

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0065

武桂芝, 杨帆, 黄明翔. 耦合渗漏项的季节性河道洪水演进模型研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 33-37, 71. WU G Z, YANG F, HUANG M X. Study on seasonal channel flood routing model coupled with leakage term[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 33-37, 71. (in Chinese)

耦合渗漏项的季节性河道洪水演进模型研究

武桂芝, 杨帆, 黄明翔

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 针对北方干旱或半干旱区季节性河道渗漏现象严重问题, 为提高流域洪水演进模拟精度, 在传统水动力学洪水演进模型基础上耦合河道渗漏项, 构建季节性河流洪水演进数学模型。采用霍顿入渗模型描述季节性河道渗漏过程, 解决河道渗漏量计算及与基于圣维南方程组洪水演进模型耦合问题; 并利用 Preissmann 四点偏心隐格式与追赶法对模型离散和计算, 开发 FORTRAN 计算程序; 最后以大沽河流域实测资料进行验证。结果表明, 沙湾庄和南村断面水位与流量过程的模拟值与实测值吻合且变化趋势一致, 洪水峰面到达断面模拟时间和实际时间基本一致, 研究区各河段来水量、渗漏量的实测值与模拟值相对误差范围分别为 $-1.66\% \sim 0.36\%$ 、 $-3.09\% \sim 3.72\%$, 所建模型可满足在现状条件下进行洪水模拟预报的需要。

关键词: 季节性河道; 河道渗漏; 洪水演进; 圣维南方程; 耦合模型

中图分类号: TV 139.16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0033-05

Study on seasonal channel flood routing model coupled with leakage term

WU Guizhi, YANG Fan, HUANG Mingxiang

(School of Environmental & Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: In view of the serious problem of seasonal river leakage in arid or semi arid areas of northern China, in order to improve the simulation accuracy of flood routing in the basin, we established a seasonal channel flood routing model which couples the traditional hydrodynamic flood routing model with channel leakage. We used the Horton infiltration model to describe seasonal river infiltration and solved the coupling problem between river channel leakage and flood routing model based on Saint Venant equations. Then, the model was discretized and solved with the Preissmann four point partial node implicit scheme and chasing method, and the FORTRAN calculation program was developed. Finally, the model was tested with measured data of the Dagou River basin. The results indicated that the simulated values of water level and flow process in Shawan and Nancun were consistent with the measured values, and their trends of variation were also consistent. The simulated time for the flood peak to reach the cross section was basically the same as the actual time. The relative error ranges between the measured value and the simulated value of water inflow and leakage in all the channel segments of the study area were $-1.66\% \sim 0.36\%$ and $-3.09\% \sim 3.72\%$ respectively. It can be concluded that this coupled model can satisfy the need of flood forecasting under the present condition.

Key words: seasonal channel; channel leakage; flood routing; Saint Venant equations; coupling model

中国北部干旱或半干旱地域河流多为季节性的河流, 季节性河流汛期水量大, 非汛期河道断流、干

枯或少水状态, 河床基质渗透能力较强, 行洪期河道渗漏现象严重, 汛期渗漏主要影响到洪水流量与地

收稿日期: 2017-09-15 修回日期: 2018-03-07 网络出版时间: 2018-03-15
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180314.1053.002.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51309137)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51309137)

作者简介: 武桂芝(1974), 女, 河南商丘人, 副教授, 博士, 主要从事水资源管理、保护与水环境模拟方面的研究工作。E-mail: wuguizhi@qtech.edu.cn

下水增补量,洪水演进过程和规律则发生显著变化^[13]。所以,在洪水模拟预报中必需探讨河道渗漏的影响,耦合渗漏项的洪水演进模拟成为干旱或半干旱区域洪水模拟中关键问题^[4,6]。

考虑河道渗漏损失的洪水演进模拟和预报,关键是要解决河道渗漏模拟、渗漏量计算及其与洪水演进模型的结合等问题。国内齐春英等^[7]探讨了明渠非恒定流在考虑入渗条件下的方程组,把水力学原理和水文学方法综合,建立了海河南部平原河流渗漏的洪水流量计算关系式。田守波^[8]通过大沽河河道野外渗漏试验和现场水文观测,研究了河道的渗漏规律,并计算出了各个河段的稳定渗漏通量,利用 MIKE11 软件建立大沽河考虑渗漏条件下的一维河道洪水演进模型。田月等^[9]综合玉符河特点,对非恒定流连续性方程基础上引入流段内渗漏量,构建了考虑河床渗漏的圣维南过程,利用软件模拟获得研究区段内 46 个典型监测断面的水位与流量过程。程亮等^[10]构建了基于霍顿入渗模型的河道入渗模拟办法,且将入渗作为单位区间出流,和以马斯京根法为基础的河流洪水演进数学模型结合,建立了强烈入渗条件的洪水演进模型。王宗志等^[11]采用质量守恒原理和微元分析方法推导含下渗项的圣维南方程组,并以此作为描述河网洪水运动的控制方程,以有限差分方法作为控制方程的离散格式,采用水文学与水力学相结合的途径,耦合上下边界,以及内边界处理模拟模块,建立考虑河道下渗的河网洪水模拟模型。在国外, Mudd 等^[12]以稳定入渗率模拟季节性河道入渗,建立和数值模拟了考虑渗漏损失条件下季节性河道洪水演进模型,用缩放比例法研究了水深、洪水峰值、水文过程、河道宽度等因素对河道渗漏以及洪水演进的影响。Efrat Morin 等^[13]研究了干旱区干流入渗对洪水演进的作用、洪水运动过程对河流渗漏的作用等。

国内外一些学者在水文学、水力学及水文与水力学结合的方法基础上建立了考虑河道入渗的洪水演进模型,一定程度上可更好地模拟洪水运动过程,弥补传统洪水演进模型的不足。但是,针对我国北方季节性河流渗漏特点,河道入渗模拟以及耦合渗漏项的洪水演进模型研究等方面还不够完善。因此,前期课题组武桂芝等^[14,15]和冯增帅等^[16,17]对青岛大沽河渗漏及对洪水演进影响方面进行研究,如开展野外入渗试验、数值模拟计算简单入渗因素对洪水演进影响等,为本次建立渗漏模型研究开展奠定了一定基础。本文遴选了霍顿入渗数学模

型模拟季节性河流渗漏过程,基于流体力学原理建立耦合渗漏项的季节性河流洪水演进数学模型,采取了 Preissmann 四点偏心隐格式与追赶法对方程组离散和计算,并且利用大沽河流域实测资料对模型验证。

1 耦合渗漏项的洪水演进模型建立与求解

1.1 耦合渗漏项的圣维南方程组建立

洪水波在河流中的演进属于非恒定明渠渐变流,非恒定明渠基本方程即为圣维南(Saint-Venant)方程组,包含连续性方程与运动方程^[18,20]。本文从不可压缩流体运动的相关基本原理出发,利用了流体力学中质量守恒原理的连续性微分方程和牛顿第二力学定律的运动性微分方程分析构建了耦合河道渗漏项的洪水演进数学方程组。

连续性方程:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -f \cdot B \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2}{\partial x A} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} = -gAS_f - f^2BS_0 \quad (2)$$

式中: B 为河道断面宽度; Z 为水位变量; Q 为流量; x, t 分别为距离和时间的坐标; f 为渗漏项入渗率; A 为过水断面面积; g 为重力加速度; S_f 为摩阻坡度; S_0 为河道底坡,指河底的纵向坡度。

由式(1)、式(2)可知,入渗率是耦合渗漏项的洪水演进模拟的关键。本文利用季节性河流大沽河上游马家会村、中游马军寨村、下游贾疃村三处野外垂向入渗试验数据,对比了 Horton、Kostiakov 和 Philip 三种模型,其中 Horton 模型对描述入渗过程效果最好,其参数具有较强的物理意义,且便于和洪水演进数学模型进行耦合。

入渗率公式:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \exp(-\beta \cdot t) \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率; t 为入渗时间; f_c 为稳定入渗率; f_0 为初始入渗率; β 为入渗参数。式(1)至式(3)组成了耦合河道入渗项的洪水演进方程组。

1.2 耦合渗漏项的方程组求解

四点隐式差分格式计算过程虽较复杂,但解法是无条件稳定的,稳定性与精度较好,可设置较大的步长,计算速度较快,是目前普遍采纳的方法^[12,23]。采用 Preissmann 四点偏心隐格式对含有渗漏项的连续性与运动性方程离散,得到以增量描述的非线性数学关系式,忽略二阶微量,简化成线性代数关系式,再利用追赶法计算出结果,见图 1。

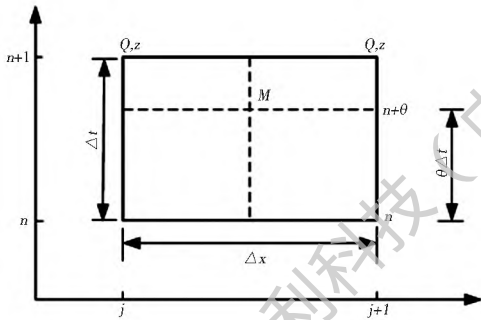


图1 四点隐式格式差分网格图
Fig. 1 Four point implicit difference grids

简化线性隐式格式对关系式推导如下:

$$f(x, t) = \frac{1}{2}(f_{j+1}^n + f_j^n) \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{\Delta f_{j+1} - \Delta f_j}{\Delta x} + \frac{f_{j+1}^n - f_j^n}{\Delta x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\Delta f_{j+1} - \Delta f_j}{2\Delta t} \quad (6)$$

式中:上标 $n, n+1$ 为时间标识;下标 $j, j+1$ 为空间标识; θ 为权重系数,且 $0 \leq \theta \leq 1$ 。

将式(4)至式(6)的差分关系式依次代入式(1)和式(2)中,并对其线性化处理后,最终得到水流连续性方程和运动性方程式的差分关系式:

$$\Delta Q_{j+1} - \Delta Q_j + C_j \Delta Z_{j+1} + C_j \Delta Z_j = D_j \quad (7)$$

$$E_j \Delta Q_{j+1} + G_j \Delta Q_j + F_j \Delta Z_{j+1} - F_j \Delta Z_j = \Phi \quad (8)$$

式中: $C_j, D_j, E_j, G_j, F_j, \Phi$ 均为离散系数。

式(7)与式(8)构成的方程关系式是基于第 j 个长方形网格构建的方程组,其未知数有 $\Delta Q_j, \Delta Q_{j+1}, \Delta Z_j, \Delta Z_{j+1}$, 仅在一个网格时方程式是不封闭的,基于整个研究河道时,将其分为 $L_2 - L_1$ 个单元河段,则存在 $L_2 - L_1 + 1$ 个断面(图2),可写出 $2(L_2 - L_1)$ 个差分方程,分别给定上下边界关系条件,从而构成封闭的数学方程组,然后利用追赶法迭代计算。

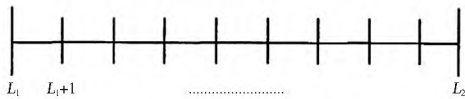


图2 计算河段示意图
Fig. 2 The computed channel

1.3 FORTRAN 计算程序开发

运用 FORTRAN95 语言设计将追赶法迭代求解程序化,实现河道计算断面水位与流量批量计算,模拟研究河道渗漏对洪水演进影响效应。程序框图见图3。

2 模型实例验证与分析

2.1 大沽河流域概况

大沽河起源地为烟台市辖招远阜山镇,横穿青

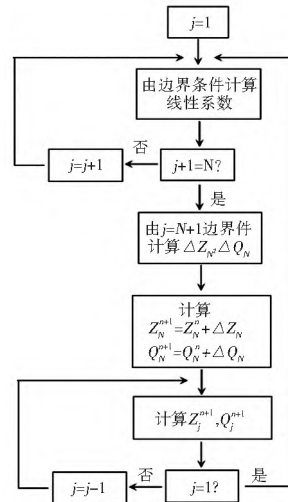


图3 追赶法求解圣维南方程组程序框图
Fig. 3 Program diagram of using chasing method for solving Saint-Venant equations

岛市辖莱西、平度、即墨、胶州等区市,青岛市境内流域距离为 179.9 km,河流总面积达到 6 131.3 km²,主要有小沽河、猪河、落药河、流浩河、城子河、桃源河、云溪河等多个支流汇入^[24]。大沽河流域古岷以北由花岗岩与变质岩组成的构造剥蚀低山丘陵地形,古岷以南由碎屑岩和火山岩组成的构造剥蚀平原,沿大沽河中下游河床两侧为河谷冲积平原,自北向南呈不规则的带状分布。古岷至店埠以南河谷开阔,地形平坦,地形标高 4~40 m,微向南倾斜,坡降 2‰~0.7‰,下游河谷宽度一般 6 km。古河谷被掩埋于地下,现代河床上叠在古河谷堆积物之上,河床深度一般 2 m。河谷两侧为剥蚀—堆积准平原,基底岩石主要为白垩系王氏组砂页岩,上覆较薄的残坡积层^[25]。大沽河河道入渗过程大致分为非稳定与稳定入渗阶段。非稳定入渗阶段,入渗率开始很大,然后快速下降,再缓慢下降;稳定入渗阶段,入渗率逐渐稳定。河道包气带砂样越粗糙,透水性越好,非稳定入渗阶段持续时间越短,河床包气带砂层为细颗粒时,渗透系数较小,入渗率较小;颗粒粗糙、松散时,渗透系数较大,入渗率较大^[14]。

2.2 耦合渗漏项的大沽河流域洪水演进模型

(1) 模型条件。

¹ 基本参数。本文选择研究区域为大沽河干流河段上起产芝水库和北墅水库,下至南庄橡胶坝,距离为 102.7 km。断面划分为 103 份,边界糙率为 0.039,主槽糙率为 0.041,漫滩糙率为 0.05,权重系数为 0.8,时间步长为 1 min。

² 边界条件。起点产芝水库水文站流量过程确定为上边界关系条件;终点南庄橡胶坝的水位过程确定为下边界条件;大沽河流域各个支流当作点源

流量边界条件进行处理。

» 初始条件。对大沽河研究河段进行恒定非均匀流水面线的计算。

¼ 入渗率。以季节性河流大沽河上、中、下游三处野外垂向入渗试验数据为基础，建立入渗率公式，构建耦合渗漏项的大沽河洪水演进模型。

(2) 模型验证与分析。

利用 2003 年 4 月大沽河大规模调水工程收集的水文资料数据对考虑渗漏项的洪水演进模型进行验证。选取沙湾庄和南村作为代表性断面，分别对水位过程、流量过程、过水时间、渗漏量进行了模拟验证。模拟结果见图 4- 图 7 与表 1。

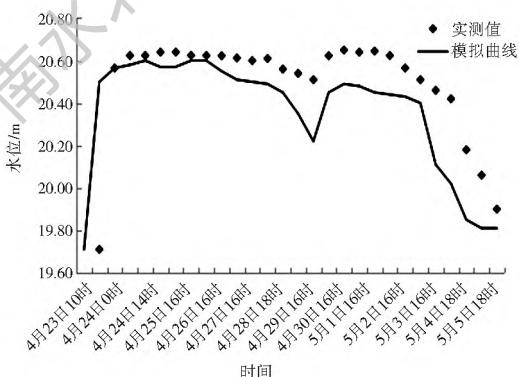


图 4 沙湾庄断面水位过程

Fig. 4 Water level process of Shawanzhuang section

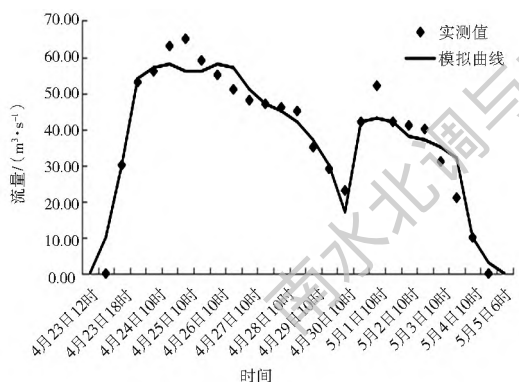


图 5 沙湾庄断面流量过程

Fig. 5 Flow process of Shawanzhuang section

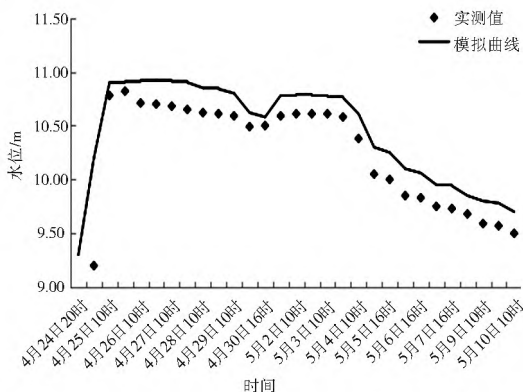


图 6 南村断面水位过程

Fig. 6 Water level process of Nancun section

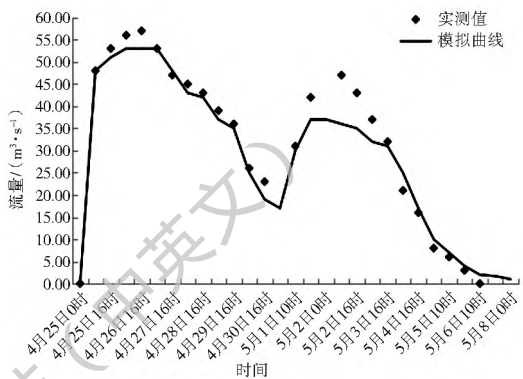


图 7 南村断面流量过程

Fig. 7 Flow process of Nancun section

图 4、图 5 分别为沙湾庄监测断面水位和流量过程的模拟值和实测值对比，图 6、图 7 分别为南村监测断面水位和流量过程的模拟值与实测值对比。可以得出，沙湾庄与南村两断面的模拟值与实测值变化趋势基本一致，洪水峰面达到断面模拟时间与实际时间基本一致。

由表 1 可知，产芝水库至贾疃闸区间各监测断面来水量实测值与模拟值相对误差范围为 -1.66% ~ 0.36%，各监测断面渗漏量的实测值和模拟值相对误差范围为 -3.09% ~ 3.72%，表明了模拟值和实测值基本吻合。沙湾庄至引黄闸渗漏量相对沙湾

表 1 大沽河流域各河段来水量和渗漏量

Tab. 1 Water inflow and leakage in each reach of the Dagu River basin

区间		上断面来水量 (实测值)/万 m ³	上断面来水量 (模拟值)/万 m ³	相对误差 (%)	渗漏量(实测值) /万 m ³	渗漏量(模拟值) /万 m ³	相对误差 (%)
开始	终止						
产芝水库	程家小吕	3 100	3 087	- 0.42	252	260	3.17
程家小吕	沙湾庄	4 458	4 474	0.36	429	441	2.80
沙湾庄	南村	4 019	3 995	- 0.60	699	725	3.72
南村	引黄闸	3310	3274	- 1.08	1 197	1 160	- 3.09
引黄闸	贾疃闸	1 865	1 834	- 1.66	388	396	2.06

庄上游和引黄闸下游渗漏量较大，渗漏最严重。根据大沽河流域调水资料，大沽河上游河段由于底水

存在，渗漏量较小，渗漏率为 8.1%；沙湾庄以下至引黄闸河段由于挖沙严重及坡降变小，渗漏量较大，

渗漏率为 36.2%，其表现与表 1 中各监测断面渗漏量模拟值和实测值结果一致。结果表明，耦合渗漏项的大沽河洪水演进模型可较好模拟季节性大沽河洪水演进过程。

3 结论

季节性河道汛前期常年处于干枯和断流状态，河床基质渗透能力较强，汛期洪水呈现水位高、流量大、暴涨暴落等特征，且沿程河道水量损失比较大，大部分为河道渗漏损失。使用传统的不考虑渗漏洪水演进数学模型进行洪水模拟预报，结果精度受到较大影响。本文建立了耦合渗漏项的季节性河道洪水演进模型，解决了河道渗漏损失演算、实际过程入渗率参数确立、渗漏与洪水演进模型耦合等问题。

利用青岛市大沽河流域实测水文资料对所建模型进行应用与验证，沙湾庄与南村断面模拟断面水位和流量过程的模拟值与实测值基本吻合且曲线趋势一致，洪水峰面到达断面模拟时间和实际时间基本一致；研究区各个河段来水量、渗漏量的实测值和模拟值相对误差范围分别为 -1.66% ~ 0.36%、-3.09% ~ 3.72%，表明所建模型精度较高，可满足在季节性河道现状条件下进行洪水演进模拟和预报的需要。

参考文献(References):

- [1] 范朝晖. 论北方城市河道多样形态断面可行性[J]. 新农村: 黑龙江, 2014, 14(8): 288-289. (FAN Z H. On the feasibility of diversified river channel forms in northern cities[J]. New Countryside: Heilongjiang, 2014, 14(8): 288-289. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.16748409.2014.08.272.
- [2] 郝鹏. 季节性河流河道渗漏试验与模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. (HAO P. Experimental and simulation study on channel seepage in seasonal rivers[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1337881.
- [3] 刘江侠, 王佰伟. 考虑地下水入渗的洪水演进模型构建及应用[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 168-172. (LIU J X, WANG B W. Study on flood routing model and application considering groundwater leakage[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(4): 168-172. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2017.04.28.
- [4] DAHAN O, TATARSKY B, ENZEL Y, et al. Dynamics of flood water infiltration and ground water recharge in hyperarid desert[J]. Ground Water, 2008, 46(3): 450-461.
- [5] SHENTSI I, ROSENTHAL E. Recharge of aquifers by flood events in an arid region[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(4): 695-712.
- [6] 田守波, 郑西来, 林国庆, 等. 大沽河河道渗漏对洪水演进的影响研究[J]. 水资源保护, 2009(S1): 16-19. (TIAN S B, ZHENG X L, LIN G Q. Study on the effect of channel leakage on flood routing of Dagu River[J]. Water Resources Protection, 2009(S1): 16-19. (in Chinese))
- [7] 齐春英, 刘克岩. 沿程渗漏河道的洪水流量演算模型[J]. 水文, 1997(6): 27-30. (QI C Y, LIU K Y. A flood flow calculation model for seepage channel along channel[J]. Hydrology, 1997(6): 27-30. (in Chinese))
- [8] 田守波. 大沽河干流渗漏对河道洪水演进的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (TIAN S B. Study on the effect of channel leakage on flood routing of Dagu River[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese))
- [9] 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 Y, TIAN C, HAO R X. Estimation of river hydraulics model and minimum ecological water demand[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2016, 47(4): 536-540. (in Chinese)) DOI: 10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2016.04.020.
- [10] 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(2): 207-215. (CHENG L, WANG Z Z, HU S Y, et al. Simulation method of natural river flood routing under severe infiltration[J]. China Science: Earth Science, 2015(2): 207-215. (in Chinese)) DOI: 10.1007/s11430-014-5018-x.
- [11] 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 Z Z, CHENG L, WANG Y T, et al. Flood simulation of river network under the influence of high intensity human activity. [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 414-424. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxh.2015.04.005.
- [12] MUDD S M. Investigation of the hydrodynamics of flash floods in ephemeral channels: scaling analysis and simulation using a shock-capturing flow model incorporating the effects of transmission losses[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1): 65-79.
- [13] 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(1): 262-275.
- [14] 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. (WU G Z. River seepage in Dagu river and its influence on flood routing[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. DOI: 10.7666/d.y1830553. (in Chinese))
- [15] 武桂芝, 郑西来, 林国庆, 等. 季节性河道渗漏野外试验研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 74-78. (WU G Z, ZHENG X L, LIN G Q, et al. Field experimental study on seasonal river seepage. [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 74-78. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2011.01.020.
- [16] 冯增帅. 季节性河道非饱和带现场入渗试验及室内试验数值模拟研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016. (FENG Z H. Numerical simulation of field infiltration test and laboratory test on unsaturated channel of seasonal channel[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016. (in Chinese))

(下转第 71 页)

- [18] 侯伟真,潘美芹.高斯核支持向量机最优模型参数选择搜索算法[C]//中国运筹学会学术交流会,2006.(HOU W Z, PAN M Q. Gaussian kernel support vector machine optimal model parameter selection search algorithm[C] // China Institute of Operations Academic Exchange, 2006. (in Chinese))
- [19] BAO Y, HAYASHIDA M, AKUTSU T. LBSizeCleave: improved support vector machine (SVM)-based prediction of Dicer cleavage sites using loop/bulge length[J]. BMC Bioinformatics, 2016, 17(1): 487. DOI: 10.1186/s12859-016-1353-6.
- [20] 郝云霄, 闫楚良, 刘克格. 基于支持向量机的机翼载荷模型研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(25): 7432-7437. (HAO Y X, YAN C L, LIU K G. Research on wing load model based on support vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(25): 7432-7437. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2013.25.028.
- [21] 徐莹, 王嘉阳, 苏华英. 基于遗传算法的支持向量机在径流中长期预报中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2014(5): 42-45. (XU Y, WANG J Y, SU H Y. Application of Support Vector Machine Based on Genetic Algorithm in Long term Forecast of Runoff[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014(5): 42-45. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2014.05.008.
- [22] 高博, 卢辉斌. 改进型粒子蚁群算法的应用研究[J]. 计算机安全, 2010(11): 11-13. (GAO B, LU H B. Application of Improved Particle Ant Colony Algorithm[J]. Computer Security, 2010(11): 11-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-0428.2010.11.004.
- [23] 宫玉琳. 永磁同步电动机伺服系统自适应逆控制策略研究[D]. 长春理工大学, 2013. (GONG Y L. Study on adaptive inverse control strategy of permanent magnet synchronous motor servo system[D]. Changchun University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [24] 郭海晋, 金蓉玲. 丹江口水库上游水资源现状及变化趋势分析[J]. 资源科学, 1997, 24(1): 28-34. (GUO H J, JIN R L. status and dynamics of water upstream of Danjiangkou Reservoir[J]. Resources Science, 1997, 24(1): 28-34. (in Chinese))
- [25] 顾思南, 杨修群. 北半球绕极涡的变异及其与我国气候异常的关系[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 135-142. (GU S N, YANG X Q. group of northern circumpolar vortex variation and its relationship with Climate Anomalies in China[J]. Meteorological Sciences, 2006, 26(2): 135-142. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-0827.2006.02.003.
- [26] 张作一, 王瑞荣, 王建中, 等. 基于前馈神经网络的潮汐预报[J]. 杭州电子科技大学学报, 2010, 30(4): 17-21. (ZHANG Z Y, WANG R R, WANG J Z, et al. Tide prediction based on feedforward neural network[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2010, 30(4): 17-21. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-9146.2010.04.005.
- [27] SL 250-2000, 水文情报预报规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SL 250-2000, Hydrological Information Specification[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2000. (in Chinese))

(上接第 37 页)

- [17] 冯增帅, 武桂芝, 李宁宁, 等. 基于季节性河流大沽河河床砂样的侧向非饱和入渗试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2017, 38(3): 79-83. (FENG ZESHU, WU GUZHI, LI NING, et al. Experimental study on lateral infiltration based on the seasonal Daguer riverbed sands[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2017, 38(3): 79-83. (in Chinese))
- [18] 陈瑞方. 不同计算方法河道水面线差异分析[J]. 水利规划与设计, 2015(12): 46-48. (CHEN R F. Analysis of river surface water difference by different calculation methods[J]. Water Resources Planning and Design, 2015(12): 46-48. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2015.12.017.
- [19] 贺五洲. 水力学实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (HE W Z. Hydraulic experiment[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2004. (in Chinese))
- [20] 汪德耀. 计算水力学理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (WANG D J. Calculation theory and application of hydraulics[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [21] 周雪漪. 计算水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. (ZHOU X Y. Computational hydraulics[M]. Tsinghua University Press, 1995. (in Chinese))
- [22] 杨晓佳, 葛永斌. 求解一维扩散方程的一种高精度紧致差分方法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2016, 48(1): 10-16. (YANG X J, GE Y B. A high resolution compact difference method for solving one dimensional diffusion equations[J]. Journal of Zhengzhou University (Science Edition), 2016, 48(1): 10-16. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-6841.201506013.
- [23] 顾峰峰, 倪汉根. 四点时空偏心隐格式的改进求解[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(3): 419-423. (GU F F, NI H G. Two improved calculation methods of Preissmann four point linear implicit scheme[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(3): 419-423. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-8608.2007.03.022.
- [24] 宋霞, 姜世强, 盛茂刚. 青岛市大沽河流域洪水水库联合优化调度系统开发总体构思[J]. 山东水利, 2008(9): 13-15. (SONG X, JIANG S Q, SHEN M G. Overall design of flood control reservoir and river regulation system of Daguer basin in Qingdao city[J]. Shandong Water Resources, 2008(9): 13-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-6159.2008.09.005.
- [25] 崔素芳. 变化环境下大沽河流域地表水-地下水联合模拟与预测[D]. 济南: 山东师范大学, 2015. (CUI S F. The joint simulation and prediction of surface water and groundwater in the Daguer River basin under the changing environment[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015. (in Chinese))