

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.004

黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析

黄建雄^{1,2,3,4}, 冶运涛^{1,4}, 曹引⁴, 顾晶晶⁴, 关昊哲⁴, 蒋云钟^{1,4}

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 4. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 为了解黄河北干流河段径流和输沙的时空变化规律及趋势, 基于2002—2021年黄河北干流水沙数据, 采用 Mann-Kendall 检验、突变点检验、小波分析、水沙关系协调性分析等方法, 对黄河北干流河段的头道拐、龙门、潼关3个水文站2002—2021年的水沙时空变化特征进行了分析。结果表明: 黄河北干流河段的输沙年内不均匀程度和集中度均大于径流, 并且年内特征变化更加显著; 各站径流集中期主要出现在9月, 而输沙集中期主要在8月和9月; 流域内水沙变化的显著突变年份多发生在2005年和2017年, 可能与近年大型水利工程的调控影响相关; 3个水文站水沙序列主要时间尺度对应的周期分别为13、10、9 a; 黄河北干流的水沙不协调性在2008年之前主要表现为水少沙多, 而在2008年之后则表现为水多沙少, 其中头道拐的来沙系数始终小于0.009, 一直处于水多沙少的状态。总体上, 研究期内黄河北干流河段径流量在不断上升, 而输沙量明显减少, 且随着时间的推移水多沙少的趋势愈发显著。

关键词: 黄河北干流; 水沙变化; 小波分析法; Mann-Kendall 检验法; 不协调度

中图分类号: TV121.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0025-09

Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River

HUANG Jianxiong^{1,2,3,4}, YE Yuntao^{1,4}, CAO Yin⁴, GU Jingjing⁴, GUAN Haozhe⁴, JIANG Yunzhong^{1,4}

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

4. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to investigate the temporal and spatial variations patterns and trends of runoff and sediment in the northern main reach of Yellow River, by adopting various methods including Mann-Kendall test, abrupt change analysis, wavelet analysis, and coordination analysis of water-sediment relationship, this study analyzed the variations of water and sediment for the hydrological stations of Toudaoguai, Longmen and Tongguan, based on the water and sediment data along the northern reach of Yellow River from 2002 to 2021. The findings revealed that the unevenness and concentration of sediment were greater than those of runoff, and the intra-annual characteristic variations exhibited more significant. Concentrated period for runoff was primarily in September, while sediment was mainly concentrated in August and September. Significant abrupt changes in water-sediment characteristics occurred in 2005 and 2017, which may be related to the regulatory impact of large-scale water conservancy projects in recent years. The dominant periodicities for water-sediment sequences were found to be 13 years, 10 years, and 9 years for Toudaoguai, Longmen, and Tongguan stations, respectively. Before 2008, the water-sediment relationship indicated sediment dominance over water, while after 2008, the trend shifted to water dominance. Particularly, sediment yield coefficient at Toudaoguai remained consistently below 0.009, indicating the persistent water dominance. Overall, the trend showed a continuous increase in runoff while sediment witnessed a noticeable

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279031); 国家重点研发计划项目(2023YFC3209302-03); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52309040); 北京市自然科学基金项目(JQ21029)

作者简介: 黄建雄(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水资源遥感研究。E-mail: hix000801@163.com

通信作者: 冶运涛(1982—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水资源与水信息研究。E-mail: yeyuntao@iwhr.com

引用本文: 黄建雄, 冶运涛, 曹引, 等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 25-33.

HUANG Jianxiong, YE Yuntao, CAO Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3): 25-33.

decrease, showing an increasingly significant trend towards runoff dominance over sediment.

Key words: north main reach of Yellow River; variation of water and sediment; wavelet analysis method; Mann-Kendall test method; degree of incoordination

黄河中游流经的黄土高原水土流失异常严重^[1],中游大量泥沙下泄,使得下游泥沙淤积、水流平缓,成为世界上著名的悬河,严重威胁到黄河下游河堤、生态环境及人民生命财产安全^[2-3]。流经黄土高原的中游河段是很多黄河问题的诱因,因此,治理黄河应先解决中游河段的水沙问题。

水沙关系是河流中最基本、最关键的要素,开展长时序水沙监测数据的年内及年际水沙关系变化研究,有利于掌控该流域的水沙特征,还能从水文情势变化等方面反映人类活动对河流变化规律的影响,促进流域的治理和生态修复^[4-6]。目前,已有不少学者围绕黄河流域的水沙关系特征进行了研究。范俊健等^[7]采用 Mann-Kendall 检验法分析了 1956—2017 年黄河上游的水沙变化,发现突变年份为 1968 年和 1986 年,验证了上游大型水利工程调控具有显著作用。Yue 等^[8]采用简单线性回归和 Mann-Kendall 检验研究了 1962—2009 年黄河河口至龙门的泥沙时空变化,在置信度 0.01 的条件下,主流和支流的泥沙负荷呈显著下降趋势。郭彦等^[9]采用小波分析方法分析了黄河上游唐乃亥站 1957—2009 年的径流和输沙序列,得出水沙序列主周期随序列长度变化的特征,揭示了多尺度振荡特点和周期规律。郑佳芸等^[10]采用 Mann-Kendall 检验和小波分析方法,分析了黄河宁夏河段水沙变化趋势和突变特性,得出宁夏河段水沙变化具有相关性和水沙异源的特性。张青青等^[11]基于模糊互判矩阵的层次分析法分析了黄河中游水沙变化的影响因子及贡献率,得出人类活动是造成径流和泥沙减少的主要因素。上述学者的研究都聚焦在黄河流域水沙关系问题上,虽然为了解黄河流域的水沙关系提供了有益信息,但涉及黄河北干流区域的研究较少。近年来,由于黄河北干流发生洪水而造成部分地区的洪涝灾害,或降雨不足、干旱等情况而导致水位下降和水资源紧张等问题时有发生^[12-14],分析黄河北干流水沙变化情况及其特征,对揭示和把握该河段水沙变化规律十分必要。

本文选取黄河北干流代表性水文站头道拐、龙门和潼关 2002—2021 年的连续月经流量、输沙量实测数据,从统计分析的角度分析径流和输沙的年内与年际变化特征及水沙关系的协调性,以期为黄河北干流河段的水资源规划、治理及调度提供参考。

1 研究区概况

黄河北干流河段位于黄河中游,可分为两段,从内蒙古托克托到龙门为“大北干流”,该河段水力资源丰富;龙门至潼关为“小北干流”,该河段河床宽水深浅,水流较为复杂,是典型的堆积游荡型河道。头道拐站是黄河中上游水沙变化的主要转折点和控制站,是内蒙古和山西省界断面站和黄河凌汛监测的重要站点;龙门站是黄河干流控制站,黄河中游洪峰编号站,也是国家重要水文站和黄河重点报讯站;潼关站作为黄河北干流的末端,也是黄河干流在地理空间位置上由朝南流向转为朝东流向的重要转折点。研究区域水土流失异常严重,大量流失的泥沙可能造成黄河下游河道的淤积,导致洪水风险增加^[15]。

除月经流量、输沙量实测数据外,本文其他数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)。

2 研究方法

黄河水沙关系的影响因素较多,既有像季节性的冰雪融化、降雨、气象事件等周期性因素,又有人类活动、土壤侵蚀、生态变化、地质变化等非周期性因素,导致其径流、输沙等数据呈现非线性、低相关性,形成了较为复杂的作用机制^[16]。针对黄河在不同时间尺度下径流和输沙的变化特点,本文从年内变化与年际变化特征两个方面对黄河北干流水沙关系开展研究。

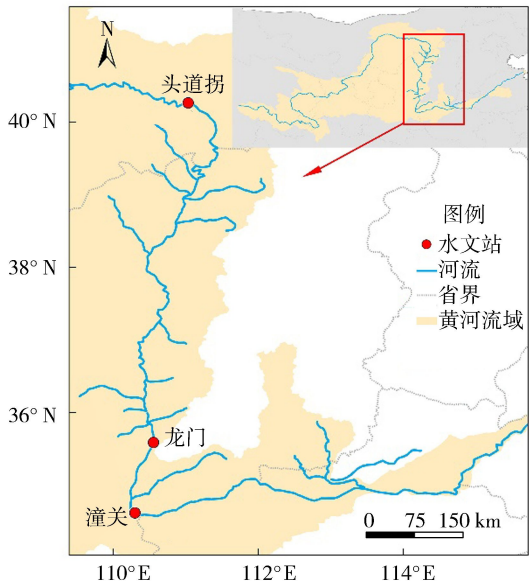


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

2.1 水沙关系年内变化特征识别

对于黄河径流和输沙的年内变化特征,主要从不均匀性、集中程度与变化幅度三个方面衡量^[17]。其中不均匀性通过不均匀系数 C_v 和完全调节系数 C_r 来判断;集中程度通过集中期 C_D 和集中度 C_u 来判断,集中期反映了年径流量或输沙量最大值出现时间,集中度反映了集中期的径流量或输沙量在全年总量中的占比;变化幅度通过极值比 C (相对变化幅度)和极差 ΔC (绝对变化幅度)来判断^[18]。不均匀性、集中程度与变化幅度具体相关计算公式见文献[19]。

对黄河北干流 3 个水文站 2002—2021 年连续 20 年水沙数据进行处理时,考虑此期间水沙关系受到人类活动及自然环境因素影响,将统计时段划分为 4 个阶段,每段跨度为 5 年,各阶段最终数据先由基础月数据计算得到年内月指标,然后通过对 5 年的年内月指标取均值得到阶段数据年内月指标。其中,2002—2006 年是黄河流域较为稳定的时期,径流和输沙比较平稳;2007—2011 年是黄河径流和输沙减少的时期,这个时期流域内降水量减少和水土保持措施不足;2012—2016 年是黄河流域径流和输沙回升的时期,这个时期流域内降水量增加和水土保持措施加强;因流域内气候变化和水土保持措施的实施效果有限,2017—2021 年黄河径流和输沙波动较大。

2.2 水沙关系年际变化特征识别

对于黄河径流和输沙的年际变化特征,采用 Mann-Kendall 检验、线性回归趋势分析和小波分析等方法进行分析。

Mann-Kendall 检验法能够避免人为因素的干扰,通过计算 UF 与 UB 统计量判断其突变点及变化趋势^[20]。Mann-Kendall 趋势检验中根据显著性水平的双侧检验要求^[21],取 $\alpha=0.05$ 为显著水平,其对应临界值为 ± 1.96 。

线性趋势拟合分析可以直观地反映径流量和输沙量在时序上的趋势情况,并验证 Mann-Kendall 检验中的突变点,通过观察对应序列在突变点前后是否出现明显的差异或转折来判断突变年份。

小波分析可以反映多时间尺度和波动性序列中随时间变化的尺度周期^[22]。本文选用 Morlet 连续复小波函数,利用水沙数据的距平值进行小波分析,所生成的小波系数图振幅较小,能更好反映序列的波动性和周期性。小波变换过程中,时间序列两端可能会产生“边界效应”^[23],需要先对两端数据进行对称延伸及变换后删除来消除或减小边界效应。对水沙数据进行 Morlet 小波变换后计算出小波方差,对应的小波方差图能看出频域和时域上的能量分布,进而分析对应序列时间尺度下的周期波动和能量大小,并根据小波方差图峰值点判断其主要周期^[24]。

2.3 水沙关系协调性分析法

水沙关系的协调性是对径流和输沙两方面的综合分析,能更准确把握黄河水沙关系。张金良等^{[[25]}提出的水沙关系协调性概念中,认为黄河协调的水沙关系是指长时段内维持下游主河道不淤或微淤的水沙搭配过程。水沙关系协调性通过计算不协调度来判断,水沙关系的不协调度可以根据来沙系数 X (含沙量与流量的比值)进行划分,包括水少沙多 ($X \geq 0.011$)、水沙协调 ($0.009 \leq X < 0.011$) 及水多沙少 ($X < 0.009$) 3 种状态^[26]。不协调度计算公式如下:

$$D = \begin{cases} \frac{X - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} & X \geq x_{\max} \\ 0 & x_{\min} < X < x_{\max} \\ \frac{X - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & X \leq x_{\min} \end{cases} \tag{1}$$

式中: D 为不协调度; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为水沙协调指数的上限和下限^[27]。来沙系数越小,单位流量含沙量越小,可能增大水流对底部河床的冲刷作用,不协调度为负值;反之,来沙系数越大,则单位流量含沙量越大,可能因过饱和而导致河道河床发生淤积,不协调度为正值。

3 结果与分析

3.1 水沙年内分配

表 1 和表 2 为黄河北干流 3 个水文站不同统计时段径流和输沙年内分配指标值。

表1 径流年内分配指标值

Table 1 Annual allocation value of runoff at each station

水文站	统计时段	不均匀系数	完全调节系数	集中度/%	集中期		极值比	极差/亿 m ³
					总向量方向/(°)	最大径流量月份		
头道拐	2002—2006 年	0.39	0.64	0.03	338.56	3	2.94	13.71
	2007—2011 年	0.39	0.49	0.06	3.22	9	2.90	16.68
	2012—2016 年	0.42	0.49	0.16	51.07	9	3.82	22.71
	2017—2021 年	0.47	0.53	0.27	48.32	9	3.98	32.70
龙 门	2002—2006 年	0.32	0.55	0.06	45.73	9	2.83	14.23
	2007—2011 年	0.36	0.47	0.06	9.20	9	3.08	18.66
	2012—2016 年	0.42	0.59	0.18	43.26	9	4.18	23.63
	2017—2021 年	0.42	0.51	0.25	43.79	9	3.23	29.85
潼 关	2002—2006 年	0.40	0.49	0.16	67.80	9	3.49	23.03
	2007—2011 年	0.42	0.57	0.15	52.81	9	3.81	30.17
	2012—2016 年	0.42	0.58	0.20	41.26	9	3.30	27.95
	2017—2021 年	0.52	0.56	0.31	51.01	9	3.91	45.54

表2 输沙年内分配指标值

Table 2 Annual allocation value of sediment at each station

水文站	统计时段	不均匀系数	完全调节系数	集中度/%	集中期		极值比	极差/万 t
					总向量方向/(°)	最大输沙量月份		
头道拐	2002—2006 年	0.81	0.65	0.25	23.39	9	25.83	795.35
	2007—2011 年	0.87	0.78	0.25	6.39	9	42.27	1 172.65
	2012—2016 年	0.89	0.76	0.44	30.07	9	25.69	994.52
	2017—2021 年	0.83	0.68	0.52	29.11	9	47.86	1 634.52
龙 门	2002—2006 年	1.38	0.84	0.70	16.07	8	42.51	6 700.60
	2007—2011 年	1.03	0.77	0.40	23.86	9	23.76	1 825.11
	2012—2016 年	1.75	0.89	0.80	20.08	7	618.25	4 883.69
	2017—2021 年	1.65	0.84	0.81	39.03	8	108.66	7 329.44
潼 关	2002—2006 年	1.05	0.75	0.56	35.46	8	25.71	11 331.44
	2007—2011 年	1.07	0.74	0.49	36.66	8	19.97	4 546.74
	2012—2016 年	1.32	0.75	0.64	17.79	7	23.68	5 375.80
	2017—2021 年	1.21	0.85	0.69	47.39	9	25.02	5 049.80

由表1可知,3水文站的径流年内不均匀系数变化规律相似,表现为4个时段不均匀系数是逐渐增大的,表明各时段径流年内分配的不均匀性在逐渐上升。整体上看,3个水文站的径流不均匀系数均增大,而完全调节系数在头道拐和龙门是先减小后增大,在潼关则不断增大,即北干流径流年内不均匀性先增大后减小,说明流域径流的平衡性在2002—2011年处于下降趋势,2012—2021年不断上升。

在径流年内分配的集中程度上,各站径流集中度在2017—2021年最大,2002—2006年最小,径流集中期多在9月,与最大月径流出现月份基本一致,但头道拐2002—2006年最大月径流出现在3月。径流年内分配的变化幅度上,各站径流量年内分配极值比和极差呈递增规律,即2002—2021年各站的径流年内分配的变化幅度逐渐增大。

由表2可看出,3个水文站输沙不均匀系数在头道拐和潼关呈先增大后减小的反“U”形趋势,在龙门呈先下降后上升的波浪形趋势,而完全调节系数在头道拐和潼关是先减小后增大,在龙门则与不均匀系数变化趋势相同。北干流输沙年内分配不均匀性变化趋势为先减小后增大,说明流域输沙的平衡性先增强后减弱。

在输沙年内分配的集中程度上,各站输沙集中度在2017—2021年最大,2007—2011年最小,输沙集中期多在8月和9月,只有龙门和潼关在2012—2016年的输沙集中期在7月,各站输沙集中期与最大月径流出现月份基本一致。输沙年内分配变化上,各站输沙量年内分配极值比和极差变化呈振荡趋势,即头道拐输沙年内变化幅度呈先增大后减小然后再增大的正“N”形趋势,龙门呈先减小后增大然后再减小的反“N”形趋势,潼关为先减小后增大的抛物线形趋势。

3.2 水沙年际分配

3.2.1 Mann-Kendall 趋势检验与分析

黄河北干流水沙序列 Mann-Kendall 趋势检验结果如表 3 所示,其中头道拐和龙门输沙序列的 Z 值绝对值小于 1.96,即其输沙序列趋势并不显著,其余径流和输沙序列的 Z 值绝对值大于 1.96,均通过显著水平为 0.05 的显著性检验;各站输沙序列检验统计量 Z 值中,龙门和潼关输沙序列的 Z 值小于零,呈下降趋势,其余径流和输沙序列 Z 值均大于零,呈上升趋势。

3.2.2 径流和输沙序列突变性分析

图 2 为黄河北干流 3 个水文站 2002—2021 年径流量和输沙量的 Mann-Kendall 突变检验结果。头道拐和龙门径流的 UF 和 UB 曲线于 2005 年、2015 年、2017 年在 95% 临界线内相交,通过 0.05 显著性检验,因此 2005 年、2015 年、2017 年为头道拐和龙门的径流突变年份。同理头道拐输沙突变年份为 2003 年、2005 年、2014 年和 2017 年,龙门输沙突变年份为 2003 年和 2019 年,潼关输沙突变年份为 2005 年,潼关径流突变年份为 2010 年、2014 年、2017 年。

表 3 Mann-Kendall 趋势检验

Table 3 Mann-Kendall trend test

水文站	序列	Z 值	趋势性	
			变化	程度
头道拐	径流	2.63	上升	显著
	输沙	1.14	上升	不显著
龙 门	径流	2.04	上升	显著
	输沙	-1.07	下降	不显著
潼 关	径流	2.17	上升	显著
	输沙	-2.24	下降	显著

— UF统计量 — UB统计量 --- 0.05显著水平

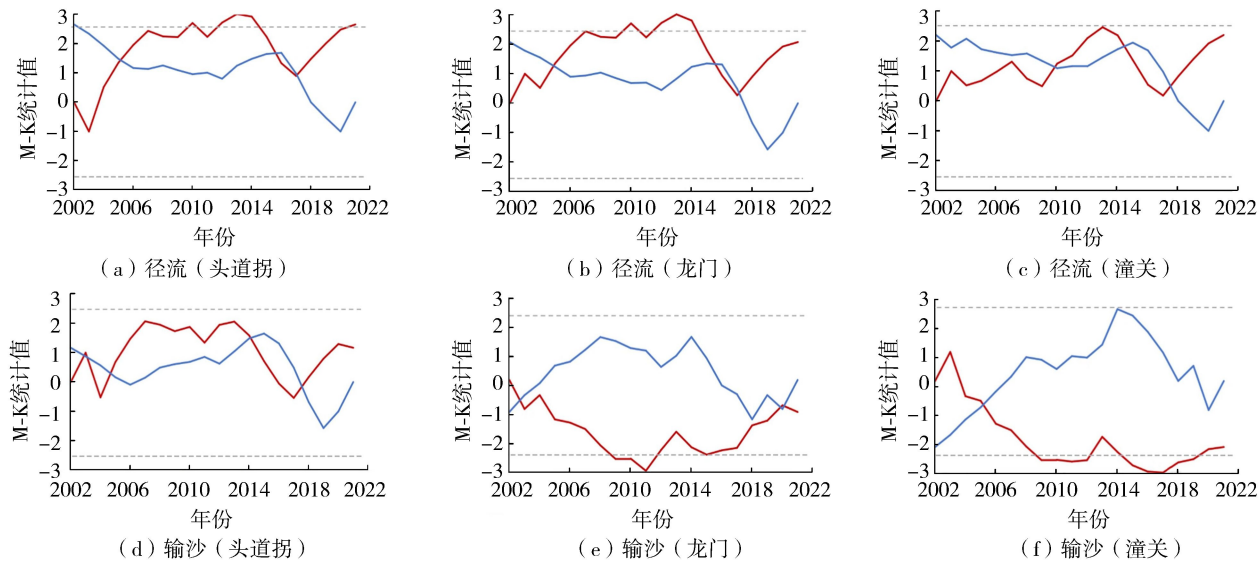


图 2 径流和输沙序列 Mann-Kendall 突变检验曲线

Fig. 2 Mann-Kendall mutation test curves for runoff and sediment

3.2.3 径流和输沙序列线性拟合趋势分析

从图 3 可以看出,3 个水文站径流量整体上都呈增大趋势,输沙量除头道拐呈增大趋势外,潼关呈减小

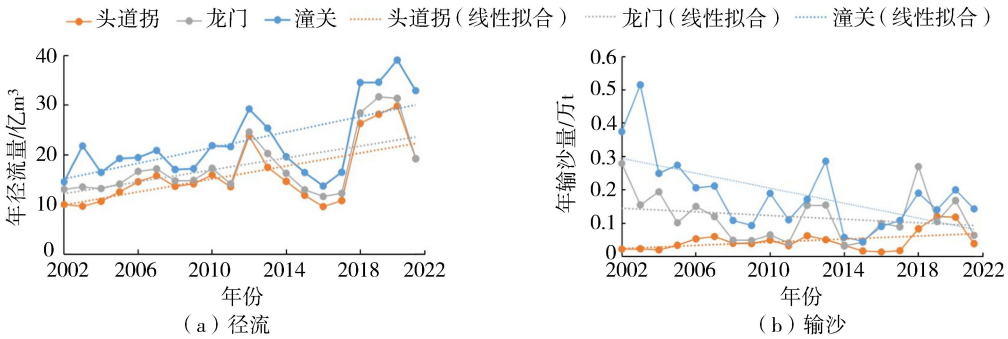


图 3 径流和输沙序列变化趋势

Fig. 3 Variation trends of runoff and sediment

趋势,龙门在前10年呈减小趋势,后10年总体略微增大,但波动幅度较大。综合分析图2和图3,可判断各站径流和输沙序列趋势发生明显转折的位置是否与突变点检验的结果相符。头道拐和龙门的径流突变年份均为2005年、2015年和2017年,由图3可见,2015年和2017年前后存在明显转折,为显著突变点。头道拐输沙突变年份为2003年、2005年、2014年和2017年,图3(b)中,2003年和2017年为显著突变年份;龙门输沙突变年份为2003年、2019年,均为显著突变点。2010年、2014年、2017年为潼关径流突变年份,2005年为输沙突变年份,图3(a)中,潼关径流显著突变点为2010年和2017年,输沙显著突变点为2005年。

3.2.4 径流和输沙序列周期性分析

图4为黄河北干流3个水文站径流量和输沙量的小波系数实部等值线,图中纵向为该时期不同时间尺度的振荡强度,横向为同一时间尺度上不同时间点的分布特征及振荡强度。头道拐径流包含6~9a和18~20a两个时间尺度(图4(a)),其中18~20a在全局振荡最为强烈,时间序列上表现最稳定,为径流主周期。头道拐输沙序列的时间尺度有6~9、18~20、10~12a(图4(d)),主周期为18~20a,6~9a和10~12a尺度周期在整个时段的连续性较差。龙门径流序列时间尺度主要有6~9、18~20a(图4(b)),其中18~20a全局振荡最强,为主周期,6~9a在2011年之后较为显著。龙门输沙序列的时间尺度有7~10、28~30a(图4(e)),其中28~30a无效,有效振荡周期为7~10a,是龙门输沙序列主周期,且在2011年后较为显著。潼关径流序列时间尺度主要有8~11、13~15、17~20a(图4(c)),其中8~11a尺度能量较弱,13~15、17~20a在整个时间序列上表现较为稳定,且能量集中,具有一定的全局性。潼关输沙序列的时间尺度有7~9、13~16、28~30a(图4(f)),其中7~9a能量最弱,表现不显著,28~30a无效,13~16a为有效主周期。头道拐径流和输沙主周期尺度下的周期基本相同,大致为13a;龙门径流和输沙主周期尺度下的周期大致为13a和10a(图4(b)(e));潼关径流和输沙主周期尺度下的周期大致为13a和9a(图4(c)(f))。

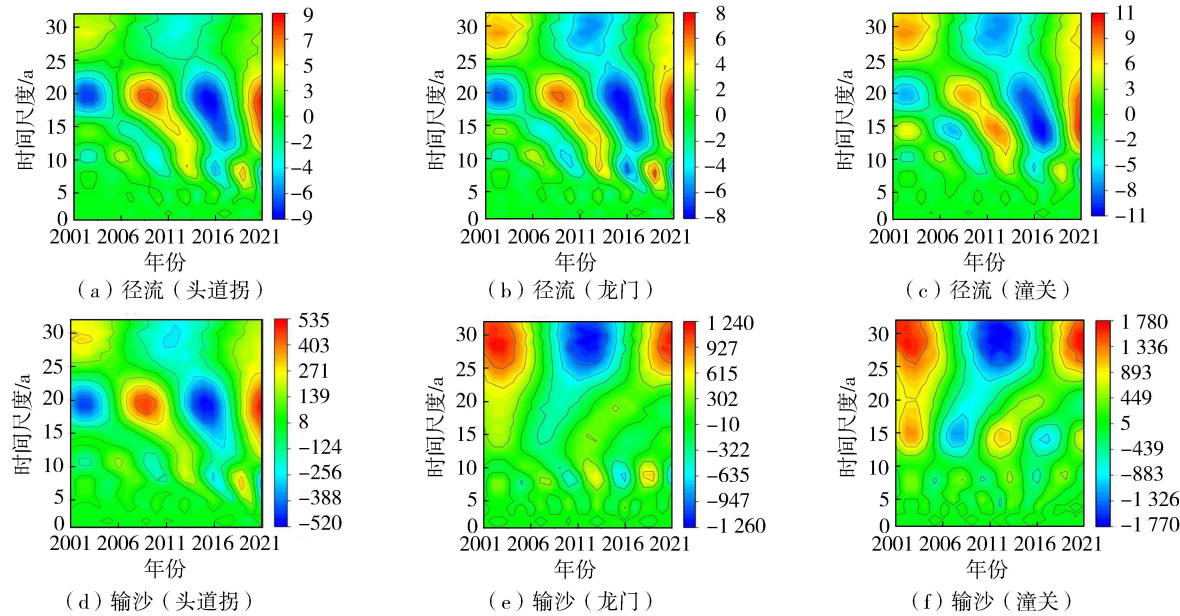


图4 径流和输沙序列小波系数实部等值线

Fig.4 Wavelet coefficient contours of real part for runoff and sediment

通过小波方差可进一步验证水沙序列的主周期,方差越大,对应的时间尺度振荡越强,其峰值对应序列时间尺度中的主周期。如图5所示,头道拐径流和输沙序列较为相似,存在2个明显的峰值,最大峰值为第一主周期,对应19a的时间尺度,说明19a左右的周期振荡最显著;第二峰值对应8a的时间尺度,为第二主周期;2个周期的波动控制着头道拐径流和输沙在整个时间域内的变化特征。龙门径流序列的第一峰值对应19a的时间尺度,为第一主周期,该尺度的周期振荡最强烈;第二峰值对应8a的时间尺度,为第二主周期。龙门输沙序列在20a时间尺度内的有效峰值对应9a的时间尺度,为其主周期。潼关径流序列第一峰值对应14a的时间尺度,为第一主周期;第二峰值对应19a的时间尺度,为第二主周期。潼关输沙序列的第一峰值对应29a的时间尺度,为第一主周期;第二峰值对应着14a的时间尺度,为第二主周期。小波方差中的时间尺度与小波系数实部等值线图分析结果基本一致,验证了小波分析结果的合理性。

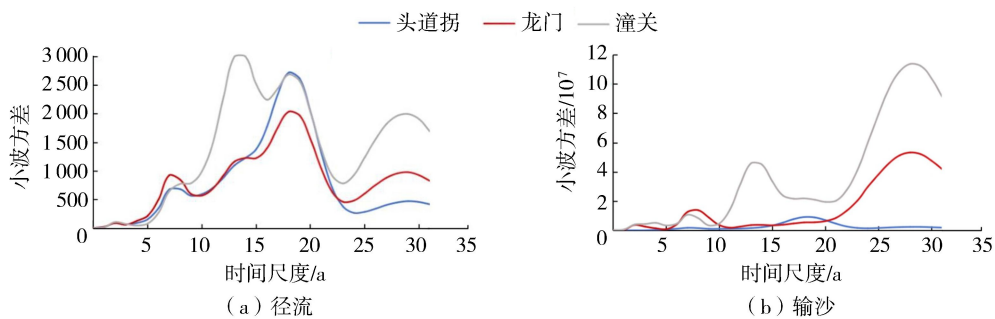


图 5 径流和输沙序列小波系数方差

Fig.5 Wavelet coefficient variance plots of runoff and sediment

3.3 水沙关系协调性分析

图 6 为来沙系数逐年变化,黄河北干流的来沙系数从头道拐到潼关逐渐增大,头道拐的来沙系数比龙门和潼关小很多,是因为上游河段来水量较大而输沙量较小,龙门至潼关河段来沙系数较大主要是黄河中游流经黄土高原。3 个水文站来沙系数总体呈下降趋势,尤其龙门和潼关下降更为显著,其中头道拐来沙系数均小于 0.009,表明该水文站来水量大而含沙量较小,一直处于水多沙少的状态。以每 5 年为一个时段,统计 3 个水文站来沙系数均值,发现龙门和潼关从第一时段到第二时段的来沙系数下降幅度较大,为 0.018;其他时段的来沙系数下降幅度则较为线性。从连续 20 年来沙系数看,头道拐来沙系数逐渐减小,表明该水文站水多沙少的情况越发显著,即水沙关系越来越不协调;龙门和潼关来沙系数的多年均值都大于 0.011,表明对应水文站的来水量小而含沙量较大。

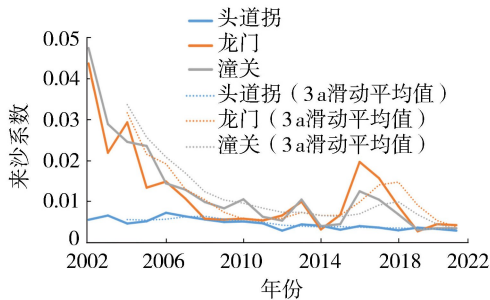


图 6 来沙系数变化

Fig.6 Variation of incoming sediments coefficient

表 4 为年内不同月份的水沙不协调度,通过数据对比发现,龙门和潼关的不协调度通常都大于头道拐,且年内不协调度较高的时期主要集中在夏季的 7、8 月,大多为水少沙多的状态。图 7 为不同年份的 3 个水文站水沙不协调度,可见黄河北干流河段在 2002—2021 年只有龙门和潼关存在水沙协调的年份,且具有一定的相似性,其中龙门有 3 个水沙协调年份(2007 年、2013 年、2018 年),潼关有 4 个水沙协调年份(2008 年、2010 年、2013 年、2017 年)且 2009 年不协调度非常小(即与水沙协调十分接近)。头道拐的水沙不协调度均为负值,一直是水多沙少的状态,与其所处位置有关;龙门和潼关的水沙不协调度在 2008 年前主要为正值,且不协调度逐年下降,从水少沙多状态逐渐趋于水沙协调状态,2008 年之后水沙不协调度以负值为主,大都

表 4 不同月份水沙不协调度

Table 4 Runoff-sediment degree of incoordination in annual monthly scale

月份	头道拐	龙门	潼关
1	-0.11	10.58	31.17
2	-1.13	7.55	26.41
3	13.02	15.32	23.89
4	16.02	7.95	18.66
5	22.57	5.12	32.42
6	26.41	33.70	32.80
7	25.00	213.14	136.42
8	26.88	155.53	146.04
9	15.11	37.23	32.99
10	14.41	16.08	22.59
11	10.70	8.91	19.96
12	4.24	10.11	26.89

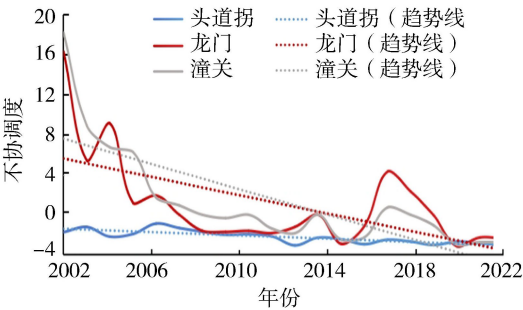


图 7 不同年份水沙不协调度

Fig.7 Runoff-sediment degree of incoordination in different years

呈水多沙少状态,但2016年两站均由水多沙少状态转向水少沙多状态,随后又恢复水多沙少状态并一直持续到2021年。

4 结 论

a. 黄河北干流河段径流不均匀性先增大后减小,流域径流平衡性在2002—2011年处于下降趋势,从2012年开始不断上升;输沙不均匀性先减小后增大,流域输沙平衡性先增强后减弱。径流年内分配不均匀系数和完全调节系数均小于输沙,输沙年内不均匀程度更大,年内特征的变化也更显著,同时,输沙集中度也更高,各站的径流集中期主要在9月,输沙集中期则主要在8、9月。

b. 黄河北干流河段径流总体为上升趋势,输沙表现为下降趋势,且径流增大输沙减少的趋势更加显著。头道拐和龙门的径流显著突变年份为2015年和2017年,潼关为2010年和2017年;头道拐输沙显著突变年份为2003年和2014年,龙门为2003年和2019年,潼关为2005年。

c. 北干流河段水沙关系变化具有多时间尺度特性,头道拐、龙门和潼关径流序列主周期尺度下的周期均为13 a,输沙序列主周期尺度下的周期分别为13、10、9 a。

d. 黄河北干流河段的来沙系数呈下降趋势,龙门和潼关下降尤为显著,头道拐的来沙系数均小于0.009,一直处于水多沙少的状态。在水沙不协调度上,龙门和潼关都是由水少沙多的状态逐渐趋于水沙协调状态(2008年左右),再变为水多沙少的状态。从趋势上来看,未来几年也将持续为水多沙少的状态,Mann-Kendall趋势检验分析及小波分析也得到相同的结果。

e. 黄河北干流河段径流量与输沙量在年和年际尺度上存在一定的相似性和同步性,呈现较为显著的相关关系,但由于流域气候环境、降水、河道情况等多因素影响,彼此之间仍存在差异性。

参考文献:

[1] 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 Chunhong, ZHANG Shuanghu,ZHANG Xiaoming. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation[J]. Strategic Study of CAE,2022,24(1):122-130. (in Chinese))

[2] XU Xiaoming,LYU Du,LEI Xiangjie,et al. Variability of extreme precipitation and rainfall erosivity and their attenuated effects on sediment delivery from 1957 to 2018 on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments,2021,21(12):3933-3947.

[3] 贾绍凤,梁媛,张士锋. 黄河流域天然径流量评价探讨[J]. 水资源保护,2022,38(4):33-38. (JIA Shaofeng,LIANG Yuan,ZHANG Shifeng. Discussion on evaluation of natural runoff in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):33-38. (in Chinese))

[4] 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 Yang,HU Chunhong,ZHANG Xiaoming,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. (in Chinese))

[5] WEI Yanhong,JIAO Juying,ZHAO Guangju,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.

[6] 江善虎,刘亚婷,任立良,等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J]. 水资源保护,2022,38(6):9-14. (JIANG Shanhu,LIU Yating,REN Liliang,et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):9-14. (in Chinese))

[7] 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,2022,20(3):1-9. (FAN Junjian,ZHAO Guangju,MU Xingmin,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. (in Chinese))

[8] YUE Xiaoli,MU Xingmin,ZHAO Guangju,et al. Dynamic changes of sediment load in the middle reaches of the Yellow River basin,China and implications for eco-restoration[J]. Ecological Engineering,2014,73:64-72.

[9] 郭彦,侯素珍,王平,等. 基于小波分析的黄河上游水沙多时间尺度特征[J]. 干旱区研究,2015,32(6):1047-1054. (GUO Yan,HOU Suzhen,WANG Ping,et al. Multi-time scale characteristics of runoff and sediment series based on wavelet analysis in the upper reaches of Yellow River[J]. Arid Zone Research,2015,32(6):1047-1054. (in Chinese))

[10] 郑佳芸,李军华,田世民,等. 近70年黄河宁夏河段干支流水沙变化规律[J]. 泥沙研究,2023,48(3):38-44. (ZHENG Jiayun,LI Junhua,TIAN Shimin,et al. Variation of water and sediment in main stream and tributaries of Ningxia reach in the

Yellow River in recent 70 years[J]. International Journal of Sediment Research,2023,48(3):38-44. (in Chinese))

[11] 张青青,钟德钰,贾宝真. 黄河中游水沙变化归因分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(5):976-987. (ZHANG Qingqing,ZHONG Deyu,JIA Baozhen. Attribution analysis of runoff-sediment variation in the middle Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(5):976-987. (in Chinese))

[12] 王鹏,靳莉君,刘静. 2021 年黄河中游秋汛及天气形势分析[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(4):74-78. (WANG Peng,JIN Lijun,LIU Jing. Summary of the autumn flood and analysis of the weather situation in the middle reaches of the Yellow River in 2021[J]. China Flood & Drought Management,2023,33(4):74-78. (in Chinese))

[13] LYU Xizhi,ZUO Zhongguo,NI Yongxin, et al. The effects of climate and catchment characteristic change on streamflow in a typical tributary of the Yellow River[J]. Scientific Reports,2019,9(1):14535.

[14] 叶婷,石朋,钟华,等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河上中游径流变化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):25-32. (YE Ting,SHI Peng,ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):25-32. (in Chinese))

[15] 薛联青,肖颖,刘远洪,等. 黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J]. 水资源保护,2023,39(4):32-41. (XUE Lianqing,XIAO Ying,LIU Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):32-41. (in Chinese))

[16] 江善虎,任明明,章二子,等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):1-7. (JIANG Shanhu,REN Mingming,ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):1-7. (in Chinese))

[17] YIN Zutang,CHANG Jun,HUANG Yu. Multiscale spatiotemporal characteristics of soil erosion and its influencing factors in the Yellow River Basin[J]. Water,2022,14(17):2658.

[18] 张文浩,瞿思敏,徐瑶,等. 泼水水库对黄河径流过程及水文情势的影响[J]. 水资源保护,2021,37(3):61-65. (ZHANG Wenhao,QU Simin,XU Yao, et al. Influence of Pohe Reservoir on runoff process and hydrological regime of Huanghe River[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):61-65. (in Chinese))

[19] 郭巧玲,杨云松,畅祥生,等. 1957—2008 年黑河流域径流年内分配变化[J]. 地理科学进展,2011,30(5):550-556. (GUO Qiaoling,YANG Yunsong,CHANG Xiangsheng, et al. Annual variation of Heihe River runoff during 1957-2008[J]. Progress in Geography,2011,30(5):550-556. (in Chinese))

[20] PESARAN M H,TIMMERMAN A. A simple nonparametric test of predictive performance[J]. Journal of Business & Economic Statistics,1992,10(4):461-465.

[21] 王军虎. 统计检验中假设的设置方法[J]. 统计与决策,2022,38(21):57-59. (WANG Junhu. Methods of hypothesis setting in statistical tests[J]. Statistics and Decision,2022,38(21):57-59. (in Chinese))

[22] WANG Junjie,SHI Bing,ZHAO Enjin, et al. Synergistic effects of multiple driving factors on the runoff variations in the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Arid Land,2021,13(8):835-857.

[23] 祁诗阳,沈宸,刘小标,等. 基于小波变换的郑州降雨量与太阳黑子活动关系分析[J]. 现代地质,2023,37(1):184-196. (QI Shiyang,SHEN Chen,LIU Xiaobiao, et al. Relationship between rainfall and sunspot activity cycle in Zhengzhou based on wavelet analysis [J]. Geoscience,2023,37(1):184-196. (in Chinese))

[24] 邵雪杰,顾圣平,曹爱武,等. 多沙河流水沙变化特征小波分析[J]. 长江科学院院报,2017,34(5):5-8. (SHAO Xuejie,GU Shengping,CAO Aiwu, et al. Wavelet analysis on flow and sediment variation in sandy rivers[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2017,34(5):5-8. (in Chinese))

[25] 张金良,练继建,张远生,等. 黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J]. 水利学报,2020,51(8):897-905. (ZHANG Jinliang,LIAN Jijian,ZHANG Yuansheng, et al. Coordination degree of water-sediment relationship of the Yellow River and regulating effect of the backbone reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(8):897-905. (in Chinese))

[26] 冯宗,孙赞盈,彭红,等. 来沙系数对河道冲淤的影响研究[J]. 人民黄河,2019,41(3):44-48. (FENG Zong,SUN Zanying, PENG Hong, et al. Study on the influence of the incoming sediment coefficient on the scour and sedimentation[J]. Yellow River, 2019,41(3):44-48. (in Chinese))

[27] 时芳欣,郜国明,王远见,等. 基于不协调度的黄河下游水沙变化分析[J]. 人民黄河,2020,42(5):52-55. (SHI Fangxin, GAO Guoming,WANG Yuanjian, et al. Analysis of inflow and sediment change of the lower Yellow River based on the degree of incoordination [J]. Yellow River,2020,42(5):52-55. (in Chinese))