J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(4):000-000
DOI 10.18307/2027.0442
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

三峡水库运用后上荆江沙质河段枯水位下降对河床冲淤的响应机制*

安姗姗[1]，唐金武[2,3]，孙昭华[1**]，李芷晴[2,3]，曹志先[1]
（1：武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室，武汉 430072）
（2：长江勘测规划设计研究有限责任公司，武汉 430010）
（3：长江水利委员会长江经济带岸线洲滩安全保障技术创新中心，武汉 430010）

摘 要：三峡水库蓄水运用后，上荆江沙质河段冲淤分布与枯水位下降均呈现显著的时空不均匀性，辨析二者响应关系对枯水位下降趋势判断具有重要意义。基于 2002 年以来多测次河道地形及水文资料，归纳了河床时空变形特征与沿程枯水位下降规律，借助二维水流数学模型开展数值试验量化了河床冲刷对枯水位的控制作用，并初步预测了 2023－2050 年的枯水位降幅。结果表明：（1）三峡建库初期，本河段冲淤强度呈上游大、下游小的分布特征；2016 年冲刷重心下移至本河段后，放宽段冲刷幅度大于束窄段的特点较为明显，由此导致放宽、束窄段之间的深泓高差均值由 2002 年的 3.78 m 减至 2021 年的 2.92 m。（2）2003－2023 年，沙市与新厂站枯水位累计降幅分别为 3.6 m 和 3.3 m，2016 年前沙市站枯水位下降速率大于新厂站，2016 年后两站枯水位呈同步下降趋势。（3）放宽段河床下切是枯水位下降的主控因素，深泓高凸的节点部位近似平行下切驱动沿程枯水位同步下降，中枯各流量级下水面比降近似等于河床比降。（4）沙市站枯水位降幅可由河段总冲刷量近似估算，基于水库下游河道冲刷强度呈幂函数衰减的规律预估 2023–2050 年沙市站枯水位累计下降约 3.22 m。以上认识可为该河段的枯水位变化趋势预测与调控提供参考。

关键词：沙质河段；河床冲刷；枯水位下降；上荆江；数值试验

Mechanism of low-water level decline in response to riverbed scour and deposition in the sandy Upper Jingjiang Reach after impoundment of the Three Gorges Reservoir*

An Shanshan[1], Tang Jinwu[2,3], Sun Zhaohua[1**], Li Zhiqing[2,3] & Cao Zhixian[1]
(1: *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *P.R.China*)
(2: *Changjiang Survey*, *Planning*, *Design and Research Co*., *Ltd*., *Wuhan* 430010, *P.R.China*)
(3: *Yangtze River Economic Belt Innovation Center for Shoreline and Shoal Safety and Security Technology*, *Wuhan* 430010, *P.R.China*)

Abstract: Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR), riverbed erosion and deposition and low water level drawdown in the sandy Upper Jingjiang Reach have shown strong spatiotemporal heterogeneity. Clarifying the link between these two variables is important for predicting low water level drawdown trends. Based on multi-temporal channel topographic and hydrological data collected since 2002, this study summarizes the spatiotemporal patterns of riverbed erosion and deposition and the evolution of low water levels in the study reach. A two-dimensional hydrodynamic model was used to assess the control effect of riverbed erosion on low water levels. It was also used to preliminarily predict low water level drawdown during 2023–2050. The results show four main findings. First, riverbed erosion intensity gradually weakened along the reach in the early post-impoundment stage of the TGR. After the erosion center migrated into the Upper Jingjiang Reach in 2016, wide channel segments eroded much more strongly than narrow segments. This process reduced the average thalweg elevation difference between wide and narrow segments from 3.78 m in 2002 to 2.92 m in 2021. Second, cumulative low water level drawdowns reached 3.6 m at Shashi (SS) Station and 3.3 m at Xinchang (XC) Station from 2003 to 2023. The drawdown rate was higher at SS Station than at XC Station before 2016. In contrast, low water level drawdown occurred synchronously at both stations after 2016. Third, riverbed incision in wide channel segments is the main factor controlling low water level drawdown. Uniform

*2026-05-21 收稿；2026—08-01 收修改稿；2026-08-06 录用。
国家自然科学基金项目（52479074）和长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新基金项目（CX2024Z13-2）联合资助。
**通信作者；E-mail: Lnszh@126.com

incision at relatively high thalweg sections causes consistent low water level decline along the entire reach. The water surface slope is close to the riverbed slope under low and moderate flow conditions. Fourth, the total riverbed scour volume can effectively estimate low water level drawdown at SS Station. Based on the power-law attenuation of erosion intensity in dam downstream reaches, the low water level at SS Station is projected to drop by about 3.22 m from 2023 to 2050. These results support the prediction and regulation of low water level variations in the Upper Jingjiang Reach.

Keywords: Sand-bed river reach; riverbed scouring; low-water level decline; the Upper Jingjiang Reach; numerical simulation

三峡水库运行 20 余年以来，下泄沙量最大减幅已达 98%[1]，紧邻水库下游的上荆江河道持续冲刷下切[2]，沿江枯水位显著下降，对沿岸生产生活造成较大影响，突出表现在两方面：一是上荆江沙卵石段与沙质段枯水位降幅差异悬殊[3]，两者衔接区间内卵石浅滩“坡陡、流急、水浅”的碍航问题日益突出；二是枯水位持续降低导致沿程众多取水设施运行条件恶化，枯期取水困难[4]，荆江南岸的太平口、藕池口断流时间也不断延长。在此背景下，如何准确预估未来时期上荆江沙质河段冲刷与枯水位变幅，是当前的重要问题。

坝下游河床冲刷引发水位调整是水库蓄水后的普遍现象，美国科罗拉多河格伦峡大坝[5]、密苏里河梯级水库[6]下游均观测到显著的河床下切与枯水位下降过程。然而，对于河床冲刷与水位降幅的预测，却是各国普遍面临的难题。尼罗河阿斯旺大坝下游实际的河道冲刷深度明显小于早期预测[7]，而莱茵河下游持续冲刷，水位下降远大于预期，不得不长期实施人工补沙措施[8]。这些表明，坝下河床冲刷及水位响应过程仍具有较大的预测不确定性，结合已建水库下游原型观测来判断其未来发展趋势，是非常必要的工作。

基于三峡水库运行以来的坝下游观测资料，已有研究表明河床下切是引起水位下降的直接原因，但河床冲刷具有显著的时空不均匀性[5-6]。从时间发展来看，冲刷重心约以 8 km/a 的速率逐步向下游迁移[9]，目前已迁移至上荆江沙质河段[10]，该河段内粗细颗粒均冲刷[11]。从空间分布来看，冲刷主要集中于枯水河槽，断面形态总体往窄深化发展。然而，由于上荆江沙质河道沿程宽窄相间，汛枯期之间束窄段与放宽段的水动力强度交替增减[12]，三峡建库后流量过程调平更利于放宽段的冲刷[13]，导致沿程宽窄段的冲刷幅度并不均匀。

上荆江沙质河道冲刷强度的空间分布不均也导致了洪、枯水位降幅的差异。由于枯水河槽以上部位变形幅度小，加之河道阻力增大以及汛期洞庭湖入汇顶托的共同影响，该河段同流量下洪水位并未明显下降，某些年份甚至偶有抬升[14-15]。相比之下，沿程枯水位则呈趋势性快速下降。已有研究认为床面下切是枯水位下降的主因，枯水位与枯水河槽平均高程基本呈等幅下降[16]；也有研究进一步指出，沿程不同部位河床下切对枯水位的影响存在差异，并提出抑制枯水位大幅下降的关键在于识别控制节点部位[17]。此外，出口水位下降引发的水位降幅溯源传递也会影响河段内部水位调整[18]。然而，上述因素之间的相互作用关系至今仍不清晰[14,16]。尤其值得注意的是，以往研究[19-20]预测至 2032 年沙市站枯水位降幅约为 2.0~3.2 m，但实际观测显示，至 2024 年该站枯水位降幅已达 3.6 m[3]，明显超过预测范围。这表明，河床冲刷与枯水位下降之间的响应规律及作用机制仍有待进一步厘清。特别是以往水位下降的预测多采用水沙数学模型，其参数不确定性是导致预测误差的重要原因之一。因此，有必要基于长期实测资料系统归纳河床冲刷与枯水位变化特征，以深化对其演变机制的认识，并为数学模型参数优化提供依据。

长江中下游存在上千公里的沙质河床，本文借助距坝最近、冲刷最为显著的上荆江沙质河段内长期观测资料，研究河床冲刷和枯水位下降之间的响应关系，不仅可以增进对二者之间响应机理的认识，也可为其他河段枯水位降幅预测提供参考。

1 研究资料及方法

1.1 研究区域及数据资料

上荆江沙质河段（大埠街至新厂）长约 100 km，内有太平口分流入洞庭湖，河道内部和出口分别布设沙市水文站和新厂水位站。受两岸节点控制，河道沿程宽窄相间，存在涴市、太平口、瓦口子、马家咀等多个弯曲分汊区间（图 1）。本河段平滩河宽均值$\overline{B}_{bf}$约为 1250 m，三峡建库前后$\overline{B}_{bf}$基本保持稳定。河段内

为典型沙质河道，虽然三峡建库以来沙市站床沙中值粒径由 2003 年的 0.215 mm 粗化至 2024 年的 0.252 mm，但仍以粒径小于 2 mm 的细沙为主。

研究中所用资料包括河道地形、水文及河床冲淤量数据。地形资料为本河段 2002、2008、2014、2016、2018 和 2021 年六个年份的汛后实测地形。其中，2002 与 2008 年测次分别代表三峡建库前及水库运行初期的河道形态；2014 年测次代表坝下游冲刷重心进入上荆江沙卵石河段后的河道形态[21]；2016、2018 及 2021 年测次代表冲刷重心进入上荆江沙质河段后的河道形态。水文资料包括沙市水文站 1992–2023 年的逐日平均流量、水位，以及新厂水位站同期的逐日平均水位。2002–2023 年上荆江及枝城至大埠街河段的逐年枯水河槽与平滩河槽冲淤量资料来源于《长江泥沙公报》及文献[3]。

需指出的是，本文计算平滩河宽等断面几何要素时，采用的平滩流量对应沙市站 30000 m^3/s，该流量是通过识别全河段断面平均水力几何要素的突变点而确定[22]。不同文献中所采用的荆江河段平滩流量数值存在一定区别[3,22-23]，如文献[3]以沙市站 26000 m^3/s 作为平滩流量 Q_{bf}，考虑到冲积河流的造床流量或 Q_{bf} 通常对应一个较窄的流量范围[24–26]，且 Q_{bf} 取 26000 m^3/s 与 30000 m^3/s 时沙市站水位仅相差 0.55 m，沿程断面河宽相对变化小于 7%（图 4（a）），因此平滩流量的选取不影响断面形态的讨论分析。对于枯水代表流量级的选取，一些研究[3]采用沙市站 6500 m^3/s，但近些年来随着三峡水库枯期补水力度加大，该流量级出现频次显著降低，故本文采用沙市站 7000 m^3/s 作为枯水代表流量。

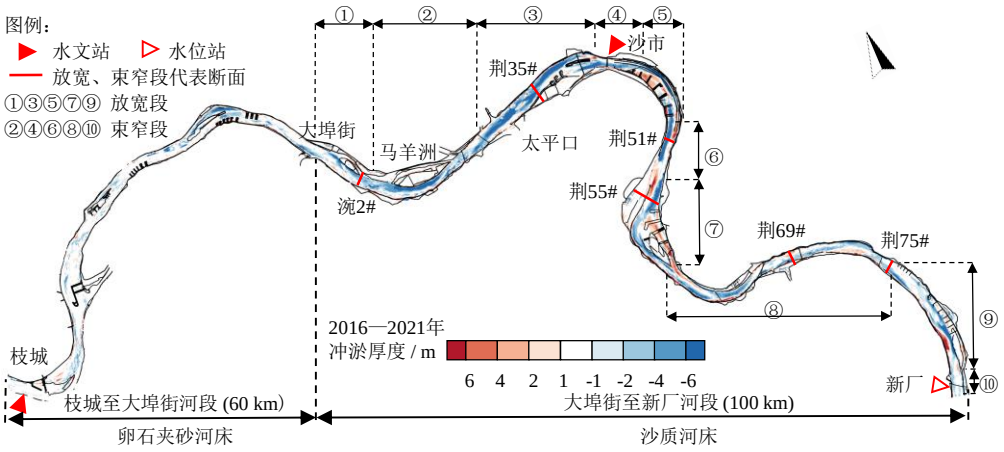

图 1　枝城至新厂河段河势图

Fig.1 Location and sketch of the Zhicheng–Xinchang reach

1.2 研究思路与方法

本文总体研究思路如图 2 所示。首先分析河段冲淤演变时空特征，包括冲淤总量的时间变化、放宽段与束窄段的冲淤强度差异、以及洪枯各级河槽的变形差异；其次分析河段内部与出口水位的变化特征，包括不同流量级下水位降幅差异及同流量下水位下降历程等；最后辨析河道冲刷与出口水位下降对河段内部枯水位的影响，并据此预测未来发展趋势。依据上述思路，研究方法如下。

（1）放宽段与束窄段的划分。基于河道地形资料，沿程布置 310 个断面以统计形态特征，断面平均间距约为 0.31 km。参考罗方冰等[10]的方法，以三峡建库前地形为基础，计算 Q_{bf} 下沿程水面线，确定各断面的平滩河宽 B_{bf}。以全河段 $\overline{B}_{bf}$ 为基准，将 $B_{bf} > \overline{B}_{bf}$ 的断面归为放宽段，$B_{bf} < \overline{B}_{bf}$ 断面归为束窄段，兼顾同类断面的连续性，沿程共划分出相间分布的 5 个放宽段与 5 个束窄段（图 1）。

（2）同流量下水位的确定。基于逐日流量与水位资料，逐年建立单值型水位–流量关系，并插值得到各年份同流量下的水位。

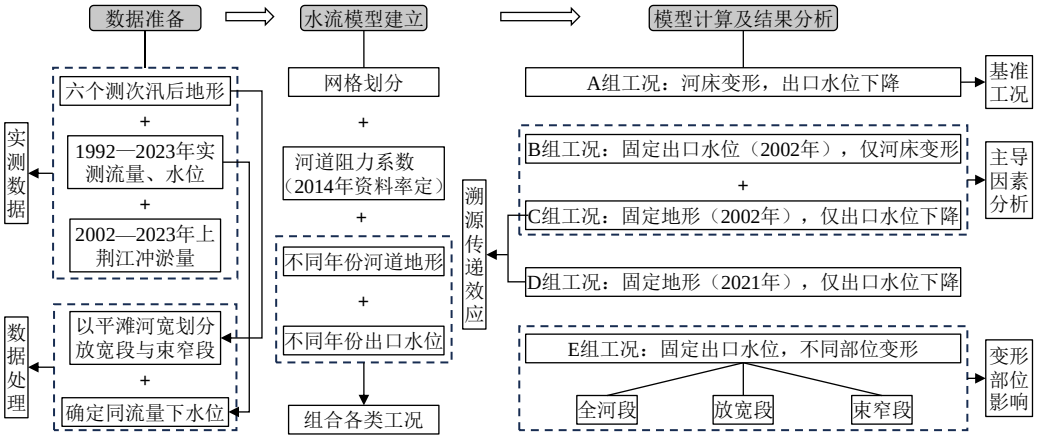

图 2　研究思路框架图

Fig.2 Frame diagram of research approach

表 1　计算工况方案设计

Tab.1 Design of simulation scenarios

组别	方案编号	计算方案	
		河道地形	出口水位
A	1	2002 年	2002 年
	2	2008 年	2008 年
	3	2016 年	2016 年
	4	2021 年	2021 年
B	5	2008 年	2002 年
	6	2016 年	
	7	2021 年	
C	8、9、10	2002 年	2002 年水位下降 DZ_1、DZ_2、DZ_3
D	11、12、13	2021 年	2002 年水位下降 DZ_1、DZ_2、DZ_3
E	14、15、16	2002 年地形，沿程平均下切 DE_1、DE_2、DE_3	2002 年
	17、18、19	2002 年地形，放宽段断面下切 DE_1、DE_2、DE_3	
	20、21、22	2002 年地形，束窄段断面下切 DE_1、DE_2、DE_3	
	23、24、25	2021 年地形，沿程平均下切 DE_1、DE_2、DE_3	2021
	26、27、28	2021 年地形，放宽段断面下切 DE_1、DE_2、DE_3	
	29、30、31	2021 年地形，束窄段断面下切 DE_1、DE_2、DE_3	

DZ_1、DZ_2、DZ_3 分别对应 2002－2008、2002－2016、2002－2021 年新厂站枯水位累计降幅，分别为 0.52、1.91、2.65 m；DE_1、DE_2、DE_3 分别对应 2002－2008、2002－2016、2002－2021 年研究河段枯水河槽的累计冲刷厚度，分别为 0.80、2.53、3.64 m。

（3）平面二维水流数学模型的建立。模型计算范围为大埠街至新厂河段，采用贴体曲线坐标系下的控制体积法[10]，将其划分为 650×101 个网格。模型考虑太平口分流，上游边界由沙市站与弥陀寺站实测流量之和确定，下游边界由沙市流量对应的新厂站水位控制。受资料条件限制，采用 2014 年 8 个断面的实测流速与水位资料率定糙率，率定值为 0.020~0.032，流速和水位误差分别控制在±0.4 m/s 和±0.04 m 以内；进一步采用 2020 年 4 个断面的实测资料进行验证，对应误差分别控制在±0.5 m/s 和±0.06 m 以内。

（4）枯水位影响因素分析。为定量辨析河床变形与出口水位下降对枯水位的影响，在固定糙率参数的条件下采用分离变量思路开展数值试验，基于 2002、2008、2016 和 2021 年地形及对应出口水位设计五组计算工况。各工况详见表 1，表中 A、B、C、D 四组用于分析河床变形和出口水位下降的独立作用及叠加效应；E 组用于辨析放宽段及束窄段河床变形对枯水位影响的差异。需指出的是，C 组与 D 组工况的出口水位及降幅相同，仅地形不同，以此来揭示河床变形对出口水位降幅溯源传递过程的非线性影响。E 组工况分别对不同部位的枯水河槽进行等厚下切处理，以此来揭示不同部位变形对枯水位影响的相对强弱。

2 河道沿程冲淤特征

2.1 冲淤总量及分布特征

为识别冲刷重心下移至沙质河段的时机，以大埠街为界将上荆江划分为卵石夹沙河段与沙质河段，比较两者 2002–2023 年枯水河槽与平滩河槽的冲刷强度（图 3）。受河床组成差异影响，2011 年前卵石夹沙河段冲刷强度始终低于沙质河段，两者枯水河槽累计下切厚度分别为 1.22 m 和 1.34 m；2011–2015 年两段冲刷均有所加速，累计下切厚度分别为 1.04 m 和 0.74 m；2015 年后卵石夹沙河段冲刷速率衰减，沙质河段仍维持较大冲刷速率，2015–2023 年累计下切厚度分别为 0.69 m 和 1.66 m。这表明，2011 年后坝下游冲刷重心转移至枝城以下，2015 年后进一步下移至大埠街以下，上述时间节点与以往研究一致[21]。基于地形法的冲淤量统计还显示，2002–2023 年沙质河段枯水河槽与平滩河槽累计冲刷强度分别为 448 与 499 万 m^3/km，呈“滩槽皆冲”特征，其中 90%的冲刷量集中于枯水河槽。

图 3　三峡建库后上荆江河床冲刷强度

Fig.3 Riverbed scouring intensity in the Upper Jingjiang Reach under post-TGR conditions

2.2 河床冲刷下切幅度的沿程差异

基于 2002 年地形，研究河段沿程 B_{bf} 范围为 620~3160 m（图 4（a）），放宽段与束窄段河长基本相当，放宽段多位于低滩、江心洲发育充分的河段，少数江心洲因接近并岸，平滩流量以下支汊接近断流，故归为束窄段，如马羊洲所在的河段②。基于上述划分结果，对两类河段的冲淤调整差异展开分析。由图 4（b）可见，随着冲刷重心下移，放宽段与束窄段枯水河槽下切幅度的差异逐渐凸显，2002－2021 年两类河段内累计下切幅度分别为 4.12 m 和 3.20 m，放宽段整体大于束窄段。在 B_{bf} 基本稳定的情况下，河床下切使得断面宽深比减小，且放宽段减小幅度更大，与以往研究认识一致[27]。两类河段冲刷强度的差异进一步改变了深泓纵向起伏特征。为消除沿程整体坡降的影响，对各测次深泓纵剖面进行去趋势化处理（图 4（c）），将去趋势后放宽段和束窄段平均深泓高程之间的差值定义为深泓相对起伏度（图 4（d））。结果表明，由于放宽段与束窄段的深泓高差减小，河段内深泓相对起伏度由 2002 年的 3.78 m 减小至 2021 年的 2.92 m，这种深泓高差总体减小的趋势与上游沙卵石河段[28]相反。

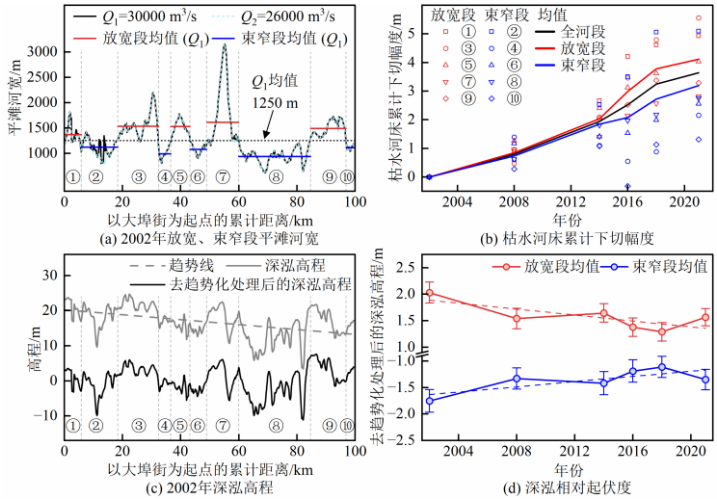

图 4　三峡建库后放宽段与束窄段的冲淤调整差异

Fig.4 Characteristics of scouring and deposition in wide and narrow reaches under post-TGR conditions

2.3 冲淤引起的典型断面变化特征

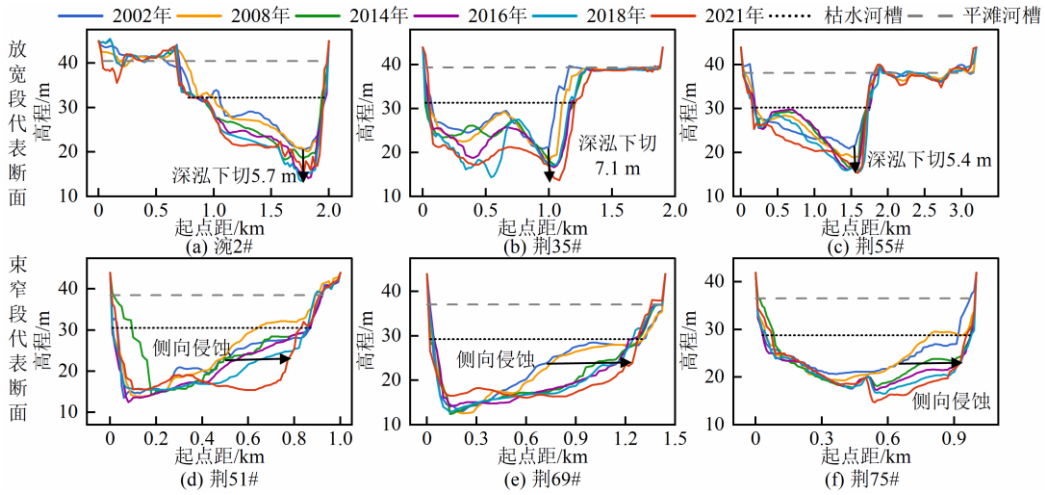

图 5　放宽、束窄段代表断面形态变化

Fig.5 Morphological changes in representative cross-sections of the wide and narrow reaches

参照长江委水文局在该河段布设的固定监测大断面位置，选取 6 个沿程分布较均匀且河宽接近所在分段$\overline{B}_{bf}$的断面（位置见图 1），其中涴 2#、荆 35#、荆 55#位于放宽段，荆 51#、荆 69#、荆 75#位于束窄段。依据 6 个测次地形来考察这 6 个断面的冲淤变形特征，由图 5 可见，各断面冲淤调整主要集中于枯水河槽，枯水河槽以上变幅较小。束窄段深泓下切幅度小，冲刷以侧蚀为主；放宽段深蚀与侧蚀同时发生，深泓高程明显降低。其原因在于，天然情况下放宽段汛期淤积、枯期冲刷，束窄段则相反[12]，水库调度的削洪补枯作用使中枯水历时增加，更利于放宽段冲刷。总体来看，2002–2021 年两类河段的枯水河床冲刷幅度均呈沿程递减的趋势，且放宽段整体大于束窄段。例如涴 2#与荆 55#断面同属放宽段，但前者偏上游，冲刷幅度为 0.84 m，而后者为 0.51 m；荆 51#与荆 75#断面同属束窄段，前者冲刷幅度 0.34 m，大于后者

的 0.30 m。从时间发展来看，2016 年后各断面冲刷均有所加速，但宽窄段之间的差异性规律不变。

3 枯水位调整特性

3.1 不同时期的水位流量关系变化

选取 2002、2016、2020 和 2023 年为代表年份，沙市、新厂两站水位流量关系的变化如图 6 所示。两站同流量下枯水位明显下降，但水位降幅随流量增大而减小，至平滩流量水位基本不变，2020 年洪水期水位则有所抬升。这表明，各级流量下影响水位变化的因素虽相同，但各因素的贡献比例因流量级而异。枯水流量下以河道冲刷下切为主导，平滩及洪水流量级则还受到下游洞庭湖入流顶托作用，以及床沙粗化、岸滩植被生长及人类活动等引起水流阻力增加的显著影响[15,29-30]。

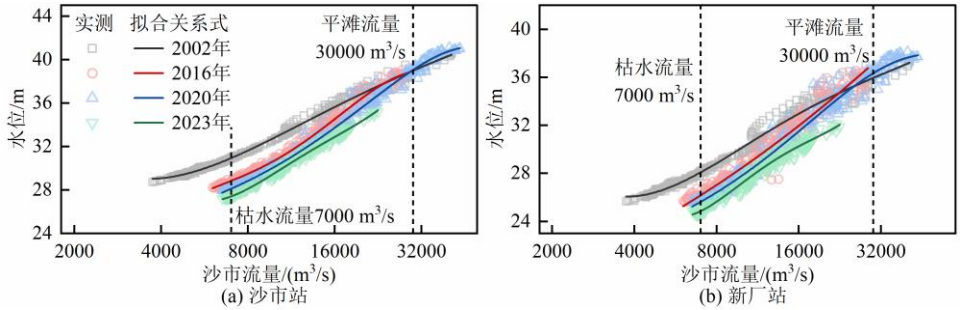

图 6　三峡建库后沙市、新厂站水位流量关系变化

Fig.6 Changes in stage–discharge relationships at Shashi and Xinchang stations under post-TGR conditions

3.2 沿程枯水位变化的同步性

沙市、新厂站水位降幅在枯水流量下最为显著（图 6），因此统计三峡建库后两站历年枯水位变幅。由图 7 可见，2003－2023 年沙市、新厂站枯水位累计下降 3.60 m 与 3.31 m，该结果与相关文献[3,16]的统计值相近。分阶段来看，2003–2016 年两站下降速率分别为 0.16、0.14 m/a，沙市站下降速率较大；2016–2023 年两站下降速率均增至 0.20 m/a。这说明，在 2016 年前由于冲刷分布具有“上大下小”的特点，水位降幅也具有类似特点，随着坝下游冲刷重心下移至沙质河段，沿程水位接近同步下降。其中，沙市站枯水位降幅在 2016 年前后突增，系所在河段冲刷加剧所致，这一突变现象在以往研究中也有发现[31-32]。

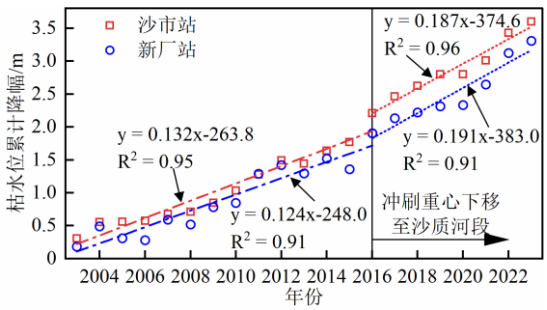

图 7　沙市、新厂站同流量下枯水位变化

Fig.7 Changes in low-water level at a given discharge at Shashi and Xinchang stations

河段内水位下降同步与否将体现在沙市、新厂两站之间的水面比降变化，图 8 统计了两站在平滩流量以下各流量级的平均水面比降。三峡建库前，各级流量下比降基本为常数，均值约为 0.42‰，波动范围为 0.29‰~0.55‰。建库后各级流量下水面比降的波动幅度略有增大，但各时期内仍基本保持定值，2009–

2010 年、2015–2016 年与 2020–2023 年期间的均值分别为 0.39‰、0.35‰与 0.34‰，呈现随时间逐渐减小的趋势。上述变化表明，冲刷重心进入沙质河段前，沙市站水位下降速率大于新厂站，水面比降较建库前减小；冲刷重心进入沙质河段后，两站下降速率趋于一致，各级流量下沿程水位基本同步下降。

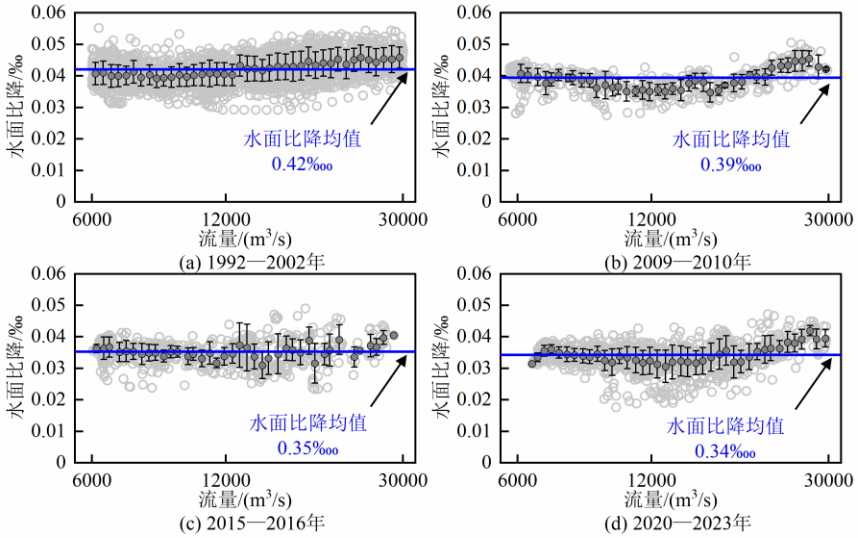

图 8　沙市与新厂站之间水面比降变化（平滩以下流量级）

Fig.8 Variation in water surface slope between Shashi and Xinchang stations below bankfull discharge

4 枯水位变化与河床冲淤关系分析

4.1 枯水位变幅的主导因素分析

坝下游枯水位受河床变形、出口水位变化及河道阻力共同影响。在本河段内，前两种因素的主导作用可由图 9 中沙市站水位累计降幅~河段累计冲刷强度、沙市站水位累计降幅~新厂站水位累计降幅之间的良好相关性所证实。阻力因素在本文中不做重点考虑，这是由于沙质河段的床沙粗化幅度相对较小，由此导致的阻力增幅也相对较小[33]，并且本文的模型糙率依据 2014 年实测资料率定，已在一定程度上反映了床沙粗化的影响。因此，本文将在固定糙率参数的情况下重点辨析两个问题：（1）长期内出口水位下降与内部冲刷强度是否具有等价性；（2）不同时期、不同部位的河床变形对内部水位的控制作用是否存在差异。

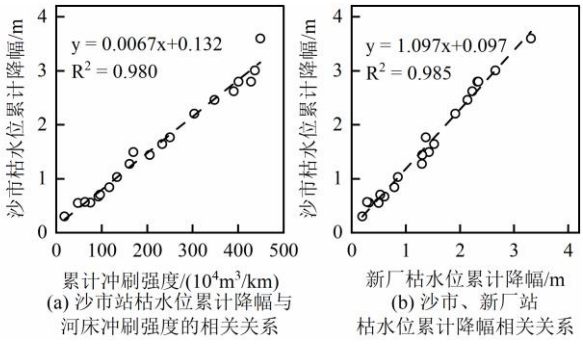

图 9　河床冲刷强度、新厂枯水位降幅与沙市枯水位降幅的相关性

Fig.9 Correlation analysis of low-water level decline at Shashi station with riverbed scouring intensity and that at Xinchang station

表 1 中 A、B、C 三组工况计算结果见表 2。由 A 组的结果可以看出，在 2002–2008、2002–2016 和 2002–2021 年三个时段，受河床变形与出口水位下降的共同影响，沙市站枯水位降幅分别为 1.16、2.44 和 3.53 m。将 B 组和 C 组结果与 A 组相比可见，河床变形对枯水位降幅的贡献比为 58.6%～89.7%，出口水位降幅的影响仅为 4.0%～6.9%，表明河床冲刷是水位下降的主导因素。需指出，各时段内两者贡献比之和小于 100%，2008 年之后该现象尤其明显，说明河床变形与出口水位下降之间存在叠加效应，并且这种效应随时间而增强。

由图 10（a）中所示的 C、D 两组工况结果可见：在 2002 年地形下，随着出口水位降幅由 $DZ_1 = 0.52$ m 增至 $DZ_3 = 2.65$ m，沙市水位仅下降 0.08~0.17 m，河道地形缓冲了 84.6%~93.6%的出口水位降幅；在 2021 年地形下，对于同样的水位降幅 DZ_1~DZ_3，沙市水位降幅为 0.35~1.5 m，河道地形仅能缓冲 32.7%~43.4%的出口水位降幅。这些计算结果进一步说明，河道地形对水位具有显著的控制作用，而三峡建库后河床冲刷减弱了地形对水位的控制作用。

以上虽然是在不同时期地形上开展的定床计算，但这些结果充分表明河道地形变化是影响沙市水位降幅的主导因素，这正是图 9（a）存在良好相关性的成因。而图 9（b）中进出口水位降幅之间的良好相关性，则是与河床大幅冲刷下切之后出口水位降幅的明显溯源传递有关。归根结底，进出口水位降幅之间的良好相关性是以河床变形为前提的，河床变形是影响水位的主导因素和主动因素。

表 2　基准工况及对比工况的数值试验结果

Tab.2 Numerical simulation results of the baseline and comparison scenarios

时段	沙市站枯水位降幅/m（单因素贡献比/%）		
	A 组工况	B 组工况	C 组工况
2002—2008 年	1.16	1.04（89.7）	0.08（6.9）
2002—2016 年	2.44	1.61（66.0）	0.17（7.0）
2002—2021 年	3.53	2.07（58.6）	0.15（4.0）

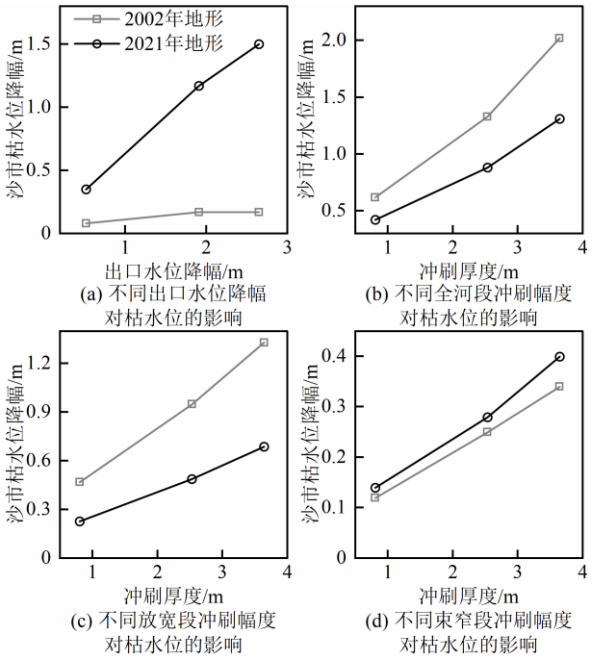

图 10　不同年代各因素对沙市站枯水位的影响

Fig.10 Influence of various factors on low-water level at Shashi station in different periods

4.2 枯水位下降的主控部位分析

表 1 中 E 组的 18 种计算工况进一步细化了沿程不同部位河床变形对水位的影响。图 10（b）的概化计算结果表明，相同下切幅度在 2002 年地形上引发的水位降幅大于 2021 年地形，从另一角度印证了河床持续冲刷弱化了其对水位的控制作用。图 10（c）、（d）进一步表明，深泓较高的放宽段对枯水位下降起控制作用，即使束窄段发生较大幅度冲刷，其对沙市水位的影响也不显著。这一现象与 Grams 等[5]在深槽与浅滩交替的其他沙质河流中观察到的规律一致，即深泓高凸的浅滩是水位下降的主控部位，深槽的剧烈冲刷对水位的影响反而有限。

依据 2002 年、2016 年与 2021 年深泓纵剖面，分别取全河段、束窄段及放宽段深泓高程点拟合纵向趋势线（图 11（a）、（b）、（c）），结果显示放宽段深泓接近平行下切，而其他两种情况下的拟合趋势线均无此特征。将这种现象与图 8 对比可见，2016 年后，冲刷重心进入沙质河段，长河段内放宽段的平行下切与水面线平行下降基本保持同步，平滩以下各流量级的水流近似维持均匀流水力特征。这一规律与 Blom 等[34]提出的非顶托情况下天然单一河道内水流近似为准均匀流的假说相一致（图 11（d）），而本文的分析表明沿程近似为均匀流的状态是由深泓高凸的放宽段所主导，这也进一步证明对枯水位有强控制作用的节点主要是深泓较高部位[17]。

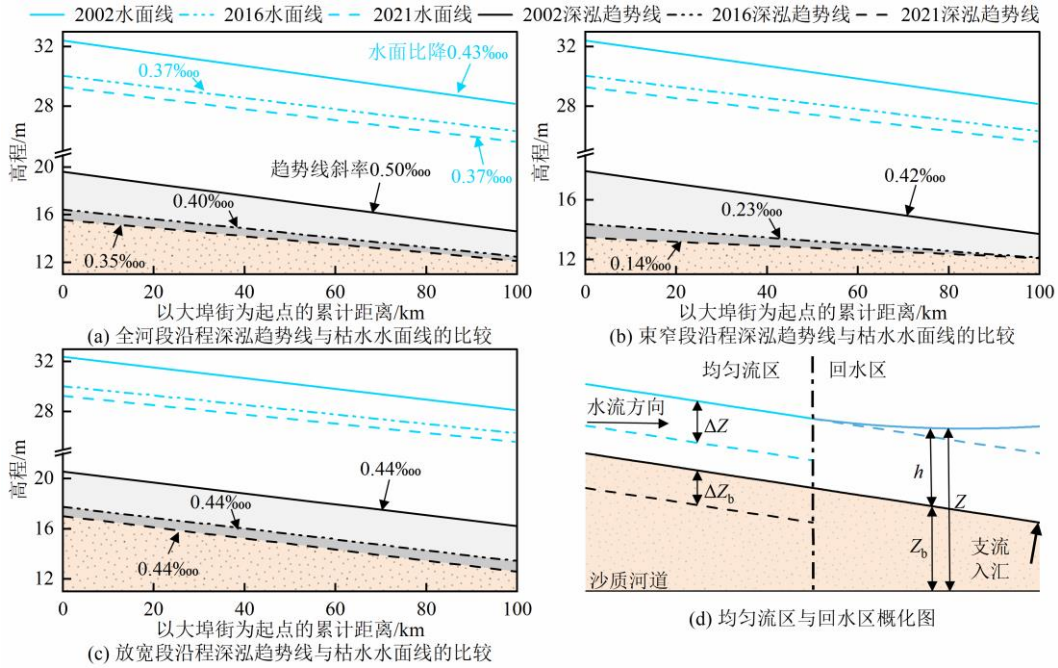

图 11　河道不同部位冲刷下切对沿程枯水位下降的影响对比

Fig.11 Comparison of scouring location effects on low-water level decline along the channel

4.3 上荆江沙质河段枯水位发展趋势分析

荆江沙质河段可冲沙层深厚，未来床沙粗化幅度有限[35]，故未来的枯水位降幅将主要取决于河床变形幅度，尤其是放宽段的变形幅度。而由图 4 可见，放宽段冲刷量占河段总冲刷量的比例稳定在 52%~57%，因此未来的枯水位降幅可由河段总冲刷量进行估算。

水库下游冲刷速率随时间呈非线性递减，根据格伦峡谷大坝下游[5]、密苏里河梯级水库下游[6]及黄河小北干流与渭河下游[36]等实测资料验证，这一衰减过程近似遵循幂函数规律[37–39]。鉴于此，本文基于 2016–2023 年（冲刷重心进入沙质河段后）实测平滩河槽年冲刷量，建立了累计冲刷量随时间的幂函数关系（图 12），用于预估其发展趋势。为反映幂函数外推的不确定性，图 12 中还构建了外推曲线的±10%误差带。

由幂函数外推结果可见，2023–2050 年研究河段累计冲刷量为 44000 万 m^3，考虑±10%误差为 37000～51000 万 m^3。结合累计冲刷强度与枯水位降幅的函数关系（图 9（a）），推算同期沙市站枯水位累计降幅约为 3.22 m，考虑±10%误差后的降幅为 2.75~3.70 m。

以上推算结果表明，未来时期上荆江沙质河段的枯水位尚有较大下降余地，这将降低沿岸取水口的取水保证率，影响引江济汉等工程正常运行[40]，同时将进一步削弱枯期太平口向洞庭湖的分流能力，导致断流天数增加[41]，这些潜在风险需予以重点关注。

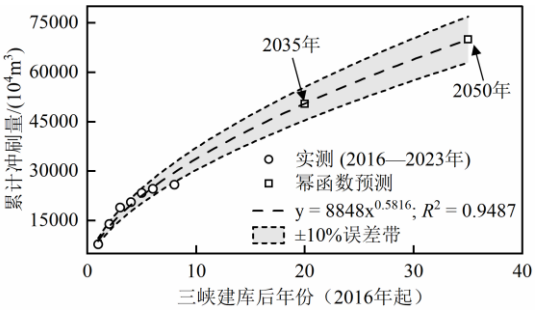

图 12　研究河段冲刷量预测（至 2050 年）

Fig.12 Predicted scour volume in the study reach (to 2050)

针对上荆江沙质河段河床冲刷与枯水位变化，以往开展过较多预测研究，表 3 对比了这些成果的年均冲刷强度及沙市站枯水位降幅。需说明，以往研究多以上荆江为对象，但考虑到 2016 年后上荆江卵石夹沙河段冲刷幅度远小于沙质河段，故统计年均冲刷强度时河长仅取沙质河段。由表 3 可见，早期文献[19-20]预测的冲刷量偏小；文献[42]较准确地预测了 2017–2023 年的冲刷幅度，但未能体现后续的幂函数衰减趋势；近期文献[43-44]的冲刷强度预测成果与本文较为接近。从预测与实测枯水位年均降幅的比较来看，各模型预测结果均偏小。这主要由两方面原因导致：一是早期研究率定模型所依据的资料为冲刷重心尚未进入沙质河段的数据，导致冲淤量计算存在误差；二是过去多采用一维模型，即使冲刷总量预测准确，河段内部放宽段、束窄段之间的冲刷强度差异不一定能够精准反映，从而也会导致水位降幅的误差。因此，本文分析所得到的认识可为未来数学模型研究提供借鉴。

表 3　实测与预测的研究河段年均冲刷强度及枯水位降幅对比

Tab.3 Comparison of observed and predicted mean annual scouring intensity and low-water level decline in the study reach

来源	时段		年均冲刷强度	沙市枯水位年
	率定资料时段	预测时段	/(10^4m^3/km)	均降幅/m
实测	2016–2023		32.832	0.261
文献[19]模型预测	1981－1987	2003–2032	8.304	0.106
文献[20]模型预测	1980–1987	2003–2032	12.485	0.068
文献[42]模型预测	2011–2016	2017–2046	32.537	0.093
文献[43-44]模型预测	2002–2020	2021–2050	15.806	0.086
本文	2016–2023	2024–2050	14.420	0.119

5 结论

依据三峡建库前后的地形与水文实测数据，分析了上荆江沙质河段内河床冲淤和枯水位变化规律，在此基础上辨析了沿程水位调整的主控因素并预测了其发展趋势。主要结论包括：

（1）河床冲刷呈显著的时空不均匀性。建库初期，研究河段冲刷幅度呈上游大、下游小的特征；2016年冲刷重心下移至本河段后，放宽段冲刷幅度大于束窄段，二者深泓高差由建库前的3.78 m减小至2021年的2.92 m，深泓相对起伏度降低。

（2）枯水位下降过程与河床变形相对应。2003–2023年沙市站枯水位累计下降3.6 m；三峡建库初期沙市枯水位下降速率大于新厂站，2016年后两站枯水位呈同步下降。

（3）沿程枯水位下降由河床下切主导，其中放宽段为主控部位。2016年后，放宽段深泓呈近似平行下切，驱动了沿程枯水位同步下降，下降过程中床面比降与水面比降保持接近。

（4）累计冲刷量与枯水位降幅呈显著相关关系，枯水位降幅可由河段总冲刷量估算。基于累计冲刷量的幂函数衰减规律，预估2023–2050年沙市站枯水位还将下降约3.22 m。

声　明：（a）作者贡献。安姗姗负责数据分析、二维水流数学模型构建、图表绘制及论文初稿撰写；唐金武作为合作单位负责人，参与研究思路制定、成果解析与整理；孙昭华作为项目负责人提出研究目的与方案，负责过程指导、成果合理性总体把控和修改定稿；李芷晴负责基础数据整理与预处理；曹志先参与研究思路制定、成果讨论与文稿修改。（b）在本文写作与修改过程中，作者未使用任何生成式AI或AI辅助技术。（c）论文中相关数据，可联系通信作者获取。

6 参考文献

[1] Shen MH, Hu CH, Li YC *et al*. Study on the changes in sediment transport capacity and response relationships in different segments of the Jingjiang Reach after the operation of the Three Gorges Reservoir. *Advanced Engineering Sciences*, 2025: 1-10. [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. 工程科学与技术, 2025: 1-10.]

[2] Shang HX, Hu CH, Xia JQ *et al*. Influence of Dongting Lake inflow on the degree and range of backwater effect in the Jingjiang reach. *Advances in Water Science*, 2023, **34**(3): 431-441. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.010. [尚海鑫, 胡春宏, 夏军强等. 洞庭湖入汇对荆江河段水位的顶托程度与范围. 水科学进展, 2023, **34**(3): 431-441.]

[3] Yang YP, Zheng JH, Li M *et al*. Research on the evolution of shoals and waterway hydrodynamic characteristics in sandy-pebble riverbed reach of the Middle Yangtze River after the operation of the TGD. *Advances in Water Science*, 2026, **37**(1): 147-160. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2026.01.012. [杨云平, 郑金海, 李明等. 三峡运行后长江中游砂卵石河段滩槽演变及通航水动力特征. 水科学进展, 2026, **37**(1): 147-160.]

[4] Xu QX, Dong BJ, Yuan J *et al*. Scouring effect of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its impact after the impoundment of the Three Gorges Project. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 650-661. DOI: 10.18307/2023.0221. [许全喜, 董炳江, 袁晶等. 三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 650-661.]

[5] Grams PE, Schmidt JC, Topping DJ. The rate and pattern of bed incision and bank adjustment on the Colorado River in Glen Canyon downstream from Glen Canyon Dam, 1956-2000. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, **119**(5/6): 556-575. DOI: 10.1130/b25969.1.

[6] Williams GP, Wolman MG. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Washington DC: U.S. Government Printing Office, **1**984.

[7] Lai X, Yin D, Finlayson BL *et al*. Will river erosion below the Three Gorges Dam stop in the middle Yangtze *Journal of Hydrology*, 2017, **554**: 24-31. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.08.057.

[8] Frings RM, Hillebrand G, Gehres N *et al*. From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*, 2019, **196**: 102830. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.002.

[9] Wang HL, Zheng S, Tan GM *et al*. Spatio-temporal channel evolution and the migration of erosion center in Yichang-Chenglingji Reach after the operation of the Three Gorges Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(12): 1470-1481. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210162. [王华琳, 郑珊, 谈广鸣等. 三峡水库运行后宜昌-城陵矶河段冲刷重心下移与时空演变. 水利学报, 2021, **52**(12): 1470-1481.]

[10] Luo FB, Chen D, Guo Y *et al*. Erosion distribution in the near-dam reach of downstream after the Three Gorges Project operation. *Journal of Sediment Research*, 2019, **44**(3): 31-38. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2019.03.006. [罗方冰, 陈迪, 郭怡等. 三峡水库蓄水以来下游近坝河段冲淤分布特征及成因. 泥沙研究, 2019, **44**(3): 31-38.]

[11] Xu QX, Li SX, Yuan J *et al*. Analysis of equilibrium sediment transport in the middle and lower reaches of the Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 806-818. DOI: 10.18307/2021.0316. [许全喜, 李思璇, 袁晶等. 三峡水库蓄水运用以来长江中

下游沙量平衡分析. 湖泊科学, 2021, **33**(3): 806-818.]

[12] Sun ZH, Li YT, Huang Y *et al*. Fluvial process of sandbars and shoals in branching channels of the middle Yangtze River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(12): 1398-1406. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.12.004. [孙昭华, 李义天, 黄颖等. 长江中游城陵矶-湖口分汊河道洲滩演变及碍航成因探析. 水利学报, 2011, **42**(12): 1398-1406.]

[13] Han JQ, Sun ZH, Huang Y *et al*. Features and causes of sediment deposition and erosion in Jingjiang reach after impoundment of the Three Gorges Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, **45**(3): 277-285, 295. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.03.004. [韩剑桥, 孙昭华, 黄颖等. 三峡水库蓄水后荆江沙质河段冲淤分布特征及成因. 水利学报, 2014, **45**(3): 277-285, 295.]

[14] Han JQ, Sun ZH, Yang YP. Flood and low stage adjustment in the middle Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR). *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1217-1226. DOI: 10.18307/2017.0520. [韩剑桥, 孙昭华, 杨云平. 三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1217-1226.]

[15] Sun ZH, An SS, Zhou XY *et al*. A framework approach to address the trend and causes of flood stage change in a river reach downstream of a dam influenced by tributaries. *International Journal of Sediment Research*, 2023, **38**(5): 662-672. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2023.05.001.

[16] Zhu LL, Yang X, Xu QX. Response of low water level change to bed erosion and the operation of Three Gorges Reservoir in upper Jingjiang reach. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(7): 1184-1194. DOI: 10.11821/dlxb201707005. [朱玲玲, 杨霞, 许全喜. 上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应. 地理学报, 2017, **72**(7): 1184-1194.]

[17] Zhang XB, Feng KD, Wang M *et al*. Study on node regulation measures for reducing scour in Jinjiang sandy river bed. *Yangtze River*, 2018, **49**(18): 24-27. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.18.006. [张细兵, 冯克栋, 王敏等. 荆江沙质河床减缓冲刷的节点整治措施研究. 人民长江, 2018, **49**(18): 24-27.]

[18] Tofelde S, Savi S, Wickert AD *et al*. Alluvial channel response to environmental perturbations: Fill-terrace formation and sediment-signal disruption. *Earth Surface Dynamics*, 2019, **7**(2): 609-631. DOI: 10.5194/esurf-7-609-2019.

[19] 中国水利水电科学研究院. 三峡水库下游河道冲淤计算研究//长江三峡工程泥沙问题研究(1996–2000): 第七卷. 北京: 知识产权出版社, 2002.

[20] 长江科学院. 三峡水库下游宜昌至大通河段冲淤一维数模计算分析//长江三峡工程泥沙问题研究(1996–2000): 第七卷. 北京: 知识产权出版社, 2002.

[21] Zheng S, An CG, Wang HL *et al*. The migration of the erosion center downstream of the Three Gorges Dam, China, and the role played by underlying gravel layer. *Water Resources Research*, 2023, **59**(11): e2022WR034152. DOI: 10.1029/2022WR034152.

[22] Sun ZH, Zhou WX, Zhou K *et al*. Relationship between the characteristics of water-sediment transportation in river-lake system and the channel forming discharge of the middle and lower Yangtze River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(5): 521-534. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200858. [孙昭华, 周炜兴, 周坤等. 江湖水沙输移与长江中下游造床流量的关系. 水利学报, 2021, **52**(5): 521-534.]

[23] Xia JQ, Zhou MR, Lin FF *et al*. Variation in reach-scale bankfull discharge of the Jingjiang Reach undergoing upstream and downstream boundary controls. *Journal of Hydrology*, 2017, **547**: 534-543. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.026.

[24] Doyle MW, Shields D, Boyd KF *et al*. Channel-forming discharge selection in river restoration design. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **133**(7): 831-837. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2007)133: 7(831).

[25] Wolman MG, Miller JP. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *The Journal of Geology*, 1960, **68**(1): 54-74. DOI: 10.1086/626637.

[26] Surian N, Mao LC, Giacomin M *et al*. Morphological effects of different channel-forming discharges in a gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, **34**(8): 1093-1107. DOI: 10.1002/esp.1798.

[27] Chen L, Yu BW, Xu QX *et al*. Analysis on the causes of erosion adjustment of cross sections geometry in the Jingjiang Reach downstream Three Gorges Reservoir of the Yangtze River. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, **55**(1): 279-286. DOI: 10.15961/j.jsuese.202101096. [陈立, 余博闻, 许全喜等. 长江三峡水库坝下游荆江段断面形态冲刷调整成因分析. 工程科学与技术, 2023, **55**(1): 279-286.]

[28] Zhou YJ, Chen L, Yan T *et al*. Features of riverbed erosion adjustment process in Yichang-Yangjianao reach. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, **31**(3): 77-82. [周银军, 陈立, 闫涛等. 宜昌至杨家脑河段河床形态冲刷调整特点分析. 水力发电学报, 2012, **31**(3): 77-82.]

[29] Yang YP, Zhang MJ, Sun ZH *et al*. The relationship between water level change and river channel geometry adjustment in the downstream of the Three Gorges Dam (TGD). *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(5): 776-789. [杨云平, 张明进, 孙昭华等. 三峡大坝下游水位变化与河道形态调整关系研究. 地理学报, 2017, **72**(5): 776-789.]

[30] Chai YF, Deng JY, Yang YP *et al*. Evolution characteristics and driving factors of the water level at the same discharge in the Jingjiang reach of Yangtze

River. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(1): 101-113. DOI: 10.11821/dlxb202101008. [柴元方, 邓金运, 杨云平等. 长江中游荆江河段同流量-水位演化特征及驱动成因. 地理学报, 2021, **76**(1): 101-113.]

[31] Wang C, Li H, Chai YF. Variation characteristics of water level under the same discharge in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Water Resources and Power*, 2021, **39**(9): 33-36. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2021.09.009. [王超, 李浩, 柴元方. 长江中下游同流量下水位变化特征. 水电能源科学, 2021, **39**(9): 33-36.]

[32] Li YT, Xue JL, Sun ZH *et al.* Channel degradation and river stage variations in reaches downstream of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, **40**(4): 1-13. DOI: 10.11660/slfdxb.20210401. [李义天, 薛居理, 孙昭华等. 三峡水库下游河床冲刷与水位变化. 水力发电学报, 2021, **40**(4): 1-13.]

[33] Liu X, Xia JQ, Zhou MR *et al.* Formula of movable bed roughness for the Middle Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(4): 535-546. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.04.007. [刘鑫, 夏军强, 周美蓉等. 长江中游动床阻力计算. 水科学进展, 2020, **31**(4): 535-546.]

[34] Blom A, Arkesteijn L, Chavarrías V *et al*. The equilibrium alluvial river under variable flow and its channel-forming discharge. *Journal of Geophysical Research*: *Earth Surface*, 2017, **122**(10): 1924-1948. DOI: 10.1002/2017JF004213.

[35] Li LL, Xia JQ, Zhou MR *et al*. Adjustment of bed material composition in a sand-bed reach of the middle Yangtze River. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 277-288. DOI: 10.18307/2021.0120. [李林林, 夏军强, 周美蓉等. 长江中游沙质河段床沙级配调整过程计算. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 277-288.]

[36] Wu BS. Delayed response model for fluvial processes of alluvial rivers - II model applications. *Journal of Sediment Research*, 2008 (6): 30-37. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2008.06.006. [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.]

[37] Ning CE. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1985, **10**(2): 143-159. DOI: 10.1002/esp.3290100207.

[38] Jing H, Zhang HW, Wang YJ *et al*. Study on the riverbed erosion and prediction based on equilibrium response model in fluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, **53**(11): 1350-1360. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220372. [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. 水利学报, 2022, **53**(11): 1350-1360.]

[39] Wu BS. Delayed response model for fluvial processes of alluvial rivers - I model development. *Journal of Sediment Research*, 2008(6): 1-7. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2008.06.002. [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.]

[40] Hua Y, Yu HM, Zhou S *et al.* Research on the influence of shashi decreasing of low water level on the Yangtze River to Han River project. *Journal of Water Resources Research*, 2024, **13**(5): 565-572. DOI: 10.12677/jwrr.2024.135064. [华永, 余红枚, 周帅等. 沙市枯水位下降对引江济汉工程取水影响研究. 水资源研究, 2024, **13**(5): 565-572.]

[41] Yan YJ, Shi Y, Jia YL *et al*. Causes of water diversion capacity change at three outlets of Jingjiang River after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Yangtze River*, 2020, **51**(5): 102-107. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.05.018. [阎云杰, 施勇, 贾雅兰等. 三峡水库蓄水后荆江三口分流能力变化原因初探. 人民长江, 2020, **51**(5): 102-107.]

[42] 三峡工程泥沙专家组. 三峡工程运行后若干重大泥沙问题研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.

[43] Yao SM, Wang HY, Liu YJ *et al*. Recent evolution and protection of rivers and lakes in the Yangtze River Basin. *China Flood & Drought Management*, 2023, **33**(9): 1-13. [姚仕明, 王洪杨, 刘玉娇等. 长江流域河湖近期演变与保护研究进展. 中国防汛抗旱, 2023, **33**(9): 1-13.]

[44] Guo XH, Yao SM, Guo C. A study on the impact of downstream sandy riverbed erosion and incision on the flow diversion at Songzi outlet. Proceedings of the 24th IAHR APD Congress. Wuhan, 2024. DOI: 10.64697/iahr-apd2024_p269.