

1950—2020 年黄河上游干流水沙时空变化与周期特征

魏艳红, 贾晓鹏, 王远征, 曹婉颖

(中国科学院西北生态环境资源研究院干旱区生态安全与可持续发展重点实验室, 兰州 730000)

摘要: [目的] 为揭示黄河上游干流径流输沙演变规律与趋势。[方法] 采用 Mann-Kendall 检验、Pettitt 检验及 Morlet 小波变换等方法, 对 1950—2020 年黄河上游地区水沙变化趋势、突变和阶段性特点进行研究。[结果] 黄河上游干流各站点年输沙量较年径流量有较大的变异, 多年平均径流量和输沙量最大值均出现在下河沿站, 分别为 304.74 亿 m^3 、1.13 亿 t, 最小值在唐乃亥站, 分别为 203.67 亿 m^3 、0.12 亿 t; 年径流量主要集中在小川—石嘴山区间, 年输沙量主要在下河沿—头道拐区间; 各站点年径流量和年输沙量均呈下降趋势, 且在 1990—2020 年下降明显, 主要在 1968 年、1985 年和 1986 年出现水沙异常变化; 水沙小波分析存在 2~5 个较为明显的峰值, 表明水沙演化过程中存在多时间尺度特征; 水沙小波系数波动幅值呈持续递减规律, 径流量和输沙量周期性特征亦发生弱化趋势, 未来一段时间内, 径流量和输沙量将呈持续下降趋势, 且输沙量减小趋势更显著。[结论] 该研究结果揭示梯级水库群建设、流域综合治理措施及河道外取水量持续攀升等人类干预, 已成为黄河上游水沙过程演变的主导驱动因素。

关键词: 黄河上游; 径流量; 输沙量; 水沙变化; 周期变化

中图分类号: P343.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0342-08

Spatiotemporal Variations and Periodic Characteristics of Runoff and Sediment Discharge in the Upper Mainstream of the Yellow River from 1950 to 2020

WEI Yanhong, JIA Xiaopeng, WANG Yuanzheng, CAO Wanying

(Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: [Objective] To reveal the hydrological regimes and trends of runoff and sediment discharge in the mainstream of the upper reaches of the Yellow River. [Methods] Using the non-parametric Mann-Kendall test, Pettitt's test, and Morlet wavelet transform, this study analyzed the trends, abrupt changes, and periodic variations of runoff and sediment discharge in the upper mainstream of the Yellow River from 1950 to 2020. [Results] The annual sediment discharge varied significantly at different stations in the upper mainstream of the Yellow River compared to the annual runoff. The maximum annual average runoff and sediment discharge were observed at Xiaheyan Station, reaching $304.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $1.13 \times 10^8 \text{ t}$, respectively, while the minimum values were recorded at Tangnaihai Station, being $203.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $0.12 \times 10^8 \text{ t}$, respectively. The annual runoff was mainly concentrated in the Xiaochuan-Shizuishan section, while the annual sediment discharge was mainly distributed in the Xiaheyan-Toudaoguai section. Both annual runoff and sediment discharge at all stations showed a decreasing trend and had significantly decreased from 1990 to 2020. Notable abnormal changes in runoff and sediment discharge were observed in 1968, 1985 and 1986. There were 2-5 obvious peaks in runoff and sediment discharge as shown by wavelet analysis, indicating that there were multi-time scale characteristics in the evolution

收稿日期: 2025-01-02

修回日期: 2025-02-07

录用日期: 2025-04-14

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-21

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFF1306901); 国家自然科学基金项目 (U2443223, 42271018, 41807073); 甘肃省科技计划青年科技项目 (23JRRA666)

第一作者: 魏艳红 (1988—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事流域土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: weiyh@lzb.ac.cn

通信作者: 贾晓鹏 (1982—), 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事风沙水沙过程研究。E-mail: jiexp@lzb.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

process of runoff and sediment discharge. The fluctuation amplitude of wavelet coefficients of runoff and sediment discharge showed a continuous decreasing trend, and the periodic characteristics of both the runoff and sediment discharge also exhibit a weakening tendency. In the future, both runoff and sediment discharge are expected to continue decreasing, with the decreasing trend of sediment discharge being more significant. [Conclusion] The results highlight that human interventions, such as the construction of cascade reservoir groups, comprehensive watershed management measures, and the continuous increase in water withdrawal outside the river channel, have become the dominant driving factors for the variations of runoff and sediment discharge processes in the upper mainstream of the Yellow River. The findings of this research will offer valuable insights for guiding watershed water resources planning and efficient management in the upper reaches of the Yellow River.

Keywords: the upper reaches of the Yellow River; runoff; sediment discharge; variation of runoff and sediment discharge; periodical variation

Received: 2025-01-02

Revised: 2025-02-07

Accepted: 2025-04-14

Online(www.cnki.net): 2025-05-21

在全球河流水沙变化研究中,气候变化和人类活动都具有前沿性和挑战性的影响,成为研究的重点和难点^[1]。水资源短缺、水沙异源及空间分布不均的黄河流域大部分地区处于干旱、半干旱气候区。受气候变化、水土保持减沙及水库拦沙等人为活动的影响,黄河流域水沙输移特点发生明显变化,主要表现为水沙年际变异大、震荡周期显著^[2]。自20世纪80年代以来,黄河干流水沙量呈协同衰减态势,递减率已达显著性水平^[3],气候暖干化趋势也使流域水资源供需矛盾加剧^[4]。黄河潼关站多年平均径流量和输沙量由1919—1959年的426.1亿m³、16亿t锐减至2000—2020年的258.1亿m³、2.4亿t,降幅分别为39.4%和85.0%^[5]。可见,近年来黄河实测水沙量明显减少,但水沙关系仍不协调,黄河水沙治理与协调问题仍比较突出^[6]。

水利设施建设、退耕还林还草、梯田和淤地坝等措施的大规模实施,使黄河干流水沙发生显著改变。已有研究^[7-9]表明,黄河径流量和输沙量剧减的主要原因是广泛的人类活动,黄河上游的水沙变化问题已引起社会各界的普遍重视^[10];范俊健等^[11]指出,高强度人类干扰已成为流域水沙过程的首要驱动力,而大规模的流域综合治理措施与水利调控工程可有效地拦截泥沙,起到调节水沙关系的作用;许文龙等^[12]研究显示,唐乃亥至头道拐区间的水沙量呈空间特异性递减,溯源解析表明梯级水库群建设、灌区取水系统扩张及流域综合治理措施等人类干预构成主导驱动力。因此,为揭示黄河上游干流水沙演变规律和趋势,通过分析干流10个站点的实测水沙资料,对1950—2020年黄河上游水沙时空变化和周期特点进行深入探究,以期流域水沙协同调控提供过程机理支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河源头至内蒙古托克托县河口镇以上的区域,按黄河流域地理、地质、水文特征划分为黄河上游,流域面积42.8万km²,河道全长3472km(图1)。该区地处青藏高原、内蒙古高原和黄土高原交界地带,地势西高东低,气候类型复杂多样,跨青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古等省(自治区)^[13]。黄河上游水沙不同源,来水来沙分布不均。上游绝大部分水量来自占据上游总径流99%的兰州站以上,泥沙主要源自年输沙量达1.53亿t的兰州至青铜峡区间,占青铜峡站输沙量总量的53%,其中大部分泥沙来自祖厉河、清水河等支流^[14]。



图1 黄河上游区域位置及干流水文站点空间分布

Fig.1 Regional location and spatial distribution of hydrological stations in the upper mainstream of the Yellow River

1.2 数据获取

基于黄河上游10个干流水文观测站点(唐乃亥、贵德、循化、小川、下河沿、青铜峡、石嘴山、巴彦高勒、三湖河口和头道拐)的月径流量和月输沙量动态监测数据,解析黄河上游干流水沙通量1950—2020年的时

序演变特征。其中,水沙资料来自黄河上游干支流水文泥沙资料数据集(1950—2020年)。

1.3 研究方法

本研究采用集中趋势(平均值)、离散特征(变异系数)及极端波动(极值比)3类统计量表征水沙序列的统计特性。其中,变差系数(CV)通过标准差与均值的无量纲比值量化年内径流量和输沙量变化的不均匀程度。当 $CV < 0.1$ 时,表示轻度变异; $0.1 \leq CV \leq 1$ 时,表示中度变异; $CV > 1$ 时,表示强烈变异^[15]。极值比(K)是径流量、输沙量最大值与最小值之比, K 值越大,表示径流和输沙的年际变化越大,反之年际变化较小,年际间变化均匀。

基于多时间尺度水沙过程演变诊断,采用MANN^[16]和KENDALL^[17]推荐的Mann-Kendall非参数统计方法,当 $Z > 0$,表示递增趋势;当 $Z < 0$,表示递减趋势;当 $|Z| \geq 1.28(\alpha = 0.1)$ 、 $1.64(\alpha = 0.05)$ 、 $2.32(\alpha = 0.01)$ 时,拒绝随机性原假设 H_0 ,其中, H_0 为数据序列 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$,服从独立同分布。检验统计量(S)计算公式为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(x_i - x_j) \text{ 和 } \text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases} \quad (1)$$

式中:sgn为符号函数; S 为正态分布,其均值为0。方差计算公式为:

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

标准统计值(Z)计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

基于双侧概率密度分布的统计决策准则,当统计量 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 时,则拒绝原假设 H_0 ,表明时间序列数据存在显著性单调变化趋势。

应用非参数Pettitt检验法确定水沙突变点,前提是有序数据系列有趋势性的变化。通过Mann-Whitney双样本秩检验,构建统计量 $U_{t,n}$ 对同源总体分割序列 $x_1, x_2, \dots, x_t$ 和 $x_{t+1}, x_{t+2}, \dots, x_n$ 进行分布一致性检验。对于一个给定的时间序列 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$,检验统计量 $U_{t,n}$ 表述为:

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_t - x_j), t=2, \dots, n \quad (4)$$

式中:sgn函数与上述Mann-Kendall法提到的相同。Pettitt检验中原假设 H_0 为序列不存在突变点,若在 t 处满足:

$$K_n = \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}| \quad (5)$$

则 t 点处为突变点,显著性检验的相伴概率为:

$$P \cong 2 \exp \left\{ -6(k_n)^2 / (n^3 + n^2) \right\} \quad (6)$$

当检验统计量 $p \leq 0.5$ 时,可判定突变点具有统计显著性。

在Matlab软件中应用Morlet复小波时频分析方法,揭示黄河上游干流水沙序列的跨尺度周期分异规律^[18]。其中,径流和输沙演化过程中的主周期可根据小波方差图来确定,横坐标为时间尺度,纵坐标为小波方差。

2 结果与分析

2.1 水沙变化统计特征

黄河上游干流各站点多年平均径流量和输沙量变化统计特征见表1。最大值均出现在下河沿站,多年平均径流量和输沙量分别为304.74亿 m^3 、1.13亿 t ;最小值在唐乃亥站,分别为203.67亿 m^3 、0.12亿 t 。各站点年径流量CV为0.22~0.35,呈中度变异水平,在唐乃亥至下河沿站 $CV < 0.3$,除石嘴山外在青铜峡至头道拐站 > 0.3 ,表明径流量年际变异在逐渐增大;年输沙量CV在0.64~1.00波动,大于年径流量,呈中度变异,至青铜峡站达到最大值1.00,与强烈变异程度接近。各站点年径流量 K 为2.57~4.52,而在巴彦高勒至头道拐站 > 4 ,表明径流量年际变化幅度越来越大;年输沙量 K 明显大于年径流量,为14.86~182.80,输沙量年际变化波动较大且不稳定,在青铜峡站变异程度最高,与青铜峡水库的蓄水调沙有密切关系。黄河上游干流各站点水沙关系的一元线性回归分析显示,径流量和输沙量间呈正向关联性。

2.2 水沙时间变化特征

图2为黄河上游干流10个站点年径流量、年输沙量时间变化曲线。除唐乃亥站外,1950—2020年线性拟合趋势线的负斜率在各站点的年径流量和年输沙量上均有所显现,表明2项指标呈逐年递减趋势,其中,年径流量在巴彦高勒站递减最为明显,斜率为-1.466;年输沙量在下河沿站减少显著,斜率为-0.029。10个站点多年平均径流量大小排序为下河沿(304.74亿 m^3)>石嘴山(277.05亿 m^3)>小川(258.61亿 m^3)>青铜峡(241.14亿 m^3)>三湖河口(221.08亿 m^3)>循化(214.52亿 m^3)>巴彦高勒(212.87亿 m^3)>头道拐(210.67亿 m^3)>贵德(205.19亿 m^3)>唐乃亥(203.67亿 m^3);而多年平均

输沙量为下河沿(1.13 亿 t)>石嘴山(1.12 亿 t)>青铜峡(1.02 亿 t)>三湖河口(0.96 亿 t)>头道拐(0.93 亿 t)>巴彦高勒(0.88 亿 t)>循化(0.26 亿 t)>贵德(0.14 亿 t)>小川(0.14 亿 t)>唐乃亥(0.12 亿 t)。通过分析可知,黄河上游干流年径流量主要集中在小川—石嘴山区间,而年输沙量则集中在下河沿—头道拐区间,存在着水沙异源的特点。除唐乃亥站,

各站点年径流量最大、最小值同步性较好,贵德至小川站分别出现在 2020 年、2003 年,下河沿至头道拐站分别出现在 1967 年、1997 年;年输沙量最大、最小值出现年份无明显同步性,最大值集中在 20 世纪 90 年代前,最小值主要出现在 21 世纪后,输沙量的波动变化受到上游干流水库建设和流域水土保持措施等的共同影响。

表 1 黄河上游干流各站点多年平均径流量和输沙量变化统计特征

Table 1 Statistical characteristics of multi-year average runoff and sediment discharge in the upper mainstream of the Yellow River

站点	年份	径流量			输沙量			线性回归	
		多年平均/亿 m ³	CV	K	多年平均/亿 t	CV	K	回归方程	R ²
唐乃亥	1956—2020	203.67	0.26	3.10	0.12	0.64	14.86	$y=0.001x-0.11$	0.70
贵德	1950—2020	205.19	0.23	3.04	0.14	0.98	155.64	$y=0.002x-0.16$	0.29
循化	1952—2020	214.52	0.23	2.92	0.26	0.80	181.68	$y=0.002x-0.14$	0.21
小川	1969—2020	258.61	0.22	2.57	0.14	0.83	71.82	$y=0.000\ 07x+0.12$	0
下河沿	1950—2020	304.74	0.23	2.66	1.13	0.84	25.83	$y=0.005x-0.46$	0.18
青铜峡	1954—2020	241.14	0.32	3.94	1.02	1.00	182.80	$y=0.006x-0.41$	0.23
石嘴山	1950—2020	277.05	0.26	3.02	1.12	0.70	15.98	$y=0.005x-0.37$	0.29
巴彦高勒	1956—2020	212.87	0.35	4.52	0.88	0.84	46.64	$y=0.006x-0.39$	0.39
三湖河口	1953—2020	221.08	0.34	4.35	0.96	0.80	25.45	$y=0.007x-0.67$	0.59
头道拐	1956—2020	210.67	0.35	4.30	0.93	0.80	19.42	$y=0.008x-0.77$	0.76

注:CV 为变差系数;K 为极值比;x 为径流量;y 为输沙量。

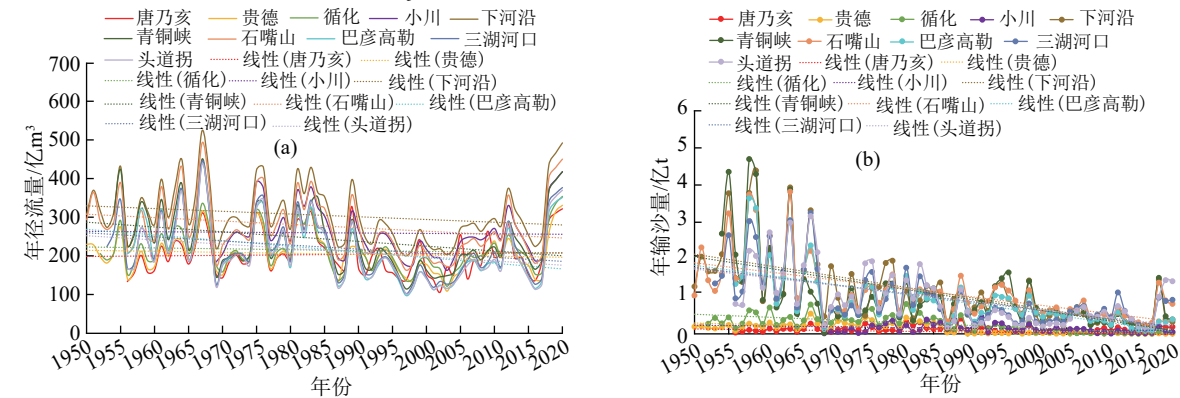


图 2 黄河上游干流各站点 1950—2020 年水沙时间变化

Fig. 2 Temporal variations of runoff and sediment discharge in the upper mainstream of the Yellow River from 1950 to 2020

2.3 水沙空间分布特征

图 3 为黄河上游干流各站点 1950—2020 年水沙沿程变化情况。自 20 世纪 70 年代以来,各站点径流量呈沿程波动的“M”形变化趋势,不同年代的径流量最大值均出现在下河沿站。1950—2020 年的多年平均径流量由唐乃亥站的 203.67 亿 m³ 增加到下河沿站的 304.74 亿 m³,在青铜峡站减小为 241.14 亿 m³,而石嘴山站又增加为 277.05 亿 m³,至头道拐站又减小为 210.67 亿 m³。各站点输沙量呈逐渐增加后略有减小趋势,在下河沿站增幅显著,下河沿—头道拐区间波动不大,增幅平稳。1950—2020 年的多年平均输沙量从唐乃亥站的 0.12 亿 t 增加到下河沿站的最大值 1.13 亿 t,之后略有减小,至头道拐站减小为

0.93 亿 t。总体而言,黄河上游流域自 20 世纪 90 年代以来,年代际平均径流量和输沙量均低于多年平均值,表明 1990—2020 年径流量和输沙量呈明显下降趋势。

2.4 水沙趋势和突变特征

表 2 为黄河上游干流年径流量和年输沙量变化趋势与突变情况。根据 Mann-Kendall 趋势检验,黄河上游干流各站点径流量和输沙量 Z 值均为负数,表明年径流量和年输沙量均呈减少趋势。从年径流量来看,唐乃亥、循化和小川站减少趋势不显著,贵德站通过 90% 的显著性水平(Z=−1.34),下河沿站在 0.05 的显著性水平下减少,青铜峡至头道拐站减少趋势显著,达到 99% 的显著性水平;从年输沙量来看,

除唐乃亥站减少趋势不显著外,小川站的显著性水平为 0.05,其余 8 个站点均呈显著减少趋势,显著性水平为 0.01。

基于 Pettitt 突变检验,黄河上游干流唐乃亥、贵德站无突变点,循化站、下河沿至巴彦高勒站突变点出现在 1985 年,小川站、三湖河口至头道拐站出现在

1986 年,显著性水平 >0.1 。年输沙量变化在唐乃亥和青铜峡站无突变,在 95% 的显著性水平下贵德和循化站突变点出现在 1986 年,下河沿、石嘴山至巴彦高勒站出现在 1968 年,显著性水平 ≥ 0.1 ,三湖河口至头道拐站突变点出现在 1985 年,显著性水平均为 0.05。

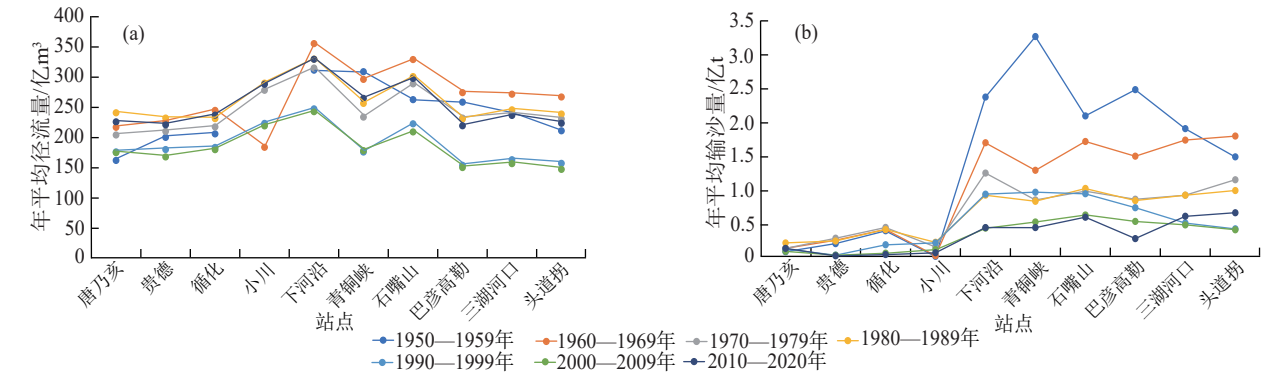


图 3 黄河上游干流各站点 1950—2020 年水沙沿程变化

Fig. 3 Spatial distributions of runoff and sediment discharge in the upper mainstream of the Yellow River from 1950 to 2020

表 2 黄河上游干流各站点年径流量和年输沙量变化趋势与突变

Table 2 Trends and abrupt changes of annual runoff and sediment discharge in the upper mainstream of the Yellow River

水文站点	年径流量				年输沙量			
	Z 值	显著性水平/%	突变年份/%	显著性水平/%	Z 值	显著性水平/%	突变年份	显著性水平/%
唐乃亥	-0.01	不显著	无突变	不显著	-0.19	不显著	无突变	不显著
贵德	-1.34	95	无突变	不显著	-6.06	99	1986	95
循化	-0.98	不显著	1985	90	-6.72	99	1986	95
小川	-0.62	不显著	1986	90	-2.05	95	2007	95
下河沿	-2.15	95	1985	90	-6.31	99	1968	90
青铜峡	-2.61	99	1985	95	-5.01	99	无突变	不显著
石嘴山	-2.47	99	1985	90	-5.65	99	1968	95
巴彦高勒	-3.22	99	1985	95	-6.30	99	1968	95
三湖河口	-2.48	99	1986	95	-4.73	99	1985	95
头道拐	-5.54	99	1986	95	-4.69	99	1985	95

2.5 水沙周期变化特征

由图 4 可知,黄河上游干流 10 个站点的径流量和输沙量变化存在 2~5 个较为明显的峰值,表明水沙演化过程中存在多时间尺度特征。从唐乃亥至头道拐站径流小波方差对应的最大峰值依次为 12、22、

22、27、22、15、22、15、22、24 a 的时间尺度,输沙小波方差对应的最大峰值分别为 5、12、11、22、6、8、5、7、12、11 a 的时间尺度。径流和输沙小波方差的最大峰值表明在该时间尺度下的周期振荡最强,是年径流量和年输沙量变化的第 1 主周期。

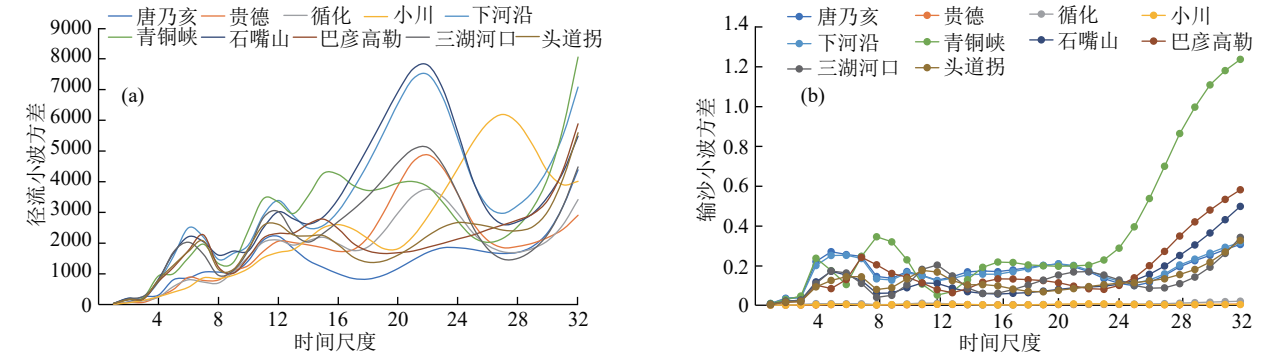
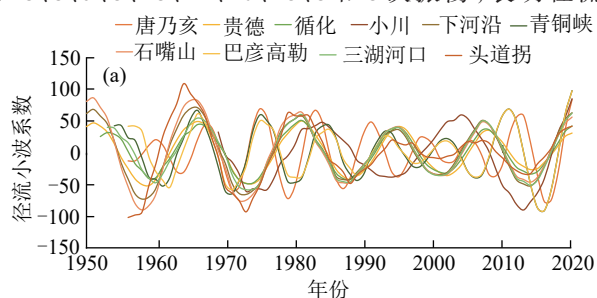


图 4 黄河上游干流各站点 1950—2020 年水沙小波方差分析

Fig. 4 Wavelet variance of runoff and sediment discharge in the upper mainstream of the Yellow River from 1950 to 2020

根据径流和输沙小波方差检验的结果,绘制黄河上游干流各站点1950—2020年水沙第1主周期趋势(图5)。在第1主周期时间尺度上,从唐乃亥至头道拐站年径流量变化出现准8、5、5、3、5、7、5、7、5和4次丰—枯或枯—丰交替的振荡,年输沙量变化出现准18、8、9、3、18、12、20、13、8和8次振荡,表明径流



量和输沙量变化存在丰—枯水期和多—少沙期周期变化。总体来看,在径流量和输沙量整体减少趋势下,水沙小波系数波动幅值呈持续递减规律,径流量和输沙量周期性特征亦发生弱化趋势,未来一段时间内,黄河上游干流径流量和输沙量将维持持续性递减态势且输沙量减小趋势更显著。

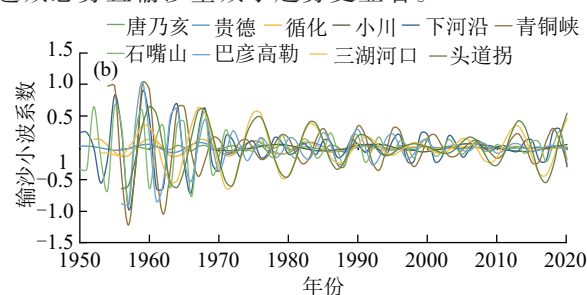


图5 黄河上游干流各站点1950—2020年水沙第1主周期趋势

Fig. 5 Trend of the first main cycle of runoff and sediment discharge in the upper mainstream of the Yellow River from 1950 to 2020

3 讨论

黄河上游干流水沙特征受气候变化和人类活动等因素的影响而明显改变^[19]。上游各站点不同年代的径流量逐渐减小,与上游急剧增加的人类活动耗水量与农灌区灌溉面积的逐渐扩大密切相关。20世纪后期,黄河上游实测输沙量剧减的主要原因是水库拦沙^[20]。其中,建成于1968年的刘家峡水库,占黄河流域面积的1/4,该水库运行后径流量变化较小,但输沙量显著降低,小川站输沙量降幅高达80.5%。在1986年龙羊峡水库投入运行之后,各水文站径流量减少幅度达到20%~40%,下河沿和头道拐站输沙量呈显著减少趋势^[21]。梯级水库群建设、流域综合治理措施及河道外取水量持续攀升等人类干预对黄河上游水沙变异起到重要作用^[22]。本研究中,干流各站点的水沙突变时间主要出现在1968年、1985年和1986年,与上游梯级水库的相继建成运营存在显著关联。截至2003年,刘家峡水库累计淤积量达16亿t;龙羊峡水库自投运以来总淤积量约3.5亿t,表明龙刘水库协同调度对黄河上游水沙关系产生显著的调节效应^[23]。水库运行后,高流量事件的减少加剧河道淤积,致使宁蒙河道的来水来沙条件发生变化,对河道冲淤演变带来较大影响。

自2000年后,流域水土保持措施的大规模实施显著改变地表侵蚀动力过程,定量分析表明,黄河上游宁夏段输沙模数与治理规模呈对数函数响应特征,水土流失生态治理措施对黄河泥沙削减起到关键作用^[24]。在水土流失生态工程治理措施中,梯田和淤地坝等具有明显的拦沙作用,对减少黄河泥沙具有显著效果。截至2012年底,黄河上游主要支流

祖厉河、清水河和湟水等,现状梯田比分别为25.5%、6.2%和6.1%,在兰州—青铜峡区间梯田减沙量达到0.54亿t^[25]。基于全国第一次水利普查数据,截至2011年底,黄河上游水土保持工程体系共有骨干坝及中小型淤地坝分别为476、1 098座,其年平均泥沙拦蓄量达1 346万t^[26]。大规模的水土保持工程措施通过显著改变流域地表径流形成机制与输沙过程,同步重塑下垫面结构特征,双重效应体现为流域生态系统的正向演替与侵蚀模数的持续下降,从而导致黄河上游干流水沙量逐渐减少^[27]。自2001—2020年以来,黄河流域上游的植被覆盖度在逐渐增加,2010年之后,主要以人类活动对植被覆盖度的促进作用为主,加之该区域的植被具有很好的水土保持能力,可有效防止水土流失和沙漠化的发生^[28]。

4 结论

1) 1950—2020年,黄河上游干流10个站点的水沙关系呈明显的正相关特征,各站点年输沙量变异程度高于年径流量,表明输沙量年际变化波动较大且不稳定。黄河上游干流年径流量主要集中在小川—石嘴山区间,而年输沙量则集中在下河沿—头道拐区间,存在着水沙异源的特点。20世纪90年代以来,年代际平均径流量和平均输沙量呈持续递减态势,表明1990—2020年,黄河上游干流径流量和输沙量均出现较为显著的下降趋势。

2) 根据Mann-Kendall趋势检验,径流量和输沙量Z值均为负数,表明黄河上游干流各站点年径流量和年输沙量均呈下降趋势。基于Pettitt突变检验,黄河上游干流各站点水沙的突变年份多出现在

1968年、1985年和1986年。通过水沙小波分析可知,在径流量和输沙量整体减少趋势下,水沙小波系数波动幅值呈持续递减规律,径流量和输沙量周期性特征亦发生弱化趋势,未来一段时间内,黄河上游干流径流量和输沙量将维持持续性递减态势且输沙量减小趋势更显著。

3) 通过改变地表产汇流、泥沙输移过程和下垫面特征,有效改善流域生态环境,显著减少水土流失,导致黄河上游干流水沙量逐渐减少,梯级水库群建设、流域综合治理措施及河道外取水量持续攀升等人类干预对黄河上游水沙变异起到重要作用。

参考文献:

- [1] 燕慧婷,王飞,何毅,等.人类活动对黄河河源区水沙变化影响评价[J].泥沙研究,2015,40(2):40-46.
YAN H T, WANG F, HE Y, et al. Impact assessment of human activities on runoff and sediment between paired years with similar weather condition in the source of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2015,40(2):40-46.
- [2] 楚纯洁,李亚丽.近60年黄河干流水沙变化及其驱动因素[J].水土保持学报,2013,27(5):41-47.
CHU C J, LI Y L. Variation of runoff and sediment and their driving factors of the Yellow River mainstream in the past 60 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(5):41-47.
- [3] 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.
ZHAO Y, HU C H, ZHANG X M, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(21):112-119.
- [4] 杨大文,杨雨亭,高光耀,等.黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应[J].中国科学基金,2021,35(4):544-551.
YANG D W, YANG Y T, GAO G Y, et al. Water cycle and soil-water coupling processes in the Yellow River Basin [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021,35(4):544-551.
- [5] 胡春宏,张双虎,张晓明.新形势下黄河水沙调控策略研究[J].中国工程科学,2022,24(1):122-130.
HU C H, ZHANG S H, ZHANG X M. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation[J]. Strategic Study of Cae, 2022,24(1):122-130.
- [6] 张金良,李达.黄河流域泥沙系统治理科学研究与工程实践[J].中国水利,2024(5):11-16.
ZHANG J L, LI D. Scientific research and engineering practice in the systematic governance of sediment in the Yellow River basin[J]. China Water Resources, 2024(5):11-16.
- [7] ZHAO G J, LI E H, MU X M, et al. Changing trends and regime shift of streamflow in the Yellow River basin [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015,29(5):1331-1343.
- [8] WEI Y H, JIAO J Y, ZHAO G J, et al. Spatial-temporal variation and periodic change in streamflow and suspended sediment discharge along the mainstream of the Yellow River during 1950—2013[J]. Catena, 2016,140:105-115.
- [9] WANG S, FU B J, PIAO S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016,9(1):38-41.
- [10] 侯素珍,王平,楚卫斌.黄河上游水沙变化及成因分析[J].泥沙研究,2012,37(4):46-52.
HOU S Z, WANG P, CHU W B. Analysis of water and sediment changes in upper Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2012,37(4):46-52.
- [11] 范俊健,赵广举,穆兴民,等.1956—2017年黄河上游水沙变化及其驱动因素[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(3):1-9.
FAN J J, ZHAO G J, MU X M, et al. Variation of runoff and sediment load and their driving factors on the upper stream of the Yellow River from 1956 to 2017[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(3):1-9.
- [12] 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.
XU W L, ZHAO G J, MU X M, et al. Variations and correlations of runoffs and sediment loads in the main stream of the upper reaches of the Yellow River over the past 60 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(6):38-47.
- [13] 张金萍,肖宏林.黄河流域灌区农业用水研究发展历程与展望[J].灌溉排水学报,2020,39(10):9-17.
ZHANG J P, XIAO H L. Past, current and future prospect for research on agricultural water use in irrigation districts in the Yellow River basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020,39(10):9-17.
- [14] 张世军,俞卫平,张红平.黄河上游径流泥沙特性及变化趋势分析[J].水资源与水工程学报,2005,16(3):57-61.
ZHANG S J, YU W P, ZHANG H P. Sediment characteristic and the variety trend analysis for upstream Yellow River [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005,16(3):57-61.
- [15] MIAO C Y, NI J R. Variation of natural streamflow since 1470 in the middle Yellow River, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2009,6(11):2849-2864.
- [16] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [17] KENDALL M G. Rank correlation measures [M]. Charles Griffin, London UK, 1975:e202.

- [18] 魏艳红,焦菊英.皇甫川流域1955—2013年水沙变化趋势与周期特征[J].水土保持研究,2017,24(3):1-6.
WEI Y H, JIAO J Y. Variation tendency and periodic characteristics of streamflow and sediment discharge in Huangfuchuan watershed from 1955 to 2013[J].Research of Soil and Water Conservation,2017,24(3):1-6.
- [19] 张曦泽,杨丽虎,宋献方.黄河上游近60年水沙变化特征及其影响因素[J].湖泊科学,2024,36(2):602-621.
ZHANG X Z, YANG L H, SONG X F. Runoff and sediment load changes in the upper Yellow River and their influencing factors in recent 60 years[J].Journal of Lake Sciences,2024,36(2):602-621.
- [20] 刘晓燕,高云飞,党素珍.黄河上游黄土高原入黄沙量变化分析[J].人民黄河,2023,45(12):1-7.
LIU X Y, GAO Y F, DANG S Z. Analysis of changes in sediment inflow of the Loess Plateau into the Yellow River in the upper reaches of the Yellow River [J]. Yellow River,2023,45(12):1-7.
- [21] 彭少明,尚文绣,王煜,等.黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J].水利学报,2018,49(10):1187-1198.
PENG S M, SHANG W X, WANG Y, et al. Research on ecological impacts of the joint operation of cascade reservoirs in the upstream of the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10): 1187-1198.
- [22] 王鸿翔,杨克非,刘静航,等.黄河上游近60年水沙演变及影响因素分析[J].中国农村水利水电,2022(3):86-93.
WANG H X, YANG K F, LIU J H, et al. Evolution and influencing factors analysis of water and sediment evolution in the upper Yellow River in recent 60 years[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(3):86-93.
- [23] 姚文艺,侯素珍,丁赞.龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J].水科学进展,2017,28(1):1-13.
YAO W Y, HOU S Z, DING Y. Effects on flow and sediment in the upper Yellow River by operation of Longyangxia Reservoir and Liujiaxia Reservoir [J]. Advances in Water Science,2017,28(1):1-13.
- [24] 赵阳,辛艳,王友胜,等.黄河上游宁夏段水土保持与水沙变化研究[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(5):1075-1083.
ZHAO Y, XIN Y, WANG Y S, et al. Study on water and sediment change and soil and water conservation effect in Ningxia section of the upper reaches of the Yellow River[J].Journal of Basic Science and Engineering,2023,31(5):1075-1083.
- [25] 马红斌,李晶晶,何兴照,等.黄土高原水平梯田现状及减沙作用分析[J].人民黄河,2015,37(2):89-93.
MA H B, LI J J, HE X Z, et al. The status and sediment reduction effects of level terrace in the Loess Plateau [J].Yellow River,2015,37(2):89-93.
- [26] 李景宗,刘立斌.近期黄河潼关以上地区淤地坝拦沙量初步分析[J].人民黄河,2018,40(1):1-6.
LI J Z, LIU L B. Analysis on the sediment retaining amount by warping dams above Tongguan section of the Yellow River in recent years [J]. Yellow River, 2018, 40(1):1-6.
- [27] 高云飞,刘晓燕,韩向楠.黄土高原梯田运用对流域产沙的影响规律及阈值[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):535-545.
GAO Y F, LIU X Y, HAN X N. Impact of the terraces on sediment yield and its thresholds on the Loess Plateau [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3):535-545.
- [28] 张宏伟,别强,石莹,等.黄河流域上游植被覆盖变化特征及其影响因素[J].干旱区研究,2024,41(8):1385-1394.
ZHANG H W, BIE Q, SHI Y, et al. Characteristics of vegetation cover changes in the upper reaches of the Yellow River basin and the influencing factors [J]. Arid Zone Research,2024,41(8):1385-1394.