

人类活动干扰对灞河流域设计洪水的影响研究

慕登睿^{1,2}, 袁卫宁^{1,2}, 吕继强^{1,2}, 罗平平^{1,2}, 范磊^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710061;

2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要: 我国干旱半干旱地区, 强烈的人类活动干扰引起城市河流洪水过程的显著变化, 影响防洪与水资源规划设计结果。基于改进的网格化分布式降雨径流模型 MCDRM (Modified Cell Distributed Rainfall Run-off Model), 定量研究土地利用变化、水库建设运行对不同重现期暴雨洪水过程变化的影响。以秦岭北麓城市型河流灞河为例, 结合流域典型人类活动干扰产汇流下垫面条件的实际情况, 构建暴雨洪水模型, 并依据推理公式法计算结果率定模型参数。研究表明: 2000年后, 西安市城镇加速扩张, 并启动“八水润长安”工程建设, 使得流域内城市用地及水域面积增加、水资源开发利用强度增加明显。强烈的人类活动改变了流域降雨产流、汇流的下垫面条件, 引起流域洪水过程变化; 秦岭北麓灞河流域 1980-2015 年设计洪水洪峰、洪水总量均减少。与 1985 年相比, 2015 年流域内重现期为 10、20、50、100 年一遇的设计洪峰流量平均减少 22.98%, 设计洪水径流总量平均减少约 21.4%。其中, 100 年一遇标准设计洪峰径流减少 23.88%, 20 年一遇标准设计洪水径流总量减少 21.51%。基于改进的网格化分布式降雨径流模型, 开展城市河流人类活动干扰的暴雨洪水模拟与响应变化研究, 结果可为干旱半干旱区中小流域设计洪水复核与计算提供新的参考。

关键词: 水文与水资源; MCDRM 模型; 人类活动; 设计洪水; 秦岭北麓; 灞河流域

中图分类号: TV11

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0071-07

Impacts of human activities on design flood of Bahe River Basin

MU Dengrui^{1,2}, YUAN Weining^{1,2}, LÜ Jiqiang^{1,2}, LUO Pingping^{1,2}, FAN Lei^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In arid and semi-arid regions of China, strong human disturbance causes significant changes in urban river flood process, which affects flood control and water resource planning results. In this paper, we study the effects of land use change and reservoir construction and operation on the changes of rainstorm flood processes in different recurrence periods by the Modified Cell Distributed Rainfall Run-off Model (MCDRM). We construct the rainstorm flood model and verify the model parameters and simulation results according to the calculation results of traditional rational formula, take the urban Bahe River at the northern foot of Qinling mountains as an example. The results showed that the trend of increase of urban land area and water area in the basin increased, and the intensity of water resources development and utilization increases obviously, due to the urbanization of xi'an city speeds up after 2000, and then the construction of the "eight rivers moisten Chang'an" project. High intensity human activities change underlying surface conditions in runoff generation and confluence of the flood in Bahe River Basin; the designed flood peak volume and total flood amount decreased since 1980. Compared with 1985, the designed flood peak flow with a recurrence period of 10 years, 20 years, 50 years and 100 years in 2015 decreased by 22.98% on average, and the total designed flood runoff decreased by 21.4% on average. Among them, the design flood peak volume decreased by a maximum of 23.88% at 100-year recurrence period, and the total amount of standard design flood runoff decreased by 21.51% at 20-year recurrence

收稿日期: 2018-11-22; 修回日期: 2019-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679185); 中国博士后科学基金项目(2017M623088)

作者简介: 慕登睿(1994-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 吕继强(1983-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 副教授, 研究方向为水文及水资源。

period. This paper carried out the study on the simulation and response change of rainstorm flood caused by human activities in urban rivers, which is based on the improved grid distributed rainfall - runoff model, and the results can provide a new reference for the design flood review and calculation of small and medium-sized watersheds in arid and semi-arid areas.

Key words: hydrology and water resources; MCDRM model; human activity; design flood; north of Qinling Mountain; Bahe River Basin

1 研究背景

我国北方地区水资源天然禀赋不足,目前水资源紧缺与水环境恶化问题已限制地区经济与社会发展。自20世纪90年代起,区域城市化进程加快,进一步加剧了水资源供需矛盾。较多学者研究认为^[1-3]影响水资源变化最直接因素是气候条件和土地利用情况^[4-6]。当前,半干旱地区人类活动对流域水文过程的影响日益显著,增加了径流变化的复杂性和不确定性^[7]。国内外研究典型人类活动对流域径流的影响已逐渐由定性分析转变为定量计算^[8-9]。目前研究成果多以洪水要素变化的统计规律为主^[10],亟需加强人类活动与水文过程相互作用及人类活动对洪水过程影响机理研究。强烈的人类活动不断改变城市河流的流域下垫面,对不同区域不同量级洪水过程影响客观存在,但影响程度不同^[11-12]。人类活动干扰类型增多、强度增大,加之水文循环过程的复杂性,使得人类活动对洪水过程的影响评价结果带有很大的不确定性。这些都是下一步人类活动对径流影响研究中需要重点解决的科学问题^[13]。

灞河属渭河的一级支流,为秦岭北麓关中城市群重要水源地之一,是西安市“八水绕长安”中最大的城市型河流。流域内农业发达,灌溉历史悠久,建有辋灞渠、李家河水库等诸多引水工程。近年来,流域中游、下游城市新区建设不断加快,灞河流域内城镇化面积增加、水利工程建设增多,使得河流水文过程发生了巨大的变化。本文以灞河为例,利用MCDRM模型模拟1980-2015年间的6期土地利用类型变化和水库建设对不同重现期的流域设计暴雨洪水的影响,研究结果对区域水资源的可持续利用、防灾减灾及水利工程的安全高效运行具有重要实践参考价值。

2 研究区概况

灞河发源于秦岭北麓的蓝田县,由南向北汇入渭河(东经109°00'~109°47'、北纬33°50'~34°

27'),总流域面积1821 km²^[14]。流域多年平均降水集水面积主要分布在降水量比较大的秦岭山区,约占流域面积的57%,暴雨洪水汇流时间短,具有暴涨猛落的山区性河流特点。灞河洪枯流量相差悬殊,据马渡王水文站(上游控制性水文站)实测资料统计,灞河多年平均流量为15.32 m³/s,年径流量为4.96 × 10⁸ m³,7-10月份径流量占全年的56.5%,12-翌年2月占全年径流量的6.7%,灞河最大洪峰流量为2160.0 m³/s(1953年8月12日)。流域土地利用类型以耕地、草地和林地为主,集中在流域上中游,2000年后河流下游水域和城市面积增加,截止2015年城市面积占流域总面积11.77%。

李家河水库枢纽位于灞河一级支流辋川河上,地处蓝田县玉川乡李家河村,水库坝址以上流域面积362 km²,设计总库容5258 × 10⁴ m³,调节库容4400 × 10⁴ m³,死库容608 × 10⁴ m³;校核洪水位881.29 m,设计洪水位880.00 m,汛限制水位880 m,死水位839 m,供水设计流量3.2 m³/s,属中型水库。李家河水库建设的主要任务是以城镇供水为主,兼顾发电。2014年,李家河水库建成后,除汛期有部分洪水量下泄外,其余入库水量将被水库调蓄利用,仅为下游河道预留0.3 m³/s生态基流量。

采用1975-2010年灞河流域上中游10个气象站点的气象数据与1个控制性水文站的径流数据,研究区地理位置及流域水文、气象站点如图1所示。

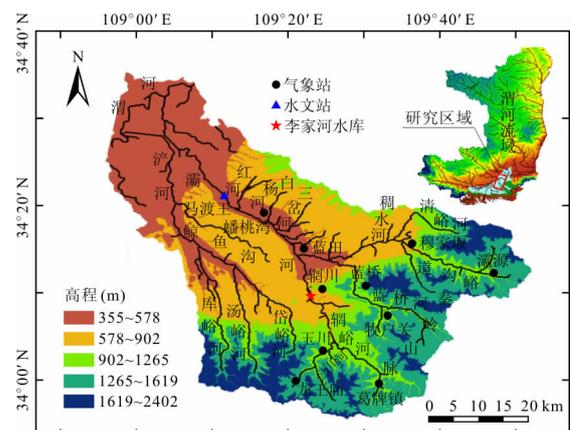


图1 灞河流域水文、气象站点位置图

3 改进的网格分布式模型 MCDRM 的建立

日本京都大学防灾研究所 2003 年提出的网格化分布式降雨径流模型 CDRM (grid - Cell Distributed Rainfall Runoff Model) 用于研究流域暴雨洪水过程^[15-17]。CDRM 模型可实现水库实时调蓄情况下的洪水过程模拟计算,并利用蒙特·卡罗方法计算流域下垫面条件变化的流域产流及汇流参数合理区间优化,可避免“异参同效”现象,解决空间蒸发与土壤含水量模拟总和不变,但存在径流模拟结果失真问题。

3.1 MCDRM 模型建立

本文根据淄河流域人类活动实际情况,构建不同的人类活动干扰过程模块,用以概化不同类型人类活动对水文过程的影响机理,提高模型的适用性。本文提出改进后的分布式 MCDRM (Modified Cell Distributed Rainfall Runoff Model) 模型,并通过蒙特·卡罗方法与人工调节参数方法结合优化模型参数,对场次洪水过程进行模拟以降低模拟结果的不确定性。

模型采用运动波模型来计算每一个网格产生的径流量。每个网格单元必要的模型参数包括粗糙值和地形属性。根据土地使用的情况,分配等效的粗糙值度数。通过 DEM (Digital Elevation Model) 定义地形属性,例如坡度和坡长。该模型模拟了 3 种侧向流动机制:毛管流、重力流、壤中流。考虑人类活动干扰的 MCDRM 模型计算流域产汇流过程原理见图 2^[18-19]。

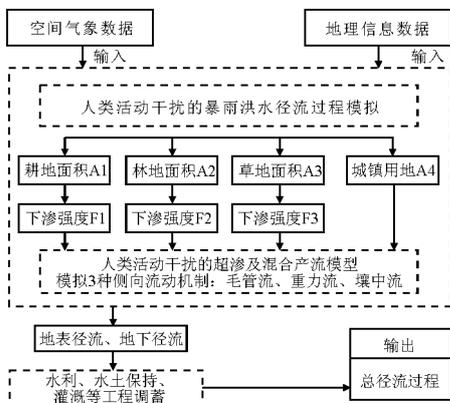


图 2 MCDRM 模型计算原理示意图

在 MCDRM 的每个网格中,当水深低于不饱和流的水深时, ($0 \leq h \leq d_m$), 通过有着不饱和传导系数 k_m 的达西定律模拟流动过程。在毛管孔隙中计算

其沿着坡度下降方向的平均速度 v_m , 建立公式为:

$$v_m = -k \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

式中: H 为水头, m; x 为网格中的水平距离, m; k 为非饱和导水率, m/s。

根据 Gardner^[20] 提出的非饱和导水率计算公式, 其表达式为:

$$k = k_m S_e^\beta \quad (2)$$

式中: k_m 为毛管水中的饱和和渗透系数, m/s; S_e 为饱和自由度; β 为不饱和指数常数。

饱和和自由度计算公式为:

$$S_e = \frac{\theta}{\theta_m} \quad (3)$$

式中: θ 为体积含水量, %; θ_m 为最大毛细管含水量, %。

因此, 公式(1) 可以改写为下式:

$$\begin{aligned} v_m &= k_m S_e^\beta \left(i - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) = k_m \left(\frac{\theta}{\theta_m} \right)^\beta \left(i - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \\ &\cong k_m \left(\frac{\theta}{\theta_m} \right)^\beta i = k_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta i \end{aligned} \quad (4)$$

式中: i 为山坡梯度; h 为水位, m; d_m 为土层中的毛细管的深度 ($d_m = D\theta_m$), 其中 D 为土层深度, m。通过 d_m 与 v_m 相乘, 得到不饱和和土层中的网格侧向流的单位宽度 q_a ($0 \leq h \leq d_m$):

$$q_a = d_m k_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta i \quad (5)$$

当水深超过不饱和流动的水深, 超过的水流作为饱和地下水, 通过饱和和水力传导系数为 k_a 的达西定律进行模拟。其重力水的坡度下降方向的平均速度 v_a 为:

$$v_a = k_a i \quad (6)$$

式中: k_a 为饱和水力传导系数, m/h。

在饱和和情况下, 网格的每单位宽度 q_b 的总出流量为 ($d_m \leq h \leq d_a$):

$$q_b = d_m k_m i + (h - d_m) k_a i \quad (7)$$

为了保持流动的连续性, 需认为当 $h = d_m$ 时, 公式(5) 与(7) 相等, 则有 $q_a = q_b$, 同时 $\frac{dq_a}{dh} = \frac{dq_b}{dh}$, 对于公式(5):

$$\begin{aligned} q_a &= d_m k_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta i = d_m \left(\frac{1}{d_m} \right) k_m \left(\frac{1}{d_m} \right)^{\beta-1} h^\beta i \\ &= k_m \left(\frac{1}{d_m} \right)^{\beta-1} h^\beta i \end{aligned} \quad (8)$$

则可得:

$$\begin{aligned} \frac{dq_a}{dh} &= \frac{d(k_m (\frac{1}{d_m})^{\beta-1} h^\beta i)}{dh} = \beta h^{(\beta-1)} k_m (\frac{1}{d_m})^{\beta-1} i \\ &= \beta k_m (\frac{h}{d_m})^{\beta-1} i \end{aligned} \quad (9)$$

由 $h = d_m$, 公式(9) 可写为:

$$\frac{dq_a}{dh} = \beta k_m (\frac{h}{d_m})^{\beta-1} i = \beta k_m i \quad (10)$$

对于公式(7) 来说:

$$q_b = d_m k_m i + h k_a i - d_m k_a i \quad (11)$$

由公式(11) 可得:

$$\frac{dq_b}{dh} = k_a i \quad (12)$$

由 $\frac{dq_a}{dh} = \frac{dq_b}{dh}$, 可得:

$$\beta k_m i = k_a i \quad (13)$$

则得到关系式:

$$k_m = k_a / \beta \quad (14)$$

当水深超过土层 D 的有效孔隙率 $\theta_a (d_a = D\theta_a)$ 水流将为表层流, 通过曼宁公式模拟平均速度 v_s :

$$v_s = k_a i + \frac{\sqrt{i}}{n} (h - d_a)^{m-1} \quad (15)$$

式中: n 为河道糙率系数, 其值与土地利用类型有关, m 为 $5/3$ 。

总出流量为地表与地下水量总和:

$$q_c = d_m k_m i + (h - d_m) k_a i + \frac{\sqrt{i}}{n} (h - d_a)^m \quad (16)$$

令 $\alpha = \frac{\sqrt{i}}{n}$, 则根据 Yasuto 等^[21] 提出的单位宽

度的流量与深度之间的关系(如图3所示), 可以通过连续性得出公式(17):

$$q = \begin{cases} v_m d_m (\frac{h}{d_m})^\beta & (0 \leq h \leq d_m) \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) & (d_m \leq h \leq d_a) \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) + \alpha (h - d_a)^m & (d_a < h) \end{cases} \quad (17)$$

连续性方程的每个网格单元的坡面流动示意图如图4所示, 连续性方程表达式为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \cos \varphi \quad (18)$$

式中: t 为时间, h ; φ 为倾斜角; r 为净降雨强度, mm/h , 模型参数之间的关系包括: d_m, d_a, k_a, n, β , Lax - Wendroff 有限差异组合被用于求解网格单元中每个节点上的一维运动波动方程。

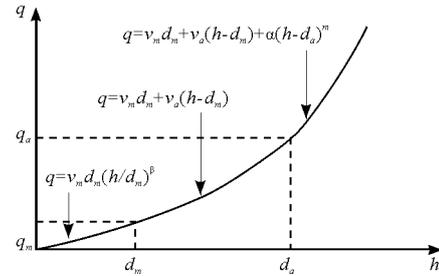


图3 单位宽度的流量 (q) 与深度 (h) 之间的关系

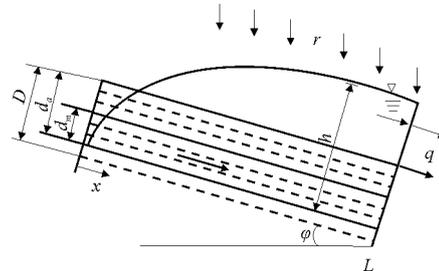


图4 坡面流动示意图

3.2 MCDRM 模型地形数据提取

可以由 DEM 提取水系和子流域特征代表的流域参数。在 DEM 中, 可以采用栅格的个数表示流域平面坐标。据此, 就可以计算流域地表上每个栅格的地表坡度、流向、流量分配系数、集水面积等。

MCDRM 模型地形参数通过 DEM 处理得到, 需要率定产汇流参数主要有: 植被根系区缺水量、土壤下渗率呈指数衰减的速率、土壤刚达到饱和时的传导度、重力排水的时间滞时参数、根带最大蓄水能力、根带土壤的初始缺水量、地表坡面汇流的有效速度、主河道汇流的有效速度。模型各产汇流参数取值见表1。

表1 MCDRM 模型率定参数表

参数名称	参数值
土壤下渗率呈指数衰减的速率	0.02
土壤刚达到饱和时的传导度	8
重力排水的时间滞时参数	20
根带最大蓄水能力	0.8
根带土壤的初始缺水量	0.01
地表坡面汇流的有效速度	4800
主河道汇流的有效速度	560

本文采用蒙特·卡罗方法与手动调节参数相结合的方式实现参数变化区间确定与优化。调节参数时, 以模拟结果的相对误差总和最小和相关系数最大构建多目标优化方程, 在给定参数变化区间的初始范围内, 优化确定合理的参数初始范围。结合优

化结果,手动调整参数优化范围,继续优化模拟,直到模拟结果达到满意为止。多目标优化模拟流程见下图 5。

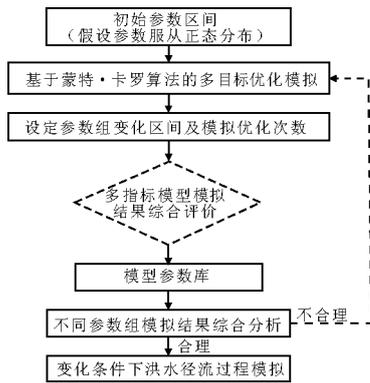


图 5 多目标参数优化计算流程图

4 灞河流域土地利用变化分析

采用从中国科学院资源环境科学数据中心下载的精度为 1 km、年份为 1980、1995、2000、2005、2010 和 2015 年的 6 期土地利用影像图。不同设计标准降雨数据采用参考文献[22-23],降雨数据的时间步长为 1 h,开展土地利用影响的降雨洪水过程模拟计算与定量研究。灞河流域不同时期土地利用见图 6,不同时期土地利用占比列统计见表 2。由图 6 可

看出,随着西安市城市快速扩张,城镇化建设导致灞河流域城市用地比例在逐渐增加。不同土地利用糙率系数表,见表 3。

表 2 灞河流域土地利用变化矩阵 %

土地利用年份	水体	城市用地	林地	农地	草地
1980	2.46	8.21	19.90	36.98	32.45
1995	1.95	8.36	18.91	38.50	32.28
2000	2.40	9.53	19.46	36.48	32.13
2005	2.54	10.32	19.53	35.55	32.06
2010	2.87	10.40	19.64	35.16	31.93
2015	2.83	11.77	19.67	33.92	31.81

表 3 不同土地利用类型的糙率系数

水体	城市用地	林地	农地	草地
0.007	0.41	1.10	0.57	0.98

西安“八水润长安”工程建设,在流域内修建人工湖、湿地公园以及橡胶坝蓄水形成的人造水景工程,使得灞河流域水体面积略有增加。区域内以城市化为代表的典型人类活动致使城市用地增加及水体面积增加,改变了流域降雨产汇流下垫面情况,必然会影响流域洪水过程。

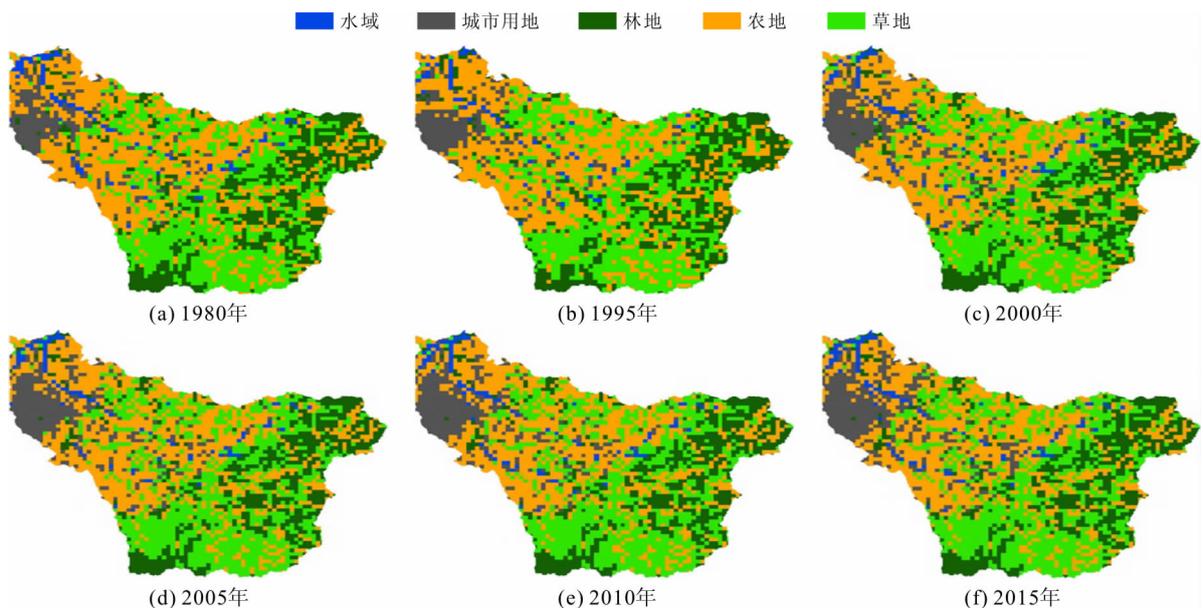


图 6 不同时期灞河流域土地利用情况

5 土地利用变化、水库建设的设计洪水过程响应模拟与量化

灞河流域中下游强烈人类活动改变了流域下垫

面条件,直接影响产流过程,同时水利工程调蓄运行,直接改变河道汇流过程,洪水径流过程必然发生变化。本文在研究灞河流域人类活动及下垫面要素的变化程度的基础上,采用基于网格化的分布式降雨洪

水模型,模拟土地利用和水库建设运行对不同设计标准的设计洪水过程、洪量、洪峰等参数的影响,初步分析人类活动及下垫面要素的变化对洪水要素的影响程度和典型流域的洪水径流演变特征,开展人类活动影响下洪水径流过程变化与定量研究。

5.1 水系和子流域特征代表的流域参数提取

依据 NASA Shuttle Radar Topographic Mission 90m Digital Elevation Model (SRTM DEM) 数字高程影像提取水系和子流域特征代表的流域参数。据此,计算流域地表上每个栅格的地表坡度、流向、流量分配系数、集水面积等。

5.2 推理公式法与 MCDRM 模型法验证

采用 MCDRM 模型模拟计算设计暴雨重现期为 $T = 10$ 年、 $T = 20$ 年、 $T = 50$ 年和 $T = 100$ 年的设计洪水过程,并依据《西安市实用水文手册》推荐的推理公式法计算灞河上游马渡王水文站设计洪水,验证模型模拟结果。验证和评价合格后,开展灞河全流域设计洪水计算。计算结果见表 4。

5.3 基于 MCDRM 模型的全流域设计洪水响应模拟

以 1980 年土地利用为基准,对比 2015 年土地利用变化与水库运行后不同设计标准暴雨洪水的洪峰、洪水总量变化,定量分析土地利用变化及水库运行对流域设计洪水过程响应。不同设计标准暴雨洪水模拟计算结果见图 7。

表 4 马渡王水文站洪峰流量计算成果汇总表

计算方法	设计暴雨频率/%			
	1	2	5	10
推理公式法	3400	2650	1900	1350
MCDRM 模拟法	3189	2535	1837	1426

5.4 MCDRM 模型结果分析

以 1980 土地利用及对应的设计洪水为基准,比较 2015 年后土地利用与李家人水库运行情况下的流域设计洪水变化,定量分析土地利用与李家人水库运行对流域设计洪水影响程度。土地利用变化与水库运行对灞河全流域设计洪水定量影响见表 5。

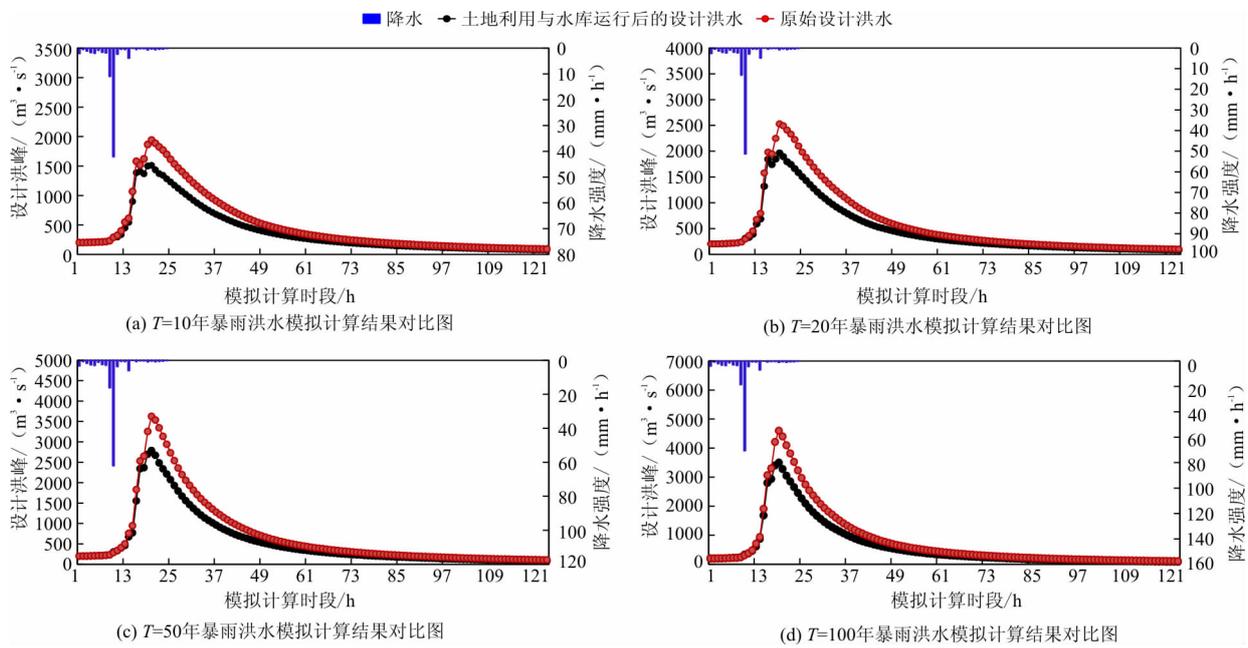


图 7 不同设计标准暴雨洪水模拟计算结果对比图

表 5 土地利用变化与水库运行对灞河全流域设计洪水的定量影响

设计暴雨重现期/a	设计洪峰/($m^3 \cdot s^{-1}$)			设计洪量/ $10^8 m^3$		
	1980 年洪峰/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	2015 年土地利用与水库运行后洪峰/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	洪峰变化比例/%	1980 年洪量/ $10^8 m^3$	2015 年土地利用与水库运行后洪峰/ $10^8 m^3$	洪量变化比例/%
10	1953.9	1509.7	22.73	2.197	1.728	21.35
20	2527.4	1965.0	22.25	2.604	2.044	21.51
50	3625.1	2789.2	23.06	3.147	2.475	21.35
100	4598.7	3500.4	23.88	3.543	2.786	21.37

对比水量变化及水文响应比例结果,表明土地利用与水库运行综合影响使得2015年后流域设计洪水洪峰与洪水总量减少20%左右。

6 结论和建议

本文建立的基于MCDRM的灞河流域水文模拟模型能够较好地模拟灞河流域在不同重现期下的设计洪水过程,得到以下结论:

(1)根据灞河流域人类活动实际情况,构建不同的人类活动干扰过程模块,提高模型的适用性。并通过蒙特·卡罗方法与人工调节参数方法结合优化模型参数,对场次洪水过程模拟以降低模拟结果的不确定性。依据《西安市实用水文手册》推荐的推理公式法计算结果验证MCDRM模型模拟效果。设计暴雨重现期为10、20、50、100 a时,MCDRM模型模拟得到的洪峰流量值与经验公式法计算得到的洪峰流量值分别相差5.6%、3.3%、4.3%、6.2%,平均差值为4.85%,模型可用于人类活动影响的洪水过程模拟计算。

(2)在土地利用变化与水库建设等人类活动干扰的影响下,1980-2015年期间灞河全流域洪峰与洪量的变化总量削减约20%。较1985年,2015年流域设计标准为10、20、50、100年一遇的洪峰流量减少比例(平均减少22.98%)大于设计洪水径流总量减少比例(平均减少约21.4%)。其中,100年一遇标准设计洪峰径流减少最大(23.88%),20年一遇标准设计洪水径流总量减少最大(21.51%)。

(3)在半干旱区流域水资源紧缺、城市洪涝现象日益加重的背景下,本文选择典型城市河流研究人类活动干扰后设计洪水过程变化,对地区水资源规划、防洪减灾尤为重要。同时,也对于今后研究半干旱区域流域洪水过程响应提供了新的选择。

参考文献:

[1] 夏伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对泔河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(6):47-52.

[2] 陶涛,信昆仑,刘遂庆. 全球气候变化对水资源管理影响的研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2007,18(6):7-12.

[3] 刘艳丽,张建云,王国庆,等. 气候自然变异在气候变化对水资源影响评价中的贡献分析——II. 未来期应用分析[J]. 水科学进展, 2012,23(2):156-162.

[4] 梁忠民,蒋晓蕾,钱名开,等. 考虑误差异分布的洪水概率预报方法研究[J]. 水力发电学报, 2017,36(4):18-25

[5] 杨大文,雷慧阁,丛振涛. 流域水文过程与植被相互作用

研究现状评述[J]. 水利学报, 2010,41(10):1142-1149.

[6] 高超,文化,宣伟栋,等. 基于分段三伽玛分布的降雨偏差纠正方法[J]. 水科学进展, 2018,29(2):169-178.

[7] 汤立群,陈国祥. 水利水保措施对黄土地区产流模式的影响研究[J]. 人民黄河,1995(1):19-22+62.

[8] 夏军,王渺林. 长江上游流域径流变化与分布式水文模拟[J]. 资源科学, 2008,30(7):962-967.

[9] 张建云,章四龙,王金星,等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007,18(2):230-234.

[10] 李成林,廖卫红,张莘莘,等. 第二松花江流域暴雨洪水演变规律分析[J]. 中国农村水利水电,2017(12):75-80.

[11] 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.

[12] 魏兆珍. 海河流域下垫面要素变化及其对洪水的影响研究[D]. 天津:天津大学, 2013.

[13] 勾奎. 环境变化对灞河流域径流情势的影响研究[D]. 西安:西安理工大学, 2013.

[14] 王战平. 灞河流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5):176-179.

[15] SAYAMA T, TAKARA K, TACHIKAWA Y. Reliability evaluation of rainfall - sediment - runoff models[J]. International Association of Hydrological Sciences, Publication, 2003(279):131-141.

[16] SUNMIN K, TACHIKAWA Y, SAYAMA T, et al. Ensemble flood forecasting with stochastic radar image extrapolation and a distributed hydrologic model. [J]. Hydrological Processes, 2010,23(4):597-611.

[17] SAYAMA T, MCDONELL J J. A new time - space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the watershed scale[J]. Water Resources Research, 2009,45(7):735-742.

[18] KOJIMA T, TAKARA K T, TACHIKAWA Y. A distributed runoff model for flood prediction in ungauged basins [J]. Discover the Worlds Research, 2007(309):267-274.

[19] SAYAMA T, TACHIKAWA Y, TAKARA K T. Spatial lumping of a distributed rainfall - sediment - runoff model and its effective lumping scale [J]. Hydrological Processes, 2012,26(6):855-871.

[20] GARDNER W R. Dynamic aspects of water availability to plants[J]. Soil Science, 1960,89(2):63-73.

[21] YASUTO T, GEN N, KAORU T. Development of stage - discharge relationship equation incorporation saturated - unsaturated flow mechanism[J]. Proceedings of Hydraulic Engineering, 2004,48:7-12.

[22] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017,28(6):820-828.

[23] 西咸新区沣西新城设计暴雨雨型分析及暴雨强度公式推求成果报告[R]. 西安理工大学.