J. Lake Sci.(湖泊科学),2026,38(6):000-000
DOI 10.18307/2026.0650
©2026 by *Journal of Lake Sciences*

三峡水库运行后长江中游（城陵矶至九江段）汊道分流比动态调整模式研究

张　为[1**]，程曦瑶[1]，李思璇[2]，李明[3]

（1：武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室，湖北 武汉 430072）
（2：长江水利委员会水文局，武汉 430010）
（3：长江航道规划设计研究院，武汉 430040）

摘要：三峡水库运行后改变了长江中下游水沙过程，引起分汊河道冲淤调整特性与相对平衡汊道分流关系变化，对防洪、航运、河道治理等产生联动影响。针对目前对梯级水库运行改变水沙条件的影响下分汊河道调整模式认识还存在局限的问题，本文根据 2003—2023 年实测水文和地形资料，以城陵矶至九江河段的十一个典型分汊河道为例，以基于动态分流比的分汊河道类别划分方法为基础，研究了分汊河道类型转化现象并分析其驱动机制。研究表明：①基于动态分流比的汊河类别划分方法在三峡水库不同运行方式下，对长江中下游分汊河道进行分类并识别其类型转化的适应性较好；②三峡水库蓄水后，分汊河道在不同时期存在不同的调整模式，2013 年以后城陵矶至九江河段以第Ⅰ类（主汊对应枯水倾向汊河）分汊河道为主，第Ⅱ类（主汊对应洪水倾向汊河）分汊河道中界牌心滩分汊段、陆溪口、嘉鱼、燕子窝河道发生了向第Ⅰ类分汊河道的转化，由“主消支长”转变为“主长支消”；③对于第Ⅱ类分汊河道向第Ⅰ类分汊河道的转化，水沙条件改变是主要原因，而航道整治工程在大部分分汊河道中表现出对类型转化的促进作用，2013 年以后 20000~30000m^3/s 流量级出现频率增大、持续时间增长，导致该流量级下主流所在汊道冲刷加剧，部分汊道转化为第Ⅰ类分汊河道，可以预见未来长江中下游分汊河型都将以向第Ⅰ类分汊河型发展，表现为“主长支消”的调整模式为主。
关键词：分汊河道；汊道调整；水沙变化；三峡水库；长江中游

Research on the Dynamic Adjustment Model for the Flow Division Ratio in the middle reaches of the Yangtze River (Channels from Chenglingji to Jiujiang) Following the Operation of the Three Gorges Reservoir

Zhang Wei[1**], Cheng Xiyao[1], Li Sixuan[2], Li Ming[3]
（1：*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China*)
（2：*Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P.R.China*）
（3：*Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute，Wuhan 430040, P.R.China*）

Abstract：Abstract: The operation of the Three Gorges Reservoir has altered water and sediment processes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. This has further affected scouring and sedimentation adjustments in branch channels, as well

×2025-12-29 收稿；2026-05-06 收修改稿.
国家自然科学基金项目（U2340217）资助。
** 通信作者；E-mail：zw97082@126.com.

as flow distribution in balanced river channels. These changes produce cascading effects on flood control, navigation, and river regulation. Current studies lack a clear understanding of how branch channels adjust to water and sediment changes induced by cascade reservoir operation. Using measured hydrological and topographic data from 2003 to 2023, this study selected eleven typical distributary channels in the Chenglingji-Jiujiang section as research objects. A classification method based on dynamic diversion ratios was adopted to explore the type conversion of distributary channels and to clarify the driving mechanisms. The results show three key findings. First, the classification method based on dynamic diversion ratios works well for identifying branch channel types and typological transitions in the middle and lower Yangtze River under different operation scenarios of the Three Gorges Reservoir. Second, branch channels showed distinct adjustment patterns in different periods after reservoir impoundment. Since 2013, Type I branch channels (main channel dominated by low flow) have become dominant in the Chenglingji-Jiujiang section. Several Type II branch channels (main channel prone to low flow), including the Jiepaoxin Sandbar branch section, Luxi Kou channel, Jiayu channel, and Yanzowo channel, have turned into Type I channels. Their evolution pattern has shifted from “main channel shortening and branch channel lengthening” to “main channel lengthening and branch channel shortening”. Third, changes in hydrological and sediment conditions are the main driver for the transformation from Type II to Type I channels. Navigation improvement projects have also promoted this transformation in most distributary channels. After 2013, the frequency and duration of river flow between 20,000 and 30,000 m³/s increased. This condition has enhanced the scouring intensity of main channels at such flow levels and has driven some branch channels to convert into Type I channels. In the future, branched river systems in the middle and lower Yangtze River will mainly evolve into Type I channels, showing a unified trend of main channel expansion and branch channel shrinkage.
Keywords: distributary channels; distributary adjustment; hydro sediment dynamics; Three Gorges Reservoir; middle Yangtze River

分汊河型河长占长江中下游的 75%以上，是长江中下游最为普遍的河型[1]，分汊河道河床的冲淤变化、断面形态调整等演变过程对航道条件、防洪安全、供水工程等方面有着直接影响[2, 3]。人类活动改变了河道演变的自然进程，尤其是大型水库的修建，显著影响了出库水沙条件，驱动水库下游分汊河型发生响应性调整。自 2013 年以来在金沙江下游—三峡梯级水库联合调度影响下，水库下泄沙量进一步减少，坝下游河道洪峰流量大幅削减，中水流量持续时间延长[4]，长江中游水沙过程进一步改变，河床冲刷加强[5]，断面形态与滩槽格局发生调整[6]，在这一阶段长江中下游分汊河道发生了“主长支消”、“主消支长”甚至主支汊交替等不同现象，影响堤防安全、增大航道治理难度[7]。此类现象在国内外受大型水利工程的河流中亦具有普遍性，本研究以城陵矶至九江河段为典型案例，揭示分汊河道的调整模式，可为其他河流的演变预测与治理提供借鉴。因此，针对长江中游研究分汊河型主支汊冲淤规律及调整方向具有重要的理论与实践意义。

长期以来，有关分汊河道形成、演变过程和驱动机制的大量研究成果表明，河道水力和输沙特性是分汊河道形成过程中的主要驱动因素，相比于单一河型，分汊河型的演变更加复杂，对于水沙条件的变化更敏感[8, 9]。三峡水库蓄水后，长江中游河床发生累积性冲刷[10]，江心滩冲刷萎缩，分汊河道主支汊交替频繁[11]，出现“主长支消”、“主消支长”的多样化演变现象。已有学者针对汊道表现的不同水流、输沙、河床特性，对三峡水库蓄水后的河道演变规律进行总结，如朱玲玲等[12]基于输沙动力调整从河床形态上归纳长江中游上荆州分汊河段均表现为短支汊冲刷发展；李明等[1]从水流动力分配角度总结长江中下游分汊河道总体表现为比降大的汊道趋于发展；韩剑桥等[13]结合河床调整对水沙动力及过程响应的特点，基于动态分流比系统划分了 2001—2013 年长江中游分汊河道类别，认为蓄水后中枯水流量持续时间的增长致使主汊分流比随流量增大而减小的河道表现为主长支消，主汊分流比随流量增大而增大的河道表现为主消支长，但自 2008 年三峡水库 175m 试验性蓄水和 2013 年以来金沙江下游梯级水库运行以来，随着出库沙量进一步减小，流量过程进一步坦化，城陵矶以下河段的冲淤特性与往年相比发生明显调整[14]，如部分汊道发生主支汊交替[15]，界牌河道主流频繁摆动，平面形态发生调整[16]，陆溪口河道左汊分流比逐年减小，由发展转变为萎缩[17]等现象。目前的研究多聚焦于 2003 年三峡水库蓄水后水沙条件首次变化对分汊河道冲淤的

影响，在水沙条件进一步改变后，现有的汊道类型判别方法能否有效识别汊道调整模式，汊道类型是否会发生转化，分汊河道是否会出现新的调整趋势，仍有待进一步研究。

本文采用 2003—2023 年典型分汊河道固定断面、分流比实测资料和主要控制水文站的实测日均流量及含沙量资料，以长江中游 11 个典型分汊河道为研究对象，结合基于动态分流比的分汊河道类别划分方法，分析三峡水库蓄水后不同时期分汊河道主支汊冲淤调整特点，明确分汊河道内部主支汊演化差异化的原因。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

长江中下游城陵矶至九江河段，全长约 502.4km，属于典型的江心洲分汊河道，河床组成主要为细砂和极细砂，河段下游有长江最大支流汉江入汇，是长江中游防洪和航道整治的重点河段。该河段主要水文站为螺山、汉口、九江站，其中螺山站位于河段进口下游约 31km 处，汉口站位于汉江入汇口下游 1.5km 处。本文研究对象为城陵矶至九江河段内 11 个典型分汊河道（图 1）。

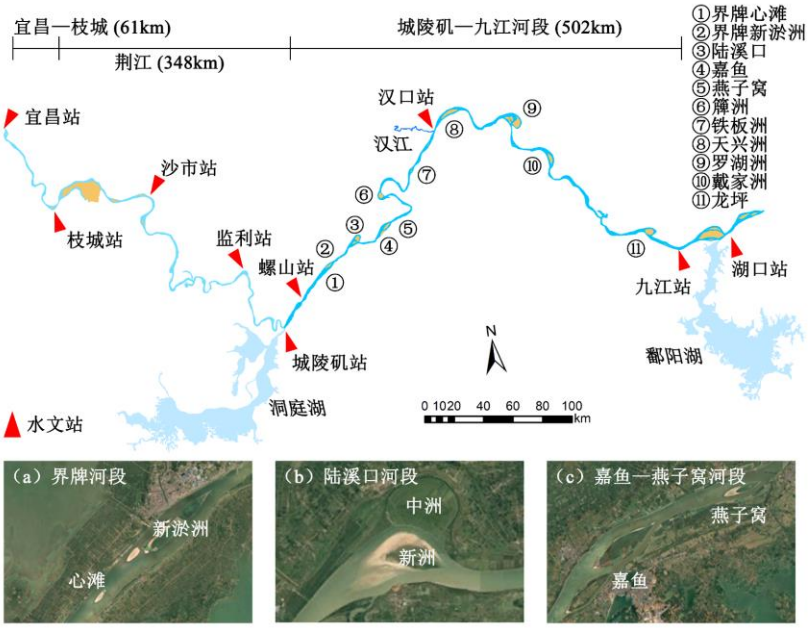


图 1　研究区域及具体研究河道分布

Fig.1 Study area and specific river channel distribution

1.2 数据来源

研究数据来源为长江水利委员会水文局 2003—2023 年城陵矶至九江河段 154 组固定断面实测资料、11 个典型分汊河道分流比实测数据，螺山、汉口水文站 2003—2023 年日均流量、含沙量实测资料。数据具体内容及范围如表 1 所示。

表 1　研究数据内容及范围

Tab.1 Content and Scope of the Study Data

数据内容	测站名称	数据范围
日均水沙数据	螺山水文站、汉口水文站	2003—2023年
固定断面数据	城陵矶至九江河段	2003年、2008年、2013年、2023年
分流比数据	11个典型分汊河道	2003—2023年（流量范围6000~51000m^3/s）

1.3 研究方法

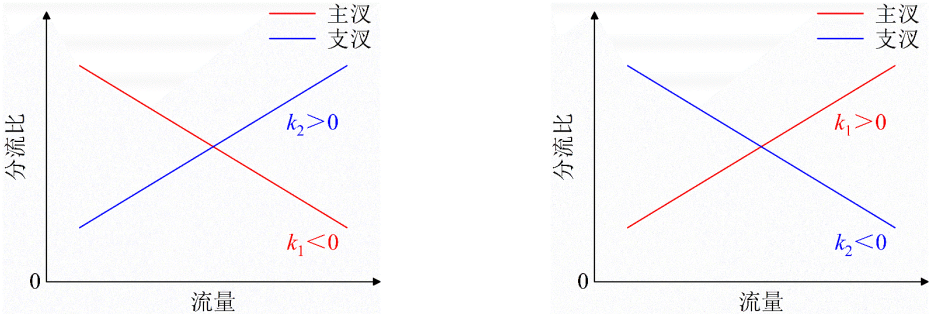
以三峡水库运行的各个阶段作为节点，将研究系列划分为三峡水库蓄水初期（2003—2007 年）、三峡水库 175m 蓄水期（2008—2012 年）、金沙江下游梯级水库运行期（2013—2023 年）三个时段，分析长江中下游城陵矶—九江河段 11 个分汊河道主支汊相对冲淤变化，根据主要站点（螺山站、汉口站）水沙条件的变化揭示其调整机理。

按照长江水利委员会水文局的划分方法，将 2003 年实测宜昌站流量为 30000m^3/s 时对应频率的城陵矶至九江河段的水面线把河槽划分为平滩河槽[18]，采用断面地形法，基于三峡水库下游各水文站实测数据和地形数据，可以计算各断面在平滩水位下的断面过水面积，从而得到各分汊河道主、支汊的槽蓄量。主、支汊的累计冲淤强度的差值即为主、支汊的相对冲淤强度 E_R，表示该段分汊河道的相对发展状况，计算公式如下：

$$E_R = V_m/L_m - V_n/L_n \tag{1}$$

式中 V_m、V_n分别为主汊、支汊的河道冲淤量，正值为累计淤积，负值为累计冲刷；L_m、L_n分别为两汊道的汊长。若E_R＞0，说明主汊相对支汊淤积，主汊发展速率小于支汊；若E_R＜0，说明主汊相对支汊冲刷，主汊发展速率大于支汊。

已有研究基于水流动力轴线在不同流量下的移位现象，采用动态分流比的方法将分汊河道进行分类[13]，划分方法如图 2 所示意。收集研究河段不同流量下的分流比数据，分别绘制主支汊的分流比随流量的变化图，并进行线性拟合，得到主、支汊对应拟合线的斜率 k_1、k_2。若 k＞0 则定义该汊道为洪水倾向型，若 k＜0 则定义该汊道为枯水倾向型，由此将分汊河道划分为两种类别：第 I 类是 k_1＜0，k_2＞0，主汊对应枯水倾向汊河，支汊对应洪水倾向汊河；反之则为第 II 类。



（a）第 I 类（主汊对应枯水倾向汊河）　　（b）第 II 类（主汊对应洪水倾向汊河）

图 2　基于动态分流比的分汊河道类别划分方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of anabranching channel classification based on dynamic flow diversion ratio

2 分汊河道冲淤调整及转化规律

2.1 汊河类型划分

三个时期的分汊河道类别划分见表 2，2003—2007 年与 2008—2012 年的分汊河道分类结果一致，界牌新淤洲（下简称新淤洲）分汊段、簰洲、天兴洲、罗湖洲、戴家洲、龙坪河道都划分为第 I 类汊河，界牌心滩（下简称心滩）分汊段、陆溪口、嘉鱼、燕子窝、铁板洲河道都划分为第 II 类汊河；而 2013—2023 年，按照分类依据将界牌心滩分汊段、陆溪口、嘉鱼、燕子窝河道划分为第 I 类汊河，其他河道则保持不变。

以三个典型分汊河道为例，图 3 分别给出了始终为第 I 类分汊河道的新淤洲分汊段、始终为第 II 类分汊河道的铁板洲河道、2013—2023 年由第 II 类分汊河道转为第 I 类分汊河道的陆溪口河道的分流比随流量变化情况。新淤洲分汊段始终保持支汊（左汊）分流比随流量增大而增大；铁板洲河道始终保持支汊（右汊）分流比随流量增大而减小；而陆溪口河道在 2003—2007 年、2008—2012 年支汊（直港）分流比随流量增大而减小，2013—2023 年发生主支汊交替后支汊（中港）分流比随流量增大而增大。

表 2　各时期分汊河道类别划分

Table 2　Classification of branch river channels by period

时期	第Ⅰ类	第Ⅱ类
2003—2007年	新淤洲、簰洲、天兴洲、罗湖洲、戴家洲、龙坪	心滩、陆溪口、嘉鱼、燕子窝、铁板洲
2008—2012年	新淤洲、簰洲、天兴洲、罗湖洲、戴家洲、龙坪	心滩、陆溪口、嘉鱼、燕子窝、铁板洲
2013—2023年	心滩、新淤洲、陆溪口、嘉鱼、燕子窝、簰洲、天兴洲、罗湖洲、戴家洲、龙坪	铁板洲

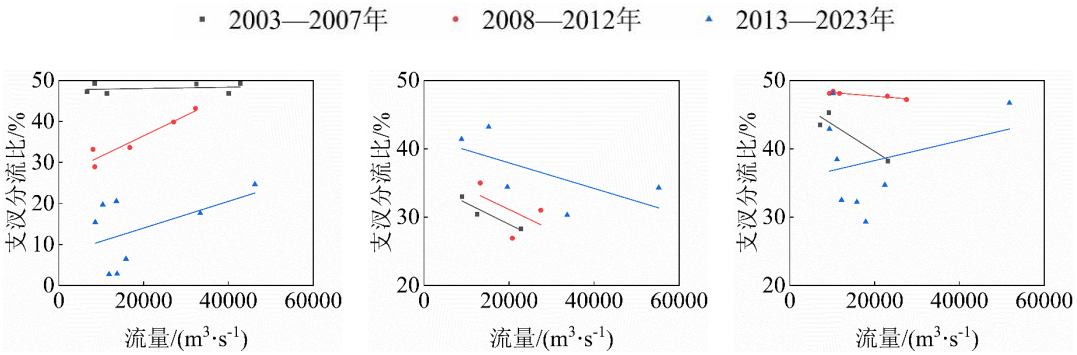


图 3　典型河道分流比随流量变化特点

Fig.3 Characteristics of the typical river channel diversion ratio with flow variation

2.2 汉河冲淤调整

图 4 分别统计三个时期各个分汊河道主汊与支汊的相对冲淤强度 E_R。当分汊河道类别发生变化时，两类别中“主长支消”或“主消支长”的主支汊调整特征仍未改变，第Ⅰ类分汊河道的 E_R 均为负值，第Ⅱ类均为正值。说明该类别划分方法不仅能划分两类分汊河道，也可以识别分汊河道类型的转化，且转化后该分类方法对应的主支汊相对调整规律依然适用。对于各个时期，从 2003—2007 年两类分汊河道的主汊皆为有冲有淤，到 2008—2013 年第Ⅰ类河道主汊皆为冲刷，再到 2013—2023 年两类河道的主汊皆为冲刷，是城陵矶至九江河段总体冲刷加剧的过程。

2.2.1 *未发生类型转化的第Ⅰ类分汊河道*　2003—2007 年，第Ⅰ类分汊河道中天兴洲、戴家洲河道表现为两汊均冲刷且主汊冲刷强度强于支汊，其他均表现为主汊冲刷、支汊淤积。2008—2012 年，第Ⅰ类分汊河道均表现为主汊冲刷、支汊淤积。2013—2023 年，心滩分汊段、陆溪口、嘉鱼、燕子窝河道由第Ⅱ类分汊河道转化为第Ⅰ类分汊河道，第Ⅰ类分汊河道中除新淤洲分汊段、龙坪河道、嘉鱼河道表现为主汊冲刷、支汊淤积，其他均表现为两汊均冲刷。统计同流量级（10000m³/s 左右）下部分未发生类型转化的第Ⅰ类分汊河道的支汊分流比逐年变化（图 5），发现各分汊河道支汊分流比都呈明显下降趋势，与冲淤强度计算结果相符，表现为主汊相对发展、支汊相对萎缩。综上所述，2013 年以后没有发生转化的第Ⅰ类分汊河道均表现为“主长支消”，表示该分类方法依然与枯水倾向汊河发展速率大于洪水倾向汊河的调整规律相适应。

2.2.2 *未发生类型转化的第Ⅱ类分汊河道*　由不同类型分汊河道主支汊年均冲淤强度（图 4）可知，2003—2007 年，第Ⅱ类分汊河道中心滩分汊段表现为两汊皆冲刷且支汊冲刷大于主汊，陆溪口河道表现为两汊均淤积，其他河道均表现为主汊淤积、支汊冲刷；2008—2012 年，第Ⅱ类分汊河道中燕子窝河道表现为两汊皆冲刷，其他河道均表现为主汊淤积、支汊冲刷；2013—2023 年，往年属于第Ⅱ类分汊河道的心滩分汊段、陆溪口、嘉鱼、燕子窝河道转化为第Ⅰ类分汊河道，而铁板洲仍属于第Ⅱ类分汊河道，两汊皆冲刷且支汊冲刷强度大于主汊。

图 6 统计同流量级（10000m³/s 左右）下未发生类型转化的第Ⅱ类分汊河道铁板洲河道的支汊分流比

逐年变化，支汊分流比表现为逐年增加的趋势。说明 2013 年以后未发生转化的第 II 类分汊河道仍表现为“主消支长”的调整规律，即支汊发展快于主汊，且两汊冲刷皆加强。

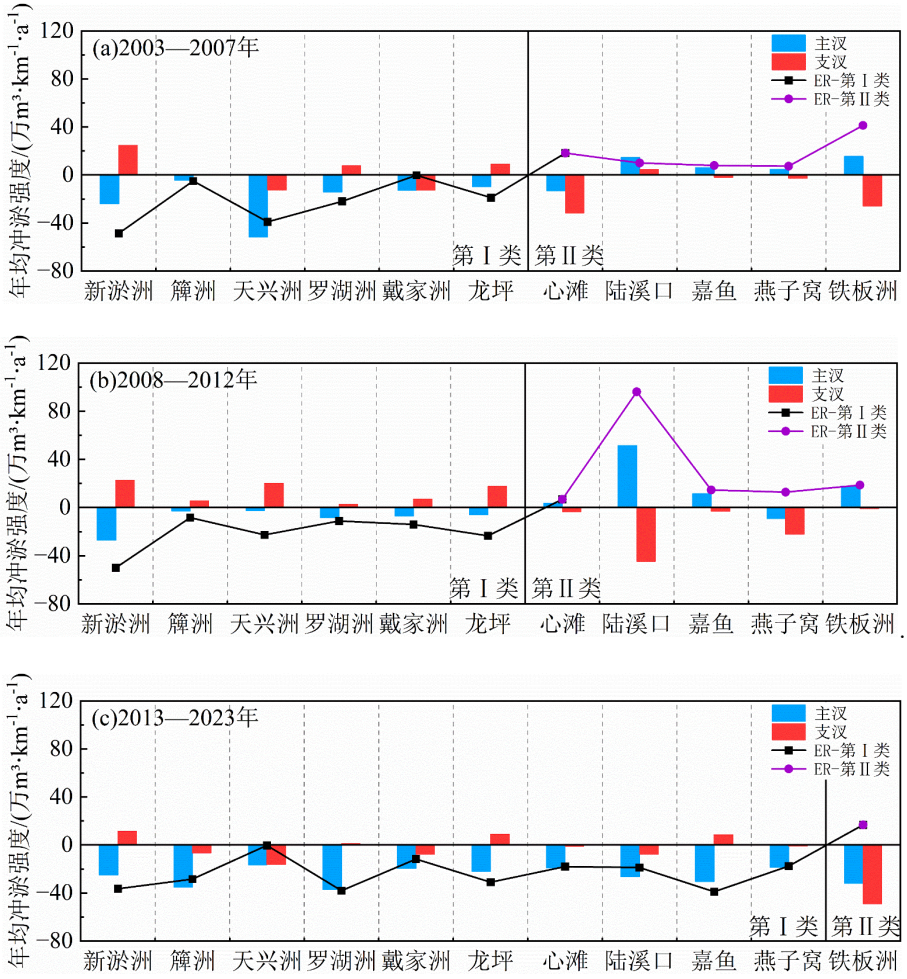
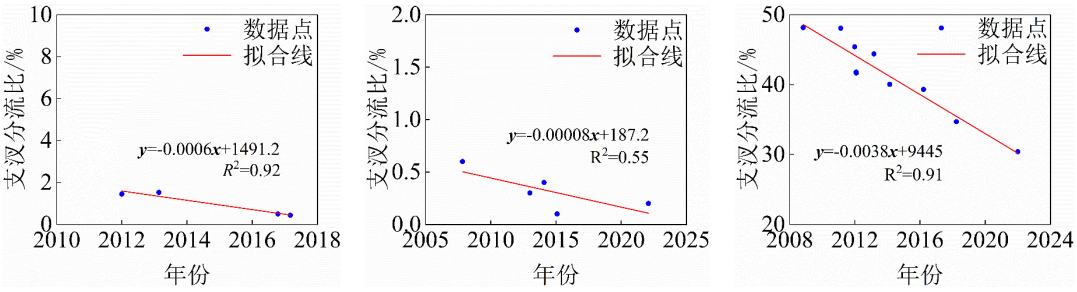


图 4　不同类型分汊河道主支汊年均冲淤强度

Fig.4 Erosion intensity in main and branching channel in anabranching reaches



（a）天兴洲　　（b）罗湖洲　　（c）戴家洲

图 5　部分未发生类型转化的第Ⅰ类分汊河道支汊分流比变化

Fig.5 Changes in the diversion ratio of Class I tributary branches that have not undergone type conversion

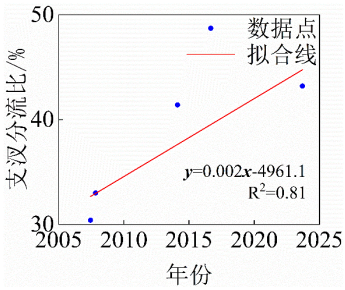


图 6　未发生类型转化的第Ⅱ类分汊河道（铁板洲河道）支汊分流比变化

Fig.6 Changes in the diversion ratio of Class II branch channels that have not undergone type conversion.

2.2.3 发生类型转化的分汊河道　不同类型分汊河道主支汊年均冲淤强度（图 4）表明，2013—2023 年，往年属于第Ⅱ类分汊河道的心滩分汊段、陆溪口、嘉鱼、燕子窝河道在转化为第Ⅰ类分汊河道后，主汊且均表现为冲刷，支汊除嘉鱼河道表现为淤积以外，其他均表现为冲刷。图 7 统计同流量级（10000m³/s）下陆溪口河道在发生类型转化前后的分流比随流量变化关系，其中陆溪口河道在 2011 年前主汊位于中港，这一期间支汊相对主汊发展，分流比由 2001 年的 45.3%逐渐增大至 2011 年的 48.1%；2011 年后发生主支汊交替，直港逐渐稳定主汊地位，从此主汊相对支汊发展，中港分流比由 2011 年的 48.1%逐渐减小至 2016 年的 38.4%。发生类型转化的各分汊河道转化前与第Ⅱ类分汊河道“主消支长”的调整规律相符，即支汊发展快于主汊；转化后与第Ⅰ类分汊河道“主长支消”的调整规律相符，即主汊发展快于支汊。说明两种汊河类型对应的调整规律在发生类型转化的情况下依然适用。

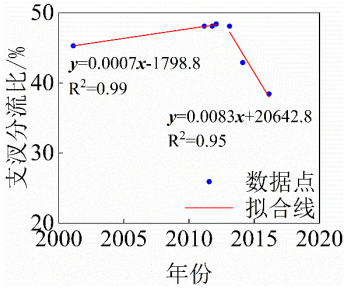


图 7　部分发生类型转化的分汊河道（陆溪口河道）支汊分流比变化

Fig.7 Changes in the diversion ratio of branch channels in partially transformed branch river systems

总体来看，2013—2023 年与 2003—2007 年、2008—2012 年两个时期的分汊河道冲淤调整不完全相同，在 2013—2023 年长江中下游城陵矶至九江河段总体冲刷加剧，且发生了第Ⅱ类分汊河道向第Ⅰ类分汊河道转化的现象，陆溪口、嘉鱼、燕子窝河道由“主消支长”演化为“主长支消”。对两类分汊河道分别进行分析，2003—2023 年，第Ⅰ类分汊河道始终表现为“主长支消”，第Ⅱ类分汊河道始终表现为“主消支长”，两类分汊河道总体仍表现为“枯水倾向汊河发展速率大于洪水倾向汊河”，该分类方法对应的调整规律依然适用。

3 分汊河道类型转化驱动成因

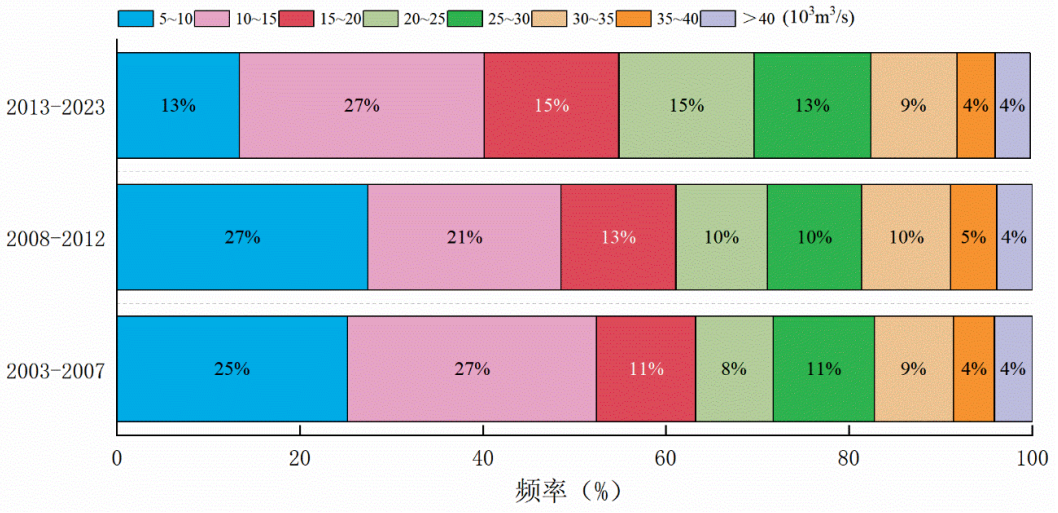
对于分汊河道内部调整，即主支汊差异化冲淤调整，主要与水沙条件变化、水流运动特性、整治工程等因素有关。在自然条件下，分汊河道由“主消支长”的第Ⅱ类分汊河道向“主长支消”的第Ⅰ类分汊河道的转化，存在两种形式。一是汊河发生了主支汊交替，原本冲刷强度较大的支汊成为了主汊，如心滩分汊段、陆溪口河道，自然条件下这种主支汊交替多与上游来流和水沙条件的变化有关；二是汊河没有发生主支汊交替，但流量过程的调整延长了主流位于主汊的时间，使主汊冲刷加剧，从而导致河道发生“主消支长”向“主长支消”的转变，如嘉鱼、燕子窝河道。

因此为明确分汊河道类型转化驱动成因，探明长江中游未来汊河调整趋势，对发生类型转化的心滩分

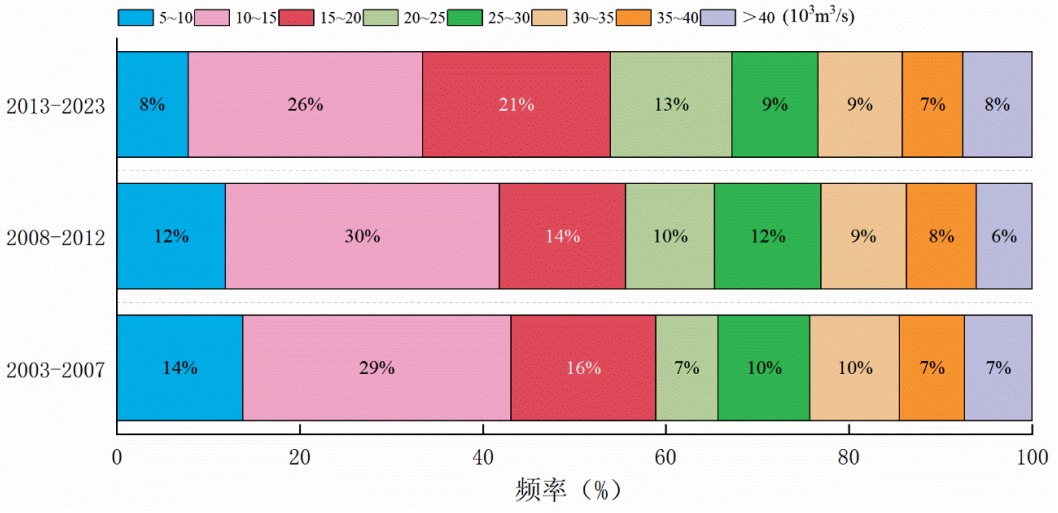
汉段、陆溪口、嘉鱼、燕子窝河道和未发生类型转化的铁板洲河道，结合水沙条件变化、水流运动特性、航道整治工程等影响因素，分别进行对主支汉冲淤调整的影响条件分析。

3.1 水沙条件变化的影响

图 8 分别分析 2003—2007、2008—2012、2013—2023 年三个时间段内螺山、汉口站不同流量级出现频率，在三峡水库 175m 蓄水期，最枯流量级和大洪水流量级的出现频率均减小，而中水流量级出现频率显著增大。以螺山站为例，20000~30000m^3/s 流量级的累计频率在 2003—2007 年间占比 19%，2008—2012 年间占比 20%，而在 2013—2023 年间增大至 28%。



(a) 螺山站

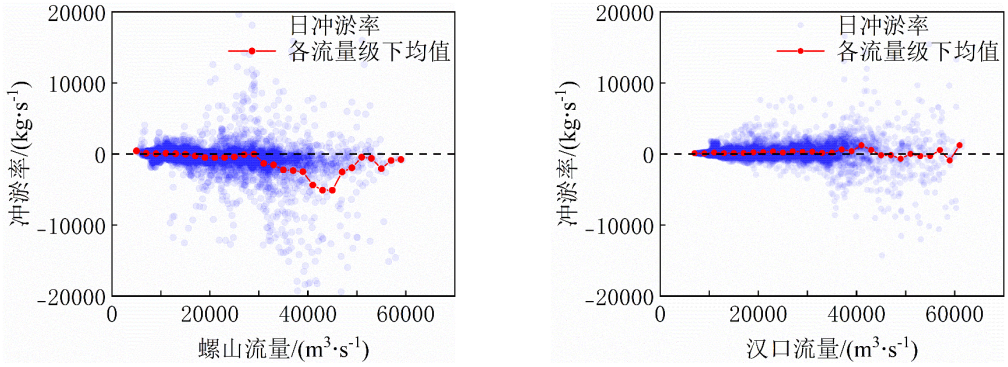


(b) 汉口站

图 8　不同流量级出现频率及持续时间

Fig.8 Frequency and duration at different flow rates

采用输沙量法统计各时期城陵矶—九江河段不同流量区间的日均冲淤率（河段进出口日均输沙率之差）见图 9。当冲淤率为正值，表示该流量区间河段出口泥沙少于进口，整体表现为淤积；当冲淤率为负值，表示该流量区间河段出口泥沙多于进口，整体表现为冲刷。在螺山—汉口河段，各流量级下基本全面冲刷；汉口—九江河段，当流量增大至平滩流量以上时河道淤积多于冲刷。

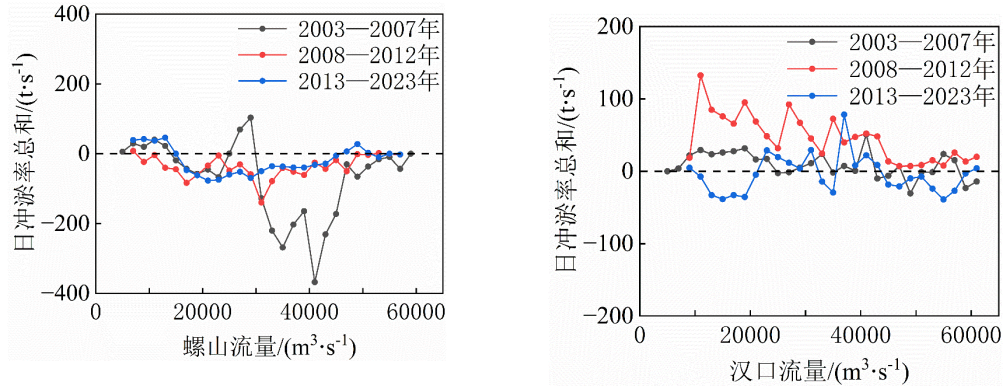


(a)螺山—汉口河段　　(b)汉口—九江河段

图 9　不同河段各流量区间日均冲淤率变化

Fig.9 Daily average sediment transport rates across different flow intervals in various river sections

由于泥沙传播与水流传播存在异步特性，日均冲淤量与河段冲淤特性的关系并不明确，因此为确定对河段冲刷影响较大的流量级，需要进一步考虑流量累计频率的变化进行分析。统计城陵矶—九江河段不同时期各流量区间的冲淤率总和见图 10，该结果基于输沙量法，叠加流量累计频率影响，可以反映不同流量区间对河段整体冲淤的影响。可见在不同时期因水库运行方案不同导致的来水来沙条件改变，使螺山—汉口河段在各时期冲刷能力大且流量频率大的区间也不同。在 2003—2007 年，累计冲刷最强的流量级与日均冲淤率最大的流量级区间相同，在 35000~45000m³ /s 之间；在 2008—2012 年，由于三峡水库 175m 蓄水方案的实施，出库沙量的大幅减少和流量过程的坦化使河段在各流量级下都呈现累计冲刷状态，在 30000m³ /s 左右流量累计冲刷最强；而在 2013—2023 年，流量过程进一步坦化，中水流量级出现频率增大，导致这一时期累计冲刷最强的流量级在 20000~30000m³ /s 之间，在 15000m³ /s 以下和 45000m³ /s 以上流量级呈现累计淤积状态。汉口—九江河段在 2003—2007 年累计冲淤率随流量级关系变化较小，在 2008—2012 年在各流量级下呈现显著淤积的状态，而在 2013—2023 年累计冲刷最强的流量级在 15000~20000m³ /s 之间。



(a)螺山—汉口河段　　(b)汉口—九江河段

图 10　不同河段各流量区间日冲淤率总和变化

Fig10 Changes in the sum of daily sediment transport rates across different flow intervals in various river sections

3.2 水流运动特性的影响

在发生汊河类型转化的 2013—2023 年时期，城陵矶至汉口河段整体冲刷影响最强的流量级由 35000~45000m³ /s 减小至 20000~30000m³ /s（图 9），说明流量过程的坦化对河床的冲淤造成显著影响。对于河段中各个分汊河道而言，汊道间的相对冲淤情况还与主流的位置有关，主流所在的一汊冲淤往往更加剧烈，而当分汊河段的流量超过某一流量值时，主流发生摆动，使滩槽相应产生冲淤变化[19]。河道主流平

面位置和断面流速分布均可表征主流线摆动的规律，因此结合各汉道主流线分布和特征断面流速分布，探讨水沙条件改变下主流运动特性对汉道冲淤的影响。

陆溪口河道由Ⅱ类分汊河道向第Ⅰ类分汊河道的转化受到主支汊交替的影响，2011 年以前主汊位于中港，2011 年以后主汊位于直港。2013 年以前，主汊（中港）与洪水倾向汊河对应，支汊（直港）与枯水倾向汊河对应；2013 年以后，主汊（直港）与枯水倾向汊河对应，支汊（中港）与洪水倾向汊河对应。即陆溪口河道的直港汊道始终对应洪水倾向汊河，中港汊道始终对应枯水倾向汊河。

图 11 展示了不同流量下陆溪口河道主流变化。小流量下主流位于直港，大流量时向中港摆动，主流摆动的临界流量在 30000m³/s 附近。在 2008—2011 年，30000m³/s 以下流量对螺山—汉口河道有较强的冲刷效应，在这一流量级下主流位于陆溪口河道中港，与河道由“主消支长”向“主长支消”的调整过程相对应，随着支汊不断发展、分流比不断增大，直港由支汊转变为主汊。2013—2023 年，由于对冲淤调整影响较大的 20000~30000m³/s 流量级出现频率增大、持续时间增长，陆溪口河道主流位于主汊（直港）的时间相应延长，导致主汊冲刷加剧，使陆溪口河道表现为“主长支消”的调整规律。

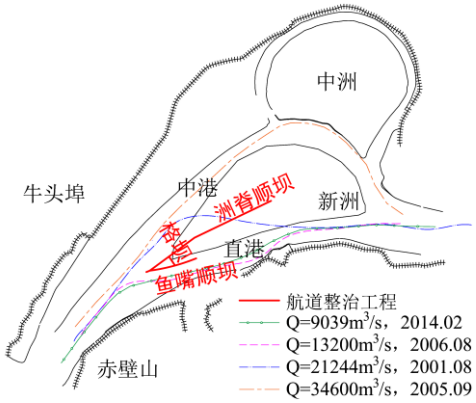


图 11　不同流量下陆溪口河道主流线位置

Fig.11 Mainstream Position of the Luxikou River Channel at Different Flow Rates

图 12 统计了嘉鱼、燕子窝、心滩分汊段、铁板洲河道靠近汊道进口的特征断面流速分布。嘉鱼、燕子窝河道均表现为 10000m³/s 以下流量级主流位于右汊（支汊），20000m³/s 以上流量级主流位于左汊（主汊）；心滩分汊段表现为 16000m³/s 以下流量级主流位于右汊，随流量增大主流向左汊摆动；铁板洲河道表现为 20000m³/s 以下流量级主流位于右汊（支汊），随流量增大主流向左汊（主汊）摆动。

2013—2023 年，对冲刷调整影响较大的 20000~30000m³/s 流量级出现频率增大，这一流量级下心滩分汊段的主流位于左汊，导致原本是支汊的左汊冲刷加剧，使该河道呈现“主消支长”的调整规律，随着支汊不断发展、分流比不断增大，左汊由支汊转变为主汊，河道转变为第Ⅰ类分汊河道，表现为“主长支消”的调整规律。

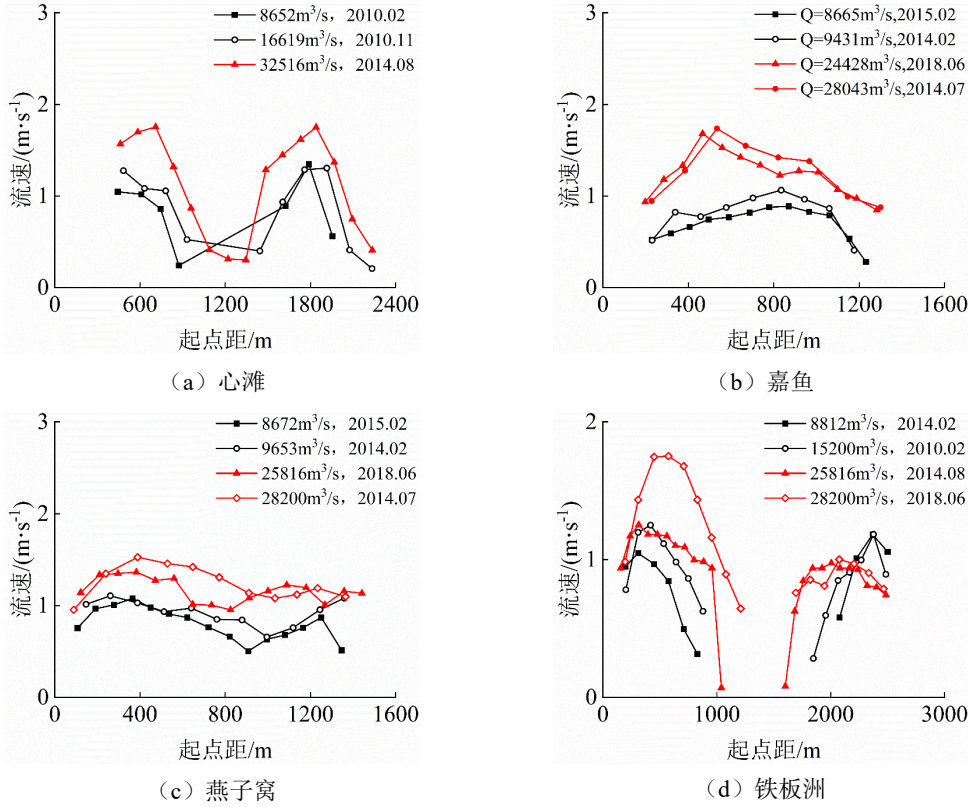
嘉鱼、燕子窝河道是上下游连续的分汊河段，其主流摆动趋势相似，在 20000~30000m³/s 流量级下河道的主流稳定于主汊，与往年相比 2013 年以后主汊的冲刷加剧，而主流位于支汊时所对应的流量级为 10000m³/s 以下，在 2013—2023 年对河段表现为淤积的影响，支汊逐渐萎缩，河道整体表现为“主长支消”的调整特征。

对于没有发生转化的铁板洲河道，20000~30000m³/s 流量级下主流稳定于支汊，与往年相比支汊的冲刷加剧，因此铁板洲河道仍表现为“主消支长”的调整规律。若未来 20000~30000m³/s 流量级出现频率仍然保持在较高的水平，且对河道冲刷调整影响剧烈，则铁板洲支汊将仍然保持不断发展的趋势，铁板洲河道有可能转变为第Ⅰ类分汊河道。

3.3 航道整治工程的影响

近年来，长江中游所实施的航道整治工程与疏浚工程基本以守护洲滩、冲刷河槽、保障主汊过流能力为基础[19][20]，对河道“主长支消”的冲淤趋势有促进作用，河势整体趋于稳定。但受年际间水沙条件变化

影响，部分河段也发生与整治工程调节方向不同的冲淤调整[21]，因此为明确第Ⅱ类分汊河型向第Ⅰ类转化的主要影响因素，对发生汊道类型转化的河道分别分析其航道整治工程与水沙条件等因素对汊河冲淤调整的影响。



（a）心滩　　（b）嘉鱼

（c）燕子窝　　（d）铁板洲

图 12　部分分汊河道特征断面流速分布

Fig.11 Flow Velocity Distribution at Selected Cross-Sections of the Partial Forked River Channel

为改善直港通航主航道的航道条件，陆溪口河道于 2004 年实施顺坝工程与直港进口挖槽疏浚工程，但直到 2009 年主汊一直维持在中港，直港进口段淤积严重，总体表现为主消支长的调整规律，至 2009 年以后由于三峡水库 175m 试验性蓄水，河道水沙条件变化，进入直港水流挟沙力不足，直港冲刷逐渐且分流比逐年增大[22]，2013 年后直港分流比超过 50%成为主汊，且直港冲刷强度大于中港，陆溪口河道转化为第Ⅰ类分汊河道，表现为“主长支消”。

嘉鱼—燕子窝河道于 2007 年实施守护洲滩、限制支汊发展的整治主体工程，但整治后仍存在主流摆动空间较大、支汊冲刷发展[23]等问题。直到 2015 年在此基础上对支汊现有的整治工程进行了维护，且 2013 年后对促进河道主汊冲刷调整影响较大的 20000~30000m³/s 流量级出现频率增大，支汊发展得到有效控制[24]，嘉鱼—燕子窝河道转化为第Ⅰ类分汊河道，主汊冲刷发展，分流比逐年增大，表现为“主长支消”。

在陆溪口、嘉鱼—燕子窝河道的演变过程中，整治工程显著改善了航道通行的条件，控制了主汊萎缩的速度，由于水沙条件与整治工程对汊道冲淤的调整方向相同，在两者共同影响下枯水倾向汊河冲刷加剧，导致汊河向第Ⅰ类分汊河道转化，表现为“主长支消”。

为维持航道畅通，心滩分汊段于 2012 年开始实施对右汊的养护疏浚工程，右汊由原本的淤积转变为冲刷（图 4），通航能力得到改善。但由于 2013 年以后汊道在对冲刷调整影响较大的 20000~30000m³/s 流量级下主流位于左汊，对淤积调整影响较大的 10000 m³/s 以下流量级下主流位于右汊，右汊在年际间仍然呈现萎缩趋势，分流比逐年减小，而左汊冲刷发展，分流比不断增大，直到 2020 年心滩进口段左汊分流比超过 50%成为主汊，心滩分汊段转化为第Ⅰ类分汊河道。

在心滩分汊段的演变过程中，尽管右汊在实施养护疏浚工程后显著改善了航道通行的条件，控制了右汊萎缩的速度，但在 2013 年以后由于三峡水库出库沙量进一步减少、流量过程进一步坦化，导致心滩分汊段左汊冲刷加剧，冲刷强度大于右汊，汊道在年际间仍保持左汊发展、右汊萎缩的调整规律，左汊因此发展为主汊，心滩分汊段转化为第Ⅰ类分汊河道。因此，对于第Ⅱ类分汊河道向第Ⅰ类分汊河道的转化而言，航道整治工程效果显著，在大部分分汊河道中表现出对类型转化的促进作用，而水沙条件改变导致枯水倾向汊道冲刷加剧则是第Ⅱ类分汊河道转化为第Ⅰ类分汊河道的关键因素。

4 结论

本文以城陵矶至九江河段 11 个典型分汊河道为研究对象，基于 2003—2023 年实测水文与地形资料，采用基于动态分流比的汊河类别划分方法，分析了三峡水库不同运行时期分汊河道类型转化现象及其驱动机制，探讨了水沙条件变化、水流运动特性与航道整治工程对汊道调整的综合影响，相关认识可为其他受水库调蓄导致的清水下泄影响的分汊河段研究提供参考。主要结论如下：

（1）基于动态分流比的分汊河道类别划分方法将汊河类型定义为“枯水倾向汊河”和“洪水倾向汊河”，与主支汊的关系对应将分汊河道划分为第Ⅰ类：主汊与枯水倾向汊河对应，表现为“主长支消”；第Ⅱ类：主汊与洪水倾向汊河对应，表现为“主消支长”，亦可识别第Ⅱ类分汊河道向第Ⅰ类分汊河道的转化，能较好反映三峡水库不同运行方案下长江中下游各时期的汊河调整规律。

（2）2013 年以后，城陵矶至九江河段以第Ⅰ类分汊河道为主，第Ⅱ类分汊河道中界牌心滩分汊段、陆溪口、嘉鱼、燕子窝河道发生了向第Ⅰ类分汊河道的转化，由“主消支长”转变为“主长支消”。第Ⅰ类分汊河道“主长支消”的调整特性使主汊占据更加优势的地位，而第Ⅱ类分汊河道“主消支长”的调整特性易使其主汊地位不稳定，2013 年以后，由于流量过程进一步调平，河道来沙进一步减少，第Ⅱ类分汊河道向第Ⅰ类分汊河道转化这一调整模式的趋势性进一步增强。

（3）对于第Ⅱ类分汊河道向第Ⅰ类分汊河道的转化而言，水沙条件改变是汊道类型发生转化的主要原因，而航道整治工程在大部分分汊河道中表现出对类型转化的促进作用。2013—2023 年因金沙江下游—三峡梯级水库联合调度，对冲淤调整影响较大的 20000~30000m^3/s 流量级出现频率增大、持续时间增长，导致该流量级下主流所在汊道冲刷加剧，部分河道转化为第Ⅰ类分汊河道，由“主消支长”转变为“主长支消”，可以预见未来长江中下游分汊河型都将以向第Ⅰ类分汊河型发展，表现为“主长支消”的调整模式为主。

5 参考文献

[1] Li M, Hu CH. Study on processes of braided river downstream of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Sediment Research*. 2017, **42**(06): 1-7.[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**(06): 1-7.]

[2] Yu MQ, Luo J, Wu LB. Analysis of Branch River Evolution Characteristics and Remediation Strategies in the Lower Yangtze River's Branching River Sections. *China Water Transportation(Science & Technology for Waterway)*. 2019(28): 10-16.[余梦清，罗健，吴凌波. 长江下游分汊河段支汊演变特点及整治对策分析. 中国水运.航道科技. 2019(28): 10-16.]

[3] 曹广晶等. 长江三峡工程水文泥沙观测与研究. 科学出版社, 2015.

[4] Li SX, Li SW, Dong BJ, *et al*.. Research on the Characteristics of Riverbed in the Middle and Lower Reaches of Wuhan Reach under the Impact of the Three Gorges Reservoir. *China Rural Water and Hydropower* 2021(10): 71-77. [李思璇，李圣伟，董炳江. 三峡水库调蓄影响下武汉河段中下段河床演变特性研究. 中国农村水利水电. 2021(10): 71-77].

[5] Gong ZL, Li LY, Wang HY, *et al*.. Review on the Characteristics and Mechanisms of Riverbank Collapse in the Middle Reaches of the Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* 2025, 42(09): 22-33.[龚志龙，李凌云，王洪杨等. 长江中游干流河道崩岸特征与机理研究综述. 长江科学院院报. 2025, 42(09): 22-33]

[6] Zhu WL, Li S, Tan ZY, *et al*.. Analysis of joint operation of the lower Jinsha River and Three Gorges cascade reservoirs in the 2024 flood season. *Yangtze River*. 2025.[朱文丽，李帅，谭政宇等. 金沙江下游-三峡梯级水库2024年汛期调度成效分析. 人民长江. 2025.]

[7] Xia JQ, Zhou MR, Xu QX, *et al*.. Bank collapse and river bed adjustment in middle Yangtze River after operation of Three Gorges Project. *Yangtze River*. 2020, **51**(01): 16-27.[夏军强，周美蓉，许全喜等. 三峡工程运用后长江中游河床调整及崩岸特点. 人民长江. 2020, **51**(01): 16-27.]

[8] 谢鉴衡. 河流模拟. 水利电力出版社, 1990.

[9] 钱宁等. 河床演变学. 科学出版社, 1987.

[10] Li SX, Yang YP, Zhang HQ, *et al*.. The scouring and siltation in river channels of the middle reaches of the Yangtze River (1975-2017) before/after the Three Gorges Project. *Journal of Lake Sciences*. 2021, **33**(05): 1520-1531.[李少希，杨云平，张华庆等. 三峡工程运行前后的长江中游河段冲淤变化（1975-2017年）. 湖泊科学. 2021, **33**(05): 1520-1531.]

[11] Yang YP, Zheng JH, Zhang HQ, *et al*.. Impact of the Three Gorges Dam on riverbed scour and siltation of the middle reaches of the Yangtze River. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2022, **47**(6): 1514-1531.

[12] Zhu LL, Xu QX, Chen ZH. Extraordinary Scour of Jingjiang Reach Downstream from Three Gorges Project. *Journal of Basic Science and Engineering*. 2018, **26**(01): 85-97.[朱玲玲，许全喜，陈子寒. 新水沙条件下荆江河段强冲刷响应研究. 应用基础与工程科学学报. 2018, **26**(01): 85-97.]

[13] Han JQ, Zhang W, Yuan J, *et al*.. Responses of riverbed morphology to the hydrological regime in anabranching reaches of the downstream Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*. 2018, **29**(02): 186-195.[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**(02): 186-195.]

[14] 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**(05): 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**(05): 776-789.]

[15] Chen SP, Li YT, Zhu LL, *et al*.. Research on river evolution mechanism of Luxikou Reach in Middle Yangtze River. *Journal of Sediment Research*. 2013,(4): 74-80.[陈尚坡，李义天，朱玲玲等. 长江中游陆溪口水道河床演变机理研究. 泥沙研究. 2013，(4): 74-80.]

[16] Guo L, Liu X, Cao H, et al.. Adjustment characteristics of the riverbed in the Chenghan reach of the Middle Yangtze River after the operation of the Three Gorges Project. *Engineering Journal of Wuhan University*. 2026, 59(02): 179-189.[郭率，刘鑫，曹辉等. 三峡工程运用后长江中游城汉河段河床调整特点. 武汉大学学报(工学版). 2026, 59(02): 179-189.]

[17] Wang ZW. Waterway regulation of braided channel in middle and lower Yangtze River after Three Gorges Reservoir operation. *Port & Waterway Engineering*. 2023(01): 143-151.[王致维. 三峡水库运行后长江中下游分汊河段航道治理. 水运工程. 2023(01): 143-151.]

[18] Zhang GY, Tan GM, Zhang W, *et al*.. Characteristics and causes of shoal-channel adjustment in Wuhan reach under the superposition of scouring and regulation projects. *Advances in Water Science*. 2024, **35**(04): 629-644.[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**(04): 629-644.]

[19] 李义天. 长江中下游河道演变与航道整治. 科学出版社, 2012.

[20] Liu LS, Li M, Jiang L, *et al*.. Regulation method in middle reaches of Yangtze River based on coordination of flood control and navigation. *Port & Waterway Engineering*. 2024(06): 99-106.[刘林双，李明，江凌等. 基于防洪-通航协同的长江中游航道整治方法. 水运工程. 2024(06): 99-106.]

[21] Zou HM, Yang CG, Yuan J, *et al*.. Evolution Characteristics of Near‐bank Riverbed Erosion and Deposition in Vulnerable Sections of Middle Yangtze River over the Past Decade. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*. 2024, **41**(06): 187-192.[邹红梅，杨成刚，袁晶等. 近10年长江中游重点险工段近岸河床冲淤演变特点分析. 长江科学院院报. 2024, **41**(06): 187-192.]

[22] Yan X, Chen L, Fan BL, *et al*.. Adaptability analysis of waterway regulation engineering of goose-head braided reach. *Engineering Journal of Wuhan University*. 2017, **50**(04): 494-499.[闫霞，陈立，范北林等. 鹅头分汊河段航道整治工程适应性分析. 武汉大学学报(工学版). 2017, **50**(04): 494-499.]

[23] Wang YX, Li YT, Zhu LL. Analysis of evolution mechanism and tendency of Jiayu-Yanziwo section in middle Yangtze River.

Journal of Sediment Research. 2012(01): 1-6.[王业祥，李义天，朱玲玲. 长江中游嘉鱼-燕子窝河段演变机理及发展趋势研究. 泥沙研究. 2012(01): 1-6.]

[24] Ma Y. Effect analysis of Yanziwo waterway regulation project from Chibi to Panjiawan in middle reaches of the Yangtze River. *Port & Waterway Engineering*. 2020(03): 104-109.[马一. 长江中游赤壁—潘家湾河段燕子窝水道航道整治工程效果分析. 水运工程. 2020(03): 104-109.]