

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.010

考虑下渗的河道与蓄滞洪区洪水演进过程模拟

吴滨滨^{1,2}, 喻海军^{1,2}, 穆杰^{1,2}, 马建明^{1,2}, 石亮³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;
3. 北京中科慧水技术有限公司, 北京 100036)

摘要:基于霍顿(Horton)下渗和有限体积法,建立了考虑动态下渗的一二维耦合水动力学模型,并选择海河流域漳卫河系与大名泛区联合防洪体系作为典型应用区域,利用典型场次洪水对河道模型进行了率定和验证,同时探讨了下渗对于河道行洪、蓄滞洪区分洪以及洪水演进过程的影响。结果表明:考虑动态下渗的河道模型具有较高模拟精度,3场典型洪水洪峰误差都在10%以内;河道下渗会明显推迟蓄滞洪区的启用时间,并减小分洪流量和洪水总量;蓄滞洪区下渗对分洪过程影响较小,但会加快蓄滞洪区的退水速度。

关键词:洪水模拟;一二维耦合;蓄滞洪区;下渗;海河流域

中图分类号:TV877 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0068-08

Flood simulation in river and flood storage-detention area considering infiltration // WU Binbin^{1,2}, YU Haijun^{1,2}, MU Jie^{1,2}, MA Jianming^{1,2}, SHI Liang³ (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. Beijing Zhongke Wisdom Water Technology Co., Ltd, Beijing 100036, China)

Abstract: A 1D-2D coupled hydrodynamic model considering the dynamic infiltration was developed based on the Horton infiltration formula and finite volume method. It was applied in the Zhangwei River system and Daming flood storage - detention area in the Haihe River Basin. The river model was calibrated and verified by using typical floods. At the same time, the influence of infiltration on flood discharge in river, flood diversion in the flood storage-detention area and flood evolution process were discussed. The results show that the river model considering dynamic infiltration has high simulation accuracy, and the peak error of three typical floods is within 10%. River infiltration will obviously delay the start-up time of the flood storage-detention area, and reduce the flood diversion flow and total amount. Infiltration in the flood storage-detention area has little effect on the flood diversion process, but it will accelerate the speed of water withdrawal in the flood storage-detention area.

Key words: flood simulation; 1D-2D coupling; flood storage-detention area; infiltration; Haihe River Basin

海河流域自1963年8月洪水以来,修建了大量水库,导致水库下游河道长期断流甚至干涸。同时,地下水超采严重,导致地下水位持续偏低,从而造成海河流域大部分河道水位和地下水水位长期处于脱节状态^[1-3]。一旦发生洪水,干河床的强烈下渗将导致不可忽略的渗漏损失,将对河道洪水演进过程产生显著影响^[3]。蓄滞洪区是流域防洪工程体系的重要组成部分,在防御河道超标准洪水或特大洪水

中具有重要作用。海河流域目前共28处蓄滞洪区,面积10693 km²,占流域总面积3%以上,涉及京津冀豫鲁5省市。河道下渗对蓄滞洪区的启用时机以及分洪量具有重要影响,同时蓄滞洪区内部地表土壤的下渗在海河流域也不可忽略,将对蓄滞洪区内部洪水演进过程及淹没范围产生影响。

目前,关于河道与蓄滞洪区联合防洪体系的模拟研究已从一维模型发展到一二维耦合模型以及全

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1502706);北京市自然科学基金重点项目(8181001);固原海绵城市建设及运营关键技术研究(SCHM-2018)

作者简介:吴滨滨(1987—),女,工程师,博士,主要从事水文水动力模拟研究。E-mail:wubb@iwhr.com

通信作者:马建明,教授级高级工程师。E-mail:mjm@iwhr.com

二维模型,其中一二维耦合模型兼具河道一维模型的计算效率和蓄滞洪区二维模型的细致模拟,具有很强的实用性^[4]。国内外单独针对河道下渗模拟的研究较多,但是在一二维耦合模拟中探讨下渗作用的研究较少。河道下渗模拟有两类主要方法:一是耦合地表(河道)和地下水的水动力学模型^[5-7];二是以河道下渗(采用 Green-Ampt、Horton 等下渗公式计算)作为区间出流,结合马斯京根或不同差分格式求解圣维南方程组的洪水演算方法(一般忽略动量影响)^[3,8-11]。目前国内研究以第二类方法为主,该方法相对第一类方法更加简便,所需资料更少,计算效率也更高,同时也符合我国北方地区地下水位长期偏低的情况,即使在洪水过程中,地下水位对入渗过程顶托现象发生的可能性也很小。本文针对我国长期干旱或半干旱地区的季节性河道及蓄滞洪区,基于霍顿(Horton)下渗和有限体积法,建立能够动态考虑下渗作用的一二维耦合水动力学模型,以期对河道与蓄滞洪区联合防洪体系的调度运用提供一定的指导。

1 研究区域概况

漳卫河系是海河流域最南部的防洪骨干水系,由漳河、卫河、卫运河、漳卫新河、南运河组成。漳河上游支流众多,主要支流清漳河与浊漳河在合漳村汇合后称漳河,至岳城水库出山区进入平原。漳河京广铁路桥以下高庄、太平庄起至徐万仓两岸有堤防约束,漳、卫两河于徐万仓相汇后称卫运河。

大名泛区位于河北省大名县中部漳河、卫河汇流的三角地带,东靠卫河左堤,北连漳河,西以自然高地为界,承担着本地区滞沥和漳河超量洪水的分洪任务。泛区地势西南高东北低,总面积约350 km²(不包括漳河堤防内部行洪滩区面积),涉及魏县、大名县 16 个乡镇,32 个村,约 28 万人,耕地面积 2.65 万 hm²;特别是大名县城也位于蓄滞洪区内。蓄滞洪区内部阻水建筑多,交通干路、涵洞等分布复杂,影响洪水演进过程。此外,小引河为泛区内主要排沥河道,自南向北穿县城东侧而过,河道上退水闸(高家固闸)是泛区的主要泄洪工程,可以将泛区内的洪水(包括县城洪涝沥水)退入漳河中,对保护大名县城和沿河乡村人民群众生命财产安全以及沿河农田起着至关重要的作用。

根据《漳卫河系防洪规划》^[12],当岳城水库泄流超过 1500 m³/s(即漳河发生 30 年一遇以上洪水)时,启用大名泛区。建国至今,漳河曾在 1951、1953、1954、1955、1956、1963 年 6 次破堤向大名泛区分洪。其中“63·8”洪水影响最大,蓄滞洪区最高滞

洪水位 45.44 m,最大蓄滞洪量达 5.1 亿 m³,滞洪历时 30 d。在前期风险图编制过程中,该区域已完成《大名泛区洪水风险图编制报告》^[13]、《漳河右堤洪水风险图编制报告》^[14]等成果。但前期风险图编制均属于静态风险图,以纯二维模型为主,内部河道、道路及涵洞分布区域网格尺寸偏小,极大地影响计算效率,且均未考虑下渗对河道及蓄滞洪区洪水演进的影响。

2 模型原理

采用中国水利水电科学研究院洪水分析软件(IFMS)^[15]中的一二维耦合水动力学模型开展河道及蓄滞洪区洪水演进模拟。其中河道洪水采用一维水动力学模型模拟,控制方程为一维圣维南方程组,并采用基于有限体积法的 Godunov 格式进行离散,该方法可以很好地处理水面大梯度流动和流态过度的情况;地表洪水演进采用二维水动力学模型,控制方程采用守恒型的二维浅水方程,采用基于有限体积法的 Godunov 格式进行离散求解,其中 Riemann 问题采用 Roe 格式的近似解进行计算,底坡源项采用特征分级离散,保证模型的守恒性,阻力源项采用隐式离散提高模型的稳定性,采用 MUSCL 空间重构和两步 Runge-Kutta 法使得模型具有时间和空间二阶精度,该方法能够适应复杂地形,计算大的水面间断,捕捉激波。地表一二维模型的耦合采用侧向连接实现,并采用使用最为广泛的堰流公式法来计算侧向连接的水流交换问题。

为了实现北方强下渗地区的洪水模拟,在一二维耦合水动力学模型中增加一维河道及二维地表的下渗模拟功能。其中一维模型以区间出流的形式考虑下渗(分河道扣除),采用 Horton 下渗公式进行计算;由于二维模型开始计算是在河道达到分洪水位之后,认为此时经过前期降雨湿润,蓄滞洪区已达到稳定下渗,因此在模型中采用稳定下渗率计算二维地表下渗(分网格扣除)。Horton 下渗公式假设下渗率是动态变化的过程,初始下渗率最大,此后以指数形式递减,直到最后达到一个稳定的下渗率,根据霍顿入渗公式的假定,土壤的瞬时下渗率采用下式计算:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

式中: f 为当前下渗率, mm/h; f_0 为初始下渗率, mm/h; f_c 为稳定下渗率, mm/h; k 为下渗衰减系数, 1/h; t 为累积有效下渗时间, h。

对式(1)积分可得累积下渗量 $F(t)$, 则任意时段平均下渗率为

$$f_{\text{cur}} = \min \left\{ i, \max \left[\frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t}, f_c \right] \right\} \quad (2)$$

式中: Δt 为计算时段长, h; f_{cur} 为时段平均下渗率, m/h; i 为 $h/\Delta t$ (h 为水深), m/h。当来水量小于下渗容量时, 全部下渗; 当来水量超过下渗容量时, 按下渗率的动态变化规律下渗。

单元下渗流量 Q_{in} 为时段平均下渗率与下渗面积 S 的乘积。对于一维模型, 在河道水位和地下水水位脱节状态下, 河道下渗以垂向下渗为主, 侧向下渗可以忽略不计, 因此 S 为下渗面在垂直方向投影的面积^[3]; 对于二维模型的稳定下渗率来说, $f_{\text{cur}} = f_c$, S 为有效单元网格的面积。

3 模型构建

3.1 一维河道模型

为了更准确地模拟大名泛区段漳河水位, 需要考虑漳河、卫河、卫运河整体的情况(如下游对漳河洪水的顶托), 同时兼顾可获得实测数据的测站分布情况。本研究一维河道建模范围确定为漳河(岳城水库以下)、卫河(元村以下)和卫运河(徐万仓—南陶)河段(图1)。河道地形均采用实测断面, 漳河河段(岳城水库—徐万仓)总长约 113 km, 总断面数 98 个, 平均比降约 0.6‰, 其中岳城水库至京广铁路段平均比降约为 2‰; 卫河河段(元村—徐万仓)总长约 52 km, 总断面数 52 个, 平均比降约 0.1‰; 卫运河河段(徐万仓—南陶)总长约 7.2 km, 总断面数 6 个, 平均比降约 0.3‰。此外, 对于蓄滞洪区内部小型退水河道——小引河, 根据《河北省大名县小引河河道治理工程》^[16] 的设计河道断面设置, 小引河整体防洪(排淤)为 10 年一遇标准, 平均底宽为 12.7 m, 边坡为 1:2。在 IFMS 模型中将该一维河道模型建立在二维网格边元上。

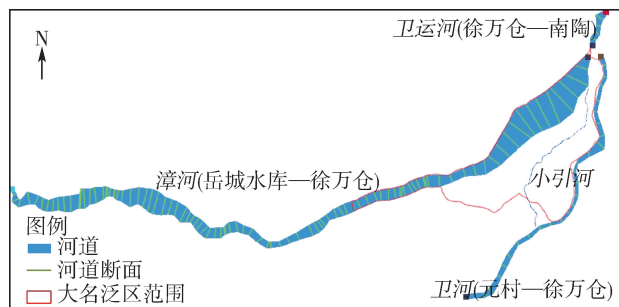


图1 一维河道模型建模范围及断面分布

3.2 二维模型

根据《漳卫河系防洪规划》^[12], 当岳城水库下泄流量超过 3000 m³/s, 如大名泛区已充分运用, 视后续洪水及堤防防守情况, 必要时依次扒开二分庄、三宗庙等堤段分洪入漳、卫夹道地区, 确保漳河左堤安

全。为满足 50 年一遇(3000 m³/s)以上洪水分析需要, 二维建模范围扩展至整个漳卫夹道地区, 西起京广铁路桥, 该范围为漳河右堤防洪保护区(含崔家桥、大名泛区两个蓄滞洪区, 下同), 总面积超 1600 km², 其中大名泛区面积约 350 km²。

对整个区域进行网格剖分, 将区域内主要道路和小河流等作为内部约束边界, 最终共划分成约 31214 个非结构四边形网格, 其中对大名泛区(特别是分洪口门等关键位置处)进行加密处理, 平均网格尺寸约为 100 m, 而其他区域网格平均尺寸约为 250 m。采用前期风险图地形数据进行二维网格高程插值, 并将主要道路设置成线形阻水建筑物在网格边元上予以考虑, 将测量的实际高程作为阻水建筑物的高度, 采用堰流公式计算建筑物两侧的过流水量。大名泛区内主要道路为 G45 大广高速、邯大高速、S215 和 S313 两条省道快速路, 以及多条环县城公路; 其他位于大名泛区外, 在漳河右堤防洪保护区范围内考虑的主要道路为 G4 京港澳高速和 S22 南林高速。这些道路的高程采用前期风险图测量成果, 并对大名县城环城道路进行补充测量和验证。对于主要道路中存在的涵洞, 采用前期风险图成果测量的桥涵、路涵实际尺寸作为模型参数, 其中对于较大的桥涵直接设置为不挡水, 允许洪水正常演进; 对于其他路涵和桥涵则采用《水力计算手册(第二版)》中隧洞有压流和无压流公式计算过流水量^[17]。二维模型建模范围及网格、地形、道路设置见图2。

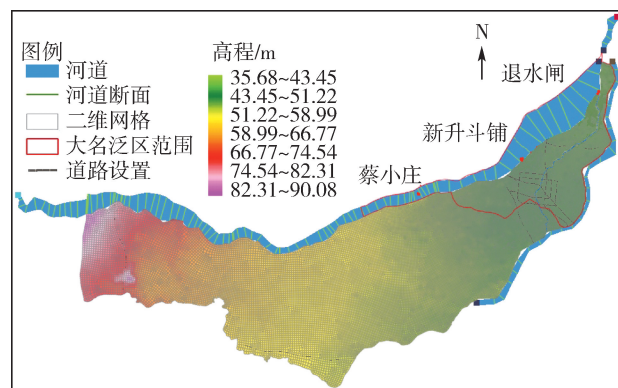


图2 二维模型建模范围及网格、地形、道路设置

3.3 一二维耦合

采用侧向连接进行一二维耦合设置。由于只考虑漳河右堤向大名泛区及漳河右堤防洪保护区的分洪情况, 因此只需要建立漳河一维河道模型(右岸)与二维蓄滞洪区的侧向连接; 而对于蓄滞洪区内部小型退水河道(小引河), 采用边元耦合的方式模拟一维河道和二维地表的水流交互, 即在二维网格边元上设置和建立一维河网模型, 网格划分时不考虑河道宽度, 因而保证二维网格尺寸均匀, 提升计算效

率和稳定性^[18]。

3.4 边界条件

模型边界条件主要为一维模型边界条件,其中漳河上游入流边界为岳城水库出流,卫河上游入流边界为元村站实测流量,下游卫运河的出流采用南陶水文站的水位流量关系曲线。对于蓄滞洪区内部的小引河考虑初始条件为干河床,无入流,下游出流为退水闸(高家固闸)。

3.5 分洪口门及退水闸

根据《漳卫河系防洪规划》等^[12],大名泛区分洪方案为:当漳河发生30年一遇以上洪水(岳城水库泄流超过1500 m³/s)时,扒漳河右堤开始向大名泛区分洪;遇30~50年一遇洪水,岳城水库限泄3000 m³/s,分洪口门以下河道泄流1500 m³/s,大名泛区分洪口门需分洪1500 m³/s;遇50年一遇以上洪水,即岳城水库下泄流量超过3000 m³/s,如大名泛区已充分运用,视后续洪水及堤防防守情况,必要时依次扒开二分庄、三宗庙等堤段分洪入漳、卫夹道地区,确保漳河左堤安全。分洪后当蓄滞洪区内小引河上高家固闸前水位42.72 m、闸下水位42.58 m时,打开小引河闸泄洪,最大泄洪流量110 m³/s。

关于大名泛区具体采用的分洪口门目前仍存在争议^[19]。《漳卫河系防洪规划》^[12]推荐使用分洪条件更有利的东王村分洪口门;但为了解决分洪洪水直接冲向大名县城的问题,《漳河干流近期治理工程可研大名束堤和分洪口门工程专题论证报告》^[20]建议将其调整成新升斗铺分洪口门,海河水利委员会于2013年8月对该论证报告进行了审查,同意了此方案,但该报告一直未批复。在本研究中,暂定以新升斗铺为大名泛区分洪口门开展模拟分析。

在模型中以溃口的形式模拟漳河右堤的分洪口门,以自定义溃口的形式(控制水流方向及最大出流)模拟小引河退水闸(高家固闸)。

4 模型率定与验证

由于大名泛区自1963年后都未曾启用,而“63·8”洪水距今相隔时间较远,下垫面条件、地形地貌等发生了较大变化,并不太适合用来进行模型的率定和验证。本次收集到漳河和卫河1996年8月1日至8月30日(199608号洪水)、2013年7月15日至

8月10日(201307号洪水)、2016年7月15至8月15日(201607号洪水)3场洪水过程数据,大名泛区均未启用,因此仅利用历史洪水对一维模型进行率定和验证。

模型中所有河道初始条件考虑为无水状态,干河床起算,每场洪水模拟时长为30 d左右,时间步长为10 s,输出间隔为10 min。采用漳河蔡小庄站(距岳城水库约74 km)的实测流量率定漳河一维河道模型的糙率和下渗参数。由于本研究中201307和201607两场洪水的洪峰均小于300 m³/s,在漳河岳城水库—蔡小庄段基本没有发生漫滩,洪水集中在河道主槽内,因此采用201607号洪水的实测流量对主槽糙率和下渗参数进行率定,并用201307号洪水进行验证。同时,采用199608号洪水的实测流量对漳河滩地糙率进行率定。率定结果如下:初始下渗率 $f_0=1825$ mm/h,稳定下渗率 $f_c=5$ mm/h,衰减系数 $k=0.25$ h⁻¹,主槽糙率为0.035,滩地糙率为0.06。此外,由于卫河、卫运河一维模型缺少相关站点率定数据,河道糙率采用《漳卫河系防洪规划》^[12]中的设计值,下渗参数采用漳河率定参数。大名泛区内部小型退水河道小引河的一维模型糙率取0.02,不考虑下渗。

3场洪水的模拟结果见表1及图3。总体而言,模拟效果较好,3场洪水的洪量误差在5%左右,洪峰误差均在10%以内,201307和201607两场中小洪水的洪峰出现时间误差在12 h以内,而1996.8月洪峰出现时间误差偏大一些,约为27.7 h。主要原因在于本研究采用的漳河河道为2011年实测地形,距199608号洪水较久远,且199608号洪水之前降雨导致河道下渗能力下降,对洪水演进过程均有较大影响。但总体上,本次构建的考虑动态下渗的一维水动力模型的模拟结果与实测值较接近,说明该模型可以用于北方地区下渗影响严重的河道洪水模拟。

表2为漳河河道洪水模拟相关研究中模型设置情况。与其他在漳河开展的洪水模拟研究相比较,本研究率定的漳河主槽和滩地糙率取值高于《漳卫河系防洪规划》^[12]中采用的河道原设计值,跟齐晶等^[21]、张晓杰^[22]的取值相近。实际上,近年来,由于漳河长年断流河底杂草丛生,且沿河居民甚至在主河槽种植庄稼和树木,大大增加了糙率^[23];而滩

表1 漳河一维河道模型蔡小庄测站典型洪水模拟结果

洪水场次	洪量			洪峰流量			峰现时间		
	实测值/	模拟值/	相对误差/	实测值/	模拟值/	相对误差/	实测值	模拟值	时间误差/
	亿 m ³	亿 m ³	%	(m ³ ·s ⁻¹)	(m ³ ·s ⁻¹)	%			
199608	6.32	6.19	2.10	1470	1402	4.60	1996-08-06T16:30	1996-08-07T20:10	27.70
201307	1.73	1.82	5.20	258	276	7.00	2013-07-26T8:00	2013-07-26T19:10	11.20
201607	1.71	1.79	4.70	290	281	3.10	2016-07-27T16:30	2016-07-27T16:50	0.33

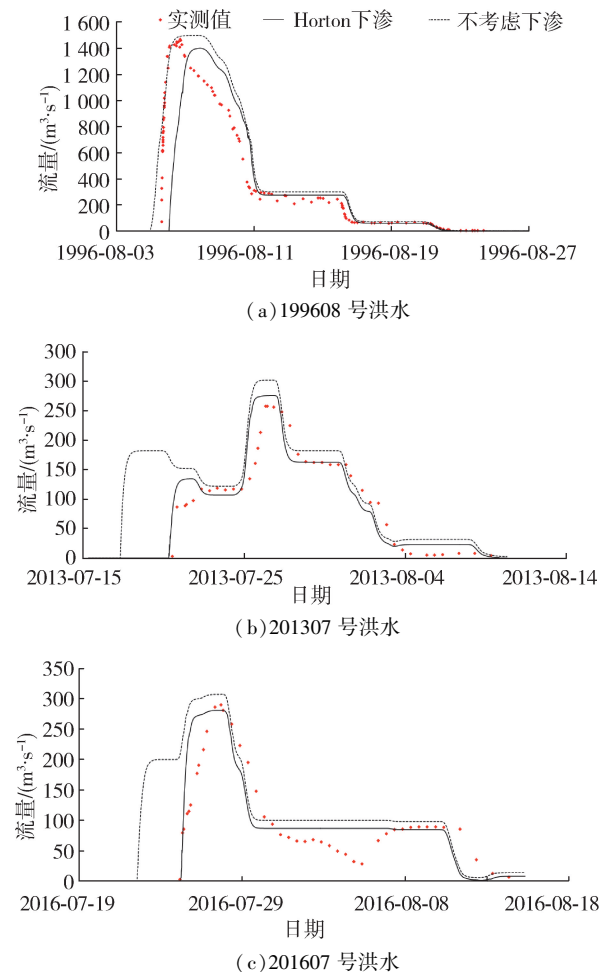


图3 漳河蔡小庄测站典型洪水模拟结果

表2 漳河河道洪水模拟相关研究中模型设置情况

文献来源	洪水演进方法	糙率设置	下渗设置	洪水场次	河道断面测量年份
《漳卫河系防洪规划》 ^[12]	一维水力学模型	主槽糙率:岳城水库—邳镇—南尚村—徐万仓3段分别为0.03,0.025,0.02;滩地糙率0.05(清障)	不考虑下渗		1996—1999年
顾志强等 ^[25]	马斯京根		霍顿($f_0 = 1\ 137\ \text{mm/h}$, $f_c = 20.9\ \text{mm/h}$, $k = 0.481$)	199608	
齐晶等 ^[21]	有限差分法	主槽0.032,滩地0.06	达西定律(岳城水库—京广铁路—南尚村—徐万仓3段的渗透系数分别为:50 m/d、1 m/d、0.8 m/d)	19820729至20010807共16场	1997年
程亮等 ^[3]	马斯京根-康吉	主槽0.02,滩地0.07	霍顿($f_0 = 1\ 823.66\ \text{mm/h}$, $f_c = 12.3\ \text{mm/h}$, $k = 0.2$)	19880805、19960804	1995年
王宗志等 ^[8]	有限差分法	未提及	霍顿(岳城水库—京广铁路桥—南尚村—徐万仓3段的渗透系数分别为50 m/d、1 m/d、0.8 m/d)	19820728、19880805、19960804	1999年和2010年
李婷婷等 ^[24]	有限差分法(恒定流)	未提及	稳定下渗率(岳城水库—邳镇—曹村—蔡小庄3段的 f_c 分别为8.208 mm/h、9.576 mm/h、5.994 mm/h)	199608、2002、2004—2006、2008	未提及年份
张大伟等 ^[26]	有限差分法	主槽0.025,滩地0.05	不考虑下渗	19820801	未提及年份
张晓杰 ^[22]	一维水力学模型	主槽0.035,滩地0.1	不考虑下渗	199608	未提及年份
本研究	有限体积法	主槽0.035,滩地0.06	霍顿($f_0 = 1\ 825\ \text{mm/h}$, $f_c = 5\ \text{mm/h}$, $k = 0.25$)	199608、201307、201607	2011年

地上更是内部村庄不断扩大,高秆作物和防护林的阻水作用也很明显^[23],现状实际的滩地糙率应高于本研究用199608号洪水所率定的值(0.06)。对于Horton下渗参数,率定过程中受河道断面地形、下渗面计算方法、前期降雨量(土壤含水量)等多种因素影响,由于所采用的洪水演进方法、断面年代、洪水场次等不同,本研究的率定值跟表2中的其他研究取值不同,其中稳定下渗率与李婷婷等^[24]的研究最为接近,主要原因在于用于率定的洪水场次都是2000年以后的,时间上更为接近。因此,有必要增加对河道下垫面的调查,以及对下渗和洪水过程的实测等,以提高北方强下渗地区河道洪水预报模型的准确性。

5 模型应用

5.1 下渗对河道洪水演进过程的影响

选取漳河岳城水库-蔡小庄河段探讨下渗对河道洪水演进过程的影响,因为该河道基本无区间入流,且在199608、201307和2016073场实测洪水中均未发生漫溢。采用3场洪水中岳城水库实测泄流和蔡小庄站实测流量,计算该河段下渗量。结果如表3所示,3场洪水的下渗损失率均在20%以上,表明洪水演进过程中下渗损失非常显著,特别是在201307和201607这两场中小量级洪水中,该河段

下渗损失率高达 30% 以上。同时,洪峰也有类似洪量随河道沿程衰减的规律,199608 号洪水洪峰衰减 $30\text{ m}^3/\text{s}$,约占洪峰总量的 2%;201307 和 201607 中小洪水洪峰衰减分别为 $44\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $17\text{ m}^3/\text{s}$,约占洪峰总量的 14.6% 和 5.5%。这与前人对河道下渗的研究结果^[24,27]一致,即河道下渗损失率和洪峰相对衰减量一般随着洪水量级的增大而减少。

表 3 岳城水库—蔡小庄河段典型洪水的演进与下渗

洪水场次	洪峰/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		洪峰传播时间/h	洪量/亿 m^3		下渗量/亿 m^3	损失率/%
	上断面	下断面		上断面	下断面		
199608	1500	1470	42	8.06	6.32	1.74	21.6
201307	302	258	44	2.51	1.73	0.78	31.1
201607	307	290	41	2.80	1.71	1.09	38.9

为了进一步分析下渗对河道洪水演进的影响,采用率定的模型模拟了不考虑河道下渗的洪水演进过程,并与实测洪水过程和考虑 Horton 下渗的洪水过程进行对比分析,结果如图 4 所示。可见不考虑下渗的模拟洪量、洪峰流量都明显高于实测洪量,且见水时刻显著提前。因此,对于河道下渗具有显著影响的北方河道,不应在洪水预报中忽略下渗作用。

5.2 下渗对口门分洪过程的影响

由于收集到的 3 场洪水都未启用大名泛区,因此采用情景分析探讨下渗对口门分洪过程以及蓄滞

洪区洪水演进过程的影响。情景分析考虑岳城水库 50 年一遇泄流情况下漳河向大名泛区的分洪情况(分洪口门为新升斗铺),共设置 4 个方案分别考虑河道下渗与否以及蓄滞洪区下渗与否,计算时间为 30 d(1 个月)。4 个方案的水量平衡计算结果见表 4。

表 4 50 年一遇洪水下蓄滞洪区水量平衡分析

方案	河道下渗	蓄滞洪区下渗	分洪入流量/亿 m^3	总出流/亿 m^3	计算区域蓄水量/亿 m^3	下渗量/亿 m^3
方案一	不考虑	不考虑	5.56	2.96	2.60	
方案二	考虑	不考虑	4.88	2.48	2.40	
方案三	考虑	考虑	4.99	2.00	0.02	2.97
方案四	不考虑	考虑	5.93	2.24	0.03	3.66

4 个方案的模拟结果表明河道下渗对分洪口门分洪过程的影响显著(方案一对比方案二,方案三对比方案四)。对比方案一和方案二,当考虑河道下渗后,新升斗铺的开始分洪时间推迟约 6 h,到达最大分洪流量的时间推迟约 8 h,最大分洪流量减小了 8.0%,即由 $1500\text{ m}^3/\text{s}$ (不考虑河道下渗)降低为 $1380\text{ m}^3/\text{s}$ (考虑河道下渗),而分洪总量也减小了 12.2%,即由 5.56 亿 m^3 减小为 4.88 亿 m^3 。对于蓄滞洪区下渗,4 个方案的模拟结果(方案一对比方案四,方案二对比方案三)显示蓄滞洪区(大名泛区)下渗对分洪过程影响相对较小。

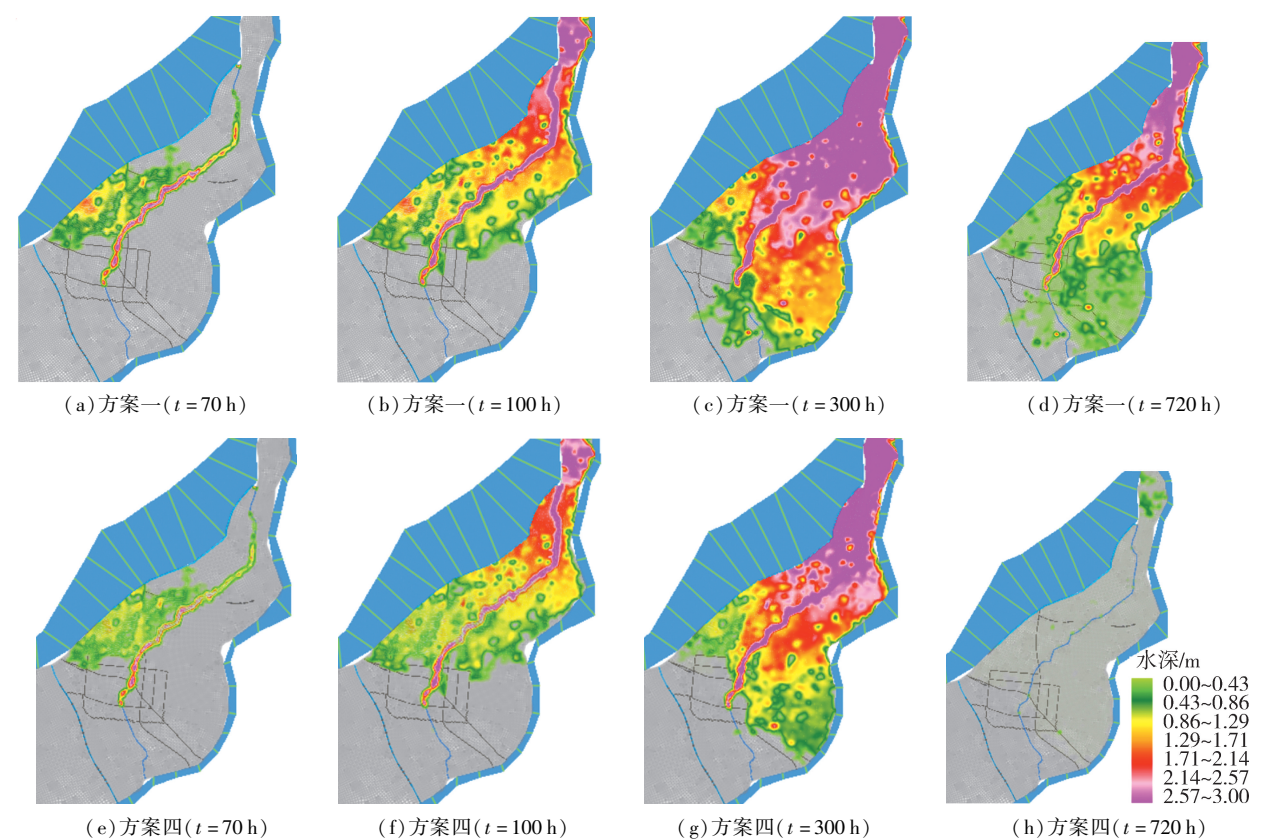


图 4 50 年一遇洪水大名泛区不同时刻淹没图(不考虑河道下渗)

5.3 下渗对蓄滞洪区洪水演进过程的影响

对比方案一与方案四、方案二与方案三,从模拟结果可以看出,在遭遇 50 年一遇洪水时,考虑蓄滞洪区下渗的洪水淹没范围及淹没水深基本上都小于对应时刻不考虑下渗时的洪水淹没范围及水深。对比方案一和方案四(图 5),在 $t = 70$ h 时洪水已经漫过 215 省道,流入小引河,并且小引河开始漫溢,随着时间的推移,淹没范围不断扩大,由于蓄滞洪区下游退水能力有限,导致水深不断增加,洪水不断向上游蔓延,最终淹没大名县城的北部和东部,其中对于不考虑下渗的方案一还淹没了县城南部部分区域;在 $t = 300$ h 时,两个方案都接近最大淹没面积,此时不考虑下渗比考虑下渗的方案蓄水量多 1.20 亿 m^3 ,淹没面积多 25.04 km^2 ,平均淹没水深大 0.41 m ;在最后时刻($t = 720$ h),考虑下渗时的蓄滞洪区基本已将洪水排尽,而不考虑下渗的蓄滞洪区仍有很大面积的淹没,在水量平衡计算中(表 4)也发现蓄滞洪区的总入渗量已超过退水闸的总出流。该结果也表明在蓄滞洪区长历时洪水演进过程中下渗作用影响较大。

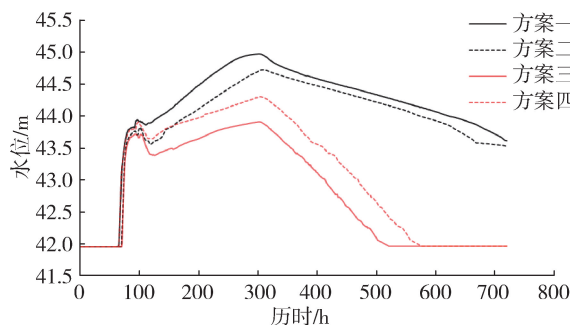


图 5 50 年一遇洪水下北环路与小引河交界附近
洪水位变化过程

再对比 4 个方案中北环路与小引河交界附近洪水位变化过程。可以看出,考虑河道下渗时,进入蓄滞洪区的洪水相应减少,涨水及退水阶段的洪水位都明显低于不考虑河道下渗的洪水位。其中方案一河道下渗及蓄滞洪区下渗均不考虑,洪峰水位最大为 44.97 m ;方案二考虑河道下渗(不考虑蓄滞洪区下渗)后略低于方案一,为 44.72 m ;而方案四在不考虑河道下渗但考虑蓄滞洪区下渗的情况下洪峰水位略低于方案二,为 44.30 m ;方案三同时考虑河道下渗与蓄滞洪区下渗,洪峰水位为 4 个方案中最小值(43.91 m)。总体上,4 个方案洪峰水位的差值最大超过 1 m 。退水阶段,洪水位的下降主要受蓄滞洪区的下渗影响,且蓄滞洪区下渗明显加快了退水

速度,方案三和方案四中该点位分别在 522 h 和 577 h 时洪水完全退去。

6 结 论

考虑动态下渗的河道模型能够较好地反应漳河洪水实际演进过程,在漳河、蔡小庄站 3 场典型洪水的模拟中,洪量误差在 5% 左右,洪峰误差均在 10% 以内。此外,探讨了下渗对于河道行洪、蓄滞洪区分洪以及内部洪水演进过程的影响。以漳河 50 年一遇设计洪水为例,考虑河道下渗与否、蓄滞洪区下渗与否,共设计 4 个方案情景进行模拟,得出结论:河道下渗会显著推迟蓄滞洪区的启用时间,并减小分洪流量和洪水总量;蓄滞洪区下渗对出口的分洪影响相对较小,但是会显著加快蓄滞洪区的退水速度。

参考文献:

- [1] 任宪韶,户作亮,曹寅白,等. 海河流域水资源评价[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [2] 水利部海河水利委员会. 海河流域防洪规划[R]. 天津:水利部海河水利委员会,2005.
- [3] 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: 207-215. (CHENG Liang, WANG Zongzhi, HU Siyi, et al. Flood routing model incorporating intensive streambed infiltration[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45: 207-215. (in Chinese))
- [4] 李春辉,徐国宾,苑希民,等. 河道与蓄滞洪区联合防洪数值模拟研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):139-144. (LI Chunhui, XU Guobin, YUAN Ximin, et al. Research progress on numerical simulation of joint flood control in river and flood detention area[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(6): 139-144. (in Chinese))
- [5] GUNDUZ O M, ARAL M. River networks and groundwater flow: a simultaneous solution of a coupled system[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1): 216-234.
- [6] RODRIGUE L B, CELLO P A, VIONNET C A, et al. Fully conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream-aquifer interactions in a drainage basin[J]. Journal of Hydrology, 2008, 353(1/2): 129-142.
- [7] 武强,孔庆友,张自忠,等. 地表河网-地下水流系统耦合模拟 I: 模型[J]. 水利学报, 2005, 36: 588-592. (WU Qiang, KONG Qingyou, ZHANG Zizhong, et al. Coupled modeling of surface water-groundwater system I. model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36: 588-

592. (in Chinese))
- [8] 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. Modelling 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))
- [9] 武桂芝. 大沽河河道渗漏及其对洪水演进影响研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
- [10] 田月,田淳,郝瑞霞. 河道水力学模型及最小生态需水量的估算[J]. 太原理工大学学报,2016,47(4):536-540. (TIAN Yue, TIAN Chun, HAO Ruixia. Channel hydraulics model and estimate of the minimum ecological water demand [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, 47(4): 536-540. (in Chinese))
- [11] MORIN E, GRODEK T, DAHAN O, et al. Flood routing and alluvial aquifer recharge along the ephemeral arid Kuiseb River, Namibia[J]. Journal of Hydrology, 2009, 368:262-275.
- [12] 中水北方勘测设计研究有限责任公司,水利部天津水利水电勘测设计研究院. 漳卫河系防洪规划[R]. 天津:中水北方勘测设计研究有限责任公司,2008.
- [13] 河北省水利水电第二勘测设计研究院. 大名泛区洪水风险图编制报告[R]. 石家庄:河北省水利水电第二勘测设计研究院,2015.
- [14] 中水珠江规划勘测设计有限公司. 漳河右堤洪水风险图编制报告[R]. 广州:中水珠江规划勘测设计研究有限公司,2016.
- [15] 马建明,喻海军,张大伟,等. 洪水分析软件在洪水风险图编制中的应用[J]. 中国水利,2017(5):17-20. (MA Jianming, YU Haijun, ZHANG Dawei, et al. Adoption of evaluation software in flood risk map drawing[J]. China Water Resources, 2017(5): 17-20. (in Chinese))
- [16] 邯郸市水利水电勘测设计研究院. 河北省大名县小引河河道治理工程[R]. 邯郸:邯郸市水利水电勘测设计研究院,2009.
- [17] 李炜,水力计算手册[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [18] 喻海军,吴俊峰,吴滨滨,等. 基于二维网格边元设置河道方法的蓄滞洪区洪水演进分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):179-184. (YU Haijun, WU Junfeng, WU binbin, et al. Application of flood a new 1D-2D simulation in numerical model coupling strategy to flood storage-detention areas[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16 (3): 179-184. (in Chinese))
- [19] 刘恩杰,刘龙龙. 大名滞洪区分洪口门位置的确定[J]. 中国水利,2015(2):43-45. (LIU Enjie, LIU Longlong. Positioning of flood diversion gate in Darning Flood Retention Basin [J]. China Water Resources, 2015 (2): 43-45. (in Chinese))
- [20] 中水北方勘测设计研究有限责任公司. 漳河干流近期治理工程可研大名束堤和分洪口门工程专题论证报告[R]. 天津:中水北方勘测设计研究有限责任公司,2012.
- [21] 齐晶,王哲. 基于 EasyRiv1D 模型的漳卫河流域河道洪水演进模拟研究[J]. 水文,2017,37(6):80-83. (QI Jing, WANG Zhe. Simulation study on river flood routing in Zhangwei Basin based on Easy Riv1D model [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37 (6): 80-83. (in Chinese))
- [22] 张晓杰. 岳城水库洪水风险图研究分析[J]. 海河水利,2007(6):33-36. (ZHANG Xiaojie. Study on the flood risk maps of Yuecheng reservoir [J]. Haihe Water Resources, 2007(6): 33-36. (in Chinese))
- [23] 白俊良,黄启芳. “96·8”洪水后漳河下游河道演变状况探讨[J]. 海河水利,2018(5):24-26. (BAI Junliang, HUANG Qifang. Study on the evolution of the lower reaches of Zhang river after the “96·8” flood [J]. Haihe Water Resources, 2018 (5): 24-26. (in Chinese))
- [24] 李婷婷,黄津辉. 漳河平原河段河道渗漏研究[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(1):12-15. (LI Tingting, HUANG Jinhui. Study of channel leakage in the plain reach of Zhang River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12 (1): 12-15. (in Chinese))
- [25] 顾志强,季志恒,胡春歧. MSKLOSS 河道洪水演算模型参数敏感性分析[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(2):73-79. (GU Zhiqiang, JI Zhiheng, HU Chunqi. Parameter sensitivity alysis of MSKLOSS river flood routing model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15 (2): 73-79. (in Chinese))
- [26] 张大伟,雷晓辉,蒋云钟,等. 改进河道洪水演进模型在漳卫河的应用[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(3):176-179. (ZHANG Dawei, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Application of improved river flood routing model in Zhangwei River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 176-179. (in Chinese))
- [27] 喻海军,马建明,范玉燕. 河道渗漏模拟计算方法研究进展[J]. 人民珠江,2017,38(12):11-15. (YU Haijun, MA Jianming, FAN Yuyan. Research progress and perspective of simulation methods of river seepage [J]. Pearl River, 2017, 38(12): 11-15. (in Chinese))

(收稿日期:2018-12-27 编辑:王芳)