

三峡建库后洞庭湖入汇对下荆江顶托特征的变化分析

李芷晴^{1, 2, 3}, 孙昭华¹, 陈立¹, 安姗姗¹, 周炜兴¹

(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. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 3. 流域水安全保障湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:厘清三峡建库后洞庭湖对下荆江顶托的新特征是当前的重大问题。针对江湖交汇点上游的监利至城陵矶河段, 引入Copula函数研究不同时期的江湖汇流遭遇特征; 基于冲积河流水流运动规律提出平衡态下的江湖流量搭配关系, 构建干流受顶托强度的评估指标, 在此基础上定量分析了三峡建库前后下荆江受顶托事件的发生几率、出现时机以及年内不同时期的顶托强度变化。研究表明, 平衡态下的江湖流量搭配为非线性函数关系, 该关系与江湖流量之间的多年平均拟合线相近, 可用于判别干流的顶托或消落状态。三峡建库后, 监利流量处于中枯水量的历时增长, 导致干流与湖泊汇流均为中枯水的遭遇概率增幅为44.6%, 干流中水与湖泊汇流为洪水(大于30 000 m³/s)的遭遇概率增幅为5.4%。受其影响, 江湖汇流点的侵蚀基准面降低, 并且年尺度上湖区对干流的平均顶托强度减弱, 但干流处于顶托态的时机由平滩以上流量级向中水流量级转移, 4—7月份出现远大于历史同期顶托强度的极端情况增多, 需引起长期关注。

关键词: 三峡水库; 下荆江; 洞庭湖; 流量遭遇; 回水顶托

中图分类号: TV147

文献标识码: A

doi: 10.3724/j.slx.20250601

1 研究背景

长江中游荆江河段比降平缓, 而洞庭湖入汇水量丰沛, 江湖交汇口上游上百公里存在季节性回水顶托, 对干流水沙输移和河床演变影响甚大。三峡水库运行后对干流产生削洪补枯作用, 不同季节的江湖来流比例发生显著调整, 洞庭湖入汇对荆江河段的顶托作用也将呈现新的特征。2017年7月三峡出库流量史无前例地减至8000 m³/s, 而同期洞庭湖出湖流量却超50 000 m³/s, 下荆江监利站出现历史罕见的水位流量关系。与此类似, 2016、2017、2020以及2024年汛期, 下荆江频繁出现流量不大但洪水位超警的现象^[1-2]。近期研究^[3]还表明, 下荆江出口河段主槽冲刷的同时, 两侧的高滩却呈缓慢淤积态势, 这种变化与大汛期间荆江出流被顶托有关。由此可见, 在三峡建库后新的江湖来流组合下, 厘清洞庭湖对下荆江顶托的新特征是当前的重大问题。

单一冲积河道经过长期自调整可达到准平衡输沙状态, 沿程比降和水力因素相对均匀。但在两种情况下, 河道水流会因回水顶托而呈现非均匀流状态。第一种是河流出口衔接湖泊、海洋等侵蚀基准面的区段, 由于水面比降沿程减缓, 流动也由准均匀流过渡为非均匀流^[4-6], 回水区段内发生缓慢溯源淤积^[7-9]。这种情况下由于出口水位稳定, 顶托强度主要由来流大小决定, 其驱动因素和物理图景相对简单, 已有不少研究^[5, 10]提出了回水长度、顶托强度等方面的衡量指标。另一种情况发生于低洼地区大型支流入汇点的上游河段, 由于干支流量组合具有随机性, 支流对干流的顶托作用具有显著的

收稿日期: 2025-09-24; 网络首发日期: 2026-04-01

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20260331.1603.007>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52479074); 水利部三峡后续研究项目(12630100100020J005)

作者简介: 李芷晴(1998—), 博士生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: lizdyx@whu.edu.cn

通信作者: 孙昭华(1976—), 博士, 教授, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: Lnszh@126.com

季节差异,顶托作用通常仅发生于支流丰水期,而枯水期甚至会发生比降沿程增大的消落作用^[11-12],在顶托与消落作用的交替影响下,交汇点上游干流河道发生复归性的动态冲淤调整^[12-13]。显然,后一种情况下的河道水流顶托规律更为复杂,各种干支流量组合的发生时机、持续时长以及对应的顶托状态、强度都应是关注的特征变量。然而由于问题的复杂性,即使对于多年维持平衡输沙状态的交汇型顶托河段,顶托特征的定量描述在国际上也缺乏普适的方法。

针对长江中游洞庭湖、鄱阳湖与干流之间顶托作用的年内、年际变化规律,近些年也已有大量研究从不同角度提出了顶托强度的衡量指标,总体来看可分为两类:第一类研究关注于湖区受干流顶托导致的泄流能力变化,如赖锡军等^[14]采用枯水期湖泊出口通道的水力坡降计算了不同时期的鄱阳湖泄流能力变化;邴建平等^[15]从江湖水量交换的观点,提出了洪水顶托强度指数,以衡量长江对鄱阳湖的顶托强度;邓金运等^[11]基于能量的观点,以干支能量的相对大小表征江对湖的顶托作用强弱。这类研究注意到了湖区出口具有往复流、湖区比降存在空间差异等复杂特点,为湖区蓄泄过程的量化提供了行之有效的办法。但由于通江湖泊水沙转移介于湖相与河相之间,常年以壅水和泥沙淤积为主,不存在汛枯期的顶托状态划分等问题,因此以上方法不能直接用于常年以河相为主的干流河段。第二类研究立足于不同汇流比情况下的干流水位和比降变化,并从干流角度提出顶托指标。如陈栋等^[12]忽略交汇口上下游的比降差异,假定江湖交汇点上下游比降相等是顶托与消落的临界状态,从而构造出顶托消落指标;尚海鑫等^[16]、杨春瑞等^[17]分别假定支流来流为0和1500 m³/s作为无顶托状态,各自构造了支流对干流的顶托强度指标。可以看出,以往研究提出的顶托状态划分多基于经验假定,不同学者提出的假定差异甚大,由此分析得到了洞庭湖对长江顶托强度减弱、变化不大等相互矛盾的认识,这不利于对三峡建库后江湖顶托作用的科学评估。

鉴于三峡建库后洞庭湖对下荆江顶托作用的变化尚未形成共识,本文针对长江与洞庭湖交汇点上游的监利至城陵矶河段,依据三峡建库前、后的水文资料开展以下工作:(1)从年、季尺度分析三峡建库前后的荆江、洞庭湖来流组合特征;(2)基于来流组合对干流水位、比降等因子的影响机理提出顶托、消落状态的判定条件,厘清三峡建库前后的状态转换条件;(3)建立干流受顶托强度的评估指标,量化三峡建库后洞庭湖入汇对于干流顶托强度的变化。

2 研究区域及数据资料

荆江河段上起枝城下迄城陵矶,全长约347 km,南岸有松滋口、太平口、藕池口以及调弦口分流入洞庭湖(其中调弦口已于1959年建闸控制),洞庭湖又汇集湘、资、沅、澧四水,经调蓄后自城陵矶入汇长江。本文选取荆江出口的监利至城陵矶河段(以下简称“监一城河段”)作为研究区域,河段全长约87 km(如图1所示),其中监利站为干流来流控制站,城陵矶(七里山)站为洞庭湖入汇控制站,城陵矶下游35 km处的螺山站作为接纳江湖合流量的控制站。

本文收集了监利、城陵矶(莲花塘)、螺山站的日均实测水位资料,以及监利、城陵矶(七里山)、螺山站的日均实测流量资料,数据覆盖时段均为1992—2020年;同时收集了2002、2008、2017年的监一城河段河道一维地形数据。鉴于城陵矶(莲花塘)站与城陵矶(七里山)站之间距离仅数公里,本文将其统一简称为城陵矶站。为体现三峡水库不同调度方式的影响,将长序列水文资料划分为三峡水库建库前的天然时期(1992—2002年)、三峡水库运行初期(2003—2008年)以及正常运行期(2009—2020年)。

3 研究思路与方法

江湖顶托强度年内、年际变化的成因在于干、支(支流指湖区)来流的不同遭遇组合,要量化三峡建库前后洞庭湖对荆江顶托特征及其驱动机制,需从水文、水动力两方面开展分析。为此提出以下总

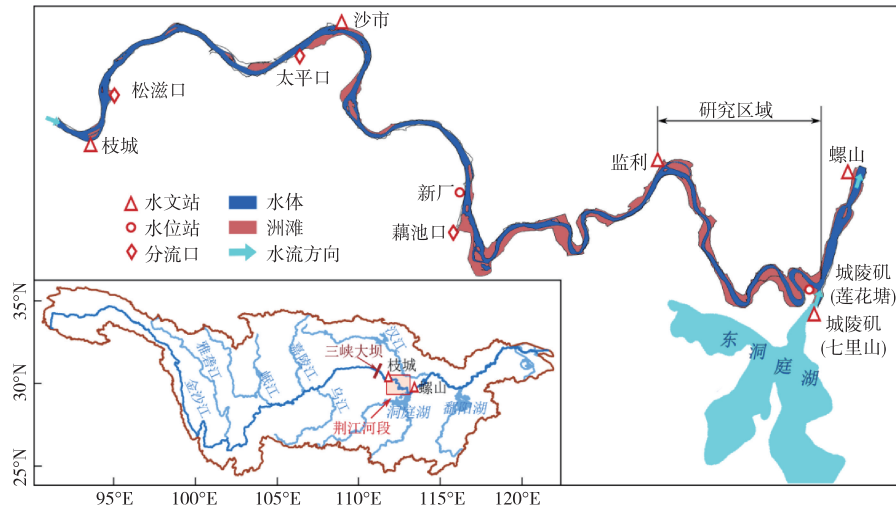


图1 研究区域河道概况

Fig. 1 Location of the study area

体思路：首先，引入 Copula 函数刻画荆江与洞庭湖在不同时期的汇流遭遇特征；其次，基于河道水力学理论结合实测资料，分析顶托态与消落态发生转换的临界条件，评估两种状态的出现几率、发生时机等特征；最后，提出顶托强度衡量方法，评估不同时期荆江受顶托强度的变化情况。具体的研究方法介绍如下。

3.1 基于 Copula 函数的江湖汇流遭遇特征分析 基于监利站与城陵矶站逐日流量数据，利用 Copula 函数分别构建不同时期的江湖流量联合分布，以此直观反映不同流量级下的江湖汇流遭遇特征，并通过计算建库前后的联合分布差值，对比分析江湖汇流遭遇概率在三峡建库前后的变化。

3.1.1 边缘分布函数的建立 以连续随机变量 X 、 Y 分别代表监利与城陵矶流量，其边缘分布函数记为 $F_X(x) = P(X \leq x)$ 、 $F_Y(y) = P(Y \leq y)$ ，相应的概率密度函数为 $f_X(x)$ 、 $f_Y(y)$ 。为确保边缘分布的可靠性，采用 Pearson-III 分布(P-III)、指数分布(EXP)、广义极值分布(GEV)以及对数正态分布(LOGN)函数分别对边缘分布进行拟合，并依据 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验各种函数的拟合效果，同时基于均方根误差(RMSE)以及赤池信息量准则(AIC)对拟合结果进行优度评价，RMSE 值越小、AIC 值越低，则表明边缘概率密度函数的拟合效果越好。

3.1.2 Copula 联合分布构建方法 依据 Sklar 定理，联合分布函数可以表示为：

$$F_{X,Y}(x,y) = C(F_X(x), F_Y(y); \theta) \quad (1)$$

式中： $C()$ 是定义在 $[0, 1]$ 上的二维 Copula 函数，用于描述随机变量间的相关性； θ 为 Copula 函数的参数。本研究采用 Gaussian Copula、t-Copula、Clayton Copula、Gumbel Copula 以及 Frank Copula 函数作为监利与城陵矶流量的联合分布备选函数，利用 Kendall 秩相关系数法估计函数参数，并依据 RMSE、AIC 信息准则评价拟合优度，以确定最优的 Copula 函数形式。

3.2 顶托态与消落态转换条件的建立方法 以往研究认为，江湖交汇区域对干支流均起到了局部侵蚀基面的作用^[13]，随着干支来流变化，湖对江的影响可分为三种状态：顶托态，湖对江产生顶托作用；消落态，湖对江产生消落作用；平衡态，湖对江既无顶托也无消落作用。区分三种状态的关键，是找出平衡态。根据以往基于天然冲积河流的大量观测发现^[18-19]，对于准平衡河流而言，多年平均情况下长河段的水面坡降与河床坡降基本相当，称之为正常流。尽管涨落水等因素会引起短时附加比降，但河段内的实际水流状态仅会在正常流附近小幅波动，这一规律由河流维持输沙能力沿程相等的自调整作用所决定，在各级流量下均近似成立。此外，即使是在三峡水库建库后的河床调整过程中，河床比降仍是顶托态与消落态下水力因素综合作用的结果，尽管此时输沙不平衡，但水面比降与河床比降的时段均值之间的耦合作用关系依然存在，可以认为建库后水面坡降与河床坡降近似相等的关系依然成立。基于这一事实，许多研究以正常流，即水面与河床是否近似平行，作为平衡态的判别依据，从空

间上区分近河口的顶托壅水区 and 远离河口的非壅水区^[20-22]。本项研究尝试延伸这一思路, 依据年内各时期水面比降与河床比降的对比关系来找出平衡态并划分顶托期与消落期。以下结合 Yen 等^[23]提出的水力性能图 (Hydraulic Performance Graphs, HPG) 来细化阐述这一思路, 并利用干支流量构建顶托-消落状态的判别指标。

在无旁侧入流的缓流状态下, 一段河道中流量 Q 与上下游水位 Z_u 、 Z_d 之间的关系可归纳为图 2 中的 HPG 曲线^[23] (图中以 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 作为举例), 其中的 N 线对应正常流条件下同步涨落的河段上、下游水位相关线, L 线对应上下游水位相等的极限回水情况, i_0 与 L 分别对应河道底坡与长度。由图 2 可见, 以 N 线为界可将各种水流状态分为 M1 区 (壅水) 与 M2 区 (跌水)。

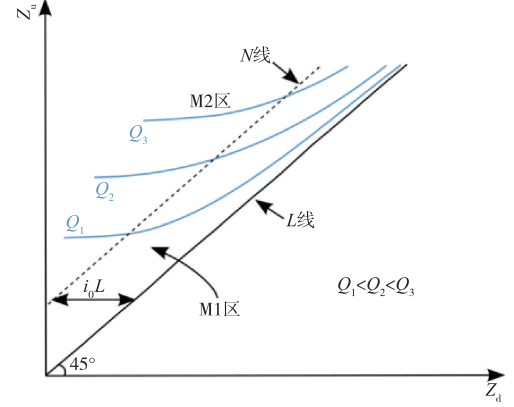


图 2 缓流情况下的 HPG 示意

Fig. 2 Schematic diagram of HPG for mild-slope

以图 3 所示的干支汇流区上游河段为例, 基于曼宁公式可写出正常流情况下河段进、出口的水位流量关系分别为^[24-25]

$$Q_R = \alpha_1 (Z_{u, N} - Z_1)^{\beta_1} \quad (2)$$

$$Q_R + Q_{D, N} = \alpha_2 (Z_{d, N} - Z_2)^{\beta_2} \quad (3)$$

式中: Q_R 为干流流量; 下角标 N 代表正常流状态; Q_D 为支流入汇流量; Z_1 、 Z_2 为反映进、出口断面河床高程的参数^[18,25]; α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 为待定参数; $Q_{D, N}$ 为干流流量 Q_R 对应的正常流条件下的支流入汇流量。对于给定的干流流量 Q_R , 当支流的实际流量大于 $Q_{D, N}$ 时, 河段出口水位 Z_d 将高于正常流水位 $Z_{d, N}$, 汇流口上游河段内形成 M1 型壅水水面线, 为受顶托状态; 反之, 当支流实际流量小于 $Q_{D, N}$ 时, 河段内形成 M2 型跌水水面线, 为消落状态。结合图 2, 正常流条件下河段进、出口水位关系可以写为

$$Z_{d, N} = Z_{u, N} - \Delta Z_N \quad (4)$$

式中 ΔZ_N 为正常流条件下的水位落差, 由河道长度与坡降决定, 可由多年平均水位落差间接反映。联合式 (2)–(4) 可得正常流条件下的干支流量关系为

$$Q_{D, N} = \alpha_2 \left[\left(Q_R / \alpha_1 \right)^{1/\beta_1} + Z_1 - \Delta Z_N - Z_2 \right]^{\beta_2} - Q_R \quad (5)$$

式中: 待定参数 α_1 、 β_1 、 Z_1 、 α_2 、 β_2 、 Z_2 可依据进、出口断面的实测水位流量资料, 通过拟合式 (2) (3) 确定; 正常流条件下的水位落差 ΔZ_N 则以多年平均水位落差 ΔZ_{ave} 近似代替^[18]。由于式 (5) 中所有参数可依据实测资料反求, 因而式 (5) 反映的是正常流情况下 Q_R 与 $Q_{D, N}$ 之间的函数关系。

由式 (5) 可见, 河段内要满足正常流状态 (平衡态), 对应的支流来流随着干流来流而变。当支流来流大于式 (5) 的计算值时, 将出现顶托壅水情况, 反之则出现消落跌水情况, 式 (5) 可作为两种状态

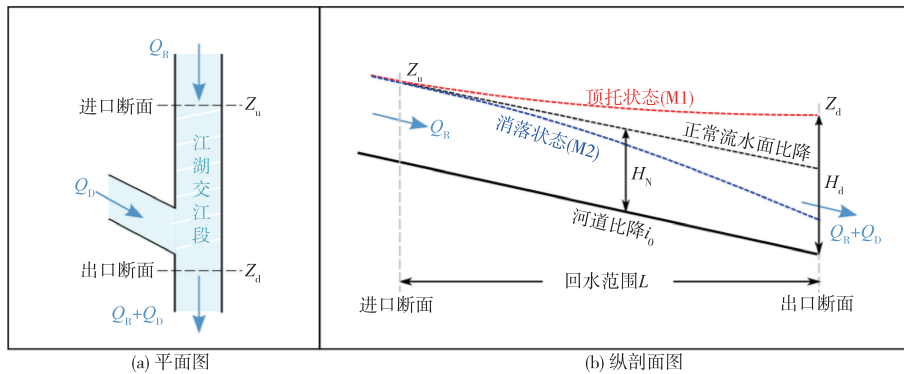


图 3 概化的江湖汇流区段示意

Fig. 3 Schematic diagram of a generalized river-lake confluence reach

的判别条件。鉴于式(5)中各参数取决于河道地形,因此当地形条件发生明显调整时,需对式(5)中的参数重新率定。可以看出,式(5)所对应的平衡态条件下干支来流搭配为非线性关系,而不是以往研究中所假定的支流流量为0或某一固定数值^[16-17,26]。

3.3 干流受顶托强度的评估方法 由前文可见,汇流口上游河段是否发生回水顶托以及受顶托的强度都取决于河段出口水位偏离正常流水位的幅度。为便于比较不同流量下的顶托壅水效应,受顶托强度可用汇流口实际水深与正常流水深的相对偏离程度来衡量,从描述顶托规律的角度,这与传统基于水位壅高绝对值或比降变幅的方法等价,同时更加直观。表达为

$$R = \frac{H_d - H_N}{H_N} \quad (6)$$

式中: R 为顶托强度; H_d 为汇流口处水深实际值,根据式(3)可写为 $H_d = [(Q_R + Q_D)/\alpha_2]^{1/\beta_2}$; H_N 为满足式(5)的正常流水深。由此可得顶托强度 R 与干支流流量的关系为

$$R = \left(\frac{Q_R + Q_D}{Q_R + Q_{D,N}} \right)^{1/\beta_2} - 1 \quad (7)$$

对于任意的干支汇流组合,根据式(7)计算得到的 R 值可判定顶托或消落强度: $R>0$ 代表干流受到支流的顶托作用, R 值越大则顶托越强; $R<0$ 代表干流处于消落态, R 值越小则消落作用越强; $R=0$ 则代表上游河段为未受顶托或消落作用的正常流态。

4 江湖汇流遭遇特征及其在三峡建库后的变化

采用对数等间隔^[27]对监利站及城陵矶站的流量划分等级,得到两站流量边缘概率密度函数(PDF)及累积分布函数(CDF)拟合效果如图4,相应评价指标如表1。可见在各时期内监利与城陵矶流量序列均以P-Ⅲ型分布的拟合效果最佳,K-S检验统计量、 $RMSE$ 和 AIC 评价指标均为最优。

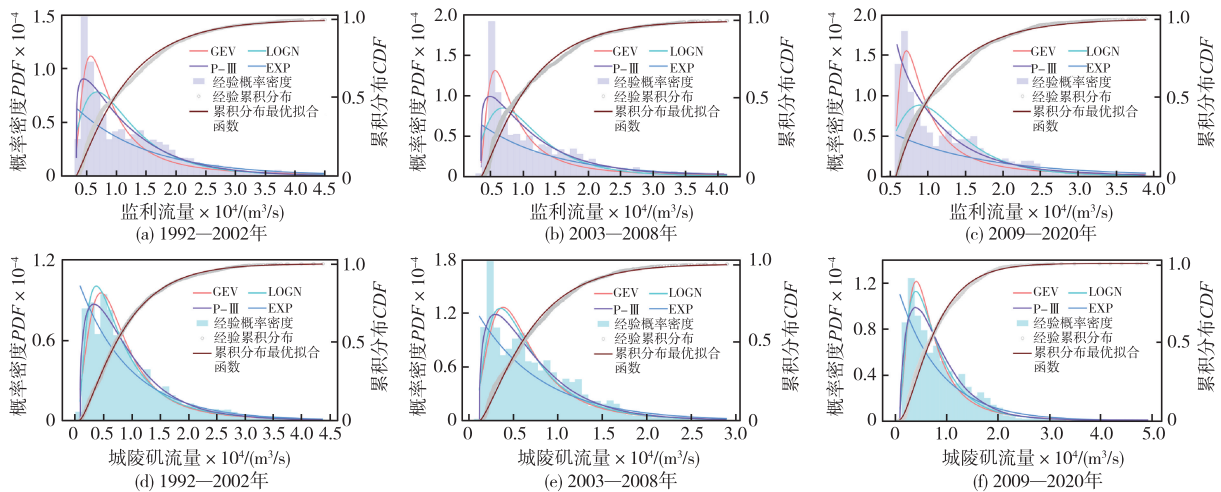


图4 不同时期的流量概率密度函数及最优累积分布函数拟合结果

Fig. 4 Fitting results of discharge PDFs and optimal CDFs for different periods

由图4所示的边缘分布拟合结果可见,两站流量频率分布均呈单峰偏态型,洪、中、枯流量区间的频率分布存在显著差异:枯水流量段存在单峰,中等流量段相对平缓,而洪水流量段频率骤降。这一总体特征在三峡建库前后的不同时期内均有体现。三峡建库后,在水库蓄洪补枯的作用下,监利站6000 m³/s以下的枯水流量级以及25 000 m³/s以上的洪水流量级的出现概率显著降低,尤其是在三峡水库进入正常运行期的2009年后,监利站6000 m³/s以下和35 000 m³/s以上的流量级基本不再出现,而10 000~20 000 m³/s中等流量出现频率明显增大。对于城陵矶站,受到三峡水库汛后蓄水、干流河道枯水位下降以及四水流域极端洪、枯水事件增加^[28-30]等因素的影响,2009年后

表1 监利站与城陵矶站流量的边缘分布函数拟合评价指标对比结果

Table 1 Comparison of evaluation metrics for marginal distribution fitting of discharge at Jianli and Chenglingji stations

时期	评价指标	监利				城陵矶			
		P-Ⅲ	GEV	LOGN	EXP	P-Ⅲ	GEV	LOGN	EXP
1992—2002年	K-S	0.059	0.089	0.084	0.257	0.016	0.039	0.034	0.117
	RMSE	0.034	0.040	0.050	0.114	0.007	0.018	0.020	0.075
	AIC	80945	81477	81550	83561	80333	80661	80510	81302
2003—2008年	K-S	0.070	0.078	0.097	0.288	0.053	0.071	0.067	0.187
	RMSE	0.039	0.041	0.056	0.127	0.023	0.039	0.035	0.087
	AIC	43684	43878	44018	45341	42477	42756	42634	43366
2009—2020年	K-S	0.057	0.099	0.103	0.377	0.054	0.056	0.051	0.191
	RMSE	0.030	0.043	0.064	0.162	0.026	0.038	0.030	0.086
	AIC	85717	86645	87148	91291	86120	86411	86196	87725

5000 m³/s 以下的枯水流量以及 18 000 m³/s 以上的中洪水流量出现频率增大，其他流量区间的频率变化尚不显著。

Copula 函数拟合精度评价及优选结果如表 2 所示。可见，三峡水库建库前后的不同时期内，各备选 Copula 的 RMSE 差异不大，但 Frank Copula 的 AIC 值显著低于其他 Copula 函数，表明其拟合效果最佳。此外，各时期监利与城陵矶流量的 Kendall 秩相关系数分别为 0.504、0.393 和 0.475，显示两站流量具有中等偏强的整体依赖。计算两站不同流量区间的联合概率分布如图 5(a)—(c) 所示，三峡水库正常运行期相较于天然时期的联合概率差异如图 5(d) 所示，图 5(d) 中联合概率增大与减小的区域以红色虚线加以区分。由图 5(a)—(c) 可见，监利与城陵矶流量的联合概率在上、下尾阶段均较小，呈现对称依赖且尾部依赖不明显，这进一步说明 Frank Copula 相较于 Clayton(偏下尾相关)、Gumbel(偏上尾相关)以及 Gaussian(对尾部相关灵活性有限)更能刻画两站流量的相关性特征。

表2 监利与城陵矶站流量的 Copula 联合分布参数估计及拟合检验结果

Table 2 Copula parameter estimation and goodness-of-fit results for discharge at Jianli and Chenglingji stations

	1992—2002年			2003—2008年			2009—2020年		
	θ	RMSE	AIC	θ	RMSE	AIC	θ	RMSE	AIC
Clayton	1.066	0.575	-1615	0.677	0.571	-416	1.086	0.571	-1813
Frank	5.722	0.573	-2556	4.038	0.576	-813	5.255	0.581	-2447
Gumbel	1.832	0.576	-2371	1.488	0.567	-593	1.694	0.581	-1985
Gaussian	0.681	0.575	-2504	0.500	0.569	-628	0.636	0.579	-2272

由图 5(a)可以看出，天然时期江湖流量组合具有明显的正相关特征，高频率组合集中于监利 6000 ~ 15 000 m³/s 与城陵矶 10 000 m³/s 以下的中枯水流量区间，联合遭遇概率为 45.7%。相比之下，三峡建库后江湖流量联合分布的整体格局未发生显著变化，高频率区域仍集中于中枯水流量组合，该组合的联合概率值于 2009 年后增大至 66.1%，相比建库前的相对增幅为 44.6%。显然，这种变化与三峡水库汛后蓄水产生拉空效应，湖区枯水期延长等因素有关。此外，由图 5(d) 可见，2009 年后监利 10 000 ~ 20 000 m³/s 的中等流量区间与城陵矶 30 000 m³/s 以上的洪水流量区间组合的出现几率有所增大，增幅为 5.4%。之所以出现以上变化，是由于三峡水库削减干流洪峰后，增多了干流中等流量与湖区入汇洪水流量的遭遇情况。

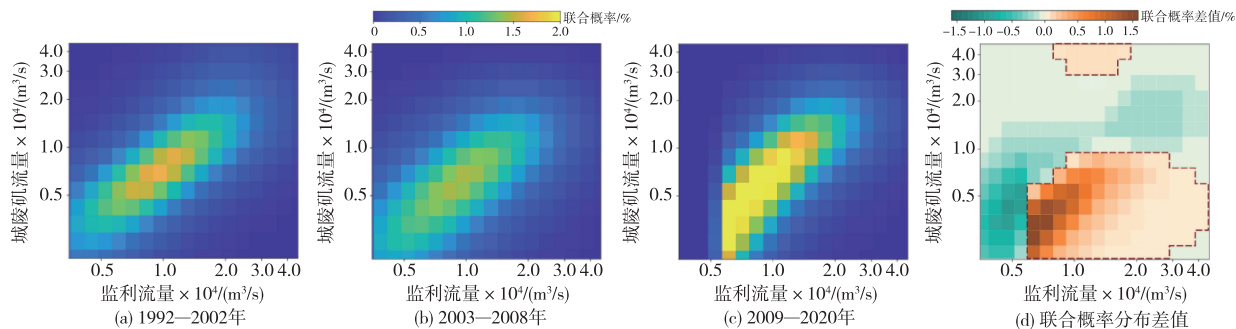


图5 监利流量与城陵矶流量的联合概率分布

Fig. 5 Joint probability distribution of discharge at Jianli and Chenglingji stations

5 不同时期洞庭湖入汇对下荆江的顶托特征

5.1 下荆江顶托态与消落态的划分 根据三峡建库前后不同时期内的实测数据, 得到监利水位与城陵矶水位的多年平均落差(ΔZ_{ave})分别为 3.119 m(1992—2002 年)、3.222 m(2003—2008 年)以及 3.266 m(2009—2020 年)。以各时期的多年平均水位落差为截距, 拟合监利水位与城陵矶水位的相关关系如图 6 所示。可见各时期水位相关关系拟合线的斜率分别为 0.997、0.998 和 0.997, 均接近于 1。由此可见, 图 6 中拟合线与图 2 中的 N 线非常接近, 监—城河段多年平均水位落差可以用于代替正常流落差。基于该落差计算得到监—城河段不同时期正常流水面比降分别为 0.398‰、0.411‰、0.417‰。以 2002 年、2008 年和 2017 年的河道地形作为各时期的代表地形, 认为在这些地形条件下, 各时期内的河道冲淤调整已经积累到一定程度。得到各代表地形下的监—城河段的平均河床纵比降分别为 0.409‰、0.479‰ 和 0.476‰ (图 7), 与图 6 所反映的正常流水面比降十分接近, 且与已有研究关于三峡建库后下荆江河段河床比降小幅增大的认识相一致^[12,31]。需要说明的是, 本文收集的地形数据均为汛后数据, 考虑到监—城河段具有洪淤枯冲的调整规律^[32], 因此河床比降略微大于平均水面比降。

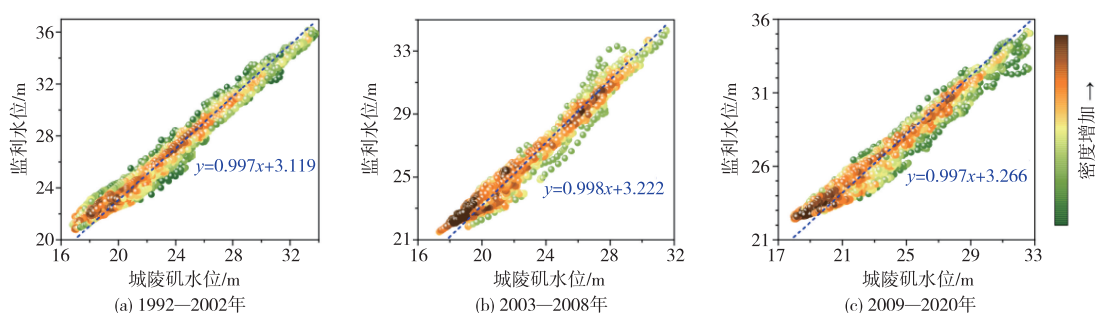


图6 监利水位与城陵矶水位相关关系

Fig. 6 Correlation between water levels at Jianli and Chenglingji stations

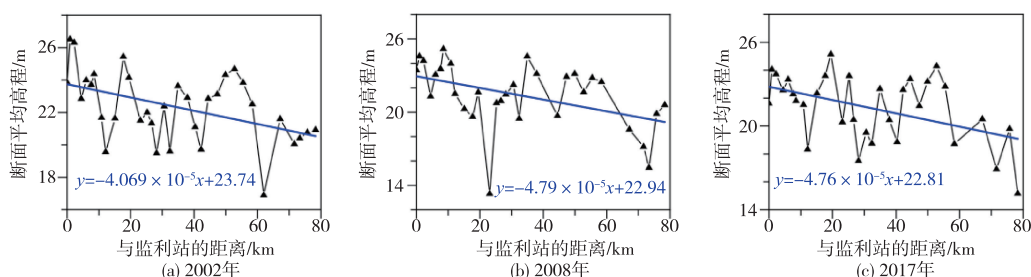


图7 监—城河段平均河床纵比降

Fig. 7 Mean longitudinal bed slope of the Jianli–Chenglingji reach

分别以式(2)(3)拟合监利站、城陵矶站 1992—2002 年、2003—2008 年、2009—2020 年水位流量关系,式(3)中以螺山流量作为江湖合流后的流量,得到各时期的参数率定结果如表 3 所示。从拟合效果来看,由于监利站受到洞庭湖入汇顶托的影响,水位流量关系略为散乱,拟合决定系数为 0.90 左右。而城陵矶站水位与螺山流量的拟合效果良好,决定系数均在 0.98 以上。

表 3 不同时期内式(2)(3)的参数拟合结果

Table 3 Fitting results of equations (2) (3) for different periods

时期	式(2)				式(3)			
	α_1	β_1	Z_1	R_1^2	α_2	β_2	Z_2	R_2^2
1992—2002 年	0.04	4.02	4.51	0.894	4.84	2.86	5.45	0.985
2003—2008 年	0.29	3.59	7.69	0.914	0.39	3.49	1.78	0.989
2009—2020 年	0.43	3.34	5.30	0.883	42.18	2.23	7.71	0.987

注: R_1^2 、 R_2^2 分别为式(2)(3)的拟合决定系数。

将表 3 的参数率定结果以及多年平均水位落差代入式(5)后,可以得到各时期内正常流条件下的江湖流量搭配关系的表达式分别为

$$1992—2002 \text{ 年: } Q_{\text{CLJ}, N} = 4.84(2.21Q_{\text{JL}}^{0.25} - 4.06)^{2.86} - Q_{\text{JL}} \quad (8)$$

$$2003—2008 \text{ 年: } Q_{\text{CLJ}, N} = 0.39(1.42Q_{\text{JL}}^{0.28} + 2.69)^{3.49} - Q_{\text{JL}} \quad (9)$$

$$2009—2020 \text{ 年: } Q_{\text{CLJ}, N} = 42.18(1.29Q_{\text{JL}}^{0.30} - 5.67)^{2.23} - Q_{\text{JL}} \quad (10)$$

式中: Q_{JL} 为监利流量; $Q_{\text{CLJ}, N}$ 为正常流条件下的城陵矶入汇流量。基于式(8)—(10)分别确定三峡建库前后不同时期的平衡态情况下江湖流量组合关系曲线(以下简称 N_0 线),如图 8 所示。图中同时点绘各时期监利站与城陵矶站实测日均流量数据,并拟合不同时期内两站同日流量的多年平均关系线,将其与 N_0 线比较如图 8 所示。可以看出,多年平均关系线与本文基于正常流理论建立的 N_0 线十分接近。这表明本文构建的 N_0 线所反映的江湖汇流遭遇情况,与多年平均意义上最可能出现的遭遇情况基本一致,实际的江湖汇流遭遇大致围绕式(5)所确定的关系波动。这同时也反映出,虽然 N_0 线由河床形态决定,而图 8 中的多年平均关系线由江湖来水过程决定,但经过长期冲积过程之后二者基本相近,说明顶托河段的河床由江湖两方因素共同塑造。

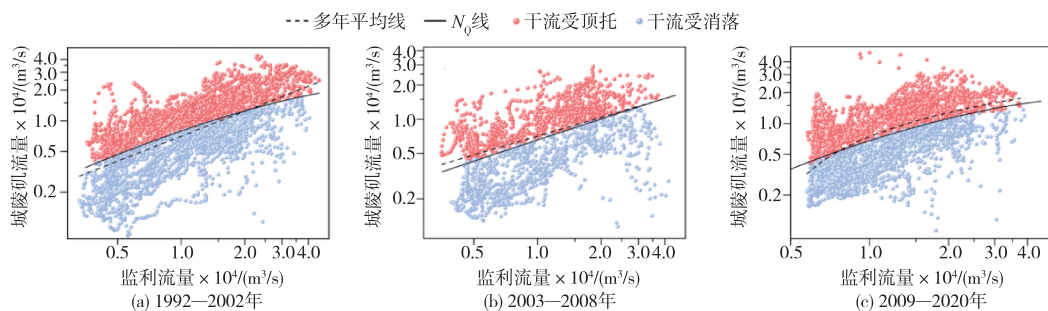


图 8 监利流量与城陵矶流量的散点分布及其状态划分

Fig. 8 Scatter distribution of discharge at Jianli and Chenglingji stations with state classification

计算平衡状态下监利流量占江湖合流量比例($Q_{\text{JL}}/(Q_{\text{JL}}+Q_{\text{CLJ}, N})$)如表 4 所示。可见,干流流量占江湖合流量的比例随着干流流量的增大而逐渐增大。以三峡建库前的天然时期为例,当监利流量分别为枯水流量 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、中等流量 $20\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以及洪水流量 $30\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,正常流状态时的监利流量占江湖合流量的比例分别为 51.7%、61.5% 以及 65.7%。这表明,随着监利流量增大,江湖合流中的城陵矶流量比例相对减小,符合洞庭湖流域主汛期靠前、长江干流主汛期靠后的特点。

由表 4 还可以看出,三峡建库后以上特点总体得到保留,但由于河道冲淤调整导致比降略增大

表4 不同监利流量下的顶托态与消落态临界转换条件

Table 4 Critical transition conditions between backwater and drawdown states under different discharge at Jianli

$Q_{JL}/(m^3/s)$	正常流时对应的城陵矶流量			干流流量占江湖合流量比例		
	$Q_{CLJ, N}/(m^3/s)$			$Q_{JL}/(Q_{JL}+Q_{CLJ, N})$		
	1992—2002年	2003—2008年	2009—2020年	1992—2002年	2003—2008年	2009—2020年
5000	4678	4278	3573	0.517	0.539	0.583
10000	7959	6583	6785	0.557	0.603	0.596
20000	12535	10072	11184	0.615	0.665	0.641
30000	15646	12849	14008	0.657	0.700	0.682

(图7), 相同监利水位(流量)对应的城陵矶水位(江湖合流量)降低(图6), 因而正常流时对应的城陵矶流量减小。从河床自调整的角度来看, 正是由于三峡水库蓄洪补枯以及水库汛后蓄水导致湖区出流的枯水历时加长(图5(d)), 从而交汇点处于较低水位的历时增长, 进一步导致了河床比降的小幅增大, 体现了江湖交汇点作为局部侵蚀基准面的作用。这说明, 消落态与顶托态的临界转换条件之所以发生调整, 其直接原因是河床冲淤, 但其根本原因还是江湖流量组合的变化。

5.2 不同时期下荆江受顶托的几率和时间分布特征

5.2.1 不同流量级下的下荆江受顶托几率 若以 N_Q 线将监利站与城陵矶站对应流量数据划分为顶托或消落状态, 根据图8可知, 在三峡建库前后的不同时期内干流处于顶托态的年均天数分别为169.1 d/a(1992—2002年)、168.5 d/a(2003—2008年)和146.5 d/a(2009—2020年), 消落态与顶托态天数的比值分别为1.16、1.17和1.49。总体来看, 各时期内处于消落态的天数均大于顶托态。与天然时期相比, 2009年后下荆江处于消落态的几率增大。

在图8基础上, 进一步统计不同时期内各监利流量级的年均出现天数, 以及该流量级下的受顶托年均天数, 以二者的比值作为该流量级下的干流受顶托几率, 其结果如图9所示。图中还给出了50%的阈值线, 当某一监利流量级下的干流受顶托几率超过50%时, 认为干流主要处于顶托态, 反之则认为以消落态为主。由图9(a)可以看出, 在三峡建库前的天然时期, 随着监利流量的增大, 干流受顶托几率整体呈上升趋势。具体而言, 当监利流量低于10 000 m^3/s 时, 干流受顶托几率普遍低于50%; 当监利流量处于10 000 ~ 25 000 m^3/s 的中水流量区间时, 干流受顶托几率有所增加, 但普遍仍略低于50%; 当监利流量为25 000 m^3/s 以上的漫滩洪水时, 干流受顶托几率超过50%, 并随监利流量的增大而急剧上升。这表明, 三峡建库前监利25 000 m^3/s 以上的漫滩流量时期更易遭遇洞庭湖入汇顶托, 其中35 000 m^3/s 以上流量级对应的受顶托几率达到70.9%。

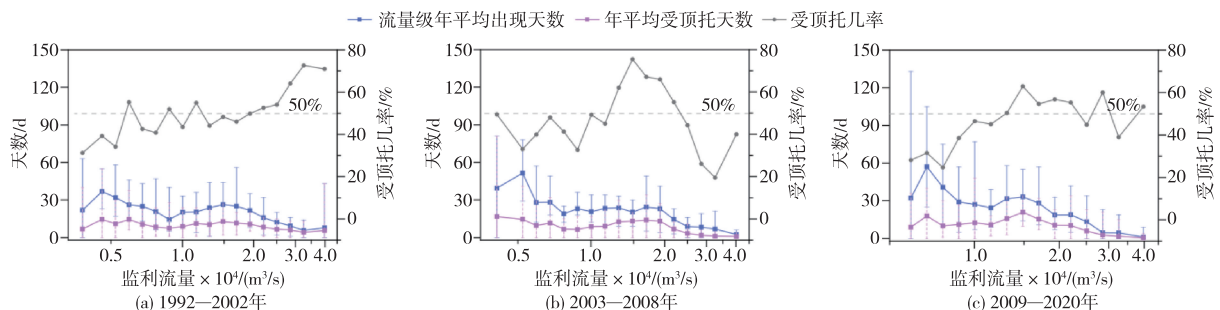


图9 三峡水库建库前后各监利流量级下的干流受顶托几率

Fig. 9 Probability of backwater occurrence at different Jianli discharges before and after the Three Gorges Reservoir impoundment

由图9(b)(c)可以看出, 三峡水库建库后, 不同监利流量级的年均出现天数和受顶托几率呈现以下变化特点: 建库前与水库运行初期内, 6000 m^3/s 以下枯水流量级的年均出现天数分别为116.7和119.0 d/a, 至2009年后则显著减小为32.2 d/a, 受顶托几率则由40.0%和40.1%减小为2009年后的

28.2%；6000 ~ 10 000 m³/s 枯水流量级的年均天数由建库前与运行初期的 80.4 和 90.8 d/a 增大至 2009 年后的 154.3 d/a，而受顶托几率则由 44.0% 和 42.9% 减小为 33.6%；10 000 ~ 25 000 m³/s 中等流量级的年均天数由建库前与运行初期的 133.0、129.2 d/a 增大为 2009 年后的 155.0 d/a，顶托态发生几率则由建库前的 48.9%，增大为运行初期以及 2009 年后的 61.9% 和 54.4%；大于 25 000 m³/s 洪水流量级的年均天数由建库前的 35.1 d/a 分别减小为运行初期的 26.3 d/a 以及 2009 年后的 23.7 d/a，同时顶托态的发生几率也由 63.5% 分别减小为 31.6% 以及 47.1%。由图 9(a)(c) 的对比还可以看出，干流受顶托几率较大的监利流量级由建库前的 25 000 m³/s 以上洪水流量区间降低为建库后的 10 000 ~ 25 000 m³/s 中等流量区间。其中，监利 15 000 m³/s 成为受顶托几率最大的流量级，水库运行初期以及正常运行期内，该流量级下的受顶托几率分别为 75.1% 和 63.0%。

之所以出现以上变化，主要是由于 2003—2008 年期间江湖双方来水均偏枯^[33]，江湖交汇点侵蚀基面降低导致河段纵剖面变陡(图 7)，从而使部分建库前处于消落态的遭遇组合转变为顶托态。另外，2009—2020 年期间，三峡水库汛期实施城陵矶补偿调度，当城陵矶流量为洪峰时，三峡水库往往拦蓄下泄流量，由此导致下荆江呈现顶托态的情况由监利大流量时期向中等流量时期发生转移。

5.2.2 下荆江受顶托的季节特征 针对 1992—2002 年与 2009—2020 年两个时期，将图 8 中 N_0 线以上的流量数据按月划分，并统计其多年月均天数如图 10(a) 所示。由图可见，三峡建库前顶托态天数呈偏态峰型，其峰值在 4 月份，3—8 月顶托态天数均在 15 d 以上。这种分布特点显然与洞庭湖流域的汛期靠前有关，此时洞庭湖汇流相较于干流流量的比例较大。三峡建库后，顶托态天数的年内分配仍呈单峰型，但峰值转移至 6 月，顶托态天数在 15 d 以上的月份是 3—7 月，其中 3—5 月以及 7 月内的天数被削减。这种变化与三峡水库汛前消落期增大下泄流量以及汛期削减洪峰有关。

在图 10(a) 基础上，进一步将各月呈顶托态的天数细分至各流量级，如图 10(b)—(d) 所示，其中的洪、中、枯流量级分别对应 25 000 m³/s 以上、10 000 ~ 25 000 和 10 000 m³/s 以下的监利流量，图中同时给出了该流量级的各月出现天数与各月呈顶托态天数。由图可见，2009 年后相比于建库前的主要差异如下：(1) 12 月一次年 3 月份以枯水流量级为主，该流量级的出现天数未明显变化，但呈顶托态的天数降低，这显然是由于枯期干流流量增大所致；(2) 4—6 月份，受三峡水库汛前消落期增大下泄流量影响，枯水流量级出现天数减少而中等流量级出现天数增多，其中 5—6 月中等流量级天数都在 20 d 以上，且各月呈顶托态的天数都在 18 d 以上；(3) 7—8 月份，受三峡水库汛期削峰影响，洪水流量级出现天数减少而中等流量级出现天数增大，其中 7 月份呈顶托态的中等流量级天数由 13.8 d 增至 16.7 d；(4) 9—11 月份，受三峡水库汛后蓄水影响，洪、中流量级天数均减少，枯水流量级天数增多，洪、中流量级下的顶托天数减少，而枯水流量级下的顶托天数略有增加。

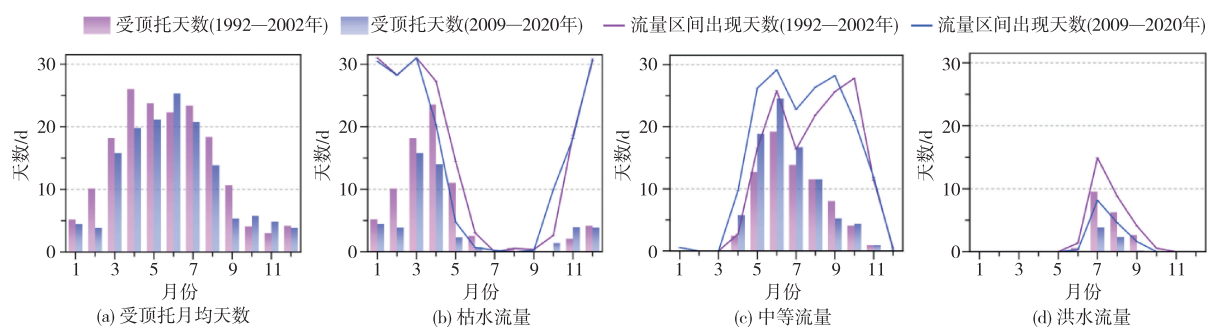


图 10 干流呈顶托态的各月天数及其在各流量级下的分布

Fig. 10 Monthly number of backwater days and their distribution across discharge levels

综上所述，三峡建库前下荆江受洞庭湖入汇顶托主要发生于 3—8 月份，而建库后则主要发生于 4—7 月份。之所以发生以上变化，是由于三峡水库调蓄导致汛期和汛后的洪、中流量级出现频次削减，而汛前和枯期的中、枯流量级增多。这种变化与洞庭湖入汇的丰枯节律组合之后，导致下荆江受洞庭湖顶托的天数在多年平均尺度上有所减小，但当监利来水处于 10 000 ~ 25 000 m³/s 的中等流量区

间时,下荆江呈现顶托态的月均天数显著增大,且主要发生于5—7月。

5.3 三峡建库前后下荆江受顶托强度特征

5.3.1 不同干支流量组合下的顶托强度 由式(7)计算三峡建库前后不同时期内各干支流量组合下的顶托强度 R ,并比较三峡建库前后的差异,结果如图11所示($\Delta R=R_{(2009-2020)}-R_{(1992-2002)}$)。由图11(a)(b)可以看出,两个时期内的顶托强度具有同样的分布规律,即对于同样的监利流量级,当城陵矶流量越大时顶托强度 R 值越大,顶托强度最大的情况发生于监利小流量与城陵矶大流量的组合。

图11(c)的 ΔR 值代表了三峡建库前后河床调整对同等汇流组合下水动力条件的影响,由于三峡建库后 N_Q 线下降,天然时期 N_Q 线以上区域的 ΔR 均为正值。这表明天然时期内处于顶托态的江湖汇流情况,在建库后所造成的顶托强度进一步增大。以监利中等流量 $12\,000\sim 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 遭遇城陵矶 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上洪水流量的情况为例,顶托强度由建库前的 0.28 增大至2009年后的 0.41 ,增幅达 46.4% ;而对于监利平滩流量($25\,000\text{ m}^3/\text{s}$)与城陵矶洪水流量级(大于 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$)遭遇情况,顶托强度由建库前的 0.17 增大至2009年后的 0.24 ,增幅达 41.2% 。

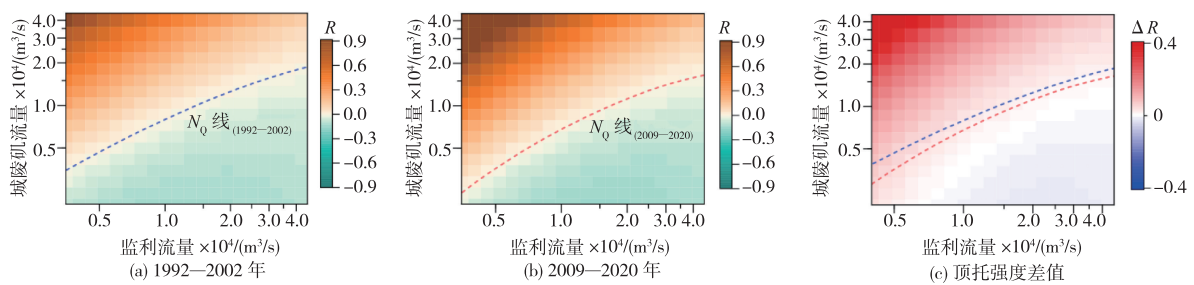


图11 各级干支流量组合下的干流受顶托强度及其在三峡建库后的变化

Fig. 11 Backwater intensity under different discharge combinations and its variation

三峡建库后河道调整导致同等条件下顶托强度增大的主要原因,是由于中枯水干支来流遭遇几率大幅增加(图5(d)),使得江湖汇流点的侵蚀基准面下降,从而使干流河床纵比降增大(图7),对应的 N_Q 线降低。从具体体现形式来看,比降增大将伴随河床的显著冲刷下切,洪、中、枯各级河槽同流量下的水深在建库后普遍增加^[32],更易产生回水。

5.3.2 年内不同时期的顶托强度变化 图12展示了三峡建库前、后(2009年后)下荆江受洞庭湖汇流顶托强度的年内分布情况,其中兼顾了多年均值以及历年同期波动幅度。从多年平均线来看,建库后顶托强度均值仅在5—6月变化不大,而在其余多数时段普遍低于建库前。然而从同期波动幅度来看,顶托强度上包络线在4—7月显著高于建库前,这说明强顶托事件在2009年后更加突出,尤其以7月份最明显。此外,顶托强度的下包络线在全年大多数时段普遍低于建库前,说明干流受较大消落作用影响的事件也有所增多。根据式(7)可见,中等干流流量搭配较大支流流量的情况下,最易导致较大 R 值;较大干流流量搭配较小支流流量,最易导致较小 R 值。以7月为例,将建库前顶托强度 R 值的95%和5%分位数(分别为 0.17 和 -0.05)分别作为极端强顶托与极端强消落的判别阈值,可得建库后极

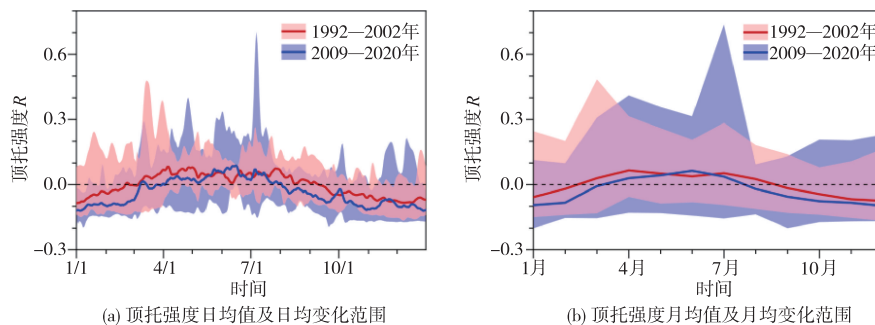


图12 三峡建库前后的下荆江顶托强度年内分布

Fig. 12 Intra-annual backwater intensity in the Lower Jingjiang River before and after the Three Gorges Reservoir impoundment

端强顶托事件主要发生在2016年($R_{\max}=0.23$)、2017年($R_{\max}=0.74$)和2020年($R_{\max}=0.23$)等洞庭湖来流较大,而三峡水库调洪作用较明显的年份;极端强消落事件则主要发生在2011年($R_{\min}=-0.10$)、2018年($R_{\min}=-0.16$)等洞庭湖来水偏枯的年份。

图9(c)与图12(b)说明,在近年来三峡水库调蓄流量过程以及洞庭湖流域气候条件变化的背景下,中等干流流量遭遇较大湖区入汇流量的极端水文事件不仅发生频率增加,由此导致的干流受顶托强度也进一步加大。对于三峡建库后出现的这种新现象,要从两方面加以关注:一是在防洪调度和堤防加固等工程实践中,要注意中等监利流量下洪水位偏高的现象增多;二是在河床长期演变趋势的判断方面,要注意汛期中等监利流量下顶托强度增大可能对洪水河槽淤积的影响。这些问题尚需结合水沙输移模拟开展更加量化的分析工作。

6 结论

针对荆江与洞庭湖交汇点上游的监利至城陵矶河段,引入Copula函数研究了三峡建库前后江湖汇流遭遇特征,基于冲积河流水流运动规律提出了平衡态下的江湖流量搭配关系、构建了干流受顶托强度的评估指标,在此基础上定量分析了三峡建库前后下荆江受顶托事件的发生几率、出现时机以及年内不同时期的顶托强度变化。得到的主要结论包括:

(1)在湖对江既无顶托也无消落作用的平衡态下,江湖流量搭配为非线性函数关系,该关系与江湖流量之间的多年平均拟合线相近,体现了江湖两方面的因素对干流河床的塑造作用,可用于判别干流的顶托或消落状态。

(2)三峡水库进入正常运行期后,监利流量处于中枯水量级的历时增长,导致干流与洞庭湖汇流均为中枯水的遭遇概率由建库前的45.7%增大至66.1%,干流中水与湖区入汇为30 000 m³/s以上洪水的遭遇概率增幅达5.4%。

(3)三峡建库前后各时期内,下荆江处于消落态的天数均大于顶托态。与天然时期相比,三峡水库进入正常运行期后下荆江处于消落态的几率增大,处于顶托态的时机由3—8月变为4—7月,对应流量由监利的平滩以上流量级向10 000~25 000 m³/s的中水流量级转移。这几个月份内中水流量级的出现天数与干流处于顶托态的天数均增多。

(4)在江湖流量变化的双重驱动下,江湖汇流点的侵蚀基准面降低,并且年尺度上湖区对干流的平均顶托强度减弱,但4—7月出现远大于历史同期顶托强度的极端情况增多,需引起长期关注。

本文提出的方法也可用于其他受支流入汇顶托的冲积型干流河段的水文水动力特性研究。

参 考 文 献:

- [1] 董耀华. 2016洪水+长江中下游防洪与治河问题再探[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(1): 1-6, 12. (DONG Y H. Review on flood control and river regulation of the middle and Lower Yangtze River after 2016-type flood[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(1): 1-6, 12. (in Chinese))
- [2] 邴建平, 邓鹏鑫, 徐高洪, 等. 2020年长江中下游干流高洪水位特点及成因分析[J]. 水利水电快报, 2021, 42(1): 10-16. (BING J P, DENG P X, XU G H, et al. Analysis on characteristics and causes of high flood level in middle and lower reaches of Yangtze River of 2020[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2021, 42(1): 10-16. (in Chinese))
- [3] 李芷晴, 陈立, 冯恺, 等. 三峡建库后荆江洲滩变形及其与水文情势变化对植被的叠加影响[J]. 水利学报, 2025, 56(5): 587-598. (LI Z Q, CHEN L, FENG K, et al. Evolution of channel bars in the Jingjiang River reach after the impoundment of the Three Gorges Reservoir and its combined effects with hydrological regime on vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(5): 587-598. (in Chinese))
- [4] NITTROUER J A, SHAW J, LAMB M P, et al. Spatial and temporal trends for water-flow velocity and bed-material sediment transport in the lower Mississippi River[J]. Geological Society of America Bulletin, 2012, 124

(3/4): 400–414.

- [5] GANTI V, CHADWICK A J, HASSENBUCK-GUDIPATI H J, et al. Experimental river delta size set by multiple floods and backwater hydrodynamics[J]. *Science Advances*, 2016, 2(5): e1501768.
- [6] FERNANDES A M, TÖRNQVIST T E, STRAUB K M, et al. Connecting the backwater hydraulics of coastal rivers to fluvio-deltaic sedimentology and stratigraphy[J]. *Geology*, 2016, 44(12): 979–982.
- [7] CHATANANTAVET P, LAMB M P, NITTROUER J A. Backwater controls of avulsion location on deltas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: 2011GL050197.
- [8] BROOKE S A S, GANTI V, CHADWICK A J, et al. Flood variability determines the location of lobe-scale avulsions on deltas: Madagascar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(20): e2020GL088797.
- [9] WU C L, NITTROUER J A. Impacts of backwater hydrodynamics on fluvial-deltaic stratigraphy [J]. *Basin Research*, 2020, 32(3): 567–584.
- [10] PAOLA C, MOHRIG D. Palaeohydraulics revisited: Palaeoslope estimation in coarse-grained braided rivers[J]. *Basin Research*, 1996, 8(3): 243–254.
- [11] 邓金运, 范少英. 基于能量的鄱阳湖—长江相互作用表征指标研究[J]. *地理学报*, 2017, 72(9): 107–116. (DENG J Y, FAN S Y. Characterization index for expressing the relationship between the Yangtze River and Poyang Lake based on the theory of energy[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 107–116. (in Chinese))
- [12] 陈栋, 渠庚, 郭小虎, 等. 三峡建库前后洞庭湖对下荆江的顶托与消落作用研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 86–94. (CHEN D, QU G, GUO X H, et al. Study of the supporting and falling impact of Dongting Lake on the Lower Jingjiang River before and after construction of Three Gorges Dam[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(2): 86–94. (in Chinese))
- [13] 林芬芬, 夏军强, 周美蓉, 等. 下荆江河槽形态及过流能力调整对上下游边界条件的响应[J]. *水利学报*, 2019, 50(5): 641–649. (LIN F F, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Recent response of bankfull channel geometry and flood-discharge capacity in the Lower Jingjiang Reach to upstream and downstream boundary conditions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(5): 641–649. (in Chinese))
- [14] 赖锡军, 黄群, 张英豪, 等. 鄱阳湖泄流能力分析[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 529–534. (LAI X J, HUANG Q, ZHANG Y H, et al. Discharge capacity analysis on Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(4): 529–534. (in Chinese))
- [15] 邴建平, 邓鹏鑫, 吕孙云, 等. 鄱阳湖与长江干流水量交换效应及驱动因素分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2017, 47(8): 856–870. (BING J P, DENG P X, LV S Y, et al. The analysis of water exchange regime research on Poyang Lake and Yangtze River and driving factors[J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2017, 47(8): 856–870. (in Chinese))
- [16] 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[J]. *水科学进展*, 2023, 34(3): 431–441. (SHANG H X, HU C H, XIA J Q, et al. Influence of Dongting Lake inflow on the degree and range of backwater effect in the Jingjiang reach[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 431–441. (in Chinese))
- [17] 杨春瑞, 邓金运, 陈立, 等. 长江中游通江湖泊对干流顶托作用变化规律[J]. *水科学进展*, 2024, 35(1): 98–111. (YANG C R, DENG J Y, CHEN L, et al. Study on the change of backwater effect of the connected lakes in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(1): 98–111. (in Chinese))
- [18] 孙昭华, 周歆玥, 范杰玮, 等. 考虑回水影响的河道水位—流量关系确定方法[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 259–270. (SUN Z H, ZHOU X Y, FAN J W, et al. Stage-discharge rating method considering backwater effect in river channel[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 259–270. (in Chinese))
- [19] SCHMIDT A R, YEN B C. Theoretical development of stage-discharge ratings for subcritical open-channel flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(9): 1245–1256.
- [20] LAMB M P, NITTROUER J A, MOHRIG D, et al. Backwater and river plume controls on scour upstream of river mouths: Implications for fluvio-deltaic morphodynamics [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117(F1): 2011JF002079.
- [21] VAN YPEREN A E, HOLBROOK J M, POYATOS-MORÉ M, et al. Backwater length estimates in modern and ancient fluvio-deltaic settings: Review and proposal of standardized workflows[J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 250: 104692.
- [22] GANTI V, CHU Z X, LAMB M P, et al. Testing morphodynamic controls on the location and frequency of river

- avulsions on fans versus deltas: Huanghe (Yellow River), China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(22): 7882–7890.
- [23] YEN B C, GONZÁLEZ-CASTRO J A. Open-channel capacity determination using hydraulic performance graph[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(2): 112–122.
- [24] SCHMIDT A R, YEN B C. Theoretical development of stage-discharge ratings for subcritical open-channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(9): 1245–1256.
- [25] KASHANI M H, DANESHFARAZ R, GHORBANI M A, et al. Comparison of different methods for developing a stage-discharge curve of the Kizilirmak River[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2015, 8(1): 71–86.
- [26] MENG Y, JIANG L, DU E, et al. A new understanding of the Poyang Lake–Yangtze River interaction: a backwater effect on the Yangtze River perspective[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(7): e2025GL114807.
- [27] 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[J]. *水利学报*, 2021, 52(5): 521–534. (SUN Z H, ZHOU W X, 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[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(5): 521–534. (in Chinese))
- [28] 方春明, 胡春宏, 陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J]. *水利学报*, 2014, 45(1): 36–41. (FANG C M, HU C H, CHEN X J. Impacts of Three Georges Reservoir's operation on outflow of the three outlets of Jingjiang River and Dongting Lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(1): 36–41. (in Chinese))
- [29] 卢金友, 姚仕明. 水库群联合作用下长江中下游江湖关系响应机制[J]. *水利学报*, 2018, 49(1): 36–46. (LU J Y, YAO S M. Response mechanism of the river and lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the combined effect of reservoir groups[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(1): 36–46. (in Chinese))
- [30] 乔川源, 朱奎, 陶昌弟, 等. 长江宜昌至螺山段河道枯水时空演变特征及驱动因素研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2025, 23(6): 644–656. (QIAO C Y, ZHU K, TAO C D, et al. Study on the spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of low-flow conditions in the Yangtze River reach from Yichang to Luoshan[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2025, 23(6): 644–656. (in Chinese))
- [31] 周炜兴, 孙昭华, 杨中华, 等. 三峡建库前后荆江沙质河段流量-输沙率关系及其变化机理[J]. *水利学报*, 2025, 56(8): 1049–1060, 1071. (ZHOU W X, SUN Z H, YANG Z H, et al. Sediment-transport rating curves and their variation mechanisms in sandy reach of the Jingjiang River before and after construction of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, 56(8): 1049–1060, 1071. (in Chinese))
- [32] 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[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(4): 1–13. (LI Y T, XUE J L, SUN Z H, et al. Channel degradation and river stage variations in reaches downstream of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(4): 1–13. (in Chinese))
- [33] 朱玲玲, 许全喜, 戴明龙. 荆江三口分流变化及三峡水库蓄水影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 822–831. (ZHU L L, XU Q X, DAI M L. Runoff diverted from the Jingjiang reach to the Dongting Lake and the effect of Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 822–831. (in Chinese))

Changes in the backwater effect of Dongting Lake inflows on the Lower Jingjiang River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir

LI Zhiqing^{1,2,3}, SUN Zhaohua¹, CHEN Li¹, AN Shanshan¹, ZHOU Weixing¹

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

2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

3. Hubei Key Laboratory of Basin Water Security, Wuhan 430010, China)

Abstract: Clarifying the new characteristics of Dongting Lake's backwater effect on the lower Jingjiang River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir is a critical issue at present. Focusing on the river section from Jianli to Chenglingji upstream of the confluence between the river and the lake, Copula functions were employed to investi-

gate the characteristics of flow coincidences between the river and the lake in different periods. Based on the flow dynamics of alluvial rivers, a balanced-state flow pairing relationship was proposed, and an index for assessing the backwater intensity of the mainstream was developed. On this basis, the occurrence probability and timing of backwater events as well as the variation of backwater intensity during different periods within a year for the lower Jingjiang River before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir were quantitatively analyzed. The results indicate that, under the balanced state, the flow pairing between the river and the lake follows a nonlinear functional relationship. This relationship is close to the long-term mean fitted line of river-lake discharges and can be used to determine whether the mainstream is in a backwater or drawdown state. After the impoundment of the Three Gorges Reservoir, the duration of Jianli discharges at the medium-low flow level increased, resulting in a 44.6% rise in the coincidence probability of both the mainstream and lake inflows being at medium-low flow. The coincidence probability of the mainstream at medium flow and lake inflows at flood level (exceeding 30,000 m³/s) increased by 5.4%. As a result, the erosional base level at the river-lake confluence decreased, and on an annual scale, the mean backwater intensity of the lake on the mainstream weakened. However, the timing of the mainstream being in a backwater state shifted from above-bankfull flow levels to medium flow levels. The occurrence of extreme backwater intensity far exceeding the historical values during April-July has increased, warranting long-term attention.

Keywords: Three Gorges Reservoir; lower Jingjiang River; Dongting Lake; flow encounter; backwater effect

(责任编辑: 鲁 婧)

(上接第 766 页)

Sediment source and transport mechanisms, patterns, and impacts in the Yarlung Tsangpo River under the influence of changing cryosphere

LI Dongfeng, LI Yiyi

(Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In response to climate change, the glacier retreat, snow cover reduction, and permafrost degradation in the Yarlung Tsangpo (YTR) basin have altered hydrological processes, sediment sources, and river sediment flux. This paper systematically reviews sediment data collected since the 1980s, combining data on meteorology, cryosphere (glaciers, snow, and permafrost), and vegetation, to comprehensively assess the sediment source and transport mechanisms, spatiotemporal variations, and engineering and ecological impacts in the basin. Sediment in the YTR basin mainly originates from rainfall erosion, glacier erosion, snowmelt erosion, freeze-thaw erosion, and geological disasters. In the upper reaches (above Lazi), sediment flux is relatively low due to low temperatures and limited precipitation; in the middle reach (Lazi to Nuxia), sediment flux increases initially due to the tributary inputs but then decreases due to channel widening and long-term sediment accumulation; in the lower reach (Nuxia to Baxika), glacier erosion and frequent geological disasters produce high sediment supplies, dominating the sediment dynamics of the entire basin. Climate warming has accelerated glacier melt and permafrost degradation, enhancing sediment availability, connectivity, and transport capacity. The observed sediment flux at Nuxia generally showed an increase trend from 1981 to 2009. Increasing river sediment flux can lead to issues such as reservoir sedimentation and turbine abrasion, while suspended sediments alter water turbidity and carbon flux, affecting water quality and the carbon cycle. It is necessary to strengthen an integrated “space-air-ground” based monitoring framework, cryosphere-oriented sediment-water models, and multi-sphere interaction research to support sustainable river management under climate change.

Keywords: Yarlung Tsangpo River; sediment; climate change; evolution patterns; basin ecology

(责任编辑: 鲁 婧)