



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2017.01.013

杨甜甜, 梁国华, 何斌, 等. 基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 72-78. YANG Tiantian, LIANG Guohua, HE Bin, et al. Study and application on flood forecasting model based on coupling hydrological hydrodynamic[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 72-78. (in Chinese)

基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用

杨甜甜, 梁国华, 何斌, 李莹芹

(大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了提高下垫面变化剧烈流域的洪水预报精度, 在传统流域水文模型的基础上耦合水动力学模型, 建立水文水动力耦合洪水预报模型。首先利用水文模型获得某一断面的流量过程作为水动力学模型的边界条件; 之后利用一维水动力学模型进行河道洪水演进计算, 推求流域出口断面的流量过程; 最后以烟台市外夹河流域为例进行验证。结果表明, 所建水文水动力耦合模型模拟的产流合格率较高, 流量过程与实测值吻合, 在一定程度上弥补了集总式水文模型不能考虑河道内复杂水流运动的不足, 因此对具有复杂水文、水力条件的流域的洪水预报具有重要的指导意义。

关键词: 大伙房流域模型; 一维水动力学模型; 水文水动力学耦合模型; 洪水预报

中图分类号: TV 122; P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0072-07

Study and application of a flood forecasting model based on coupled hydrological-hydrodynamic approach

YANG Tiantian, LIANG Guohua, HE Bin, LI Yingqin

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of flood forecasting in basins with dramatic changes in the base course, this paper proposes a coupled hydrological-hydrodynamic flood forecasting model which couples the traditional hydrological model with the one dimensional hydrodynamic model. First, the flow process of a section was obtained by the hydrological model and was used as the boundary condition of the one dimensional hydrodynamic model. Then the one dimensional hydrodynamic model was applied to simulate the flood routing in the river channel. The proposed method was tested on the Waijia River basin in Yantai City, China. The results indicate that the coupled model can simulate runoff yield with a high qualification rate, and generate flow processes that tally with the measured values. It can be concluded that this coupled hydrological-hydrodynamic model may make a significant contribution to flood forecasting in basins with complex hydrologic and hydraulic conditions thanks to its ability to model water movement in the basin.

Key words: DHF model; one dimensional hydrodynamic model; coupled hydrological-hydrodynamic model; flood forecasting

流域洪水预报作为洪水调度的基础, 是防洪减灾的一项重要非工程措施。20世纪60年代以来, 世界各国都投入大量人力物力研制了适用于本国流域特点的洪水预报模型^[1]。通常, 在模型中将流域径流过程分为产流和汇流两部分。相对产流而

言, 汇流过程不仅受产流过程的影响而且还受流域地形、河网、河道等多种因素的影响, 其规律多变不易描述。传统的集总式流域水文模型通常采用马斯京根法或其它水文学方法进行演进计算。但是, 由于仅能根据水量平衡方程和槽蓄方程进行流量计

收稿日期: 2016-01-06 修回日期: 2016-05-11 网络出版时间: 2017-01-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0919.002.html>

作者简介: 杨甜甜(1987-), 女, 山东泰安人, 主要从事洪水预报方面的研究。E-mail: tyang@mail.dlut.edu.cn

通讯作者: 何斌(1977-), 男, 浙江舟山人, 副教授, 博士, 主要从事水文预报方面的研究。E-mail: hebin@dlut.edu.cn

算,模拟结果往往不甚理想。尤其是在丘陵、平原混合区域,河道内水流运动受地形条件、上游来水、回水顶托等因素的影响,传统的洪水预报模型中河网汇流部分无法描述这些影响因素而导致流域出口断面的洪水预报精度降低^[27]。

国内外学者针对该问题进行了一些尝试和研究^[8-9],在水文学方法的实际应用中加入河道水流运动物理机制的描述,以求尽可能地反映流域汇流真实情况,通常借助计算机等工具求解圣维南方程组,得到河道内不同断面的流量和水位,进而补充传统洪水预报无法得到的信息,提高预报精度。然而,我国幅员辽阔,流域各有特点,洪水预报模型在实际应用上仍然存在着许多问题。因此,在充分考虑流域产流、汇流特点,研制适合流域实际情况的水文水动力学耦合的洪水预报模型,显得尤为重要。本文以烟台市外夹河流域为研究背景,在传统洪水预报的汇流部分加入计算水力学的求解方法,采用一维水动力学方法进行模拟,结合水文学模型构建水文水动力学耦合模型以弥补水文学模型不能考虑河道内复杂水流运动的不足。

1 耦合洪水预报模型的构建

1.1 水文模型

降雨径流是流域洪水的重要成因,水文模型是模拟流域上游区域以及中下游区间产、汇流过程的重要工具,在我国应用较广泛的主要是基于蓄满产流的新安江流域水文模型和基于超渗产流的大伙房流域模型^[10](DHF)。其中,DHF模型于1973年由辽宁省大伙房水库管理局提出,由产流和汇流两部分模型组成,是一种集总式概念性水文模型。其中,产流模型采用超渗产流机理进行计算,以抛物线描述流域表层蓄水容量的空间分配曲线,以霍尔登下渗曲线为基础亦采用抛物线描述双层下渗率分配曲线;汇流模型采用据多年预报经验总结得到的变强度、变汇流速度的经验单位线进行计算。DHF模型共16个产汇流参数,需优选确定的只有6个参数。整个模型结构合理,数学方程简单,便于计算运用,模型的模拟精度和检验精度较高,已在东北的桓仁、碧流河、石佛寺等10多个流域的洪水预报中得到良好的应用^[11-13]。

根据研究流域的特点,选择适用于北方干旱半干旱地区的DHF作为本文耦合模型中的水文模型部分来计算研究流域上游断面的出流,将其结果作为水动力学模型的输入条件。

1.2 水动力学模型

一维水动力学模型根据离散方式的不同有多种求解方法,包括特征线法、有限差分法、有限体积法等。其中有限差分法的Preissmann四点偏心隐格式在江河的洪水演进计算中应用最为广泛,且其计算精度、计算效率、稳定性完全满足本文模型需求。因此,采用Preissmann四点偏心隐格式对描述天然河道一维水流运动的圣维南方程组离散,使用追赶法对离散后方程组进行求解。根据不同的边界条件,可设不同递推关系,依次求得河道内各断面的水位、流量值^[14-16]。

水动力学模型的对象往往是一个大型、复杂的非恒定水流系统,为了尽可能真实地模拟实际河道中的水流运动状态,在应用时需要天然河道的水力学参数及模型的边界条件、初始条件、参数条件进行明确。

(1)天然河道地形复杂,断面形状不规则,给水力学参数的计算带来困难,在实际应用中通常将其进行概化,使其在基本符合断面形状变化的基础上又能降低模型复杂度提高计算效率。

(2)上游边界条件是非恒定流发生过程中,首断面应满足的水力条件。它常以流量过程线或水位过程线来表示,而下边界条件通常以水位过程线或水位流量关系曲线来表示。

(3)除特殊条件的处理外,模型要想稳定计算,必须给予能反映河道初始状态的水位、流量值,可以是恒定状态的,也可以是非恒定状态的。

(4)模型中的待定参数主要有反映固体边界作用的糙率系数,差分格式的权系数 θ ,时间步长和空间步长。河道的糙率因影响因素众多,很难准确求得,模型可在河道实际情况基础上给出糙率初值,然后根据计算结果进行优化;权系数直接影响模型稳定性和计算精度,一般选取大于等于0.6的强稳定状态;时间步长根据计算需求及稳定性要求可取30s、60s等;空间步长取两断面间距,为不等距步长,大约为100~500m,其中在河道断面形状变化较剧烈和弯道河段,距离步长较小,顺直河道距离步长较大,对断面间距较大者根据实际需求进行插值。

1.3 耦合模型构建方法

集总式水文模型专注于降雨、径流的产生过程和规律,将整个水文系统看作一个整体而进行研究,不考虑系统内部的不均匀性和河道水流运动规律。在流域下垫面均一、形状规则、区域内河网较简单、汇流规律较单一的情况下,单独使用集总式水文

模型进行洪水预报不仅可以降低模型复杂程度而且也能取得较为理想的结果。但是,大多数流域的下垫面不会一成不变,所以忽略水流运动规律的集总式水文模型无法满足工程需要,其预报精度会受地形、河网等影响。水动力学模型着重于河道水流运动规律的详实描述,可以反映河道内细微差别。因此,两者耦合使用正好可以弥补传统集总式水文模型的不足。

耦合模型的建立重点在其耦合方法上,本文选择连接的方式进行耦合,见图 1。采用大伙房流域水文模型进行河道上边界断面和各支流控制流域出口断面的流量过程的预测;将其计算结果作为上边界条件和内边界条件直接输入到一维水动力学模型中;一维水力学模型的数据不反馈输入到水文学模型,二者是单向输入的。

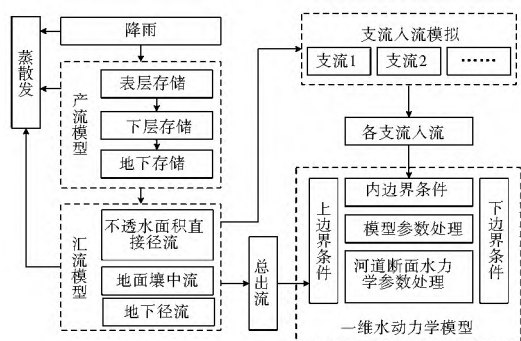


图 1 水文水动力耦合模型结构

Fig. 1 Structure of the coupled hydrological hydrodynamic model

2 耦合模型的应用

2.1 研究流域

烟台市外夹河流域(图 2)面积 $1\ 072\ \text{km}^2$, 平均长度 $60\ \text{km}$, 宽度 $15.5\ \text{km}$, 形状系数 0.26 , 上游宽、下游窄, 呈“梨”型; 河道干流全长 $64\ \text{km}$, 干流平均比降 1.32% 。流域为典型的丘陵、平原混合区域, 其上游谭家庄水文站以上区域和各支流上游区域主要为山地、丘陵区; 而谭家庄站与福山站之间以及主干河道两侧则多以平原、洼地为主, 因此不同下垫面条件导致区域内汇流时间有很大差异。同时, 福山水文站距离入海口仅有 $8\ \text{km}$, 河道水流受海潮顶托回水现象严重, 导致出口断面——福山水文站的洪水预报精度降低; 另外, 外夹河河道弯曲度大、河床多有突起, 极易壅水漫滩威胁两岸安全。

本文选取外夹河福山站以上流域建立大伙房流域模型和水文水动力耦合模型, 用于验证水文水动力学耦合模型的合理性和对洪水预报精度的改善。研究区域内有福山站、谭家庄站、古现村站、桃村站、

清泉埠站、铁口站 6 个雨量站, 均有长系列实测降雨资料; 应用大伙房流域模型和水文移置法进行研究区域的降雨径流模拟计算, 得到谭家庄水文站的流量过程和区域中谭家庄水文站与福山水文站间间的各支流流量过程, 作为水动力学模型的上边界条件和内边界条件。水动力学模型计算河段选择外夹河谭家庄水文站至福山水文站河段, 河段划分 121 个断面, 5 个特殊结点, 全长约 $27.9\ \text{km}$ 。谭家庄站、福山站是外夹河上比较大的水文站, 有实测水位、流量资料, 本文利用福山站来检验耦合模型的可靠性。

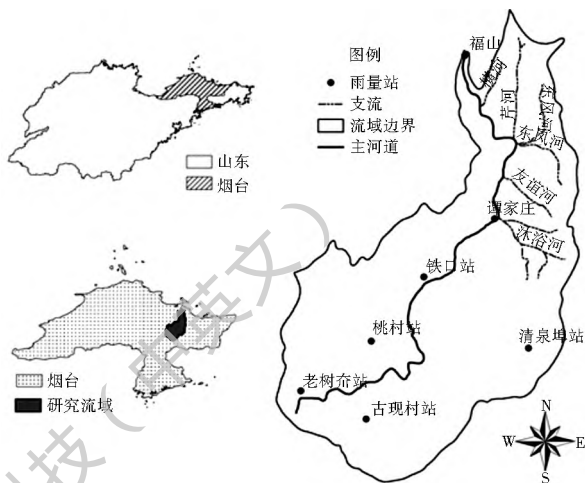


图 2 研究流域

Fig. 2 Location of the study area

2.2 模型条件处理

水文水动力学耦合模型中其产汇流特性及水流特征不光遵循特定理论, 还有一定的经验性, 单纯地注重数学模型的处理不足以保证模型模拟得到良好的效果, 还必须对研究区域及河段的特征信息进行补充并加以经验性的处理, 即需对实际工程情况进行特殊处理。

(1) 区间入流的处理。

研究区域中谭家庄水文站与福山水文站之间河段还有沐浴河、友谊河、东风河、芹河、横河 5 条支流入流, 但各支流流域控制面积较小, 河流短, 汛期洪量小, 并且缺少各支流实测断面资料及水文资料。为降低耦合模型中一维水动力学模型的复杂程度, 将其简化处理不做河网计算, 而是作为主干河道旁侧入流。因此, 需要对各支流流域进行降雨径流模拟, 出流直接耦合于水动力学模型。但是, 由于外夹河各支流缺乏实测水文资料, 并且各支流流量较小, 其入流对主干河道水量、峰现时间等影响不大, 因此不采用水文模型对各支流控制区域进行流量模拟, 而是采用水文移置的方法进行处理: 直接根据各支流控制面积和谭家庄以上区域的面积比, 移用谭家

庄水文站以上区域大伙房流域模型计算结果。其中,东风河与芹河入流点距离较近,为了降低模型复杂程度将其简化为一条支流来考虑。各支流控制流域面积与谭家庄以上区域面积比见表1。

表1 各支流流域面积

Tab. 1 The drainage area of each tributary

水动力学模型组成部分	区域名称	控制面积/km ²
上边界条件	谭家庄以上区域	760
支流入流	沐浴河	75
	友谊河	35
	东风河和芹河	125
	横河	24

(2) 河道断面处理。

本研究河段上游属于天然状态河槽,断面窄而深,基本无滩地、河心淤积带的存在,而下游处于城镇地带,人工修筑堤防并进行过大规模的河道治理,断面形状变化不剧烈。在本模型中,将上游断面的尖锐突起部分修整为规则的梯形或复式断面;而下游断面较为规则,将其概化为矩形、梯形或复式断面。由于研究河段的流量集中在主槽内,滩地的行洪流量较小,所以在本文计算中暂不考虑复式断面的水流差异。

(3) 模型边界条件处理。

福山水文站是研究河段外夹河与邻近清洋河汇合之前的一个控制站,同时也是水动力学模型的下边界,距入海口8 km。由于清洋河上游为门楼水库,汛期受水库泄洪及潮水顶托影响,存在死水及回水情况,增加了福山断面边界条件处理的复杂性。研究比较下列方案:A方案给定福山站水位流量关系;B方案给定福山水位过程;C方案给定福山流量过程。试算结果表明,福山边界条件的给定与模型计算的准确性及稳定性密切相关。若要强制给定福山水位过程或流量过程将致使水位与流量不协调,从而使计算失稳。考虑到本模型侧重于干流福山站流量、水位的精确预报,通过多种方案的比较最后选定的方案A。

(4) 模型初始条件处理。

模型中的水动力学部分采用恒定初始状态,即以任一初始水位,推算出各计算断面在足够长时间恒定流量(采用场次洪水初始时刻实测流量值)输入的情况下到达稳定状态下的河道内各断面处水位和流量,并以此值作为模型计算的初始值,进行非恒定流的计算。

(5) 模型参数条件处理。

水动力学模型的空间步长采用相邻断面间距离长度,为保证模型计算的稳定性及空间步长的合理性,对断面间距较大的按500 m的距离利用相邻断面进行插值。时间步长根据计算需求及稳定性要求取60 s,权重 θ 取0.8,既保证模型精度又计算稳定。根据研究河段现有资料情况以及精度、计算速度等的要求,研究河段上游基本处于天然河道状态,糙率取0.05;下游处于城镇地带,河床、岸壁的粗糙度小,糙率取0.028。

2.3 模型结果与分析

(1) 耦合模型模拟结果。

选用流域出口断面——福山水文站1976年—1990年期间资料完整性较好、有代表性的16场洪水进行模拟计算,从而验证所采用的水文水动力耦合模型能否有效地描述流域产汇流特性、能否真实反映河道的水流情况,模型参数及地形、断面的概化是否合理,以及对洪水预报精度是否有所改善。模拟结果如表2所示。

从耦合模型的产流模拟结果可知:a.其产流模拟仅有750813场次不合格,其余场次洪水径流深预报相对误差均在20%以内,合格率达94%;b.760629、790731、850726三个场次洪水总径流量预报偏大,原因为流域内塘坝、洼地等的截流作用未纳入水文模型中,导致在极度干旱情况下的产流量偏大;c.大部分场次洪水产流模拟值偏小,因为谭家庄上游区域内植被情况较好,下游区域为城镇,不透水面积大,而模型构建时对上、下游区域进行均一处理未考虑其下垫面的变化。

从耦合模型的汇流模拟结果可知:a.有15场洪水的洪峰流量和峰现时间的预报误差在允许范围内,合格率为94%;b.确定性系数有10场在0.7以上,只有730821场次洪水在0.5以下,流量过程拟合较好;c.从图3所示的4场典型洪水过程模拟结果看,耦合模型对于洪水流量过程整体上拟合良好,所确定的参数基本能反映流域产汇流特性以及河道水流特性;但是,对于峰前、峰后小洪水以及复峰型洪水反映不灵敏,如760818场次洪水的大洪峰前的小峰起峰不明显,850818场次洪水的退水拟合不好,分析原因是主干各支流入流进行了概化处理,未考虑其产汇流差异性。

综上所述,耦合模型产、汇流模拟合格率均为94%,且福山水文站模拟流量过程与实测值拟合良好,说明所建立的水文水动力耦合模型能够较好地反映流域的降雨-径流响应过程。

表 2 福山水文站耦合模型模拟结果

Tab. 2 Simulation results by the coupled hydrological hydrodynamic model at Fushan Station

洪号	前期土壤含水量 / mm	平均降雨 / mm	产流					汇流					确定性系数	
			实测 / mm	模拟 / mm	相对误差 (%)	绝对误差 / mm	是否合格	实测 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	模拟 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	绝对误差 / $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	相对误差 (%)	峰现时差 (时段)		是否合格
730821	34.5	74.2	21.1	19.2	9	-1.9	是	264	257	-7	2.65	1	是	0.36
730831	45.8	149.9	75	71.8	4.3	-3.2	是	1129	1030	-99	8.77	1	是	0.82
740813	80.4	89.1	61.9	54.12	12.57	-7.78	是	843	725	-118	14.00	2	是	0.85
750813	63	263.8	200.2	132.8	33.7	-67.4	否	1540	1306	-234	15.19	1	是	0.67
760629	10.4	113.7	25.5	29	13.7	3.5	是	267	313	46	17.23	0	是	0.87
760812	61.7	87.6	41.6	37.4	10.1	-4.2	是	454	413	-41	9.03	1	是	0.71
760818	97.5	106.6	69.9	58.8	15.88	-11.1	是	686	735	49	7.14	0	是	0.87
770805	58.2	129	62.5	57	8.8	-5.5	是	717	587	-130	18.13	1	是	0.78
780702	101.5	89.3	59.4	53.4	10.1	-6	是	626	623	-3	0.48	1	是	0.78
780815	39.5	85.1	48.4	40.7	15.9	-7.7	是	405	396	-9	2.22	1	是	0.79
790731	22.3	193.7	86	93.4	8.6	7.4	是	881	1164	283	32.12	3	否	0.55
820825	64.9	126.1	34.8	31.4	9.77	-3.4	是	428	505	77	17.99	0	是	0.65
850726	4	82.9	14.6	16.3	11.6	1.7	是	303	266	-37	12.21	0	是	0.64
850818	66.9	197	132	125.1	5.2	-6.9	是	878	911	33	3.76	1	是	0.82
870904	43.2	102.8	37.4	31.9	14.7	-5.5	是	480	426	-54	11.25	0	是	0.97
900724	102.6	98.9	61.7	58.2	5.67	-3.5	是	414	495	81	19.57	0	是	0.67

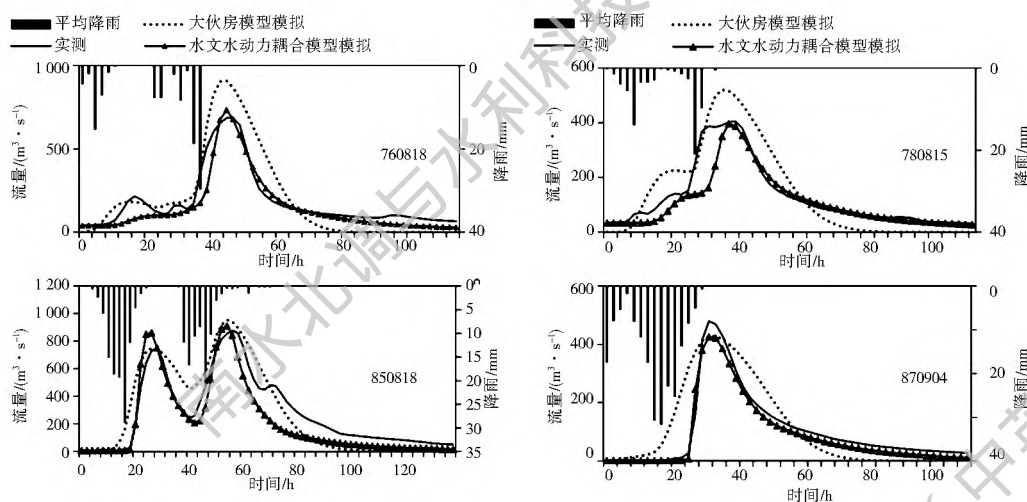


图 3 福山水文站典型场次洪水模拟与实测流量值的比较

Fig. 3 Comparison of the measured and simulated streamflow at Fushan Station

(2) 与大伙房模型结果对比分析。

单独使用大伙房模型对福山水文站以上流域进行场次洪水模拟, 其结果如表 3 所示。与水文水力耦合模型模拟结果进行对比分析可知:

a. 大伙房模型模拟的产流结果合格率为 81%, 低于耦合模型的 94%; 汇流模拟结果合格率只有 56%, 远低于耦合模型的 94%; b. 大伙房模型模拟的洪水过程确定性系数只有 7 场在 0.7 以上, 最高只有 0.85, 低于耦合模型的 0.97; 另有 820825 场次和 900724 场次洪水确定性系数过小,

说明大伙房模型对洪水过程的模拟偏差较大, 不能很好地反映流域汇流特性; c. 大伙房模型模拟的峰现时间大部分都有 1 个时段的差值, 其中 730831 场次洪水峰现时间差为 4 个时段, 预报不合格。d. 从图 3 所示的 4 场典型洪水过程模拟结果可以看出, 大伙房模型模拟的洪水流量过程与实际洪水拟合效果不是很好, 退水较快。

综上所述, 单纯地使用大伙房流域水文模型进行流域洪水模拟往往会影响到汇流的准确性, 而水动力学模型的加入使得汇流更加贴合流域实际情况。

表3 福山水文站大伙房模型计算结果

Tab. 3 Simulation results by DHF model at Fushan Station

洪号	前期土壤含水量 / mm	平均降雨 / mm	产流					汇流					确定性系数	
			实测 (mm)	模拟 / mm	相对误差 (%)	绝对误差 / mm	是否合格	实测 / (m ³ ·s ⁻¹)	模拟 / (m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差 / (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差 (%)	峰现时差 (时段)		是否合格
730821	34.5	74.2	21.1	23.4	11.0	2.3	是	264	268	1.5	4	1	是	0.62
730831	45.8	149.9	75	83.1	10.7	8.1	是	1129	1233	9.2	104	4	否	0.67
740813	80.4	89.1	61.9	45.9	25.8	-16.0	否	843	568	32.6	-275	1	否	0.50
750813	63	263.8	200.2	189.3	5.4	-10.9	是	1540	1841	19.5	301	1	是	0.78
760629	10.4	113.7	25.5	31.4	23.3	5.9	否	267	271	1.5	4	1	是	0.71
760812	61.7	87.6	41.6	38.4	7.7	-3.2	是	454	431	5.1	-23	2	是	0.82
760818	97.5	106.6	69.9	75.7	8.3	5.8	是	686	909	32.5	223	0	否	0.69
770805	58.2	129	62.5	62.8	0.5	0.3	是	717	715	0.3	-2	2	是	0.85
780702	101.5	89.3	59.4	65.1	9.6	5.7	是	626	776	24.0	150	0	否	0.75
780815	39.5	85.1	48.4	50.5	4.4	2.1	是	405	521	28.6	116	0	否	0.57
790731	22.3	193.7	86	89.7	4.4	3.7	是	881	844	4.2	-37	2	是	0.78
820825	64.9	126.1	34.8	65.1	87.0	30.3	否	428	738	72.4	310	1	否	-1.42
850726	4	82.9	14.6	16.4	12.4	1.8	是	303	368	21.5	65	1	否	0.61
850818	66.9	197	132	134.2	1.7	2.2	是	878	954	8.7	76	1	是	0.79
870904	43.2	102.8	37.4	42.2	12.8	4.8	是	480	428	10.8	-52	2	是	0.61
900724	102.6	98.9	61.7	69.3	12.3	7.6	是	414	483	16.7	69	1	是	0.25

(3) 1990年以后洪水模拟。

烟台市外夹夹河自1990年起修建了大量的橡胶坝、拦河闸以及跨河大桥等工程,致使流域的产、汇流条件有较大的改变。但是,由于缺乏闸坝参数及运行资料,耦合模型建立过程中并未考虑河道中的人工建筑物。本文利用建立的耦合模型对1990年以后的9场洪水进行模拟计算,分析其是否对流域产汇流有影响,从而验证本文所建耦合模型的适用性。

分析表4的模拟结果可知:a.1990年以后洪水的产、汇流模拟结果的合格率分别为66.7%、88.9%,较1990年前洪水的模拟合格率有所降低;

b.大部分场次洪水产流模拟值较实际值偏大,而1990年以前洪水模拟值大部分偏小。虽然在实际工程运用中,当汛期遇大洪水时各橡胶坝均将其坝顶高程降到最低,但其对洪水依然有拦蓄作用,对产流产生一定影响;c.不合格场次洪水的产流量、洪峰流量值均较小,说明橡胶坝、拦河闸、跨河大桥等工程的修建会大大降低小洪水模拟的精确性,而对大洪水影响作用不明显。综上所述,虽然河道人工建筑物的修建改变了流域的产汇流条件使得耦合模型无法很好地反映小洪水的产汇流特性,但其对大洪水依然适用。

表4 1990年以后洪水耦合模型模拟结果

Tab. 4 Simulation results by the coupled model about flood events at Fushan Station since 1990

洪号	前期土壤含水量 / mm	平均降雨 / mm	产流					汇流					确定性系数	
			实测 / mm	模拟 / mm	相对误差 (%)	绝对误差 / mm	是否合格	实测 / (m ³ ·s ⁻¹)	模拟 / (m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差 / (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差 (%)	峰现时差 (时段)		是否合格
940722	87.4	63.8	31.3	38.3	22.4	7	否	399	482	20.8	83	1	否	0.7
950822	77.5	104.9	47.9	52.1	8.8	4.2	是	783	765	2.3	-18	1	是	0.95
970819	10.6	252.4	113.4	121	6.7	7.6	是	1220	1075	11.9	-145	1	是	0.91
010726	99.6	253	189.8	195.4	3.0	5.6	是	499	470	5.8	-29	0	是	0.79
030727	48.7	76.1	17.6	29	64.8	11.4	否	495	589	19.0	94	1	是	0.61
030731	77.3	58.9	38.8	38.4	1.0	-0.4	是	851	755	11.3	-96	0	是	0.85
030822	54	143.1	99.4	97.2	2.2	-2.2	是	1622	1411	13.0	-211	0	是	0.93
030917	34.3	79.2	26.2	31.6	20.6	5.4	否	585	675	15.4	90	0	是	0.88
070810	60.3	292.2	205.5	186.5	9.2	-19	是	2932	2784	5.0	-148	0	是	0.64

3 结论

本文建立了复杂下垫面条件的水文预报和天然河道复杂地形和水流条件的水动力学计算的耦合洪水预报模型,并利用烟台市外夹河流域的实测水文资料进行模型的应用验证,结果如下。

(1) 本文所建的水文水动力耦合模型模拟的洪水流量过程与实测过程拟合良好,模型计算稳定、快速,可用于实际洪水的预报。

(2) 通过与大伙房模型的模拟结果对比发现,耦合模型能够更好地解决单纯使用集总式水文模型而不能反映河道水流运动的弊端,大大提高了流域洪水预报模拟精度,更具有通用性。

(3) 限于数据资料的缺乏,模型实际应用过程中采取了一些概化的方法,同时未考虑流域内小水库、小型塘坝和洼地等的调蓄作用和橡胶坝、拦河闸、跨河大桥等建筑物对河道水流运动的影响。因此,对于小洪水受以上因素影响较大,导致本文所建模型的模拟与实测值有所偏差,而其更适用于大洪水的模拟。

参考文献(References):

- [1] 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 278-289. (XU Zong xue. Hydrological models: past, present and future[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2010, 46(3): 278-289. (in Chinese))
- [2] 常露, 刘开磊, 姚成, 等. 复杂河道洪水预报系统研究—以淮王家坝至小柳巷区间流域为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25(3): 422-427. (CHANG Lu, LIU Kai lei, YAO Cheng, et al. Real time flood forecasting system for complicated river channels: a case study from Wangjiaba to Xiaoliuxiang section in the Huaihe River basin[J]. Lake Science, 2013, 25(3): 422-427. (in Chinese))
- [3] 徐兴亚, 方红卫, 张岳峰, 等. 基于粒子滤波同化的河道洪水实时概率预报模型与应用[J]. 水科学进展, 2015, 3. (XU Xing ya, FANG Hong wei, ZHANG Yue feng, et al. A real time probabilistic channel flood forecasting model and application based on particle filters[J]. Advances in Water Science, 2015, 3. (in Chinese))
- [4] 薛天柱. 洪水演算方法在白龙江河段洪水预报中的应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. (XUE Tian zhu. Method in Bailong River Flood Forecasting[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. (in Chinese))
- [5] 赵人俊. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (ZHAO Ren jun. Hydrologic models of watersheds[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1983. (in Chinese))
- [6] 程亮, 王宗志, 胡四一, 等. 强烈下渗条件下天然河道洪水演进模拟方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 207-215. (CHENG Liang, WANG Zong zhi, HU Si yi, et al. Flood routing model incorporating intensive streambed infiltration[J]. Scientia Sinica Terrae, 2015, 45(2): 207-215. (in Chinese))
- [7] 包红军, 李致家, 王莉莉. 具有行蓄洪区的复杂水系实时洪水预报研究[J]. 水力发电学报, 2009(4): 5-12. (BAO Hong jun, LI Zhi jia, WANG Li li. Real time flood forecasting for complex watershed with flood diversion and flood retarding areas[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009(4): 5-12 (in Chinese))
- [8] 王船海, 李光焯. 实用河网水流计算[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997. (WANG Chuan hai, LI Guang zhi. Practical guide on river network flow calculation[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1997. (in Chinese))
- [9] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. (YANG Guo lu. Mathematical model of river[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993. (in Chinese))
- [10] 大连理工大学, 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 水库防洪预报调度方法及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 43-52. (Dalian University of Technology, The Office of Flood Control and Drought Relief Headquarters. Method and application of reservoir flood forecasting operation[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1996. (in Chinese))
- [11] 王猛, 彭勇, 梁国华. 大伙房模型在石佛寺流域洪水预报方案中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 93-97. (WANG Meng, PENG Yong, LIANG Guo hua. Application of DHF model in flood forecasting for Shifosi Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 93-97. (in Chinese))
- [12] 马玉军. 碧流河水库流域洪水预报方案及设计洪水过程修匀研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (MA Yu jun. Study on flood forecasting scheme and graduation of design flood hydrograph of Biliuhe Reservoir[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [13] 李娜. 基于知识的桓仁水库实时洪水预报方法应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (LI Na. Study and application on real time flood forecast method of Huanren Reservoir based on knowledge[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [14] 杜献梅, 赵克玉, 冯玉权. 沁河中游复式断面洪水演进模拟[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013(2): 223-227. (DU Xian mei, ZHAO Ke yu, FENG Yu quan. Simulation of flood routing with compound cross section in middle reach of the Qin River[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2013(2): 223-227. (in Chinese))
- [15] 李云良, 张奇, 姚静, 等. 鄱阳湖湖泊流域系统水文水动力联合模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2): 227-335. (LI Yun liang, ZHANG Qi, YAO Jing, et al. Integrated simulation of hydrological and hydrodynamic processes for Lake Poyang catchment System[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(2): 227-335. (in Chinese))
- [16] 杨洵, 梁国华, 周惠成. 基于 MIKE11 的太子河观—蓼河段水文水动力模型研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(11): 84-87. (YANG Xun, LIANG Guo hua, ZHOU Hui cheng. Study on hydrology and hydrodynamic model in Guanying—Shenwo section of Taizihe River based on MIKE11[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(11): 84-87. (in Chinese))