

我国东南沿海中小流域洪水模拟研究*

许有鹏 都金康 王腊春 周寅康

(南京大学城市与资源系, 南京 210093)

提 要 我国东南沿海多为独流入海的中小流域, 河流短小, 流域调节能力弱. 该区洪水历时较短, 但危害较大, 加之近年来区内经济的迅速发展, 洪水造成的损失日趋加剧, 因此开展此区洪水特性和防洪减灾研究意义重大. 本文以中国东南沿海曹娥江流域为典型, 根据中小流域洪水的特点, 在初步分析流域降雨径流的成因和洪水演进规律的基础上, 开展了流域洪水模拟研究, 选择建立了流域降雨径流模型以及洪水演进模型, 重点探讨了利用遥感信息和 GIS 相结合确定水文模型参数的方法和途径, 经实验流域资料检验分析, 其模拟结果计算精度满足要求. 该研究将有助于该区流域降雨径流特性及洪水演变规律的深入研究, 同时为东南沿海中小流域洪水模拟预测和防洪减灾研究提供了经验和模式.

关键词 洪水模拟 模型参数 遥感和 GIS 中小流域 东南沿海
分类号

1 前言

洪水灾害是当今世界上主要的自然灾害, 每年因洪水而造成的损失占自然灾害损失的 40% 以上. 我国也是一个洪涝灾害频繁发生的国家, 几乎每年都要遭受洪水灾害威胁, 并且随着社会经济的发展, 洪水灾害的损失日趋严重. 因此开展流域洪水特征规律和防洪减灾研究日趋重要. 同时随着计算机模拟技术、现代遥感遥测技术、地理信息系统等现代科学技术的发展, 为流域洪水模拟和预测技术提高创造了条件^[1].

我国东南沿海多为丘陵山地, 水系上均属中小流域河流, 这里经济发达, 河流受潮汐影响大, 所形成的洪水往往是陡涨陡落, 洪水过程较短、流速快、洪水不易控制且破坏力大, 洪涝灾害的损失也较为严重. 为此本文选择了我国东南沿海中小流域为实验区, 以遥感和 GIS 作支持, 开展中小流域洪水模拟研究, 探讨遥感和 GIS 信息辅助确定不同类型洪水参数、辅助进行洪水淹没模拟的计算分析研究, 经检验研究成果基本满意. 该研究为东南沿海中小流域洪水模拟预警和防洪减灾研究创造了条件.

实验流域位于曹娥江的支流新昌江流域, 流域面积 276km², 流域植被以马尾松和新炭林为主, 其次是松杉竹混交林, 覆盖较好, 生长茂盛, 水土保持良好. 耕地以旱地为主, 有少量水田, 流域土壤大部分为轻壤土和沙壤土, 其次是粘土和黄土, 土壤发育较好. 流

* 国家自然科学基金(49771020, 40171015)资助.

2003-08-19 收稿; 2004-09-02 收修改稿. 许有鹏, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: xuyup@jlonline.com

域内基岩主要为火山凝灰岩和变质岩。流域呈扇型水系，河流为山溪性河流，源短流急，洪水传播快，汇流时间短，流域洪水汇流时间一般为 3-4h。

2 中小流域洪水模拟分析

2.1 流域洪水模拟分析

流域水文动态过程是气象因素和下垫面综合作用的结果，流域中地表水和地下水的动态过程既受控于流域降雨和蒸发等气象因素，同时也受流域内地貌、土壤、植被等自然地理因素的影响。因此，流域洪水模拟研究均从这两方面着手，根据径流形成原理，开展流域水文模型和参数研究，并在此基础上利用模型模拟和预测流域的洪水过程。

目前暴雨洪水模拟分析主要采用水文学和水力学研究的方法，对洪水的洪峰流量、洪水总量和洪水历时等特征要素进行模拟分析，对于流域的降雨径流模拟计算，一般采用概念性水文模型来进行洪水过程模拟，而平原河道洪水演算和平原洪水淹没计算常采用简化的水力学模型。模型一般用其结构反映降雨径流规律，而用参数反映流域下垫面特征，而人类活动影响则在模型中加以综合反映。

用于降雨径流模拟的确定性水文模型一般具有一定物理概念，模型是以径流形成的物理机制为出发点，通过模型转换计算，由降雨的输入最后形成径流的输出。也就是模型根据水量平衡原理，利用模型结构和参数来反映降雨经过流域入渗、蒸发、地面径流和地下径流的各环节，并利用模型参数来综合反映下垫面地质、地貌、植被和土壤等下垫面因素对上述径流形成各环节的影响。当模型应用于不同的流域时，模型参数必须根据该流域特征加以确定。其中较著名的模型有 Stanford 模型、Sacramento 模型，我国新安江和陕北模型等等。在河道及洪泛区洪水演进方面，以非稳定流方程为基础的不稳定流数值计算随着计算机高速发展，也得到较广泛应用。

2.2 流域暴雨洪水模型的选用

本次降雨径流模拟主要选用三水源新安江模型，根据该模型参数物理意义，探讨了利用遥感信息和 GIS 相结合直接或辅助确定模型参数的方法和途径。并利用水文模型，结合气象资料，进行中小流域洪水模拟计算研究。

新安江三水源模型的特点是结构合理，概念清晰，计算精度较高。该模型结构主要包括蒸散发计算、产流量计算、分水源计算和汇流计算四大部分^[2]。在产流量计算中，模型采用“蓄满产流”模式。在分水源计算，模型把总径流划分为地表径流、地下径流以及壤中流三种水源。在汇流计算中，壤中流 RI 和地下径流 RG 对河网的总汇流，都可用线性水库来模拟。地表径流的汇流计算采用无因次单位线或滞后演算法进行计算。

该模型中的主要 15 个参数大多具有一定的物理意义，但由于观察手段限制，许多参数一般不能通过观测取得，只能通过参数率定方法，利用实测降雨径流资料，在参数物理意义范围内率定求得。该模型参数分为四个层次：(1)蒸散发层，包括 K 、 WUM 、 WLM 、 C 四个参数，这些参数主要影响长时段内的产流总量；(2)产流量层，包括 WM 、 B 、 IM ，此层参数主要影响产流量的大小；(3)分水源层，包括 SM 、 EX 、 KG 、 KI ，此层主要影响模型中各种水源的划分；(4)汇流层，包括 CG 、 CI 、 L 、 CS ，在这层中将流域面上各种水源的产流过程汇集成为流域出口流量过程。上述参数中较敏感的参数主要有： K 、 KG 、 KI 、 CG 、

C 、 SM 、 CS 、 L 等八个参数，模型参数确定中重点分析优选这几个参数。

2.3 流域下游洪水演进模型

东南沿海中小流域洪水淹没主要发生在流域中下游冲洪积平原上，洪水一般以漫淹为主。当洪水泛滥以后，水流扩散，受平原微地形影响，行洪速度十分缓慢。研究区均为独流入海的中小流域，洪水过程和淹没时间一般不长，但若遇天文高潮或台风风暴潮增水影响，造成与洪水顶托，则整个平原洪泛区将被洪水淹没，且退水迟缓，淹没历时长，可能导致更大范围洪潮水灾害。本文主要在这些平原上开展洪水淹没模拟分析。

平原洪泛区洪水淹没演进分析主要依据水动力学方法，依据动量守恒和质量守恒原理所得出的两个基本方程，即连续方程和运动方程。将二维不稳定流的基本方程采用柱体积分，变换为面积分后，可得到如下形式的基本方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{\Delta x} M \Big|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{\Delta y} N \Big|_{y_i}^{y_{i+1}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\Delta x}{U} M \Big|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{\Delta y}{V} N \Big|_{y_i}^{y_{i+1}} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{xb}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\Delta x}{U} M \Big|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{\Delta y}{V} N \Big|_{y_i}^{y_{i+1}} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{yb}}{\rho} \quad (3)$$

式中： h 为柱体平均水深； U 、 V 分别为 x 、 y 方向的平均流速； M 、 N 分别为 x 、 y 方向的单宽流量，显然 $M=U \cdot h$ ， $N=V \cdot h$ ； H 为水面高程； τ_{xb} 、 τ_{yb} 分别为 x 、 y 方向的床面剪切应力； ρ 为水的密度；在泛滥洪水计算中，省略式中比重较小一些项，就可得出简化的洪水淹没计算的差分方程^[3]。

3 遥感和GIS在模拟模型参数确定中应用

3.1 遥感信息与水文模型参数

在概念性模型中，模型参数确定的正确与否对模型模拟精度影响较大。目前所采用的利用流域的实测水文资料对参数率定的方法，往往使模型参数就失去了原有物理意义，在一定程度上也就影响了模型的应用。本文拟采用将水文模型和遥感信息相结合，在GIS支持下，利用遥感信息确定或辅助确定模型中的有关参数^[4]。该方法可为广大缺乏资料的中小流域水文模型的应用以及参数推求创造了条件，对中小流域洪水模拟具有重要意义。

随着遥感技术的发展，信息所具有的整体性好、分辨率高，且快速、准确的特点日趋显著。并且遥感技术所获得的流域下垫面信息，不仅反映了流域植被覆盖、土壤类型和土壤含水量特征，而且还反映了这些因素的各种组合以及相互作用情况。利用遥感信息确定的水文参数要比从常规单一图件提取的参数具有更多的优越性。它可以综合分析下垫面因素对模型参数的影响，更好地保持模型参数的原有特性，可减少模型参数的率定工作量。

由于目前遥感技术不能直接量测出水文变量的数值，而是记录了综合反映流域下垫面特征的光谱信息，所以水文遥感的任务首先是要将这些光谱信息转变成有用的水文信息。

3.2 利用遥感和GIS确定模型参数

本文以Landsat TM 影像信息为主要信息源，主要采用数据图像处理并结合GIS空间数据库支持来分析确定水文模型的大部分参数，少数参数仍采用经验方法推求，整个参数推求如图1所示。

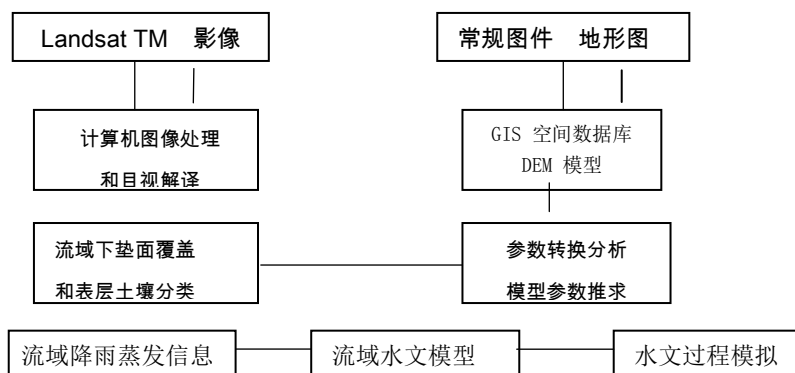


图1 利用遥感信息和 GIS确定模型参数框图

Fig.1 Flowchart of model parameters derived from remote sensing and GIS

3.2.1 流域下垫面覆盖分类和按水文特性的土壤分类 遥感信息源选用1987年5月18日的Landsat TM1-7波段影像磁带，首先进行数字图像处理分析，获得流域下垫面覆盖类型图^⑤。考虑地表覆盖类型对模型参数影响，本次地表覆盖类型分为耕地、覆盖好的林地(森林覆盖率大于50%的林地)、覆盖差的林地(森林覆盖率为30%-50%的林地)、疏林草灌、居民地和裸地、水体共六类。

考虑流域内不同土壤特性对模型中土壤含水量有关参数的影响，特将流域土壤按水文特性进行分类。主要依据各时期有关常规图件，按土壤按质地以及渗透特性分为三个类型，分析时将砂土和砂壤土定为I类，将壤土和粘壤土定为II类，而III类则包括粉粘土和壤土。将流域土壤分布类型输入GIS空间数据库中，同时将实验流域河网水系、地形等高线等输入空间数据库中，建立DEM模型。在GIS支持下，将流域下垫面覆盖类型图和土壤类型图相叠加，分析出流域不同覆盖类型下的不同土壤类型情况，并进行相应类型面积统计，从而获得流域各种覆盖类型以及土壤类型的面积比重(表1)。流域中这些类型面积差异反映了下垫面对径流影响空间分异。

表1 流域地表覆盖类型及土壤类型分类(%)

Tab. 1 Classification of land cover and soil type in the basin

	砂壤土	壤土	粘土
I 耕地	0.52	4.25	5.23
II ₁ 覆盖好林地	4.13	39.92	32.12
II ₂ 覆盖差林地	0	6.78	3.22
III 草灌地	0	1.49	0.56
IV 居民地、裸地	0	0.07	0.07
V 水体		2.29	

3.2.2 模型参数推求分析 根据选用模型参数物理意义，按照上述基于遥感和GIS的下垫

面覆盖和土壤分类信息,分别采用了直接推求、间接辅助推求以及人工经验推求等多种方式推求模型参数值^[6,7]。流域不透水面积IM则直接从分类中直接求得。模型张力水最大容量WM按定义即田间持水量概念。首先推求不同土壤的WM值。根据流域特性及实验观测资料将本流域土壤层上层定为20cm,下层定为50cm,深层定为15cm,由此推求出每种土壤类型各层张力水最大值。分水源计算中表层自由水容量参数SM和各种土壤的全持水量有关,为此各种土壤中SM推求,上中层考虑了土壤全持水量特性,下层则根据研究重点参考了岩性情况,最后按各层厚度加权平均。自由水库对地下水出流系数KG则根据各土壤稳定下渗率数值加以推求。

由于所选用的模型为集中参数模型,故所推求参数应转换为全流域平均参数。为此在流域内同一覆盖类型中,将不同类型土壤所推求的参数值按其面积权重比例 β_j 求得其参数值。考虑到下垫面覆盖类型的差异对径流形成有显著影响,根据实验观测结果和计算经验,对各种覆盖类型中参数分别乘以不同的影响系数 α_i ,最后再按各覆盖类型所占比重 γ_i 求得整个流域参数值。其计算式为:

$$Eptr_k = \sum \gamma_i \alpha_i \sum \beta_j \times ptr_{ijk} \quad (k=1, \dots, 5)$$

式中: ptr_{ijk} 为模型的k个参数在i类覆盖j类土壤类型中的参数值, $Eptr_k$ 则为k个参数全流域平均值,据此式主要推求了WM, WUM, WLM, SM, KG五个参数。自由水库对壤中流出流系数K的推求,则考虑到自由水库壤中流一般三天左右时间可基本退出,即 $KG+K=0.7$,蒸散发能力折算系数k则借助于GIS中DEM模型推算出流域平均高程,然后和观测点高程相比较,求得校正折算系数 $K=0.98$ 。汇流计算中滞后演算法中的参数,河网消退系数CS以及河网汇流滞后时间L,选用时变线性汇流模型,根据遥感和GIS所推求的流域河网和地貌特性加以推求^[2]。其它水文参数根据计算经验加以分析确定: $B=0.25$; $C=0.15$; $EX=1.5$; $CG=0.95$; $C=0.7$ 。利用遥感和GIS确定的模型参数见表2。

表2 基于遥感和GIS的模型参数值

Tab. 2 Model parameter values derived from remote sensing and GIS

IM	WM	WUM	WLM	WDM	SM	KG	KI	K	CS	L
0.024	90	24	48	18	34.5	0.287	0.413	0.98	0.45	1

3.3 GIS支持下洪水模拟计算

洪水淹没数值模拟分析,主要是应用简化了的流体运动的基本方程,利用差分的方法进行数值计算。求出洪水在各运动时刻的解,包括流速、流向和水深。计算时,首先划定模型的模拟范围,将模拟范围划分为计算网格,并要考虑各网格的内部条件(如糙率、土地利用情况等)和边界条件(如堤防、公路、铁路等),通过计算可模拟各种规模洪水时的淹没情况。模拟时,首先建立以流域地形等高线和淹没等深线为基础的数字地形模型,然后通过二维不稳定流模型的数值计算出最大淹没影响水深和范围,然后将影响范围和DEM的拓扑叠加而得到洪水淹没范围模拟成果图。

在进行上述模型数值计算时,首先确定计算区域范围、边界条件、初始条件、有关物理和控制参数。利用区域内等高线、水系、水利工程分布图、土地利用图、道路、居民地

分布图等基础数据,借助 GIS 生成模拟计算网格.当模型初始条件及物理参数格网产生以后,须赋予每个计算单位初始状态,包括 x, y 向初始流速,水面高程或水深等.物理参数主要为计算单元的底高程以及查曼宁(糙率)系数等参数.对于计算单元底高程,利用计算区域内的等高线数据,采用合适的内插方法,计算出格网中心点或格网结点的高程值;而各计算单元的曼宁系数的选取主要利用计算区域内的土地利用图,根据不同的下垫面状况,给相应的计算单元内插出合适的曼宁系数 n .其他演算参数有:演算时段控制参数,起始计算时间、终止计算时间、计算时间步长等;结果输出控制参数、控制结果文件输出的时间步长间隔数.对已知水深洪水的淹没范围的确定,借助 GIS 系统的帮助,将计算结果和 DEM 叠加,由系统确定已知水深的洪水的淹没范围.

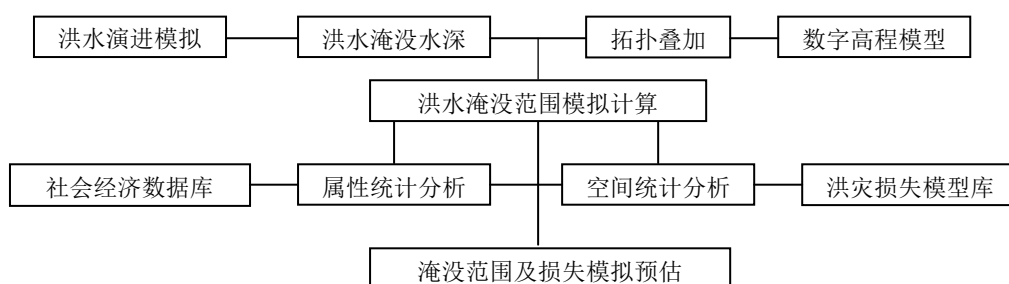


图 4 洪水淹没模拟及灾情预估流程

Fig. 4 Flow chart of flood-submerged simulation and damage evaluation

4 实验区验证情况分析

4.1 流域降雨径流模拟

以实验流域1986-1990年日降雨径流资料以及其间台风期 8场洪水资料为例,根据上述基于遥感和GIS所确定的参数值,利用新安江三水源模型进行了日径流和次洪水模拟计算的分析检验.在日模型中,其年径流模拟误差一般在5%以内.次洪水模拟计算成果见表3,从表中看出次洪水模拟计算成果也基本满足精度要求.因此利用遥感信息结合GIS的帮助分析确定新安江模型参数是基本可行的,精度基本可以满足要求.

4.2 实验区洪水淹没模拟

本次主要选择了研究区下游的洪泛平原区,开展洪水淹没模拟研究,实验区域面积为232 km²,按100米间距内插网格点,借助流域防汛地理信息系统的帮助,流域内水力特性参数取自当地水利、水文部门实测数据,平原内土地利用情况通过GIS系统来确定,下垫面糙率系数分别取为:村庄0.07;树丛0.065;旱田0.060;水田0.050;裸地0.035;河道及水面0.035.

在系统模拟运算时,当系统根据上游降雨径流预报得出流量超出警戒,平原河道入口处水位高出河床,并发生满溢时,即采用该模型进行模拟预测,模拟分析出平原淹没区内最高水位,最大水深,借助GIS帮助推求出淹没区范围,结合社会经济数据库,统计淹没

区内社会经济情况和可能损失情况,为防洪减灾调度提供参考.经上述几场洪水淹没模拟计算分析,经检验所模拟的洪水淹没范围和实际情况基本一致.

表3 次洪水模拟计算误差统计

Tab. 3 Error statistics of flood simulation of the model

洪水号	总量差 (m ³ /s)	相对误差 (%)	计算洪峰 (m ³ /s)	峰差 (m ³ /s)	峰相对差 (%)	滞时差 (h)	ABS (%)	LOG (%)
8609	-284.22	-0.143	93.81	-2.19	-0.023	-2	0.369	0.132
8709	245.90	0.021	799.57	132.57	0.199	3	0.345	0.110
8908	-1152.95	-0.245	141.57	-17.43	-0.110	1	0.257	0.084
8991	332.08	0.089	112.74	-1.26	-0.011	-2	0.385	0.126
8992	-2153.64	-0.251	256.75	85.25	0.249	0	0.384	0.119
8993	-166.77	-0.024	697.14	-202.86	-0.225	1	0.184	0.072
9081	-446.07	-0.169	188.59	-21.41	-0.102	1	0.226	0.082
9082	252.72	0.012	986.93	-18.07	-0.018	1	0.187	0.072
总平均:	相对误差: 0.146	峰相对误差: 0.127	ABS: 0.270	LOG: 0.099				

5 结语

本文以我国东南沿海中小流域为例,开展了流域暴雨洪水模拟以及流域下游洪水淹没模拟综合研究,探讨了利用遥感和GIS信息辅助确定概念性模型参数以及辅助二维洪水淹没计算的方法和途径.该研究将有利于中小流域等缺乏水文资料地区参数确定和水文模型的应用,同时有利于概念性水文模型,特别是分布参数模型的深入研究.此外该研究将为中小流域防洪减灾研究创造了条件.

参 考 文 献

- Schultz G A. Remote sensing in hydrology. *Journal of Hydrology*, 1988, **100**(1):239-265
- 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析. *水文*, 1988, (6):2-9
- 刘树坤,李小佩,李仕功等. 小清河分洪区洪水演进的数值模拟. *水科学进展*, 1991, **2**(3):188-193
- 万洪涛,陈德清. GIS支持下的洪水模拟概念模型. *地理研究*, 1998, **17**(增刊): 62-70
- 许有鹏,陈钦峦,朱静玉. 遥感信息在水文动态模拟中的应用. *水科学进展*, 1995, **6**(2):156-161
- Bhaskar N R, James W P, Devulapalli R S. Hydrologic parameter estimation using geographic information system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1992, **118**(5):492-512
- Pietroniro W. Remote sensing applications in hydrological modeling. *Hydrological Sciences Journal*, 1996, **41**(4):563-591

Research of Flood Simulation in Coastal Medium and Small Basin in Southeast China

XU Youpeng, DU Jinkang, WANG Lachun & ZHOU Yinkang

(Department of Urban and Resources Science, Nanjing University 210093, Nanjing, P. R. China.)

Abstracts

In southeast China coastal areas there are many rivers of medium or small size that flow into the sea separately. Because the length of rivers is short and the area of basin is small, their flood regulation and storage capacities are low, duration of flow concentration is short, and therefore flood hazard is grave. Especially in recent years, with rapid expansion in regional economy, losses of flooding have also been drastically increased. Thus, it is significant to develop the research of flood characteristics and prevent flood to reduce calamity. In this paper, taking Chinese southeast coastal Cao-E river catchments as typical case, on basis of the characteristic of flood in medium and small basin, the cause of rainfall runoff and flood routing law are being preliminary to analyses. Flood simulated research of basin have been developed, and rainfall runoff model as well as flood routing model are built. Last the paper emphasis on the approaches and methods that model parameters are derived from the information of remote sensing and GIS are discussed, the calculate precision of models is factory requirement by inspection analysis in experiment catchments. This research will be helpful for the research of rainfall runoff characteristics and flood process simulation. Meanwhile, this research will provide valuable information and a mode for flood simulated forecast with prevent flood to reduce calamity research in the medium and small basin.

Keywords: Flood simulation; model parameters; remote sensing and GIS; medium and small basin; southeast coastal area in China