

三峡水库 175 m 试验性蓄水期调度运行对洞庭湖蓄水量变化的影响^{*}

付 湘, 赵秋湘, 孙昭华^{**}

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 长江干流与洞庭湖存在复杂的并联型分汇关系, 当三峡水库调度改变长江径流过程时, 会引起洞庭湖年内槽蓄量的变化, 对于洞庭湖地区防洪、水资源配置和水环境保护产生显著的影响. 本文建立了枝城至螺山站的荆江-洞庭湖水流模型, 利用 2008—2017 年的三峡水库实际调度日数据, 分析有、无三峡水库调度两种情况下洞庭湖槽蓄量的变化过程, 同时利用建库前和近期的水位流量关系反映河道过流能力, 分析了河道调整的影响. 结果表明: 由河道调整引起的槽蓄量变化在汛前消落期、汛期、汛末蓄水期和枯水期分别为 -3.06%、0.12%、-0.01% 和 -13.31%. 有三峡水库影响情况下, 汛前消落期由于荆江“三口”进入洞庭湖的多年平均总径流增加 23.94%, 洞庭湖出口处城陵矶多年平均水位升高 0.53 m, 阻碍了洞庭湖出流, 洞庭湖多年平均槽蓄量增长 13.30%; 汛期由于荆江“三口”分流量减少 3.54%, 城陵矶水位降低 0.02 m 导致出湖流量增多, 因此洞庭湖多年平均槽蓄量减少 0.20%; 在汛末蓄水期, 荆江“三口”分入洞庭湖的多年平均总径流量减少 37.18%, 城陵矶多年平均水位降低 1.33 m, 导致出湖流量增多, 因而洞庭湖多年平均槽蓄量减少 27.74%; 在枯水期, 荆江“三口”多年平均总径流量增加 5.61%, 城陵矶多年平均水位上升 0.07 m, 最终洞庭湖多年平均枯期槽蓄量增加 2.96%.

关键词: 三峡水库; 洞庭湖; 槽蓄量; 水流模型; 荆江“三口”; 城陵矶水位

Effects of 175 m experimental operation of the Three Gorges Reservoir on the storage capacity of Lake Dongting

FU Xiang, ZHAO Qiuxiang & SUN Zhaohua^{**}

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

Abstract: Stem stream of Yangtze River and Lake Dongting have complicated relation of diffidence and confluence. Operation of the Three Gorges Reservoir leads to intra-year variation of runoff process and storage capacity of Lake Dongting, which is significant and profound for flood control, water resource allocation and water environmental protection in Lake Dongting area. This paper built a flow model of Jingjiang River and Lake Dongting from Zhicheng to Luoshan Station which involves three modules: the flow-split module of Jingjiang River, the main stream module and the Lake Dongting module. Based on the actual operational data of the Three Gorges Reservoir, variation of the storage capacity of the Lake Dongting with and without the influence of the Three Gorges Reservoir during 2008–2017 were calculated and analysed. The results show that the variation of the storage capacity of the Lake Dongting caused by river topography is -3.06%, 0.12%, -0.01% and -13.31% in seasons of pre-flood and main-flood, post-flood and dry period, respectively. Under the influence of the Three Gorges Reservoir, the multi-year average total runoff diverted from Jingjiang River (MARJ) increased by 23.94% in the pre-flood period, and the multi-year average water level at Chenglingji Station (MAWC) increased by 0.53 m, which hindered the flow of Lake Dongting into the Yangtze River. The annual average water storage of Lake Dongting (AWD) increased by 13.30%. In main-flood season, the MARJ and MAWC decreased by 3.54% and 0.02 m respectively, which resulted in the increase of outflow. Therefore, the multi-year AWD decreased by 0.20%. In post-flood season

^{*} 国家自然科学基金项目(51979199, 51879198)和三峡工程泥沙重大问题研究项目(17900100000016J032)联合资助. 2018-12-12 收稿; 2019-04-18 收修修改稿. 付湘(1971 ~), 女, 博士, 教授; E-mail: xfu@whu.edu.cn.

^{**} 通信作者; E-mail: zhsun@whu.edu.cn.

the MARJ and MAWC decreased by 37.18% and 1.33 m respectively, resulting in an increase in the discharge of the lake and a reduction 27.74% of the AWD. During the dry season, the MARJ and MAWC increased by 5.61% and 0.07 m respectively, resulting in the decrease of outflow from the Lake Dongting. The AWD increased by 2.96% over the years.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Lake Dongting; storage capacity; flow model; Jingjiang River; water level

洞庭湖蓄泄特性一直是江湖关系研究的重要内容,三峡建库前,由于荆江-洞庭湖区洪灾形势愈演愈烈,许多研究针对江湖自然冲淤、下荆江裁弯、湖泊围垦等多种驱动因素,深入分析了分流河道萎缩、下荆江冲刷、城陵矶~汉口河段淤积以及洞庭湖湖容减小对江湖分汇流的影响效应,还讨论了河床、湖床调整之后,江湖系统对不同洪水过程调蓄作用的变化^[1-7]。虽然这些研究存在不少争议,但公认的事实有两方面:一是江湖之间存在强烈耦合联动,表现在荆江冲淤对江湖之间流量分配的调整作用,以及汇流口下游顶托对湖区滞流的增大作用等;二是江湖蓄泄过程深受干流与湖区来流量级、组合比例等水文特征影响,江湖系统调蓄作用因流量过程而变。正是基于这些认识,采用不同水文情景开展整体模拟与分析,成为研究江湖系统水量交换和蓄泄特征的主要途径。

三峡水库 2003 年蓄水以来,清水下泄导致坝下干流和分流河道持续调整,水位流量关系明显变化^[8-9]。2008 年水库进入 175 m 试验性蓄水期后,对径流调节幅度增大,漫滩大流量频次减少、汛后落水加快,加剧区域水文情势和水力特性的双重变化^[10]。针对三峡水库蓄水后江湖水量交换特征的调整,水利、地学等领域开展了深入研究工作,普遍认为水库汛后蓄水等径流变化易引发湖区水资源、湿地生态环境等方面新问题^[12-13]。许多研究还尝试采用数学模型、观测资料统计等手段,对水库蓄水引起的洞庭湖区水量、水位变幅开展了量化分析^[14-15]。尽管已有研究充分重视了江湖之间关联性和整体性,但其中仍存在几方面的不足:一是分析的时间尺度较大,不同流量下洪枯河槽水力特性差异和水库调节的季节分异性难以充分反映;二是受制于地形资料收集等困难,不同时期河道调整的影响难以通过模型量化。

水文观测和水力学原理均证实,水位流量关系能够反映河道形态、阻力等综合调整,已有研究还表明,即使在干流河道冲淤变化的情况下,荆江“三口”分流量与口门附近水位存在良好相关关系^[15]。基于这些水力学关系,结合水量守恒原理,本文建立了由分流模块、干流模块和湖区模块组成的枝城至螺山站的简化水流模型,将还原前后的 2008—2017 年流量系列输入模型,计算“有三峡”、“无三峡”和“河道调整”三种情况下洞庭湖蓄水量调蓄过程,对比分析三峡水库不同调度期内洞庭湖年际年内蓄泄特性变化规律及成因,对于洞庭湖地区防洪、水资源配置和水环境保护有参考意义。

1 研究区域及数据资料

荆江河段上起湖北省枝城,下至湖南省岳阳市城陵矶,全长约 360 km。洞庭湖位于荆江河段南岸,承接来自松滋口、太平口、藕池口和调弦口(于 1958 年建闸控制)“四口”的长江来流,同时汇集湘水、资水、沅水、澧水四水及环湖中小河流,所有入流量经过洞庭湖调蓄后,于城陵矶汇入长江,荆江和洞庭湖江湖关系极为复杂,可谓牵一发而动全身(图 1)。为整体反映江湖之间关联性,研究区域下边界取为螺山水文站,上边界为枝城以及洞庭湖四水(湘、资、沅、澧)入流控制站。

研究中涉及的水文资料包括:1882—2017 年宜昌站年径流量资料,用于长江上游来流的水文频率统计;1998 年城陵矶、南咀水位及湖区入、出流观测资料,用于分析确定湖区槽蓄经验关系;2000—2003 年和 2012—2017 年长江干流枝城、沙市、螺山等站水位、流量以及新厂站水位资料,“三口”五站(新江口、沙道观、弥陀寺、康家港、管家铺)水位流量资料,用于确定相关的水流计算工作曲线;2008—2017 年枝城日流量,湖区入、出流观测站(湘潭、桃江、桃源、石门、城陵矶)流量,以及三峡入库观测资料,用以确定有、无三峡水库情况下的来流过程。以上资料主要由长江水利委员会水文局提供。计算过程中,洞庭湖区间来流缺乏观测资料,以出湖、入湖观测站的年径流量差对入湖流量过程实施同倍比放大,从而保证流量守恒性。

2 研究方法

本文以同一水文系列为基准,定量分析有、无三峡水库情况下洞庭湖湖区入出流变化过程,从而明确三

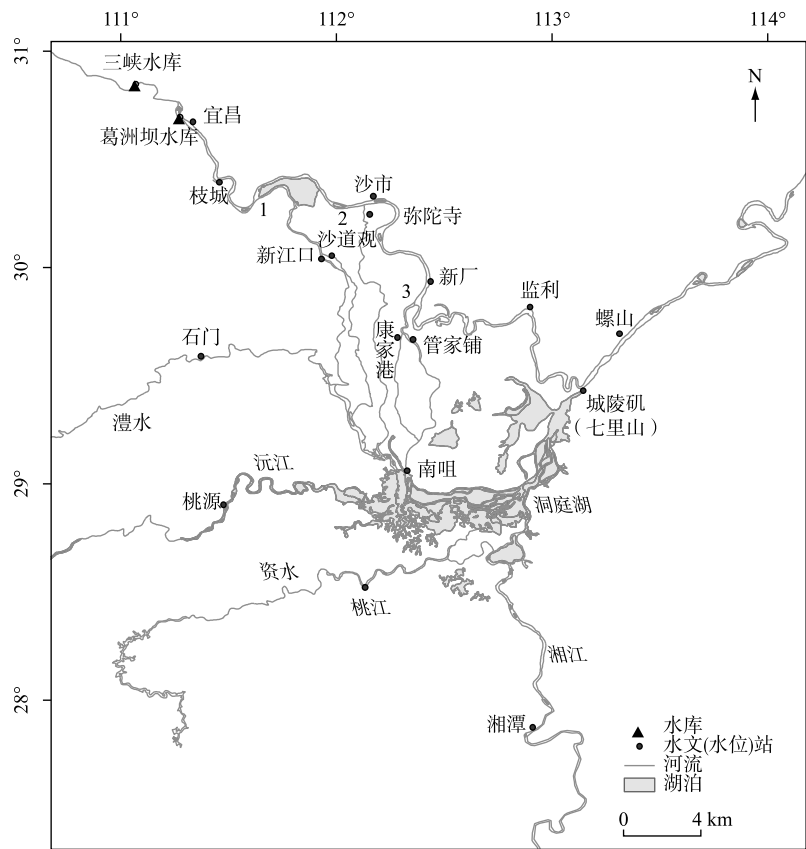


图 1 荆江洞庭湖区关系图(图中 1 为松滋口,2 为太平口,3 为藕池口)

Fig.1 Location of the Jingjiang River and Lake Dongting

峡水库调度对洞庭湖蓄水量的影响,研究思路如图 2 所示。

将枝城实测流量和相应还原流量分别加上同时期四水流量和洞庭湖区间流量,分别形成水流模型的两
种输入条件:实测数据和还原数据。同一位置不同时期的水位流量关系变化能够反映河道调整的影响,用
2012—2017 年、水库蓄水前的 2000—2003 年实测资料分别确定干流水位流量关系、干流水位~分河道流量
关系,代表有、无三峡水库情况下的河道分汇流状态,形成具有两种参数状态的荆江洞庭湖水流模型:三峡
后状态和三峡前状态,该模型包括分流模块、干流模块和湖区模块三部分。采用水流模型实施了 3 种计算情
景:1)将实测流量数据输入三峡后河道参数状态的水流模型中,得到的计算结果称“有三峡”系列,其中包含
了地形变化的影响;2)将还原流量数据输入三峡前河道参数状态的模型中,得到的结果称“无三峡”系列;3)
将还原流量数据输入三峡后河道参数状态模型中,得到的结果称“河道调整”系列。将“有三峡”和“无三峡”
系列进行对比分析,可得到三峡水库对荆江“三口”分流量、城陵矶水位、洞庭湖蓄水量变化的影响,该影响
包括由三峡水库调度引起的径流过程变化产生的影响和由于河道调整产生的影响;将“无三峡”和“河道调
整”系列进行对比,可以分离出河道调整的影响。根据图 2 的研究思路,研究方法包括枝城流量的还原计算
和水流模型的建立。

2.1 枝城流量的还原计算方法

采用式(1)对 2008—2017 年枝城流量进行还原^[16],即当三峡水库日蓄水变化量为正时将蓄水变化量加
至枝城实测流量,为负时则从枝城实测流量中减去,其计算式为:

$$Q_{zc}^n = Q_{zc}^o + \frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{1}$$

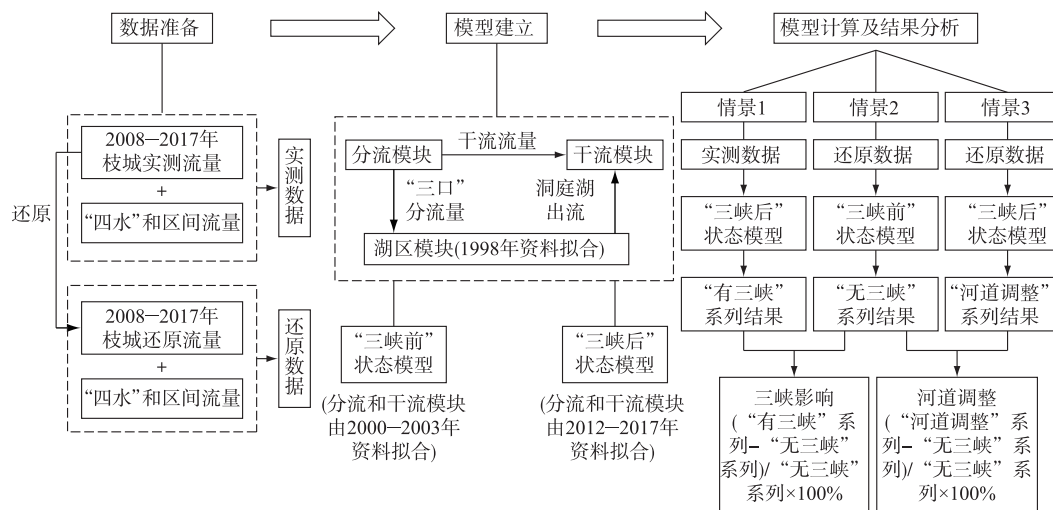


图2 研究思路框架图

Fig.2 Frame diagram of research approach

式中, Q_{zc}^n 、 Q_{zc}^o 分别为枝城站还原流量、实测流量 (m^3/s); ΔV 为通过坝前水位推算的三峡水库蓄水量变化 (m^3); Δt 为时间步长, 此处取为 1 天。式(1)中未考虑宜昌至枝城河段蓄水量变化的影响, 是由于该河段长度仅为 60 km, 且河槽狭窄, 其槽蓄作用相对于长度超过 600 km 且宽段较多的三峡库区而言, 基本可以忽略。

2.2 水流模型

2.2.1 模块介绍 1) 分流模块。大量研究表明, 荆江“三口”分流量与分流口附近长江干流水位存在良好相关关系^[15]。1990s 以来荆江“三口”分流关系基本维持稳定^[17], 三峡水库清水下泄导致河床冲淤的影响从 2003 年开始, 至 2012 年后已有一定累积影响。在综合考虑年份来水频率和河道地形代表性情况下, 分别采用 2012—2017、2000—2003 年“三口”分流量与枝城、沙市、新厂水位拟合了干流水位~各分流道流量关系, 以此代表有、无三峡水库两种情况下的河道分流特性。由于两种情况下的水位流量关系曲线在时间跨度上超过 10 年, 河道冲淤的累积性影响已自动体现, 同时三峡前和三峡后分别选取 4 年和 6 年的资料拟合平均水位~流量关系曲线, 可在很大程度上消除由涨落水等随机因素的影响。三峡水库蓄水后, 由于长江中游荆江河段冲刷剧烈使得河床高程下切明显, 中低水位持续下降, 但是中低水位下荆江“三口”多处于断流状态, 因此对干流水位~各分流道流量关系影响不大。针对各分流道拟合的关系式见表 1, “有三峡”和“无三峡”两种情况下的干流(枝城站、沙市站和新厂站)水位流量关系见式(2)~(7); “有三峡”和“无三峡”两种情况下的“三口”(松滋口、太平口和藕池口)分流计算见式(8)~(13)。其中 $Z_{zc,t}$ 、 $Z_{ss,t}$ 、 $Z_{xc,t}$ 分别为枝城站、沙市站、新厂站 t 时刻的水位(m); $Q_{zc,t}$ 、 $Q_{ss,t}$ 、 $Q_{xc,t}$ 分别为枝城站、沙市站、新厂站 t 时刻的流量, 其中新厂站流量取沙市站滞后一天的流量过程 (m^3/s); $Q_{tp,t}$ 、 $Q_{sz,t}$ 、 $Q_{oc,t}$ 分别为太平口、松滋口、藕池口 t 时刻的流量 (m^3/s)。各式拟合均采取了日均资料, 拟合的决定系数 R^2 均在 0.98 以上。鉴于本文讨论的是平均意义上的水量交换, 并非精确的洪水演进演算, 这个精度已能够满足水量计算的需求。

2) 干流模块。干流模块的功能, 一是实现沿程各站流量与水位之间的换算, 从而为“三口”分流计算提供必需的门口附近干流水位; 二是实现沿程流量演算; 三是给出城陵矶水位, 从而为湖区出流计算提供边界。为实现这些需求, 采用 2000—2003、2012—2017 年水位流量资料, 分别建立了两个时期枝城、沙市、螺山水位流量关系, 以及沙市流量~新厂水位关系、螺山水位~城陵矶水位相关关系, 以此来代表无三峡水库和有三峡水库情况下的干流河道水力特性。其中, 2000—2003 年螺山站水位流量关系、2012—2017 年螺山站水位流量关系、螺山站与城陵矶站的水位关系见公式(14)~(16), 其中螺山站与城陵矶站水位相关关系在三峡运行前后关系稳定, 均采用公式(16)。

表 1 荆江“三口”分流拟合公式
Tab.1 Empirical formulae of the three outfalls of Jingjiang River

拟合关系式	“有三峡”(2012—2017 年)	序号	“无三峡”(2000—2003 年)	序号
干流 水位 流量 关系	枝城站 $Z_{zc,t} = 3 \times 10^{-10} \times Q_{zc,t}^4 - 3 \times 10^{-7} \times Q_{zc,t}^3 + 8 \times 10^{-5} \times Q_{zc,t}^2 + 0.023 Q_{zc,t} + 36.188$	(2)	$Z_{zc,t} = -2.031 \times 10^{-18} \times Q_{zc,t}^4 + 3.024 \times 10^{-13} \times Q_{zc,t}^3 - 1.791 \times 10^{-8} \times Q_{zc,t}^2 + 6.520 \times 10^{-4} \times Q_{zc,t} + 34.953$	(3)
	沙市站 $Z_{ss,t} = 1.8 \times 10^{-7} \times Q_{ss,t}^3 - 0.0002 Q_{ss,t}^2 + 0.097 Q_{ss,t} + 25.781$	(4)	$Z_{ss,t} = 3 \times 10^{-7} \times Q_{ss,t}^3 - 0.0003 Q_{ss,t}^2 + 0.104 Q_{ss,t} + 27.204$	(5)
	新厂站 $Z_{xc,t} = -6 \times 10^{-10} \times Q_{ss,t-1}^4 + 9 \times 10^{-7} \times Q_{ss,t-1}^3 - 0.0005 Q_{ss,t-1}^2 + 0.138 Q_{ss,t-1} + 21.022$	(6)	$Z_{xc,t} = -6 \times 10^{-10} \times Q_{ss,t-1}^4 + 9.570 \times 10^{-7} \times Q_{ss,t-1}^3 - 0.0005 Q_{ss,t-1}^2 + 0.129 Q_{ss,t-1} + 23.078$	(7)
三口 分流 计算 公式	松滋口 $Q_{sz,t} = -2.521 Z_{zc,t}^3 + 360.042 Z_{zc,t}^2 - 16279 Z_{zc,t} + 237086$	(8)	$Q_{sz,t} = -1.719 Z_{zc,t}^3 + 264.8 Z_{zc,t}^2 - 12614 Z_{zc,t} + 191306$	(9)
	太平口 $Q_{tp,t} = 29.333 Z_{ss,t}^2 - 1724.081 Z_{ss,t} + 25288.879$	(10)	$Q_{tp,t} = 16.870 Z_{ss,t}^2 - 1.076.042 Z_{ss,t} + 17140.264$	(11)
	藕池口 $Q_{oc,t} = 0.066 Z_{xc,t}^4 + 9.358 Z_{xc,t}^3 - 466.790 Z_{xc,t}^2 - 9845 Z_{xc,t} - 74897$	(12)	$Q_{oc,t} = -0.247 Z_{xc,t}^4 + 35.470 Z_{xc,t}^3 - 1850 Z_{xc,t}^2 + 41866 Z_{xc,t} - 348614$	(13)

$$y_0 = -1.327 \times 10^{-18} x_0^4 + 2.444 \times 10^{-13} x_0^3 - 1.802 \times 10^{-8} x_0^2 + 8.016 \times 10^{-4} x_0 + 14.356 \quad (14)$$

$$y_1 = -1.808 \times 10^{-18} x_1^4 + 2.506 \times 10^{-13} x_1^3 - 1.585 \times 10^{-8} x_1^2 + 7.405 \times 10^{-4} x_1 + 14.495 \quad (15)$$

$$Z_{clj} = 0.97y + 1.74 \quad (16)$$

式中, x_0 、 x_1 和 y_0 、 y_1 分别代表 2000—2003、2012—2017 年螺山站的流量 (m^3/s) 和水位 (m), y 、 Z_{clj} 分别代表螺山站的水位 (m) 和城陵矶站的水位 (m). 对于干流流量演进, 认为上荆江的枝城、沙市与下荆江进口附近的新厂存在 1 d 的时间滞后, 下荆江出口的监利站、螺山站与枝城存在 2 d 的滞后期, 同时忽略除了“三口”分流之外的沿程取水和区间小支流.

3) 湖区模块. 将湖区视为水库, 基于水库调洪计算原理, 采用公式 (17)~(19) 实现湖区入出流演算.

$$S = f(z_{\text{dih}}) \quad (17)$$

$$\Delta S = \left(\frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{O_t + O_{t+1}}{2} \right) \Delta t \quad (18)$$

$$I = Q_{\text{三口}} + Q_{\text{四水}} + Q_{\text{区间}} \quad (19)$$

式中, z_{dih} 为洞庭湖区代表水位 (m); S 为一定水位下的湖区槽蓄量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$), ΔS 为时段内槽蓄量变化量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$); I 、 O 分别为洞庭湖总来流、总出流 (m^3/s); 角标 t 、 $t+1$ 代表时间步长始末; $Q_{\text{三口}}$ 、 $Q_{\text{四水}}$ 、 $Q_{\text{区间}}$ 分别为荆江“三口”、“四水”、洞庭湖区间来流量 (m^3/s). 取洞庭湖出口城陵矶和西洞庭区南咀站水位加权值作为湖区的代表水位 $Z_{\text{dih}}(t) = \alpha Z_{\text{clj}} + (1 - \alpha) Z_{\text{nz}}$, 其中 Z_{clj} 、 Z_{nz} 分别为城陵矶水位和南咀水位 (m). 1990s 以来洞庭湖湖区冲淤幅度不大^[3], 可认为式 (17) 的关系较为稳定. 取近 30 年来年内流量变幅最大的 1998 年来流过程, 以 1998 年 2 月 18 日城陵矶水位 22 m 为起涨点, 根据式 (18) 计算日均槽蓄变化量^[6], 累加得到各日槽蓄量, 并与该日湖区代表水位拟合 $S \sim Z$ 关系. 经反复调整代表水位中的权重值 α , 发现取 0.4 时可达最佳拟合效果如图 3b 所示, 优于仅取城陵矶水位作为代表水位, 由此得到湖区的经验槽蓄曲线. 式 (17)~(19) 中, 城陵矶水位由干流模块获得, 南咀水位由文献[18]中的方法根据来流和城陵矶水位联合确定, 来流是已知量, 出流是待求量. 需要指出的是, 以上计算中的槽蓄量为相对值, 当城陵矶水位为 22 m 时槽蓄量为 0. 但工程实践中较关心的是洞庭湖区的年内各季水位变幅以及由此引起的湖区水量变化^[6], 即使蓄水量是相对值, 只要保持基准统一, 同样可以开展年际蓄水量比较.

2.2.2 模块耦合 采用以上各模块, 可联合确定水流在江湖系统内演进过程, 具体是: 输入枝城流量, 根据枝城水位~流量关系确定枝城水位, 进而确定出松滋口分流量, 与此相类似, 可得到干流沙市站、新厂站流量水

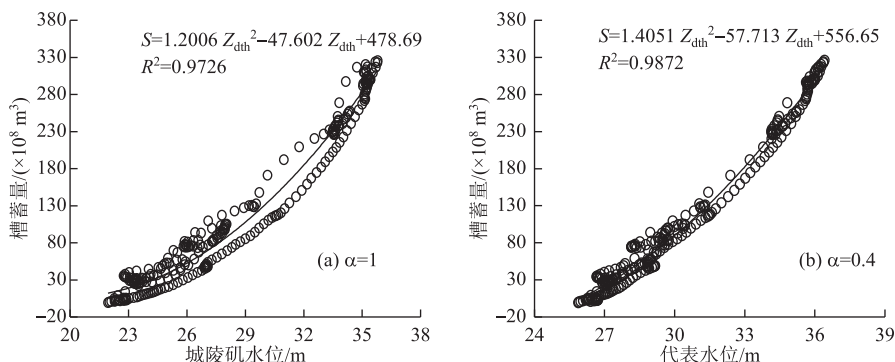


图3 洞庭湖槽蓄量与代表水位关系

Fig.3 Curve diagram of the storage capacity of Lake Dongting and the representative water level

位以及太平口、藕池口分流量;由“三口”分入流量,加上“四水”来流和湖区区间来流,得到湖区总入流;假定一个湖区出流值,加上下荆江出流(枝城站流量扣除“三口”分流再滞后2 d)可得到螺山流量,由螺山水位流量关系以及螺山~城陵矶水位相关关系,得到城陵矶水位以及湖区代表水位;由计算得到的湖区代表水位,重新根据公式(17)~(19)计算湖区出流,并代替假定的湖区出流值。在一个时间步长内,以上步骤反复迭代直至收敛,可得到真实的每日城陵矶出流量,然后逐时间步长推进,可得到连续的湖区蓄泄过程。

2.2.3 模型检验 水流计算模型不需要原始地形,但却可通过不同时期的水位流量关系等工作曲线反映河道调整的影响,并且计算过程中严格保证了区域内水量守恒。为检验模型有效性,取模型计算得到的2008—2017年江湖汇流区监利流量、城陵矶水位、城陵矶流量分别与实测值作比较,对比结果如图4(a)、(b)和(c)所示,日尺度的NSE^[19](Nash-Sutcliffe efficiency coefficient,即纳什效率系数)分别为0.99、0.98和0.91,模拟值与实测值吻合度较高。其中城陵矶流量NSE较低,主要由采用年尺度的同倍比放大方式计算洞庭湖区间来流,导致区间来流误差较大引起的。由此可见,虽然本文建立的水流模型只是属于水文学经验模型,不能精确反映短时间尺度内非恒定流传播过程,但考虑到本文研究的重点并非精确的洪水演进演算,这个精度已能够满足水量计算的需求,可用于“三口”分流量和城陵矶水位、流量等的计算。

3 结果与分析

由于2008年三峡水库进入175 m试验性蓄水期,取2008—2017年10年系列为典型水文过程。三峡水库蓄水前后,上游径流过程还受到气候变化、人类活动等其他因素的影响,因此先分析2008—2017年水文系列的代表性,然后以该系列为基准,对比有、无三峡水库情况下的分汇流及湖区调蓄特征等方面差异。

3.1 来流频率、三峡水库调度分期及模型入流条件

宜昌水文站为三峡水库出库代表站,采用宜昌站1882—2017年的径流系列进行频率分析,从而确定三峡水库实际调度2008—2017年的来水频率见表2。同时分别统计了四个时段1882—2003、1990—2003、2003—2017、2008—2017年的多年平均径流量分别为4483.73亿、4274.09亿、4048.35亿、4105.12亿m³;最大年径流量为5747.81亿、5226.27亿、4648.97亿、4648.97亿m³。可以看出在近一百多年内2008—2017年各年份水量总体偏枯,尤其是2009、2011和2013年。

参照2015年《三峡(正常运行期)~葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》^[20-22],三峡水库的调度分期为:汛前消落期(5月20日至6月10日)、汛期(6月11日至9月10日)、汛末蓄水期(9月11日至10月31日)和枯水期(11月1日至次年的5月19日)。2008—2017年三峡日均库水位变化过程如图5所示。在汛前消落期,需要将库水位降至145 m以腾空防洪库容,迎接即将来临的汛期,由图5可见,除2008年库水位由150 m降至145 m外,其余年份均大约从155 m消落至145 m。根据防洪规划,汛期库水位应维持在防洪限制水位145 m附近,但由图5看出,实际情况下许多年份汛期库水位都不是维持在145 m,这是因为汛期拦截中小洪水的缘故^[8]。汛末蓄水期库水位由145 m提升至175 m(2008和2009年稍低于175 m),以满足即将来临的枯

水期水库调度. 枯水期在保证发电和下游航运要求的前提下水库尽量保持在较高水位运行,到4月底水库水位不低于 155 m. 以上变化特点,从侧面体现了三峡水库在年内不同时期对流量的调蓄作用.

枝城站作为研究区域入口,其流量过程变化受三峡水库调节影响. 图 6 为有、无三峡水库情况下 2008—2017 年枝城多年日均流量过程,可见由于三峡水库的调蓄作用,枝城流量在汛前消落期、汛期、汛后蓄水期和枯水期多年平均流量增加量分别为 16.54%、-2.45%、-18.24% 和 11.75%.

3.2 荆江“三口”分流变化分析

“三口”分流是荆江—洞庭湖关系调整的驱动因子^[9]. 以往的研究表明,同样来流条件下,荆江“三口”分流比主要受荆江河段水位及“三口”分流洪道冲淤变化的影响^[23]. 三峡水库建成后,干流与分流河道同时发生冲淤变化,并且径流过程被调节,“三口”分流量变化由来流量和分流比变化同时引起.

对有、无三峡水库影响和河道调整系列的 2008—2017 年荆江“三口”分流量求多年日均过程,可以看出研究时段内荆江“三口”分流量的总体变化(图 7). 相比于无三峡水库的情况,在有三峡水库时,汛前消落期荆江“三口”分流量增加;汛期“三口”分流量有增有减,变化过程变得平缓;汛末蓄水期“三口”分流量大幅减少;枯水期可见小幅增加. 此外,“无三峡”线和“河道调整”线并不完全重合,可知河道调整对荆江“三口”分流有一定程度的影响.

为量化不同情况下“三口”分流量的年内变化,以无三峡水库情况的年内 4 个时段分流量为基准,表 3 中分别统计了仅由河道调整引起的“三口”径流量变化比例,以及由三峡水库(包括径流变化和河道调整影响)引起的径流量变化比例. 由表 3 中统计结果可见,河道调整使得汛期“三口”分流量增大 2.32%,汛前消落期、汛末蓄水期和枯水期则分别减小 15.37%、2.92% 和 20.24%,全年来看,多年平均减少 1.80%. 河道调整对荆江“三口”分流的影响和三峡水库清水下泄冲刷河槽有关,干流和分流河道均发生冲刷,引起了干流水位~流量关系及干流

水位~分流量关系发生变化. 汛期水量较大时期,干流水位降幅小,但“三口”洪道内洪水位却发生下降^[24],因而“三口”分流量增加;而非汛期干流同流量下水位明显降低,导致“三口”分流量减少. 三峡水库建成之后,在河道调整和径流过程变化的双重影响下,汛前消落期荆江“三口”总径流量增加,多年平均增加 5.69 亿 m^3 , 占无三峡水库状态时汛前消落期分流量的 23.94%;此时期虽然河道调整会引起分流量减少,但由于三峡水库泄流使河道流量大幅增大,故“三口”分流量增大. 汛期由于三峡水库的削峰作用“三口”总径流量多年平均减少 11.00 亿 m^3 , 占无三峡水库状态时汛期分流量的 3.54%. 汛末蓄水期由于河道调整的影响,加之三峡水库下泄流量大幅减小,荆江“三口”总径流量明显减少,多年平均减少 42.99 亿 m^3 , 占无三峡水库状态时汛末蓄水期分流量的 37.18%. 枯水期“三口”分流量多年平均增加 2.52 亿 m^3 , 占无三峡水库状态时枯

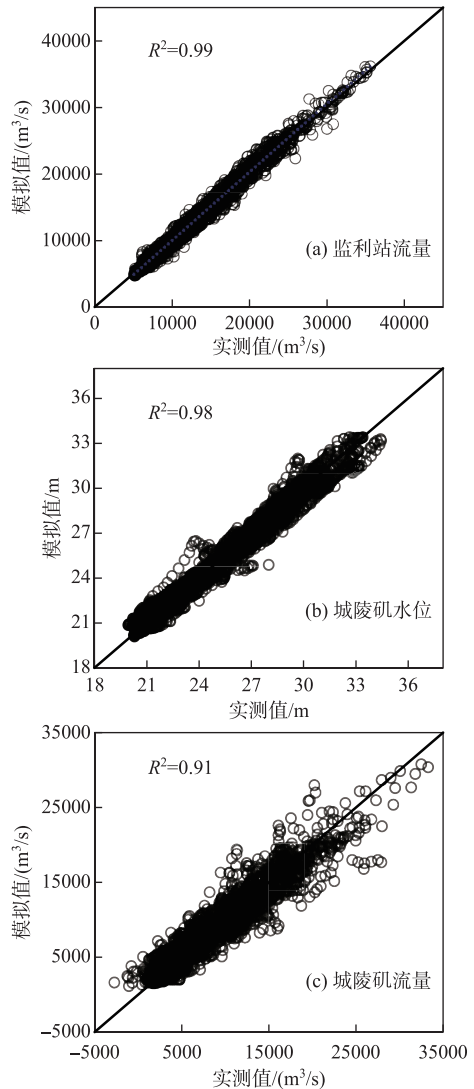


图 4 2008—2017 年监利站流量、城陵矶水位、城陵矶流量实测值和模拟值对比
Fig.4 Comparison of observed and calculated water level and flow process at Chenglingji Station and flow process at Jianli Station in 2008–2017

表 2 2008—2017 年水平年划分结果
Tab.2 Level years classification in 2008–2017

时间	年径流量/ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	经验 频率/%	水平年
2008 年	4186.03	69.49	枯水年
2009 年	3821.74	89.79	特枯水年
2010 年	4047.85	78.72	枯水年
2011 年	3393.45	98.53	特枯水年
2012 年	4648.97	33.03	丰水年
2013 年	3755.66	92.05	特枯水年
2014 年	4584.00	37.94	丰水年
2015 年	3946.41	84.34	枯水年
2016 年	4264.07	63.63	枯水年
2017 年	4403.02	52.51	枯水年

水期分流量的 5.61%, 此时期三峡水库补水使得“三口”分流量增大. 从全年来看, “三口”多年平均总径流量减少 45.77 亿 m^3 , 占无三峡水库状态全年分流量的 9.25%. 由此看出, 河道调整使得“三口”分流在高水位时分流增加, 在低水位时分流减少且水位越低该作用越显著; 但在河道调整和径流变化双重作用下径流变化带来的影响占主导地位.

3.3 城陵矶水位变化分析

以往研究表明, 城陵矶水位变化主要由城陵矶—汉口河段冲淤变化及上游径流量发生较大改变所引起^[7]. 三峡建成之后, 城陵矶—汉口河段处于微冲状态, 而水库调蓄和降雨变化引起江湖来流变化也较大, 这几方面因素必然引起城陵矶水位变化. 本文主要从年际变化与年内变化两个方面分析河床冲淤和水库调蓄的影响.

2008—2017 年在有三峡水库、无三峡水库和河道调整影响下城陵矶旬平均水位及宜昌旬平均来流变化过程见图 8, 从年际来看, 有、无三峡水库情况下城陵矶水位总体变化趋势一致, 各年水位峰值与宜昌来流量有较大关系, 在三峡水库影响下, 水位过程峰谷差异减小, 多年平均减小 0.20 m.

表 3 2008—2017 年河道调整及有三峡水库影响情况下不同运行期荆江“三口”总径流量多年平均变化比例
Tab.3 Variation of total runoff diverted from Jingjiang River in different operating periods under the influence of topography of the river course and the Three Gorges Reservoir in 2008–2017

	汛前消落期	汛期	汛末蓄水期	枯水期	全年
河道调整	-15.37%	2.32%	-2.92%	-20.24%	-1.80%
三峡影响	23.94%	-3.54%	-37.18%	5.61%	-9.25%

2008—2017 年在河道调整及有无三峡水库影响情况下城陵矶多年日均水位变化过程见图 9, 从年内过程来看, 三峡建成前后城陵矶水位在三峡水库的年内不同运行期存在较大差异. 通过比较“无三峡”和“河道调整”两种情况的多年平均水位过程线, 四个时期内多年平均水位变化分别抬高 -0.15、0.01、-0.04、-0.23 m, 除汛期外, 河道地形变化使城陵矶水位下降, 总体来看汛前消落期和枯水期水位消减程度相对较大. 考虑水库调节等综合影响, 三峡水库建成后, 汛前消落期城陵矶水位多年平均升高 0.53 m, 原因是此时期水库下泄水量增大. 汛期城陵矶水位有涨有落, 并无明显变化, 总体来看水位仅降低 0.02 m, 是三峡水库削峰调洪的结果. 汛末蓄水期城陵矶水位显著降低, 多年平均降低 1.33 m. 该时期城陵矶水位逐渐消落, 无三峡水库状态下 10 月 31 日多年平均水位为 24.67 m, 而有三峡水库状态下 10 月 13 日多年平均水位已低于 24.67 m, 即在三峡水库影响下城陵矶水位大约提前 18 天消落. 原因是此时三峡库水位由 145 m 升高至 175 m, 长江中下游干流流量迅速减少, 城陵矶水位也相应地降低. 枯水期城陵矶水位升高, 平均升高 0.07 m. 易知其原因为: 枯水期三峡库水位由 175 m 降至 155 m, 向长江中下游河道补水, 导致荆江“三口”以下长江干流流量较三峡水库建成前有所增加, 水量增大引起的城陵矶水位抬高程度大于地形调整引起的水位降低程度, 城陵矶水位因此略抬高. 总体来看, 河道地形调整对城陵矶水位的影响较小, 各个时期径流调节影响均占主导地位.

3.4 洞庭湖年内槽蓄量变化过程分析

由洞庭湖蓄泄模型得到的洞庭湖槽蓄量变化过程如图 10、11 所示, 图 10 采用旬平均槽蓄量作图以减小过程线的波动, 图 11 为多年日均槽蓄量变化过程. 此处槽蓄量为相对值, 城陵矶水位为 22 m 时对应的洞庭湖槽蓄量为 0.

从年际变化来看(图 10), 有、无三峡水库两种情况下的槽蓄量变化过程基本一致, 即三峡水库对洞庭湖

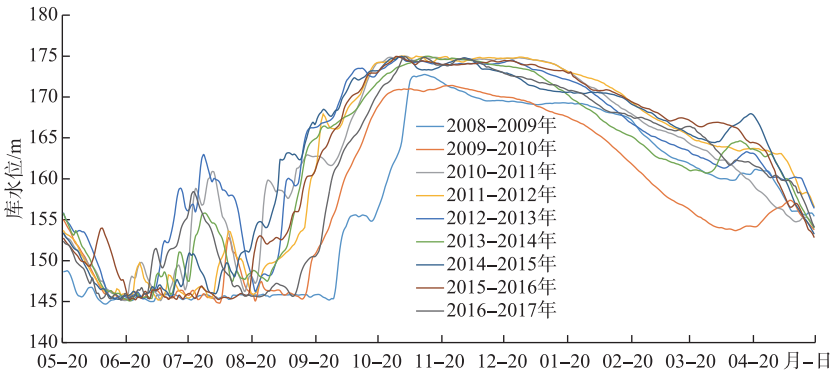


图 5 2008—2017 年三峡日均库水位变化过程

Fig.5 Variation of daily mean water level of the Three Gorges Reservoir in 2008-2017

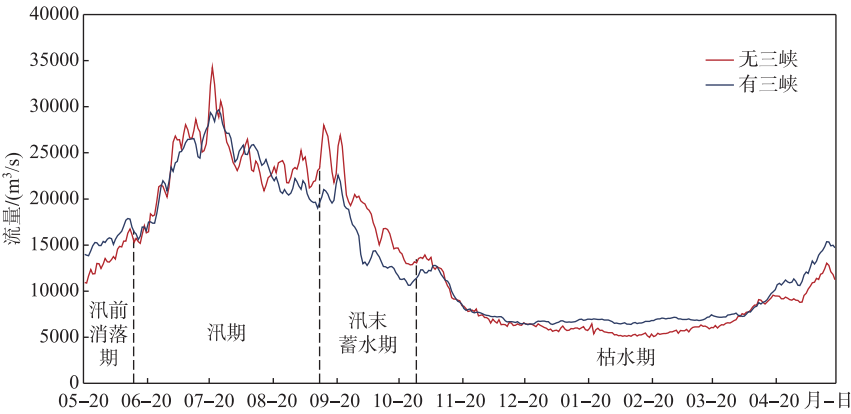


图 6 2008—2017 年有无三峡水库情况下枝城多年日均流量过程

Fig.6 The average discharge at Zhicheng Station with and without the influence of the Three Gorges Reservoir in 2008-2017

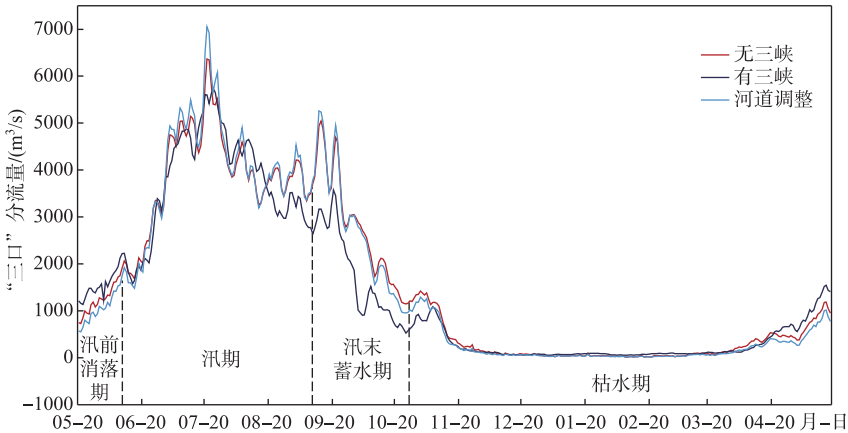


图 7 2008—2017 年河道调整及有、无三峡水库影响情况下荆江“三口”多年平均流量变化

Fig.7 The multi-year average discharge diverted from Jingjiang river under the influence of topography of the river course and the Three Gorges Reservoir in 2008-2017

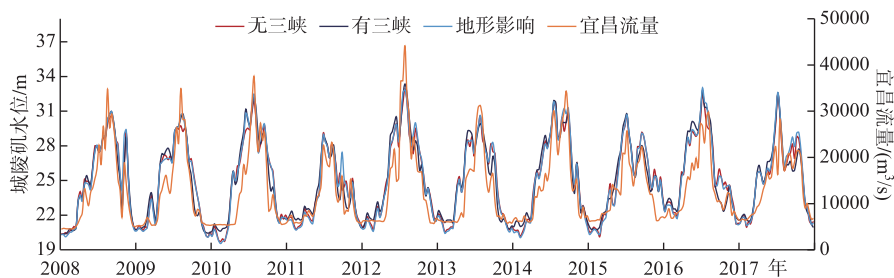


图 8 2008 年 1 月—2017 年 12 月有无三峡水库影响及河道调整影响下
城陵矶旬平均水位和宜昌旬平均来流过程

Fig.8 Variation of ten-day average water level of Chenglingji Station under the influence of topography of the river course and the Three Gorges Reservoir and ten-day average discharge at Yichang Station in 2008–2017

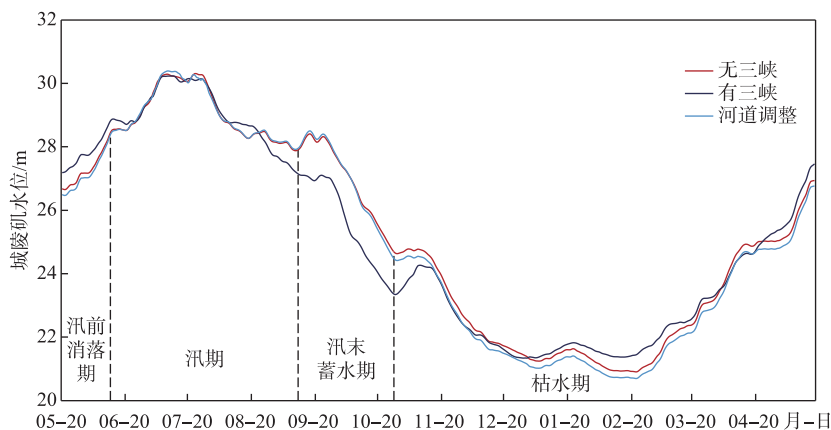


图 9 2008—2017 年河道调整及有、无三峡水库影响情况下城陵矶多年日均水位变化过程

Fig.9 Variation of multi-year average water level at Chenglingji Station under the influence of topography of the river course and the Three Gorges Reservoir in 2008–2017

年际蓄泄过程的影响不明显;洞庭湖最大槽蓄量的大小主要受当年来水频率的影响,而最小槽蓄量基本不变.

从年内来看(图 11),洞庭湖槽蓄量在三峡水库不同的运行期内存在较大差异. 由河道调整引起的槽蓄量变化在 4 个时期分别为-3.06%、0.12%、-0.01%、-13.31%,汛前消落期、汛期和汛末蓄水期在河道调整的影响下变化并不十分显著,枯水期槽蓄量减小比例较大. 有三峡水库影响情况下,汛前消落期洞庭湖槽蓄量稍有增加,多年平均日槽蓄量增加 10.16 亿 m^3 ,占无三峡水库状态下汛前消落期多年平均日槽蓄量的 13.30%;原因是在汛前消落期由荆江“三口”进入洞庭湖的水量增多,多年平均总径流增加 23.94% (表 3),洞庭湖出口处城陵矶水位升高,其多年平均水位升高 0.53 m (图 9),阻碍了洞庭湖水流入长江,入流增大而出流减小,则洞庭湖槽蓄量相应增大. 在汛期,荆江“三口”分流量减少 3.54%,城陵矶水位降低 0.02 m,洞庭湖出流增多,入流减少的同时出流增多,因此汛期多年平均日槽蓄量减少 0.23 亿 m^3 ,占无三峡水库状态下多年平均日槽蓄量的 0.20%. 在汛末蓄水期,洞庭湖槽蓄量明显减少,多年平均日槽蓄量减少 19.58 亿 m^3 ,占无三峡水库状态多年平均日槽蓄量的 27.74%;原因是:汛末蓄水期荆江“三口”分入洞庭湖的水量显著减少,多年平均总径流量减少比例为 37.18% (表 3),洞庭湖出口处城陵矶水位显著降低,多年平均降低 1.33 m (图 9),导致洞庭湖出流增多,因而其槽蓄量显著减少. 在枯水期,洞庭湖多年平均日槽蓄量增加 0.52 亿 m^3 ,占无三峡水库状态下日槽蓄量的 2.96%;此时期从荆江“三口”进入洞庭湖的水量增多 5.61%,城陵矶

水位多年平均升高 0.07 m,导致出流减少,因此洞庭湖槽蓄量增大. 从河道调整、三峡水库对洞庭湖槽蓄量综合影响结果来看,枯水期地形影响较突出,但在各个时期径流调节影响均为主导因素,这与其他学者根据实测资料分析的结论是一致的^[9,24].

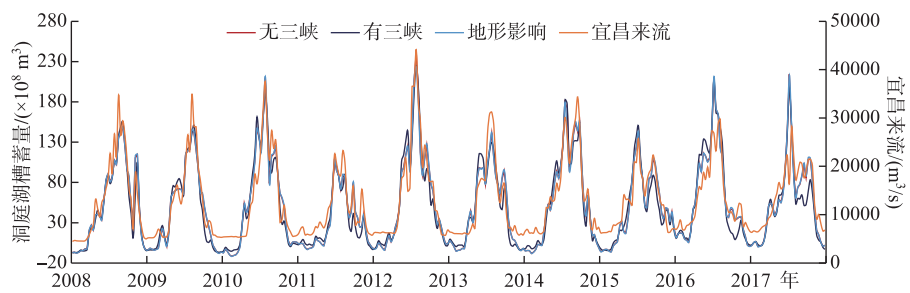


图 10 2008—2017 年有无三峡水库、河道调整影响下洞庭湖旬平均槽蓄量及宜昌旬平均来流过程
Fig.10 Variation of ten-day average storage capacity of Lake Dongting under the influence of topography of the river course and the Three Gorges Reservoir and ten-day average discharge at Yichang Station in 2008—2017

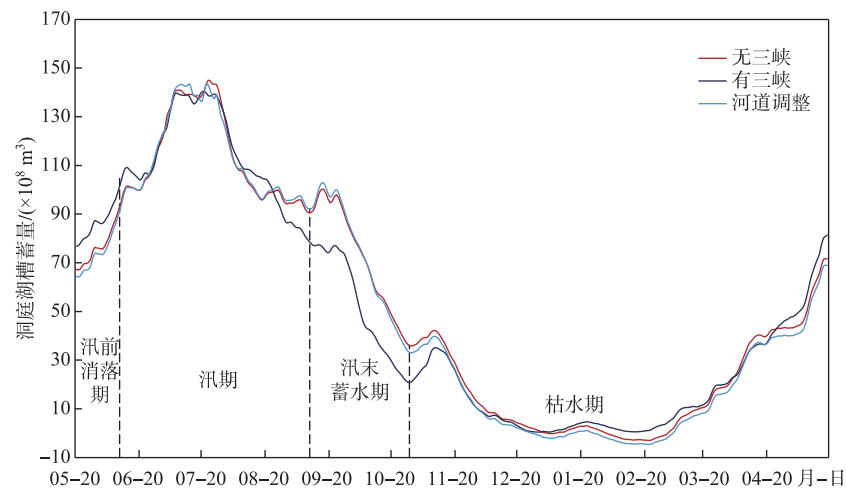


图 11 河道调整及有、无三峡水库影响情况下洞庭湖的多年日均槽蓄量变化过程
Fig.11 Variation of multi-year average storage capacity of Lake Dongting under the influence of topography of the river course and the Three Gorges Reservoir

4 结论

基于经验关系建立了枝城至螺山站荆江洞庭湖水流模型,以 2008—2017 年水文系列为基础,计算有无三峡水库影响情况下洞庭湖槽蓄量变化过程,在分析荆江“三口”分流和城陵矶水位变化的基础上,讨论三峡水库不同调度期内洞庭湖槽蓄量变化的趋势及原因. 结论归纳如下:

- 1) 河道调整使得年内四个时期荆江“三口”多年平均径流量变化比例分别为-15.37%、2.32%、-2.92%和-20.24%,城陵矶水位变化量分别为-0.15、0.01、-0.04 和-0.23 m,洞庭湖槽蓄量变化比例分别为-3.06%、0.12%、-0.01%和-13.31%. 总体来看,河道调整的影响在汛期表现为正(增加或升高),其余时期表现为负(减少或降低).
- 2) 三峡水库实际调度对荆江“三口”分流量变化影响为:汛前消落期多年平均增加 23.94%;汛期变化不明显,多年平均减少 3.54%;汛末蓄水期多年平均减少 37.18%;枯水期多年平均增加 5.61%. 全年来看,“三

口”分流量相比三峡建成前有所减少,“三口”分流变化主要受径流调节影响。

3) 三峡水库实际调度对城陵矶水位变化体现在:汛前消落期多年平均抬高 0.53 m;汛期水位变化较小,多年平均降低 0.02 m;汛末蓄水期水位由于三峡蓄水、长江干流水量减少而显著降低,多年平均水位降低 1.33 m;枯水期由于三峡水库向长江中下游河道补水效应大于河道下切的影响,多年平均水位抬高 0.07 m。全年来看,城陵矶水位变化主要受制于三峡水库径流调节的影响。

4) 三峡水库运行前后,洞庭湖槽蓄量的年际涨落变化不大,但年内各时期变化较明显。在汛前消落期,由于经荆江“三口”进入洞庭湖的水量增多而经城陵矶流出的水量减少,洞庭湖槽蓄量增大,多年平均增大比例为 13.30%;汛期和汛末蓄水期经荆江“三口”分入洞庭湖的水量减少而经城陵矶流出的水量增大,洞庭湖槽蓄量减少,多年平均减少比例分别为 0.20% 和 27.74%;枯水期多年平均槽蓄量增大 2.96%。

5) 相比于以往单纯基于实测资料的统计分析,本文采用“还原”的方式确保“有三峡”和“无三峡”两种情况下水文基准一致,并以三峡工程的影响作为唯一变量,采用控制变量和结果对比的方式获得了水库调蓄和河床调整两种作用各自对洞庭湖调蓄过程的影响。由结果来看,河道调整的作用在低水位时影响较突出,除此之外的大多数时期径流调节的影响占主导地位,该认识与前人成果定性上一致^[9-10,25-26],但本文中量化的结果可为湖区的水资源变化研究提供更为准确的参考。需要说明的是,本文的认识主要基于近期2008—2017 年水文系列,如果将来气候条件和人类活动使来流发生新的变化,三峡水库对湖区蓄水量的影响幅度也会发生改变。

5 参考文献

- [1] Li YT, Deng JY, Sun ZH *et al.* Sediment deposition and variation of flood storage capacity in Lake Dongting. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, **31**(12): 48-52. [李义天, 邓金运, 孙昭华等. 泥沙淤积与洞庭湖调蓄量变化. 水利学报, 2000, **31**(12): 48-52.]
- [2] Gao JF, Zhang C, Jiang JH *et al.* Changes in sediment deposition and erosion and their spatial distribution in the Lake Dongting. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(3): 269-277. [高俊峰, 张琛, 姜加虎等. 洞庭湖的冲淤变化和空间分布. 地理学报, 2001, **56**(3): 269-277.]
- [3] Jiang JH, Huang Q. Analysis of the lake basin change and the rushing-silting features in the past decades of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2004, **16**(3): 209-214. DOI:10.18307/2004.0303. [姜加虎, 黄群. 洞庭湖近几十年来湖盆变化及冲淤特征. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 209-214.]
- [4] Ma YX, Lai HZ. Research on the variations of the water and sediment for recent 50 years in the Jingjiang River and Lake Dongting area. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, **12**(4): 103-106. [马元旭, 来红州. 荆江与洞庭湖区近 50 年水沙变化的研究. 水土保持研究, 2005, **12**(4): 103-106.]
- [5] Qu G, Tang F, Liu XB. Variations and effects on water and sediment in the Jingjiang River three outlets and Lake Dongting. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2007, **18**(3): 94-97. [渠庚, 唐峰, 刘小斌. 荆江“三口”与洞庭湖水沙变化及影响. 水资源与水工程学报, 2007, **18**(3): 94-97.]
- [6] Zhang ZQ, Li XC, Zhen Y. Research on flood storage function and change law of Lake Dongting. *Journal of Sediment Research*, 2014, (2): 68-74. [张振全, 黎昔春, 郑颖. 洞庭湖对洪水的调蓄作用及变化规律研究. 泥沙研究, 2014, (2): 68-74.]
- [7] Huang Q, Sun ZD, Lai XJ *et al.* Changes of the flood regulation capacity at Lake Dongting since 1950s. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3): 676-681. DOI:10.18307/2016.0325. [黄群, 孙占东, 赖锡军等. 1950s 以来洞庭湖调蓄特征及变化. 湖泊科学, 2016, **28**(3): 676-681.]
- [8] Zhang M, Zhou JJ, Huang GX. Flood control problems in middle reaches of Yangtze River and countermeasures. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(4): 1-10. [张曼, 周建军, 黄国鲜. 长江中游防洪问题与对策. 水资源保护, 2016, **32**(4): 1-10.]
- [9] Zhu LL, Xu QX, Dai ML. Runoff diverted from the Jingjiang reach to the Lake Dongting and the effect of Three Gorges Reservoir. *Advanced in Water Science*, 2016, **27**(6): 822-831. [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. 水科学进展, 2016, **27**(6): 822-831.]
- [10] Fang CM, Hu CH, Chen XJ. Impacts of Three Georges Reservoir's operation on outflow of the three outlets of Jingjiang

- River and Lake Dongting. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, (1). [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. 水利学报, 2014, (1).]
- [11] Li JB, Chang J, Lv DQ *et al.* The hydrological effect between Jingjiang River and Lake Dongting during initial period of Three Gorges Project operation. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(11): 1342-1352. [李景保, 常疆, 吕殿青等. 三峡水库调度运行初期荆江与洞庭湖区的水文效应. 地理学报, 2009, **64**(11): 1342-1352.]
- [12] Huang W, Wang WD. Effects of three gorges dam project on Lake Dongting wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(20): 6345-6352. [黄维, 王为东. 三峡工程运行后对洞庭湖湿地的影响. 生态学报, 2016, **36**(20): 6345-6352.]
- [13] Li JB, Dai Y, Yin RX. Effects of Three Gorges Reservoir impoundment on the wetland ecosystem service value of Lake Dongting, South-central China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(3): 809-817. [李景保, 代勇, 殷日新等. 三峡水库蓄水对洞庭湖湿地生态系统服务价值的影响. 应用生态学报, 2013, **24**(3): 809-817.]
- [14] Huang Q, Sun ZD, Jiang JH. Impacts of the operation of the Three Gorges Reservoir on the lake water level of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 424-428. DOI:10.18307/2011.0316. [黄群, 孙占东, 姜加虎. 三峡水库运行对洞庭湖水位影响分析. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 424-428.]
- [15] Wang D, Li YT, Deng JY *et al.* Preliminary analysis of changes in hydraulic elements of Lake Dongting in storage period of Three Gorges reservoir. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, **33**(2): 26-32. [王冬, 李义天, 邓金运等. 三峡水库蓄水期洞庭湖水力要素变化初步分析. 水力发电学报, 2014, **33**(2): 26-32.]
- [16] Li S, Xiong L, Dong L *et al.* Effects of the Three Gorges Reservoir on the hydrological droughts at the downstream Yichang station during 2003-2011. *Hydrological Processes*, 2013, **27**(26): 3981-3993.
- [17] Li ZW, Yuan S, Zhu LL *et al.* Channel adjustments induced by four mender cutoffs in the middle Yangtze river (Jingjiang reach). *Resources and Environment in the Yangtze River*, 2018, **27**(4). [李志威, 袁帅, 朱玲玲等. 荆江河段 4 次裁弯后干流河道调整研究. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(4).]
- [18] Sun ZH, Li Q, Yan X *et al.* Analysis of the critical relationship between the water levels of Lake Dongting and Chenglingji station. *Advanced in Water Science*, 2017, **28**(4): 496-506. [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. 水科学进展, 2017, **28**(4): 496-506.]
- [19] Wang WG, Li JX, Wei JD *et al.* Runoff simulation by hydrological model based on the assimilated evapotranspiration. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(2): 159-168. [王卫光, 李进兴, 魏建德等. 基于蒸散发数据同化的径流过程模拟. 水科学进展, 2018, **29**(2): 159-168.]
- [20] Li YA, Zhang C. Operation management of three gorges hydropower plant. Beijing: China Electric Power Press, 2009. [李永安, 张诚. 三峡电站运行管理. 北京: 中国电力出版社, 2009.]
- [21] Zheng SR. Discussion on utilization of flood resources and comprehensive benefits of Three Gorges Project. *Yangtze River*, 2013, **44**(15): 1-6. [郑守仁. 三峡工程利用洪水资源与发挥综合效益问题探讨. 人民长江, 2013, **44**(15): 1-6.]
- [22] Li JB, Zhang ZQ, Ou CM *et al.* Responses of water regimes in Lake Dongting area under different dispatching modes during the running period of the Three Gorges Reservoir. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(9). [李景保, 张照庆, 欧朝敏等. 三峡水库不同调度方式运行期洞庭湖区的水情响应. 地理学报, 2011, **66**(9).]
- [23] Li YT, Guo XH, Tang JW *et al.* Changes on runoff diversion from Jingjiang reach of the Yangtze river to Lake Dongting after operation of Three Gorges Reservoir. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, **17**(1): 21-31. [李义天, 郭小虎, 唐金武等. 三峡建库后荆江“三口”分流的变化. 应用基础与工程科学学报, 2009, **17**(1): 21-31.]
- [24] Sun SR, Xie P, Zhao JY *et al.* Variability in the annual flood peak discharge and water level in the three outlets of Lake Dongting. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 812-824. DOI: 10.18307/2018.0323. [孙思瑞, 谢平, 赵江艳等. 洞庭湖“三口”洪峰流量和水位变异特性分析. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 812-824.]
- [25] Cao WH, Mao JX. Impacts of Three Georges Reservoir's operation on Jingjiang River and outflow of the three outlets. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2015, **46**(6): 67. [曹文洪, 毛继新. 三峡水库运用对荆江河道及“三口”分流影响研究. 水利水电技术, 2015, **46**(6): 67.]
- [26] Li JB, Dai Y, Ou CM *et al.* Effect of store water application of the three-Gorges reservoir on Yangtze river on water and sediment characteristics in the Dongting Lake. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(3): 215-219. [李景保, 代勇, 欧朝敏等. 长江三峡水库蓄水运用对洞庭湖水沙特性的影响. 水土保持学报, 2011, **25**(3): 215-219.]