

三峡工程运用后长江松滋口分流变化特征与发展趋势研究*

郭小虎**, 黄梅, 郭超, 陈栋

(长江科学院水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 武汉 430010)

摘 要: 松滋河是荆江分流入洞庭湖的主要通道之一, 其分流变化对江湖防洪、水资源利用及水环境生态具有重要影响。基于实测资料分析与物理模型试验, 研究了三峡工程运行后长江干流与松滋口河段水沙演变及河床冲刷对分流的影响关系。结果表明: 与 1990-2002 年相比, 2003-2022 年期间枝城站年均输沙量减少约 90.6%, 松滋口分沙量亦同步减少约 87.1%; 2003-2022 年期间枝城至杨家脑河段平滩河槽冲刷 2.39 亿 m^3 , 平均冲深 2.3m, 河床显著粗化, 而松滋口门段平滩河槽冲刷 4325 万 m^3 , 平均冲深 3.0m, 近期与干流卵石夹沙河床形成冲刷速率差异; 根据物理模型结果预测, 未来在次饱和水流长期作用下引起长江干流杨家脑以下沙质河床持续下切, 导致杨家脑水位出现不同程度下降, 致使分流减少, 其中枝城站 $7000\text{m}^3/\text{s}$ 流量下 2035 年、2050 年水位分别下降 1.58m 和 2.57m, 相应松滋口分流量减少 8.3%、16.7%; 但口门内外河床不对等冲刷, 口门段沙质冲刷速率更高, 使过水断面扩大, 至 2035 年末, 即使考虑杨家脑水位下降的影响, 松滋口分流仍呈不同程度增大, 其中枯水期枝城站 $7000\text{m}^3/\text{s}$ 流量下分流反增 20.8%, 杨家脑水位下降与口门内外不对等冲刷的贡献率分别为 33% 和 133%; 随着流量增大, 二者对分流变化的影响贡献率数值均显著增大, 但抵消后对分流量变幅的影响不大, 相关影响或主要集中于枯水期。河床组成分异通过调控冲刷进程维持了松滋口分流稳定, 枯水期分流增加有利于洞庭湖水资源调配, 但会一定程度降低干流水位并影响中枯水期航道畅通。

关键词: 三峡工程; 松滋口; 分流分沙; 物理模型; 试验; 冲刷

Characteristics and development trends of flow diversion variations at Songzi outlet on the Yangtze River after the operation of the Three Gorges Project*

Guo Xiaohu**, Huang Mei, Guo Chao & Chen Dong

(Key Laboratory of River and Lake Management and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River of MWR, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P. R. China)

Abstract: The Songzi River is one of the main channels through which the Jingjiang River diverts water into Lake Dongting. Changes in the diversion of water through the Songzi River have significant implications for flood control in the river-lake system, as well as for the utilization and ecology of water resources. This study uses an analysis of measured data and physical model experiments to investigate the relationships between water-sediment evolution, riverbed scouring and changes in diversion in the Yangtze main channel and the Songzi outlet reach following the operation of the Three Gorges Project. Results show that, compared to the 1990–2002 period, annual average sediment transport at Zhicheng Station decreased by around 90.6% between 2003 and 2022, with a corresponding reduction of approximately 87.1% in sediment diversion at Songzi outlet. During this period, the bankfull channel between Zhicheng and Yangjiaobao underwent a total scouring of 239 million m^3 , with an average depth of 2.3 m, resulting in substantial riverbed coarsening. By contrast, the bankfull channel at the Songzi outlet reach was scoured by 43.25 million m^3 , with an average scouring depth of 3.0 m. This formed a differential scouring rate compared to the pebble-sand mixed bed in the main channel. Physical model predictions suggest that the continuous downcutting of the sandy

*2025-02-21 收稿; 2025-04-29 收修稿。

国家自然科学基金长江水科学研究联合基金(U2240206, U2240224)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CKSF2024326/HL, CKSG2024272/HL)和 2024 年度湖北省科普教育基地提能项目(CKSD2024593/HL)联合资助。

**通信作者; E-mail: xiaohu001328@163.com.

riverbed downstream of Yangjiaonao in the Yangtze main channel caused by long-term action of sub-saturated flow will lead to progressive declines in water levels at Yangjiaonao and corresponding reductions in diversion at Songzi outlet. At a discharge of 7,000 m³/s at Zhicheng Station, the water level at Yangjiaonao is projected to decrease by 1.58 m and 2.57 m in 2035 and 2050 respectively, resulting in a reduction in diversion of 8.3% and 16.7% respectively. However, asymmetric scouring between the inner and outer parts of the mouth (with higher scouring rates in the sandy reach of the mouth, which expands the cross-sectional flow area) leads to increased diversion at Songzi outlet by the end of 2035, despite the decline in water levels at Yangjiaonao. During low-flow periods, with a discharge of 7,000 m³/s at Zhicheng Station, diversion actually increases by 20.8%. Contribution rates are -33% from the drop in the Yangjiaonao water level and 133% from asymmetric mouth scouring. As discharge increases, the absolute values of both contribution rates rise significantly; however, their combined effect results in minimal net change in diversion volume. This suggests that these influences are primarily concentrated during medium- to low-flow periods. The differential riverbed composition regulates the scouring process, maintaining stable diversion at Songzi outlet. While increased low-flow diversion is beneficial for water resource allocation in Lake Dongting, it may also lead to a moderate decrease in main channel water levels and affect navigation during medium- to low-flow periods.

Keywords: Three Gorges Project; Songzi outlet; diversion and sediment distribution; physical model; experiment; scouring

荆江河段（枝城至城陵矶）河道全长约 347.2km，南岸沿程有松滋口、太平口、藕池口和调弦口（已于 1958 年建闸封堵）分流入洞庭湖，洞庭湖又集湘、资、沅、澧四水于城陵矶处汇入长江，构成非常复杂的江湖关系。松滋口分流居荆江三口分流之首，其分流变化对江湖防洪、水资源利用以及水环境生态具有重要影响。三峡水库运行后，“清水”下泄导致坝下游河道冲刷下切，干流水位流量关系发生变化，进而影响松滋口的分流能力。松滋口分流的变化不仅关系到洞庭湖的水资源调配，还对湖区生态系统稳定性产生深刻影响。因此，研究松滋口分流变化趋势对长江中游湖泊生态系统的科学治理和可持续发展具有重要意义。

针对松滋口分流分沙变化的既有研究^[1-6]较为丰富，这些研究从不同维度系统阐明了近 70 年来松滋口分流分沙的变化特征；影响松滋口分流的变化主要因素有^[7]：松滋口口门附近长江干流水位变化、松滋口口门河段的冲淤变化、口门附近干流河道河势的变化，其中 2002-2013 年期间松滋口上游关洲左汊发展，则有利于增加中大流量（枝城站流量大于 20000m³/s）时松滋口的分流比^[8]，但关洲河段河床经历持续冲刷，航道整治工程实施后河势逐渐趋于动态平衡，左右汊分流关系处于相对稳定或变幅较小的态势^[9]。关于松滋口分流分沙比的变化趋势，前期成果认为由于干流河道冲刷下切，松滋口分流分沙比将持续减小^[10-12]；但随着研究深入，现有研究成果认为松滋口分流能力将基本变化不大^[4,9]，甚至当枝城站流量大于 25000m³/s 时松滋口分流能力略有提升^[4,13]；三峡蓄水调蓄作用引起径流过程改变，使得松滋口枯水期分流量显著增加，消落期稍有增加，汛期与蓄水期则有一定程度减少^[14-16]。

随着次饱和水流的作用下，杨家脑以下沙质河段仍将长期处于冲刷态势，下游沙质河床持续冲刷水位下降对松滋口口门附近干流河段水位将可能会造成一定影响，进一步引起松滋口分流减小；现有松滋口口门内外的河床组成差异性导致河床冲刷下切幅度不同，对松滋口分流变化也会产生影响，目前定量预测成果未能体现主要因素的贡献关系。考虑到松滋口附近干流河段为典型的碍航段，已实施了大量航道整治工程，在工程扰动下松滋口口门区局部水流结构与泥沙输移呈现较为显著的三维特征，因此本研究在利用实测资料剖析水沙变化及口门内外河道冲淤变化特征的基础上，采用物理模型试验定量预测主要影响因素变化对松滋口分流关系调整的影响。该研究成果有望为长江江湖关系的规划与治理等提供一定的参考与借鉴。

1 研究区域及方法

研究区域主要为长江干流宜昌至杨家脑段与松滋河水系。干流河段上起宜昌市镇川门下至枝江市百里洲尾的杨家脑（见图 1），全长约 118.6km，三峡工程蓄水前河床组成为沙夹卵石，而杨家脑以下河段河床组成为沙质。按照河段特点通常将宜昌至杨家脑河段分为宜昌、宜都和枝江三个河段，其中宜昌河段为镇川门至虎牙滩，长 23.1km，宜都河段为虎牙滩至枝城水文站，长 37.7km，枝江河段为枝城至杨家脑，长 57.8km。松滋河水系为松滋口分流入湖的洪道，松滋口到大口河段长度为 24km；松滋河在大口分为东西两支，其中西支从大口至张九台入澧水，长 115.2km；东支从大口至小望角，长 149.3km；中支从青龙窖至小望角，长 31.4km；河道间有 7 条串河，串河总长约 68.3km。

研究方法主要采用实测资料分析与物理模型试验。实测资料分析主要根据研究河段的现场观测数据，进行相关整理、分

析和解释，以揭示研究区域的水沙运动规律和河床演变特性。物理模型试验是依据河道形态和水流泥沙运动特征，按相似准则缩小成实体模型，其能够真实反映三维水流及泥沙运动特征，从而准确模拟河道水沙输移过程与河床冲淤演变规律；可通过控制实验条件，定量预测主要影响因素变化对松滋口分流关系调整的影响。

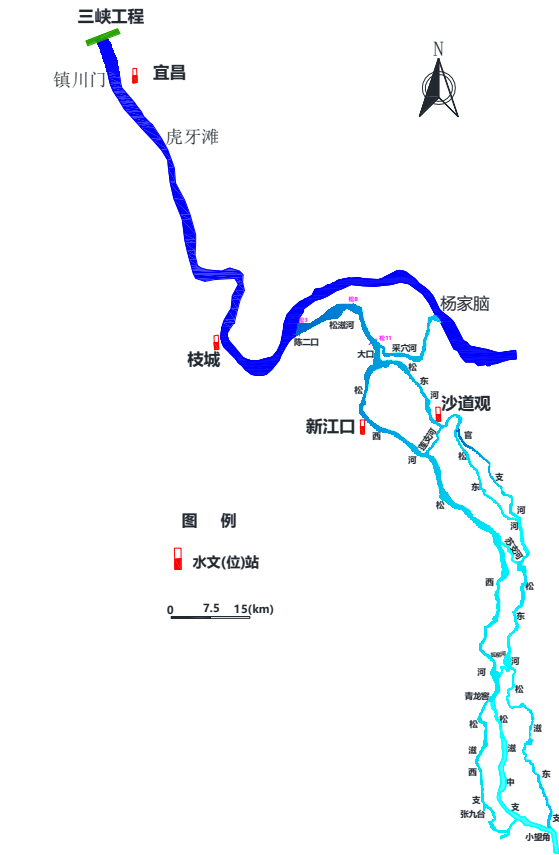


图 1 研究河段

Fig. 1 Schematic diagram of the research river section

2 物理模型验证及试验方案设计

2.1 物理模型建立及定床验证

长江干流模拟范围为枝城~杨家脑河段，河道总长度约 57.8km；松滋口河段模型模拟范围为松滋河从陈二口至大口，河段长约 24km；采穴河河段长约 20km；松西河从大口至新江口下，河段长约 16.5km；松东河从大口至沙道观下，河段长约 20.5km（见图 2），模型平面比尺 1:400，垂直比尺 1:100，模型变率为 4.0。定床模型初始地形分为干流河道与松滋口口门河道，其中干流河道采用 2021 年 4 月实测河道地形图制图制模，松滋口口门河道采用 2020 年 11 月实测河道地形图制图制模。

根据实测资料，不同流量下河床糙率系数在 0.022-0.035 波动，平均糙率 0.028，满足阻力相似要求的模型糙率为 0.028/1.08=0.026；因常用模型水泥砂浆粉面糙率约 0.013，需加糙处理。定床模型的各项比尺详见附表 1。涉及试验河段相关河（航）道整治工程以及涉水建筑工程等均在物理模型中模拟。

选择本河段实测洪（2020 年 7 月 31 日，40700m³/s）、中（2022 年 7 月 6 日，20000m³/s）、枯（2022 年 1 月 29 日，6800m³/s）3 级流量对试验河段水面线、流速分布及汉道分流比进行验证。定床物理模型所模拟的水位、流速、分流比的值与实测值较为一致（附图 1-附图 3），符合有关规范^[7]的要求，较好地反映了工程河段的水流运动规律，将此模型用于研究下游沙质河床冲刷对松滋口分流的影响。

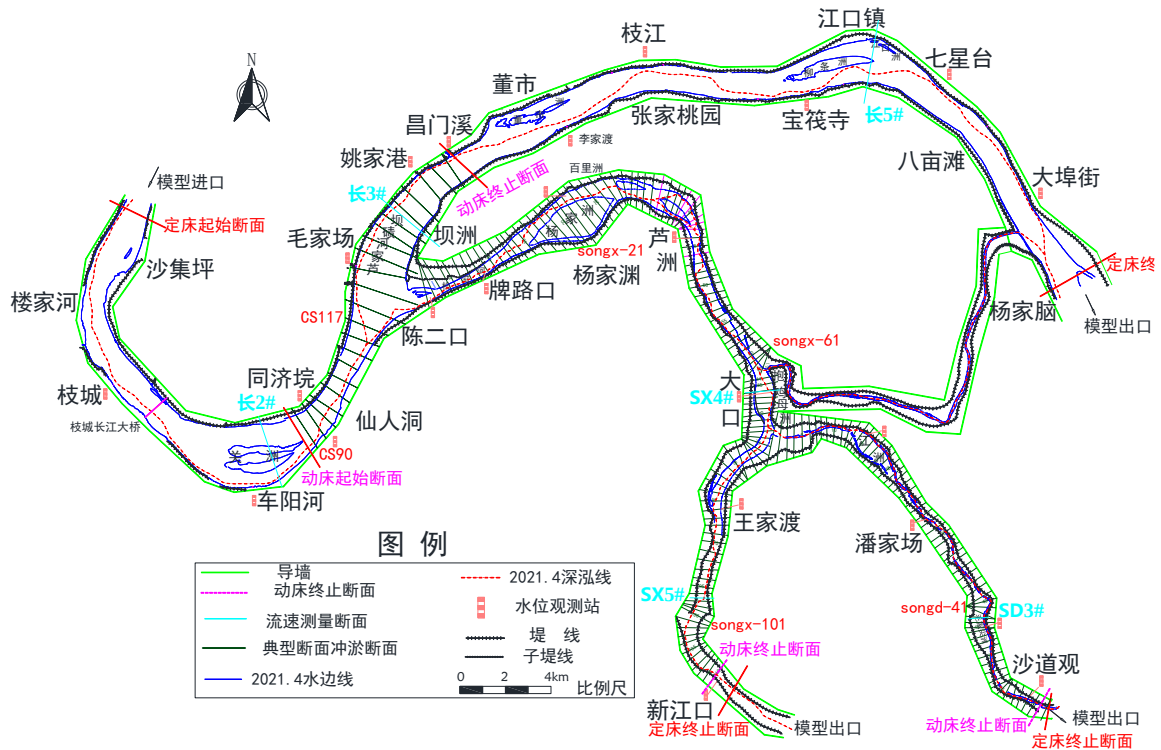


图 2 长江分流入洞庭湖水道物理模型范围示意图

Fig. 2 Schematic diagram of physical model of the waterways where the Yangtze River diverges into Lake Dongting

2.2 动床模型验证

长江干流河段动床范围为关洲尾~昌门溪河段；松滋河口门河段；松滋河从陈二口至大口段，松西河从大口至新江口段，松东河从大口至沙道观段（图 2）。动床模型是在原定床模型的基础上改制而成的，将河床高程约 43m 以上及有护岸工程处制作作为定床，其余制作作为动床。动床模型验证试验选取 2015 年 11 月实测地形图和 2015 年 12 月松滋河口门河段实测地形图作为初始地形。松滋河口门河段终止地形选用 2020 年 7 月，长江干流选用 2021 年 4 月地形资料验证。

根据 2015 年 12 月期间试验河段床沙资料，松滋河口门河段原型床沙中值粒径为 0.174-0.287mm，中值平均粒径约为 0.211mm，粒径比尺为 0.9，选取中值粒径为 0.248mm 的模型沙；干流关洲尾~昌门溪河段原型中床沙（卵石部分）中值粒径为 31.2mm，模型实际采用床沙中值粒径为 2.1mm。采用塑料合成沙作为模型沙，塑料合成沙的容重为 1.38t/m³。

在模型中施放 2015 年 12 月至 2021 年 4 月时间段的天然水沙过程，以复演 2021 年 4 月长江干流实测河道地形与 2020 年 7 月松滋河口门实测河道地形。动床模型长江干流水面线验证采用与定床验证试验同时段的概化流量级（6800m³/s、20000m³/s、40700m³/s）进行验证，水面线验证、流速分布及分流比验证均满足相关规范要求。典型断面除局部位置典型断面局部位置变化剧烈之外，其他断面总体而言模型与原型冲淤特性基本一致（附图 4）；模型各主要等高线与原型相比，平面位置基本一致，各等高线与原型基本吻合；在动床模型试验中，各个河段冲淤量允许误差在规定范围之内（附图 5）。

经验证试验确定，悬移质的含沙量比尺 1: 0.75、沙质推移质泥沙单宽输沙率比尺 1: 750 与河床冲淤变形时间比 1: 135 是合理可靠的。动床模型的泥沙运动相似的各项比尺详见附表 2。

2.3 定、动床模型试验方案设计

2.3.1 定床模型试验方案 三峡工程蓄水后，随着河道冲刷，枝城至杨家脑干流河段河床逐步由蓄水前的沙质河床或沙夹卵石河床演变为卵石夹沙河床，床沙组成逐年粗化和沿程粗化的趋势明显，而杨家脑以下河段为沙质河床，考虑到未来沙质河床仍持续处于冲刷下切状态，根据长江防洪规划修编的数学模型预测成果^[8]，2020 年至 2035 年（15 年）、2050 年（30 年）末枝城至杨家脑河段冲刷量分别为 0.26 亿 m³、0.27 亿 m³，平均冲深约 0.14m、0.15m，而下游杨家脑以下沙质河段冲刷量仍较大，其中下游沙市站相同流量下水位变化如下表 1 所示。

表 1 干流沙市站同流量下水位变化值 单位: m

Tab. 1 Water level change value at Shashi Station on the main stream under the same discharge

流量/m ³ /s	7000	10000	20000	30000	40000	50000
2035 年	-1.58	-1.5	-1.38	-0.87	-0.29	-0.05
2050 年	-2.57	-2.54	-2.16	-1.5	-0.35	-0.07

表 1 显示, 2020 年至 2035 年、2050 年流量为 30000m³/s 以下沙市站水位下降幅度相对较大, 流量越小, 水位下降幅度较大, 其中在流量为 7000m³/s 时, 较 2020 年基准水位 28.05m, 至 2035 年、2050 年, 水位下降分别为 1.58m、2.57m, 而流量为 50000m³/s 时, 水位下降幅度较小。因此枝城至杨家脑河段流量在 40000m³/s 以下的水位变化主要受下游沙质河段冲刷的影响。

由于杨家脑距离沙市站仅为 30km, 可基本认为在相同流量下杨家脑与沙市站水位下降幅度一致, 考虑到松滋口附近干流河段河床难以冲刷, 而杨家脑附近中枯水流量下水位下降幅度较大, 本文开展了杨家脑水位变化对干流河段水位变化、松滋口分流的影响试验研究工作。考虑到未来流量为 50000m³/s 时水位下降幅度不大, 因此给出枝城站流量为 7000m³/s、10000m³/s、20000m³/s、30000m³/s 及 40000m³/s 时, 尾门水位不同下降数值的试验工况, 具体试验方案如下表 2 所示。

表 2 定床模型试验水文条件表

Tab. 2 Hydrographic condition table for fixed-bed model test

模型进口流量/m ³ /s	杨家脑水位/m	新江口水位/m	沙道观水位/m
7000	30.01	33.34	断流
	28.43	33.34	断流
	27.44	33.34	断流
	32.82	34.07	32.57
10000	31.32	34.07	32.57
	30.28	34.07	32.57
	35.57	36.65	36.15
	34.19	36.65	36.15
20000	33.41	36.65	36.15
	38.06	38.85	38.73
	37.19	38.85	38.73
	36.56	38.85	38.73
30000	41.05	41.34	41.21
	40.76	41.34	41.21
	40.7	41.34	41.21
	40.7	41.34	41.21

2.3.2 动床模型试验方案 动床模型方案试验初始地形长江干流河道采用 2021 年 4 月实测河道地形图制模; 松滋口口门河道采用 2020 年 7 月河道地形图制模。干流河床与松滋口试验河段河床组成则分别采用 2022 年 10 月、2019 年 9 月实测床沙资料进行配沙。长江干流河段大于 2mm 以上的床沙级配为 72.9%, 卵石粒径比尺为 22, 进行卵石推移质配沙, 小于 2mm 以下的床沙级配为 27.1%, 沙质粒径比尺为 0.9, 作为沙质推移质配沙 (图 3 (a)); 松滋口口门河段原型床沙中值平均粒径约为 0.248mm, 沙质粒径比尺取为 0.9, 进行沙质悬移质配沙 (图 3 (b))。

2013-2022 年期间枝城站水流含沙量较低, 且包含 2020 年大水年、2022 年特枯年, 因此试验水沙条件采用 2013-2022 年实际水文过程。根据 2035 年 (15 年) 末各尾门处水位、流量的过程数据, 建构各尾门处水位流量关系式, 模型的尾门水位则利用相应的关系式插值得到其变化过程。

在动床模型初始地形上, 施放了 2013-2022+2018-2022 年水沙系列, 能模拟不同水文条件下河道演变。试验中, 5 年末、10 年末及 15 年末监测典型断面地形, 15 年末松滋口分流口门处地形见附图 6。

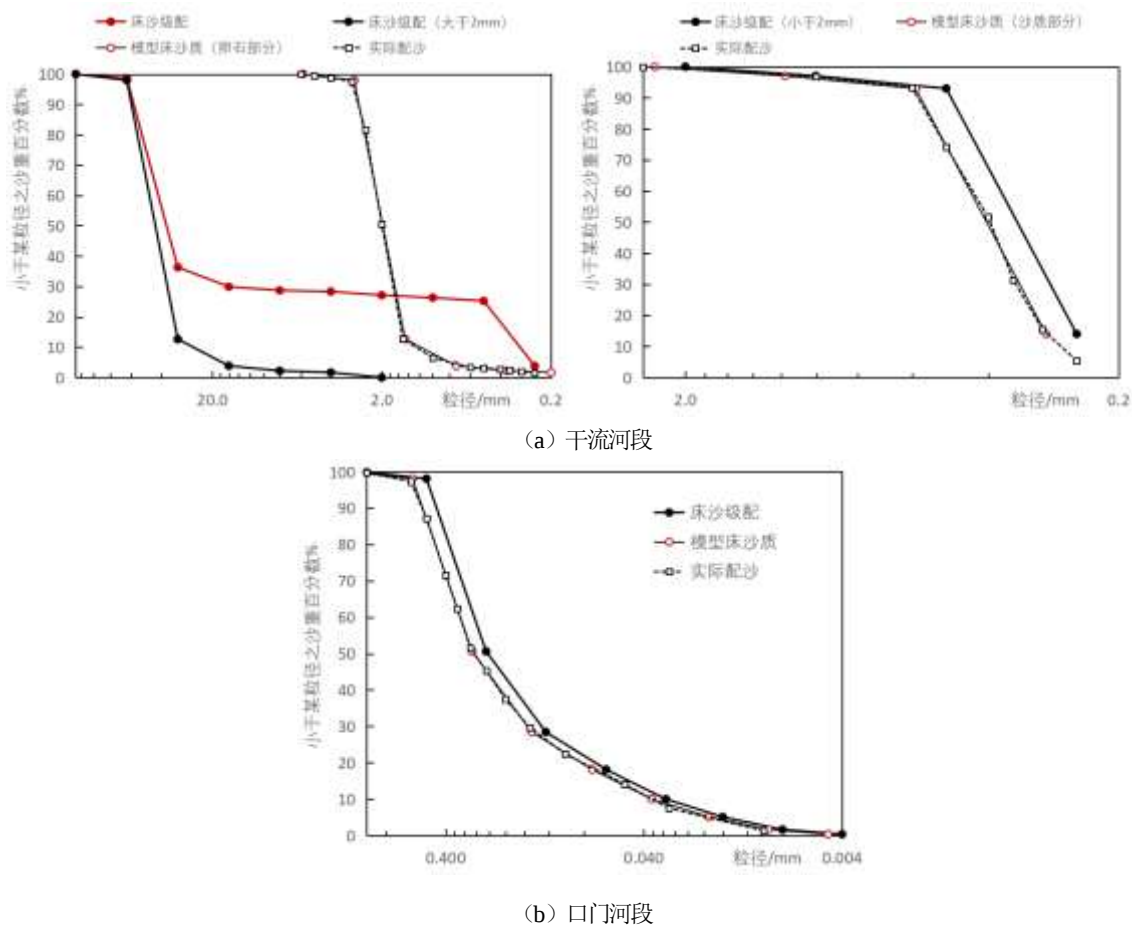


图 3 试验河段原型、模型及模型设计床沙级配曲线

Fig. 3 Prototype, model, and model - designed bed sediment gradation curves of the experimental river reach

3 水沙变化特性及河床冲淤规律

3.1 水沙变化

根据枝城站历史实测资料统计,三峡水库蓄水前后年径流量呈波动状态且无明显的趋势性变化,维持在4400亿 m^3 左右,2003-2022年期间年均径流量相较1955-2002年减少约3.7%;1955-1989年期间枝城站年输沙量无明显变化趋势;1990-2002年期间年输沙量为减少态势,2003年以来年输沙量减幅增大,2003-2022年期间年均输沙量为3850万t,相较1990-2002年期间的减少90.6%(图4)。1955-1989年期间,松滋口分流量为减小趋势,在1990-2022年期间分流量变化不明显;分沙量在1955-1989年期间有所减小,1990-2002年期间松滋口分沙量同样为减小态势,2003-2022年期间年均分沙量进一步减小,其数值为445万t,相较1990-2002年期间的减少87.1%(图4)。

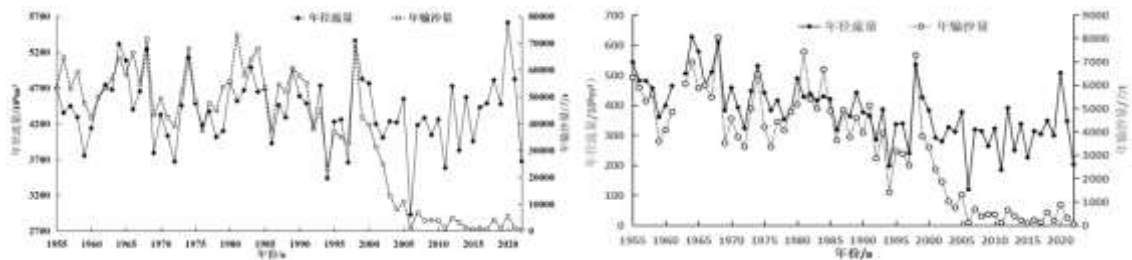


图 4 枝城站年径流量与年输沙量历年变化(左)、松滋口分流分沙量历年变化(右)

Fig. 4 Annual runoff and sediment load at Zhicheng Station (left) and historical changes in water and sediment distribution at Songzi Outlet (right)

3.2 河床冲淤及床沙级配变化

根据实测资料统计，2003-2022 年期间宜昌至杨家脑河段平滩河槽累计冲刷量为 40502 万 m³，平均冲深约 2.13m，宜昌河段、宜都河段及枝江河段冲刷量分别为 1896 万 m³、14697 万 m³ 及 23909 万 m³，分别冲深约 0.68m、2.43m 及 2.30m；其中宜昌河段冲刷主要集中在 2003 年，宜都河段冲刷主要集中在 2003-2014 年，而枝江河段冲刷主要集中在 2004-2017 年；2018-2022 年期间河段累计冲刷量仅为 1811 万 m³，平均冲深约 0.10m。2003-2022 年期间松滋河水系及口门段均明显冲刷，松滋口水系及口门段平滩河槽累计冲刷量分别为 11702 万 m³、4325 万 m³，若松滋河水系与口门段平均河宽分别按照 300m、600m 计，分别冲深 1.26m、3.00m；2011-2016 年松滋口水系及口门段冲刷量最大，这与松滋口口门段 2013-2015 年期间人工采砂有关，松滋河口口门段松 3 至松 8 断面间 13.8km 长河段内采砂量为 2650 万 m³[6]。

2003-2022 年期间宜昌站床沙粗化最为显著，2022 年汛后床沙粒径粗化为 33.0mm；枝城站从 2021 年以后床沙明显粗化，2022 年汛后床沙粒径粗化为 29.1mm[9]。根据 2015 年 9 月、2019 年 9 月份松滋河口口门段典型断面（位置见图 1）的床沙资料可知，2015-2019 年期间松滋河口口门段典型断面床沙级配略有粗化，至 2019 年 9 月份口门段河床组成仍为沙质型，其中床沙中值粒径在 0.21-0.29mm（图 5）。

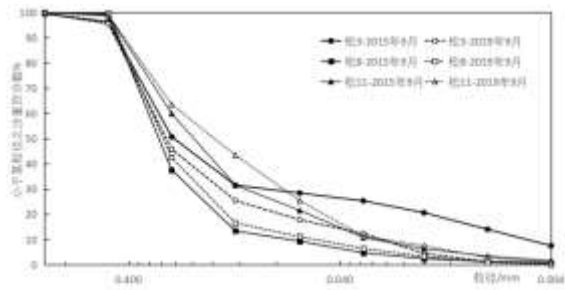


图 5 三峡水库运用后松滋河口口门段典型断面床沙颗粒级配变化

Fig. 5 Changes of sand grain gradation in typical section of Songzi outlet section after the operation of Three Gorges Reservoir

3.3 相同枝城站流量下松滋口分流变化

分析了三峡工程蓄水后枝城站流量为 7000m³/s、10000m³/s、20000m³/s、30000m³/s 及 40000m³/s 时松滋口分流变化过程（图 6）。枝城站流量为 7000m³/s 时松滋口分流呈先减后增的态势，流量为 10000m³/s 时松滋口分流稍有减小，流量为 20000m³/s、30000m³/s 及 40000m³/s 时松滋口分流则稍有增大。综上，除枝城站流量为 7000m³/s 时松滋口分流增加之外，其他流量下松滋口分流变化趋势不明显。

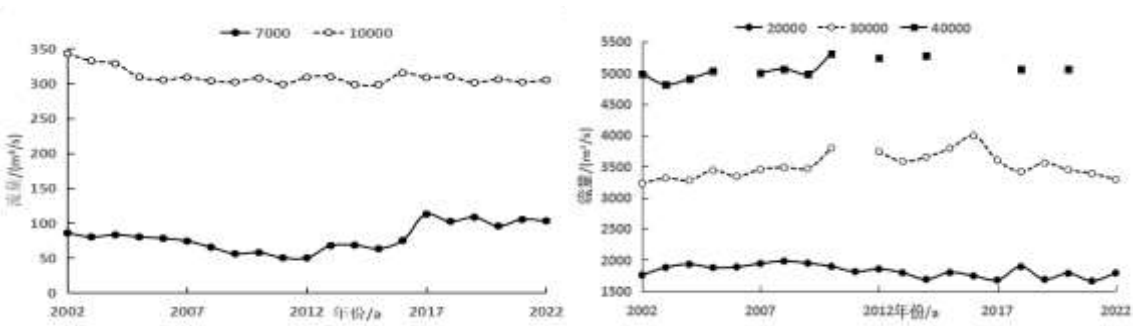


图 6 三峡水库运用前后相同枝城流量下松滋分流变化

Fig.6 Changes in the Songzi River's diversion under the same Zhicheng discharge before and after the operation of the Three Gorges Reservoir

4 2035 年末松滋口分流演变趋势预测

4.1 杨家脑水位下降对松滋口分流的影响

根据定床模型试验数据，给出了不同枝城站流量条件下不同尾门水位下降对干流河道水位的影响(图 7)。结果显示，在

低流量（如 $7000\text{m}^3/\text{s}$ ）时，尾门水位下降使干流河道水位呈阶梯状降低，靠近尾门处水位下降明显，向松滋口方向递减；高流量（如 $40000\text{m}^3/\text{s}$ ）时，水位变化相对平缓。这种水流形态变化受河道地形、建筑物及水流惯性影响，在低流量下，水流能量小，受尾门水位变化影响大；高流量时，水流能量大，对尾门水位变化的缓冲能力更强。统计了不同流量下陈二口水位下降数值与杨家脑水位下降数值的比值（简称 $S_{\text{比}}$ ）。由表 3 可知，随着流量越小， $S_{\text{比}}$ 则越小，反之亦然。其中流量为 $7000\text{m}^3/\text{s}$ 时 $S_{\text{比}}$ 为 $0.076:1\sim0.1:1$ ；流量为 $30000\text{m}^3/\text{s}$ 时 $S_{\text{比}}$ 为 $0.34:1\sim0.27:1$ 。

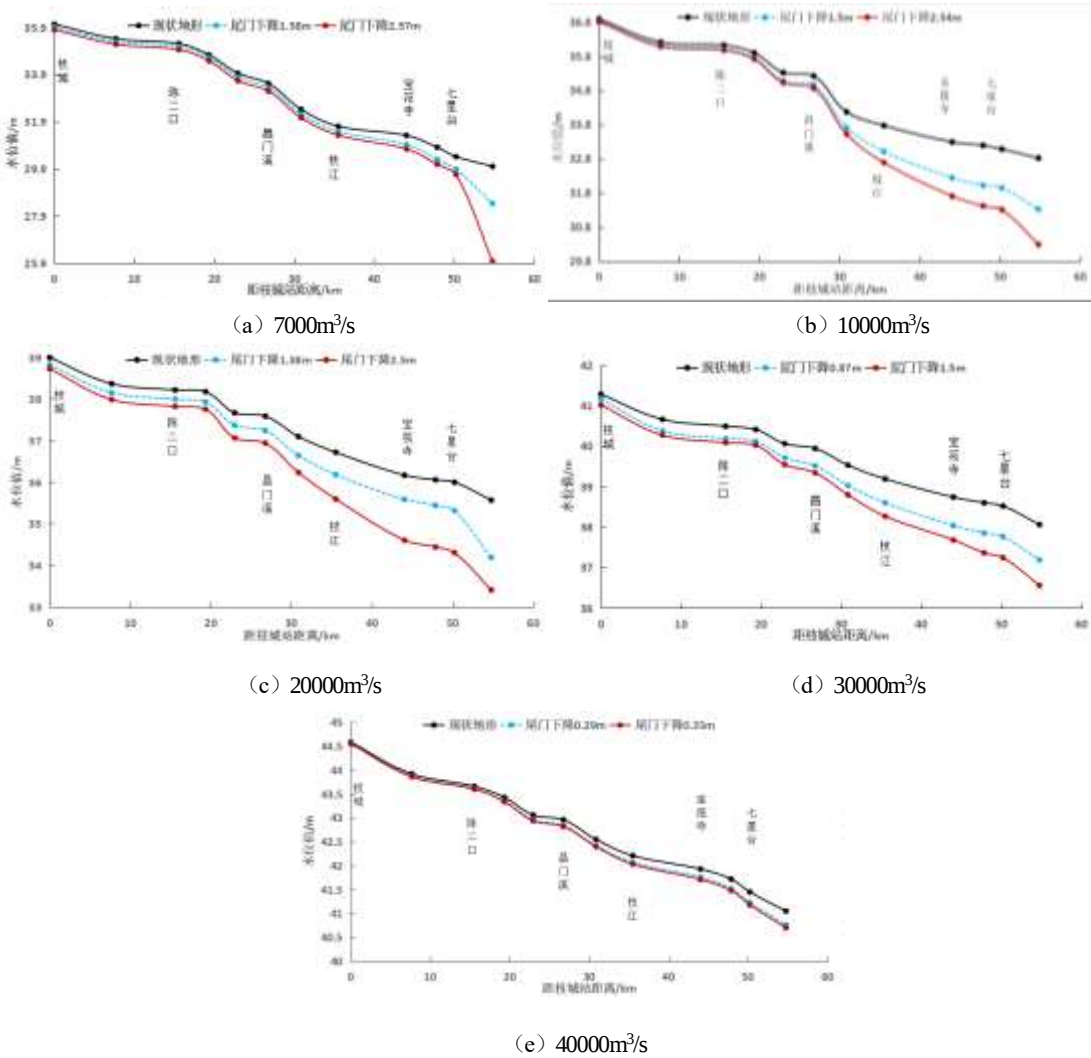


图 7 不同流量下尾门水位下降对干流河段沿程水位的影响

Fig. 7 Influence of tailgate water level drop under different flow rates on the water level along the main stream reach

表 3 不同流量级下 $S_{\text{比}}$ 变化

Tab. 3 The ratio change of the water level drop values between Chen'erkou and Yangjianao under different flow rates

枝城站流量/ m^3/s	$S_{\text{比}}$
7000	0.076:1~0.1:1
10000	0.073:1~0.055:1
20000	0.16:1~0.19:1
30000	0.34:1~0.27:1
40000	0.172:1~0.171:1

表 4 不同流量级下杨家脑水位下降对松滋口分流的影响

Tab. 4 Influence of the water level drop at Yangjiaobao on the diversion at Songzikou under different flow levels			
枝城站流量/m ³ /s	现状地形分流量/m ³ /s	2035 年分流量变化/m ³ /s	2050 年分流量变化/m ³ /s
7000	120	10 (下降 1.58m)	20 (下降 2.57m)
10000	280	15 (下降 1.5m)	40 (下降 2.53m)
20000	2540	60 (下降 1.38m)	90 (下降 2.16m)
30000	3320	150 (下降 0.87m)	220 (下降 1.5m)
40000	5350	60 (下降 0.29m)	80 (下降 0.35m)

表 4 表明,在相同流量下尾门水位下降幅度越大,则松滋口分流量减幅越大;随着流量越大,在相同尾门减幅条件下松滋口分流量减幅也越大。在枝城站流量为 7000m³/s 时尾门分别下降 1.58m、2.57m,则松滋口分流量分别减少 10m³/s、20m³/s,占现状地形分流量的 8.3%与 16.7%;在流量为 30000m³/s 时尾门分别下降 0.87m、1.5m,则松滋口分流量分别减少 150m³/s、220m³/s,占现状地形分流量的 4.5%与 8.1%;在流量为 40000m³/s 时尾门分别下降 0.29m、0.35m,则松滋口分流量分别减少 60m³/s、80m³/s,占现状地形分流量的 1.1%与 1.5%。

4.2 杨家脑水位下降与河床不对等冲刷对松滋口分流的影响

根据动床模型试验数据给出了 2030 年、2035 年末试验河段冲淤量及深度的定量预测数据。图 8 显示,模型运行至第 2030 年末,口门附近干流河段与松滋河试验河段累计冲刷量为 502 万 m³、995 万 m³,分别冲刷 0.31m、0.71m;第 2030 年末至第 2035 年末,口门附近干流河段与松滋河试验河段累计冲刷量为 92 万 m³、382 万 m³,分别冲刷 0.06m、0.27m;在整个 15 年水沙系列作用下,口门附近干流河段与松滋河试验河段累计冲刷量为 594 万 m³、1377 万 m³,分别冲刷 0.37m、0.98m。从试验成果来看,由于口门附近干流河段为卵石夹沙河床,而松滋河试验河段为沙质河床,因此造成口门附近干流河段与松滋河试验河段不对等冲刷,其中松滋河试验河段冲刷深度显著大于口门附近干流河段冲刷深度。

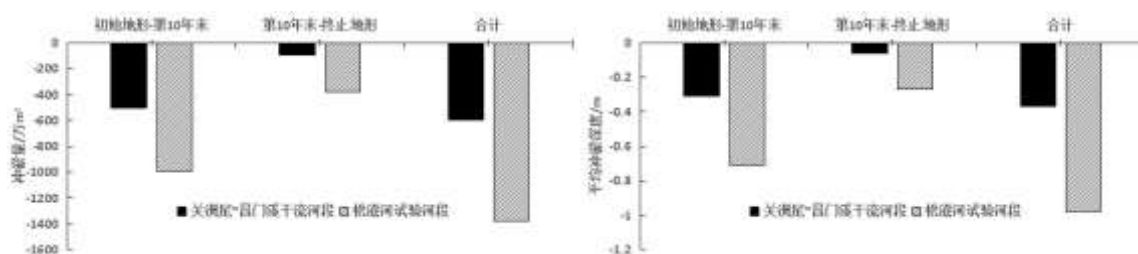


图 8 不同时间段干流与松滋河试验河段冲淤量及深度定量预测

Fig.8 Quantitative prediction of erosion and deposition volume and depth in the test reaches of the main stream and Songzi River in different time periods

随着“清水”持续冲刷的影响,松滋口附近干流河段河床组成已为卵石夹沙层,床面提供可冲的沙量将越来越少,而松滋口口门河段河床组成为沙质,根据物理模型试验成果的预测,至 2035 年末口门附近干流与松滋口口门河段的平均冲深分别为 0.37m、0.98m,松滋口附近干流河段与口门河段河床组成的差异性,导致口门内外河床处于不对等冲刷状态,其中口门外干流河段河床冲刷幅度较小,而口门内河床冲刷幅度大;在相同枝城流量下松滋口口门河段过水面积的增加幅度相对较大,有利于松滋口的分流。在 2035 年末的地形上施放了各典型流量级,并预测了 2035 年末松滋口分流变化特征(表 5)。随着杨家脑水位下降,再加上口门内外不对等冲刷,导致分流发生一定的调整,2035 年末在各典型流量下分流量略有增加,在中枯水流量下分流量增幅相对较大,在枝城流量为 7000m³/s 下,松滋口分流增大 30m³/s,增幅为 25%;而在枝城流量为 40000m³/s 下,松滋口分流增大 30m³/s,增幅仅为 0.6%。

表 5 显示,物理模型试验表明,在次饱和水流长期作用下,杨家脑以下沙质河段持续大幅冲刷,引起杨家脑附近的中枯流量下水位不断下降,但由于芦家河坝、航道整治工程以及河床粗化等抑制作用,下游中枯水流量下水位下降对松滋口口门处的水位影响不大;口门至杨家脑河段水面比降不断增加,水流流速增大,这种水流条件的改变不利于中枯水期航道通畅。同时松滋口口门内、外河床处于不对等冲刷状态,口门内冲刷幅度相对较大,在相同枝城流量下松滋口口门河段过水面积的增加幅度相对较大,因此有利于改善松滋口分流,维护其分流能力。

表 5 2035 年末松滋口分流的变化

Tab. 5 Changes in the diversion of Songzikou by the end of 2035

枝城站流量/m ³ /s	现状地形分流量/m ³ /s	2035 年末分流量变化 /m ³ /s	分流量变化/m ³ /s	分流量的变幅/%
7000	120	150	30	25.0
10000	280	305	25	8.9
20000	2540	2560	20	0.8
30000	3320	3350	30	0.9
40000	5350	5380	30	0.6

4.3 讨论

分析了尾门水位下降与河床不对等冲刷对松滋口分流的影响,其中表 5 中分流量的变化已考虑了尾门水位下降对松滋口分流的影响。下面根据表 4 及表 5 的试验数据计算了二者的贡献值(表 6)。根据综合因素的分流量变化分析,随着枝城站流量的增加,分流量变化在不同流量下表现出一定的波动,表明在不同流量下,综合因素对分流量变化的影响并不呈现简单的线性关系。同时,在不同流量下杨家脑水位下降和河床不对等冲刷对松滋口分流量变化的影响表现出明显差异性,杨家脑水位下降对分流量有显著的负向影响,河床不对等冲刷则有显著的正向影响。其中 7000m³/s 时杨家脑水位下降对分流变化的影响贡献率为-33%,而河床不对等冲刷对分流变化的影响贡献率为 133%。随着流量的增加,这两种影响的贡献率绝对值均显著增大。根据贡献率绝对数的比值变化可知,不同流量条件下二者影响程度的对比存在差异,随着枝城站流量增大,该比值从 0.25:1 逐渐增大到 0.83:1,后略有下降,表明在枯水流量下,河床不对等冲刷对分流变化的影响相对更强。

根据物理模型的结果预测,7000m³/s 时分流增加 25m³/s,枯水期分流量增幅达 20.8%,随着流量增大,无论杨家脑水位下降还是河床不对等冲刷的影响,对分流量变幅的影响均呈减小趋势,即使两种分流量变化的贡献率绝对值均显著增大,二者抵消后,对分流量变幅的影响不大,二者综合影响或主要集中在中枯水期。

表 6 2035 年末杨家脑水位下降与河床不对等冲刷对松滋口分流影响的贡献率

Tab. 6 Contribution rates of water level decline at Yangjianao and unequal riverbed scouring to the diversion impact at Songzi outlet by the end of 2035

枝城站流量 /m ³ /s	综合因素	杨家脑水位下降的影响		河床不对等冲刷的影响		贡献率绝对数 的比值
	分流量变化/m ³ /s	分流量变化/m ³ /s	贡献率	分流量变化/m ³ /s	贡献率	
7000	30	-10	-33%	40	133%	0.25:1
10000	25	-15	-60%	40	160%	0.38:1
20000	20	-60	-300%	80	400%	0.75:1
30000	30	-150	-500%	180	600%	0.83:1
40000	30	-60	-200%	90	300%	0.67:1

基于最新实测断面地形数据的分析表明,河道冲刷预测成果具有科学合理性。枝江河段 2020 年 10 月~2024 年 10 月的观测数据显示,平滩河槽累计冲刷量为 514 万 m³,其中口门附近干流河段冲刷量为 165 万 m³,对应年均冲刷速率为 41 万 m³/a。相较而言,物理模型对 2020-2025 年口门干流河段的预测冲刷量为 275 万 m³,年均冲刷量为 55 万 m³/a。实测与模型数据在冲刷趋势上呈现一致性,但实测年均值较模型预测减少 14 万 m³/a,相对偏差达 34%。经溯源分析,该差异主要源于水文条件的时空异质性:模型试验采用的 2013-2017 年径流序列(年均径流量偏丰)与实测期 2022-2023 年连续枯水年组形成显著对比。尽管存在量值差异,但冲刷深度空间分布的预测偏差处于容许范围,故认为预测结果总体合理。就松滋河试验河段而言,2020 年 10 月~2022 年 10 月实测平滩河槽累计冲刷量为 222 万 m³,年均冲刷量为 111 万 m³/a,较模型预测的 2020-2025 年均冲刷量 118 万 m³/a(总冲刷量 588 万 m³)存在 7 万 m³/a 的负偏差(相对偏差 6.3%)。该差异机制与干流河段具有同源性,主要归因于 2022 年枯水条件与模型初始水文序列(2013-2017 年)的径流丰枯差异。值得强调的是,模型准确再现了松滋河试验段冲刷强度显著高于口门干流段的区域分异特征,其年均冲刷量级比为 2.14:1(118: 55),实测数据年均冲刷量级比为 2.71:1(111: 44),二者冲刷在空间格局较为吻合。

三峡工程运行后,“清水”冲刷导致松滋口分流变化对洞庭湖生态系统和水资源利用产生了显著影响,根据物理模型结果可知,至 2035 年末枯水期分流明显增加有利于松滋河水系的水资源调配,改善局部水环境,促进湖区生态系统的稳定性。杨家脑以下沙质河段的持续冲刷导致口门至杨家脑河段水面比降增大、流速加快,降低干流水位并影响中枯水期航道畅通,对航运安全和水资源管理提出了新的挑战。

本研究采用物理模型定量预测至 2035 年末长江松滋口分流变化趋势,虽取得一定的认识,但仍存在一定的局限性。影响松滋口分流的因素繁多且相互关联,除研究涉及因素外,气候变化、未来河(航)道整治工程等因素难以在模型中全面体现。为更准确预测松滋口分流变化,后续研究需结合长期、高频的现场监测数据,利用先进的监测技术获取高精度数据。同时,融合多种模型方法,如将物理模型与数值模型结合,优势互补,综合考量各类影响因素,进而提升对松滋口分流变化预测的准确性,有望为长江江湖关系的科学治理和可持续发展提供一定的科技支撑。

5 结论

本文采用原型观测资料分析干流与松滋口河段水沙及河床冲刷变化特征,建立了松滋口口门段物理模型,定量研究了下游沙质河床冲刷与河床不对等冲刷对松滋口分流的影响,得到以下认识:

(1) 建立了松滋口口门河段物理模型,平面比尺为 1:400;垂直比尺为 1:100,利用实测地形、水文资料对武汉河段实体模型进行定、动床验证,验证结果均符合有关要求;定床模型试验方案分别给出了 2035 年、2050 年末 5 组流量下杨家脑水位下降值,动床模型试验方案施放了 2013-2022+2018-2022 年水沙系列。

(2) 与 1990-2002 年相比,2003-2022 年期间枝城站年均输沙量为 3850 万 t,减少约 90.6%;松滋口分沙量为 445 万 t,亦同步大幅减少约 87.1%。2003-2022 年期间枝城至杨家脑河段累计冲刷量达 2.39 亿 m^3 ,平均冲深 2.3m,河床由沙质向卵石夹沙转变,粗化趋势显著;松滋口口门段冲刷量达 4325 万 m^3 ,平均冲深 3.0m,但其床沙仍以沙质为主,与干流卵石夹沙河床形成组成差异,导致后来冲刷速率不对等。

(3) 物理模型试验成果预测,下游沙质河床持续冲刷导致杨家脑不同流量下水位呈一定下降,导致分流减少,中枯水流量下水位显著下降,7000 m^3/s 时 2035 年、2050 年末降幅分别 1.58m 与 2.57m,相应的松滋口分流量减少幅度最大,分别减少 10 m^3/s 、20 m^3/s ,占现状 8.3%与 16.7%;而 2035 年末即使考虑杨家脑水位下降的影响,河床不对等冲刷使过水断面扩大,分流能力增强,中枯水流量下分流量增幅相对较大,7000 m^3/s 时分流增加 25 m^3/s ,枯水期分流量增幅达 20.8%,其中杨家脑水位下降对分流变化的影响贡献率为-33%,河床不对等冲刷贡献率为 133%。随流量增加,二者对分流变化的影响贡献率数值均显著增大,但抵消后对分流量变幅的影响不大,其主要影响或主要集中于中枯水期。

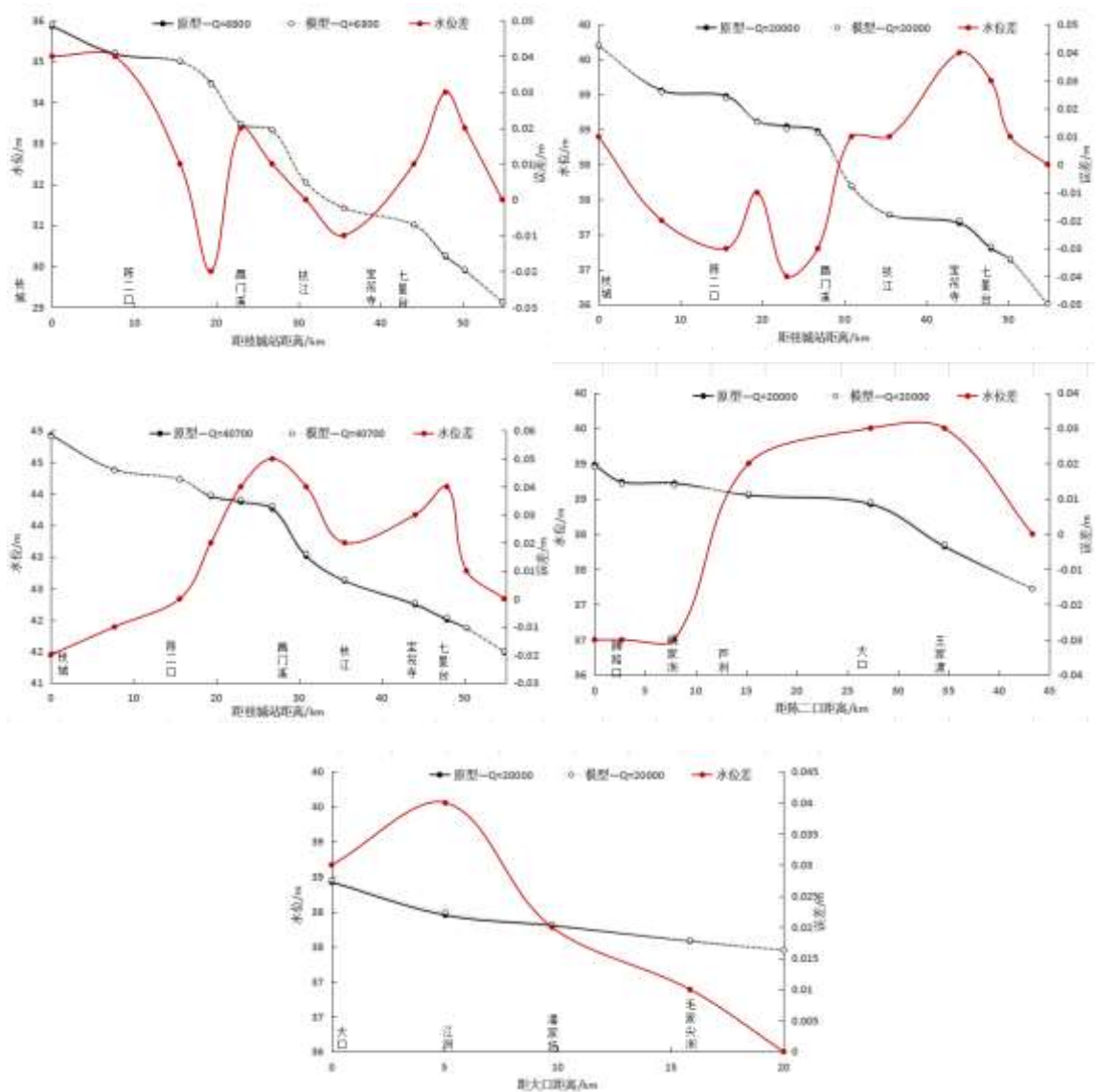
6 附件

附图 1 到附图 6,附表 1 和附表 2 见电子版 (doi: 10.18307/2026.0152)。

6 参考文献

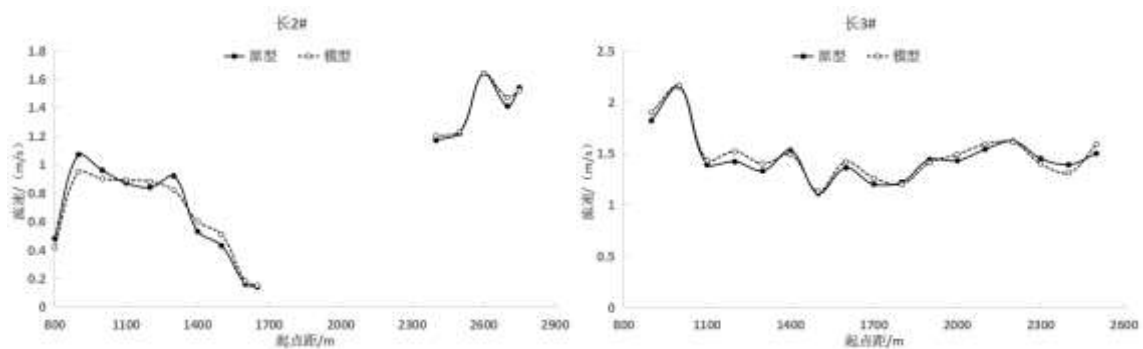
- [1] Lu JY. Study on laws of runoff and sediment diverted from three outfalls on the Jingjiang Reach of the Jingjiang River. *Journal of Sediment Research*, 1996, (4): 54 - 60. [卢金友. 荆江三口分流分沙变化规律研究. *泥沙研究*, 1996, (4): 54 - 60.]
- [2] Lu JY, Luo HK. Preliminary analysis of the relationship changes between the Yangtze River and Dongting Lake. *Yangtze River*, 1999, (4): 24 - 26. [卢金友, 罗恒凯. 长江与洞庭湖关系变化初步分析. *人民长江*, 1999, (4): 24 - 26.]
- [3] Xu QX, Hu GY, Yuan J. Study on the changes of diversion and sediment discharge at the three outlets of the Jingjiang River in recent 50 years. *Journal of Sediment Research*, 2009, (5): 1 - 8. [许全喜, 胡功宇, 袁晶. 近 50 年来荆江三口分流分沙变化研究. *泥沙研究*, 2009, (5): 1 - 8.]
- [4] Ge YX, Li YT, Deng JY, et al. Analysis on the change mechanism of the diversion of the three outlets of the Jingjiang River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*, 2022, (2): 36 - 42. [葛宇轩, 李义天, 邓金运等. 三峡水库蓄水后荆江三口分流变化机理分析. *泥沙研究*, 2022, (2): 36 - 42.]
- [5] Guo XH, Li YT, Zhu YH, et al. Variation Characteristics of diversion and sediment discharge ratio at the entrance of Songzikou. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22 (3): 457 - 468. [郭小虎, 李义天, 朱勇辉等. 松滋口口门分流分沙比变化特性. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22 (3): 457 - 468.]
- [6] Duan GL, Peng YB. Changes in the diversion of Songzikou in the Jingjiang River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir and its influencing factors.

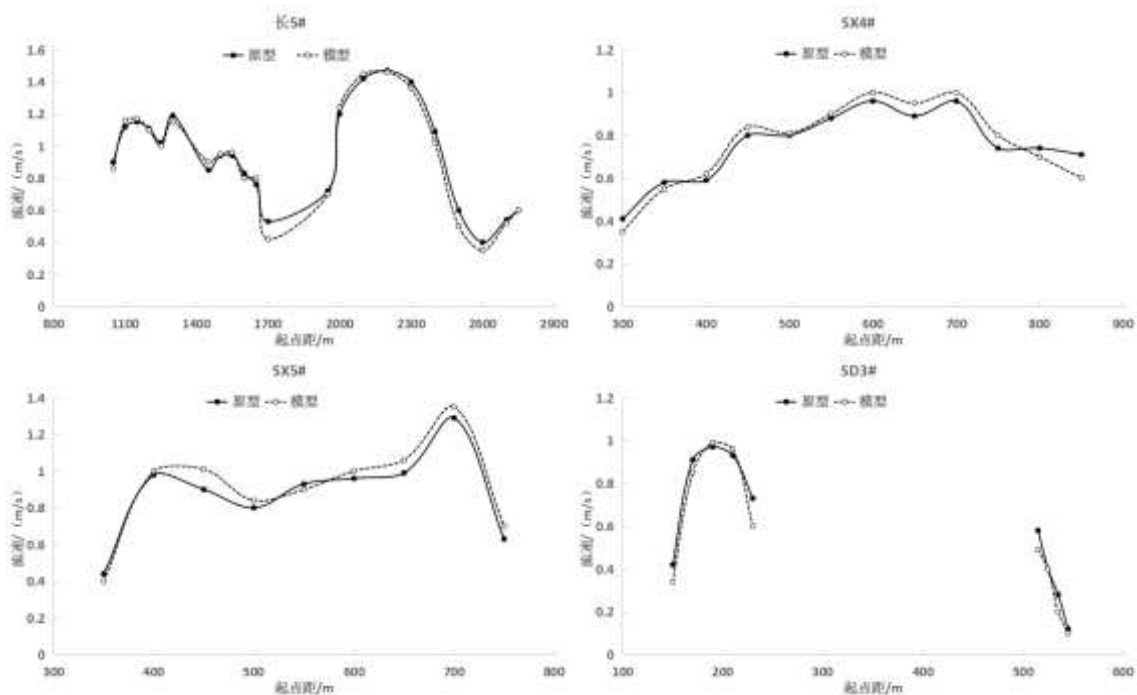
- Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41 (02): 14 - 20. [段光磊, 彭亚波. 三峡水库蓄水后荆江松滋口分流变化及其影响因素. 长江科学院院报, 2024, 41 (2): 14 - 20.]
- [7] Li YT, Guo XH, Tang JW, et al. The changes of diversion at the three outlets of the Jingjiang River after the construction of the Three Gorges Reservoir. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17 (1): 21 - 31. [李义天, 郭小虎, 唐金武等. 三峡建库后荆江三口分流的变化. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17 (1): 21 - 31.]
- [8] Huang L, Liu SH. Influence of river regime adjustment of Guanzhou Reach on the diversion of Songzikou after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. Engineering Science and Technology, 2018, 50 (1): 22 - 27. [黄莉, 刘士和. 三峡水库蓄水后关洲河段河势调整对松滋口分流影响. 工程科学与技术, 2018, 50 (1): 22 - 27.]
- [9] Huang L, Liu SH, Liao WJ. Study on river regime adjustment and response of water and sediment characteristics in Guanzhou reach after the operation of the Three Gorges Reservoir. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28 (5): 1007 - 1017. [黄莉, 刘士和, 廖伟坚. 三峡水库投运后关洲河段河势调整及水沙特性响应研究. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28 (5): 1007 - 1017.]
- [10] Wang CH, Han QW. Preliminary estimation of sedimentation in the flood channels of the three outlets in the south of Jingjiang River and Dongting Lake after the completion of the Three Gorges Reservoir. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997, (11): 16 - 19. [王崇浩, 韩其为. 三峡水库建成后荆南三口洪道及洞庭湖淤积概算. 水利水电技术, 1997, (11): 16 - 19.]
- [11] Han QW. Changes of flood situation along the middle Yangtze River. Journal of Sediment Research, 1999, (5): 1 - 12. [韩其为. 江湖流量分配变化导致长江中游新的洪水形式. 泥沙研究, 1999, (5): 1 - 12.]
- [12] Gan MH, Liu KB, Yang DW, et al. Study on flood control, water resources and water environment of the four - river system of Dongting Lake. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30 (5): 5 - 9, 34. [甘明辉, 刘卡波, 杨大文等. 洞庭湖四口河系防洪、水资源与水环境研究. 水力发电学报, 2011, 30 (5): 5 - 9, 34.]
- [13] Zhu YH, Guo XH, Li LY. Changes in flood diversion capacity of the three outlets of Jingjiang River and outflow from Dongting Lake during the flood season in 2020. Yangtze River, 2020, 51 (12): 210 - 215. [朱勇辉, 郭小虎, 李凌云. 2020 年汛期荆江三口分洪能力及洞庭湖出流变化. 人民长江, 2020, 51 (12): 210 - 215.]
- [14] Zhang DD, Dai ML, Li YQ, et al. Flow variation characteristics of the three outlets of Jingjiang River from 1956 to 2020 and the effect of reservoir water replenishment. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (3): 945 - 957. [张冬冬, 戴明龙, 李妍清等. 1956 - 2020 年荆江三口径流变化特征及水库补水效果. 湖泊科学, 2022, 34 (3): 945 - 957.]
- [15] Zhu BY, Xu Q, Zhu LL, et al. Diversion changes of the three outlets of Jingjiang River into Dongting Lake since 1955. Journal of Lake Sciences, 2023, 35 (5): 1832 - 1843. [朱博渊, 徐琪, 朱玲玲等. 1955 年以来入洞庭湖的荆江三口分流变化. 湖泊科学, 2023, 35 (5): 1832 - 1843.]
- [16] Yao SM, Guo XH. Variation laws of water and sediment transport in the Zhicheng - Luoshan reach of the middle Yangtze River and the three - outlet flood channels from 1955 to 2021. Journal of Lake Sciences, 2024, 36 (5): 1572 - 1587. [姚仕明, 郭小虎. 1955 - 2021 年期间长江中游枝城至螺山河段与三口洪道水沙输移变化规律. 湖泊科学, 2024, 36 (5): 1572 - 1587.]
- [17] 中华人民共和国水利部. 河工模型试验规程. 北京: 中华人民共和国水利部, 2012. SL 99 - 2012.
- [18] 长江水利委员会. 长江流域防洪规划修编. 武汉: 长江水利委员会, 2024.
- [19] 长江水利委员会水文局. 2022 年度三峡水库入出库水沙特性、水库淤积及坝下游河道冲刷分析. 武汉: 长江水利委员会水文局, 2023.



附图1 实验河段定床模型验证水位对比

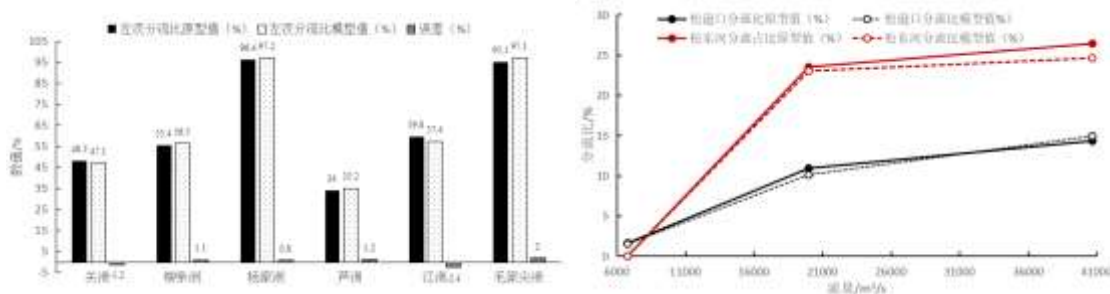
Attached Fig. 1 Comparison of Water Levels for the Fixed - bed Model Verification in the Experimental River Reach





附图 2 口门河段定床模型典型断面流速验证图 (进口流量 20000m³/s)

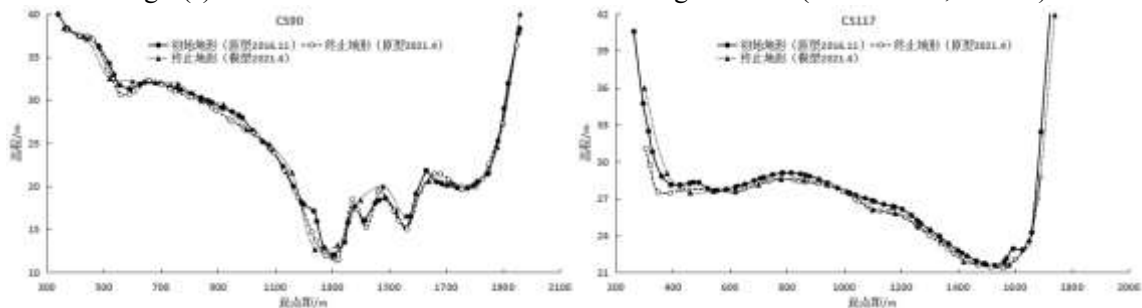
Attached Fig. 2 Verification Diagram of Flow Velocity at Typical Cross - sections of the Fixed - bed Model in the Mouth Reach (Inflow Discharge: 20000 m³/s)

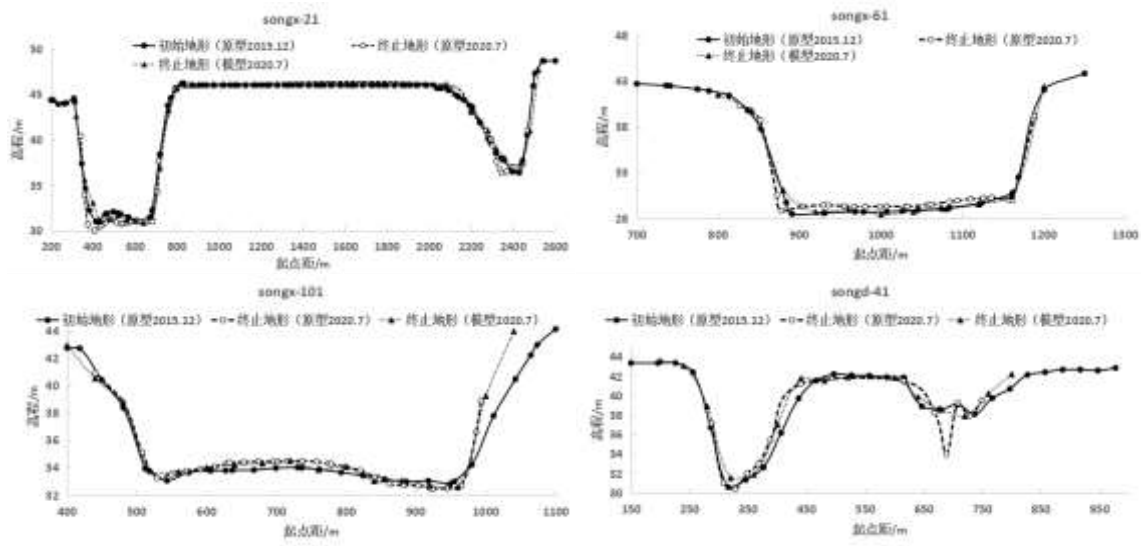


附图 3(a) 典型汉道分流比验证 (流量 20000m³/s) 附图 3(b) 松滋口口门分流比验证 (流量 20000m³/s)

Attached Fig.3(a) Verification of Typical Branch Channel Flow Distribution Ratio (Flow Rate 20,000 m³/s)

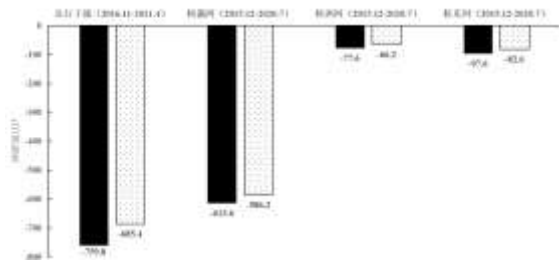
Attached Fig. 3(b) Verification of Flow Distribution Ratio at Songzikou Inlet (Flow Rate 20,000 m³/s)





附图4 试验河段动床模型典型横断面验证图

Attached Fig.4 Verification Diagram of Typical Cross-Sections in the Movable Bed Model of the Test River Reach



附图5 原型及模型河床分段冲淤量对照表（43m 高程以下）

Attached Fig.5 Comparison Table of Segment-wise Erosion and Deposition Volumes in the Prototype and Model Riverbed (Below 43m Elevation)



附图6 动床模型15年末松滋口分流口门处

Attached Fig. 6 Topographic map of the diversion entrance of Songzikou at the end of 15th years in the mobile bed model

附表 1 定床模型比尺表

Appendix Table 1		Scale table of fixed-bed model
相似条件	比尺名称	比尺值
几何相似	平面比尺	1:400
	垂直比尺	1:100
水流运动相似	流量比尺	1:400000
	糙率比尺	1:1.08
	流速比尺	1:10

附表 2 动床模型比尺表

Appendix Table2		Scaling table of movable - bed model	
相似条件	比尺名称	比尺值	备 注
悬移质泥沙 运动相似	沉速比尺	1:2.5	
	起动流速比尺	1:10	
	粒径比尺	1:0.9	
	含沙量比尺	1:0.442	最终取为 1:0.75
	河床变形时间比尺	1:230	最终取为 1:135
推移质泥沙 运动相似	沉速比尺	1:2.5	
	起动流速比尺	1:10	
	粒径比尺	1:0.9	
	单宽输沙率比尺	1:442	最终取为 1:750
	河床变形时间比尺	1:230	最终取为 1:135