

流域洪水模拟通用模型结构研究

李光炽

(河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 在分析流域水流特性的基础上,提出了流域可分解为一系列特征对象和流域洪水运动由水位场确定的概念.特征对象由基本元素组成,将节点水位作为模型基本变量,通过各种流域基本元素间的水量交换函数,采用数据驱动运行机制建立了流域洪水模拟通用模型,并用实例验证了方法的可行性.

关键词 流域 洪水模拟 通用模型结构

中图分类号 TV131.4

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2005)01-0014-04

目前,流域洪水演进模型^[1]可分为 3 类:以水文学为基础的对流扩散波模型;以计算流体力学为基础的洪泛区二维洪水演进模型^[2];以计算水力学为主并与水文学相结合的动力^[3~6]模型.这些模型大都以分区模型为主,各区域间以显式连接.由于连接处的水位与流量不协调,因而会影响全流域洪水模拟计算的稳定性,并且区域间计算精度也不相同,单区域计算结果较好,全流域洪水模拟计算结果会因人而异,所以难以得到高精度的计算结果.为适应现代防洪减灾保障体系理论的发展,保证全流域模拟计算的稳定性,提高计算精度,增强模型的通用性,本文对流域洪水模拟通用模型进行了研究.

1 流域水流特性分析

为了建立流域洪水模拟的通用模型,首先对流域特性进行系统分析.一般情况下,流域可分为上游区、中游区和下游区.上游区大多为丘陵和山区,河道比降较大,水流速度快,属急流流态,其水位流量关系明确,洪水波属运动波类型.中游区,从山区进入平原,河道比降变缓,水流速度减小,水流流态为缓流,由于过流能力会受到下游水位的影响,因而会出现排洪不畅的现象.超标洪水时,需启用行洪区、分洪区等辅助行洪.这时的水位流量关系曲线不再唯一,而是一组与下游水位相关的曲线.下游区,河道进入平原入海段,河道比降极其平坦,水流会受到潮水和洪水的双重作用,水位和流量因潮汐作用而波动,水流流态为缓流.此时河道具有较强的过流能力,排洪不畅的主要原因是潮汐的顶托.洪水泛滥是上游洪水和河口大潮遭遇的结果.从河口到潮周界的下游区,河道水流方向随潮汐的变化而变化,流态比较复杂,有涨潮流和落潮流,断面水位流量关系不复存在.

上游区,流域的出口水位(或流量)可以唯一地反映上游的水流状态,而中下游区,水位(或流量)已不能作为唯一指标,水位与流量的相关关系已无法用简单的函数来表达.一般来说,河道底坡从上游的陡坡变化到下游的缓坡,流域的水流运动也从急流变化到缓流.急流和缓流是两种不同性质的流态,虽然它们的控制方程都为圣维南方程,但它们对定解条件的要求是不同的,因此它们所对应的求解方法也不相同.对于急流状态的河道水流,由于下游的水流状态不会影响上游的流动,水位和流量的对应关系稳定,满足马斯京根法的应用条件,可采用马斯京根法进行求解.对于缓流状态的河道水流,由于下游的流动状态与上游的流动状态相互影响,水位和流量的对应关系不再唯一,应采用隐式差分全流域耦合方法进行求解.

2 流域模拟的特征对象和基本元素

从流域洪水模拟角度看,河道、湖泊、水库、蓄洪区、行洪区、口门和控制闸等过水建筑物,是组成流域洪水运动的特征对象.平水期,水流主要在河道、湖泊中运动;洪水期,当上游来流超过河道泄流能力时,通过分

洪、行洪等,使水流通过闸、口门、堤防等水工建筑物进入行蓄洪区。由上中游河网和行、蓄洪区组成行、蓄洪区型流域,由中下游的河网、湖泊和闸门等组成内涝型流域。包含所有流域特征对象的流域可称为一般性流域。这样,对不同类型的流域来说,其特征对象的组成是不一样的。

流域洪水演进模型一般以河道断面、二维计算网格等为基础描述对象。这种描述方法不够抽象,不同对象间没有共性,难以形成统一求解的框架。如果流域的水流运动由水位场决定,那么以抽象的对象节点作为基本描述对象,就有可能形成全流域统一求解的结构。所谓节点,是指两条河道的交汇点、调蓄单元的中心点、二维计算网格的中心点及连接构件(堰、闸等水工建筑物)涉及的两端点等。这样,可以进一步抽象出流域的基本元素——节点、河段、连接构件等。节点可分为有调蓄能力节点和无调蓄能力节点。河道端点为无调蓄能力节点,调蓄单元中心点为有调蓄能力节点。因此,流域特征对象由流域基本元素组成。如二维流动区域,则由一系列有调蓄能力的节点和连接构件组成,即一个二维计算网格由一个有调蓄能力的节点及四周的 4 个连接构件组成。

3 通用模拟模型结构和构造

全流域洪水模拟,用水力学方法求解时会遇到从急流到缓流的过渡问题。为了确保全流域模拟的稳定性,可以把流域划分成上游急流区、中间过渡区和平原缓流区。上游急流区和中间过渡区的水流运动,其水位和流量关系稳定,可采用水文学产汇流理论的方法解得流域的出流过程。平原缓流区,其水流受上游来水和下游水位顶托的共同作用,可采用水文学方法解决产流问题。汇流和洪水演进的求解必须采用水力学方法。对河道,用数值方法求解圣维南方程;对行洪区,用数值方法求解浅水波方程;对过流控制建筑物,用相应的水力学方法进行求解。这样,对全流域平原缓流区,可以先建立水力学模拟模型,然后由水文学方法提供水力学模型边界条件,最后通过水力学方法模拟全流域的水流运动。水力学方法是从水流运动机理出发的模拟方法,用其来模拟给定边界条件下的水流运动时,没有预报功能,而将其与水文学方法相结合,由水文学方法预报边界条件,通过水力学方法模拟,其结果具有与水文学方法相同的预见期,同样具有预报功能。

构造流域洪水模拟通用模型的基本步骤为 (a)分解出流域基本元素。分解出的这些基本元素要有稳定的特征,能适应任何一个流域;同时,基本元素要完备,能够构成任何一个流域。(b)建立基本元素的水流模拟模型,并针对不同特征的基本元素建立相应的水流模拟模型。(c)研究基本元素的水流模拟模型间的通用耦合方法,由具体的特征对象的水流模拟模型耦合成特定的流域,由此构造流域洪水演进通用模型。要达到真正的通用性,必须采用数据驱动方式。数据驱动方式以规范的数据格式,通过数据输入遍历所有流域基本元素模拟,自动形成对应的模型。

流域洪水模拟模型可分为流域水文模拟模型和流域洪水演进模拟模型两部分。流域水文模拟模型包括流域蒸发模拟、降雨产流模拟、区域汇流模拟和区域出流预报。区域出流预报作为流域水文模型的输出,在流域洪水演进模型中作为输入,形成流域洪水演进模型的边界条件。流域洪水演进模型包括边界条件模拟、零维水流模拟、一维水流模拟、二维水流模拟、区间入流模拟、工程控制模拟和各区域连接关系模拟。通过连接关系模拟,可形成全流域完全耦合隐式求解方法,确保模拟模型的稳定性。所以,本文构造了通用流域洪水模型结构,如图 1 所示。

在流域洪水模拟中,把水看作不可压缩物质,则体现质量变化的指标可以用水位来表示。以节点水位作为基本变量能够描述流域水量的变化,而且全流域的水位场决定了流域内的水流运动以及区域间的质量交换和动量交换等,因此,流域内的各种水流运动都可以表示为节点水位的函数关系。以节点水位作为基本量,建立节点水位的求解方程,可以形成全流域耦合求解的模拟系统。节点水位求出后,由函数关系可以求出流域内各节点间的水量交换指标,如流量、流速等。

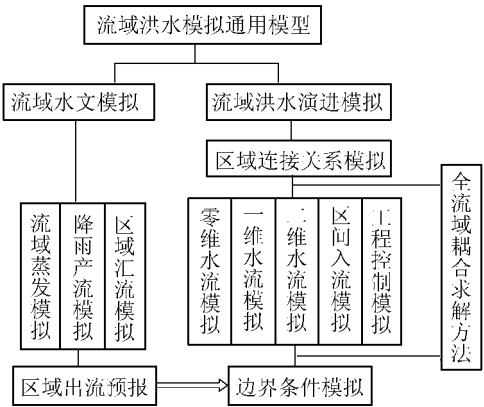


图 1 流域洪水模拟通用模型结构

Fig.1 Structure of universal model for basin flood simulation

4 实 例

将以上讨论的流域洪水模型结构应用于淮河流域蚌埠—洪泽湖洪水模拟,其计算流域概化如下:

- a. 淮河干流具有大断面资料,用一维算法进行模拟,沿淮干主要有北淝河口和五河口 2 片无资料区,概化为 2 个零维单元,通过连接构件与淮干相连接.
- b. 沿淮河两岸的方邱湖、临北段、花园湖、香浮段、潘村洼、腰滩、蛤滩、西滩 8 个行洪区,具有行洪作用,必须考虑流速的变化,则用二维算法进行模拟.以 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 作为计算单元,则方邱湖划分为 326 个单元,临北段划分为 111 个单元,花园湖划分为 920 个单元,香浮段划分为 184 个单元,潘村洼划分为 570 个单元,腰滩划分为 63 个单元,蛤滩划分为 44 个单元,西滩划分为 52 个单元.各行洪区通过各自的上下口门与淮干相连接,用宽顶堰型连接构件模拟口门的水量交换.
- c. 沿洪泽湖四周概化为 27 条河道,用一维方法进行模拟;女山湖、七里湖、陡湖及沿洪泽湖四周的 380 个圩区,主要模拟对象为调蓄量和水位的变化,则用零维算法进行模拟.

洪泽湖是典型的二维区域,湖面宽阔,水面积 $1\,500\text{ km}^2$,必须考虑风应力和柯氏力的影响,故采用完全的二维算法进行模拟^[7].以 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 作为单元,共划分为 6 174 个计算单元.

通过以上概化,建立了一个包含 582 个计算断面、428 个连接构件、9 026 个计算节点的洪水计算模型(图 2).

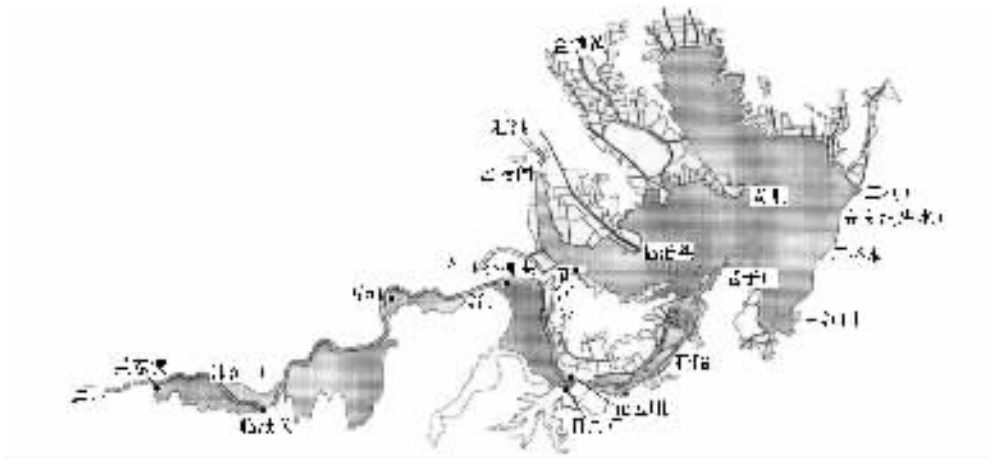


图 2 计算流域概化
Fig.2 Sketch of basin computation

根据 1991 年淮河流域的水文资料,蚌埠以实测流量作为边界条件,区间产流用新安江模型进行模拟,洪泽湖三河闸以实测水位过程作为边界条件.通过模拟计算,得到了淮干沿程水位和洪泽湖周边水位,如图 3 所示.

从图 3 可以看出,计算水位与实测水位过程非常吻合.据统计,各站计算峰值水位与实测峰值水位的差都在 5 cm 以内,表示计算水位过程与实测水位过程拟合程度的确定性系数均超过 0.981.这表明,本文模型能模拟流域实际洪水运动.

5 结 语

本文首先提出流域由流域特征对象组成、特征对象由基本元素组成和流域水流由水位场确定的基本概念,然后选择抽象的节点水位为基本变量,通过流域基本元素的水量交换函数,采用隐式耦合连接方式,形成节点水位求解方程,从而建立了全流域耦合求解的流域洪水模拟通用模型.该模型可分解为流域水文模拟模型和洪水演进模拟模型.流域水文模拟模型可解决降雨产流模拟问题,为洪水演进模拟提供入流边界条件.流域洪水演进模拟模型可模拟洪水在流域中的运动规律.实例验证表明,流域洪水模拟通用模型具有较高的模拟精度,可推广应用于一般性流域.

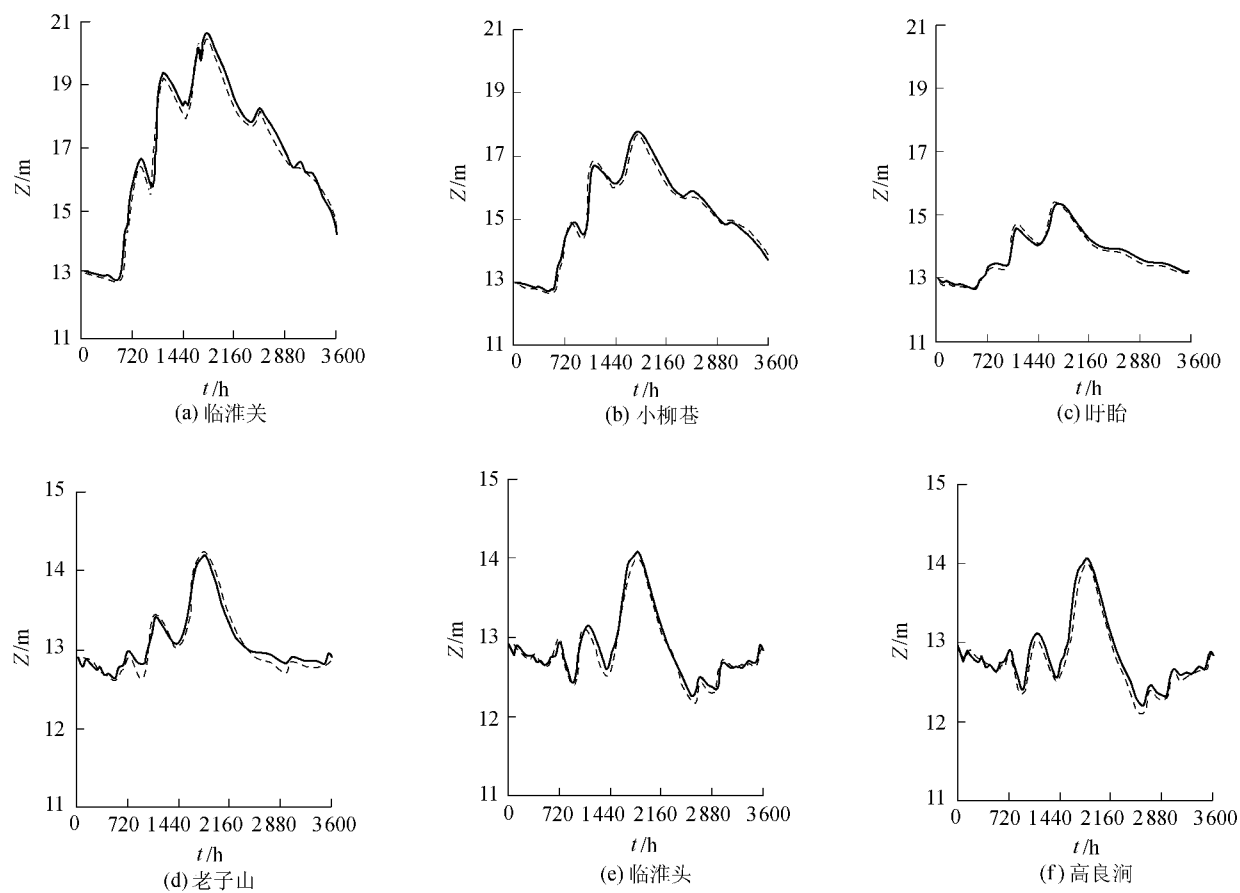


图 3 计算水位与实测水位的比较
Fig.3 Comparison of water level course obtained by computation and observation

参考文献：

[1] 李光炽. 流域洪水演进模型及其参数反问题研究 [D]. 南京: 河海大学, 2001.
[2] 谭维炎, 胡四一, 王银堂, 等. 长江中游洞庭湖防洪系统水流模拟 [J]. 水科学进展, 1996 (4) 336—353.
[3] 李光炽, 王船海. 大型河网水流模拟的矩阵标识法 [J]. 河海大学学报, 1995 23 (1) 36—43.
[4] 李光炽, 王船海. 内涝型流域洪灾洪水模拟 [J]. 成都科技大学学报, 1995 (1) 87—96.
[5] 王船海, 李光炽. 行洪区型流域洪水模拟 [J]. 成都科技大学学报, 1995 (2) 6—14.
[6] 王船海, 李光炽. 流域洪水模拟 [J]. 水利学报, 1996 (3) 44—50.
[7] 李光炽, 王船海, 周晶晏. 二维流场模拟的矩阵标识法 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002 30 (5) 80—84.

Study on the structure of the universal model for river basin flood simulation

LI Guang-chi

(College of Water Resources and Environment , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract Based on an analysis of the river basin flood characteristics , it is proposed that a river basin can be divided into a series of objectives with different characteristics. The objectives consist of basic elements , and the flood evolution in the river basin depends on the water stage field. Then , with the nodal water stage taken as the basic variable , a universal model for river basin flood simulation is established by use of the inter-element water volume exchange function and the data driving mechanism. The feasibility of the model is verified by some examples.

Key words river basin ; flood simulation ; structure of the universal model