

应用新安江-海河模型研究下垫面变化对设计洪水的影响^{*}

钟 粟, 姚 成, 李致家^{**}, 黄鹏年

(河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘 要: 为了探明流域产汇流参数变化特征及其演变机理, 分析流域下垫面条件变化对设计洪水的影响. 通过新安江-海河模型研究卫河流域代表区下垫面变化情况, 采用综合线性权重法对元村集站设计洪水资料系列进行一致性修正. 结果表明: 自由水蓄水容量、河网水流退水系数、地表填注蓄水能力和地下水库出流初始水深这 4 个参数在 1980 年后都变大, 可见代表区下垫面 1980 年前、后发生了明显的变化, 导致流域内径流量大幅减少; 合河—新村—五陵区间在 1980 年前 15 场洪水和 1980 年后 32 场洪水的预报径流深合格率都超过 80%, 达到乙等精度; 元村集站最大 5 日洪量修正后比修正前平均减小 27.1%; 最大 15 日洪量修正后比修正前平均减小 25.4%; 最大 30 日洪量修正后比修正前平均减小 23.0%. 本研究可为水利工程的建设规模的确定提供科学依据, 保障地区的防洪安全, 满足人民生活和生产用水需求.

关键词: 下垫面; 新安江-海河模型; 设计洪水; 径流深

Effect of land surface changes on design flood using Xin'anjiang-Haihe Model

ZHONG Li, YAO Cheng, LI Zhijia & HUANG Pengnian

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: To ascertain characteristics of parameters of watershed runoff and converge and evolution mechanism of runoff changes, effects of watershed surface changes on flooding design have been analyzed. Land surface changes of Weihe watershed using Xin'anjiang-Haihe Model have been studied and the consistency of flood series was corrected using integrated linear weight method. The results indicated that the parameters of the free water storage capacity, the recession constant in the "lag and route" method, the interception and the retention capacity of surface runoff and the outflow initial depth of underground reservoir all increased and the underlying surface had obvious changes after 1980, resulting in the reduction of runoff in the watershed. Runoff depth modeling between Hehe watershed and Wuling watershed for 15 floods before 1980 and 32 floods after 1980 were all more than 80% accurate compared with the records in the datasets, reaching the accuracy of the second-best class in all the records. After the corrected-parameters, the modeling 5th largest flood has reduced 27.1% errors, the 15th largest flood reduced 25.4% errors, and the 30th largest flood reduced 23.0% errors, compared with the previous modelings on average. The study provided a scientific basis for constructing the water projects, being safeguard of floods, and satisfying the demand of water supply for people's daily lives and industrial activities.

Keywords: Underlying surface; Xin'anjiang-Haihe Model; design flood; runoff depth

洪水资料是设计洪水频率计算的基础, 是决定成果精度的关键^[1], 必须对洪水资料的可靠性、一致性和代表性进行审查和分析, 判断样本是否满足统计上独立同分布的要求, 保证频率分析的前提成立. 卫河是海河的最大支流, 兼有饮用水、渔业、灌溉、排涝、航运和美化环境 6 大功能, 随着经济、社会发展及人口的增加, 卫河流域水资源开发利用量大幅度增加, 水资源的过度开发以及建设活动已对本流域的下垫面条件产生了显著影响, 破坏了资料的“一致性”或“同分布性”, 洪水的概率分布也发生了改变, 因此需要对设计洪

^{*} 国家自然科学基金项目(41130639, 51179045, 41101017, 41201028)和水利部公益性行业科研专项经费项目(201301068, 201401034)联合资助. 2014-08-20 收稿; 2014-12-01 收修修改稿. 钟粟(1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: 1085313168@qq.com.

^{**} 通信作者; E-mail: zjlhohai@163.com.

水进行一致性修订.

目前,流域下垫面变化对径流的影响是一个热点问题,流域下垫面变化对洪水的影响及机理研究更是一个难点问题. Bronstert 等利用 WASIM-ETH 模型研究了德国西部一个中尺度流域土地利用变化对暴雨洪水的定量影响,认为土地利用变化对产流量的影响取决于降雨特征^[2]; Naef 等的研究表明,土地利用变化对短历时、高强度降雨产生的洪水影响较大^[3];丁杰等通过 HEC 模型对伊河上游东湾流域采用历史反演法的模拟结果表明,东湾流域在 1964—2000 年近 40 年来下垫面的调蓄作用有所增大,次洪径流相对于往年来说偏小约 35.11%,次洪洪峰偏小约 12.30%^[4].

一般研究洪水系列变化有两种方法:一种是考虑产汇流条件机理变化的水文模型方法^[5-10],另一种是通过统计比较分析的常规经验方法^[6],本研究采用水文模型法.

相比经验方法,水文模型方法由于构筑了反映产汇流机理的数学模型结构,模型中反映蒸散发、产流及汇流过程的参数均能在一定程度上体现下垫面变化的影响,因此可得到较高的模拟预报精度^[11]. 本研究以新安江模型为基础,针对海河流域半湿润、半干旱且受人类活动影响严重的特点,提出了新安江-海河模型^[12],并通过模型研究 1980 年前、后人类活动对下垫面的影响程度. 由于 1980 年后模型参数可一定程度地表达 1980 年后人类活动影响下的流域下垫面特性,因此采用 1980 年后的参数统一处理 1980 年前、后的降雨资料,可得到现状条件下的洪水系列.

1 流域概况

1.1 自然地理

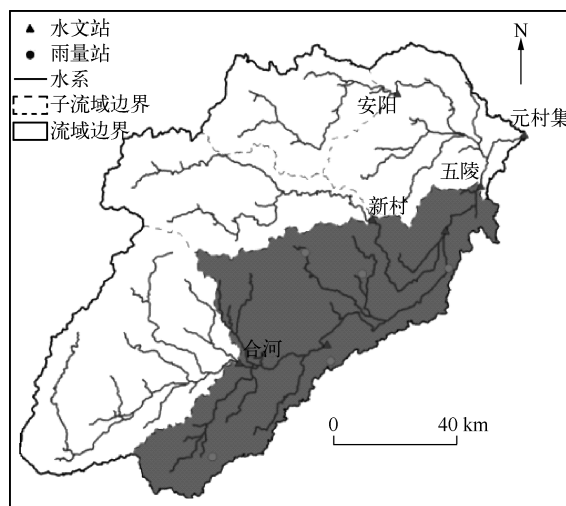


图 1 合河—新村—五陵区间水系及站点分布

Fig. 1 Distribution of rivers and stations of Hehe - Xincun - Wuling

合河—新村—五陵区间(图 1)属于卫河流域,面积约 2468 km². 主要支渠有西孟姜女河、东孟姜女河、淇河、人民胜利渠、共产主义渠、思德河、沧河等. 本区间大致以京广铁路为界,分成东西两大地貌类型,西部以山地丘陵为主,东部为广阔平原.

1.2 水文气象

合河—新村—五陵区间流域属暖温带半湿润半干旱季风气候,气候较温和,年平均气温一般在 13~14℃ 之间,且由南向北递减. 区内多年平均降水量为 500~800 mm,由南向北、由东向西递减,受东南季风影响,年内降雨量极不平均,降水量的 60%~70% 集中在 7—9 月.

1.3 资料搜集

该区间的日雨量资料源于道口、新村、淇门等 9 个站点 1965—2011 年逐日降水量表,时段雨量资料源于道口、新村、淇门等 9 个站点 1965—2011 年降水量摘录表;蒸发资料源于合

河水文站 1965—2011 年的逐日水面蒸发量表,采用 E601 型蒸发器;实测日流量资料源于合河(共)、合河(卫)、新村、五陵水文站点 1965—2011 年逐日平均流量表,时段流量资料采用合河(共)、合河(卫)、新村、五陵水文站 1965—2011 年洪水水文要素摘录表^①.

① 资料由水利部海河水利委员会科技咨询中心提供.

2 研究方法

2.1 新安江-海河模型简介

新安江模型主要适用于我国长江、淮河及以南湿润流域,但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.因此,新安江-海河模型考虑了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,增加了两个地下水水库补给参数,分别是地下水水库补给比例系数、地下水水库出流初始水深,前者较为敏感;同时,也考虑了地表小型水利工程建设的影响,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洼参数,分别是地表填洼蓄水能力(RVW)、小型蓄水工程控制面积比例(IMF)、地表洼地出流系数(IIA),其中地表洼地出流系数较为敏感;对于山丘区地下水开采额外增加的包气带蓄水容积,可以按两种方式处理,一是通过加大流域平均张力水容量(WM)数值来体现,二是在模型中增加地下水开发引起的附加容量参数,存储部分径流汇流损失量;对于植被变化引起的蒸散发变化,增加了反映植被生物量多少的归一化植被指数参数($NDVI$),并构建了 $NDVI$ 与现有分层蒸散发模型的相关计算模式^[12].新安江-海河模型的流程见图2.图中各参数的意义见表1.

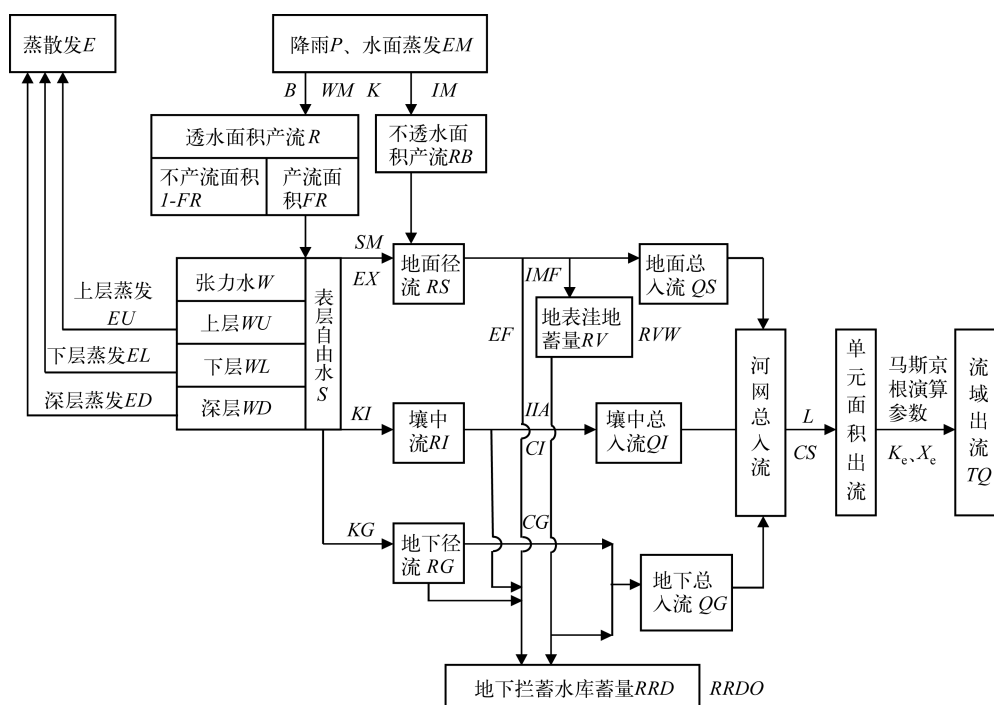


图2 新安江-海河模型流程

Fig. 2 Flow chart of the Xin'anjiang-Haihe Model

2.2 新安江-海河模型法修订介绍

模型法修订方法是先用新安江-海河模型分别模拟1980年前、后的洪水,然后用1980年前、后率定得到的2套模型参数统一模拟1980年前的洪水,得到2个预报径流深系列,从而计算:

$$Y = (R_{80前} - R_{80后}) / R_{80前} \quad (1)$$

然后将1980年前的洪水实测径流深进行无因次化,得到:

$$X = R_{实测} / R_{实测max} \quad (2)$$

最后画出 X 与 Y 相关关系曲线图,然后查图求出相应修订比例.式中, Y 为修订比例, $R_{80前}$ 为1980年前

参数模拟的预报径流深, $R_{80后}$ 为 1980 年后参数模拟的预报径流深, $R_{实测}$ 为实测径流深, $R_{实测max}$ 为最大实测径流深, X 为 $(0, 1]$.

表 1 新安江-海河模型参数
Tab. 1 The parameters of Xin'anjiang-Haihe Model

序号	参数意义	参数	1980 年前参数值	1980 年后参数值
1	蒸散发折算系数	K	1	1
2	流域蓄水容量分布曲线指数	B	0.3	0.3
3	深层散发系数	C	0.12	0.12
4	流域平均张力水容量	WM	200	200
5	上层张力水容量	WUM	30	30
6	下层张力水容量	WLM	90	90
7	不透水面积比例	IM	0.01	0.01
8	自由水蓄水容量	SM	22	40
9	流域自由水容量分布曲线指数	EX	1.5	1.5
10	地下水出流系数	KG	0.45	0.45
11	壤中流出流系数	KI	0.25	0.25
12	地下水消退系数	CG	0.998	0.998
13	壤中流消退系数	CI	0.97	0.97
14	河道汇流的马斯京干法系数	X	0.35	0.35
15	河网水流消退系数	CS	0.78	0.89
16	河网汇流滞时	L	0	0
17	地表填洼蓄水能力	RVM	5	30
18	小型蓄水工程控制面积比例	IMF	0.4	0.4
19	地表洼地出流系数	IIA	0.01	0.01
20	地下水库补给比例系数	EF	0.005	0.005
21	地下水库出流初始水深	$RRDO$	5	30

2.3 元村集站洪水修订方法介绍

元村集站是由楚旺站在 1979 年迁到河南省南乐县元村集改名而来,因此缺乏 1980 年前的实测洪水资料.同时,元村集站受上游漫溢分洪、平原积涝、坡洼滞洪、河槽调蓄等影响,实测资料代表性较差,因此本文对元村集站的洪水修订采用综合线性权重法,具体方法如下:

对于元村集站以上流域,可划分为 4 个子流域,分别是合河流域、新村流域、安阳流域、合河—新村—五陵区间.元村集站的修正比例采用每个子流域相对应的修正比例乘以每个子流域洪量所占权重相加得到.本文以卫河流域中合河—新村—五陵为代表区间,研究流域下垫面变化对径流深的影响,并求出此区间的修订比例和洪量.另外笔者前期也已获得其他 3 个子流域,即合河流域、新村流域、安阳流域的修订比例以及洪量情况,因此可对卫河元村集水文站的设计洪水资料进行一致性修订,具体简化修订公式为:

$$Y_{元村集} = Y_{合河} \cdot \frac{W_{合河}}{W_{元村集}} + Y_{新村} \cdot \frac{W_{新村}}{W_{元村集}} + Y_{安阳} \cdot \frac{W_{安阳}}{W_{元村集}} + Y_{区间} \cdot \frac{W_{区间}}{W_{元村集}}$$

(3)

$$W_{元村集(修)} = W_{元村集} \cdot (1 - Y_{元村集})$$

(4)

式中, $Y_{元村集}$ 为元村集的修订比例, $Y_{合河}$ 为合河的修订比例, $Y_{新村}$ 为新村的修订比例, $Y_{安阳}$ 为安阳的修订比例, $Y_{区间}$ 为区间的修订比例, $W_{元村集}$ 为元村集的洪量, $W_{合河}$ 为合河的洪量, $W_{新村}$ 为新村的洪量, $W_{安阳}$ 为安阳的洪量, $W_{区间}$ 为区间的洪量, $W_{元村集(修)}$ 为元村集修订后的洪量.

2.4 无因次化法简介

元村集、合河、新村、安阳水文站以及区间的洪水系列分别有最大 5 日洪量(W_5)、最大 15 日洪量(W_{15})、最大 30 日洪量(W_{30}).为了简化计算工作量,采用将各个时间段洪量经行无因次化,即:

$$Y = W_i / W_{i,\max} (i = 5, 10, 15) \quad (5)$$

统一到区间 $(0, 1]$ 之间,然后通过前文所述的 X 与 Y 相关关系曲线图,查出相对应的修订比例,从而进行修正。式中, W_i 为最大 i 日洪量; $W_{i,\max}$ 为最大 i 日洪量中的最大值。

3 结果与分析

3.1 模型参数率定及分析

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难点问题^[13]。新安江-海河模型有21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,甚至可根据一般经验固定下来,不参加鉴别^[14]。

运行新安江-海河次洪模型,需要知道某些变量的初始值,主要是土壤含水量的初始值,这可以通过运行新安江-海河日模型获得。1980年前选取1965—1975年11场洪水资料来率定次洪模型参数,剩余1976—1979年4场洪水来验证;1980年后选取1980—2002年23场洪水资料率定次洪模型参数,剩余2003—2011年9场洪水来验证。

对比1980年前、后两套参数, SM 、 CS 、 RVM 、 $RRDO$ 这4个参数都不同程度变大(表1)。

SM 表示流域表土蓄水能力,在水源划分结构中起着主导作用^[13]。表土可分为浅层与深层两部分。若表土蓄水能力小,则自由水多蓄于浅层,易溢出形成地面径流;反之,则自由水蓄水除浅层外尚及于深层,产生较多的地下径流。浅层土质决定于植被条件,深层土质则决定于基岩性质。海河流域1980s以后,特别是近20年来,农民收入水平提高,原来生活所必须的薪柴多数已由燃气和煤炭取代,加上禁牧措施的实施,流域植物量大大增加,植被状况明显改善。植被良好,则浅层土质下渗能力增强,地面径流减少,自由水蓄渗由浅层向深层转移, SM 增大。

CS 表示河网调蓄能力,大小取决于洪水流速及河网蓄量^[13]。天然状态下, CS 决定于河网地貌,主要考虑河底比降、河道糙率、水面宽度、河网密度等影响因素;随着人类活动日趋强烈,也需考虑水利工程及水土保持工程的影响。海河流域1980s以后修建了大量的水库、淤地坝等蓄水工程。这些工程减缓了水流流速,延长了汇流时间,增加了河网蓄量,进而增强了河网调蓄能力,消减了洪峰流量。因此, CS 值增大。

RVM 表示地表填注蓄水能力,地表填注能力包括塘坝、谷坊坝等的蓄水能力,天然洼地的蓄水能力以及灌溉耕地(含梯田)畦埂的蓄水能力等^[12]。天然流域最大填注量一般不大,可纳入张力水蓄水容量曲线一并考虑;海河流域人类活动影响强烈,因此有必要将此因素提取出来,单独考虑。流域 RVM 从5 mm增加到30 mm,反映出海河流域1980s后拦水、取水设施急剧增多,用水量急剧增大,因而径流及洪水量也大大减小。

$RRDO$ 表示地下水库出流初始水深^[12]。海河流域地下水资源相对丰富,但是1980年后人类活动加剧,农业用水、工业用水、生活用水大大增加,对浅层地下水与深层地下水的混合过度开采使得地下水水位下降,这样使得河流系统和地下水系统的水头差变大,地表水则会补给地下水,从而导致地表径流量大大减少,洪峰也变小。

3.2 模型模拟结果及分析

根据《水文情报预报规范》(GB/T 22482—2008)可知:五陵站1980年前模拟了15场洪水(表2),径流深合格率为86.67%,洪峰合格率为53.3%;五陵站1980年后模拟了32场洪水(表3),径流深合格率为81.25%,洪峰合格率为46.9%。1980年前、后径流深合格率都超过了80%,达到乙等精度;但洪峰合格率相对不高,可能是由于卫河流域存在超渗产流,模型没有考虑全面。通过以上分析可知,模型模拟径流深精度较高,可作为设计洪水系列修正的依据^[15]。

3.3 一致性修订成果

采用新安江-海河模型对1980年前、后洪水分别率定,并对元村集站洪水系列进行一致性修正,结果见表4。 W_5 修正后比修正前平均减少27.1%, W_{15} 修正后比修正前平均减小25.4%, W_{30} 修正后比修正前平均减小23.0%。

表 2 1980 年前五陵站径流深和洪峰模拟结果

Tab. 2 The simulation results of runoff depth and flood peak of Wuling watershed before 1980

洪水起始时间	实测径流深/ mm	模拟径流深/ mm	径流深绝对误差/ mm	实测洪峰/ (m^3/s)	模拟洪峰/ (m^3/s)	洪峰相对误差/ %
1965-07-09 08:00	12.6	13.9	1.3	126.0	109.8	-12.9
1966-07-23 08:00	38.5	32.6	-5.9	219.1	106.4	-51.4
1967-08-18 08:00	35.9	36.0	0	320.0	207.1	-35.3
1968-07-13 08:00	21.1	19.1	-2.0	124.0	62.6	-49.5
1969-09-20 08:00	47.0	42.4	-4.6	289.0	268.3	-7.2
1970-07-30 08:00	258.7	248.0	-10.7	734.0	1120.7	52.7
1971-08-21 08:00	96.2	73.8	-22.4	329.0	299.7	-8.9
1972-07-30 08:00	108.5	58.3	-50.2	395.0	193.8	-50.9
1973-07-20 08:00	58.5	64.9	6.4	226.0	229.1	1.4
1974-08-07 08:00	82.7	82.3	-0.3	366.0	339.6	-7.2
1975-08-06 08:00	215.8	213.4	-2.4	728.0	1033.7	42.0
1976-07-19 08:00	242.9	228.5	-14.5	749.0	1105.4	47.6
1977-07-27 08:00	174.6	177.9	3.3	450.0	510.3	13.4
1978-07-24 08:00	46.5	48.4	1.8	267.0	281.7	5.5
1979-07-05 08:00	19.1	21.2	2.0	77.8	81.4	4.6

表 3 1980 年后五陵站径流深和洪峰模拟结果

Tab. 3 The simulation results of runoff depth and flood peak of Wuling watershed after 1980

洪水起始时间	实测径流深/ mm	模拟径流深/ mm	径流深绝对误差/ mm	实测洪峰/ (m^3/s)	模拟洪峰/ (m^3/s)	洪峰相对误差/ %
1980-07-29 08:00	11.0	10.6	-0.4	69.5	60.2	-13.4
1981-08-16 08:00	34.6	30.1	-4.5	190.0	197.8	4.1
1982-08-01 08:00	246.2	247.9	1.7	746.0	1241.9	66.5
1983-09-08 08:00	40.0	35.2	-4.8	160.0	141.4	-11.6
1984-08-10 08:00	36.8	32.5	-4.2	135.0	90.0	-33.3
1985-09-15 08:00	41.2	39.9	-1.3	156.0	153.2	-1.8
1986-08-01 15:00	11.3	12.4	1.1	48.2	33.3	-30.9
1987-08-15 08:00	7.1	7.6	0.5	42.0	32.7	-22.1
1988-08-11 08:00	69.3	85.7	16.4	240.0	291.1	21.3
1989-07-17 08:00	11.9	11.8	0	208.0	94.4	-54.6
1990-06-26 08:00	15.6	8.3	-7.3	197.0	50.0	-74.6
1991-08-24 08:00	12.4	10.9	-1.4	38.2	34.0	-11.0
1992-08-11 08:00	21.1	20.1	-1.0	58.5	56.1	-4.1
1993-06-28 08:00	18.4	19.2	0.8	69.5	63.8	-8.2
1994-07-12 08:00	96.1	81.2	-14.9	376.0	284.4	-24.4
1995-07-24 08:00	20.6	19.8	-0.9	90.5	96.8	7.0
1996-08-04 08:00	266.7	256.0	-10.7	730.0	1069.1	46.5
1997-07-20 08:00	4.7	2.7	-2.0	27.4	11.8	-56.9
1998-08-12 08:00	60.8	77.1	16.3	242.0	225.9	-6.7
1999-07-13 08:00	6.8	7.8	1.0	141.0	46.7	-66.9
2000-07-05 08:00	120.8	129.4	8.6	409.0	260.9	-36.2
2001-07-22 08:00	28.6	27.8	-0.8	92.8	73.7	-20.6
2002-07-02 19:00	6.5	6.5	0	34.2	31.7	-7.3
2003-08-25 07:00	36.2	39.0	2.8	68.0	54.5	-19.9
2004-08-10 20:00	38.8	30.5	-8.3	102.0	74.7	-26.8
2005-07-17 08:00	58.4	58.2	-0.2	122.0	128.9	5.7
2006-06-29 08:00	19.9	15.2	-4.7	175.0	120.8	-31.0
2007-07-30 08:00	23.4	25.1	1.7	100.0	89.2	-10.8
2008-07-15 08:00	38.5	36.5	-2.0	141.0	114.2	-19.0
2009-07-13 08:00	12.6	6.2	-6.4	29.8	8.8	-70.5
2010-09-04 08:00	29.1	23.3	-5.8	152.0	83.4	-45.1
2011-09-13 08:00	27.9	32.0	4.1	76.9	85.2	10.8

表4 元村集站洪水资料修订
Tab.4 The revised results of flood of Yuancunji watershed

年份	$W_5/$ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	W_5 修正比例	W_5 修正值/ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	$W_{15}/$ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	W_{15} 修正比例	W_{15} 修正值/ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	$W_{30}/$ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	W_{30} 修正比例	W_{30} 修正值/ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)
1953	1.535	0.270	1.120	3.865	0.167	3.218	5.385	0.150	4.575
1954	1.415	0.254	1.056	3.647	0.167	3.037	6.168	0.135	5.333
1955	5.743	0.096	5.193	9.184	0.089	8.367	12.561	0.081	11.539
1956	11.824	0.055	11.169	19.274	0.053	18.251	22.973	0.054	21.728
1957	1.213	0.273	0.882	2.753	0.220	2.149	3.385	0.232	2.600
1958	1.665	0.202	1.329	4.285	0.152	3.633	7.756	0.117	6.850
1959	0.740	0.366	0.469	1.339	0.363	0.853	1.851	0.382	1.144
1960	0.598	0.421	0.346	1.275	0.388	0.781	2.186	0.306	1.516
1961	4.272	0.110	3.803	5.028	0.135	4.351	5.584	0.152	4.734
1962	0.611	0.491	0.311	1.211	0.458	0.657	2.068	0.373	1.297
1963	12.730	0.052	12.068	21.617	0.047	20.606	25.873	0.049	24.606
1964	1.387	0.291	0.984	3.182	0.202	2.540	5.877	0.144	5.031
1965	0.510	0.436	0.287	0.878	0.513	0.428	1.258	0.499	0.630
1966	0.690	0.431	0.393	1.259	0.439	0.706	1.765	0.406	1.049
1967	0.765	0.389	0.468	1.125	0.470	0.596	1.977	0.367	1.252
1968	0.435	0.506	0.215	0.787	0.521	0.377	1.074	0.507	0.529
1969	1.279	0.294	0.903	2.375	0.235	1.817	3.226	0.232	2.479
1970	6.305	0.071	5.855	7.872	0.090	7.166	9.381	0.093	8.504
1971	1.347	0.262	0.994	2.754	0.219	2.151	4.081	0.197	3.279
1972	1.574	0.266	1.156	2.924	0.213	2.301	4.128	0.193	3.330
1973	0.990	0.381	0.613	1.701	0.299	1.193	3.226	0.221	2.512
1974	1.393	0.243	1.055	2.206	0.283	1.581	2.873	0.262	2.121
1975	4.867	0.105	4.356	6.874	0.106	6.143	8.112	0.112	7.200
1976	7.259	0.074	6.721	10.024	0.079	9.235	12.617	0.079	11.618
1977	2.144	0.199	1.717	4.738	0.146	4.047	7.087	0.132	6.152
1978	1.250	0.280	0.900	1.726	0.292	1.222	2.548	0.268	1.866
1979	0.460	0.504	0.228	0.840	0.509	0.413	1.345	0.462	0.724

3.4 频率分析结果

从表5中可以看出:(1)修正后的频率曲线的 C_v 值大于修正前;(2)元村集站在1980年后,由于下垫面的变化导致其设计洪量都减小,减少幅度随着设计频率的增大而增大;(3)相同频率下,设计洪量的减少幅度随时间段增长而增大。

4 结语

本文以合河—新村—五陵为代表区间,对1965—2011年的天然年降雨径流系列进行模拟分析,研究发现新安江—海河模型的 SM 、 CS 、 RVM 、 $RRDO$ 这4个参数都不同程度变大,因而通过参数的变化可以反映:1980s后,卫河流域下垫面条件发生显著变化,流域调蓄作用明显增强,地表拦蓄和持水能力增强,地下水位下降严重,从而造成了在相同降雨情况下,流域产生的径流量不同程度减小,因此对卫河流域设计洪水进行一致性修正是必要的。本文通过修订元村集站洪水资料,并进行频率分析,为确定水利工程有关建筑物尺寸,以使该工程符合指定的防洪安全标准提供了设计依据,有利于保障地区防洪安全和运行期工程安全。

本文在采用新安江—海河模型进行参数率定时,存在异参同效性,对参数的不确定性也存在缺陷;笔者提出采用综合线性权重法计算元村集站的修订比例,此方法简单明晰,但是对成果可靠性还需要进一步验证;可深入探讨分析下垫面变化对不同特征频率洪水的影响,并开展如何进行资料还原或设计洪水成果修正的理论

以及方法技术的评价分析;人类活动变化包括人口的增长、城市化水平发展、植被增减变化、水利设施对截留的影响等,都有可能导致流域下垫面的变化,在后续研究中将进一步区分人类活动对径流变化的影响等.

表 5 元村集站洪量频率分析修正前后对比*
Tab. 5 The flood volume frequency analysis of Yuancunji watershed

项目		频率统计参数			频率/%					
		均值	离差系数 C_v	偏差系数 C_s	0.5	1	2	5	10	20
5 日洪量	修正前/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	1.85	1.84	4.58	21.46	17.17	13.08	8.11	4.85	2.27
	修正后/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	1.67	1.98	4.79	20.99	16.68	12.59	7.64	4.44	1.96
	减少比例/%	9.73	-7.61	-21.38	2.19	2.85	3.75	5.80	8.45	13.66
15 日洪量	修正前/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	3.19	1.69	4.34	33.69	27.18	20.94	13.30	8.22	4.08
	修正后/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	2.88	1.80	4.52	32.60	26.14	19.98	12.47	7.52	3.57
	减少比例/%	9.72	-6.51	-15.19	3.24	3.83	4.58	6.24	8.52	12.50
30 日洪量	修正前/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	4.28	1.46	3.99	38.64	31.56	24.73	16.29	10.55	5.70
	修正后/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	3.91	1.53	4.15	37.22	30.25	23.55	15.29	9.73	5.11
	减少比例/%	8.64	-4.79	-3.50	3.67	4.15	4.77	6.14	7.77	10.35

* C_v 、 C_s 无单位.

致谢:感谢李巧玲老师,刘开磊博士,王白陆、张梦婕师姐对本研究提供的帮助和宝贵建议.

5 参考文献

[1] 梁忠民,钟平安,华家鹏. 水文水利计算. 北京: 中国水利水电出版社,2008: 13.

[2] Bronstert A, Bardossy A, Bismuth C *et al.* Multi-scale modeling of land-use change and river training effects on floods in the Rhine basin. *River Research and Application*, 2007, **23**(10): 1102-1125.

[3] Naef F, Scherrer S, Weiler M. A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology*, 2002, **267**: 74-79.

[4] 丁杰,李致家,郭元等. 利用 HEC 模型分析下垫面变化对洪水的影响——以伊河东湾流域为例. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 463-468. DOI 10. 18307/2011. 0321.

[5] 胡春歧,刘惠霞,胡军波. 紫荆关以上流域下垫面条件变化对产汇流影响分析. 南水北调与水利科技, 2008, **6**(5): 50-55.

[6] 赵人俊. 流域水文模型. 北京: 水利电力出版社,1983.

[7] Beven KJ, Kirkby MJ. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, **24**(1): 43-69.

[8] Beven KJ, Wood E. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology*, 1983, **65**: 139-158.

[9] Beven KJ. Hillslope runoff processes and flood frequency characteristics. In: Abrahams AD ed. Hillslope processes. London: Allen & Unwin, 1986: 187-202.

[10] 李致家,孔凡哲,王栋等. 现代水文模拟与预报技术. 南京: 河海大学出版社,2010.

[11] 张建中,毛慧慧. 下垫面变化条件下设计洪水修订方法研究. 水利水电技术, 2012, **42**(12): 1-8.

[12] 李致家,黄鹏年,张建忠等. 新安江-海河模型的构建与应用. 河海大学学报, 2013, **41**(3): 189-195.

[13] 包为民. 水文预报. 北京: 中国水利水电出版社,2006: 154.

[14] 戴建男,李致家,黄鹏年等. 新安江模型参数不确定性分析. 河海大学学报, 2011, **39**(6): 618-622.

[15] 李致家,周赛,姚玉梅等. 经验方法研究下垫面变化对洪水的影响. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 637-642. DOI 10. 18307/2012. 0419.