

# 基于水文水动力耦合模型的 铜山城区洪水预报研究

佟保根, 王晓君

(徐州市铜山区水务局, 江苏 徐州 221100)

**摘要:** 研究在降雨径流模型的基础上耦合一、二维水动力学模型, 构建了铜山城区水文水动力耦合河道洪水预报模型。利用降雨径流模型模拟计算重点防洪河道上游断面的流量过程作为水动力学模型的边界条件, 进行河道洪水演进计算, 滚动预报河道重点防洪断面的水位与流量过程, 实现河道洪水和可能的地表洪水演进实时分析和预报, 结合多场次历史洪水资料进行率定和验证, 结果表明模型可对铜山城区洪水进行较好模拟, 对支撑“降水-产流-汇流-演进”全过程推演、提升铜山城区防洪“四预”能力具有重要现实意义。

**关键词:** 洪水预报; 降雨径流模型; 水动力模型; 铜山城区

中图分类号: TV21

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)09-0001-0004

## Research on flood forecasting in Tongshan urban area based on the coupling model of hydrology and hydrodynamics

TONG Baogen, WANG Xiaojun

(Tongshan District Water Bureau of Xuzhou City, Xuzhou 221100, China)

**Abstract:** A hydrological and hydrodynamic coupled river flood forecasting model for Tongshan urban area was constructed by coupling one and two dimensional hydrodynamic models based on the Rainfall runoff model. Using the Rainfall runoff model to simulate and calculate the flow process of the upstream section of the key flood control river as the boundary condition of the hydrodynamic model, the river flood routing calculation is carried out, and the water level and flow process of the key flood control section of the river are predicted in a rolling manner to achieve real-time analysis and prediction of river floods and possible surface floods. Combined with multiple historical flood data for calibration and verification, the results show that the model can simulate floods in Tongshan urban area well, which has important practical significance for supporting the whole process of “precipitation-production flow-convergence-evolution” and improving the “four predictions” ability of flood control in Tongshan urban area.

**Key words:** flood forecasting; Rainfall runoff model; hydrodynamic model; Tongshan urban area

### 1 概 述

我国地处季风气候区, 暴雨洪水集中, 城区洪涝问题突出, 充分利用洪水预报技术预判风险、规避风险, 实现减少人员伤亡、遏制经济损失一直是

城市防洪减灾研究的重点<sup>[1]</sup>。水利部强调, 要遵循“降水-产流-汇流-演进”规律, 加强“流域-干流-支流-断面”水文监测, 滚动更新洪水预报<sup>[2]</sup>。

当前广泛应用的都市雨洪预报方法可分为水文学方法、水动力学方法以及水文水动力学方法<sup>[3-6]</sup>。

收稿日期: 2024-06-17

作者简介: 佟保根(1966—), 正高级工程师, 硕士, 主要从事防汛抗旱水利水务科技网络安全信息化工作。E-mail: t8388@126.com

其中,水文水动力学方法兼顾了产汇流水文原理和洪水演进水力学特征,近年来受到了众多学者的关注<sup>[7-8]</sup>。孙嘉辉等<sup>[9]</sup>将降雨径流模型与一维水动力模型耦合后构建了青狮潭流域洪水预报模型,模拟结果表明该模型可应用于青狮潭流域洪水预报。薛娇等<sup>[10]</sup>采用基于紧密耦合的模型耦合方式,初步构建了珠江三角洲水文水动力耦合模型,对珠江三角洲的水流运动过程及其典型示范区产汇流过程进行了模拟,模拟结果证明该模型可为珠江三角洲洪水预报提供支撑。邓成等<sup>[11]</sup>基于暴雨洪水管理模型(SWMM)和二维水动力模型 LISFLOOD-FP 构建了深圳市典型区域水文水动力耦合模型,对典型暴雨下研究区的内涝时空演进过程进行较好地模拟。高英等<sup>[12]</sup>采用水文学与水动力学松耦合的建模方式,针对贾鲁河流域山丘区、平原区的城市地区和农村地区分别构建洪水预报模型,对降雨、产流、坡面汇流以及防洪保护区分洪、河道内水闸调度、河道洪水演进和淹没变化的全过程进行了模拟,精度较高。

铜山城区山丘众多,大小山有28座,占城区面积的1/6以上,多为馒头山,分散孤立,山脚下缺少拦山截水沟和滞蓄地,一旦发生洪水,则无任何缓冲、滞蓄的余地,滚坡而下,直泄城区,容易造成重灾,开展铜山城区洪水预报技术研究对防洪减灾具有重要意义。考虑到铜山城区水文地理特征及资料情况,本文采用模型输入要求适中的降雨径流NAM模型、一维河网水动力模型以及二维地表水动力模型构建铜山城区水文水动力耦合模型,分析该模型在铜山城区洪水模拟和预报中的可用性,以期在城市洪水防御决策提供技术支撑。

## 2 模型原理

### 2.1 降雨径流模型

降雨径流模型由丹麦理工大学水力动力工程学院的Nielsen和Hansen首次提出<sup>[13]</sup>。降雨径流模型基于水文循环的物理结构,同时又结合了一些经验、半经验公式,通过连续计算4个不同且相互影响的储水层的含水量来模拟产汇流过程。模型的各个参数和变量代表的是流域平均值(表1),模型参数和变量的初始值可以根据流域的自然特征初定,然后利用历史水文资料进行率定。

### 2.2 一维河网水动力模型

一维河网水动力模型利用一维非恒定流圣维南方程组来模拟河流的水流状态,采用四点加权Preissmann固定网格隐式差分格式离散方程,求解时采用迭代法。一维水动力模型沿河道网格布置有交错法(即水位、流量点交叉布置)和水位、流量同一网格布置法。本文采用水位、流量同一网格布置法。

一维非恒定流圣维南方程组基本方程为

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} + q_1 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} \left( \alpha_1 \frac{Q^2}{A} \right) + u_1 q_1 = -gA \left( \frac{\partial Z}{\partial X} + S_f \right) \quad (2)$$

式中: $X$ 为流程,m; $t$ 为时间,s; $Z$ 为水位,m; $Q$ 为流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $S_f$ 为水力坡度, $S_f = \frac{Q|Q|}{K^2}$ ;  $q_1$ 为单位流程上的侧向出流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ,负值表示流入; $u_1$ 为单位流程上的侧向出流速在主流方向的分量,m; $A$ 为过水断面面积, $\text{m}^2$ 。

表1 降雨径流模型主要参数及取值范围

参数	物理意义	取值范围
Lmax	浅层蓄水区最大含水量,表示植被根系蒸散发所需最大含水量	50~250 mm
Umax	地表蓄水区最大含水量,表示该蓄水区包含地表洼地截留、植被截留以及表层土壤储存的总含水量	5~25 mm
CQOF	地表径流系数,它决定剩余雨量进入地表径流或成为下渗量的分配比例	[0,1]
TOF	地表径流计算阈值,仅在浅层蓄水层的相对含水量大于TOF时产生	[0,1]
TIF	壤中流计算阈值,仅在浅层蓄水层的相对含水量超过TIF时产生	[0,1]
TG	地下径流计算阈值,植物根区储水层的相对含水量超过TG时产生	[0,1]
CKIF	壤中流出流时间,决定地表蓄水量中的壤中流数量的参数	500~1 000 h
CK1,CK2	地表径流、壤中流汇流时间常数,地表径流和壤中流汇流模型是采用同一时间常数的两个串联线性水库模型	3~48 h
CKBF	地下径流汇流时间,来自地下蓄水层的基流,是使用时间常数为CKBF的线性水库模型生成	500~5 000 h

### 2.3 二维地表水动力模型

根据研究区域特点,采用高性能格式建立适合复杂计算域和任意地形的二维水动力模型,模型计算采用无结构网格有限体积法,基于二维水动力模型构建流域淹没分析模型,分析溃口淹没以及流速流向的变化,对发生漫堤、溃口或分洪河段的相关区域,计算淹没区域范围、洪水演进过程。其原理介绍如下:

守恒型二维浅水方程与对流扩散方程耦合的矢量表达式为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \quad (3)$$

式中: $q=[h, hu, hv]^T$ ,为流量; $f(q)=[hu, hu^2 + gh^2/2, huv]^T$ ,为流量在 $x$ 向的通量向量; $g(q)=[hv, hv^2 + gh^2/2, huv]^T$ ,为流量在 $y$ 向的通量向量; $h$ 为水深; $u$ 和 $v$ 分别为 $x$ 方向和 $y$ 方向的垂线平均流速分量; $g$ 为重力加速度;源汇项 $b(q)$ 为

$$b(q)=[q_w, gh(s_{0x} - s_{fx}) + q_w u, gh(s_{0y} - s_{fy}) + q_w v, \nabla(D_i \nabla(hC_i)) - \mu_i hC_i + \mu_{i-1} hC_{i-1} + \mu_{i-2} hC_{i-2} + S_i]$$

式中, $s_{0x}$ 和 $s_{fx}$ 分别为 $x$ 方向的河底坡度及摩阻坡度; $s_{0y}$ 和 $s_{fy}$ 分别为 $y$ 方向的河底坡度及摩阻坡度,摩阻坡度由曼宁公式估算; $q_w$ 为单位时间内的净雨深; $D_i$ 为扩散系数; $\nabla$ 为梯度算子。

## 3 模型构建与验证

### 3.1 模型构建

铜山城区内奎河有4条主要支流包括楚河、玉泉河、焦山河和东风河。本次一维水动力模型概化的河网范围包括铜山城区的楚河、龙泉河、轿山湖、焦山河、铁路东沟、玉泉河、东风河(拦山河)、奎河8个干支流河段,水文分区如图1所示。采用降雨径流模型计算河道上游断面流量过程或区间流量过程,为反映区间较大支流、排涝泵站及雨水管道对防洪对象的影响,进行奎河洪水预报模型建设时需要考虑以上4条主要支流的流量和沿线泵站及雨水管道,作为集中入流汇入,其余小的支流作为旁侧入流形式汇入相应的主河道区段内。

二维地表水动力模型构建考虑重要城集镇区域,主要包含以下工作:

(1)网格划分,综合考虑二维建模范围边界(外边界)、内部线型阻水建筑物(高速公路、铁路)、河道堤防等,划分二维网格。为了精确模拟洪水,网格平均尺寸整体控制在100 m左右,重点关注区域

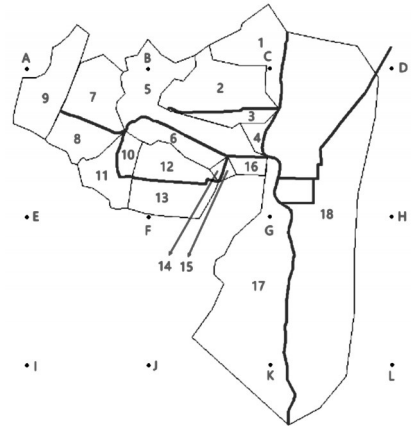


图1 水文分区

和河道近岸区域进行加密处理,平均尺寸控制在10 m左右。

(2)参数设置,二维模型参数设置主要包括地表糙率,将根据下垫面类型(草地、林地、裸土等)进行分类设置。二维地表水动力模型采用精细化建模方式,充分利用高精度地形数据,采用 $m$ 级甚至 $亚m$ 级的结构或非结构网格。

为实现河道漫堤、溃堤洪水的模拟,需要将一维河网水动力模型和二维地表水动力模型进行双向耦合。本文采用侧向连接(溃口、堤防、泛洪区等)方式耦合一维河网水动力模型和二维地表水动力模型,对于结构物(闸、泵、水库放流等)则采用结构物隐式链接,并精细化地考虑分洪口门调度启用规则。在未发生溃堤或漫堤时,进行一维河网水动力模型计算;当发生溃堤或漫堤后,开始进行一二维水动力耦合模型计算,通过一维河网水动力模型计算将联解界面处的水位传递给二维模型,进而根据二维模型计算得到溃口处的流量,再传递回给一维数学模型,水位流量的传递通过迭代控制误差。一二维水动力耦合模型联解示意图如图2所示。

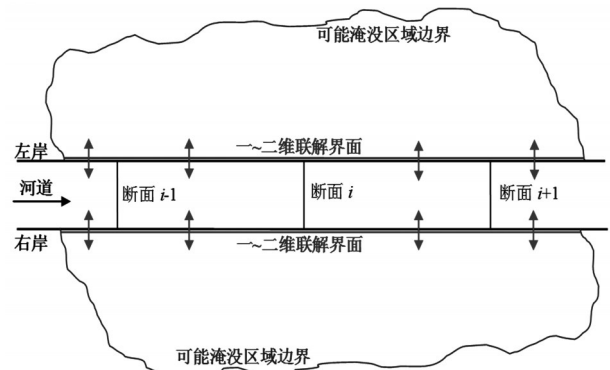


图2 一二维水动力耦合模型联解方式示意

### 3.2 模型率定与验证

采用优化算法自动率定和人工调参相结合的方式对模型参数进行率定,结果如表2所示。

选取2023年9月15—17日的典型洪水过程,对

铜山区水文水动力耦合模型进行了验证,对各主要断面3天预测模拟值与实测数据进行了对比,以奎河站为例,对比结果见图3,奎河站水位确定性系数为0.21,基本满足模型精度要求。

表2 模型主要参数率定结果

参数	Lmax/mm	Umax/mm	CQOF	TOF	TIF	TG	CKIF/h	CK1,CK2/h	CKBF/h
初始值	100	10	0.9	0.00	0.00	0.00	1 000	10	2 000
最小取值	100	10	0.1	0.00	0.00	0.00	200	10	1 000
最大取值	300	20	1.0	0.99	0.99	0.99	1 000	50	4 000

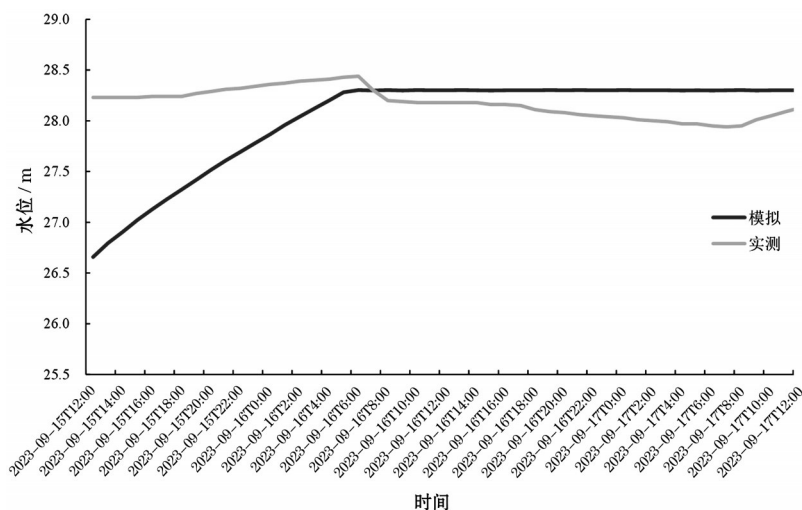


图3 奎河站一二维水动力耦合模型模拟值与实测值对比

## 4 结 论

本文尝试在降雨径流模型的基础上耦合一、二维水动力学模型,构建了铜山城区水文水动力耦合河道洪水预报模型,并选取典型洪水资料对模型模拟结果进行了率定和验证。结果表明,该模型可为强化铜山城区洪水预报、提升区域水灾害防御能力提供算法支撑。

#### 参考文献:

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.中国城市洪涝问题及成因分析[J].水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [2] 李国英.在水旱灾害防御工作视频会议上的讲话[J].中国防汛抗旱,2021,31(3):4-5.
- [3] 黄国如,陈文杰,喻海军.城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J].水科学进展,2021,32(3):334-344.
- [4] 刘成帅,韩臻悦,李想,等.基于BIC-KMeans和SWMM的城市雨洪快速模拟方法[J].水资源保护,2023,39(5):79-87.
- [5] 晁丽君,张珂,陈新宇,等.基于多源降水融合驱动的WRF-Hydro模型在中小河流洪水预报中的适用性[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):55-64.

- [6] 孙文字,姚成,刘志雨,等.秦淮河水文水动力模型及实时校正[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):26-33.
- [7] 宋利祥,徐宗学.城市暴雨内涝水文水动力耦合模型研究进展[J].北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(5):581-587.
- [8] 崔璨,董增川,罗赟,等.基于水文水动力模型的洪泽湖汛末蓄水策略智能优化设计[J].水资源保护,2023,39(4):143-151.
- [9] 孙嘉辉,梁藉,曾志强,等.耦合水动力模型的NAM模型在青狮潭流域的应用[J].中国农村水利水电,2018,(10):161-164.
- [10] 薛娇,廖小龙,钟逸轩,等.珠江三角洲水文水动力耦合模型研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(2):60-68.
- [11] 邓成,夏军,余敦先,等.基于水文水动力耦合模型的深圳市典型区域城市内涝模拟[J].武汉大学学报(工学版),2023,56(8):912-921.
- [12] 高英,王鹏,屈志刚,等.数字孪生贾鲁河流域洪水预报模型与应用[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(4):47-59.
- [13] 余有贵.NAM模型在珠江流域初步应用实践[J].人民珠江,2005(3):34-37.