

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.03.010

# 洞庭湖入汇对荆江河段水位的顶托程度与范围

尚海鑫<sup>1</sup>, 胡春宏<sup>1,2</sup>, 夏军强<sup>1</sup>, 周美蓉<sup>1</sup>

(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. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 洞庭湖入汇对长江干流水位的顶托作用影响着荆江河段的水文情势变化, 分析其变化特征对研究长江中下游防洪安全问题具有重要意义。为揭示汇流顶托作用的程度与影响范围, 本文基于1990—2020年荆江河段水位流量关系与洞庭湖汇流比, 提出洞庭湖入汇顶托程度的量化方法, 构建计算顶托程度的随机森林回归模型, 分析顶托程度主要影响因素的重要性。结果表明: ① 洞庭湖入汇顶托程度与汇流比呈显著正相关关系; 顶托程度随干流流量增大而增加, 2003—2020年枯水、中水和洪水流量级监利站水位受顶托程度平均为0.59、1.33和1.60 m; 顶托最大影响范围随干流流量与汇流比增大向上游延伸。② 随汇流比增大, 在2020年干流枯水、中水和洪水流量级下, 顶托最大影响范围的延伸区间分别为石首—沙市、石首—陈家湾和陈家湾—枝城; 汇流比、荆江段累计冲刷深度、螺山水位及干流流量对顶托程度变化的重要性占比分别为28%、27%、25%和20%。③ 构建的顶托程度计算模型在不同流量级都能够较好地计算荆江河段水位的顶托程度并确定顶托影响范围。

**关键词:** 顶托作用; 水位—流量关系; 随机森林回归; 洞庭湖入汇; 荆江河段

**中图分类号:** TV142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)03-0431-11

荆江防洪是长江中下游防洪的关键, 三峡工程运用后江湖关系和防洪形势发生变化, 但由于坝下游河道冲刷及洞庭湖调蓄能力的改变, 荆江河段仍然存在洪水风险<sup>[1-4]</sup>。长江2016年、2017年和2019年洪水均属于中下游干流河道与湖泊洪水遭遇与相互顶托造成的区域性洪水<sup>[5-8]</sup>。2020年长江发生全流域大洪水, 监利站最高水位排历史第3位, 洞庭湖入汇顶托是导致监利站高洪水位的主要原因之一<sup>[9]</sup>。由此可见, 洞庭湖入汇顶托作用深刻影响荆江河段的水文情势变化<sup>[10-11]</sup>, 深入研究洞庭湖入汇对长江干流水位顶托作用的程度与影响范围, 对研究长江中下游防洪安全问题具有重要意义。

洞庭湖等通江湖泊入汇长江会对干流水位产生顶托作用<sup>[12]</sup>。自20世纪50年代至21世纪初, 通江湖泊对长江的顶托作用不断增强<sup>[13]</sup>。三峡水库运用后, 长江干流流量过程调平、坝下游河段冲刷等诸多因素导致江湖关系发生了改变, 通江湖泊与长江中下游干流表现出新的水文关系<sup>[14-16]</sup>。目前已有许多关于长江与通江湖泊相互作用、相互影响的研究<sup>[17-18]</sup>, 但对顶托作用的分析方法不同且结果各异。赵军凯等<sup>[19]</sup>、邴建平<sup>[20]</sup>从水量交换的角度定义了“湖补江”“湖分洪”的江湖相互作用状态, 分析了江湖相互作用状态的年内变化过程; 李雨等<sup>[21]</sup>、邓金运等<sup>[13]</sup>用干流与湖泊的能量差表示江与湖相互作用的强弱, 分析了江湖相互作用关系的变化; 胡振鹏等<sup>[22]</sup>采用数理统计方法分析了江湖水文关系变化; 陈栋等<sup>[23]</sup>从水面比降角度提出了顶托消落比, 分析了洞庭湖入汇对下荆江顶托消落作用的年际与年内变化。还有学者通过数学模型<sup>[24-25]</sup>、物理模型及水槽试验<sup>[26]</sup>等方法评估支流湖泊入汇的影响, 得到了很多诸如汇流河段水动力特性<sup>[24]</sup>、水流掺混及冲淤分布<sup>[25-26]</sup>等问题的研究成果。通过对比可发现, 已有的研究成果多关注江湖之间相互影响的状态及入汇对汇流河段水沙特性、水流结构的影响, 由于江湖相互作用的复杂性, 目前仍无统一的指标表征江湖相互顶托作用, 缺少洞庭湖入汇对长江中游干流水位顶托程度与顶托影响范围的量化研究。

收稿日期: 2023-01-09; 网络出版日期: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230412.1319.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2040215; U2240206)

作者简介: 尚海鑫(1995—), 男, 甘肃敦煌人, 博士研究生, 主要从事河流动力学研究。E-mail: shanghx@whu.edu.cn

通信作者: 夏军强, E-mail: xiajq@whu.edu.cn

本研究基于荆江河段沙市站、监利站、莲花塘站等 11 个水文站和水位站的水位流量实测资料, 以及荆江河段的冲淤量统计资料, 提出基于水位—流量关系的顶托程度计算方法, 并分析顶托程度和影响范围。筛选出影响入汇顶托作用的主要因素, 构建考虑多因素影响的随机森林回归模型, 用以计算洞庭湖入汇对荆江河段沿程水位的顶托程度。

## 1 河段概况与研究方法

### 1.1 研究河段概况

长江中游荆江河段上起枝城, 下迄城陵矶, 全长约 347 km, 其间以藕池口为界, 分为上、下荆江, 上荆江属于微弯分汉型河道, 下荆江属于弯曲型河道(图 1)。洞庭湖汇集松滋、太平、藕池三口分流与湘、资、沅、澧“四水”来流, 于城陵矶处汇入长江干流。洞庭湖出口段岳阳至城陵矶长约 8 km, 其与长江干流交汇角接近  $90^\circ$ , 出口处历年深泓线较为集中, 河床冲淤变幅较小, 河床较为稳定。监利水文站位于藕池口下游(汇流口上游约 80 km), 至城陵矶之间无分流和支流入汇影响, 本研究选择该站的实测水位、流量资料近似代表干流的来流条件; 七里山水文站是洞庭湖出口控制站(汇流口上游约 5 km), 选择该站实测水位流量资料代表洞庭湖出流的水文情势变化; 莲花塘水位站位于江湖汇流处; 螺山水文站位于汇流口下游约 30 km。

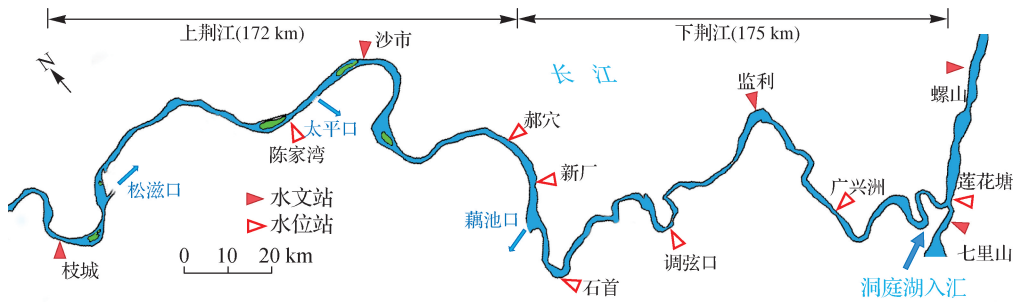


图 1 荆江河段及水文站与水位站示意

Fig. 1 Sketch of the Jingjiang reach, the hydrometric stations and water level stations

受上游来水变化及三峡水库调蓄的影响, 长江枯期平均流量增大、汛期平均流量减小, 干流流量过程调平; 洞庭湖出湖流量减小。三峡工程运用前(1990—2002 年)、三峡水库蓄水初期(2003—2008 年)和三峡水库 175 m 试验性蓄水后(2009—2020 年), 监利站枯期的多年平均流量分别为  $6\ 560$ 、 $7\ 620$  和  $7\ 770\ \text{m}^3/\text{s}$ , 汛期的多年平均流量分别为  $18\ 900$ 、 $16\ 900$  和  $17\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$ , 如图 2 所示。三峡工程运用前(1986—2002 年)与三峡工程运用后(2003—2018 年)洞庭湖多年平均出湖水量分别约 2 720 亿、2 380 亿  $\text{m}^3$ 。

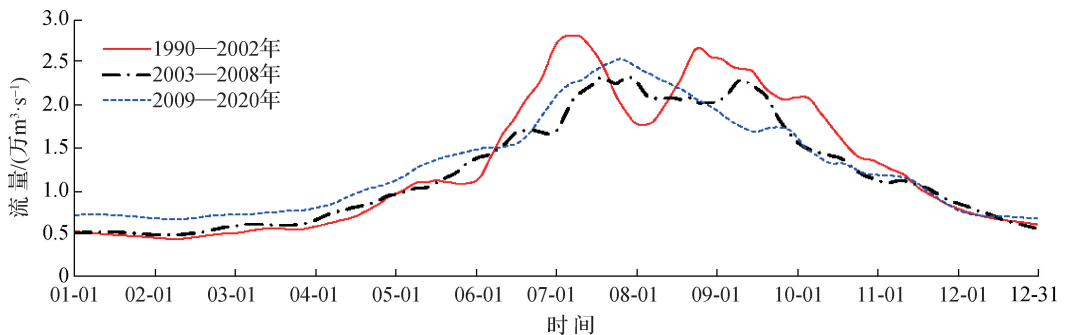


图 2 监利水文站多年平均流量

Fig. 2 Average annual discharge at the Jianli hydrometric station

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 顶托程度计算方法

本研究收集了监利站(1990—2020年)、七里山站(1990—2020年)、螺山站(1990—2020年)、枝城站(2000—2020年)、沙市站(2000—2020年)等5个水文站的水位流量实测资料和7个水位站(陈家湾、郝穴、新厂、石首、调弦口、广兴洲、莲花塘)(2000—2020年)的水位实测资料。

以监利站的实测水位、流量近似代表干流的来流条件,筛选干流枯水(7 000 m<sup>3</sup>/s)、中水(10 000 m<sup>3</sup>/s)和洪水(30 000 m<sup>3</sup>/s)3个流量时,各水文站或水位站对应的水位数据。为增加样本数量,将各流量 ±300 m<sup>3</sup>/s 范围内作为同级流量考虑。

计算与所筛选干流流量同时间的洞庭湖入汇的汇流比( $R_Q$ ):

$$R_Q = Q_{QLS}/Q_{JL} \quad (1)$$

式中: $Q_{QLS}$ 、 $Q_{JL}$ 分别为七里山站和监利站的流量, m<sup>3</sup>/s。

最后计算干流不同流量级条件下洞庭湖入汇对荆江水位的顶托作用。Yen等<sup>[27]</sup>、孙昭华等<sup>[18]</sup>对交汇水流回水作用的研究结果表明,在天然河道内存在与长河段河床平均坡降相平行的恒定流水面线,可视作长河段的“正常流”。当河段出口水位壅高,水面线也会随着抬升,此时水面线与“正常流”水面线的落差即回水顶托程度。假定认为在同一年内干流河床冲淤变化对水位—流量关系影响较小,在相同 $Q_{JL}$ 条件下,假设洞庭湖出湖流量趋近于0时,荆江水位不受洞庭湖入汇顶托的影响且保持稳定,处于“正常流”状态。通过点绘实测水位、流量资料可发现,干流各站同流量的水位与汇流比有显著的线性相关关系,对1990—2020年每年、每个水文或水位站、各流量级的水位与对应 $R_Q$ 值进行线性拟合(式(2)),保留斜率为正的函数(入汇对水位有顶托作用)并记录截距,不同 $R_Q$ 值对应的实测水位与截距之差即为顶托程度(式(3))。

$$Z_{iq} = kR_Q + b \quad (2)$$

$$\Delta Z = Z_{iq} - b \quad (3)$$

式中: $Z_{iq}$ 为不同水文站或水位站(下标*i*)、流量级(下标*q*)的实测水位, m; $k$ 为斜率; $b$ 为截距,即上述研究所述“正常流”水位, m; $\Delta Z$ 为实测水位与“正常流”水位的落差,即顶托程度, m。

以莲花塘水位站2018年数据为例介绍顶托程度计算方法:

(1) 分别筛选干流 $Q_{JL} = 7\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{JL} = 10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{JL} = 30\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时的莲花塘站水位( $Z_{LHT}$ ),将每个流量对应的 $Z_{LHT}$ 与 $R_Q$ 进行线性拟合( $R^2$ 均大于0.93)。

(2) 所得函数的截距即为无入汇顶托作用时的 $Z_{LHT}$ ,枯水、中水与洪水3个流量级算得截距分别为17.14、19.05与26.29 m。

(3) 实测水位与截距之差即为洞庭湖入汇对莲花塘站水位的顶托程度,如图3所示。其余年份、各站也有相同的规律。

(4) 在确定洞庭湖入汇顶托作用的影响范围时,比较同流量、不同汇流比时的 $\Delta Z$ ,当某站的 $\Delta Z$ 为0或几乎不随汇流比变化时,视为该站水位不受洞庭湖入汇顶托影响。

### 1.2.2 顶托程度回归模型

前述计算方法是基于同一年内、代表流量级条件下的水位—流量关系计算各水文站或水位站的顶托程度,然而洞庭湖入汇对荆江水位的顶托受多个因素影响。一方面计算顶托程度还应考虑汇流口下游水位对荆

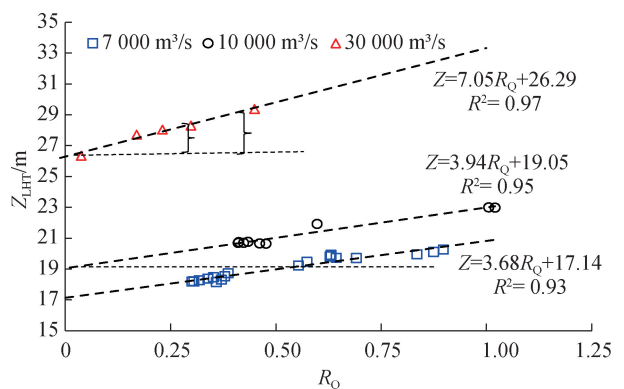


图3 顶托程度计算方法示意

Fig. 3 Sketch of the computing method for degree of backwater

江水位的影响；另一方面，使用同年内的数据就忽略了年际河段冲淤变化可能带来的影响。此外，荆江河段所设水文站、水位站间距约 10 ~ 50 km，实测资料无法直接反映两测站区间内顶托程度的沿程变化。

在前述方法的基础上构建随机森林回归模型，可以同时考虑干流流量、汇流比、河段年际冲刷、螺山站水位、水文站或水位站位置等因素计算顶托程度，解决多元回归问题<sup>[28]</sup>；也可将各年、水文站及水位站、代表流量级数据的离散属性连续化，以此计算河段沿程水位受顶托程度，并分析顶托程度影响因素的重要性<sup>[29]</sup>。构建随机森林回归模型(图 4)的步骤如下：

(1) 将各站洪水、中水和枯水流量及对应的汇流比、螺山站水位 ( $Z_{LS}$ )，结合各水文站、水位站至汇流口的距离 ( $L$ )、荆江河段每年累计冲刷深度作为解释变量；将算得的顶托程度作为响应变量，共同组成构建模型所需的样本数据集(共计 4 727 组)。

(2) 初步构建随机森林，使用均方误差 ( $E_{MS}$ ) 评估计算结果精度，以决策树数量较少并且  $E_{MS}$  稳定为准则确定决策树数量，然后对生成的所有决策树的结果进行平均得到最终结果(式(4))。

$$Y(x) = \frac{1}{B_1} \sum_{b=1}^{B_1} T(x; \Theta_b) \tag{4}$$

式中： $Y(x)$  为所有决策树输出的平均值，即顶托程度预测值； $B_1$  为模型中决策树的个数； $T(x; \Theta_b)$  为模型中的训练样本。

(3) 从数据集中随机抽取 70% 的数据对模型进行训练，抽样之后剩余的 30% 数据样本作为验证集，评估已构建模型的准确度。

(4) 通过模型计算  $E_{IncMS}$ ，表示各解释变量的重要性，其含义为假设对某个解释变量随机赋值，如计算结果的  $E_{MS}$  增大，则该变量对模型准确度有影响。 $E_{IncMS}$  值越高，表明变量对模型结果的重要性越高。

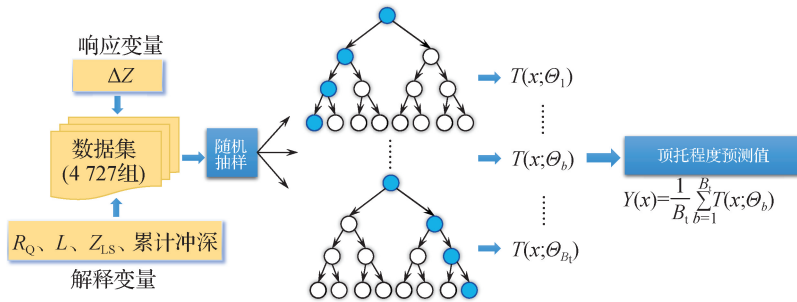


图 4 随机森林回归模型  
Fig. 4 Random Forest regression model

## 2 洞庭湖入汇对荆江水位的顶托作用

### 2.1 荆江水位受顶托程度

以监利站为代表，分析汇流比对荆江水位受顶托程度的影响，计算结果表明监利站  $\Delta Z$  变化明显受到  $R_Q$  的影响。如图 5 所示，在相同监利站流量条件下， $R_Q$  越大  $\Delta Z$  越高。对 7 000、10 000 和 30 000  $m^3/s$  3 个流量级的  $R_Q$  和  $\Delta Z$  做正态性检验和相关分析，Shapiro-Wilk 检验结果表明被检验参数基本可接受为正态分布，进一步计算它们之间的 Pearson 相关性系数。相关性检验结果表明枯水、中水、洪水 3 个流量级条件下， $R_Q$  与  $\Delta Z$  的相关性系数分别为 0.66、0.78 和 0.74 ( $P < 0.01$ )，说明在各流量级荆江水位受顶托程度与汇流比的整体趋势均呈现正相关关系。

以监利站为例，对比干流不同流量级荆江水位受顶托程度，结果表明干流流量越大，荆江水位受洞庭湖入汇顶托作用越明显。 $Q_{JL}$  为枯水、中水和洪水 3 个流量级时，2003—2020 年相应  $\Delta Z$  平均值分别约为 0.59、1.33

和 1.60 m。在不同干流流量条件下, 相同汇流比产生的顶托作用无法直接比较, 以洞庭湖出湖流量 14 000 m<sup>3</sup>/s (5 年一遇频率) 为标准, 相应的  $R_0$  值约为 2.30、1.40 和 0.47, 当  $Q_{JL}$  在上述 3 个流量级时, 对应监利站  $\Delta Z$  分别为 1.78、1.83 和 2.12 m。再对比监利站  $\Delta Z$  随  $R_0$  的变化率, 干流流量越大,  $\Delta Z$  随  $R_0$  增大的速率越快, 这 3 个流量级时监利站  $\Delta Z$  与  $R_0$  的比值分别为 1.09、1.48 和 2.97, 同样说明干流流量越大, 监利站水位受顶托作用的影响越明显。

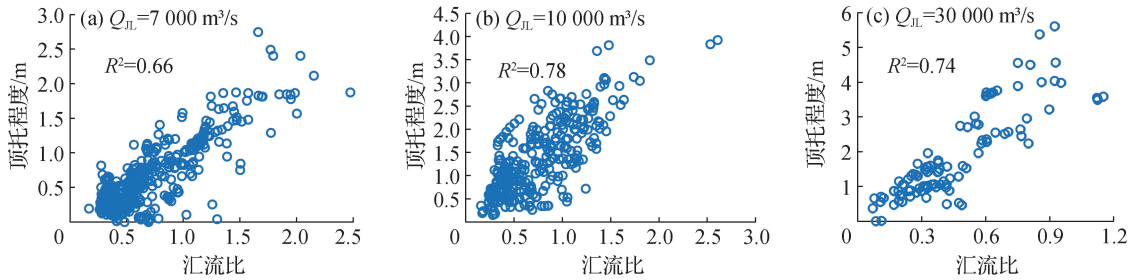


图5 监利站不同流量级条件下顶托程度随汇流比变化

Fig.5 Change of degree of backwater effect with the discharge ratios under different discharges at the Jianli hydrometric station

对比分析三峡工程运用前(1990—2002 年)、三峡工程运用初期(2003—2008 年)和三峡水库 175 m 试验性蓄水后(2009—2020 年) 3 个时间段监利站水位受顶托程度的变化(表 1)。可发现三峡工程运用后, 干流枯水、中水与洪水流量条件下监利站水位受顶托程度均有减弱。2003—2008 年与 1990—2002 年相比, 3 个流量级下  $\Delta Z$  的平均数分别减小 0.11、0.09 与 1.31 m, 2009—2020 年与 1990—2002 年相比,  $\Delta Z$  的平均数分别减小 0.53、0.66 与 0.33 m。三峡工程运用后每组  $\Delta Z$  中位数也小于工程运用前。对 3 个流量级条件下的顶托程度进行差异性分析, Friedman 检验效应量 Cohen's  $f$  值分别为 0.48、0.36 和 0.48(中等以上变异,  $P < 0.01$ ), 以上结果均表明三峡工程运用后洞庭湖入汇对干流水位顶托程度减弱。三峡水库的调蓄作用使长江干流汛期流量偏小, 2003—2008 年、2009—2020 年 2 个时段监利站的汛期平均流量比 1990—2002 年分别减少约 2 035、1 526 m<sup>3</sup>/s。此外三峡工程运用后(2003—2018 年), 汛期三口分流进入洞庭湖水量比蓄水前(1991—2002 年)减少 13.6%<sup>[30-32]</sup>, 月均出湖流量减少约 1 200 m<sup>3</sup>/s<sup>[23]</sup>, 导致汇流比相应减小, 以上原因共同导致洞庭湖对荆江河段水位顶托作用发生改变。

表 1 三峡工程运用前后顶托程度对比

Table 1 Contrast of degree of backwater effect before and after operation of the Three Gorges Project

| 年份            | $Q_{JL} = 7\ 000\ m^3/s$ |       | $Q_{JL} = 10\ 000\ m^3/s$ |       | $Q_{JL} = 30\ 000\ m^3/s$ |       |
|---------------|--------------------------|-------|---------------------------|-------|---------------------------|-------|
|               | 平均数/m                    | 中位数/m | 平均数/m                     | 中位数/m | 平均数/m                     | 中位数/m |
| 1990—2002 年   | 0.83                     | 0.64  | 1.61                      | 1.59  | 2.41                      | 2.10  |
| 2003—2008 年   | 0.72                     | 0.60  | 1.52                      | 1.33  | 1.10                      | 0.92  |
| 2009—2020 年   | 0.30                     | 0.29  | 0.95                      | 0.74  | 2.08                      | 1.56  |
| Cohen's $f$ 值 | 0.48                     |       | 0.36                      |       | 0.48                      |       |

## 2.2 洞庭湖入汇顶托作用的影响范围

监利站、莲花塘站靠近洞庭湖与长江交汇口, 这一河段的水位受洞庭湖入汇顶托作用影响最明显。在干流枯水、中水和洪水流量时,  $R_0$  变化范围分别为 0.70~1.31、0.32~1.48 与 0.44~0.66; 随  $R_0$  增加, 监利站相应的  $\Delta Z$  分别增大 0.54、1.71 和 2.26 m, 莲花塘站相应的  $\Delta Z$  分别增大 0.88、2.67 和 3.00 m, 明显高于干流其他测站。监利站上游的河段水位受顶托程度虽仍受汇流比变化影响, 但随着与汇流口距离增加, 顶托作用的影响逐渐减弱。

顶托作用的最大影响范围由干流流量与汇流比共同影响决定。以2020年为例分析顶托作用的影响范围。干流枯水、中水与洪水条件下，顶托作用的最远影响范围自汇流口向上游分别延伸到了沙市站、陈家湾站与枝城站。同流量级条件下，影响范围也会随汇流比增加而延长。在干流枯水流量条件下， $R_Q = 0.32$ 时石首站能受到顶托影响，当 $R_Q$ 增加到1.08与1.48时，影响范围分别上延到郝穴站与沙市站(图6(a))。在干流中水和洪水流量级下，随汇流比改变，顶托影响最远范围的延伸区间分别为石首—陈家湾、陈家湾—枝城(图6(b)，图6(c))。顶托影响范围外的 $\Delta Z$ 基本不随 $R_Q$ 改变发生明显变化。

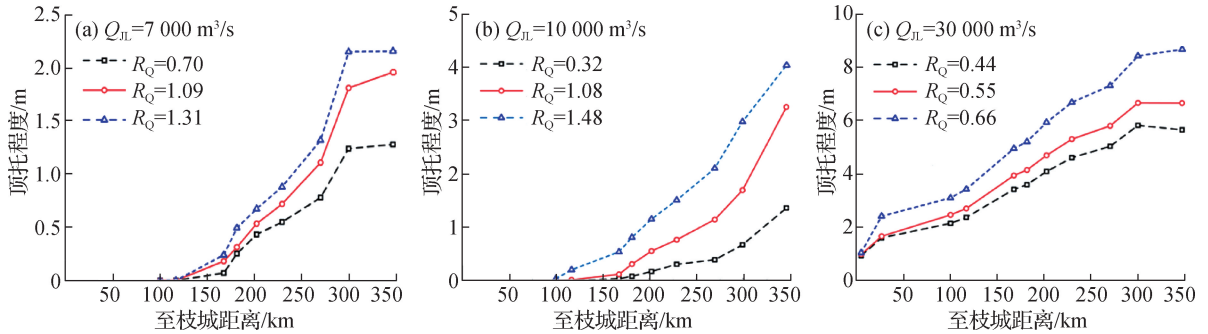


图6 监利站不同流量级条件下顶托作用影响范围

Fig. 6 Affected ranges of backwater effect under different discharge stages at the Jianli hydrometric station

### 3 顶托程度计算模型

前述方法可计算同一年内、代表流量级条件下的各水文站或水位站的顶托程度，但忽略了汇流口下游螺山站水位、荆江段年际冲刷对顶托程度的影响。计算多因素影响下的顶托程度可看作解决多元回归问题。这里首先确定影响顶托作用的主要因素作为构建模型的解释变量，然后构建随机森林回归模型，计算洞庭湖入汇对荆江河段沿程水位受顶托程度。进一步抽取2018年、2020年洪水遭遇情况，使用模型计算顶托程度，最后分析解释变量对顶托程度变化的重要性。

#### 3.1 确定回归模型解释变量

除了汇流比外，荆江段同流量下的水位还会受螺山站水位影响<sup>[30]</sup>。但在前述方法中，为了探究荆江段各水文站及水位站的水位与汇流比的定量关系，未同时考虑螺山水位对顶托程度的影响。从图5可发现，监利站 $\Delta Z$ 在相同 $R_Q$ 条件下仍有波动，说明还有其他因素影响顶托程度。分析监利站与螺山站水位(分别用 $Z_{JL}$ 和 $Z_{LS}$ 表示)间的相互影响关系，对 $Z_{JL}$ 与 $Z_{LS}$ 做正态性检验和相关分析，Shapiro-Wilk检验结果表明 $Z_{JL}$ 与 $Z_{LS}$ 基本可接受为正态分布， $Z_{LS}$ 与 $Z_{JL}$ 间具有显著正相关关系(Pearson  $r$ 值 $> 0.98$ ， $P < 0.01$ )。故认为顶托程度的波动可由螺山站水位变化导致，在构建数据集时把 $Z_{LS}$ 也作为构建回归模型所需的解释变量。

前述方法是基于年内干流河床冲淤变化对水位—流量关系影响较小这一条件，这忽略了河段年际冲淤变化可能带来的顶托程度改变。三峡工程运用后，大量泥沙被拦截在库区内，坝下游河段持续冲刷，根据《中国河流泥沙公报》公布的荆江河段冲淤变化资料，2003—2020年荆江河段呈持续冲刷状态，平滩河槽累计冲刷量为12.29亿 $m^3$ 。由冲刷量与荆江河段长度、平均河宽的比值，算得河段累计冲深约2.66 m(图7)。荆江河段的枯水河槽向窄深方向发展，枯水河槽水深增大6%，枯水位相应降低<sup>[33-35]</sup>。

由前文分析已知，三峡工程运用后干流水位受洞庭湖入汇顶托程度减弱，这也可能与荆江河段河床调整、同流量水位降低有关。三峡工程运用后荆江河段的平滩河槽形态有明显调整，受护岸工程的影响，荆江河段平均河宽变化较小，河槽形态变化以冲深为主。上荆江、下荆江河段平滩水深分别增加1.6和1.0 m，平滩面积增加约12%和8%，槽蓄量相应增加。同时两河段河床纵比降均略有调平，且分别减小了6.2%及16.5%<sup>[36-37]</sup>。顶托程度的变化一方面可能与荆江河段槽蓄量增加有关，另一方面荆江河段河床纵比降调平，

同流量条件下流速相应减小, 导致洞庭湖入汇顶托作用发生改变。故在构建回归模型时还需使用荆江河段累计冲刷深度作为解释变量。

### 3.2 模型建立与验证

从2000—2020年干流11个水文站及水位站的实测资料中筛选洪水、中水、枯水流量及相应的水位、汇流比、螺山站水位, 再结合各水文站或水位站与汇流口的距离、2000—2020年荆江段每年累计冲刷深度等数据共同作为解释变量, 将某一水文站或水位站、同流量级的顶托程度作为一组响应变量, 整理出4 727组解释变量与响应变量, 共同构成建模需要的数据集。其中, 7 000、10 000和30 000 m<sup>3</sup>/s流量级的数据组数分别为1 985、2 375和364组。

构建模型时, 首先由所有解释变量生成1~500棵决策树组成的随机森林作为初步模型。输入全部数据集对模型进行训练。从图8可见, 当决策树数量约为300时,  $E_{MS}$ 达到最低水平且基本保持稳定。为了在保证结果准确度的情况下减少决策树的数量, 确定由300棵决策树组成随机森林回归模型, 此时模型计算结果准确性较高( $E_{MS}$ 为0.129)。

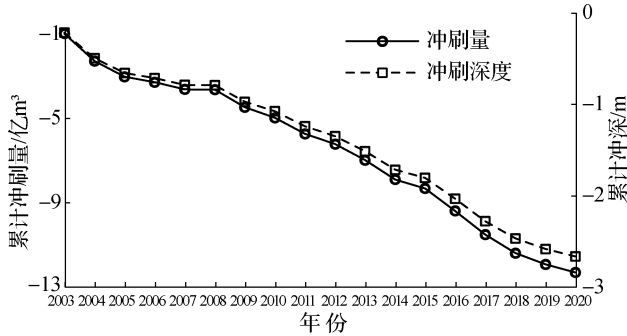


图7 荆江河段累计冲刷情况

Fig.7 Total scour situation of Jingjiang reach

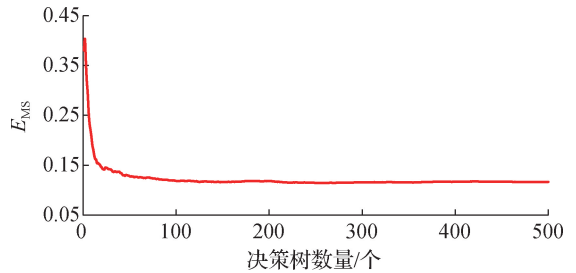


图8  $E_{MS}$ 与决策树的数量的关系

Fig.8 Relationship between  $E_{MS}$  value and the number of decision trees

分别使用训练集(随机抽取70%数据)和测试集(抽样后剩余30%数据)进一步对模型计算结果进行训练与验证。将训练集输入模型, 对比顶托程度计算值与实测值, 模型计算结果 $R^2$ 为0.91(图9(a))。在此基础上将验证集数据输入模型, 此时计算值与实测值的 $R^2$ 为0.87(图9(b)), 模型同样表现出较高的计算精度。因建模使用的数据集中包含了干流洪水、中水、枯水流量级的顶托程度及其影响因素, 故模型在不同流量级条件下都能够较准确地计算荆江河段水位受顶托程度, 模拟效果良好。构建的模型适用于受多因素综合影响的荆江水位受顶托程度的计算。

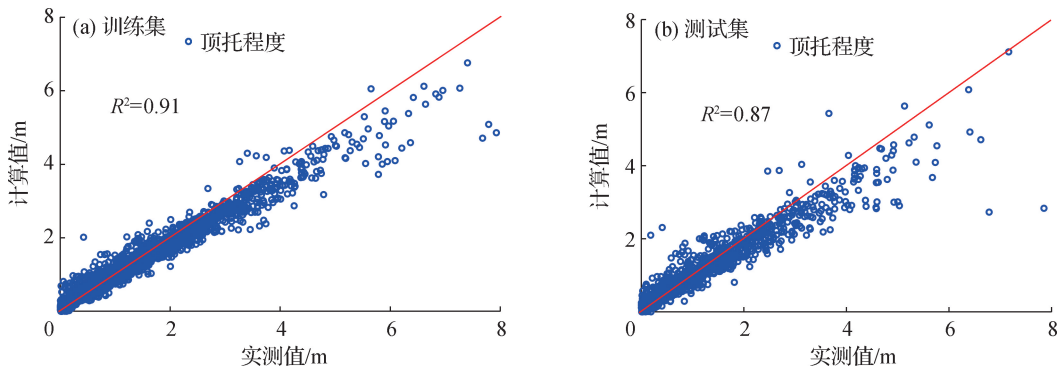


图9 模型训练和验证的精度

Fig.9 Accuracies of model training and model test

### 3.3 顶托程度计算与影响因素重要性分析

长江干流与洞庭湖洪水遭遇与相互顶托导致了历史上多次大洪水期间同流量水位抬升<sup>[30]</sup>。从2018年与2020年监利站的洪水过程中选择了4 d日均流量大于30 000 m<sup>3</sup>/s、同时洞庭湖日均出湖流量大于10 000 m<sup>3</sup>/s的情况(表2),运用构建的模型计算并验证江湖洪水遭遇时,洞庭湖入汇对荆江水位的顶托程度与影响范围。计算结果表明,2018年7月15日 $Q_{JL}=33\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 、 $R_Q=0.36$ 、 $Z_{LS}=28.07\ \text{m}$ ,顶托程度相对较小,监利站水位受顶托程度为0.93 m,顶托影响仅到郝穴站;2020年7月22日在相同 $Q_{JL}$ 条件下, $R_Q$ 增加到0.64, $Z_{LS}$ 上涨了3.44 m,顶托程度明显增强,沙市站与监利站的水位受顶托程度分别为3.70和5.49 m,顶托作用最远影响到枝城站;2020年其余2 d的 $Q_{JL}$ 分别为38 500与37 000 m<sup>3</sup>/s,但后者 $R_Q$ 更大,导致顶托程度更高,8月25日沙市站与监利站的顶托程度分别比8月22日高0.22与0.23 m。

表2 不同洞庭湖出湖流量的顶托程度

Table 2 Backwater effect under different Dongting Lake outlet discharge

| 日期         | $Q_{JL}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | $Q_{QLS}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | $R_Q$ | $Z_{LS}/\text{m}$ | 最远影响测站 | 沙市站顶托/m | 监利站顶托/m |
|------------|---|--|-------|-------------------|--------|---------|---------|
| 2018-07-15 | 33 200                                    | 11 900                                     | 0.36  | 28.07             | 郝穴站    | 0       | 0.93    |
| 2020-07-22 | 33 200                                    | 21 400                                     | 0.64  | 31.51             | 枝城站    | 3.70    | 5.49    |
| 2020-08-22 | 38 500                                    | 13 600                                     | 0.35  | 29.88             | 枝城站    | 1.74    | 2.91    |
| 2020-08-25 | 37 000                                    | 16 000                                     | 0.43  | 29.19             | 枝城站    | 1.96    | 3.14    |

通过构建的模型计算解释变量 $E_{IncMS}$ ,可得到单独改变其中一个变量时模型精度的变化情况,计算结果的 $E_{IncMS}$ 值越高,表明变量对模型结果的重要性越高。以此为依据分析其对干流同一位置顶托程度变化的重要性。汇流比、荆江段累计冲刷深度、螺山站水位及干流流量的 $E_{IncMS}$ 值分别为82.9、78.7、73.4与57.7,基于此结果计算每个解释变量对模型结果重要性所占的百分比,得到这4个变量对顶托程度变化的重要性占比分别为28%、27%、25%与20%。

## 4 结 论

本研究基于1990—2020年荆江段水文站、水位站的水位—流量关系,提出了洞庭湖入汇对荆江水位顶托程度的计算方法,分析了洞庭湖入汇对荆江水位顶托的程度与影响范围,构建了计算顶托程度的随机森林回归模型,并分析了解释变量对顶托程度变化的重要性。主要结论如下:

(1) 顶托程度随汇流比增大而增加,二者呈正相关关系(Person  $r$ 值均大于0.66,  $P < 0.01$ )。干流流量越大,荆江水位受顶托作用越明显,2003—2020年枯水、中水和洪水流量级时监利站水位受顶托程度均值分别为0.59、1.33和1.60 m。三峡工程运用后洞庭湖入汇对荆江顶托程度减弱,枯水、中水与洪水流量的顶托程度平均数与中位数均小于工程运用前。

(2) 监利站—莲花塘站区间内水位受顶托作用最明显,干流流量与汇流比等共同影响决定了顶托作用的最大影响范围。2020年监利出现枯水、中水与洪水流量时,顶托最大影响范围随汇流比增大而上延,延伸区间分别为石首—沙市、石首—陈家湾、陈家湾—枝城。

(3) 基于汇流比、干流流量、荆江河段累计冲刷深度、水文站及水位站至汇流口距离、螺山站水位等参数,构建了计算顶托程度的随机森林回归模型。通过模型分析可知,汇流比、荆江段累计冲刷深度、螺山站水位及干流流量对顶托程度变化的重要性占比分别为28%、27%、25%与20%。模型在枯水、中水和洪水条件下都能够较好地计算洞庭湖入汇对荆江段沿程水位顶托程度。

### 参考文献:

[1] 张为,高宇,许全喜,等.三峡水库运用后长江中下游造床流量变化及其影响因素[J].水科学进展,2018,29(3):



- 331-338. (ZHANG W, GAO Y, XU Q X, et al. Changes in dominant discharge and their influential factors in the middle and lower reaches of Yangtze River after the Three Gorges Dam impoundment[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 331-338. (in Chinese))
- [2] 周建军. 三峡工程建成后长江中游的防洪形势和解决方案(I)[J]. *科技导报*, 2010, 28(22): 60-68. (ZHOU J J. Situation of the Mid-Yangtze flood after the commencement of the Three Gorges Project and the countermeasures(I)[J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(22): 60-68. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] LIANG J, YI Y R, LI X D, et al. Detecting changes in water level caused by climate, land cover and dam construction in inter-connected river-lake systems[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147692.
- [5] 张冬冬, 戴明龙, 徐高洪, 等. 三峡水库蓄水期洞庭湖出湖水量变化[J]. *水科学进展*, 2019, 30(5): 613-622. (ZHANG D D, DAI M L, XU G H, et al. Research on change of the outflow of Dongting Lake during the refill period of the Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 613-622. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] GENG M M, NIU Y D, LIAO X H, et al. Inter-annual and intra-annual variations in water quality and its response to water-level fluctuations in a river-connected lake, Dongting Lake, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(10): 14083-14097
- [8] 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))
- [9] 姚仕明, 郭小虎, 陈栋, 等. 2020年汛期长江中下游河道洪水过程及特性分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2021, 31(2): 5-10. (YAO S M, GUO X H, CHEN D, et al. Analysis on the flood process and characteristics of the middle and lower reaches of the Yangtze River in the flood season of 2020[J]. *China Flood & Drought Management*, 2021, 31(2): 5-10. (in Chinese))
- [10] 夏继红, 陈永明, 周子晔, 等. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. *水科学进展*, 2017, 28(5): 780-787. (XIA J H, CHEN Y M, ZHOU Z Y, et al. Review of mechanism and quantifying methods of river system connectivity[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(5): 780-787. (in Chinese))
- [11] 黄草, 陈叶华, 李志威, 等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. *水科学进展*, 2019, 30(5): 661-672. (HUANG C, CHEN Y H, LI Z W, et al. Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake area[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 661-672. (in Chinese))
- [12] 毛北平, 吴忠明, 梅军亚, 等. 三峡工程蓄水以来长江与洞庭湖汇流关系变化[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(5): 48-57. (MAO B P, WU Z M, MEI J Y, et al. Confluence relationship changes of Yangtze River and Dongting Lake since impoundment of Three Gorges Project[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(5): 48-57. (in Chinese))
- [13] 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): 1645-1654. (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): 1645-1654. (in Chinese))
- [14] 胡春宏, 张双虎. 长江经济带水安全保障与水生态修复策略研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 166-175. (HU C H, ZHANG S H. Strategies for water security and aquatic ecosystem restoration in the Yangtze River economic belt[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 166-175. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] LU C, JIA Y F, JING L, et al. Shifts in river-floodplain relationship reveal the impacts of river regulation: a case study of Dongting Lake in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 932-941.

- [17] 邱江潮, 刘丙军, 杨子博, 等. 基于水位流量关系的流量估算不确定性分析[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 214-223. (QIU J C, LIU B J, YANG Z B, et al. Uncertainty analysis of estimated discharge based on stage-discharge rating curves[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 214-223. (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] 赵军凯, 李九发, 蒋陈娟, 等. 长江中下游河湖水量交换过程[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 759-770. (ZHAO J K, LI J F, JIANG C J, et al. Water exchange between river and lake in the middle and lower reach of Changjiang River[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 759-770. (in Chinese))
- [20] 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, LYU 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))
- [21] 李雨, 许全喜. 三峡水库运用后长江倒灌鄱阳湖特性研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(6): 10-18. (LI Y, XU Q X. Characteristics of backflows from the Yangtze River to the Poyang Lake after using of the Three Gorges Reservoir[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(6): 10-18. (in Chinese))
- [22] 胡振鹏, 傅静. 长江与鄱阳湖水文关系及其演变的定量分析[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 570-579. (HU Z P, FU J. Quantitative study on hydrology relationship between the Yangtze River and Poyang Lake and its changes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(5): 570-579. (in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 王协康, 周苏芬, 叶龙, 等. 长江与嘉陵江交汇区水流结构的数值模拟[J]. 水科学进展, 2015, 26(3): 372-377. (WANG X K, ZHOU S F, YE L, et al. Numerical simulation of confluence flow structure between Jialing River and Yangtze River[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(3): 372-377. (in Chinese))
- [25] LUDEÑA S G, CHENG Z, CONSTANTINESCU G, et al. Hydrodynamics of mountain-river confluences and its relationship to sediment transport[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 122(4): 901-924.
- [26] DUGUAY J, BIRON P M, LACEY J. Impact of density gradients on the secondary flow structure of a river confluence[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(10): 1-17.
- [27] 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.
- [28] PETERS J, de BAETS B, VERHOEST N E C, et al. Random forests as a tool for ecohydrological distribution modelling[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 207(2/3/4): 304-318.
- [29] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [30] 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))
- [31] 格宇轩, 李义天, 邓金运, 等. 三峡水库蓄水后荆江三口分流变化机理分析[J]. 泥沙研究, 2022, 47(2): 36-42. (GE Y X, LI Y T, DENG J Y, et al. Processes of the three outlets along the Jingjiang River before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(2): 36-42. (in Chinese))
- [32] 张冬冬, 戴明龙, 李妍清, 等. 1956—2020年荆江三口径流变化特征及水库补水效果[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 945-957. (ZHANG D D, DAI M L, LI Y Q, et al. Characteristics of runoff in the three outlets along Jingjiang River and the influence of water supplement by the reservoirs during 1956—2020[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(3): 945-957. (in Chinese))
- [33] 许全喜, 董炳江, 张为. 2020年长江中下游干流河道冲淤变化特点及分析[J]. 人民长江, 2021, 52(12): 1-8. (XU Q X, DONG B J, ZHANG W. Characteristics and analysis on scouring and silting changes in main stream of middle and lower rea-

- ches of Changjiang River in 2020[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(12): 1-8. (in Chinese))
- [34] 朱玲玲, 杨霞, 许全喜. 上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应[J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1184-1194. (ZHU L L, YANG X, XU Q X. Response of low water level change to bed erosion and the operation of Three Gorges Reservoir in upper Jingjiang reach[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1184-1194. (in Chinese))
- [35] 夏军强, 刘鑫, 姚记卓, 等. 近期长江中游枯水河槽调整及其对航运的影响[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(2): 1-11. (XIA J Q, LIU X, YAO J Z, et al. Low-water channel adjustment in Middle Yangtze River after operation of Three Gorges Project and its effect on navigation[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(2): 1-11. (in Chinese))
- [36] 夏军强, 邓珊珊, 周美蓉, 等. 三峡工程运用对近期荆江段平滩河槽形态调整的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(3): 385-391. (XIA J Q, DENG S S, ZHOU M R, et al. Effects of the Three Gorges Project operation on the recent variation in bankfull channel geometry of the Jingjiang reach[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(3): 385-391. (in Chinese))
- [37] ZHOU M R, XIA J Q, DENG S S. One-dimensional modelling of channel evolution in an alluvial river with the effect of large-scale regulation engineering[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 965-975.

## Influence of Dongting Lake inflow on the degree and range of backwater effect in the Jingjiang reach \*

SHANG Haixin<sup>1</sup>, HU Chunhong<sup>1,2</sup>, XIA Junqiang<sup>1</sup>, ZHOU Meirong<sup>1</sup>

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

2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China*)

**Abstract:** The backwater effect caused by the confluence of the Dongting Lake is a critical factor influencing the hydrological processes in the Jingjiang reach, and an analysis of its changing characteristics is of critical importance for studying flood control safety issues in the middle and lower reaches of the Yangtze River. A quantitative method was proposed to analyze the degree and range of the backwater effect in terms of stage-discharge rating curves in the Jingjiang reach and the discharge ratios of the Dongting Lake inflow from 1990 to 2020. Then, a random forest regression model was constructed to calculate the backwater effect and sequence its four key influencing factors. The results demonstrated that: ① There was a significant positive correlation between the degree of backwater effect and the discharge ratio. In addition, the degree of backwater effect also increased with an increasing discharge from the mainstream. The mean degrees of backwater effect characterized by the water level variation were 0.59, 1.33 and 1.60 m respectively at the Jianli hydrometric station under the conditions of low discharge, bankfull discharge and flood discharge in the Middle Yangtze River during the period 2003—2020. ② The range caused by the backwater effect extended to the upstream with increasing mainstream discharges and discharge ratios. In 2020, with the increasing discharge ratios, the range zones under the three characteristic discharges were the reaches of Shishou—Shashi, Shishou—Chenjiawan and Chenjiawan—Zhicheng, respectively. ③ Furthermore, the contributions of discharge ratio, cumulative scouring depth, water level at the Luoshan hydrometric station, and mainstream discharge to the backwater effect accounted for 28%, 27%, 25% and 20%, respectively. It is verified that the random forest regression model can reflect the degree and range of the backwater effect under various discharge conditions in the Jingjiang reach.

**Key words:** backwater effect; stage—discharge rating; random forest regression; Dongting Lake inflow; Jingjiang reach

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2040215; No. U2240206).