

文章编号: 1000-582X(2012)05-143-08

三峡水库澎溪河(小江)回水区一维水动力特征分析

李 哲, 郭劲松, 方 芳, 龙 曼, 刘智萍, 高 旭

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 利用 HEC-RAS 水动力模型, 对三峡水库运行初期(2007—2008 年)澎溪河流域回水区段的一维水动力特征进行了模拟研究。在其库湾、河汊、大面积淹没区或消落带等水域, 通过建立虚拟堤坝、划分成水体主要输送干道和储水区域的方式对河道进行概化; 经参数率定与模型验证, 确定糙率取值范围为 0.27~0.35, 所建立的模型具有较好的模拟精度。采用准非恒定流的方式对研究期间水动力过程进行模拟演算发现, 低水位状态下澎溪河回水区上游河段断面平均流速将超过 0.5 m/s, 接近天然河道; 而在高阳平湖处形成独立且相对封闭的大面积浅层淹没区; 高阳大桥以下河段随断面面积的加大而流速放缓; 高水位状态下, 不同河段间流速无显著差异, 深水河道型水库特征显著。研究期间, 建模区域总库容、水体滞留时间变化范围分别为 $8.26 \times 10^8 \sim 2.51 \times 10^8 \text{ m}^3$, 157.0~3.8 d。库容变化主要受河口水位的影响, 水体滞留时间则在径流和水位的双重影响下波动明显。研究期间, 17.8% 的水体滞留时间数据样本显示澎溪河回水区呈过流型水库特征, 主要集中于夏季汛期; 82.2% 的水体滞留时间数据样本显示其呈过渡型水库特征。

关键词: 三峡水库; 澎溪河回水区; HEC-RAS; 一维水动力模型; 水体滞留时间

中图分类号: TV131.4

文献标志码: A

1D hydrodynamic model on Pengxi (Xiaojiang) River Backwater Area in the Three Gorges Reservoir

LI Zhe, GUO Jin-song, FANG Fang, LONG Man, LIU Zhi-ping, GAO Xu

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: A 1D hydrodynamic model on Pengxi Backwater Area (PBA) in the Three Gorges Reservoir during its preliminary operation period (2007-2008) is set up based on HEC-RAS. In the large submerged area or water fluctuation zone, virtual levee is set up in the model between the conveyance channel and the storage area. The Manning's n in PBA is calibrated and selected in the range of 0.27 - 0.35. Calibrated model has good modeling results. Quasi-Steady simulation approach is applied to calculate 1D hydrodynamic condition in the PBA during the study period. Analysis on the hydrodynamic condition in the PBA show that in the low-water-level operation stage, average velocity of upper reach in PBA will exceed 0.5 m/s, which is close to natural river. The Gaoyang Lake is formed as a relative independent and semi-closure dam-lake in the middle reach of PBA. Due to the enlarged cross section, the velocity at downstream of PBA is significantly decreased. In the high-water-level operation stage, no remarkable difference of

收稿日期: 2011-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009155, 51179215); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2010BB0228, CSTC2012JJB20004)

作者简介: 李哲(1981-), 男, 重庆大学副教授, 博士, 主要研究领域为水库生态学, (E-mail) ZheLi81@sina.com.

velocity among cross sections in the PBA, indicating a significant hydrological characteristic of deep river-based reservoir. The variation of reservoir capacity and hydraulic retention time in the PBA is $8.26 \times 10^8 - 2.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $157.0 - 3.8 \text{ d}$ respectively. The variation of reservoir capacity in PBA is impacted by the water level fluctuation more significantly. The hydraulic retention time in the PBA is impacted by both and river discharge dually. Frequency analysis show that 17.8% of hydraulic retention time data in the PBA is showed to be overflow reservoir type and 82.2% of that data showed to be transition type.

Key words: Three Gorges Reservoir; Pengxi Backwater Area; HEC-RAS; 1D hydrodynamic model; hydraulic retention time

三峡水库成库后,水动力条件的改变被认为是诱发其支流回水区出现富营养化和发生水华的关键诱因^[1]。作为支持富营养化发生、发展的外部动力条件,水动力条件对关键生态要素时空分配及生态过程的影响至关重要^[2]。近年来,围绕三峡水库氮、磷积累、藻类生长及其群落结构特点和水华成因等进行了大量研究^[3-6],但关于三峡水库调度运行下支流回水区水动力特点的报道却并不多见^[7-9]。掌握三峡水库支流回水区水动力特点将进一步揭示水库蓄水带来的氮、磷汇积、藻类生长等富营养化现象提供更关键、丰富的宏观物理背景信息,具有重要的科学意义。

三峡水库蓄水后大量土地被淹,河道下垫面条件显著改变。伴随库湾、河汊的形成和水位壅升,天然河道的水流单向流动性发生明显变化,并受水库季节调蓄的影响,其流场特征变得复杂。常用的一维水动力模型在其概化、求解等方面受到上述水力条件的约束,其在建模中仍存在一些困难,适用性也受到影响^[10],但作为掌握河道宏观动力条件的关键工具,一维水动力模型在三峡库区仍具有其重要的实际价值^[7-9]。

HEC-RAS(Ver 4.0)是美国陆军工程兵水利工程中心于 2008 年 3 月更新发布的一维河流水力模型,主要用于对天然河道、河网系统进行一维恒定流、非恒定流、可动边界泥沙输移等河流动力过程的模拟,亦可完成一维温度场、浓度场的初步模拟演算^[10]。除常规的河道水力模拟与水工设计外^[11],近年来该模型的应用研究已发展到对河湖系统动力学、溃坝过程以及生态水力学研究等诸多方面^[12],大量研究案例表明 HEC-RAS 对水库、河湖系统等较复杂环境的水动力模拟是可行的^[13-16]。本研究拟引入 HEC-RAS 模型软件,在其基础上对三峡水库典型支流一维水动力特征进行模拟演算,结合 2007 年 1 月—2008 年 12 月三峡水库试验性蓄水阶段的水位、流量数据,分析水库调度过程典型支流回水区一维水动力特性的时空变化,以期更清晰地掌握水

库调度运行下三峡典型支流宏观水动力特征,为进一步阐释水体富营养化的生态过程提供重要的物理背景信息。

1 HEC-RAS 下澎溪河回水区一维水动力模型的实现

1.1 模型的物理边界

澎溪河(又名:小江)流域(图 1)是三峡库区中段、北岸流域面积最大的次级河流。三峡水库蓄水至 156 m 后,澎溪河回水区延伸至开县渠口镇境内。但考虑回水区末端受到 156~145 m 水位涨落的影响,选择 145 m 以下的永久回水区(澎溪河云阳段:养鹿—河口,见图 2)作为研究区域,以 1:2 000 176 m 水下地形图为基础,建立新华水文站(控制流域面积 4 536.0 km²)至澎溪河河口(控制流域面积 5 172.5 km²)的一维水动力模型。实际建模河段长为 43.25 km,河道深泓线平均坡降 0.97‰,建模区域内各控制断面基本信息见表 1,河道深泓线高程沿程变化见图 2。

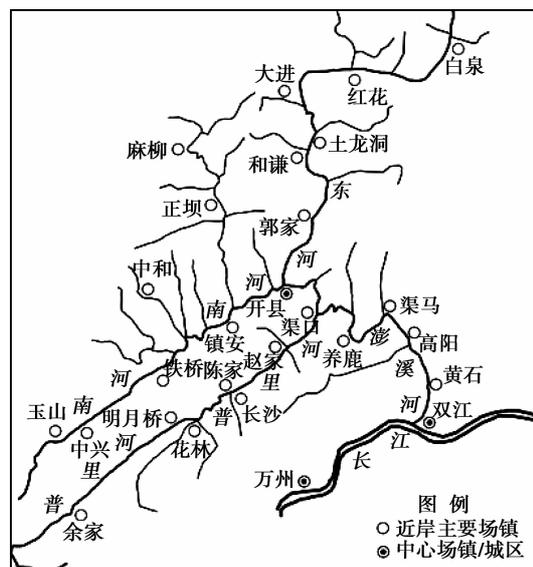
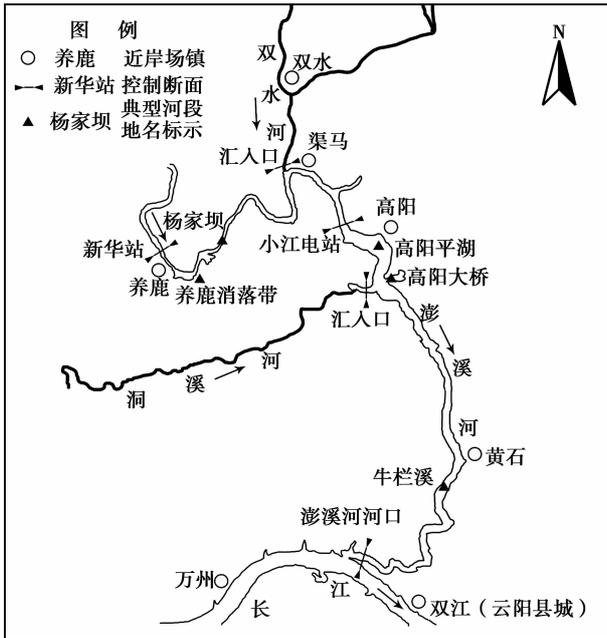
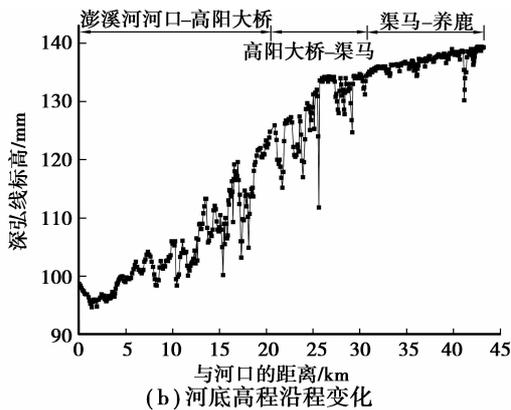


图 1 澎溪河流域水系图



(a) 澎溪河回水区控制断面



(b) 河底高程沿程变化

图 2 澎溪河回水区控制断面与河底高程沿程变化

表 1 澎溪河回水区一维水力模型
关键控制断面基本信息

断面名称	控制流域 面积/km ²	与澎溪河河口 的距离/km	河道深泓 线标高/m
新华站	4 536.0	43.25	139.30
小江电站	4 820.0	25.84	133.60
澎溪河河口	5 172.5	0	98.70
双水河汇入口	284.0	30.71*	137.00
洞溪河汇入口	172.0	20.40*	127.20

说明: * 为支流汇入口断面同下游澎溪河河口距离。

1.2 模型数学方程

1.2.1 恒定流模型

恒定流模型基于对断面间能量平衡方程的迭代求解,公式表示为:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 \cdot v_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 \cdot v_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

式中: Z_1, Z_2 分别为 2 个计算断面的河底标高; Y_1, Y_2 分别为 2 个计算断面的水深; v_1, v_2 分别为 2 个计算断面的流速; a_1, a_2 分别为 2 个计算断面加权流速水头系数; g 为重力加速度; h_e 为计算断面间的能量损失。

断面间能量损失包括沿程水头损失和局部水头损失,公式表示为:

$$h_e = L \cdot \bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 \cdot v_2^2}{2g} - \frac{a_1 \cdot v_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

式中: L 为加权后断面间距; \bar{S}_f 为断面间摩擦阻值坡降特征值; C 为断面间放大或缩小的损失系数;其中,对 L 的计算考虑了左右岸河滩、主河道之间过水能力的差异,计算公式如下:

$$L = \frac{L_{lob} \cdot \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \cdot \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \cdot \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (3)$$

式中: L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} 分别表示 2 个计算断面间左河滩、主槽和右河滩的断面间距; $\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$ 分别为左右河滩和主槽过水流量的算术平均值。

在断面分割基础上,对 2 个断面独立输送单元(左岸、右岸或主槽)总输送能力(Conveyance)进行计算,并求取 2 个计算断面间的 S_f 的均值 \bar{S}_f 。

某断面的 S_f :

$$Q = K \cdot S_f^{1/2}; K = \frac{1.486}{n} A \cdot R^{2/3} \quad (4)$$

2 个断面间计算河段的 \bar{S}_f :

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \text{ (HEC-RAS 的默认形式)} \quad (5)$$

式中: Q 为左右河滩或主槽(独立输送单元)的过水流量; K 为断面(或断面分割单元)的输送能力(Conveyance); n 为曼宁系数(糙率值); A 为左右河滩或主槽的过水断面面积, R 为相应的水力半径。同理,对流速系数 a 的确认亦根据断面分割结果通过加权计算获得,具体详见文献[10]。

糙率是河道水力模型中最关键的模型参数。全断面糙率值 n 的确认根据实际河道边壁变化分割计算单元计算,公式如下:

$$n_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i \cdot n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} \quad (6)$$

式中: n_c 为全断面的当量计算糙率值; P 为全断面湿周; P_i 为第 i 个分割单元湿周; n_i 为第 i 个分割单元的边壁糙率值。

1.2.2 非恒定流模型

非恒定流模型采用有限差分法对 St. Venant 方程组进行求解,方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial r} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 & (\text{连续性方程}). \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_1 \right) = 0 & (\text{动量方程}). \end{cases} \quad (7)$$

式中: x 为河道纵向距离, t 为时间, Q 为流量, A 为实际过水断面面积, S 为断面中非输送部分, q_1 为侧向汇入项, g 为重力加速度, S_1 为阻力项(同上), V 为流速。在有限差分的数值求解中, HEC-RAS 选择稳定性较好的 Liggett and Cunge 四点加权隐格式进行方程离散(默认 $\theta=0.6$), 迭代求解, 具体参考文献[10], 在此不再赘述。

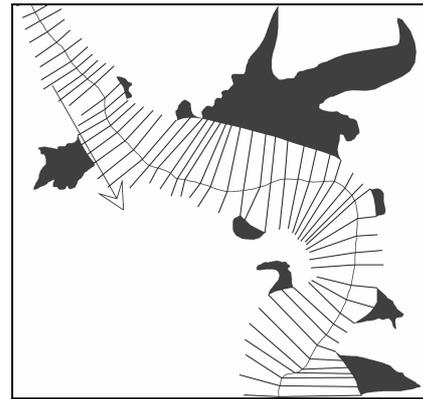
1.3 河道断面概化与糙率初选

蓄水后, 水位壅升使澎溪河回水区出现众多库湾、河汊, 部分河段形成大面积淹没区或消落带(养鹿、高阳), 近似于浅水型的过水性湖泊。一维水动力模型中关于水流单向性的基本假设将可能在上述水域出现偏差, 河道断面划分中要求断面垂直于流场亦很难实现。

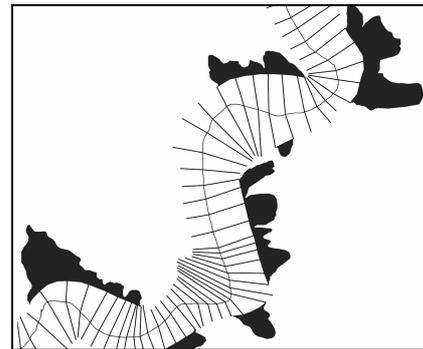
针对上述难点, 本研究拟在澎溪河回水区库湾、河汊和大量淹没区、消落带处, 根据流场方向, 经验性地在上述水域和主要河道间建立虚拟堤坝(virtual levees), 概化成满足一维模型基本假设的水体主要输送干道和 HEC-RAS 中的储水区域(storage area, 即: 仅同主输送干道存在水量的动态交换, 而不考虑其自身的流场特征)^[10-11], 虚拟堤坝的糙率值设置为 0。典型的高阳平湖段和双江大桥段概化结果见图 3。

根据上述河道概化方案, 对澎溪河回水区主河段共划分 491 个计算断面, 平均间距为 88.26 m; 支流洞溪河(流域面积 172 km²)、双水河(流域面积 284 km²) 仅考虑下游汇入口河段, 各分别建立 7 个和 2 个计算断面。

本案例中, 区域河道断面复杂, 既有顺直的峡谷型河段, 又有大面积消落带和淹没区。根据建模区域内各断面的野外实际调查情况, 其糙率值 n 的初选综合比较参考了三峡水库干流水动力模型研究结果^[17]、美国 USGS 河流糙率信息库^[18] 及周文德糙率经验值^[19] 等, 同时考虑了不同类型河段、不同淹没水位下两岸植被覆盖和岩石特点, 初步选取的断面糙率范围为 0.025~0.035, 其中, 河床床面糙率范围为 0.025~0.030; 河岸边壁糙率取值范围为 0.028~0.035。



(a) 高阳平湖



(b) 双江大桥

图 3 高阳平湖和双江大桥概化结果
(填充区域为 Storage area)

1.4 参数率定与模型验证

1.4.1 参数率定

以澎溪河干流宝塔窝(开县县城下游)至原新华(二)站(现为小江电站断面, 见表 1)1982 年 7 月下旬一次洪水过程水文数据为基础, 对天然河道洪水过程进行非恒定流模拟(时间间隔 4 h, 计算步长为 20 s), 率定的各河段糙率值, 率定结果见图 4、表 2。率定后对上述历史水文过程模拟的平均相对误差为 $(2.19 \pm 0.13)\%$, 最大相对误差不超过 5%。

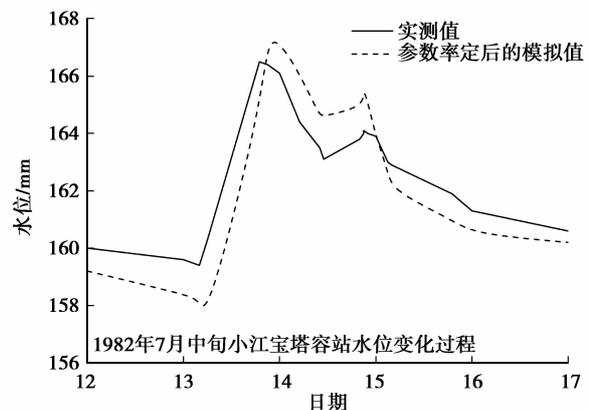


图 4 断面糙率率定后历史水文过程的实测值与模拟值

表 2 率定后澎溪河回水区不同河段糙率值选取范围

河段	床面糙率取值	河岸边壁类型说明	高程范围	边壁糙率取值
养鹿消落带	0.027~0.030	台地形消落带,草地、泥滩地和灌木丛	145~150	0.032~0.037
			150~176	0.035~0.040
杨家坝—小江电站	0.028~0.031	峡谷型,近岸岩石裸露,植被较稀疏,但断面规则	141~176	0.032~0.035
小江电站—高阳大桥	0.029~0.034	平坝型淹没区,为大面积农田,已清库,但仍有部分泥滩地	140~156	0.033~0.038
			156~176	0.037~0.040
高阳大桥—牛栏溪	0.029~0.033	峡谷型,近岸岩石裸露,植被较稀疏,断面较规则	138~176	0.033~0.038
牛栏溪—河口	0.030~0.035	断面复杂,边壁既有垂直岩壁,也有缓坡和大面积淹没区、消落带;边壁有植被覆盖	125~135	0.032~0.035
			135~176	0.034~0.040

1.4.2 模型验证

蓄水后澎溪河回水区原有水文站撤销,缺少在水库实际运行状态下回水区的实测水文过程数据,并给模型验证带来一定困难。故本研究尝试使用实测水动力数据(流速)对验证模型,并同其他相关研究结果进行比较以说明模型的有效性。

本研究在 2007 年汛期(4 月下旬至 8 月,三峡水库运行水位为 145 m)对渠马渡口断面流速(距澎溪河河口 30.88 km)进行 9 次断面流速实测,并进行模型验证。实测流速采用重庆华正水仪器厂 LS45A 型旋杯式流速仪测得(量程 0.015~3.5 m/s),模型验证结果见图 5,相对误差为(5.99±0.88)%,最大相对误差不超过 10%。另外,邓春光等研究发现在水位 145 m、流量 143.3 m³/s 下,澎溪河回水区长度为 59.0 km^[20];本次推算结果为 57.5 km,同其接近。上述结果说明基于 HEC-RAS 的澎溪河回水区段一维模型能实现对其水动力过程的有效模拟,糙率率定结果能满足模型模拟要求。

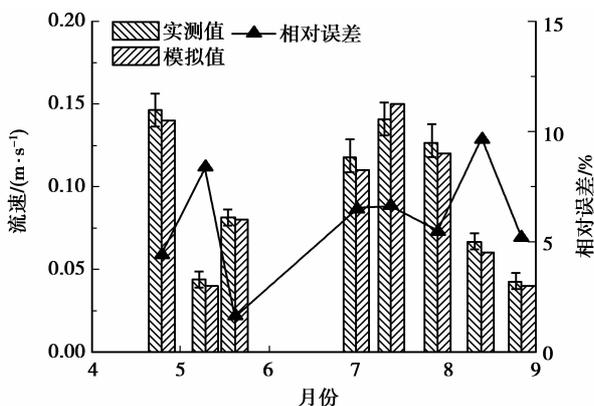


图 5 基于河道断面流速实测数据的模型验证结果

2 水库调度下的澎溪河回水区一维水动力特征分析

2.1 数据来源与模型演算方案

本研究时间范围为 2007 年 1 月 1 日—2008 年 12 月 31 日,为三峡水库试验性蓄水阶段,澎溪河河口水位根据长江干流万县水文站和三峡大坝日实测水位推算;澎溪河河口流量引自重庆大学龙天渝教授课题组的流量推算结果^[21-22](见图 6)。

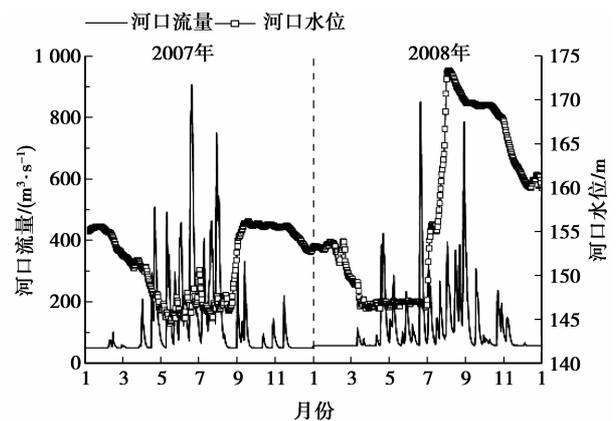


图 6 研究期间澎溪河河口径流量和水位变化情况

HEC-RAS 提供了对河道水力模型的 3 种演算方案,即恒定流(steady model)、准非恒定流(quasi-unsteady model)、非恒定流(unsteady model)。其中,准非恒定流模型是在恒定流模型基础上,选取特定时间间隔并计算该时间间隔内的恒定流模型以实现连续时间下一维水动力过程的演算^[10],其本质上是离散时段下对恒定流演算结果的连续化,这对于模拟水-沙两相流动、复杂边界下的水动力过程具

有一定优势^[10-11]。由于三峡水库具有水位、流量反季节大幅度交叠变化的特点,有别于传统天然河道径流过程的水动力特点。故本研究采用准非恒定流演算方法模拟全年水库调蓄下水动力特征的变化过程,并采用非恒定流模型计算一次水文事件(如:低水位运行下的洪峰过程)或局部时段的水动力特征。

选取研究期间最高水位(2008年11月7日,

173.30 m)、最低水位(2007年6月7日,144.58 m)、最高流量(2007年6月20日,907.09 m³/s)和最低流量(2007年1月1日,50.49 m³/s)4个典型的实测状态为代表,分析澎溪河回水区河道沿程水力学基本特征。最高、最低水位下典型河段计算断面河道水力特征见表3。上述各状态下的过水断面、流速沿程变化见图7。

表3 研究期间高、最低水位下典型河段计算断面的水力学基本特征

典型河段	断面特点说明	河段长度/km	最高水位(173.30 m)				最低水位(144.48 m)			
			过水断面面积均值	水力半径均值	水面宽度均值	深泓线处水深均值	过水断面面积均值	水力半径均值	水面宽度均值	深泓线处水深均值
养鹿消落带	大面积台地型消落带	3.11	12 868.3	23.8	516.6	35.6	859.7	4.4	198.5	6.9
杨家坝—小江电站	峡谷型河段	14.18	6 662.4	24.6	248.7	38.3	990.9	6.8	140.1	9.6
小江电站—高阳大桥	高阳平湖大面积淹没区	6.93	22 973.0	33.2	661.4	49.6	5 781.8	11.4	511.0	20.9
高阳大桥—牛栏溪	峡谷型河段	10.05	14 050.6	36.5	341.0	65.3	5 602.1	21.2	244.2	36.5
牛栏溪—澎溪河河口	回水区下游段	8.40	25 119.9	40.9	574.7	74.8	10 819.7	25.4	410.4	46.0

说明:过水断面面积单位为 m²;水力半径、水面宽度单位和水深的单位均为 m。

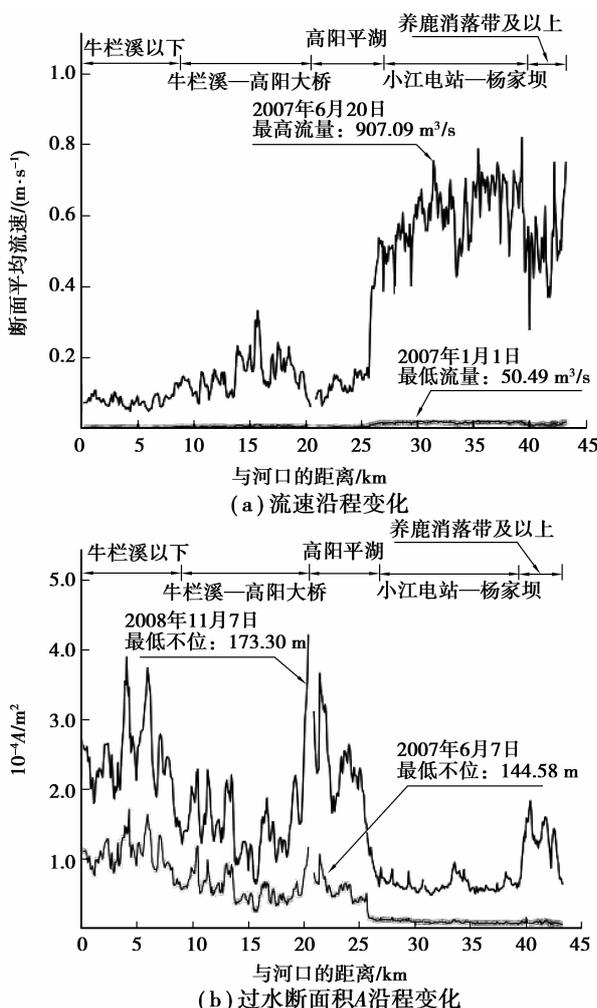


图7 典型状态下河道水力特征的沿程分布

145 m蓄水后研究区域内的水面坡降已很不显著,在2007年6月20日洪峰通过时建模区域起止断面间水位落差最大仅为0.37 m,水面坡降为0.009‰。在其他状态下,水位抬升或来水量减少将使起止断面间落差进一步缩小,水面坡降接近于0‰。在汛期低水位状态下,养鹿—小江电站河段为峡谷型河段,深泓线平均水深不到10 m,养鹿以上河段甚至不到7 m,汛期断面平均流速将会超过0.5 m/s,接近于天然河道。高阳平湖段(小江电站—高阳大桥)是澎溪河回水区中相对独立且封闭的大型浅水淹没区。虽然其河道深泓线标高128~130 m,但却因淹没大面积的农田而形成水域面积在4~5 km²的过水性浅水湖泊,低水位下该水域平均水深不足12 m,淹没区平均水深不足7 m,断面平均流速不超过0.2 m/s。高阳平湖下游高阳大桥至牛栏溪是研究区域内的另一个峡谷型河道,同养鹿杨家坝—小江电站河段相比,水深显著增加,低水位下时平均水深超过35 m,汛期平均流速不超过0.4 m/s,显著高于高阳平湖段;而牛栏溪以下河段水面进一步放宽,最大水面宽度可达700 m以上,河道深泓线平均深度亦增加至40 m以上,汛期流速放缓至约0.1 m/s。

在高水位状态下,冬季枯水季节径流量减少和水位壅升的交叠作用使得澎溪河回水区各河段间平均流速接近0.0 m/s,不同河段间流速无显著差异,并已不能显著表现出一维水动力特征。上游养鹿消落带受淹,过水断面放大,该河段河道深泓线水深达

35.6 m;养鹿杨家坝—小江电站峡谷型河道平均水深达38.3 m,而高阳平湖和下游牛栏溪以下河段河道深泓线水深分别可达60~80 m,澎溪河回水区深水河道型水库特征明显。

2.2 水体滞留时间的季节变化

水体滞留时间 t_{HRT} (单位为 d) 通常指湖泊、水库有效容积 V (单位为 m^3) 同入湖(库)流量 Q (单位为 m^3/d) 的比值,是水体湖沼学特点的关键宏观变量和对水体湖沼学特征进行分类的重要基准^[23]。建模区域总库容 R_{cap} (含库湾、河汊,下同)、水体滞留时间 t_{HRT} 日变化过程见图8。

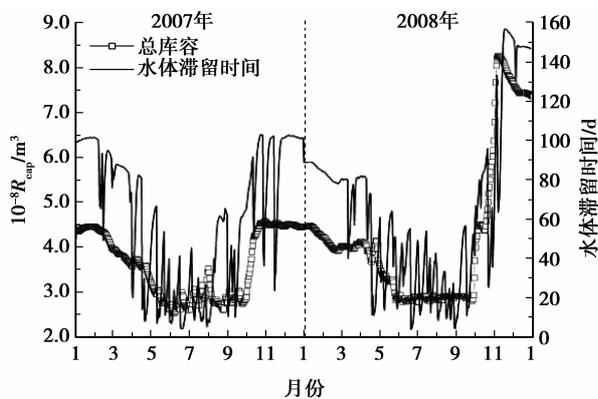


图8 研究期间澎溪河回水区总库容、水体滞留时间的周年变化过程

研究期间,澎溪河回水区最大库容为 $8.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2008年11月7日,河口水位为173.30 m),同期总水域面积达 $2.12 \times 10^7 \text{ m}^2$,平均水深为39.00 m。最低水位(2007年6月7日,144.58 m)下,最小库容为 $2.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,同期总水域面积为 $1.43 \times 10^7 \text{ m}^2$,平均水深为17.58 m。 t_{HRT} 最大值出现在2008年11月18日,达157.0 d,同期河口水位为172.3 m。 t_{HRT} 最小值出现在2007年6月20日,仅为3.8 d,同期河口水位为147.5 m。

Spearman 相关性分析发现,澎溪河回水区总库容同河口水位呈完全正相关关系 ($r=1.000$, $\text{Sig.} \leq 0.01$),同径流量成较显著的负相关关系 ($r=-0.448$, $\text{Sig.} \leq 0.01$),表明水库调蓄下水位涨落对澎溪河回水区库容改变的影响显著; t_{HRT} 同河口水位、径流量的相关系数 r 分别为0.774和-0.850 ($\text{Sig.} \leq 0.01$),其受径流、库容的双重影响,变化幅度与频率均较为剧烈。澎溪河河口水位 l (m) 同库容 R_{cap} (m^3) 的线性回归公式为:

$$R_{\text{cap}} = 0.1989l - 26.3918 \quad (R^2 = 0.9976, \text{Sig.} \leq 0.01) \quad (8)$$

据此,水体滞留时间 t_{HRT} 与河口水位 l 、日径流量 Q

的回归关系可表示为:

$$t_{\text{HRT}} = \frac{1 \times 10^{-8}}{Q} (0.1989l - 26.3918) \quad (R^2 = 0.9976) \quad (9)$$

根据 Straškraba 等对水库的分类标准(表4),在研究期间的 t_{HRT} 数据样本中,澎溪河回水区呈过流型水库特征的时段约占17.8%,主要集中在5—8月的夏季主汛期,处于过渡型状态的时段约占82.2%,研究期间水体滞留时间超过300 d的湖泊型水体滞留特征尚不存在。

表4 水库分类指标^[23]

类型	水体滞留时间/d	混合类型	营养类型说明
过流型	<20	完全混合	流动限制浮游生物的充分发展
过渡型	20~300	中等强度分层	增加了流动和分层的影响
湖泊型	>300	分层	传统营养级别

3 结 语

在 HEC-RAS 软件平台上,采用将澎溪河回水区库湾、河汊、大面积淹没区或消落带等水域划分成水体主要输送干道和储水区域的方法,对复杂的河道地形进行概化;经综合比较,确定澎溪河回水区断面糙率取值范围为0.27~0.35,且该模型具有较好的模拟精度。

当洪峰通过时,建模区域将形成0.009‰的水面坡降;低水位下回水区上游河段断面平均流速将会超过0.5 m/s,接近天然河道;中游高阳平湖处形成独立且相对封闭的大面积浅层淹没区;下游高阳大桥以下河段流速放缓;高水位下,不同河段流速无显著差异,深水河道型水库特征明显。

研究期间,澎溪河回水区库容、水体滞留时间变化范围分别为 $8.26 \times 10^8 \sim 2.51 \times 10^8 \text{ m}^3$, 157.0~3.8 d。库容变化主要受河口水位的影响,而水体滞留时间则在径流和库容的双重影响下波动显著。研究期间,17.8%的 t_{HRT} 数据样本显示澎溪河回水区呈过流型特征,主要集中于夏季汛期;82.2%的 HRT 数据样本显示澎溪河回水区呈过渡型特征。

参考文献:

- [1] 李崇明,黄真理,张晟,等. 三峡水库藻类“水华”预测[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 1-6.
LI CHONG-MING, HUANG ZHEN-LI, ZHANG SHENG, et al. Risk forecast of algal bloom in the

- Three Gorges Reservoir[J]. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(1): 1-6.
- [2] WETZEL R. *Limnology*, 3E. lake and river ecosystems [M]. San Diego, USA: Academic Press, 2001.
- [3] 况琪军, 周广杰, 胡征宇. 三峡库区藻类种群结构与密度变化及其与氮磷浓度的相关性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(2): 231-235.
KUANG QI-JUN, ZHOU GUANG-JIE, HU ZHENG-YU. Changes in algal community structure and algal density in relation to TN and TP in the Three Gorges Reservoir[J]. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(2): 231-235.
- [4] 张晟, 李崇明, 郑丙辉, 等. 三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(3): 500-505.
ZHANG SHENG, LI CHONG-MING, ZHENG BING-HUI, et al. Trophic states and nutrient output of tributaries in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3): 500-505.
- [5] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. *环境科学*. 2008, 29(1): 1-6.
ZHENG BING-HUI, CAO CHENG-JING, QIN YAN-WEN, et al. Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 1-6.
- [6] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征[J]. *湖泊科学*. 2009, 21(1): 36-44.
LI ZHE, FANG FANG, GUO JIN-SONG, et al. Spring algal bloom and nutrients characteristics in Xiaojiang River backwater area, Three Gorge Reservoir, 2007 [J]. *Journal of Lake Science*, 2009, 21(1): 36-44.
- [7] 富国. 湖库富营养化敏感分级水动力概率参数研究[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(6):80-84.
FU GUO. Study of the hydrodynamic probability parameters on eutrophication sensitivity classification of lake and reservoirs [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(6):80-84.
- [8] 富国. 湖库富营养化敏感分级指数方法研究[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(6): 85-88.
FU GUO. Study of the methodology of sensitivity classification index on eutrophication of lakes and reservoirs [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(6): 85-88.
- [9] 李锦秀, 禹雪中, 幸治国. 三峡库区支流富营养化模型开发研究[J]. *水科学进展*, 2005, 16(6): 777-783.
LI JIN-XIU, YU XUE-ZHONG, XING ZHI-GUO. Eutrophication model for the branch of Three-Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(6): 777-783.
- [10] BRUNNER G W. HEC-RAS, river analysis systems hydraulic reference manual version 4. 0 [R]. CA: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC), 2008.
- [11] WARNER J C, BRUNNER G W, WOLFE B C, et al. HEC-RAS, river analysis systems application guide [R]. CA: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC), 2008.
- [12] WYRICK J R, RISCHMAN B A, BURKE C A, et al. Using hydraulic modeling to address social impacts of small dam removals in southern New Jersey [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90 (Suppl3): S270-S278.
- [13] NAKAYAMA T, WATANABE M. Role of flood storage ability of lakes in the Changjiang River catchment [J]. *Global Planet Change*, 2008, 63(1): 9-22.
- [14] TOMSIC C A, GRANATA T C, MURPHY R P, et al. Using a coupled eco-hydrodynamic model to predict habitat for target species following dam removal [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(3): 215-230.
- [15] WYRICK J R, RISCHMAN B A, BURKE C A, et al. Using hydraulic modeling to address social impacts of small dam removals in southern New Jersey [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90 (suppl3): S270-S278.
- [16] CHEN YING, XU YOU-PENG, YIN YI-XING. Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoxi basin, China [J]. *Quaternary International*, 2009, 208(1/2): 121-128.
- [17] 黄真理, 李玉樑, 陈永灿, 等. 三峡水库水质预测和环境容量计算 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [18] USGS. Verified roughness characteristics of natural channels [EB/OL]. [2011-10-23] <http://www.rcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/>.
- [19] CHOW V T. *Open channel hydraulics* [M]. NY: McGraw-Hill Book Company, 1959.
- [20] 邓春光. 三峡库区富营养化研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [21] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测 [J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3): 574-581.
LONG TIAN-YU, LIANG CHANG-DE, LI JI-CHENG, et al. Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 574-581.
- [22] 吴磊, 龙天渝, 刘腊美, 等. 三峡库区小江流域溶解态非点源污染负荷研究 [C] // 黄真理编. *中国环境与生态水力学* 2008. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 221-227.
- [23] STRASKRABA M, TUNDISI J G. Guidelines of lake management. Vol. 9 [C] // International Lake Environment Committee. *Reservoir Water Quality Management*. Japan: International Lake Environmental Committee, 1999: 37-66.