

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0003

徐杰,李致家,马亚楠,等.基于 TOPKAPI 模型的湿润流域洪水模拟[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):18-25. XU J, LI Z J, MA Y N, et al. Flood simulation based on TOPKAPI model in a humid basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 18-25. (in Chinese)

基于 TOPKAPI 模型的湿润流域洪水模拟

徐杰¹,李致家¹,马亚楠¹,胡友兵²

(1. 河海大学 水文水资源学院,南京 210098;2. 淮河水利委员会水文局(信息中心),安徽 蚌埠 233001)

摘要:为了研究分布式水文模型在湿润流域的应用效果,将基于物理的分布式 TOPKAPI 模型应用到淮河上游息县以上流域,模拟该区域 2007—2017 年的 11 场次洪水过程,分析模型的适用性。结果表明, TOPKAPI 模型在湿润流域场次洪水模拟中精度尚可,但随着流域面积的增大,大坡岭、长台关、息县的平均纳什效率系数依次为 0.54、0.5、0.29,模拟精度有所下降;在合理范围内调整滞时,平均纳什效率系数最多提高 0.2,在合理范围内调整河网蓄水消退系数,平均纳什效率系数最多提高 0.3,考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型的平均纳什效率系数能达到 0.7。分析结果表明,合理采用滞后演算法的 TOPKAPI 模型能有效用于湿润流域的洪水预报。

关键词:洪水模拟;TOPKAPI 模型;滞后演算法;模拟精度;淮河上游;嵌套流域

中图分类号:TV122 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Flood simulation based on TOPKAPI model in a humid basin

XU Jie¹, LI Zhijia¹, MA Yanan¹, HU Youbing²

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

2. Hydrologic Bureau (Information center) the Huai River Resources Commission, Bengbu 233001, China)

Abstract: In order to explore the application effect of the distributed hydrological model in a humid basin, the physical distributed TOPKAPI model was applied to simulate the flood events in the upstream of the Huaihe River. The model was validated above Xixian station with 11 flood events between 2007 and 2017. The results showed that the accuracy of the model in the flood simulation was acceptable. The mean Nash-Sutcliffe coefficient (NSC) of Dapoling, Changtaiguan and Xixian were 0.54, 0.5 and 0.29, respectively, which exhibited that the simulation accuracy of the model decreased with the increase of watershed area. The mean NSC can be increased by up to 0.2 by adjusting the lag time within a reasonable range, and up to 0.3 by adjusting the recession coefficients of water storage in the basin. The mean NSC of the TOPKAPI model can be reached 0.7 by considering lag-and-route method, indicating that lag-and-route method can be effectively used for the TOPKAPI model for flood simulations in a humid basin.

Key words: flood simulation; TOPKAPI model; lag-and-route method; simulation accuracy; the upstream of the Huaihe River; nested watershed

流域水文模型的研究始于 20 世纪 50 年代,早期主要依据传统产汇流理论和数理统计方法建立数

收稿日期:2019-05-06 修回日期:2019-06-18 网络出版时间:2019-06-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190620.1650.004.html>

作者简介:徐杰(1995—),男,江苏如东人,主要从事流域水文过程模拟研究。E-mail: xujie9506@163.com

通信作者:李致家(1962—),男,山西运城人,教授,博士生导师,主要从事水文模型与水文预报的教学和研究工作。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

学模型^[1]。随着时间的推移,SWM 模型^[2]、水箱模型^[3]、sacramento 模型^[4]、新安江模型^[1]等集总式模型大量涌现。而随着计算机技术的进步,GIS 与 RS 等技术的较快发展,相比于集总式模型而言,在描述降雨和下垫面条件空间变异性上有很大优势的基于物理机制的分布式水文模型^[5]如 SHE^[6]、VIC^[7]、SWAT^[8]、CASC2D^[9]、TOPKAPI^[10]等模型应运而生,且在很多流域得到成功应用^[11-15]。分布式水文模型结构复杂,但是模型参数具有较强的物理意义,能够基于网格^[16]或 DEM^[17-18]充分利用空间信息,考虑模型输入空间变异性 and 单元间的水力联系,更准确地描述水文过程的产汇流机理^[19-20],描述水文循环时空变化过程^[21],分布式水文模型是流域水文模型发展的必然趋势^[22]。

本文选取基于物理基础的分布式水文模型 TOPKAPI,对淮河上游息县水文站以上流域(下称息县流域)进行洪水模拟,分析流域面积对洪水预报的影响,并引入滞后演算法对 TOPKAPI 模型进行改进,提高模型在湿润流域的模拟精度。

1 研究方法

1.1 TOPKAPI 模型

TOPKAPI 模型^[23-24]是意大利 Ezio Todini 教授于 1995 年根据降雨径流模型提出的新的分布式模型,考虑了蒸散发、融雪、壤中流、地表径流、河道水流等水文过程模块^[25-27]。模型根据气象数据和植被参数计算净降雨量;根据降雨和气温数据采用 Thornthwaite 公式计算蒸散发;根据降水、气温和积雪资料模拟融积雪;以 DEM 网格为计算单元,根据流域地形地貌特征,应用三个串联的“结构上相似”的非线性水库分别描述土壤层、地表、排水网的水流运动规律。模型基于物理概念、结构相对简单、参数相对较少。

1.2 滞后演算法

单元流域面积较大或流域坡面汇流及其复杂的时候,需要考虑河道对水流运动的调蓄作用。滞后演算法^[28]计算公式为

$$Q_t = CR \times Q_{t-1} + (1 - CR) QT_{t-T} \quad (1)$$

式中: t 为计算时刻; Q 为单元面积河网出流(m^3/s); QT 为单元面积河网入流(m^3/s); T 为滞后时间(h); CR 为河网蓄水消退系数。

2 案例研究

2.1 研究区概况

息县流域^[29-30]位于河南省南部,居淮河上游,处

于北亚热带和暖温带,在气候上具有过渡特征,地形呈现西高东低趋势,干流河长 250 km。息县流域多年平均年降雨量 1 060 mm,降雨集中在汛期(6—9 月)。息县上游存在南湾和石山口两座大型水库,除这两个水库之外,息县以上的集水面积为 8 826 km^2 ,息县上游长台关水文站集水面积 3 027 km^2 ,长台关上游大坡岭水文站集水面积 1 640 km^2 。息县流域雨量站、气温站与水库等位置分布见图 1。

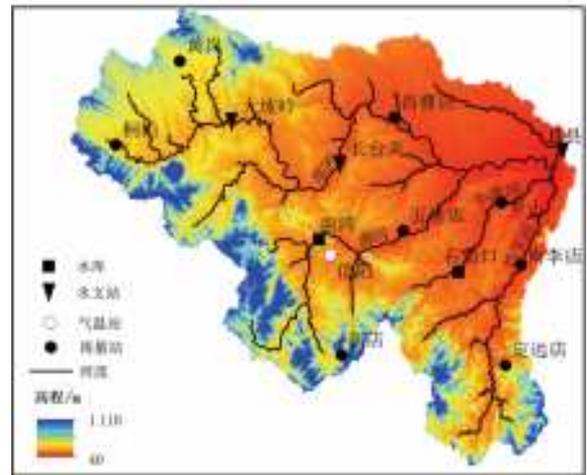


图 1 息县以上流域

Fig. 1 Upper reaches above Xixian station

2.2 基础数据

TOPKAPI 模型所需的输入资料包括原始数字高程资料、土壤类型、土地利用、水文气象资料等。其中原始数字高程资料(图 1)采用由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的 SRTM(shuttle radar topography mission),选用 90 m×90 m 精度 DEM,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>);土壤类型资料(图 2(a))采用联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)所构建的世界土壤数据库(harmonized world Soil database version 1.1)(HWSO),数据来源于“黑河计划数据管理中心”(<http://westdc.westgis.ac.cn>);土地利用资料(图 2(b))采用 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据库数据集,精度 1 km×1 km,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>);气温资料采用中国地面气候资料日值数据集(V3.0),数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);雨量流量水库出流量等数据来源于淮河水利委员会水文局,时间尺度包含 2007—2017 年的资料。

2.3 评价指标

本研究选取纳什效率系数(NSE)、洪峰相对误

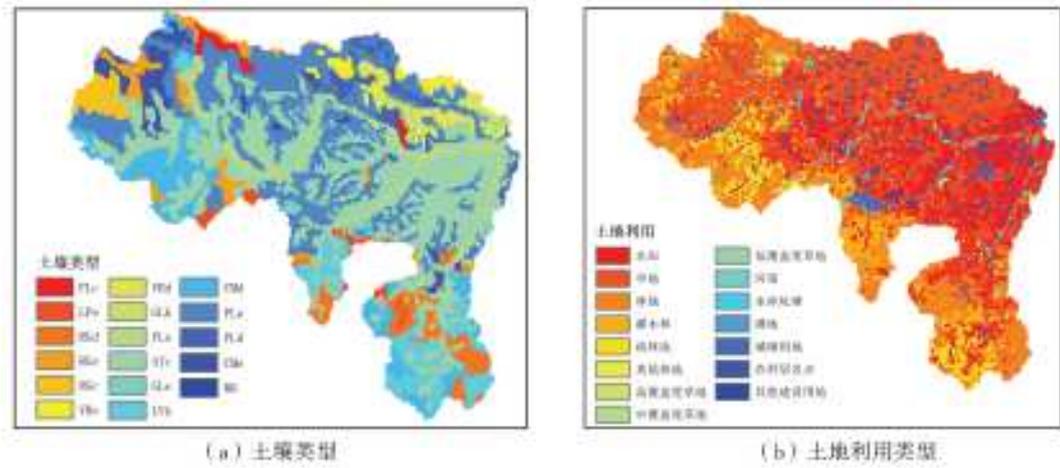


图 2 息县流域土壤类型和土地利用类型

Fig. 2 Soil texture and land use types in Xixian River basin

差(RPE)、洪峰过程均方根误差(RMSEP)作为评价指标,分析模拟精度,分别表示为

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^n(q_{m,i}-q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n(q_{s,i}-\bar{q}_s)^2} \quad (2)$$

$$RPE=(q_{mmax}-q_{smax})/q_{smax} \times 100\% \quad (3)$$

$$RMSEP=\left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k(q_{m,i}-q_{s,i})^2\right)^{1/2} \quad (4)$$

式中: n 为资料序列长度; $q_{m,i}$ 为序列 i 的模拟值(m^3/s); $q_{s,i}$ 为序列 i 的实测值(m^3/s); \bar{q}_s 为实测序列均值(m^3/s); q_{mmax} 为模拟洪峰值(m^3/s); q_{smax} 为模拟洪峰值(m^3/s); k 为洪峰流量过程序列长度。

NSE 用于描述单场洪水过程模拟序列与实测序列之间偏差的大小,NSE 值越接近 1,表明模拟序列偏离实测序列的程度越小,模拟精度越高,对多场洪水的 NSE 取平均,可得到平均纳什效率系数 MNS;RPE 显示峰现时刻预报误差的大小,绝对值越大,预报洪峰偏离实测洪峰的幅度越大,对多场洪水的预报精度结果取绝对值的均值,可得到平均洪峰相对误差绝对值 MRP;RMSEP 用于描述单场洪水洪峰流量过程模拟序列与实测序列之间吻合程度, RMSEP 值越接近 0,模拟精度越高,对多场洪水的 RMSEP 取平均,可得到平均洪峰均方根误差 MRM。

3 结果与分析

本文从 2007—2017 年资料中挑选了大坡岭、长台关和息县洪峰流量均较大的 11 场次洪水(表 1)进行模拟分析,包括现有 TOPKAPI 模型模拟效果和考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型模拟效果。

3.1 TOPKAPI 模型模拟结果

TOPKAPI 模型所需的饱水率 θ_s 、残水率 θ_r 、土壤厚度 D 、饱和水平渗透率 k_h 、饱和垂直渗透率 k_v 、

表 1 嵌套流域场次洪水信息

Tab. 1 Flood information in the nested watersheds

场次	洪号	实测洪峰流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)		
		大坡岭	长台关	息县
1	2007062508	1 400	1 500	3 970
2	2007071308	1 030	1 630	4 350
3	2007071908	773	805	1 310
4	2008071908	1 650	2 500	3 716
5	2008081008	641	730	3 260
6	2009082308	1 132	1 469	2 077
7	2010071308	2 280	2 480	3 510
8	2012090408	958	1 411	2 010
9	2014092408	2 100	2 070	1 980
10	2015062308	817	938	1 810
11	2017091808	717	1 110	2 259

坡面曼宁系数 n_o 、河道曼宁系数 n_c 等参数,均可由土壤类型和土地利用性质来确定,理论上为确定值,但是由于参数时空变化幅度大,需要在物理意义范围内,进行参数率定。以 RPE 较优为目标函数,采用试错法进行参数微调得到了相对优的参数,流域中主要土壤类型及土地利用对应的参数见表 2。

图 3 为根据表 2 所示参数计算得的三个流域 NSE 和 RPE 箱型图。从图上可知,三个流域 RPE 大多集中在 $\pm 20\%$ 之内,且 RPE 均值接近 0,因为 TOPKAPI 为蓄满产流机制,在息县嵌套流域模型应用效果尚可,但存在一定程度的系统偏差;随着流域面积的增加,RPE 分布没有明显的变化趋势;其中大坡岭流域存在较为明显的异常点的原因是大坡岭流域面积相对较小,实测洪峰流量值较小,容易导致 RPE 计算结果偏大;息县流域计算结果易偏大,考虑是水库放水资料较少,采用的插值规则是按照最近流量资料赋值直到下一个流量资料出现,入流资料存在偏大的可能。但是从确定性系数角度来说,随着流域面积的增加,NSE 有逐渐减小的趋势,大

坡岭 NSE 多集中在 0.5~0.9, MNS 为 0.54, 长台关 NSE 多集中在 0.4~0.8, MNS 为 0.5, 息县仅有 4 场 NSE 达到 0.5 以上, MNS 为 0.29。究其原因, 是随着流域面积的增加, 河道调蓄作用愈加明显, 实测流量过程发生推移与坦化, TOPKAPI 模型响应提前,

导致洪水过程拟合效果较差, 系统误差加大。参数率定时, 在产流结果相对准确的情况下, 在合理范围内调整坡面及河道糙率, 虽然能够控制 RPE 在一定范围内, 但是 NSE 较低, 所以需要考虑加入滞后演算法以反映流域的调蓄作用。

表 2 TOPKAPI 模型主要参数值

Tab. 2 Main parameters values of TOPKAPI model

土壤类型	产流参数					坡面汇流参数		河道汇流参数	
	$k_{st}/(10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_{sp}/(10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	θ_s	θ_r	D/m	土地利用性质	n_o	河道分级	n_c
ATc	1.12	2.12	0.438	0.076	1.4	旱地	0.10	1	0.075
PLe	1.82	2.82	0.463	0.097	1.5	水田	0.10	2	0.065
CMd	1.39	3.39	0.442	0.074	1.5	林地	0.15	3	0.055
LVh	2.82	2.82	0.443	0.145	1.2	农村居民点	0.08	4	0.05
FLe	3.88	3.88	0.426	0.065	1.1	灌木林	0.15	5	0.045
VRd	1.20	1.20	0.434	0.187	1.0	疏林地	0.15	6	0.040

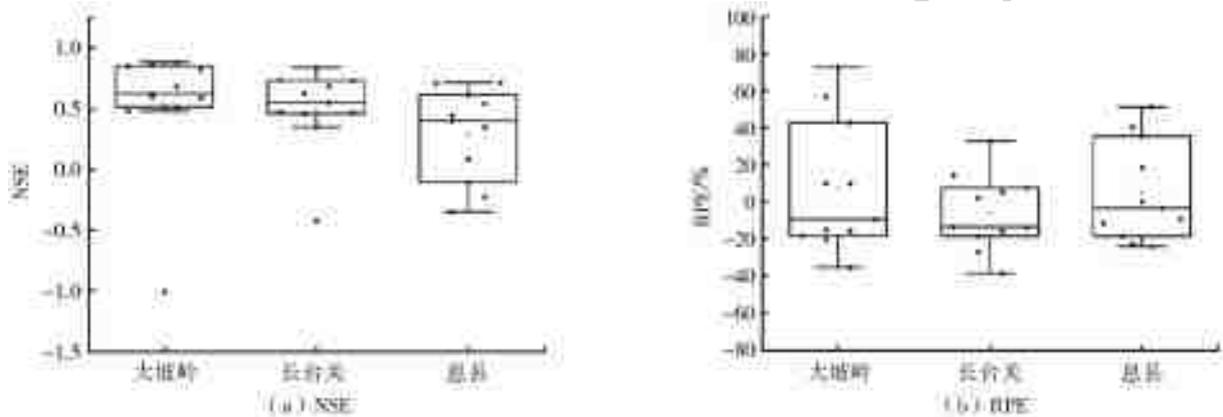


图 3 嵌套流域 NSE 和 RPE 分布

Fig. 3 Distribution of NSE and RPE in the nested watersheds

3.2 考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型

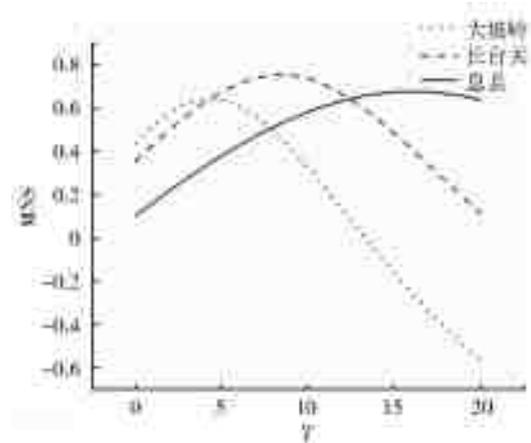
滞后演算法包括两个参数, 主要反映平移作用的滞时 T 和主要反映坦化作用的河网蓄水消退系数 CR 。

3.2.1 滞时 T 对模拟结果的影响

图 4 为嵌套流域随着滞时的增加, MNS 的变化趋势。由图可知, 三个流域的 MNS 均为先增大后减小, 其中大坡岭在 $T=0$ 时 MNS 为 0.44, 在 $T=4$ h 时 MNS 达到最大值 0.64, 继续增大 T , MNS 下降; 长台关在 $T=0$ 时 MNS 为 0.35, 在 $T=8$ h 时, MNS 达到最大值 0.76, 息县在 $T=0$ 时 MNS 为 0.1, 在 $T=16$ h 时, MNS 达到最大值 0.68。相比于不考虑滞时, 大坡岭、长台关、息县在合适 T 时, MNS 分别最高提高了 0.2、0.41、0.58, 说明在合理范围内增加 T 能够有效提高模拟结果精度; 流域面积越大, 最优的 T 值也越大。

3.2.2 河网蓄水消退系数 CR 对模拟结果的影响

在不考虑滞后演算法时, 嵌套流域 RPE 结果均

图 4 嵌套流域 MNS 随 T 的变化Fig. 4 Change of MNS with T in the nested watersheds

易偏高, 所以为了使 RPE 达到较优值, 进行参数率定时, 选取的曼宁系数值偏高(表 2)。此处由于开始考虑滞后演算法的影响, 需要对表 2 的曼宁系数值进行修正。经过调试, 在表 2 的基础上, 将坡面曼宁系数下调 0.01, 河道曼宁系数下调 0.005。

图 5 为嵌套流域在新汇流参数下 MNS 和 MRP

随着 CR 变化的变化。从图上可知,随着 CR 的增大,三个流域的 MNS 均为先增加后减小,MRP 均为先减小后增大,即模拟效果随着 CR 的增大先提高,达到一定值时效果下降,即在合理范围内增大 CR 能够有效提高预报结果精度;流域面积越大,最优的 CR 值也越大。从 MNS 角度看,其中大坡岭在 CR=0 时 MNS 为 0.44,在 CR=0.882 时 MNS 达到极大值 0.74;长台关在 CR=0 时 MNS 为 0.35,在 CR=

0.918 时, MNS 达到极大值 0.77;息县在 CR=0 时 MNS 为 0.1,在 CR=0.959 时, MNS 达到 0.76。若以 MNS 为目标函数,在 CR 最优时,大坡岭、长台关、息县 MNS 最高分别提高了 0.3、0.42、0.66,但是大坡岭对应的 MRP 减小 3.4%、长台关、息县分别增加 11.7%、6.7%,说明以 MNS 为目标函数所得的最优解不一定是以 MRP 为目标函数的最优解,参数率定时建议采用多目标函数考虑模型适用性。

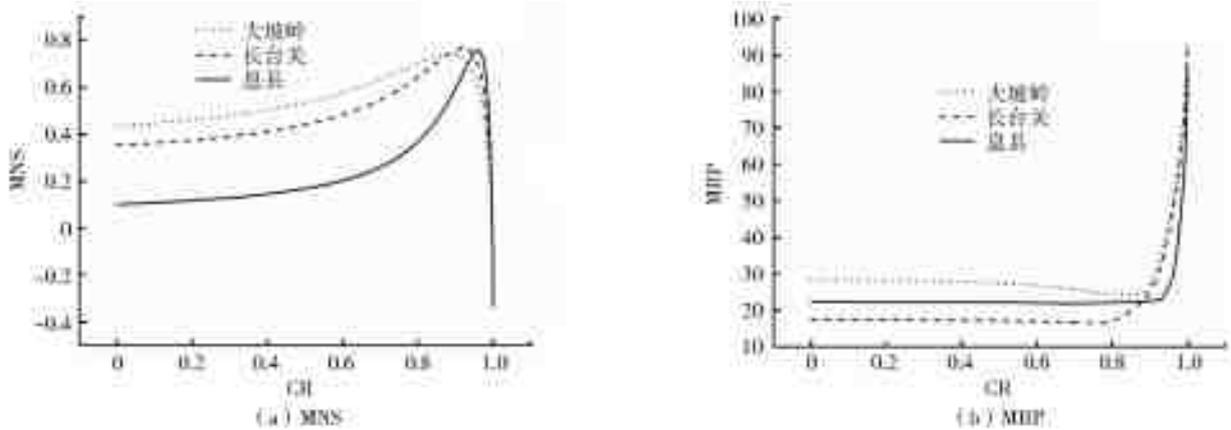


图 5 嵌套流域 MNS 和 MRP 随 CR 的变化

Fig. 5 Change of MNS and MRP with CR in the nested watersheds

3.2.3 滞后演算法参数不确定性分析

图 6 为嵌套流域在不同 T 、CR 条件下,MRM、MNS、MRP 的结果等值线,图 6(a)为 MRM;图 6(b)为 MNS;图 6(c)为 MRP;Ⅰ代表大坡岭,Ⅱ代表长台关,Ⅲ代表息县。

从 MRM 角度看,大坡岭较优参数中 T 介于 $[0,1]$,CR 介于 $[0.73,0.83]$,长台关 T 介于 $[0,3]$,CR 介于 $[0.81,0.87]$,息县 T 介于 $[4,7]$,CR 介于 $[0.88,0.92]$;从 MNS 角度看,大坡岭较优参数中 T 介于 $[0,1]$,CR 介于 $[0.8,0.85]$,长台关 T 介于 $[2,5]$,CR 介于 $[0.8,0.89]$,息县 T 介于 $[2,7]$,CR 介于 $[0.9,0.96]$;从 MRP 角度看,较优参数中大坡岭 CR 应小于 0.87,长台关 CR 应小于 0.9,息县 CR 应小于 0.95;总体上,随着流域面积的增大,参数 T 与 CR 有增大的趋势;两者均为敏感参数;三个流域 CR 较优参数范围不超过 0.1,CR 相比于 T 更加敏感。

考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型中,大坡岭 T 取值 0,CR 取值 0.81,长台关 T 取值 3,CR 取值 0.83,息县 T 取值 5,CR 取值 0.92,计算结果见图 7。其中图 7 的图例 A 为 TOPKAPI 模型计算结果,B 为考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型计算结果。从 NSE 角度看,考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型在嵌套流域的应用效果均优于未考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型,大坡岭、长台关、息县 MNS

依次为 0.71、0.76、0.74,考虑滞后演算法可以有效减少异常点或者减小异常点数值,NSE 计算结果分布更接近 1;从 RPE 角度看,考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型计算结果离散程度更低,一定程度上减小了极大值出现的可能。总体来说,考虑滞后演算法的 TOPKAPI 模型具有更高的模拟精度。

4 结论

本文以淮河上游的息县流域为例,探讨了 TOPKAPI 模型在湿润地区的应用效果,结果如下。

(1)TOPKAPI 为蓄满产流机制,在息县流域模型应用效果尚可,但容易存在一定程度的系统偏差。对息县上游嵌套流域进行模型计算表明,随着流域尺寸的增加,大坡岭、长台关、息县的 MNS 依次为 0.54、0.5、0.29,模型计算结果变差,是因为模型中缺少反映河网汇流的参数,导致随着流域尺寸的增加,系统误差加大。

(2)仅加入滞时变量,模型结果精度提高,证明原有计算结果确实存在一定系统误差,MNS 最多提高 0.2。加入河网蓄水消退系数进行考虑,随着河网蓄水消退系数的增加,模型结果精度提高,MNS 最多提高 0.3,但超过某一阈值时,精度急剧下降。采用不同目标函数求得的最优河网蓄水消退系数不同,所以建议考虑参数率定时需要采用多目标函数。

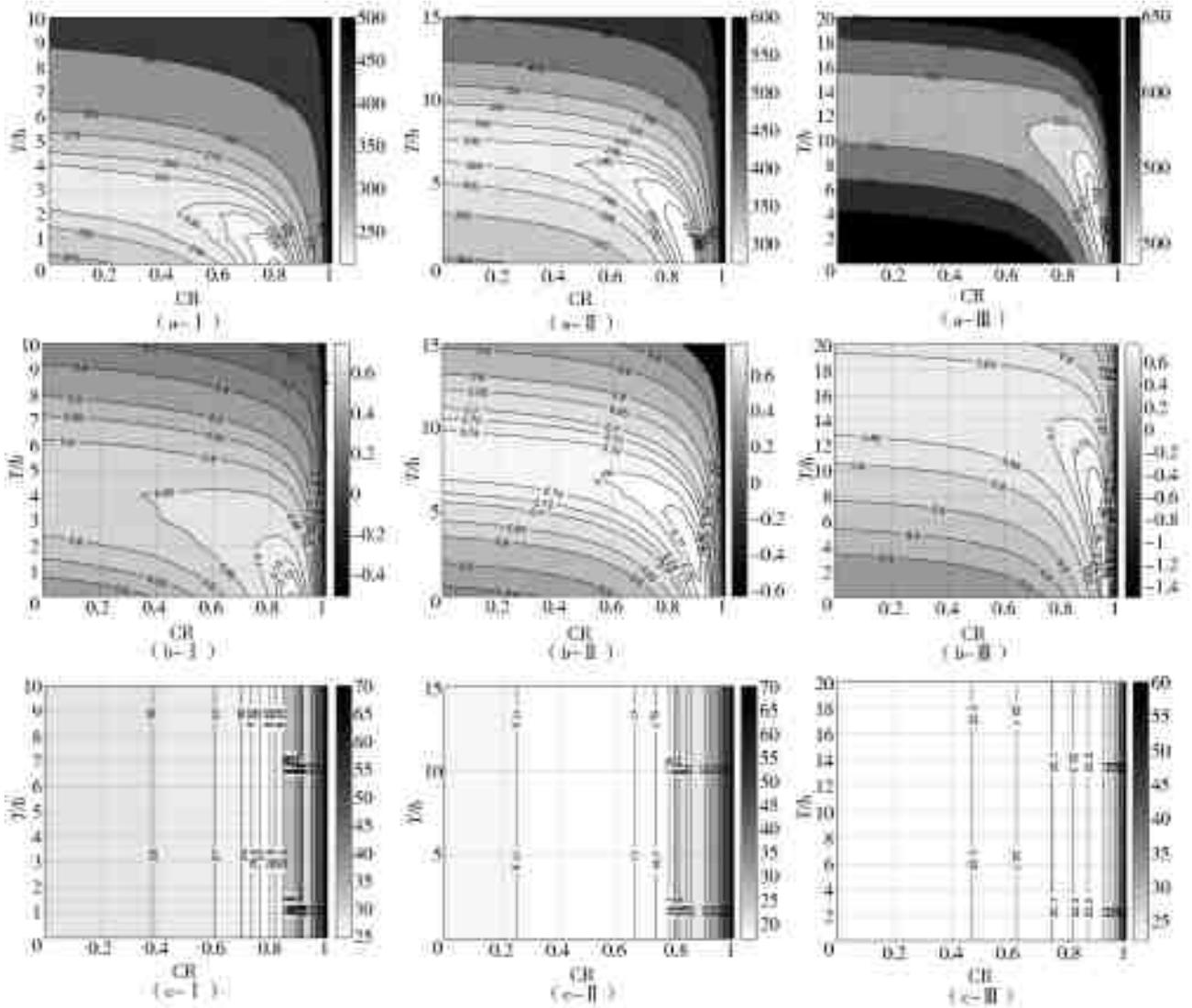


图 6 嵌套流域 MRM、MNS、MRP 计算结果

Fig. 6. Nested watershed MRM, MNS, MRP calculation results

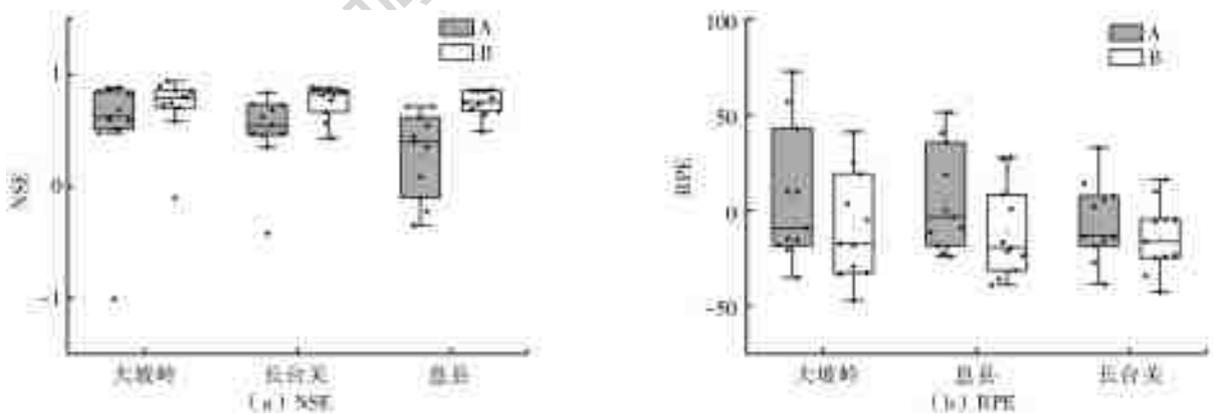


图 7 嵌套流域模型改进前后结果对比

Fig. 7. Comparisons of model results for nested watersheds

(3)随着流域尺寸的增加,流域的滞时与河网蓄水消退系数有增大的趋势,两者均为敏感参数,河网蓄水消退系数更加敏感。合理采用滞后演算法的 TOPKAPI 模型 MNS 能达到 0.7,能有效用于湿润流域的洪水预报。

参考文献(References):

[1] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型 [M]. 北京:水利电力出版社,1984;1-10. (ZHAO R J. Watershed hydrological simulation; Xin'anjiang model and Shanbei model[M]. Beijing: Water Resources and

- Electric Power Press, 1984: 1-10. (in Chinese))
- [2] CRAWFORD N H, LINSLEY R K. Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV[M]. Palo Alto, CA: Stanford University, 1966.
- [3] SUGAWARA M. Automatic calibration of the tank model [J]. Hydrological Sciences Bulletin des Sciences Hydrologiques, 1979, 24(3): 375-388.
- [4] FRANCHINI M, PACCIANI M. Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models[J]. Journal of Hydrology, 1991, 122(1-4): 161-219.
- [5] FREEZE R A, HARLAN R L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response NSE model [J]. Journal of Hydrology, 1969, 9(3): 237-258.
- [6] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European hydrological system-systeme hydrologique Europeen, SHE. 1. history and philosophy of a physically-based, distributed modeling system [J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1-2): 45-59.
- [7] CHERKAUER K A, BOWLING L C, LETTENMAIER D P. Variable infiltration capacity cold land process model updates[J]. Global & Planetary Change, 2003, 38(1): 151-159.
- [8] 李致家. 现代水文模拟与预报技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2010: 190-225. (LI Z J. Modern hydrological modelling and forecasting techniques [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2010: 190-225. (in Chinese))
- [9] DOWNER C W, OGDEN F L, MARTIN W D, et al. Theory, development, and applicability of the surface water hydrologic model CASC2D [J]. Hydrological Processes, 2010, 16(2): 255-275.
- [10] CIARAPICA L, TODINI E. TOPKAPI: a model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(2): 207-229.
- [11] 廖如婷, 胡珊珊, 杜龙刚, 等. 基于 HEC-HMS 模型的温榆河流域水文模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 15-20. (LIAO R T, HU S S, DU L G, et al. Hydrological simulation of Wenyu River basin based on HEC-HMS model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 15-20. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. NSEbdqk. 2018. 0147.
- [12] 董晓华, 方燕琴, 李英海, 等. 基于 SWAT 模型的淮河流域上游土地利用变化情景的水文响应[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 32-40. (DONG X H, FANG Y Q, LI Y H, et al. Hydrological response under land use change scenarios for the upper Huaihe watershed based on SWAT model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 32-40. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 05. 006.
- [13] 刘玉环, 刘志雨, 李致家, 等. 基于 TOPKAPI 模型的黑河上游径流模拟研究[J]. 水力发电, 2016, 42(12): 20-23, 118. (LIU Y H, LIU Z Y, LI Z J, et al. Runoff simulation for the upper reaches of Heihe River basin based on TOPKAPI model [J]. Water Power, 2016, 42(12): 20-23, 118. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2016. 12. 006.
- [14] 刘玉环, 李致家, 刘志雨, 等. 半湿润半干旱地区 TOPKAPI 模型的洪水模拟[J]. 水力发电, 2016, 42(1): 18-22. (LIU Y H, LI Z J, LIU Z Y, et al. TOPKAPI-based flood simulation in semi-humid and semi-arid regions [J]. Water Power, 2016, 42(1): 18-22. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 0559-9342. 2016. 01. 005.
- [15] 陶新, 刘志雨, 颜亦琪, 等. TOPKAPI 模型在伊河流域的应用研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(3): 105-106, 108. (TAO X, LIU Z Y, YAN Y Q, et al. Application of TOPKAPI model in Yihe River basin [J]. Yellow River, 2009, 31(3): 105-106, 108. (in Chinese))
- [16] 杨大文, 李翀, 倪广恒, 等. 分布式水文模型在黄河流域的应用[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 143-154. (YANG D W, LI C, NI G H, et al. Application of a distributed hydrological model to the Yellow River basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(1): 143-154. (in Chinese))
- [17] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 1-5. (GUO S L, XIONG L H, YANG J, et al. A DEM and physically based distributed hydrological model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2000, 33(6): 1-5. (in Chinese))
- [18] 熊立华, 郭生练, 田向荣. 基于 DEM 的分布式流域水文模型及应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 517-520. (XIONG L H, GUO S L, TIAN X R. DEM-based distributed hydrological model and its application [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 517-520. (in Chinese))
- [19] 黄平, 赵吉国. 森林坡地二维分布型水文数学模型的研究[J]. 水文, 2000, 20(4): 1-4. (HUANG P, ZHAO J G. A Study on 2-D Distributed hydrological numerical model in the woody sloping field [J]. Journal of China Hydrology, 2000, 20(4): 1-4. (in Chinese))
- [20] 夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 789-796. (XIA J, WANG G S, LYU A F, et al. A research on distributed time variant gain modeling [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 789-796. (in Chinese))
- [21] 石朋, 芮孝芳, 瞿思敏, 等. 一个网格型松散结构分布式水文模型的构建[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 662-670. (SHI P, RUI X F, QU S M, et al. Development and application of a grid-based distributed hydrological model [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 662-670. (in Chinese))
- [22] 徐帅帅, 王雅莉, 陈淑芬, 等. 基于分布式水文模型的

- “尼伯特”台风暴雨洪水反演[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 132-139. (XU S S, WANG Y L, CHEN S F, et al. Characterization and simulation of 'Niebert' typhoon rain and flood in Meixi River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 132-139. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0043.
- [23] CIARAPICA L, TODINI E. TOPKAPI. A model for the representation of the rainfall-runoff process at different scales [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(2): 207-229.
- [24] 马泽蒂, 刘志雨, 翁明华, 等. 译, TOPKAPI 模型与应用指南[M]. 南京: 河海大学出版社, 2014: 14-54. (MAZZETTI C, LIU Z Y, WENG M H, et al. TOPKAPI model and user reference[M]. Nanjing: HOHAI University Press, 2014: 14-54. (in Chinese))
- [25] LIU Z, MARTINA M L V, TODINI E. Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian Catchment [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 9(4): 347-364.
- [26] 赵君, 张晓民. 改进的 TOPKAPI 模型及其在洪水预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 131-136. (ZHAO J, ZHANG X M. Application of improved TOKAPI model to flood forecast [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(2): 131-136. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2011.03.013.
- [27] DENG P, LI Z J, LU Z Y. Numerical algorithm of distributed TOPKAPI model and its application [J]. Water Science and Engineering, 2008, 1(4): 14-21
- [28] 李致家, 胡伟升, 丁杰, 等. 基于物理基础与基于栅格的分布式水文模型研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 5-13, 32. (LI Z J, HU W S, DING J, et al. Study on distributed hydrological model of solving physical equation on grids [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 5-13, 32. (in Chinese))
- [29] 苏欢, 董晓华, 方燕琴, 等. SWAT 在淮河流域径流模拟中的应用研究[J]. 人民长江, 2016, 47(8): 18-22, 38. (SU H, DONG X H, FANG Y Q, et al. Study on application of runoff simulation of upper Huaihe River basin based on SWAT model [J]. Yangtze River, 2016, 47(8): 18-22, 38. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.08.004.
- [30] 高红艳, 唐英敏. 基于栅格新安江模型的淮河上游土壤侵蚀预测[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 73-77. (GAO H Y, TANG Y M. Prediction of the soil-erosion in the upper stream of the Huaihe River based on the grid Xinanjiang model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 73-77. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.03.013.

• 科普知识 •

蓝水与绿水的确切定义及其转化机制问题

Falkenmark 最早提出“绿水”和“蓝水”的概念(Falkenmark, 1995), 但目前尚无统一的定义。刘昌明院士认为:“绿水”是分子状态的水和受分子力约束的水分, 包括气态水、土壤颗粒表面分子吸附及其空隙束缚的水, 在流域水循环中是由降水转化而来, 转化的动力主要是热力作用和植物根系吸水作用;“蓝水”是重力赋存和受重力作用而流动的液态水, 主要是指由降水派生和补给的地表水和地下水, 是水利工程开发的主要水源, 因此, 人们也称其为“工程水资源”。由于“绿水”和“蓝水”之和源于降水量, 因此笔者认为流域降水量就是广义的淡水资源总量, 而地表水加地下水减去重复量则应是“蓝水”资源的总量, 是水利工程的常规开发利用的对象。

——摘自刘昌明院士在第十七届中国水论坛的报告《中国生态文明建设与生态水关系认知的商榷》, 2019年11月。