

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.03.001

新安江-海河模型的构建与应用

李致家¹,黄鹏年¹,张建中²,姚 成¹,姚玉梅¹

(1.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2.海河水利委员会科技咨询中心,天津 300170)

摘要:为研究海河流域下垫面变化对洪水的影响,对新安江模型进行修订,得到新安江-海河模型。选择海河 6 个典型流域作为研究对象,分别用新安江模型与新安江-海河模型进行产汇流模拟计算,结果表明:洪水分年代、分量级模拟精度较高,但此时新安江模型参数取值不合理, S_M 值偏大;新安江-海河模型与新安江模型精度相当或稍有提高,参数取值更加合理。

关键词:新安江模型;新安江-海河模型;下垫面变化;海河流域

中图分类号:P338 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2013)03-0189-07

Construction and application of Xin'anjiang-Haihe model

LI Zhijia¹, HUANG Pengnian¹, ZHANG Jianzhong², YAO Cheng¹, YAO Yumei¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Technology Consulting Center, Haihe Water Conservation Commission, Tianjin 300170, China)

Abstract: To study the influence of the underlying surface changes of the Haihe Basin on floods, the Xin'anjiang-Haihe model was developed by improving the Xin'anjiang model. Six typical watersheds in the Haihe Basin were selected as study areas where the Xin'anjiang model and the Xin'anjiang-Haihe model were used to simulate the runoff yield and concentration process. The results show that the accuracy is high when floods are divided with periods and magnitudes and are simulated respectively. The parameters of the Xin'anjiang model are unreasonable. For example, the S_M value is too large. The Xin'anjiang-Haihe model can maintain or improve the accuracy of the Xin'anjiang model, and its parameter values are more reasonable.

Key words: Xin'anjiang model; Xin'anjiang-Haihe model; underlying surface change; Haihe Basin

海河流域是我国七大流域之一,同时也是我国政治文化中心所在地,在国民经济中占有举足轻重的地位。20 世纪 80 年代之后由于流域内大规模的经济建设,使整个流域下垫面情况发生显著变化,对径流及洪水过程产生明显影响^[1-6]。研究适用于海河流域的水文模型,评估海河流域下垫面变化对洪水过程的影响,对海河流域防洪建设和水资源管理具有重大意义。

新安江模型主要适用于我国长江、淮河及其以南湿润流域^[7],海河流域地处北方半干旱半湿润地区,产汇流条件与湿润地区有较大差异。考虑半干旱半湿润流域水文特征^[8-10]及模型应用经验^[11-12],针对海河流域小型水利开发和地下水开采等人类活动对产汇流影响比较突出的特点,对于北方河流洪水初期河道比较干枯的情况要考虑初损,本研究对新安江模型进行修订,在模型中增加反映人类活动影响的结构和参数,在 2011 年初提出了增加补给深层地下水的的海河模型即新安江-海河模型(第一版)^[13]。随着研究工作的深入,提出了新的新安江-海河模型(第二版)。

将新安江模型与新安江-海河模型分别应用于海河典型流域,比较参数取值与模拟结果,旨在探求适合于海河流域的水文模拟方法和水文模型。

收稿日期:2012-10-22

基金项目:国家自然科学基金(41130639, 51179045, 41101017);公益性行业(气象)科研专项(201006037);国家博士点基金(20090094110005);江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXZZ12_0241)

作者简介:李致家(1962—),男,山西运城人,教授,博士,主要从事水文预报与流域水文模型研究。E-mail: zhijia-li@vip.sina.com

1 新安江-海河模型介绍

针对海河流域的产汇流特点,2011 年初提出的新安江-海河模型(第一版)基于新安江模型,考虑下垫面变化如地下水位下降的影响,在新安江模型三水源划分模块中增加了补给深层地下水模块。

随着研究工作的深入,提出了第二版新安江-海河模型。第一版新安江-海河模型主要考虑地下水位下降的影响,第二版在第一版的基础上考虑了地表小型水利工程及水土保持工程建设的影响:对于小型蓄水塘坝以及谷坊、鱼鳞坑、梯田等水土保持工程,在模型中增加了地表径流填注参数;对于山丘区地下水开采额外增加的包气带蓄水容积,可以按 2 种方式处理,一是通过加大流域平均张力水容量(W_m)数值来体现,二是在模型中附加容量参数,描述地下水开发引起的径流汇流损失量。对于植被变化引起的蒸散发变化^[14],在新安江-海河模型(第二版)中增加了反映植被生物量多少的归一化植被指数参数,并构建了植被指数参数与现有分层蒸散发模型的相关计算模式。由于北方河流洪水前期河道比较干,另外有的河道如官厅到三家店河道有明显的渗漏,因此,在模型中加入河道初损或者渗漏参数。

1.1 植被指数与蒸散发量相关模式

有关研究^[15]表明,流域蒸散发量与植被指数参数和植被覆盖度均呈现正相关关系。流域植被变化引起的蒸散发量变化按以下公式计算:

$$\Delta E = \alpha(N_p - N_0) \tag{1}$$

式中: ΔE ——植被覆盖变化引起的蒸散发变化量; α ——蒸散发量植被指数参数相关性修正系数,取值可参考文献[15]; N_p ——现状年份的植被指数; N_0 ——前期年份的植被指数。

1.2 流域地表径流拦蓄量的模拟

新中国成立以来,海河流域兴建了大量的水利工程,截至 2005 年,海河流域已兴建大中型蓄水工程 148 座,兴利蓄水容积 139 亿 m^3 ;兴建小型水库及蓄水塘坝 19 200 座,兴利蓄水容积 9.7 亿 m^3 。此外,海河流域太行山和永定河山区还兴建了大量的小型蓄水塘坝以及谷坊、鱼鳞坑、梯田等水土保持工程。这些蓄水工程极大地改变了流域的下垫面状况。在洪水分析中对于大型工程及影响比较明显的中型工程,一般是将蓄水工程的影响通过还原方法进行工程影响一致性处理;对于小型蓄水塘坝以及谷坊、鱼鳞坑、梯田等水土保持工程,由于数量较多,不好单独处理,一般归于流域下垫面变化中进行考虑。

新安江-海河模型(第二版)采用地表水填注能力参数对小型水利及水土保持工程的拦蓄能力影响进行模拟。在模型参数率定前,可对流域小型蓄水工程控制面积、蓄水容量进行调查,给定初始值,然后再进行参数率定;也可通过日模型演算获得初始值。流域一次洪水过程的地表径流填注量 R_v 用式(2)估算:

$$R_v = \min\left(R_{vm} - R_0, \frac{F_v}{F_l}R_{so}\right) \tag{2}$$

式中: R_{vm} ——地表填注蓄水能力,mm; R_0 ——初始填注量,mm; F_v ——模拟单元内小型蓄水工程控制面积, km^2 ; F_l ——模拟单元总面积, km^2 ; R_{so} ——新安江模型计算出的地面径流量,mm。

1.3 流域地下径流拦蓄量的模拟

海河流域秋冬季降雨较少,用水量较多,地下水开采量大于补给量,地下水位下降。汛期刚开始时,地下水埋深较深,径流汇流过程中不断渗漏,补充地下水,抬升地下水位。

新安江-海河模型(第二版)设立地下拦蓄水库,模拟这种现象。分水源后地表、壤中与地下径流按某一比例因子补给地下水库。地下水库设有阈值 R_d ,水库蓄水量小于 R_d 时不出流,全部蓄积于水库内;水库蓄水量大于 R_d 时,超过的部分按地下径流出流,参数直接借用地下径流参数。公式如下:

$$R_s = R_{so}(1 - F_0) \tag{3}$$

$$R_l = SK_l F_R(1 - F_0) \tag{4}$$

$$R_G = SK_G F_R(1 - F_0) \tag{5}$$

式中: R_s ——新安江-海河模型计算的地面径流量,mm; F_0 ——径流补给地下拦蓄水库的比例系数; R_l ——新安江-海河模型计算的壤中流量,mm; S ——自由水蓄水深,mm; K_l ——表层自由水蓄水库对壤中流的日出流系数; F_R ——产流面积比例; R_G ——新安江-海河模型计算的地下径流量,mm; K_G ——表层自由水蓄水库对地下水的日出流系数。

1.4 河道拦蓄

河道拦蓄主要分为河道填洼与下渗损失,河道损失量有多种计算方法^[16-17],对于不同的断面资料情况,需要采取不同的处理方法。

2 研究范围和流域概况

选取海河典型流域作为研究对象,研究范围和流域概况见表 1。

表 1 研究范围和流域概况

Table 1 Research scope and basin profiles

干流	支流	流域	流域面积/ km ²	流域概况
大清河	拒马河	紫荆关	1 760	紫荆关流域主河道长 81.5 km,河道纵坡 0.55%,流域平均宽度 25.4 km。流域内植被情况较差,仅局部地区有小块成林。流域多年平均降雨量约为 650 mm
	沙河	阜平	2 210	阜平以上一般为深山区,河道纵坡平均为 0.53%,河床呈 V 形,两岸皆为岩石,几乎无台地,河床覆盖物为大块石和沙砾。流域内植被情况较差,局部有小块成林。流域多年平均降雨量约为 600 mm
潮白河	白河	张家坟	8 506	张家坟水文站是密云水库流域西支白河入库控制站。白河发源于河北省张家口地区,河源至水库全长 248 km,河道平均比降为 0.487%。流域 7—9 月月径流深最大,占全年的 63%
		戴营	4 266	戴营水文站是潮河流域的控制水文站,流域内多年平均降雨量为 528 mm,多年平均蒸发能力为 916 mm,多年平均径流量为 1.804 亿 m ³ ,多年平均径流深为 74.7 mm
	潮河	下会	5 340	下会水文站是密云水库流域东支潮河入库控制站。潮河发源于河北省承德地区,河源至水库全长 220 km,河道平均比降为 0.187%。流域 7—9 月月径流深最大,占全年的 58%
蓟运河	还乡河	邱庄水库	525	邱庄水库以上流域为山区,多白云岩,土壤以淋溶或石灰性褐土为主,上游一部分为山地棕色森林土,东北部兼有草甸褐土。土壤肥沃、植被较好,植被度范围为 30%~50%,梯田较多。流域多年平均降雨量为 630 mm

采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的 1 km×1 km DEM 数据,根据流域雨量站情况进行分块。某些流域资料情况较复杂,如张家坟流域,流域内先后有云州水库、白河堡水库等大中型水库建成,不同时期流域分块情况及模拟面积也不同。

根据代表性原则和实际观测条件,在保证资料质量的前提下尽可能选用较多场次的雨洪,各个流域选用的雨量站及洪水场次见表 2。

表 2 各典型流域选用的雨量站及洪水场次

Table 2 Rain gauge stations and floods in typical watersheds

编号	流 域	雨量站个数	洪水场次
1	紫荆关	11	1967—2005 年间的 38 场洪水
2	阜 平	8	1958—2004 年间的 41 场洪水
3	张家坟	11	1960—2006 年间的 41 场洪水
4	戴 营	6	1964—2002 年间的 40 场洪水
5	下 会	6	1979—2006 年间的 26 场洪水
6	邱庄水库	6	1966—1998 年间的 40 场洪水

3 新安江模型模拟结果分析

3.1 海河流域新安江模型参数率定

新安江模型参数的率定及不确定性分析是新安江模型研究与应用的难点问题^[18-19]。新安江模型有 17 个参数,若所有参数均参加率定,则增加了率定的不确定性和成果的不可靠性。因此,应对敏感的参数仔细鉴别,不敏感的可粗略一些,甚至可据一般经验固定下来,不参加鉴别。

文献[20]曾对新安江模型参数敏感性有过分析和统计,敏感参数大致有 10 个,分别是流域蒸散发折算系数 K_C 、表层自由水蓄水容量 S_M 、壤中流消退系数 C_1 、地下水消退系数 C_G 、河网蓄水消退系数 C_S 、滞时 L 、马斯京根法演算参数 K_E 、马斯京根法演算参数 X_E 以及 K_C 和 K_I 。

对于不敏感参数如表层自由水蓄水容量曲线方次 E_X ,据经验取 1.5,海河流域统一用此值,不再参加率定。对于敏感参数,要进一步分析其在海河流域的敏感性,以减少敏感参数的数目,利于模型调试。

对于新安江次洪模型, K_C 转为不敏感参数。海河流域多数地区有“先超后蓄”的产流特征^[21],与湿润流域相比,地面径流影响较大,洪水总体退水较快,壤中流与地下径流影响较小。 K_C 、 K_I 、 C_1 和 C_G 是与壤中流和地下径流有关的参数,在海河流域反复调试,发现这些参数并不敏感,一般可设 K_C 为 0.45, K_I 为 0.25, C_1 为 0.96, C_G 为 0.998。这样,既削弱了壤中流与地下径流的影响,使壤中流与地下径流过程线比较平缓、洪

水过程线的主体是地面径流,又没有完全忽略壤中流与地下径流。从模拟结果看,这样设置可能导致某些场次洪水尾水段的模拟效果稍差,但整体上模拟效果很好。

L 对峰现时间敏感,对径流深与洪峰模拟并不敏感,这是一个非常独立而又很好调试的参数。在海河流域山丘区,汇流速度相当快,一般取 $L=0$ 。 K_E 虽然敏感,但 K_E 必须等于 Δt ,这其实是定值,不用做调试。这样,只剩下 3 个敏感参数 S_M 、 C_S 和 X_E 。

C_S 和 X_E 都是汇流参数,具有相关性。与湿润流域相比,海河流域相当多的洪水陡涨陡落或陡涨缓落,河槽调蓄作用较小。据经验,在海河流域可设 X_E 为 0.35,通过调节 C_S 来模拟汇流过程。于是,新安江模型在海河流域最敏感的参数只有 S_M 和 C_S 。

3.2 海河流域新安江模型初值确定

运行新安江次洪模型,需要知道某些变量的初始值(主要是土壤含水量的初始值),可以通过运行新安江日模型获得。

因为海河流域某些雨量站及水文站仅有汛期资料,所以单站土壤含水量 W 只能从每年 6 月 1 日开始计算,由此向后逐日推算,获得每日 8:00 的 W ,直至汛期结束。 W 的初值不能为零,否则会出现负值,蓄水量曲线无意义,产流计算失效; W 的初值过大则不符合流域实际情况。经反复研究, W 的初值取 W_M 的 30% 比较合适。

运行新安江日模型不是为了模拟日径流过程,而是为了获得逐日 W ,为次洪模拟做准备,所以 K_C 最为重要。海河流域 6—9 月蒸散发量占全年的 60% 以上,8 月是植被最茂密的时期,植被区温度比水面温度低,地、气温差大,植被蒸腾作用强烈,实际蒸散发大于水面蒸发,其蒸散发系数(表 3)最大达到了 1.0 以上^[22]。

表 3 海河流域汛期逐月蒸散发系数

Table 3 Monthly evapotranspiration coefficients in flood seasons in Haihe Basin

月份	耕地蒸散发系数			林地蒸散发系数		
	2003 年	2004 年	2006 年	2003 年	2004 年	2006 年
6	0.50	0.56	0.44	0.58	0.50	0.50
7	0.85	0.97	0.91	0.87	0.97	0.93
8	1.23	1.08	1.14	1.10	1.02	1.11
9	1.09	0.81	0.68	1.01	0.75	0.63

经研究,海河流域的汛期日模型 K_C 可取为 1,其余各参数也取固定值,不必再做调试,可获得次洪土壤初始含水量的相对大小。结果表明,这么做能最大限度地减少参数的不确定性,土壤初始含水量也较准确。

3.3 新安江模型阜平流域模拟结果分析

采用新安江模型模拟阜平流域 1958—2004 年间的 41 场洪水,率定参数,获得参数值如下: $K_C=1$,流域蓄水容量分布曲线指数 $B=0.5$,深层散发系数 $C=0.12$, $W_M=180$,上层张力水容量 $W_{UM}=20$,下层张力水容量 $W_{LM}=90$,不透水面积比例 $I_M=0.01$, $S_M=37\text{ mm}$,流域自由水容量分布曲线指数 $E_X=1.5$, $K_G=0.45$, $K_I=0.25$, $C_G=0.998$, $C_I=0.96$, $X_E=0.35$, $K_E=1$, $C_S=0.32$, $L=0$ 。

20 世纪 80 年代之后由于大规模的经济建设,导致海河流域在 80 年代前后下垫面有明显的变化。下垫面变化影响产汇流条件,因此,应将洪水分为 80 年代前和 80 年代后分别调试。

海河流域大小洪水产汇流性质悬殊,新安江模型模拟时常出现大洪水偏小、小洪水偏大的现象,应将洪水分量级,分别模拟。

用新安江模型分量级、分年代模拟阜平流域洪水,仅 S_M 和 C_S 有变化,其余参数不变,结果如表 4 所示。可以看出,在阜平流域分量级、分年代模拟,新安江模型的精度很高,但参数取值并不合理。

表 4 阜平流域新安江模型各时期模拟结果

Table 4 Simulation results of Xin'anjiang model for Fuping Watershed in various periods

频率	洪水时间	S_M/mm	C_S	洪量合格率/%	洪峰合格率/%
大于或等于 10 年一遇	1980 年以前	30	0.15	100	100
	1980 年以后	30	0.15	100	100
	1958—1967 年	20	0.02	100	100
5 ~ 10 年一遇	1968—1977 年	35	0.15	75	75
	1978—2004 年	69	0.20	80	100
小于 5 年一遇	1980 年以前	40	0.29	73	
	1980 年以后	72	0.15	77	

S_M 反映表土蓄水能力。 S_M 受降雨资料时段均化的影响,当用日作为时段长时,在土层很薄的山区其值为 10 mm 或更小一些;而在土深林茂、透水性很强的流域,其值可取 50 mm 或更大一些;一般流域在 10 ~ 20 mm 之间。当计算时段长减小时 S_M 要加大。

阜平以上一般为深山区,河道纵坡平均为 0.53%,河床呈 V 形,两岸皆为岩石,几乎无台地,河床覆盖物为大块石和沙砾。流域内植被情况较差,因此,阜平流域 S_M 值应较小,次洪模型模拟的 S_M 值最高达 69 mm (5 ~ 10 年一遇)和 72 mm (小于 5 年一遇),显然偏大。

20 世纪 80 年代以后由于流域内地下水开采以及人类活动的影响,增加了流域拦蓄,使流域的包气带发生了变化,新安江模型的张力水蓄水容量等发生变化。从理论上来说张力水蓄水容量是田间持水量和凋萎含水量之差,自由水蓄水容量是饱和含水量与田间持水量之差。新安江模型 1980 年以后的洪水 S_M 数值比较大,这样与该参数原来的物理意义不同,实际上把流域拦蓄、河道下渗对流域产汇流的影响都反映到这个参数中了。

3.4 新安江模型其他流域模拟结果分析

采用新安江模型模拟紫荆关、张家坟、戴营、下会和邱庄水库流域的洪水,率定参数。小洪水产汇流情势复杂,洪峰模拟效果不好,因此只统计径流深合格率。表 5 为紫荆关及邱庄水库流域模拟结果。

表 5 紫荆关及邱庄水库流域新安江模型各时期模拟结果

Table 5 Simulation results of Xin'anjiang model for Zijingguan and Qiuzhuang Reservoir watersheds in various periods						
流域	洪水量级	时间	S_M /mm	C_S	径流合格率/%	洪峰合格率/%
紫荆关	大水	1980 年以前	30	0.02	100	75
		1980 年以后	30	0.28	100	100
	中水	1980 年以前	36	0.30	71	71
		1980 年以后	28	0.01	100	50
	小水	1980 年以前	30	0.14	73	
		1980 年以后	35	0.16	85	
邱庄水库	大水	1980 年以前	58	0.04	67	67
		1980 年以后	70	0.04	100	100
	中水	1980 年以前	48	0.26	71	71
		1980 年以后	55	0.26	86	86
	小水	1980 年以前	70	0.15	100	
		1980 年以后	70	0.15	75	

张家坟、戴营和下会流域隶属于密云水库流域,面积大,雨量站较少,情况复杂,因此只模拟径流深,不模拟洪峰,模拟结果如表 6 所示。

可以看出,新安江模型在这些流域基本可以达到或超过乙级精度,但是参数取值不合理, S_M 值偏大。也就是说,新安江模型并不能完全反映海河流域的下垫面情势。因此,有必要修订新安江模型,使之参数更加合理、结构更加完善。

4 新安江-海河模型模拟结果分析

新安江模型在海河流域参数取值不合理,模型结构不能反映下垫面变化。新安江-

表 6 密云水库流域新安江模型各时期模拟结果

Table 6 Simulation results of Xin'anjiang model for Miyun Reservoir Watershed in various periods

流域	时间	S_M /mm	C_S	径流合格率/%
戴营	1980 年以前	57	0.09	76.20
	1980 年以后	68	0.10	78.60
下会	1980 年以前	35	0.09	90.90
	1980 年以后	52	0.13	86.70
张家坟	1964—1970 年	24	0.01	70.00
	1971—1982 年	35	0.03	73.30
	1983—2007 年	38	0.04	78.90

海河模型的目的就是要使参数取值合理、模型结构能反映下垫面变化,同时增加的参数能简单率定。

新安江-海河模型原有的参数调试方法与新安江模型相同,模型又增加了 2 个敏感参数 F_v/F_l 与 F_0 。 F_v/F_l 指模拟单元内小型蓄水工程控制面积比例,其数值可通过流域查勘得到; F_0 为地面径流和壤中流渗漏比例系数,因为人类活动造成海河流域地下水位下降,径流汇流过程中会不断渗漏,从而补充地下水、抬升地下水位,这个数值的确定可参考流域内的地下水开采情况。也就是说,新安江-海河模型需要调试的敏感参数为 $S_M, F_v/F_l, F_0$ 和 C_S ,可参考流域资料,通过率定得出。这样,模型既能模拟流域出口断面的流量过程,

又能切合海河流域实际,反映流域下垫面的变化,还能减少率定参数,减少模型的不确定性。

新安江模型阜平、邱庄水库及戴营流域的 S_M 取值明显偏大,紫荆关、下会及张家坟流域的 S_M 取值正常或稍有偏大。以阜平、邱庄水库和戴营流域为典型流域,应用新安江-海河模型分年代、分量级重新模拟,结果如表7所示。

表7 阜平、邱庄水库及戴营流域新安江-海河模型各时期模拟结果
Table 7 Simulation results of Xin'anjiang-Haihe model for Fuping and
Qiuzhuang reservoirs and Daiying Watershed in various periods

流域	洪水量级	时间	S_M/mm	C_S	F_v/F_t	F_0	径流合格率/%	洪峰合格率/%
阜平	大水	1980 年以前	30	0.15	0	0	100	100
		1980 年以后	30	0.15	0	0	100	100
		1958—1967 年	15	0.05	0	0	100	100
	中水	1968—1977 年	25	0.29	0	0	100	75
		1978—2000 年	35	0.36	0.10	0.170	80	80
		1980 年以前	40	0.29	0	0	73	
	小水	1980 年以后	40	0.15	0.10	0.210	92	
邱庄水库	大水	1980 年以前	38	0.04	0	0.190	67	83
		1980 年以后	45	0.04	0.05	0.190	100	100
		1980 年以前	30	0.25	0	0.265	79	71
	中水	1980 年以后	36	0.25	0.05	0.265	100	71
		1980 年以前	40	0.15	0	0.260	78	
		1980 年以后	40	0.15	0.05	0.260	100	
	小水							
戴营	大水	1980 年以前	30	0.10	0	0.100	75	
		1980 年以后	40	0.10	0.20	0.300	75	
	小水	1980 年以前	38	0.10	0	0.100	85	
		1980 年以后	40	0.01	0.20	0.340	89	

新安江-海河模型能维持或提高新安江模型的精度,参数取值更加合理,说明通过在新安江模型中增加拦蓄水库的结构项来反映海河流域下垫面的特性更加客观与合理。

5 结 语

我国半干旱半湿润流域的产汇流情势与湿润流域有较大差异,径流年际变化大,人类活动影响显著,因而,需将洪水按年代及量级分类,分别模拟才能满足精度要求。

新安江模型在海河多个流域均能达到或超过乙级精度,但参数值往往不合理, S_M 值偏大,违背其本身的物理意义。新安江-海河模型自新安江模型修订而来,其考虑了海河流域的水文特性,添加了流域拦蓄水库项,反映海河流域的下垫面变化特性。经验证,新安江-海河模型的精度与新安江模型相当,但参数取值更合理、模型结构更完善。

参考文献:

[1] 韩瑞光,冯平. 流域下垫面变化对洪水径流影响的研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(8):27-30. (HAN Ruiguang, FENG Ping. Effects of sublayer and land-cover change on flood in Daqinghe River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2010,24(8):27-30. (in Chinese))

[2] 韩瑞光,丁志宏,冯平. 人类活动对海河流域地表径流量影响的研究[J]. 水利水电技术,2009,40(3):4-7. (HAN Ruiguang,DING Zhihong,FENG Ping. Study on influence of human activity on surface runoff in Haihe River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2009,40(3):4-7. (in Chinese))

[3] 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. (CHEN Min, XIE Yuebo,FENG Yupeng. Influence of human activity on consistency of runoff series in Haihe River Basin[J]. Journal of China Hydrology,2007,27(3):57-59. (in Chinese))

[4] YANG Yonghui,TIAN Fei. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China[J]. Journal of Hydrology,2009,374(3/4):373-383.

[5] 刘春葵,刘志雨,谢正辉. 近50年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报,2004,15(4):385-393. (LIU Chunzhen,LIU Zhiyu,XIE Zhenghui. Study of trends in runoff for the Haihe River Basin in recent 50 years[J]. Quarterly

- Journal of Applied Meteorology,2004,15(4):385-393. (in Chinese))
- [6] ZHANG Zengxin, CHEN Xi, XU Chongyu, et al. Evaluating the non-stationary relationship between precipitation and streamflow in nine major basins of China during the past 50 years[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1/2): 81-93.
- [7] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利电力出版社, 1984:43-47.
- [8] 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.
- [9] 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, 2007, 21(7): 894-906.
- [10] 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. (LI Zhijia, YU Shasha, LI Qiaoling, et al. Regional pattern of rainfall-runoff relationship[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(6): 597-604. (in Chinese))
- [11] 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. (WANG Lili, LI Zhijia, BAO Hongjun. Development and comparison of grid-based distributed hydrological models for excess-infiltration runoffs[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(2): 123-128. (in Chinese))
- [12] 瞿思敏, 包为民, 张明, 等. 新安江模型与垂向混合产流模型的比较[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2003, 31(4): 374-377. (QU Simin, BAO Weimin, ZHANG Ming, et al. Comparison of Xin'anjiang model with vertically-mixed runoff model[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2003, 31(4): 374-377. (in Chinese))
- [13] 李致家, 姚玉梅, 张建中, 等. 利用水文模型研究下垫面变化对洪水的影响[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 5-10. (LI Zhijia, YAO Yumei, ZHANG Jianzhong, et al. Study on impact of basin cushion changes on river floods by hydrological modeling [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 5-10. (in Chinese))
- [14] 晏利斌, 刘晓东. 1982-2006年京津冀地区植被时空变化及其与降水和地面气温的联系[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 226-232. (YAN Libin, LIU Xiaodong. Spatial-temporal changes in vegetation cover and their relationships with precipitation and surface air temperature over the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1982 to 2006[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2): 226-232. (in Chinese))
- [15] 倪猛, 陈波, 岳建华, 等. 洛河流域蒸散发遥感反演及其与各参数的相关性分析[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 34-37. (NI Meng, CHEN Bo, YUE Jianhua, et al. Estimating evaporation in Luo River Basin using remote sensing and analyzing correlation between evaporation and various parameters[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(6): 34-37. (in Chinese))
- [16] WALTERS M O. Transmission losses in arid region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(1): 129-138.
- [17] ANDERSON M G, MCDONNELL E J. Encyclopedia of hydrologic science[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2005: 41-58.
- [18] 戴建男, 李致家, 黄鹏年, 等. 新安江模型参数不确定性分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 39(6): 618-622. (DAI Jiannan, LI Zhijia, HUANG Pengnian, et al. Uncertainty analysis of Xin'anjiang model parameters[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(6): 618-622. (in Chinese))
- [19] 叶金印, 姚成, 李京兵, 等. 综合误差系数在新安江模型参数全局优化中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2013, 41(1): 1-5. (YE Jinyin, YAO Cheng, LI Jingbing, et al. Application of comprehensive error coefficient to global parameter optimization in Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2013, 41(1): 1-5. (in Chinese))
- [20] 包为民. 水文预报 [M]. 3版. 北京:中国水利水电出版社, 2006: 153-154.
- [21] 何平, 张广生, 边荣英. 海河流域中部地区产流理论分析[J]. 河北水利科技, 2001, 22(1): 45-50. (HE Ping, ZHANG Guangsheng, BIAN Rongying. A study of runoff yield in mid-area of haihe Basin[J]. Hebei Water Conservancy Technology, 2001, 22(1): 45-50. (in Chinese))
- [22] 水利部海河水利委员会. 海河流域下垫面变化对洪水影响研究报告[R]. 天津:水利部海河水利委员会, 2009.