

文章编号: 1000-0887(2004) 12-1220-10

# 交汇、分流河道洪水演进模型及其应用<sup>\*</sup>

范 平, 李家春, 刘青泉

(中国科学院 力学研究所 工程科学部, 北京 100080)

(本刊编委李家春来稿)

摘要: 通过引入水深连接方程, 耦合了干、支流河道的水流运动, 给出了它们的流量分配关系, 建立了交汇、分流河道洪水演进模型。对交汇河道中水流顶托作用随河道参数的变化规律进行了研究。分析了干、支流洪峰遭遇现象, 指出干流和支流的洪峰遭遇是 1998 年长江大洪水干流高洪水位的重要原因之一。并定性解释长江干流荆江河段的裁弯取直和长江分流河道的淤积对河道水流的影响。

关键词: 交汇河道; 分流河道; 顶托作用; 洪峰遭遇; 长江

中图分类号: TV122<sup>+</sup>.5; TV133.1 文献标识码: A

## 引 言

交汇和分流河道在水力学中统称为交叉水流系统, 它是自然水系以及明渠流中最常见的现象。自 Taylor<sup>[1]</sup> 针对交汇和分流河道中的一维水流特性的研究以来, 人们已开展了不少的研究工作。

对交汇河道一维水流特性研究代表性的有: Ramamurthy<sup>[2]</sup> (1988) 研究了具有直角交汇形式的交汇水流系统中的顶托作用; 倪晋仁<sup>[3]</sup> (1992) 简单地分析了水深顶托作用与汇流比(支流和干流入汇流量的比值)和交汇角之间的关系; Hsu<sup>[4]</sup> 等人(1998) 对于直角交汇河道中交汇区上下游的水深比、流动分离区以及分离区最大可能收缩系数作了研究; Hsu<sup>[5]</sup> (1998) 在原来研究的基础上对于交汇角为 30°、45° 和 60° 的 3 种情况进行了探讨, 得出了交汇区上下游的水深比值随着交汇角、侧向入流与总流流量比值以及主流下游流动 Froude 数增加的结论。由于交汇河道中相关参数较多, 因此, 针对交汇河段水流相互顶托作用的研究往往局限于一些特定的简化条件, 例: 河道零坡度、忽略摩擦阻力、干支流河道等宽以及干支流交汇区上游水深相等。分流河道的一维水流现象(流量分配问题) 看似简单却尚未得到很好解决, 特别是流量分配随河道参数变化的规律还未得到深入的探讨。除 Taylor<sup>[1]</sup> 的研究外, 较有代表性针对分流河道流量分配问题的研究有: Lakshmana<sup>[6]</sup> (1966) 研究了分流比与河道下游 Froude 数以及河长与河宽比之间的关系; Ramanurthy<sup>[7, 8]</sup> (1988, 1990) 研究了短河道的直角分流系统中的水流问题, 得到了分流区流量分配比值与水深比值及水流 Froude 数之间的关系; 陈立<sup>[9]</sup> (2001) 提出了一个简

\* 收稿日期: 2003\_05\_16; 修订日期: 2004\_06\_22

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(10332050); 国家自然科学基金资助项目(10002023)

作者简介: 范平(1976—), 男, 湖南人, 博士(联系人, Tel: + 86\_10\_62545533\_2110; Fax: + 86\_10\_62561284; E\_mail: fanping@imech.ac.cn)。

单计算分流河道分流比的近似公式,但对于公式中各种参数对流量分配的影响却没有进行深究。

由长江洪灾的实情可知,交汇河道洪水问题中最为严重的是洪峰遭遇现象。无论1998年洪水,还是历史上的数次大洪水,大量事实都反映了长江洪灾的一个显著特点是干、支流洪水遭遇情况恶劣(季学武1999<sup>[10]</sup>,黎安田1999<sup>[11]</sup>)。分流河道的流量分配问题是许多有争议的水力学现象的焦点。季学武(1999)<sup>[10]</sup>指出荆江裁弯减少了三口分流,增加了干流流量,抬高了干流水位,是长江洪灾的一个原因。而段文忠(2001)<sup>[12]</sup>却认为荆江裁弯降低了干流水位。可见荆江裁弯对长江干流的防洪利弊仍存在争论。问题的本质就是下荆江与其分流河道所组成的分流河道系统中,流量分配与水位改变之间的内在联系。

本文研究了非恒定水流、考虑摩擦阻力及河道坡度的交汇河道中的顶托作用,然后应用于长江实际情况,研究了长江干、支流的洪峰遭遇现象,指出洪峰遭遇是长江1998大洪水干流高水位的一个重要原因。通过引入一个水深连接方程,分析了分流河道流量分配的变化规律,并应用于实际荆江地区,定性说明了单纯的荆江裁弯将降低其水位,是一项有利于长江防洪的举措。

## 1 模型及验证

### 1.1 交汇河道模型

图1为一干、支流交汇河道模型。图中ABCD是交汇单元。Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub>分别是干、支流上游来流流量, Q<sub>3</sub>是交汇后干流下游流量。θ是交汇角。干、支流河宽分别为B<sub>1</sub>和B<sub>2</sub>。入汇长度为Δl = B<sub>2</sub>/(sinθ)。河道断面均假设为矩形。AB断面靠近干流上游的水深为h<sub>1</sub>, BC断面靠近支流上游的水深为h<sub>2</sub>, CD断面靠近干流下游的水深为h<sub>3</sub>。带源项的一维圣维南方程如下:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) = -gA \left[ \frac{\partial y}{\partial x} + S_f \right] + q_1 u_q, \quad (2)$$

式中Q为断面平均流量(m<sup>3</sup>/s), y代表水位(m), A是断面过水面积(m<sup>2</sup>), B为河道宽度(m), x为沿河道流向的坐标, q<sub>1</sub>为支流入汇的单宽流量(m<sup>2</sup>/s), u<sub>q</sub>为支流入汇在主流方向上的流速分量(m/s), g为重力加速度。除入汇段外的其它河段,方程(2)中入汇单宽流量q<sub>1</sub>和入汇流速u<sub>q</sub>值为0。

干、支流河道按一维均匀地划分网格,单元网格长度为1 km。入汇河段为一个网格单元。对于上述方程的求解,采用常用的四点偏心隐式差分格式。差分离散后所得的规则五对角矩阵采用追赶法进行数值求解。计算时间步长为600 s。

### 1.2 边界条件与交汇连接条件

上游边界条件:干、支流上游均给定流量过程:  $Q = f(t)$ 。

下游边界条件:干流下游边界条件采用水位\_流量关系:  $Q = f(y)$ ,可由均匀流公式导出。应用曼宁公式以及下游边界处底坡和能坡相等的假设可得水位\_流量关系如下:

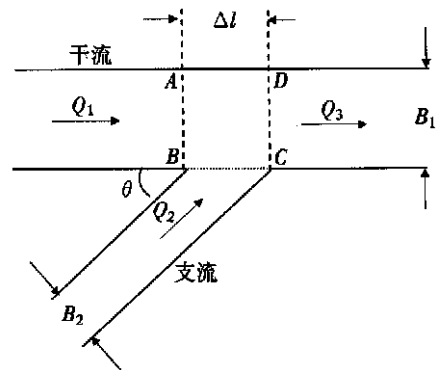


图1 交汇河道模型示意图

$$Q = \frac{\sqrt{S_0} (A/h)^{5/3}}{n (x/h)^{2/3}} (y - z), \tag{3}$$

其中  $x$  为湿周(m),  $x(y) = b + 2h$ ;  $b$  为河道断面底宽(m);  $h$  为水深(m),  $h(y) = y - z$ ;  $y$  是水位(m);  $z$  为河底高程(m),  $S_0$  为河道底坡,  $n$  为曼宁糙率系数。交汇单元  $BC$  边处的水位过程  $y_2$  定为支流下游边界条件, 其值为上一时间步交汇单元上下游端干流水位  $y_1$  和  $y_3$  的平均值。

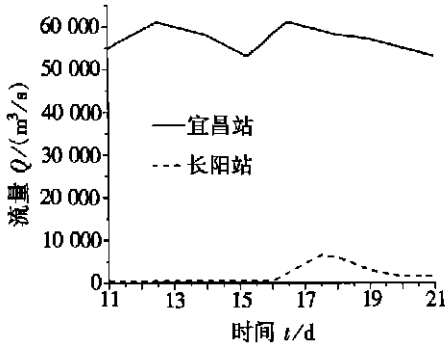


图2 长江宜昌站和清江长阳站流量过程

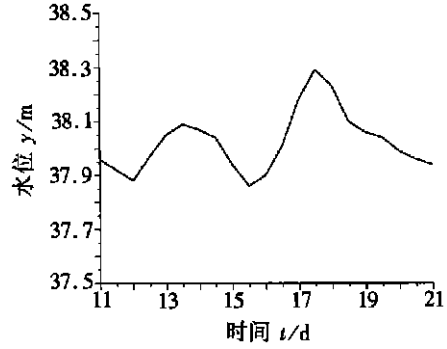


图3 长江监利站水位过程

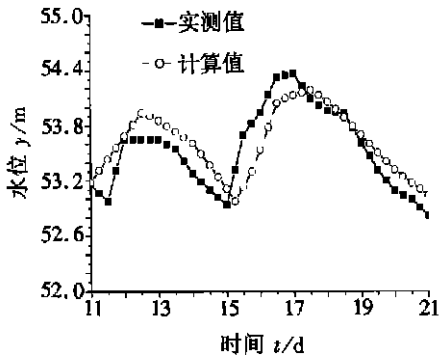


图4 宜昌站水位过程计算与实测值的比较

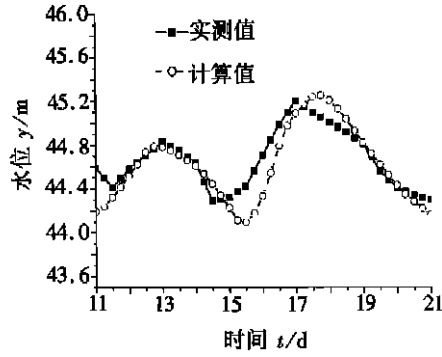


图5 沙市站水位过程计算与实测值比较

### 1.3 模型验证

计算边界条件如图2和图3所示, 分别为长江宜昌站和清江长阳站1998年8月11日到8月21日的流量过程, 以及长江监利站的水位过程。曼宁糙率值率定为0.015。图4所示为长江宜昌站的水位过程计算与实测值的比较。图5所示为长江沙市站的水位过程计算与实测值的比较。可以发现计算结果与实测水位过程基本符合。

### 1.4 分流河道模型

图6为一底高程不一致的分流河道示意图。图中  $AB$  为主流河道,  $BC$  和  $BD$  为分支河道,  $B$  为分汉点,  $C$ 、 $D$  分别为分支河道下游端点。河道  $BC$  和  $BD$  在分流点  $B$  处高程差  $\Delta z$ , 河道  $BC$  的底高程与主流河道连续,  $ab$ 、 $bc$  和  $bd$  分别为河道  $AB$ 、 $BC$  和  $BD$  的恒定水面线。

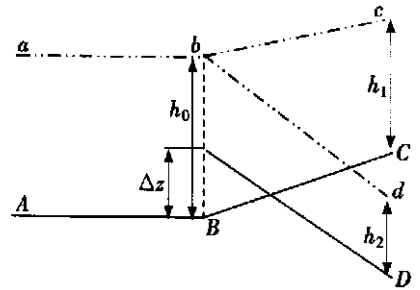


图6 底高程不一致的分流河道示意图

首先可以列出几个水力学中常用的公式, 恒定情况下水流连续方程为:

$$Q_1 + Q_2 = Q_0, \quad (4)$$

其中  $Q_0$  是主流河道断面的恒定流量值,  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别是分支河道  $BC$  和  $BD$  的断面恒定流量值。

当系统处于恒定状态时, 分支河道末端  $C$  和  $D$  处的流动可视作恒定均匀的。根据曼宁公式及明槽定常渐变流(余常昭<sup>[13]</sup> 1999) 理论在  $C$  和  $D$  处满足:

$$Q_1 = \frac{B_1}{n_1} \sqrt{i_1 - (1 - Fr_1^2) h_{1s_1}} h_1^{5/3}, \quad Q_2 = \frac{B_2}{n_2} \sqrt{i_2 - (1 - Fr_2^2) h_{2s_2}} h_2^{5/3}, \quad (5a, b)$$

其中  $n_1$ 、 $B_1$ 、 $i_1$ 、 $h_1$ 、 $J_{f1}$ 、 $h_{1s_1}$  和  $Fr_1$  分别是河道  $BC$  的糙率、河宽、底坡以及下边界  $C$  处的水深、水流能坡、水深比降和水流 Froude 数;  $n_2$ 、 $B_2$ 、 $i_2$ 、 $h_2$ 、 $J_{f2}$ 、 $h_{2s_2}$  和  $Fr_2$  分别是河道  $BD$  的糙率、河宽、底坡以及下边界  $D$  处的水深、水流能坡、水深比降和水流 Froude 数;  $s_1$  和  $s_2$  是流向方向;  $Fr^2 = Q^2 / (B^2 g h^3)$ ,  $g$  是重力加速度。

以上是水力学中常用的公式。可见在分流河道系统  $ABCD$  中, 水流方程有 3 个((4) 和 (5a, b)), 而存在 4 个水力参数:  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $h_{1s_1}$  和  $h_{2s_2}$ 。因此由上述公式组成的方程组是不适定的。为了能够得到流量分配解, 本文根据分流河道自身的几何特点, 增加一个水深连接方程, 使得方程与未知数个数相等, 从而水流方程组解耦。从图 6 中可以发现存在如下几何关系:

$$h_0 = h_1 - \alpha_1 L_1 h_{1s_1} = h_2 - \alpha_2 L_2 h_{2s_2} + \Delta z, \quad (6)$$

其中  $h_0$  是主流河道在分流点  $B$  处的水深;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为河道  $BC$  和  $BD$  的河长;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为修正因子, 定义为  $\alpha_1 = h_{s_1} / h_{1s_1}$ ,  $\alpha_2 = h_{s_2} / h_{2s_2}$ ,  $h_{s_1}$  和  $h_{s_2}$  分别为河道  $BC$  和  $BD$  的平均沿程水深比降值, 定义为  $h_{s_1} = (h_1 - h_0) / L_1$ ,  $h_{s_2} = [h_2 - (h_0 - \Delta z)] / L_2$ 。

若视  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为已知参数, 则式(4)、(5)、(6) 中未知量数目与方程数相等, 从而可以联立求解, 得到关于  $Q_1$  或  $Q_2$  的四次方程:

$$f(Q_2) = C_4 Q_2^4 + C_3 Q_2^3 + C_2 Q_2^2 + C_1 Q_2 + C_0, \quad (7)$$

其中系数分别为:

$$\begin{aligned} C_4 &= \alpha_2 L_2 n_2^2 g h_2^{-1/3} - \alpha_1 L_1 n_1^2 g h_1^{-1/3} - h_2 + h_1 - \Delta z, \quad C_3 = -2Q_0 C_4, \\ C_2 &= Q_0^2 (\alpha_2 L_2 n_2^2 g h_2^{-1/3} - \alpha_1 L_1 n_1^2 g h_1^{-1/3} - h_2 + h_1 - \Delta z) + \\ &\quad (\alpha_1 L_1 n_1^2 g h_1^{-1/3} - \alpha_2 L_2 i_2 - h_2 + h_1 - \Delta z) B_2^2 g h_2^3 + \\ &\quad (\alpha_1 L_1 i_1 - \alpha_2 L_2 n_2^2 g h_2^{-1/3} + h_2 - h_1 + \Delta z) B_1^2 g h_1^3, \\ C_1 &= 2Q_0 B_2^2 g h_2^3 (\alpha_2 L_2 i_2 - \alpha_1 L_1 n_1^2 g h_1^{-1/3} - h_2 + h_1 - \Delta z), \\ C_0 &= B_1^2 B_2^2 g^2 h_1^3 h_2^3 (\alpha_2 L_2 i_2 - \alpha_1 L_1 i_1 - h_2 + h_1 - \Delta z) + \\ &\quad Q_0^2 B_2^2 g h_2^3 (\alpha_1 L_1 n_1^2 g h_1^{-1/3} - \alpha_2 L_2 i_2 - h_2 + h_1 - \Delta z). \end{aligned}$$

考虑到一般大型河道的流动都是缓流, 即  $Fr^2 \ll 1$ , 同时假设两条分支河道下游边界条件为自由的, 即水流能坡与河道底坡相等  $J_f = i$ , 此时水深为正常水深, 水面比降的修正因子  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ 。由此可以得到具有对称形式的解:

$$Q_1 = \frac{\frac{B_1}{n_1} \sqrt{i_1}}{\frac{B_1}{n_1} \sqrt{i_1} + \frac{B_2}{n_2} \sqrt{i_2}} Q_0, \quad Q_2 = \frac{\frac{B_2}{n_2} \sqrt{i_2}}{\frac{B_1}{n_1} \sqrt{i_1} + \frac{B_2}{n_2} \sqrt{i_2}} Q_0, \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\frac{B_1}{n_1} \sqrt{i_1}}{\frac{B_2}{n_2} \sqrt{i_2}}. \quad (8)$$

从上述 3 式可以看出, 当下游边界条件是自由边界条件时, 分流系统的流量分配完全取决于分支河道的几何因子(河宽、糙率和底坡), 与河长无关。

## 2 交汇河道模型在干支流洪水遭遇中的应用

### 2.1 顶托作用分析

依照 Taylor 等人的定义, 选取交汇区干流上、下游水深比值  $R_h = h_1/h_3$  和流量比值  $R_q = Q_1/Q_3$  作为衡量顶托作用和汇流比的指标。下面讨论  $R_h$  与参数  $R_q$ 、 $\theta$  以及  $B_1/B_2$  的关系。全面研究  $R_h$  与这些参数的关系非常复杂, 为了讨论方便, 固定干流下游水流 Froude 数  $Fr_3$  不变, 研究  $R_h$  与参数  $R_q$ 、 $\theta$  和  $B_1/B_2$  之间的联系。

参数选择如下: 交汇角  $\theta$  变化范围为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  到  $150^\circ$ 。汇流比  $R_q$  变化范围为 0.1、0.3、0.5、0.7 到 0.9。为保证  $Fr_3$  不变, 干流下游流量  $Q_3$  固定为  $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。支流河宽  $B_2$  的变化范围为 500、750、1 000、1 250 到 1 500 m。干流河宽  $B_1$  的值固定为 1 000 m。支流和干流的糙率  $n_1$  和  $n_2$  为 0.02, 坡度均为  $6\text{E}-5$ 。

### 2.2 水深比随交汇角的变化规律

$R_h$  与  $\theta$  的关系与  $R_q$  以及  $B_2$  的大小有关。因此研究  $R_h$  与  $\theta$  之间的关系时, 需要固定  $R_q$  或  $B_2$  不变, 讨论另一个对  $R_h$  与  $\theta$  关系的影响。

图 7 选取了汇流比  $R_q$  分别为 0.1 和 0.7 时, 水深比  $R_h$  随交汇角  $\theta$  的变化情况。(a) 图中汇流比为 0.1, 随着交汇角增加, 水深比  $R_h$  显著增加, 反映了顶托作用随交汇角增加; (b) 图中水深比  $R_h$  随交汇角变化很小, 说明支流流量小, 顶托作用微弱。

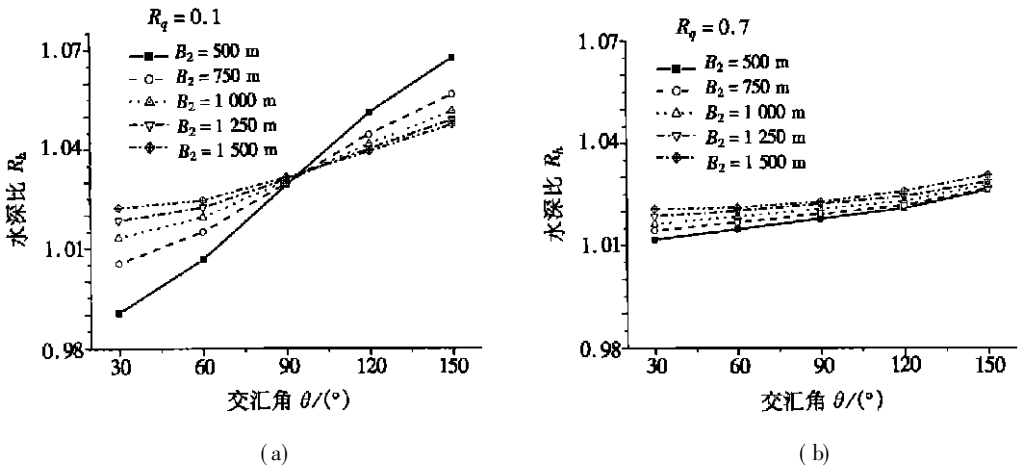


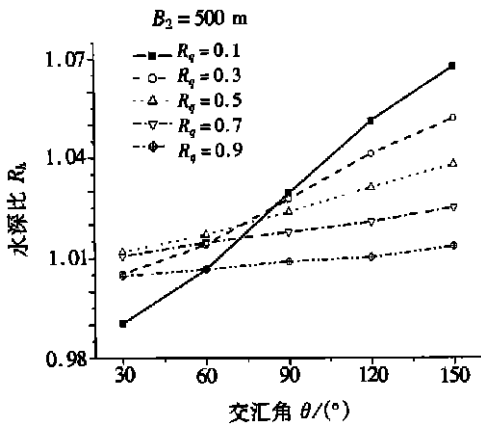
图 7 汇流比一定的条件下水深比值与交汇角的关系

图 8 给出了支流河宽分别为 500 m 和 1 000 m 时, 水深比  $R_h$  与交汇角  $\theta$  的变化情况。(a) 图中支流河宽  $B_2$  为 500 m, 水深比  $R_h$  随交汇角  $\theta$  显著增加, 说明此时顶托作用强烈; (b) 图中支流河宽  $B_2$  为 1 000 m, 水深比  $R_h$  随交汇角  $\theta$  变化微弱, 说明入汇水流流速小, 顶托作用较弱。

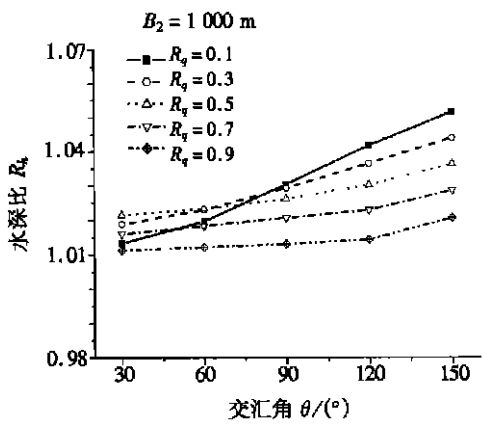
可见, 交汇角  $\theta$  从顺向转为逆向过程中, 支流输入的动量增加, 从而顶托作用增加。支流流量越大则动量越大, 支流河宽越小则支流流速越大, 顶托作用增加越明显。

### 2.3 水深比 $R_h$ 随汇流比 $R_q$ 的变化规律

图 9 给出了支流河宽  $B_2$  分别为 500 m 和 1 000 m 时, 水深比  $R_h$  随汇流比  $R_q$  的变化情况。(a) 图中支流河宽为 500 m, (b) 图中支流河宽为 1 000 m。交汇角  $\theta$  大于  $90^\circ$  (逆向) 时, 随着汇流比  $R_q$  增加, 水深比  $R_h$  单调减小。说明支流流量减小, 产生的顶托作用减小。支流河宽  $B_2$  增加, 曲线斜率减小, 意味着支流河宽增加造成水流流速减小, 对顶托作用的影响也随着减小。交



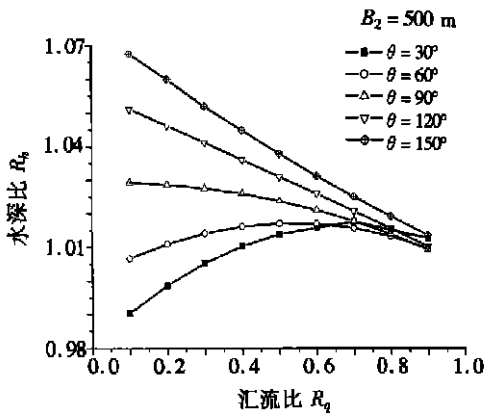
(a)



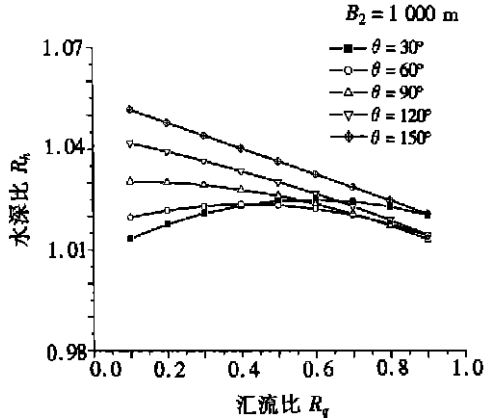
(b)

图 8 支流河宽一定的情况下水深比与交汇角的关系

汇角  $\theta$  小于  $90^\circ$  (顺向) 时, 随着汇流比  $R_q$  增加, 水深比  $R_h$  先增加后减少。这是由于支流流量增加的同时, 干流上游流量将减少, 造成水深比减小。

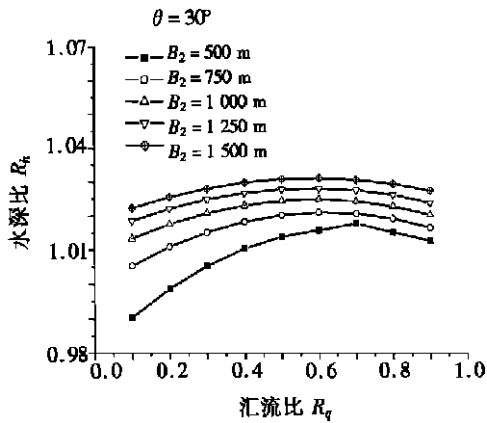


(a)

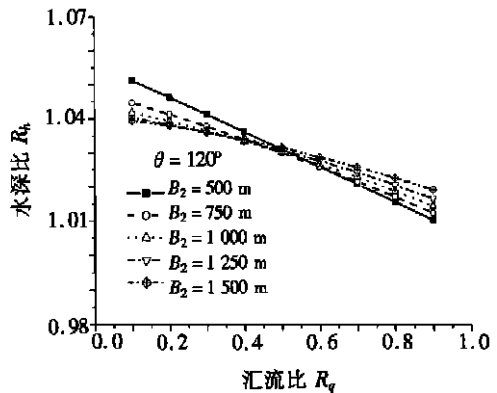


(b)

图 9 河宽比一定的条件下水深比与汇流比的关系



(a)



(b)

图 10 交汇角一定的条件下水深比与汇流比的关系

图 10 给出了交汇角  $\theta$  分别为  $30^\circ$  和  $120^\circ$  时, 水深比  $R_h$  随汇流比  $R_q$  的变化情况。 (b) 图中交汇角  $\theta$  大于  $90^\circ$  (逆向), 水深比  $R_h$  随汇流比  $R_q$  单调减小。说明逆向入汇时, 顶托作用随支流流量增加而加强。 (a) 图中交汇角  $\theta$  小于  $90^\circ$  (顺向), 随着汇流比  $R_q$  增加, 水深比  $R_h$  先增加后减少。原因和前面一样, 也是由于支流流量增加的同时, 干流上游流量将减少, 造成水深比  $R_h$  减小。

可见, 支流如果逆向入汇干流, 将产生很强的顶托作用, 顶托作用随支流流量增加而加强。支流河宽增加造成支流流速减小, 将减弱顶托作用。

## 2.4 干、支流洪峰遭遇分析

交汇河道中最为严重的洪水问题是洪峰遭遇。可以发现 1998 年 8 月 17 日前后长江干流洪水与清江洪水遭遇, 这一天长江上荆江全线超高水位。长江宜昌站和清江长阳站来流情况如图 2 所示。考虑 6 种情况: 长阳洪峰相对于实际情况提前 4、3、2、1 天以及滞后 1、2 天。将 6 种情况与实际的干流洪水过程比较, 观察干流洪峰水位的变化情况。图 11 是 6 种情况与实际沙市水位过程的比较。case4 中长阳站洪峰 8 月 16 日发生, 与干流宜昌站同日洪峰完全遭遇, 此时干流水位最高; case1 中, 长阳站洪峰 8 月 13 日发生, 与干流宜昌同日洪峰完全遭遇, 产生另一超高水位。可见支流洪峰与干流任一洪峰遭遇都将产生高水位。1998 年实际情况是支流洪峰与干流第二个洪峰遭遇, 因此可以说, 1998 年 8 月 17 日长江干流全线超高水位是由清江洪水与干流洪水遭遇造成的。

比较各种遭遇情况下沙市最高水位, 可以发现可能发生的最高洪峰水位 (45.36 m) 与最低值 (44.91 m) 之间差值达 45 cm。实际沙市最高水位 (45.25 m) 与最低可能水位 (44.91 m) 之间差值为 34 cm。可见如果能够人为改变干流和支流洪峰的遭遇情况, 则可大大降低干流洪峰水位值。黄思平<sup>[14]</sup>指出隔河岩水库 8 月 16 日动用 2.9 亿  $m^3$  的库容, 削峰 4 200  $m^3/s$ , 降低沙市水位 0.15 m。本文计算所得实际沙市水位与可能最高水位差值为 0.11 m, 与之较接近。

总之, 若清江隔河岩水库库容更大, 其削峰和错峰能力则会更强, 1998 年沙市最高水位是可以降低 0.34 m 的。从而通过本文的研究得出这样一个结论: 在易发生洪峰遭遇的交汇河道上, 要尽可能的扩大水库防洪标准, 发挥水库削峰、错峰功能, 避免洪峰遭遇。

## 3 分流河道模型在荆江地区洪灾分析中的应用

一般来说河道下游边界条件不会是简单的自由边界条件, 因此水深比降的修正因子  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  通常难以确定, 从而流量分配通过上述方法仍旧难以得出。虽然如此, 仍可根据前面的基本公式导出一些派生关系式, 来分析河道几何因子对流量分配的影响, 从而得出流量分配随河道几何参数的变化规律。对基本方程 (4)、(5)、(6) 式进行微分运算可得如下派生方程 (假设  $Fr^2 \ll 1$ ):

$$dQ_1 = -dQ_2, \quad (9)$$

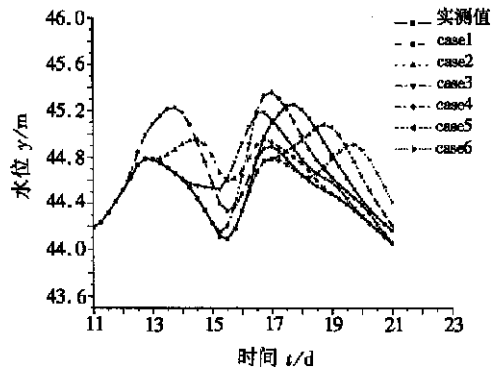


图 11 不同清江来流条件沙市水位过程比较

$$\frac{dQ_1}{Q_1} = \frac{dB_1}{B_1} - \frac{dn_1}{n_1} + \frac{1}{2} \frac{d(i_1 - h_{1s_1})}{i_1 - h_{1s_1}} + \frac{5}{3} \frac{dh_1}{h_1}, \quad (10)$$

$$\frac{dQ_2}{Q_2} = \frac{dB_2}{B_2} - \frac{dn_2}{n_2} + \frac{1}{2} \frac{d(i_2 - h_{2s_2})}{i_2 - h_{2s_2}} + \frac{5}{3} \frac{dh_2}{h_2}, \quad (11)$$

$$dh_1 - \alpha_1 L_1 dh_{1s_1} - \alpha_1 h_{1s_1} dL_1 = dh_2 - \alpha_2 L_2 dh_{2s_2} - \alpha_2 h_{2s_2} dL_2 + d\Delta z. \quad (12)$$

在某些假设前提条件下, 可以得出水流因子 ( $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $h_{1s_1}$ 、 $h_{2s_2}$  和  $h_0$ ) 随着河道几何因子 ( $B_1$ 、 $n_1$ 、 $i_1$ 、 $L_1$ 、 $B_2$ 、 $n_2$ 、 $i_2$ 、 $L_2$ ) 的变化规律:

由于水流能坡可表达为:

$$J_f = i - (1 - Fr^2) \frac{dh}{ds}, \quad (13)$$

对缓坡型河道,  $Fr^2 \ll 1$ , 因此可以忽略. 又由曼宁公式可知, 水流能坡  $J_f$  是大于 0 的, 从而

$$i - \frac{dh}{ds} > 0 \quad (14)$$

### 3.1 河长的影响

实际情况中, 河长改变对河道水流产生影响最典型的例子就是河道裁弯取直. 河道裁弯取直实际就是保持河道两端的底高程不变, 通过河长的变化来改变河道坡度. 以河道  $BC$  为例, 假设仅河道  $BC$  的河长发生变化, 同时河道两端的高程不变, 应满足:

$$di_1 = -\frac{i_1}{L_1} dL_1, \quad dn_1 = dn_2 = dB_1 = dB_2 = dh_1 = dh_2 = di_2 = d\Delta z = 0, \quad (15)$$

于是式(12)化为:

$$-\alpha_1 L_1 dh_{1s_1} + \alpha_1 L_1 \frac{h_{1s_1}}{i_1} di_1 = -\alpha_2 L_2 dh_{2s_2}. \quad (16)$$

联立(9)、(10)、(11)、(16)式可得:

$$\frac{dh_{1s_1}}{di_1} = \left[ 1 + \frac{\alpha_1 L_1 Q_2}{\alpha_2 L_2 Q_1} \frac{i_1 - h_{1s_1}}{i_2 - h_{2s_2}} \frac{h_{1s_1}}{i_1} \right] \left[ 1 + \frac{\alpha_1 L_1 Q_2}{\alpha_2 L_2 Q_1} \frac{i_1 - h_{1s_1}}{i_2 - h_{2s_2}} \right]^{-1}, \quad (17)$$

$$\frac{dh_0}{di_1} = \alpha_1 L_1 \left[ \frac{h_{1s_1}}{i_1} - 1 \right] \left[ 1 + \frac{\alpha_1 L_1 Q_2}{\alpha_2 L_2 Q_1} \frac{i_1 - h_{1s_1}}{i_2 - h_{2s_2}} \right]^{-1}, \quad (18)$$

$$\frac{dQ_1}{di_1} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\alpha_2 L_2} \frac{Q_2}{i_2 - h_{2s_2}} \frac{dh_0}{di_1}. \quad (19)$$

再根据判别式(14)有:

$$\frac{dh_{1s_1}}{di_1} > 0, \quad \frac{dh_0}{di_1} < 0, \quad \frac{dQ_1}{di_1} > 0. \quad (20)$$

可见, 河道  $BC$  裁弯取直造成其坡度增加, 主流水深减少, 河道  $BC$  的流量增加.

### 3.2 分流河道河宽的影响

若仅河道  $BC$  的河宽改变, 则有:

$$dh_1 = dh_2 = dn_1 = dn_2 = di_1 = di_2 = dB_2 = d\Delta z = 0, \quad dB_1 \neq 0. \quad (21)$$

重复前面的求解步骤可得:

$$\frac{dh_{1s_1}}{dB_1} > 0, \quad \frac{dh_0}{dB_1} < 0, \quad \frac{dQ_1}{dB_1} > 0. \quad (22)$$

可见, 随着河道  $BC$  的河宽增加, 主流河道的水深降低, 河道  $BC$  的流量增加.



### 3.3 分流河道相对高程改变的影响

若仅分流河道相对高程变化,则有:

$$dh_1 = dh_2 = dn_1 = dn_2 = di_1 = di_2 = dB_1 = dB_2 = 0, d\Delta z \neq 0 \quad (23)$$

重复前面的求解步骤可得:

$$\frac{dh_{1s}}{d\Delta z} < 0, \frac{dh_0}{d\Delta z} > 0, \frac{dQ_1}{d\Delta z} < 0 \quad (24)$$

可见,当河道  $BD$  的底高程相对河道  $BC$  的底高程抬高时,将使得主流河道水深增加,河道  $BC$  的流量增加,河道  $BD$  的流量相应减少。

### 3.4 在荆江地区洪灾分析中的应用

上述结论有助于定性分析长江荆江地区多年来干流及其分支河道的历史演变对干流防洪态势的影响:

1) 荆江分流河道由于泥沙淤积不断萎缩,使得其河道高程抬高,过水断面缩小。由以上分析中 3.2 和 3.3 两节内容可知,这种演变将造成长江干流流量增加,水位抬高,从而加重长江干流的洪水危害。同时可知扩大长江分流河道的分洪能力是减轻长江洪水灾害的有效途径之一。

2) 下荆江自然和人工裁弯取直,使其坡降增加。由以上分析的 3.1 节内容可知,这种变化将造成下荆江流量增加,水位降低,显然这有利于干流防洪。

## 4 结 论

1) 在干流下游水流 Froude 数  $Fr_3$  不变条件下,得到了顶托作用随河道参数变化的规律。同时得出干、支流洪峰遭遇是 1998 年长江大洪水高洪水位的一个重要原因。这说明了在易发生洪水遭遇的交汇河段,修建具有高防洪标准的水库,充分利用水库的削峰和错峰能力是现阶段避免洪水成灾的一个经济、有效的措施。

2) 得到了分流河道流量分配及主流水深随河道参数的变化规律。即:任意一条分支河道裁弯取直、河宽增加和高程降低都将降低主流河道的水深,同时增加这条分支河道的分流流量。荆江分流河道由于泥沙淤积不断萎缩,使得其河道高程抬高,过水断面缩小。这种演变将造成长江干流流量增加,水位抬高,加重干流洪水危害。下荆江自然和人工裁弯取直,使其坡降增加。这种变化将造成下荆江流量增加,水位降低,有利于干流防洪。

### [参 考 文 献]

- [1] Taylor E H. Flow characteristics at rectangular open channel junctions[J]. Trans ASCE, 1944, 109: 893—912.
- [2] Ramamurthy A S, Carballada L B, Tran D M. Combining open channel flow at right angled junctions [J]. J Hydraulic Engineering, 1988, 114(12): 1449—1460.
- [3] 倪晋仁,王光谦,张国生. 交汇河段水力计算探讨[J]. 水利学报, 1992, 7(7): 51—56.
- [4] Hsu C C, Wu F S, Lee W J. Flow at 90° equal width open channel junction[J]. J Hydraulic Engineering, 1998, 124(2): 186—191.
- [5] Hsu C C, Lee W J, Chang C H. Subcritical open channel junction flow[J]. J Hydraulic Engineering, 1998, 124(8): 847—855.
- [6] Lakshmana N S, Sridharan L. Discussion of dividing flow in an open channel[J]. J Hydraulic Division ASCE, 1966, 94(HY6): 237—239.

- [7] Ramamurthy A S, Satish M G. Division of flow in short open channel branches[J]. J Hydraulic Engineering, 1988, **114**(4): 428—438.
- [8] Ramamurthy A S. Dividing flow in open channels[J]. J Hydraulic Engineering, 1990, **116**(3): 449—455.
- [9] 陈立, 明宗富. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001, 106—107.
- [10] 季学武. 长江 1998 年洪水和水文科技进步[J]. 人民长江, 1999, **30**(2): 1—5.
- [11] 黎安田. 长江 1998 年洪水与防汛抗洪[J]. 人民长江, 1999, **30**(1): 1—7.
- [12] 段文忠, 郑亚慧. 长江城陵矶\_螺山河段水位抬高及原因分析[J]. 水利学报, 2001, **2**(2): 29—34.
- [13] 余常昭. 明槽急变流——理论和在水工中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999, 21—22.
- [14] 黄思平, 吴如发. 水库工程对 1998 年长江防洪作用分析[J]. 人民长江, 1999, **30**(2): 24—26.

## Flood Routing Models in Confluent and Dividing Channels

FAN Ping, LI Jia\_chun, LIU Qing\_quan

(DES, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, P. R. China)

**Abstract:** By introducing a water depth connecting formula, the hydraulic equations in the dividing channel system were coupled and the relation of discharge distribution between the branches of the dividing channels can be yielded. In this manner, a numerical model for the confluent channels was established to study the variation of backwater effects with the parameters in the channel junction. The meeting of flood peaks in the mainstream and tributary can be analyzed with this model. The flood peak meeting is found to be a major factor for the extremely high water level in the mainstream during the 1998 Yangtze River flood. Subsequently the variations of discharge distribution and water level with channel parameters between each branch in this system were studied as well. As a result, flood evolution caused by Jingjiang River shortcut and sediment deposition in the entrance of dividing channels of the Yangtze River may be qualitatively elucidated. It is suggested to be an effective measure for flood mitigation to enhance regulation capability of reservoirs available upstream of the tributaries and harness branch entrance channels.

**Key words:** confluent channels; dividing channels; backwater effect; flood peak meeting; the Yangtze River