

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.04.011

岷江河口汇流特征及浅滩整治水位

何熙^{1,2}, 郝岭², 邓涯¹, 李顺超², 曹民雄¹

(1. 南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏南京 210029;
2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川成都 610017)

摘要: 山区支流河口航道受干、支流“博弈”影响, 兼具天然河流和回水顶托段水文泥沙的双重特性, 分析两江水沙条件、汇流特征、顶托影响对研究支流河口段航道治理具有重要意义。本文以岷江河口为例, 采用1960—2020年金沙江、岷江实测水文泥沙资料, 基于Copula函数理论构建两江退水期日均流量联合分布模型, 建立岷江河口段航道枯水河床造床作用函数, 提出山区支流河口段航道浅滩整治水位的量化方法。研究表明: ①受流域上游水库大规模开发建设以及人类活动因素影响, 岷江下游年径流量及输沙量呈显著减小趋势, 但枯水期流量呈显著增加趋势; ②金沙江对岷江河口段壅水作用总体表现为汛期强于枯水期, 对岷江汛末至枯水期时段冲刷航槽、维持岷江河口段航道水深创造了有利条件; ③岷江河口壅水高度随汇流比增大而增加, 且两者呈明显的正线性相关关系; ④岷江河口变动壅水区范围内整治水位应遵循羊角石以上按照非顶托河段采用设计最低通航水位以上1.5 m的原则, 羊角石—杨家滩河段整治水位则应自上而下采用设计最低通航水位以上1.5~2.0 m渐变增加的原则。

关键词: 汇流特征; 汇流比; 顶托作用; Copula函数; 整治水位

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)04-0645-12

长江上游山区河流航道作为西南地区关于国家综合立体交通网建设中的重要组成部分, 其运量、能耗、运输能力相比公路运输有着明显优势, 以“干支联动、区域协同”为主题推动长江上游航运高质量发展已成为快速融入长江经济带的重要举措。长江上游重要高等级支流河口段航道往往受干、支流交互顶托影响, 其水沙动力因素极其复杂, 航道治理难度较大, 成为影响干支流航道联通的“肠梗阻”。因此, 深入研究山区河流干支流汇流特征、顶托影响以及支流河口段航道水沙条件、河床演变特征等一系列基础问题, 对于支流河口段航道治理具有重要意义。

国内外学者在干支流汇流特征及顶托影响的研究方面多集中于三峡大坝以下, 主要关注通江湖泊与长江干流交互顶托的影响。尚海鑫等^[1]采用随机森林回归模型揭示了洞庭湖入汇对荆江河段水位顶托的影响程度和范围; 杨春瑞等^[2]分析了三峡水库蓄水前后洞庭湖和鄱阳湖对长江干流顶托强度的变化情况; 孙昭华等^[3-4]、张明月等^[5]针对长江中游受通江湖泊顶托影响, 提出了一种新的水位—流量关系确定方法, 分析了受长江干流顶托影响下湖区与干流水文关联性问题。对于长江上游, 钟亮等^[6]采用分形几何法探讨了长江和嘉陵江两江汇流比的变化趋势和频率分布特征。在支流河口顶托段水沙条件及河床演变的研究方面, 张帮稳等^[7]基于实测数据和三维水沙模型, 分析了溪洛渡库区支流河口段泥沙淤积特性及拦门沙形成机理, 提出支流来沙是支流河口段淤积的主因。朱玲玲等^[8-9]基于数字高程模型, 分析了三峡库区支流河口段泥沙淤积情况, 提出支流河口段淤积主要以干流倒灌为主; 结合长江干流对洞庭湖和鄱阳湖的顶托情况, 分析了两湖冲淤变化特征及主要影响因素。以上可知, 已有研究多关注通江湖泊与干流的相互作用关系以及库区河段

收稿日期: 2024-03-15; 网络出版日期: 2024-07-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240717.1748.004>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3200403); 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金项目(Yk223001-1)

作者简介: 何熙(1989—), 男, 四川巴中人, 高级工程师, 主要从事航道治理及河流动力学方面研究。

E-mail: lovehessi@qq.com

的干支流水沙条件,对于山区天然河流干支流汇流特征、顶托影响以及支流河口段航道水沙条件的研究相对较少,且缺乏基于以上研究进一步开展山区支流河口段航道治理的探索。

本文采用金沙江、岷江下游河段水文和泥沙实测资料,定量分析金沙江和岷江两江汇流特征以及金沙江对岷江河口段顶托影响,基于 Copula 函数理论,构建两江退水期日均流量联合分布模型,建立岷江河口段航道枯水河床造床作用函数,提出山区支流河口段浅滩整治水位量化方法。

1 研究区概况

岷江是长江上游重要的一级支流,在乐山大佛处接纳右岸的大渡河、青衣江2条主要支流,继而转向东南,在宜宾市合江门汇入长江,其中汇合口以上的长江河段称为金沙江。研究区域位于岷江下游河口段(图1)。岷江为典型的山区河流,主要表现为汛期水位陡涨陡落,洪、枯水期水位变幅大,部分滩段坡陡流急等特点。岷江中洪水期一般为每年5—10月,枯水期一般为每年11月至翌年4月。20世纪50年代,随着岷江流域水电站大规模开发建设,特别是紫坪铺和瀑布沟两大巨型水库相继投入运用,坝下游河段水沙情势发生较大变化。高场水文站位于岷江河口上游约27 km,至河口无分流和支流入汇影响,本研究选择该站实测水文和泥沙资料代表岷江的水沙情势;宜宾水位站位于金沙江与岷江交汇处,选择该站实测水位资料代表岷江河口处水位;横江水文站为横江出口控制站(金沙江和横江河口上游约15 km),向家坝水文站位于金沙江和横江河口上游约1.7 km,选择上述2处站点实测水文、泥沙资料代表金沙江的来水来沙情势。

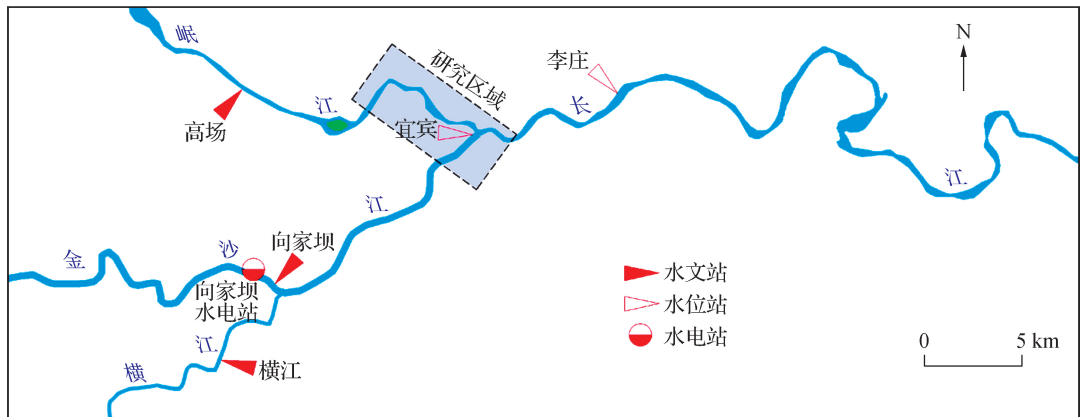


图1 研究河段地理位置及水文站与水位站示意

Fig.1 Sketch of the study area, the distribution of gauging stations and stage gauging stations

2 研究河段水沙及河床演变特征

2.1 研究河段水沙演变特征

根据高场水文站1960—2020年水文和泥沙统计资料,采用 Mann-kendall 趋势检验^[10-11],结果表明(图2),高场水文站年均流量在引调水等人类活动因素影响下呈显著减小趋势($p < 0.05$),但受流域上游大型水库“蓄洪补枯”的影响,坝下游河段枯水期流量以及最枯2月月均流量均呈显著增加趋势($p < 0.01$),且年内流量过程呈现进一步调平。此外,受流域上游梯级水库拦沙作用影响,坝下游河段年输沙量呈显著减小趋势($p < 0.01$)。以紫坪铺及瀑布沟水库蓄水运行时间为节点,2011—2020年枯水期多年平均流量以及最枯2月多年月均流量相对2006—2010年分别增加了318 m³/s和359 m³/s,相对1960—2005年分别增加了354 m³/s和468 m³/s;2011—2020年多年平均输沙量相对2006—2010年减小了0.0016亿t,相对1960—2005年减小

了0.237 7 亿 t。上述水沙条件的变化为岷江下游航道建设提供了有利的条件。

以高场水文站 1960—2020 年年径流量和输沙量为序列, 采用皮尔逊 III 型概率分布函数拟合高场水文站径流和泥沙系列, 分别以频率 37.5% 和 67.5% 作为水沙丰、平、枯划分标准^[12-13]。其中在 2011—2020 年共计 10 a 时间内, 水沙丰、平、枯遭遇情形主要表现为: 2020 年为丰水丰沙年, 2018—2019 年为连续丰水平沙年, 2014 年为平水枯沙年, 其余年份均为枯水枯沙年。

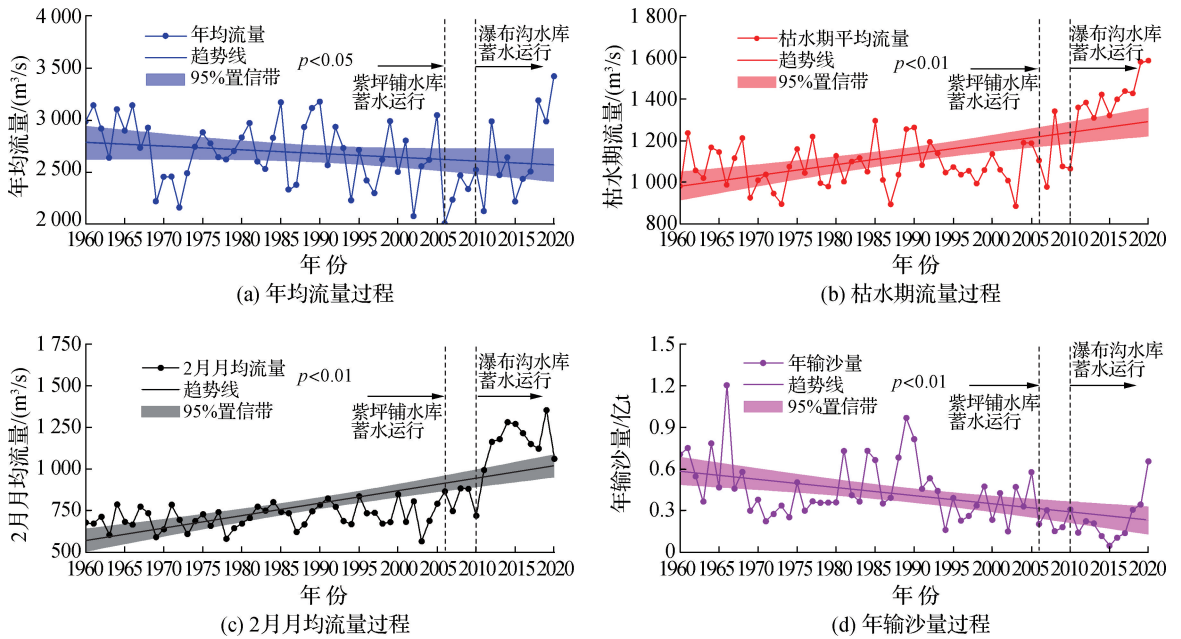


图2 1960—2020 年高场水文站径流量与输沙量年际变化情况

Fig.2 Variations of runoff and sediment runoff at Gaochang gauging station during 1960—2020

在考虑岷江流域上游大型水电站以及金沙江向家坝水电站运用后对研究河段水沙一致性的影响, 选取高场、向家坝、横江 3 个水文站 2011—2020 年共计 10 a 的水文资料作为分析样本, 两江径流量总体表现为年内分布极不均匀、洪枯水差异明显等特点(图 3(a))。其中, 金沙江和岷江日均流量变异系数分别为 0.70

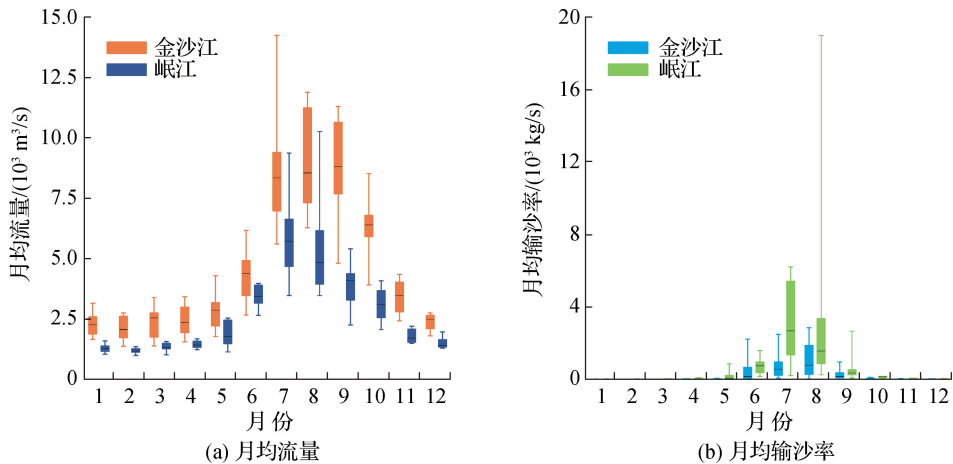


图3 2011—2020 年金沙江、岷江月均流量及输沙率变化箱型图

Fig.3 Box plot of monthly average discharge and sediment discharge of Jinsha River and Minjiang River during 2011—2020

和 0.79, 两江汛期径流量分别约占全年径流量的 72.54% 和 73.63%。由于在水沙搭配上, 河道输沙率与流量一般呈幂相关关系^[14], 因此两江输沙率亦存在年内分布不均的特点(图 3(b))。其中金沙江和岷江日均输沙率变异系数分别为 7.64 和 6.00, 两江汛期输沙量分别约占全年输沙量的 97.78% 和 98.04%。对比两江水文泥沙特点, 金沙江多年平均流量约为岷江的 1.69 倍, 但来沙量仅约占岷江的 33%。

2.2 两江汇流比及岷江河口水位顶托特征

两江不同来流组合对岷江河口的壅水影响亦不尽相同。Yen 等^[15]、孙昭华等^[3]针对受交汇流影响的河段, 将与长河段河床平均坡降相平行的恒定水面线视为长河段的“正常流”。以此理论, 尚海鑫等^[1]将受顶托河段水面线与“正常流”水面线的落差定义为回水顶托程度; 杨春瑞等^[2]将实际水位差与无顶托水位差的比值定义为顶托强度。

本文采用等落差法, 以 2011—2022 年高场水文站日均水位与宜宾水位站日均水位落差(ΔZ_{G-Y})为参变数, 建立各水位落差条件下岷江河口处水位—流量关系曲线(图 4(a))。以该水位—流量关系“曲线簇”的“下包线”为基础, 将岷江某级流量下河口处实测水位与该流量在“下包线”所对应水位的差值定义为岷江河口壅水高度, 以 ΔZ 表示。

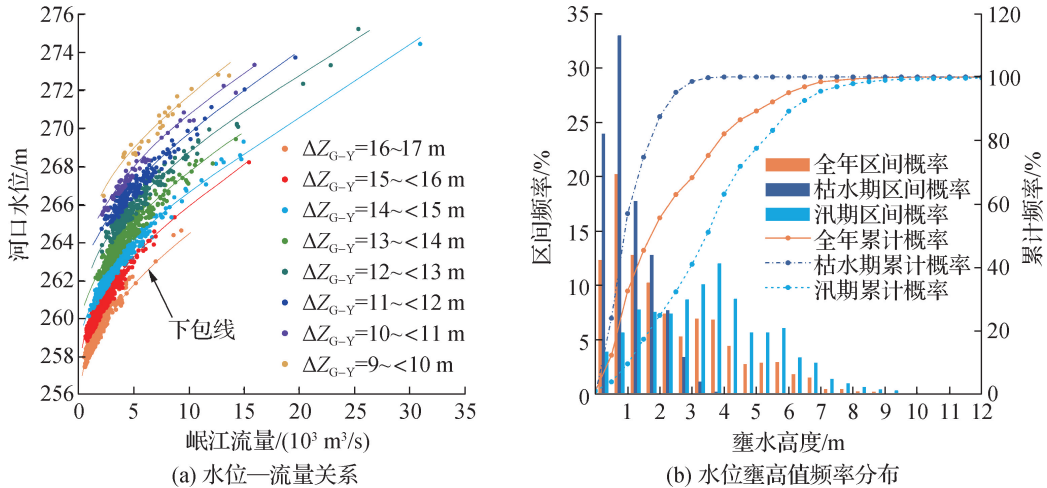


图 4 2011—2020 年岷江河口水位—流量关系及水位壅高值频率分布

Fig. 4 Stage—discharge relationship and frequency distribution of backwater height at mouth of Minjiang River during 2011—2020

根据各水文(位)站 2011—2020 年实测资料, 岷江河口在全年、枯水期和汛期 3 个时段的多年平均水位壅高值分别为 2.30、1.06 和 3.54 m。枯水期与汛期 2 个时段的河口水位壅高值样本变异系数分别为 0.57 和 0.68, 表明汛期水位壅高值离散程度较枯水期高, 即两江来水并非完全同步。对比枯水期和汛期 2 个时段河口壅水高度累计频率分布曲线(图 4(b)), 枯水期较汛期明显左偏, 说明枯水期金沙江对岷江河口段顶托作用弱于汛期, 为汛后退水时段冲刷航槽、维持岷江河口段航道水深创造了有利条件。

为研究两江汇流比以及岷江河口水位顶托情况, 在考虑区间传播和流量平衡基础上, 本文将汇流比(R_Q)定义为干流金沙江日均流量(Q_J)与同时间支流岷江日均流量(Q_M)的比值:

$$R_Q = Q_J / Q_M \quad (1)$$

根据两江 2011—2020 年实测水文资料, 其汇流比为 0.16 ~ 5.36, 最大及最小汇流比分别出现在汛期 9 月和 8 月, 多年平均汇流比为 1.82。对比全年、枯水期及汛期 3 个时段汇流比区间频率及累计频率, 其分布基本一致(图 5), 均表现为汇流比在 1.50 ~ 1.75 的区间频率最大, 分别为 17.16%、19.27% 和 14.62%。采用 Friedman 检验对全年、枯水期及汛期 3 个时段汇流比区间频率进行差异性分析, 结果表明: 枯水期和

汛期汇流比区间频率存在显著性差异($p < 0.05$), 而枯水期与全年以及汛期与全年的汇流比区间频率存在非显著性差异。

进一步研究岷江河口壅水高度与汇流比的相关关系, 选取 2011—2020 年覆盖岷江洪、中、枯各水期的 6 个代表性流量: 最小通航流量($900 \text{ m}^3/\text{s}$)、2 月多年月均流量($1\ 179 \text{ m}^3/\text{s}$, 多年月均流量最小值)、整治流量($2\ 250 \text{ m}^3/\text{s}$)、多年平均流量($2\ 698 \text{ m}^3/\text{s}$)、7 月多年月均流量($6\ 002 \text{ m}^3/\text{s}$, 多年月均流量最大值)、最大月均流量($10\ 261 \text{ m}^3/\text{s}$)以及上述流量同时间对应的各水文(位)站水位数据。为增加样本数量, 将各流量 $\pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内作为同级流量加以考虑。将各级流量对应的壅水高度值与汇流比进行线性拟合, 其 Pearson 相关系数均大于 0.96, 决定系数(R^2)均大于 0.93, 说明岷江各级流量下, 河口壅水高度与汇流比呈明显的正线性相关关系(图 6)。

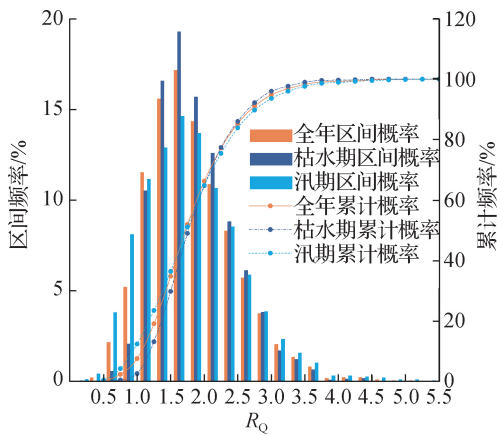


图 5 汇流比分布情况

Fig. 5 Distribution of confluence ratio

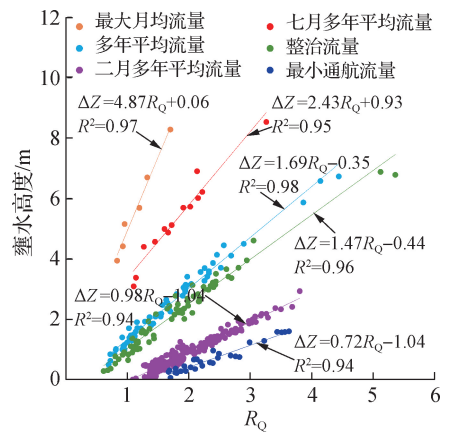


图 6 岷江河口壅水高度随汇流比变化关系

Fig. 6 Relation between backwater height and confluence ratio at mouth of Minjiang River

2.3 岷江河口段河床演变特征

岷江河口段铜锣湾滩群自上而下分别由上乌木桩、桥板滩、铜锣湾、羊角石、五权树、杨家滩、庙矶子以及偏窗子 8 个滩险组成, 其兼具“浅、急、险”的碍航特性。岷江河口段河床演变主要表现为上游泥沙在该河段的沉积和输移。以河口段干、支流水动力特性及泥沙冲淤特点来看, 可将其分为上、下 2 个区段: 下乌木桩至杨家滩约 5.6 km 河道为首尾窄、中段宽的“胃状”河段, 受金沙江各水期不同程度的顶托影响, 属于变动壅水区。变动壅水区淤积强度受干、支流不同来水来沙组合影响, 尤其在岷江来沙量较大且遭受金沙江长历时顶托后, 淤积最为显著。根据 2017 年 4 月至 2018 年 12 月以及 2018 年 12 月至 2020 年 12 月 2 个时段岷江河口段河床冲淤分布特征(图 7), 均出现汛后航槽内淤浅碍航的问题, 其淤积态势与水库变动回水区接近, 淤积体形态与三角洲较为相似。在 2020 年汛后, 淤积体形态进一步发育, 向下游推移约 500 m, 滩面淤高约 2 m, 甚至高于枯水位, 形成局部地形落差达 12 m 的急流陡坡段, 出现明显的“吊坎水”。对比前后 2 个时段岷江河口段河床冲淤特征, 其后一时段变动壅水区范围内河床淤积程度明显强于前一时段。其主要原因为: ① 2020 年岷江发生流域性特大洪水, 来水来沙量远大于其他年份, 其中 2020 年高场水文站实测来沙量分别为 2017 年和 2018 年的 4.74 倍和 2.14 倍; ② 2020 年金沙江主汛期为 9 月, 较岷江主汛期 8 月滞后约 1 个月, 导致岷江在退水期冲沙时段遭受金沙江汛期长历时的顶托影响。

杨家滩至河口约 4.3 km 河道为窄深型单一河段, 无明显边滩, 两江交汇区河道受两岸基岩及堤防约束, 河势及交汇角较为稳定。该段常年受金沙江顶托影响, 枯水期水深充裕, 属于常年壅水区。对比该区域前后 2 个时段河床冲淤变化来看, 总体处于输沙平衡状态, 航道水深可常年维持在 3.5 m 以上。

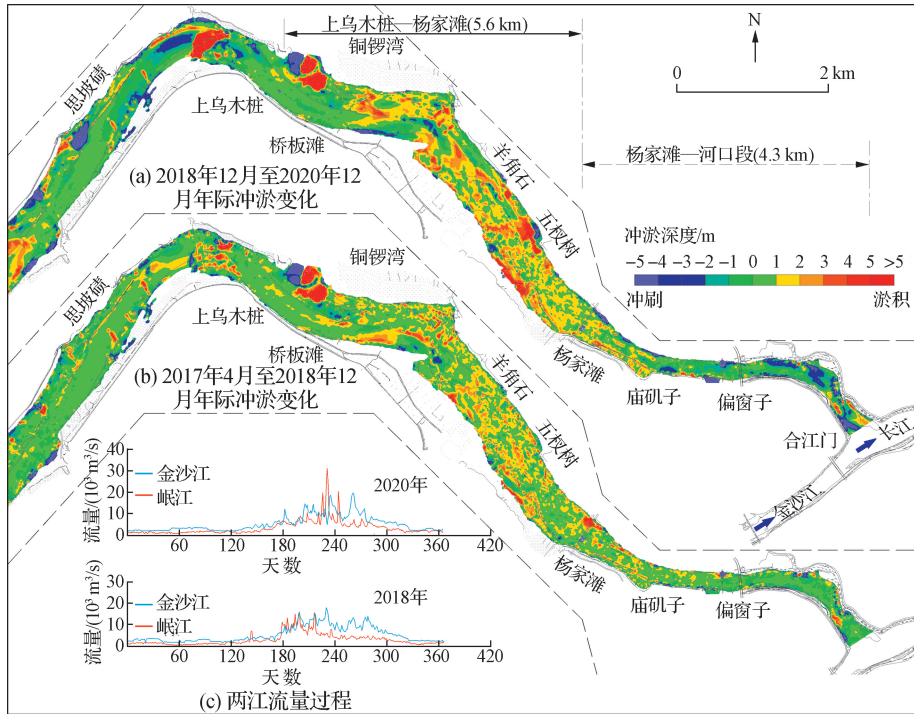


图7 岷江河口段河床演变情况

Fig. 7 River bed evolution of Minjiang River mouth channel

3 岷江河口段浅滩整治水位的确定

目前在岷江非河口段滩险整治中,均采用第二造床流量($2\ 250\ \text{m}^3/\text{s}$)为整治流量,其整治水位相对设计最低通航水位的超高值为 $1.5\ \text{m}$,并在实施后取得较好的整治效果。但岷江河口段航道整治水位一直尚未明确。对于支流河口段航道的治理与非河口段航道均应考虑利用洪水开始降落至枯水期时段对浅滩的冲刷作用来维持相对稳定的航道水深,因此仍可采用造床流量法计算整治流量^[16]。由于航道整治为低水治理,航道整治建筑物在整治水位以上时段工程前后的输沙能力差异不大,主要冲刷作用发生在退水期水位降至整治水位附近时起至枯水期这一时段,因此整治水位的选取至关重要。但与支流非河口段航道存在明显差异的是支流河口段航道受干流顶托影响,在整治流量下沿程水位并非为“单值曲线”,而是与干流不同来流组合后自顶托段末端向下游形成“曲线簇”。

根据马卡维耶夫理论,造床作用的大小,既与造床强弱有关,也与造床历时有关。某级流量的造床强度用断面输沙率(G)表示,其历时可采用该流量出现的频率(P)来表示,造床作用可用 G 与 P 的乘积表示。考虑岷江河口段以推移质造床为主,且推移质 G 主要与断面平均流速(U)的4次方成正比^[17],因此造床作用亦可表示为 U^4 与 P 的乘积。根据前述关于岷江河口段整治流量仍采用第二造床流量($2\ 250\ \text{m}^3/\text{s}$)的观点,同时岷江河口受金沙江来流顶托影响,其断面平均流速将是 Q_1 的函数,即 $U = U(Q_1)$ 。根据输沙能力公式推求整治水位的方法,枯水河床造床作用(F_{bed})最终可表示为 U^4 与金沙江流量的条件频率 $P(Q_1 = q_1 | Q_M = 2\ 250)$ 的乘积:

$$F_{\text{bed}} = U^4(Q_1)P(Q_1 = q_1 | Q_M = 2\ 250) \quad (2)$$

式中: q_1 为金沙江日均流量特定值。

选取洪水开始降落至枯水期这一时段的水文资料, $F_{\text{bed}}-Q_1$ 关系曲线将是一条单峰函数曲线,则岷江整

治流量与该单峰函数峰值对应的金沙江流量组合工况下岷江河口段沿程水位即为变动壅水区范围内的整治水位。根据式(2), 需进一步研究退水期两江来流的联合分布函数以及条件概率函数。本研究将基于 Copula 函数理论构建两江退水期日均流量联合分布模型。

3.1 边缘概率密度函数的建立

采用金沙江和岷江 2011—2020 年各站点水文资料, 将研究河段每年 10 月至翌年 1 月退水期时段的日均流量系列作为样本, 以对数等间距划分方法进行区间流量频率统计^[18]。该方法可充分考虑小流量数据较多以及大流量数据较少的代表性问题。区间划分的组数按统计样本数量的均方根取整, 各流量的经验概率密度如下式:

$$f(q_i) = \frac{N_i/N}{\Delta q_i} \tag{3}$$

式中: $f(q_i)$ 为经验概率密度; q_i 和 Δq_i 分别为第 i 级流量区间的上下边界均值和差值; N_i 为各区间内天数; N 为流量系列的总天数。

对于水文频率的分析和计算, 常采用正态分布、皮尔逊 III 型分布以及对数正态分布, 上述分布函数对于日均流量这种观测样本序列并不适用^[18-19]。本文采用广义极值分布 (GEV) 来描述金沙江和岷江退水期日均流量分布情况, 其概率密度函数的表达式如下:

$$f(q/k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{q - \mu}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{k}} \exp\left[-\left(1 + k \frac{q - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right] \tag{4}$$

式中: q 为流量; k 、 μ 、 σ 分别为广义极值分布函数的参数。

采用最小二乘法分别对金沙江及岷江退水期日均流量概率密度函数进行参数估计。其中, 金沙江退水期日均流量概率密度函数参数估计值为: $k_J = 0.7$, $\mu_J = 858.5$, $\sigma_J = 2\ 436.6$, 概率分布拟合函数的 $R^2 = 0.989\ 9$; 岷江退水期日均流量概率密度函数参数估计值为: $k_M = 0.4$, $\mu_M = 458.4$, $\sigma_M = 1\ 449.5$, 概率分布拟合函数的 $R^2 = 0.998\ 1$ 。进一步采用 K-S 检验对金沙江及岷江概率分布函数进行拟合优度检验, 结果表明: 在 0.05 的显著性水平下, 金沙江及岷江退水期日均流量服从广义极值分布 (图 8)。

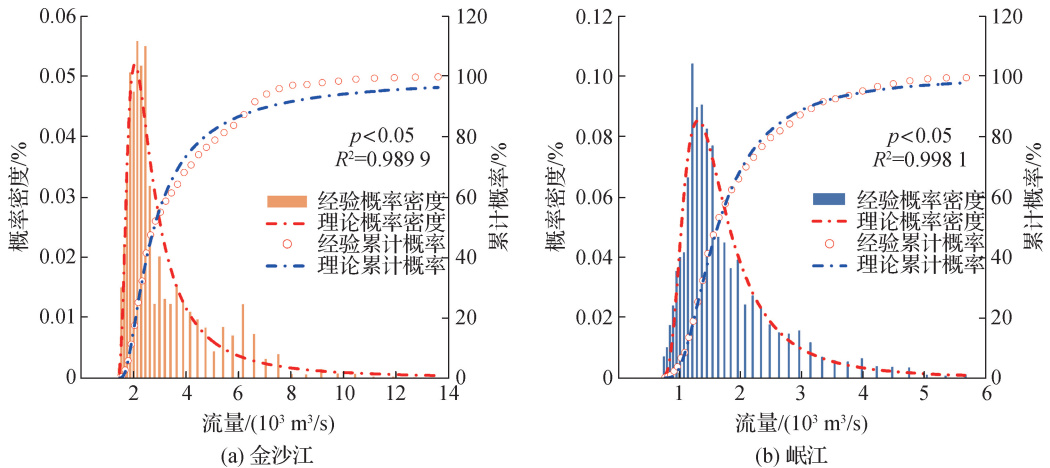


图 8 退水期日均流量概率密度及概率分布拟合曲线

Fig. 8 Fitting of probability density and probability distribution curves of daily mean discharge during the recession period

3.2 两江退水期日均流量联合分布函数

3.2.1 Copula 函数参数估计及拟合优度评价

在水文领域中常采用 Archimedean Copula 函数建立多变量的相关性, 其常用的有 Clayton Copula、G—H

Copula 以及 Frank Copula 函数^[20-22]。各 Copula 函数的参数值采用 Kendall 秩相关系数法求解, 采用离差平方和最小准则(OLS)进行 Copula 函数拟合优度评价, 其量度指标欧氏距离(d)的表达式如下:

$$d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [C(u_i, v_i) - C_{\text{emp}}(u_i, v_i)]^2} \quad (5)$$

式中: u_i 、 v_i 分别为金沙江、岷江退水期日均流量观测值; $C(u_i, v_i)$ 和 $C_{\text{emp}}(u_i, v_i)$ 分别为金沙江、岷江退水期日均流量联合分布理论频率值和经验频率值; n 为联合观测值的个数。

图 9 为各 Copula 模型下金沙江、岷江退水期日均流量联合分布的理论值与经验值对比图, 由图可知上述散点均落在 45° 对角线附近, 说明采用的理论联合分布是合理的。同时结合拟合优度评价指标, G—H Copula 函数 $d=0.0168$, 分别较 Clayton Copula 函数 $d=0.0330$ 和 Frank Copula 函数 $d=0.0203$ 小, 因此选定 G—H Copula 为联结函数的最优模型。

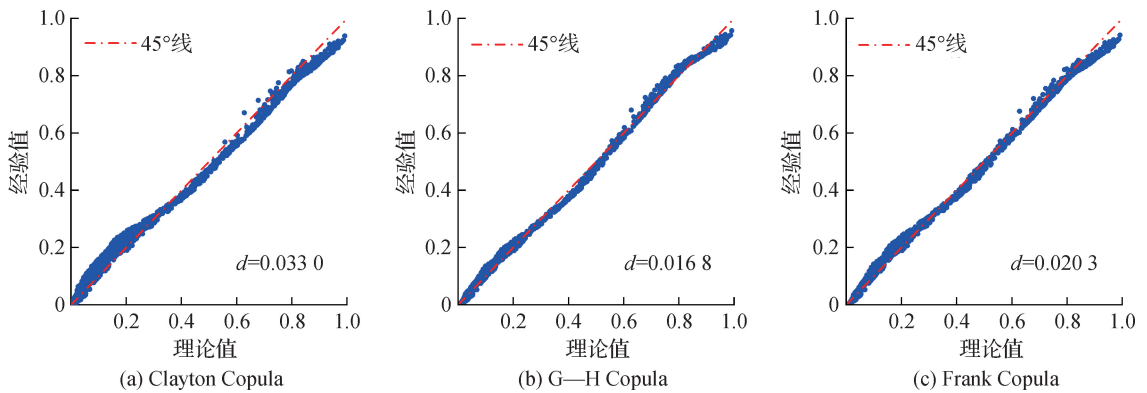


图 9 各 Copula 函数模型的经验值与理论值对比

Fig. 9 Comparison diagram of empirical value and theoretical value for each Copula function model

3.2.2 两江退水期日均流量联合分布函数及条件概率函数

采用 G—H Copula 函数模型的金沙江、岷江退水期日均流量联合概率分布函数及条件概率分布函数如下:

$$C(F_J, F_M) = \exp\{- [(-\ln F_J)^{2.3781} + (-\ln F_M)^{2.3781}]^{1/2.3781}\} \quad (6)$$

$$F(Q_J < q_J | Q_M = q_M) = \frac{\partial C(F_J, F_M)}{\partial F_M} \quad (7)$$

式中: $C(F_J, F_M)$ 为两江退水期日均流量联合概率分布函数; F_J 、 F_M 分别为金沙江、岷江退水期日均流量边缘概率分布函数; q_M 为岷江日均流量特定值。

若求解岷江某级流量发生条件下金沙江日均流量的条件概率密度函数, 可对式(7)求解关于金沙江日均流量的一阶偏微分方程得到式(8):

$$f(Q_J = q_J | Q_M = q_M) = \frac{\partial C(F_J, F_M)}{\partial F_M \partial F_J} \frac{dF_J}{dq_J} \quad (8)$$

3.3 岷江河口段浅滩整治水位的计算

结合图 4(a) 和图 6, 可计算得到岷江下游设计最小通航流量(900 m³/s)以及整治流量(2 250 m³/s)条件下, 岷江河口水位与汇流比的关系曲线。当 $R_Q=0$ 时, 则可视岷江河口不受金沙江来流顶托影响。根据岷江河口处河道断面形态, 进一步计算得到岷江整治流量(2 250 m³/s)条件下金沙江不同来流时河口处断面平均流速。联合式(2)和式(8)可推导出枯水河床造床作用峰值对应的金沙江流量为 3 100 m³/s(图 10), 则该流量与岷江整治流量(2 250 m³/s)组合条件下岷江河口变动壅水区范围内的沿程水位即为其分段整治水位。

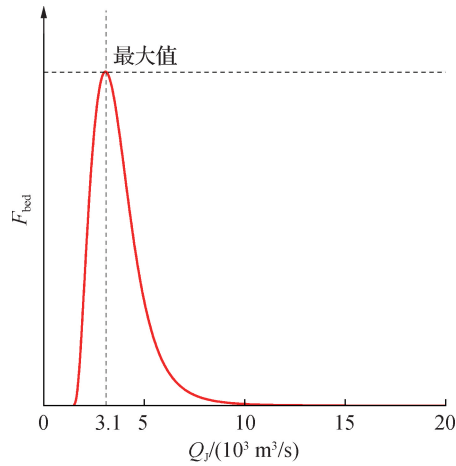


图 10 岷江整治流量条件下 F_{bed} — Q_J 关系曲线

Fig. 10 Relationship between F_{bed} and Q_J under regulation discharge of Minjiang River

进一步分析岷江河口变动壅水区范围内各滩险位置处的整治水位, 建立河口段平面二维水流数学模型。拟定 5 个具有代表性的计算工况: 工况 1, 设计最小通航流量($900 \text{ m}^3/\text{s}$)条件下的“正常流”工况; 工况 2, 设计最低通航水位, 该工况为设计最小通航流量($900 \text{ m}^3/\text{s}$)与该流量在河口处水位—流量关系“下包线”所对应水位的组合工况; 工况 3, 岷江整治流量($2\,250 \text{ m}^3/\text{s}$)条件下的“正常流”工况; 工况 4, 岷江整治流量($2\,250 \text{ m}^3/\text{s}$)与该流量在河口处水位—流量关系“下包线”所对应水位的组合工况; 工况 5, 岷江整治流量($2\,250 \text{ m}^3/\text{s}$)与金沙江流量($3\,100 \text{ m}^3/\text{s}$)条件下的组合工况, 该组合工况可认为对岷江河口段变动壅水区范围内枯水河床塑造作用最强。

各工况下岷江河口沿程水位见图 11, 对比工况 1 与工况 2 条件下岷江河口段沿程水位可知, 设计最小通航流量($900 \text{ m}^3/\text{s}$)条件下, 金沙江顶托作用最弱可至杨家滩—庙矶子航段, 即杨家滩以下河段为常年壅水区, 杨家滩以上河段为变动壅水区。对比工况 4 与工况 3 以及工况 5 与工况 3 条件下岷江河口沿程水位可知, 岷江整治流量($2\,250 \text{ m}^3/\text{s}$)条件下, 顶托最弱可至五权树—杨家滩河段; 枯水河床塑造作用最强工况条件下, 金沙江顶托影响可至羊角石—五权树航段, 正好与岷江河口常年淤沙段及“吊坎水”出现的位置一致。同时对比工况 5 和工况 2, 工况 5 较工况 2 在羊角石以上河段水位超高值基本在 1.5 m 左右, 在羊角石—杨家滩河段水位超高值自上而下呈 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ 渐变增加。结合前述整治水位的确定方

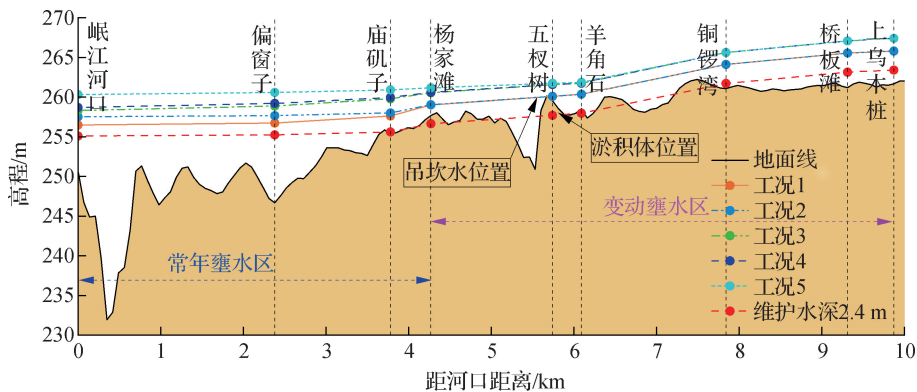


图 11 岷江河口段各代表工况条件下沿程水位

Fig. 11 Water level along the Minjiang River mouth under representative working conditions

法,对于岷江河口变动壅水区范围内整治水位,应遵循羊角石以上仍按照非顶托河段采用设计最低通航水位以上1.5 m的原则,羊角石—杨家滩河段整治水位则应按照自上而下采用设计最低通航水位以上1.5~2.0 m渐变增加的原则。

4 结 论

针对山区支流河口段航道水沙运动复杂、治理难度较大等问题,本文以岷江河口为例,分析了金沙江和岷江两江水沙条件、汇流特征、顶托程度等影响支流河口段航道治理的关键因子,并基于Copula函数理论构建了两江退水期日均流量联合分布模型,建立了岷江河口段航道枯水河床造床作用函数,得到以下主要结论:

(1) 受流域上游水库大规模开发建设以及人类活动等因素影响,岷江下游航道年径流量及输沙量呈显著减小趋势,但枯水期流量及最枯2月月均流量均呈显著增加趋势,成为下游航道建设的有利因素。

(2) 金沙江对岷江河口段壅水作用总体表现为汛期强于枯水期,对岷江汛末至枯水期时段冲刷航槽、维持岷江河口段航道水深创造了有利条件。

(3) 岷江某级流量下,河口壅水高度随汇流比增大而增加,且两者呈明显的正线性相关关系。从全年、枯水期及汛期3个时段来看,汇流比区间频率及累计频率总体分布较为一致;但枯水期和汛期汇流比区间频率存在显著性差异,而枯水期与全年以及汛期与全年的汇流比区间频率存在非显著性差异。

(4) 岷江河口变动壅水区范围内整治水位应遵循羊角石以上按照非顶托河段采用设计最低通航水位以上1.5 m的原则,羊角石—杨家滩河段整治水位则应自上而下采用设计最低通航水位以上1.5~2.0 m渐变增加的原则。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 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))
- [3] 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))
- [4] 孙昭华,李奇,严鑫,等.洞庭湖区与城陵矶水位关联性的临界特征分析[J].水科学进展,2017,28(4):496-506. (SUN Z H, LI Q, YAN X, et al. Analysis of the critical relationship between the water levels of Dongting Lake and Chenglingji station[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 496-506. (in Chinese))
- [5] 张明月,邓鹏鑫,王磊之,等.鄱阳湖汇流顶托对长江汉口水位影响的量化分析[J].湖泊科学,2022,34(5):1712-1722. (ZHANG M Y, DENG P X, WANG L Z, et al. Quantitative analysis of influence of converge jacking in Lake Poyang on the water level in Hankou section of Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1712-1722. (in Chinese))
- [6] 钟亮,孙建云,韩正国.嘉陵江汇流特性统计及分形分析[J].人民长江,2015,46(16):14-19. (ZHONG L, SUN J Y, HAN Z G. Study of confluence characteristics of Jialing River basin based on statistic and fractal analysis[J]. Yangtze River, 2015, 46(16): 14-19. (in Chinese))
- [7] 张帮稳,邓安军,王党伟,等.溪渡渡库区支流拦门沙形成机理[J].水科学进展,2023,34(6):928-937. (ZHANG B W, DENG A J, WANG D W, et al. Study on formation mechanism of barrier sandbar of tributaries in Xiluduo Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(6): 928-937. (in Chinese))
- [8] 朱玲玲,许全喜,张欧阳,等.三峡水库支流河口淤积及拦门沙形成风险研究[J].中国科学(技术科学),2019,49

- (5): 552-564. (ZHU L L, XU Q X, ZHANG O Y, et al. Sedimentation at estuary of 66 tributaries in the Three Gorges Reservoir[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(5): 552-564. (in Chinese))
- [9] 朱玲玲, 陈剑池, 袁晶, 等. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 348-357. (ZHU L L, CHEN J C, YUAN J, et al. Sediment erosion and deposition in two lakes connected with the Middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 348-357. (in Chinese))
- [10] CHEN Z Q, DENG Y, MA A X, et al. An estimation method of river dry runoff alteration after upper new reservoirs storage[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(2): 560.
- [11] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG J Y, WANG G Q, JIN J L, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))
- [12] 张金萍, 丁志宏, 郭兵托. 泾河水沙丰枯演化规律及组合遭遇风险研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(1): 11-16. (ZHANG J P, DING Z H, GUO B T. Study on evolution trends and encounter risk of runoff and sediment in Jinghe River[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(1): 11-16. (in Chinese))
- [13] 刘翊竣, 徐国宾, 段宇. 基于 Copula 函数淮河流域水沙联合分布研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(6): 494-501. (LIU Y J, XU G B, DUAN Y. Study on joint distribution of water and sediment in Huaihe River basin based on Copula function[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(6): 494-501. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 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.
- [16] 王益良, 黎国森. 山区河流支流河口航道整治[J]. *水道港口*, 2005, 26(S1): 36-42, 65. (WANG Y L, LI G S. Channel regulation of tributary river mouth in mountainous rivers[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2005, 26(S1): 36-42, 65. (in Chinese))
- [17] 徐金环. 航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (XU J H. Channel regulation[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [18] 周炜兴, 孙昭华, 周坤, 等. 三峡水库蓄水前后长江中下游流量频率分布特征及其对洪水造床作用的影响[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(2): 616-629. (ZHOU W X, SUN Z H, ZHOU K, et al. Characteristics of discharge frequency and their effects on flood channel formation in the middle and lower reaches of the Yangtze River before/after the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(2): 616-629. (in Chinese))
- [19] SEGURA C, PITLICK J. Scaling frequency of channel-forming flows in snowmelt-dominated streams[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(6): W06524.
- [20] 刘章君, 郭生练, 许新发, 等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 148-159. (LIU Z J, GUO S L, XU X F, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: a state-of-the-art review[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 148-159. (in Chinese))
- [21] 黄宇明, 缴健, 窦希萍, 等. 基于 Copula 函数的大通站水沙特征分析[J]. *水利水电工程学报*, 2022(4): 37-45. (HUANG Y M, JIAO J, DOU X P, et al. Analysis of runoff and sediment characteristics of Datong station based on Copula function[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(4): 37-45. (in Chinese))
- [22] 马川惠, 黄强, 郭爱军. 泾河流域水沙联合分布特征分析及其不确定性评估[J]. *水利学报*, 2019, 50(2): 273-282. (MA C H, HUANG Q, GUO A J. Characteristic analysis and uncertainty assessment of joint distribution of flow and sand in Jinghe River basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(2): 273-282. (in Chinese))

Confluence characteristics and regulation stage of shoals at Minjiang River mouth*

HE Xi^{1,2}, HAO Ling², DENG Ya¹, LI Shunchao², CAO Minxiong¹

(1. *Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Sichuan Communication Surveying & Design Institute CO., LTD, Chengdu 610017, China*)

Abstract: Tributary-mouth channels of mountain rivers are affected by the game between the tributary and main stream, the water and sediment characteristics of which are characterized by both natural rivers and the reach affected by backwater from the main stream. Analyzing the water and sediment conditions of the tributary and main stream, the confluence characteristics, the backwater effects is of great significance for studying the tributary-mouth channel regulation. Taking mouth of Minjiang River as an example, a joint distribution function model of daily mean discharge during the recession period of Jinsha River and Minjiang River was constructed based on the Copula function theory and a function for the low water tributary-mouth channel formation was established using measured hydrologic and sediment data of Jinsha River and Minjiang River during 1960—2020. A quantitative method for determining the shoal-regulation stage of tributary-mouth channel was proposed. The study produced some important results: ① The annual runoff and sediment runoff showed significant decreasing trends, whereas the runoff during the dry season showed significant increasing trends in the Lower Minjiang River affected both by the large-scale development and construction of reservoirs in the upper reaches and human activities. ② The backwater effect of the Jinsha River on the mouth of Minjiang River was generally stronger during the flood season than that during the dry season which provided favorable conditions for scouring the channel during the period from the end of the flood season to the dry season and maintaining the mouth channel depth of Minjiang River. ③ The backwater height at mouth of Minjiang River increased with the increase of the confluence ratio, and there was a significant positive linear correlation between them. ④ The regulation stage should follow the principle of being 1.5 meters above the designed minimum navigable stage in the fluctuant backwater zone upstream of Yangjiaoshi, and should gradually increase from 1.5 to 2.0 meters above the designed minimum navigable stage in the reach between Yangjiaoshi and Yangjiatan.

Key words: confluence characteristics; confluence ratio; backwater effect; Copula function; regulation stage

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3200403) and the Open Fund Project of Key Laboratory of Port, Waterway & Sedimentation Engineering Ministry of Communications, China(No. Yk223001-1).