•水利与土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500259

本刊网刊

三峡水库蓄水运用后荆江段输沙能力及其与多因素的响应

沈铭晖[1],胡春宏[1],李雨晨[2],郭　率[3],史红玲[1*]

(1.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100048;2.中国长江电力股份有限公司,湖北 宜昌 443002;
3.中国长江三峡集团有限公司,湖北 宜昌 443133)

摘　要:三峡水库蓄水运用以来,下泄水沙过程发生变化,坝下游荆江段河道输沙能力相应发生变化,河道处于严重的冲刷状态。基于2003—2023年枝城–监利河段沿程水文站实测水沙和床沙资料,分析长江荆江段各站输沙率的变化趋势,计算不同河段输沙比变化,通过探究引起输沙比(STR)变化的主要影响因素,建立荆江段汛期输沙比计算公式。研究表明:三峡水库运行后,荆江段沿程各站输沙率与流量呈良好的幂函数关系,均随时间推移呈现减小趋势。三峡水库运行后,荆江段不同河段的输沙比普遍大于1,表明各河段处于冲刷状态;STR与来沙系数呈对数负相关,与水流强度呈幂函数正相关,与床沙中值粒径相关性较差。综合考虑水流强度、来沙系数及床沙中值粒径的影响,建立汛期输沙比计算公式,经验证与实测值吻合较好;由输沙比关系式可知,来沙系数的影响权重大于床沙中值粒径与水流强度的综合项,表明来沙减少是河道输沙比变化的主导因素。

关键词:荆江段;河道输沙比;来沙系数;水流冲刷强度

中图分类号:TV142　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0259-09

自2003年三峡水库蓄水运用以来,清水下泄导致坝下游河道长距离持续冲刷,对河道、生态环境以及沿岸居民的生活和生产带来了诸多问题与挑战。荆江河段作为三峡大坝下游的近坝段,处于三峡工程影响“首当其冲”的位置,其输沙能力的变化对长江中下游的生态环境、航运和水资源利用具有重要意义[1–2]。深入理解荆江河段在三峡水库运用后的冲刷过程,并定量评估其输沙能力的变化,对优化水库调度、制定科学的河道治理方案具有重要现实意义。

三峡水库蓄水运用以来,已有不少学者对荆江段河道的输沙能力与水沙过程变化开展了研究,王延贵等[3]指出水库运用显著改变下泄的水沙条件,影响坝下输移特性;许全喜等[4]系统研究了近50 a长江流域不同河段、不同时段的水沙变化特性;韩博闻等[5]通过相关分析法和M–K非参数检验法探究了三峡蓄水前后长江中下游径流量和输沙量变化;姚仕明等[6]通过对比建坝前后的资料,给出了下游河道输沙率变化的规律;Guo等[7]研究了荆江河段沉积物悬浮状态的根本变化,由进水流量、泥沙浓度和三峡水库的运行水位综合控制。除了水沙关系,Li等[8]构建了荆江河段的泥沙交换模型;沈健等[9]探索了三口洪道对荆江水沙变异过程的响应;刘亚等[10]通过研究得到了荆江河道弯曲特征数对汛期平均流量、洪峰变差系数、年输沙量和输沙指数等水沙条件变化的响应;樊咏阳等[11]提出了不同时期荆江河段冲刷强度最大的流量级;左利钦等[12]探索了荆江河段泥沙冲淤对三峡水库汛期排沙的响应,30%左右的排沙比是荆江河段洪季冲淤的临界点。

输沙比(STR,记为S_{TR})指在一定的时段内由河段输出的泥沙量与进入该河段的总沙量之比,是河道输沙能力常用的评价指标之一[13–14]。许炯心[15]通过泥沙进出平衡的概念与实测资料统计回归了1955—1997年宜昌–武汉河道的泥沙输沙比公式,能明显反映泥沙输移对水沙条件的响应,但忽略了河床边界与形态情况的影响。McKie等[16]通过物理实验揭示了大颗粒间距对河床物质粗化程度和侵蚀模式的关键作用,并采用输沙比来反映水槽内泥沙冲淤状态。韩其为[17]利用三门峡水库水沙资料,建立

收稿日期:2025 – 04 – 10　　**修回日期:**2025 – 05 – 23　　**网络出版日期:**2025 – 11 – 18

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目(0704217);国家自然科学基金项目(U22A20237)

作者简介:沈铭晖(1996—),男,博士生. 研究方向:水力学及河流动力学. E-mail:1027849685@qq.com

* **通信作者:**史红玲,正高级工程师,博士, E-mail:shihl@iwhr.com

水库排沙比与下游河道排沙比的关系。Cheng 等[18]基于1971—2016年花园口–高村河段实测资料，构建了排沙比与水沙条件和主槽形态响应。三峡水库蓄水后，荆江段的输沙比发生了明显变化。然而，现有研究主要关注输沙比的历史变化特征，对影响三峡建坝后下游河道输沙比变化的关键控制因素及其作用机制尚缺乏系统量化分析。

本文基于已有研究，建立三峡水库下游冲刷过程中荆江段河道输沙比与其主控因子的定量关系，分析来水来沙、床沙中值粒径对河道输沙能力的影响。利用2003—2023年荆江实测水沙及床沙资料，剖析河道输沙变化与河床边界调整特征，揭示汛期输沙比对水沙条件和床沙中值粒径的响应规律，构建输沙比计算公式，实现水沙–床沙耦合作用下河道输沙能力的定量表征。

1 河段概况与数据

1.1 河段概况

长江中游荆江河段起于枝城，终至城陵矶，全长约348 km，河段沿程有枝城、沙市、监利3个干流水文站。为研究该河段输沙特性，以沿程水文站为节点，将荆江河段分为以下3个河段：枝沙河段为枝城–沙市之间的河段（88 km），沙监河段为沙市–监利之间的河段（200 km），监城河段为监利–城陵矶之间的河段（60 km），其示意图如图1所示。本文对输沙比的分析主要来自干流水文站水沙数据，监城河段进口数据来自监利水文站，且为了去除洞庭湖汇流对河道输沙能力变化的影响，本文研究的荆江段主要河段为枝沙河段和沙监河段。枝城至大埠街河段河床主要由卵石夹沙组成，枝城水文站位于砂卵石河段；而大埠街以下河段为沙质河床，沙市、监利两水文站位于沙质河床河段[19–21]。



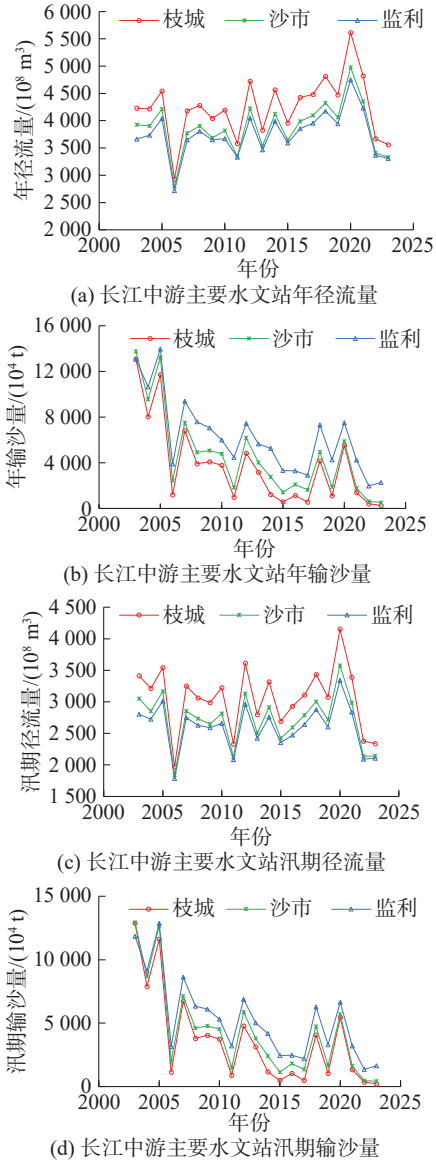
图1 三峡大坝下游河段示意图

Fig. 1 Sketch map of the lower reaches of the Three Gorges Dam

1.2 水沙数据及过程变化

收集2003—2023年长江干流中游沿程枝城、沙市、监利3个水文站逐日流量、逐日含沙量和汛后床沙中值粒径情况。上述沿程水文站的历年径流量及输沙量、历年汛期径流量和输沙量变化如图2所示。

由图2可知，三峡水库蓄水以来（2003—2023年）各站历年径流量和汛期径流量的变化不大，枝城、沙市、监利站的多年平均年径流量为4 245×10^8、3 331×10^8、3 758×10^8 m^3，但各个站的汛期径流量占比减少，枝城、沙市、监利站从2003年最高占比80.7%、77.7%、76.5%减少至2023年的65.7%、64.3%、63.6%，三峡水库流量调度的削峰补平作用使得下游河道汛期来水量占比减少明显，非汛期占比上升。



(a) 长江中游主要水文站年径流量

(b) 长江中游主要水文站年输沙量

(c) 长江中游主要水文站汛期径流量

(d) 长江中游主要水文站汛期输沙量

图2 三峡大坝下游来水来沙的变化过程

Fig. 2 Variation process of water and sediment discharge downstream of the Three Gorges Dam

三峡水库运行后，拦沙作用显著，进入下游河道的输沙量明显减少，枝城、沙市、监利3水文站相对于2003年的最大减幅分别为98.0%、96.2%、82.7%，并呈现沿程递减规律。2003—2023年中的大部分年份，各水文站汛期输沙量占全年沙量的比例大于60%，且枝城水文站所有年份的占比都在80%以上，最高可达

99.4%。由此可见，汛期长江中游输沙量占全年河道输沙量的大部分，是河道输沙变化主要影响时段。

2　长江中游河道输沙能力变化

2.1　沿程水文站输沙率变化

天然河流长期流动可视为达到某种冲淤平衡状态，河道输沙率与流量的关系在一定程度上代表河道输沙能力。2003 年后，三峡水库蓄水以来，下泄清水使下游河道发生冲刷调整，河道输沙率与流量关系相应发生变化。根据 2003—2023 年长江中游河道沿程水文站水沙数据，以 2009 年三峡水库试验性蓄水运用、2013 年金沙江下游溪洛渡水库全面运行，入库水沙进一步减少为节点，划分为 2003—2008 年、2009—2013 年和 2014—2023 年 3 个时段，统计不同时段输沙率（Q_S）与流量（Q）的关系，结果如图 3 所示。长江中游河道在冲刷调整过程中输沙率与流量依然呈现良好的幂函数关系：$y=kx^{\alpha}$，其中：k、α 均为参数，分别反映区域来沙供给量、河床边界条件的影响[22–23]，通常河道床沙越粗，α 值越大[8]。由图 3 可知：从时间上看，长江中游各站流量与输沙率关系线均向下偏移，说明各站同流量级的输沙率随着时间推移存在减小现象；从空间沿程上看，上游至下游各水文站 k 值总体呈增加趋势、α 值总体呈减小趋势，体现了越往下游河段来沙量越大、河床级配越细的规律。此外，决定系数 R^2 在 3 个时期都呈下降趋势，可见受水库拦沙及调蓄调度影响的坝下游河道输沙率与流量相关性有所下降。

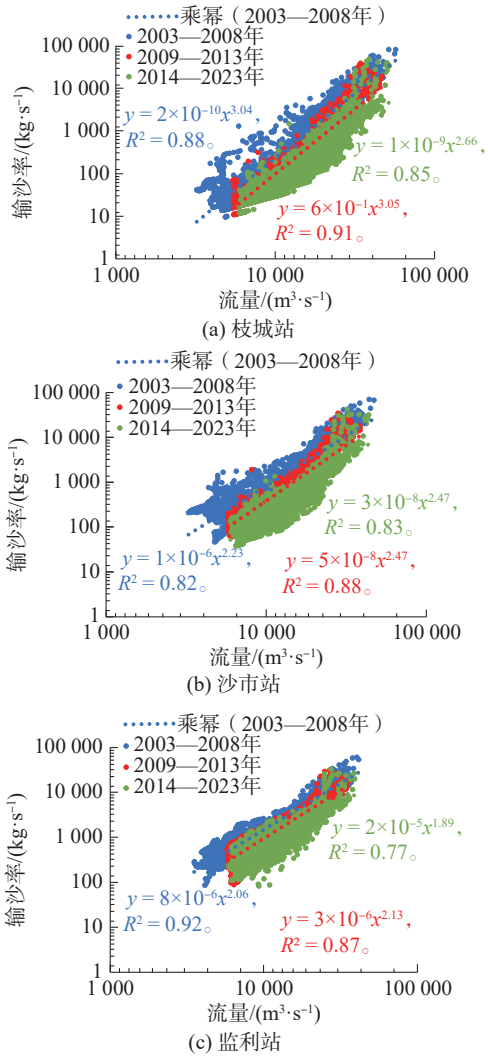


图3　三峡大坝下游沿程输沙率与流量关系

Fig. 3　Relationship between sediment discharge and water discharge along downstream of the Three Gorges Dam

2.2　不同河段输沙比变化

输沙比是对河段内泥沙输移状况的反映，能表明冲淤或淤积变化的趋势，McKie 等[16]运用输沙比评估水槽试验中悬浮物质的输送效率。以各个河段进口站汛期来沙量作为进口沙量 $W_{s,in}$，以河段出口站汛期来沙量作为输沙量 $W_{s,out}$，上述 3 站构成了 2 个河段：枝沙河段、沙监河段。各个河段的输沙比代表各自河段的输沙能力，计算关系式为：

$$S_{TR}=W_{s,out}/W_{s,in} \tag{1}$$

由式（1）的定义可知：当 $S_{TR}>1$ 时，说明从河段中输出的泥沙量大于进入的泥沙量，表明河段整体处于冲刷状态，且输沙比越大说明河道的输沙效率越高；当 $S_{TR}=1$ 时，说明河段输出的泥沙量与进入的泥沙量相当，表明河段内接近输沙平衡状态；当 $S_{TR}<1$ 时，说明河段中输出的泥沙量少于进入的泥沙量，表明河段整体处于淤积状态。长江中游各河段输沙比计算结果如图 4 所示。由图 4 可知，长江中游河道大部分河段的输沙比值大于 1，表明该河段整体处于冲刷状态。枝沙、沙监河段的 S_{TR} 范围分别为 1.00～2.80、0.91～3.87，2003 年的 S_{TR} 分别为 1.00、0.91，处于基本平衡状态，2017 年枝沙河段的 S_{TR} 增至 2.80，2023 年沙监河段的 S_{TR} 达 3.87，河道演变为剧烈冲刷状态。尤其是沙监河段 2022—2023 年 S_{TR} 值呈明显增大趋势，表明该河段处于剧烈冲刷状态。

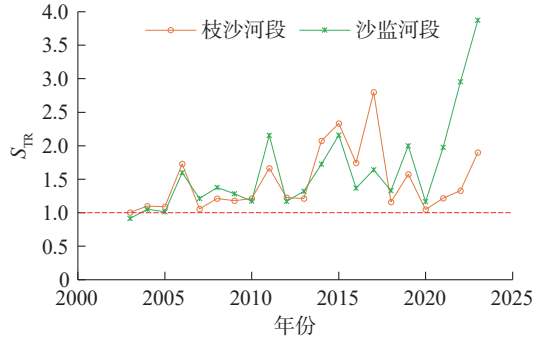


图4　不同河段 S_{TR} 变化

Fig. 4　Variations of sediment transport ratios in different segments

3 河道输沙比影响因素的响应分析

河流水沙动力是河床形态调整的主要驱动力，可用进口水沙条件表达，涉及流量、含沙量等多种因素的综合影响。周美蓉等[24]研究发现，荆江石首河段的平滩河槽参数与汛期水流冲刷强度呈现较好关系。冯雪等[25]研究发现，荆江河段非均匀悬沙的恢复效率与来沙系数呈对数正相关。从时间分布来看，荆江段河道泥沙输移主要发生在汛期，这一时期大流量与较高含沙量的共同作用导致河床形态发生显著变化。本文选取河道进口汛期来沙系数[26−27]和水流冲刷强度[28]反映河段输沙的水沙动力影响，其表达式分别为：

$$\xi = \overline{S}/\overline{Q} \tag{2}$$

$$F = (\overline{Q}^2/\overline{S})/10^4 \tag{3}$$

式(2)、(3)中：$\overline{Q}$为荆江段水文站汛期平均流量，m^3/s；$\overline{S}$为含沙量，kg/m^3；ξ为汛期的来沙系数，$(kg·s)/m^6$，代表进口来沙情况；F为汛期的水流冲刷强度，$m^9/(kg·s^2)$，表达水流动能对河道输沙的影响。

来沙系数越大，意味着有更多的泥沙进入河道，而水流冲刷强度越大则表达了水流对河床的侵蚀作用增强。二者相互作用，直接影响了河道的输沙能力。

3.1 输沙比对来沙系数的响应

来沙系数代表了河段进口来沙量的大小。分析两个河段输沙比与河段进口水文站来沙系数的关系，结果如图5所示。由图5可见，两个河段的输沙比与来沙系数呈现较好的对数关系，R^2值分别为0.594和0.727。具体的数学关系式可概括为：

$$S_{TR} = k_1 \ln \xi + k_2 \tag{4}$$

式中，k_1、k_2均为系数。

由图5、式(4)可知，两个河段的输沙比随着来沙系数的增大而减小，呈负相关性。关系式中的$|k_1|$值大小反映了河段输沙比随来沙系数的变化率情况，k_2值可以看作$\ln \xi = 0$时的基准输沙比，也是模型的调整参数，用于校准模型以适应不同的流域条件。从两个河段对比可知：沙监河段的$|k_1|$值最大，表明来沙系数变化对该河段输沙比影响最大；枝沙河段的$|k_1|$值比沙监河段小，意味着相同来沙系数下，枝沙河段输沙比的响应幅度更小。

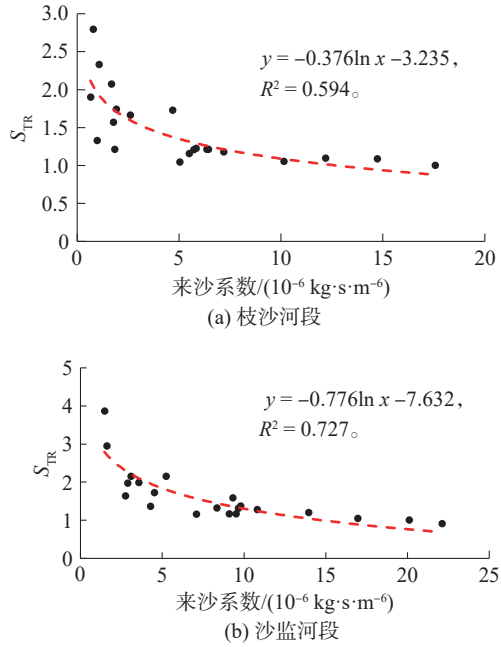


图5 不同河段S_{TR}对来沙系数的响应

Fig. 5 Response of S_{TR} to the sediment coefficients in different segments

3.2 输沙比对水流强度的响应

水流强度是表征河道水流动力的重要参数之一。分析两个河段输沙比与进口水文站水流强度的关系，结果如图6所示。

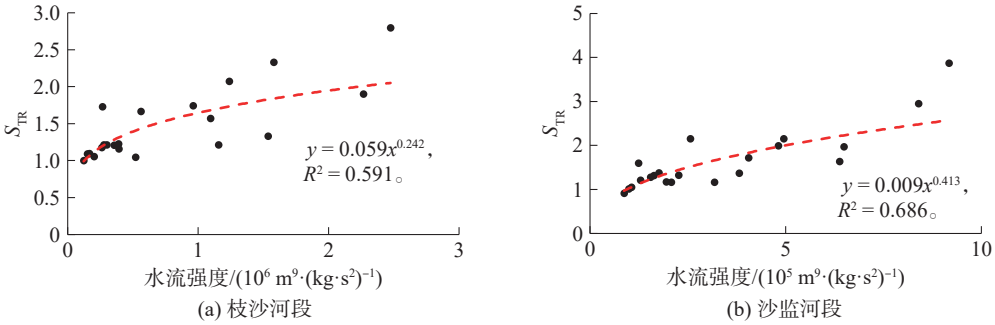


图6 不同河段S_{TR}对水流强度的响应

Fig. 6 Response of S_{TR} to water flow intensity in different segments

由图6可知，河段输沙比与水流强度呈幂函数关系，随着水流强度的增大而不断增大，相关性较好(R^2值分别为0.588和0.672)，其数学关系式为：

$$S_{TR} = k_3 F^{k_4} \tag{5}$$

式中，k_3、k_4分别为关系式的系数和指数。

由图6、式(5)可知，4个河段的输沙比随着水流冲刷强度的增大而增加，呈现正相关性。式(5)中：k_3反映了河道输沙比的基底情况，表示在单位水流冲刷强度

下输沙比的基准值，反映了在特定条件下水流对泥沙输移的初始影响程度；k_3可以校准模型以适应不同的流域条件，枝沙河段的k_3较大（0.059），沙监河段的k_3值较小（仅有0.009）。k_3越大，表明输沙比对水流冲刷作用越敏感。k_4反映了河道输沙比随着水流强度变化而发生的变化率，沙监河段的k_4较大（0.413），枝沙河段的k_4较小（0.242），反映沙监河段受水流冲刷影响的变化更大一些。

3.3　床面阻力变化的影响

河道输沙比的影响因素复杂多样，其中河床的抗冲性是一个关键因素，直接影响泥沙的起动和输移能力。河床抗冲性是指河床抵抗侵蚀和保持稳定的能力，通常与河床颗粒的粒径、组成和结构有关。本文采用汛后河段床沙中值粒径D_{50}作为河床边界条件的代表因素，反映研究河段的抗冲性年变化综合情况，两个河段的汛后床沙中值粒径变化如图7所示。由图7可知：枝沙河段发生明显粗化，床沙中值粒径在2021年发生较大突变，粗化达到26.1 mm；沙监河段为沙质河床，床沙中值大体呈增长趋势，从2003年的0.215 mm增长至2023年的0.250 mm。经回归分析可知，两个河段输沙比直接与河床中值粒径的相关性很差。尽管河段输沙比与河床中值粒径没有直接的相关性，但床沙中值粒径D_{50}的逐年增长反映了河道的粗化情况，亦能表现粗化后河床阻力的变化，是泥沙输移与起动的代表性因素，也是分析河段输移比应当考虑的重要因素。对于荆江段河道床沙粒径范围来说，床沙粒径越粗，河床越难以被冲刷，河道输沙比也越小。

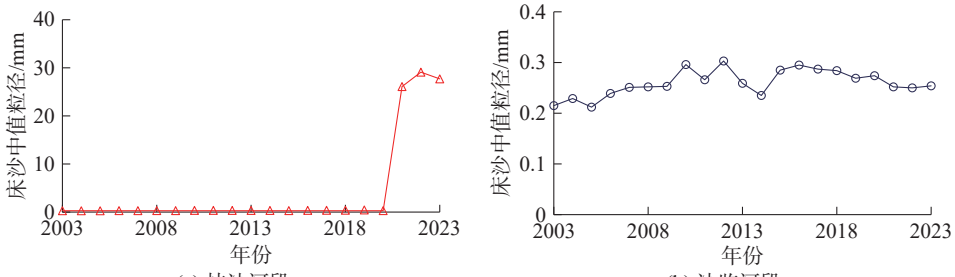


图7　不同河段汛后床沙中值粒径变化

Fig. 7　Variations of river bed median grain size in different river segments

4　河道输沙比关系式

根据实际资料分河段构建荆江段河道输沙比的计算经验公式。输沙比在物理学机制上受到的主要影响分两部分：一是河流的冲淤过程受到上游来沙量情况影响，直接影响河段内的泥沙数量与沉积过程，用来沙系数表现；二是河道来水来沙与河床边界共同作用决定了河流的水动力特性，进而影响泥沙在河段内的沉降与冲刷行为，其中河段水流冲刷与挟带泥沙的能力通过水流冲刷强度表征，河床边界可以用床沙中值粒径作为河道的抗冲性[29]。综合考虑河段进口水沙条件与河段床面阻力的共同影响，利用多因素回归分析方法，其中枝沙河段的床沙中值在2021—2023年有剧烈的倍数变化（60～100倍），所以在率定过程中枝沙河段使用2003—2021年的数据，且沙监河段使用2003—2018年的数据进行模型率定，调整参数以反映实际情况，建立河段输沙比数学表达为：

$$S_{TR}=aD_{50}^{b}\ln F+c\ln\xi+d \tag{6}$$

式中：D_{50}为河段床沙中值粒径，mm；a、b、c、d均为拟合系数。

从拟合关系可以看出，沙监河段输沙比与来沙系数、水流冲刷强度和床沙中值粒径综合影响的相关性都较高（R^2=0.844、0.825）。

式（6）参数率定如表1所示。

表1　式（6）参数率定

Tab. 1　Calibration of parameters in Equation (6)

河段	a	b	c	d	R^2
枝沙河段	−0.415	0.027	−0.908	−4.477	0.844
沙监河段	−1.005	0.070	−1.406	−3.851	0.825

根据式（6）各因素的代表意义，可从物理过程上阐述各因素对输沙比的影响：1）拟合系数反映了床沙中值粒径与水流强度综合项对输沙比的影响，两个河段的a值均为负，说明输沙比随着床沙中值粒径与水流强度综合项的增大而减小；由式（5）可知，输沙比与水流强度呈正相关关系，由此可推断，床沙中值粒径粗化对河床冲刷的抑制作用与水流强度增强的冲刷作用起到了一定的抗衡作用。2）拟合系数b反映了床沙粒径的影响，两个河段系数b均为正值且随河段向下游有所增加，说明近20 a来，离三峡水库距离越远的下游河道床沙中值粒径粗化越不明显，需要更大的指数与水流冲刷强度的冲刷作用来抗衡。3）拟合系数c反映了来沙系数的影响，两个河段的c值均为负，表明输沙比随着来沙系数的增大而减少。4）此外，两个河段的拟合系数绝对值$|c|$大于$|a|$，表明来沙系数对输沙

比的影响权重大于水流强度与床面阻力的综合作用；事实上，从式(6)计算数值上可以得知，两个河段的$|c\ln\xi|$均大于$|aD_{50}^{b}\ln F|$，说明来沙的影响在长江中游输沙比变化过程中占据重要作用。

由以上分析可知，2003 年三峡水库蓄水运用以来，荆江段各河段输沙比随来沙系数的增加而减小，随水流冲刷强度的增加而增加，床沙中值粒径变粗对输沙比增加起到一定抑制作用。上述影响因素中，来沙系数是引起输沙比变化的主要影响因素。计算经验公式能有效得到三峡下游荆江段河道输沙比年变化趋势。S_{TR}的计算值与实测值对比如图 8 所示。由图 8 可以看出，枝沙河段和沙监河段 S_{TR} 计算值最大值明显低于实测值，极端高值通常出现在短期的极端事件中，如突发性涨水，而模型可能未能充分考虑这些事件的非线性影响。模型所使用的参数可能未能涵盖所有影响因素，尤其是短期内的变化，如河床结构的突变或局部环境变化。

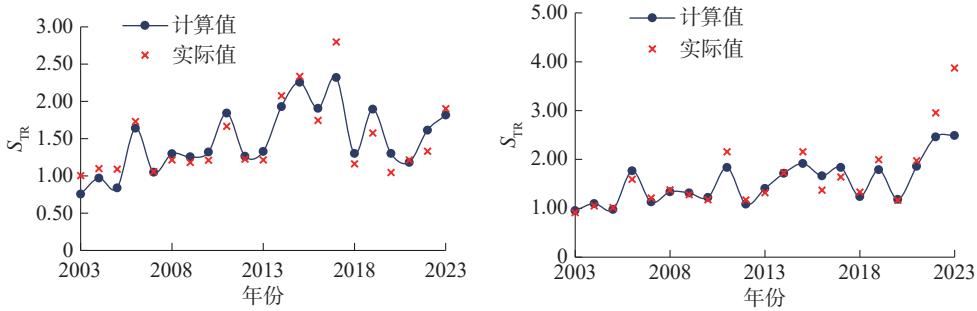


图 8 S_{TR}的计算值与实测值对比

Fig. 8 Comparison between the calculated and measured values of S_{TR}

5 结 论

三峡水库蓄水后，下游河道处于持续冲刷过程，河道输沙能力显著变化，基于 2003—2023 年荆江段实测水文站水沙资料和河道床沙粒径级配数据，分析了荆江段河道在冲刷情况下河道输沙能力的变化，并构建了不同河段输沙比与各影响因素的计算关系式，主要结论如下：

1)三峡水库蓄水运行后，荆江段河道汛期来水量占比减少，非汛期占比上升；河道输沙量大幅减小，较蓄水前各站的最大减幅在 82.7%～98.0%；沿程各站不同时期输沙率与流量的幂函数关系良好，整体呈减小趋势。

2)三峡水库蓄水运行后，荆江段不同河段年输沙比大部分大于 1，说明河道处于冲刷状态；输沙比与来沙系数呈对数关系，趋势为负相关，说明来沙系数越大，则河段输沙比越小；输沙比与水流强度呈幂函数关系，说明水流强度增大，则河段的输沙比增大。

3)构建了荆江段不同河段输沙比计算公式，由各影响因素对比可知，来沙系数对输沙比的影响权重大于水流强度与床面阻力的综合作用，表明来沙减小是引起河道输沙比变化的主导因素。

参考文献：

[1] Huang Yuyun,Yang Zhuoyuan,Yu Fei,et al.The suitable ecological discharge of the Jingjiang Reach after the operation of Three Gorges Project[J].Journal of Lake Sciences,2024,36(6):1900–1910.[黄宇云,杨卓媛,余飞,等.三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量研究[J].湖泊科学,2024,36(6):1900–1910.]

[2] Huang Hai, Song Xiaolong, Zhang Lei, et al. Monthly hydraulic geometry relationship quantification with environmental LAI by utilizing sentinel data: A case in Jingjiang reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2024, 636:131322.

[3] Wang Yangui, Liu Xi, Shi Hongling. Variations and influence factors of runoff and sediment in the Lower and Middle Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2014, 39(5): 38–47.[王延贵,刘茜,史红玲.长江中下游水沙态势变异及主要影响因素[J].泥沙研究,2014,39(5):38–47.]

[4] Xu Quanxi, Tong Hui. Characteristics of flow and sediment change in Yangtze River in recent 50 years[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(5):38–47.[许全喜,童辉.近 50 年来长江水沙变化规律研究[J].水文,2012,32(5):38–47.]

[5] Han Bowen, Li Na, Zeng Chunfen, et al. Analysis of influence of large-scale water conservancy project on variation characteristics of water and sediment in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(2):139–144.[韩博闻,李娜,曾春芬,等.大型水利工程对长江中下游水沙变化特征的影响分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(2):139–144.]

[6] Yao Shiming, Xing Guodong, Chen Dong. Changes in sediment transport rate in the midstream of Yangtze River before and after the construction of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(8):10–16.[姚仕明,邢国栋,陈栋.三峡建库前后长江中

游河道输沙率变化分析[J]. 长江科学院院报,2022,39(8):10–16.]

[7] Guo Anan,Chen Dong,He Li,et al.Reshuffling of the sediment suspension regime in the “starving” middle Yangtze River downstream from cascade mega-reservoirs[J]. Journal of Hydrology,2023,622:129694.

[8] Li Linlin,Xia Junqiang,Zhou Meirong,et al.Modeling of sediment exchange process and channel evolution in the downstream reach below the Three Gorges Dam[J]. CATENA, 2025,251:108815.

[9] Shen Jian, Yuan Song. Water and sediment process variation in Jingjiang River in the middle reaches of the Yangtze River and response analysis of flow capacity of three outlets[J]. Pearl River,2024,45(2):53–59.[沈健,原松 . 长江中游荆江水沙过程变异与三口洪道通流能力响应分析[J]. 人民珠江,2024,45(2):53–59.]

[10] Liu Ya, Li Yitian, Sun Zhaohua, et al. Relationship between flow and sediment regime and changes of main streamline in Jingjiang reach[J]. Hydro–Science and Engineering,2011(2):77–83.[刘亚,李义天,孙昭华,等 . 荆江河段水沙条件与主流线特征关系研究[J]. 水利水运工程学报,2011(2):77–83.]

[11] Fan Yongyang, Hu Chunyan, Chen Mofei. Response of bed evolution in Jingjiang River to water and sediment process before and after operation of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River,2020,51(10):1–6.[樊咏阳,胡春燕,陈莫非 . 三峡水库蓄水前后荆江河段冲淤与水沙过程响应[J]. 人民长江,2020,51(10):1–6.]

[12] Zuo Liqin, Lu Yongjun, Wang Hongyang, et al. Responses of erosion and deposition in the Jingjiang reach to sediment delivery of the Three Gorges Reservoir during flood season[J]. Advances in Water Science,2023,34(1):115–125.[左利钦,陆永军,王洪杨,等 . 荆江河段泥沙冲淤对三峡水库汛期排沙的响应[J]. 水科学进展,2023,34(1):115–125.]

[13] Hu Chunhong, Chen Jianguo, Liu Dabin, et al. Studies on the features of cross section’s profile in lower Yellow River under the conditions of variable incoming water and sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11):1283–1289.[胡春宏,陈建国,刘大滨,等 . 水沙变异条件下黄河下游河道横断面形态特征研究[J]. 水利学报,2006,37(11):1283–1289.]

[14] Chen Xujian,Hu Chunhong,An Yuqi,et al.Comprehensive evaluation method for sediment allocation effects in the Yellow River[J].International Journal of Sediment Research, 2020,35(6):651–658.

[15] Xu Jiongxin. Influence of variations in suspended sediment concentration and grain size on sediment deposition of Yichang–Hankou reach of Yangtze River[J]. Advances in Water Science,2006,17(1):67–73.[许炯心 . 含沙量和悬沙粒径变化对长江宜昌–汉口河段年冲淤量的影响[J]. 水科学进展,2006,17(1):67–73.]

[16] McKie C W,Juez C,Plumb B D,et al.How large immobile sediments in gravel bed rivers impact sediment transport and bed morphology[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2021,147(2):04020096.

[17] Han Qiwei.Regulation of flow-sediment in the Yellow River[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2008(9):1015–1026.[韩其为 . 论黄河调水调沙[J]. 天津大学学报,2008(9):1015–1026.]

[18] Cheng Y F,Xia J Q,Zhou M R,et al.Response of sediment delivery ratio to the incoming flow-sediment regime and channel geometry in the braided reach of the Lower Yellow River[J].Acta Geographica Sinica,2021,76(1):127–138.

[19] Yang Yunping,Zhang Mingjin,Zhu Lingling,et al.Impact of the operation of a large-scale reservoir on downstream river channel geomorphic adjustments: A case study of the Three Gorges[J]. River Research and Applications, 2018, 34(10):1315–1327.

[20] Yang Yunping, Zheng Jinhai, Zhang Huaqing, et al. Impact of the Three Gorges Dam on riverbed scour and siltation of the middle reaches of the Yangtze River[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2022,47(6):1514–1531.

[21] Yang Yunping, Zhang Mingjin, Li Yitian, et al. Suspended sediment recovery and bedsand compensation mechanism affected by the Three Gorges Project[J]. Acta Geographica Sinica,2016,71(7):1241–1254.[杨云平,张明进,李义天,等 . 长江三峡水坝下游河道悬沙恢复和床沙补给机制[J]. 地理学报,2016,71(7):1241–1254.]

[22] Shen Hongbin,Wu Baosheng.Exponent change rule of power law for sediment transport in alluvial rivers[J]. Advances in Water Science,2018,29(2):179–185.[申红彬,吴保生 . 冲积河流泥沙输移幂律函数指数变化规律[J]. 水科学进展,2018,29(2):179–185.]

[23] Shen Hongbin, Wu Baosheng, Wu Huali. A review on the effects of boundary condition on sediment transport efficiency in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science,2019,30(3):445–456.[申红彬,吴保生,吴华莉 . 黄河下游河道边界条件影响输沙效率研究述评[J]. 水科学进展,2019,30(3):445–456.]

[24] Zhou Meirong, Xia Junqiang, Deng Shanshan. Fluvial processes of the Shishou reach in the Jingjiang Reach in recent fifty years[J].Journal of Sediment Research,2017,42(1):40–46.[周美蓉,夏军强,邓珊珊 . 荆江石首河段近 50 年河床演变分析[J]. 泥沙研究,2017,42(1):40–46.]

[25] Feng Xue,Xia Junqiang,Zhou Meirong,et al.Transport characteristics of non-uniform suspended sediment in the Jingji-

ang Reach after the Three Gorges Project operation[J].Journal of Lake Sciences,2021,33(6):1898−1905.[冯雪,夏军强,周美蓉,等.三峡水库运用后荆江段非均匀悬沙恢复特性[J].湖泊科学,2021,33(6):1898−1905.]

[26] Feng Zong,Sun Zanying,Peng Hong,et al.Study on the influence of the incoming sediment coefficient on the scour and sedimentation[J].Yellow River,2019,41(3):44−48.[冯宗,孙赞盈,彭红,等.来沙系数对河道冲淤的影响研究[J].人民黄河,2019,41(3):44−48.]

[27] Wu Baosheng,Shen Guanqing.Discussion on the physical significance of incoming sediment coefficient[J].Yellow River,2008,30(4):15−16.[吴保生,申冠卿.来沙系数物理意义的探讨[J].人民黄河,2008,30(4):15−16.]

[28] Wu Baosheng,Xia Junqiang,Fu Xudong,et al.Effect of altered flow regime on bankfull area of the Lower Yellow River, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008,33(10):1585−1601.

[29] Cheng Yifei,Xia Junqiang,Zhou Meirong,et al.Response of sediment delivery ratio to the incoming flow-sediment regime and channel geometry in the braided reach of the Lower Yellow River[J].Acta Geographica Sinica,2021,76(1):127−138.[程亦菲,夏军强,周美蓉,等.黄河下游游荡段排沙比对水沙条件与断面形态的响应[J].地理学报,2021,76(1):127−138.]

Changes in Sediment Transport Capacity and Response Relationships in Different Segments of the Jingjiang Reach After the Operation of the Three Gorges Reservoir

SHEN Minghui[1], *HU Chunhong*[1], *LI Yuchen*[2], *GUO Shuai*[3], *SHI Hongling*[1*]

(1.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2.China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 3.China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China)

Abstract:

Objective The impoundment of the Three Gorges Reservoir, a major hydraulic intervention in the Yangtze River, has significantly altered sediment dynamics along the Jingjiang reach. This study aims to investigate changes in sediment transport capacity between Zhicheng and Jianli following reservoir operation. Hydrological and bed sediment data collected over two decades (2003—2023) were analyzed to identify trends in the sediment transport rate (STR), calculate changes in the STR among different river segments, and determine the primary factors governing these changes. A specific objective of this study was to develop a robust formula for calculating the STR during the flood season, providing insights into the altered sediment transport regime of the river.

Methods Hydrological data from multiple monitoring stations along the Zhicheng–Jianli section of the Yangtze River were analyzed. These data included flow rates and sediment transport measurements for the period 2003—2023. Statistical analysis and mathematical modeling techniques were used to examine the relationship between STRs and flow rates, identifying trends over time. The STRs of different segments of the Jingjiang reach were calculated to assess the degree of scouring following reservoir operation. The relationships between the STR and key influencing factors, such as the sediment supply coefficient, flow intensity, and the median grain size of bed sediments were examined. Finally, a formula for calculating the STR during the flood season was established using these influencing variables to predict sediment transport changes accurately.

Results and Discussions The findings reveal a significant shift in sediment dynamics along the Jingjiang reach following the operation of the Three Gorges Reservoir. First, the STRs at various stations exhibit strong power-function relationships with flow rate, with an overall decreasing trend over the 20-year study period. This trend indicates the scouring effect associated with the reservoir, as reduced sediment supply downstream is accompanied by decreased STRs. The calculated STR values for different segments of the Jingjiang reach are predominantly greater than 1, indicating a prevalent state of scouring. This result suggests that these river segments are experiencing net sediment loss, likely owing to reduced sediment supply from upstream. The study further shows that the STR exhibits a negative logarithmic relationship with the sediment supply coefficient, suggesting that lower sediment supply is associated with more pronounced scouring. Conversely, the STR exhibits a positive power-function relationship with flow intensity, highlighting the role of increased flow in enhancing sediment transport capacity. The correlation between the STR and the median grain size of bed sediments is relatively weak, indicating that grain size has a comparatively limited influence on sediment transport dynamics under the conditions examined. Through multivariate analysis, a formula for calculating the STR during the flood season was developed by incorporating flow intensity, sediment supply coefficient, and median grain size. The formula shows good agreement with the measured values, providing a useful tool for predicting changes in sediment transport. The relationships derived from the STR formula indicate that the sediment supply coefficient has a greater influence on the STR than the combined effects of median grain size and flow intensity. This finding highlights the important role of sediment supply in determining sediment transport dynamics along the river, with reduced upstream sediment inputs being closely associated with changes in the STR.

Conclusions The study concludes that the operation of the Three Gorges Reservoir has significantly altered sediment transport dynamics along

the Jingjiang reach of the Yangtze River. The observed decrease in STRs and the prevalence of scouring conditions indicate changes in downstream sediment supply following reservoir operation. STR values greater than 1 across various segments suggest that these areas are experiencing net sediment loss, likely owing to reduced sediment supply from upstream. The developed formula for calculating the STR during the flood season provides a useful tool for predicting changes in sediment transport by incorporating key variables, including flow intensity, sediment supply coefficient, and median grain size. The analysis indicates that the sediment supply coefficient is the dominant factor influencing changes in the STR, with a greater influence than flow intensity and grain size. This finding emphasizes the importance of sediment management strategies that consider upstream sediment supply to mitigate scouring and maintain the ecological and geomorphological functions of the river. Overall, this study provides insights into sediment transport dynamics along the Jingjiang reach under the influence of large-scale hydraulic interventions. By highlighting the important role of sediment supply in shaping changes in the STR, the study underscores the importance of comprehensive sediment management in ensuring sustainable development and maintaining the ecological balance of the Yangtze River. Future research should focus on long-term monitoring and modeling to further improve sediment transport predictions and support adaptive management strategies in response to ongoing changes in river dynamics.

Key words: Jingjiang reach; sediment transport ratios; sediment supply coefficients; flow scour intensity

（编辑　周　璇）

引用格式: Shen Minghui,Hu Chunhong,Li Yuchen,et al.Changes in sediment transport capacity and response relationships in different segments of the jingjiang reach after the operation of the Three Gorges Reservoir[J]. Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):259–267.[沈铭晖,胡春宏,李雨晨,等.三峡水库蓄水运用后荆江段输沙能力及其与多因素的响应[J].工程科学与技术,2026,58(6):259–267.]