

文章编号:0559-9350(2010)07-0803-07

平原区河段洪水演进模拟系统研究与应用

张行南, 彭顺风

(河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于数字流域平台和水力学模型软件HEC-RAS, 研究了河道和行蓄洪区地形数据的处理、分洪口门和水利工程的模拟等技术难题, 提出了上下游边界条件、初始条件的自动生成方法, 模拟河道和行蓄洪区的洪水演进, 研制了平原区河段洪水演进模拟系统, 模拟河道洪水波在行蓄洪区各种工况条件下的运动过程。该模拟系统应用于流域洪水实时预报调度, 评价行蓄洪区启用对洪水过程的影响, 为流域防洪调度决策提供定量技术支持。在淮河流域王家坝至临淮岗区间, 利用2007年7月份流域性大洪水期间的报讯数据系列, 对本文提出的模拟系统进行了率定和验证, 并评价了6种洪水调度方案的效果。结果表明系统中非恒定流模型的数值解稳定, 模拟的洪水过程与实测系列吻合, 客观地反映了研究区域洪水运动过程和行蓄洪区启用对该过程的影响, 准确地评价了流域洪水调度方案的效果。

关键词: 防洪调度; 洪水演进模拟; HEC-RAS; 数字流域

中图分类号: TV122

文献标识码: A

1 研究背景

淮河中游地区地势平缓, 水泄不畅, 上游洪水容易在此汇集泛滥, 因而成为防洪的重点区域。其防洪的工程措施主要依靠堤防和行蓄洪区。行蓄洪区的启用, 会造成大量的人口转移和财产损失, 启用决策难度很大。在实际防洪决策中, 行蓄洪区的合理使用, 是实现洪水的科学调度, 减少洪灾损失的关键所在。河道洪水演进模拟可为洪水科学调度提供重要依据。由于平原区地形多变、河网交错、行蓄洪区众多, 相互间水力联系复杂, 故河道洪水演进模拟困难, 历来是防洪领域研究的热点和难点问题。

平原区洪水模拟最有效的方法是水力学领域的非恒定流模拟计算方法。随着计算机和现代信息技术的迅猛发展, 计算水力学方面的理论研究取得了丰硕的成果^[1], 并在洪水模拟中得到了应用^[2-4]。差分格式是水力学数值模拟主要研究内容之一。然而, 数值模型的构建对研究区域下垫面特征信息依赖性大, 短缺的数字化流域下垫面信息制约了模型的精度和应用范围。在实际应用中, 流域及河道的概化、上下游边界条件和初始条件的确定、河道与行蓄洪区间空间拓扑关系的建立、分洪口门的模拟、河道和行蓄洪区洪水过程及分洪流量过程的模拟等, 是需重点研究的问题, 这常常决定了实际应用的成败。为了解决这个问题, 近年来水利部门已经卓有成效地开展了下垫面信息采集和数字化工作^[5-6]。在淮河流域, 已经建成了包括1:5000~1:25万多种比例尺的全要素数字地形图和相应精度的数字高程模型、多种精度数字正射遥感影像、河道大断面数据和水文数据等各类数据在内的数字流域平台。本文以淮河流域为例, 基于已建成的数字流域平台, 对基于河道一维非恒定流偏微分方程组差分格式数值解法的HEC-RAS模型进行了研究, 提出了完整的边界条件处理和洪水过程模拟方案, 研制了平原区河段洪水演进模拟系统。

收稿日期: 2009-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(50879017); “十一五”国家科技支撑计划(2008BAB29B08-02)

作者简介: 张行南(1960-), 男, 江苏张家港人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxn@hhu.edu.cn

淮河流域地处我国南北气候过渡地带，汛期(6—9月份)受梅雨、台风的影响，容易发生流域性洪水，且往往在中游泛滥成灾。新中国建立以来，淮河流域逐步建成了以水库、堤防、分洪河道、排涝工程、行蓄洪区等水利工程为主的综合工程防洪体系。然而，2003年的流域性洪水，仍然造成了3 730万人受灾，385万hm²耕地被淹，直接经济损失高达286亿元^[7]。说明仅完成水利工程建设是不够的，需要加强洪水预报、调度和预警等非工程措施的研究，以便充分发挥水利工程的防洪效益。

淮河王家坝至临淮岗河段长度为105.3km(图1)，是淮河防汛中最令人瞩目的河段。王家坝是上、中游的分界水文站，其洪水过程是淮河中游洪水调度的主要依据之一。大水期间，洪水通过淮河及其北部的濠河分洪道向下游宣泄，洪水过程分别由王家坝站和杉岗站控制。临淮岗处建有拦河闸和姜唐湖进洪闸控制洪水，以保证下游淮北大堤、重要城市、矿区和铁路的安全。该河段南部有史灌河在三河尖汇入淮河，其洪水过程由蒋集水文站控制。其他汇入的支流无水文站控制。河段两岸都有堤防束水。该河段两侧多为平原洼地，人口稠密，设有濠洼、城西湖、姜唐湖三处蓄洪区，以及南润段、邱家湖两处行洪区，其基本情况见表1。各行蓄洪区间关系复杂，对洪水的影响相互关联。润河集水文站的水位和流量是这些行蓄洪区启用的重要依据之一。该区域支流众多，洪、涝混杂，主河槽各水文站水位流量关系不稳定，绳套曲线大中套小，正反交织，水利工程星罗棋布。由此可知，淮河中游河道洪水过程非常复杂，演进模拟具有很大的难度。

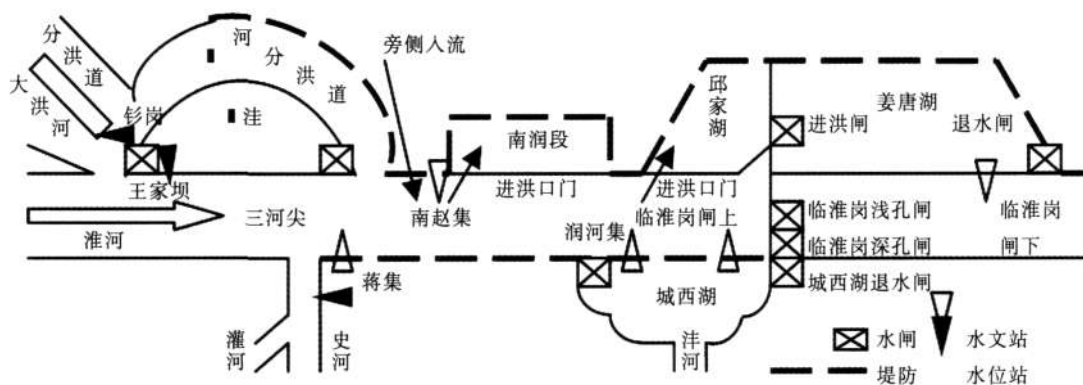


图1 王家坝至临淮岗段防洪工程概化

表1 行蓄洪区基本情况

名称	总面积/km ²	耕地面积/万hm ²	人口/万人	2003年GDP/亿元	设计滞蓄洪量/亿m ³	进洪方式
濠洼	108.4	1.200	15.55	4.22	7.5	水闸控制
城西湖	517.0	2.713	16.41	4.65	28.8	水闸控制
姜唐湖	145.8	0.778	10.14		7.6	水闸控制
南润段	10.7	0.077	0.97	0.26	1.1	人工挖掘
邱家湖	37.0	0.244	2.63	0.56	1.6	人工挖掘

注：数据来源于《淮河干流行蓄洪区调整规划》(2005年12月)

2 模拟系统构建

基于美国工程兵团水文工程中心(Hydrologic Engineering Center, HEC)开发的河流分析系统(River Analysis system, RAS)软件HEC-RAS构建数值模型^[8]。HEC-RAS是一个集成了GIS功能的河道水力学模型系统，其图形用户界面提供了增加、删除和修改模型图形要素的功能，可以对河道骨架线、河道断面、涵洞、桥梁、拦河闸、岸边水闸、岸边堰等图形要素的几何形状和特征参数进行编辑，从而建立几何模型。把初始条件和边界条件数据输入几何模型，即可进行水流分析。淮河数

字流域平台提供了地形图和水利工程数据处理、以及初始条件和边界条件数据处理功能，实现了数据处理的自动化和规范化，为模型构建提供了数据支撑。本文构建了河道、行蓄洪区、水工建筑物等对象的几何模型，构建了河段与行蓄洪区洪水演进过程模拟系统，实现了模拟系统构建的标准化，提高了系统构建的效率。

2.1 电子地图处理 在建模型之前需要把电子地图导入HEC-RAS作为背景图，以便在相应的地理位置编辑河道、水闸等模型图形要素。本文采用图层主要有：淮河干流和一级支流河道、堤防、水闸、行蓄洪区、水文站点、重要防洪城市和居民点。这些图层都是基于国家标准的1:25万淮河流域数字地形图，配合高空间分辨率卫星影像再加工的成果。模型基于平面坐标构建，采用的长度单位为米。因此，成果图层导入HEC-RAS之前，需要设置坐标和投影系统，其参数通过ArcMap的投影坐标系统属性窗口(Projected Coordinate System Properties)设置^[9]。为了保持电子地图的精度，坐标系保持其原来的1980年西安坐标系；投影系统采用通用横轴墨卡托6°分带投影(Universal Transverse Mercator Projection)；中央经线设为东经117°，比例因子为0.999 6；坐标东经偏移量为500km，北纬偏移量为0。这样就把成果图层球面坐标系统变换为平面坐标系统，为几何模型构建提供了地理参考。

2.2 几何模型构建 以上述导入的图层为背景，在HEC-RAS中建立以下三类几何模型：

(1)河道模型。河道位置由河道骨架线控制，几何形状由众多的河道断面表达。为了方便获得河道入流边界条件，建模主要考虑有水文站控制的河道。如图1所示，这里编辑的河道有：淮河王家坝至临淮岗、濠河分洪道钡岗至南照集、史灌河蒋集至三河尖。利用HEC-RAS河段编辑功能(River Reach)，从上游向下游，根据背景图上的河道线，提取各河段的骨架线。在三河尖、南照集两处添加河道汇合点(Joint)。汇合点既保证了干支流通通，也是河段的分界点。各河段长度和断面数量见表2。考虑到南赵集以上河段，有许多无控制的支流汇入，为了保证模型水量平衡，在南赵集处淮河左岸，增加一条虚拟的河道，用于模拟综合的旁侧入流(图1)。

表2 基于HEC-RAS建模的河道长度与断面数量统计

河段名称	河段长度/km	实测断面数
淮河王家坝至三河尖	49.4	111
淮河三河尖至南照集	13.0	16
淮河南照集至临淮岗	42.9	89
濠河分洪道钡岗至南照集	49.0	2(线性内插129处)
史灌河蒋集至三河尖	42.6	2(线性内插99处)

原始的河道断面数据由里程、基点、基线方位角、起点距(主河槽岸边点有标记)、测点高程组成。其定位系统是基于1954北京坐标系和高斯克吕格3°分带投影的平面坐标系统。由于坐标转换误差和原始数据精度不同，把断面坐标转换到1980西安坐标系后，许多断面偏离了在HEC-RAS中绘制的河道骨架线。因此，本文不用断面基点和基线方位角来定位，而是先把王家坝、临淮岗闸下两处断面的中泓放在河道骨架线两端，使断面基线垂直于河道骨架线。然后，以断面的原来坐标值，计算各相邻断面的中泓间距、主河槽左岸点间距和右岸点间距，再分别计算出各相邻断面每种间距与其合计值的比值 R_m 、 R_l 、 R_r 。再根据HEC-RAS中王家坝至临淮岗河道骨架线长度，以 R_m 为权重系数，计算各相邻断面中泓间距，据此间距把各断面中泓依次布置在骨架线上。同样以 R_l 、 R_r 为权重系数，分别计算各相邻断面主河槽左、右岸岸边点间距，从而调整了各断面基线方位角。最后给主河槽和两侧滩地分别赋给曼宁系数，即建立了河道的几何模型(图2)。史灌河蒋集至三河尖和濠河分洪道，只有上下两端有断面数据，中间分别直线内插99处和129处断面，曼宁系数与淮干一样赋值。

(2)行蓄洪区模型。以导入HEC-RAS的行蓄洪区图层为背景，利用HEC-RAS行蓄洪区编辑功能(Storage Area)，提取背景图上濠洼、南润段、城西湖、邱家湖、姜唐湖5处行蓄洪区多边形，并从数字淮河平台分别读取相应的水位库容关系数据，即建立了该类模型。其水位和蓄水量变化过程可由进洪闸或口门进洪过程，根据水量平衡公式计算。

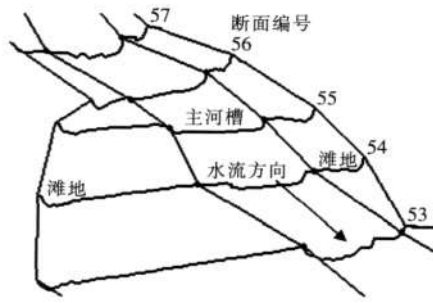


图2 润河集附近河道模型

(3) 水工建筑物模型。本模型中水工建筑物包括岸边水闸、拦河闸和岸边堰三类。以导入 HEC-RAS 的水利工程图层为背景，利用岸边建筑物编辑功能(Lateral Structure)，在王家坝闸、城西湖闸、姜唐湖闸处分别编辑水闸模型，利用拦河建筑物编辑功能(Inline Structure)，在临淮岗建立拦河闸模型，输入每孔闸门位置、宽度和高度，以及底板高程、堰流系数等参数。然后分别把岸边水闸模型与濠洼、城西湖、姜唐湖模型连接起来。岸边堰用于模拟无闸控制的南润段、邱家湖两行洪区的进洪口门。同样利用岸边建筑物编辑功能，在上述两进洪口门处建立岸边堰模型，选择堰型为宽顶堰，同时输入堰流系数、中心位置、完全冲开后底部的宽度和高程、左右两侧坡度和完全冲开历时，以及启用时的堰上水位，并把堰与相应的行洪区连接起来。

对于拦河闸泄洪过程，在闸门未提出水面的情况下，如果闸尾水深与闸上水深比值大于0.67，则采用淹没出流公式，否则采用自由出流公式。当闸门提出水面时，则采用标准堰的泄流计算公式。在计算过程中，根据计算水位和闸门开度实时切换计算公式。闸的流量系数根据实测的流量过程进行率定。

对于岸边水工建筑物分洪过程，需要考虑河道水面坡降的影响。对于岸边闸门泄流过程，计算公式与拦河闸完全一样，但需要对每一扇闸门分别计算闸上水头。对于岸边堰，根据堰流标准公式，沿河道水流方向(设为 X 方向)微分单元的过堰流量(dQ)可表达为式(1)：

$$dQ = C \times dx \times H^{3/2} \quad (1)$$

式中： C 为堰流系数； dx 为堰顶微分单元宽度； H 为微分单元处的堰上水头，为水位与堰顶高程差值。设岸边堰顶及其对应的河道水面线都是直线，则有

$$Z_{us} = a_{us}x + C_{us} \text{ 和 } Z_w = a_w x + C_w \quad (2)$$

式中： Z_{us} 、 C_{us} 分别为水位变量和堰顶上游的水位值， a_{us} 为水面坡降； Z_w 、 C_w 分别为堰顶高程变量和堰顶上游高程； a_w 为堰顶坡降。把式(2)代入式(1)，则有：

$$dQ = C \times dx \times (a_{us}x + C_{us} - a_w x - C_w)^{3/2} \quad (3)$$

对于上式，从堰顶上游 x_1 处至下游 x_2 处积分，则获得过堰总流量为：

$$Q_{x_1 \rightarrow x_2} = 2C / (5a_1) \left((a_1 x_2 + C_1)^{5/2} - (a_1 x_1 + C_1)^{5/2} \right) \quad (4)$$

式中： a_1 为河道水面坡降与堰顶坡降的差值， C_1 为 x_1 处水位与堰顶高程的差值。如果 a_1 为 0，则沿河道水流方向堰顶与水面线平行，这时采用标准堰流公式计算过堰流量。

3 系统验证和应用

2007年7月，淮河流域发生了流域性大洪水，王家坝至临淮岗河段整个7月份全线超过警戒水位，部分河段超过了保证水位。防汛部门先后启用了该河段濠洼、南润段、邱家湖、姜唐湖等行蓄洪区抵御洪水。本文利用这次洪水过程，对模拟系统进行实证研究。

3.1 边界条件生成 根据水力学模型原理，利用模型进行水流分析，必须在研究区域内所有开口处设置边界条件，在所有的河段端点和行蓄洪区都要设置初始条件。上游入口边界条件有流量过程、

水位过程、流量水位过程3种类型；下游出口边界除了上游的3种类型外，还有水位流量关系曲线、正常水深两种类型。对于王家坝、钫岗、蒋集等上游入口，选择流量过程作为边界条件。临淮岗没有流量实测资料，用其下游水位过程作为边界条件。所有水闸以闸门开启度过程、岸边堰以启用水位，以及相应的堰闸尺寸和出流公式为边界条件。虚拟的旁侧入流河道以流量过程为边界条件，该过程为实测润河集流量过程与王家坝、蒋集、钫岗三站合计流量过程的差值系列。

3.2 初始条件确定 岸边堰的尺寸和启用水位根据2007年7月洪水期实际情况进行调整。南润段7月11日12时行洪时，南赵集、润河集的水位分别为28.25m、27.79m，行洪口门堰启用水位取这两站水位平均值28.02m，堰顶高程为18.00m。实际行洪挖开了两个口门，模型中简化为一处岸边堰，堰底宽度采用两实际行洪口门的合计值253.00m。邱家湖的启用水位、口门宽度、堰顶高程根据实际发生情况，分别设为27.47m、210.00m、18.00m。以各站7月9日8时的流量、水位值为初始条件，包括王家坝、钫岗、蒋集、三河尖、南赵集和旁侧入流处的流量，以及所有行蓄洪区的水位。

3.3 系统验证 本文选择2007年7月9日8时—15日8时为率定期。把系统计算和输出时段长均设为1h，根据润河集水位和流量、临淮岗闸上三系列的模拟值与实测值的差距，调整各断面的曼宁系数 n 和堰闸的流量系数 C 等参数，使得模拟系列与实测系列吻合。确定性系数(R^2)和效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)用来衡量模拟系列与实测系列的吻合程度^[10]。取得比较满意的模拟结果后，利用率定的参数，把模拟期间改设为7月15日9时—31日8时，以验证系统的有效性。图3、图4给出了系统的模拟结果，其中前145h为系统率定期结果，之后的为验证期结果。根据系统输出结果，分别计算率定期和检验期的确定性系数 R^2 和效率系数NSE(见表3)。

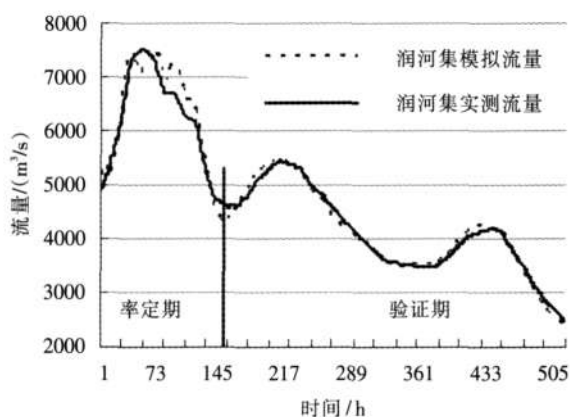


图3 润河集模拟和实测流量系列对比

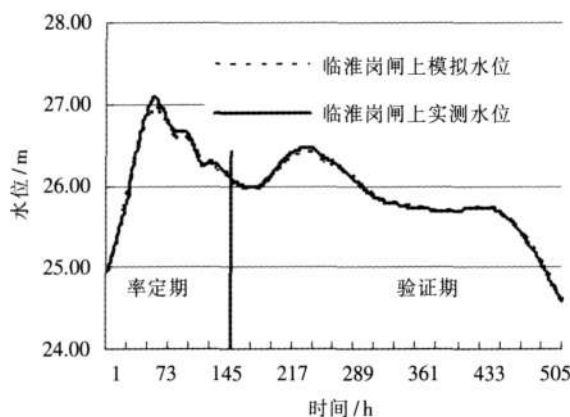


图4 临淮岗闸上模拟和实测水位系列对比

表3 系统模拟效率系数NSE和确定性系数 R^2 值汇总

模拟期	润河集 水位系 列NSE	润河集 水位系 列 R^2	润河集 流量系 列NSE	润河集 流量系 列 R^2	临淮岗 闸上水位 系列NSE	临淮岗 闸上水位 系列 R^2
率定期	0.948	0.974	0.913	0.936	0.978	0.997
验证期	0.977	0.998	0.985	0.987	0.994	0.998

根据表3数据，各系列的 R^2 均大于0.93，NSE值均大于0.91。和实测值比较，润河集洪峰水位绝对差不到0.01m，洪峰流量相对误差小于2%，临淮岗洪峰水位绝对差最大值为0.16m。可见，无论率定期还是验证期，模拟系列与实测系列均较好地吻合。

为了进一步验证系统的有效性和强健性，本文又利用2003年7月20日8时—30日8时的洪水过程对系统进行了验证，以润河集流量系列为例，统计的NSE和 R^2 均为0.991，表明模拟系列与实测系列也很好吻合(图5)。

3.4 系统应用 由于研究区域行蓄洪区众多，启用组合复杂多样，且启用会给当地造成巨大的经济损失，因此，每种方案都要根据具体情况，既要仔细论证，又要及时快速决策。本文研制的模拟系

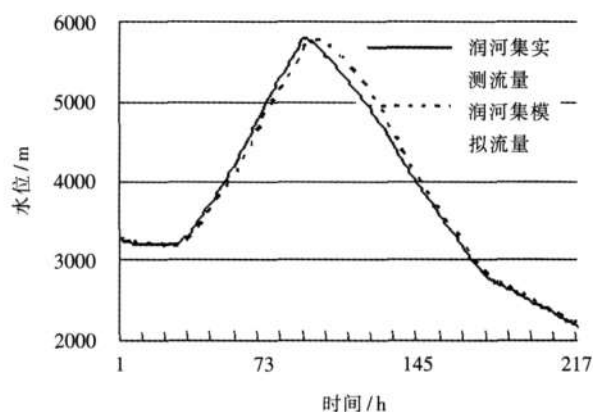


图5 润河集站2003年7月模拟和实测流量系列对比

统为启用方案效果评价提供了有效的支持。由于不掌握人口、耕地的地区分布数据，加上区内地势低平，这里把行蓄洪区作为整体处理，一旦进洪，整区受灾，在实际防洪工作中也往往这样处理。以2007年洪水调度为例，系统模拟了6种洪水调度方案的效果(表4)，其中方案4为实际发生的情况，当时润河集实测洪峰水位、流量分别为27.82m、7 520m³/s，模拟值与之接近。根据淮河防汛总指挥部于2007年汛前发布的淮河防御洪水方案，行洪区严格按照行洪水位启用，对于2007年洪水，南润段、邱家湖必然要使用。方案1、2模拟不启用蓄洪区的情况，结果表明这两种方案将导致润河集水位超过其附近的淮北大堤堤顶高程(28.20m)，将严重威胁淮北大堤安全。方案3、4与方案1相比，分别降低洪峰水位0.46m、0.47m，削峰率分别为18.5%、16.4%，都可以大大降低了淮北大堤的洪水压力。可见这两种方案，对于研究区域防洪形势影响是基本一样的，姜唐湖似乎没有发挥很大作用。又通过方案5专门模拟启用姜唐湖的情况，也验证了这一结论。可见，2007年启用姜唐湖主要是为了减轻临淮岗下游的防洪压力。方案6模拟了启用城西湖的情况，由于城西湖库容大，进洪快，启用后可以完全代替濠洼和姜唐湖。在方案4中，濠洼和姜唐湖进洪闸进洪过程根据当时报汛数据设定，它们分别自7月10日13时、7月11日15时启用，都持续46h，分别进洪2.44、1.68亿m³。方案6中系统设置城西湖36孔闸自7月10日13时全部开到最大开度，持续23h，进洪4.07亿m³，与方案4濠洼、姜唐湖进洪量总和相当。对于润河集水势影响来看，方案6、4是一样的。但城西湖作为淮河最大的蓄洪区，其启用不仅考虑本研究区域的情况，更多地考虑临淮岗下游的防洪安全，不到紧急关头不启用。同时从方案4可以看出，濠洼，姜唐湖还远没有达到最大蓄水量，足以控制防洪形势，还不需要起用城西湖。这些方案比较表明，该模拟系统可以帮助决策人员合理地选择洪水调度方案，尽可能地减少洪灾损失。

表4 各种行蓄洪区启用方案的模拟防洪效果

行蓄洪区启用	方案1: 全不启用	方案2: 南润段 邱家湖	方案3: 南润段 邱家湖濠洼	方案4: 南润段、 邱家湖、濠洼 姜唐湖	方案5: 姜唐湖	方案6: 南润段 邱家湖城西湖
润河集洪峰水位/m	28.21	27.98	27.75	27.74	28.20	27.71
润河集洪峰流量/ (m ³ /s)	8 361	7 802	6 812	6 987	8 487	7 023
淹没耕地/万 hm ²	0	0.32	1.52	2.30	0.78	2.71
影响人口/万人	0	3.60	19.15	29.29	10.14	16.41

4 结论

以数字流域为支撑，可规范高效地处理海量基础地理、河道断面和行蓄洪区、水利工程等数

据, 以满足洪水演进模拟的需要。以 HEC-RAS 为核心, 构建的流域中游平原区河段洪水演进模拟系统, 可灵活地修改河道断面几何形状, 增加删除和修改堰闸、桥梁、涵洞等水工建筑物, 满足对各种不同地理条件下河段洪水演进模拟的需要。淮河流域的实证研究表明, 系统能客观地反映洪水的运动规律, 可以应用于比较行蓄洪区启用方案对于河道水面线的影响, 分析各种调度方案下防洪形势, 从而为评估和选择洪水调度方案提供定量的技术支持, 体现出很强的实用性。

参 考 文 献:

- [1] 郑邦民. 计算水动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [2] 吴晓玲, 王船海, 向小华. 实时校正中的旁侧入流反演方法[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 52-57.
- [3] 胡四一, 施勇, 王银堂, 等. 长江中下游河湖洪水演进的数值模拟[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 278-286.
- [4] Maidment D R. Arc Hydro-GIS for water resources [M]. Redlands, California, USA: ESRI Press, 2002: 167-175.
- [5] 李国英. “数字黄河”工程建设实践与效果[J]. 中国水利, 2008(07).
- [6] 刘家宏, 王光谦, 王开. 数字流域研究综述[J]. 水利学报, 2006, 37(2): 240-246.
- [7] 水利部水文局, 水利部淮河水利委员会. 2003年淮河暴雨洪水[M]. 北京: 水利电力出版社, 2005.
- [8] Us Army Corps of Engineers HEC. HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual[R]. Davis, California, USA, 2002.
- [9] Minami M. Using ArcMap[M]. Redlands, California, USA: ESRI Press, 2000.
- [10] Krause P, Boyle D P, Båse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment[J]. Advances in Geosciences, 2005, 5: 89-97.

Combined simulation system for propagation of flood in plain rivers and its application

ZHANG Xing-nan, PENG Shun-feng

(National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: On the basis of the digital river basin and software HEC-RAS, the methods to treat the topography data of the flood channel and the flood flowing and retarding basin as well as the simulation of flood diversion project were studied. The approaches for automatic generating the upper and lower reaches boundary conditions and initial condition were suggested. The combination simulation system for flood propagation in the plain rivers was developed by combining the flood routing through the channel with that through the flood flowing and retarding basins. The system was applied to simulate the flood wave evolution under the different operation scenarios of the flood flowing and retarding basins and as the core of the system for real-time flood forecasting and operation in a river basin. The output of the system was adopted to evaluate the effects of flood flowing and retarding basins on flood propagation. The combination simulation system presented in this paper was validated by the data obtained from the Wangjiaba and Linhuaigang inter-reaches located in the Middle Huaihe River basin. There was a big flood all over the basin with several flood peaks in 2007. The first flood peak was used to calibrate the model parameters of the system and the following flood peaks were used to verify the system. The result indicated that the numerical solution of the hydraulic model based on HEC-RAS was stable with high simulating precision and the characteristics of flood propagation were described precisely.

Key words: flood control of a basin; combination simulation system for flood propagation; HEC-RAS; digital river basin

(责任编辑: 李福田)