

近年黄河下游输沙功能的时空变化及其影响因素分析

张茹¹, 张志全^{2,3}, 罗凯³

(1.山西水利职业技术学院, 山西 运城 044000; 2.河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 3.黄河水利委员会 上游水文水资源局, 兰州 730030)

摘 要:黄河下游河道输沙功能受自然和人为因素的扰动,对黄河的入海泥沙通量产生深远影响。为探明近年来黄河下游河道输沙功能的演变及其主导因素,基于黄河下游河段各站点 2007—2020 年实测径流与泥沙资料,计算历年黄河下游河道输沙功能,并结合流域降水、水土保持和引水引沙的变化情况讨论了各因素对输沙功能演变的影响。结果表明:黄河下游河道输沙功能指标在 2007—2020 年显著下降了约 57%,其中花园口—高村段输沙功能指标和其降幅均高于高村—艾山段和艾山—利津段;黄河下游河道输沙功能演变的主导因素是河床粗化、水土流失综合治理面积增加和引水量增大,三者的相对贡献率分别达 37.6%,21.6%,17.5%。河床粗化与引水量增大使输沙功能减弱,与水土流失综合治理对输沙功能的增强作用相反,三者综合作用下黄河下游河道输沙功能近年来呈退化趋势。

关键词:黄河下游; 输沙功能; 河床粗化; 水土保持

中图分类号:P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0095-05

Study on the Temporal-Spatial Variation of Sediment Transport Function in the Lower Reaches of the Yellow River and Its Influencing Factors in Recent Years

ZHANG Ru¹, ZHANG Zhiquan^{2,3}, LUO Kai³

(1.*Shanxi Conservancy Technical Institute, Yuncheng, Shanxi 044000, China;*

2.*College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

3.*Upstream Hydrology and Water Resources Bureau, Yellow River Conservancy Committee, Lanzhou 730030, China)*

Abstract: The sediment transport function of the lower reaches of the Yellow River is disturbed by natural and anthropogenic factors, which has the profound influences on the sediment flux of the Yellow River into the sea. To investigate the evolution of the sediment transport function of the lower reaches of the Yellow River and its effect factors in recent years, based on the measured data of runoff, sediment, precipitation, water-soil conservation and water-sediment diversion from 2007 to 2020, the annual sediment transport function was calculated and its dominant factors were discussed. The results show that the sediment transport function index of the lower reaches of the Yellow River decreased by 57% from 2007 to 2020, and the sediment transport function index of Huayuankou—Gaocun section and its decline rate were higher than those of Gaocun—Aishan and Aishan—Lijin sections; moreover, the main reasons for the evolution of the sediment transport function in the lower reaches of the Yellow River were the riverbed armoring, soil-water conservation, and water diversion, which contributed 37.6%, 21.6%, and 17.5% to the changes of sediment transport function, respectively. The riverbed armoring and the increase in water diversion had weakened the sediment transport function, while the increase in soil and water conservation had the opposite enhancement effect. The sediment transport function of the lower Yellow River has been degraded in recent years under the combined effects of the three dominant factors.

Keywords: lower reaches of the Yellow River; sediment transport function; riverbed armoring; soil and water conservation

黄河下游河道的输沙功能是决定黄河入海泥沙通量的重要因素,对黄河口海岸的演变、黄海与渤海水下三角洲的沉积具有深远影响^[1]。在不同时期,黄河下游河道输沙功能的演变趋势与其造床造陆的作用在自然和人为因素的共同驱动下动态变化^[2]。自 20 世纪 80 年代中期以来,黄河流域降水周期性减少,同时农业灌溉需求的增大使得河道引水量也大幅增长,黄河下游河道输沙功能迅速减弱,河道发生萎缩,甚至出现季节性断流,三角洲造陆功能也显著退化,引起各方广泛关注^[3-4]。随着小浪底水库的建成,水库的运行调度能够对黄河下游水沙过程起到一定的调节作用,进而促使河道输沙功能发生与之前截然不同的变化。许炯心^[5]就指出,通过小浪底水库进行调水调沙,可以使得场次洪水平均含沙量维持在 35 kg/m³ 左右的输沙最优含沙量。这种调水调沙使得黄河下游河道输沙功能大幅增强,扭转了黄河下游河道逐年萎缩的态势^[6]。近年来经济社会的高速发展促使人们在黄河流域的治理与开发活动增加,特别是水土流失综合治理措施的大范围实施和黄河下游农业灌溉用水的持续增大,加之全球气候变暖,黄河下游河道的水沙条件将会进一步改变,也会导致其输沙功能的响应与变化^[7]。史红玲等^[8]采用 M-K 检验法及秩和检验法对黄河干流主要水文站水沙序列进行分析,发现水土保持措施减沙及水库建设拦沙对近年来黄河来沙量的持续减少起到了主导作用。胡春宏等^[9]的研究表明,黄河河道输沙能力与水利水保工程建设呈现协同的阶段变化,近年来黄河干流利于输沙的流量持续时间和水量、沙量都大幅减少,需对水沙变化机理深入研究,以准确预测新情势下黄河水沙变化趋势。夏军等^[10]则指出,在气候变化条件下,应完善小浪底水库水沙调控体系,探讨黄河下游河道更加高效的输沙模式。

目前,对于在强人类活动影响下黄河下游输沙量变化及其所引起的河床演变和三角洲造陆变化等问题已有诸多研究成果,但对近年来黄河下游河道输沙功能变化及其影响因素的分析研究尚且不足。探明近年来强人类活动影响下黄河下游输沙功能演变的原因及其主导因素,是当前黄河下游开发、治理与保护迫切需要解决的问题。本文基于黄河下游河段各站点 2007—2020 年实测径流与泥沙资料,计算分析近年黄河下游河道输沙功能的时空演变特征,并结合流域降水、水土保持和引水引沙数据,讨论各因素对输沙功能演变的影响,为黄河下游河道输沙与河床演变的有关研究提供新的认识。

1 研究区概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山脉,流经青海、四川等 9 个省区,全长约 5 464 km,其流域面积约为 75 万 km²,是世界上含沙量最大的河流之一。黄河流域主要的泥沙来源为中游的黄土高原,区域产沙量约占黄河下游来沙总量的 90%^[11]。黄河下游指河南郑州桃花峪以下的黄河河段,河段平均比降约为 0.12‰。本文研究河段为黄河下游花园口—利津河段(小浪底水库下游 110~735 km),全长约 625 km。河段中还设有高村(小浪底水库下游 283 km 处)和艾山(小浪底水库下游 465 km 处)两个水沙监测站,将河段分 3 部分。其中花园口—高村河段全长约 173 km,按河床演变特点区分属于游荡型河段,比降较大,河道宽浅,洲滩众多,河床由易冲刷的细沙组成;高村—艾山河段全长约 182 km,属于过渡型河段,两岸土质较好,比降介于上游游荡段与下游弯曲段之间;艾山—利津河段则属于弯曲型河段,全长约 270 km,比降较小,河岸抗冲性较强,加之人为控导工程的作用,其河势较稳定。

2 数据来源与研究方法

2.1 水文数据

本文所用的花园口(113.7°E,34.9°N)、高村(115.1°E,35.4°N)、艾山(116.3°E,36.3°N)和利津(118.3°E,37.5°N)水文站的径流输沙资料、泥沙粒径和河段引水引沙数据来源于《中国河流泥沙公报》(2007—2020 年);区域(山西省、陕西省、甘肃省、内蒙古自治区和宁夏回族自治区)水土流失综合治理面积数据引自《中国水土保持公报》(2007—2020 年);流域降水数据源自《中国水资源公报》和《水情年报》(2007—2020 年)。

2.2 河段输沙功能的计算方法

河道输沙功能指某一河道在宏观意义上输送泥沙的能力,它不要求满足输沙平衡条件,因为无论处于平衡状态或非平衡状态(淤积和冲刷)下的河道都具有输沙功能。因此,以黄河下游各河段为单元,从泥沙收支平衡的概念(Sediment budget)出发^[2,12],黄河下游河道的输沙功能指标 F_s (也有学者称之为河道排沙比)可按式进行计算:

$$F_{s,uv} = \frac{Q_{s,v}}{Q_{s,u} - Q_{\text{div},uv}} \quad (1)$$

式中: u, v 分别为河段的进口点和出口点; $Q_{s,u}$ 和 $Q_{s,v}$ 分别为河段进口处和出口处的输沙量;由于黄河

下游灌溉引沙量较大,不可忽略,故分母处需减去河段区间引沙量 $Q_{\text{div},uv}$ 。

注意到,若取 $Q_{s,u}$ 为花园口站输沙量; $Q_{s,v}$ 为利津站输沙量; $Q_{\text{div},uv}$ 为花园口—高村、高村—艾山、艾山—利津三段引沙量之和,则可计算得到黄河下游整体的输沙功能指标 F_s 。

2.3 相对权重法

相对权重法(relative weight)是由 Johnson 等^[13]于 2000 年提出的一种估计线性模型中自变量相对重要性的方法。本文使用该方法来量化各影响因素(来沙系数、中值粒径、降水量、水土流失综合治理面积和引水量)对黄河下游河道输沙功能变化的相对贡献率。该方法首先以自变量分解出的正交变量作为中间载体,然后分别通过自变量对正交变量、因变量对正交变量建立线性回归方程,最后自变量的相对重要性则为两组回归系数平方的积的和。相对权重法的主要步骤简述如下:

(1) 将自变量(来沙系数、中值粒径、降水量、水土流失综合治理面积和引水量)和因变量(黄河下游河道输沙功能)进行标准化处理(X, Y);

(2) 对标准化后的自变量矩阵 X 进行奇异值分解,获得相互独立的正交变量 Z ;

(3) 建立正交变量 Z 与标准化的自变量 X 和标准化因变量 Y 之间的线性回归方程,分别得到回归系数 λ_{kj} (自变量 X 与正交变量 Z 之间)和 B_k (因变量 Y 与正交变量 Z 之间);

(4) 由于矩阵 Z 中的正交变量间是不相关的,因此避免了变量之间的相互作用(共线性)问题。可用 λ_{kj2} 表示正交变量矩阵 Z 所占原始变量矩阵 X 的贡献比例。最后,各变量的权值 ϵ_j 可表示为:

$$\sum_{j=1}^n \epsilon_j = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \lambda_{jk}^2 B_k^2 = R_{y(x_1, x_2, \dots, x_n)}^2 \quad (2)$$

可以看到,各自变量的权值之和等于整个模型的决定系数 R^2 。最后,各自变量的相对权重 ϕ_j (即本研究中的相对贡献率)可表示为:

$$\phi_j = \frac{\epsilon_j}{R^2} \times 100\% \quad (3)$$

3 黄河下游河道输沙功能的时空变化

图 1 统计了黄河下游各河段输沙功能指标在 2007—2020 年的变化情况。总体来看,花园口—利津河段输沙功能呈现出明显的下降趋势,至 2018—2020 年,该段输沙功能已降至 0.97 左右,相比于 2007 年的 2.28 降幅达 57%。黄河下游花园口—利

津河段是黄河向海输送泥沙的重要输沙带,该段输沙功能的大幅度退化,是近年黄河三角洲造陆速度减缓的重要原因之一。分段来看,黄河下游花园口—高村段(游荡段)的输沙功能最大、高村—艾山段(过渡段)次之,而艾山—利津段(弯曲段)则最小。3 个河段输沙功能在 2007—2020 年均出现不同程度的下降,其中花园口—高村段下降趋势较高村—艾山段和艾山—利津段更为显著,这与颜明等^[14]基于长序列水沙数据得出的高村以上河道冲刷强度大于高村以下河段冲刷强度的认识基本相符。

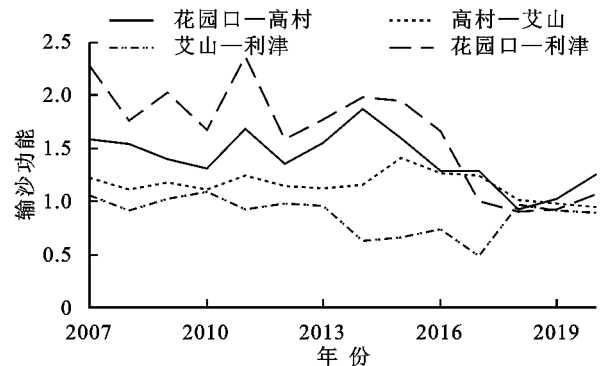


图1 黄河下游各河段输沙功能指标的变化趋势

4 输沙功能演变的影响因素分析

4.1 来沙系数和泥沙粒径

图 2 是 2007—2020 年黄河下游花园口、高村、艾山、利津 4 个水文站来沙系数(定义为 $\xi = S/Q$, S 为含沙量, Q 为流量)和床沙中值粒径均值的年际变化情况。可以看到,受小浪底水库拦沙作用的影响,黄河下游来沙系数呈现出减小的趋势。已有研究表明,来沙系数越大,则河道输沙功能指标越低^[2]。因此黄河下游来沙系数的减小理应使得其输沙功能指标升高,但由前文分析可知,在研究时期内黄河下游河道输沙功能指标整体上表现为下降的趋势,这说明来沙系数的变化并不是该时期影响输沙功能演变的主导因素。

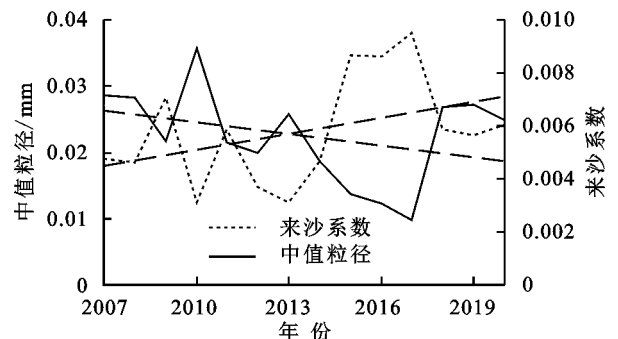


图2 黄河下游来沙系数与床沙中值粒径的变化趋势

观察黄河下游床沙中值粒径的变化可以发现,研究时期内中值粒径呈现增大的趋势,这是小浪底水库

建成后黄河下游河道持续冲刷而导致的河床粗化现象^[15]。由于河道水流挟沙力与泥沙沉速负相关,而泥沙沉速与泥沙粒径正相关,因此在同等水力条件下河道输送粗颗粒泥沙的能力要低于输送细泥沙的能力。这表明研究时期内床沙中值粒径的持续粗化是该时期黄河下游河道输沙功能指标下降的原因之一。

4.2 降水量和水土保持

图 3 是 2007—2020 年黄河流域降水量及黄河流域中上游主要产沙区域(山西省、陕西省、甘肃省、内蒙古自治区和宁夏回族自治区)水土流失综合治理面积的变化情况。如图 3 所示,流域降水量表现为周期性波动的趋势,在研究时期内无明显的上升或下降趋势,因此降水量的变化不是该时期河道输沙功能下降的主要原因。除降水量外,水土保持是影响黄河流域产沙量的另一重要因素^[16]。随着水土保持措施的大范围实施,在 2007—2020 年,黄河流域中游主要产沙区的水土流失综合治理面积呈现出明显的增大趋势,2020 年相比于 2007 年水土流失综合治理面积增幅超过 7.2%。水土流失综合治理面积的增大使得流域内坡面侵蚀强度降低,泥沙汇入量减小,削减了黄河下游的泥沙来源,是黄河下游河道输沙功能发生变化的驱动因素之一。

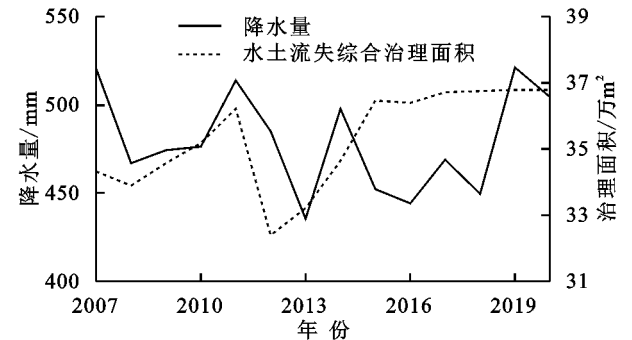


图 3 流域降水量及黄河下游水土流失综合治理面积的变化趋势

4.3 农业灌溉用水

由于黄河下游灌溉引水量较大,引水的同时不可避免地引走河道内的泥沙,因此河段的区间引水势必会对其输沙功能产生重要影响。本文统计了 2007—2020 年黄河下游花园口—利津河段区间引水量的变化情况(图 4),在经济社会不断发展的大背景下,研究时期内黄河下游区间引水量也显著增大。在相同的水流含沙量条件下,引水量的增大意味着引沙量也相应增加,河道内可输送的沙量减少。因此,研究时期内引水量的增大也是该时期黄河下游河道输沙功能指标下降的原因之一。

4.4 量化各影响因素对于输沙功能演变的贡献率

一般而言,来沙系数、泥沙粒径、降水量、水土流失综合治理面积、引水量与输沙功能指标之间的关系并不是独立的,它们之间存在某种程度上的共线性,如水土流失综合治理会减少流域产沙,从而影响来沙系数。因此本文将输沙功能指标序列作为因变量,上述 5 种影响因素作为自变量,运用相对权重法探讨上述影响因素在黄河下游河道输沙功能演变过程中的相对贡献率。表 1 的计算结果表明,在研究时期内,床沙中值粒径是影响输沙功能变化最主要因素,其贡献率达到 37.6%;其次是水土流失综合治理面积,其对输沙功能变化的影响程度约为 21.6%;引水量的影响程度在 5 个因素中排序第三,为 17.5%;来沙系数对输沙功能变化的影响程度则较小,为 15.1%;而降水量的影响最小,仅为 8.2%。取影响程度最大的 3 个因素——中值粒径、水土流失综合治理面积和引水量,将其贡献率求和可达到 76.7%,表明这 3 个因素的变化对于黄河下游河道输沙功能演变起到主导作用。

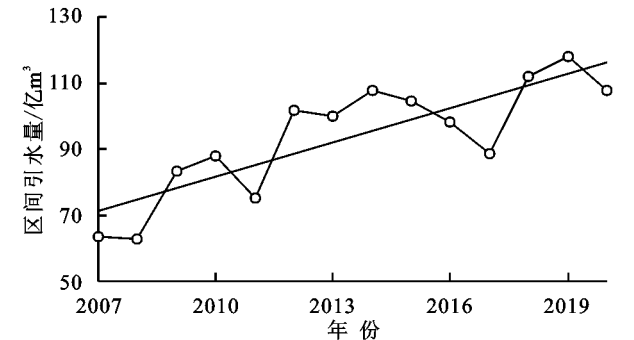


图 4 黄河下游花园口—利津段区间引水量的变化趋势

表 1 各影响因素对黄河下游河道输沙功能演变的贡献度

项目	来沙系数	中值粒径	降水量	水土流失综合治理面积	引水量	求和
ϵ	0.035	0.088	0.019	0.051	0.041	0.234
$\phi/\%$	15.100	37.600	8.200	21.600	17.500	100.000

为进一步探明黄河下游河道输沙功能变化与其主要驱动因素之间的线性关系,构建包含泥沙粒径、水土流失综合治理面积和引水量这 3 个自变量和输沙功能这一因变量之间的线性回归模型,基于最小二乘法拟合得到回归方程表达式如下:

$$F_{s,wv} = -98.016x_1 + 0.104x_2 - 0.01x_3 + 1.196 \quad (4)$$

式中: x_1, x_2, x_3 分别为泥沙粒径、水土流失综合治理面积和引水量。由回归方程的系数可知,床沙中值粒径和引水量与河道输沙功能呈负相关,与前文的定性分析相符;而水土流失综合治理面积与河道输沙功能呈正相关,这是因为水土保持措施使得黄河流域中游产沙减小,导致含沙量较小的水流进入黄河下游,使

得下游河道输沙能力增强。2007—2020 年,黄河下游河道输沙功能在床沙粗化、水土流失治理面积增大和引水量增加 3 个主导因素的影响下,整体上呈现出下降的趋势。

为判别回归方程拟合质量的好坏,计算回归方程计算值与实测值的均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(NSE)如下:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum (y'-y)^2}{n}} \tag{5}$$

$$NSE=1-\frac{\sum (y'-y)^2}{\sum (y-\bar{y})^2} \tag{6}$$

式中: n 为时间序列长度; y' 为回归方程计算值; y 为该年份实测值; \bar{y} 为实测数据 y 的平均值。注意到, $NSE \geq 0.65$, 模拟结果表现优秀; $0.65 > NSE \geq 0.5$, 模拟结果表现良好; $0.5 > NSE \geq 0.2$, 模拟结果表现一般; $NSE < 0.2$, 模拟结果表现很差^[17]。

如图 5 所示,将回归方程计算得到的河道输沙功能与其实测值进行对比,我们发现计算值与实测值基本吻合,表明考虑泥沙粒径、水土流失综合治理面积和引水量这 3 个主要影响因素的多元回归方程可以较为准确地反映输沙功能的变化情况。

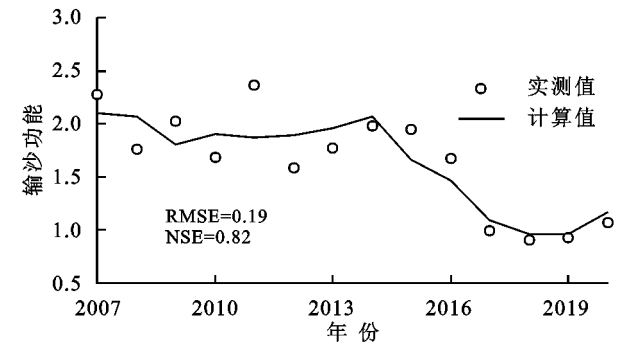


图 5 输沙功能回归方程计算值与实测值的对比

5 结论

(1) 黄河下游河道输沙功能指标在 2007—2020 年呈现显著下降的趋势,研究时期内降幅达 57%。花园口—高村段输沙功能比高村—艾山段和艾山—利津段要大,其降幅也更大。黄河下游河道输沙功能的大幅度退化,是近年黄河三角洲造陆速度减缓的重要原因之一。

(2) 2007—2020 年造成黄河下游河道输沙功能下降的主导因素是河床粗化、水土流失综合治理面积

增加和引水量增大,三者对输沙功能变化的相对贡献率分别达到 37.6%,21.6%,17.5%。其中,河床粗化与引水量增大使得河道输沙功能减弱,而水土流失综合治理面积增加使得河道输沙功能增强。此外,通过多元线性回归,考虑上述 3 个主导因素得到的回归方程可以较为准确地反映输沙功能的年际变化情况。

参考文献:

[1] 任美镠,史运良.黄河输沙及其对渤海、黄海沉积作用的影响[J].地理科学,1986,6(1):1-12.

[2] 许炯心.黄河下游河道输沙功能的时间变化及其原因[J].地理研究,2006,25(2):276-284.

[3] 王玲,王建中.黄河下游断流成因分析[J].人民黄河,1997,19(10):13-17,21.

[4] 黄金池.黄河下游河槽萎缩与防洪[J].泥沙研究,2001(4):7-11.

[5] 许炯心.水沙条件对黄河下游河道输沙功能的影响[J].地理科学,2004,24(3):275-280.

[6] 张晓华,尚红霞,郑艳爽.小浪底水库运用以来黄河下游冲淤调整特点[J].人民黄河,2006,28(4):22-23,25.

[7] 于海超,张扬,马金珠,等.1969—2018 年黄河实测径流与天然径流的变化[J].水土保持通报,2020,40(5):1-7.

[8] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.

[9] 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.

[10] 夏军,彭少明,王超,等.气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理[J].人民黄河,2014,36(10):1-4.

[11] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2015(9):38-42.

[12] Knighton D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective[M]. London: Arnold, 1998.

[13] Johnson J. A heuristic method for estimating the relative weight of predictor variables in multiple regression[J]. Multivariate Behavioral Research, 2000,35(1):1-19.

[14] 颜明,贺莉,王彦君,等.1950—2015 年黄河下游河道排洪输沙时空演变[J].水土保持研究,2019,26(4):1-6,12.

[15] 申冠卿,张原锋,张敏.小浪底水库运用后黄河下游河道洪水与泥沙输移特性[J].泥沙研究,2020,45(6):59-66.

[16] 焦菊英,马祥华,王飞,等.渭河流域侵蚀产沙强度的区域分异特征[J].水土保持研究,2004,11(4):60-63.

[17] Ritter A, Munoz-Carpena R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments-Science-Direct[J]. Journal of Hydrology, 2013,480(1):33-45.