

考虑地下水入渗的洪水演进模型构建及应用

刘江侠¹, 王佰伟²

(1. 水利部海河水利委员会科技咨询中心, 天津 300170; 2. 水利部海河水利委员会, 天津 300170)

摘要: 近年来我国北方地下水埋深逐渐增加,在洪水演进中,地下水渗漏的可能性较大,从而对洪水演进可能产生较大影响。针对此问题,以小清河分洪区及其西部为研究对象,建立了考虑地下水入渗的洪水演进模型。利用该模型对小清河分洪区的设计标准洪水进行了模拟,分析了地下水渗漏对小清河分洪区、河北省部分区域的水位以及出口东茨村的水位和泄量的影响。模拟结果表明:地下水渗漏对小清河分洪区的洪水演进有较大影响。因此在小清河分洪区的调度运用以及治理规划时,需要充分考虑地下水渗漏这一重要因素。

关键词: 地下水渗漏; 洪水演进; 二维非恒定流; 格林-安普特公式; 小清河分洪区

中图分类号: TV122.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0168-05

Study on flood routing model and application considering groundwater leakage

LIU Jiangxia¹, WANG Baiwei²

(1. Consultation Center of Science & Technology of Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300170, China;

2. Haihe River Water Conservancy Commission, MWR, Tianjin 300170, China)

Abstract: In recent years, the gradual increase of groundwater depth may cause large proportion of leakage, which may influence flood routing obviously. For that reason, flood routing model considering groundwater leakage was established taking Xiaoqinghe flood diversion area and its west zone as study object. The model was applied to simulate the flood design - standard of Xiaoqinghe flood diversion area. Then the influence of groundwater leakage on flood level of the Xiaoqinghe flood diversion area in Hebei Province, and flood level of Dongcicun station, which is the exit of the flood diversion area, was analyzed. The study result indicated that groundwater leakage had great effect on flood routing in the Xiaoqinghe flood diversion area. Therefore, groundwater leakage must be considered sufficiently in flood control and manage, and construction planning.

Key words: groundwater leakage; flood routing; two - dimensional unsteady flow; Green - Amput Formulation; Xiaoqinghe flood diversion area

近几十年来人类活动在多地引起了下垫面条件的显著变化,下垫面条件的显著变化不仅影响洪水的产生过程,对洪水演进可能也会造成影响。关于下垫面变化对洪水影响的研究较多^[1-5],但更多侧重于对洪水产生过程的影响研究,对洪水演进影响的研究分析还较少。另一方面,洪水对地下水影响的研究较多^[6-9],而地下水入渗这一因素对洪水演进的量化影响研究也较少。本文即以地下水位较低的小清河分洪区为研究对象,研究分析地下水渗漏对洪水演进的影响。

我国北方地区近年干旱少雨,地下水超采现象严重^[10],海河流域地下水位下降明显^[11-12],以小清河分洪区及其西部区域为例,地下水最大埋深将近30m。洪水发生时,入渗对洪水演进的影响十分显著。在海河流域2012年发生的“7.21”洪水过程中,拒马河上游的张坊站实测洪峰流量达到2500 m³/s、大石河漫水河站实测洪峰1110 m³/s,由于河道的渗漏,洪水演进至下游新盖房时洪峰流量仅为217 m³/s^[13]。在洪水演进中地下水渗漏的作用大小,特别是对小清河分洪区内的水位和分洪区下游

东茨村水位影响的大小,需要进行量化。针对以上问题,本文建立了考虑地下水入渗的二维非恒定流洪水演进模型,对入渗的影响进行了分析,以量化地下水渗漏的影响,为小清河分洪区治理和建设提供地下水渗漏定量影响的参考和依据。

1 模型构建

以圣维南方程组为基础,同时考虑地下水沿程渗漏,构建二维非恒定流数学模型。

1.1 洪水演进模型

洪水演进采用二维浅水非恒定流基本方程,如下:

连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \tag{2}$$

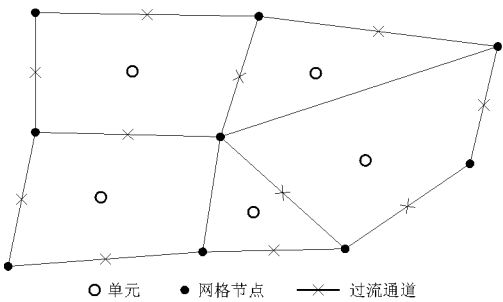


图1 H和Q的空间布置方式

1.2 地下水渗漏计算方法

下渗率采用简化的 Green - Ampt 下渗曲线^[15]计算,在下渗过程中土壤水分剖面线不断向下延伸,如图 3 所示。

湿润锋面与土壤表面之间的水势梯度表示为 $[-(s_f + z_f) - H]/z_f$, s_f 为土壤吸力, $-(z_f + s_f)$ 为湿润锋面处的总水势。则地表处的入渗率 f_p 为:

$$f_p = K_s \left(\frac{s_f + H}{Z_f} + 1 \right) \tag{4}$$

式中: K_s 为饱和水力传导度^[16], cm/d, 本文采用 40 ~ 80 mm/h。

此次模型计算时,假定下渗土层土壤含水量为田间持水量,忽略土壤吸力,将式(4)简化为:

$$f_p = K_s \left(\frac{H}{Z_f} + 1 \right) \tag{5}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \tag{3}$$

式中: H 为水深, m; M 、 N 分别为 x 、 y 方向上的单宽流量, $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$, 且 $M = H \cdot u$, $N = H \cdot v$; u 、 v 分别为流速在 x 、 y 方向上的分量, m/s ; q 为源汇项; Z 为水位, m, $Z = Z_0 + H$, Z_0 为底高程; n 为糙率; g 为重力加速度, m/s^2 ; t 为时间, s。

非恒定流公式采用有限体积法^[14]进行离散。有限体积法在不规则网格上适应性较好,计算精度较高,守恒性较好。且对方程进行离散时,能够满足因变量的积分在任意一组控制体积内均保持守恒,可以较好地适应所建模型的研究需求。本文有限体积采用无结构不规则网格,体积控制采用单元中心的方式,如图 1 所示。计算水深 H 取网格平均水深,计算流量 Q 取网格周边通道的单宽流量平均值。在时间层面上, H 和 Q 的计算采用通道、单元交错的方式,如图 2 所示。

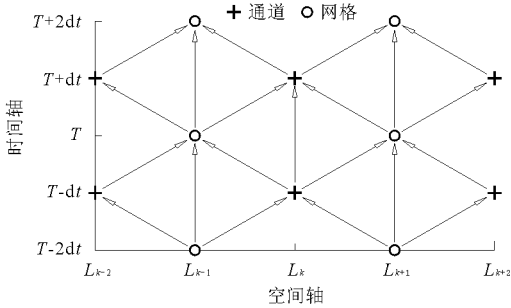


图2 H和Q的时间交错计算方式

1.3 考虑地下水入渗的洪水演进模型构建

以单元为计算基础,将地下水入渗量即 $f_p \cdot dt$ (dt 为渗漏时间) 作为源汇项即 q , 考虑到连续方程中。在下渗过程中,当单元上地面水深大于 0.005 m 时考虑下渗;当地面以下入渗饱和水舌高度小于 0.1 m 时,按 0.1 m 取值;当地面以下入渗饱和水舌高度小于地下水埋深以下 0.5 m 时,正常入渗。下渗后通过累加渗流水深,对单元的地上淹没水深进行修正。下渗处理如图 4 所示。

2 研究区概况

2.1 小清河分洪区

小清河分洪区位于大清河水系北支白沟河流域,地跨北京市和河北省两省市。除滞蓄北拒马河、琉璃河、小清河等当地河流洪涝水外,还承担着分

泄、滞蓄永定河分洪洪水的任务。分洪区西接山前高地,东以永定河右堤为界,北至大宁水库分洪闸下,南至古城小埧和小营横堤,洪水经古城小埧及小

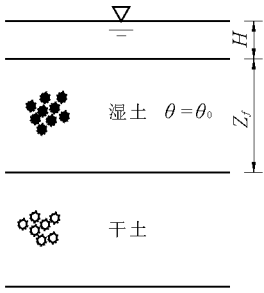


图3 概化的湿润锋移动

2.2 现状地下水埋深

根据地下水位实测资料分析,小清河分洪区及其西部沙坑范围内 2012 年“7.21”洪水前西城坊以西的地下水埋深为 25 ~ 30 m,西城坊以东及涿州市段地下水平均埋深为 15.56 ~ 18.86 m,六环路以北 7.18 m,六环路至河北与北京省界之间的区域内地下水平均埋深为 12.88 ~ 17.50 m。经初步估算,地下水位以上包气带孔隙储水容积约为 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。“7.21”洪水后,2012 年 12 月底西城坊以西的地下水埋深为 16.6 m,地下水平均回升了 12.4 m;西城坊以东及涿州市段地下水平均埋深为 13.75 ~ 18.55 m,地下水平均回升了 3.6 m;六环路以北 5.6 m,地下水平均回升了 1.2 m;六环路至河北与北京省界之间的区域内地下水平均埋深为 8.24 ~ 13.04 m,地下水平均回升了 4.85 m;包气带孔隙储水容积减少为 $7.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,比“7.21”之前减小了 $3.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中 40% 左右为汛期河道或坡面洪水入渗所致,其余为当年降水入渗所致。“7.21”洪水前后地下水埋深分布情况见图 5。

3 模型在小清河分洪区及西部沙坑的应用

3.1 计算范围

计算范围包括小清河行洪及其西部的沙坑,上起北拒马河京石二通道,北自大宁水库,下游至白沟河东茨村,包括区间的小清河、大石河、胡良河、北拒马河等河道和小清河分洪区。

3.2 地形剖分

模型采用非结构网格,以正方形网格为主,局部辅以三角形、五边形、六边形网格,最大的网格尺寸为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 。为准确地反映西部沙坑的实际情况、模型范围内桥的过流能力以及北拒马河下游

营横堤拦挡导入白沟河。分洪区规划行滞洪面积 335 km^2 ,其中河北省涿州市 182.5 km^2 。

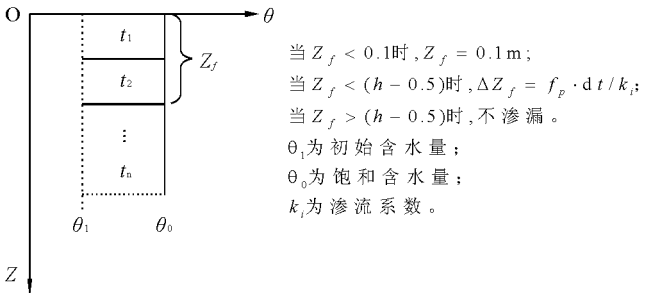


图4 下渗的处理方式

河道主槽洪水运动的水流形式,对北拒马河北支、中支、南支以及下游河道进行了网格加密处理,按 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 进行加密。

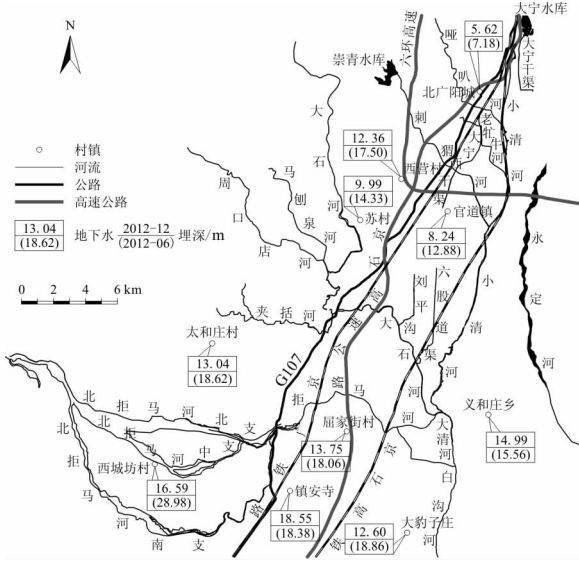


图5 地下水埋深分布情况

3.3 模型参数与边界条件

(1)糙率。模型所取糙率视网格内的河道状况、作物组成、村庄分布以及树丛、道路、堤埝分布等情况综合确定。

计算单元全部为村庄时,取 0.10;计算单元全部为树林时,取 0.08;计算单元全部为农田时,取 0.05 ~ 0.06;全部为河道时,取 0.03。当计算单元内有两种或两种以上覆盖物时,按不同覆盖物的比例综合选取。

(2)内部边界条件。计算区域内的 107 国道、京广铁路、京石高速、京白公路等高等级公路作为非溃决堤防按实际走向和高程输入模型。公路上的过水桥梁和公路桥按实际尺寸和过流状况概化为宽顶

堰输入模型,小型桥梁和涵洞进行适当概化后输入模型。

目前,小清河分洪区西部诸多沙坑群已经改变了原有河道状况,受公路或跨河工程控制,沙坑被分隔多个坑群。本次模型计算,按实测地形将沙坑概化后输入模型,沙坑之间按宽顶堰进行水力联结。

(3)上边界和下边界条件。入流洪水包括本河系的北拒马河、大石河、胡良河、小清河、刺猬河和哑巴河等河流来水,按北拒马河张坊站与东茨村同频率,其他河流相应进行组合,50 年一遇洪水时,东茨村站洪峰流量为 $5\,066\text{ m}^3/\text{s}$,6 日洪量为 $10.87\times10^8\text{ m}^3$,北拒马河张坊站洪峰流量为 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$,6 日洪量为 $7.06\times10^8\text{ m}^3$ 。另外考虑永定河来水,白沟河东茨村以上流域出现 20 年一遇洪水时永定河不分洪;白沟河东茨村以上流域出现 50 年一遇洪水时,与永定河 100 年一遇洪水(分洪 $214\text{ m}^3/\text{s}$)相组合。北拒马河落宝滩洪水以 1963 年 8 月张坊站实测洪水过程为典型、琉璃河、胡良河洪水以 1963 年 8 月漫水河站实测洪水过程为典型缩放;小清河采用概化过程线计算设计洪水过程线。

洪水出口为白沟河,因此将东茨村断面水位泄量关系和小营横堤分洪口门作为模型的下游边界。50 年一遇控制水位为 28.68 m ,泄量为 $3\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.4 模型验证

由于缺少实测的相关资料,且相关的规划及论证报告均采用无渗漏的结果,故在模型参数率定和验证时,参考数据为小清河分洪区(河北省部分)安全建设工程可行性研究报告^[17]中涿全安全区的堤前水位,和大清河防洪规划中东茨村的设计水位,采用不渗漏情况下的模拟水位与该设计水位相比较,对模型进行验证。比较结果如表 1 所示。两处模拟水位与设计水位的差别均较小,不超过 0.05 m ,因此可认为模型较好地反映了小清河分洪区的洪水演进过程。

表 1 小清河分洪区设计水位与模拟水位对比表 m			
位 置	设计水位	模拟水位	误差
涿全安全区堤前	29.80	29.76	0.04
东茨村	28.68	28.69	0.01

4 结果及分析

利用模型内部和入流出流边界条件,对小清河分洪区及西部沙坑设计洪水标准即 50 年一遇洪水

进行了二维非恒定流数值模拟。根据模拟结果对小清河分洪区不同位置处的淹没情况进行分析。小清河分洪区特征部位渗漏和不渗漏情况下的最高水位比较结果,如表 2 所示。考虑地下水渗漏因素时,四个特征部位的最高水位均有明显降低,部分最大降幅将近 0.5 m 。由此,地下水渗漏对小清河内部的洪水演进有较为明显的影响,也证明地下水渗漏较明显地改变了小清河分洪区蓄洪滞洪和行洪过程。

位置	最高水位对比表 m		
	最高水位		考虑渗漏因素时 最高水位的降低值
	未考虑渗漏	考虑渗漏	
千河套徐家庄	36.78	36.37	0.41
千河套宁村	36.64	36.23	0.41
胡良套邸家庄	31.22	30.79	0.43
涿全套沙窝村	29.76	29.42	0.34

对于小清河分洪区出口处东茨村,在 50 年一遇标准洪水情况下,如不考虑地下水渗漏,最高水位为 28.69 m ,最大泄量为 $3\,238\text{ m}^3/\text{s}$ 。在考虑地下水渗漏的条件下,最高水位为 27.91 m ,比不考虑渗漏时降低了 0.78 m ;最大泄量则为 $2\,473\text{ m}^3/\text{s}$,比不考虑渗漏时降低了 $765\text{ m}^3/\text{s}$,降低幅度达 24%。由此可见,地下水渗漏对于小清河分洪区出口的最高水位和最大泄量,均有不容忽视的影响。

5 结 论

(1)经模拟和分析,在考虑地下水渗漏情况下,发生标准洪水时小清河分洪区内的水位比不考虑地下水渗漏降低幅度较大,分洪区出口的水位和泄量也都有明显的降低,可见地下水渗漏对小清河分洪区的洪水演进有较大影响。

(2)按照本文的分析结果,未来小清河分洪区治理时,如考虑地下水渗漏的影响,将使规划建设的安全设施如堤防、高村基等的高程相应下降。针对新的下垫面情况,小清河分洪区的运用和调度需要重新进行严格论证,为防洪调度提供理论依据。

(3)本文的研究还有局限之处,在研究方法上,还未与降雨产流模型耦合,使研究模型成为一个完整的系统;在应用上,研究结论限于为地下水渗漏较大的区域提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 姚成,孙如飞,李致家,等. 下垫面变化条件下合河流域设计洪水修订[J]. 水力发电. 2015,41(11): 9-13.
- [2] 冯平,付军,李建柱. 下垫面变化对洪水影响的水文模型分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版). 2015,48(3):189-195.
- [3] Saghafian B, Farazjoo H, Bozorgy B, et al. Flood intensification due to changes in land use[J]. Water Resources Management, 2008, 22(8): 1051-1067.
- [4] Bronstert A, Bardossy A, Bismuth C, et al. Multi-scale modelling of land-use change and river training effects on floods in the Rhine basin[J]. River Research and Applications, 2007, 23(10): 1102-1125.
- [5] 李建柱, 冯平. 紫荆关流域下垫面变化对洪水的影响[J]. 地理研究. 2011, 30(5): 921-930.
- [6] 李杰, 许光泉. 一次洪水后河流对地下水影响数学模型及其应用研究[J]. 地下水. 2016, 38(5): 12-15.
- [7] 张倩, 王文科, 段磊, 等. 金陵河洪水入渗对地下水调蓄能力影响的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报. 2014, 25(1): 91-94.
- [8] 徐华山, 赵同谦, 孟红旗, 等. 河岸带地下水理化指标变化及与洪水的响应关系研究[J]. 环境科学. 2011, 32(3): 632-640.
- [9] 尹立河, 张俊, 王晓勇, 等. 基于地下水对洪水响应的含水层水力参数反演[J]. 人民黄河. 2014, 36(10): 58-60+64.
- [10] 姜姗姗, 占车生, 王会肖, 等. 地下水开采对海河流域水循环过程影响的模拟[J]. 南水北调与水利科技. 2016, 14(4): 54-59.
- [11] 韩鹏. 海河流域地下水开发利用现状与对策[J]. 海河水利, 2015(1): 1-5.
- [12] 任永强, 潘云, 宫辉力. 海河流域地下水储量空间变化趋势分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版). 2014, 35(2): 89-98.
- [13] 胡春岐, 刘惠霞. 河北省“7.21”暴雨洪水分析[J]. 河北水利, 2012(7): 7-7+21.
- [14] 李大鸣, 林毅, 徐亚男, 等. 河道、蓄滞洪区洪水演进数学模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2009, 42(1): 47-55.
- [15] 沈冰, 黄红虎. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 61-62.
- [16] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 179-180.
- [17] 姚晨光, 董传红, 马建礼, 等. 小清河分洪区(河北省部分)安全建设工程可行性研究报告[R]. 河北省水利水电勘测设计研究院, 2012, 6: 111-112.

(上接第 167 页)

- [10] Pagliara S, Kurdistani S M. Flume experiments on scour downstream of wood stream restoration structures [J]. Geomorphology, 2017, 279: 141-149.
- [11] Santos R M B, Sanches Fernandes L F, Varandas S G P, et al. Impacts of climate change and land-use scenarios on *Margaritifera margaritifera*, an environmental indicator and endangered species [J]. Science of The Total Environment, 2015, 511: 477-488.
- [12] Piggott J J, Townsend C R, Matthaei C D. Climate warming and agricultural stressors interact to determine stream macroinvertebrate community dynamics [J]. Global Change Biology, 2015, 21(1): 206-222.
- [13] Hyde K D, Fryar S, Tian Q, et al. Lignicolous freshwater fungi along a north-south latitudinal gradient in the Asian/Australian region; can we predict the impact of global warming on biodiversity and function? [J]. Fungal Ecology, 2016, 19: 190-200.
- [14] Pander J, Mueller M, Knott J, et al. Is it worth the money? The functionality of engineered shallow stream banks as habitat for juvenile fishes in heavily modified water bodies [J]. River Research and Applications, 2017, 33(1): 63-72.
- [15] Gallardo B, Clavero M, Sanchez M I, et al. Global ecological impacts of invasive species in aquatic ecosystems [J]. Global Change Biology, 2016, 22(1): 151-163.
- [16] East A E, Pessl G R, Bountryc J A, et al. Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: River channel and floodplain geomorphic change [J]. Geomorphology, 2015, 228: 765-786.
- [17] Hwan J L, Carlson S M. Fragmentation of an intermittent stream during seasonal drought: Intra-annual and interannual patterns and biological consequences [J]. River Research and Applications, 2016, 32(5): 856-870.