

文章编号: 0559-9350(2025)08-1037-12

黄河下游输沙需水量模拟预测研究

李琳琪^{1,2}, 张红武², 傅旭东², 侯琳², 郭庆超¹, 黄海¹

(1. 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100048;

2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 黄河下游输沙需水量的合理预测对优化水沙调控、保障防洪安全及提升河道治理效果至关重要。本文引入带有平均含沙量分布系数 α_s 与非饱和系数 f_s 的非平衡输沙方程计算沿程含沙量变化,以河床综合稳定性指标作为河道整治工程的约束程度,构建出黄河下游河段冲淤数值模型,并利用黄河下游实测水沙数据对模型进行验证。通过选取不同来水来沙条件的10组方案进行模拟,研究发现输沙需水量与来沙量呈正相关关系,在来沙量超过5亿t时,需水量增长趋缓。此外,河道整治程度的提高能够有效减少输沙需水量,例如,当河床综合稳定性指标 Z_w 由4提升至4.5时,相同来沙量下的需水量可降低约10%。进一步的模拟预测显示,黄河下游未来年输沙量在2亿~3亿t时,输沙需水量为100亿~155亿 m^3 ,且当前水资源配置基本能够满足输沙需求。本研究的成果可为黄河下游水沙调控及河道治理提供科学依据,并对高含沙河流的水沙调控研究亦具有重要的参考价值。

关键词: 输沙需水量; 黄河下游; 河床综合稳定性指标; 数值模型; 推移质输沙

中图分类号: TV143

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20240347

1 研究背景

黄河下游的水沙主要源自其上中游区域,其中潼关水文站控制着流域面积的91%、水量的90.3%,以及近乎进入下游的全部输沙量。受到自然环境和人类活动的双重影响,自1980年代起,黄河的径流和输沙情况发生了显著的变化^[1]。水土保持措施有效减少了进入黄河的泥沙量,加之小浪底水库的拦沙效应,进入黄河下游的沙量则更为有限。根据花园口、利津等水文站2018—2021年的观测数据,尽管来水量较大而来沙量相对较少,但黄河下游河道这4年即使在调水调沙状态下仍处于微淤状态。黄河水沙情势变化不仅关乎黄河流域的治理规划以及治黄方略的调整,也是预测黄河输沙需水量的重要前提。黄河下游输沙需水量预测作为黄河流域治理与开发规划的关键基础,其可靠性和合理性对于流域内水沙调控工程布局、防洪安全保障以及河道治理等多个方面均具有至关重要的作用。

关于输沙需水量,最初李保如、赵业安等按总输沙水量进行探索^[2-4],不少学者以此开展研究^[5-6];此后岳德军等^[7]与石伟等^[8]按单位重量泥沙的输沙水量进行计算;吴保生等^[9]试图将塑槽与输沙需水量相联系,同时也加大了研究难度。显然,这三方面的内涵之间有所区别。清华大学在承担水利部有关部门委托的黄河远期输沙需水量研究任务时,将输沙需水量定义为:在一定来水来沙及河床边界条件下,某一河段内河道处于均衡状态时输送一定数量泥沙所对应的总水量^[10]。这一总

收稿日期: 2024-06-07; 网络首发日期: 2025-07-04

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20250703.1612.001>

基金项目: 内蒙古自治区财政重大专项(2024JBGS0016); 水利部重大科技项目(SK-2022055); 国家自然科学基金面上项目(52379083)

作者简介: 李琳琪(1994-), 博士, 工程师, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: lilq@iwhr.com

通信作者: 张红武(1958-), 教授, 博士生导师, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zhhw@mail.tsinghua.edu.cn

水量是在未来多年平均来沙量条件下,黄河下游河道维持主槽不萎缩、河床不抬高的多年平均总水量,而非汛期来看,允许存在河床冲淤有小幅变化。在进入下游的泥沙大幅减小情况下,黄河下游依然处于不断冲淤调整的趋衡响应^[11]过程中,应当允许河道存在一定比例的冲刷和淤积,故采用河流动力学方法计算的输沙需水量值需要从多年平均尺度上考虑,使河道的冲淤变化处于相对均衡状态。

在预测输沙需水量的研究中,主要采用的方法包括统计分析法、机器学习与深度学习方法、遥感与GIS技术方法以及数学模型法,不同方法适用于不同尺度和精度要求的研究^[12-14]。统计分析法基于历史数据,构建经验关系或统计模型,以预测流量和输沙量。该方法计算简便,能够揭示变量间的关系,但对非线性关系的处理能力较弱,对极端气候或突发事件(如洪水)的预测适应性不足。机器学习与深度学习方法利用人工智能技术对非线性水沙关系进行建模和预测^[15],能够处理流量与输沙量之间的复杂关系,计算速度快。然而,其预测结果的解释性较差,且需要大量历史数据进行训练,若训练数据不足或数据质量低,可能导致过度拟合现象。遥感与GIS技术方法主要利用卫星遥感、无人机和GIS技术进行河道监测和预测^[16]。该方法适用于长期和大尺度监测,能够获取大范围的水文信息,不受传统观测点限制。但其空间分辨率和时间分辨率有限,无法提供高频实时数据,采集的数据处理工作复杂,且受天气和地形影响,如云层遮挡可能影响卫星遥感数据质量。基于水力学与泥沙动力学理论构建的水动力数值模型,能够模拟河道水沙输移过程。模型具有坚实的物理基础,适用于多种空间尺度,能够反映河道水深、流速及河床演变过程,在河流、湖泊及近海水域的泥沙输移、河床演变和洪水演进等领域得到广泛应用^[17-19]。然而,这些模型的运行高度依赖于大量的物理参数和初始条件,尤其是详尽的地形数据。尽管遥感影像技术能够提供较高精度的滩地地形资料,但水下地形数据的采集依然需要依赖于人工和设备进行实地探测。对于那些河道较长且部分年份缺乏测量数据的研究区域,模型的应用和模拟精度受到一定限制。

河相关系是研究河流在特定流量下,河床形态与水流、泥沙等因素之间关系的重要工具。河相关系能够体现河流系统的演变规律,并确定河床的稳定性和形态特征。张红武等^[20-21]基于河相关系提出了河床综合稳定性指标,用于判定河型和河流状态。利用这一指标能够表达河宽与水深的关系,将其引入水动力模型中,即便在缺乏水下地形数据的情况下,亦能估算出均衡状态下河流几何形貌特征的度量参数,从而使得水动力学模型在水下地形缺失的河段中,也能够快速进行河流输沙过程的模拟计算。此外,在预测未来输沙需水量的过程中,考虑持续建设的控导工程对河道的约束作用将逐步稳定河势,可以在模型中通过调整河床综合稳定性指标来体现。

本文在一维模型的框架基础上结合河床综合稳定性指标建立河段冲淤数值模型用于水沙过程模拟。该模型继承了水动力模型的优势,利用河床综合稳定性指标估算河床几何形貌特征参数,解决因缺失地形资料而无法应用一维水动力模型的问题。在预测过程中,通过调整河床综合稳定性指标,能够合理表征冲积河流在人工干预下通过趋衡调整所达到的均衡主槽形态。本研究利用该模型对黄河下游宽河段输沙需水量进行模拟和预测,此外,根据预测结果拟合的输沙需水量关系曲线,为调水调沙和防洪安全提供理论支持。

2 河段冲淤数值模型构建

在对黄河下游宽河段开展数值计算时,水流挟沙能力和河床糙率这两个根本问题直接影响模型的准确性。本研究选用张红武水流挟沙力公式^[22]计算黄河下游宽河段冲淤平衡状态下的水流挟沙力,能够较好地模拟含沙量和挟沙力相差较大的河道输沙特性^[23-24]。由于泥沙数值模型的基本方程不封闭,以往数学模型一般选用阻力公式来封闭方程,对糙率赋同一定值或仅区分主槽和滩地的糙率取值,本文在建立模型时使用李琳琪等^[25]提出的适用于冲积河流的动床阻力公式封闭整体方程组,根据日流量和含沙量,采用“涨冲落淤”的规律对糙率赋值。涨冲落淤现象是河流动力学中的一个基本过程,它

反映了河流在自然条件下的动态平衡过程。在涨水期,水流速度加快,冲刷河床,河床相对光滑,糙率赋值偏小。而在落水期,水流速度减缓,携带的泥沙沉积下来,形成淤积,河床相对粗糙,糙率赋值偏大。为体现不同时期实施河道整治工程程度对河道冲淤量的影响,根据自动调整作用^[20]和“趋衡响应原理”^[11],可选用河床综合稳定性指标^[21]作为均衡状态下河流几何形貌特征的度量参数。针对高含沙河流,河道冲淤变化显著,现有模型计算一般洪水过程时,通常将恢复饱和系数设定为远小于1的经验数值,来弥补因计算的水流挟沙能力较小而导致计算含沙量与实际含沙量相差较大的缺陷,但经验设置的恢复饱和系数不能准确计算复杂的冲淤演变过程,本文采用张红武等^[20]对非平衡输沙方程修正后推导出的含沙量沿程变化公式参与模型计算。

以往的泥沙数值模型认为悬移质输送量占泥沙输移比重大,并且推移质输沙较为复杂,模拟精度差,从而容易忽略推移质输沙计算。而黄河下游床沙颗粒逐渐粗化,推移质输沙一般都是粗沙,对输沙的贡献突出表现是加大了粗沙的输移比重。因此,模型中建立悬移质输沙和推移质输沙两部分,能够充分体现床沙粗化后的泥沙输移状况。

2.1 河床综合稳定性指标 为定量判定河型,张红武等^[20-21]认为在任何河床组成或水沙组成条件下,冲积河流的综合稳定性主要取决于河床的纵向和横向稳定性,给到纵向、横向稳定特征指标后,认为两指标值较小时,说明稳定性较小,河型判定为游荡型河段,反之为非游荡型河段。进一步将两者乘积,显然代表了纵向和横向稳定特征的组合,成为河床综合稳定性指标:

$$Z_w = \frac{1}{J} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{D_{50}}{h} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{h}{B} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

式中: J 为比降; γ_s 和 γ 分别为泥沙和水的容重; D_{50} 为床沙中值粒径; h 为水深; B 为河宽; Z_w 为河床综合稳定性指标,当 $Z_w < 5$ 时,为游荡型河流;当 $5 \leq Z_w \leq 15$ 时,为分汊(过渡)型河流;当 $Z_w > 15$ 时,为弯曲型河流。

将物理概念清晰的河床综合稳定性指标 Z_w 引入河流数学模型,不仅可以避免使用经验性过强甚至量纲都不和谐的河相关系式参与数学模型计算带来的局限性,还可合理表征冲积河流在人工干预下通过趋衡调整所达到的均衡主槽形态^[11]。模型计算使用以日为时间序列的数据,因 Z_w 在短时间内不会发生较大的变化,不需要根据日水沙量变化而调整。另外,可以通过调整 Z_w ,模拟未来河床形态变化后的冲淤情况及输沙需水量。引入李琳琪等^[25]动床阻力公式(2)以及水流连续方程(3),即

$$n = \frac{2.308}{V} h^{0.7} D_{50}^{1/10} \left(\frac{4.9 D_m}{h_0} + \frac{V^2}{2g\Delta l} \right)^{1/2} \left(\frac{c_n}{c_{n0}} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$Q = VBh \quad (3)$$

式中: n 为糙率; V 为流速; D_m 和 h_0 分别为造床流量下床沙代表粒径和水深; Δl 为流速水头对应的相对长度; c_n 为涡团参数; c_{n0} 为清水时的涡团参数; Q 为流量。

2.2 悬移质输沙计算 悬移质输沙量由出口断面悬移质含沙量过程及历时 $T(d)$ 计算:

$$W_{sus} = S_{out}QT \quad (4)$$

式中: W_{sus} 为悬移质输沙量; S_{out} 为断面出口含沙量,采用张红武等^[20]对非平衡输沙方程修正后推导出的含沙量沿程变化公式计算:

$$S_{out} = \frac{1}{f_s} S_* + \left(S_{in} - \frac{1}{f_s} S_* \right) e^{-a_s f_s \frac{\omega_s}{q} x} \quad (5)$$

式中: f_s 为泥沙非饱和系数; S_* 为水流挟沙力,由张红武公式^[22]计算; S_{in} 为断面入口含沙量; a_s 为平均含沙量分布系数; ω_s 为泥沙在浑水中的沉速; q 为单宽流量; x 为河段长度。

$$f_s = \left(\frac{S_{in}}{S_*} \right)^{0.1/\arctg\left(\frac{S_m}{S_*}\right)} \quad (6)$$

$$S_* = 2.5 \left[\frac{(0.0022 + S_v) V_*^3}{\kappa_m \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} g h \omega_s} \ln \left(\frac{h}{6D_{50}} \right) \right]^{0.62} \quad (7)$$

$$\gamma_m = \gamma + \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_s} \right) S \quad (8)$$

$$a_* = \frac{1}{N} \exp \left(8.21 \frac{\omega_s}{\kappa_m V_*} \right) \quad (9)$$

$$N = \int_0^1 f \left(\frac{\sqrt{g}}{c_n C}, \eta \right) \exp \left[5.33 \frac{\omega_s}{\kappa_m V_*} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{\eta} - 1} \right] d\eta \quad (10)$$

$$f \left(\frac{\sqrt{g}}{c_n C}, \eta \right) = 1 - \frac{3\pi\sqrt{g}}{8c_n C} + \frac{\sqrt{g}}{8c_n C} \left(\sqrt{\eta - \eta^2} + \arcsin \sqrt{\eta} \right) \quad (11)$$

$$V_* = \frac{V\sqrt{g}}{C} \quad (12)$$

$$c_n = 0.15 - 0.63 \sqrt{S_v} (0.365 - S_v) \quad (13)$$

$$\kappa_m = \kappa_0 \left[1 - 4.2 \sqrt{S_v} (0.365 - S_v) \right] \quad (14)$$

$$\omega_s = \omega_0 \left[\left(1 - \frac{S_v}{2.25 \sqrt{d_{50}}} \right)^{3.5} (1 - 1.25 S_v) \right] \quad (15)$$

式中： S_v 为体积百分比表示的含沙量，含沙量 S 与体积含沙量的关系为 $S = \gamma_s S_v$ ； κ_m 和 κ_0 分别为浑水、清水卡门常数， κ_0 取0.4； γ_m 为浑水容重； ω_0 分别为泥沙在清水中的沉速； V_* 为摩阻流速； C 为谢才系数； d_{50} 为悬沙中值粒径。

2.3 非平衡输沙方程参数关系分析 为明晰上述非平衡输沙方程参数的变化规律，统计花园口、夹河滩、高村和孙口水文站2006—2015年的实测泥沙颗粒资料，得到 d_{50} 的平均值为0.015 mm， ω_0 的平均值为0.3 cm/s，可根据式(7)—(15)计算出三条不同摩阻流速条件下的平均含沙量分布系数 a_* 与 S 的关系曲线(图1)，从图1可看出，随着 S 的增大， a_* 呈现先增加后减小的变化趋势，尤其在 S 大于550 kg/m³后，不同摩阻流速条件下 a_* 的曲线合为一体。继而由式(6)求出泥沙非饱和系数 f_s 和含沙量与挟沙力之比 S/S_* 的关系曲线(见图2)，可看出， f_s 在 S/S_* 小于0.9以前由小迅速变大趋近于1，随后增速减慢逐渐呈平缓增加趋势。正是由于非平衡输沙方程参数具有特有的变化规律，才能够比以往将参数取为常数的数学模型更能够适应黄河复杂的非平衡输沙变化规律。

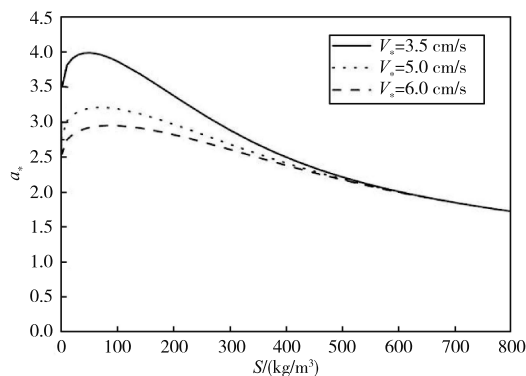


图1 a_* 与 S 的关系图($\omega_0=0.3$ cm/s)

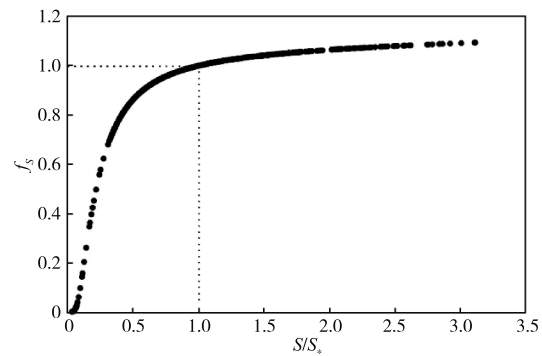


图2 f_s 与 S/S_* 的关系图

2.4 推移质输沙计算 将推移质输沙运动视为输沙带运动，其中包括悬移质与推移质交换的泥沙，推

移质断面输沙量及历时 T 计算：

$$W_{\text{bed}} = q_s B_s T \quad (16)$$

式中： W_{bed} 为推移质输沙量； q_s 为断面出口单宽推移质输沙量； B_s 为推移质输沙带宽度，其单宽推移质输沙量计算关系为：

$$q_s = s_d V_d \Delta_m \quad (17)$$

$$s_d = \alpha_* \max(S, S_*) \quad (18)$$

$$V_d = V \left(1 - \frac{7.85 \sqrt{g}}{C} \right) \quad (19)$$

式中： s_d 为底层含沙量； V_d 为底层流速； Δ_m 为推移质输沙层厚度。由于推移质层厚度在野外实测时通常存在测量难度大、测量效果不好等问题，实测数据资料很少。对于推移质输沙层厚度的计算，综合考虑水利摩阻厚度的概念，以及泥沙粒径、水流强度、水流摩阻特性对推移质输沙层厚度的影响，采用张罗号^[26]建立的推移质输沙层厚度关系式来计算，公式如下：

$$\Delta_m = \frac{C}{\sqrt{g}} D_{50} 10^{(1 - \sqrt{\sin(\pi Fr_A)})} \quad (20)$$

由于面积型 Froude 数与水流强度和水流搬运泥沙的能力相关，其规律性高于传统水深型 Froude 数，更适用于黄河沙质河段，计算结果更符合实际。面积型 Froude 数计算公式如下^[27]：

$$Fr_A = \frac{V}{\sqrt{g \sqrt{RB}}} \quad (21)$$

式中 Fr_A 为面积型 Froude 数。

2.5 模型求解步骤 本研究建立的河段冲淤数值模型求解步骤为：第一步，在确定模拟河流的现阶段或预期的 Z_w 值后，基于日水沙数据，按照涨冲落淤规律赋值日糙率 n ，将式(1)至式(3)联立，求解出河宽 B 、水深 h 和流速 V ；第二步，利用已知的日流量、含沙量值，以及计算得到的水深和流速数据，根据式(4)，计算河段悬移质输沙量 W_{sus} ；第三步，根据式(16)，计算河段推移质输沙量 W_{bed} ；第四步，当计算得到的悬移质、推移质输沙量之和与该河段进口输沙量 W_{in} 相同时，认为达到动态冲淤平衡，计算此时的用水量 W_{water} 为：

$$W_{\text{sus}} + W_{\text{bed}} = W_{\text{in}} \quad (22)$$

$$W_{\text{water}} = \sum QT \quad (23)$$

式中： W_{in} 为河段进口输沙量； W_{water} 为动态输沙平衡时需水量。

3 研究区域概况及模型验证

3.1 研究区域概况 黄河下游花园口至孙口水文站段为宽河段，艾山至利津水文站为窄河段^[28-29]，宽河段与窄河段的河道在河床比降、河床形态、床沙粒径等方面存在区别。黄河下游水面比降是上陡下缓，河床状况是上乱下稳，输沙能力上小下大，床沙粒径是上粗下细，这些差异会导致水流挟沙力计算结果沿程变化，造成不同条件下输送单位重量泥沙所需的水量有差异。黄河下游宽河段不仅有长时间序列的水文数据，还有相对较为丰富的泥沙颗粒数据，日时间序列资料相对较多。再者黄河下游宽河段发挥水沙调节的主导作用，对来水来沙过程最为敏感、响应最为迅速。黄河下游宽河段是探讨河段冲淤变化程度和远期输沙水量的关键研究对象，从而本文建立黄河下游宽河段冲淤数值模型，以河道治理程度为条件，模拟未来宽河段冲淤变化情况。

黄河勘测规划设计研究院有限公司按照年均输沙量 3 亿、6 亿和 8 亿 t 给出了黄河下游未来 50 年水沙长时间序列^[30-31]。根据年总来沙量级，选择了其中 10 个年份的日均水沙数据作为模型进口处的水沙

条件，来预测不同水沙条件下的输沙需水量，所有计算方案的详细信息见表1。如表所示，这10种方案是根据其年来沙量进行排序的，为排除数据选择对结果的干扰，每个年来沙量级选择2至3组不同日均水沙系列作为对比。选用了高村至孙口河段2021年调水调沙期(6月20日—7月9日)，2013年汛期(6月30日—7月25日)两段典型洪水期以及花园口至孙口河段1977年全年的实测数据资料对模型进行验证。

选用黄河下游宽河段上的花园口、夹河滩、高村和孙口水文站2006—2015年的实测泥沙颗粒资料，寻找悬移质中值粒径 d_{50} 、含沙量 S 和清水沉速 ω_0 之间的规律。分析实测资料并点绘悬沙中值粒径 d_{50} 与含沙量 S 之间的关系，见图3(a)。 d_{50} 和 S 之间存在着一定的关系，含沙量偏小时， d_{50} 随着含沙量的增加而减小；含沙量大于 60 kg/m^3 后， d_{50} 随着含沙量的增加却没有明显变化，基本在 0.008 mm 左右持平。分析原因认为是小浪底异重流排沙现象造成进入下游的沙量较大，但是异重流进入下游的泥沙粒径很小，大部分为随水流飘入下游的冲泻质。异重流排沙受小浪底下泄水位的影响，水位低时，排沙粒径稍粗，水位高时，排沙粒径较细，所以很难找到相应规律。因此通过分析以上实测资料，采用分段函数拟合得如下关系式：

$$\begin{cases} d_{50} = 0.008 + 0.05S^{-2} & S \leq 60\text{ kg/m}^3 \\ d_{50} = 0.008 & S > 60\text{ kg/m}^3 \end{cases} \tag{24}$$

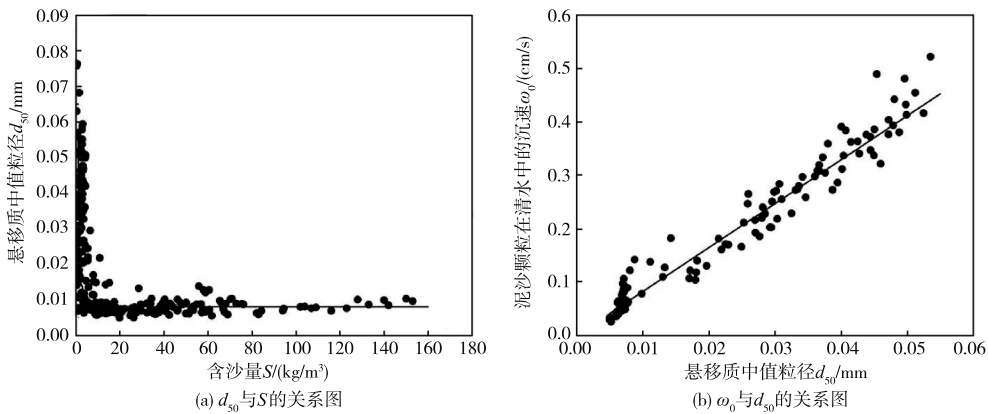


图3 黄河下游悬沙中值粒径与含沙量及沉速关系图

采用黄河下游宽河段的实测悬移质中值粒径和对应实测泥沙颗粒的清水沉速 ω_0 资料，建立 d_{50} 与 ω_0 关系，见图3(b)。通过统计实测资料发现，悬移质颗粒级配和沉速的测量资料集中在汛期，非汛期资料较少。并且统计资料范围在2006年以后，随着小浪底水库的运行，汛期来沙量大时，悬移质粒径小于 0.01 mm 的泥沙颗粒占比很大。分析图3(b)中 d_{50} 与 ω_0 之间的关系，给出函数关系为 $\omega_0=8.2323d_{50}$ 。

对于黄河下游宽河段，受已有工程约束和上游水库对水沙的调控，目前宽河段的河床综合稳定指标均在3.5以上，随着工程修建，宽河段河势将更加稳定。在模型计算时，黄河下游宽河段 Z_w 分别取值为4和4.5；高村站作为游荡型和过渡型的临界点，故高村至孙口河段 Z_w 取5。

3.2 模型验证 方案 V1 和方案 V2 所采用的数据均为实测资料，方案 V1 中使用的数据是在 2021 年小浪底水库调水调沙期收集的数据；而方案 V2 采用的是 2013 年汛期的数据，方案 V3 采用 1977 年花园口水文站日实测水沙数据。三个验证方案的日数据资料丰富，能够较好的验证和评价河段冲淤数值模型，根据实测资料利用输沙率法计算河段实测冲淤量，验证结果如表 2 所示，表明在同时段内，模型计算冲淤量同实际冲淤量相差不大。说明模型精度较高，适用性较强。

表 2 验证方案结果

方案	Z_w	模型输入糙率	悬移质输沙量/亿 t	推移质输沙量/亿 t	计算总输沙量/亿 t	实测输沙量/亿 t	计算淤积量/亿 t	实测淤积量/亿 t
V1	5	实测	0.426	0.007	0.433	0.420	0.0976	0.111
V2	5	涨冲落淤赋值	0.661	0.008	0.669	0.670	0.0007	-0.002
V3	3.8	涨冲落淤赋值	11.149	0.176	11.325	11.325	6.859	6.148

1977 年是黄河下游最有代表性的高含沙洪水年，这一实测资料能够对模型充分进行验证。利用 1977 年水沙资料深入分析选用不同平均含沙量分布系数与非饱和系数对模型精度的影响。已知 1977 年黄河下游花园口至孙口段的淤积量为 6.148 亿 t，当模型计算过程将非饱和系数 f_s 和平均含沙量分布系数 a_s 均恒取值为 1 时，计算该河段淤积量为 6.923 亿 t；当 f_s 恒取值为 1， a_s 按照式(9)计算时，计算该河段淤积量为 7.089 亿 t；当 f_s 按照式(6)计算， a_s 恒取值为 1 时，计算该河段淤积量为 7.153 亿 t；当 f_s 恒取值为 1， a_s 恒取值为 0.25 时，计算该河段淤积量为 6.960 亿 t；当 f_s 恒取值为 1， a_s 恒取值为 0.01 时，计算该河段淤积量为 5.402 亿 t。将上述结果与模型模拟结果进行对比，模型计算的淤积量与河段实测淤积量的相对误差最小，说明引入非平衡输沙方程能够提升模型精度。利用 1977 年洪水资料进一步分析不同水流挟沙力公式对模型精度的影响，选用张瑞瑾悬移质水流挟沙力公式进行对比计算，当 f_s 和 a_s 分别按照式(6)和式(9)计算时，计算该河段淤积量为 14.366 亿 t；当 f_s 和 a_s 均恒取值为 1 时，计算该河段淤积量为 14.508 亿 t，说明选取适用研究区的水流挟沙力公式和参数也至关重要。

4 黄河下游输沙需水量研究

运用上述构建的河段冲淤数值模型对黄河下游宽河段在不同整治工程修建程度下的水沙输移进行模拟。10 个方案均以 1 个水文年为计算总长进行逐日计算，方案已知逐日流量和含沙量，各方案输入糙率根据涨冲落淤规律赋值。统计黄河下游花园口、夹河滩、高村和孙口水文站造床流量下的床沙代表粒径 D_m 平均数为 0.08 mm，水深 h_0 平均数为 2.2 m，带入式(2)参与计算。10 个方案分别计算 Z_w 取值为 4 和 4.5 时的两种情况。

4.1 黄河下游宽河段模拟结果 模型以一个水文年为周期，计算从 6 月 26 日起，计算到次年 6 月 25 日止。根据 10 个方案给出的不同水沙条件下的日水沙量对糙率进行赋值，当日含沙量小于等于 0.1 时，糙率赋值 0.01；当日含沙量大于 0.1 时，根据涨冲落淤规律对糙率赋值。以方案 6 为例，输沙期的糙率赋值见图 4 所示。

利用模型对黄河下游宽河段进行模拟，模型模拟结果如图 5。每个方案在 Z_w 取 4 和 4.5 时的冲淤量累积情况分别见图 5(a)和图 5(b)。从图 5 的整体模拟计算结果来看，各方案在一个水文年内的逐日水沙条件下，黄河下游宽河段在来水量足够大时发生冲刷，来水量较小时出现淤积。当 $Z_w=4$ 时，方案 1 到 10 的年累积冲淤量分别为-0.20 亿、-0.27 亿、-0.15 亿、-0.25 亿、0.30 亿、-0.37 亿、0.20 亿、-0.11 亿、-0.03 亿和 0.86 亿 t(负为冲刷，正为淤积，下同)；当 $Z_w=4.5$ 时，方案 1 到 10 的年累积冲淤量分别为-0.23 亿、-0.38 亿、-0.20 亿、-0.36 亿、0.21 亿、-0.44 亿、0.09 亿、-0.21 亿、-0.09 亿和 0.70 亿 t。对比图 5(a)和图 5(b)的各方案结果，发现随着 Z_w 的提升，河道整治工程逐渐完善，导致河

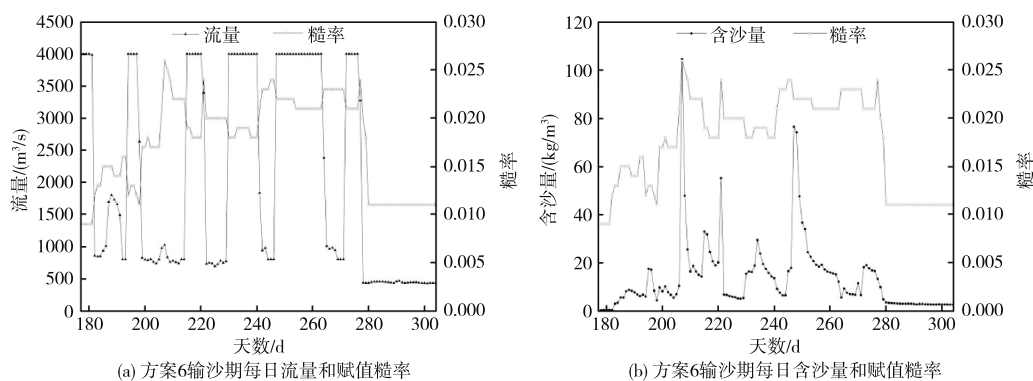


图4 方案6输沙期的流量、含沙量与赋值糙率关系图

宽变窄, 各方案在 $Z_w=4.5$ 时河槽被冲刷的强度明显高于 $Z_w=4$ 时。也说明, 通过整治工程对河道的进一步约束, 能够有效减少输沙需水量, 提升河道输水输沙能力。

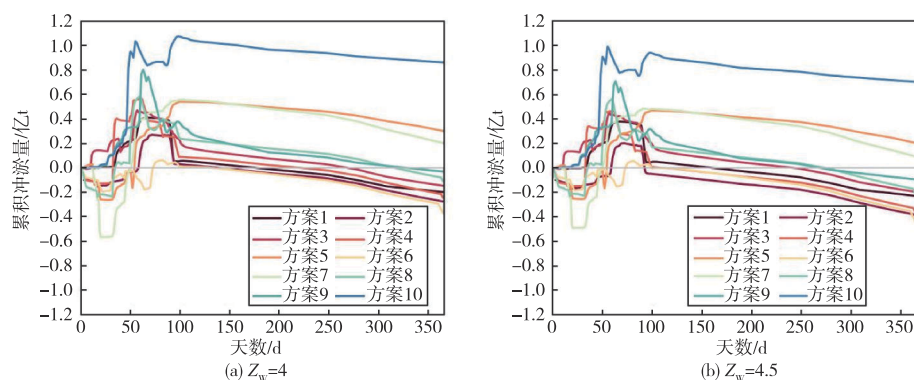


图5 各方案累积冲淤量

各方案来沙均集中在汛期, 从有沙日开始计算冲淤量, 当输沙结束且冲淤量接近0时, 认为达到动态输沙平衡, 并计算此时的用水量。方案5、方案7和方案10由于在年际范围内河道呈淤积状态, 无冲淤平衡时的结果, 其他7个方案在达到动态输沙平衡时的模拟结果如表3所示。分析认为, 同一方案达到动态平衡时, Z_w 取4.5比 Z_w 取4时的输沙用水量明显少, 达到冲淤平衡所需要的时间也明显缩短。

分析黄河勘测规划设计研究院有限公司给出的黄河下游未来50年水沙时间序列可发现, 日含沙量数据在汛期的值大于0且数据连续, 在非汛期时均为0, 本文将含沙量数据大于0的时期称为输沙期, 含沙量数据为0的时期称为清水期。模型以水文年为单位, 自汛期算起, 计算完整的输沙期后如有淤积, 利用清水期来冲刷本年度淤积物, 直至冲淤量为0或清水期结束停止计算。根据模型输出结果计算达到动态输沙平衡时输沙期和清水期所用的水量, 以及两期输水输沙天数, 见表4。通过对比7个方案输沙用水量的计算结果发现, 在达到动态冲淤平衡时, 输沙总量越大用水总量也越大。对比同一输沙量级下的各方案, 例如方案3和方案4的输沙量都在3亿t左右, 虽然两方案逐日来水来沙条件各不相同, 但是在达到动态输沙平衡时用水量相差不大。

分析表4中输沙需水的天数可知, 当浑水输沙时流量偏小并且含沙量较大, 则淤积严重, 因此需要较长时间的清水冲刷才能达到动态冲淤平衡, 如方案1、3、8和9。在浑水输沙期内, 若输沙量较大的时间比较集中, 大部分含沙水流流量较大且有一定的输沙能力, 所以整个浑水输沙期只会有轻微淤积, 需要清水冲刷的时间则较短, 如方案2、4和6。上述结果说明, 在同一来沙量级, 达到冲淤平衡所用天数和浑水输沙能力对日来水来沙情况较为敏感。另外对比不同 Z_w 下的冲淤情况发现, 当 Z_w 提升至4.5时, 输沙难度相对减小, 清水输沙天数和用水量大幅减少。分析表4中的年剩余水量和天

表3 各方案在动态平衡时的输沙量及用水量

Z_w	方案	计算天数 /d	输沙用水量 /亿 m ³	悬移质输沙量 /亿 t	推移质输沙量 /亿 t	总输沙量 /亿 t	计算淤积量 /亿 t
4	1	175	81.16	1.330	0.056	1.386	-0.00001
	2	139	109.99	2.028	0.052	2.080	-0.00004
	3	218	165.65	3.164	0.112	3.276	-0.0001
	4	146	169.76	3.258	0.063	3.320	-0.0003
	6	140	208.55	4.013	0.043	4.056	0.0004
	8	197	215.25	4.174	0.119	4.293	-0.0002
	9	321	262.65	5.861	0.146	6.007	-0.0002
4.5	1	160	75.09	1.332	0.054	1.386	-0.00004
	2	126	98.98	2.029	0.049	2.078	-0.00002
	3	202	149.73	3.187	0.084	3.276	-0.00001
	4	131	152.80	3.270	0.050	3.320	0.0004
	6	129	190.51	4.015	0.041	4.056	0.0001
	8	176	199.33	4.198	0.095	4.293	-0.0004
	9	265	244.57	5.879	0.127	6.007	-0.0003

表4 各方案动态冲淤平衡时用水情况

Z_w	方案	浑水输沙用水量 /亿 m ³	浑水输沙天数 /d	清水输沙用水量 /亿 m ³	清水输沙天数 /d	年剩余水量 /亿 m ³
4	1	62.943	128	18.219	47	85.720
	2	105.887	128	4.100	11	115.884
	3	106.928	128	58.722	90	61.632
	4	150.703	128	19.057	18	120.336
	6	189.737	128	18.813	12	158.421
	8	158.856	128	56.394	69	76.087
	9	174.753	128	87.897	193	24.052
4.5	1	62.943	128	12.145	32	91.794
	2	98.975	126	0	0	126.895
	3	106.928	128	42.802	74	77.551
	4	150.703	128	2.095	3	137.298
	6	189.737	128	0.773	1	176.461
	8	158.856	128	40.474	48	92.007
	9	174.753	128	69.817	137	42.132

数，7个方案在达到动态冲淤平衡后，年内剩余天数的日均流量都小于900 m³/s，对于黄河下游宽河段而言，流量相对较小，造床能力较弱。

4.2 未来河段冲淤情况及输沙需水量预测 随着黄河下游整治工程的不断修建完善，河床综合稳定性指标 Z_w 会有一定的提升，本节考虑河道整治程度达到 $Z_w=4$ 和 $Z_w=4.5$ 时的两种条件，来预测未来输沙需水量。根据 Z_w 取4和4.5时，在达到动态输沙平衡时，根据模型预测不同水沙条件下的结果拟合出预测曲线，见图6所示。

从图6中的曲线趋势可看出，年输沙量和需水量成正比，年来沙量小于5亿t时的用水量呈现快速

增长趋势,来沙量大于5亿t的用水量呈现缓慢增长趋势。进一步模拟了方案9在 $Z_w=6$ 时的输沙需水情况,输沙量6.007亿t,达到动态冲淤平衡时,总用水量为198.33亿t,计算天数为164d,其中清水冲刷7d。对比 $Z_w=4$ 时,可节省64.32亿 m^3 水量。说明河道整治程度对输沙需水量的影响十分明显,黄河下游宽河段目前处于游荡状态,有较大的整治空间,能够通过修建整治工程进一步稳定主槽,约束河势发展,提升行洪和输沙能力。

根据曲线可以查找黄河下游宽河段不同年输沙总量在达到动态冲淤平衡时的需水量,当 $Z_w=4$ 时,输沙2亿、3亿和4亿t分别需水110亿、155亿和200亿 m^3 才能达到动态冲淤平衡;当 $Z_w=4.5$ 时,输沙2亿、3亿和4亿t分别需水100亿、143亿和188亿 m^3 才能达到动态冲淤平衡。

分析花园口站1952—2020年的年均径流量、输沙量变化情况,认为近20年来,年径流量有增加趋势,年均径流量为278.09亿 m^3 ,2016年的年径流量最小为178.80亿 m^3 ,查图6得出,178.80亿 m^3 水在 $Z_w=4$ 和 $Z_w=4.5$ 时,可以冲刷3.5亿和3.8亿t沙。2000年后的输沙量相对于以前明显地锐减,张红武等^[32]预测黄河下游未来年均来沙量为2.2亿至2.4亿t,胡春宏^[33]和王光谦等^[34]认为未来50至100年潼关站年平均输沙量将逐步稳定在3亿t/a左右。根据图6得出,当 $Z_w=4$ 时,黄河下游宽河段年来沙量2.2亿、2.4亿和3亿t需水119亿、128亿和155亿 m^3 能够达到动态冲淤平衡;当 $Z_w=4.5$ 时,年来沙量2.2亿、2.4亿和3亿t需水109亿、117亿和143亿 m^3 能够达到动态冲淤平衡,需水量远小于近20年来的年均径流量。未来黄河下游宽河段基本不会出现大量泥沙淤积,河床基本不会抬高。但考虑极端天气情况频发,难免会出现如方案5、7和10的来水来沙条件,导致河道出现少量或局部淤积。

4.3 黄河下游输沙需水量预测结果对比 Hou等^[35]基于维持河流均衡关系,构建了黄河输沙需水量的计算方法,同时给出了考虑河道治理程度下($Z_w=4$)的黄河下游输沙需水量,这里将该结果与本文得出的结果进行对比,见图7。

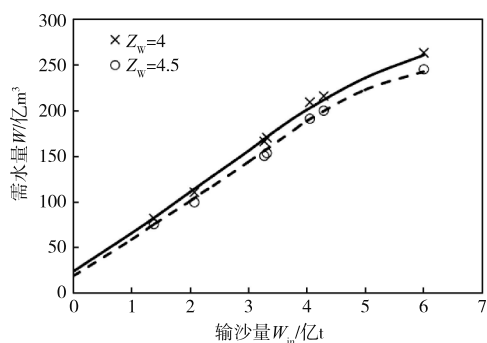


图6 不同 Z_w 下游输沙用水量关系

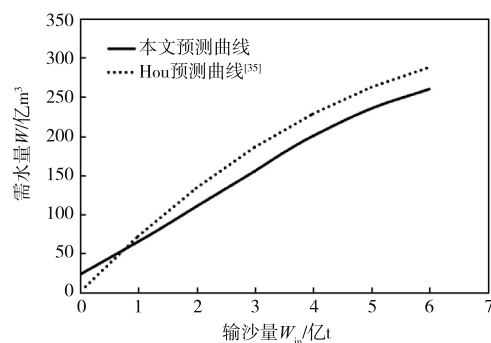


图7 不同输沙用水量计算方法结果对比

从图7可以看出,在 Z_w 取4时,本文方法计算的输沙需水量结果整体偏小,在输沙量小于0.77亿t时,本研究的预测曲线高于Hou等^[35]的预测曲线,本研究认为黄河下游仍然需要一定的水量来维持主槽的稳定和泥沙输移。当输沙量为2亿、3亿和4亿t时,本文计算所需水量分别为110亿、155亿和200亿 m^3 ;利用Hou的方法计算所需水量分别为134亿、186亿和228亿 m^3 。且随着 Z_w 取值变大,两方法的输沙需水量均呈减小趋势。

5 结论

本研究在剖析带有平均含沙量分布系数 a_s 与非饱和系数 f_s 的非平衡输沙方程和能否合理计算沿程含沙量变化的基础上,引入计算精度较高的水流挟沙力公式等补充方程,构建了黄河下游冲淤数值模型框架,并以河床综合稳定性指标体现河道整治工程对河槽的约束程度,进行水流泥沙冲淤过程的模拟计算,以探讨不同水沙条件和河道整治程度对输沙需水量的影响。研究表明,该模型能够较为准确模拟河道水沙输移特性,并基于实测数据验证了模型的适用性和可靠性。通过选取不同来水来沙条件

的10组方案进行模拟计算,研究发现黄河下游宽河段的输沙需水量与来沙量呈正相关关系,但在来沙量超过5亿t时,需水量的增长速率趋缓。此外,模型预测结果显示,黄河下游宽河段未来的输沙需水量随着河道整治程度的提高而显著降低,表明合理布局的河道整治工程有助于提高输沙效率。

具体而言,当 $Z_w=4$ 时,年输沙量2亿、3亿和4亿t时的需水量分别约为110亿、155亿和200亿 m^3 ;当 $Z_w=4.5$ 时,对应需水量降至100亿、143亿和188亿 m^3 。这表明,在未来水沙调控策略中,提升河道整治程度不仅可以提高河道的输沙能力,还能有效降低输沙过程中对水资源的需求。进一步的模拟研究表明,若河道治理程度提升至 $Z_w=6$,则输沙需水量可进一步降低。例如,对于输沙量6.007亿t的情况, $Z_w=6$ 时的需水量比 $Z_w=4$ 时减少了64.32亿 m^3 ,充分说明整治工程在提高输沙效率方面的显著作用。

此外,在相同的年输沙量级方案中,即使日来水来沙条件不同,达到动态冲淤平衡时所需的总水量基本保持一致。例如,年输沙量在3亿t左右的两个不同方案(方案3和方案4),尽管逐日水沙条件存在差异,但最终所需的输沙水量相差不大。这表明,在给定的水沙条件下,河道输沙过程具有一定的稳定性,合理的水沙调控措施能够使系统趋于相对稳定的均衡状态。

从长远来看,黄河下游的输沙需水量受多种因素的影响,包括流域来水来沙量、河道整治程度以及极端气候事件的发生频率等。本研究预测了黄河下游未来50年不同来沙条件下的输沙需水量,大部分水沙条件能够在一个水文年内达到动态冲淤平衡,但考虑极端天气情况,也不乏出现类似方案5、方案7和方案10的来水来沙条件,导致河道出现少量或局部淤积。因此,在制定未来黄河水沙调控和治理规划时,需要充分考虑极端水沙事件的影响,并结合不同情景进行科学评估。本研究的成果可为黄河下游的水沙调控、河道治理及防洪规划提供科学依据,并对其他高含沙河流的输沙需水量研究具有重要的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 钱意颖,叶青超,周文浩,等.黄河干流水沙变化与河床演变[M].北京:中国建材工业出版社,1993.
- [2] 李保如.各种措施对黄河下游河道减淤作用的比较[C]//黄河的研究与实践.1986.
- [3] 李保如.治黄设想[C]//黄科所科学研究论文集(第2集).1990.
- [4] 赵业安,潘贤娣,李勇,等.黄河下游河道输沙用水量的初步研究[C]//黄科院科学研究论文集(第4集).1993.
- [5] 严军,胡春宏.黄河下游河道输沙水量的计算方法及应用[J].泥沙研究,2004(4):25-32.
- [6] 安催花,鲁俊,吴默溪,等.黄河下游河道平衡输沙的沙量阈值研究[J].水利学报,2020,51(4):402-409.
- [7] 岳德军,侯素珍,赵业安,等.黄河下游输沙水量研究[J].人民黄河,1996(8):32-33,40,62.
- [8] 石伟,王光谦.黄河下游最经济输沙水量及其估算[J].泥沙研究,2003(5):32-36.
- [9] 吴保生,郑珊,李凌云.黄河下游塑槽输沙需水量计算方法[J].水利学报,2012,43(5):594-601.
- [10] 张红武,傅旭东,马宏博,等.黄河远期输沙需水量研究报告[R].北京:清华大学,2022.
- [11] 景唤,张红武,王彦君,等.基于冲积系统趋衡响应模型的河床冲刷研究与预测[J].水利学报,2022,53(11):1350-1360.
- [12] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [13] 吴险峰,刘昌明.流域水文模型研究的若干进展[J].地理科学进展,2002(4):341-348.
- [14] 范琳琳,李亚龙,乔伟,等.基于EMD及BPNN的云南省昭通市径流量预测[J].人民长江,2020,51(9):79-83,211.
- [15] 林天宙,彭杨,罗诗琦,等.基于RF-LSTM模型的长江上游汛期日含沙量预测[J].中国农村水利水电,2024(10):32-39.
- [16] 黄静,赵庚星.基于遥感和GIS的黄河口最近20年淤蚀时空动态及水沙影响[J].海洋地质前沿,2021,37(3):16-21.
- [17] 郭庆超,关见朝,韩其为,等.冯铁营引河对淮河干流洪水位及河床演变影响的研究[J].泥沙研究,2018,43(6):1-7.
- [18] 夏军强,王增辉,王英珍,等.黄河中下游水库-河道-滩区水沙模拟系统的构建与应用[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):652-665.

- [19] 窦国仁, 赵士清, 黄亦芬. 河道二维全沙数学模型的研究[J]. 水利水运科学研究, 1987(2): 1-12.
- [20] 张红武, 江恩惠, 白咏梅, 等. 黄河高含沙洪水模型的相似律[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1994.
- [21] 张红武, 赵连军, 曹丰生. 游荡河型成因及其河型转化问题的研究[J]. 人民黄河, 1996(10): 11-15, 61.
- [22] 张红武, 张清. 黄河水流挟沙力的计算公式[J]. 人民黄河, 1992(11): 7-9.
- [23] 侯琳, 张红武, 赵君驰, 等. 水流挟沙力公式的理论剖析与检验[J]. 水利学报, 2023, 54(5): 563-574, 586.
- [24] 杨张辉, 张红武. 西方学者水流挟沙力公式剖析研究[J]. 水利学报, 2024, 55(12): 1484-1495.
- [25] 李琳琪, 张红武, 侯琳, 等. 河流动床阻力影响参数分析及其计算研究[J]. 水利学报, 2023, 54(12): 496-1506.
- [26] 张罗号. 沙质河床推移质输沙率计算研究[J]. 水利学报, 2017, 48(4): 467-472.
- [27] 张红武, 张罗号, 赵晨苏. 基于面积型 Froude 数的河型判数与黄河河道最大输沙流量及河槽宽深尺度[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 11-17, 47.
- [28] 张楚汉, 王光谦, 陈祖煜, 等. 黄河九篇[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [29] LI L Q, ZHANG H W, HOU L, et al. An improved method and the theoretical equations for river regulation lines [J]. Sustainability, 2023, 15(3): 1965.
- [30] 黄河勘测规划设计有限公司. 黄河未来水沙情势变化及水沙过程设计[R]. 郑州: 黄河勘测规划设计有限公司, 2013.
- [31] 马睿. 黄河输沙能力提升机理及治理方案研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [32] 张红武, 侯琳, 李琳琪. 黄河治理巨大的减沙成就与未来输沙需水量[J]. 中国水利, 2021(21): 17-20.
- [33] 胡春宏. 黄河水沙变化与下游河道改造[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 10-15.
- [34] 王光谦, 钟德钰, 吴保生. 黄河泥沙未来变化趋势[J]. 中国水利, 2020(1): 9-12, 32.
- [35] HOU L, ZHANG H W, LI L Q, et al. A method for calculating water demand for sediment transport based on the principles of river dynamics[J]. Water, 2023, 15: 3514.

Simulation and prediction of water demand for sediment transport in the lower Yellow River

LI Linqi^{1,2}, ZHANG Hongwu², FU Xudong², HOU Lin², GUO Qingchao¹, HUANG Hai¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Department of Hydraulics and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Reasonable prediction of water demand for sediment transport in the lower reaches of the Yellow River is crucial for optimizing water-sediment regulation, ensuring flood control safety, and enhancing the effectiveness of river channel management. This study introduces a non-equilibrium sediment transport equation incorporating the average sediment concentration distribution coefficient a_s and the unsaturated coefficient f_s to calculate the variation in sediment concentration along the river course. A numerical model of channel erosion and deposition is constructed, with the integrated riverbed stability index serving as a constraint for river regulation projects. The model is validated using measured water and sediment data from the lower Yellow River. By simulating 10 scenarios with different water and sediment conditions, the study finds a positive correlation between sediment transport water demand and sediment inflow. When the sediment inflow exceeds 500 million t, the growth in water demand tends to slow down. Furthermore, an increase in the degree of river regulation effectively reduces the sediment transport water demand. For instance, when the integrated riverbed stability index Z_w increases from 4 to 4.5, the required water volume for the same sediment inflow can be reduced by approximately 10%. Further simulation predictions suggest that when the annual sediment transport volume in the lower reaches of the Yellow River is between 200 and 300 million t, the corresponding water demand ranges from 10 to 15.5 billion m^3 , and the current water resource allocation is generally sufficient to meet sediment transport needs. The findings of this study provide a scientific basis for water-sediment regulation and river channel management in the lower Yellow River and offer valuable insights into water-sediment regulation in high-sediment rivers.

Keywords: water demand for sediment transportation; lower reaches of the Yellow River; integrated riverbed stability index; numerical model; bedload transport

(责任编辑: 王 婧)