

王传贵,梅雪梅,张国军,等. 1989~2019 年黄河宁夏段支流水沙变化规律及其驱动因素[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 844-856.

WANG Chuan-gui, MEI Xue-mei, ZHANG Guo-jun, et al. Variation of Water and Sediment in the Tributaries of Ningxia Section of Yellow River, China from 1989 to 2019 and Their Driving Factors[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 844-856.

DOI:10.19814/j.jese.2022.09016

· 环境与可持续发展专刊 ·

# 1989~2019 年黄河宁夏段支流水沙变化 规律及其驱动因素

王传贵<sup>1</sup>, 梅雪梅<sup>2,3,4\*</sup>, 张国军<sup>5</sup>, 任正龔<sup>5</sup>, 张晓明<sup>6</sup>,  
李 鹏<sup>7</sup>, 赵 阳<sup>6</sup>

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 地热与生态地质研究中心, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 河南省减污降碳协同工程技术研究中心, 河南 郑州 450001; 4. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 5. 宁夏回族自治区水土保持监测总站, 宁夏 银川 750002; 6. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 7. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘 要:**为明确黄河宁夏段典型支流水沙变化的主要驱动因素,基于清水河泉眼山站、红柳沟鸣沙洲站、苦水河郭家桥站实测水文资料,运用滑动平均法、Mann-Kendall 突变检验和双累积曲线法分析典型流域的水沙变化趋势以及突变年份,运用累积斜率法、水文法和水保法对比分析水沙变化的驱动因素。结果表明:①1989~2019 年,清水河、红柳沟和苦水河流域水沙变化均表现出减少趋势;相比来说,输沙量变化较径流量变化更显著,苦水河流域的水沙变化较清水河和红柳沟流域更显著。②人类活动在水沙变化中占据主导地位且贡献率逐渐增大;运用累积斜率法、水文法和水保法进行水沙变化归因分析,均表明人类活动是水沙变化的主要驱动因素,其中累积斜率法和水文法计算结果比较接近。③利用水保法对清水河流域进行水沙变化归因分析,发现人类活动中减水效益占据主导地位的是淤地坝和梯田,贡献率分别为 42.9%、29.0%,减沙效益占据主导地位的是淤地坝,贡献率为 94.5%。

**关键词:**水沙变化;突变检验;驱动因素;相关性检验;减沙效益;人类活动;水土保持;宁夏;黄河  
**中图分类号:**P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2023)04-0844-13

## Variation of Water and Sediment in the Tributaries of Ningxia Section of Yellow River, China from 1989 to 2019 and Their Driving Factors

WANG Chuan-gui<sup>1</sup>, MEI Xue-mei<sup>2,3,4\*</sup>, ZHANG Guo-jun<sup>5</sup>, REN Zheng-yan<sup>5</sup>,  
ZHANG Xiao-ming<sup>6</sup>, LI Peng<sup>7</sup>, ZHAO Yang<sup>6</sup>

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. Geothermal and Ecological Geology Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001,

收稿日期:2022-09-08;修回日期:2023-01-09 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(32201627);宁夏回族自治区水利科技项目(SBZZ-J-2021-13, SBZZ-J-2021-12);  
郑州大学院士团队科研启动基金项目(134-32340370, 134-32340364);  
中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项资金项目(SE0145B022022)

作者简介:王传贵(1999-),男,河南驻马店人,工学硕士研究生, E-mail: wangchuanguai@gs.zzu.edu.cn.

\* 通讯作者:梅雪梅(1992-),女,河南商丘人,直聘副教授,农学博士, E-mail: mxm0115@126.com.

Henan, China; 3. Research Centre of Engineering and Technology for Synergetic Control of Environmental Pollution and Carbon Emissions of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 4. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 5. Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 6. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 7. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to find the main driving factors of the variation of water and sediment in the typical tributaries of Ningxia section of Yellow River, based on the measured hydrological data at Quanyanshan station of Qingshui river, Mingshazhou station of Hongliugou river and Guojiaqiao station of Kushui river, the variation trend of water and sediment, and mutation year of the typical watershed were analyzed by the sliding average method, Mann-Kendall mutation test and double accumulation curve method; the driving factors of the variation of water and sediment were analyzed by cumulative slope method, hydrology method, and soil and water conservation method. The results show that ① from 1989 to 2019, the variation of water and sediment in Qingshui river, Hongliugou river and Kushui river basins all show a decreasing trend; the variation of sediment transport is more significant than that of runoff; compared with Qingshui river and Hongliugou river basins, the variation of water and sediment in Kushui river basin is more significant. ② Human activities play a leading role in the variation of water and sediment, and the contribution rate gradually increases; the cumulative slope method, hydrology method, and soil and water conservation method used in the attribution analysis of the variation of water and sediment show that human activity is the main driving factor of the variation of water and sediment, and the cumulative slope method and hydrology method have the same results. ③ According to the soil and water conservation method used in the attribution analysis of the variation of water and sediment in Qingshui river basin, it is found that the water reduction benefits of human activities are dominated by silt dam and terraced fields, with contribute rates of 42.9% and 29.0%, respectively; silt dam is dominant in sediment reduction, with contribute rate of 94.5%.

**Key words:** variation of water and sediment; mutation test; driving factor; correlation test; sediment reduction benefit; human activity; soil and water conservation; Ningxia; Yellow River

## 0 引言

受气候变化和人类活动的共同影响,黄河流域下垫面发生显著变化,进而影响其水循环过程<sup>[1-2]</sup>。尤其随着黄河流域生态建设工程、水利工程等的不断推进,黄河流域的水沙关系发生重大变化<sup>[3]</sup>。黄河水沙异源,输沙主要来源于中游的黄土高原<sup>[4-5]</sup>,因此,以往对于黄河流域水沙变化关系的研究多集中在中游地区。例如, Ma 等通过 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变点检验等统计方法分别分析了皇甫川<sup>[6]</sup>、黄河中游多沙粗沙区<sup>[7]</sup>、窟野河<sup>[8]</sup>、昕水河<sup>[9]</sup>以及黄河下游<sup>[10]</sup>的水沙变化规律;王冰洁等分别从日尺度和年尺度分析了黄河中游不同地貌下输

沙与径流的关系<sup>[11]</sup>,发现黄河中游 78 个水文站点的输沙和径流存在显著的幂函数关系; Xu 等通过水文气象资料、植被覆盖度和人口数据分析黄河中游水沙变化的驱动因素<sup>[12-13]</sup>,认为以植被恢复、煤矿开采为主的人类活动是造成流域径流量和输沙量减少的主要因素; Hu 等分析了渭河、泾河流域极端降雨等气候因素和人类活动对水沙变化的影响,发现极端降雨会显著影响流域的水沙情势,但人类耗水量的增加、水土保持措施和水库建设是造成流域径流量和输沙量减少的主要原因<sup>[14-16]</sup>;程亦菲等通过构建一维水沙耦合模型、流域水沙模拟技术,定量识别流域的水沙变化特征<sup>[17-18]</sup>。此外,在黄河水沙变化研究中,还包括数据库构建优化,如吴丹等研究了黄

河水沙变化数据库构建关键技术,将黄河流域降雨、泥沙、土地利用数据进行有机集成<sup>[19]</sup>。

相对而言,黄河上游地区水沙变化及其受气候变化和人类活动的影响研究尚显不足。Miao 等以黄河宁夏段为例,分析中国黄河近 70 年水沙排放的演变模式和空间来源,得出水沙排放量显著下降且有明显的周期性变化特征<sup>[20]</sup>;范俊健等运用 Mann-Kendall 趋势检验、Spearman 秩相关系数法、累积距平法和小波变换等方法分析黄河上游的水沙变化情况,发现黄河上游径流量和输沙量均有减少趋势,且输沙量减少幅度明显大于径流量,其中宁夏段年径流量存在 6、9、13、28 年的变化主周期<sup>[21-23]</sup>;余欣等通过分析湟水流域水沙变化,得到水沙变化趋势各异、水沙明显异源的结论<sup>[24]</sup>;Yao 等利用温度、风、降水、出水和输沙负荷等数据,定量估计了气候变化和人类活动对黄河上游西柳沟水沙变化的贡献<sup>[25]</sup>。目前,大多研究主要集中在水沙变化关系方面,受方法和技术手段的限制,区分气候变化和人类活动对水沙变化的贡献程度存在较大争议。

综合来看,对流域水沙变化的研究主要通过趋势分析、突变分析等方法来分析流域水文序列的变化趋势和突变时间,通过气候因素(如降水、蒸发等)以及人类活动因素(如植树种草等水土保持措施、灌溉等水利措施)来量化分析水沙变化的驱动因素<sup>[26]</sup>。宁夏作为沿黄九省区中唯一全境属于黄河流域的省区,在黄河流域生态保护和高质量发展战略中具有重要地位。而宁夏境内黄河支流众多,最大的为清水河,其次为苦水河、红柳沟等。明晰这些支流长时间序列水沙关系及其驱动机制,是黄河流域治理的重要基础,可为该地区乃至全流域生态保护提供有力支撑<sup>[27]</sup>。本文基于黄河宁夏段清水河、红柳沟和苦水河等典型流域近 30 年的水文观测数据,综合运用多种方法(Mann-Kendall 突变检验、累积斜率法、水文法、水保法<sup>[28]</sup>等)分析水沙变化趋势,量化气候变化及人类活动对水沙变化的贡献,为黄河宁夏段乃至全流域水土流失治理提供理论支撑。

## 1 研究区概况

黄河宁夏段位于黄河上游,西起中卫市南长滩,东至石嘴山市头道坎,全长 397 km,纬度范围为 35°14'N~39°23'N,经度范围为 104°17'E~107°39'E,沿程干流包括下河沿、青铜峡、石嘴山 3 个水文站。宁夏位于中国西北内陆地区,地处黄河水系,地势南

高北低,呈阶梯状下降,丘陵沟壑众多;气候属温带大陆性干旱、半干旱气候,夏季降水少,气温变化起伏大;地形可分为北部引黄灌区、中部干旱带和南部山区 3 个部分。

根据 2019 年水土流失动态监测结果,宁夏水土流失面积为  $1.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占宁夏总面积( $6.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ )的 23.93%,2019 年共新增水土流失治理面积 920.42  $\text{km}^2$ ,包括植树种草、建设梯田、淤地坝、封禁治理等各项水土保持措施。截至 2019 年末,宁夏累计完成治理面积 21 837  $\text{km}^2$ ,总体治理程度达到 55.74%,水土治理成效显著。值得一提的是,黄河宁夏段清水河流域从 20 世纪 60 年代开始的水土保持治理工作,截至 2010 年已完成各项水土保持措施的面积共计 8 410.5  $\text{km}^2$ ,其中包括梯田 1 059.7  $\text{km}^2$ 、水土保持林 2 339.5  $\text{km}^2$ 、人工种草 615.2  $\text{km}^2$ 、坝地 76.9  $\text{km}^2$ 、封禁治理 4 319.2  $\text{km}^2$ 。

黄河宁夏段包括清水河、红柳沟、苦水河等主要支流,其对应的出口站分别为泉眼山站、鸣沙洲站、郭家桥站。黄河水沙变化与黄河各支流水沙变化息息相关,本文主要聚焦黄河宁夏段内的清水河、红柳沟和苦水河流域(图 1)。

## 2 数据来源与分析方法

### 2.1 数据来源

本文收集了黄河宁夏段典型流域 1989~2019 年水文数据,包括清水河泉眼山站、红柳沟鸣沙洲站和苦水河郭家桥站 3 个水文站的逐日降水量、径流量和输沙量数据,数据来自国家地球科学系统数据中心;此外,还收集了清水河流域 1989~2010 年历年的水土保持措施面积,包括梯田、草地、水土保持林、坝地、封禁治理等。由于资料受限,未能有效获取红柳沟和苦水河流域的水土保持措施信息。

### 2.2 分析方法

本文采用滑动平均法、Mann-Kendall 突变检验和双累积曲线法分析各流域水沙变化趋势和突变时间,划分基准期;采用累积斜率法、水文法和水保法等定量揭示气候变化和人类活动对水沙变化的贡献率,明确典型流域水沙变化的主要驱动因素。

Mann-Kendall 突变检验广泛用于长时间序列水文数据的突变检验,其样本不需要遵循一定的分布,是一种较常用的非参数检验方法<sup>[29]</sup>。本文通过 MATLAB 软件实现各水文数据的 Mann-Kendall 突变检验,并确定突变年份。

双累积曲线法是在同一坐标系中绘制某一时段

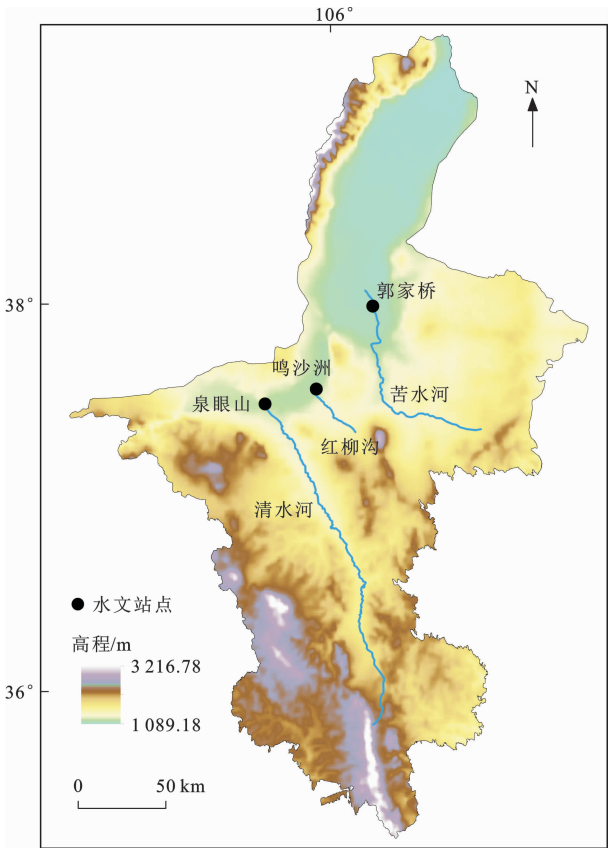


图 1 黄河宁夏段清水河、苦水河和红柳沟水文站点位置  
Fig.1 Location of Hydrological Stations of Qingshui River, Kushui River and Hongliugou River in Ningxia  
Section of Yellow River

内一种变量累积值与另一变量累积值的关系曲线，以表示两个变量间的相互关系。本文通过绘制典型流域径流量和输沙量的双累积曲线，结合 Mann-Kendall 突变检验分析各典型流域水文要素的突变年份。

累积斜率法主要是通过点绘流域累积年降水量、累积年径流量、年输沙量的曲线，拟合得到基准期各水文要素累积量的斜率，依据各要素在基准期斜率的变化，判断驱动因素对水沙变化的贡献率<sup>[30]</sup>。采用累积斜率法计算时，将降雨量作为影响

水沙的主要气候因素，将累积降雨量斜率变化作为气候因素的贡献率，由 1 减去气候因素的贡献率即为人类活动对水沙变化的贡献率。

水文法主要将突变年份前的时段作为研究流域的基准期，将突变年份后的时段作为研究期。在基准期各水文要素间寻找相关关系（如降水量-径流量、降水量-输沙量、累积降水量-累积输沙量、累积降水量-累积径流量、汛期降水量-汛期径流量、汛期降水量-汛期输沙量等），同时建立相关模型分析研究期水沙变化中各驱动因素的贡献率。

水保法分析水沙变化的驱动因素时，通过搜集流域的各种水利工程措施（如水库、灌溉和各项水土保持措施等），分析各种人类活动对流域水沙变化的贡献率。其中，水土保持措施方面，调查研究区流域内各水土保持措施面积，确定不同地貌类型区不同条件、不同时期各项水土保持措施的减水减沙指标，分项计算、逐项累加，进而确定流域内各项水土保持措施的减水减沙量。各项水土保持措施的减水减沙量计算公式为

$$W=\varphi F_b K$$
(1)

式中： $W$  为单项措施蓄水量或拦泥量； $\varphi$  为单项措施蓄水定额或拦泥定额； $F_b$  为单项措施面积； $K$  为单项措施利用率。

根据地区相似性原则，参考《黄河水沙变化研究（第一卷）》成果资料<sup>[31]</sup>以及近期无定河、祖厉河水保法研究成果<sup>[32-34]</sup>，确定清水河流域不同时期的各单项水土保持措施蓄水和拦泥定额以及利用率（表 1）。

3 结果分析

3.1 典型流域水沙变化趋势

黄河宁夏段清水河、红柳沟、苦水河流域的水文要素年变化曲线如图 2 所示，其中五年滑动平均值曲线过滤掉数据中的频繁起伏，能表示出平滑的变化趋势。Mann-Kendall 突变检验结果如图 3 所示，

表 1 各项水土保持措施蓄水定额、拦泥定额及利用率

措施	1990~2000 年各项水土保持措施效果			2000~2010 年各项水土保持措施效果		
	蓄水定额/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	拦泥定额/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	利用率/%	蓄水定额/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	拦泥定额/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	利用率/%
梯田	300	21.00	85	315	22.00	90
造林	150	10.75	55	160	11.25	60
草地	140	5.90	36	155	6.30	50
淤地坝	1 500	11 500.00	100	1 600	11 800.00	100
封禁治理	100	20.00	100	110	21.50	100

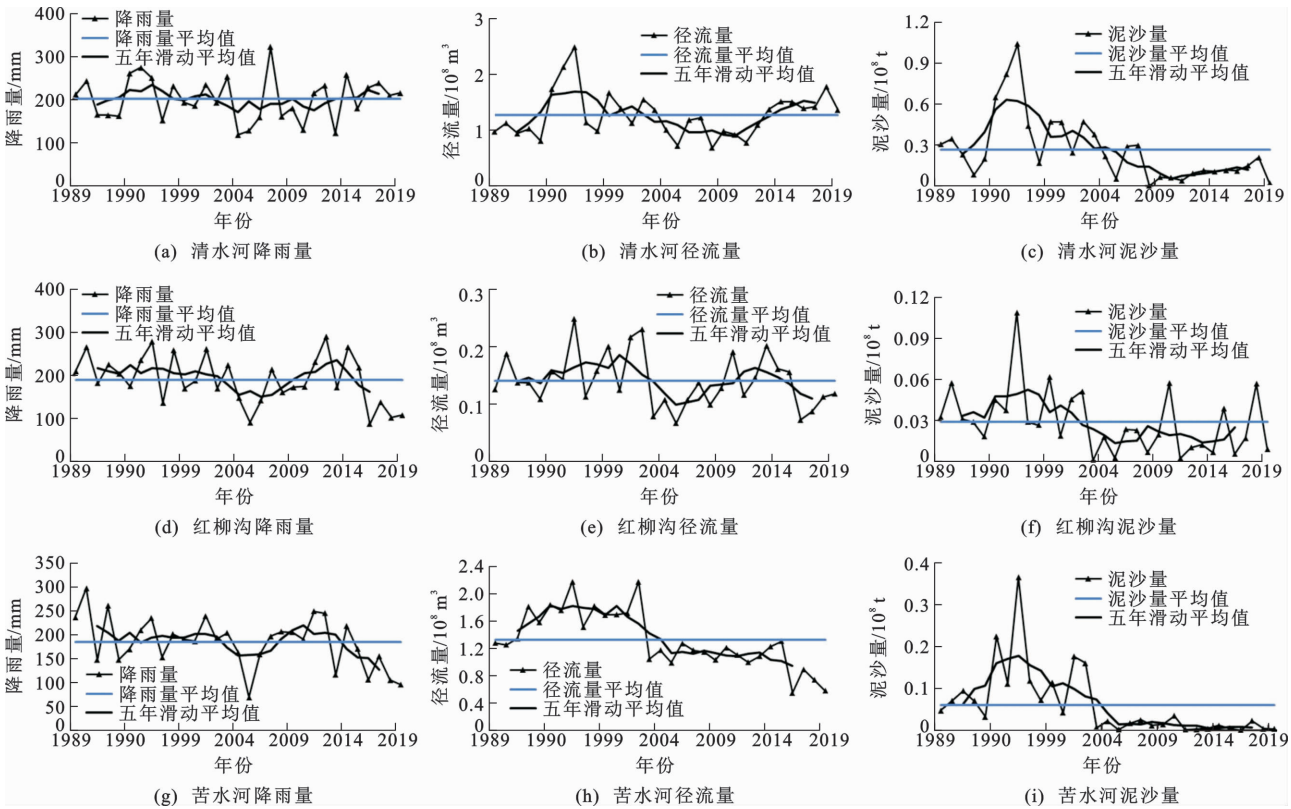
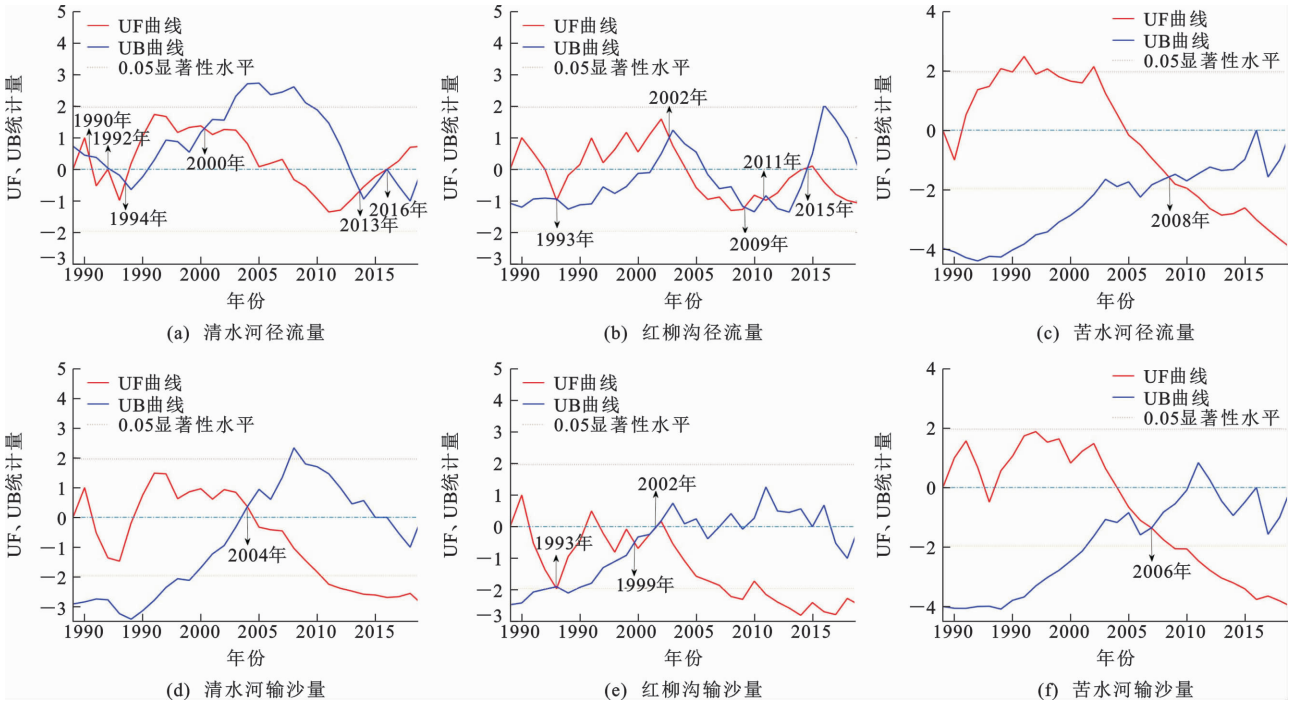


图 2 典型流域水文要素年变化曲线

Fig. 2 Annual Variation Curves of Hydrological Elements in Typical Watersheds



UF 表示正序时间统计序列;UB 表示逆序时间统计序列

图 3 Mann-Kendall 突变检验结果

Fig. 3 Results of Mann-Kendall Mutation Test

其中 UF 曲线可以直观表现变化趋势,设置显著性水平为 0.05,临界值为 1.96。UF 曲线大于 0 表示增加趋势,大于 1.96 表示显著增加;UF 曲线小于 0 表示减少,小于 -1.96 表示显著减少。



综合图 2、3 分析典型流域的水沙变化趋势。清水河流域多年(1989~2019 年)降雨量平均值、径流量平均值、输沙量平均值分别为 201.28 mm、 $1.262 0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.266 7 \times 10^8 \text{ t}$ 。降雨量年际变化较大,尤其在 2004~2009 年的变化差异更明显,五年滑动平均值在降雨量平均值附近波动[图 2(a)]。径流量在 1996~2008 年波动变化但总体下降,在 2009~2019 年呈波动增长[图 2(b)],但 UF 曲线未超过临界值,变化趋势不明显[图 3(a)]。输沙量的五年滑动平均值呈现先增加后减少、后略有增加的趋势[图 2(c)],在 1989~2004 年呈现增加→减少→增加的波动变化,但总体变化趋势不显著,2004 年以后呈减少趋势,且在 2010 年左右超出临界值,输沙量显著减少[图 3(d)]。

红柳沟流域多年(1989~2019 年)降雨量平均值、径流量平均值、输沙量平均值分别为 189.61 mm、 $0.141 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.028 9 \times 10^8 \text{ t}$ 。降雨量在多年平均值附近波动,且变化趋势不显著,2005 年出现降水量最小值[图 2(d)]。径流量变化幅度较大,五年滑动平均值呈现增加→减少→增加→减少的变化趋势[图 2(e)],Mann-Kendall 突变检验中 UF 曲线也显示了这种规律,且未超出临界值,变化趋势不明显[图 3(b)]。输沙量年际波动较为剧烈,总体呈减少趋势,其五年滑动平均值在 2002 年之前均在多年平均水平之上,2002 年后普遍低于多年平均水平[图 2(f)],UF 曲线显示 2007 年以后输沙量显著减少[图 3(e)]。

苦水河流域多年(1989~2019 年)降雨量平均值、径流量平均值、输沙量平均值分别为 185.11 mm、 $1.334 0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.060 8 \times 10^8 \text{ t}$ 。降雨量年际波动幅度大,2012~2019 年降雨量明显减少,在 2005 年出现最小值[图 2(g)]。苦水河流域径流量整体呈现波动减少趋势,在 2002 年以后的年径流量均小于多年径流量平均值[图 2(h)],在 2009 年左右 UF 曲线超出临界值(−1.96),减少趋势显著[图 3(c)]。苦水河流域输沙量呈现先增加后阶梯式减少的趋势,2002 年前输沙量变化幅度较大,2002 年后输沙量锐减[图 2(i)],表现出和径流量相似的变化趋势,且在 2009 年之后显著减少[图 3(f)]。

通过 Mann-Kendall 突变检验寻找径流量和输沙量可能存在的突变点,即 UF 曲线和 UB 曲线的交点为可能的突变点。清水河流域径流量可能出现突变的年份为 1990 年附近、1992 年、1994 年、2000 年、2013 年、2016 年[图 3(a)];红柳沟径流量可能

突变的年份为 2002 年前后、2009 年、2011 年、2015 年[图 3(b)];苦水河流域径流量可能出现突变的年份为 2008 年[图 3(c)]。在输沙量方面,清水河流域输沙量可能出现突变的年份为 2004 年左右[图 3(d)];红柳沟流域可能出现突变的年份为 1993 年、1999 年、2001 年、2002 年[图 3(e)];苦水河流域可能出现突变的年份为 2006 年左右[图 3(f)]。

由于部分径流量和输沙量的 Mann-Kendall 突变检验存在较多交点,这些交点有的是突变点,有的是假突变点。如果选取假突变点有可能会影响最终的检验结果,甚至会得出错误的结论,因此有必要采用双累积曲线法分别计算降雨量、径流量和输沙量的累积年值。清水河流域降雨量-径流量累积曲线的拐点在 1996 年前后和 2013 年前后,降雨量-输沙量累积曲线拐点在 2003 年前后[图 4(a)];红柳沟

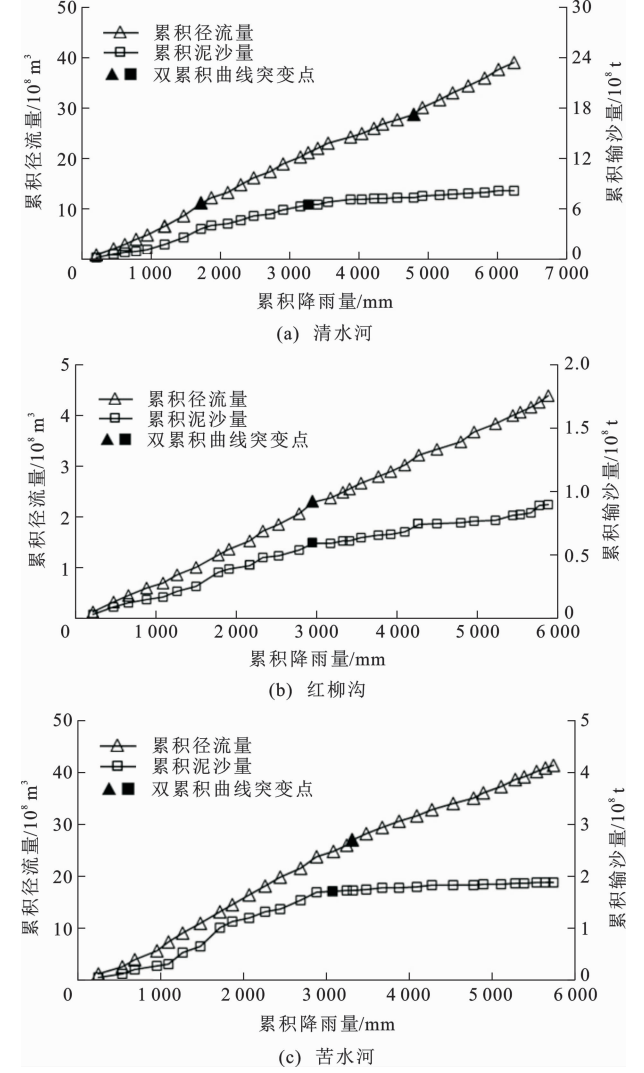


图 4 降雨量-径流量、降雨量-输沙量双累积曲线  
Fig. 4 Double Accumulation Curves of Rainfall-runoff and Rainfall-sediment

流域降雨量-径流量累积曲线和降雨量-输沙量累积曲线的拐点均在 2002 年[图 4(b)];苦水河流域降雨量-径流量累积曲线的拐点在 2004 年前后,降雨量-输沙量累积曲线的拐点在 2002 年左右[图 4(c)]。

综合 Mann-Kendall 突变检验与降雨量-径流量、降雨量-输沙量双累积曲线发现:清水河流域径流量突变年份为 1996 年、2013 年,输沙量突变年份为 2003 年,径流量基准期为 1989~1996 年,输沙量基准期为 1989~2003 年;红柳沟径流量和输沙量突变年份都为 2002 年,基准期为 1989~2002 年;苦水河径流量突变年份为 2004 年,基准期为 1989~2004 年,输沙量突变年份为 2002 年,基准期为 1989~2002 年。

3.2 流域水沙变化驱动因素

3.2.1 累积斜率法

通过前述方法确定各流域水沙数据的突变年份,划分基准期,采用累积斜率法分析水沙变化贡献

率,结果如表 2 所示。从表 2 可以看出:清水河流域在 1997~2012 年、2013~2019 年累积径流量斜率减少幅度分别为 20.4%、-35.5%;累积降雨量斜率减少幅度分别为 9.2%、-15.1%,人类活动对径流量变化的贡献率分别为 54.9%、57.5%;在输沙量方面,研究期间累积输沙量相对基准期减少了 76.8%,人类活动的贡献率为 92.1%,占据主导地位。红柳沟流域在研究期间累积径流量斜率减少 17.9%,累积输沙量斜率减少 55.8%,累积输沙量的变化幅度远大于累积径流量;在径流量方面,气候变化贡献率为 69.3%,人类活动贡献率为 30.7%,气候变化占主导地位;在输沙量方面,气候变化贡献率为 22.2%,人类活动贡献率为 77.8%,人类活动占据主导地位。苦水河流域在研究期间累积径流量斜率相比基准期减少 38.7%,累积输沙量斜率减少 91.5%,输沙量锐减;人类活动对径流量变化的贡献率为 78.0%,对输沙量变化的贡献率为 90.1%;人类活动在苦水河流域水沙变化中占据主导地位。

表 2 典型流域年径流量-输沙量累积曲线的累积斜率法归因分析结果

Table 2 Attribution Analysis Results of Cumulative Slope Method of Annual Runoff-sediment Accumulation Curve in Typical Watersheds							
典型流域	水文要素	时段	累积降雨量斜率/ (mm·年 <sup>-1</sup> )	累积径流量斜率/ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ·年 <sup>-1</sup> )	累积输沙量斜率/ (10 <sup>8</sup> t·年 <sup>-1</sup> )	不同驱动因素的贡献率	
						气候变化	人类活动
清水河	径流量	1989~1996 年	209.66	1.379 7			
		1997~2012 年	190.42	1.098 3		45.1%	54.9%
		2013~2019 年	219.26	1.488 1		42.5%	57.5%
	输沙量	1989~2003 年	210.47		0.467 3		
		2004~2019 年	197.74		0.108 5	7.9%	92.1%
红柳沟	径流量	1989~2002 年	210.13	0.162 0			
		2003~2019 年	184.07	0.133 0		69.3%	30.7%
	输沙量	1989~2002 年	210.13		0.043 0		
		2003~2019 年	184.07		0.019 0	22.2%	77.8%
苦水河	径流量	1989~2004 年	197.39	1.720 9			
		2005~2019 年	180.68	1.054 3		22.0%	78.0%
	输沙量	1989~2002 年	197.37		0.134 6		
		2003~2019 年	179.39		0.011 5	9.9%	90.1%

3.2.2 水文法

为使计算结果准确,要求建立的模型相关要素之间有较高的相关性。本文对基准期的降雨量-径流量、降雨量-输沙量、累积降雨量-累积输沙量、累积降雨量-累积径流量进行相关性分析,相关性检验结果如表 3 所示。

清水河、红柳沟、苦水河流域基准期累积降雨量-累积径流量、累积降雨量-累积输沙量均具有较高的相关性。拟合流域基准期相关水文要素间的关

系,得到累积降雨量-累积径流量、累积降雨量-累积输沙量的关系为

$$\sum W_1 = 0.006\ 6 \sum P_1 - 0.978\ 4 \tag{2}$$

$$\sum S_1 = 0.002\ 2 \sum P_1 - 0.492\ 8 \tag{3}$$

$$\sum W_2 = 0.000\ 8 \sum P_2 - 0.089\ 2 \tag{4}$$

$$\sum S_2 = 0.000\ 2 \sum P_2 - 0.025\ 5 \tag{5}$$

$$\sum W_3 = 0.008\ 7 \sum P_3 - 1.802\ 7 \tag{6}$$

表 3 水文要素间相关性  
Table 3 Correlation of Hydrological Elements

典型流域	水文要素间相关系数			
	降雨量- 径流量	降雨量- 输沙量	累积降雨量- 累积径流量	累积降雨量- 累积输沙量
清水河	0.620 2	0.291 4	0.985 4	0.932 0
红柳沟	0.161 2	0.152 8	0.995 1	0.989 7
苦水河	0.002 5	0.004 8	0.997 3	0.974 2

$$\sum S_3 = 0.000\ 7 \sum P_3 - 0.258\ 6 \quad (7)$$

式中: $W_1$ 、 $S_1$ 、 $P_1$  分别表示清水河流域径流量、输沙量和降雨量; $W_2$ 、 $S_2$ 、 $P_2$  分别表示红柳沟流域的径流量、输沙量和降雨量; $W_3$ 、 $S_3$ 、 $P_3$  分别表示苦水河流域的径流量、输沙量和降雨量。

表 4 为基于水文法的典型流域水沙变化归因分析结果。清水河流域 1997~2012 年、2013~2019 年实测年均径流量相比基准期减少幅度为 21.0%、-33.2%,根据式(2)计算两个时期人类活动对年径流量变化的贡献率分别为 59.5%、82.0%,人类活动占主导地位;研究期间年输沙量减少 71.0%,人类活动贡献率为 101.7%。红柳沟流域研究期间径流量和输沙量相比基准期减少幅度分别为 25.0%、71.0%,根据式(4)、(5)计算得出人类活动减水和减沙的贡献率分别为 63.3%、83.3%;红柳沟流域研

表 4 基于水文法的典型流域水沙变化归因分析结果

Table 4 Attribution Analysis Results of Variation of Water and Sediment by Hydrology Method in Typical Watershed

典型流域	水文要素	时段	实测累积值	实测年均值	模拟年均值	实测年均变化情况		气候影响情况		人类活动影响情况	
						变化量	变化幅度	减少量	减少幅度	减少量	减少幅度
清水河	径流量	1989~1996 年	11.173×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	1.397×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>							
		1997~2012 年	28.829×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	1.103×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	1.278×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.294×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	21.0%	0.119×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	40.5%	0.175×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	59.5%
		2013~2019 年	39.109×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	1.469×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	1.169×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.366×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	-33.2%	0.066×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	18.0%	0.300×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	82.0%
	输沙量	1989~2003 年	6.314×10 <sup>8</sup> t	0.421×10 <sup>8</sup> t							
		2004~2019 年	8.265×10 <sup>8</sup> t	0.122×10 <sup>8</sup> t	0.426×10 <sup>8</sup> t	0.299×10 <sup>8</sup> t	71.0%	-0.005×10 <sup>8</sup> t	-1.7%	0.304×10 <sup>8</sup> t	101.7%
红柳沟	径流量	1989~2002 年	2.293×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.164×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>							
		2003~2019 年	4.379×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.123×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.149×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.041×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	25.0%	0.015×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	36.7%	0.026×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	63.3%
	输沙量	1989~2003 年	0.5899×10 <sup>8</sup> t	0.042×10 <sup>8</sup> t							
		2004~2019 年	0.8967×10 <sup>8</sup> t	0.012×10 <sup>8</sup> t	0.037×10 <sup>8</sup> t	0.030×10 <sup>8</sup> t	71.0%	0.005×10 <sup>8</sup> t	16.7%	0.025×10 <sup>8</sup> t	83.3%
苦水河	径流量	1989~2004 年	25.954×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	1.622×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>							
		2005~2019 年	41.359×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	1.027×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	1.552×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.595×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	36.7%	0.070×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	11.8%	0.525×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	88.2%
	输沙量	1989~2002 年	1.697×10 <sup>8</sup> t	0.121×10 <sup>8</sup> t							
		2003~2019 年	1.886×10 <sup>8</sup> t	0.011×10 <sup>8</sup> t	0.120×10 <sup>8</sup> t	0.110×10 <sup>8</sup> t	71.0%	0.001×10 <sup>8</sup> t	1.0%	0.109×10 <sup>8</sup> t	99.0%

从表 5 可以看出:在减水方面,清水河流域基准期(1989~1996 年)各项水土保持措施减水 0.288×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,1997~2010 年各项水土保持措施减水量减少了 0.548×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,人类活动的贡献率为 92.2%,研究期间梯田、水土保持林、人工种草、淤地坝等水

究期间输沙量减少幅度远大于径流量,人类活动在减沙减水中占据主导地位,且对输沙量减少的影响更大。苦水河流域研究期间实测年均径流量相对基准期减少幅度为 36.7%,根据式(6)计算得到人类活动的贡献率为 88.2%,人类活动在流域减水中占据主导地位;在输沙量方面,研究期间输沙量减少幅度为 71.0%,人类活动占据主导地位,其贡献率为 99.0%,气候变化对流域输沙量变化的影响较微弱。

3.2.3 水保法

受水土保持措施资料的限制,本文只将水保法应用于清水河流域,未能应用于其他流域。截至 2010 年,清水河流域已完成水土保持措施面积 841 047 hm<sup>2</sup>,其中梯田 105 967 hm<sup>2</sup>、水土保持林 233 949 hm<sup>2</sup>、人工种草 61 514.8 hm<sup>2</sup>、坝地 7 694.3 hm<sup>2</sup>、封禁治理 56.139 hm<sup>2</sup>。结合相关资料,20 世纪 80 年代清水河流域淤地坝面积约占坝地总面积的 70%,2000 年后清水河流域大规模建设的淤地坝面积达到坝地总面积的 88%。由于统计的坝地面积包含水库淤地和淤地坝两部分,本文将 1989~1999 年淤地坝面积约按传统坝地面积的 80%计算,2000~2010 年淤地坝面积按传统面积的 88%计算。

土保持措施的减水效益分别为 0.159×10<sup>8</sup>、0.111×10<sup>8</sup>、0.043×10<sup>8</sup>、0.234×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,减水贡献率分别为 29.0%、20.3%、7.8%、42.9%,淤地坝和梯田的贡献较大;在减沙方面,清水河流域基准期(1989~2003 年)各项水土保持措施年均减沙量为



表 5 水土保持措施减水减沙分析结果

Table 5 Analysis Results of Water and Sediment Reduction by Soil and Water Conservation Measures

参数	时段	实测年均值	不同水土保持措施的减水减沙量					人类活动影响情况	
			梯田	水土保持林	人工种草	淤地坝	封禁治理	减水减沙量	减少幅度
径流量	1989~1996 年	$1.397\times10^8\text{ m}^3$	$0.059\times10^8\text{ m}^3$	$0.026\times10^8\text{ m}^3$	$0.017\times10^8\text{ m}^3$	$0.186\times10^8\text{ m}^3$	/		
	1997~2010 年	$1.115\times10^8\text{ m}^3$	$0.159\times10^8\text{ m}^3$	$0.111\times10^8\text{ m}^3$	$0.043\times10^8\text{ m}^3$	$0.234\times10^8\text{ m}^3$	/	$0.260\times10^8\text{ m}^3$	92.2%
输沙量	1989~2003 年	$0.421\times10^8\text{ t}$	$0.005\times10^8\text{ t}$	$0.003\times10^8\text{ t}$	$0.001\times10^8\text{ t}$	$1.351\times10^8\text{ t}$	$0.002\times10^8\text{ t}$		
	2004~2010 年	$0.142\times10^8\text{ t}$	$0.018\times10^8\text{ t}$	$0.013\times10^8\text{ t}$	$0.003\times10^8\text{ t}$	$1.527\times10^8\text{ t}$	$0.055\times10^8\text{ t}$	$0.254\times10^8\text{ t}$	90.9%

1.362×10<sup>8</sup> t,研究期间(2004~2010 年)年均减沙量为 1.616×10<sup>8</sup> t,人类活动对减沙的贡献率为 77.4%。研究期间梯田、水土保持林、人工种草、淤地坝、封禁治理等水土保持措施的减沙效益分别为 0.018×10<sup>8</sup>、0.013×10<sup>8</sup>、0.003×10<sup>8</sup>、1.527×10<sup>8</sup>、0.055×10<sup>8</sup> t,减沙效益占比分别为 1.1%、0.8%、0.2%、94.5%、3.4%,其中淤地坝占主导地位。

3.2.4 不同方法对比

综合比较不同方法的计算结果发现:对于清水河流域,运用累积斜率法和水文法分析 1997~2012 年数据表明人类活动对径流变化的贡献率将近 60%,水保法得到结果偏大,人类活动的贡献率为 92.2%;运用累积斜率法和水文法分析 2013~2019 年数据均表明人类活动是径流变化的主导因素[图 5(a)];在输沙量方面,累积斜率法和水文法计算结果表明人类活动对输沙变化的贡献率在 90%以上,水保法分析得到人类活动贡献率为 90.9%[图 5(b)];整体来看,人类活动对径流量、输沙量变化的贡献率在 50%以上,明显大于气候变化对径流量和输沙量变化的贡献率,明确了人类活动在流域的水沙变化贡献因素中占主导地位。对于红柳沟流域,累积斜率法和水文法分析结果都表明人类活动是造成输沙量变化的主要因素,其贡献率在 80%左右;在径流量方面,累积斜率法得到气候变化占主导地位,其贡献率为 69.7%,水文法分析得到人类活动占主导地位,其贡献率为 63.3%,可见降雨量对径流量的影响较其他流域更大。对于苦水河流域,累积斜率法和水文法分析结果都表明人类活动是流域水沙变化的主导因素,人类活动对径流变化的贡献率接近 80%,对输沙变化的贡献率接近 90%。

4 讨 论

本文采用 Mann-Kendall 突变检验分析时,多个水文站的水文要素序列都出现了多个交点,且交点时间较近,不宜直接确定水文要素序列的突变年份,因此,需要结合降雨量-径流量、降雨量-输沙量

双累积曲线寻找累积曲线的拐点,共同确定水文要素突变年份。结果表明,黄河宁夏段典型支流近年来径流量和输沙量年际变化大,水沙锐减,这与慕丹丹等在黄河宁夏段得到的水沙变化结果<sup>[23,35-36]</sup>一致。累积斜率法、水文法、水保法分析均表明人类活动是水沙变化的主要因素,说明分析结果基本可靠。

本文进一步量化了人类活动中各项水土保持措施对水沙变化的贡献率,结果显示黄河宁夏段典型流域水沙变化与下垫面的治理密切相关。根据水土保持措施面积统计,清水河流域水土保持措施总面积在 2000 年左右开始快速增长,清水河流域内有中小型水库约 90 座,拥有同心、固海两大扬黄灌溉工程,各种人类活动对流域的径流量和输沙量都有很大的影响,而输沙量突变年份为 2002 年,这与流域内在 2000 年开始大力推进坝地建设、封禁治理、植树种草等各项水土保持措施有很大关系。在人类活动对流域水沙变化的研究中,清水河流域减水减沙效益最大的水土保持措施都为淤地坝,淤地坝的减水效益占比 42.9%,减沙效益占比 94.5%,这与马进国等定性分析得到的影响宁夏清水河流域水沙变化的因素(如降雨、水库运用、淤地坝建设等)<sup>[37]</sup>吻合。对于苦水河流域,通过累积斜率法和水文法分析表明人类活动是造成流域水沙变化的主要因素,这与傅彦超等通过双累积曲线法分析得到的结果<sup>[38]</sup>一致。

在分析水沙变化驱动因素的贡献中,采用累积斜率法、水文法、水保法所得结果存在偏差,这在多种方法对比驱动因素中较为常见。例如,蒋凯鑫等在黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析中,采用双累积曲线法、水文法、弹性系数法以及水保法来分析无定河的输沙变化驱动因素,也存在多种方法对比有差别的现象<sup>[39]</sup>。本文中,采用累积斜率法分析水沙变化时将降雨量作为变量,未考虑流域蒸散发、减水减沙措施的开展以及减水减沙作用的滞后性,也存在对径流量、输沙量可能有着重要影响的因素没有参与分析计算的问题,从而造成计算结果中

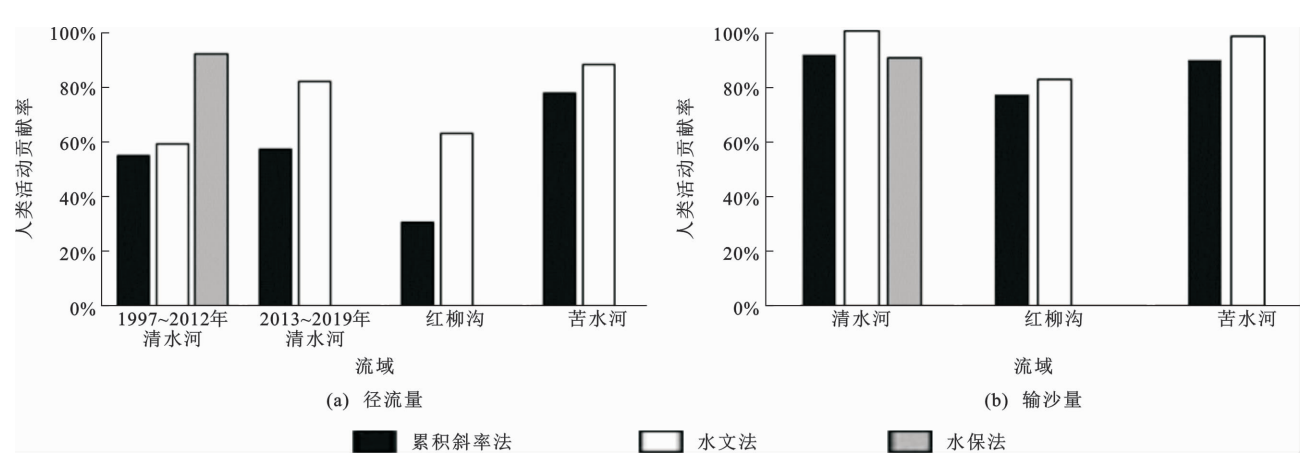


图 5 不同方法分析人类活动贡献率对比

Fig. 5 Comparisons of Contribution Rate of Human Activity by Different Methods

人类活动对水沙变化的贡献率计算偏小,这也是累积斜率法计算人类活动贡献率得到的结果小于水文法的原因。而水保法尚不能考虑到影响流域水沙变化的所有因素,如水土流失治理面积的有效性、重复性,不同水土保持措施之间的耦合性等,这可能会造成与其他方法计算结果存在误差。但累积斜率法、水文法和水保法的计算结果在表征主要驱动因素方面一致,均显示人类活动是水沙变化的主导因素。

流域的径流量和输沙量具有不确定性,对水沙变化的影响因素应该是多样的,因此目前有关人类活动对流域水沙变化的影响评价方法有待优化。例如,水文法在计算清水河流域输沙量变化驱动因素时,人类活动的贡献率超过了 100%,这主要是因为经相关性分析采用累积径流量-累积降雨量、累积输沙量-累积降雨量作为水文模型,在累积计算中导致误差逐渐积累增大。在未来的研究中,应从流域复杂非线性角度,建立包含气候、下垫面的多层次水沙模型<sup>[40]</sup>,更深入地研究人类活动对流域水文过程的影响,探索流域减水减沙效益计算的新方法<sup>[41]</sup>,分析黄河上游近期水沙变化对流域内植被和土地利用变化的响应<sup>[42]</sup>,为继续开展黄土高原水土流失治理提供支撑。

## 5 结 语

本文运用滑动平均法、Mann-Kendall 突变检验和双累积曲线法明确了 1989~2019 年黄河宁夏段支流的水沙变化规律,运用累积斜率法、水文法和水保法量化了水沙变化驱动因素。

(1)通过滑动平均法和 Mann-Kendall 突变检验分析典型流域水沙变化趋势。清水河流域年际降雨量呈现不明显减少趋势,径流量波动较大,输沙量整体呈现减少趋势;红柳沟流域年际降雨量小幅波

动,径流量波动变化较大,输沙量总体逐渐减少;苦水河流域降雨量总体呈减少趋势,2008 年后降雨量逐渐减少,径流量略微增长后持续下降,输沙量在 2002 年后急剧减少。

(2)由 Mann-Kendall 突变检验和双累积曲线法确定突变年份后,进而确定不同研究期间水沙变化驱动因素。人类活动在水沙变化中占据主导地位且贡献率逐渐增大,气候变化贡献率小于人类活动。采用累积斜率法和水文法分析流域水沙变化驱动因素,除红柳沟在径流量变化驱动因素计算结果上相差较大外,其他流域的径流量和输沙量变化的主导因素均为人类活动,且两种方法计算结果相差不超过 10%,可见累积斜率法和水文法计算结果较为一致。采用水保法在水沙变化驱动因素分析方面和另外两种方法计算结果均表明人类活动是主要因素。其区别在于:在径流量变化方面,水保法计算的人类活动贡献率比累积斜率法和水文法更大;在输沙量变化方面,水保法计算人类活动的贡献率与累积斜率法的计算结果近似。

(3)采用水保法分析清水河流域水沙变化的驱动因素,通过指标法明确人类活动中各项水土保持措施对减水减沙的贡献。结果表明:人类活动是造成水沙变化的主要因素。具体来说,在梯田、水土保持林、人工种草、淤地坝等各项水土保持措施中,在减水效益方面占据主导地位的是淤地坝和梯田,其减水贡献率分别为 42.9%、29.0%;而在减沙效益方面占据主导地位的是淤地坝,其减沙贡献率为 94.5%。

## 参考文献:

## References:

[1] JIA L, YU K X, LI Z B, et al. Temporal and Spatial

- Variation of Rainfall Erosivity in the Loess Plateau of China and Its Impact on Sediment Load[J]. *Catena*, 2022,210:105931.
- [2] YIN S H,GAO G Y,RAN L S,et al. Extreme Streamflow and Sediment Load Changes in the Yellow River Basin:Impacts of Climate Change and Human Activities[J]. *Journal of Hydrology*,2023,619:129372.
- [3] 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*,2022,20(5):976-987.  
ZHANG Qing-qing, ZHONG De-yu, JIA Bao-zhen. 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.
- [4] WANG Z J,XU M Z,LIU X,et al. Quantifying the Impact of Climate Change and Anthropogenic Activities on Runoff and Sediment Load Reduction in a Typical Loess Plateau Watershed[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*,2022,39:100992.
- [5] 刘晓燕. 黄土高原现状产沙情势评价[J]. *水利学报*,2023,54(1):24-33.  
LIU Xiao-yan. Evaluation on Present Status of Sediment Yield in the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2023,54(1):24-33.
- [6] MA X Q,SHI C X,PENG J,et al. Quantitative Ascription of Sediment Discharge Changes of Two Highly Sediment-loaded Tributaries of the Yellow River in China:The Importance of Selecting Rainfall Index and Timescale[J]. *Water*,2021,13(6):845.
- [7] 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.  
SUN Qian,YU Kun-xia,LI Zhan-bin,et al. The Trends of Streamflow and Sediment and Their Driving Factors in the Middle Reaches of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*,2018,73(5):945-956.
- [8] 刘 强,蔡学娅,刘君怡,等. 黄河中游窟野河流域水沙关系变化特征及其成因分析[J]. *水土保持研究*,2022,29(4):68-74.  
LIU Qiang,CAI Xue-ya,LIU Jun-yi,et al. Variation Characteristics and Causes of Runoff-sediment Relationship in Kuye River Basin in the Middle Reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2022,29(4):68-74.
- [9] 夏 露,马耘秀,宋孝玉,等. 黄河中游昕水河流域水沙变化及归因研究[J]. *水土保持学报*,2021,35(6):109-115.  
XIA Lu,MA Yun-xiu,SONG Xiao-yu,et al. Study on the Variation and Attribution of Runoff and Sediment in Xinshui River Watershed of Middle Yellow River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2021,35(6):109-115.
- [10] WANG H X,LIU J H,GUO W X. The Variation and Attribution Analysis of the Runoff and Sediment in the Lower Reach of the Yellow River During the Past 60 Years[J]. *Water Supply*,2021,21(6):3193-3209.
- [11] 王冰洁,李二辉,王彦君,等. 黄河中游日和年输沙率-流量关系空间变化及影响因素[J]. *清华大学学报(自然科学版)*,2020,60(5):440-448.  
WANG Bing-jie, LI Er-hui, WANG Yan-jun, et al. Spatial Variations and the Factors Influencing Daily and Annual Sediment Rating Curves in the Middle Yellow River Basin[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*,2020,60(5):440-448.
- [12] XU J,JIANG X H,SUN H T,et al. Driving Forces of Nature and Human Activities on Water and Sediment Changes in the Middle Reaches of the Yellow River in the Past 100 Years[J]. *Journal of Soils and Sediments*,2021,21(6):2450-2464.
- [13] 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.  
LI Hui-juan, SHI Chang-xing, MA Xiao-qing, et al. Quantification of the Influencing Factors of Runoff and Sediment Discharge Changes of the Kuye River Catchment in the Middle Reaches of the Yellow River [J]. *Resources Science*,2020,42(3):499-507.
- [14] HU J F,LI P F,ZHAO G J,et al. Effects of Climate Variability and Anthropogenic Factors on Sediment Load Reduction in the Weihe River Basin,China[J]. *Hydrological Processes*,2022,36(4):e14562.
- [15] 邱德勋,穆兴民,赵广举,等. 渭河流域极端降雨变化趋势及其对水沙情势的影响[J]. *水土保持研究*,2022,29(6):65-72.  
QIU De-xun, MU Xing-min, ZHAO Guang-ju, et al. Effects of Precipitation Extremes Change on Streamflow and Sediment Load in Weihe River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2022,29(6):65-72.
- [16] 冯绍杰,穆兴民,高 鹏,等. 泾河水沙变化特征及其影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*,2022,36(10):151-157.  
FENG Shao-jie, MU Xing-min, GAO Peng, et al. Trends of Runoff and Sediment Loads in the Jinghe River Basin and Influencing Factors[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,2022,36(10):151-157.

- [17] 程亦菲,夏军强,周美蓉,等.一维水沙耦合模型参数敏感性分析:以2020年黄河下游洪水演进为例[J].水力发电学报,2022,41(12):100-110.  
CHENG Yi-fei, XIA Jun-qiang, ZHOU Mei-rong, et al. Parameter Sensitivity Analysis of Dynamically Coupled One-dimensional Morphodynamic Model; Case Study of Lower Yellow River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(12): 100-110.
- [18] 鲍振鑫,张建云,王国庆,等.基于水文模型与机器学习集合模拟的水沙变异归因定量识别:以黄河中游窟野河流域为例[J].水科学进展,2021,32(4):485-496.  
BAO Zhen-xin, ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing, et al. Quantitative Assessment of the Attribution of Runoff and Sediment Changes Based on Hydrologic Model and Machine Learning: A Case Study of the Kuye River in the Middle Yellow River Basin[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 485-496.
- [19] 吴丹,夏润亮,李涛,等.黄河水沙变化数据仓库构建关键技术研究[J].人民黄河,2022,44(10):159-162.  
WU Dan, XIA Run-liang, LI Tao, et al. Study on Key Technologies of Data Warehouse Construction of Water and Sediment Change in the Yellow River[J]. Yellow River, 2022, 44(10): 159-162.
- [20] MIAO J D, ZHANG X M, ZHAO Y, et al. Evolution Patterns and Spatial Sources of Water and Sediment Discharge over the Last 70 Years in the Yellow River, China: A Case Study in the Ningxia Reach[J]. Science of the Total Environment, 2022, 838: 155952.
- [21] 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 Jun-jian, ZHAO Guang-ju, MU Xing-min, 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.
- [22] 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 Wen-long, ZHAO Guang-ju, MU Xing-min, 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.
- [23] 慕丹丹,褚金镛,高博.基于小波变换的黄河宁夏段水沙变化趋势研究[J].人民黄河,2021,43(11):65-68,75.  
MU Dan-dan, CHU Jin-di, GAO Bo. Evolution Law of the Runoff and Sediment Discharge in Ningxia Reach of the Yellow River Based on Wavelet Transform[J]. Yellow River, 2021, 43(11): 65-68, 75.
- [24] 余欣,李其江,刘希胜,等.湟水流域水沙情势演变及驱动力分析[J].人民黄河,2022,44(9):64-70.  
YU Xin, LI Qi-jiang, LIU Xi-sheng, et al. Analysis of Water and Sediment Situation Evolution and Driving Force in Huangshui River Basin[J]. Yellow River, 2022, 44(9): 64-70.
- [25] YAO H F, SHI C X, SHAO W W, et al. Impacts of Climate Change and Human Activities on Runoff and Sediment Load of the Xiliugou Basin in the Upper Yellow River[J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 481713.
- [26] 夏岩,张姝琪,高文冰,等.黄土高原变绿对黄河中游延河流域径流演变的影响估算[J].地球科学与环境学报,2020,42(6):849-860.  
XIA Yan, ZHANG Shu-qi, GAO Wen-bing, et al. Influence of Greening Loess Plateau on Streamflow Change in Yellow River Basin of the Middle Yellow River, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(6): 849-860.
- [27] ZHANG B Q, TIAN L, HE C S, et al. Response of Erosive Precipitation to Vegetation Restoration and Its Effect on Soil and Water Conservation over China's Loess Plateau[J]. Water Resources Research, 2023, 59(1): e2022WR033382.
- [28] 孙莉英,郑明国,蔡强国,等.张家界地区溇水流域洪水特征分析[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2014,42(2):95-102.  
SUN Li-ying, ZHENG Ming-guo, CAI Qiang-guo, et al. Analysis of Flood Characteristics in Loushui Basin of Zhangjiajie Region[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2014, 42(2): 95-102.
- [29] 韩建纯,李鹏,杨志,等.基于随机森林模型的茹河流域水沙变化及其影响因素研究[J].生态学报,2023,43(10):4190-4201.  
HAN Jian-chun, LI Peng, YANG Zhi, et al. Variation and Influencing Factors of Runoff and Sediment in Ru River Basin Based on Random Forest Model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4190-4201.
- [30] 王鸿翔,刘静航,赵颖异,等.黄河下游水沙变化与归因分析[J].人民黄河,2021,43(4):24-29,71.  
WANG Hong-xiang, LIU Jing-hang, ZHAO Ying-yi, et al. Analysis of Water and Sediment Variation and

- Attribution in the Lower Yellow River[J]. Yellow River, 2021, 43(4): 24-29, 71.
- [31] 汪 岗, 范 昭. 黄河水沙变化研究(第一卷)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- WANG Gang, FAN Zhao. Study on the Change of Water and Sediment of the Yellow River(Volume I) [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2002.
- [32] 冉大川, 张 栋, 焦 鹏, 等. 西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 143-149.
- RAN Da-chuan, ZHANG Dong, JIAO Peng, et al. Analysis on the Attribution of Water and Sediment Changes in Xiliugou Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 143-149.
- [33] 赵 越. 祖厉河流域水沙变化特征及水土保持减水减沙效益研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- ZHAO Yue. Study on Variation Characteristics of Water and Sediment and Sediment Reduction Benefits of Water and Soil Conservation in Zuli River Basin[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.
- [34] 蒋凯鑫. 黄河中游多沙粗沙区典型流域水沙变化归因对比分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- JIANG Kai-xin. Attributional Comparative Analysis of Runoff and Sediment Discharge Change in Typical Basins in Rich and Coarse Sediment Area in the Middle Reaches of the Yellow River[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [35] 岳志春, 马晓阳, 田福昌. 黄河宁夏段近期水沙变化及河势演变分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(2): 117-123.
- YUE Zhi-chun, MA Xiao-yang, TIAN Fu-chang. Analysis on Recent Water-sediment Variation and River Regime Evolution of Ningxia Section of Yellow River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(2): 117-123.
- [36] 朱婉依, 李昆鹏, 李丽珂, 等. 黄河宁夏段水沙演变规律及冲淤空间分布特征研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 28-33.
- ZHU Wan-yi, LI Kun-peng, LI Li-ke, et al. Evolution Law of Water and Sediment and Spatial Distribution Characteristics of Erosion and Deposition in the Ningxia Section of the Yellow River[J]. Yellow River, 2022, 44(8): 28-33.
- [37] 马进国, 郑艳爽, 张晓华, 等. 宁夏清水河流域水沙变化特点分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 57-63.
- MA Jin-guo, ZHENG Yan-shuang, ZHANG Xiao-hua, et al. Analysis on the Characteristics of Flow and Sediment Variation in Qingshui River Basin of Ningxia [J]. Hydro-science and Engineering, 2020(4): 57-63.
- [38] 傅彦超, 王友胜, 杨 志, 等. 近 30 年苦水河水沙变化特征及成因分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 224-232.
- FU Yan-chao, WANG You-sheng, YANG Zhi, et al. Analysis of Characteristics and Causes of Water and Sediment Changes in Recent 30 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 224-232.
- [39] 蒋凯鑫, 于坤霞, 曹文洪, 等. 黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 143-149.
- JIANG Kai-xin, YU Kun-xia, CAO Wen-hong, et al. Attributional Comparative Analysis of Runoff and Sediment Change in Typical Basin of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 143-149.
- [40] 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): 1028-1039.
- HU Chun-hong, ZHANG Xiao-ming. Several Key Questions in the Researches of Runoff and Sediment Changes and Trend Predictions in the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1028-1039.
- [41] 肖培青, 王玲玲, 杨吉山, 等. 大暴雨作用下黄土高原典型流域水土保持措施减沙效益研究[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1149-1156.
- XIAO Pei-qing, WANG Ling-ling, YANG Ji-shan, et al. Study on Sediment Reduction Benefits of Soil and Water Conservation Measures in Typical Watersheds in the Loess Plateau Under the Heavy Rainfall [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1149-1156.
- [42] 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 Jia-yun, LI Jun-hua, TIAN Shi-min, et al. Variation of Water and Sediment in Main Stream and Tributaries of Ningxia Reach in the Yellow River in Recent 70 Years[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(3): 38-44.