

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.002

王立辉, 王坤, 王宗志, 等. 含多个行洪区的淮干中游段洪水模拟 I: 模型建立[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 8-15.
(WANG Lihui, WANG Kun, WANG Zongzhi, et al. Flood simulation with multiple flood detention areas in the middle reaches of the Huaihe River I: development of flood routing model[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 8-15. (in Chinese))

含多个行洪区的淮干中游段洪水模拟 I: 模型建立

王立辉¹, 王 坤^{1,2}, 王宗志², 程 亮², 刘克琳², 谢伟杰^{1,2}, 何岩雨¹

(1. 福州大学, 福建 福州 350002; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 淮干中游分布着 16 个行洪区, 堤内有堤。建立具有良好模拟精度和较高计算效率的洪水模拟模型是科学管理淮河流域洪水的难点和关键。基于 MIKE11 软件, 以行洪时间和蓄洪量不变为原则, 把行洪区概化为一维河道; 提出了在缺少行洪区实测地形资料的情况下, 利用行洪区水位-库容关系曲线概化行洪区河道断面的方法; 针对行洪区各口门的不同控制方式, 采用相应的概化方法并设置合理的控制参数, 模拟洪水在主河道与多个行洪区之间的转换过程; 采用 2007 年和 2003 年实测洪水资料, 对模型进行率定和验证, 结果表明该模型精度较高, 能快速模拟行洪区进退洪过程及其调度规则。模型可服务于淮河中游洪水的科学安排与实时决策, 其建模思路对闸坝众多的复杂河道洪水演进模拟具有一定借鉴意义。

关 键 词: 淮河中游; 洪水演进; 行洪区; 一维模型

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)03-0008-08

目前淮河中游两岸建有行洪区 16 处, 排泄流量占河道总排洪能力的 20%~40%^[1], 是淮河中游防洪工程体系重要组成部分。这些行洪区启用标准低、使用频繁, 对于分洪削峰、降低河道水位、减轻淮干防洪压力具有重要作用。由于历史原因, 行洪区内仍然分布着约 40 多万人口和 666.67 km² (100 万亩) 左右耕地^[2]。建立模拟精度与计算效率兼顾、考虑行洪区调度运用的淮河中游洪水演进模型, 对于淮河中游洪水规划调度与治理建设具有重要意义。研究适应河道特点的洪水演进模型是近年来防洪减灾领域的研究热点。例如王宗志等根据海河流域漳卫河水系具有季节性、下渗强的特点, 建立了考虑河道下渗的河网洪水模型, 并将其运用于流域洪水安排及防洪格局调整中, 取得良好效果^[3]。包红军等采用马斯京根法、马斯京根水位模拟法和扩散波非线性水位法等水文学方法, 建立了淮河干流王家坝至鲁台子段洪水演进模型来进行预报^[4]。水文学方法在地势平缓、闸坝众多的平原区河道洪水演进中具有一定的局限性。近年来, 随着计算机技术的快速发展, 计算水力学取得长足进步, 成为平原区河网、水库洪水演进及溃口、闸门进退洪等复杂水力过程模拟的有效方法^[5-6]。张行南等基于数字流域平台和水力学模型软件(HEC-RAS), 构建了淮河中游王家坝至临淮岗河段洪水演进模拟系统^[7], 模型中将行洪区概化为零维水库, 给定水位库容关系。何用等将行洪区概化为行洪区河段, 蓄洪区概化为汉点, 采用一维水动力学模型建立了淮河中游王家坝至蚌埠段行蓄洪区洪水调度水动力学模型^[8]。吴时强等在建立淮河中游润合集至鲁台子段一、二维耦合模型时, 采用二维模型模拟洪水在淮干及行洪区的洪水演进过程^[9]。在水动力学模型中, 采用二维模型确能较好地模拟行洪区内洪水流向的动态变动, 但二维模型对地形数据要求高, 当行洪区较多时, 全部采用二维模型, 其模拟计算时间

收稿日期: 2017-08-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0400906); 国家自然科学基金资助项目(51479119, 51409169); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501054)

作者简介: 王立辉(1972—), 男, 湖南益阳人, 副教授, 博士, 主要从事防洪减灾与水力学计算研究。

E-mail: wanglh@fzu.edu.cn 通信作者: 王宗志(E-mail: Wangzz77@163.com)

过长,难以服务实时决策。因此,本文考虑将行洪区与淮干共同概化为一维河网。与一般河网不同,含有行蓄洪区的河网结构随着进退洪设施开启、行蓄洪区运用而逐步形成^[8],行蓄洪区运用显著影响了河道洪水演进。丹麦水利研究所开发的一维河道水力学软件(MIKE11)具有计算效率高、模型稳健、能够模拟大多数水工建筑物调度运行的特点,已被广泛应用于洪水演进模拟预报、泥沙输运度、水工建筑物设计与水质模拟等方面^[10-15]。本文采用 MIKE11 软件,以行洪时间和行蓄洪量不变为原则,把行洪区概化为一维河道,提出并比较了两种河道断面获取方法;研究如何利用 MIKE11 软件水工建筑物模块,模拟进退洪闸与口门调度、行洪区运用规则,实现洪水在淮干与多个行洪区之间的转换过程;最终建立含多个行洪区的淮干中游段洪水模拟模型,为淮河中游洪水调度管理提供有力工具。

1 模型建立

1.1 河段简介与河网概化

淮河中游正阳关到茨淮新河口(上桥闸下)之间的河段走势及行洪区分布如图1所示。该河段共有6个行洪区,其中寿西湖、董峰湖、汤渔湖与荆山湖行洪区分布在主河道两侧,主河道在上下六坊堤出现分叉,环绕两行洪区而过。

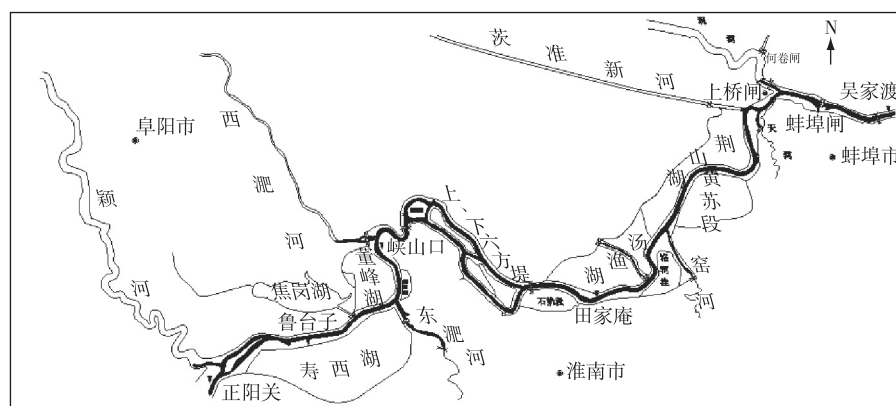


图1 淮干正阳关-茨淮新河口段水系分布概况

Fig. 1 General situation of the reach from Zhengyangguan to the estuary of the Cihuaixin River in the main stream of the Huaihe River

为灵活高效模拟洪水在主河道演进及行洪区的行洪过程,主河道与行洪区统一采用一维模型计算,区间旁侧支流作为点源处理。模型结构概化如图2所示。

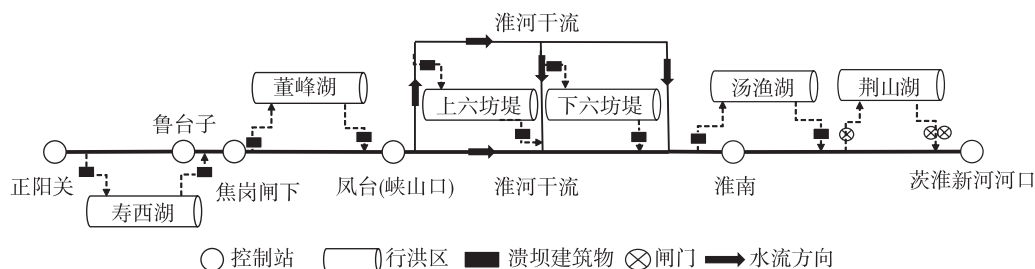


图2 淮河干流与各行洪区概化河网

Fig. 2 Generalized river network of main stream of the Huaihe River and all flood detention areas

模型中洪水在主河道与行洪区之间的交换过程通过10个溃坝建筑物与3个闸门等控制工程来实现。其中,由于荆山湖下口门进洪与退洪调度规则不同(退洪设计流量 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$,反向进洪 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$),在模型中无法用同1个闸来模拟两种不同的规则,因此建模时在下游口门设置1个闸门,模拟行洪区下口门的退洪

调度规则(设计流量 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$);在闸门旁另添加 1 条虚拟河道作为下口门进洪通道,并在此河道上添加 1 个闸门来模拟下口门的进洪调度规则(设计流量 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$);两个控制建筑物共同完成荆山湖下口门进退洪调度规则的模拟。除荆山湖行洪区上下游口门由闸门控制外,其余行洪区口门皆以溃坝建筑物控制,该建筑在未溃决时相当于 1 个挡水的堰,达到溃决条件后溃口形成并发展,用来模拟口门扒口的形成过程。行洪区现有调度运行规则如表 1 所示。

表 1 行洪区调度运用规则

Tab. 1 Schedules and operations of flood detention areas

名称	控制站	行洪水位/m	设计行洪流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	运用方式	口门情况
寿西湖	鲁台子	25.90	3 200	开口行洪	上口门底高程 25.9 m, 宽 1 500 m; 下口门底高程 25.5 m, 宽 2 000 m。
董峰湖	焦岗闸下	24.60	3 000	开口行洪	上口门底高程 24.6 m, 宽 3 000 m; 下口门底高程 24.3 m, 宽 4 000 m。
上六坊堤	凤台	23.90	2 800	开口行洪	上口门底高程 23.7 m, 宽 1 000 m; 下口门底高程 23.5 m, 宽 1 000 m。
下六坊堤	凤台	23.90	2 800	开口行洪	上口门底高程 23.5 m, 宽 1 500 m; 下口门底高程 23.3 m, 宽 2 000 m。
汤渔湖	淮南	24.25	4 300	开口行洪	上口门底高程 24.5 m, 宽 2 000 m; 下口门底高程 24.2 m, 宽 1 500 m。
荆山湖	淮南	23.15	3 500	开闸行洪	进洪闸设计进洪流 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$; 退洪闸设计退洪流 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 、反向进洪流量 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

当主要关注行洪区内的分洪和行洪作用,以及淮干洪水演进时,即不过于关注洪水要素在行洪区微观变化、要求模型具有较高计算效率时,可以在尽可能保证行洪时间和行蓄洪量不变要求下,将行洪区概化为一维河道,以提高计算效率。图 3 给出了 MIKE 11 软件中正阳关到茨淮新河口河段的河网结构图,横、纵坐标分别为投影后位置的 x 与 y 坐标。图 3 中弯曲线段为河道中心线,与中心线垂直的短线表示断面所处的位置。该河网共有 11 条河段、3 个闸建筑物和 10 个溃坝建筑物组成。由于淮干在上、下六坊堤行洪区出现了分叉,将此处的淮干河段概化为 2 条河道,将上、下六坊堤行洪区上游和下游淮干河段概化成 2 条河道,由此将淮干概化为 4 个河段。6 个行洪区概化成 6 个河段。考虑荆山湖行洪区退洪闸的反向进洪,设置了 1 条虚拟河段,由此概化出了 11 条河段。荆山湖行洪区设有进洪闸和退洪闸,退洪闸又需要反向进洪,为模拟荆山湖的进洪、退洪和反向进洪过程,设置了 3 个闸建筑物。其余 5 个行洪区均以口门进退洪,设置了 10 个溃坝建筑物,模拟其进退洪过程。本次研究淮干主河道断面利用 2009 年淮干实测河道大断面资料,行洪区断面主要由水位库容关系曲线概化得到。

1.2 行洪区断面概化

MIKE11 将河道断面作为水位点,断面形状由 x (原点距)和 y (高程)2 个参数来控制。对于行洪区断面的概化,可以依据资料情况采用 2 种方法进行概化。第 1 种是根据数字地形资料(例如 DEM)采用 SMS(SURFACE-WATER MODELING SYSTEM)将高程内插到整个行洪区,而后结合 Arcgis 等空间分析工具得到行洪区中心线,沿中心线隔一定距离截取断面并得到断面上各位置高程从而获得 (x, y) 数据,输入到

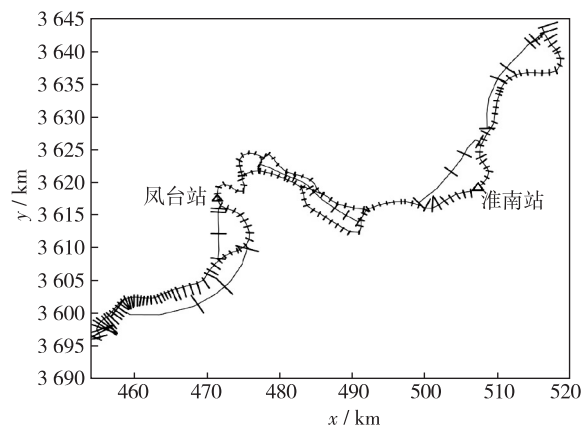


图 3 MIKE 11 中河网结构

Fig. 3 River network in MIKE 11

MIKE11 断面文件中形成行洪区各个断面的形状。第 2 种方法是缺少实测地形资料时,利用行洪区水位-库容关系曲线,将断面概化成由底部的窄深三角形、中部宽浅三角形和上部宽浅矩形组成的断面(见图4(a))。底部三角形采用窄深形式,一方面是为了让行洪区断面底部高程与淮干河床底部高程平稳衔接,防止因河床底高程落差太大而导致震荡;另一方面是借鉴干河床洪水演进模拟中“窄缝法”的思想,避免流量较小,断面过宽,导致水深过浅计算易发散问题。中部宽浅三角形则主要反映洪水由中泓向堤脚运动过程。上部宽浅矩形则反映了洪水淹没了行洪区底部、水位到达堤脚后的淹没情况。图4(a)是利用寿西湖水位-库容曲线概化得到的断面。断面概化时,需要确定行洪区中心线长度 L 、下部三角形最低点高程 h_1 、中部三角形最低点高程 h_2 、上部矩形底部高程 h_3 、顶部高程 h_4 和宽度 B 等参数。中心线长度 L 可由行洪区形状结合区内高程分布估算出。高程 h_1 可由与行洪区相接处淮干断面的最低点高程确定。高程 h_2 取库容关系曲线中库容为 0 时的水位。高程 h_3 和 h_4 由行洪区堤防堤脚和堤顶高程确定。确定这些参数后,给定不同宽度 B ,计算不同水位 h 对应过水断面面积 $A(h,B)$,再利用 $V=LA(h,B)$,计算出被概化成一维河道的行洪区水位-库容关系。以最小化概化后水位-库容关系曲线与行洪区已有水位库容-关系曲线的差异为原则,确定宽度 B 。经估算,寿西湖行洪区概化断面参数取值为: $B=5\,000\text{ m}$, $L=25\,000\text{ m}$, $h_1=8.0\text{ m}$, $h_2=17.0\text{ m}$, $h_3=22.0\text{ m}$, $h_4=27.0\text{ m}$ 。概化断面的水位库容关系与行洪区实测对比情况如图 4(b)所示。由图可知,概化断面水位-库容关系曲线与实测曲线的误差小。进一步统计发现,不同水位下库容相对误差绝对值均在 5% 以内,表明该概化方法形成的断面能准确保证行洪区水位-库容关系。

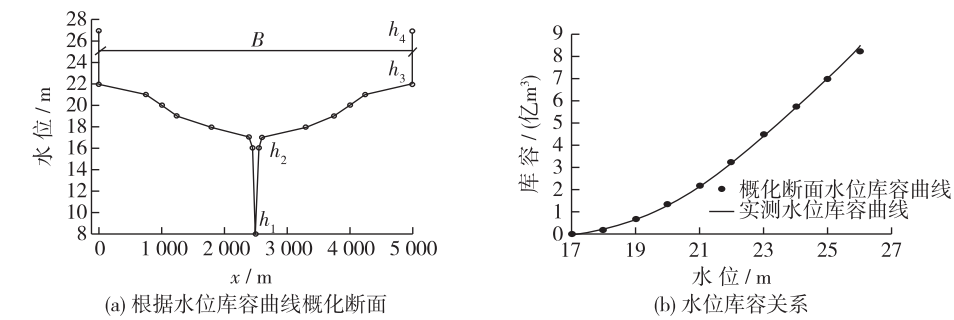


图 4 行洪区断面概化和水位库容关系

Fig. 4 Generalized cross-section and comparison between water level and capacity

为探究行洪区断面 2 种概化方法对行洪区分洪和行洪效果影响,针对寿西湖行洪区,分别以这 2 种断面,运用该模型模拟了淮干 20 年一遇设计洪水(2003 年型)和 50 年一遇设计洪水(1954 年型)。表 2 中给出 2 种断面下寿西湖行洪区分洪和行洪效果对比结果。由表 2 可知,采用 2 种断面时,淮干发生 20 年和 50 年一遇洪水时,行洪区开始分洪时间相同,最大分洪流量相对误差分别为 3.8% 和 0.7%,分洪量相对误差分别为 2.36% 和 6.75%,产生误差的原因是地形数据抽取断面概化的河道呈现出中间宽两头窄的形状,一定程度上阻碍了水流的运动,可以通过调整河槽与滩地的糙率值来改善模拟效果,本文为探求由水位-库容关系概化断面的合理性,没有进行参数的优化。总体来说,采用概化断面与实测断面的行洪区分洪和行洪效果差别可以接受,所以本文提出的行洪区断面概化方法可以满足使用需要。

表 2 寿西湖行洪区分洪参数

Tab. 2 Flood diversion parameters of Shouxihu flood detention area

洪水类型	断面类型	最大分洪流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	开始分洪时间	分洪量/ 亿 m^3	最大分洪流量 相对误差/%	开始分洪 时间差/h	分洪量相对 误差/%
20 年一遇洪水	地形数据抽取断面	303	2003-07-05 T03 : 00	1.13	3.8	0	2.36
	水位库容概化断面	315		1.16			
50 年一遇洪水	地形数据抽取断面	3 097	1954-07-10 T24 : 00	39.39	0.7	0	6.75
	水位库容概化断面	3 121		42.24			

根据上述概化方法将淮干中游 6 个行洪区概化为一维河道,各行洪区概化断面的相关参数见表 3。

表 3 行洪区概化断面参数

Tab. 3 Generalized cross-section parameters of flood detention areas

行洪区	宽度 B/m	中心线 长度 L/m	三角形底 高程 h_1/m	三角形顶 高程 h_2/m	矩形底 高程 h_3/m	矩形顶 高程 h_4/m	断面个数
寿西湖	5 000	25 000	8.0	17	22	27	4
董峰湖	2 000	72 000	6.9	17	20	28	4
上六坊堤	1 000	7 600	13.5	18	22	25	4
下六坊堤	1 500	8 100	7.2	17	19	28	4
汤渔湖	2 100	12 000	6.5	15	18	25	4
荆山湖	2 100	19 000	6.1	15	18	25	5

1.3 分洪过程模拟

寿西湖、董峰湖等 6 个行洪区进退洪皆由相应控制站水位控制,其调度规则如表 1 所示。其中,寿西湖、董峰湖、上六坊堤、下六坊堤、汤渔湖均采用开口行洪方式。模拟过程中,将各行洪区上下游口门(形状为矩形)概化为 MIKE11 structure 中的 Dam breaker structure(溃坝)构筑物,通过对构筑物中参数的合理设置,该构筑物可以很好地模拟口门扒口的形成过程。其中,坝顶高程为表 1 中给出的各分洪口门底部高程,坝顶长度为分洪口门宽度,溃口底高程为口门附近行洪区内部地面高程,起溃水位设定为各行洪区对应控制站的行洪水位。模拟时,当各行洪区对应控制站处水位超过行洪区的行洪水位时,口门处的挡水坝开始溃决,溃口形成并逐渐发展,洪水开始在行洪区河道中演进,当口门处水位低于溃口底部高程时,行洪区进洪停止。

溃口过流量的计算式为:

$$Q = c_v k_s [c_{\text{weir}} b \sqrt{g(h - h_b)} (h - h_b) + c_{\text{slope}} s \sqrt{g(h - h_b)} (h - h_b)^2] \quad (1)$$

式中: Q 为通过溃口的流量; c_v 为入流收缩损失的修正系数; k_s 为淹没修正系数^[13]; b 为溃口的底宽; h 为上游水位; h_b 为溃口底高程; s 为溃口的边坡; c_{weir} 为溃口水平部分的堰系数,取 0.546 430; c_{slope} 为溃口边坡部分的堰系数,取 0.431 856。

如表 1 所示,荆山湖行洪区设有进洪闸和退洪闸,采用开闸方式行洪。下游退洪闸具备反向进洪功能,因此在下流退洪闸处,添加 1 条虚拟河道,虚拟河道中设置闸门来模拟退洪闸的反向进洪功能。进洪时,进洪闸和退洪闸同时开闸进洪;当行洪区完全被淹没,下游退洪闸开始退洪,同时虚拟河道中的闸门关闭。进退洪闸可采用 MIKE11 structure 中的 Control structure(可控水工建筑物)来模拟。可控水工建筑物是指模拟过程中按照设定调度规则,自动判断调整运行方式(例如闸门开启、过闸流量)的一类建筑物,包括水闸、橡胶坝、水泵等。MIKE11 中提供了闸孔出流型、越流型、流量型等多种类型可控水工建筑物,可依据河道某处的水位或流量、水位差或流量差、蓄水量、时间等数十种逻辑判断条件,建立调度运行规则。模拟过程中,模型根据建筑物上下游水文条件自动判断所处流态(亚临界流、临界流、超临界流等),选用相应的流体力学公式进行计算。为模拟退洪闸的进洪和退洪过程,设置了退洪闸和虚拟退洪闸两个完全一样的可控水工建筑物,并都与淮干连接。当满足分洪条件时,进洪闸和虚拟退洪闸开闸进洪,退洪闸关闭。而当满足退洪条件时,虚拟退洪闸关闭,退洪闸开启退洪。依据表 1 中给出荆山湖行洪区启用条件和闸门最大分洪流量,在 MIKE11 中采用基于水位判断条件,来建立进退洪闸调度规则。

1.4 模型率定和验证

利用 2003 年 7 月 1 日至 7 月 30 日的实测资料对模型进行率定。模拟时以正阳关 2003 年实测流量过程作为上边界,淮干茨淮新河口处水位流量关系作为下边界。参数率定时,通过调整淮干主槽与漫滩以及行洪区的糙率值,使凤台(峡山)站(距正阳关 36.4 km)和淮南站(距正阳关 83.9 km)模拟与实测水位过程尽可能一致。经率定得到淮干主河槽糙率值为 0.025,滩地糙率值为 0.03,行洪区糙率值为 0.037。图 5 中

给出了凤台站和淮南站模拟与实测水位过程对比结果。由该图可知,淮南站洪峰水位绝对误差小于 0.1 m,模拟系列与实测系列也能较好地吻合;凤台站模拟系列与实测系列亦能较好地吻合,平均误差低于 0.2 m。造成误差的主要原因可能是采用的实测地形数据(2009 年)与洪水发生时(2003 年)的地形差异。

为进一步验证模型有效性和可靠性,需要对模型进行验证。2007 年是大洪水年,淮河中游上六坊堤、下六坊以及荆山湖行洪区均启用,可以用于验证。因此,本文利用 2007 年 7 月 5 日至 9 月 13 日的洪水过程对模型进行验证。凤台和淮南站水位过程模拟与实测值对比如图 6 所示。由图可见,水位过程峰谷相对,洪峰到达时间差小于 2 h,最大水位误差小于 0.2 m。率定和验证结果均表明该模型可以用于行洪区调度运用影响下的淮河干流洪水演进模拟。

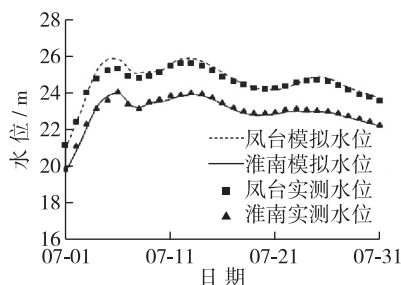


图 5 2003 年洪水率定结果

Fig. 5 Water levels calibration results of Fengtai and Huainan stations in 2003

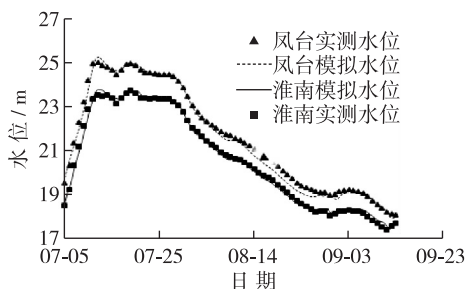


图 6 2007 年洪水验证结果

Fig. 6 Water levels verification results of Huainan and Fengtai stations in 2007

文献[16]中给出了 2007 年洪水期间上六坊堤和下六坊堤平均行洪流量分别为 177 和 260 m^3/s ; 模型模拟出的平均行洪流量分别为 152 和 248 m^3/s , 两者基本吻合。

2 结果讨论与分析

图 7 给出了淮河发生 20 年一遇设计洪水时,荆山湖行洪区上下游进退洪流量过程。由图 7 可知,当淮南站水位达到 23.15 m 时,荆山湖行洪区开始进洪,此时湖内无水,进洪闸(JSHXH100)和虚拟退洪闸(XUN1650)同时进洪,退洪闸(JSHXH18900)关闭。由于进洪闸和虚拟退洪闸进洪流量很大,荆山湖很快装满,开始退洪。退洪时,进洪闸(JSHXH100)仍在进洪,虚拟退洪闸(XUN1650)关闭不再进洪,流量变成 0;退洪闸(JSHXH18900)开始按照设计流量 3 500 m^3/s 退洪。该过程线完整反映了荆山湖闸门的进退洪过程以及调度规则,这表明采用 Control structure 建筑物能很好地模拟荆山湖行洪区的进退洪过程。

图 8 给出了董峰湖上下游口门进退洪流量过程。可见,当淮干控制站(焦岗闸下)水位超过 24.60 m,相应董峰湖上口门(DFHXH100)附近淮干水位恰好超过其底高程 24.6 m 时,董峰湖行洪上口门溃决进洪,上游口门

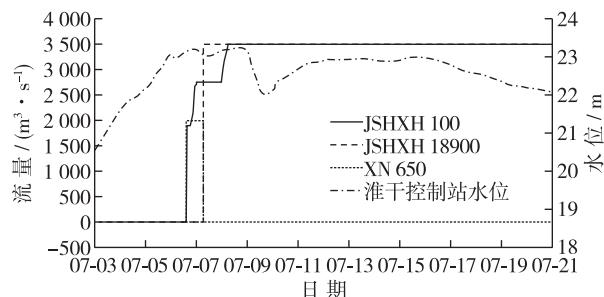


图 7 荆山湖上下游闸门进退洪过程

Fig. 7 Flood process of upstream and downstream gates of Jingshanhu flood detention areas

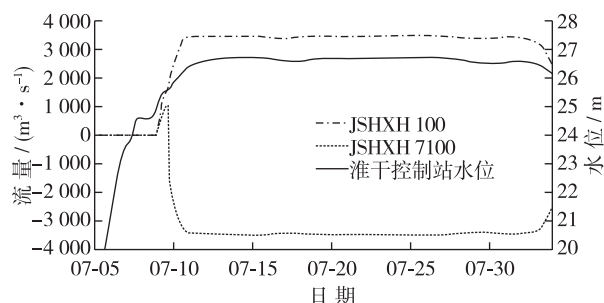


图 8 董峰湖上下口门进退洪过程

Fig. 8 Flood process of upstream and downstream gates of Dongfenghu flood detention areas

(DFHXH100)开始进洪;此时,由于下游口门(DFHXH7100)附近淮干水位超过其底高程 24.3 m,下游口门(DFHXH7100)也开始进洪。由于上下游口门同时进洪,董峰湖很快蓄满,下游口门(DFHXH7100)开始退洪,流向发生改变,其流量变成负值。随着洪水上涨,上下游口门分洪流量均达到了设计流量 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

3 结 语

与一般河网不同,含有行洪区的河网结构随着进退洪设施开启、行蓄洪区运用而逐步形成,行蓄洪区运用显著影响了河道洪水演进。建立模拟精度与计算效率兼顾、考虑行洪区调度运用的洪水演进模型,对于洪水规划调度有重要意义。本文以淮干中游为例,采用 MIKE 11 水动力模型,建立了含多个行洪区河网洪水模拟模型。建模过程中,将分洪区概化为一维河道,提出并验证了缺乏实测地形资料时行洪区河道断面概化方法,该方法所需资料少,能很好地避免模型计算中常见的震荡问题;利用 MIKE 11 中构筑物模块,模拟开口行洪和开闸行洪 2 种分洪方式。采用 2003 和 2007 年洪水过程对模型进行了率定与验证,结果表明模型能快速准确地模拟该河段洪水演进过程。本文提出的建模方法以及行洪区断面概化方法对于其他类似河网洪水模拟具有重要参考价值。

参 考 文 献:

- [1] 水利部淮河水利委员会. 淮河流域防洪规划[M]. 蚌埠: 水利部淮河水利委员会, 2004. (The Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources. The Huaihe river basin flood control planning[M]. Bengbu: The Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources, 2004. (in Chinese))
- [2] 吴永生. 安徽省淮河行蓄洪区经济社会发展对策[J]. 江淮水利科技, 2007(3): 7-8, 36. (WU Yongsheng. The economic and social development countermeasure of flood detention areas of the Huaihe River in Anhui province[J]. Jianghuai Water Resources and Technology, 2007(3): 7-8, 36. (in Chinese))
- [3] 王宗志, 程亮, 王银堂, 等. 高强度人类活动作用下考虑河道下渗的河网洪水模拟[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 414-424. (WANG Zongzhi, CHENG Liang, WANG Yintang, et al. Modeling the flood behavior in a river network considering the streambed infiltration and its application in Haihe River basin of China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 414-424. (in Chinese))
- [4] 包红军, 李致家, 王莉莉. 淮河鲁台子以上流域洪水预报模型研究[J]. 水利学报, 2007(增刊1): 440-448. (BAO Hongjun, LI Zhijia, WANG Lili. Study of flood forecasting for upper reaches of the Huaihe River above Lutaizi[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(Suppl1): 440-448. (in Chinese))
- [5] 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—I. 建模思路和基本算法[J]. 水科学进展, 1996, 7(4): 336-345. (TAN Weiyan, HU Siyi, WANG Yintang, et al. Flow modelling of the middle Yangtze River-Dongting Lake flood control system—I. modelling procedures and basic algorithms[J]. Advances in Water Science, 1996, 7(4): 336-345. (in Chinese))
- [6] 王立辉, 潘存鸿, 吴修广, 等. 非粘性沙坝溃决数学模型及求解[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 859-863. (WANG Lihui, PAN Cunhong, WU Xiuguang, et al. Mathematical modelling of non-cohesive earth dam breaches[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 859-863. (in Chinese))
- [7] 张行南, 彭顺风. 平原区河段洪水演进模拟系统研究与应用[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 803-809. (ZHANG Xingnan, PENG Shunfeng. Combined simulation system for propagation of flood in plain rivers and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 803-809. (in Chinese))
- [8] 何用, 李义天, 要威, 等. 淮河中游行蓄洪区洪水调度水动力学模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 20(3): 386-392. (HE Yong, LI Yitian, YAO Wei, et al. Research on hydrodynamic model in the middle reach of Huaihe river with flood storage[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 2005, 20(3): 386-392. (in Chinese))
- [9] 吴时强, 吴修锋, 周辉, 等. 淮河临淮岗洪水控制工程洪水调度模型研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 196-202. (WU Shiqiang, WU Xiufeng, ZHOU Hui, et al. Flood control operation numerical model for Linhuaigang project on Huai River[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(2): 196-202. (in Chinese))
- [10] 吴天蛟, 杨汉波, 李哲, 等. 基于 MIKE11 的三峡库区洪水演进模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 51-57. (WU Tianjiao, YANG Hanbo, LI Zhe, et al. Simulation of flood propagation in the Three Gorges Reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 51-57. (in Chinese))

- Tianjiao, YANG Hanbo, LI Zhe, et al. Modeling of flood routing for Three Gorges reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 51-57. (in Chinese))
- [11] 余晓, 李翀, 王昊, 等. 额尔古纳河洪水淹没模拟及湿地植被变化分析[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1308-1315. (YU Xiao, LI Chong, WANG Hao, et al. Simulation of flood inundation and analysis on dynamic variation of wetlands for Argun River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1308-1315. (in Chinese))
- [12] 左其亭, 李冬峰. 基于模拟-优化的重污染河流闸坝群防污调控研究[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 979-986. (ZUO Qiting, LI Dongfeng. Research on regulation for pollution-control of dams on heavily polluted river base on the model of simulation and optimization[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 979-986. (in Chinese))
- [13] WANG Qinggai, ZHAO Xiaohong, YANG Mushui, et al. Water quality model establishment for middle and lower reaches of Hanshui River[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(6): 646-655.
- [14] RAHMAN M M, GOEL N, ARYA D S. Development of the jamuneswari flood forecasting system; case study in Bangladesh water quality model establishment for middle and lower reaches of Hanshui River[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 17(10): 1123-1140.
- [15] Danish Hydraulic Institute. MIKE 11: a modelling system for rivers and channels, reference manual[M]. Denmark: Danish Hydraulic Institute, 2012.
- [16] 中华人民共和国水利部水文局. 2007 年淮河暴雨洪水[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (Hydrology Bureau of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Storm floods of the Huaihe River in 2007[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2010. (in Chinese))
- [17] 淮河防汛抗旱总指挥部. 淮河洪水调度方案[M]. 合肥: 淮河防汛抗旱总指挥部, 2016. (General Headquarters of Flood Control and Drought Relief of Huaihe River. Flood dispatching scheme of Huaihe River[M]. Hefei: General Headquarters of Flood Control and Drought Relief of Huaihe River, 2016. (in Chinese))

Flood simulation with multiple flood detention areas in the middle reaches of the Huaihe River I : development of flood routing model

WANG Lihui¹, WANG Kun^{1,2}, WANG Zongzhi², CHENG Liang², LIU Kelin², XIE Weijie^{1,2}, HE Yanyu¹
(1. Fuzhou University, Fuzhou 350002, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The middle reaches of the Huaihe River contain multiple flood detention areas and several dikes. It is difficult and yet imperative to develop a flood simulation model with high precision and calculation rate for the scientific flood management of the river basin. Using the MIKE11 software developed by the Danish Hydraulic Institute, the flood detention areas were simulated as one-dimensional rivers, according to the different control methods of each entrance of the flood detention area. This was done using different generalization methods and setting reasonable control parameters to realize the conversion process of the flood between the Huaihe River and the flood detention areas, with the principles of flood routing time and flood storage invariant. A method to generalize the channel profiles of the flood detention area was put forward, and we could use the reservoir water level-capacity curve when we lacked information about the terrain in the area. This model was calibrated and verified using the observed flood data of the years 2007 and 2003. The results show that the model has high precision and can quickly simulate the flood routing process and scheduling rules in this basin. The model can be useful for scientific management and real-time decision-making regarding floods in the middle reaches of the Huaihe River. The modeling process is of significance as a reference for developing flood routing models of rivers with numerous gates and dams.

Key words: middle reaches of the Huaihe River; flood routing; flood detention area; one-dimensional model