙量增加趋势性显著($Z = 1.99$,显著性超过 95%),其余各水文站的输沙均呈减小趋势。比较而言,秦安站输沙量减少的显著性最高, Z 值为 -6.85 ,而洪德站、雨落坪站和庆阳站输沙量减小趋势不显著, Z 值分别为 -1.33 , -1.77 , -1.70 ;其余水文站的输沙量均呈显著减少趋势,显著性均超过 99%。

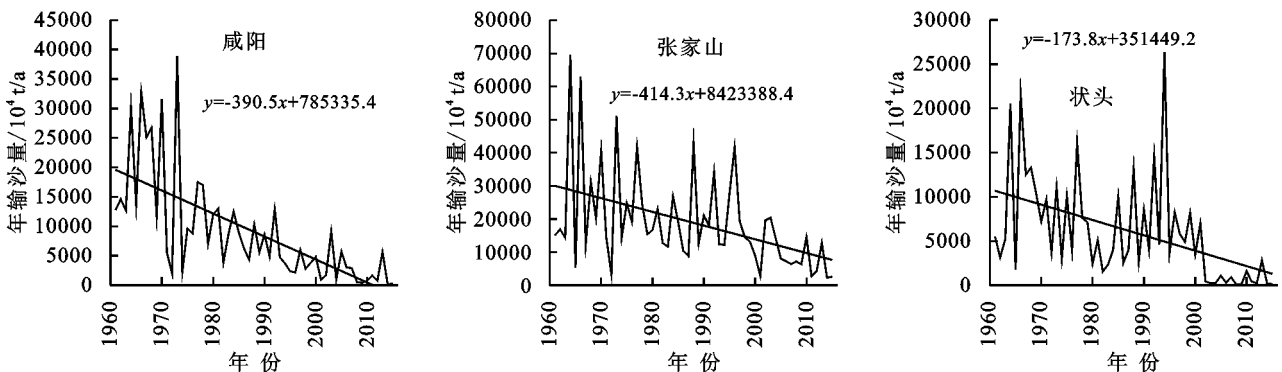


图 2 输沙量年际变化趋势

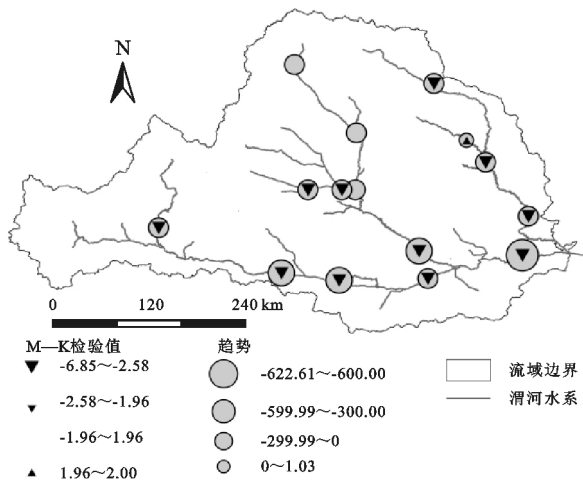


图 3 渭河流域各水文站 1961—2015 年输沙量 M-K 趋势检验

3.2 输沙模数时空变化特征

对渭河流域 1961—2015 年 15 个区间的输沙模

数进行统计分析(图 4),各区间的输沙模数多年均值在空间位置上总体呈现西高东低,在各年代输沙模数中,北洛河 1、渭河 4、北洛河 4、渭河 5 均小于 1 000 t/(km²·a)。而作为渭河流域的主要产沙区,泾河 3、渭河 2、北洛河 2、泾河 2、泾河 5、泾河 1 区间输沙模数的多年平均值均大于 5 000 t/(km²·a);对于北洛河 2 区间而言,其输沙模数多年平均值高达 17 098 t/(km²·a),属于剧烈侵蚀的范围。对渭河各区间不同年代输沙模数进行计算发现,各区间输沙模数随着年代递增呈减少趋势,上世纪 60 年代,渭河 15 个集水区间中输沙模数 > 5 000 t·t/(km²·a) 的区间有 8 个,70 年代和 80 年代输沙模数超过 5 000 t/(km²·a) 的区间有 7 个,90 年代减少为 5 个,2000 年以后仅有 3 个区间。

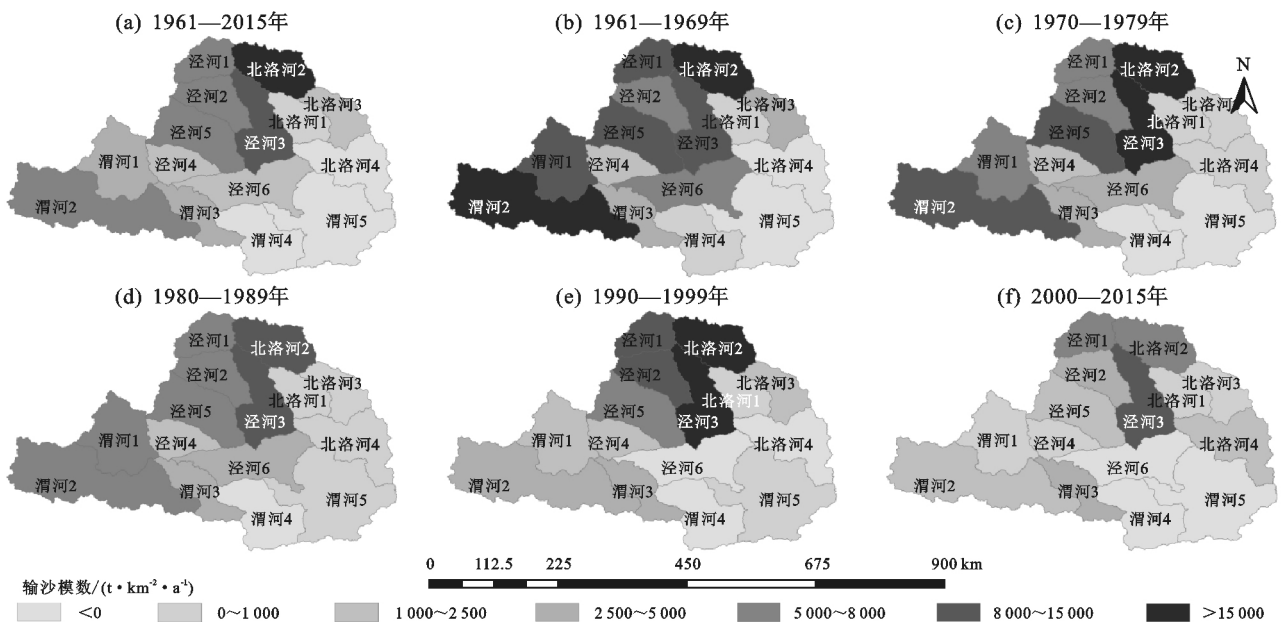


图 4 1961—2015 年渭河流域输沙模数时空分布

3.3 渭河输沙与驱动因素的相关性

双累积曲线广泛应用于水文气象研究中,能简单、直观分析变量之间的一致性和演变趋势性,代表了 2 个相关变量年累积随时间的变化关系,可用于评价降雨、人类活动对径流和输沙量影响。通过对渭河流域 1981—2015 年降水量与输沙量双累积曲线分析(图 5)可知,渭河流域多年累积降雨量和累积输沙量序列在 1981—1996 年间具有较好的相关性($R^2=0.99$),在 1996 年前后,输沙—降雨曲线发生明显的偏移,和状头站、咸阳站年输沙量序列有着相近的突变结果。根据该曲线可以发现,渭河输沙变化的时期大致可以分为 2 个阶段:一个为 1981—1996 年,另一个为 1997—2015 年。

根据现有资料,从降水、植被、地形、水系、土地 5 个要素选取影响流域输沙模数的指标,共计 27 个。对 1981—1996 年和 1997—2015 年输沙模数与各驱动因子进行了相关性分析见图 6 和图 7。

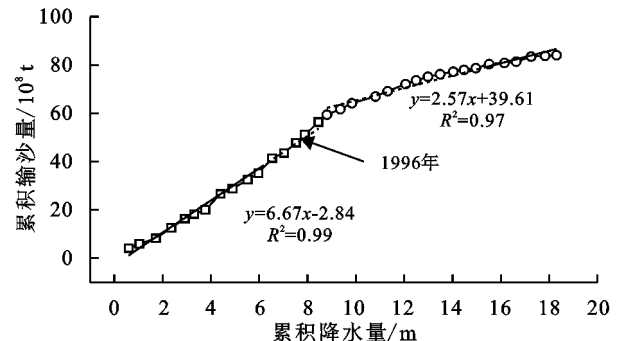


图 5 渭河年降雨量和年输沙量双累积曲线

对 1981—1996 年和 1997—2015 年 2 个时期输沙与各驱动因子进行相关性分析显示,在 2 个时期,输沙模数与 NDVI 呈较好的负相关关系,与土地利用因子中的草地面积占比均呈高度正相关关系,相关性系数分别为 0.86 和 0.83。这主要与渭河流域草地分布于易受侵蚀的沟谷坡面有关,在渭河流域草地多

存在于沟道及坡面上,草地的面积占比一定程度上反映了渭河流域沟道的面积。此外,2 个时期降雨量和降雨侵蚀力与输沙模数间均呈负相关关系,这与渭河流域的降雨时空分布有关,相关研究^[26]表明,渭河流域降雨侵蚀力的时空分布为东南到西北为逐渐减小,易受侵蚀的渭河流域北部地区降雨量小,而植被茂密、抗侵蚀力强的渭河南麓降雨量大。因此,降雨量和降雨侵蚀力与输沙模数呈现负相关关系。同时,地形因子中的最大高差与侵蚀模数成负相关关系,也与最大高差值较大的区间多分布于渭河南麓有关。

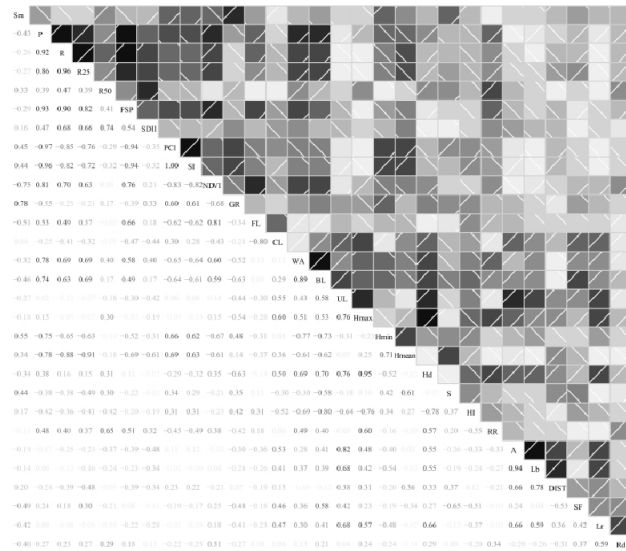


图 6 渭河流域 1981—1996 年输沙与驱动因子相关性分析

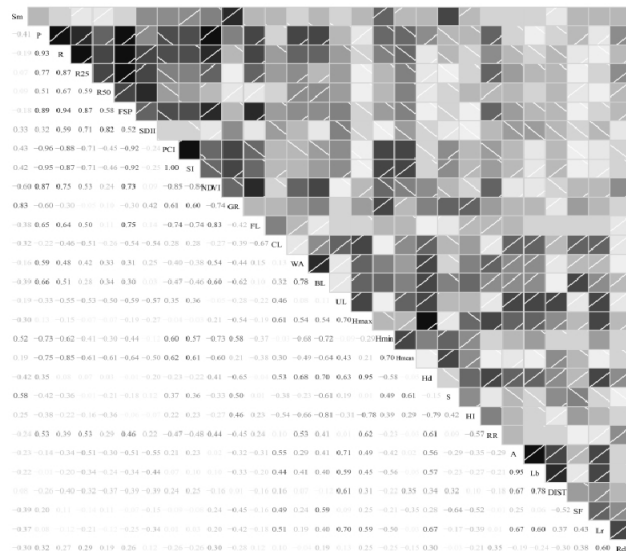


图 7 渭河流域 1997—2015 年输沙与驱动因子相关性分析

在 1981—1996 年,降雨指标中降雨量、年降雨集中度指数和季节性指数与输沙模数相关系数 > 0.5 , 由于这 3 个指标之间有较强的自相关性,为更好地反映影响流域输沙的原因,选取与输沙模数成中度正相关的降雨集中度指数作为影响输沙的降雨主控因子。NDVI、土地利用中的林地占比、地形因子中的最小高程和平均坡度与输沙模数呈中度相关,相关系数分别为 $-0.73, -0.51, 0.58$ 和 0.52 ,所以剔除表中相关

性较差与自相关强的驱动因子,保留降雨因子中的降雨集中度指数、植被因子 NDVI、地形因子中的最小高程和平均坡度及土地利用因子中的草地占比作为 1981—1996 年影响输沙的主控因子。

1997—2015 年,降雨指标因子与输沙模数的相关系数均 < 0.5 ,表明这一阶段降雨对渭河侵蚀产沙的影响程度较前一阶段有所下降。NDVI、最小高程和平均坡度与输沙模数的相关系数分别为 $-0.60, 0.52$ 和 0.58 。为了与前一阶段形成对比,仍选取降雨因子中的降雨集中度指数、植被因子 NDVI、地形因子中的最小高程和平均坡度、土地利用因子中的草地占比作为 1997—2015 年影响输沙的主控因子。

根据筛选出来的影响输沙模数的主控因子,采用通过利用偏最小二乘回归方法构建 2 个阶段输沙主控因子的关系模型。

1981—1996 年输沙模数与主控因子关系模型为:

$$S_m = -0.002PCI - 2.148NDVI + 0.033GR + 4.912 \times 10^{-5} H_{\min} + 0.05S - 0.013 \quad R^2 = 0.72$$

1997—2015 年输沙模数与主控因子关系模型为:

$$S_m = 0.014PCI + 0.463NDVI + 0.017GR + 3.026 \times 10^{-5} H_{\min} + 0.035S - 0.098 \quad R^2 = 0.70$$

4 结论

(1)渭河干流和 2 大支流的年均输沙量均呈现减少趋势。泾河的张家山站年均输沙量以 0.041 亿 t/a 的速率减少,其 2010—2015 年年均输沙量为 0.655 亿 t ,相当于 1961—1969 年年均输沙量 2.756 亿 t 的 23.8% 。渭河干流咸阳站和北洛河状头站的年均输沙量分别从 1961—1969 年的 $2.00, 1.04$ 亿 t 减少到 2010—2015 年的 $0.150, 0.899$ 亿 t 。

(2)渭河流域 15 个水文站的输沙变化显示除张村驿站呈增加趋势外,其余 14 个水文站的输沙均呈现减小趋势,其中华县站的输沙量减少幅度最大,洪德站、雨落坪站和庆阳站输沙量呈现不显著减小趋势,其余水文站均呈显著减少趋势。

(3)对渭河流域输沙与驱动因子进行相关性分析,渭河输沙量的主控因子包括降雨集中度指数、植被覆盖指数、草地面积比例、最小高程和平均坡度。

本文将渭河流域多年输沙时空变化特征及其与流域各特征因子的关系进行了分析,但未能考虑流域内兴建的梯田、坝库等工程措施对输沙变化的影响,未来还需进一步考虑水土保持工程对流域输沙的作用。

参考文献:

[1] 吴崇泽.黄河口的基本情况及其治理问题[J].黄渤海海洋, 1987(3): 83-90.
 [2] 胡春宏,张晓明.论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J].水利学报, 2018, 49(9): 6-17.
 [3] 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): 5-11.

- [4] 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):3-12.
- [5] 赵广举,River M,穆兴民,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):1070-1078.
- [6] 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):1-11.
- [7] 林学钰,廖资生,苏小四,等.黄河流域地下水资源及其开发利用对策[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(5):677-684.
- [8] 王国庆,王云璋.渭河流域产流产沙模型及径流泥沙变化原因分析[J].水土保持学报,2000,14(4):22-25.
- [9] 陈广圣,马静.渭河流域输沙量变化规律分析[J].人民珠江,2014,35(6):75-78.
- [10] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于Budyko假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21):7607-7617.
- [11] 胡安焱,刘燕,郭生练,等.渭河流域水沙多年变化及趋势分析[J].人民黄河,2007,29(2):41-43.
- [12] 左德鹏,徐宗学,隋彩虹,等.气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(2):115-123.
- [13] 焦菊英,马祥华,王飞,等.渭河流域侵蚀产沙强度的区域分异特征[J].水土保持研究,2004,11(4):60-63.
- [14] 李同昇,刘彦随,刘晓琼,等.基于小波多尺度变换的渭河水沙演变规律研究[J].地理科学,2015,35(2):211-217.
- [15] Buendia C, Herrero A, Sabater S, et al. An appraisal of the sediment yield in western Mediterranean river basins[J].Science of The Total Environment,2016,572:538-553.
- [16] Vente J D, Verduyn R, Verstraeten G, et al. Factors controlling sediment yield at the catchment scale in NW Mediterranean geoecosystems[J].Journal of Soils and Sediments,2011,11(4):690-707.
- [17] 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.
- [18] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J].Hydrological Processes,2002,16(9):1807-1829.
- [19] 徐宗学,张楠.黄河流域近50年降水变化趋势分析[J].地理研究,2006,25(1):29-36.
- [20] Hu J, Gao P, Mu X M, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J].Catena,2019,173:234-245.
- [21] 柴雪柯.渭河流域水沙变化及其影响因素[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [22] Wold S, Albano C, Dunn M. Pattern regression finding and using regularities in Multivariate Data[M]. London: Analysis Applied Science Publication,1983.
- [23] 王国华,张虎,魏岳嵩.偏最小二乘回归在SPSS软件中的实现[J].统计与决策,2017,475(7):69-73.
- [24] 张学成,匡键,井涌.20世纪90年代渭河入黄水量锐减成因初步分析[J].水文,2003,23(3):43-45.
- [25] 信忠保,许炯心,余新晓.近50年黄土高原水土流失的时空变化[J].生态学报,2009,29(3):79-89.
- [26] 刘宇林,赵广举,穆兴民,等.近55年渭河流域降雨侵蚀力变化及对输沙量的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(3):15-22.
- (上接第90页)
- [7] 王红兰,唐翔宇,张维,等.施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):107-112.
- [8] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):290-299.
- [9] 陈胜男,胡钧铭,徐宪立,等.绿肥压青粉垄保护性耕作对土壤水分入渗及其后延效应的影响[J].中国农业气象,2018,39(12):778-785.
- [10] 于庆峰,苗庆丰,史海滨,等.耕作方式对秸秆覆盖玉米田春播期土壤水热盐状况的影响[J].水土保持研究,2019,26(3):265-268.
- [11] 张金珠,王振华,虎胆·吐马尔白.具有秸秆夹层状土壤一维垂直入渗水盐分布特征[J].土壤,2014,46(5):954-960.
- [12] 韩胜强,王振华,李文昊,等.不同可降解膜覆盖对一维土柱土壤水分入渗和蒸发的影响[J].中国农村水利水电,2019(8):42-46.
- [13] 何子森,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外草被坡面土壤入渗参数变化规律与模拟研究[J].水土保持学报,2018,32(2):74-79.
- [14] 张敬晓.黄土丘陵区林地干化土壤水分入渗及迁移规律研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [15] 舒维花,蒋齐,王占军,等.宁夏盐池沙地不同密度人工柠条林土壤水分时空变化分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(12):172-176.
- [16] 曹云生,赵艳玲.不同灌木林分枯落物层与土壤层水源涵养能力研究[J].水土保持研究,2019,26(6):179-183.
- [17] 阿茹·苏里坦,常顺利,张毓涛.天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[J].生态学报,2019,39(24):9111-9118.
- [18] 倪含斌,张丽萍.神东矿区堆积弃土坡地入渗规律试验研究[J].水土保持学报,2007,21(3):28-31.
- [19] 薛建辉,郝奇林,何常清,等.岷江上游两种亚高山林分枯落物层水文特征研究[J].水土保持学报,2009,23(3):168-172.
- [20] 李波,李晔,韩惟怡,等.人工降雨条件下不同粒径泥沙中氮磷流失特征分析[J].水土保持学报,2016,30(3):39-43.
- [21] 李兆松,王兵,汪建芳,等.铁杆蒿与白羊草枯落物覆盖量对黄土坡面流水动力特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(17):151-157.
- [22] 刘绪军,任宪平,杨亚娟,等.东北黑土区植物篱土壤入渗性能研究[J].水土保持通报,2017,37(2):45-49.
- [23] 付玉娟,祝陈梦媛,张旭东,等.农田下垫面处理对降雨入渗的影响[J].水土保持研究,2019,26(4):74-79.
- [24] 孙佳美,余新晓,李瀚之,等.模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究[J].水利学报,2017,48(3):341-350.
- [25] 喻阳华,李光容,严令斌,等.赤水河上游主要树种枯落物调蓄水分效应[J].中国水土保持科学,2015,13(3):39-44.