

# 三峡蓄水后库区洪水波传播规律初步分析

陈力,段唯鑫

(长江水利委员会水文局,湖北 武汉 430010)

**摘要:**三峡水库蓄水后,原天然河道变成水库回水区,库区内洪水传播特性发生显著变化,且不同库段内洪水传播特性随库水位及上游来水条件而改变。针对三峡蓄水后库区水力条件变化,基于 MIKE11 模型模拟计算不同库水位及来水条件下洪水波在库区传播时间,以及影响洪水波传播的水流速度、运动波、动力波传播速度等因子,通过对计算结果验证与分析,初步揭示了三峡库区内不同库段在各种来水条件下的洪水波特性以及变化规律。

**关键词:**三峡库区;MIKE11 模型;流速;运动波;动力波;洪水波传播

中图分类号:TV124

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)01-0030-05

## 1 概述

洪水波具有运动波和动力波双重波动性,但以何为主支配洪水波的运动,则由边界条件和动力因素而定。李记泽,叶守泽<sup>[1]</sup>通过对圣维南方程组进行小扰动,分析了干扰波传播的特征方程,得出了 Manning、Chezy 摩阻律所对应各种性质洪水波的波速、衰减量等动力传播特征,并提出了运动波、动力波判别依据。徐正凡<sup>[2]</sup>将洪水波中的各水力要素看作是恒定流部分与波动部分的叠加,通过变换圣维南方程组,得出  $h_0/\lambda i$  ( $h_0$  为恒定流水深、 $\lambda$  为半波长、 $i$  为底坡)比值确定该波动的特性。运动波以  $W=ku$  ( $1 \leq k \leq 2$ ,  $u$  为水流速度)波速向下游传播,而动力波以  $u \pm \sqrt{gy}$  ( $y$  为水深)波速向上下游传播,一般而言动力波波速远大于运动波波速。在一般河道中的洪水波符合运动波特性,而在水库中洪水波可能满足动力波条件。

实际入库洪水中从入库断面到坝址随水深不同,边界形状变化较大,洪水波波动特性也相应有差异,一般可将水库中的洪水动态分为三段来描述,上游为河流区,紧靠坝址一段为水库蓄水区(平水区),中间一段为过渡区(或叫库河区)。在河流区内洪水波以运动波为主,在蓄水区洪水波以动力波特性传播,而在过渡区内开始还是运动波,但因水深加大流速较河流区减小,而后段是则为动力波特性。洪水波因特性不同,传播速度及时间相差很大,因此对水库运行调度有影响。

本文以已建立的三峡库区(寸滩、武隆~三峡大

坝)MIKE11 模型为基础,分析计算不同来水及库水位条件下库区运动波波速、动力波波速及洪峰传播时间,进而分析库区各段洪水波的传播特性。

## 2 三峡水库库区概况及洪水波特性

三峡工程是中国最大的水利枢纽工程,是长江中下游防洪体系中的关键性骨干工程,大坝坝址位于湖北省宜昌市三斗坪,具有防洪、发电、航运等综合效益。三峡水库修建前,该河段地处“三峡”,两岸悬崖峭壁、江面狭窄、水流湍急。河段内设有清溪场、万县、巫山等水文站,其中寸滩~清溪场河长约 130km、清溪场~万县河长约 190km、万县~巫山河长约 170km、巫山~三峡大坝河长约 120km,库区全河长达 600 余 km,寸滩至三峡坝址洪水传播时间为 60h 左右。2003 年 6 月后三峡水库蓄水至 135m,2006 年汛后蓄水至 156m,2008 年汛期后实施 175m 试验性蓄水,原寸滩至三峡大坝天然河道变为水库回水区。蓄水后库区的水文水力学特性发生了较大的改变,断面扩大、流速减小,万县以下各水文站无法观测流量,且水位受坝前水位影响显著;水深大幅加大,洪水波运动特征发生变化,传播时间较天然河段明显缩短。

三峡水库正常运行后,汛限制水位为 145m,正常蓄水位为 175m,一个水利年库水位变幅达 30m,不同库水位及来水条件下库区内河流区、过渡区、水库蓄水区的分布也随之变化,使洪水波在库区内传播更加复杂。三峡库区洪水传播时间受洪水波特性影响差异

较大,而防洪调度方案及短期发电计划应以坝址来水为依据进行制定,对洪水传播时间把握不准就会造成水库水位变化超出预计,甚至可能超出规定的许可范围,造成发电计划修改或调度困难。

### 3 三峡库区洪水波要素计算

#### 3.1 三峡库区 MIKE11 水力学模型

MIKE11 由丹麦水力研究所研究开发,包括水动力(HD)、洪水预报(FF)、对流扩散(AD)、泥沙输送(ST)、水质(WQ)、富营养化(ECOLab)、融雪(ICE)、结果校正(DA)等模块。其中水动力模型是模型核心部分,可模拟河道水体沿程变化,并可以耦合 NAM、UHM、SMAP、Urban、FEH、DRiFt 等降雨径流模型,即径流(RR)模块<sup>[3]</sup>。MIKE11 模型中 HD 模块中将河道上的每个网格节点按照水位点和流量点的顺序交替布置,以圣维南方程组为控制方程,采用了六点中心隐式格式(Abbott Scheme)及“双扫”算法进行数值计算一维一层水力要素<sup>[4]</sup>。

根据实测断面建立三峡库区(寸滩、武隆~三峡大坝江段)MIKE11 模型,并在断面的处理过程进行容积的平衡计算,使得在相同的水位条件下根据断面计算的河槽蓄水量与设计库容值一致。三峡区间根据水系分布和水文测站的控制情况,将整个区间分为 13 个分区分别建立 NAM 降雨径流模型,按各分区的地理位置与 MIKE HD 模型耦合,形成三峡区间水文水力学相结合的 MIKE11 模型,并通过边界条件的处理实现三峡水库的预报调度<sup>[5]</sup>。

自 2005 年三峡库区 MIKE11 模型建成后,随三峡水库运行资料的积累,参数不断优化改进,在汛期三峡水库来水预报及调度中发挥过重要作用,2005~2012 年汛期基于 MIKE11 模型预报的入库流量,1~3d 预见期平均相对误差分别为 4.74%、6.94%和 8.53%<sup>[6]</sup>。2010 年、2012 年汛期长江上游出现区域性洪水时,模型都准确的模拟预报了库区洪水演进,特别是在 2010 年 7 月 19 日,依据上游来水预测,预报当 14 时起出库流量按 40 000m<sup>3</sup>/s 调度时,23 日将出现 158m 左右最高库水位,22 日 8 时库水位预期上涨至 157m,预报误差不到 0.3m,之后因其他需要改变调度方式<sup>[7]</sup>。

因 MIKE11 模型计算河道(库区)每个断面每个时段的水位,以及相邻两断之间面每个时段的流量,并可根据水库不同运行工况灵活设置边界条件,因此可模拟各运行方式下入库洪水在库区的演进情况。

#### 3.2 三峡水库蓄水后库区水流速度的计算

河流(库区)内水流速度计算可借用 MIKE11 模型中 AD 模块计算,MIKE11-AD 为计算物质在河道中传播模块,其传播机理主要为两方面,其一为随水流平移,其二为相邻过水断面间浓度差引起的扩散,计算方程为:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_2q$$

式中: $C$  为浓度; $D$  为扩散系数; $A$  为断面面积; $K$  为线性衰减系数; $q$  为区间来水; $C_2$  为区间来水物质浓度; $x$  为纵向分量; $t$  为时间分量。

若忽略区间来水、物质在河道传播过程中的衰减及扩散,即令  $D=0$ 、 $K=0$ 、 $q=0$ ,则上式简化为: $\frac{\partial QC}{\partial x}$

$$= -\frac{\partial AC}{\partial t}$$

即物质浓度沿程变化为断面浓度随时间的变化,物质在河道中传播完全由水流平移决定,在河道中传播速度即为水流速度  $u$ 。因此当知道物质在一段河道内传播时间,可根据  $u=St$  ( $S$  为河段长,  $t$  为物质在河段中传播时间)推求该河段内平均水流速度。在三峡库区 MIKE11 模型中采用 DA 模块,在寸滩站来水中添加示踪物质,且仅在洪峰时刻浓度大于 0,其它时刻浓度皆为 0,则模拟出寸滩以下断面示踪物质出现最大浓度的时间,即为寸滩洪峰水质点流至此断面时间,而任意两断面时间差即为其控制河段的水流时间。由此方法,可依据河段长及水流时间计算库区各段的平均水流速度。

#### 3.3 三峡库区动力波波速计算

通过上述 3.2 节方法,可推求根据库区内各段水流速度  $u$ ,因此只需要知道  $y$  (洪峰水深)即可计算动力波向下游的传播速度  $u + \sqrt{gy}$ 。根据三峡内库区实测断面,可知任意断面的最低点高程  $H_0$ ,而通过 MIKE11 模型对洪水过程进行模拟,可得各断面的洪峰水位  $H$ ,水深  $y=H-H_0$ ,由此可计算库区各断面间动力波向下游的传播速度。

将三峡库区分为寸滩~清溪场、清溪场~万县、万县~巫山、巫山~三峡大坝四段,当寸滩站来水为 20 000m<sup>3</sup>/s 时,各段的流速、水深、动力波速度计算结果如表 1 所示。

### 4 三峡库区洪水波传播规律的分析与检验

三峡水库 2003~2006 年汛期库水位维持在 135m 左右运行,2007~2008 年汛期库水位在 145m 左右运

表1 不同库水位条件下三峡库区各段水流速度与动力波传播速度  
Table1 Dynamic wave celerity and transition time at different reservoir levels in the Three Gorges Reservoir area

库水位	水力要素	寸滩~清溪场	清溪场~万县	万县~巫山	巫山~三峡大坝
145	流速/ $m \cdot s^{-1}$	1.134	0.475	0.209	0.061
	水深/m	35.1	46	85.7	116.4
	动力波速/ $m \cdot s^{-1}$	19.5	21.5	28.9	33.5
150	流速/ $m \cdot s^{-1}$	1.071	0.370	0.202	0.054
	水深/m	36.5	50.5	90.5	121.4
	动力波速/ $m \cdot s^{-1}$	19.8	22.4	29.7	34.2
155	流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.915	0.289	0.121	0.044
	水深/m	38.7	55.1	95.4	126.3
	动力波速/ $m \cdot s^{-1}$	20.2	23.3	30.4	34.9
160	流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.730	0.208	0.103	0.022
	水深/m	41.5	59.9	100.3	131.3
	动力波速/ $m \cdot s^{-1}$	20.7	24.2	31.1	35.5
165	流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.528	0.165	0.082	0.008
	水深/m	44.9	64.7	105.2	136.3
	动力波速/ $m \cdot s^{-1}$	21.3	25.1	31.9	36.2
170	流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.444	0.143	0.072	0.005
	水深/m	48.8	69.6	110.1	141.3
	动力波速/ $m \cdot s^{-1}$	22.1	26.0	32.6	36.9
175	流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.289	0.138	0.056	0.004
	水深/m	53.2	74.5	115	146.3
	动力波速/ $m \cdot s^{-1}$	22.9	26.9	33.3	37.5

行,2009年开始汛期多次进行防洪调度,同时还为提高水资源利用率开展中小洪水调度。由于水库对上游来水的拦蓄,在一次来水过程中库水位不断变化,如“10·7”洪水过程中三峡库水位由146.30m左右涨至158.80m以上,涨幅达12m以上;“12·7”洪水过程中库水位由156.0m左右涨至163.0m以上,涨幅在7m以上。库水位上涨导致库区内上下游站点最高水位出现原因不同,清溪场以上最高水位主要受上游来水影响,万县以下最高水位受库水位上涨的影响明显,而巫山以下水位受水库水位影响更为突出。因此,在水库对上游洪水进行拦蓄调度时,不能直接依据最高水位出现时间计算洪水传播时间。根据经验,在区间来水较小时,洪水波实际传播时间可采用寸滩、武隆合成洪峰与坝前入库洪峰时间差代替<sup>[8]</sup>,坝前水位在155m以下时,传播时间在18~30h之间,平均传播时间在22h左右,当库水位在155~165m左右时,平均传播时间减少至18h左右,当库水位升至165m以上时,传播时间减少至12h左右。

洪水在河道(库区)向下游传播受很多因素的影

响,如起涨流量大小,流量上涨的快慢,涨幅(洪峰流量),涨退水历时等。为简化计算起涨流量统一为 $20\,000\text{m}^3/\text{s}$ (汛期出现较大来水时寸滩流量大多都从 $20\,000\text{m}^3/\text{s}$ 左右起涨);当寸滩~清溪场、清溪场~万县段天然河道情况下洪水波波形周期(相当于洪水过程线的历时)分别大于1d、5.6d时可满足无水库影响下运动波传播条件<sup>[1]</sup>,因此本文将洪水涨退历时统一为6d。选取洪峰流量分别为 $35\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $40\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $50\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $55\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $60\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $65\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $70\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $75\,000\text{m}^3/\text{s}$ 的洪水,采用MIKE11模型计算分析三峡库水位分别为145m、150m、155m、160m、165m、170m、175m时的传播时间,如图1所示。

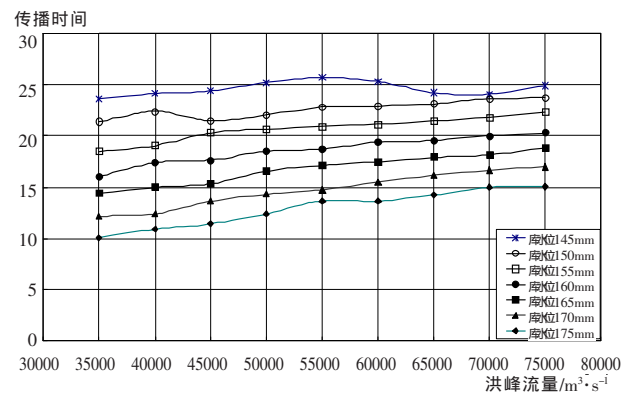


图1 不同洪峰流量三峡库区洪水波传播时间与库水位相关图  
Fig.1 Relationship between the flood wave routing time and reservoir level at the different peak flows in the Three Gorges Reservoir area

从图1可见,MIKE11计算三峡库区洪水传播时间与前述分析的实际传播时间基本相当,库水位越高洪水波传播时间越短的规律相符,因此计算结果总体可信。另外,还可从图1看出相同库水位时,洪峰流量增大传播时间总体呈加大趋势,但局部也有减小的情况,其原因为洪峰流量加大时,符合运动波特性的传播河段加长、符合动力波特性的传播河段减小,导致传播时间加长,但同时由于洪峰流量增大时运动波、动力波速度也相应加大,可能在一定范围内缩短传播时间。

选取库水位在145m左右变化不大的洪水过程,分析得万县~巫山段洪水波平均传播时间约为1.5h,相应传播速度约为 $29.5\text{m/s}$ ,与动力波传播速度基本相当,因此可认为库水位在145m以上万县~巫山段洪水按动力波特性的传播。巫山~三峡大坝位于万县~巫山以下,库水位在145m以上时洪水传播也应符合动力波特性的传播。对万县以上分为寸滩~清溪场、清溪场~万县两段,分别模拟寸滩洪峰流量 $35\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $55\,000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $75$



000m<sup>3</sup>/s 的洪水过程,计算不同三峡库水位条件下上述两段洪水传播时间,计算结果如图 2~4 所示:

万县段为水库平水区。由图 4,对于 75 000m<sup>3</sup>/s 洪峰流量洪水,库水位在 170m 以下时寸滩~清溪场段洪水波以运动波特性传播,清溪场~万县段为过渡区;库水位在 170m 以上时寸滩~清溪场段为过渡区,清溪场~万县段为水库平水区。

### 5 结论

通过寸滩至三峡大坝 MIKE11 水力学模型,根据 MIKE11-AD 模块分别计算了不同条件下水流速度,根据 MIKE11-HD 模型计算寸滩~清溪场、清溪场~万县段洪水波传播时间,以及相应条件下运动波、动力波波速及相应传播时间,经分析可得如下结论:(1)三峡库水位在 145m 以上时万县以下符合动力波特性;(2)三峡库水位在 155m 以下时,对于 35 000m<sup>3</sup>/s 以上来水,清溪场以上洪水波以运动波特性传播;(3)三峡库水位在 170m 以上时,对于 75 000m<sup>3</sup>/s 以下来水,清溪场以下库区符合动力波特性;(4)三峡库水位在 155~170m 范围内变动清溪场~万县段在过渡区与平水区变换,洪水越小、库水位越高时更偏向为平水区。

#### 参考文献:

- [1] 李记泽,叶守泽.三峡建库后库区洪水波动力特性初步分析[J].水电能源科学,1991,9(4):265-273. (LI Jize, YE Shouze. An analysis about dynamical characteristic of flood waves in the reservoir region after the completion of the Three-Gorge Project [J]. Hydroelectric Energy, 1991,9(4):265-273. (in Chinese))
- [2] 徐正凡.论水库中洪水波的传播特性[J].人民长江,1987,(9):14-20. (XU Zhengfan, Discussion of flood wave transition in reservoir area [J]. Yangtze River, 1987,(9):14-20. (in Chinese))
- [3] Danish Hydraulic Institute. MIKE11: A modeling system for rivers and channels user-guide manual [R]. DHI. 2007.
- [4] Danish Hydraulic Institute. MIKE11: A modeling system for rivers and channels reference manual [R]. DHI. 2007.
- [5] 三峡水利枢纽调度通信中心. MIKE 非稳定流计算的水动力学预报调度模型建立[R]. 2005. (Three Gorges Project Scheduling Communication Center. Setup of MIKE model of unsteady flow for flood forecasting and controlling [R]. 2005. (in Chinese))
- [6] 长江水利委员会水文局.长江三峡以上水资源量动态预测方案研究[R]. 2012. (Bureau of Hydrology, CWRC. Dynamic prediction of water resource in the upper basin of Yangtze River [R]. 2012. (in Chinese))
- [7] 闵要武,王俊,陈力.三峡水库入库流量计算及调洪演算方法探讨[J].人民长江,2011,42(6):49-52. (MIN Yaowu, WANG Jun, CHEN Li. Discussion on calculation method of flood routing and inflow of Three Gorges Reservoir [J]. Yangtze River, 2011,42(6):49-52. (in Chinese))
- [8] 长江水利委员会水文局.三峡电站水库出入库代表性流量分析[R]. 2012. (Bureau of Hydrology, CWRC. Analysis of the representation of inflow and outflow discharge of Three Gorges Reservoir [R]. 2012. (in Chinese))

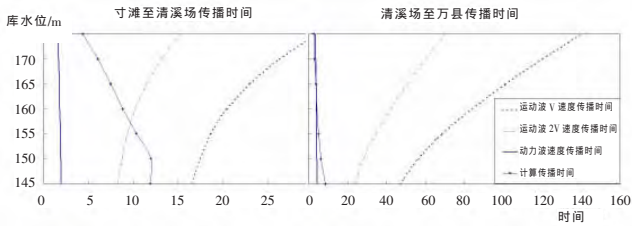


图 2 35 000m<sup>3</sup>/s 洪峰流量寸滩~清溪场、清溪场~万县不同库水位洪水传播时间图

Fig.2 Routing time at the different reservoir levels for 35 000m<sup>3</sup>/s-peak flow in the reaches of Cuntan~Qingxichang and Qingxichang~Wanxian

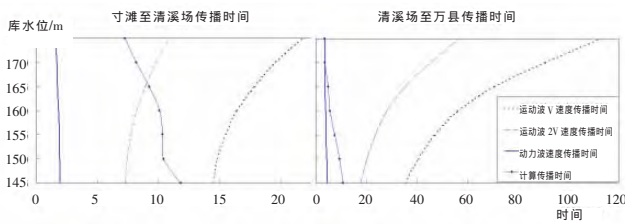


图 3 55 000m<sup>3</sup>/s 洪峰流量寸滩~清溪场、清溪场~万县不同库水位洪水传播时间图

Fig.3 Routing time at the different reservoir levels for 55 000m<sup>3</sup>/s-peak flow in the reaches of Cuntan~Qingxichang and Qingxichang~Wanxian

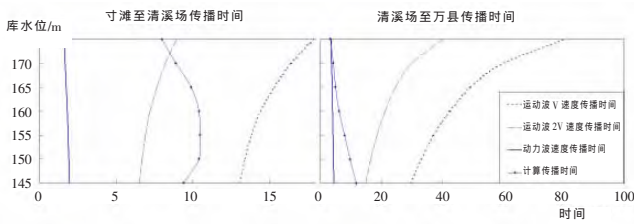


图 4 75 000m<sup>3</sup>/s 洪峰流量寸滩~清溪场、清溪场~万县不同库水位洪水传播时间图

Fig.4 Routing time at the different reservoirs levels for 75 000m<sup>3</sup>/s-peak flow in reaches of Cuntan~Qingxichang and Qingxichang~Wanxian

由图 2 可见,对于洪峰流量为 35 000m<sup>3</sup>/s 洪水,三峡库水位在 155m 以下时,寸滩~清溪场段洪水传播速度介于  $u$  至  $2u$  之间,符合运动波特性;清溪场~万县传播速度大于  $2u$  但小于  $u+\sqrt{gy}$ ,符合过渡区洪水传播特性。库水位在 155m 以上时,寸滩~清溪场段传播速度大于  $2u$  但小于  $u+\sqrt{gy}$ ,符合过渡区洪水传播特性;清溪场~万县传播速度接近  $u+\sqrt{gy}$ ,符合水库平水区洪水传播特性。由图 3 可知,对于 55 000m<sup>3</sup>/s 洪峰流量洪水,库水位在 165m 以下时寸滩~清溪场段洪水波以运动波特性传播,清溪场~万县段为过渡区;库水位在 165m 以上时寸滩~清溪场段为过渡区,清溪场~

## Preliminary Analysis of Flood Wave Routing in Three Gorges Reservoir Area

CHEN Li, DUAN Weixin

(Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resource Commission, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** After the impounding of the Three Gorges Reservoir, the natural river channel became reservoir area, and the characteristics of flood wave routing changed significantly and controlled by the discharge of inflow and the water level before the dam. Based on the MIKE11 model setup in the reservoir area, the flood routing time were calculated for different cases, other elements combined to the routing time also computed including the flow velocity, the kinematic wave celerity and dynamic wave celerity in each scenario. By validation and analysis the results, some general conclusion can be reached for the characteristics of the flood wave routing along the reservoir area.

**Key words:** Three Gorges Reservoir Area; MIKE11 model; velocity; kinematic wave; dynamic wave; flood wave routing

(上接第 29 页)

(3) 本文计算方法的洪峰传播历时计算值与实际值存在明显的线性关系,且更适用于长江上游流域,实际应用时需要进行简单的线性转换,可用于流域的快速洪水预报。

参考文献:

- [1] John M. H. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function [J]. *Mathematical Geology*, 1978, 10(1): 59-72.
- [2] J.V. Perez-Pena, J.M. Azanon, A. Azor et al. CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments: applications to drainage basin analysis in SE Spain [J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35: 1214-1223.
- [3] 张敬春, 李川川, 张梅, 等. 格尔木河流域面积-高程积分值的地貌学分析 [J]. *山地学报*, 2011, 29 (3): 257-268. (ZHANG Jingchun, LI Chuanchuan, ZHANG Mei, et al. Geomorphologic analysis of the Golmud river drainage basin based on hypsometric integral value [J]. *Journal of Mountains Science*, 2011, 29(3): 257-268. (in Chinese))
- [4] 信志保, 许炯心, 马元旭. 黄土高原面积-高程分析及其侵蚀地貌学意义 [J]. *山地学报*, 2008, 26(3): 356-363. (XIN Zhongbao, XU Jiongxin, MA Yuanxu. Hypsometric integral analysis and its sediment yield implications in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Mountains Science*, 2008, 26(3): 356-363. (in Chinese))
- [5] 李泳, 陈晓清, 胡凯衡. 流域特征曲线与泥石流活动 [J]. *山地学报*, 2006, 24 (3): 320-326. (LI Yong, CHEN Xiaoping, HU Kaiheng, et al. Characteristic curves and debris flow activity of a valley [J]. *Journal of Mountains Science*, 2006, 24(3): 320-326. (in Chinese))
- [6] 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 面积高度积分的面积依赖与空间分布特征 [J]. *地理研究*, 2010, 29(6): 271-282. (ZHAO Hongzhuang, LI Youli, YANG Jingchun, et al. Influence of area and space dependence for hypometric integral and its geological implications [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(6): 271-282. (in Chinese))
- [7] Luo W., John M. H. A Theoretical travel time based on watershed hypsometry [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(4): 785-792.
- [8] Liang C., Yu Z. Theoretical analysis of potential runoff energy from a grid DEM [J]. *Nature and Science*, 2004, 2(1): 17-23.

## Flood Crest Travel Duration Calculating Method Based on Hypsometric Curve and Its Application in Yangtze River Basin

LI Jian, JIN Zhongwu, YANG Wenjun

(Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The flood crest travel to the outlet of a watershed is related with some characteristics of the watershed. This paper calculated the flood crest travel duration in the Yangtze River Basin based on the gravitation driven principle and hypsometric curve. The results show that the flood crest travel durations of the 53 sub-basins in the Yangtze River Basin obtained by ArcGIS have obvious relationship with the characteristics of the sub-basins, there is a linear relation between the value calculated with the method based on hypsometric curve and the value calculated with the empirical formula. The research could be used for studying the relationship of the hydrological response with watershed geomorphology and real-time flood forecast.

**Key words:** flood crest travel duration; hydrologic response; hypsometric curve; Yangtze River Basin