

105-111

三峡工程对坝下长江流量影响研究

姜加虎 黄群

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

p 332.4

提要 根据长江水情的具体特点, 采用 Preismann 隐式格式, 建立了一个描述长江水情的水动力学数值模式, 以最佳拟合历史水文资料, 重演历史水文过程为原则, 率定数值模式中的各参数, 并运用率定后的模式, 进行三峡工程对坝下长江(枯水期和丰水期)若干断面处流量影响的模拟预测。

关键词 三峡工程, 长江, 流量, 数值模拟, 预测

水情

三峡工程对其下游生态环境的影响^[1,2], 首先是通过改变长江水情而起作用的, 因此, 正确评估三峡工程对坝下长江水情的影响, 具有十分重要的意义。传统的经验相关法, 由于其相关关系的单调性和稳定性往往难以满足^[3], 所以预测精度偏低。为分析三峡工程不同调度方案下的长江水文情势可能变化, 本文采用数值模拟方法, 定量研究三峡工程对坝下长江若干典型断面处流量的影响。

1 数值模拟方法简述

1.1 差分方程组建立

根据河流动力学 Saint Venant 方程组^[4]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial t} - \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{Q|Q|}{K^2} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, Z 为水位(m); B 为河宽(m); Q 为流量(m^3/s); x 为指向河口方向的横坐标(m); t 为时间(s); g 为重力加速度(m/s^2); A 为过水断面面积(m^2); K 为阻抗模数, $K = \frac{A}{n} R^{2/3}$ (n 为糙率, R 为水力半径)。

应用 Preismann 隐式差分格式对方程组(1)进行数值离散, 取 θ 为表示格式的参数, Δ 表示时间差分, 即 $\Delta Q = Q^{n+1} - Q^n$, $\Delta Z = Z^{n+1} - Z^n$, 得(1)式的差分方程组为:

$$\Delta Q_j \begin{pmatrix} A_{1j} \\ A_{2j} \end{pmatrix} + \Delta Z_j \begin{pmatrix} B_{1j} \\ B_{2j} \end{pmatrix} + \Delta Q_{j+1} \begin{pmatrix} C_{1j} \\ C_{2j} \end{pmatrix} + \Delta Z_{j+1} \begin{pmatrix} D_{1j} \\ D_{2j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{1j} \\ E_{2j} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中

$$A_{1j} = - \frac{4\theta\Delta t}{\Delta x(B_{j+1}^* + B_j^*)}$$

• 国家“八五”攻关项目(85-16-06-03)资助。

收稿日期: 1995-10-19, 收到修改稿日期: 1996-06-07。

作者简介: 姜加虎, 男, 1962年生, 副研究员。1991年于中国科学院南京地理与湖泊研究所获理学硕士学位。主要从事物理湖泊学和水文气象学方面的研究工作, 发表有关论文20余篇。

$$\begin{aligned}
B_{1j} &= 1 - \frac{4\theta\Delta t(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x(B_{j+1}^n + B_j^n)} \frac{dB_j^n}{dZ_j^n} \\
C_{1j} &= \frac{4\theta\Delta t}{\Delta x(B_{j+1}^n + B_j^n)} \\
D_{1j} &= 1 - \frac{4\theta\Delta t(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x(B_{j+1}^n + B_j^n)^2} \frac{dB_{j+1}^n}{dZ_{j+1}^n} \\
E_{1j} &= -\frac{4\Delta t(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x(B_{j+1}^n - B_j^n)} \\
A_{2j} &= 1 - \frac{4\theta\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{Q_j^n}{A_j^n} \right) + 2g\theta\Delta t \frac{A_j^n |Q_j^n|}{(K_j^n)^2} \\
B_{2j} &= \frac{\theta\Delta t}{\Delta x} \cdot \left[\frac{2(Q_j^n)^2 B_j^n}{(A_j^n)^2} - g(A_{j+1}^n + A_j^n) + g(Z_{j+1}^n - Z_j^n) B_j^n \right] \\
&\quad + g\theta\Delta t \frac{Q_j^n |Q_j^n|}{(K_j^n)^2} \cdot \left[B_j^n - \frac{2A_j^n}{K_j^n} \frac{dK_j^n}{dZ_j^n} \right] \\
C_{2j} &= 1 + \frac{4\theta\Delta t Q_{j+1}^n}{\Delta x A_{j+1}^n} + 2g\theta\Delta t \frac{A_{j+1}^n |Q_{j+1}^n|}{(K_{j+1}^n)^2} \\
D_{2j} &= \frac{\theta\Delta t}{\Delta x} \cdot \left[-\frac{2(Q_{j+1}^n)^2 B_{j+1}^n}{(A_{j+1}^n)^2} + g(A_{j+1}^n + A_j^n) + g(Z_{j+1}^n - Z_j^n) B_{j+1}^n \right] \\
&\quad + g\theta\Delta t \frac{Q_{j+1}^n |Q_{j+1}^n|}{(K_{j+1}^n)^2} \cdot \left[B_{j+1}^n - \frac{2A_{j+1}^n}{K_{j+1}^n} \frac{dK_{j+1}^n}{dZ_{j+1}^n} \right] \\
E_{2j} &= -\frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left[\frac{2(Q_{j+1}^n)^2}{A_{j+1}^n} - \frac{2(Q_j^n)^2}{A_j^n} + g(A_{j+1}^n + A_j^n) \cdot (Z_{j+1}^n - Z_j^n) \right] \\
&\quad - g\Delta t \cdot \left[\frac{A_{j+1}^n Q_{j+1}^n |Q_{j+1}^n|}{(K_{j+1}^n)^2} + \frac{Q_j^n |Q_j^n| A_j^n}{(K_j^n)^2} \right]
\end{aligned}$$

式中,上标 n 代表时间差分点,下标 j 代表空间差分点.

1.2 差分方程组求解

1.2.1 递推方程组的推求 假设 ΔQ 与 ΔZ 成立下列关系

$$\Delta Q_j = F_j \Delta Z_j - G_j, \quad \Delta Z_j = H_j \Delta Q_{j+1} + I_j \Delta Z_{j+1} + J_j \quad (3)$$

令 $\beta = A_{2j} F_j + B_{2j}$, 得差分方程组 (2) 的递推方程组为:

$$H_j = -\frac{C_{1j}}{A_{1j} F_j + B_{1j}}, \quad I_j = -\frac{D_{1j}}{A_{1j} F_j + B_{1j}}, \quad J_j = \frac{E_{1j} - A_{1j} G_j}{A_{1j} F_j + B_{1j}} \quad (4)$$

$$F_{j+1} = -\frac{\beta I_j + D_{2j}}{\beta H_j + C_{2j}}, \quad G_{j+1} = \frac{E_{2j} - \beta J_j - A_{2j} G_j}{\beta H_j + C_{2j}} \quad (5)$$

1.2.2 边界条件处理 Saint Venant 方程组的边界条件有 3 类,即:水位边界条件 $Z=Z(t)$; 流量边界条件 $Q=Q(t)$; 水位流量关系边界条件 $Q=Q(Z)$. 根据三峡工程不同调度方案对坝下长江水情的调蓄效果,模式的上游边界条件采用流量过程;而下游边界条件,在方程组求解过程中,其边界条件应是已知的,但三峡工程对坝下长江水位与流量的影响,在计算之前却是未知的. 因此,采用水位或流量过程作为下游边界条件,显然不合适. 根据濮培民等^[1]和尤联元等^[5]研究,三峡工程对坝下最大冲刷距离,坝高 150m 方案可能不超过城陵矶,而坝高 180m 方案估计可以到达城陵矶以下. 由于大通远离城陵矶,所以大通江段的冲淤变化受三峡工程的影

响估计较小,同时考虑到河道水位流量关系是某一河段水情特点固有性质的反映,因此,模式的下游边界条件采用水位流量关系。

(1) 上游边界条件处理:

$$F_1 = 0, \quad G_1 = \Delta Q_1 \quad (6)$$

(2) 下游边界条件处理:取 p 表示下游边界断面,则

$$\Delta Z_p = \frac{Q(Z_p^*) - G_p - Q_p^*}{F_p - \frac{dQ(Z_p^*)}{dZ_p}}, \quad \Delta Q_p = \frac{dQ(Z_p^*)}{dZ_p} \cdot \Delta Z_p + Q(Z_p^*) - Q_p^* \quad (7)$$

1.2.3 集中旁流处理 在长江宜昌至大通模拟预测范围内,有清江、松滋口、太平口、藕池口、洞庭湖口、汉江和鄱阳湖口七处较大的出或入江口,它们构成了数值模式的内部边界,在这些内部边界处, Saint Venant 方程组不再适用,必须根据其水力特性作特殊处理。图 1 为长江某支流与干流汇合示意图。图中所示,在差分方程组求解中,如果追的系数 $F_{j-1}, G_{j-1}, F_j, G_j$ 已算出,那么怎样继续求得 F_{j+1}, G_{j+1} 等等;同样也需算得系数 H_j, I_j, J_j , 以便在赶的过程中,从 $\Delta Z_{j+1}, \Delta Q_{j+1}$ 算出 $\Delta Z_j, \Delta Q_j$ 等等。根据内部边界的连续条件和能量守恒条件(忽略干支流交汇处的河槽调蓄),有

$$Q_{j+1}^{*+1} = Q_j^{*+1} + Q_b^{*+1}, \quad \Delta Z_{j+1} = \Delta Z_j \quad (8)$$

经简单推导可得:

(1) 追的系数 F 与 G 推求

$$F_{j+1} = F_j, \quad G_{j+1} = G_j - Q_{j+1}^* + Q_j^* + Q_b^{*+1} \quad (9)$$

(2) 赶的系数 H, I, J 的推求

$$H_j = 0, \quad I_j = 1, \quad J_j = 0 \quad (10)$$

1.2.4 差分方程组求解步骤

(1) 追赶系数的计算:由于在递推方程组(4)和(5)中, $A_{1j}, B_{1j}, C_{1j}, D_{1j}, E_{1j}, A_{2j}, B_{2j}, C_{2j}, D_{2j}, E_{2j}$ ($j=1, 2, \dots, p$) 为差分方程组(2)中 $\Delta Z_j, \Delta Q_j, \Delta Z_{j+1}, \Delta Q_{j+1}$ 未知变量之系数,显然 n 时刻它们为已知值,这样由上游边界条件,首先求得 F_1, G_1 , 利用循环计算式(5)则算得 F_2, G_2 ; 在递推过程中,若遇到内部边界,利用(9)、(10)两式直接计算追赶系数,如此循环,直到下游边界 $j=p$ 为止。

(2) $n+1$ 时刻水位流量的推求:在 F_j, G_j, H_j, I_j, J_j ($j=1, 2, \dots, p$) 求出的条件下,根据下游边界条件,则可算得下游边界水位和流量的增量 $\Delta Z_p, \Delta Q_p$ 。这样由关系式 $\Delta Z_j = H_j \Delta Q_{j+1} + I_j \Delta Z_{j+1} + J_j$ 求得 ΔZ_{j-1} , 再利用关系式 $\Delta Q_j = F_j \Delta Z_j + G_j$ 求得 ΔQ_{j-1} ; 如此循环递推,直到求出 ΔZ_1 和 ΔQ_1 为止,最后利用定义 $Q_j^{*+1} = \Delta Q_j + Q_j^*, Z_j^{*+1} = \Delta Z_j + Z_j^*$, 便得到 $n+1$ 时刻的水位

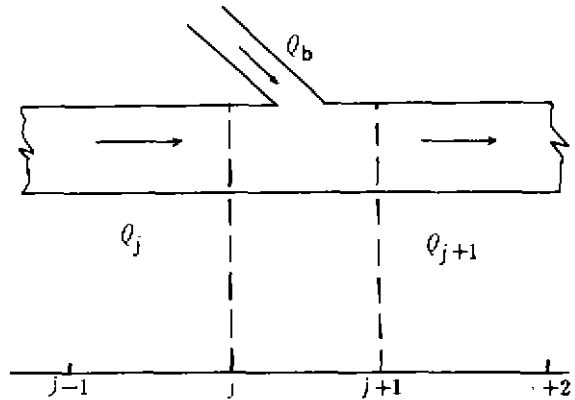


图 1 支流与长江汇合示意图

Fig. 1 Structural sketch of branch river with the Changjiang River

Z_i^{n+1} 和流量 Q_i^{n+1} .

2 参数率定与验证

2.1 长江河道分段与初始边界条件

考虑到模拟预测范围内长江水文测站的分布情况,即沿江共有 19 个水文测站(宜昌站、枝江站、马家店站、陈家湾站、沙市站、郝穴站、新厂站、石首站、调弦口站、监利站、螺山站、龙口

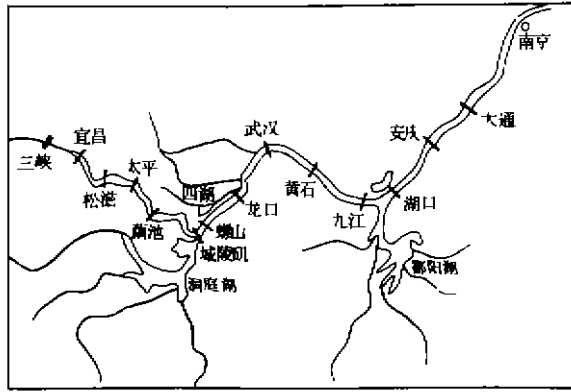


图 2 长江宜昌至大通江段部份
计算断面示意图

Fig. 2 Sketch map of partial calculation
sections from Yichang to Datong
in the Changjiang River

站、汉口站、黄石站、武穴站、九江站、彭泽站、安庆站和大通站)有水位资料,其中宜昌站、新厂站、监利站、螺山站、汉口站和大通站又有流量资料;同时兼顾到沿江较大出入江口清江、松滋口、太平口、藕池口、洞庭湖口、汉江和鄱阳湖口的沿程分布,并以长江计算断面分段的相对均匀性为原则,将宜昌至大通江段共分为 32 个断面(图 2). 计算时取 Preissmann 隐式差分格式的系数 $\theta=0.65$, 时间步长 $\Delta t=1h$. 上游边界条件取宜昌逐日平均流量,其计算时的逐时流量由线性内插求得;下游边界条件取大通站水位流量关系,以表格形式给出. 初始条件,对于有实测资料的断面以各水文测站的逐日平均水位和流量代入;对于无实测资料的断面,由线性内插给定. 最后,利用追赶法作 48 次追赶计算,并将计算结果

作为实际采用的初始条件,预测计算时的初始场给定亦作类似处理.

2.2 参数率定与验证

对于数值模拟而言,当其初始条件和边界条件给出,只需确定数 n 和 α ,便可进行水情计算. 但由于长江河道形态以及水情特征的复杂性和多变性^[3-5],对率定后的参数进行稳定性检验是十分必要的. 这一方面要验证所选用作为参数率定水文资料的代表性,另一方面要检查率定后的参数用作水情预报的可靠性. 考虑到三峡水库是年内调节水库的实际,进行参数率定与验证时,尽可能选用年代较近年份的水文资料. 采用 1982 年水文资料作为参数率定的依据,1983—1985 年水文资料作为验证的依据,并分成枯水期(1—4 月涨水情况)、丰水期(5—8 月汛期)、中水期(9—12 月退水情况)3 种情形,进行逐一率定与验证计算,其部分结果如图 3、4 所示.

参数率定结果表明,参数 n 随丰、中和枯水期的变化规律是,丰水期 n 值较小(0.026 0—0.026 5),枯水期 n 值较大(0.036 0—0.036 5),中水期 n 值介于上述两者之间(0.028 0—0.029 5). 从图中可见,无论是率定还是验证,计算过程与实测过程配合得均比较理想,说明模式设计合理,其计算结果可信.

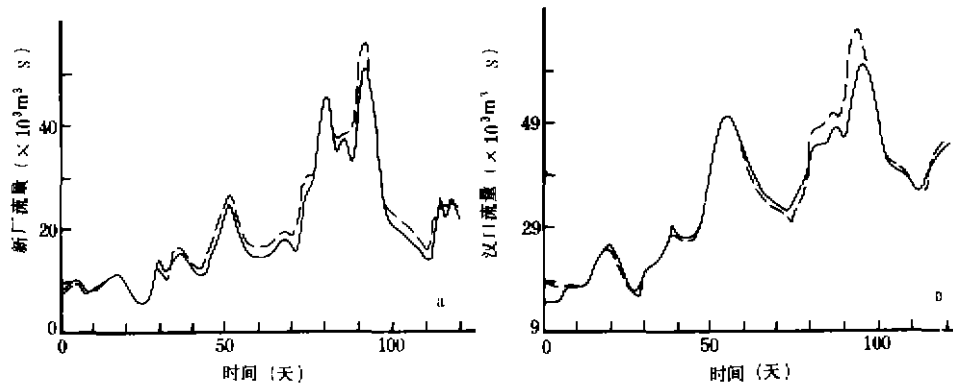


图3 模式新厂站(a)、汉口站(b)(1982年5—8月)流量率定结果(—实测流量,···计算流量)

Fig. 3 The rated results of the discharge (May—Aug.) at Xinchang St. (a), and Hankou St. (b)

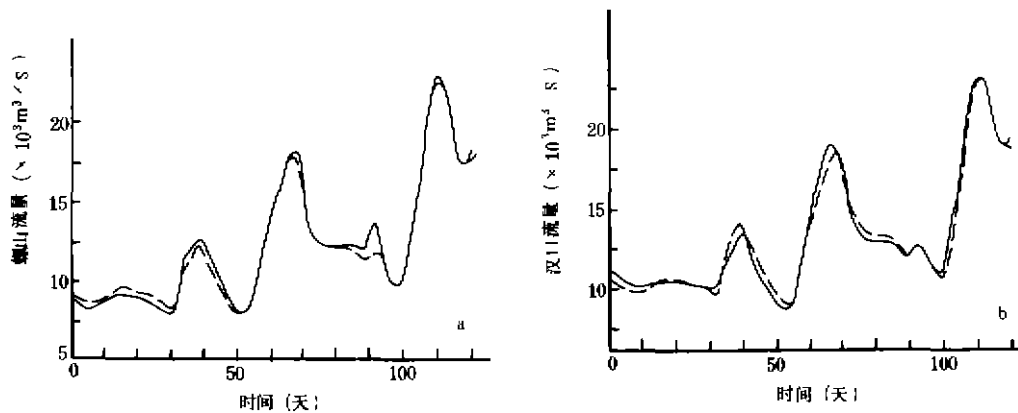


图4 模式螺山站(a)、汉口站(b)流量验证结果(—实测流量,···计算流量)

Fig. 4 The verified results of the discharge (Feb. to Apr.) at Luoshan St. (a) and Hankou St. (b)

3 三峡工程对坝下长江流量影响预测

为了使预测结果能够从平均的角度,且普遍地适用于未来的预报和对策研究,预测计算时,将长江底水(初始条件)的支、干流流量组合和干流水位值,分成两种情况,即将1982—1985年1—4月的逐日平均水位和流量取多年平均,作为枯水期的长江底水;5—8月的逐日平均水位和流量取多年平均,作为丰水期的长江底水。另外,由于中水期的参数介于丰水期和枯水期之间,且接近丰水期类型,故可参考丰水期预测结果,不另作专门预测计算。

由表1所示的预测结果表明:①三峡水库增泄或减泄某一流量的影响,随距宜昌距离的增加而相对减小,不难理解,这是受长江调蓄作用愈往下游愈强所致。②在三峡水库增减泄相同流量的情况下,枯水期其下游长江各断面处的流量变化量比丰水期的流量相

应变化量稍小.事实上,枯水期河床糙率大于丰期河床糙率,这样当上游丰、枯水期流量改变相同值时,对过水断面造成的滞水作用枯水期较丰水期强,从而枯水期流量的改变量小于丰水期.

表 1 三峡水库增、减泄流量对坝下长江流量影响的预测

单位: m^3/s

Tab. 1 Prediction of the impacts of the sluicing Three Gorges Dam on its downflow discharge

增、减泄 流量	3000		3500		4000		4500		5000		5500		6000	
	增	减	增	减	增	减	增	减	增	减	增	减	增	减
马家店	2922	2951	3427	3450	3934	3949	4440	4447	4946	4946	5446	5445	5947	5954
松滋口	2853	2905	3356	3406	3868	3901	4376	4399	4884	4897	5385	5396	5886	5896
太平口	2757	2839	3260	3335	3774	3833	4282	4330	4788	4829	5290	5326	5796	5819
藕池口	2330	2501	2806	2985	3302	3478	3800	3974	4286	4472	4786	4967	5289	5447
石首	2163	2416	2647	2897	3139	3388	3644	3883	4135	4380	4637	4873	5145	5348
监利	1839	2103	2326	2574	2805	3062	3304	3556	3795	4054	4286	4546	4792	5011
洞庭湖口	1541	1748	2024	2209	2499	2690	2991	3181	3482	3677	3967	4171	4466	4639
螺山	1395	1602	1874	2058	2351	2536	2841	3024	3332	3518	3816	4012	4314	4482
龙口	1234	1431	1700	1882	2175	2354	2660	2838	3150	3329	3635	3823	4129	4296
汉口	1005	1199	1425	1639	1877	2096	2343	2570	2824	3054	3309	3543	3796	4020
黄石	936	1160	1309	1591	1735	2039	2184	2504	2651	2982	3130	3466	3612	3945
武穴	919	1230	1222	1645	1589	2077	2001	2529	2442	2996	2903	3472	3376	3949
九江	928	1268	1211	1678	1560	2105	1960	2553	2392	3017	2847	3491	3315	3967
鄱阳湖口	928	1269	1211	1678	1560	2105	1960	2554	2392	3017	2846	3491	3315	3967
彭泽	937	1296	1208	1701	1545	2126	1937	2572	2363	3033	2813	3506	3279	3980
安庆	974	1397	1211	1789	1515	2205	1881	2643	2287	3098	2721	3565	3178	4036
大通	1005	1499	1220	1879	1501	2287	1846	2717	2232	3166	2651	3627	3100	4093

长江三峡水利枢纽是治理与开发长江的一项特大型工程,它具有多方面的效益.枯水期三峡水库增加下泄流量的调度运行,将明显增加其下游江段的流量,可使坝下沿江地区枯水期的农田灌溉等受益;丰水期作减泄流量的调度运行,无疑对缓解目前汛期沿江防洪的紧张状况极为有利.

4 体会

由于一个完整的系统往往十分复杂,其中包含了大量复杂的相互作用、相互制约因素^[2].然而,由于人们真正感兴趣的因素通常是有限的,所以选用一个比较适当的数值模拟方案对系统进行概括描述非常重要.数值模拟方案的选择,一般取决于所要研究的对象,一味追求高维和包罗万象的描述,企图获得更为精确的信息而人为复杂化,对于真正感兴趣因素的研究,并非具有更多的优越性.因此,对于数值模拟,必须针对所要描述对象的主要特性,作最简化概括处理,以能够反映主要研究对象的基本规律为原则,并将模拟结果与客观资料进行充分比较、验证,达到数值模拟结果信息的完整性和客观资料的离散性、但具有真实性特点的相互补充,才能获得更为满意和有价值的结果.本文从水情角度,研究了三峡工程对坝下长江流量的影响,由于计算时没有考虑三峡水库兴建后,引起坝下泥沙冲淤和河床演变,因此预测结果只代表三峡工程的建成初期情况,具有一定的适用范围,而有关问题待进一步研究.

致谢 张辉玉清绘了文中插图,特此致谢.

参 考 文 献

- 1 冯子道. 长江三峡工程的争鸣和论证. 湖泊科学, 1989, 1(1): 96-105
- 2 夏宜琮. 三峡工程的生态环境问题. 湖泊科学, 1993, 5(2): 181-191
- 3 濮培民等著. 三峡工程与长江中游湖泊洼地环境. 北京: 科学出版社, 1994
- 4 汪德懋著. 计算水力学理论与应用. 南京: 河海大学出版社, 1988
- 5 尤联元等. 三峡工程修建后下游河道变化预估. 见: 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组编 长江三峡工程对生态与环境的影响及其对策研究论文集. 北京: 科学出版社, 1987
- 6 梁瑞驹等. 太湖流域水文数学模型. 湖泊科学, 1993, 5(2): 99-107

THE IMPACTS OF THE THREE GORGES PROJECT ON ITS DOWNFLOW DISCHARGE OF THE CHANGJIANG RIVER

Jiang Jiahu Huang Qun

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

According to the regime of the Changjiang River, this paper sets up a numerical dynamics model of applying Preismann implicit difference method for difference treating of Saint Venant equations. Based on the best-imitating historical hydrologic data and recurring historical hydrologic process, each parameter in the differential equation is rated. The rated model is used to study the impacts of the Three Gorges Project on the discharge, in dry and rain seasons respectively, at certain stations along the Changjiang River. The results are as follows.

(1) The impacts of the increased/decreased sluicing discharge from the Three Gorges Dam will reduce relatively with the distance of calculating section from Yichang Station after the Three Gorges Project operated. The relative reducing rate is about 0.5 during rain season, and about 0.67 during dry season in Datong section of the river. The reason is that the distance of calculating section from Yichang to Datong is not only longer, but also wider, and the capacity of river regulating is greater.

(2) Because of greater roughness of the river basing during dry season (0.036 0-0.036 5) than that of rain season (0.026 0-0.026 5), the damping effect of the river section during dry season is stronger than that of rain season, and the the impacts of the Three Gorges Project on discharge along its downflow of the Changjiang River during dry season are greater than that of rain season. The rate of the impact value between rain season and dry season is 1.0--0.75, when the sluicing discharge from the Three Gorges Project increases/decreases relatively after the Three Gorges Project operated.

Key Words The Three Gorge Project, Changjiang River, discharge, numerical simulation, prediction