

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.007.

李天毅, 于坤霞, 李占斌, 等. 黄土高原多沙粗沙区泥沙集中度变化特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 203-209.

LI Tianyi, YU Kunxia, LI Zhanbin, et al. Variation Characteristics and Driving Factors of Sediment Concentration in Sandy Region of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 203-209.

黄土高原多沙粗沙区泥沙集中度变化特征及驱动因素

李天毅^{1,2}, 于坤霞^{1,2}, 李占斌^{1,2}, 李鹏^{1,2}, 贾路^{1,2}, 杨志³, 张国军³, 魏小燕³

(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.西安理工大学

旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048; 3.宁夏回族自治区水土保持监测总站, 银川 750002)

摘要: [目的]揭示黄土高原多沙粗沙区的泥沙和泥沙集中度的变化规律, 阐明泥沙集中度的影响因素, 进而为流域水土流失治理和生态保护提供一定的科学依据。 [方法]基于 1956—2010 年皇甫川、孤山川、秃尾河、窟野河和无定河流域的输沙量数据, 利用 Mann-Kendall 趋势检验法、Pettitt 突变点检验法、Morlet 小波分析方法分析了黄土高原多沙粗沙区泥沙集中度的时空变化特征, 通过 Pearson 相关系数探究了泥沙集中度与生态建设措施的相关性。 [结果] (1) 1956—2010 年, 黄土高原多沙粗沙区的输沙量呈现显著减少的趋势, 但是皇甫川、孤山川、无定河流域的泥沙集中度呈现显著增加的趋势。 (2) 孤山川与无定河流域的泥沙集中度具有显著的 ($p < 0.05$) 突变点, 分别为 1990 年与 1986 年。 (3) 研究区泥沙集中度主周期介于 15~55 a。 (4) 径流集中度对于研究区泥沙集中度有显著的影响。除此之外, 生态建设措施面积与泥沙集中度有显著的正相关关系, 其中梯田、造林和种草对于研究区的泥沙集中度的影响程度最大。 [结论] 黄土高原多沙粗沙区的输沙量逐渐减少且越来越集中, 泥沙集中度受到降雨径流和生态建设措施等因素影响。

关键词: 泥沙集中度; 相关性分析; 生态建设措施

中图分类号: P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0203-07

Variation Characteristics and Driving Factors of Sediment Concentration in Sandy Region of the Loess Plateau

LI Tianyi^{1,2}, YU Kunxia^{1,2}, LI Zhanbin^{1,2}, LI Peng^{1,2}, JIA Lu^{1,2},

YANG Zhi³, Zhang Guojun³, Wei Xiaoyan³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Key Laboratory of Ecological Hydrology and

Disaster Prevention in Arid Regions, National Forestry Administration, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 3. Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to reveal the variation law of sediment and sediment concentration in the Loess Plateau, clarify the influencing factors on sediment concentration, and provide some scientific bases for soil erosion control and ecological protection in the basin. [Methods] Based on the sediment transport data of Huangfuchuan, Gushanchuan, Tuwei, Kuye and Wuding River basins from 1956 to 2010, the temporal and spatial variation characteristics of sediment concentration in the coarse sediment region were analyzed by using Mann-Kendall trend test, Pettitt change point test and Morlet wavelet analysis. The correlation between sediment concentration and ecological construction measures was explored by Pearson correla-

收稿日期: 2022-05-19

修回日期: 2022-07-14

资助项目: 国家自然科学基金(52079104); 陕西省重点研发计划(2023-ZDLSF-60); 宁夏区水利科技项目(SBZZ-J-2021-12, SBZZ-J-2021-13); 榆林市科技计划项目(CXY2018-2-19)

第一作者: 李天毅(1996—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源、水土保持。E-mail: lty617148964@163.com

通信作者: 于坤霞(1989—), 女, 河南长垣人, 博士, 副教授, 主要从事非一致性水文频率分析、流域水热耦合平衡研究和气候变化与人类活动对水文过程影响分析研究。E-mail: yukunxia@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

tion coefficient. [Results] (1) From 1956 to 2010, the sediment transports in the study area showed significant decreasing trends, but the sediment concentrations in the Huangfuchuan, Gushanchuan and Wuding river basins showed significant increasing trends. (2) The sediment concentration in Gushanchuan and Wuding River basins had significant abrupt change ($p < 0.05$) in the years of 1990 and 1986, respectively. (3) The main cycle of sediment concentration in the study area was 15~55 years. (4) Runoff concentration had a great impact on sediment concentration in the study area. In addition, the area of ecological construction measures had a significant positive correlation with sediment concentration, and terrace, afforestation and grass planting had the greatest influence on sediment concentration in the study area. [Conclusion] In the Loess Plateau, the amount of sediment is gradually reduced and more and more concentrated. The concentration of sediment is affected by rainfall runoff and ecological construction measures.

Keywords: sediment concentration; correlation analysis; ecological construction measures

黄河是我国泥沙量最大的河流,也是世界上罕见的多沙河流。其中从内蒙古河口镇至河南桃花峪间为黄河中游,河段全长约 1 206 km,流域面积约 $3.44 \times 10^5 \text{ km}^2$,来沙量占全河来沙量的 90% 以上,为黄河泥沙的主要来源地^[1]。黄河由于水少沙多、水沙关系不协调直接影响沿岸的水资源开发利用。大量入黄泥沙在下游不断淤积,形成地上“悬河”,给下游平原区造成极大危害^[2]。因此,治黄的重点和难点在于如何处理泥沙问题。

目前,已有大量研究分析了黄河干支流水沙多时空演变特征,如许文龙等^[3]研究了近 60 a 黄河上游水沙关系及其变化,指出大部分水文站存在水沙显著减少的趋势,大型水利工程及大量水土保持措施布设是造成这一现象的主要原因。胡春宏等^[4]研究了不同时期黄河水沙空间分布及其变化过程,指出自然条件变化和人类活动是黄河下游水沙量减少的主要原因。赵广举等^[5]运用多种方法对黄河流域水沙变化情势进行评估并分析了水沙变化机制。虽然这些研究在一定程度上能够反映水文过程和气候过程的变化情况,但很难揭示泥沙在某一时段内的分配状况。Oliver^[6]在 1980 年提出了一种基于月降雨量的降雨集中度计算方法,黄生志等^[7]探究了不同环境下降雨集中度的变异以及驱动力,贾路等^[8]探究了西北地区降雨集中度的时空演变以及影响因素,发现降雨集中度能够很好地表征降雨在年内的集中程度和季节性。汤奇成等^[9]初步研究了中国河川径流集中度。但是目前黄土高原多沙粗沙区泥沙集中度研究较少,因此本文采用泥沙集中度来研究黄土高原多沙粗沙区泥沙在年内的集中程度与季节性。

研究区取自黄土高原多沙粗沙区,黄土高原多沙粗沙区,是整个黄河流域土壤被侵蚀最为严重的地区,也是导致黄河泥沙含量剧增的主要泥沙地^[10-11]。本研究利用 Mann-Kendall 趋势分析和 Pettitt 突变

点检验的方法来研究黄土高原多沙粗沙区泥沙集中度的变化趋势和突变情况,基于 Hurst 指数用以描述时间序列的自相关性,使用 Morlet 小波分析来研究黄土高原多沙粗沙区泥沙集中度的周期性变化,最后通过 Pearson 相关系数来研究黄土高原多沙粗沙区泥沙集中度变化的驱动因素。该研究成果有助于进一步深化黄土高原多沙粗沙区泥沙年内分配的认识,为保护黄土高原多沙粗沙区生态环境和应对泥沙资源问题提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区取自黄河中游,位于黄土高原东部地区,属于黄土高原多沙粗沙区,主要位于陕西省和内蒙古自治区境内,是世界上水土流失最严重的地区,是我国生态问题集中体现的地区,也是我国水土保持和生态建设的重点地区。研究区属(暖)温带(大陆性)季风气候,冬春季受极地干冷气团影响,寒冷干燥多风沙;夏秋季受西太平洋副热带高压和印度洋低压影响,炎热多暴雨^[12]。研究区流域面积为 $4.62 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔介于 597~1 848 m,地势西高东低,平均年降雨量为 410 mm,多为短历时、高强度暴雨,降雨分配不均,水土流失严重,土质疏松,地表植被覆盖稀疏,地表黄土覆盖面积达 90% 以上,土壤侵蚀严重,流域沟壑纵横,水土流失严重,土壤侵蚀以水力侵蚀为主,并复合有风力、重力侵蚀,是黄河粗泥沙主要来源地区之一。研究区分为皇甫川流域、孤山川流域、窟野河流域、秃尾河流域与无定河流域,对应的水文站依次为:皇甫水文站、高石崖水文站、温家川水文站、高家川水文站和白家川水文站^[13-15](图 1)。

1.2 数据来源

本文研究区泥沙和径流数据均来自于水文年鉴,时间跨度为 1956—2010 年;降雨数据来自 <https://>

worldclim.org,时间跨度是1956—2010年;生态建设措施数据来自于黄河上中游管理局;淤地坝数据来自陕西省水土保持年鉴。

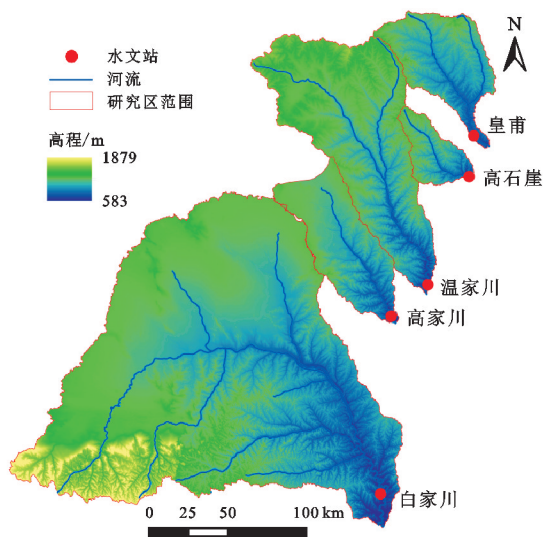


图1 研究区概况

1.3 研究方法

1.3.1 泥沙集中度 1980年 Oliver^[6]提出的降雨集中度,发现降雨集中度能够很好地表征降雨在年内的集中程度和季节性,经过对降雨集中度合理变形得到泥沙集中度,泥沙集中度是基于月输沙量计算的用以描述泥沙季节不均匀性的指标,依据降雨集中度数据特征提出泥沙集中度数据指标:泥沙集中度 ≤ 20 时,表明月输沙量在年内分配比较均匀;20<泥沙集中度 ≤ 50 时,表明月输沙量在年内变化季节性较为明显;泥沙集中度 > 50 时,表明月输沙量在年内分配有异常集中性。泥沙集中度计算公式具体如下:

$$\text{CIM} = \frac{\sum_{i=1}^{12} S_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} S_i)^2} \quad (1)$$

式中: CIM 为泥沙集中度; S_i 为第 i 个月的输沙量。

1.3.2 Mann-Kendall 趋势分析 Mann-Kendall^[16]法是一种在水文、气象等领域应用广泛的趋势分析非参数检验法。在本研究中,采用 Mann-Kendall 法来分析泥沙集中度在年际变化的趋势。当 Mann-Kendall 标准检验值 Z 为零时,表示数据不存在变化趋势;当 Mann-Kendall 标准检验值 Z 为正值时,表示数据存在增加趋势;当 Mann-Kendall 标准检验值 Z 为负值时,表示数据存在减少趋势;当 $p = 0.05$ 时,若 Mann-Kendall 标准检验值 $Z > 1.96$,表明数据增加趋势显著;若 Mann-Kendall 标准检验值 $Z < -1.96$,表明数据减小趋势显著。

1.3.3 Hurst 指数 Hurst 指数^[17]以英国水文学家哈罗德·赫斯特命名,用以描述时间序列的自相关性,反映了序列中隐藏的长期趋势。当 $0 < H < 0.5$

表明时间序列具有长期相关性,但将来的总体趋势和过去相反,属于负可持续性;当 $H = 0.5$ 表明时间序列是随机和不相关的,现在不会影响未来;当 $H > 0.5$ 表示时间序列具有长期相关的特征,也就是具有持续性, H 越接近 1,相关性越强;当 $H = 1$,说明未来完全可以用现在来预测。

1.3.4 Pettitt 突变点检验法 Pettitt 检验法^[18]是检验时间序列下单个未知突变点的常用工具,基本原理是对同一总体 X 的两个样本 $x_i (1, 2, \dots, t)$ 和 $x_N (N = t + 1, t + 2, \dots, N)$ 进行 Mann-Whitney 定义的统计量进行检验。

$$U_{t,N} = U_{t,N-1} + \sum \text{Sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

式中: $U_{t,N}$ 和 $U_{t,N-1}$ 分别为样本为 N 和 $(N-1)$ 时相对应的统计量 U 的值; Sgn 为符号函数,计算 $|U_{t,N}|$ 中的最大值记作 k_t ,显著性检验系数记作 p ,公式为:

$$K_t = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (3)$$

$$p \approx \exp[-6(K_t^2)] / (N^3 + N^2) \quad (4)$$

1.3.5 Morlet 小波分析 小波分析^[19]通过将时间系列分解到时间频率域内,从而得出时间系列的显著的波动模式,即周期变化动态,以及周期变化动态的时间格局。本研究采用 Morlet 小波分析方法分析研究区泥沙集中度变化的周期性。Morlet 小波变换公式如下:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi}(\frac{t-b}{a}) dt \quad (5)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数,可同时反映频域和时域的特性; a 为频域因子; b 为时域因子。若 a 较小,则频域分辨率低而时域高,反之亦然; $|a|^{-\frac{1}{2}} \overline{\Psi}(\frac{t-b}{a})$ 是由母小波伸缩和平移得到的一簇函数族。

2 结果与分析

2.1 黄土高原多沙粗沙区输沙量和泥沙集中度特征分析

从图 2 可以看出,5 个流域的输沙量随着时间变化 1956—2010 年呈现明显的下降趋势,而且显著下降的时间点基本都是 1975 年左右,因为 1973 年我国第一次全国环境保护会议召开,拉开了环境保护工作的序幕,自 20 世纪 70 年代开始,国家在黄土高原地区先后开展了小流域水土流失综合治理、退耕还林还草、淤地坝建设和坡耕地整治等一系列生态工程,使得研究区输沙量大大减少^[20-21]。

黄河中游流域输沙量时间变化特征见表 1,皇甫川流域输沙量范围在 $1.38 \times 10^6 \sim 1.72 \times 10^8 \text{ t}$,平均值为 $4.5 \times 10^7 \text{ t}$;孤山川流域输沙量范围在 $4.0 \times 10^4 \text{ t} \sim$

$6.8 \times 10^7 \text{ t}$, 平均值为 $1.2 \times 10^7 \text{ t}$; 窟野河流域输沙量范围在 $3.0 \times 10^4 \text{ t} \sim 2.89 \times 10^8 \text{ t}$, 平均值为 $6.8 \times 10^7 \text{ t}$; 秃尾河流域输沙量范围在 $2.4 \times 10^5 \text{ t} \sim 6.8 \times 10^7 \text{ t}$, 平均值为 $1.5 \times 10^7 \text{ t}$; 无定河流域输沙量范围在 $2.7 \times 10^6 \sim 4.4 \times 10^8 \text{ t}$, 平均值为 $1.07 \times 10^8 \text{ t}$ 。5 个流域极值比介于 163~8 987, 说明数据变化较大。5 个流域变异系

数从大到小为: 孤山川、秃尾河、窟野河、皇甫川和无定河, 变异系数均大于等于 1, 说明研究区流域输沙量属于强变异, 不稳定。M-K 趋势检验的统计量均大于 1.96, 表明 5 个流域输沙量呈显著的下降趋势, 其中输沙量下降趋势从大到小依次为: 窟野河、孤山川、无定河、秃尾河与皇甫川。

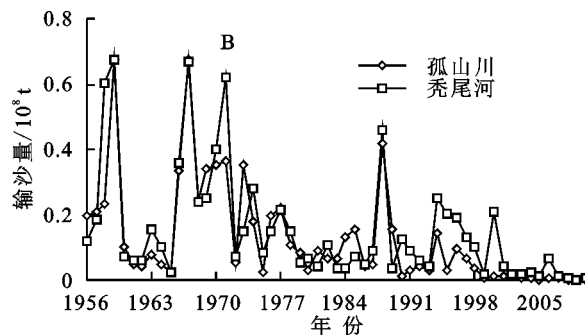
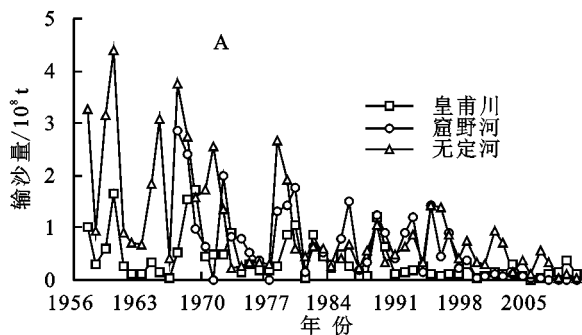


图2 研究区输沙量年际变化

表1 黄土高原多沙粗沙区输沙量时间变化特征

流域	水文站	流域 面积/km ²	输沙量/10 ⁸ t			变异 系数	M-K 趋势检验	极值比
			最大值	最小值	平均值			
皇甫川	皇甫	3246	1.72	0.0138	0.45	1.02	2.65	123
孤山川	高石崖	1272	0.68	0.0004	0.12	1.34	4.21	1547
窟野河	温家川	8706	2.89	0.0003	0.68	1.03	4.74	8987
秃尾河	高家川	3294	0.68	0.0024	0.15	1.16	3.2	275
无定河	白家川	30260	4.4	0.0267	1.07	1	3.84	163

从图3中可以看出, 研究区输沙量年内分配极度

不均, 5 个流域输沙量年内分配在 6—8 月达到高峰。

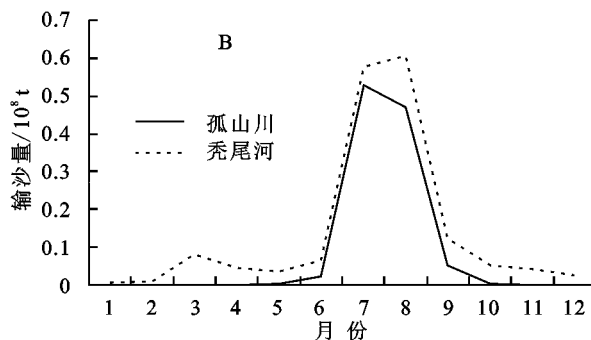
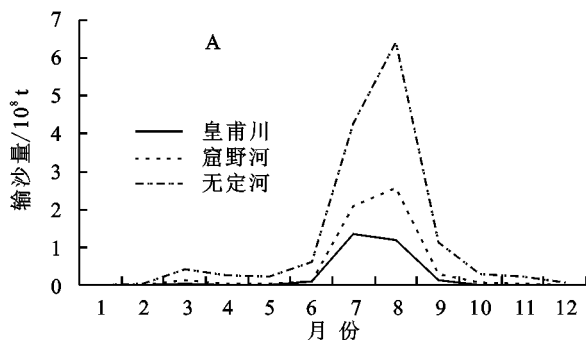


图3 1956—2010 年研究区输沙量年内分配曲线

从图4中可以得出, 5 个流域的泥沙集中度均为上升趋势。结合图2与图4可以得出: 研究区泥沙集中度逐年上升但是输沙量逐渐减少。

黄河中游流域泥沙集中度变化特征见表2。皇甫川流域泥沙集中度范围为 29~92; 孤山川流域泥沙集中度范围为 9.29~66.57; 窟野河流域泥沙集中度范围为 26.18~90.02; 秃尾河流域泥沙集中度范围为 11.3~88.7; 无定河泥沙集中度范围为 19~79.7。根据流域泥沙集中度均值可以看出孤山川、秃尾河和无定河流域月输沙量在年内有明显季节性变化, 皇甫川和窟野河流域月输沙量在年内分配有异常集中性。5 个流域中除了窟野河和秃尾河流域变化趋势不显著, 皇甫川、孤山川和无定河流域的泥沙集

中度均有显著增加趋势, 且孤山川流域泥沙集中度增加趋势最大。表2的泥沙集中度变异系数介于 0.33~0.58, 属于中等变异, 研究区中部的泥沙集中度年际变化幅度较大, 不稳定, 研究区北部和南部泥沙集中度变化较小, 相对稳定。5 个流域的 Hurst 指数均大于 0.5, 表明研究区的泥沙集中度会持续增加。

2.2 泥沙集中度突变点分析

本研究采用了 Pettitt 突变点检验法来检验 5 个流域的泥沙集中度。从表3可以看出, 除了皇甫川流域泥沙集中度突变点在 1967 年, 其他 4 个流域的泥沙集中度突变点都在位于 1985—1990 年, 且孤山川和无定河两个流域的泥沙集中度突变点是显著的 ($p < 0.05$)。

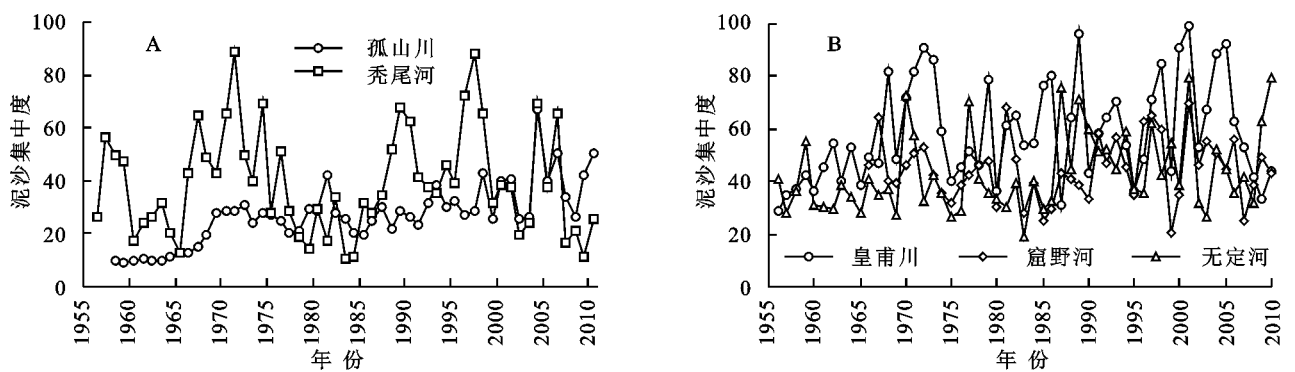


图 4 研究区泥沙集中度年际变化

表 2 1956—2010 年黄河中游流域泥沙集中度时间变化特征

区域	水文站	泥沙集中度			变异 系数	M-K 趋势 检验统计量	Hurst 指数
		最大值	最小值	平均值			
皇甫川	皇甫	92	29	58.19	0.33	2.211	0.55
孤山川	高石崖	66.57	9.29	27.1	0.43	5.9	0.7
窟野河	温家川	90.02	26.18	57.2	0.29	1.44	0.55
秃尾河	高家川	88.7	11.3	39.33	0.5	0.28	0.55
无定河	白家川	79.7	19	43.17	0.35	2.46	0.58

表 3 研究区泥沙集中度 Pettitt 突变点检验

水文站	统计量		突变点 (年份)	显著性 ($p<0.05$)
	最大值	最小值		
皇甫川	122	-330	1967	不显著
孤山川	0	-490	1990	显著
窟野河	0	-484	1985	不显著
秃尾河	154	-160	1987	不显著
无定河	6	-414	1986	显著

王随继^[22]、刘雅丽^[23]等发现,在地貌及地表环境因素没有明显改变、降水量略微下降的情况下,研究区的人为减沙作用从 20 世纪 50 年代至 80 年代持续增强,其中作为研究区沟道拦沙的主力建筑淤地坝的减沙效应非常明显,但是其拦沙作用在 80 年代达到顶点,此后开始减弱。这是种现象是由于前期所修筑的部分淤地坝已经达到了它们的运用时限,库容被泥沙完全占有而失效。因此泥沙集中度突变点聚集于 1985—1990 年。

2.3 泥沙集中度周期性分析

使用 Morlet 小波分析对研究区进行周期性分析(图 5)。其中皇甫川流域泥沙集中度主周期为 24 a;孤山川流域泥沙集中度主周期为 55 a;窟野河流域泥沙集中度主周期为 34 a;秃尾河流域泥沙集中度主周期为 40 a;无定河流域泥沙集中度主周期为 15 a。5 个流域中,主周期介于 15~55 a。研究区主要具有两个偏少中心,分别是 1970 年左右和 2000 年左右,1985 年左右具有一个偏少中心。

3 讨论

关于黄河流域输沙量的定量演变特征及其驱动机制的定性分析,已有大量的研究成果并取得了基本一致的结论^[24],黄河中游输沙量呈显著减少趋势,区域人类活动的贡献大于气候变化的贡献,是泥沙减少的主要驱动力。在 1960 年以前,黄河水沙变化主要制约于气候等自然因素,径流量随降雨的变化而相应出现丰枯变化;自 20 世纪 60 年代末以来,气候等自然因素和人类活动因素成为水沙变化的双重制约因子,近年来尤其是 2000 年以来人类活动对水沙变化起到了主导作用^[25]。因此,本研究从水文因素和生态因素来探究泥沙集中度的影响因素。

3.1 泥沙集中度与水文因素相关性

径流量与降雨量是影响输沙量的重要因素,所以分析泥沙集中度应该从径流量和降雨量两方面进行研究。表 4 选取了泥沙集中度显著变化的 3 个流域进行分析,分析了 3 个流域的泥沙集中度与径流量、径流集中度和降雨量以及降雨集中度的相关性。从表中可以看出孤山川流域泥沙集中度与径流量的呈现显著负相关($p<0.05$),径流量越大,孤山川流域的输沙量年内分配越不均匀;孤山川流域和秃尾河流域泥沙集中度与径流集中度呈现显著正相关($p<0.05$),说明这两个流域径流量年内分配越不均匀,输沙量也越不均匀。

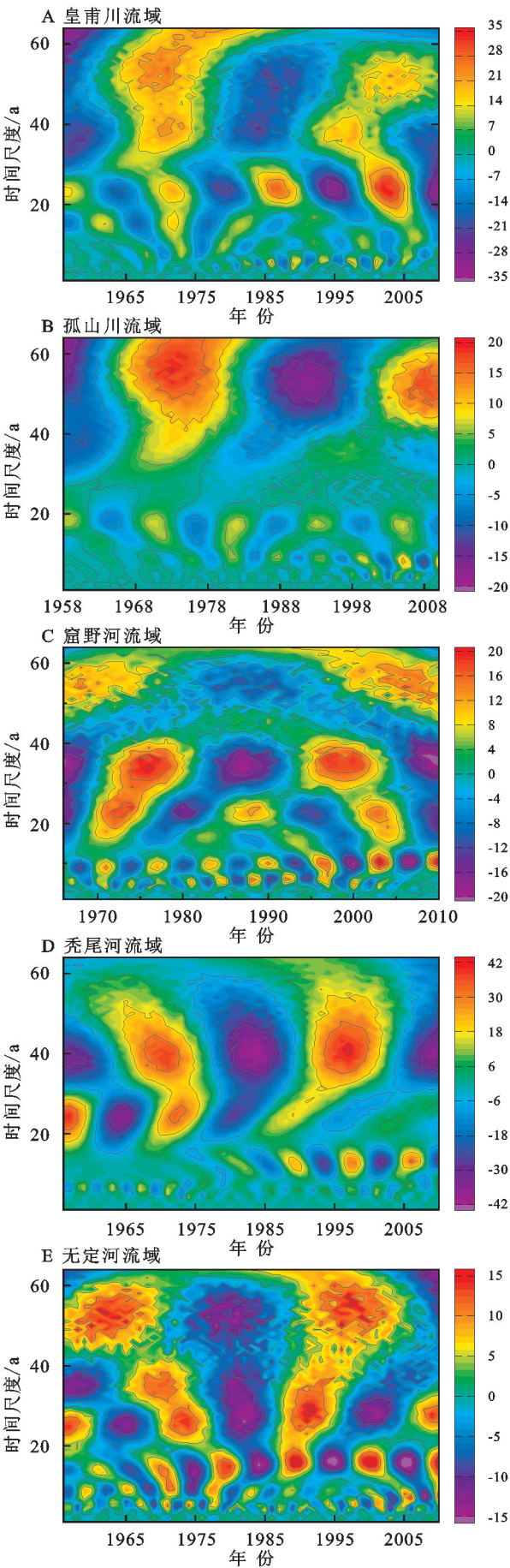


图 5 研究区泥沙集中度周期性

从表 4 中可以得出结论:径流量、径流集中度、降雨量、降雨集中度 4 个指标中对泥沙集中度影响最大的是径流集中度。近年来,气候变化加剧,极端暴雨事件呈现频率增加、强度加剧、持续时间延长的态势,极端暴雨会导致径流量突增,而径流量突增会导致径流年内分配不均,径流集中度增加,伴随着洪水频次多,持续时间长的现象,单次洪水的输沙量相比于年内非极端气候的输沙量骤增,而由于非汛期输沙量受到生态建设措施的影响,输沙量大大减少,导致输沙量年内分配不均匀加剧,泥沙集中度增加^[26],因此径流集中度对泥沙集中度影响较大,且两个变量呈正相关关系。

表 4 黄河中游流域泥沙集中度与水文因素相关性分析

区域	水文站	水文因素相关性分析			
		径流量	径流集中度	降雨量	降雨集中度
皇甫川	皇甫	-0.117	0.072	-0.139	-0.060
孤山川	高石崖	-0.588 **	0.388 **	-0.263	-0.043
秃尾河	高家川	-0.037	0.412 **	-0.100	0.157

注: * 代表 0.05 级别显著; ** 代表 0.01 级别显著,下同。

3.2 泥沙集中度与生态建设措施的相关性

流域输沙量除了受降雨和径流等水文因素影响外,还受到生态建设措施的影响。表 5 展示了泥沙集中度与梯田、造林、种草、封禁治理和淤地坝坝控面积的相关系数。从表中可以得出,生态建设措施中梯田、造林和种草面积与皇甫川流域的泥沙集中度呈显著正相关($p<0.05$);梯田、造林、种草、封禁治理和淤地坝坝控面积与孤山川流域的泥沙集中度也呈现显著的正相关($p<0.01$);孤山川流域的泥沙集中度对于梯田、造林和种草的相关性最大,且都在 0.7 以上;无定河流域的泥沙集中度只与淤地坝坝控面积呈显著正相关($p<0.05$)。因此可以说生态建设措施与泥沙集中度的关系是呈显著正相关。孙倩等^[11]论证了黄土高原多沙粗沙区生态建设措施对输沙量的影响程度均在 70% 以上。生态建设措施在非极端气候减沙拦沙作用十分显著,在非极端天气时使输沙量大大降低,但是在极端暴雨或者洪涝灾害时,生态建设措施显得十分脆弱^[27],输沙量会大幅增加,输沙量年内分配不均加剧,泥沙集中度增加。所以生态建设措施与研究区的泥沙集中度呈现正相关。

4 结 论

(1) 黄土高原多沙粗沙区输沙量均呈现显著下降趋势,但皇甫川、孤山川和无定河流域的泥沙集中度呈现显著上升趋势($\alpha=0.05$)。

表 5 研究区泥沙集中度与生态建设措施相关性分析

区域	水文站	生态建设措施相关性分析				
		梯田	造林	种草	封禁治理	淤地坝坝控面积
皇甫川	皇甫	0.297 *	0.352 *	0.317 *	0.268	-0.098
孤山川	高石崖	0.751 * *	0.721 * *	0.730 * *	0.534 * *	0.647 * *
无定河	白家川	0.177	0.189	0.281	0.276	0.285 *

(2) 研究区泥沙集中度的主周期范围为 15~55 a。孤山川和无定河流域的泥沙集中度存在显著突变点($p<0.05$),突变点分别为 1990 年与 1986 年。

(3) 研究区泥沙集中度与径流集中度有显著的正相关性($p<0.01$),径流集中度比径流量、降雨量和降雨集中度对泥沙集中度影响更大;生态建设措施面积与研究区的泥沙集中度也呈显著的正相关性($p<0.05$)。

参考文献:

[1] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(1):1-10.

[2] 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):1-7.

[3] 许文龙,赵广举,穆兴民,等.近 60 年黄河上游干流水沙变化及其关系[J].中国水土保持科学,2018,16(6):38-47.

[4] 胡春宏,陈绪坚,陈建国.黄河水沙空间分布及其变化过程研究[J].水利学报,2008,39(5):518-527.

[5] 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):1070-1078.

[6] Oliver J E. Monthly precipitation distribution: a comparative index[J]. The Professional Geographer,1980,32(3):300-309.

[7] 黄生志,杜梦,李沛,等.变化环境下降雨集中度的变异与驱动力探究[J].水科学进展,2019,30(4):496-506.

[8] 贾路,于坤霞,邓铭江,等.西北地区降雨集中度时空演变及其影响因素[J].农业工程学报,2021,37(16):80-89.

[9] 汤奇成,程天文,李秀云.中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J].地理学报,1982,37(4):383-393.

[10] 付金霞,张鹏,郑粉莉,等.河龙区间近 55 年降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J].农业机械学报,2016,47(2):185-192,207.

[11] 孙倩,于坤霞,李占斌,等.黄河中游多沙粗沙区水沙变化趋势及其主控因素的贡献率[J].地理学报,2018,73(5):945-956.

[12] 王逸男,孔祥兵,赵春敬,等.2000—2020 年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J].水土保持学报,2022,36(3):130-137.

[13] 刘强,尉飞鸿,常康飞,等.皇甫川流域水沙变化特征及

其影响因素[J].干旱区研究,2021,38(6):1506-1513.

[14] 姜泓旭,田鹏,穆兴民,等.不同时间尺度孤山川流域水沙关系变化及驱动因素[J].水土保持学报,2020,34(2):86-92,215.

[15] 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.

[16] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica; Journal of the Econometric Society, 1945,13(3):245-259.

[17] Bodruzzaman M, Hurst's rescaled-range (R/S) analysis and fractal dimension of electromyographic (EMG) signal[C]// Cadzow J, Shiavi R, IEEE Proceedings of the Southeastcon'91. IEEE, 1991.

[18] Xu G, Zhang J, Li P, et al. Vegetation restoration projects and their Influence on runoff and sediment in China[J]. Ecological Indicators, 2018, 95:233-241.

[19] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological, 1998,79(1):61-78.

[20] Zhao Y, Cao W, Hu C, et al. Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events[J]. Catena, 2019, 177: 31-40.

[21] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.

[22] 王随继,冉立山.无定河流域产沙量变化的淤地坝效应分析[J].地理研究,2008,27(4):811-818.

[23] 刘雅丽,王白春.黄土高原地区淤地坝建设战略思考[J].中国水土保持,2020(9):48-52.

[24] 郭巧玲,陈新华,孙斌.窟野河水沙变化及驱动力分析[J].水土保持学报,2015,29(1):17-20.

[25] 姚文艺,高亚军,安催花,等.百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析[J].水利水电科技进展,2015,35(5):112-120.

[26] 高亚军,徐十锋,吕文星,等.黄河粗泥沙集中来源区洪水泥沙阶段变化研究[J].中国水土保持,2020(9):80-83.

[27] 柳莎莎,王厚杰,张勇,等.气候变化和人类活动对黄河中游输沙量影响的甄别[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(4):41-50.