

# 三峡水库蓄水后荆江三口分流量计算方法

陈帮<sup>1</sup> 李志威<sup>2</sup> 胡旭跃<sup>1</sup> 朱玲玲<sup>3</sup> 谭岚<sup>41</sup>

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 中国水利水电科学研究院水利部水沙科学与

江河治理重点实验室, 北京 100038;

3. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010;

4. 湖南百舸水利建设股份有限公司, 湖南 长沙 410007)

**【摘要】:** 荆江三口河道(藕池河、虎渡河、松滋河)的水沙变化是江湖关系演变的重要内容, 其分水分沙变化驱动江湖关系的调整, 而且三峡水库蓄水后加剧了三口分流显著减少。通过三口河道的 5 个水文站 2003~2018 年水位与流量实测数据分析, 考虑口门区水位下降等因素, 得到三口河道分流量的经验公式, 并量化荆江枯水位下降对三口河道分流量的影响。结果表明: 三口分流量是口门区水位的函数, 口门区水位下降引起三口河道分流量的同向减少。根据水位与流量关系得到三口五站简化分流量计算公式, 进一步考虑口门区水位下降、河道宽度等因素, 得到经验分流量与修正分流量的计算公式。采用 2017~2018 年实测日平均水位值与流量值, 验证藕池河管家铺站与康家岗站的分流量经验公式, 得到相对误差分别为 4.5%与 13.7%, 验证虎渡河弥陀寺站的相对误差为 11.5%, 松滋河新江口与沙道观的相对误差值分别为 4.5%与 7.3%。可知荆江三口分流量的经验公式与实测值符合良好, 可作为评估未来受荆江干流水位下降对荆江三口河道分流量的影响。

**【关键词】:** 荆江三口 水沙变化 分流量 三峡水库

**【中图分类号】:** TV147 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0667-10

荆江三口位于长江中游荆江南岸, 由松滋口、太平口与藕池口组成, 荆江自松滋河、虎渡河与藕池河分流汇入洞庭湖, 形成连通且复杂的江湖关系。1950 年以来, 荆江三口分流分沙呈递减趋势已成共识<sup>[1~6]</sup>, 调弦口堵口、下荆江系统裁弯、葛洲坝截流和三峡水库等水利工程使得三口河道水沙变化呈现明显的阶段性特征。荆江三口分流入湖水量的持续减少, 影响洞庭湖区的灌溉、航运、饮用水安全和水环境生态, 驱动江湖关系的新调整<sup>[7]</sup>。

**作者简介:** 陈帮(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为河流动力学。E-mail: chenbang94@163.com

李志威, E-mail: lizw2003@whu.edu.cn

**基金项目:** 湖南省科技重大专项(2018SK1010); 湖南省教育厅重点项目(19A017); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ3036); 中国水利水电科学研究院水利部水沙科学与江河治理重点实验室开放研究基金(IWHR-JH-2020-A-01)

荆江三口河道水沙变化是研究江湖关系的关键，确定水沙变化等驱动因素并量化影响幅度是研究重点，国内相关学者就荆江三口水沙变化驱动力的分析主要围绕自然因素与水利工程展开。早期学者认为口门河势变化，分流口门与干流的相对位置、口门附近干流河势变化与分流道的冲淤变化等<sup>[8]</sup>自然因素，是影响荆江三口分流分沙的主要原因。后期学者主要针对水利工程的影响进行探讨，例如方春明等<sup>[9]</sup>认为下荆江裁弯后水位的下降是三口河道淤积萎缩和分流分沙急剧减小的主要驱动力；李景保等<sup>[10]</sup>指出长江中游调弦口堵口、下荆江系统裁弯、葛洲坝截流是导致洞庭湖来水来沙缓减的主动因子；许全喜等<sup>[11]</sup>认为荆江河床冲刷和洞庭湖淤积萎缩是三口分流分沙变化的主要因素。

三峡水库蓄水后，引起江湖系统水沙输移与冲淤演变特性的改变，坝下游含沙量急剧减少，致使河床长距离冲刷，枯水期水位持续下降<sup>[12~15]</sup>。荆江干流水位变化是影响三口分流的直接因素之一<sup>[16]</sup>，荆江枯水期水位的下降促使荆江三口分流减少，年均断流时间延长<sup>[17]</sup>。藕池口将荆江分为上荆江与下荆江两段，相比下荆江，上荆江河床冲刷发展剧烈，枯水位下降幅度最大<sup>[18]</sup>。Zhang 等<sup>[19]</sup>量化三峡水库蓄水对长江与洞庭湖之间水交换影响程度，朱玲玲等<sup>[20]</sup>引入径流还原计算方法，量化三峡水库蓄水后不同运行方式对三口分流量的影响程度。然而，三峡水库蓄水运行后三口分流量计算方法枯水期水位下降对分流量变化影响缺乏定量研究。本文考虑口门区水位下降与三口河道沿程水位比降等因素，根据水位与流量关系得到三口分流量经验公式，以此计算三峡蓄水后荆江枯水位下降对三口河道分流量的影响，可短期预测未来三口河道分流量变化及对江湖关系调整的影响。

## 1 研究数据与方法

水文数据采用长江委水文局三口河道的五个水文站(管家铺、康家岗、弥陀寺、新江口与沙道观水文站)2003~2018 年日平均水位与日平均流量。以堰流水力计算公式为基本原型<sup>[21]</sup>，采用 2003~2010 年五站日平均水位与日平均流量，利用 Origin 统计软件待定系数为 1.5 或 2.0 拟合其他系数，得到日平均相对水深与日平均流量的相对关系，其中日平均相对水深为五站的日平均水位与 2003~2016 年断流时多年平均水位的相对差值。统计五站 2003~2016 年流量为  $0\text{m}^3/\text{s}$  时的年均水位变化，作为三口河道口门区水位下降值。其中新江口水文站未发生断流，统计年平均水位未出现下降趋势，因此取流量  $0\sim 100\text{m}^3/\text{s}$  对应的水位变化。考虑口门区水位下降等因素，初步得到三口河道五站分流量经验公式。

将 2011~2016 年五站日平均水位，输入分流量经验公式中得到相应的计算日平均流量，计算流量与实测流量的差值除以实测流量值，得到的数值再平方作为相对误差值来判定相对误差，其相对误差值在 10%之内符合要求，大于相对误差则需引进相对误差，进行修正。最后利用 2017~2018 年日平均水位，输入修正的经验公式，根据相对误差值判断误差是否符合要求。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 径流变化分析

对比分析 1956~2014 年三口(松滋口、太平口、藕池口)与四水(湘水、资水、沅水、澧水)的年均径流量(图 1)，相比四水年均径流量，三口河道来水量下降趋势大。三口与四水线性拟合得到的斜率分别为-16.0、0.9，表明三口平均以每年  $16.0\times 10^8\text{m}^3$  的速率递减，而四水以每年  $0.9\times 10^8\text{m}^3$  的速率在递增。1956~1966 年至 1967~1972 年，三口多年平均径流量从  $1260.2\times 10^8\text{m}^3$  降至  $1097.7\times 10^8\text{m}^3$ ，减幅 12.9%，而四水多年平均径流量从  $1519.3\times 10^8\text{m}^3$  增加至  $1711.7\times 10^8\text{m}^3$ ，增幅 12.7%。2003~2014 年三口与四水多年平均径流量分别为  $472.8\times 10^8\text{m}^3$ 、 $1537.7\times 10^8\text{m}^3$ ，同期三口多年平均径流量只占入湖总量的 23.5%。

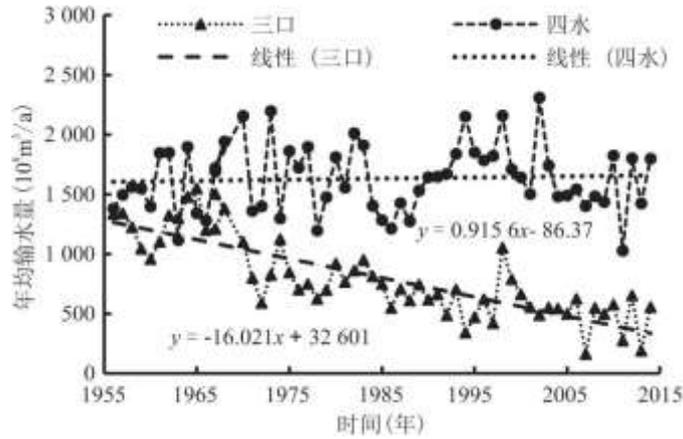


图1 1956~2014年三口和四水的年均径流量变化

1965~1973年与1998~2002年三口年均输水量下降幅度大,1965~1973年从 $1549 \times 10^8 \text{m}^3$ 下降至 $825 \times 10^8 \text{m}^3$ ,减少 $724 \times 10^8 \text{m}^3$ ,1998~2002年年均输水量减少 $564 \times 10^8 \text{m}^3$ ,减幅为53.6%。2003~2014年年均输水量趋势基本稳定。

图2表明三口河道多年平均径流量的变化,三口河道整体都呈现逐年递减的趋势。1951~1960年与1961~1970年藕池河多年平均径流量大于松滋河与虎渡河,分别为 $699 \times 10^8 \text{m}^3$ 、 $598 \times 10^8 \text{m}^3$ ,分别占三口径流总量的49.7%与44.9%。1961~1970年至1971~1980年藕池河径流量陡降 $359 \times 10^8 \text{m}^3$ ,减幅60.0%,同期松滋河径流量从 $512 \times 10^8 \text{m}^3$ 减少至 $413 \times 10^8 \text{m}^3$ ,减少 $99 \times 10^8 \text{m}^3$ ,减幅19.3%,低于藕池河的减幅量,至此松滋河多年径流量高于其他两河。1951~1966年至2011~2016年,虎渡河多年径流量从 $209 \times 10^8 \text{m}^3$ 降至 $74 \times 10^8 \text{m}^3$ ,减少 $135 \times 10^8 \text{m}^3$ ,同期松滋河与藕池河分别减少 $224 \times 10^8 \text{m}^3$ 、 $599 \times 10^8 \text{m}^3$ ,藕池河多年径流量减幅最大。

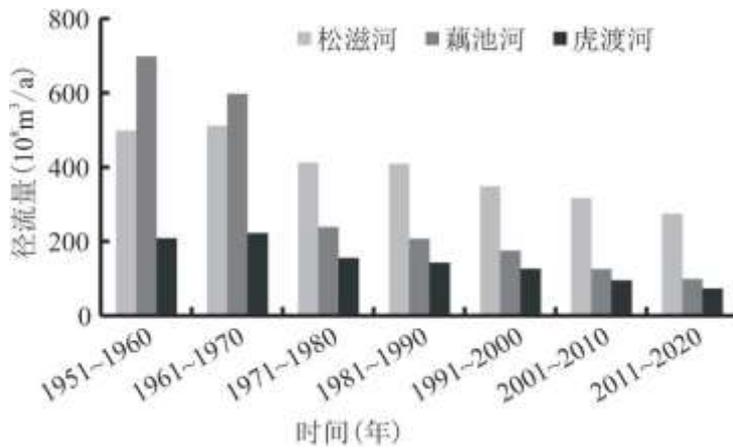


图2 三口河道的多年径流量

以调弦口堵口、下荆江系统裁弯、葛洲坝截流和三峡水库蓄水为时间节点,统计三口河道多年分流比(图3)。1956~2016年,三口河道分流比整体呈现下降趋势,1956~1966年至1973~1980年藕池河分流比从14.1%降至5.6%,减少8.5%,同期松滋河与虎渡河分别减少1.1%与1.0%。1973~1980年至2003~2016年三口河道分流比下降速率减缓,藕池河、松滋河与虎渡河分别下降3.0%、2.6%与0.9%。

## 2.2 藕池河经验公式

### 2.2.1 藕池河经验公式建立

以堰流水力计算公式为基本原型, 统计分析藕池河管家铺与康家岗两水文测站 2003~2018 年日平均流量与日平均水位的水文资料。探究 2 个水文测站日平均流量与日平均水深的对应关系, 取水深为 2003~2010 年日平均水位分别与流量为  $0\text{m}^3/\text{s}$  时日平均水位平均值(管家铺 30.02m、康家岗 32.61m)的高程差值。排除断流时的日平均流量与水位, 得到 2 个水文测站流量与水深的对应关系(图 4), 经幂函数非线性拟合, 初步得到藕池河分流量的计算公式:

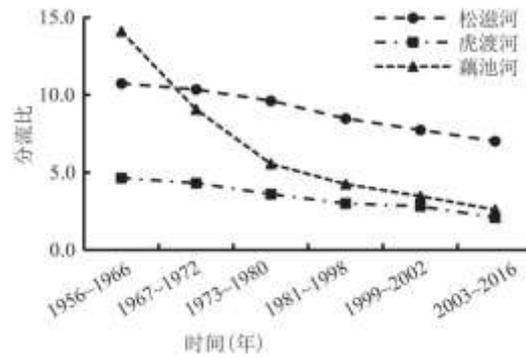


图 3 三口河道的多年分流比

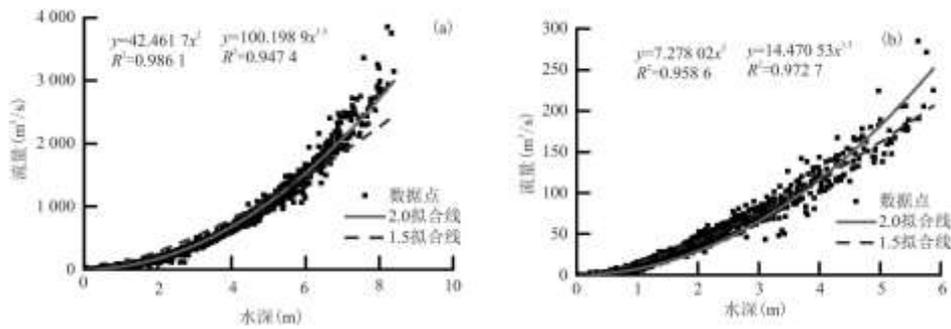


图 4 2003~2010 年藕池河两水文站流量与水深相关关系(a)管家铺站(b)康家岗站

$$\text{管家铺: } Q_1 = 42.46 \times (H_1 - 30.02)^2 \quad (1)$$

$$\text{康家岗: } Q_2 = 7.28 \times (H_2 - 32.61)^2 \quad (2)$$

式中:  $Q_1$  与  $Q_2$  为藕池河管家铺与康家岗的日平均流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H_1$  与  $H_2$  分别为管家铺与康家岗的水位, m。

三峡水库蓄水后, 清水下泄导致荆江干流河道平均冲刷深度超过 2m, 枯水期水位下降。口门区断流时水位下降的变化是藕池河流量与水位关系的影响因素, 统计 2003~2016 年藕池河口门区流量为  $0\text{m}^3/\text{s}$  时年平均水位, 得到图 5a 和图 5b, 经幂函数非线性拟合后得到在枯水期内管家铺站与康家岗站的年均水位变化。当长江干流冲淤平衡时, 口门区断流时水位高程将不再持续下降。前人研究表明<sup>[22]</sup>, 三峡水库运用至 40a 后, 下荆江段冲刷基本停止, 因此确定水位下降的时间至 2040 年截止, 之后年份以 2040 年断流时的水位为准。

根据 2006 年管家铺水文站断面数据, 水位在 30m 时的河宽为 215m。同年康家岗水文站水位在 32m 时河宽为 35m。将流量为

0m<sup>3</sup>/s 时口门区水位变化、断流时对应的藕池河水面河宽等因素考虑至式 1 与式 2 中, 得到:

$$\text{管家铺: } \begin{cases} h_1 = 30.3 \times (t - 2002)^{-0.006} \\ Q_{1r} = 0.20 \times W_1 \times [H_1 - h_1]^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{康家岗: } \begin{cases} h_2 = 33.1 \times (t - 2002)^{-0.008} \\ Q_2 = 0.21 \times W_2 \times [H_2 - h_2]^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $h_i$  为各水文站断流时的水位, m;  $t$  为 2003 年三峡水库蓄水后的年份时间(2003 $\leq t \leq 2040$ , 当  $t > 2040$  时,  $t$  取值 2040),  $d; Q_{1r}$  为考虑枯水期口门区水位、水面河宽等因素的分流量, m<sup>3</sup>/s;  $W_i$  为断流时水面河宽, 当位于管家铺与康家岗水文站断面时分别为 215、35m。

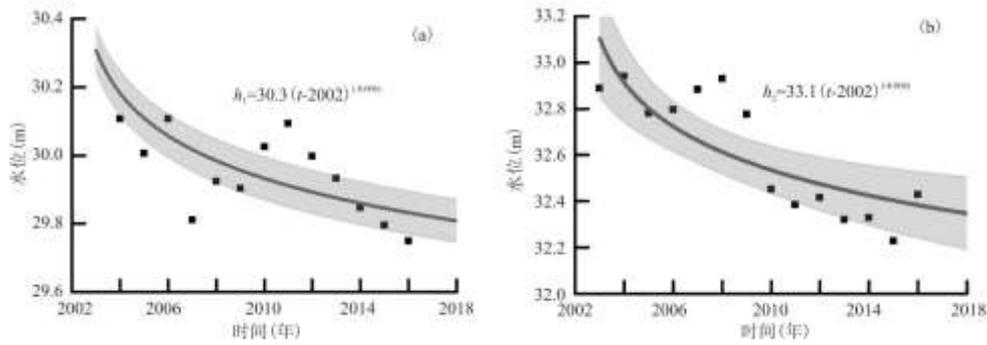


图 5 2003~2016 年藕池河两水文站断流年平均水位 (a)管家铺站 (b)康家岗站

### 2.2.2 藕池河经验公式修正

为验证藕池河流量与水位关系的经验公式的精度, 取 2011~2016 年藕池河管家铺与康家岗水文站日平均流量与日平均水位, 将日平均水位分别输入至式 3 和式 4 中, 得到相应的计算流量值。取实测流量值为横坐标, 计算流量为纵坐标得到实测流量与计算流量如图 6, 图中 45° 线为完全拟合线, 数据点越接近 45° 线则计算流量越精确, 误差越小, 设置 $\pm 10\%$ 为允许误差。管家铺站实测流量在  $Q=1500\sim 2000\text{m}^3/\text{s}$  对应除几个计算流量值略大之外, 其他值都在 $\pm 10\%$ 为允许误差范围内。2011~2016 年计算流量值与实测流量值相对误差值为 2.4%, 藕池河管家铺站经验公式无需进行修正。

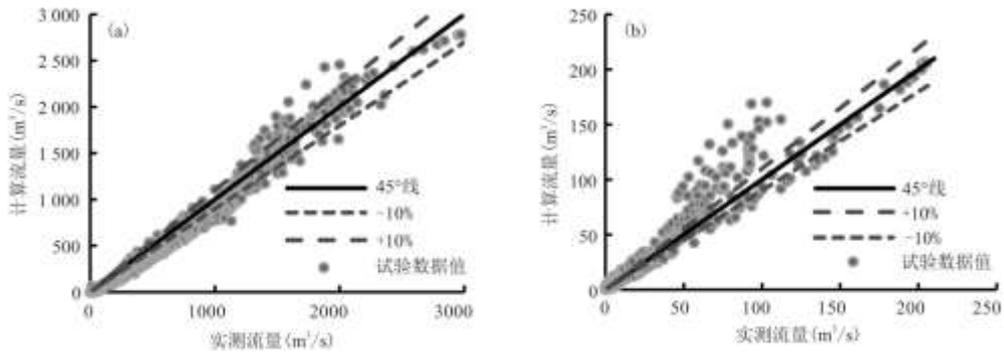


图 6 2011~2016 年藕池河修正后实测流量与计算流量对比(a)管家铺站(b)康家岗站

藕池河康家岗站未修正之前, 2011~2016 年计算流量值与实测流量值相对误差值为 19.7%, 计算值整体大于实测值, 需引进修正系数, 修正系数 0.9、0.8 与 0.7 得到的相对误差值分别为 14.6%、10.6%与 7.8%, 修正系数过小, 整体相对误差小, 但致使高流量下实测流量值大于计算流量, 因此综合选用修正系数 0.8。修正后的管家铺站与康家岗站公式为:

$$\text{管家铺: } \begin{cases} h_1 = 30.3 \times (t - 2002)^{-0.006} \\ Q_{1R} = 1.0 \times 42.46 \times [H_1 - h_1]^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{康家岗: } \begin{cases} h_2 = 33.1 \times (t - 2002)^{-0.008} \\ Q_{2R} = 0.8 \times 7.28 \times [H_2 - h_2]^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Q_{iR}$  为考虑沿程比降、口门区水位下降等因素修正后的分流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

藕池河康家岗站实测流量在  $Q=50\sim 100\text{m}^3/\text{s}$  时, 计算流量大于实测流量, 且超出误差范围。为分析误差产生原因, 根据 2003~2018 年已有日平均流量与日平均水位数据, 统计水文站不同流量级别水位的变化。由于管家铺水文站过流能力强, 分流量大, 因此管家铺站分  $Q=0\sim 100$ 、 $100\sim 500$ 、 $500\sim 1000$ 、 $1000\sim 2000$ 、 $2000\sim 3000\text{m}^3/\text{s}$  共 5 个流量级别, 康家岗水文站过流能力小则分为  $0\sim 50$ 、 $50\sim 100$ 、 $100\sim 200\text{m}^3/\text{s}$ 。

进一步结果如图 7a 和图 7b, 2003~2018 年管家铺站 5 个流量级别下水位都是呈下降趋势, 康家岗水文站流量在  $Q=0\sim 50\text{m}^3/\text{s}$  时, 线性拟合后斜率为  $-0.07$ , 即在此流量级下, 水位以  $0.07\text{m}/\text{a}$  的速度下降, 而在  $Q=50\sim 100\text{m}^3/\text{s}$  流量级别下斜率为  $0.07$ , 水位呈递增趋势。在康家岗站建立公式时, 是以断流时水位变化来推算口门区水位的下降, 断流时水位斜率为  $-0.056$ , 因此与  $Q=50\sim 100\text{m}^3/\text{s}$  流量级的水位变化相反, 在  $Q=50\sim 100\text{m}^3/\text{s}$  下, 计算流量大于实测流量。藕池河康家岗水文站 2003~2016 年均断流天数达到 185d, 数据样本少, 也是导致误差的一个方面。

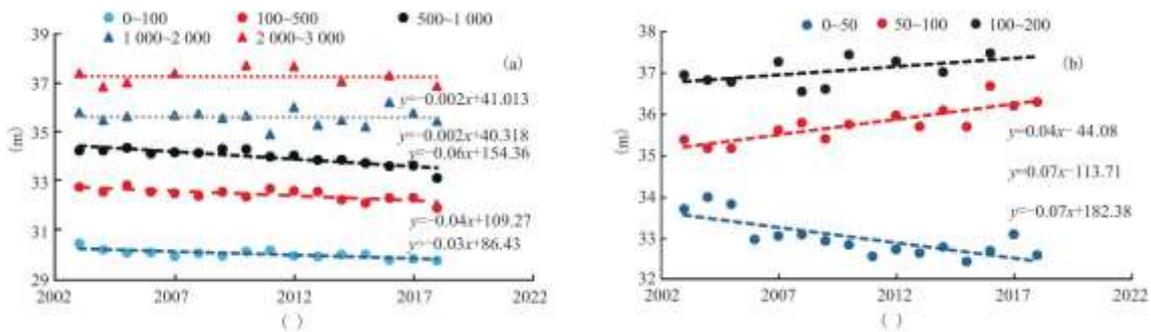


图 7 2003~2018 年藕池河不同流量级别水位变化(a)管家铺站(b)康家岗站

### 2.2.3 藕池河经验公式验证

以管家铺与康家岗水文站 2017~2018 年日平均流量与水位资料验证修正后的藕池河两站流量与水位经验公式, 图 8a 和图 8b 分别为 2017~2018 年两站实测流量值与计算流量值, 管家铺站计算流量值基本在  $\pm 10\%$  以内, 计算得到相对误差值为 4.5%。康家岗站修正之后实测流量值与计算流量值相对误差值为 13.7%。藕池河两水文站计算流量值较高度还原实测流量, 藕池河经验公式基本符合实际情况。

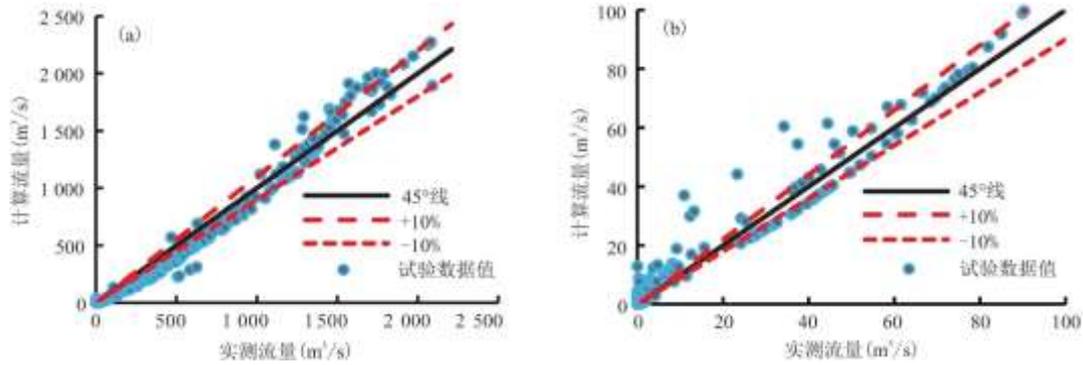


图 8 2017~2018 年藕池河实测流量与计算流量对比 (a)管家铺站 (b)康家岗站

### 2.3 虎渡河经验公式

#### 2.3.1 虎渡河经验公式建立

统计 2003~2016 年弥陀寺水文站流量为  $0\text{m}^3/\text{s}$  时的年平均水位, 取平均值为  $31.96\text{m}$ , 日平均水位与  $31.96\text{m}$  的差值得到断流时相对水深, 排除流量为  $0\text{m}^3/\text{s}$  的日平均流量之后得到与相对水深的对应关系(图 9)利用 Origin 软件经幂函数非线性拟合, 指定指数为 1.5、2 回归其他系数, 指数为 2 时 R 的平方值为 0.98, 指数为 1.5 时, R 的平方值为 0.96, 指数为 2 时拟合的结果较好, 初步得到弥陀寺日平均流量与日平均水深关系式为:

$$\text{弥陀寺: } Q_3 = 16.35 \times (H_3 - 31.96)^2 \quad (7)$$

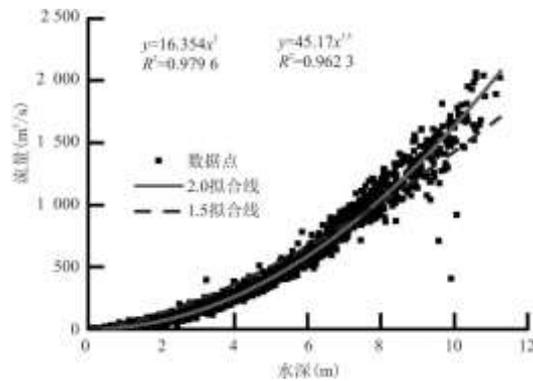


图 9 2003~2010 年虎渡河弥陀寺水文站流量与水深相关关系

考虑弥陀寺口门区水位的变化, 统计 2003~2016 年弥陀寺站每年流量为  $0\text{m}^3/\text{s}$  时的平均水位, 如图 10 所示, 断流时的年均水位呈现递减趋势, 经幂函数非线性拟合后得到在枯水期内弥陀寺站的年均水位变化。测量得到 2006 年弥陀寺站水位在  $32\text{m}$  时的水面河宽为  $63.0\text{m}$ 。综合上述因素, 得到虎渡河流量与水位的经验公式为:

$$\text{弥陀寺: } \begin{cases} h_3 = 32.26 \times (t - 2002)^{-0.005} \\ Q_{3r} = 0.26 \times W_3 \times [H_3 - h_3]^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $W_3$ 为虎渡河断流时水面河宽，当位于弥陀寺水文站断面时，取值 63.0m。

### 2.3.2 虎渡河经验公式修正与验证

取 2010~2016 年虎渡河弥陀寺水文站日平均流量与日平均水位，以日平均水位作为自变量输入至式 8 中，得到相应的计算流量值(图 11(a))。未修正时计算得到相对误差为 12.1%。引入修正系数 0.9、0.8 得到的相对误差值分别为 10.7%、10.5%，当修正系数为 0.8 时，计算流量能更吻合 45° 拟合线，综合考虑修正系数为 0.8。修正之后的公式为：

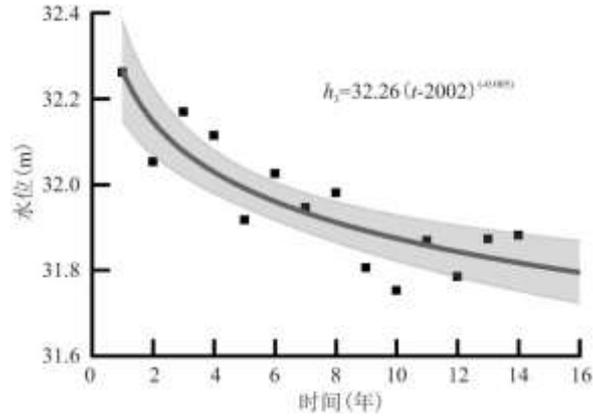


图 10 2003~2016 年虎渡河弥陀寺站断流年平均水位

$$\text{弥陀寺: } \begin{cases} h_3 = 32.26 \times (t - 2002)^{-0.005} \\ Q_{3R} = 0.8 \times 16.35 \times [H_3 - h_3]^2 \end{cases} \quad (9)$$

以弥陀寺水文站 2017~2018 年日平均流量与水位实测资料验证修正后的虎渡河流量与水位经验公式，实测流量与计算流量对比分析图如图 11(b)所示。修正之后原计算流量与实测流量的相对误差值为 11.5%，计算流量值基本还原实测流量，弥陀寺河经验公式基本符合实际情况。

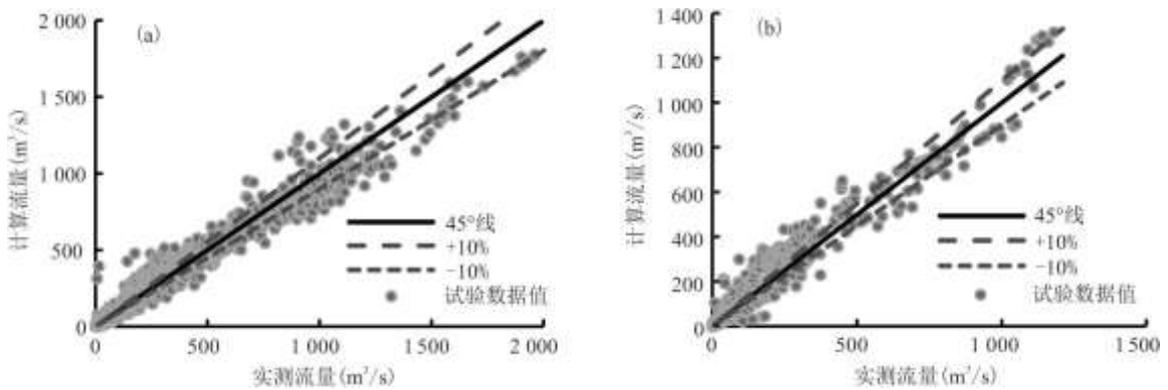


图 11 虎渡河实测流量与计算流量对比(a)2011~2016 年 (b)2017~2018 年

### 2.4 松滋河经验公式

### 2.4.1 松滋河经验公式建立

2003~2010年松滋河新江口水文站未出现断流情况,统计这14年年均最低水位值为35.00m。沙道观水文站流量为 $0\text{m}^3/\text{s}$ 时的多年平均水位为34.70m。两站日平均水位与多年平均最低水位的差值为日平均水深,与同期日平均流量的对应关系如图12,经幂函数非线性拟合日平均水深与日平均流量,新江口指数为2与1.5时 $R^2$ 分别为0.97、0.99,指数为1.5时拟合的效果更好,新江口指数选用1.5,沙道观指数为2与1.5时 $R^2$ 分别为0.988、0.990,选用指数为2。分别得到初步关系式如下:

$$\text{新江口: } Q_4 = 148.50 \times (H_4 - 35.00)^{1.5} \quad (10)$$

$$\text{沙道观: } Q_5 = 20.43 \times (H_5 - 34.70)^2 \quad (11)$$

式中: $Q_4$ 与 $Q_5$ 为松滋河新江口站与沙道观站的日平均流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H_4$ 与 $H_5$ 分别为松滋河新江口站与沙道观站的水位,m。

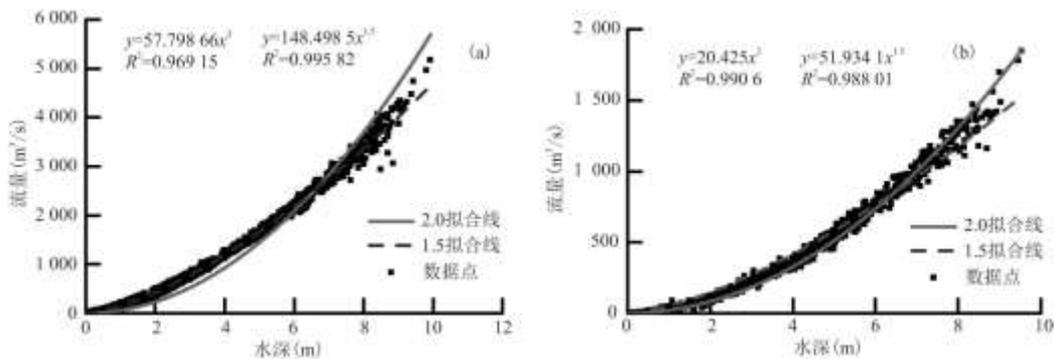


图12 2003~2010年松滋河水文站流量与水深相关关系(a)新江口(b)沙道观

统计2003~2016年沙道观站每年流量为 $0\text{m}^3/\text{s}$ 时的年平均水位(图13),经幂函数非线性拟合后得到在枯水期内沙道观站的年平均水位变化。同期新江口水文站未发生断流,统计年平均水位,未出现下降趋势,水位在35m时的流量整体较小,取流量 $0\sim 100\text{m}^3/\text{s}$ 对应的水位变化,经幂函数非线性拟合后得到在枯水期内新江口站的年平均水位变化。

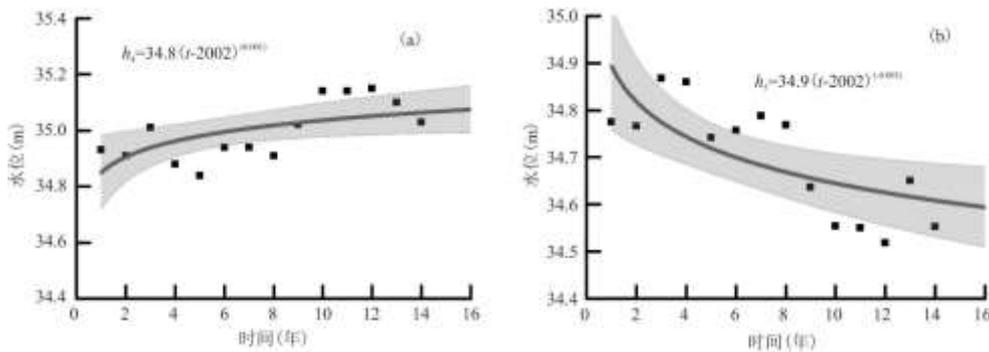


图13 2003~2016年松滋河沙道观站断流年平均水位

测得松滋河新江口与沙道观水位在35m时河宽分别为160m、60m。综合上述因素,得到松滋河新江口与沙道观水文站流量与水位的经验公式为:

$$\text{新江口: } \begin{cases} h_4 = 34.80 \times (t - 2002)^{(0.001)} \\ Q_{4r} = 0.93 \times W_4 \times [H_4 - h_4]^{1.5} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{沙道观: } \begin{cases} h_5 = 34.90 \times (t - 2002)^{(-0.003)} \\ Q_{5r} = 0.41 \times W_5 \times [H_5 - h_5]^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中： $W_4$ 与 $W_5$ 为松滋河断流时或流量接近 $0\text{m}^3/\text{s}$ 的水面河宽，当位于新江口与沙道观水文站断面时，分别为160、60m。

#### 2.4.2 松滋河经验公式修正与验证

取2011~2016年松滋河新江口与沙道观水文站日平均流量与日平均水位，将日平均水位输入至式12与13中，得到相应的计算流量值，实测流量与计算流量对比图如图14a和图14b。2011~2016年新江口与沙道观计算流量值与实测流量值相对误差值分别为6.6%与8.7%，两水文测站计算流量基本在 $\pm 10\%$ 为允许误差范围内，松滋河两站经验公式无需进行修正。

以新江口与沙道观水文站2017~2018年日平均流量与水位资料验证修正后的松滋河两站流量与水位经验公式，图15a和图15b分别为新江口与沙道观实测流量值与计算流量值对比图，两水文站2017~2018年流量实测值与计算值对比数据值基本接近 $45^\circ$ 拟合线。2017~2018年新江口与沙道观计算流量值与实测流量值相对误差值分别为4.5%与7.3%，说明两水文站计算流量值基本还原实测流量，松滋河经验公式符合实际情况。

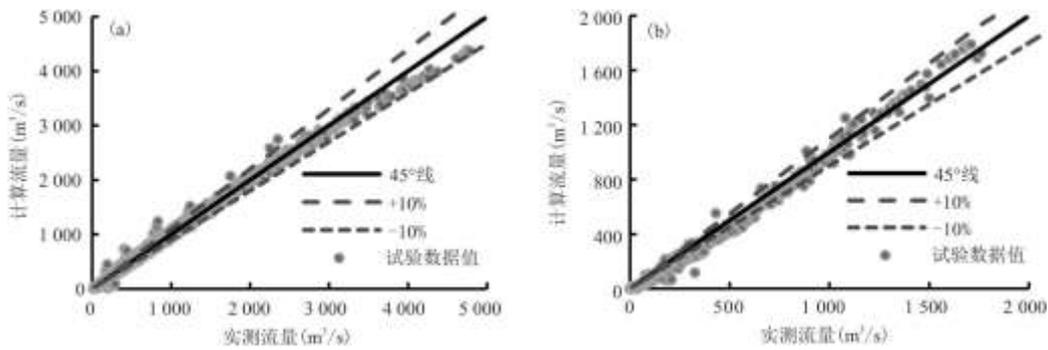


图 14 2011~2016 年松滋河实测流量与计算流量对比(a)新江口站 (b)沙道观站

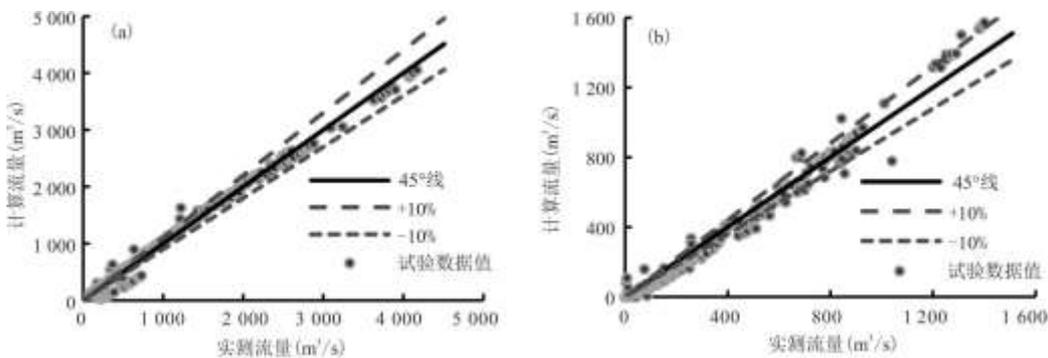


图 15 2017~2018 年松滋河实测流量与计算流量对比(a)新江口站 (b)沙道观站

### 3 结论

(1)荆江三口分流量是口门区水位的函数,考虑口门区水位下降、河道宽度等因素,根据水位-流量关系建立三口河道 5 个水文站的分流量公式与修正经验公式。以 2017~2018 年实测日平均水位值与流量计算值验证了藕池河的管家铺站与康家岗站分流量经验公式,得到相对误差分别为 4.5%与 13.7%,同时验证了虎渡河弥陀寺站得到的相对误差为 11.5%,松滋河新江口与沙道观计算流量值与实测流量值相对误差值分别为 4.5%与 7.3%。

(2)根据三口河道 5 个水文站实测流量与计算流量对比,发现松滋河两站计算流量与实测流量验证精度最好,藕池河康家岗水文站 2003~2016 年均断流天数达到 185d,数据样本少,且  $0\sim 50\text{m}^3/\text{s}$  与  $50\sim 100\text{m}^3/\text{s}$  流量级别水位变化差异大,导致康家岗水文站的分流量经验公式验证时精度低。

本文建立的三口河道分流量的修正经验公式可预测由于荆江干流枯水期水位下降对三口分流量的影响,对三口河道防洪安全评价和灌溉引水规划设计具有参考价值。

#### 参考文献:

[1]韩其为,周松鹤.三口分流河道的特性及演变规律[J].长江科学院院报,1999,16(5):5-8.

[2]胡光伟,毛德华,李正最,等.荆江三口 60a 来入湖水沙变化规律及其驱动力分析[J].自然资源学报,2014,29(1):129-142.

[3]郭小虎,李义天,刘亚.近期荆江三口分流分沙比变化特性分析[J].泥沙研究,2014(1):53-60.

[4]陈帮,李志威,胡旭跃,等.藕池河形态变化与冲淤过程研究[J].泥沙研究,2019,44(4):33-40.

[5]WANG X Y,LI X,BAIYIN B,et al.Maintaining the connected river-lake relationship in the middle Yangtze River reaches after completion of the Three Gorges Project [J].International Journal of Sediment Research,2017,32(4):487-494.

[6]张细兵,卢金友,王敏,等.三峡工程运用后洞庭湖水沙情势变化及其影响初步分析 [J].长江流域资源与环境,2010,19(6):640-643.

[7]万荣荣,杨桂山,王晓龙,等.长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J].湖泊科学,2014,26(1):1-8.

[8]卢金友.荆江三口分流分沙变化规律研究 [J].泥沙研究,1996(4):55-62.

[9]方春明,曹文洪,鲁文,等.荆江裁弯造成藕池河急剧淤积与分流分沙减少分析[J].泥沙研究,2002(2):40-45.

[10]李景保,王克林,秦建新,等.洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其动因 [J].地理学报,2005,60(3):503-510.

[11]许全喜,胡功宇,袁晶.近 50 年来荆江三口分流分沙变化研究 [J].泥沙研究,2009(5):1-8.

[12]韩剑桥,孙昭华,杨云平.三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征 [J].湖泊科学,2017,29(5):1217-1226.

---

[13]孙昭华, 黄颖, 曹绮欣, 等. 三峡近坝段枯水位降幅的时空分异性及成因 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(4): 694-704.

[14]许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2):146-154.

[15]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.

[16]李义天, 郭小虎, 唐金武, 等. 三峡建库后荆江三口分流的变化 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1):21-31.

[17]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.

[18]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.

[19]ZHANG R, ZHANG S H, XU W, et al. Flow regime of the three outlets on the south bank of Jingjiang River, China: an impact assessment of the Three Gorges Reservoir for 2003-2010 [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015 (29):2047-2060.

[20]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.

[21]朱勇辉, 渠庚, 郭小虎. 非恒定流条件下荆江三口分流模拟控制方式研究 [J]. 长江科学院院报, 2011, 28(6):82-86.

[22]朱玲玲, 陈剑池, 袁晶, 等. 基于时段控制因子的荆江三口分流变化趋势研究 [J]. 水力发电学报, 2015, 34(2):103-111.