J. Lake Sci.(湖泊科学), 2026, 38(1):000-000
DOI 10.18307/2026.0153

三峡工程运用后长江中游典型分汊段分流分沙比调整特点与成因分析*

朱　恒，夏军强**，邓珊珊，周美蓉

（武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室，　武汉　430072）

摘　要：三峡工程的运用引起坝下游分汊段冲淤调整，进而改变分流分沙格局，对防洪、航运和生态等带来深远影响。本文选取监利~石矶头河段内三种不同类型分汊河段为研究对象，分析持续冲刷条件下的汊道演变特点，并基于二维水沙模型对比计算了三峡工程运用前后不同流量级下的分流分沙比，最后阐明了分流格局调整的驱动成因。结果表明：三峡运用后，研究河段内顺直分汊段两汊有冲有淤，弯曲及鹅头分汊两汊均冲，且冲刷主要发生于枯水河槽，整治工程阻止了江心洲两缘高滩崩退且促进了洲头低滩淤积；冲刷强度大的汊道发展为主汊，造成部分分汊段主支汊易位，南门洲及陆溪口右汊枯水流量下分流比分别由 0.42、0.40 提升至 0.95、0.81，增幅均超 100%；汊道不平衡冲淤是分流分沙格局调整的主要成因，且影响随流量增大而减小，主汊相对支汊冲刷厚度每增加 1.0m，主汊分流比增加约 7.6~15.8%，分沙比增加约 8.2~11.8%；平面形态改变进一步影响了分流格局，南阳洲左汊口门处低滩淤积不利于入流，且高滩崩退后左移降低了左汊洪中流量下的分流比。

关键词：分流分沙比；汊道演变；分汊河型；整治工程；长江中游

Variation characteristics and causes of flow and sediment diversion ratios in the typical bifurcated reaches of the Middle Yangtze River after the Three Gorges Project operation

Zhu Heng[1], XIA Junqiang[1**], Deng Shanshan[1] & Zhou Meirong[1]

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

Abstract: The operation of the Three Gorges Project resulted in substantial channel adjustments in the downstream reaches, thereby altering the diversion patterns of flow and sediment in bifurcated reaches. This had a considerable impact on flood control, navigation, water diversion, and ecology. The present study investigated the variation characteristics of four distinct bifurcated reaches in the reach between Jianli and Shijitou of the Middle Yangtze River. Utilizing a two-dimensional flow-sediment transport model, this study compared the flow and sediment diversion ratios prior to and following reservoir operation under various flow regimes, thereby identifying the drivers behind the variation in diversion patterns. The results demonstrate that during the post-operation period, the straight bifurcated reach underwent erosion and deposition, while both the main and second branches of the curved bifurcated reach underwent erosion, primarily occurring in the low-water channels. The implementation of river regulation projects has been demonstrated to impede the retreat of the high floodplain of the mid-channel bar (MCB) and to induce the deposition of the low floodplain of the MCB. The channels exhibiting higher levels of erosion intensity underwent evolution, subsequently assuming the role of the primary branches. This phenomenon induced a shift in the main and secondary branches of select bifurcated reaches. The low-discharge diversion ratios in the right branch of the bifurcated reaches of Nanmenzhou and Luxikou increased from 0.42 and 0.40 to 0.95 and 0.81, respectively, with both showing an increase of over 100%. The imbalance in erosion across the bifurcated reaches is the primary cause of variation in flow and sediment diversion patterns, with the impact decreasing for higher discharge. For every 1.0 m increase in the relative scour depth between the main and secondary branch, the flow diversion ratio of the main branch is shown to increase by approximately 7.6–15.8%, and the sediment diversion ratio increases by approximately 8.2–11.8%. It is evident that

* 2024-12-25 收稿；2025-03-36 收修改稿。
国家自然科学基金项目（U2040215，52109098）资助。
**通信作者；E-mail: xiajq@whu.edu.cn

alterations to the mid-channel bar planform would have a consequential impact on flow diversion patterns. Sediment deposition on the low floodplain was detrimental to the inflow entering the left branch of the Nanyangzhou reach, while the retreat of the high floodplain in the left branch further decreased the flow diversion ratio under medium to high discharge conditions.
Keywords: Flow and sediment diversion; Channel evolution; Bifurcated channel pattern; River regulation engineering; Middle Yangtze River

分汊型河流是冲积河流中一种常见的河流地貌形态。分汊河段内由于水沙分股输移，因此容易产生主流摆动、滩槽变形、主支汊易位等现象[1-2]。在长江中下游干流中，分汊河段长度占比超过 70%[3]。三峡工程运用显著改变了坝下游河道的水沙条件，下泄沙量大幅度减少，坝下游产生长距离、长时期的河床冲刷。在长江中游河床持续冲刷过程中，这些分汊段滩槽形态发生变化，导致主支汊分流分沙比发生调整[4-6]，进而对防洪航运及岸线利用等带来重要影响[7-10]。

当前关于分汊段分流比的研究成果较多，分汊段地形差异及上游来流变化是导致汊道内水动力条件不同和分流比调整的主要因素[11-13]。部分学者从河床演变学基本原理出发，基于最小能耗理论[14]、曼宁公式[15]、等动量法[16]等各种假设推求分流比计算公式。童朝锋等[16]通过假设两分流水体在垂直于河道主轴方向上的动量相等推导了分流比公式，适用于两汊河床高程相差较大的分汊段。陈立等[17]通过引入综合反映两汊糙率、比降差异的因子，改进了基于曼宁系数的分流比公式，并分析得到汊道冲淤变化对微弯分汊段分流比的影响大于顺直分汊段。在分流比公式的基础上，考虑含沙量垂线分布、横向环流输沙等因素的影响，可以进一步确定分沙比的表达式[18-19]。

伴随着水沙测量技术与计算机技术的发展，分汊段流场结构可以在室内实验[20-22]和数值模拟[23-25]中被详细描述，进而能确定出更高精度的分流比结果。在室内实验中，部分学者考虑了进口流量，汊道河床高程、汊道弯曲程度等因素变化下分流比变化规律[20-22]。Marra 等[21]在水槽实验中观测到了汊道分流区的二次流运动，将会导致底部更多水流进入主汊，但这种效应随着进口流量和两汊河宽比的增加而减少。Bertoldi 等[22]分析了不同江心洲宽度的分汊段水沙输移特征，实验结果表明江心洲宽度和汊道曲率增加都将降低进入汊道的沙量。鉴于分汊河段水流运动复杂，需要采用二维及三维数学模型来描述[23-25]。李琳琳等[23]通过三维水沙数学模型计算了河道展宽对分流分沙比的影响，发现伴随着两汊河宽增加，分流区前横向环流作用减弱，使得分沙比与分流比趋于一致。刘亚等[24]基于二维数学模型，分析了两汊长度比和汊道进口水流走向对分流比的影响，结果表明：对弯曲型分汊段，进口水流走向是主导因素；对鹅头型汊道，分流比主要受各汊道弯曲程度影响。现有研究已表明地形改变将对汊道分流分沙格局产生较大影响，但多为定性描述，缺乏定量分析[26]。此外为稳定洲滩格局，分汊段多修建整治工程，进一步影响了分流分沙比变化趋势。

长江中游主要包括顺直、弯曲、鹅头三种分汊河型，皆存在于监利-石矶头河段，故选取其为研究河段。本文通过对比三峡建库前后的地形资料，分析典型分汊段的河床冲淤与洲滩格局变化规律，计算建库前后各汊道段在不同流量级下分流分沙比的调整特点，揭示河床冲刷及整治工程对分流分沙比调整的影响。

1 研究区域与方法

1.1 河段概况

长江中游上至湖北宜昌，下至江西湖口，总长约 955 km。中游监利~汉口河段内有多处江心洲发育，河槽宽窄相间，以分汊河型为主。整个中游形成了 25 个分汊段，其中顺直分汊、弯曲分汊、鹅头分汊数量占比分别为 40%、48%和 12%[27]。为同时考虑三类分汊河型，选取监利~石矶头河段为研究区域，河段全长 189.4km，有乌龟洲、南阳洲、南门洲及陆溪口 4 个汊道（图 1a-d）。该河段有洞庭湖入汇，沿程设有监利、螺山 2 个水文站及广新洲、莲花塘和石矶头等 3 个水位站。

基于 2021 年 4 月的实测地形计算了长江中游监利~石矶头分汊河段的河床形态特征参数[28]，其中南阳洲及南门洲汊道均为顺直分汊，但这两分汊段冲淤及分流格局调整程度有较大差异，且南阳洲汊道更为稳定（表 1）。乌龟洲汊道由于曲率半径较小，为弯曲分汊，而曲率半径最小且放宽率最大的陆溪口汊道属于鹅头分汊。各江心洲头部均修建有护滩带、顺坝等结构形式的整治工程，用于稳定洲滩，维持航道形态。除洲头守护外，部分江心洲两侧也受到较强水流冲刷作用，为防止岸线崩退，修建有护岸工程，如乌龟洲右缘、团洲右缘等[9, 11]。

1.2 数学模型

分汊河段演变涉及到水沙横向输移，一维模型无法反映流速和含沙量的横向分布，而三维水沙模型计算量过大，不适用于长河段水沙模拟，故本文采用平面二维水沙动力学模型计算中游分汊段的水沙输移过程。Xia 等[29]基于无结构网格有限

体积法建立了平面二维水沙模型，故江心洲的不规则边界可通过三角形网格反映。由于长江中下游含沙量较低，忽略水沙耦合项时，控制方程组的守恒形式可表示为：

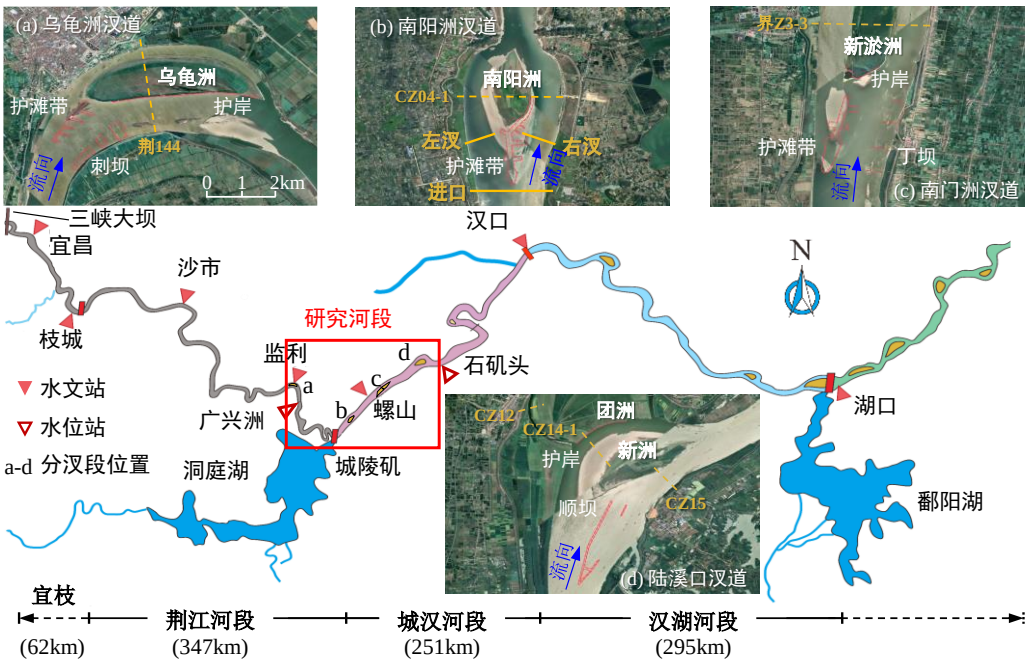

图 1 长江中游监利~石矶头河段示意图

Fig.1 Sketch of the Jianli-Shijitou reach in the Middle Yangtze River

表 1 监利~石矶头分汊河段的河床形态特征参数及整治工程修建情况

Tab.1 Morphological characteristics and regulation projects of bifurcated subreaches in the Jianli-Shijitou reach

汊道名称	分汊类型	主汊	曲率半径/m	分汊系数	放宽率	汊道长宽比	整治工程	竣工时间
南阳洲	顺直	右汊	/	2.04	1.70	2.93	杨林岩水道航道整治工程	2017.9
南门洲	顺直	右汊	/	2.01	1.41	5.54	界牌河段航道整治工程	2000.5
							界牌河段航道整治二期工程	2018.11
乌龟洲	弯曲	右汊	2.93×10^3	2.35	2.30	3.50	窑监河段航道整治一期工程	2012.11
陆溪口	鹅头	右汊(直港)	1.90×10^3	3.68	5.08	1.37	陆溪口航道整治工程	2011.9

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{U})}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y}=\frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{U})}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial y}+\mathbf{S} \tag{1}$$

式中：$\mathbf{U}$ 为守恒变量向量；$\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{G}$ 分别为 x 和 y 方向的对流通量向量；$\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{F}$ 为扩散向量；$\mathbf{S}$ 为源项向量，包括为底坡源项和其他源项两部分。上述变量的表达式如下：

$$\mathbf{U}=\begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \\ hS_k \end{bmatrix},\quad \mathbf{E}=\begin{bmatrix} hu \\ hu^2+\frac{1}{2}gh^2 \\ huv \\ huS_k \end{bmatrix},\quad \mathbf{G}=\begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2+\frac{1}{2}gh^2 \\ hvS_k \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\mathbf{D}=\begin{bmatrix} 0 \\ h(T_{xx}+D_{xx}) \\ h(T_{yx}+D_{yx}) \\ \varepsilon S_{kx} \end{bmatrix},\ \mathbf{F}=\begin{bmatrix} 0 \\ h(T_{xy}+D_{xy}) \\ h(T_{yy}+D_{yy}) \\ \varepsilon S_{ky} \end{bmatrix},\mathbf{S}=\begin{bmatrix} 0 \\ ghS_{bx} \\ ghS_{by} \\ 0 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \\ -\alpha_{sk}\omega_{sk}\left(S_k-S_{*k}\right) \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：h 为水深，u 和 v 分别为 x 和 y 方向的流速；S_{bx} 和 S_{by} 分别为 x 和 y 方向的河床比降；S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x 和 y 方向的摩

阻坡度，可表示为 $S_{fx}=n^2u\sqrt{u^2+v^2}/h^{4/3}$，$S_{fy}=n^2v\sqrt{v^2+u^2}/h^{4/3}$，其中 n 为曼宁糙率系数；T_{xx}、T_{xy}、T_{yx}、T_{yy} 为水深平均的雷诺应力项；D_{xx}、D_{xy}、D_{yx}、D_{yy} 为扩散应力项；ε 为泥沙扩散系数；S_k 和 S_{*k} 分别为第 k 组泥沙的含沙量和水流挟沙力。在计算网格的界面通量时采用 HLL 格式，并采用预估、校正两步格式进行离散求解，其他关键问题处理详见文献[29]。

1.3 数据源

为了反映三峡工程运行前后长江中游监利~石矶头分汊河段的河床冲淤及滩槽调整情况，本文收集了河段内 123 个固定断面地形数据、三峡工程运行前后的 1：20000 水下地形数据。其中三峡工程运用后的水下地形在 2021 年 4 月测量，工程运用前城陵矶以上河段地形在 2002 年 9 月测量，城陵矶以下河段地形在 2001 年 10 月测量。此外，为开展平面二维水沙输移计算，收集了监利站及七里山站 2002 年及 2021 年的悬移质含沙量及级配数据。上述资料来源于《中国河流泥沙公报》（http://mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb/）、长江水利委员会水文局专题科研报告[30]及其测量并发布的数据。在模型验证过程中，本研究采用了声学多普勒流速仪（ADCP）测量的南阳洲分汊段典型断面的流速分布数据。

2 数学模型率定和验证

2.1 计算条件

模型上边界位于监利附近的荆 142 断面，下边界位于石矶头附近的 CZ18-1 断面。由于三峡运用前后河床边界调整明显，需生成两套网格，运用前计算网格共 161522 个，节点 83322 个；运用后计算网格共 190670 个，节点 97555 个。计算网格单元的面积为 599~8964m^2，且对主槽区域进行了局部加密。

研究区域内分汊段多位于城陵矶以下，故以螺山站流量作为代表流量，模拟三峡工程运用前后不同流量级下分汊段的水沙输移过程。选择代表流量级别时，为减小同流量下水位变化的影响，以平均连续 7 日流量作为代表值，同时可得其他站点对应的水沙条件。此外，为对比运用前后同流量级下的分流分沙比变化，选取的代表流量应尽量接近。三峡工程运用前，螺山站洪中枯的代表流量选取为 35500、25800 和 9400 m^3/s；三峡运用后，洪中枯流量选取为 35700、25400 和 9200 m^3/s，对应其他水文/水位站的流量、水位条件(表 2)。模型进口条件给定监利站流量，洞庭湖入汇给定七里山站流量，出口条件给定石矶头站水位。计算时非均匀沙共分成 5 组，基于 2001 年 10 月和 2020 年 12 月河段内的实测床沙级配数据，采用反距离插值法将固定断面床沙级配插值到网格节点上，作为模型率定和验证的初始床沙级配。由于本文采用的水沙数学模型是非恒定流模型，故开展恒定流计算时保持进出口边界条件不变并计算至稳定。采用 2002 年水沙资料进行率定，采用 2021 年的水沙资料进行验证。

表 2 不同流量级下模型的进出口边界条件

Tab. 2 Inlet and outlet boundary conditions at different discharges

流量级	2002 年				2021 年			
	螺山/(m^3/s)	监利/(m^3/s)	七里山/(m^3/s)	石矶头/m	螺山/(m^3/s)	监利/(m^3/s)	七里山/(m^3/s)	石矶头/m
洪水	35500	21600	13800	24.60	35700	26800	9000	25.60
中水	25800	16200	10100	23.23	25400	15900	9600	23.16
枯水	9400	5600	3900	15.75	9200	7300	2100	15.01

2.2 模型率定与验证

率定及验证结果表明，2002 年和 2021 年各站水位计算值与实测值符合良好，绝对误差均在 0.1m 以内（表 3）。表 4 给出了 2002 年不同流量级下的计算与实测的含沙量对比，相对误差小于 2%。相较于 2002 年，2021 年螺山站的含沙量有较大幅度的降低，洪水流量下仅为 0.104 kg/m^3，计算相对误差约为 2%，含沙量降低主要源于上游来沙减少。此外，收集了乌龟洲及南阳洲三峡工程运用后不同流量级下的分流分沙比（表 5）数据用于模型验证，结果表明计算与实测分流分沙比的相对误差均在 10%以内。

图 2 给出了南阳洲及乌龟洲汊道进口及左右汊断面垂线平均流速计算值与实测值的对比。尽管实测时间与计算时段地形均在一定时间差距，但河段内地形改变相对较小，故实测流速可近似验证 2021 年计算流速。在枯水流量下，南阳洲进口及左右汊断面平均流速的计算值分别为 0.80、0.41 和 1.07m/s，与实测值 0.89、0.27 和 1.02m/s 较接近，相对误差分别为 10.1%、51.9%和 4.9%，由于左汊实测点偏少导致相对误差较大。在中水流量下，南阳洲进口及左右汊断面平均流速的计算值分别为 0.82、0.74 和 1.20m/s，与实测值 0.71、0.72 和 1.23m/s 较接近，相对误差分别为 15.5%、2.7%和 2.4%。测次 2#时左汊断面

中间流速突然降低，可能与测量时 ADCP 流速仪受其他过往船舶及鱼类活动影响，导致计算误差偏大。对于乌龟洲，进口及右汊流速基本符合，但在支汊内计算流速略小于实测值。整体看来，计算的流速横向分布与实测结果符合良好。此外，含沙量的模拟结果与实测值总体符合较好，但仍存在一定的误差（图 3）。在枯水流量下，南阳洲进口及左右汊断面平均含沙量的计算值分别为 0.035、0.024 和 0.035kg/m^3，对应的实测值分别为 0.046、0.035 和 0.045kg/m^3，绝对误差均约为 0.010kg/m^3。在中水流量下，南阳洲进口及左右汊断面平均含沙量的计算值分别为 0.026、0.020 和 0.043kg/m^3，对应的实测值分别为 0.032、0.029 和 0.052kg/m^3，绝对误差均小于为 0.010kg/m^3。总体而言，含沙量的模拟精度比流速略低，原因主要在于研究河段的含沙量较低，要精准模拟的难度较高，且本文模型采用张瑞瑾公式计算挟沙力，流速均为挟沙力公式中的重要参数，故流速的模拟误差也会导致含沙量的计算误差。

表 3 2002 年及 2021 年计算与实测水位的绝对误差

Tab.3 Absolute errors between the calculated and measured water levels in 2002 and 2021

流量级	2002 年水位绝对误差/m			2021 年水位绝对误差/m			
	监利	莲花塘	螺山	监利	广兴洲	莲花塘	螺山
洪水	0.01	-0.09	-0.07	-0.05	0	-0.04	0.01
中水	0.04	-0.06	0.00	-0.05	-0.03	0.00	0.02
枯水	-0.05	-0.08	-0.05	0.03	-0.02	-0.04	-0.01

表 4 2002 年及 2021 年螺山站计算与实测含沙量

Tab.4 Comparisons between the calculated and measured sediment concentrations at Luoshan in 2002 and 2021

流量级	2002 年			2021 年		
	计算/(kg/m^3)	实测/(kg/m^3)	相对误差	计算/(kg/m^3)	实测/(kg/m^3)	相对误差
洪水	0.922	0.928	-2%	0.106	0.104	-2%
中水	0.456	0.467	-2%	0.068	0.068	0
枯水	0.171	0.168	-2%	0.074	0.074	0

表 5 南阳洲及乌龟洲汊道计算与实测的分沙比 1)

Tab.5 Comparisons between the calculated and measured sediment diversion ratios in the bifurcated reaches of Nanyangzhou and Wuguizhou

测次	位置	时间	流量/(m^3/s)	含沙量/(kg/m^3)	主汊实测分流比	主汊计算分流比	主汊实测分沙比	主汊计算分沙比
1#	南阳洲	2023.2	8560	0.036	0.86	0.87	0.88	0.88
2#	南阳洲	2023.6	22600	0.054	0.71	0.72	0.69	0.75
3#[31]	乌龟洲	2019.4	10000	0.064	0.92	0.91	—	—
4#[32]	乌龟洲	2017.7	22700	0.86	0.89	0.91	0.91	0.98

1）南阳洲汊道测量时代表流量和含沙量为螺山站数据，乌龟洲汊道测量时代表流量和含沙量为监利站数据。

3 三峡运用后汊道形态及分流分沙比调整特征

3.1 河床边界条件调整

3.1.1 河床冲淤变化　根据 2003 年宜昌站 5000、30000 和 50000 m3/s 流量下的水面线为参照，将河槽划分为枯水、平滩和洪水河槽，各年份采用断面法计算河槽冲淤量[28]。长江中游监利~石矶头河段在三峡工程运用后，由于下泄水流的含沙量大幅减小，河床冲刷程度逐渐加剧。在三峡工程运用前期（2003-2012 年），河段内冲刷强度相对较小，枯水与洪水河槽分别累计冲刷 1.02×108、1.42×108m3。造成该现象的原因在于此时冲刷主要发生于近坝段，至研究河段内含沙量已有较大恢复。但在 2013 年后，随着冲刷重心下移，该河段内冲刷强度明显增加。至 2021 年，枯水与洪水河槽分别累计冲刷 3.78×108、4.65×108m3，河床冲刷以枯水河槽为主，约占洪水河槽累计冲刷量的 81%（图 4a）。图 4b 给出了 2003-2021 年各分汊段平滩河槽的多年平均冲淤强度，两个顺直分汊段表现为右汊冲刷，左汊淤积，而河道弯曲曲率更大的乌龟洲及陆溪口汊道的左右汊均表现为冲刷态势。乌龟洲两汊冲刷强度较为接近，左右汊冲刷强度分别为 6.07×104、8.11×104m3/(km·a)，且右汊冲刷主要集中于汊道前段。南阳洲左汊为支汊，淤积萎缩态势明显，淤积强度达 16.93×104m3/(km·a)，且淤积分布较为均匀。南门洲汊道位于界牌长顺直河段内，左汊总体上呈微淤态势，右汊大幅度冲刷，冲刷强度达 27.73×104m3/(km·a)。从冲淤分布来看，南门洲右汊入口前大幅冲刷，左汊则相反，汊道内冲淤也与之对应。

陆溪口左汊（中港）冲淤变化不大，右汊（直港）的冲刷强度达 23.22×104m3/(km • a)。以往研究常认为短汊具有比降优势，更易向冲刷发展[3,11]，在乌龟洲及陆溪口汊道均得以验证，流程更短的右汊具有更强的冲刷强度。

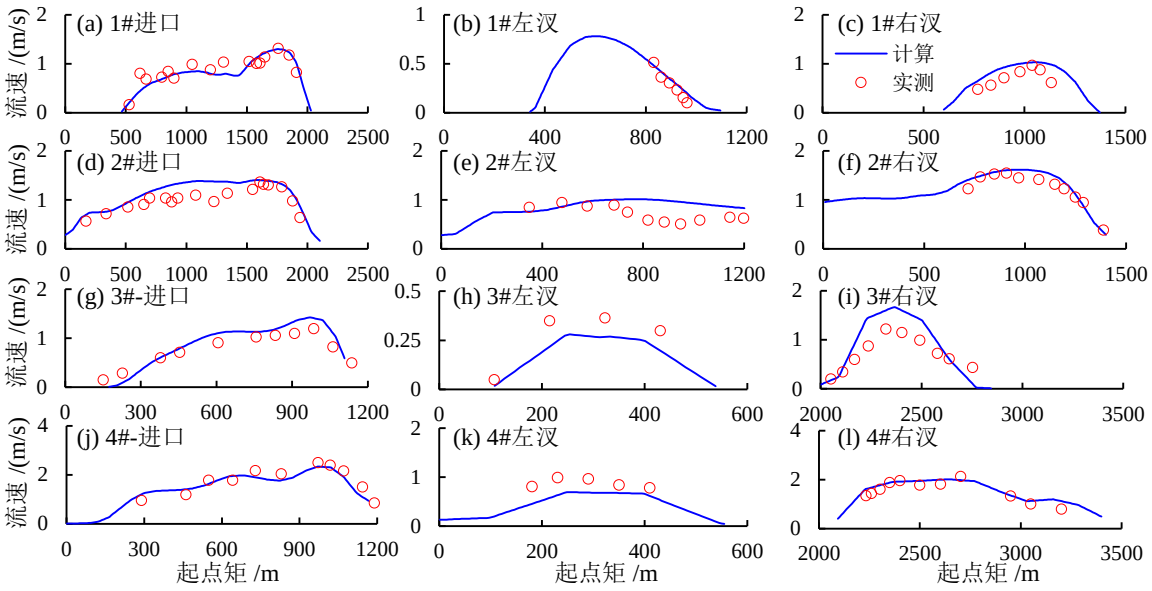

图 2 南阳洲及乌龟洲典型断面垂线平均流速的计算值与实测值对比

Fig. 2 Comparisons between the calculated and measured depth-averaged velocities at different sections in the bifurcated reaches of Nanyangzhou and Wuguizhou

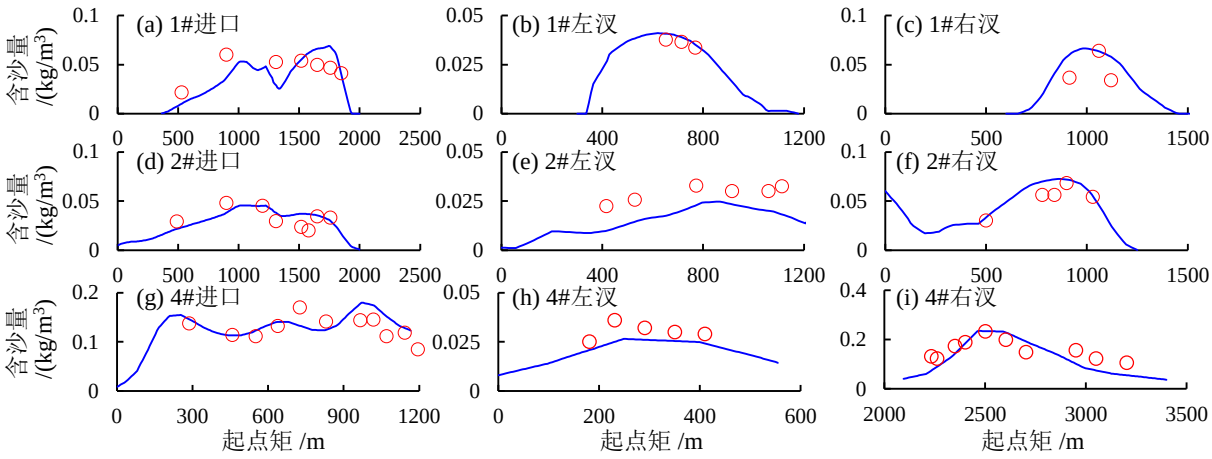

图 3 南阳洲及乌龟洲典型断面垂线平均含沙量的计算值与实测值对比

Fig. 3 Comparisons between the calculated and measured depth-averaged sediment concentrations at different sections in the bifurcated reaches of Nanyangzhou and Wuguizhou

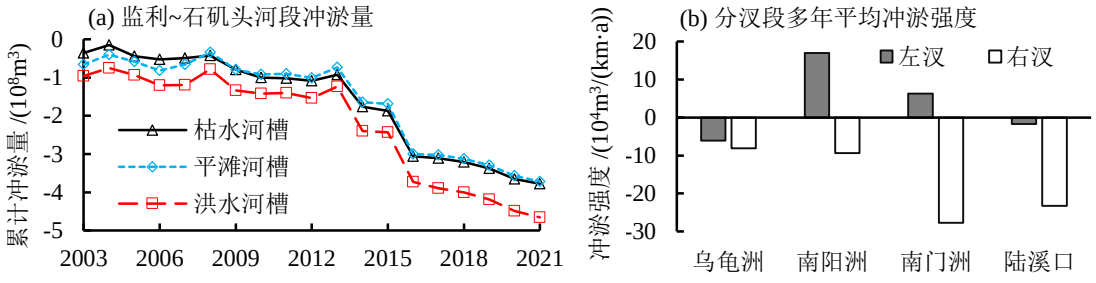

图 4 2003-2021 年研究河道累计冲淤量变化

Fig.4 Variation in the cumulative channel deformation volumes in 2003-2021

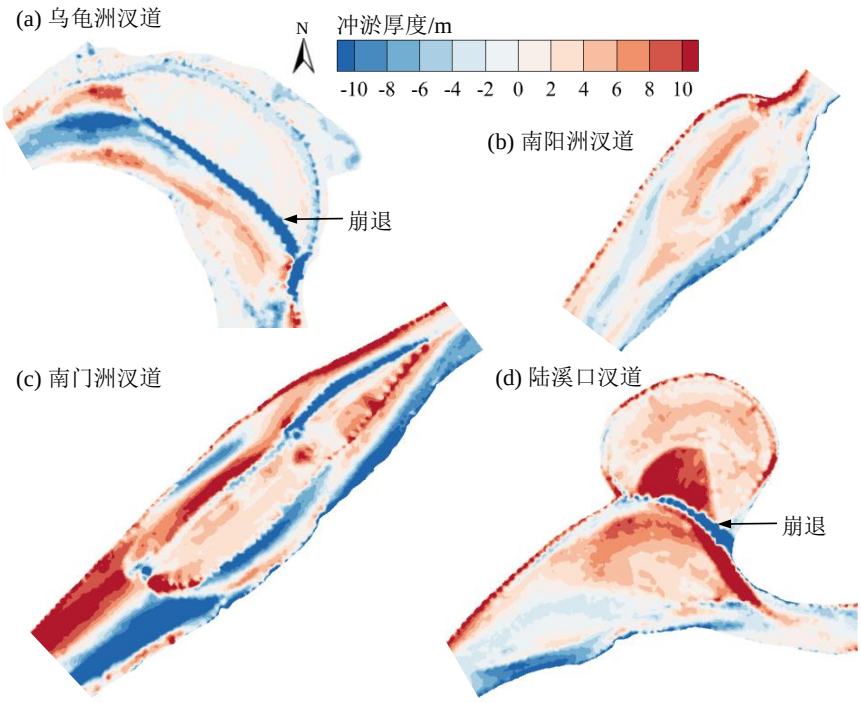

图 5 2003-2021 年典型分汊河段河床冲淤厚度的平面分布

Fig.5 Distributions of riverbed erosion and deposition depths in typical bifurcated reaches in 2003-2021

3.1.2 河槽横断面形态调整 图 6 给出了三峡运用前、运用后（包括整治工程修建前后）的分汊段典型横断面形态变化。三峡工程运用后，各汊道整体呈下切趋势，伴随有崩岸发生，导致河槽展宽。在弯曲分汊及鹅头分汊段，乌龟洲右缘和新洲右缘分别崩退约 40m 和 200m，但在修建护岸工程后，江心洲不再崩退（图 6a、图 6d）。顺直分汊段江心洲头部均修建有护滩带，从图 6b 和图 6c 可以看出，工程修建后促进了江心洲的淤高，使得南阳洲右汊及南门洲左汊河宽有所减小。

从整个分汊段的平滩河槽特征参数来看，各汊道平滩河宽呈增加趋势，且弯曲分汊及鹅头分汊段的展宽幅度更大，说明在弯道水流作用下，江心洲及凹岸一侧更易崩退进而扩宽河槽。各分汊段平滩水深均增加 20%，约为平滩河宽变化率的 2 倍，河槽的冲深程度大于展宽程度。对于弯曲分汊及鹅头分汊段，两汊断面重心均不断下移，表现为窄深化发展，但右汊发展程度更大（图 6a、图 6d）。而在顺直分汊段，滩槽调整更为复杂，左右汊形态变化有所不同，左汊边滩发生淤积，右汊主槽普遍冲深，这也与口门区域的冲淤分布对应，将更利于右汊入流。

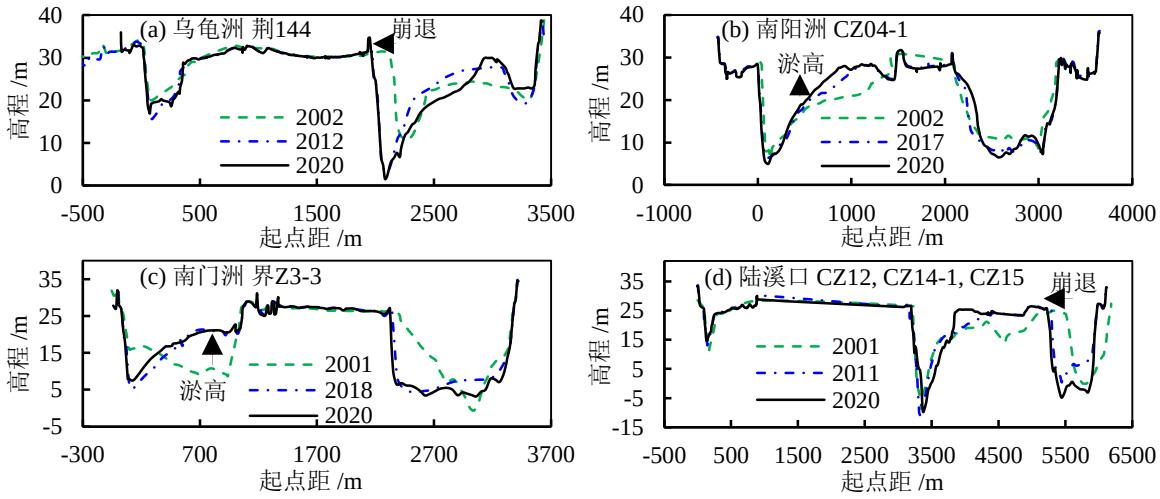

图 6 不同分汊段典型断面形态变化

Fig.6 Variations in cross-sectional profiles at typical sections in different bifurcated reaches

3.1.3 平面形态调整 三峡工程运用后，研究河段内江心洲出露面积呈增加趋势。采用刘雨晨等[33]对长江中游江心洲滩的划分标准，枯水位以上（以螺山站作为代表水位，20m—1985 国家高程基准）作为江心洲出露面积。在乌龟洲及南阳洲头部整治工程实施后，江心洲洲头淤积显著，江心洲面积由 6.33、3.62km^{2}分别增长至 6.85、4.67km^2，增幅约 8%、29%。在南门洲汊道分流区内，2002 年汛前右汊入口存在洲滩，至 2021 年该洲滩已消失，而洲头左侧修建的护滩带使得左汊入口产生较大淤积，缩窄左汊河宽，不利于该汊入流条件（图 7c）。新洲形态发生较大改变，洲滩整体左移，右汊（直港）展宽，左汊（中港）缩窄，右汊迎流条件大幅改善。

2002~2021 年间，各分汊段内的深泓位置也产生较大调整。乌龟洲汊道入口右岸修建有边滩守护工程，使得深泓远离右岸，一定程度上改善了左汊的入流条件（图 7a）。乌龟洲与团洲右缘均发生崩退，使得汊道深泓位置较 2002 年更贴近江心洲。南阳洲 2002 年进口段两汊深泓位置距离较远，到 2021 年深泓往中间摆动，水流集中更利于主汊分流（图 7b）。由于汊道入口处洲滩格局变化剧烈，南门洲深泓位置由靠近左汊摆动至靠近右汊，分流格局也将随之改变（图 7c）。总体看来，顺直分汊的深泓位置主要受到江心洲洲头低滩冲淤影响，而弯曲及鹅头分汊段的深泓往凹岸侧移动。

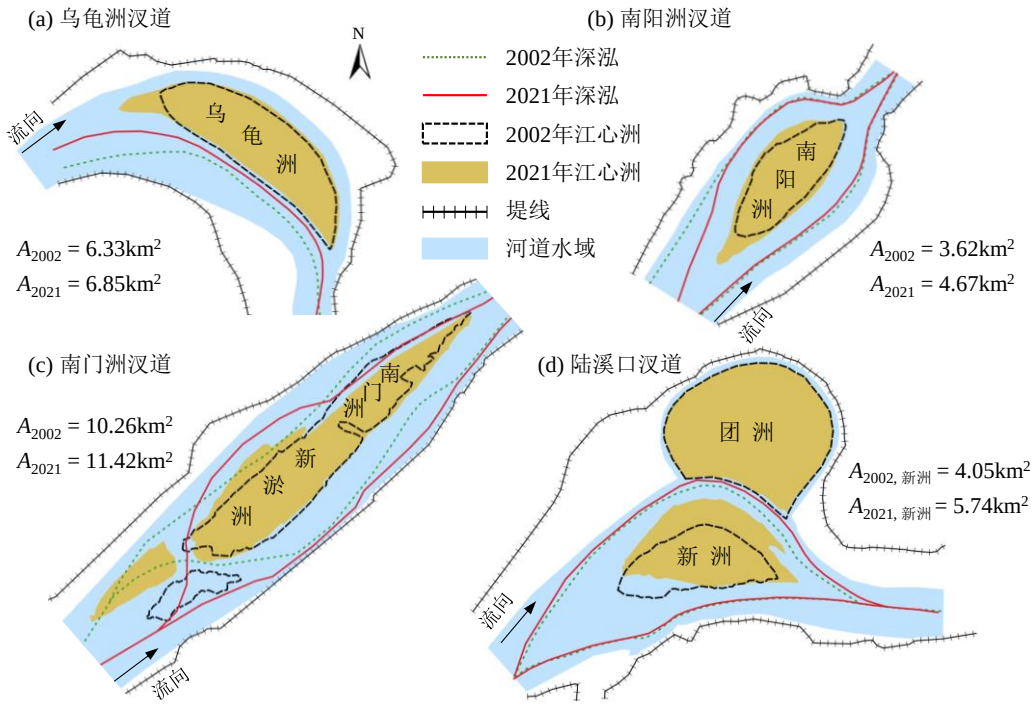

图 7 不同类型分汊河段平面形态变化

Fig.7 Changes in planform morphology of different bifurcated reaches

3.2 不同流量级下分流分沙比调整规律

本文基于二维水沙模型的计算结果，统计分析了三峡建库前后洪中枯流量下各分汊段的分流分沙比。计算各汊道进口断面流量及输沙量，除以汊道入口前总流量及输沙量，即得分流比与分沙比。

3.2.1 分流比调整 三峡运用后，各分汊段不同流量级下的分流比产生较大变化，冲刷强度大的汊道分流格局调整更为剧烈（图 8）。乌龟洲右汊为主汊，各流量级下分流比均在 0.90 以上，且在工程运用前后没有发生明显变化。而南阳洲在左汊淤积，右汊冲刷的情况下，右汊作为主汊地位进一步稳固，洪中枯流量级下分流比由 0.58，0.59 和 0.79 提升至 0.68，0.72 和 0.87。在南门洲与陆溪口右汊均发生较强冲刷，发展速率远大于左汊，使得主支汊易位。三峡工程运用前，南门洲左汊枯水时为主汊，伴随流量增加，分流比从 0.58 减少至 0.46。在枯水时，右汊入口处低滩阻碍入流，但随流量增加阻碍作用减弱，分流比相应增加。至 2021 年时，右汊入口处低滩消失，且汊道内冲刷较强，右汊转变为主汊，洪中枯流量级下的分流比为 0.78，0.82 和 0.96，增幅为 46%，55%和 105%。陆溪口右汊分流比变化情况相似，在入流条件改善和汊道冲刷的条件下，由支汊转变为主汊，枯水流量级下分流比由 0.40 提升至 0.81，增幅达 100%，而洪中流量级下增幅约为 50%。

在三峡工程运用前，南门洲与陆溪口的主汊均表现为分流比随流量增加而增加，即主汊为洪水倾向汊道[34]，乌龟洲与南阳洲汊道则相反，主汊为枯水倾向汊道。而在三峡工程运用后，各分汊段主汊均为枯水倾向汊道，说明枯水倾向汊道发展速率大于洪水倾向汊道，原因可能在于洪水流量级频率下降，枯水河槽冲刷下切。

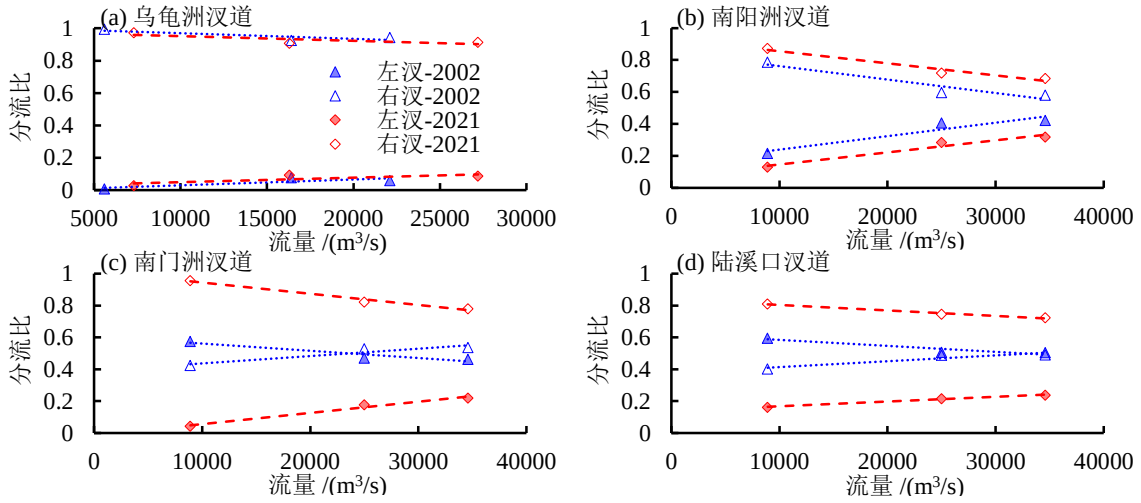

图 8 三峡工程运用前后不同分汊河段的分流比变化

Fig.8 Changes of diversion flow ratio in the bifurcated reaches before and after the Three Gorges Project (TGP)

3.2.2 分沙比调整　图 9 给出了三峡工程运用前后各分汊段的分沙比变化情况，分沙格局调整与分流格局类似。乌龟洲与南阳洲分流比变化较小，其分沙比变化也不大，其中南阳洲洪中枯流量级下分沙比由 0.64，0.68 和 0.87 提升至 0.73，0.75 和 0.88。而分流格局调整剧烈的南门洲与陆溪口汊道分沙比也产生较大变化，其中陆溪口由左汊（中港）分沙比较大转变为右汊（直港）分沙比较大，右汊分沙比平均增加约 0.39。此外，在三峡工程运用后，各分汊河段主汊均表现为分沙比随流量增加减少，与分流比调整规律一致。

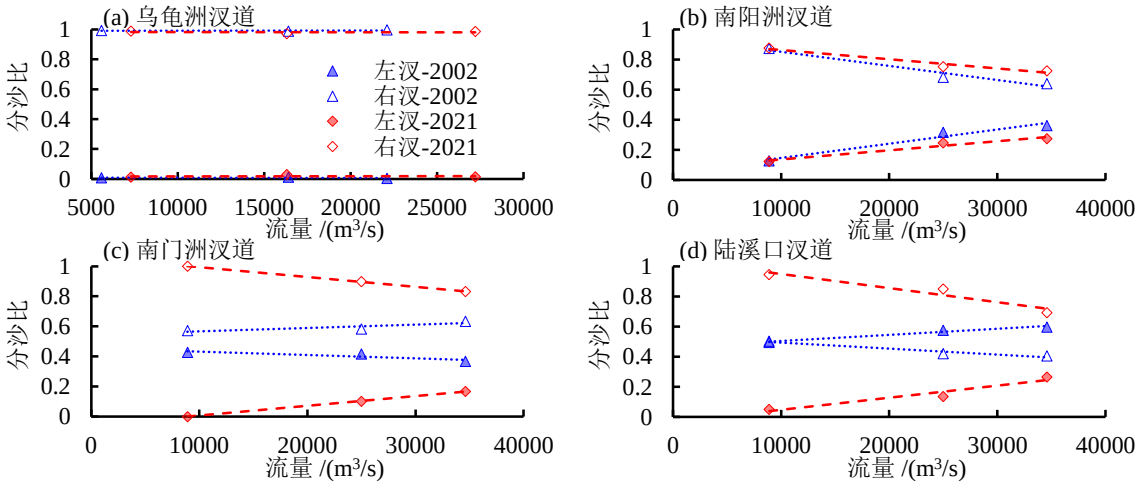

图 9 三峡运用前后不同分汊河段的分沙比变化

Fig.9 Changes of sediment diversion ratio in the bifurcated reaches before and after the TGP

为进一步反映分流分沙比之间的关系，统计了 4 个分汊段右汊各流量级下分流分沙比的变化量，并给出了分流比变化量与分沙比变化量之间的相关关系（图 10）。结果表明，2002-2021 年分流比变化量与分沙比变化量呈明显正相关关系（显著性水平大于 0.99）。三峡工程运用后分流比改变程度略大于分沙比，河床冲刷及整治工程对分流比和分沙比的影响几乎保持一致。

3.3 分流分沙比调整成因分析

分汊河段内分流分沙比调整，与分流区主流摆动，汊道内河床冲淤，洲滩格局变化等因素密切相关[35]。三峡工程运用后，长江中游河道普遍冲刷下切，而整治工程修建进一步改变了江心洲的平面形态，最终使分流分沙格局产生较大调整。因此，本节从汊道冲淤变化及平面形态改变两方面分析分流分沙格局调整的影响因素。

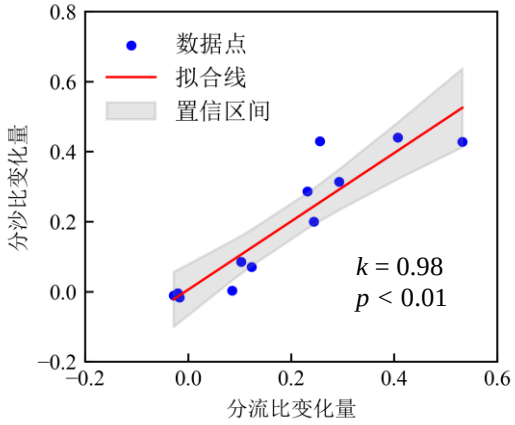

图 10 分流比变化量与分沙比变化量的相关关系

Fig.10 Correlation between the variation degrees in sediment diversion ratio and flow diversion ratio

3.3.1 汊道冲淤的影响 为反映两汊间的冲淤差距，将主，支汊的冲淤厚度之差定义为相对冲淤厚度，且相对冲刷为正，但由于部分汊道发生了主支汊易位，则以三峡工程运用后的分流格局为准。研究河段内，4 个分汊段右汊均为主汊，且除乌龟洲外，右汊冲刷厚度均大于左汊。图 11 给出了 2002-2021 年间不同流量级下分流分沙比变化量与相对冲淤厚度间的关系，结果表明在各流量级别下，随相对冲刷厚度增加，分流分沙比变化量也越大。线性拟合结果表明，主汊相对支汊冲刷厚度每增加 1.0m，洪水至枯水流量下分流比增加约 0.039~0.065，增幅约 7.6~15.8%；分沙比增加约 0.044~0.059，增幅约 8.2~11.8%。此外，南门洲汊道与陆溪口汊道在洪中水流量下的相对冲淤厚度接近，但南门洲分流比变化量略大于陆溪口汊道，说明顺直分汊的分流分沙比对汊道冲淤调整更为敏感，而鹅头分汊还可能受到口门冲淤、分流角度等其他因素的影响。

比较不同流量级下的分流比变化量可发现，枯水时变化量最大，洪水时变化量最小，相对冲淤厚度对分流比的影响随流量增加而减少。造成该现象的原因在于，三峡工程运用后汊道冲淤主要集中在枯水河槽，枯水河槽的冲刷厚度更大，且同流量下枯水位降低，水深变幅更大，对分流比的影响也更大。在同一相对冲淤厚度条件下，分沙比变化量也随流量增加而减少，但整体上冲淤厚度对分沙格局的影响略小于分流。

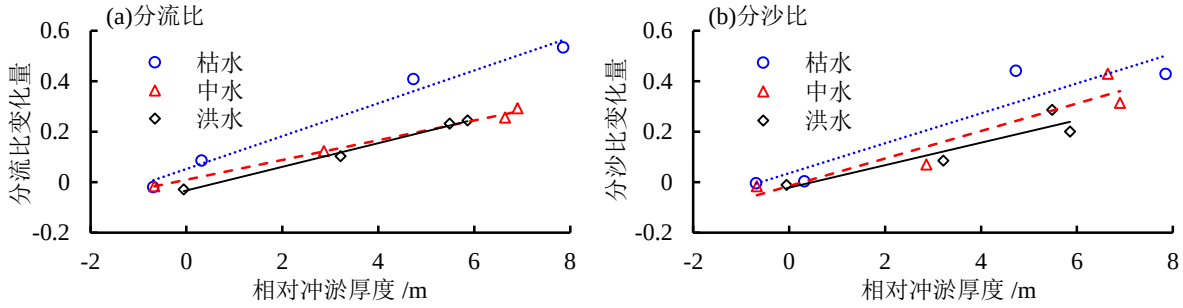

图 11 分流分沙比变化量与相对冲淤厚度的相关关系

Fig.11 Correlations between sediment and flow diversion ratio changes and relative scour-deposition thickness

33.2 平面形态的影响 三峡工程运用后，洲滩形态及汊道进口地形发生显著改变，本节以南阳洲汊道段为例，分析平面形态改变对分流分沙格局的影响。对比枯水流量下 2002 年与 2021 年分汊段的流速分布，结果表明 2021 年分流点位置明显前移。造成这种现象的原因在于，整治工程修建使得南阳洲头部低滩向上游淤积，水流提前分股。此外，由于分流区内左岸边滩淤积，缩窄流路宽度，综合影响下使得左汊入流条件降低，右汊枯水流量下分流比增加（图 12a、图 12d）。伴随流量增加，至中洪流量时，江心洲低滩被淹没，分流格局主要受高滩影响。2002-2021 年间，南阳洲头部高滩发生崩退左移，分流点也随之改变，导致右汊入口河宽增加，进而使得分流比增加，左汊则反之。

对比两汊流速分布，右汊流速明显大于左汊，挟沙能力也更强。三峡工程运用后，长江中游泥沙运动以悬移质为主，故挟沙能力更强的右汊含沙量高于左汊。此外，图 12e 和图 12f 可以看出左汊进口处流速呈先减小后增加的趋势，表明左汊入口河床高程抬升，一定程度上阻碍了泥沙输移。而在 2002-2021 年，南门洲左汊入口呈淤积态势，进一步降低了进入汊道的沙量，使得分沙比减少。

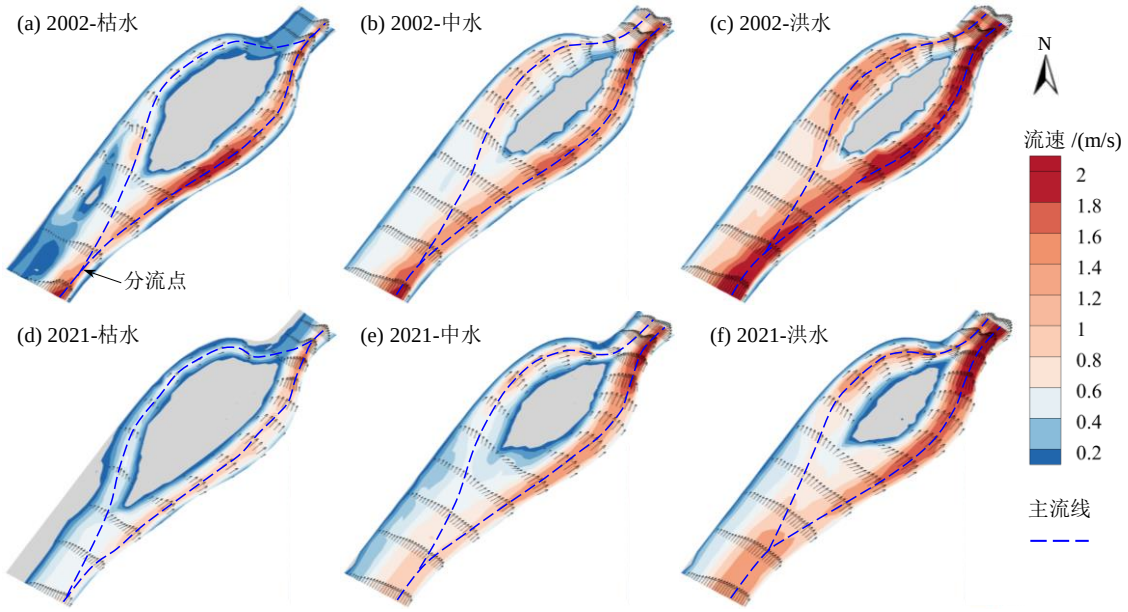

图 12 南阳洲汊道 2002 年及 2021 年不同流量下垂线平均流速分布

Fig.12 Depth-averaged velocity vectors in the bifurcated reach of Nanyangzhou under different discharges in 2002 and 2021

4 讨论

现有研究成果表明，影响汊道分流关系调整的驱动因子主要包括三方面：干流来水来沙条件、分流口水力要素变化及汊道的冲淤变化[3, 5]。本文为了反映不同驱动因子对于分流比的影响程度，选择了 6 个特征变量开展对分流比变化量的回归分析（图 13）。由于本文在每个流量级下的数据点只有 4 组，补充收集了实测主汊分流比[11, 28, 31, 32]，保证每个流量级下数据均为 9 组。采用岭回归分析方法[36]开展重要性分析，该方法适用于特征变量间存在多重共线性且数据集较小的情况。计算结果表明，洪中枯流量级下模型的决定系数均在 0.90 以上，说明岭回归能够较好反映各个特征变量的重要程度。对比不同特征变量的回归系数，相对冲淤厚度在洪中枯流量级下均为最大值，说明其对分流比调整的影响最大，其次则为口门的冲淤厚度。此外，这两个特征变量的回归系数都展现出随流量级减小而增加的趋势，与 4.3.1 节所得结论一致。而流量级的频率变化及来沙不饱和度对于分流比调整的直接影响较小，原因可能在于来水来沙条件首先影响了河道地形，之后再反映至分流比。对于分汊系数，在洪水流量下呈正相关，而枯水流量下呈负相关，说明在流量较大时，鹅头及弯曲分汊的短汊（主汊）的分流比会随着弯曲程度增加而增加，而流量较小时则相反，这可能与大流量时短汊的流路衔接更顺直有关[37]。

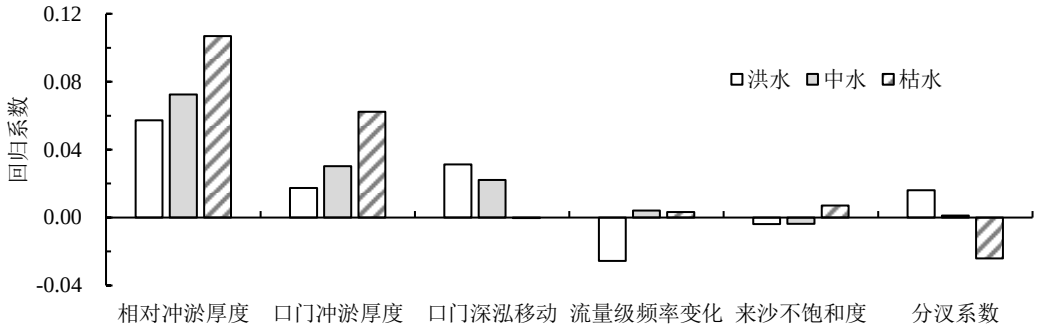

图 13 不同特征变量对分流比变化量的影响程度

Fig.13 Impacts of different characteristic variables on the flow diversion ratio changes

5 结论

本文以监利~石矶头河段为研究对象，通过对比三峡工程运用前后的实测水沙、地形资料，分析了冲刷条件与整治工程综合影响下 4 个分汊河段的调整规律，同时采用二维水沙模型计算了三峡工程运用前后不同流量级下分流分沙比变化，阐明了典型分汊段分流分沙格局调整的主要因素。主要结论如下：

（1）2002-2022 年期间，监利~石矶头河段整体呈冲刷态势，枯水河槽占洪水河槽累计冲刷量的 81%。顺直分汊段两汊有冲有淤，弯曲及鹅头分汊段两汊均冲，且短汊冲刷占优。整治工程修建阻止高滩崩退，促进低滩淤积，分汊段平滩水深增

长率约为平滩河宽的 2 倍，断面形态向窄深化发展。

（2）三峡工程运用后冲刷强度大的汊道发展为主汊，且各类分汊段主汊的分流比均表现为随流量增加而减小。南门洲及陆溪口右汊分流比在三峡运用后均大幅增加，枯水流量下流比分别由 0.42、0.40 提升至 0.95、0.81，增幅均超 100%，发生主支汊易位。分沙比主要受分流比影响，分沙比变化量与分流比变化量几乎一致。

（3）汊道不平衡冲淤变化是分流分沙格局调整的主要成因，且影响随流量增大而减小，两汊相对冲刷厚度每增加 1.0m，冲刷更强的汊道洪水至枯水流量下分流比增加约 7.6~15.8%，分沙比增加约 8.2~11.8%。汊道分流区内平面形态进一步影响了分流分沙比，枯水流量下南门洲左汊入口处低滩淤积不利于迎流条件，而在洪中流量下受高滩崩退左移影响，左汊分流比进一步下降。

6 参考文献

[1] 王英珍, 夏军强, 邓珊珊等. 黄河下游游荡段床面冲淤与滩岸变形耦合模型. 中国科学:技术科学, 2022, 52 (8): 1285-1298.

[2] Hu Y, Deng J, Li Y, et al. Flow resistance adjustments of channel and bars in the middle reaches of the Yangtze River in response to the operation of the Three Gorges Dam. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32, 2013–2035.

[3] 李明, 胡春宏. 三峡工程运用后坝下游分汊型河道演变与调整机理研究. 泥沙研究, 2017, 42(6):1-7.

[4] 杨绪海, 熊海滨, 李义天, 等. 三峡水库蓄水后下荆江河段典型洲滩调整机理. 湖泊科学, 2021, 33(3):819-829.

[5] 方娟娟, 付菁, 杨云平, 等. 长江下游仪征河段汊道分流属性及航道滩槽演变机制. 湖泊科学, 2022, 34 (4): 1335-1346.

[6] 夏军, 陈进. 从防御 2020 年长江洪水看新时代防洪战略. 中国科学:地球科学, 2021, 51 (1): 27-34.

[7] 杨云平, 李明, 刘万利, 等. 长江荆江河段滩槽演变与航道水深资源提升关系. 水科学进展, 2022, 33(2): 240-252.

[8] Tong H L., Yi K W, Xie K W, et al. Morphological environment survey and hydrodynamic modeling of a large bifurcation-confluence complex in Yangtze River, China. The Science of the Total Environment, 2020, 737: 139705.

[9] Yang Y, Li M, Liu W, et al. Relationship between potential waterway depth improvement and evolution of the Jingjiang Reach of the Yangtze River in China. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33: 547–575.

[10] Qing C Y, Colin D R, Jonathan M, et al. Impact evaluation of instream bar management using morphodynamic modelling. Journal of Environmental Management, 2022, 318: 115564.

[11] 朱玲玲, 葛华, 李义天等. 三峡水库蓄水后长江中游分汊河道演变机理及趋势. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23 (2): 246-258.

[12] Ragno N, Redolfi M, Tubino M. Quasi-universal length scale of river anabranches. Geophysical Research Letters, 2022, 49: e2022GL099928.

[13] Hundey E J, &Ashmore P E. Length scale of braided river morphology. Water Resources Research, 2019, 45(8): W08409

[14] 刘晓芳, 黄河清, 邓彩云. 江心洲平衡形态水动力条件的理论分析. 水科学进展, 2014, 25(4): 477-483.

[15] 丁君松, 丘凤莲. 汊道分流分沙计算. 泥沙研究, 1981, 2: 58-64.

[16] 童朝锋, 严以新, 孟艳秋, 等. 分汊河道分流比估算方法. 水利水电科技进展, 2011, 31(6): 7-9+90.

[17] 陈立, 陈帆, 张为等. 荆江沙市段分流比计算公式的改进及应用. 湖泊科学, 2020, 32(3): 840-849.

[18] 韩其为, 何明民, 陈显维. 汊道悬移质分沙模型. 泥沙研究, 1992, 1: 46-52.

[19] 余新明,谈广鸣,张悦. 河道分流分沙计算模式研究进展. 水利水电科技进展, 2006, 3: 67-71.

[20] Bertoldi W, &Tubino M. River bifurcations: Experimental observations on equilibrium configurations. Water Resources Research, 2007, 43, W10437.

[21] Marra W A, Parsons, D R, Kleinhans M G, et al. Near-bed and surface flow division patterns in experimental river bifurcations. Water Resources Research, 2014, 50: 1506–1530.

[22] 王森, 李坤芳, 刘兴年等. 植被影响下的弯曲分汊河道水沙特性 . 工程科学与技术.

[23] 李琳琳, 余锡平. 分汊河道分沙的三维数值模型. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(9):1492-1497.

[24] 刘亚, 姚仕明, 谢炎等. 分汊河道主支汊交替主导因子的转换模拟. 水科学进展, 2020, 31(3): 348-355.

[25] Hao L, Dimitrios K F, Arthur R S, et al. Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flows and energy losses. Advances in Water Resources, 2018, 117: 120-139.

[26] 杨云平, 周良平, 张华庆 等. 三峡工程运行后荆江河段分汇段航道水深资源及碍航驱动机制. 湖泊科学, 2023, 35(2):

684-695.
[27] 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.
[28] 陈帆. 新水沙条件下分汊河段调整响应机理及模拟研究[学位论文]. 武汉大学, 2020.
[29] Xia J Q, Lin B L, Falconer R A, et al. Modelling dam-break flows over mobile beds using a 2D coupled approach. Advances in Water Resources, 2010, 33: 171-183
[30] 长江水利委员会水文局. 2018 年度三峡水库进出库水沙特性、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, 2019.
[31] Ban X, Qi T, Wang H Z, et al. Comprehensive environmental flows assessment for multi-guilds in the riparian habitats of the Yangtze River. Water Resources Research, 2022, 58: e2021WR030408.
[32] 魏林云, 李强, 谢静红. 长江下荆江监利河段乌龟洲汉道分流分沙变化及演变特征分析. 水利水电快报, 2021, 42 (2): 24-30.
[33] 刘雨晨, 夏军强, 周美蓉, 等. 三峡建库后长江中游江心洲滩面积调整特点. 泥沙研究, 2023, 48(3): 30-37.
[34] 韩剑桥, 张为, 袁晶, 等. 三峡水库下游分汊河道滩槽调整及其对水文过程的响应. 水科学进展, 2018, 29(2): 186-195.
[35] 姚仕明, 张超, 王龙, 等. 分汊河道水流运动特性研究. 水力发电学报, 2006, 3: 49-52+57.
[36] Si W, Gupta H V, Bao W, et al. Improved dynamic system response curve method for real-time flood forecast updating. Water Resources Research, 2019, 55, 7493–7519.
[37] 章广越, 谈广鸣, 张为, 等. 冲刷及整治工程叠加作用下武汉河段滩槽调整特征与成因. 水科学进展, 2024, 35 (4): 629-644.