

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.003

三盛公水库运用对下游河道输沙的影响

吴腾^{1,2}, 申孙平³, 李涛⁴, 秦杰¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098; 3. 广州市水务规划勘测设计研究院, 广东广州 510640; 4. 黄河水利科学研究院信息工程中心, 河南郑州 450003)

摘要: 通过建立一维水沙数学模型, 分析了不同下泄流量与含沙量条件下三盛公水库下游河道的水沙输移规律, 统计了河道的含沙量、累计冲淤量和河段沿程冲淤量, 并计算了河道单位长度冲淤量, 定量分析了不同河段的冲淤特点。结果表明: 流量相同的条件下, 进口含沙量越大, 河道沿程淤积量和累计淤积量越大, 但水库下游 100 km 后水体含沙量逐渐趋于一致, 与进口含沙量无关; 水库的下泄流量和含沙量对下游河道的冲刷和淤积影响明显, 下泄含沙量不大于 3 kg/m^3 时, 下游河道以冲刷为主; 水库至三湖河口河段冲淤变化受上游来水来沙条件影响明显, 该河段冲淤平衡来沙系数在 $0.004 \text{ kg} \cdot \text{s/m}^6$ 附近。

关键词: 河道输沙; 泥沙淤积; 来沙系数; 冲淤平衡; 三盛公水库

中图分类号: TV145.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2021)05-0401-05

Influence of operation of Sanshengong Reservoir on sediment transport in the downstream river

WU Teng^{1,2}, SHEN Sunping³, LI Tao⁴, QIN Jie¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China;

3. Guangzhou Water Planning, Survey, Design and Research Institute, Guangzhou 510640, China;

4. Electronic and Computer Engineering Center of Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In this paper, a one-dimensional mathematical model is developed to study the sediment transportation law in the downstream reach of Sanshengong Reservoir under different flow conditions and sediment concentrations. The sediment concentration, cumulative erosion and deposition, and erosion and deposition along the river section are counted, the erosion and deposition per length of the river is calculated, and the erosion and deposition characteristics of different river sections are quantitatively analyzed. The results show that under the same flow discharge, the larger the sediment concentration in entry, the larger the erosion and deposition along river and cumulative erosion and deposition. However, the sediment concentration after the 100 km downstream reach is prone to be consistent, having nothing to do with the entry sediment concentration. Meanwhile, the discharge flow and sediment content of the reservoir have a significant impact on the erosion and deposition of the downstream reach. When the sediment content of discharge is not more than 3 kg/m^3 , the downstream river is dominated by erosion. Finally, the erosion and deposition change of the reach from the reservoir to the Sanhu Estuary are significantly affected by the upstream inflow and sediment conditions, and the balanced inflow and sediment coefficient of erosion and deposition is around $0.004 \text{ kg} \cdot \text{s/m}^6$.

Key words: sediment transportation; erosion and deposition change; incoming sediment coefficient; balance condition between erosion and deposition; Sanshengong Reservoir

水库运用改变了下游河道天然情况下的水沙条件, 易引起河道输沙特性的改变。长期以来, 人类在黄河流域活动频繁, 黄河上游陆续修建了多座水库, 水库的修建给河道冲淤带来多重影响。一方面, 水库下游清

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402506); 国家自然科学基金面上项目(52179061, 52079043)

作者简介: 吴腾(1979—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: wuteng@hhu.edu.cn

通信作者: 秦杰, 副研究员。E-mail: jqin@hhu.edu.cn

引用本文: 吴腾, 申孙平, 李涛, 等. 三盛公水库运用对下游河道输沙的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 401-405.

WU Teng, SHEN Sunping, LI Tao, et al. Influence of operation of Sanshengong Reservoir on sediment transport in the downstream river [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5): 401-405.

水下泄,有利于冲刷下游河道;另一方面,水库拦蓄了洪峰,减小了最大下泄流量,改变了断面形态,增大了阻力^[1-2],降低了河道输沙能力,不利于河道输沙。近年来,三盛公水库下游局部河道输沙能力降低显著,河槽淤积加速,河道萎缩明显,排洪能力下降,洪灾风险逐年提高。优化水库运用是缓解下游河道淤积的重要方式,许多学者研究了黄河上游水库运用方式对下游河道冲淤的影响,其中,龙羊峡-刘家峡水库联合运行对黄河上游内蒙古河段冲淤的影响是研究的热点方向^[3-4]。研究认为,可通过水库运用调整下泄水沙条件以实现河道减淤^[3]。根据相关研究,提出了许多治理对策,如:建议河道流量保证在 $1\,500 \sim 2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,并加强水土流失治理^[5],还应尽可能增加汛期下泄流量,多输送泥沙^[6]。也有学者通过对比青铜峡水库的不同排沙方式,分析下游河道的冲淤变化以研究青铜峡水库运行对下游河道的影响^[7]。三盛公水库至三湖河口河段属于黄河内蒙段,河道冲淤影响因素复杂^[7-8],三盛公水库的控制运用对下游河道输沙的影响并不明确。随着黄河上游水资源的开发利用,该河段局部区域的持续淤积成为制约水资源利用效率的瓶颈问题^[9]。

为了缓解三盛公水库至三湖河口河段泥沙淤积的恶化趋势,提出消除河道萎缩的措施,需要明确水库运用对自然水沙过程的调节作用与叠加影响,了解河道水力因子调整对水沙条件变化的响应。本文以三盛公水库至三湖河口河段为研究对象,建立该河段一维水沙数学模型,探究水库不同下泄流量和含沙量条件下下游河道的输沙特性,比较沿程冲淤量与含沙量的变化,定量计算单位长度河道的冲淤强度,并建立来沙系数与单位水量冲淤量之间的相关关系,得到了不同来沙系数与河段冲淤变化的规律。

1 研究区域概况

黄河内蒙河段位于黄河上游的下段,自宁夏中卫县下河沿以上的南长滩入境,全长为 $1\,149.6 \text{ km}$,约占黄河总长的 $1/5$ 。三盛公水库位于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县境内总干渠的入口处,设计库容约为 0.8 亿 m^3 ,总装机容量为 $2\,000 \text{ kW}$,海拔约 $1\,054 \text{ m}$,控制流域面积约为 31.441 万 km^2 ^[10]。三盛公水库至三湖河口河段处于黄河上游(图1),是典型的冲积性河段。天然条件下,该河道处于缓慢抬升的状态,河道平滩流量为 $3\,500 \sim 4\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。近年来受人类活动的影响,河道淤积严重,局部平滩流量仅有 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右^[11]。三盛公水库至巴彦淖尔河道流向自南向北,从巴彦淖尔至三湖河口河道流向自西向东,河段长约为 210 km ,平均宽约 $3\,500 \text{ m}$,主槽平均约宽 750 m ,河道比降为 0.014% ^[12]。

巴彦高勒是三盛公水库下游进入黄河上游内蒙河段的控制水文站,来水来沙主要集中于汛期。1952—1968年,汛期水量占全年总水量的 62.9% ,来沙系数为 $0.0068 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$;1969—1986年,汛期水量占全年总水量的 53.0% ,来沙系数为 $0.0054 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$;1987—2012年,汛期水量占全年总水量的 38.1% ,来沙系数为 $0.0121 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ ^[13]。由统计结果可知,该河段汛期水量和沙量逐渐减少,但来沙系数变化较大,表明该河段水沙关系不稳定,尤其是来沙系数较大的年份,容易产生局部河段的淤积。

2 研究方法

2.1 数学模型建立

建立三盛公水库至三湖河口段一维水沙数学模型,利用该模型研究三盛公水库在不同下泄流量与不同的排沙强度下,下游河道的冲淤以及含沙量沿程变化规律。模型的基本方程^[14]如下:

$$\text{水流连续方程} \quad \frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q_i}{\partial x} - q_{Li} = 0 \quad (1)$$

$$\text{水流运动方程} \quad \frac{\partial Q_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_{1i} \frac{Q_i^2}{A_i} \right) + \alpha_{2i} \frac{Q_i}{A_i} q_{Li} + g A_i \left(\frac{\partial Z_i}{\partial x} + \frac{Q_i^2}{K_i^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\text{泥沙连续方程} \quad \frac{\partial (Q_i S_i)}{\partial t} + \frac{\partial (Q_i S_i)}{\partial x} + \sum_{j=1}^m K_{1ij} \alpha_{*ij} b_{ij} \omega_{ij} (f_{1ij} S_{ij} - S_{*ij}) - S_{Li} q_{Li} = 0 \quad (3)$$



图1 研究区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area

河床变形方程

$$\frac{\partial Z_{bij}}{\partial t} - \frac{K_{1ij}\alpha_{*ij}}{\gamma_0}\omega_{sij}(f_{1ij}S_{ij} - S_{*ij}) = 0 \quad (4)$$

式中: i ——断面编号; j ——子断面编号; m ——子断面数; Q ——流量; A ——过水面积; t ——时间; x ——沿流程坐标; q_L ——单位长度侧向入流量; α_1 ——干流动量修正系数; α_2 ——入汇支流动量修正系数; Z ——水位; g ——重力加速度; K_1 ——附加系数; α_* ——平衡含沙量分布系数; f_1 ——泥沙非饱和系数; b ——断面宽度; ω_s ——泥沙浑水沉速; S ——含沙量; S_* ——水流挟沙力; S_L ——单位长度侧向入流量相应的含沙量; Z_b ——断面平均河床高程, γ_0 ——淤积物干容重。方程采用 Preissmann 四点差分格式进行离散,再用追赶法迭代求解。模型参数的计算方法参考文献[14]。

2.2 数学模型验证

黄河上游内蒙河段是泥沙淤积的主要区域,数学模型范围选定三盛公水库至三湖河口河段,采用实测资料进行验证。数学模型验证计算时间为 2015 年 1 月 1 日至 12 月 31 日,模拟的冲淤演变时间为 1 a,计算时间步长为 1 min。主河槽糙率取 0.015~0.022,滩地糙率取 0.025~0.035,水流挟沙力采用张红武公式^[14],动量修正系数取 1,淤积物干容重取 1.3。巴彦高勒位于三盛公水库下游,是下游河段的第一个控制水文站,水文资料完备,因此,本次数值模拟验证选取巴彦高勒至三湖河口河段,可以反映三盛公水库下游河道的冲淤变化。图 2 为巴彦高勒至三湖河口河段数学模型验证结果(负值表示河床为冲刷,正值表示河床为淤积),图中计算值与实测值较为接近,满足精度要求,能体现汛期冲刷、非汛期淤积的变化趋势。

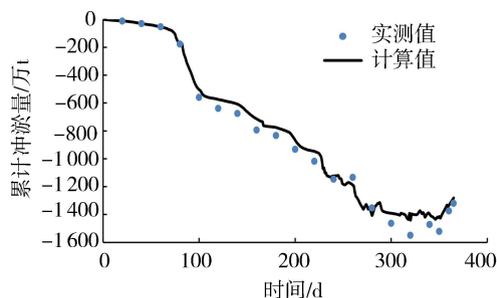


图 2 数学模型验证

Fig.2 Validation of numerical model

3 三盛公水库运用对下游河道冲淤影响

3.1 模型计算条件

近年来,三盛公水库下游河道中小流量水位明显抬高,平滩流量普遍降至 1500 m³/s 左右,局部河段不足 1000 m³/s。以下游河道的平滩流量作为特征流量,分析三盛公水库排沙期,确定三级排沙流量。三盛公水库的下泄含沙量与下泄流量密切相关,下泄流量越大,下泄含沙量越大。根据实测水文数据,三盛公水库下泄水体的含沙量为 0~50 kg/m³。本文对 9 种不同的水沙组合进行模拟分析,含沙量分为低、中、高 3 个等级,流量也分为 3 级,取值见表 1。河道地形条件采用 2012 年实测地形。上游控制条件为含沙量与流量,下游边界条件采用三湖河口的实测水位流量关系,确定不同流量所对应的水位。计算历时取 10 d。

3.2 三盛公水库下游河道输沙特性

图 3、图 4 为不同出库流量条件下三盛公水库下游河道沿程冲淤量与含沙量关系。三盛公水库下泄水体的含沙量越高,河道淤积量越大。低含沙量时河道以冲刷为主,高含沙量时河道基本处于淤积状态。三盛公水库至三湖河口河道沿程含沙量变化规律为:在距三盛公水库 30 km 河段,进口含沙量为 3 kg/m³时,含沙量沿程持续增大;进口含沙量为 10 kg/m³以内时,沿程含沙量先减小后增大,然后持续减小;进口含沙量大于 10 kg/m³时,沿程含沙量持续减小。不同的计算条件下,距三盛公水库 30~70 km 河段含沙量下降较快,主要是由于该河段河宽变窄,水深增加,水流的挟沙力增大,导致河道含沙量增大,淤积减小;距三盛公水库 70~140 km 河段含沙量基本保持不变;在距三盛公水库 150 km 处,含沙量出现极大值,出现的原因主要是河道变窄,水流挟沙力增大。对于同一下泄流量,不同下泄含沙量的水体,在水库下游 100 km 后水体的含沙量趋于一致,与进口含沙量无关。

3.3 河道单位长度冲淤量变化

前文分析了不同水沙组合下沿程冲淤量与含沙量,但是选取的断面数量有限,断面之间的距离也长短不一,断面之间距离长的河段冲淤量与距离短的河段冲淤量无法直接比较,因此,计算河道单位长度冲淤量:

表 1 数学模型计算条件

Table 1 Calculation conditions of numerical model

出库流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	含沙量/ (kg·m ⁻³)	三湖河口 水位/m
500	3	1018.50
	10	
	20	
1000	8	1018.94
	20	
	40	
1500	10	1019.34
	35	
	50	

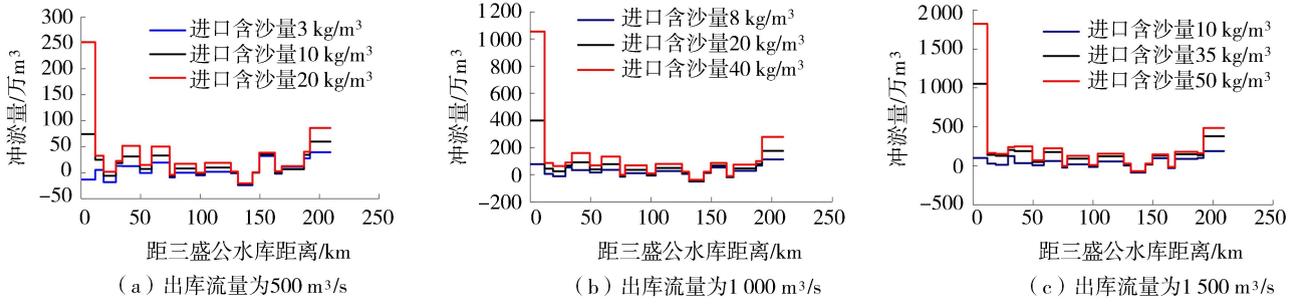


图3 不同出库流量下河道沿程冲淤量

Fig. 3 Erosion and deposition amount along river under different flow discharge

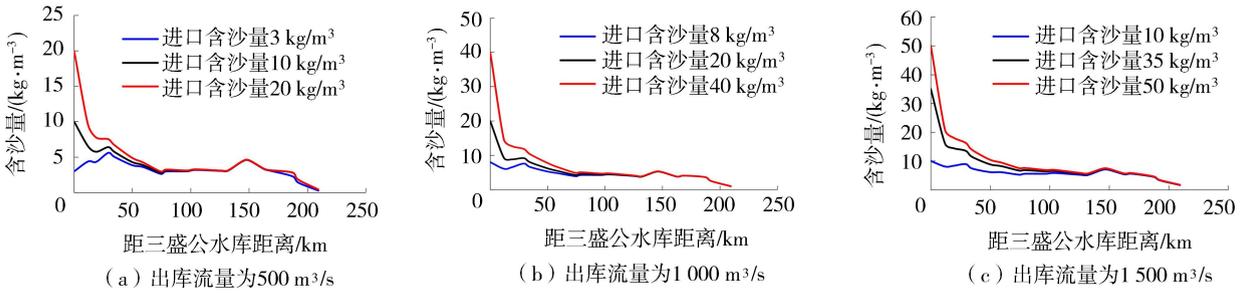


图4 不同出库流量下河道沿程含沙量

Fig. 4 Sediment concentrations along river under different flow discharge

$$w_i = W_i/l_i \quad (5)$$

式中: w_i ——第*i*至*i+1*个断面之间河道单位长度冲淤量; W_i ——第*i*至*i+1*个断面内的冲淤量; l_i ——第*i*至*i+1*个断面的河段长度。

当 w 为正值且越大时,该河段淤积量越高;当 w 为负值且越小时,该河段冲刷量越高;当 $w=0$ 时,该河段冲淤平衡。不同流量与不同含沙量条件下,下游河道单位长度冲淤强度见图5。总体来看,不同等级流量下全河段的冲淤效率变化趋势较为接近,进口含沙量的大小直接影响河段的冲刷和淤积趋势。与图3、图4不同,图5计算的河道单位长度冲淤强度与断面间距无关。如三盛公水库下游187.0~192.0 km河段,因断面间距较短,总的淤积量不大,但是单位长度淤积强度较高;类似的,距三盛公水库59.1~74.4 km河段因断面间距相对较长,总淤积量较大,但单位长度淤积强度不大。综合而言,当三盛公水库下泄水体含沙量不大时,淤积强度较大的区域主要集中于下游187.0~209.3 km河段内;当三盛公水库下泄水体含沙量大于 10 kg/m^3 时,淤积强度较大的区域主要在下游18.0 km以内河段、下游29.3~49.4 km河段和下游187.0~209.3 km河段。

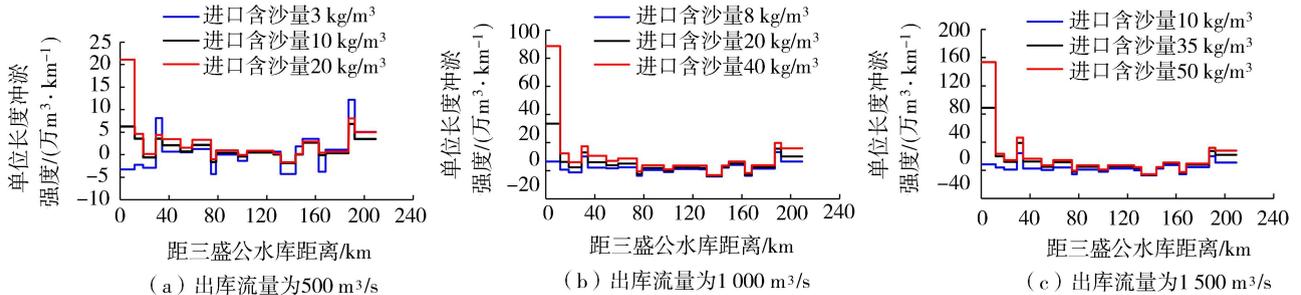


图5 不同条件下河道单位长度冲淤强度

Fig. 5 Erosion and deposition intensity per river length under different conditions

4 下游河道冲淤平衡条件

根据三盛公水库的运用方式,设定不同的下泄流量和含沙量,采用一维水沙数学模型模拟分析三盛公水库

至三湖河口河段来沙系数与单位水量冲淤量之间的相关关系,结果如图6所示。来沙系数为含沙量 S 与流量 Q 的比值,单位水量冲淤量为河道冲淤量 W 与总水量 V 的比值^[15-16]。根据图6得到来沙系数与单位水量冲淤量的拟合公式为

$$\frac{W}{V} = 6.441 \ln\left(\frac{S}{Q}\right) + 35.717 \quad (6)$$

式中:当 $W/V=0$ 时,即不冲不淤的条件下, $S/Q=0.004 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$;当 $S/Q < 0.004 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时,河道具有冲刷趋势; $S/Q > 0.004 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时,河道具有淤积趋势。为了保持该河段的冲淤平衡,可通过水库调节,控制来沙系数在 $0.004 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 附近。

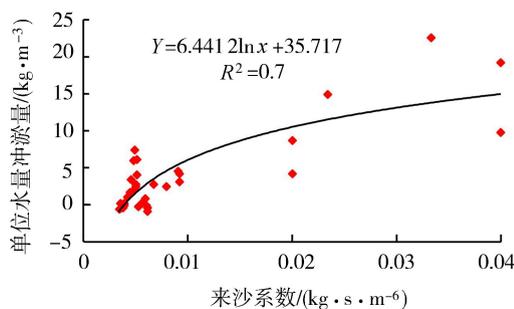


图6 来沙系数与单位水量冲淤量关系

Fig. 6 Relationship between sediment coefficient and Erosion and deposition per volume of water

5 结 论

a. 流量相同的条件下,进口含沙量越大,河道沿程淤积量和累计淤积量越大;水库下游100 km后,水体含沙量逐渐趋于一致,与进口含沙量无关。

b. 三盛公水库的下泄流量和含沙量对下游河道的冲刷和淤积影响明显。下泄含沙量不大于 $3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,下游河道以冲刷为主;当下泄含沙量大于 $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,淤积量较高的主要有3段,第一段是三盛公水库下游18.9 km以内河段,第二段是距三盛公水库29.3~49.4 km河段,第三段是距三盛公水库187.0~209.3 km河段。

c. 三盛公水库至三湖河口河段冲淤变化受上游来水来沙条件影响明显,该河段冲淤平衡来沙系数在 $0.004 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 附近,当来沙系数小于 $0.004 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时,河段具有冲刷趋势,当来沙系数大于 $0.004 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^6$ 时,河段具有淤积趋势。

参考文献:

- [1] QIN Jie, NG S L. Estimation of effective roughness for water-worked gravel surfaces[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(11): 923-934.
- [2] QIN Jie, WU Teng. Comments on "Analysis of flow resistance equations in gravel-bed rivers with intermittent regimes: Calabrian Fiumare Data Set" by G Mendicino and F Colosimo [J]. Water Resources Research, 2020, 56(3), Doi: 10.1029/2019WR0266330.
- [3] 赵业安,张红武,温善章.论黄河大柳树水利枢纽工程的战略地位与作用[J].人民黄河,2002,24(2):1-5 (ZHAO Yean, ZHANG Hongwu, WEN Shanzhang. On its strategic status and roles of the Daluoshu Hydraulic Complex on the Yellow River[J]. Yellow River, 2002, 24(2): 1-5. (in Chinese))
- [4] 杨根生,拓万全,戴丰年,等.风沙对黄河内蒙古河段河道淤积泥沙的影响[J].中国沙漠,2003,23(2):152-159. (YANG Gensheng, TUO Wanquan, DAI Fengnian, et al. Contribution of sand sources to the silting of riverbed in Inner Mongolia section of Huanghe River[J]. Journal of desert research, 2003, 23(2): 152-159. (in Chinese))
- [5] 刘晓燕,侯素珍,常温花.黄河内蒙古河段主槽萎缩原因和对策[J].水利学报,2009,40(9):1048-1054. (LIU Xiaoyan, HOU Suzhen, CHANG Wenhua, et al. Cause of main channel shrinkage occurred to the Inner-Mongolia reaches of Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1048-1054. (in Chinese))
- [6] 鲁俊,周丽艳,张厚军,等.青铜峡水库排沙对下游河道冲淤的影响[J].人民黄河,2012,34(3):19-21. (LU Jun, ZHOU Liyan, ZHANG Houjun, et al. Influence of Qingtongxia Reservoir sediment ejection on downstream riverbed evolution[J]. Yellow River, 2012, 34(3): 19-21. (in Chinese))
- [7] 申冠卿,张原锋,侯素珍,等.黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响[J].泥沙研究,2007(1):67-75. (SHEN Guanqing, ZHANG Yuanfeng, HOU Suzhen, et al. Impact of water and sediment regulation by reservoirs in the upper Yellow River on Inner-Mongolia reaches[J]. Journal of Sediment Research, 2007(1): 67-75. (in Chinese))
- [8] 吴保生,刘可晶,申红彬,等.黄河内蒙古河段输沙量与淤积量计算方法[J].水科学进展,2015,26(3):311-321. (WU Baosheng, LIU Kejing, SHEN Hongbin, et al. Calculation methods for sediment load and deposition volume in the Inner Mongolia reach of the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 311-321. (in Chinese))