

文章编号:1005-0930(2024)04-1011-013 中图分类号:TV143 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.04.008

低含沙量条件下黄河下游水流挟沙力公式及其应用

程亦菲¹, 夏军强¹, 周美蓉¹, 鲁俊²

(1.武汉大学,水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072;2.黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南 郑州 450003)

摘要:水流挟沙力公式及其参数的选择,对泥沙输移过程计算有重要影响.小浪底水库运行后,黄河下游发生低含沙量洪水的频率增大,因此挟沙力计算关系的适应性需要重新研究.基于河床冲淤判别指标,筛选了小浪底水库运行前后黄河下游低含沙量条件下各水文断面处于冲淤相对平衡时的实测水沙要素,确定了挟沙力系数与水沙综合参数的计算关系,并应用于黄河下游典型少沙年的水沙输移过程计算.结果表明:挟沙力系数与水沙综合参数呈密切的函数关系,且随着水沙综合参数的增大逐渐减小并最终保持不变;对比了不同挟沙力模式下2017年黄河下游水沙输移过程的计算结果,当挟沙力系数采用提出的计算式确定时,游荡段含沙量过程计算值与实测值符合较好,与挟沙力系数取常数相比,各水文断面平均相对误差降低50%~67%.因此该计算式确定的挟沙力系数能较好适应水沙条件的沿程变化,可以提高水沙数学模型的计算精度.

关键词:低含沙量;挟沙力计算;输沙平衡;悬移床沙质;参数确定;黄河下游

黄河下游水沙关系不协调、水沙灾害频发,是黄河治理的关键河段.自20世纪以来,水库修建等强人类活动显著增强,黄河下游来沙量大幅降低,导致黄河下游纵向及横断面形态均发生显著变化.具体表现为河床持续冲刷,导致床沙粗化;游荡段河床冲深下切与横向展宽同时发生,断面形态显著调整.进口及河床边界条件的变化导致黄河下游河道的输沙特性呈现新特点,而开展黄河下游河道输沙特性研究是进行流域水沙调控及管理的重要依据.悬移质水流挟沙力是河道输沙特性的重要指标,指的是在一定的水流泥沙及河床边界条件下,水流所能携带泥沙的数量^[1-3].其计算关系的选择会改变水沙数学模型的计算精度,进而影响河床演变的预测结果.因此悬移质水流挟沙力一直是河流泥沙研究中的重要基础问题,也是工程泥沙与河流治理规划中需要解决的实际生产问题.开展低含沙量条件下水流挟沙力的研究,有助于掌握黄河下游河道的水沙输移规律,为实现黄河的长

收稿日期:2022-12-22;修订日期:2023-11-21

基金项目:国家自然科学基金项目(U2243238, U2243237, 51725902)

作者简介:程亦菲(1997—),女,博士研究生.E-mail:chengyf@whu.edu.cn

通信作者:夏军强(1974—),教授,博士生导师.E-mail:xiajq@whu.edu.cn

治久安提供一定的理论基础。

国内外许多学者对水流挟沙力进行了大量研究,主要包括从能量观点建立的半理论半经验公式^[4-7],以及基于回归分析确定的经验计算关系^[8-9]。前者如张瑞瑾挟沙力公式,被广泛应用于少沙河流^[1-2],后者如沙玉清公式^[8],也可以在一定程度上解决实际生产问题。对于以黄河为代表的多沙河流,含沙量较高,一场洪水过程中含沙量变幅大,河流输沙特性复杂^[10],常见的挟沙力公式较难直接应用。因此较多研究选取黄河干支流水沙资料或水槽试验资料,建立适用的挟沙力公式。张红武等^[6]基于水槽资料和黄河土城子河段测验资料,建立了半理论半经验的水流挟沙力公式。费祥俊^[11]基于28组低含沙量水槽试验数据,回归分析确定了悬移质输沙平衡关系式。近期如陈绪坚和胡春宏^[12]基于韩其为提出的非均匀沙水流挟沙力统计理论方法,推导了可适用于黄河下游中低含沙量条件的悬移质挟沙力公式,但该公式结构复杂。Natio等^[13]和Ma等^[14]均基于Engelund-Hansen输沙率计算关系,采用黄河下游水文站实测资料重新率定了公式参数,得到了能适用于细沙河床的水流挟沙能力公式。经过大量的实测资料验证,对于黄河水流挟沙力的计算,张红武挟沙力公式的精度较高且实用性强^[15-18],因此较多水沙数学模型推荐使用此公式^[17,19-20]。

小浪底水库运行后,黄河下游水沙情势呈现新特点。来水量变化不大但有进一步减少的可能性^[21]。由于黄土高原水土流失的治理效果显著,中游产沙锐减至约 $3 \times 10^8 \text{ t/a}$ ^[22],再加之小浪底水库显著的拦沙作用,下游来沙量大幅减少。花园口断面汛期多年平均含沙量由 43.0 kg/m^3 (1985~1999年)降低至 6.7 kg/m^3 (2000~2020年),下游大多数年份来沙量不足 $1.0 \times 10^8 \text{ t}$,仅为小浪底水库运行前(1985~1999年)的14%。根据洪水泥沙分类标准,日均最大含沙量小于 20 kg/m^3 的洪水为低含沙量洪水^[23]。花园口日均含沙量低于 20 kg/m^3 的天数由 307 d/a (1985~1999年)增加到 358 d/a (2000~2020年),小浪底水库运行后日均含沙量高于 60 kg/m^3 的天数仅为 0.9 d/a ,因此水库运行后下游发生低含沙量洪水的频率增大。然而以往对黄河下游水流挟沙力的研究,多基于中高含沙水流挟沙成果,如张红武在开展高含沙水流模型相似律研究时,引入挟沙水流阻力系数和挟沙效率系数来推导建立挟沙力公式的理论形式,并基于黄河土城子挟沙能力测验资料和黄委会水利科学研究院泥沙研究所(黄科所)水槽及模型资料率定得到这两个参数的经验关系,但其室内水槽试验含沙量主要为中高含沙量条件,只有4组试验资料的含沙量低于 20 kg/m^3 ^[6]。因此在含沙量大幅降低的情况下,需要开展低含沙量条件下黄河下游水流挟沙力的研究,从而建立能适应不同洪水泥沙组合的黄河下游水流挟沙力公式。

本研究收集小浪底水库运行前后下游7个水文站的实测水沙资料,以广泛应用于黄河中下游水库及河道的张红武挟沙力公式为例,开展低含沙量条件下黄河下游水流挟沙力的研究,分析确定挟沙力公式中的系指数与水沙综合参数的计算关系,并应用于典型少沙年份黄河下游水沙输移过程计算。

1 挟沙力资料的整理

张红武水流挟沙力公式系指数的不确定性主要是由于挟沙水流阻力系数和挟沙效率系数的经验处理,这两个系数是基于黄河土城子挟沙能力测验资料和黄科所水槽及模型资料率定调试得到的,而模型试验成果中日均含沙量大部分高于 20 kg/m^3 ,缺少 $0 \sim 20 \text{ kg/m}^3$

的含沙量数据.为重新率定低含沙量条件下张红武挟沙力公式中的参数,笔者收集了小浪底水库运行前后黄河下游7个水文站实测水沙资料,各水文站布置河段相对平顺,水流平稳,符合河流水沙测验规范,筛选得到如下两组平衡态数据.

第1组实测资料:小浪底水库运行前(1956~1990年)黄河下游河床冲淤幅度较小、处于输沙相对平衡时的实测水力泥沙要素.包括花园口、夹河滩、利津等7个水文站的流量 Q 、水位 z 、水深 h 、河宽 B 、面积 A 、比降 J 、水温 T 、悬移质全沙含量 S 、悬沙级配和床沙级配等,共计1000组数据^[24].筛选得到日均全沙含量在 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 以下的平衡态数据,共543组,各测站水力泥沙要素变化范围如表1所示.

表1 小浪底水库运行前后黄河下游各测站处于输沙平衡时水沙要素变化范围

Table 1 Hydrological data collected from the Lower Yellow River in the relative equilibrium state before and after the operation of the Xiaolangdi Reservoir

站点	组别	流量/ (m^3/s)	流速/ (m/s)	水深/ m	水位/ m	水面比降/ 10^{-4}	悬移质含沙 量/(kg/m^3)	悬移质床质 含量/(kg/m^3)	水沙综合 参数
花园口	第1组	118~5600	0.6~2.3	0.6~3.4	/	0.2~6.8	2.25~19.87	0.60~13.36	0.116~10.069
	第2组	126~5130	0.5~2.8	0.7~5.0	88.8~93.6	0.2~8.9	0.10~20.00	0.03~13.12	0.011~25.895
夹河滩	第1组	293~4640	0.3~2.0	0.7~2.0	/	0.4~7.3	4.02~19.69	1.31~9.88	0.019~13.553
	第2组	103~5250	0.5~2.9	0.6~5.6	72.0~77.5	0.2~5.0	0.18~20.00	0.10~10.60	0.023~25.622
高村	第1组	218~5320	0.4~2.3	1.1~2.8	/	0.1~4.0	0.90~19.40	0.50~11.70	0.053~14.327
	第2组	107~4510	0.4~2.7	0.7~4.4	58.2~63.8	0.2~2.7	0.34~20.00	0.19~12.45	0.034~38.774
孙口	第1组	63~3680	0.4~2.3	0.6~2.6	/	0.3~4.2	0.80~19.98	0.27~10.96	0.020~15.493
	第2组	86~4730	0.4~2.8	0.6~6.5	43.1~49.0	0.1~3.0	0.23~19.90	0.13~12.27	0.015~34.901
艾山	第1组	25~7470	0.3~2.9	1.0~6.4	/	0.4~2.2	0.68~19.86	0.14~12.63	0.050~29.707
	第2组	71~4230	0.3~2.1	1.1~5.9	36.2~41.9	0.6~1.2	0.46~19.90	0.20~12.94	0.017~10.198
涑口	第1组	47~7500	0.3~2.5	0.8~11.3	/	0.3~5.0	0.41~19.53	0.14~10.45	0.013~13.252
	第2组	80~4590	0.4~2.5	1.0~8.9	25.4~30.9	0.1~5.3	0.22~19.75	0.10~10.89	0.027~15.460
利津	第1组	81~6350	0.4~2.5	0.9~4.7	/	0.3~2.3	0.93~19.86	0.17~11.34	0.068~12.278
	第2组	20~4440	0.3~2.7	0.4~5.9	9.2~13.9	0.2~2.9	0.15~19.93	0.03~12.48	0.018~30.040

第2组实测资料:为小浪底水库运行后(2000~2020年)下游河床处于冲淤相对平衡时的实测水力泥沙要素,同样包括上述7个水文站的实测水沙要素及床沙级配等.小浪底水库运行后,坝下游河床基本处于冲刷状态,但在特定时段局部河段仍能出现输沙平衡状态,此时实测含沙量可近似等于水流挟沙力.这里的局部河段指的是有测验资料断面附近的河段.此外,短时段内的河床冲淤状态不能反映其真实情况,考虑到实测资料相邻组次的时间间隔一般为4d,在洪水期测次相对较密,因此本研究中只对相邻测次的数据进行筛查.目前对各挟沙力公式的检验的研究较多,但对河床处于冲淤相对平衡状态的统一判别标准的描述较少,如Zhou等^[3]认为在长江中游相邻测次主槽高程的冲淤速率 $|\Delta(z-h)/\Delta t| < 0.01\text{m}/\text{d}$ 时,河床处于相对冲淤平衡状态,式中物理量含义如前所述;张羽等^[25]提出相邻测次断面河床的相对冲淤变形率大于10%时,黄河下游河床处于强烈冲淤状态;黄仁勇等^[26]提出河床冲淤判别指标 $\left| \zeta = \rho_s \frac{A_1 - 0.5(z_1 - z_2) \cdot (B_1 + B_2) - A_2}{S_{\omega_m} \Delta t B} \right| \leq 0.04$ 时,黄河下游河床处于微冲微淤状态,式中 $[A_1 - 0.5(z_1 - z_2) \cdot (B_1 + B_2) - A_2]/B$ 表示该时段断

面平均冲淤厚度, m ; Δt 为前后两测次间隔的时间, s ; ω_m 为群体沉速, m/s ; 床沙干密度 ρ_s 取 $1400\text{kg}/\text{m}^3$, 其余物理量含义同上. 采用黄仁勇提出的方法筛选得到全沙含量在 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 以下的输沙平衡态数据, 共 2 663 组, 各水沙要素变化范围如表 1 所示.

值得说明的是, 已有文献 [3, 7, 27-28] 提到的泥沙漏测现象是目前水沙测验资料中普遍存在的问题, 但目前研究中对于挟沙能力的分析资料并没有进行校正 [7]. 悬浮指标 $z = \omega_m / (\kappa U_*)$, 式中 ω_m 为群体沉速, 具体计算说明见下节, κ 为浑水卡门常数, U_* 为摩阻流速. 悬浮指标代表重力作用与紊动作用间的相互关系, 以往研究采用该指标说明含沙量垂线分布的均匀程度 [27, 29]. 该值越小代表紊动作用越强, 则含沙量沿垂线分布越均匀, 相对漏测量就较小 [7, 27]. 已有研究 [12, 27] 表明花园口和高村站漏测率相对较大, 故此处计算了这两个水文断面处于输沙平衡状态时的悬浮指标, 计算得到这两站 2000~2020 年悬浮指标范围分别为 0.12~1.10 以及 0.09~0.63, 小于文献 [30] 水槽试验中的悬浮指标. 此外, 鉴于现有水沙数学模型应用时没有考虑修正含沙量, 因此本研究不考虑校正悬沙实测值.

2 低含沙量条件下挟沙力参数的重新率定

基于河床处于相对冲淤平衡状态时的实测水沙资料, 重新率定低含沙量条件下张红武挟沙力公式中的参数, 主要计算步骤包括: 悬移床沙质含量与水沙综合参数 (扣除冲泻质) 的计算; 挟沙力系数指数与水沙综合参数计算关系式的确定. 值得注意的是, 张红武挟沙力公式在进行参数率定时没有对床沙质及冲泻质加以区分 [6], 但是水流挟沙力的确切定义为: 在一定的水流和泥沙综合条件下, 水流能够携带的悬移质中床沙质的临界含沙量. 此外基于悬移床沙质建立的挟沙力公式也应能适用于全沙 [24], 因此在计算水沙综合参数时扣除冲泻质.

2.1 悬移床沙质含量与水沙综合参数的计算

2.1.1 悬移床沙质含量的确定 悬移质中的冲泻质不参与实际造床, 只与上游补给有关, 而与局部水流条件无关 [24]. 床沙质与冲泻质的划分方法包括理论法、经验法以及建立分界粒径与水力泥沙因子关系的半经验半理论法. 目前冲泻质临界粒径的确定方法主要是经验法, 包括固定粒径法 [24] 和采用级配曲线计算的拐点法 [3, 31]. 在黄河下游粒径小于 0.025mm 的泥沙颗粒通常被视为冲泻质 [32-33], 因此本研究在计算悬移床沙质含量时认为粒径小于 0.025mm 的泥沙含量为冲泻质含量. 由此计算得到两组实测资料的悬移床沙质含量 S' 分别为 $0.14\sim 13.36\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.03\sim 13.12\text{kg}/\text{m}^3$.

2.1.2 水沙综合参数计算 广泛应用于黄河下游的张红武挟沙力公式为

$$S_* = K \left[\frac{(0.0022 + S_v) U^3}{\kappa \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} gh \omega_m} \ln \left(\frac{h}{6D_{50}} \right) \right]^M = KC^M \quad (1)$$

式中: S_v 为体积比含沙量; γ_s 、 γ_m 分别为泥沙容重和浑水容重; 卡门常数 $\kappa = 0.4\sim 1.68 \sqrt{S_v}$ ($0.365 - S_v$); D_{50} 为床沙中值粒径; ω_m 为群体沉速; h 为水深; K 、 M 均为公式系数. 张红武在高含沙水流模型相似律的相关成果中, 确定 K 、 M 分别取值为 2.5 和 0.62 [6]. 此处定义 C 为水沙综合参数, 其计算关键在于群体沉速 ω_m 的计算. 采用张红武方法计算群体沉速

$\omega_m = \sum_{i=1}^N \Delta P_{*i} \omega_{si}$, 式中 N 为挟沙力分组数, 与悬移床沙质分组数保持一致; ω_{si} 为第 i 组沙

的浑水沉速, 采用张红武公式计算 $\omega_{si} = \omega_{0i} \left[\left(1 - \frac{S_v}{2.25 \sqrt{d_{50}}} \right)^{3.5} (1 - 1.25 S_v) \right]$, 式中 ω_{0i} 为第 i 组泥沙在清水中的沉速; d_{50} 为悬沙中值粒径, mm; ΔP_{*i} 为第 i 组挟沙力级配, 采用李义天提出的方法确定^[34]. 由此计算得到两组实测资料的水沙综合参数分别为 0.013 ~ 29.707、0.011 ~ 38.774.

2.2 挟沙力公式中系指数的计算关系

基于输沙平衡态下计算得到的悬移床沙质含量及水沙综合参数, 可以反算挟沙力公式中的系指数 K 和 M . 首先拟合悬移床沙质含量 S' 与水沙综合参数 C 的关系(图 1(a)), 可以发现以幂函数形式确定的拟合关系式并不能完全反映水流挟沙力与水沙综合参数的关系. 张瑞瑾在挟沙力的研究中也指出挟沙力系指数应是水沙综合参数的函数^[2], 因此幂函数公式中的系指数不应该是定常数(图 1(a)). 故本研究将通过数据变换计算低含沙量条件下张红武挟沙力公式的系指数. 具体计算步骤如下: ①首先将 S' 与 C 取对数, 并以数据散点坐标值大于 0 为原则, 对数据进行平移, 得到新的坐标 ($\lg C + 3$, $\lg S' + 2$); ②以最优拟合为原则拟合变换坐标后的数据散点, 得到幂函数曲线, 如图 1(b) 所示; ③变化后的曲线斜率仍为挟沙力公式中的指数 M , 因此可以得到不同水沙综合参数下指数 M 的计算关系式 $M = 0.9658(\lg C + 3)^{-0.2451}$; ④代入公式反算系数 K , 此时不同水沙综合参数下的系指数均可计算.

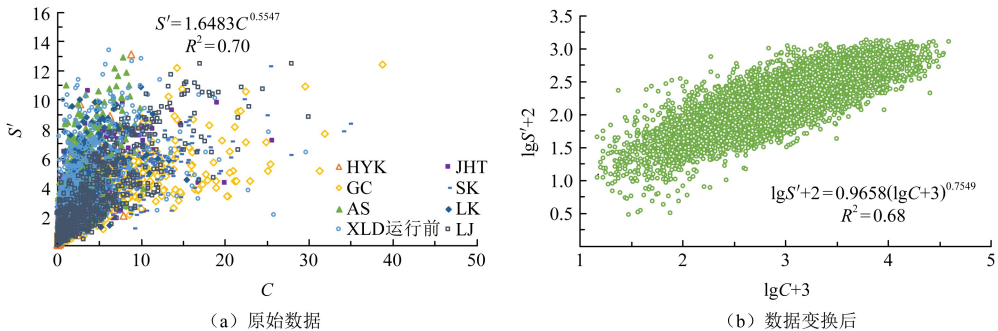


图 1 悬移床沙质含量与水沙综合参数的关系

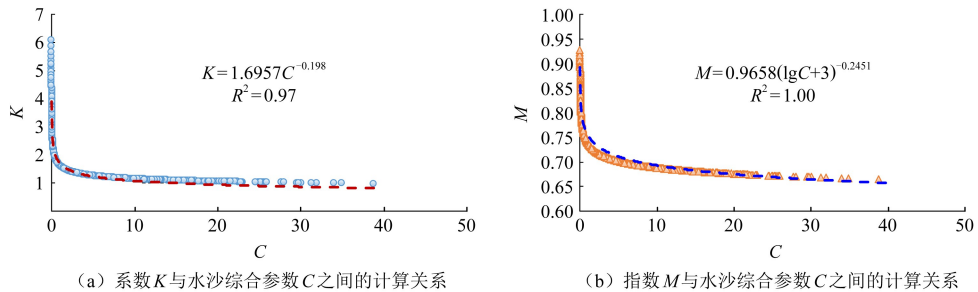
Fig.1 Relationship between suspended bed-material load concentration and comprehensive parameter

基于上述计算结果, 拟合系指数 K 、 M 与水沙综合参数 C 的关系, 如图 2 所示. 基于最优拟合原则, K 、 M 与水沙综合参数呈较好的函数关系. 因此低含沙量条件下重新率定得到的张红武挟沙力公式中的系指数分别为

$$K = 1.6957C^{-0.198} \quad (2)$$

$$M = 0.9658(\lg C + 3)^{-0.2451} \quad (3)$$

系指数 K 、 M 随着水沙综合参数的增大而减小, 且降幅逐渐减小. 水沙综合参数 C 由 0 增大至 2 时, 系指数减小幅度最大, 但随着 C 的进一步增大, 系指数 K 、 M 的变化幅度不

图2 系指数 K 、 M 与水沙综合参数 C 之间的计算关系Fig.2 Relationship between the coefficient K and exponent M of the Zhang's equation and the comprehensive parameter

大,即在大流量条件下,挟沙力主要依赖水沙综合参数的变化.在收集的实测资料范围内,系数 K 变化范围为 0.987~6.088,指数 M 的变化范围为 0.665~0.928.此外需要说明的是,冲积河流中水流、泥沙及河床三者是相互影响的,挟沙水流运动塑造河流床面形态,后者又约束挟沙水流的运动,所有挟沙力计算形式中的系指数应当是随着边界条件变化的变量.因此文中确定的计算关系是黄河下游低含沙量条件下水流泥沙和河床边界双重作用的结果,如果不对式(2)和式(3)加以改变,可能无法直接适用于其他河流的低含沙量情况.以张红武公式为例,本研究给出了低含沙量条件下水流挟沙力公式的计算流程,该流程同样适用于其他形式水流挟沙力公式的改进.

3 低含沙量条件下挟沙力公式在黄河下游的应用

将上述重新率定得到的低含沙量条件下张红武公式嵌入已有的一维水沙耦合模型,进一步说明该公式的适用性.一维水沙耦合模型的基本控制方程及关键问题处理,详见文献[18].为说明低含沙量条件下系指数的合理性,模型采用3种挟沙力计算模式:模式1,张红武公式系指数取常数($K=2.5, M=0.62$);模式2,采用张红武中低含沙量条件下的挟沙力公式 $S_* = 0.14 \left[\frac{U^3}{gh\omega_m} \ln\left(\frac{h}{6D_{50}}\right) \right]^{0.6[6]}$;模式3,采用式(2)和式(3)计算张红武挟沙力公式系指数.

3.1 河段概况及边界条件

黄河下游通常指孟津到利津河段(图3),总长约为756km,区间流域面积为 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,属于典型的冲积平原河流.下游沿程设置有花园口、高村以及利津等7个水文站.按照河道形态,黄河下游分为3个河段:高村以上的游荡型河段,高村至陶城埠的过渡型河段,以及陶城埠至利津的弯曲型河段.但考虑到水文断面位置及子河段冲淤量的划分,过渡段与弯曲段的分界位置定为艾山.游荡型河段全长为299km,具有水流宽浅散乱、主槽易淤善冲等特点,是下游河道治理的关键河段.该段主槽两侧修筑了大量的生产堤和控导工程,水沙的横向交换受到较大影响,人为地缩窄了行洪通道.图3(b)所示为游荡段花园口断面的形态,滩槽不易区分,主槽宽浅,平滩宽度和水深分别为2502m和2.2m.过渡段长约185km,由于该河段有工程控制,河床稳定性大于游荡段.弯曲段长约272km,沿岸

有大量的险工和控导工程,防护长度占该河段总长的 70%以上.该段断面一般由主槽和一级滩地构成,其主槽范围及平滩高程的确定相对简单.图 3(c) 所示为弯曲段利津断面的形态,主槽相对窄深,平滩宽度和水深分别为 611m 和 6.6m.

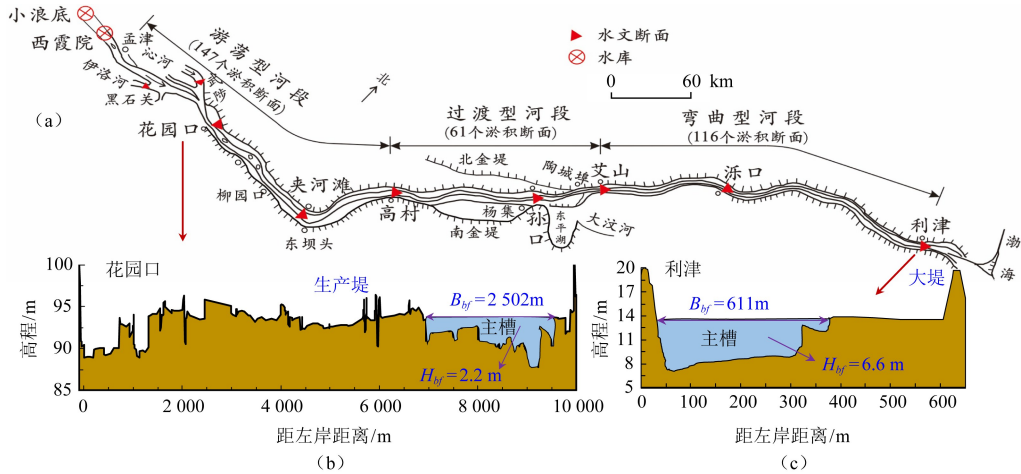


图 3 黄河下游示意

Fig.3 Sketch of the Lower Yellow River

小浪底水库位于黄河中游最后一段(峡谷段)的出口处,对进入下游的水沙条件有较强的调节作用.这里以花园口站水沙条件表征黄河下游的来水来沙条件,图 4 所示为小浪底水库运行前后进入下游的水沙量及日均含沙量(S_t) 低于 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 的频率分布.小浪底水库运行后水量降低 32%,沙量急剧减少,年均沙量仅为 $1.2 \times 10^8 \text{t}/\text{a}$ (2000~2020 年),年均含沙量仅为 $3.9\text{kg}/\text{m}^3$.除 2018~2020 年来沙量超过 $3.0 \times 10^8 \text{t}$ 外,水库运行后 71% 的年份来沙量不足 $1.0 \times 10^8 \text{t}$.1951~1999 年日均含沙量低于 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 的频率平均为 78%,小浪底水库运行后,日均含沙量低于 $20\text{kg}/\text{m}^3$ 的频率持续稳定为 98%,部分年份(如 2015~2017 年)全年日均含沙量均低于 $20\text{kg}/\text{m}^3$.

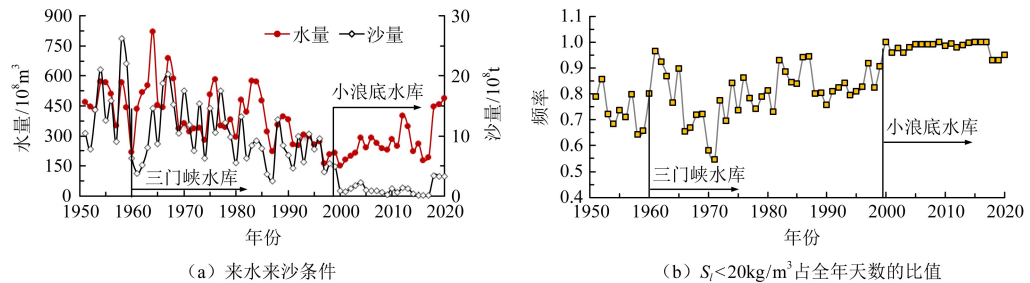


图 4 黄河下游水沙条件

Fig.4 Temporal variations in the flow-sediment regime in the Lower Yellow River

2017 年进入黄河下游的沙量为 $0.06 \times 10^8 \text{t}$,是典型的少沙年,因此采用模型计算该年汛期水沙演进过程.收集 2017 年花园口至利津汛前 81 个实测断面地形资料,并对各断面

进行滩槽划分,初始床沙级配资料采用汛前河段内部分断面的实测床沙级配成果,并取床沙干密度为 $1.4\text{t}/\text{m}^3$.上游边界条件采用花园口的日均水沙过程,下游边界条件为利津站的日均水位过程,如图 5 所示.2017 年汛期花园口流量为 $306\sim 1120\text{m}^3/\text{s}$,含沙量为 $0.05\sim 0.66\text{kg}/\text{m}^3$.由实测资料可知,该河段悬沙和床沙组成为 $0.002\sim 2\text{mm}$,故计算中将非均匀沙分为 10 组.模型计算时段为 2020 年 5 月 1 日—10 月 31 日,共计 4 392h.

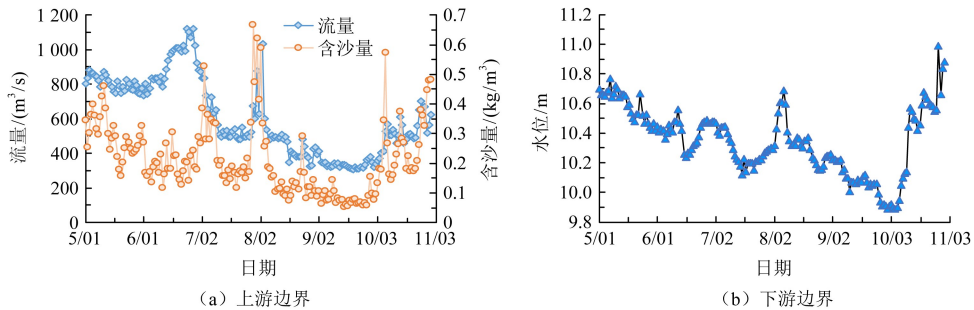


图 5 模型计算的水沙边界条件

Fig.5 Boundary conditions for modelling of the 2017 flood season

3.2 计算结果

由于利用模型计算的水位和流量过程对糙率的敏感度最高,而挟沙力系数指数及恢复饱和系数取值对水位与流量的影响不大,因此以模式 1 计算的夹河滩、孙口及艾山 3 个水文断面的结果为例,绘制计算与实测的流量和水位过程(图 6),进而说明采用的一维水沙耦合模型对黄河下游水流演进过程计算的适用性.各断面的计算水位与实测水位过程符合程度良好,表明模型糙率的取值基本合理,均方根误差分别为 0.18m 、 0.08m 、 0.10m ,纳什效率系数均大于 0.80.模型计算流量的精度沿程有所降低,这主要是由于计算时缺乏汛期引水引沙资料.游荡段的计算流量与实测流量过程偏差不大,如夹河滩站流量过程的纳什效率系数达 0.91,均方根误差仅为 $63\text{m}^3/\text{s}$,但过渡段和弯曲段的计算流量均偏大.

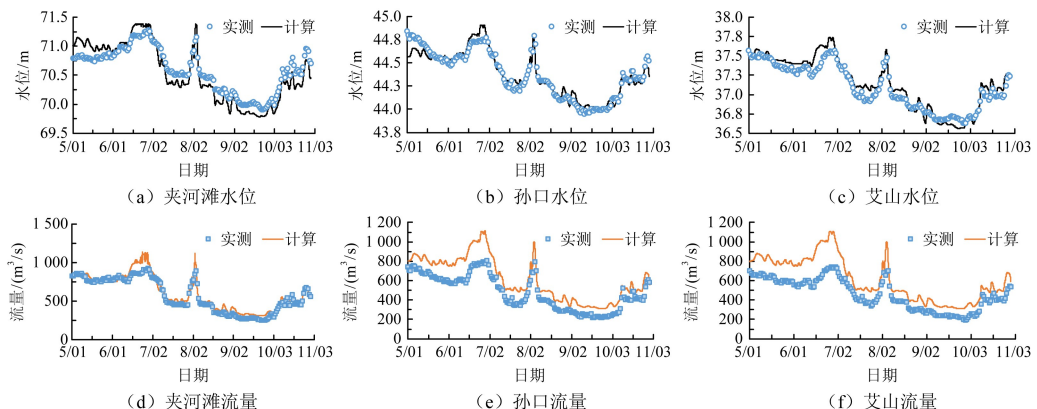


图 6 各水文站水位、流量计算与实测过程比较

Fig.6 Comparisons between the calculated and measured hydrographs of water level and discharge at different hydrometric sections

上述分析表明,采用的模型能合理模拟黄河下游尤其是游荡段的水流演进过程,但鉴于缺乏汛期引沙资料会对高村以下断面含沙量的模拟过程造成较大误差,因此下面仅以游荡段(夹河滩和高村断面)为例比较不同挟沙力计算模式下含沙量过程的模拟效果,如图7所示.可以发现不同挟沙力模式下计算的含沙量过程与实测过程基本一致,但量级及沙峰差别较大.利用模式1(张红武挟沙力公式中系数取常数 $K=2.5$ 、 $M=0.62$)计算与实测沙峰符合较好,尤其是在高村断面,利用模式1计算得到沙峰为 $1.83\text{kg}/\text{m}^3$,比实测沙峰仅偏大9%,但该年汛期低含沙量过程模拟的精度较低;利用模式2(张红武于20世纪80年代提出的半经验半理论公式)计算结果整体偏大,不适用于目前低含沙量条件下的含沙量过程模拟;模式3采用式(2)、式(3)重新计算挟沙力公式系数,模拟含沙量过程与实测过程符合较好,相较于模式1,夹河滩和高村断面的平均相对误差分别从 $0.04\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.03\text{kg}/\text{m}^3$ 减小到 $0.02\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.01\text{kg}/\text{m}^3$,模型计算的含沙量精度有所提升.

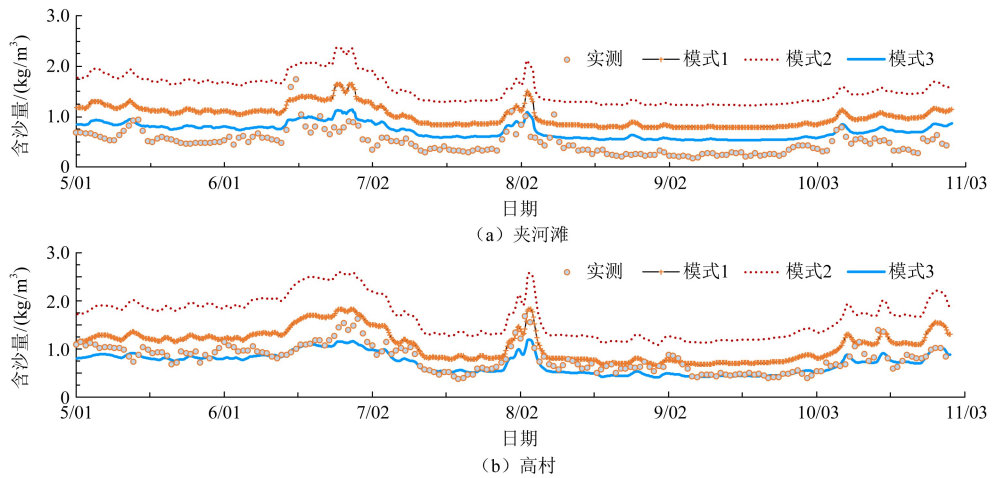


图7 不同挟沙力计算模式下夹河滩和高村断面含沙量过程比较

Fig.7 Comparisons between the sediment concentration calculated by different methods at hydrometric sections of Jiahetan and Gaocun

2017年汛期水沙演进过程中,利用模型计算得到夹河滩断面的水沙综合参数 C 为 $0.089\sim 0.805$,系数 K 为 $1.770\sim 2.737$,指数 M 为 $0.748\sim 0.813$;高村断面的水沙综合参数 C 为 $0.055\sim 0.736$,系数 K 为 $1.802\sim 3.015$,指数 M 为 $0.751\sim 0.829$.夹河滩断面和高村断面间距 77km ,水力条件有所差异,导致挟沙力公式中的系数指数沿程调整,这表明式(2)和式(3)能较好反映挟沙力系数指数对水沙要素沿程变化的适应性.

鉴于缺乏引水引沙过程,难以对不同挟沙力计算模式下过渡段和弯曲段的含沙量过程计算精度进行说明,在此对模型计算的这两段冲淤量的精度进行比较.由于泥沙公报上仅公布了各段全年引水引沙量,此处暂定所有引沙均发生在计算时段,因此给出了基于输沙量法和断面地形法的汛期下游各河段冲淤量的实测值以及模式1和模式3的计算值(表2).输沙量法与地形法在计算过渡段冲淤量时差别不大,但在弯曲段存在定性差别.比较利用挟沙力模式1和模式3计算的各段冲淤量,可以发现利用模式3计算的河段冲淤量更小,较长河段的计算冲淤量更接近实测值,尤其是与基于断面地形法实测的冲淤量更接近.

表2 各河段冲淤量计算值与实测值对比(单位: 10^8 m^3)

Table 2 Comparisons between the calculated and measured channel evolution volumes in different reaches

	高孙段	孙艾段	过渡段	艾冻段	冻利段	弯曲段
模式1 计算值	-0.158	-0.029	-0.187	-0.074	-0.037	-0.411
模式3 计算值	-0.093	-0.021	-0.114	-0.032	-0.020	-0.052
输沙量法实测值	-0.008	-0.015	-0.023	-0.012	0.016	0.004
地形法实测值	-0.002	-0.026	-0.028	0.007	-0.034	-0.027

4 结论

小浪底水库运行后,黄河下游多年平均含沙量减少 84%,日均含沙量低于 20 kg/m^3 的出现频率达 98%。基于水库运行前后下游 7 个水文站的实测水沙资料,分析并确定了低含沙量条件下张红武挟沙力公式中系指数的计算关系,得出主要结论如下:

(1) 低含沙量条件下张红武挟沙力公式中系指数与水沙综合参数呈密切的函数关系。选取小浪底水库运行前后坝下游各水文断面处于冲淤相对平衡状态下的实测水沙资料,计算了低含沙量条件下挟沙力系数与水沙综合参数,计算结果表明:水沙综合参数在 $0.011 \sim 38.774$ 变化,系数 K 变化范围为 $6.088 \sim 0.987$,指数 M 变化范围为 $0.665 \sim 0.928$; 系数指数均随着水沙综合参数的增大而减小,决定系数均在 0.97 以上;

(2) 低含沙量条件下张红武挟沙力公式能准确模拟典型少沙年黄河下游水沙演进过程。对比了 3 种挟沙力模式下 2017 年黄河下游水沙过程的计算结果。利用模式 1(张红武挟沙力公式系数取常数)及模式 2(张红武 20 世纪 80 年代提出的中低含沙量公式)模拟的含沙量结果均偏大,其中利用模式 1 计算游荡段含沙量过程的平均相对误差分别为 0.04 kg/m^3 、 0.03 kg/m^3 ; 采用低含沙量条件下率定得到的系数指数与水沙综合参数计算关系,利用模型计算的含沙量结果与实测值整体符合良好,平均相对误差分别为 0.02 kg/m^3 、 0.01 kg/m^3 ; 重新率定得到的系数指数对水沙条件的沿程变化有较好的适应性,因此不同水文断面系数指数计算结果有所差异;

(3) 张红武挟沙力公式属于半理论半经验公式,反映了泥沙含量、群体沉速、浑水流速分布及床沙中值粒径的影响,因此被广泛应用于黄河下游水沙数学模型中。但考虑到挟沙力系数指数应是随河床边界条件调整的变量,因此后续研究可以采用相同的方法建立高中低含沙量条件下系指数的函数关系,从而建立能适用于不同洪水泥沙组合的黄河下游水流挟沙力公式。

参考文献

- [1] Prosser I P, Rustomji P. Sediment transport capacity relations for overland flow[J]. Progress in Physical Geography, 2000, 24(2): 179-193
- [2] Tan G M, Fang H W, Dey S, et al. Rui-Jin Zhang's research on sediment transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(6): 02518002
- [3] Zhou M R, Xia J Q, Deng S S, et al. Sediment transport capacity of low sediment-laden flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 2022, 60(6): 996-1008
- [4] Yang C T, Molinas A, Wu B S. Sediment transport in the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, 122(5): 237 - 244

- [5] 曹如轩.高含沙水流挟沙力的初步研究[J].水利水电技术,1979,(5):55-61+34
Cao Ruxuan.Preliminary research about sediment transport capacity of hyper-concentrated flow (in Chinese)[J].Water Resources and Hydropower Engineering,1979,(5):55-61+34
- [6] 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
Zhang Hongwu,Jiang Enhui,Bai Yongmei,et al.Model similarity conditions for hyper-concentrated flood of the Yellow River[M].Zhengzhou:Henan Technology Press,1994
- [7] 费祥俊,吴保生,傅旭东.两相非均质流输沙平衡关系及挟沙力研究[J].水利学报,2015,46(7):757-764
Fei Xiangjun,Wu Baosheng,Fu,Xudong.Equilibrium sediment transport relation and sediment carrying capacity of two-phase heterogeneous flows[J].Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(7):757-764
- [8] 沙玉清.泥沙运动的基本规律[J].泥沙研究,1956,(2):1-54
Sha Yuqing.Basic laws of sediment transport[J].Journal of Sediment Research,1956,(2):1-54
- [9] 王兆印.悬移质运动规律的分析[J].水利学报,1986,(7):11-20
Wang Zhaoyin.A study on the mechanism of suspended load motion[J].Journal of Hydraulic Engineering,1986,(7):11-20
- [10] 傅旭东,姜立伟,吴保生,等.黄河下游河道场次洪水排沙比及其不确定性[J].中国科学:技术科学,2010,40(4):349-357
Fu Xudong,Jiang Liwei,Wu Baosheng,et al.Sediment delivery ratio and its uncertainties on flood event scale:Quantification for the Lower Yellow River[J].Science China Technology Science,2010,40(4):349-357
- [11] 费祥俊.黄河下游低含沙水流挟沙力研究[J].人民黄河,2003,25(9):16-18+25
Fei Xiangjun.Study on sediment transport capacity in low sediment-laden flow[J].Yellow River,2003,25(9):16-18+25
- [12] 陈绪坚,胡春宏.水流挟沙力的统计理论计算方法及其应用[J].水利学报,2014,45(10):1199-1204
Chen Xujian,Hu Chunhong.Statistical theory-based method of sediment carrying capacity and its application[J].Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(10):1199-1204
- [13] Natio K, Ma H B, Nittrouer J A, et al. Extended Engelund-Hansen type sediment transport relation for mixtures based on the sand-silt-bed Lower Yellow River, China[J]. Journal of Hydraulic Research, 2019, 57(6): 770-785
- [14] Ma H B, Nittrouer J A, Wu B S, et al. Universal relation with regime transition for sediment transport in fine-grained rivers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(1): 171-176
- [15] 舒安平.水流挟沙能力公式的转化与统一[J].水利学报,2009,40(1):19-32
Shu Anping.Transformation and unification of the formulas for sediment transport capacity in sediment-laden flows[J].Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(1):19-32
- [16] 吴腾,李远发,洪建,等.聚类统计方法在高含沙水流挟沙力公式验证中的应用[J].水利学报,2007,(7):852-856+865
Wu Teng,Li Yuanfa,Hong Jian,et al.Application of clustering analysis method in verification of sediment carrying capacity formula for hyper-concentrated sediment flow[J].Journal of Hydraulic Engineering,2007,(7):852-856+865
- [17] Zhang J L, Shang Y Z, Liu J Y, et al. Optimisation of reservoir operation mode to improve sediment transport capacity of silt-laden rivers[J]. Journal of Hydrology, 2021, 594: 125951
- [18] Xia J Q, Zhang X L, Wang Z H, et al. Modelling of hyperconcentrated flood and channel evolution in a braided reach using a dynamically coupled one-dimensional approach[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 622-635
- [19] 李肖男,张红武,钟德钰,等.黄河内蒙古河段洪水演进与冲淤模拟研究[J].水利学报,2017,48(10):1206-1219
Li Xiaonan,Zhang Hongwu,Zhong Deyu,et al.Numerical simulation research on the flood propagation and riverbed deformation in the Inner Mongolia reach of the Yellow River[J].Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(10):1206-1219
- [20] 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
An Cuihua,Lu Jun,Wu Moxi,et al.The threshold value of equilibrium sediment transport in the Lower Yellow River[J].Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(4):402-409
- [21] 刘晓燕.关于黄河水沙形势及对策的思考[J].人民黄河,2020,42(9):32-40
Liu Xiaoyan.The water and sediment situation and countermeasure[J].Yellow River,2020,42(9):32-40
- [22] 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

- Wang Guangqian, Zhong Deyu, Wu Baosheng. Future trend of Yellow River sediment changes [J]. China Water Resources, 2020, (1): 9-12
- [23] 刘继祥,刘红珍,付健.黄河中下游洪水泥沙分类管理研究[M].郑州:黄河水利出版社,2020
Liu Jixiang, Liu Hongzhen, Fu Jian. Water-sediment classification management in the middle and lower reaches of the Yellow River [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2020
- [24] Wu B S, Van Maren D S, Li L Y. Predictability of sediment transport in the Yellow River using selected transport formulas [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(4): 283-298
- [25] 张羽,洪建,李远发,等.黄河水流挟沙力公式的验证[J].人民黄河,2006,(11):16-17+20
Zhang Yu, Hong Jian, Li Yuanfa. Verification of the sediment transport capacity for the Yellow River [J]. Yellow River, 2006, (11): 16-17+20
- [26] 黄仁勇,韦直林,赵连军,等.河床冲淤幅度判别指标与水流挟沙力公式验证[J].人民黄河,2004,(5):22-24
Huang Renyong, Wei Zhilin, Zhao Lianjun, et al. The indicator quantifying the channel evolution state and its application in the verification in sediment transport capacity [J]. Yellow River, 2004, (5): 22-24
- [27] 申冠卿,姜乃迁,张原锋,等.黄河下游断面法与沙量法冲淤计算成果比较及输沙率资料修正[J].泥沙研究,2006,1:32-37
Shen Guanqing, Jiang Naiqian, Zhang Yuanfeng, et al. Comparison of the calculated sedimentation amount by different methods in the Lower Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2006, 1: 32-37
- [28] 刘明堂,田壮壮,齐慧勤,等.基于 Kalman-BP 协同融合模型的含沙量测量[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(5):970-977
Liu Mingtang, Tian Zhuangzhuang, Qi Huiqin, et al. Cooperative fusion model based on Kalman-BP neural network for suspended sediment concentration measurement [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(5): 970-977
- [29] 舒安平.挟沙水流悬移质运动效率系数的研究[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(2):209-216
Shu Anping. Study of efficiency coefficient of suspended load motion in sediment-laden flows [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(2): 209-216
- [30] 费祥俊.悬移质水流挟沙能力与输沙特性[J].泥沙研究,2003,3:30-34
Fei Xiangjun. Sediment carrying capacity and characteristics of flow with suspended load [J]. Journal of Sediment Research, 2003, 3: 30-34
- [31] Einstein H A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows [R]. United States Department of Agriculture, Technical bulletin, 1950
- [32] 李小平,李文学,李勇,等.水库拦沙期黄河下游洪水冲刷效率调整分析[J].水科学进展,2007,18(1):44-51
Li Xiaoping, Li Wenxue, Li Yong, et al. Analysis of erosion efficiency and adjustment of flood in the lower Yellow River during the storage periods [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 44-51
- [33] 陈建国,周文浩,袁玉萍.三门峡水库典型运用时段黄河下游粗细泥沙的输移和调整规律[J].泥沙研究,2002,(2):15-22
Chen Jianguo, Zhou Wenhao, Yuan Yuping. Transportation and adjustment of different grain sized sediment along the lower Yellow River under typical operation modes of sanmenxia reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 2002, (2): 15-22
- [34] 李义天.冲淤平衡状态下床沙质级配初探[J].泥沙研究,1987,(1):82-87
Li Yitian. Preliminary research about the gradation of bed-material load in quasi-equilibrium [J]. Journal of Sediment Research, 1987, (1): 82-87

Determination of Parameters in the Formula for Sediment Transport Capacity in Low Sediment-laden Flows and Its Application in the Lower Yellow River

CHENG Yifei¹, XIA Junqiang¹, ZHOU Meirong¹, LU Jun²

(1.State Key Laboratory of Water Resources Engineering and management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract

The determination of parameters in the formula for sediment transport capacity will exert a significant effect on sediment transport processes. The formulae for sediment transport capacity mainly consider hyperconcentrated flows, which are currently applied in numerical simulation of sediment transport and channel evolution processes in the Yellow River. However, low concentrated floods occur frequently in the Lower Yellow River (LYR) after the operation of the Xiaolangdi Reservoir, and the applicability of these formulae is limited because the parameters are originally obtained based on hyperconcentrated flows before the reservoir operation. In this study, the hydrological data in the relative equilibrium state were collected from the hydrometric stations. Furthermore the calculation relations are determined between the parameters in the formula and the comprehensive parameter, which were then applied in the numerical modelling of the 2017 flood in the LYR. The results show that: (1) the coefficient and exponent of the formula proposed by H.W.Zhang show a negative power functional relationship with the comprehensive parameter, and reach constant values lastly; (2) comparisons are made among the simulated sediment concentration hydrographs calculated by three methods. The simulated hydrographs are in best agreement with the observations in the braided reach when the formula proposed in the study is adopted, with MAEs reducing by 50% and 67% at the stations of Jiahetan and Gaocun respectively. The formula established in the study can reflect the effects of flow and sediment dynamics, which can improve the accuracy of the one-dimensional morphodynamic model.

Keywords: low sediment concentration; formula for sediment transport capacity; relative equilibrium; suspended bed-material; parameter determination; the Lower Yellow River