

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.028.

范馨逸, 胡作龙, 赵广举, 等. 2007—2017年府谷—龙门段河道冲淤特征及其动力机制[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 211-216.

FAN Xinyi, HU Zuolong, ZHAO Guangju, et al. Characteristics and Dynamic Mechanism of River Channel Sourcing and Silting in the Fugu-Longmen Section During 2007—2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 211-216.

2007—2017年府谷—龙门段河道冲淤特征及其动力机制

范馨逸¹, 胡作龙², 赵广举^{1,3,4}, 穆兴民^{1,3}, 高鹏^{1,3,4}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.河南水环境勘测设计有限公司, 河南 三门峡 472000; 3.中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的]河道演变是水流、泥沙与河床边界相互作用的结果,对水利工程的安全、洪涝灾害的防控有显著的影响。黄河中游府谷—龙门段位于晋陕峡谷地带,以黄土高原沟壑侵蚀地貌为主,流经的黄土高原地区是黄河泥沙的主要来源,因此研究该河段的河道冲淤特征及影响因素对控制黄河中游水土流失有重要意义。[方法]基于府谷、吴堡、龙门3个典型水文站径流泥沙及河道断面数据,分析了2007—2017年府谷—龙门段河道冲淤特征及相关影响因素。[结果](1)近11年来府谷—龙门段河道整体表现为冲刷,其中府谷—吴堡段表现为河道冲刷量逐渐减小,吴堡—龙门段表现为河道冲刷逐年加剧。(2)府谷—吴堡段呈水减沙增的趋势,吴堡—龙门段整体表现为水多沙少,两河段河道冲淤量与水流含沙量变化同步。(3)府谷—吴堡段悬移质泥沙中值粒径呈增加趋势,河道冲刷变缓;吴堡—龙门段悬移质泥沙中值粒径呈减小趋势,加剧河道侵蚀。(4)府谷站入黄泥沙量增加,河道侵蚀力降低,河道冲刷变缓;吴堡站入黄泥沙量减少,河道侵蚀力增强,河道处于冲刷的状态。[结论]径流泥沙的变化在很大程度上影响了府谷—龙门段河道冲淤。在生态环境有所改善的背景下,研究该河段河道冲淤特征及动力机制对进一步减少中游地区水土流失、预防中下游洪涝灾害具有重要的意义。

关键词: 黄河中游; 河道冲淤; 水沙变化; 中值粒径; 水沙关系曲线

中图分类号: TV147

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0211-06

Characteristics and Dynamic Mechanism of River Channel Sourcing and Silting in the Fugu-Longmen Section During 2007—2017

FAN Xinyi¹, HU Zuolong², ZHAO Guangju^{1,3,4}, MU Xingmin^{1,3}, GAO Peng^{1,3,4}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Henan Water Environment Survey and Design Co., Sanmenxia, Henan 472000, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] River evolution is the result of the interaction between river flow and riverbed boundaries, and has a significant impact on the safety of water projects and the prevention and control of flooding. The Fugu-Longmen section of the middle reaches of the Yellow River is located in the Jin-Shan canyon, and is dominated by gully erosion landform of the Loess Plateau. Riverbank erosion is the main source of sediment in this area. So it is important to study the characteristics and influencing factors of river channel sourcing and silting in this section to control soil erosion in the middle reaches of the Yellow River. [Methods] Based on

收稿日期: 2022-04-07

修回日期: 2022-05-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原水土保持措施潜力及其对河流泥沙的调控机制”(U2243211)

第一作者: 范馨逸(1999—), 女, 宁夏固原人, 在读硕士研究生, 主要从事生态水文及水土保持研究。E-mail: fanxinyi26@icloud.com

通信作者: 高鹏(1976—), 男, 陕西扶风人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事生态水文及水土保持研究。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

data of runoff, sediment and river cross-section in three typical hydrological stations, Fugu, Wubu and Longmen, the characteristics of channel erosion and siltation, and the related influencing factors in Fugu-Longmen section from 2007 to 2017 were analysed. [Results] (1) The channel exhibited erosion in Fugu-Longmen section in the past 11 years, with the channel in Fugu-Wubu section exhibiting a gradual decrease and the channel exhibiting an increase in Wubu-Longmen section. (2) The Fugu-Wubu section showed a trend of decreasing water and increasing sediment, while the Wubu-Longmen section showed an overall trend of more water and less sediment. The amount of channel erosion and siltation in the two sections was synchronized with the change of sediment content in the water flow. (3) The median size of suspended sediment in the Fugu-Wubu section increased, then river scour became slower. The median size of suspended sediment in the Wubu-Longmen section tended to decrease, exacerbating river erosion. (4) The amount of incoming yellow sediment in the Fugu-Wubu section increased, the erosive force of the river weakened, and river scouring became slower. The Wubu-Longmen section was in a state of scouring due to human intervention, which reduced the amount of sediment entering the Yellow River and increased the erosive force of the river. These results are consistent with the pattern of channel evolution in both river sections. [Conclusion] The change of runoff and sediment have greatly affected the siltation of the Fugu-Longmen section. Under the background of improved ecological environment, it is significance to study the characteristics and dynamic mechanism of river channel dredging in this section of the river to further reduce soil erosion in the middle reaches of the river and prevent flood disasters in the middle and lower reaches of the river.

Keywords: middle reaches of the Yellow River; river channel scouring and silting; water-sediment variations; median particle size; sediment rating curve

河道演变是以泥沙运动为纽带,水流与河床相互作用的结果^[1],研究河道冲淤变化,对防治水土流失,减少洪水风险,改善流域生态、景观结构,保障人民生命和财产安全有重要的意义^[2]。因此国内外许多专家和学者对河道断面演变及其影响因素进行了大量研究。黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带,其高质量发展事关中华民族的永续发展,但由于黄河水少沙多、水沙关系不协调,河道善淤,易引发洪涝灾害,阻碍区域流域经济发展、危害百姓生命健康。赵占超^[3]、曹绮欣^[4]、林秀芝^[5]、李鹏^[6]等通过黄河部分流域实测断面及水沙数据分析了河道冲淤量与水沙搭配的关系,指出河道侵蚀和泥沙淤积与河流泥沙运移过程和输沙量的变化有关;韩香举等^[7]基于水下地形数字高程模型及实测水沙资料,探讨了黄河口滨海区冲淤变化与水沙因子及泥沙中值粒径的关系;冀鸿兰等^[8]根据1988—2018年黄河内蒙古段河道边界分析其变化特征及影响因素,发现水力条件、河岸物质构成是造成河道演变时空差异的主要因素,同时,在一定程度上河道演变也受水利工程、水土保持工程等人造因素的影响;Yao等^[9]基于1958—2000年黄河宁蒙河段的遥感卫星图像,剖析了该河段河岸侵蚀面积变化规律及其内在机制;刘晓芳等^[10]通过1964—2012年黄河口实测水沙和地形资料,分析黄

河口尾间河道冲淤和水位对变化规律及影响因素,分析发现导致1964—2012年黄河口尾间河道以淤积为主的主要因素是流路改道。

黄河中游地处晋陕峡谷地带,流经的黄土高原地区,土质疏松、植被覆盖度低、生态环境脆弱,该地区的水土流失是黄河泥沙的主要来源^[11]。据统计,黄河中有90%的泥沙来自于黄土高原^[12],水沙不平衡,引发黄河中游河道冲淤变化,加剧中游地区水土流失及下游地区“地上悬河”的发展。但自1999年国家开始实施退耕还林(草)工程以来,黄河中游主要泥沙来源区径流量、输沙量显著减少^[13],河流的输沙能力发生变化,在一定程度上对下游的河道演变产生影响,为有效预防黄河下游地区的洪涝灾害的发生、建立良好生态环境,研究黄河中游河道演变规律及影响因素显得尤为重要。但现有的大部分研究都侧重于以黄土高原生态环境改善前黄河上、下游河道冲淤变化规律及单一影响因素为研究对象,而系统分析退耕还林(草)工程实施后黄河中游河道演变特征及影响因素的研究鲜少。因此,本文在获取黄河中游流量、输沙量及实测大断面等数据的基础上,就黄河府谷—龙门段近期的河道冲淤状况进行分析,并进一步确定其驱动因素,为认识多沙河流河床演变提供理论依据,同时,为黄河中游地区水沙调控、黄河流域高质量发展提供技术支撑。

1 研究区概况

黄河中游府谷—龙门段位于晋陕峡谷地带,地理坐标为 $110^{\circ}35' - 111^{\circ}05'E, 35^{\circ}40' - 37^{\circ}27'N$, 区间段干流全长 570 km, 河道纵比降约为 0.93%, 除府谷河谷宽度较大之外, 其余的大多在 400~600 m。中游府谷—龙门区间内以黄土高原沟壑侵蚀地貌为主, 土质疏松、谷坡陡峻、起伏较大、植被覆盖度低, 降水集中且多为暴雨, 水土流失严重, 区域侵蚀模数为 5 000~15 000 $t/km^2 \cdot a$ 。中游府谷—龙门段水文站分布及研究河段见图 1。

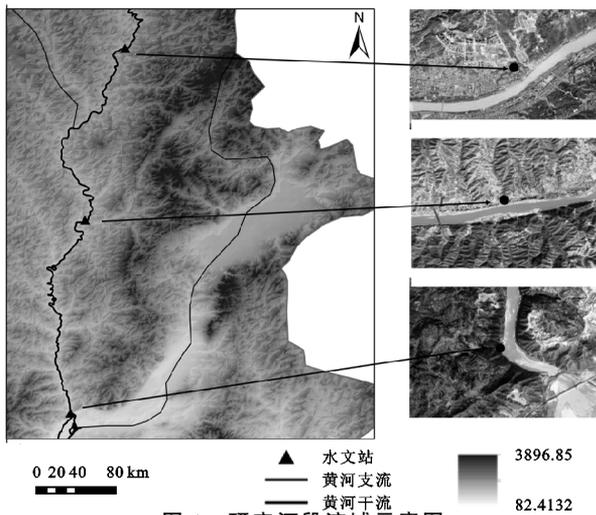


图 1 研究河段流域示意图

2 数据及方法

2.1 数据

本文选用黄河中游 2007—2017 年府谷、吴堡、龙门 3 个水文站逐年、逐日的流量、输沙量, 2007—2017 年府谷、吴堡 2 个水文站实测悬移质泥沙中值粒径, 及 2007—2018 年 3 个水文站典型断面的实测数据, 数据资料均来源于水利部水文局《黄河流域水文资料》。

2.2 方法

本文通过 3 个水文站的典型断面及分区段计算冲淤量, 研究府谷—龙门段 2007—2017 年河道冲淤的变化特征及其空间分布, 并由此结合研究区河段的水沙过程对河道冲淤的动力机制进行分析研究。

2.2.1 断面法 目前, 计算河道冲淤量的方法有断面法、网格地形法和输沙率法^[14]。本研究的研究区域位于晋陕峡谷地带, 其河道的冲淤变化主要集中在垂直方向, 断面法计算冲淤量能够更好的体现出河道主槽高程变化与河道整体冲淤的关系, 因此本文采用断面法计算府谷—吴堡段、吴堡—龙门段的河道冲淤量, 并采用区间河段冲淤量对比方法, 既可反映府谷—龙门段河道冲淤的空间分布特征, 又可

以详细地了解各区间段河道冲淤随时间的变化。计算公式如下:

$$\Delta V = \left(\frac{\Delta A_i + \Delta A_{i+1}}{2} \right) \times \Delta L_{i,i+1} \quad (1)$$

式中: ΔV 为冲淤量 ($10^6 m^3$); ΔA_i 为第 i 个断面的冲淤面积 (m^2); $\Delta L_{i,i+1}$ 为第 i 和第 $(i+1)$ 断面的距离 (m)。

2.2.2 水沙关系曲线 水沙关系曲线不仅能表示流域土壤侵蚀强度和泥沙输移量, 还能体现水流携沙能力的变化, 即河流侵蚀力的变化^[15]。因此本文选用水沙关系曲线 (Sediment Rating Curves) 研究黄河中游府谷—龙门段河道冲淤与流域产沙特征及河流侵蚀力的关系。其表达式为:

$$S = aQ^b \quad (2)$$

式中: S 指含沙量 (kg/m^3); Q 指流量 (m^3/s); a 和 b 为拟合得到的水沙关系曲线参数。水沙关系曲线参数中的 a 代表流域的产沙特性, 表示人为干预下流域土壤侵蚀强度和泥沙迁移量的变化, 包括小流域水土保持措施、水利工程等; b 代表侵蚀动力, 表示河流携沙能力, 即河流的侵蚀力大小, 受河道形状、泥沙粒径等因素的影响^[16]。 a 和 b 值的高低不仅能表明流域输沙特性的变化, 且与河道的形态存在一定的关系^[17]。

3 结果与分析

3.1 河道的冲淤状况

3.1.1 典型断面形态变化 府谷、吴堡和龙门站位于晋陕峡谷, 因此河道的冲淤变化特征主要表现为主槽垂向高程的变化。图 2 是 2007—2018 年府谷、吴堡、龙门站的典型断面形态调整过程, 可以看出府谷和龙门站典型断面的变化特点为持续冲刷下切, 深槽刷深, 过流面积持续增加, 吴堡站则以冲淤交替变化为主。

2007—2018 年府谷站 (图 2A) 典型断面冲刷剧烈, 断面形态由“U”型河槽逐渐向“V”型河槽发展, 且深泓点逐渐向右摆动。2010 年主槽发生明显冲刷, 同一水位下过水面积增大, 与 2009 年相比, 深泓高程平均下降 0.3%, 垂直冲刷深度为 2.16 m。此外, 在同一年河床左侧边壁发生较大的右移, 变化幅度为 26.2 m。2012 年府谷站在汛期遭受特大洪水, 因此 2013 年河道深泓高程平均降低 1.02 m, 河道过水面积扩大了 8.7%, 自此后河道断面基本保持稳定, 冲淤交替, 以冲刷为主, 深泓高程在 804~805 m 波动。2007—2018 年吴堡站 (图 2B) 断面整体变化幅度较小, 表现为冲刷, 与 2007 年相比, 2018 年的深槽冲刷降低了 2.94 m。其中在 2011 年河床右侧壁

左移,河槽束窄,横向变化的幅度为 39.2 m。2007—2018 年龙门站(图 2C)典型断面表现为持续的冲刷下切,与 2007 年相比,2018 年的深泓高程平均下降 1.1%,形态由最初的“矩形”向“U”型转变,且向左高右低的倾斜状态发展。在 2015 年河道右侧发生明显的垂向侵蚀,与 2014 年相比,深槽下切 0.2%,过水面积扩大 17.9%,且自 2015 年开始,随着河流的侧蚀作用,河道冲刷整体右移。

3.1.2 河道冲淤量的变化 本文采用断面面积差法对府谷—龙门河段冲淤量进行统计计算,图 3 为 2007—2017 年府谷—吴堡段、吴堡—龙门河段冲淤量的计算结果。从空间上来看,2007—2017 年府谷—龙门河段整体表现为冲刷,且冲刷剧烈的区域主要集中在吴堡—龙门河段,累积冲刷量为 $148.8 \times 10^6 \text{ m}^3$,是府谷—龙门河段的 2 倍,原因可能是,水沙特性不同导致河道的输沙能力不同,从而使两段河道冲淤存在差异。

从时间上来,府谷—吴堡河段(图 3A)冲淤变化具有明显的阶段性差异,2007—2012 年河道处于强冲刷状态,年均冲刷量为 $1.45 \times 10^7 \text{ m}^3$,至 2012 年之后,随着时间的推移冲刷速率逐渐衰减,年均冲刷量仅有 $6.0 \times 10^5 \text{ m}^3$,相比于前一个阶段冲刷速率下降了 96%。因此,可将 2007—2017 年府谷—吴堡段的河道演变过程划分为两个阶段,即 2007—2012 年为强冲刷阶段,2013—2017 为缓慢冲刷阶段。2007—2017 年吴堡—府谷河段(图 3B)整体处于冲刷状态,河道冲刷强度较大,年均冲刷量为 $1.35 \times 10^7 \text{ m}^3$,且多数年份处于被水流强烈侵蚀的状态,少数表现为淤积,冲刷时间持续较长,因此成为府谷—龙门河段侵蚀最剧烈的区域。

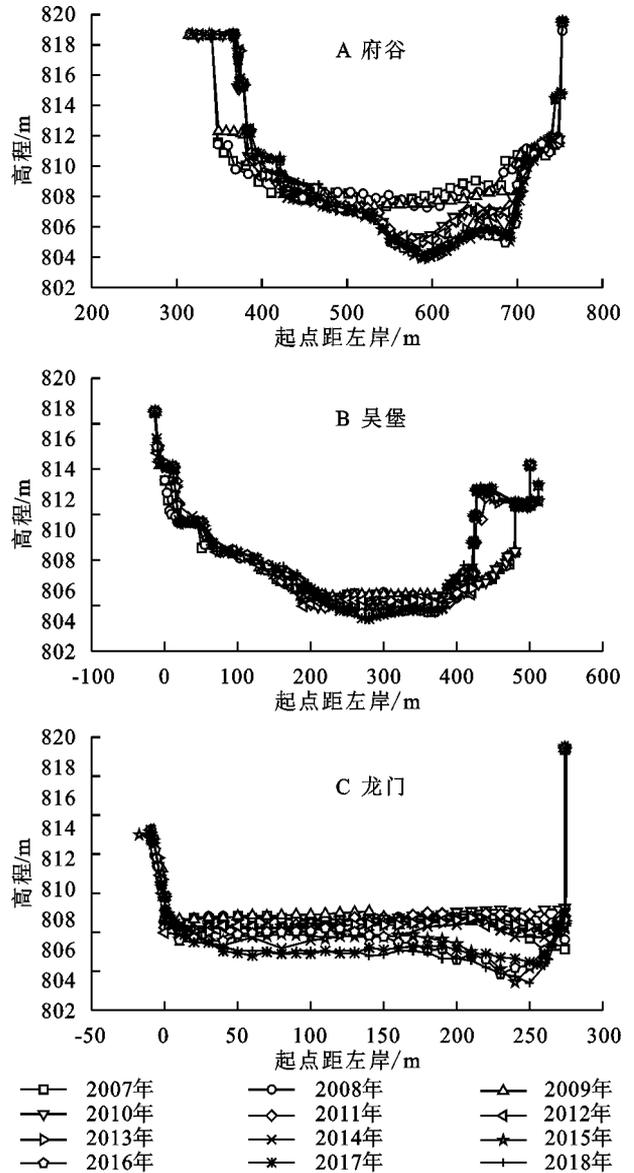
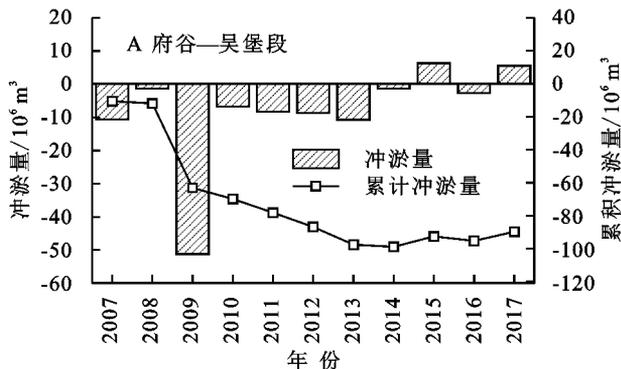


图 2 2007—2018 年府谷、吴堡、龙门站典型断面的变化过程

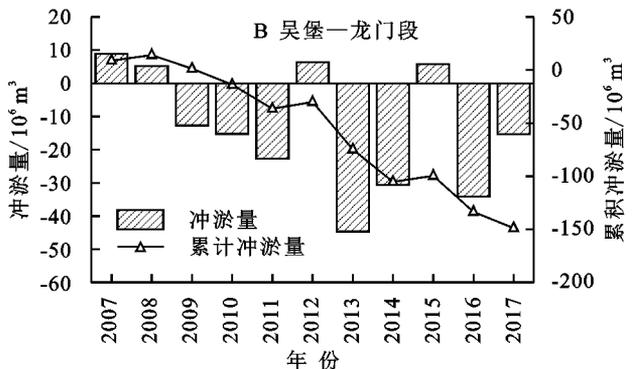


图 3 2007—2017 年府谷—吴堡段、吴堡—龙门段冲淤量及累计冲淤量变化

3.2 河道冲淤的动力机制

3.2.1 径流—输沙量变化过程 径流—输沙过程是引起河道冲淤的根本原因^[18-19],径流是输沙的主要动力,沙量是河床淤积的主要来源^[20]。

图 4 是 2007—2017 年府谷—吴堡段、吴堡—龙

门段径流—输沙量的变化过程。从图 4 中可知:2007—2017 年府谷—吴堡段径流量整体呈减小的趋势,输沙量则缓慢增加。其中由于 2012 年遭受特大洪水,区间内径流量和输沙量发生剧烈变化,径流量和输沙量较 2011 年分别增长了 212% 和 672%。

综合分析表明, 府谷—吴堡河段初期输沙量较小, 水流含沙量不能满足水流挟沙能力, 需河道床沙补充, 导致河道遭受持续冲刷, 后期随水流含沙量逐渐增加至满足水流挟沙能力, 河道的冲刷减缓甚至部分年份发生淤积, 这是造成 2007—2017 年府谷—吴堡河段、吴堡—龙门河段冲淤量差异显著的主要原

因。2007—2017 年吴堡—龙门段内输沙量保持在较低水平, 年均输沙量为 $3\,429 \times 10^4$ t, 但由于该河段内径流量的增加, 水流含沙量随之减小, 不能满足水流携沙能力, 因此, 造成吴堡—龙门段河道侵蚀严重, 冲刷量大, 这与赵占超等^[3]在黄河内蒙古河段所得的结果一致。

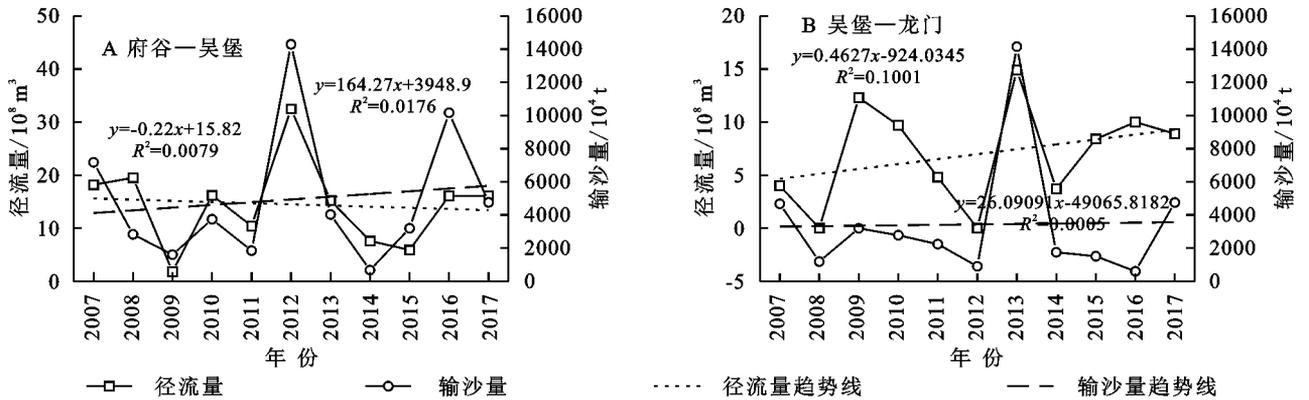


图 4 2007—2017 年府谷—吴堡段及吴堡—龙门段径流—输沙量的变化过程

3.2.2 悬移质泥沙中值粒径 水流对悬移质泥沙的携运能力, 与其中值粒径呈反比, 即在一定水力条件下, 随悬移质泥沙中值粒径的增加, 水流携沙能力减弱, 易引发河道内泥沙的淤积^[21]。图 5 是 2007—2017 年府谷—吴堡段、吴堡—龙门段悬移质泥沙中值粒径的变化过程。

3.2.3 水沙关系曲线 2007—2017 年府谷、吴堡站水沙关系曲线参数 a, b 的变化趋势见图 6。府谷站 2007—2017 年 a 和 b 的多年平均值分别为 2.96×10^{-3} , 1.38, 虽然其变化趋势不显著, 但根据趋势线的斜率可以发现 a 和 b 分别呈增加和减小的趋势(图 6A), 表明 2007—2017 年府谷站在人类活动干预下, 流域产沙特性发生变化, 土壤侵蚀量较大, 入黄泥沙量增加, 且河流自身的侵蚀力减弱, 单位水流功率降低, 从而导致河道由初期强冲刷转变成后期的缓慢冲刷状态, 这与该河道冲淤变化的阶段性特征相吻合。

2007—2017 年府谷—吴堡段和吴堡—龙门段多年平均悬移质泥沙中值粒径分别为 0.018 mm 和 0.022 mm。其中府谷—吴堡段的悬移质泥沙呈逐渐粗化的趋势, 至 2016 年中值粒径达到最大值 0.079 mm。在该河段内, 随悬移质泥沙中值粒径的增大, 水流输沙力逐渐减弱, 河道冲刷强度减缓, 河道冲刷量减小; 2007—2017 年吴堡—龙门段悬移质泥沙中值粒径虽无明显的变化趋势, 但趋势线的斜率为负, 说明该河道内的悬移质泥沙自 2007 年起略有细化的趋势。这表明较细的泥沙颗粒更容易被水流带走, 不易在河道内淤积, 且伴随高流量, 河道冲刷加剧, 导致吴堡—龙门段成为府谷—龙门段冲刷最严重的河段。

吴堡站 2007—2017 年 a 和 b 的多年平均值分别为 2.00×10^{-3} , 1.17, 整体的变化趋势见图 6B 所示, a 值呈减小的趋势, 说明 2007—2017 年吴堡站由于人类活动等因素的影响, 该流域的水土流失情况得到改善, 入黄泥沙量减少, 这些因素可能包括黄河水利工程以及退耕还林还草工程等水土保持措施等; b 值呈增加的趋势, 说明该河段水流携沙能力增强, 河流具有较高的侵蚀力, 导致河道冲刷严重, 这与水动力、河流侵蚀能力、河床初始形态等内部因素相关。

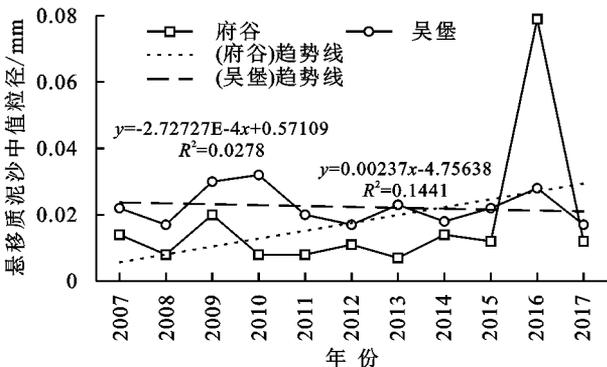


图 5 2007—2017 年府谷、吴堡悬移质泥沙中值粒径变化过程

4 结论

(1) 2007—2017 年府谷—龙门段河道整体表现为冲刷。府谷—吴堡段的冲淤变化以 2013 年为界表现出明显的阶段性差异, 前期(强冲刷阶段)冲刷强度大, 后期(缓慢冲刷阶段)冲刷强度减弱; 吴堡—龙门段自 2007 年就表现为冲刷强度逐渐增强, 且累积冲刷量为 1.488×10^8 m³, 是府谷—吴堡段的 2 倍。

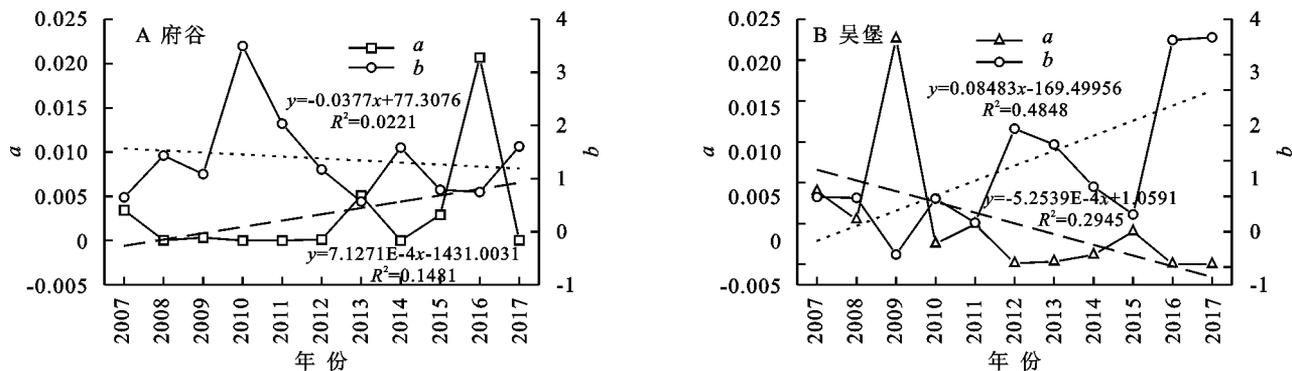


图6 2007—2017年府谷、吴堡站水沙关系曲线参数 a 、 b 的变化趋势

(2) 府谷—吴堡河段径流量整体呈减小趋势,输沙量缓慢增加,前期含沙量不能满足水流挟沙能力造成该河段遭受冲刷,后期随输沙量的增加,水流含沙量逐渐增加,能够满足水流挟沙力,河道出现淤积;吴堡—龙门河段年均径流量较大,输沙量较小,水流含沙量不能满足水流携沙能力,河道冲刷加剧。

(3) 府谷—吴堡河段悬移质泥沙中值粒径整体呈粗化趋势,河道冲刷变缓,冲刷量减小;吴堡—龙门河段悬移质泥沙中值粒径整体呈细化趋势,加剧河道侵蚀,冲刷量增加。

(4) 府谷站入黄泥沙量较大,且河流侵蚀力弱,下切侵蚀缓慢,河道冲刷量小;吴堡站入黄泥沙量少,水流的侵蚀力强,致使河道冲刷量大。这与两河道冲淤规律相吻合。

参考文献:

- [1] 许炯心,蔡强国,李炳元,等.中国河流地貌研究进展:纪念沈玉昌先生100年诞辰[J].地理学报,2016,71(11):2020-2036.
- [2] Das A K, Sah R K, Hazarika N. Bankline change and the facets of riverine hazards in the floodplain of Subansiri-Ranganadi Doab, Brahmaputra Valley, India [J]. Natural Hazards, 2012,64(2):1015-1028.
- [3] 赵占超,侯素珍,赖瑞勋,等.黄河内蒙古河段水沙及河床演变特性变化分析[J].水利水电技术(中英文),2022,53(2):109-120. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2022.02.011.
- [4] 曹绮欣,关凯,张冰洁,等.1960—2017年北洛河下游冲淤变化特征及其成因分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(2):74-80.
- [5] 林秀芝,董晨燕,苏林山,等.黄河小北干流冲淤与水沙响应关系分析[J].人民黄河,2019,41(5):5-8.
- [6] 李鹏,陈沈良,刘清兰,等.黄河尾间沙洲及河口形态对水沙变化的响应[J].泥沙研究,2022,47(2):57-64. DOI:10.16239/j.cnki.0468-155x.2022.02.009.
- [7] 韩香举,陈沈良,付作民,等.现行黄河口滨海区冲淤时空演变及其影响因素[J].海洋通报,2020,39(5):567-580.
- [8] 冀鸿兰,樊宇,翟涌光,等.1988—2018年黄河内蒙古段河道边界演变特征及影响因素[J].水土保持通报,2020,40(5):242-249,267.
- [9] Yao Z, Ta W, Jia X, et al. Bank erosion and accretion along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008[J]. Geomorphology, 2011,127(1/2):99-106.
- [10] 刘晓芳,王党伟,吉祖稳,等.黄河口尾间河道冲淤及其影响因素分析[J].泥沙研究,2020,45(5):42-47.
- [11] 穆兴民,巴桑赤烈, ZHANG Lu,等.黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J].泥沙研究,2007(2):36-41.
- [12] Yue X, Mu X, Zhao G, 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.
- [13] 蒋观滔,高鹏,穆兴民,等.退耕还林(草)对北洛河上游水沙变化的影响[J].水土保持研究,2015,22(6):1-6.
- [14] 侯珺,戴巧玉.河道冲淤量不同计算方法的结果与分析[J].陕西水利,2021(9):83-85.
- [15] Syvitski J P, Morehead M D, Bahr D B, et al. Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters[J]. Water Resources Research, 2000,36(9):2747-2760.
- [16] 夏绍钦,张会兰,郝佳欣,等.长江涪江小河流域水沙关系特性及其驱动因素研究[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1603-1613.
- [17] Yang G, Chen Z, Yu F, et al. Sediment rating parameters and their implications: Yangtze River, China[J]. Geomorphology, 2007,85(3/4):166-175.
- [18] 王延贵,胡春宏,刘茜,等.长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J].泥沙研究,2016(1):1-8.
- [19] 黎铭,张会兰,孟铖铖.黄河皇甫川流域水沙关系特性及关键驱动因素[J].水利水电科技进展,2019,39(5):27-35.
- [20] 谢炎,刘亚,范北林.冲积河流河道演变的水沙因子指标研究进展[J].人民长江,2019,50(10):32-36.
- [21] 许炯心,胡春宏,陈建国.不同粒径组泥沙对黄河下游沉积的影响及其在黄河治理中的意义[J].中国科学(编辑:技术科学),2009,39(2):310-317.