

三门峡水库汛期敞泄排沙冲刷—平衡发展过程研究*

申红彬¹, 王海周¹, 陈建^{1**}, 刘飞¹, 史红玲²

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450045)

(2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 三门峡水库汛期敞泄排沙对库区冲刷与库容恢复具有重要作用, 并往往表现为冲刷—平衡发展过程, 现有研究多有不足。综合采用资料统计、理论分析、试验研究、概化模拟等方法, 深入研究三门峡水库汛期敞泄排沙规律与冲刷—平衡发展过程。通过资料分析认为, 三门峡水库汛期敞泄排沙可采用考虑上站来水含沙量的输沙幂律函数公式, 且输沙系数随累计冲刷时间及总量增大而不断衰减, 这是形成冲刷—平衡发展过程的根本原因, 也是造成以往率定流量幂律指数值出现小于 1.0 不合理现象的重要原因。进一步考虑汛期敞泄排沙初期床面新淤泥沙与后期床面淤积固结泥沙冲刷起动临界条件差别, 对考虑上站来水含沙量的输沙幂律函数公式进行改进, 并对后期输沙系数进行修正, 结果显示修正后输沙系数总体变化趋势更为光滑、合理; 经三门峡水库泥沙淤积固结及冲刷起动试验验证, 水库泥沙淤积固结干密度的小幅增大会导致起动临界条件(流速、剪切应力、流量等)的大幅增长。最后, 再进一步结合河流自动调整原理及滞后响应模型, 建立输沙系数及累计冲刷量的滞后响应模型, 并对三门峡水库汛期敞泄排沙冲刷—平衡发展过程进行概化模拟。结果表明计算输沙系数随累计冲刷时间变化曲线与实测值变化趋势基本符合, 计算累计冲刷量随累计入库水量变化曲线与实测值变化趋势符合良好, 确定性系数与 Nash-Sutcliffe 效率系数均在 0.98 以上, 初步说明了所建模型方法的合理性。

关键词: 三门峡水库; 敞泄排沙; 冲刷—平衡过程; 自动调整; 滞后响应

Study on the scouring- equilibrium process of full open discharge for Sanmenxia reservoir*

Shen Hongbin¹, Wang Haizhou¹, Chen Jian^{1**}, Liu Fei¹ & Shi Hongling²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, P.R.China)

(2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, P.R.China)

Abstract: Full open discharge scouring during the flood season is crucial for the scouring process of the Sanmenxia Reservoir and often exhibits a scouring-equilibrium process. However, current research on this topic remains insufficient. By combining field data analysis, theoretical research, experimental study, and model simulation, this study investigates the sediment transport law and scouring-equilibrium process of full open discharge. Data analysis indicates that the sediment transport rate of full open discharge during the flood season can be calculated using a power law relationship model incorporated with the upstream sediment supply function, where the sediment transport coefficient decreases with the increase of accumulated scouring time and volume. The decrease in the sediment transport coefficient is a fundamental reason for the formation of the scouring-equilibrium process and an important cause of the unreasonable phenomenon that the power law index of discharge is less than 1.0 in previous calibrations. Furthermore, considering the difference in incipient motion conditions between the upper

* 2025-08-30 收稿; 2025-12-17 收修稿。

国家自然科学基金联合基金项目(U22A20237)、水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SEDI-2025-09)和水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹)研究基金项目(2023-SYSJJ-08)联合资助。

** 通信作者: E-mail: chenjian@ncwu.edu.cn.

layer of newly deposited sediment and the lower layer of consolidated sediment, the power law relationship model is improved and the sediment transport coefficient is revised. The results show that the variation of the revised sediment transport coefficient becomes smoother and more reasonable. Scouring experiments on consolidated sediment demonstrate that a slight increase in the dry density of consolidated sediment leads to a significant increase in incipient motion conditions (velocity, shear stress, and discharge). Finally, based on the self-adjustment principle of alluvial rivers and the delayed response model theory, a delayed response model between the sediment transport coefficient and accumulated scouring volume is established and applied to simulate the scouring-equilibrium process of full open discharge in the Sanmenxia Reservoir. The simulation results show that the calculated curve of the sediment transport coefficient varying with accumulated scouring time is consistent with the measured values, and the calculated curve of accumulated scouring volume varying with accumulated incoming water is in good agreement with the measured values. The values of the determination coefficient and Nash-Sutcliffe efficiency are 0.98 and 0.98, respectively, which preliminarily verify the rationality of the proposed model.

Key words: Sanmenxia reservoir; full open discharge; scouring-equilibrium process; self-adjustment; delayed response

泥沙淤积对水库库容与使用寿命具有重要影响。黄河三门峡水库作为我国第一座在多沙河流上修建的大型水库，泥沙淤积问题历来十分突出。据有关资料统计，三门峡水库在运用初期 1960-1964 年间累计淤积泥沙 35.75 亿 m^3 ，库容（330m 高程以下）损失高达 60%^[1]；另受水库泥沙淤积上延影响，上游潼关高程不断抬高，进而导致潼关以上小北干流、渭河、北洛河淤积严重。为减缓三门峡水库淤积，先后对水库进行了多次较大泄流规模改造与运用方式调整，使得水库运用被分为多个时期：蓄水拦沙（1960 年-1961 年）、滞洪排沙（1962 年-1973 年）、蓄清排浑（1974 年-今），2003 年后在蓄清排浑基础上进一步开展“318”控制运用，即保证非汛期最高运行水位不高于 318m。大量实测资料统计表明，三门峡水库自 2003 年开展“318”控制运用以后，加上近些年来有利入库水沙条件影响，库区总体处于冲刷状态，主要表现为汛期冲刷、非汛期淤积，且汛期冲刷多以敞泄排沙为主^[2]。不过，进一步分析三门峡水库汛期敞泄排沙效率往往随累计水量的增大而减小，表现出冲刷—平衡的发展过程，现有研究多有不足。

部分学者对三门峡水库冲淤演变的时间滞后与空间联动^[3]、平衡时间^[4]、重心变化^[5]等进行了研究，但研究时间尺度多以年或汛期等为单位，较少关注水库汛期内敞泄排沙的冲刷—平衡发展过程。不少学者对三门峡水库汛期敞泄排沙的水沙运动规律进行了研究，并试图建立出库输沙量（率）与入库水量（流量）、沙量（含沙量）等之间的关系^[6]，但多未考虑冲刷—平衡发展过程的影响，导致相关参数率定结果存在一定的不合理性。已有河床（推移质）冲刷试验与模拟表明^[7, 8]，床面泥沙粗化对河床冲刷—平衡以及再冲刷—再平衡发展过程具有重要影响，本质反映了床面泥沙边界条件改变对输沙与冲淤规律的反馈作用。另有不少学者指出^[9-11]，水库泥沙淤积固结往往会改变床面泥沙密实状态，并对床面泥沙（特别是粘性泥沙）冲刷起动临界条件产生重要影响，进而影响水库溯源冲刷的形式（如全程剥蚀与局部跌坎模式、衰减型与增强型跌坎等）^[12]。在三门峡水库汛期与非汛期交替冲淤、且总体冲刷的变化背景下，对于汛期敞泄排沙，上层非汛期新淤泥沙与下层淤积固结泥沙冲刷特性有所不同，也是排沙研究需要考虑的问题。

本文在上述研究基础上，综合采用资料统计、理论分析、试验研究、概化模拟等方法，进一步深入研究三门峡水库汛期敞泄排沙规律与冲刷—平衡发展过程。研究成果可为黄河三门峡水库后期制定更为合理的库区冲沙清淤方案提供支撑。

1 资料统计与分析

1.1 三门峡水库简介

三门峡水库位于黄河中、下段连接处，被称为“黄河第一坝”，控制流域面积 68.84 万 km^2 ，占黄河总流域面积的 91.5%，控制水、沙量分别占黄河总水、沙量的 89%、98%。三门峡水库库区范围包括黄河龙门、渭河临潼、汾河河津和北洛河状头四个水文站至大坝之间的干支流，但自蓄清排浑运用以来，主要指潼关以下河段。三门峡库区潼关至大坝之间河段全长 113.5km，河谷宽 1~6m，两岸为黄土台塬，河道平面整体上宽下窄，属山区峡谷型河道。在三门峡库区潼关以下河段，沿程分布有多个水文站，主要包括

潼关、古夺、大禹渡、史家滩等。对于三门峡水库具体地理位置及库区布设测量断面，可参见图 1。

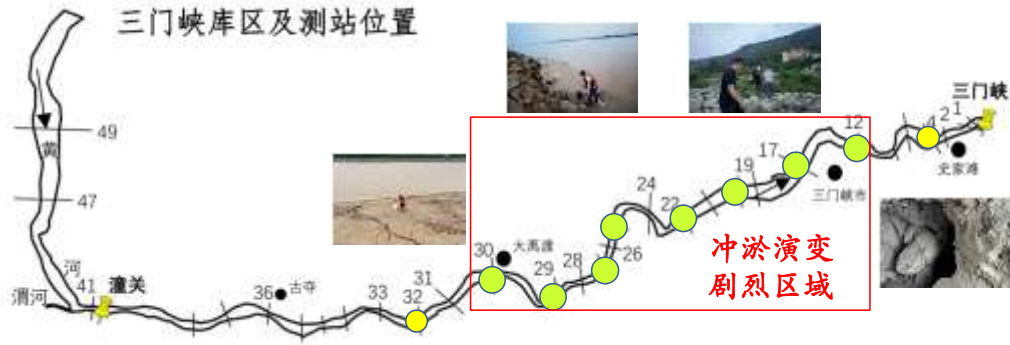


图 1 三门峡水库库区位置及测量断面布设图

Fig. 1 Diagram of the locations of Sanmenxia reservoir and measuring sections

1.2 水库汛期敞泄排沙冲刷—平衡过程

三门峡水库自 2003 年开展“318”控制运用以后，加上有利入库水沙条件，库区总体处于冲刷状态（参见图 2），2003-2022 年累计冲刷泥沙约 1.9 亿 m^3 ，但在 2011 年后冲刷明显降低，2011-2022 年累计冲刷泥沙仅约 0.3 亿 m^3 。考虑汛期冲刷，特别是敞泄排沙冲刷的重要作用，分别收集整理并统计分析 2003-2005 年与 2021-2023 年潼关以下库区不同年份汛期敞泄排沙累计冲刷量与累计入库水量之间的关系^[6, 13]，如图 3 所示。可以看出：三门峡水库不同年份汛期敞泄排沙累计冲刷量均随累计入库水量增大而增大，但在不同时期形成两条不同的趋势线，且增幅速率均逐渐减小，表现出冲刷—平衡的发展过程。

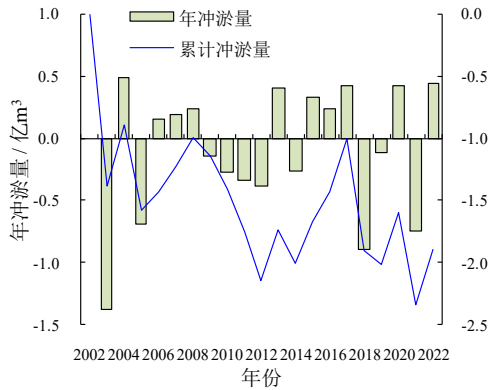


图 2 库区历年冲淤及累计变化过程

Fig. 2 Variation processes of scouring and deposition

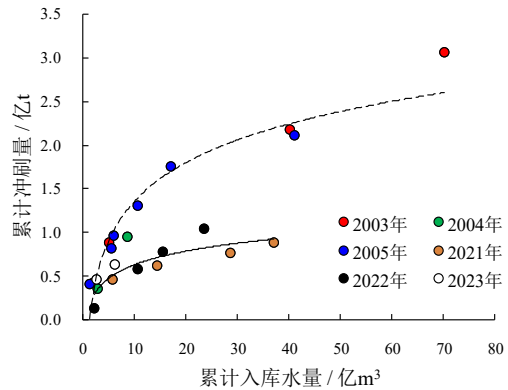


图 3 累计冲刷量与入库水量关系

Fig. 3 Relation of scouring volume and runoff

1.3 水库汛期敞泄排沙规律分析

在三门峡水库汛期敞泄排沙过程中，水流基本处于敞流状态，输沙类似于河道输沙。对于多沙河流，输沙率一般可采用考虑上站来水含沙量的幂律函数公式表示^[6, 14]，则水库汛期敞泄排沙出库输沙率或输沙量可近似表示如下：

$$Q_s = K S_u^a Q^b \quad (1)$$

$$W_s = K' W_{su}^a W^{b-a} \quad (2)$$

$$K' = KT^{1-b} \quad (3)$$

式中： Q_s 为出库输沙率，kg/s； Q 为流量，m³/s； S_u 为入库水流含沙量，kg/m³； W_s 为一定时段出库输沙量，kg； W 为一定时段入库水量，m³； W_{Su} 为一定时段入库沙量，kg； T 为时段，s； K 、 K' 为输沙系数，主要与河床前期累计冲淤情况有关； a 、 b 分别为输沙指数，主要与河段长度、断面形态等有关^[15]， $a+b \approx 2.0$ 。

以往基于式（1）或（2）分析三门峡水库汛期敞泄排沙出库输沙率往往较少考虑输沙系数 K 的变化，导致指数 b 率定值有时小于 1.0^[6]，这与输沙经典理论不符^[16]。根据冲积河流自动调整原理^[17]，河流持续冲刷将会通过自动调整，如床面与水面比降调平、床沙粗化等，最终达到新的输沙平衡状态，对应图 3 水库汛期敞泄排沙的冲刷—平衡发展过程，反映于式（1）、（2）中主要表现为输沙系数 K 的调整（因库区河段长度、断面形态变化不大，可暂不考虑指数 a 、 b 变化，同时便于对指数 a 、 b 值进行率定）。基于式（2），分别点绘三门峡水库汛期敞泄排沙出库沙量与入库水量、沙量之间的关系，如图 4（a）、（b）所示。比较图 4（a）、（b），可以看出水库出库沙量与入库沙量之间相关关系较好，因此确定指数 a 值约为 0.6，并根据指数 $a+b \approx 2.0$ 关系，进而确定指数 b 值约为 1.4。

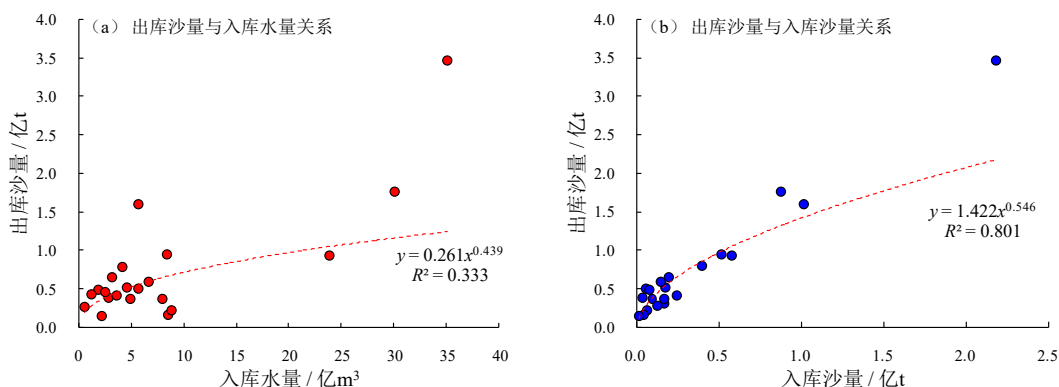


图 4 出库沙量与入库水量、沙量关系

Fig. 4 Relation of sediment discharge with incoming water, sediment discharge

基于上述指数 a 、 b 值确定结果，进一步基于式（1）分析不同年份汛期敞泄排沙输沙系数 K 变化情况，如图 5（a）、（b）所示。可以看出，输沙系数 K 随累计冲刷时间及总量增大而不断衰减，反映出床面泥沙持续冲刷下比降调平、粒径粗化等因素的综合影响，并成为水库汛期敞泄排沙冲刷—平衡发展过程的主要原因，这与以往研究认识相符合^[16]。再进一步将输沙系数 K 转化为 K' ，分析水库汛期敞泄排沙过程中输沙系数变化对图 4（a）中出库沙量与入库水量关系的影响，如图 6（a）、（b）所示。可以看出，在三门峡水库不同年份汛期敞泄排沙过程中，受自然来流变化过程影响，较大敞泄水量（或流量）往往发生在后期，此时受床面前期冲刷调整影响，输沙系数往往较小，因而导致图 4（a）中随着入库水量的增大，出库沙量增大放缓，易出现率定指数 b 值小于 1.0 的不合理情况。

1.4 水库汛期敞泄排沙公式改进

综合图 5（a）、（b）可以看出，在三门峡水库不同年份汛期敞泄排沙过程中，初期与后期输沙系数往往差异较大，甚至出现“跳减”现象，不尽合理。分析原因，主要是由于初期冲刷多为前非汛期新近淤积泥沙，随着冲刷进行，后期冲刷泥沙多为床面以前淤积固结泥沙，相对不易冲刷。进一步考虑床面泥沙冲刷起动临界条件影响^[18]，并表示为临界流量，则对式（1）可改进表示为：

$$Q_s = KS_u^a (Q - Q_c)^b \quad (4)$$

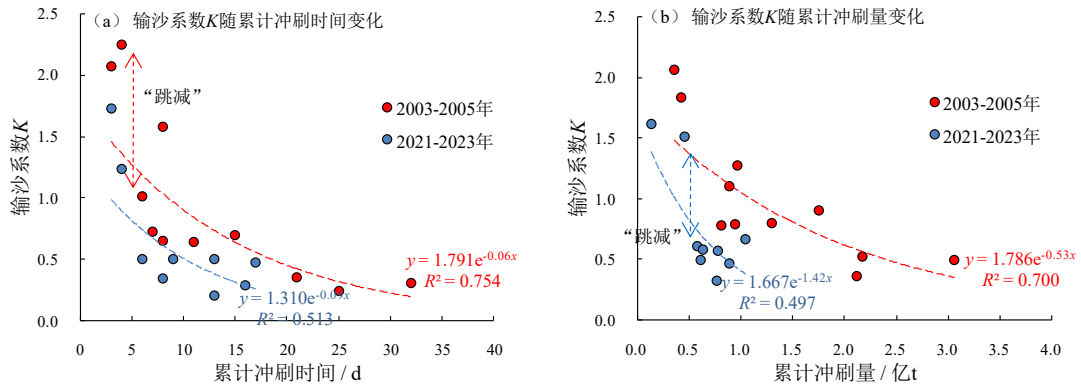


图5 输沙系数随累计冲刷变化过程

Fig. 5 Variation process of sediment transport coefficient with continue scouring

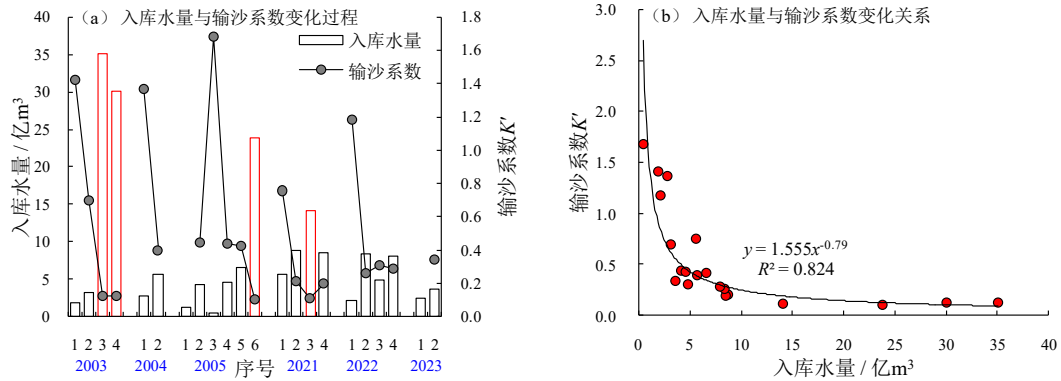


图6 输沙系数随累计冲刷变化过程

Fig. 6 Variation process of sediment transport coefficient with continue scouring

式中： Q_c 为床面泥沙冲刷起动临界流量，m³/s。

基于式(4)，对三门峡水库不同年份汛期敞泄排沙后期冲刷过程，考虑床面泥沙淤积固结影响，综合确定起动临界流量为290m³/s，并进一步修正输沙系数，结果如图7(a)、(b)所示。可以看出，修正后输沙系数K随累计冲刷时间及总量增大而衰减的变化趋势总体更为光滑，相对更为合理。

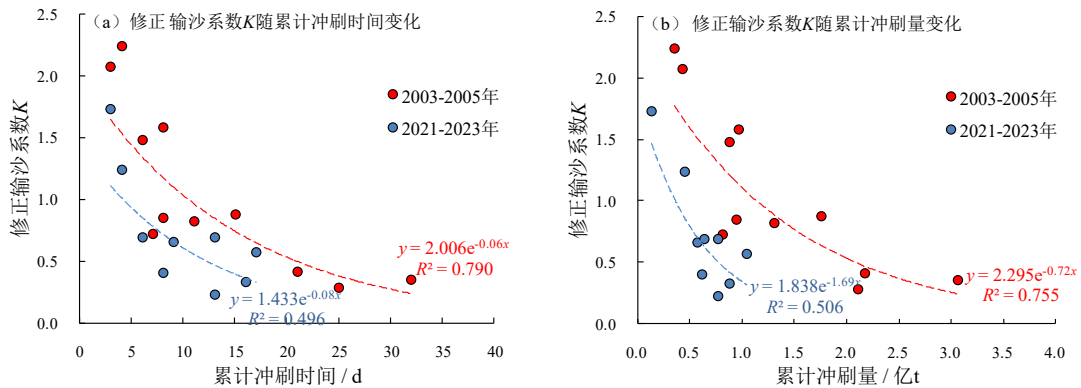


图7 修正输沙系数随累计冲刷变化过程

Fig. 7 Variation process of revised sediment transport coefficient with continue scouring

2 试验研究与验证

2.1 试验简介

1. 泥沙现场采样

为进一步认识三门峡水库泥沙淤积固结对冲刷起动临界条件影响,组织开展相关试验研究。根据三门峡水库 2003 年开展“318”控制运用以来不同测量断面冲淤沿程分布情况,重点围绕主要冲刷河段(黄淤 18~32 断面),并向上下游适当延伸,拟定 9 个泥沙取样断面,分别为:黄淤 12、17、22、27、30(大禹渡)、33、36(古夺)、39、41(潼关),参见图 1 圈示位置。2024 年 8 月,组织人员赴水库现场取样(参见图 1 照片),并采用激光粒度仪对不同取样断面淤积泥沙粒径级配进行测量,结果如图 8 所示,分析不同取样断面淤积泥沙中值粒径与粘性颗粒含量,如图 9 所示。

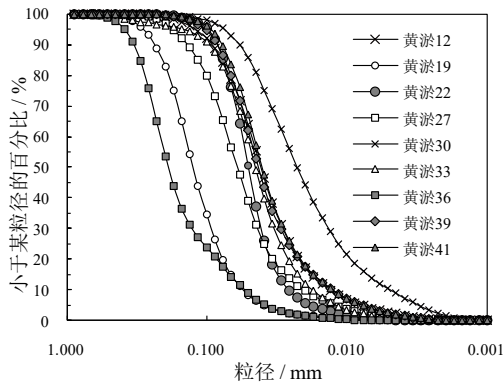


图 8 泥沙粒径级配曲线

Fig. 8 Sediment particle size distribution curves

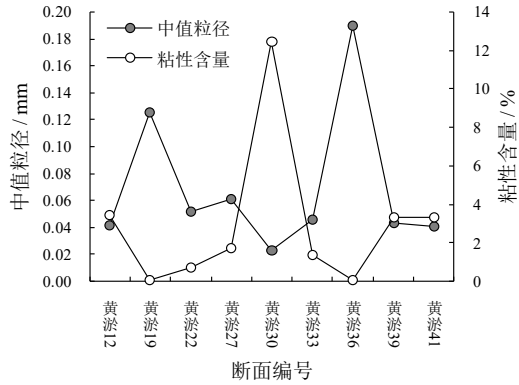


图 9 泥沙中值粒径及粘性颗粒含量

Fig. 9 Sediment median size and clay content

分别制作、改进水库泥沙淤积固结及冲刷起动试验装置,如图 10、11 所示。其中,水库泥沙淤积固结装置可以精确控制加载不同压力,以模拟泥沙颗粒骨架在不同有效应力条件下的淤积固结过程。分别对水库不同取样断面泥沙开展淤积固结试验,加压压力分别设置为 0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa,并每隔 1、2、3、5、7、10、14 天开启装置取样。对水库不同取样断面泥沙在不同加压压力、加压天数下的固结土柱,开展冲刷起动试验。在试验过程中,逐渐加大流量(流速)并仔细观察土柱表面泥沙起动情况,当发现达到少量起动标准时,记录水流流量并转化为流速与剪切应力,作为起动临界条件。



图 10 泥沙淤积固结可控压力试验装置

Fig. 10 Consolidation experiment device with adjustable pressure



图 11 固结泥沙冲刷起动试验装置

Fig. 11 Incipient motion device of consolidated sediment

2.2 试验结果与分析

图 12 (a) - (d) 分别为三门峡水库泥沙淤积固结试验不同取样断面（黄淤 12、22、30 和 36 断面）在不同加压压力条件（0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa）下实测干密度随时间变化过程。可以看出，随着泥沙淤积固结时间的增长，泥沙干密度总体呈现不断增大的变化趋势，且增大速率先快后慢，最终趋向于稳定值。不过，在不同取样断面与压力条件下，泥沙淤积固结干密度的时间增长曲线有所不同，变化范围在 $0.9 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 之间，呈现出复杂的变化规律。

图 13 (a) - (b) 分别为三门峡水库淤积固结泥沙冲刷起动试验过程中实测起动临界流速、剪切应力与泥沙干密度之间的变化关系。可以看出，水库淤积固结泥沙起动临界流速与剪切应力随干密度的增大总体呈超线性幂律函数增长（幂律指数大于 1.0），这表明对于水库泥沙淤积固结干密度的小幅增大将会导致起动临界条件（流速、剪切应力、流量等）的大幅增长。因此，对三门峡水库汛期敞泄排沙考虑上站来水含沙量的输沙幂律函数公式（1），进一步考虑初期床面新淤泥沙与后期床面淤积固结泥沙冲刷起动临界条件差别，改进表示为式（4）是合理的。

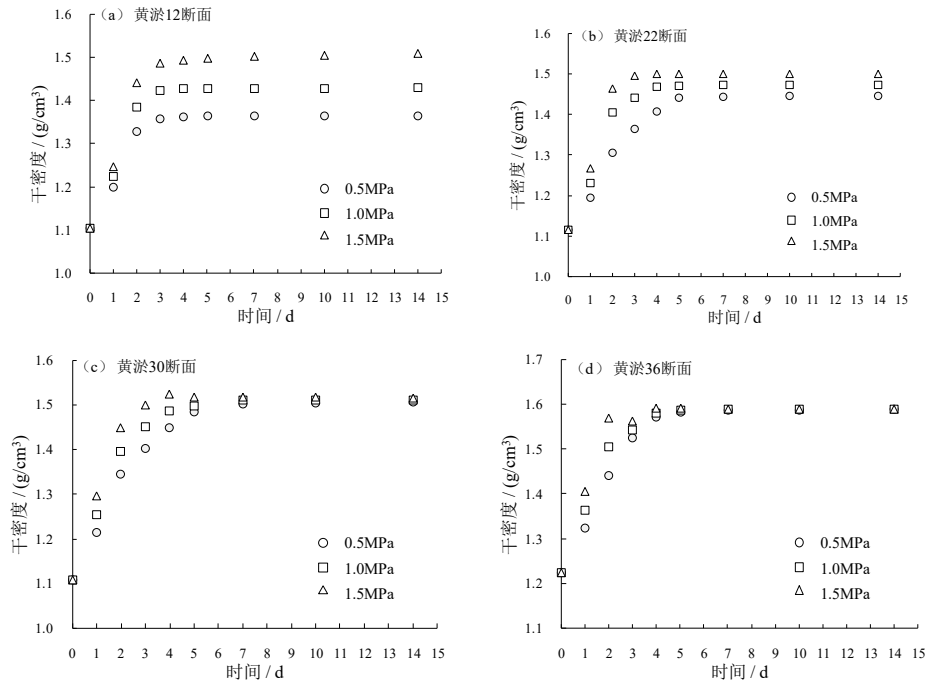


图 12 水库泥沙淤积固结干密度随时间变化过程

Fig. 12 Time-variation processes of dry density during reservoir deposited sediment consolidation

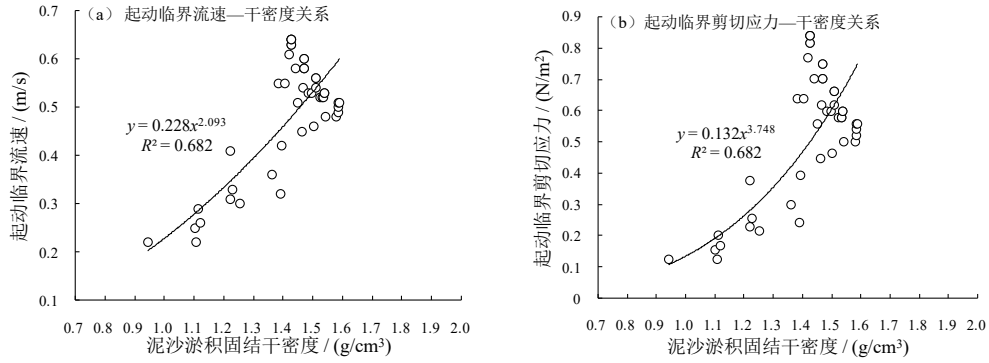


图 13 水库淤积固结泥沙起动临界流速、剪切应力与干密度变化关系

Fig. 13 Relation between incipient motion velocity and shear stress with consolidated sediment dry density

3 模型建立与概化模拟

3.1 模型基本方程建立

在上述资料统计与试验研究的基础上, 研究建立三门峡水库汛期敞泄排沙的冲刷—平衡发展过程概化模型。基于三门峡水库汛期敞泄排沙出库输沙率改进公式 (4), 结合河流系统滞后响应模型理论^[19-20], 对于河流冲刷自动调整过程中输沙系数 K 的调整, 认为初始调整变化速率较快, 随后逐渐降低, 并最终趋向于零, 进而可以建立如下滞后响应模型方程^[21]:

$$K = [1 - \exp(-\beta t)] K_e + \exp(-\beta t) K_0 \quad (5)$$

$$K_e = \frac{Q_{su}}{S_u^a (Q - Q_c)^b} \quad (6)$$

式中: K_e 为输沙系数平衡值; K_0 为输沙系数初始值; Q_{su} 为入库输沙率, kg/s; t 为时间, s; β 为调整变化速率, 1/s。

联合式 (4)、(5)、(6), 在水库恒定来水来沙且冲刷条件下, 根据沙量平衡法, 则库区单位时间冲刷率为:

$$\delta = Q_s - Q_{su} = (K - K_e) S_u^a (Q - Q_c)^b \quad (7)$$

式中: δ 为库区单位时间冲刷率, kg/s。

对式 (7) 沿时间积分, 则可以建立库区累计冲刷量的滞后响应模型方程:

$$\Delta = [1 - \exp(-\beta t)] \Delta_e \quad (8)$$

$$\Delta_e = \frac{1}{\beta} (K_0 - K_e) S_u^a (Q - Q_c)^b = \frac{1}{\beta} (Q_{s0} - Q_{su}) \quad (9)$$

式中: Δ 为水库累计冲刷量, kg; Δ_e 为累计冲刷量平衡值, kg; Q_{s0} 为出库输沙率初始值, kg/s。

对于式 (8), 如将时间 t 转化为累计径流量 W , 则可进一步表示为:

$$\Delta = [1 - \exp(-\beta' W)] \Delta_e \quad (10)$$

式中: W 为水库累计径流量, m³; β' 为修正调整变化速率, $\beta' = \beta/Q$, 1/m³。

3.2 模型应用与效果评价

基于水库汛期敞泄排沙出库输沙系数及累计冲刷量滞后响应模型方程式 (5) - (6) 及 (8) - (10),

考虑初期床面新淤泥沙与后期床面淤积固结泥沙冲刷起临界流量的区别，分别以三门峡水库 2005 年与 2022 年汛期敞泄排沙为例，应用模拟输沙系数随累计冲刷时间、累计冲刷量随累计入库水量的变化过程。为简化计算，将汛期内不同场次敞泄排沙入库流量、含沙量概化为恒定过程，并分别加以递推模拟，相关模型参数如表 1 所示，具体模拟结果如图 14-16 所示。其中，对于 2005 年汛期敞泄排沙第 1、2 场次，因第 1 场次入库含沙量约为 0，难以应用考虑上站来水含沙量的输沙幂律函数公式，因此对场次 1 与 2 进行了合并处理；对于 2022 年汛期敞泄排沙第 1 场次输沙系数初始值 K_0 ，因 2005-2022 年期间水库总体呈现冲刷态势（总冲刷量约为 0.3 亿 m^3 ），并结合参数率定，确定 2022 年汛期敞泄排沙第 1 场次输沙系数初始值 K_0 较 2005 年有所减小。分别选用确定性系数 R^2 与 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{NS} 作为汛期敞泄排沙累计冲刷量模拟效果量化评价指标^[22-23]，具体结果同列于表 1。其中，确定性系数 R^2 是评价模拟效果最为基本的评价指标，变化范围在 0~1.0 之间，当 $0.6 < R^2 \leq 0.7$ 时说明模型精度一般，当 $0.7 \leq R^2 \leq 0.8$ 时说明模型精度较好，当 $0.8 \leq R^2 \leq 1.0$ 说明模型精度很高；Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{NS} 是判定残差与实测值数据方差相对量的标准化统计值，变化范围在 $-\infty \sim 1.0$ 之间，当 $E_{NS} = 1.0$ 时说明模拟值与实测值完全吻合，当 $E_{NS} > 0.5$ 时说明模拟结果在可以接受的水平内，当 $E_{NS} > 0$ 时说明模拟结果有效，当 $E_{NS} \leq 0$ 时说明模拟值与实测值存在较大偏差。两者指标计算公式分别为：

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n \left(\Delta_c^i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_c^i \right) \left(\Delta_o^i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_o^i \right) \right]^2}{\sum_{i=1}^n \left(\Delta_c^i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_c^i \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(\Delta_o^i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_o^i \right)^2} \quad (11)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_c^i - \Delta_o^i)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\Delta_o^i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_o^i \right)^2} \quad (12)$$

式中： R^2 为确定性系数； E_{NS} 为 Nash-Sutcliffe 效率系数； Δ_o^i 为第 i 样本序号实测值； Δ_c^i 为第 i 样本序号计算值； n 为样本总数； i 为样本序号。

表 1 模型参数及效果评价统计表

Tab.1 Statistics of model parameters and performance evaluation results

年份	水沙过程概化			模型参数					效果评价		
	场次	$Q / (m^3/s)$	$S_u / (kg/m^3)$	$Q_c / (m^3/s)$	K_0	K_c	a	b	$\beta / (1/d)$	R^2	E_{NS}
2005	1	839	46.4	0	2.4	0.31	0.6	1.4	0.15	0.99	0.99
	2										
	3										
	4										
	5										
	6										
2022	1	848	4.5	0	1.5	0.12					
	2	1624	60.6	290	0.35						
	3	1412	32.8	290	0.31						
	4	2315	11.2	290	0.14						

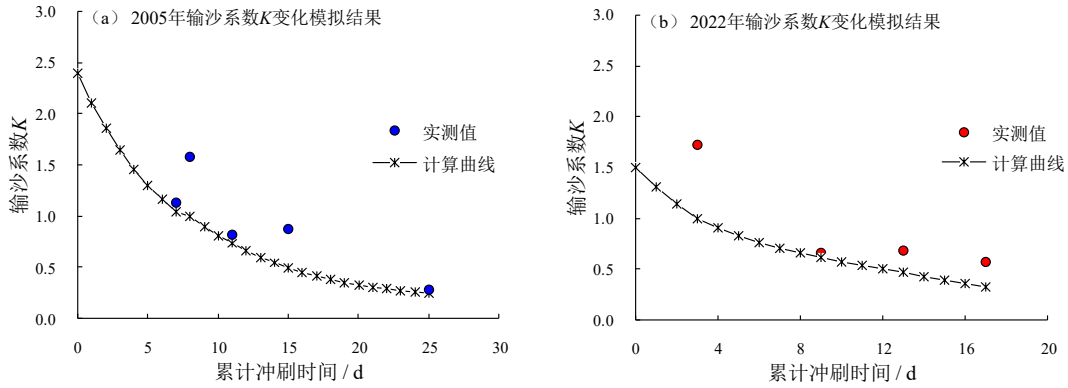


图 14 输沙系数 K 随累计冲刷时间变化过程模拟结果

Fig. 14 Simulation results of sediment transport coefficient variation process during continue scouring

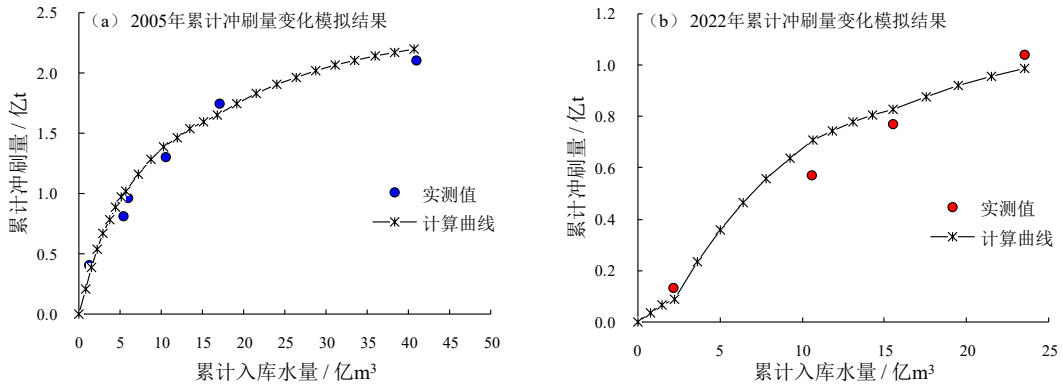


图 15 累计冲刷量随累计入库水量变化过程模拟结果

Fig. 15 Simulation results of accumulated scouring volume variation with accumulated incoming water

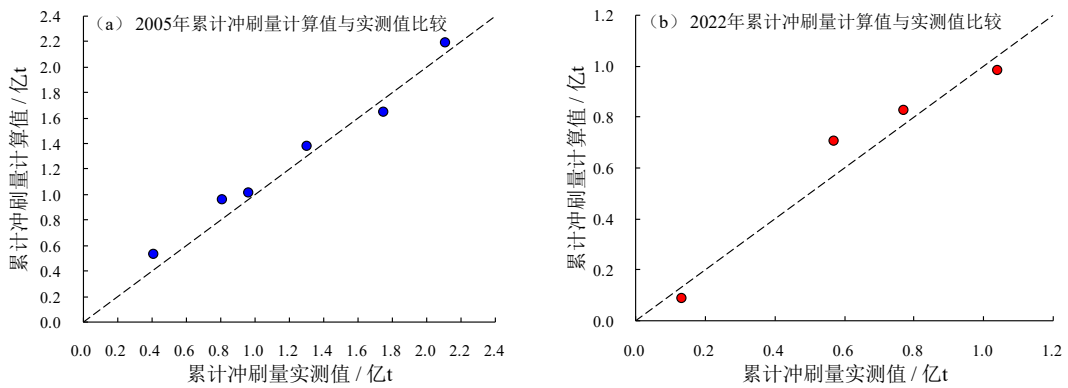


图 16 累计冲刷量计算值与实测值比较

Fig. 16 Comparison between calculated and measured accumulated scouring volume

综合图 14-16 及表 1 可以看出:基于水库汛期敞泄排沙出库输沙系数及累计冲刷量滞后响应模型方程,考虑初期床面新淤泥沙与后期床面淤积固结泥沙冲刷起临界流量区别,对输沙系数随累计冲刷时间变化的计算曲线与实测值变化趋势基本符合,对累计冲刷量随累计入库水量变化的计算曲线与实测值变化趋势符合良好,确定性系数 R^2 与 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{MS} 均达到 0.98 以上,反映出冲刷—平衡的发展过程,

初步说明了所建模型方法的合理性。

4 结论

(1) 三门峡水库不同年份汛期敞泄排沙累计冲刷量均随累计入库水量增大而增大,但在不同时期形成不同的趋势线,且增幅速率均逐渐减小,表现出冲刷—平衡的发展过程。

(2) 三门峡水库汛期敞泄排沙可采用考虑上站来水含沙量的输沙幂律函数公式,且输沙系数随累计冲刷时间及总量增大而不断衰减,这是形成冲刷—平衡发展过程的根本原因,也是造成以往率定流量幂律指数出现小于 1.0 不合理现象的重要原因。

(3) 考虑三门峡水库汛期敞泄排沙初期床面新淤泥沙与后期床面淤积固结泥沙冲刷起临临界条件的差别,对考虑上站来水含沙量的输沙幂律函数公式进行了改进,并对后期输沙系数进行了修正,结果显示修正后输沙系数随累计冲刷时间及总量增大而衰减的变化趋势总体更为光滑、合理。经三门峡水库泥沙淤积固结及冲刷起临试验验证,对于水库泥沙淤积固结干密度的小幅增大,将会导致起临临界条件(流速、剪切应力、流量等)的大幅增长。

(4) 对于三门峡水库汛期敞泄排沙冲刷—平衡发展过程,基于考虑上站来水含沙量的输沙幂律函数改进公式,结合河流自动调整原理及滞后响应模型,建立输沙系数及累计冲刷量的滞后响应模型,并进行概化模拟。结果表明,计算输沙系数随累计冲刷时间变化曲线与实测值变化趋势基本符合,计算累计冲刷量随累计入库水量变化曲线与实测值变化趋势符合良好,确定性系数与 Nash-Sutcliffe 效率系数均达到 0.98 以上,初步说明了所建模型方法的合理性。

5 参考文献

- [1] Lin XZ, Dong CY, Li DD. Sediment analysis and operational mode of Sanmenxia reservoir. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(5): 18-22. [林秀芝, 董晨燕, 李丹丹. 三门峡水库淤积分析和运用方式研究. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 18-22.]
- [2] Hou SZ, Hu T, Wang P, et al. Analysis of erosion and sedimentation in the Sanmenxia reservoir and Tongguan elevation change in recent years. *Journal of Sediment Research*, 2024, 49(16): 30-36. [侯素珍, 胡恬, 王平, 等. 近年来三门峡库区冲淤及潼关高程变化分析. 泥沙研究, 2024, 49(16): 30-36.]
- [3] Zheng S, Wu BS, Hou SZ, et al. Spatial and temporal erosion and deposition processes and the delayed response of the Sanmenxia reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(12): 1433-1445. [郑珊, 吴保生, 侯素珍, 等. 三门峡水库时空冲淤与滞后响应. 水利学报, 2019, 50(12): 1433-1445.]
- [4] He J, Zheng S, Wu BS. Changes of erosion\deposition centers in the Sanmenxia reservoir and its influence on the riverbed elevation at Tongguan. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(1): 338-348. [何娟, 郑珊, 吴保生. 三门峡水库冲淤重心变化及其对潼关高程的影响. 湖泊科学, 2023, 35(1): 338-348.]
- [5] Shen Y, Zheng S, Wu BS. Calculation method for erosion and deposition processes in the Sanmenxia reservoir based on delayed response model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1207-1217. [沈逸, 郑珊, 吴保生. 基于滞后响应模型的三门峡水库冲淤计算方法. 水利学报, 2022, 53(10): 1207-1217.]
- [6] Hou SZ, Hu T, Yang F, et al. Research on the causes of sediment discharge of Sanmenxia reservoir during flood season. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 393-400. [侯素珍, 胡恬, 杨飞, 等. 三门峡水库汛期排沙效果研究. 水利学报, 2021, 52(4): 393-400.]
- [7] Xu Y, Zhu DJ, Meng Z, et al. Experimental study on bed load transport in the armoring process. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 339-347. [徐元, 朱德军, 孟震, 等. 河床粗化过程中推移质输移特征试验研究. 水科学进展, 2018, 29(3): 339-347.]
- [8] Li YS, Wu T, Qin J, et al. Study on the balance time of river bed scouring under clear water conditions. *Journal of Sediment Research*, 2025, 50(4): 15-22. [李乐诗, 吴腾, 秦杰, 等. 清水条件下河床冲淤平衡时间研究. 泥沙研究, 2025, 50(4): 15-22.]
- [9] Wang PQ, Cai RR. Effect of sediment consolidation time on dry density and incipient motion and scour. *Yellow River*, 2014, 36(5): 22-23. [王普庆, 蔡蓉蓉. 淤积物固结时间对干容重与起临冲刷的影响. 人民黄河, 2014, 36(5): 22-23.]

- [10] Wang J, Tan GM, Shu CW. Experimental study on inception of consolidated cohesive sediment. *Journal of Sediment Research*, 2014(6): 25-29. [王军, 谈广鸣, 舒彩文. 固结状态下黏性泥沙起动规律试验研究. 泥沙研究, 2014(6): 25-29.]
- [11] Zhou SF, Huang ZW, Wang ZC. Experimental study on initiation law of consolidated cohesive sediment in Poyang Lake. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(3): 99-104. [周苏芬, 黄志文, 王志超. 鄱阳湖黏性底质淤泥固结起动规律试验. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 99-104.]
- [12] Yang F, Wang YJ, Jiang EH. Influence factors and two evolution patterns for retrogressive erosion of step. *Sci Sin Tech*, 2024, 54(7): 1390-1398. [杨飞, 王远见, 江恩慧. 跌坎溯源冲刷的影响因素与两种发展模式. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(7): 1390-1398.]
- [13] Wu BS, Zhang YF. Analysis on sediment transport in the lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2007 (1): 30-35. [吴保生, 张原锋. 黄河下游输沙量的沿程变化规律和计算方法. 泥沙研究, 2007 (1): 30-35.]
- [14] Wang P, Jiang NQ, Hou SZ, et al. Results of scour and silt of prototype testing of the Sanmenxia reservoir. *Yellow River*, 2007, 29(7): 22-24. [王平, 姜乃迁, 侯素珍, 等. 三门峡水库原型试验冲淤效果分析. 人民黄河, 2007, 29(7): 22-24.]
- [15] Shen HB, Cao B, Wu HL, et al. Parameters variation law with distance in the discharge-sediment relation model of the Lower Yellow River. *ACTA Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 635-649. [申红彬, 曹兵, 吴华莉, 等. 黄河下游水沙关系模型参数随河段距离变化规律. 地理学报, 2020, 28(6): 1294-1303.]
- [16] Zhou WX, Sun ZH, Yang ZH, et al. Sediment-transport rating curves and their variation mechanisms in sandy reach of the Jingjiang River before and after construction of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 56(8): 1049-1060, 1071. [周炜兴, 孙昭华, 杨中华, 等. 三峡建库前后荆江沙质河段流量—输沙率关系及其变化机理. 水利学报, 2025, 56(8): 1049-1060, 1071.]
- [17] Qian N, Zhang R, and Li JF, et al. 1981. A preliminary study on the mechanism of self-regulation of sediment transport capacity in the lower Huang He (The Yellow River). *Acta Geographica Sinica*, 1981, 36 (2), 143-155. [钱宁, 张仁, 李九发, 等. 黄河下游挟沙能力自动调整机理的初步探讨. 地理学报, 1981, 36(2): 143-155.]
- [18] Wu BS, Liu KJ, Shen HB, et al. Calculation methods for sediment load and deposition volume in the Inner Mongolia reach of the Yellow River. *Advances in Water Science*, 2015, 26(3): 311-321. [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. 水科学进展, 2015, 26(3): 311-321.]
- [19] Wu BS. Delayed response model for fluvial processes of alluvial rivers I: model development. *Journal of Sediment Research*, 2008, (6): 1-7. [吴保生. 冲积河流河床演变的滞后响应模型-I 模型建立. 泥沙研究, 2008, (6): 1-7.]
- [20] Wu BS. Delayed response model for fluvial processes of alluvial rivers II: model applications. *Journal of Sediment Research*, 2008, (6): 30-37. [吴保生. 冲积河流河床演变的滞后响应模型-II 模型应用. 泥沙研究, 2008, (6): 30-37.]
- [21] Shen HB, Wu HL, Li LJ, et al. Description method for variation of sediment transport rate based on delayed response model. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(6): 1294-1303. [申红彬, 吴华莉, 李灵军, 等. 基于滞后响应模型的输沙率变化过程描述方法. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1294-1303.]
- [22] Hu S, Cao MM, Qiu HJ, et al. Applicability evaluation of CFSR climate data for hydrologic simulation: A case study in the Bahe River Basin. *ACTA Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1571-1586. [胡胜, 曹明明, 邱海军, 等. CFSR 气象数据在流域水文模拟中的适用性评价-以灞河流域为例. 地理学报, 2016, 71(9): 1571-1586.]
- [23] Shen HB, Xu ZX, Wang HZ, et al. Assessment on the linear effect of urban road network confluence and applicability of Clark unit hydrograph model. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3): 62-69. [申红彬, 徐宗学, 王海周, 等. 城市路网汇流线性效应与 Clark 分布式单位线适用性检验. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 62-69.]