

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0117

张润庆,何蒙,姚成,等.新安江-海河模型在烟台市典型流域的径流模拟[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):78-84. ZHANG R Q, HE M, YAO C, et al. Runoff simulation using Xin'anjiang-Haihe model in the typical basins of Yantai city [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 78-84. (in Chinese)

## 新安江-海河模型在烟台市典型流域的径流模拟

张润庆<sup>1</sup>,何蒙<sup>2</sup>,姚成<sup>2</sup>,姜会杰<sup>3</sup>,李致家<sup>2</sup>

(1. 烟台市水利局, 山东 烟台 264000; 2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098;  
3. 烟台市水文局, 山东 烟台 264000)

**摘要:**为建立适用于烟台市半湿润地区的水文模型,考虑流域水文特征及下垫面条件的影响,采用新安江-海河模型对2011—2018年烟台5个典型流域进行径流模拟。2014年起烟台连续3年干旱,河道干涸,径流量与2014年前相比大幅减少。考虑到干旱的影响,采用Mann-Kendal检验法对年径流序列进行突变检验,确定2014年为年径流突变点,将模拟序列分为2个时间段。结果表明:径流过程分段模拟之后,新安江-海河模型在烟台市典型流域的径流模拟精度较高,参数取值较为合理,模型能够反映实际的产汇流情况,有较好的适用性。

**关键词:**新安江-海河模型;半湿润地区;径流模拟;Mann-Kendal检验;烟台市

中图分类号:TV214 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Runoff simulation using Xin'anjiang-Haihe model in the typical basins of Yantai city

ZHANG Runqing<sup>1</sup>, HE Meng<sup>2</sup>, YAO Cheng<sup>2</sup>, JIANG Huijie<sup>3</sup>, LI Zhijia<sup>2</sup>

(1. Water Conservancy Bureau, Yantai 264000, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Bureau of Hydrology, Yantai 264000, China)

**Abstract:** To establish a hydrological model suitable for the sub-humid area of Yantai city, the Xin'anjiang-Haihe model was used to simulate the runoff in the five typical basins in Yantai city from 2011 to 2018. Since 2014, Yantai city has been dry for three consecutive years, the river has dried up, and the runoff has decreased significantly compared with that before 2014. Considering the influence of drought, the Mann-Kendal test is used to test the abrupt change of annual runoff sequence, and 2014 is determined as the abrupt change point of annual runoff. The simulation sequence is divided into two time periods and is simulated in segments. The results showed that, after subsection simulation of the runoff process, the runoff simulation accuracy of the Xin'anjiang-Haihe model in the typical basin of Yantai city is higher, and the parameters are more reasonable. The Xin'anjiang-Haihe model can reflect the actual production confluence and has good applicability.

**Key words:** Xin'anjiang-Haihe model; sub-humid area; runoff simulation; Mann-Kendal test; Yantai city

烟台市位于山东半岛东北部,属暖温带季风型大陆性气候,全市多年平均降水量为680.8 mm,降水时空分布不均匀,时间分布上汛期(6—9月)降水量占全年降水量的70%以上,地域分布上由南向北

递减。河流为山区季节性河流,具有河床比降大,源短流急,洪水过程陡涨陡落。径流受季节影响变化较大,汛期多年平均天然径流量占全年的80%左右,旱季河道普遍干涸断流。整个地区受人类活动

收稿日期:2019-12-26 修回日期:2020-04-28 网络出版时间:2020-05-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200515.1400.002.html>

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508103);国家自然科学基金(51979070;51679061)

作者简介:张润庆(1965—),男,山东德州人,高级工程师,主要从事水资源管理研究。E-mail: ytzhangrq@126.com

影响较大,至 2017 年,全市共建有水库、拦河闸坝等地表蓄水工程 10 500 多座,地表水拦蓄率达到 41%;地下水库 3 座,地下水开发利用率高达 47%<sup>[1]</sup>。各类水利工程使流域下垫面条件发生显著变化,产汇流机制受到影响,对径流及洪水过程造成巨大的影响<sup>[2-8]</sup>。因此,在实际应用中需要根据流域特性选择合适的水文预报模型,能够考虑下垫面变化的影响因子,反映北方半湿润地区季节性河流的特点,以满足烟台地区洪水预报的精度需求。

新安江模型具有结构简单、模拟精度稳定可靠等优点,得到了国内外的普遍认可,在我国应用广泛。但是新安江模型多适用于我国南方湿润地区<sup>[9]</sup>,而烟台位于北方半湿润地区,产汇流条件与湿润地区有所差别。若直接将新安江模型运用在烟台地区,模型的适用性受到挑战,而新安江-海河模型对新安江模型进行了改进,在新安江模型结构的基础上增加了反映人类活动影响的结构和参数,在海河流域半湿润、半干旱地区取得不错的应用效果。考虑到北方半湿润流域的水文特征<sup>[10-12]</sup>及模型应用经验<sup>[13-15]</sup>,本文采用新安江-海河模型对烟台 5 个典型流域进行径流模拟,分析参数取值与模拟结果,讨论该模型在烟台地区的适用性。

## 1 新安江-海河模型介绍

2012 年李致家等<sup>[16]</sup>对新安江模型进行修订,考虑到流域内地下水严重开采,包气带变厚,在新安江模型水源划分模块中增加了补给深层地下水模块。2013 年李致家等<sup>[17]</sup>在此基础上又增加了反映地表小型水利工程及水土保持工程对下垫面条件影响的结构与参数,建立了新安江-海河模型。

### 1.1 地表径流拦蓄模块

人类活动影响较大的流域建有数量颇多的小型水库、蓄水塘坝等水利工程,这些工程通常没有详细的水文资料,不宜单独处理,一般作为流域下垫面条件进行考虑<sup>[18-20]</sup>。新安江-海河模型采用地表填洼蓄水能力来模拟小型水利工程的拦蓄影响。将小型水库、塘坝聚合成一个虚拟的大型洼地,在产流模块进行填洼计算。因此,在模型参数率定前,先对流域小型蓄水工程的控制面积、蓄水容量等进行调查,给定参数的初始值,然后再进行参数率定。流域的地表径流填洼量  $R_v$  可表示为

$$R_v = \min(R_m - R_0, IMF \cdot R_{S0}) \quad (1)$$

式中: $R_v$  为地表填洼量,mm; $R_m$  为地表填洼蓄水能力,mm; $R_0$  为初始填洼量,mm;IMF 为小型蓄

水工程控制面积比例; $R_{S0}$  为计算出的地表径流量,mm。

### 1.2 地下径流拦蓄模块

烟台地区枯季降水量显著减少,各行各业用水量增多,地下水开采量远远大于补给量,导致地下水位大幅度下降。尤其是 2014—2016 年全市连续干旱,地下水位持续下降<sup>[21]</sup>,河水与地下水处于脱节状态。汛期刚开始时,地下水埋深较深,径流在汇流过程中不断渗漏补给地下水。新安江-海河模型增加了一个虚拟的地下拦蓄水库来模拟这种现象。在分水源模块中令地表、壤中与地下径流按照一定的比例补给地下水。地下水库设有容量阈值  $R_d$ ,当水库的补给蓄水量小于  $R_d$  时不出流,全部储存在拦蓄水库内;当水库补给蓄水量大于  $R_d$  时,超过的部分以地下径流的形式计算出流。公式为

$$R_s = (R_{S0} - R_v) \cdot (1 - F_0) \quad (2)$$

$$R_l = S \cdot K_l \cdot F_R \cdot (1 - F_0) \quad (3)$$

$$R_g = S \cdot K_g \cdot F_R \cdot (1 - F_0) \quad (4)$$

式中: $R_s$  为填洼计算后的地表径流量,mm; $R_l$  为计算的壤中径流量,mm; $R_g$  为计算的地下径流量,mm; $S$  为自由水蓄水深,mm; $K_l$  为壤中流出流系数; $K_g$  为地下水出流系数; $F_0$  为地下水库的补给系数; $F_R$  为产流面积比例。

## 2 研究流域概况

### 2.1 流域概况

选取烟台地区 5 个典型流域作为研究对象,对 2011—2018 年进行径流模拟。流域概况见表 1、数据概况见表 2。

本研究采用 SRTM DEM 90 m 分辨率的地形数据,根据雨量站的分布情况采用泰森多边形对流域进行分块。对有大型水库的流域(五龙河、黄水河)需要先将水库以上的控制面积裁减掉再进行分块,模型运算时不考虑水库以上控制面积的产汇流,将水库的出流过程作为河道的入流直接进行河道演算。

### 2.2 年径流序列突变检验

2014 年起烟台地区连续 3 年发生干旱,汛期雨量减少,且降雨不集中,雨型不利于形成洪水,河道常年干涸断流,径流量与 2014 年之前相比大幅减少,产汇流条件发生变化。本文采用 Mann-Kendal 检验法<sup>[22-23]</sup>(以下简称 M-K 检验)对 5 个典型流域 2011—2018 年的实测年径流序列进行突变检验,分析典型流域的年径流序列是否在 2014 年发生突变。

表 1 研究流域概况

Tab. 1 Overview of research basin

河流名称	水文站以上流域面积/km <sup>2</sup>	流域概况
外夹河	997.0	干流全长 83 km,平均宽度 38.2 m,流域以低山丘陵为主,平均比降为 1.32‰,建有 1 座中型水库、8 座拦河闸坝等主要拦蓄工程。流域多年平均降水量为 704.6 mm,多年平均径流深 185.5 mm
王河	365.0	干流全长 55 km,山地、丘陵面积占总面积的 67.6%,平均比降为 1.98‰,流域内共有中型水库 3 座、小型水库 39 座,控制流域面积合计 84.2 km <sup>2</sup> 。流域多年平均降水量为 622.8 mm,多年平均径流深 129.1 mm
东村河	54.6	干流全长 33 km,平均比降为 3.6‰,流域建有 5 座中小型水库、17 处橡胶坝。流域多年平均降水量为 715.8 mm,多年平均径流深 206.9 mm
五龙河	2 450.0	干流全长 130 km,平均比降为 1.04‰,建有 1 座大(2)型水库、3 座中型水库等。流域内多年平均降水量为 698.1 mm
黄水河	1 034.0	干流全长 57 km,平均比降 2.32‰,建有 1 座大型水库、7 处拦河闸等主要拦蓄工程。流域多年平均降水量为 660.4 mm,多年平均径流深 145.2 mm

表 2 各典型流域数据概况

Tab. 2 Overview of each typical basin data

河流名称	水文站名称	雨量站数/个	流量资料
外夹河	福山	3	2011—2018 年水文站日均流量数据
王河	平里店	1	2011—2018 年水文站日均流量数据
东村河	海阳	1	2011—2018 年水文站汛期日均流量数据
五龙河	团旺	10	2011—2018 年水文站日均流量数据、沐浴水库日均流量数据
黄水河	诸由观	4	2011—2018 年水文站日均流量数据、王屋水库日均流量数据

### 2.2.1 M-K 检验原理

Mann 和 Kendall 提出的 M-K 检验方法是一种非参数检验统计方法,广泛应用于单变量时间序列的趋势分析中。该方法敏感性较高,不要求样本服从某一统计分布,也可以避免异常数值的干扰,后来经过其他人进一步的改进,形成目前的计算格式,广泛用于水文气象数据时间序列的突变检验分析<sup>[24-25]</sup>。

假设某水文变量时间序列为  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 构造统计量  $S_k$  表示第  $i$  个样本  $X_i > X_j$  ( $1 \leq j \leq i$ ) 的累计数

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$\text{其中, } r_i = \begin{cases} 1, & X_i > X_j \\ 0, & X_i \leq X_j \end{cases}$$

式中:  $X_j$  和  $X_i$  代表水文时间序列相应年份数据;  $n$  代表序列长度。

在时间序列随机独立的假定下,  $S_k$  的期望和方差分别为

$$E[S_k] = k(k-1)/4 \quad (6)$$

$$\text{var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad 1 \leq k \leq n \quad (7)$$

将  $S_k$  标准化为

$$UF_k = \frac{(S_k - E[S_k])}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (8)$$

将水文变量时间序列  $X_i$  逆序排列生成一组新的时间序列并表示为  $X'_i$ , 按照式(5)至式(8)再计算一次统计量, 同时使

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ i' = n+1-i \end{cases} \quad (9)$$

水文变量序列  $X_i$  随时间的变化趋势可以根据统计序列  $UF_k$  和  $UB_k$  的数值大小分析得到,  $UF_k$  服从标准正态分布: 如果  $UF_k$  值大于 0, 说明水文序列随时间呈上升趋势; 如果  $UF_k$  值小于 0, 说明水文序列随时间呈下降趋势。在双边趋势检验中给定显著性水平  $\alpha$ : 如果  $|UF_k| > UF_{k1-\alpha/2}$ , 则认为水文序列存在明显的变化趋势; 如果  $UF_k$  等于  $UB_k$ , 且在临界值之间, 则表明此时水文序列发生了突变。

### 2.2.2 检验结果分析

对 5 个流域的水文站实测年径流序列进行 M-K 检验, 将显著性水平  $\alpha$  取为 0.05, 则统计量的临界值为  $\pm 1.96$ , M-K 检验结果见图 1。可以看出: (a) 福山站和海阳站的检验结果相似, 2011—2018 年  $UF_k$  都小于 0, 年径流一直是减小的趋势, 且  $UF_k$  和  $UB_k$  在 2014 年出现交点, 说明 2014 年由于干旱, 年径流确实发生了突变。(b) 诸由观站、团旺站、平里店站的检验结果相似, 2011—2018 年期间  $UF_k$  并不都小于 0, 在 2013 年出现  $UF_k$  大于 0 的情况, 且

$UF_k$  和  $UB_k$  这两条曲线存在多个交点。这是因为:2013年烟台地区汛期出现强降雨,多个流域发生大洪水,年径流量有所增大;2014年起烟台全市范围发生干旱,汛期雨量减少,且降雨不集中,雨型

不利于形成洪水,所有流域的年径流量明显减小,经过3年连续干旱,河道流量很小甚至没有流量,普遍存在断流现象。因此,可以把2014年作为烟台地区年径流量发生突变的时间节点。

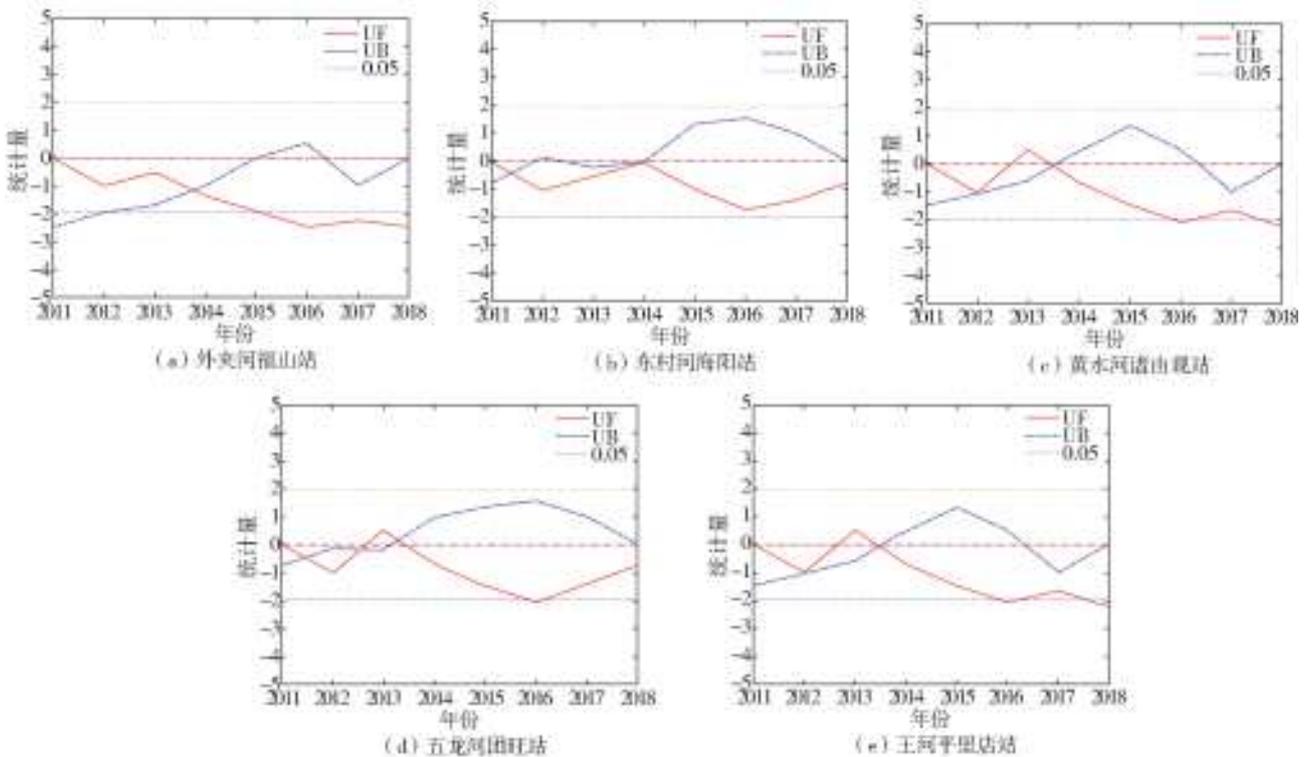


图1 烟台5个流域水文站M-K检验结果

Fig. 1 M-K test results of 5 watershed hydrological stations in Yantai

### 3 新安江-海河模型的径流模拟结果

新安江-海河模型的参数率定方法可参考新安江模型的方法,采用SCE-UA自动优化算法与人工优选法相结合的参数率定方法,实现对模型参数的优选。SCE-UA算法是由段青云等提出的全局优化算法,本文以总体水量误差和确定性系数最优为目标函数,以2014年为分界点对5个研究流域进行分期率定模拟。先根据模型推荐的参数取值范围、参数的物理意义及研究流域的特性给定参数优化的上下边界,将参与进化的复合形个数设为2,最大迭代次数设为1000,目标函数改进失败的容许次数为10,目标函数值的收敛容差为0.001,参数迭代步长收敛容差为0.0001。

为降低率定结果的不确定性,先将参数划分成敏感与不敏感参数,按照模型应用经验和流域特性,将不敏感参数直接取为定值,不需要进行优化。新安江-海河模型大致有10个敏感参数:流域蒸散发折算系数 $K$ 、流域平均自由水蓄水容量 $S_M$ 、地下水流出系数 $K_G$ 、壤中流出系数 $K_I$ 、小型蓄水工程控制面积比例IMF、地下水库的补给系数 $F_0$ 、壤中流

消退系数 $C_1$ 、地下水消退系数 $C_G$ 、河网消退系数 $C_S$ 、汇流滞时 $L$ 。 $K$ 是流域蒸散发能力与实测水面蒸发的比值,是对蒸散发计算影响最大的参数取值,因此对水量平衡计算十分重要。 $S_M$ 影响着地表径流的大小,对洪量、洪峰的模拟很重要,一般流域取值范围为10~20mm。 $K_G$ 、 $K_I$ 代表着自由水出流的快慢,两者之和一般固定取0.7,因此,只需要对1个参数进行率定,就可以自动得到另一个参数的值。 $C_G$ 、 $C_I$ 代表着不同水源的退水时间。流域地下水、壤中流占比越大,消退系数取值越大,需要的退水时间越长。在北方半湿润地区 $C_G$ 一般取0.98左右,相当于退水时间为50天左右; $C_I$ 取0.7左右,相当于退水时间为3天左右。 $C_S$ 代表河网地貌对洪水的调蓄作用, $C_S$ 越小,洪峰流量越大,对洪峰的模拟结果影响非常大。IMF可通过流域查勘或查阅相关资料得到, $F_0$ 可参考流域内的地下水开采情况和流域前期的干旱情况,这两个参数对径流深影响很大。 $L$ 表示洪水传播的滞后性,对峰现时间的模拟结果有明显的影响,是一个比较独立的参数。本文在调试过程中发现与壤中流、地下径流有关的参数并不敏感,这是因为烟台地区山区中小流域洪水一

般陡涨陡落,河槽调蓄作用较小,地面径流是总径流过程的主体部分,壤中流与地下径流占比小,对流量模拟结果影响较小。所以,本文将  $K_G$ 、 $K_1$ 、 $C_G$ 、 $C_1$  作为不敏感参数固定下来,以减少敏感参数的数目,便于模型调试。

保持其他参数不变,通过改变 2014 年前后的初始土壤含水量  $W_0$  和地下水库补给系数  $F_0$ 。完成对各个研究流域干湿两个时期的径流模拟,参数率定结果见表 3,径流模拟结果见表 4。

由表 3 可以看出考虑地表拦蓄和地下拦蓄作用后,各流域的参数取值较为合理,没有出现明显偏大的情况,说明新安江-海河模型能够较好地反映下垫面情况,模型结构更加完善,适用于北方半湿润地区。

表 3 新安江-海河模型在各流域的敏感参数

Tab. 3 The sensitive parameters of the Xin'anjiang-Haihe model in different basins

流域	时间	$K_C$	$S_M/mm$	$C_S$	IMF	$F_0$
福山	2014 年前	0.95	20	0.10	0.10	0.45
	2014 年后	0.95	20	0.10	0.10	0.76
平里店	2014 年前	1.00	30	0.70	0.43	0.60
	2014 年后	1.00	30	0.70	0.43	0.90
海阳	2014 年前	0.70	10	0.75	0.05	0
	2014 年后	0.70	10	0.75	0.05	0.30
团旺	2014 年前	1.00	20	0.35	0.30	0.10
	2014 年后	1.00	20	0.35	0.30	0.25
诸由观	2014 年前	0.80	10	0.40	0.20	0
	2014 年后	0.80	10	0.40	0.20	0.92

表 4 不同年份新安江-海河模型在各流域的径流模拟结果

Tab. 4 Daily runoff simulation results of the Xin'anjiang-Haihe model in different basins

年份	福山		平里店		海阳		团旺		诸由观	
	VRE	DC	VRE	DC	VRE	DC	VRE	DC	VRE	DC
2011	13.10	0.37	-17.95	0.64	3.13	0.45	6.62	0.74	26.47	0.44
2012	-71.36	0.54	-48.37	0.14	-0.99	0.70	-2.67	0.46	-26.75	0.37
2013	-0.83	0.55	44.48	0.26	8.16	0.86	-0.15	0.62	19.52	0.73
2014	19.76	0.38	16.71	0.22	27.15	0.62	-6.47	0.81	13.68	0.57
2015	0	0	0	0	-12.43	0.61	-13.22	0.61	0	0
2016	0	0	0	0	0	0	-114.94	-4.80	0	0
2017	-17.64	0.18	-10.82	0.04	-17.43	0.29	19.11	0.49	-6.01	0.37
2018	0	0	0	0	8.53	0.31	-7.28	-0.69	0	0

本文采用洪量相对误差(下文简称 VRE)、确定性系数(下文简称 DC)作为模拟精度评价指标。

DC 指标。DC 用于描述洪水过程模拟序列与实测序列之间的吻合程度,其变化范围为  $(-\infty, 1]$ 。DC 值越接近 1,表明模拟序列与实测序列过程的吻合程度越高,模拟精度越高。

计算方法为

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{c,i} - q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{o,i} - \bar{q}_o)^2} \quad (10)$$

式中: $q_{c,i}$ 为模拟值; $q_{o,i}$ 为实测值; $\bar{q}_o$ 为实测值的均值; $n$ 为实测资料序列长度。

VRE 指标计算公式为

$$VRE = (V_{c,p} - V_{o,p}) / V_{o,p} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $V_{c,p}$ 为模拟洪量值; $V_{o,p}$ 为实测洪量值。

VRE 指标表示模拟的洪量相对于实测值的偏离程度,正数代表模拟值大于实测值,负数代表模拟值小于实测值;其绝对值越大,表明模拟与实测的差距越大。

从表 4 可以看出:(a)2011—2018 年平均确定性系数为 0.40;2011—2014 年的平均确定性系数为 0.46。只有 2012 年的洪量相对误差大于  $\pm 20\%$ ,根据实测数据可知 2012 年的径流量较小,与 2011 年、2013 年的径流量差距较大,在兼顾其他年模拟效果的情况下该年洪量模拟结果偏大。(b)平里店流域 2012 年和 2013 年的洪量相对误差较大,这是因为该流域正常情况下河道流量就很小,部分河段常年断流,因此洪水过程模拟结果较差,2011—2018 年平均确定性系数为 0.26,2011—2014 年的平均确定性系数为 0.32。2013 年流域突发大洪水,径流量猛增,2014 年后连续干旱,河道干涸得更严重。所以,该流域径流量年际变化较大,参数率定比较困难,模拟结果较差。(c)海阳流域 2011—2018 年平均确定性系数为 0.55,2011—2014 年的平均确定性系数为 0.66。只有 2014 年的洪量相对误差大于  $\pm 20\%$ ,因为 2014 年是年径流开始突变的时间点,径流受干旱影响程度较小,之后 2015、2016 年连续干旱,导致河

道干涸断流,径流明显减小。所以,2014年的实测径流量要比2015、2016年的径流量大,而在率参过程中要综合考虑干旱年的模拟效果,使得2014年的模拟结果偏小。(d)团旺流域2011—2018年平均确定性系数为-0.22,2011—2014年的平均确定性系数为0.66。2016年径流量相比其他年份大幅减小,洪量相对误差较大。(e)诸由观流域2011—2018年平均确定性系数为0.5,2011—2014年的平均确定性系数为0.53。2011年和2012年的洪量相对误差

大于±20%,因为2011—2013年的径流量年际变化较大,参数率定时要综合考虑。

以团旺流域为例,分别选取丰水年(2013年)、枯水年(2015年)的径流模拟过程线进行对比,见图2。可以看出:(a)团旺流域2013年和2015年的面平均雨量、洪峰、洪量相差较大,径流量变化明显。所以,将2014年作为径流模拟的分界点是有必要的。(b)新安江-海河模型能够较好地模拟团旺流域的径流过程。

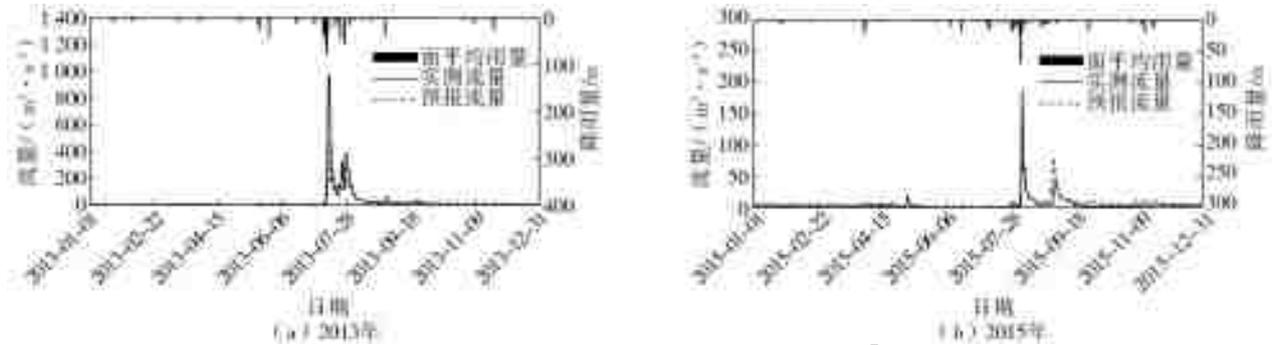


图2 团旺流域径流模拟过程线对比

Fig. 2 Comparison of runoff simulation process in Tuanwan basin

## 4 结 语

烟台市半湿润地区的产汇流情势与南方湿润地区有较大的差异,季节性河流使得径流年际、年内变化大,流域内人类活动影响显著。为建立适用于烟台市半湿润地区的水文模型,考虑到流域水文特征及下垫面条件的影响,采用新安江-海河模型对2011—2018年烟台5个典型流域进行径流模拟,分析结论如下:

(1)考虑到连续干旱对年径流序列的影响,通过M-K检验确定了2014年为径流突变点,将2011—2018年分为2个时间段对各流域分别进行径流模拟,使模拟结果更加合理。

(2)新安江-海河模型增加了地表小型蓄水工程和地下水库模块,能够合理地模拟半湿润流域的径流过程。由径流模拟结果可以得到福山、海阳、团旺流域只有1年的洪量相对误差大于±20%,平里店、诸由观流域有2年的洪量相对误差大于±20%。受干旱影响,5个研究流域2011—2018年的平均确定性系数均不高,但是2011—2014年的平均确定性系数较高,模拟结果可以接受,说明模型在烟台流域可以取得较高的径流模拟精度。由于可用的资料年限较短且受干旱影响,多年无实测径流,本文仅用模型进行了日径流模拟而没有进行验证,旨在研究新安江-海河模型在烟台半湿润地区的适用

性,研究成果可为烟台流域水文模拟和模型研究提供参考价值。

(3)本研究的重点是分析新安江-海河模型在烟台流域日径流模拟的适用性,在参数率定中更加注重水量的平衡,对洪峰流量的模拟精度要求不高,而且烟台流域普遍缺水,河道断流,模拟流量过程较为困难。因此,未来还需要继续研究水文模型在北方半湿润流域的洪水预报精度,更好地为烟台流域防汛工作服务。

## 参考文献:

- [1] 王燕,王增凯,蔡国文. 烟台市水资源现状及保障对策探析[J]. 地下水, 2017, 39(4): 151-152. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-1184. 2017. 04. 057.
- [2] 陈民,谢悦波,冯宇鹏. 人类活动对海河流域径流系列一致性影响的分析[J]. 水文, 2007, 27(3): 57-59. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2007. 03. 015.
- [3] 田传冲,黄冬菁,马海波. 下垫面变化对流域洪水特性的影响分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(9): 16-22, 27. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2018. 09. 004.
- [4] 夏军,马协一,邹磊,等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 1-6. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 01. 001.
- [5] 杨沫霞,马文林,张质明,等. 土地利用变化和气候变化对温榆河上游流域径流变化的影响[J]. 南水北调与水

- 利科技, 2018, 16(3): 72-78. DOI: 10. 13476/j. cnki. ns-bdqk. 2018. 0071.
- [6] 徐振辞, 郭永辰. 城市不同下垫面条件的降雨径流模拟试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(1): 64-66. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2007. 01. 022.
- [7] 张峰远. 大伙房水库运行对下游水文情势的影响分析[J]. 水利规划与设计, 2019(5): 35-37, 99. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2469. 2019. 05. 010.
- [8] 任涵璐, 刘江侠, 曹阳. 流域下垫面变化对潮白河密云水库上游径流影响分析[J]. 水利规划与设计, 2017(11): 92-94. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2469. 2017. 11. 025.
- [9] 赵人俊. 流域水文模型: 新安江模型和陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 43-47.
- [10] COSH M H, JACKSON T J, MORAN S, et al. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 304-313. DOI: 10. 1016/j. rse. 2007. 07. 001.
- [11] REANEY S M, BRACKEN L J, KIRKBY M J. Use of the connectivity of runoff model (CRUM) to investigate the influence of storm characteristics on runoff generation and connectivity in semi-arid areas[J]. Hydrological Process, 2006, 21(7): 894-906. DOI: 10. 1002/hyp. 6281.
- [12] 李致家, 于莎莎, 李巧玲, 等. 降雨-径流关系的区域规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 597-604. DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2012. 06. 001.
- [13] 张梦婕, 刘晋, 李致家, 等. 新安江-海河模型在阜平流域的应用[J]. 人民黄河, 2014, 36(11): 30-32, 140. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2014. 11. 009.
- [14] 李致家, 于莎莎, 戴健男, 等. 利用水文模型研究下垫面变化对洪水的影响[J]. 人民黄河, 2012, 34(7): 17-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2012. 07. 005.
- [15] 王莉莉, 李致家, 包红军. 基于栅格的分布式超渗产流水文模型构建及比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 123-128. DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2010. 02. 001.
- [16] 李致家, 于莎莎, 戴健男, 等. 利用水文模型研究下垫面变化对洪水的影响[J]. 人民黄河, 2012, 34(7): 17-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2012. 07. 005.
- [17] 李致家, 黄鹏年, 张建中, 等. 新安江-海河模型的构建与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 5-11. DOI: 10. 3876 / j. issn. 1000-1980. 2013. 03. 001.
- [18] 万蕙, 黄会勇, 袁迪, 等. 水利工程影响下的洪水预报研究进展[J]. 人民长江, 2017, 48(7): 11-15. DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2017. 07. 003.
- [19] 孙新国, 彭勇, 张小丽, 等. 基于聚合水库蓄放水模拟的洪水预报研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 308-316, 324. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20160329.
- [20] 薛志春, 李成林, 彭勇, 等. 人类活动对流域洪水过程的影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 5-9. DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2013. 06005.
- [21] 陶志斌, 于林弘, 杨宁, 等. 烟台大沽夹河地下水源地评价研究综述[J]. 山东国土资源, 2019, 35(2): 24-31. DOI: 10. 12128/j. issn. 1672-6979. 2019. 02. 004.
- [22] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259. DOI: 10. 2307/1907187.
- [23] DAVID F N, KENDALL M G. Rank correlation methods[J]. Biometrika, 1950, 37(1): 190. DOI: 10. 2307/2332168.
- [24] BURN D H, HAG ELNUR M A. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1): 107-122. DOI: 10. 1016/S0022-1694(01)00514-5.
- [25] 叶磊, 周建中, 曾小凡, 等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. 水文, 2014, 34(6): 33-39. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2014. 06. 006.