

## 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\*

丁 杰, 李致家, 郭 元, 黄鹏年

(河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

**摘 要:** 近些年, 由于气候变化和人类活动的双重作用改变了流域下垫面的水文特性, 探讨研究下垫面变化的水文响应过程具有重要的理论和现实意义. 河南伊河洪水虽然量级不大, 但发生几率较高, 对水库运用和河道冲淤的影响较大. 如果洪水变小, 伊河下游的造床流量也相应减小, 水库控制中常洪水的流量及所需的防洪库容可做相应调整, 反之亦然. 因此, 为了科学治理和管理伊河, 开展伊河中下游洪水变化研究也是非常必要的. 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了约 35.11%, 次洪洪峰偏小了约 12.30%. 1990s 前后下垫面条件下在较大洪水上差别不大, 在较小洪水上的差别稍大.

**关键词:** HEC 模型; 下垫面变化; 洪水效应; 东湾流域; 水文模型; 伊河

### Flood responds to the change of underlying surface with the HEC model: A case of Dongwan Basin, Yi River

DING Jie, LI Zhijia, GUO Yuan & HUANG Pengnian

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

**Abstract:** In recent years, climate change and human activities have changed the hydrological characteristics of underlying surface. In this condition, it is of important theoretical and practical significance to study how the flood responds to the changes of land utility and cover. The flood level of Yi River, Henan Province is not high but it occurred with high frequency and has a negative effect on the reservoir and channel. If the flood volume turns small, the downstream flow of Yi River can also become small. Reservoir can control middling storage capacity for flood flow and be adjusted to the required storage and the opposite is also right. Therefore, it is necessary to do some research on the downstream of Yi river. The final simulation results by applying the HEC model show that the food volume and peak flow value decreased by 35.11% and 12.30% respectively from 1964 to 2000 in Dongwan Basin, upper reaches of Yi River. The effect of land-cover between current cover and past cover on hydrology would be small for large storm and big for small storm events.

**Keywords:** HEC model; change of underlying surface; flood responds; Dongwan Basin; hydrological model; Yi River

以往研究下垫面对径流洪水的影响问题大多采用实验流域和代表流域两种方法. 实验流域在国外是从 1930s 开始发展起来的, 但我国是从解放初期才开始建立了大量径流试验站并开展研究工作; 代表流域是在国际水文十年 (1965–1974 年) 期间提出的概念, 即最具有相似水文特性地区众多流域的代表<sup>[1]</sup>, 但这两种方法存在明显的局限性. 1960s 以来, 随着计算机技术的发展, 流域水文模型的发展为分析下垫面变化的水文效应提供了一个有效的手段. 因为水文模型是基于对水文现象的认识, 通过分析其成因及各要素之间的关系, 最后用数学方法建立模型, 模拟流域水文变化的过程. 为了尽可能的反映流域内的空间差异, 很多水文模型都是趋向于与遥感和地理信息系统相结合来反映流域降雨-径流关系以及下垫面变化在其中的作

\* 国家自然科学基金项目 (50479017) 和博士点基金项目 (20090094110005) 联合资助. 2010–07–13 收稿; 2010–09–30 收修改稿. 丁杰, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: jieding100@126.com.

用. 本文以东湾流域为代表流域, 通过 HEC-HMS 模型率定东湾流域不同年代的参数情况, 分析不同土地利用时期流域水文动态变化规律, 然后通过模型模拟的方法, 用下垫面变化前的资料率定模型中的参数, 再对率定的参数进行检验, 然后用率定的模型来推求变化后自然状况下的径流过程, 并与实测资料相对比, 以此来鉴定下垫面变化对径流的影响; 最后统计分析下垫面变化对次洪洪峰、次洪径流的影响规律.

## 1 HEC 模型介绍

HEC (Hydrologic Engineering Center) 模型包含 HEC-GeoHMS 与 HEC-HMS 两部分, 由美国陆军工程团水文工程中心开发研制, 主要由流域模块、气象模块和控制模块三部分组成<sup>[2]</sup>. 流域模块用于构建流域水文系统的各个水文单元, 包括子流域产流、坡面汇流、地下径流、河道汇流和水文参数率定等内容. 气象模块主要用于输入和管理流域降雨资料, 描述雨量站分布, 分析各雨量站的权重, 计算流域平均降雨量. 控制模块主要用于设定模型的起始、结束时间以及模拟流域降雨径流过程等. HEC 模型将径流形成过程进行典型概化, 把子流域分为两部分: 陆面和水面. 水面上的降雨直接形成径流, 降在陆面上的降雨满足植物截留、地面填洼、下渗等损失后形成地表坡面径流. 降在不透水下垫面上的直接径流, 汇入河道后, 以汇流方式下泄, 流至流域出口<sup>[3]</sup>. 若在每一计算模块中选用不同的计算方法, 所需要的资料和参数也就有所不同, 例如, 若未选 SMA 方法, 蒸发资料就是非必需的. 模型未详细模拟下渗水分在土壤层中的运动, 而是将近地表土壤水的水平运动与坡面流合为直接径流, 也没有对地下水的运移进行模拟, 只是将其看作基流<sup>①</sup>.

根据流域自然特征和资料, 本文选用的产流计算方法是 SCS-CN 经验曲线法; 汇流计算方法是 Snyder 单位线法; 基流模拟选取指数衰减法 (Recession); 河道汇流计算选取马斯京根法 (Muskingum). 由前人做的大量实验得到: SCS-CN 曲线法比较适合较小流域 (一般小于  $8\text{km}^2$ ) 的径流模拟, 而 Snyder 单位线法对于中尺度的流域更适合<sup>[4]</sup>. 因此为了提高模拟精度, 本文在各子流域地表径流汇入河道过程采用 Snyder 单位线法. 模型可以根据子流域状况不同而设置不同的参数. 先给模型参数赋以初始值, 再利用试错法对参数进行调整, 直到目标函数达到要求.

(1) 净雨计算: SCS-CN 曲线法是由美国水土保持局总结出的一种经验型的降雨径流计算方法, 它不是把流域的产流机制简单地划分成干旱区超渗产流和湿润区蓄满产流两种机制, 而是通过经验关系, 来计算每个子流域或水文响应单元的产流方法. SCS-CN 曲线法有以下特点: 在降雨径流关系上考虑了流域下垫面的特点, 如土壤、坡度、土地利用等; 可应用于无资料地区; 考虑了人类活动对径流的影响; 参数少, 使用方便<sup>[5]</sup>. 此方法有 3 个参数,  $CN$ ,  $I_a$  以及不透水率. 主要参数  $CN$  与研究流域的土壤类型、植被覆盖、植被类型、地形情况、前期土壤湿度条件下下垫面特征有很大关系. 根据经验,  $CN$  可从下垫面性质表中查出. 其中土壤最大持水量  $S(\text{mm})$  与  $CN$  值的经验公式<sup>[6]</sup>为:

$$S = 25400 / CN - 254 \quad (1)$$

流域累计净雨与累计降雨、初损、土壤持水量的关系式为:

$$P_t = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S), I_a = 0.2S \quad (2)$$

式中,  $P_t$  为  $t$  时刻对应的累计净雨;  $P$  为  $t$  时刻对应的累计降雨;  $I_a$  为初始缺水量, 当  $P \leq I_a$  时, 流域不产流. 每时段的净雨即为该时段始末累积净雨插值. 该公式表明径流只与降雨和  $CN$  有关.  $CN$  越大, 径流越多, 其取值范围在 0-99, 实际应用中一般需大于 40<sup>[7]</sup>.

(2) 汇流计算: Snyder 单位线法并没有完整的定义一个水文单位线, 所以, 在运用 HEC-HMS 计算水文曲线时需要一个参数率定过程. 根据已给的参数  $T_p$  和  $C_p$ , 运用模型确定最优的 Clark 参数. Bedient 和 Huber 提出确定滞时  $T_p$  和流域形状系数  $C_p$  的公式<sup>[8]</sup>:

$$T_p = C_t (L \times L_c)^{0.3} \quad (3)$$

式中,  $T_p$  代表理想单位线洪峰滞时;  $L$  为流域干流长度;  $L_c$  为流域出口至流域中心距离;  $C_t$  为流域停滞系数,

① 赵彦增, 孔凡哲, 李燕. HEC-HMS 在河南中汤流域的应用研究. 中国水利学会 2006 学术年会.

通常取值范围为 1.8–2.2;  $C_p$  为流域形状系数, 通常取值范围为 0.4–0.8.  $C_t$  越大,  $C_p$  越小. 也可通过单位线计算得出:

$$C_p = Q_p T_p / 640A \quad (4)$$

式中,  $Q_p$  为单位线的洪峰值;  $A$  为流域面积.

(3) 基流运算: 退水曲线法的原理和公式为:

$$Q_t = Q_0 e^{-t/K} \quad (5)$$

式中,  $Q_0$  和  $Q_t$  为起始退水流量和其后  $t$  时刻的流量;  $K$  为参数, 可由下式计算:

$$W_t = KQ_t \quad (6)$$

式中,  $W_t$  为  $t$  时刻的蓄水量;  $K$  为以恒定泄流量  $Q_t$  泄完蓄水量  $W$  所用的时间, 也可解释为流域水流平均汇集时间.  $K$  越大, 退水越慢, 峰型越胖<sup>[9]</sup>.

(4) 河道汇流演算: 河道汇流演算中采用的是马斯京根法, 其原理就是在圣维南方程中如果忽略惯性项, 动力波就成为扩散波, 相应的圣维南方程就简化为扩散波方程. 马斯京根法在理论上属于扩散波, 所以可以用于下游回水影响较小的天然河道<sup>[10]</sup>. 其具体演算公式因为有很多文献都详细说明过本文就不再赘言.

## 2 流域概况及数据处理

东湾流域位于伊河河源地区 (33.5°–34.5°N, 111°–112°E), 以东湾水文站作为流域控制出口, 流域面积 2856 km<sup>2</sup>. 流域西高东低, 上游林地面积大, 属大陆性季风气候. 降水量的分布极不均匀, 年降水量随地形高度增加而递增, 因而山地为多雨区, 河谷及附近丘陵为少雨区. 降水年际变化较大, 年最大降水量是年最小降水量的 2 倍左右, 且年内分配极为不均, 每年 7–9 月的降水量占年降水总量的一半以上. 本文采用 HEC-HMS 模型对东湾流域的 20 场洪水进行模拟计算, 时段为 1h. 采用 NOAA 提供的 90m × 90m DEM 数据来提取东湾站以上流域. 利用 HEC-GeoHMS 将研究流域按自然分水线划分为 20 个子流域 (图 1). 子流域的数量与设定的最小河道值有关, 最小河道值越小, 子流域数量就越多. 一般情况下, 子流域数量越多, 模拟的效果越好, 而子流域少的优点仅在于计算处理的时间会较短些.

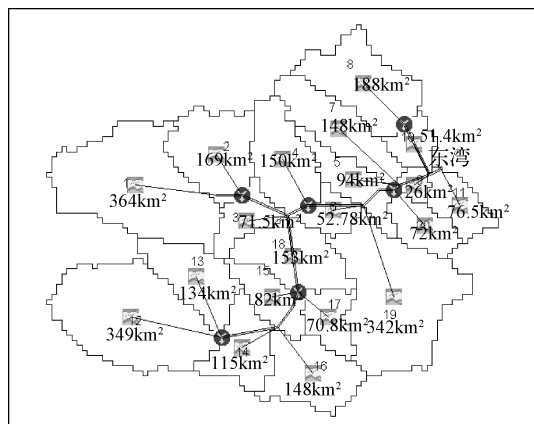


图 1 HEC 模型中东湾子流域划分方案

Fig. 1 Division scheme of Dongwan Basin with HEC model

## 3 HEC-HMS 模型应用

### 3.1 参数率定

HEC-HMS 模型主要用于干旱半干旱地区, 这些地区的产流方式多为超渗产流, 而东湾流域为半干旱半湿润地区, 并不完全是超渗产流, 实际情况是部分降雨首先满足截留、填洼、下渗等产流前损失, 然后再产流, 在模型的计算结果上, 就表现为计算的洪水初始阶段会大一些. 研究发现该模型对雨量大、径流量大的洪水或单峰洪水模拟效果较好; 但对较小的洪水和多峰的洪水, 模拟效果要差一些. 若洪水类型为双峰型, 会发现计算的峰现时间会与实测的有很大的误差. 该模型对雨量资料的反映较敏感, 在雨量变化幅度较小的情况下, 也可使模拟曲线发生较明显的变化, 所以在次洪模拟时段的划分上不能太长. 为了避免模型结构给模拟结果带来的误差, 合理的确定好模型参数是洪水模拟的关键. 本文采用了如下的解决方法:

(1) 如果在计算时间之前有洪水, 则在参数的设定上,  $I_a$  代表初始损失的参数需小一些, 或者为零, 为了更

符合实际情况,在本次研究中该参数的确定是参考新安江日模型中对模拟次洪的相应年份进行模拟所计算出来的次洪开始当天的初始土壤含水量;(2) 在  $tp$  的确定上考虑了流域本身的水文特性,根据各子流域离流域出口的远近来合理安排各子流域上的该参数,所以在 1、2、12、18 四个子流域上该参数的取值都比其他子流域大,根据实际年降雨、蒸发、径流特征值将选择的资料分为了两个阶段:1961 - 1991 年和 1992 - 2000 年. 根据参数的具体物理意义,通过人工试错法,最终确定参数的取值(表 1). 本文对于模型应用好坏是通过洪峰流量、洪量(径流量)和洪水过程三个准则进行评判,即 Nash 和 Sutcliffe 提出的 Nash 效率系数(确定性系数)  $DC$ 、径流深相对误差  $ER$  和洪峰流量相对误差  $EQ$ <sup>[11]</sup>.

$$ER = |R_{\text{实测}} - R_{\text{计算}}| \times 100\% / R_{\text{实测}} \tag{7}$$

$$EQ = |Q_{\text{实测}} - Q_{\text{计算}}| \times 100\% / Q_{\text{实测}} \tag{8}$$

$$DC = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{9}$$

式中,  $y_i$  为实测值;  $y$  为计算值;  $n$  为资料数;  $\bar{y}$  为实测平均值.

表 1 1960s 和 1990s 参数值

Tab. 1 The parameter values in 1960s and 1990s

参数物理意义	参数	1960s	1990s
SCS 法曲线数	$CN$	70	55
不透水面积	$im$	0.01	0.01
洪水滞时系数(h)	$tp$	3	5
洪峰系数	$cp$	0.96	0.96
地下水初始流量( $m^3/s$ )	$if$	5	5
地下水消退系数	$recession\ ratio$	0.5	0.65
地下水作为唯一径流成分阈值( $m^3/s$ )	$tf$	20	20
时段(h)	$k$	1	1
河道汇流的马斯京根法系数	$x$	0.35	0.35

$CN$  值越大说明研究流域越容易产流,结果表明 1960s 要比 1990s 容易产流;  $tp$  表示汇流快慢, 1960s 汇流比 1990s 要慢;  $recession\ ratio$  值越大说明地下水消退的越缓慢, 1990s 地下水消退比 1960s 缓慢(表 1). 综合上述三个参数的结果可以充分说明下垫面在 1990s 的调蓄作用要大于 1960s. 进一步分析发现计算结果也符合研究流域的下垫面情况. 在近 40 年内当地政府部门做了大量的水土保持、封山育林和小水库建设等工作, 1990s 初又加大了栾川生态园的建设, 这些工作本身会对地表的径流量和流域的张力水容量等有一定的影响, 表现为径流量会有不同程度的减少, 流域调蓄能力变大等.

3.2 HEC-HMS 模型模拟结果分析

在东湾流域共选取 20 场洪水进行模拟分析, 其中前 15 场洪水是由 1990s 前的参数率定分析所得, 后 5 场是 1990s 后的参数计算所得. 对于 20 场洪水, 共有 18 场洪量合格, 合格率为 90%, 有 17 场洪峰合格, 合格率为 85%, 对于确定性系数平均值是 0.9, 总共有 15 场大于 0.8. 洪量相对误差平均为 -7%, 洪峰相对误差平均为 2.42% (表 2). 总体来说 HEC-HMS 模型基本能够再现东湾流域的洪水过程.

4 采用 HEC 模型研究下垫面变化对径流与洪水的影响

4.1 1990s 前参数模拟下洪水情况

采用率定好的 1992 年以前的 HEC 模型参数模拟 1992 年之后的洪水, 发现计算的次洪径流量平均偏大 35.11%, 洪峰平均偏大 12.30% (表 3). 排除资料误差等因素, 就可认为由于下垫面条件等的变化, 同雨量子级情况下, 1990s 以后的次洪径流相对于往年来说偏小了约 35.11%, 次洪洪峰偏小了约 12.30%.

4.2 1990s 后参数模拟下的洪水情况

采用目前洪水模型调式的参数, 从 1990s 之前模拟计算的洪水洪峰值平均偏小 17.96%, 流量值平均偏小 19.48% (表 3).

5 结论

(1) HEC 模型基于 ArcView 的运行平台具有很好的操作界面和强大的可视化功能, 应用方便, 是一种

表 2 次洪模拟结果

Tab. 2 The final results after flood simulation

洪水场次	计算洪峰 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	实测洪峰 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	洪峰相对 误差(%)	计算径流 深(mm)	实测径流 深(mm)	径流相对 误差(%)	确定性 系数
1964072300	1593.8	1450	-9.92	68.1	65.7	-3.65	0.91
1964092206	1086.0	956	-13.60	72.9	70.9	-2.82	0.93
1964100301	1460.2	1460	-0.01	47.9	57.9	17.30	0.93
1965071914	1223.0	1140	-7.28	38.7	39.4	1.78	0.93
1967071116	909.7	921	1.23	28.2	22.3	-26.50	0.70
1968091803	1525.5	1700	10.26	43.9	45.6	3.73	0.97
1973070108	1089.3	1040	-4.74	33.1	26.7	-24.00	0.88
1975080508	4799.4	4200	-14.27	226.6	171.1	-32.40	0.78
1975091907	458.7	470	2.40	36.0	37.2	3.23	0.72
1980063000	638.1	744	14.24	32.4	32.2	-0.62	0.91
1981071408	474.2	482	33.60	16.8	14.4	-16.70	0.85
1982073102	3178.7	3500	9.18	78.1	78.9	1.01	0.84
1983100308	1358.4	1290	-5.30	79.0	71.7	-10.18	0.88
1984090817	917.2	888	-3.28	46.6	45.0	-3.56	0.95
1985091412	929.3	749	-24.07	57.8	52.3	-10.52	0.90
1994070223	800.5	1210	33.84	16.3	13.7	-18.98	0.71
1995081114	743.4	836	11.08	30.8	27.1	-13.65	0.89
1996080208	1642.2	1730	5.08	88.4	87.4	-1.14	0.91
1998081312	1368.4	1320	-3.67	34.8	36.7	5.18	0.94
2000071220	1477.6	1770	16.52	38.9	37.7	-3.18	0.77

表 3 1960s 和 1990s 参数下的模拟值

Tab. 3 The parameter values simulated in 1960s and 1990s

年代	洪水场次	总雨量 (mm)	蒸发总量 (mm)	计算洪峰 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	实测洪峰 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	相对差值 (%)	计算径流 深(mm)	实测径流 深(mm)	相对差值 (%)
1960s	1994070223	70.8	8.5	1280.1	1210	-5.79	24.4	13.7	-78.10
	1995081114	96.8	10.0	985.2	836	-17.85	43.1	27.1	-59.04
	1996080208	130.3	11.5	1833.9	1730	-6.01	101.3	87.4	-15.90
	1998081312	73.2	9.0	1739.9	1320	-31.81	43.7	36.7	-19.07
	2000071220	51.4	5.8	1837.7	1770	-0.04	39.0	37.7	-3.45
	1964072300	125.7	26.8	1483.2	1450	-2.29	60.2	65.7	8.37
1990s	1964092206	93.6	12.1	668.5	956	30.08	46.8	70.9	33.99
	1964100301	57.8	15.2	798.3	1460	45.32	24.2	57.9	58.20
	1965071914	53.8	21.5	772.8	1140	32.21	23.7	39.4	39.85
	1967071116	53.0	14.4	580.8	921	36.93	16.9	22.3	24.22
	1968091803	83.3	8.8	1263.8	1700	25.66	33.7	45.6	26.10
	1973070108	101.0	19.2	1155.5	1040	-11.11	30.9	26.7	-15.73
	1975080508	295.1	21.9	4036.0	4200	3.90	189.3	171.1	-10.64
	1975091907	94.6	11.8	738.6	470	-57.15	39.6	37.2	-6.45
	1980063000	77.2	19.2	663.3	744	-10.85	32.1	32.2	0.31
	1981071408	48.4	10.9	516.0	482	33.60	15.6	14.4	-8.33
	1982073102	110.8	7.2	2078.7	3500	40.61	48.6	78.9	38.40
	1983100308	137.0	12.5	1278.9	1290	0.86	68.6	71.7	4.32
	1983101708	30.7	5.8	239.0	440	45.68	15.1	29.7	49.16
	1984090817	66.6	6.3	578.8	888	34.82	27.0	45.0	40.00
	1985091412	82.5	3.8	618.2	749	17.46	36.7	52.3	29.83

很好的流域管理和洪水预报工具,从东湾流域的模拟结果来看,HEC-HMS 模型在该流域适用性好,精度较高,但模型的参数,特别是敏感参数  $CN$ ,  $I_a$  和流域特有的水文特性和产流前的土壤含水量相关性高,而且对输出结果敏感. 本文根据这一特征将新安江日模型所计算的前期土壤含水量率定  $I_a$ ,  $CN$  则根据东湾流域土壤特征查  $CN$  表所得<sup>[3]</sup>,最后结果表明这种率定 HEC-HMS 参数的方法可行;进一步研究还发现汇流参数  $tp$  要根据各子流域距离出口的距离来调试,但模型在对复峰洪水的模拟还需要加强.

(2) HEC 模型中的 HEC-GeoHMS 模块结合了流域特定的地理信息把流域划分成具有相似水文特征的水文响应单元,为模型更真实地反映下垫面变化水文效应提供了物理基础.

(3) 本文运用 HEC 模型分析下垫面在 1990s 前后变化以及这种变化对次洪的影响,最后结果为伊河下游水库制定相应的洪水调度方案给出了重要依据,具有重要的实际意义和指导价值.

## 6 参考文献

- [1] 于伟忠,程渭钧. 人类活动对水文影响效应的研究. 华水科技情报, 1982, (2): 1-8.
- [2] Scharffenberg WA. Hydrologic Modelling System HEC-HMS: Users manual. California: Army Corps of Hydrologic Engineering Center, 2000.
- [3] HEC-HMS Users Manual, US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Version 2.1, 2001.
- [4] 董小涛,李致家. HEC 模型在水文预报中的运用. 东北水利水电, 2004, 22(11): 43-44.
- [5] 李 燕,陈孝田,朱朝霞. HEC-HMS 在洪水预报中的应用研究. 人民黄河, 2008, 309(4): 23-24.
- [6] Hydrologic Modelling System HEC-HMS Technical Report. Hydrologic Engineering Center, 2000.
- [7] 董小涛,李致家,李利琴. 不同水文模型在半干旱地区的应用比较研究, 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 132-135.
- [8] Scharffenberg WA, Fleming MJ, Feldman AD. The Hydrologic Modeling System(HEC-HMS) toward a complete framework for hydrologic engineering. World Water and Environmental Resources Congress, 2003:1197-1204.
- [9] 林三益. 水文预报. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [10] 李致家,姚 成,汪中华. 基于栅格的新安江模型的构建和应用. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 131-134.
- [11] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型和陕北模型. 北京: 水利电力出版社, 1984.