

文章编号:0559-9350(2017)03-0308-09

基于聚合水库蓄放水模拟的洪水预报研究

孙新国^{1,2}, 彭 勇¹, 张小丽^{1,3}, 周惠成¹

(1. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 淮阴工学院 管理工程学院, 江苏 淮安 223030;

3. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450045)

摘要:大量水利工程建设很大程度上改变了流域的天然水文特性,特别是对洪水产生了更显著的影响,给流域水文预报工作带来很大的难度。本文首先基于聚合水库的思想,将众多水利工程聚合成一个水库,并根据各水利工程的基本调蓄规律制定聚合水库的蓄放水模拟图;然后将聚合水库的蓄放水模拟图与天然期洪水率定得到的TOPMODEL模型相结合,构建考虑水利工程影响的洪水预报模型;最后在丰满水库五道沟以上流域进行实例验证。结果表明,考虑水利工程影响的洪水预报方案优于原预报方案,显著提高了洪水预报合格率,并能有效克服原方案在初汛和久旱后预报产流偏大及主汛大洪水期间预报产流偏小的问题;预报洪水过程与实测洪水过程也更加吻合。对3种类型洪水过程的分析表明,聚合水库蓄放水模拟图能较好地反映水利工程在洪水过程中的蓄放规律和对洪水的综合作用。

关键词:洪水预报;水利工程影响;聚合水库;蓄放水模拟图;TOPMODEL模型

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20160329

1 研究背景

由于人口和社会生产力的急剧增长,水的问题已成为世界上日益严重的问题之一^[1-2]。为了缓解防洪和兴利的矛盾,流域内修建了许多各种类型的水利水电工程。这些工程使流域的产汇流形成条件发生了变化^[3-5],以至于无论水文预报还是水文计算都不得不考虑它们的影响^[6-8]。然而,受水利工程的位置、库容大小以及运行方式的影响,量化这些水利工程的水文影响是一项困难的工作^[9]。

目前考虑水利工程影响的洪水预报主要有两种:第一类方法是分析洪水趋势性变化,主要是对受水利工程影响前后的水文资料进行对比分析^[10-12],一般采用趋势法和相关分析法。但该方法仅适用于水利工程建设时间比较均匀的流域,且缺乏机理机制基础,只能对水利工程的水文效应进行简单描述。第二类方法是在水文模型中增加考虑水利工程影响的模块,很多分布式水文模型如CEQUEAU模型^[13]带有此类模块,可通过设置特定的参数来考虑水利工程的影响。这种方法所需的水利工程运行数据较多,因此很难应用于水利工程众多且无相应运行数据的流域。通常大型水利工程的资料较为齐全,而中小水利工程往往资料不足或无资料,为解决这种问题,Guntner等^[14]提出了一种水库群的聚合方法。该方法首先依据库容大小将水库分成不同的类型,然后将相同类型的水库聚合成一个虚拟水库,最终在流域的水量平衡模型中考虑虚拟水库的运行特征,从而简化了水量平衡模型对水库的考虑方式。Payan等^[9]同样采用了这种聚合方式,但并未对水库进行分类,并基于此提出了一种

收稿日期:2016-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51379027, 91547111);辽宁省自然科学基金项目(2015020608);国家十二五科技支撑计划子课题(2015BAB07B03)

作者简介:孙新国(1987-),男,河南信阳人,博士生,主要从事人类活动影响下的洪水预报研究。E-mail: sunxinguo48144562@163.com

通讯作者:彭勇(1979-),男,湖北公安人,副教授,博士生,主要从事水文气象耦合不确定环境下的水库群优化调度研究。

E-mail: pengyong@dlut.edu.cn

使用集总式水文模型考虑水库影响的方法，结果表明该方法能有效提高低流量的模拟效果。然而，这种方法仍需要获得水库的日库容变化数据，难以应用于不能获得此类数据的流域。

基于上述分析，本文提出一种新的考虑水利工程影响的洪水预报方法。首先基于聚合水库的思想，将众多水利工程聚合成一个水库，并根据各水利工程的基本调蓄规律制定聚合水库的蓄放水模拟图；然后建立 TOPMODEL 预报模型^[15]，并利用流域天然期水文资料率定模型参数；再将聚合水库的蓄放水模拟图与该 TOPMODEL 模型相结合，构建考虑水利工程影响的洪水预报模型；最后在丰满水库五道沟以上流域进行实例验证。

2 研究区概况

丰满水库位于吉林省东南部的第二松花江上，控制流域面积为 42 500 km²。近年来，随着农田的开垦，流域内大量湿地出现退化^[16-18]。为了缓解该地区水资源紧张问题，流域内修建了大量的中小水库塘坝。2002 年丰满发电厂利用卫星遥感资料进行水体识别，发现整个流域内水面面积大于 4 000 m² 的明水水体个数竟达到了 9 335 个。洪水预报时整个丰满水库流域划分为 3 个区：丰满水库蓄水区(Ⅰ区)、五道沟以上(Ⅱ区)和白山水库以上(Ⅲ区)。总体上，Ⅰ、Ⅱ两区的小型水库和塘坝等水利工程建设比Ⅲ区更为突出，两区水库与塘坝的控制面积达到 8 445 km²，占相应流域面积的 35.94%，可蓄水量达 10.21 亿 m³，是丰满水库总库容 110 亿 m³ 的 9.28%，防洪库容 27 亿 m³ 的 37.81%。其中，Ⅱ区水库与塘坝的控制面积达到 7 421 km²，占相应流域面积的 63.98%，对产汇流的影响最大。近年的洪水预报实践也表明，Ⅱ区内小水库塘坝拦洪或泄洪作用明显^[19]。因此，本文以丰满Ⅱ区为典型开展研究，流域内水系、水库与站点情况见图 1，各类型水利工程库容和控制面积见表 1。

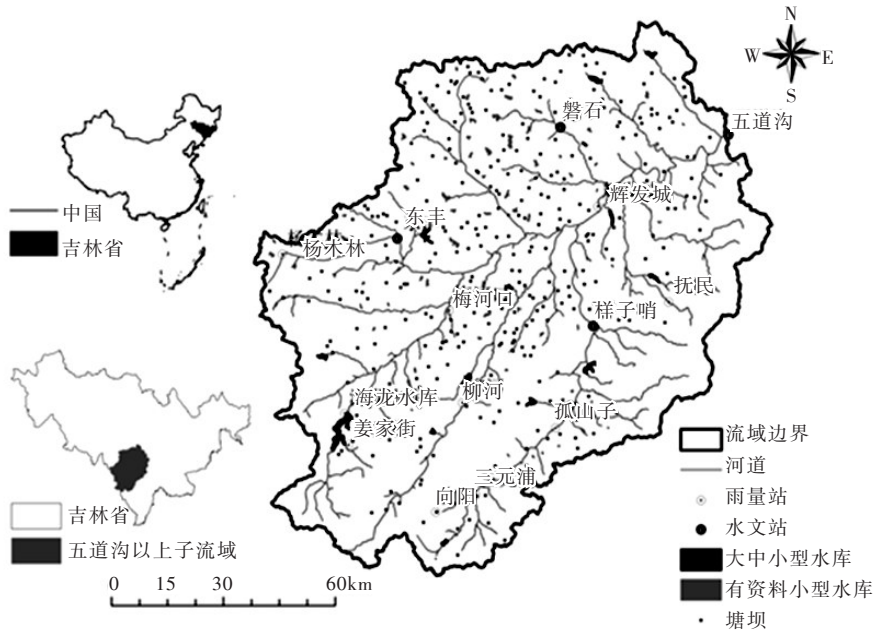


图 1 丰满Ⅱ区流域

表 1 丰满Ⅱ区各量级水库基本情况统计

项目	塘坝	小型水库	中型水库	大型水库	合计
分级库容×10 ⁶ /m ³	≤0.1	0.1~10	10~100	≥100	
个数(座)		476	12	1	
库容×10 ⁶ /m ³	54.62	407.70	179.82	316	958.14
占总库容比例/%	5.7	42.55	18.77	32.98	100
控制面积/km ²	2 252.06	3 891.56	729.65	548	7 421.27
占总控制面积比例/%	30.35	52.44	9.83	7.38	100

3 TOPMODEL模型

3.1 模型介绍 1979年Beven等^[20]提出了以变源产流为基础的TOPMODEL模型(TOPgraphy based hydrological MODEL)。该模型通过土壤含水量来确定产流面积的大小和位置,且定义缺水量 D 为饱和含水量与土壤含水量之差($D \leq 0$ 的面积为饱和和源面积),通常等于地下水表面距流域地表深度 z_i 。以地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 的空间分布来反映流域水分亏缺的空间分布,其中 α 为流经坡面任一点处单位等高线长度的汇流面积。 $\tan\beta$ 为该点处的坡度。模型结构如图2所示。

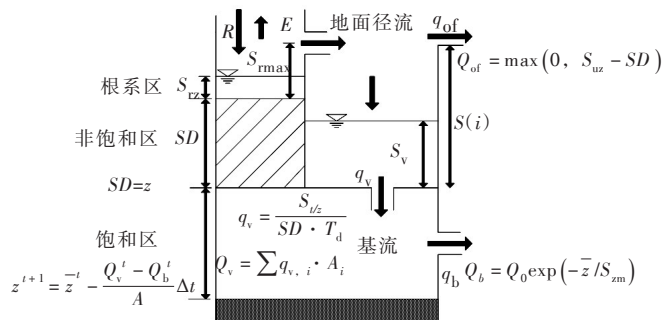


图2 TOPMODEL模型结构

图2中, R 为降雨量, E 为蒸发量, $S_{\max}$ 为根系区最大含水量, S_{rz} 为根系区含水量, q_{of} 为地面径流, q_v 为壤中流, Q_0 为初始壤中流, q_b 为地下径流。 SD 反映了地下水水位深度,也代表流域蓄水量, S_{uz} 代表土壤非饱和区含水量,当前土壤的饱和度 χ 可由下式进行计算:

$$\chi = \frac{S_{uz}}{SD} \quad (1)$$

根据不同地形指数下的土壤饱和度得到的综合土壤饱和度可以表征土壤前期降雨情况,能够实时反映土壤含水量的变化。由模型结构可以看出, χ 对壤中流有直接影响,可以模拟非饱和区土壤内水分的进出。

3.2 建模资料说明 本文所用数据包括:数字高程图(DEM)、场次洪水资料和水利工程信息。其中:(1)90 m×90 m数字高程图(DEM)从全球地理信息数据库中获得,具体网址为:(<http://telascience.sdsc.edu/teladata/SRTM/version2/SRTM3/>);(2)1953—2010年五道沟水文站的场次洪水的流量信息由松辽水利委员会(SLRCC)提供;(3)1953—2010年15个雨量站的日降雨信息由吉林省水文局提供;(4)1953—2010年流域日水面蒸发资料由中国气象科学数据共享服务网提供;(5)大中小水库的信息由松辽水利委员会(SLRCC)提供,主要包括1座大型水库、12座中型水库和23座有资料小型水库1993—2006年5—10月的逐日入库流量资料(部分小水库资料时段为6—8月)。各年代塘坝库容统计信息由吉林省水文局提供。

4 考虑水利工程影响的洪水预报模型

4.1 聚合水库库容计算 由于中小水库及塘坝在场次洪水中的实时运行资料很难快速准确获得,且本文主要研究这些水利工程的综合影响,因此,本文基于聚合水库思想将所有中小水库及塘坝聚合成一个水库,并进一步研究该聚合水库的蓄放水规律,从而体现中小水库和塘坝对洪水的综合影响。聚合水库的库容计算方法如下^[21]。

(1)大型水库。研究流域只有一座大型水库,根据历史实测运行资料、水库水文特征和水库设计参数分析可知,水库在低水位时会对洪水有明显拦蓄作用,在主汛期水位可能会高于汛限水位,但洪水结束时水位基本维持在汛限水位,则其聚合库容为兴利库容。

(2)中小型水库。中小型水库大都没有明确的调度规则,但根据水库现有运行资料分析可知,有

资料中型水库正常库容占总库容平均比例为 63 %，有资料小型水库正常库容占总库容平均比例为 72 %，因此以中小型水库总库容的 70 % 作为聚合库容。

(3) 塘坝。塘坝的人工控制能力较差，其库容大小即是其在洪水过程中的拦蓄量，因此将其总库容作为聚合库容。

4.2 聚合水库蓄放模拟图 水利工程对洪水产汇流的影响主要有以下三方面：(1) 在非汛期和汛前主要以供水为主，由于灌溉增加，流域前期土壤湿润，使产流增大；(2) 汛初发生降雨时会拦蓄部分洪水；(3) 遇到特大暴雨时，有的水利工程垮坝，可能会把水库存水也一起泄放出来，增大洪水洪量和峰值。即水利工程对洪水的影响主要表现为洪水规模较小时的拦蓄作用和洪水规模较大时的放流作用。汛初和久旱后，土壤干旱，水库塘堰处于空库状态，此时发生暴雨洪水，水利工程对洪水产流量的影响尤为突出，主要表现为拦蓄作用。随着降雨的继续，土壤趋于饱和，水库也逐渐蓄满，水利工程对洪水的影响较小。当大暴雨降临时，由于不能拦蓄洪水，在底水一起泄放时，不仅会增加泄水量，甚至还可能造成垮坝现象。到汛末，受蒸发和取用水的影响，以及为了满足非汛期的用水需要，水利工程又开始拦蓄洪水。根据以上规律建立聚合水库蓄放水模拟图，见图 3。

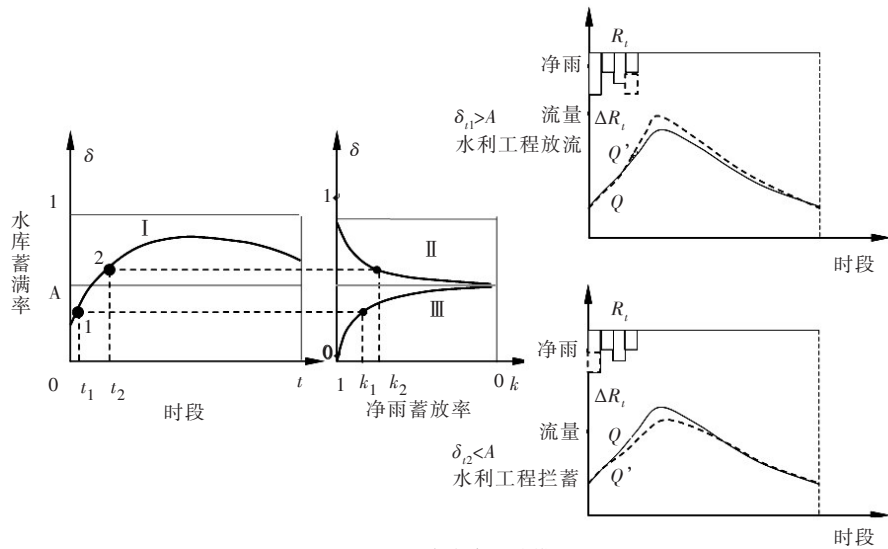


图 3 聚合水库蓄放模拟

图 3 中，左图横轴 t 为场次洪水过程的各个时刻，横轴 k 为时段净雨蓄放率，纵轴 δ 为水库蓄满率。考虑大部分中小水利工程都是无闸门的，因此假定当蓄满率小于 A 时聚合水库表现为拦蓄作用，当蓄满率大于 A 时聚合水库表现为放流作用。曲线 I 为一场洪水的水库蓄满率的变化过程；曲线 II 为时段净雨放流率随水库蓄满率的变化过程，假设曲线的形式为 $k_1 = [(A - \delta)/A]^m$ ；曲线 III 为时段净雨拦蓄率随水库蓄满率的变化过程，假设曲线的形式为 $k_2 = [(\delta - A)/(1 - A)]^n$ 。其中，参数 A 、 m 、 n 都通过优化得到。即随着水库蓄水量的增加，水库对洪水的作用由拦蓄逐渐变成放流，水库库容倾向于趋近中间区域，蓄放率也逐渐减小。考虑水利工程影响前后的洪水模拟过程如图 3 中右图所示，其中， R_t 为时段产流量； ΔR_t 为时段水利工程影响量，当 $\delta_{t1} < A$ 时，时段拦蓄量 $\Delta R_{1,t} = k_{1,t} R_t$ ，当 $\delta_{t2} > A$ 时，时段放流量 $\Delta R_{2,t} = k_{2,t} R_t$ ； Q 为原模型模拟的洪水过程； Q' 为考虑水利工程影响后模拟的洪水过程。

4.3 考虑水利工程影响的洪水预报模型计算流程 由于无法获得洪水发生时水库的蓄满率（蓄水情况），因此本文采用土壤饱和度 χ_0 和洪水发生时的前期降雨因子 ρ_0 来识别水库的初始蓄满率 δ_0 。土壤饱和度 χ_0 可以衡量近期土壤水分的出入状况，决定了聚合水库的上层库容变化，对聚合水库蓄满率有非线性影响；而前期降雨因子 ρ_0 决定了水利工程前期水量的积累，对聚合水库蓄满率有直接的线性影响，二者共同影响洪水发生时水利工程的蓄满状况。因此假定水库的初始蓄满率 δ_0 等于土壤饱和度 χ_0 的 τ 次函数与前期降雨因子 ρ_0 的线性叠加，具体公式如下：

$$\delta_0 = B\chi_0^\tau + (1 - B)\rho_0 \quad (2)$$

$$\rho_{\theta} = \begin{cases} 1, & P_n \geq P_{\max} \\ 0, & P_{\max} > P_n > P_{\min} \\ -1, & P_n \leq P_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

式中： P_n 为洪水发生前 n 天总降雨量； χ_0 为洪水过程中某一时刻土壤饱和程度； t 、 B 、 n 、 $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 为模型参数，利用水利工程影响期洪水优化得到， $0 < \delta_0 < 1$ 。

考虑水利工程影响的洪水计算流程如下：

(1)根据洪水发生前的降雨信息，计算出水库的初始蓄满率 δ_0 ；并根据洪水所处的年代计算出聚合水库库容 V 。则聚合水库的初始库容为 $v_0 = \delta_0 V$ 。

(2)当时段 $t=1$ ，根据 δ_0 和聚合水库蓄放模拟图得到放水率 $k_{1,1}$ 或拦蓄率 $k_{2,1}$ ，从而得到时段水利工程影响拦蓄量 $\Delta R_{1,1}$ 或放流量 $\Delta R_{2,1}$ ；聚合水库的时段末库容为 $v_1 = v_0 + \Delta R_{1,1}$ 或 $v_1 = v_0 - \Delta R_{2,1}$ ， $\delta_1 = v_1/V$ 。

(3)当时段 $t>1$ ，根据 δ_{t-1} 和聚合水库蓄放模拟图得到时段径流放水率 $k_{1,t}$ 或拦蓄率 $k_{2,t}$ ，从而得到时段水利工程影响拦蓄量 $\Delta R_{1,t}$ 或放流量 $\Delta R_{2,t}$ ；聚合水库的时段末库容为 $v_t = v_{t-1} + \Delta R_{1,t}$ 或 $v_t = v_{t-1} - \Delta R_{2,t}$ ， $\delta_t = v_t/V$ 。

(4)校正天然预报模型预报结果 R_t ，得到水利工程影响下的时段产流量 R'_t 。

(5) $t=t+1$ ，若 $t < T$ ，则转入(3)，否则转入(6)。

(6)根据水利工程影响下的时段产流量 R'_t ，得到水利工程影响下的场次洪水模拟结果 Q'_t 。

5 结果及分析

5.1 各年代聚合水库库容 同一年代的洪水采用相同聚合水库库容，根据水利工程聚合水库库容计算模型和各年代各类型水利工程库容统计结果得到各年代聚合水库库容，各年代聚合水库库容计算结果见表2。

表2 五道沟以上流域各年代水利工程聚合水库库容统计

年代	各年代总库容 $\times 10^6/\text{m}^3$			聚合库容 $\times 10^6/\text{m}^3$			聚合水库库容 $\times 10^6/\text{m}^3$	折算为径流深/mm
	大	中小	塘坝	大	中小	塘坝		
50s		61.0	54.6	0.0	42.7	54.6	97.3	7.9
60s		198.0	54.6	0.0	138.6	54.6	193.2	15.7
70s	316	405.1	54.6	124.0	283.6	54.6	462.2	37.6
80s	316	463.5	54.6	124.0	324.4	54.6	503.0	40.9
90s	316	525.7	54.6	124.0	368.0	54.6	546.6	44.4
00s	316	587.5	54.6	124.0	411.3	54.6	589.9	48.0

5.2 天然状态下模型参数率定及计算结果 通过统计流域水库年代分布可知流域1956年以前水利工程较少，因此，可以认为1956年前的洪水符合天然状态下的产汇流机制，将其用于率定天然状态下的模型参数。由于1956年以前有完整实测资料的场次洪水较少，所以仅选取1953—1955年间的4场洪水用于参数率定，2场洪水用于检验。用于参数率定的优化算法为PSO算法^[22]。参数率定期和验证期的净雨模拟结果如表3，洪水过程模拟结果如图4所示。

表3 天然状态下模型率定和验证结果

	洪号	降雨量/mm	实测净雨/mm	模拟净雨/mm	相对误差/%	是否合格	合格率
率定期	19540814	81.5	55.2	55.2	0.00	合格	100%
	19540622	96.0	40.3	41.1	1.96	合格	
	19530821	226.7	173.3	173.4	0.00	合格	
	19530801	112.7	80.6	72.2	-10.45	合格	
验证期	19550719	158.5	93.6	88.2	-5.77	合格	100%
	19540918	109.1	86.8	86.8	0.00	合格	

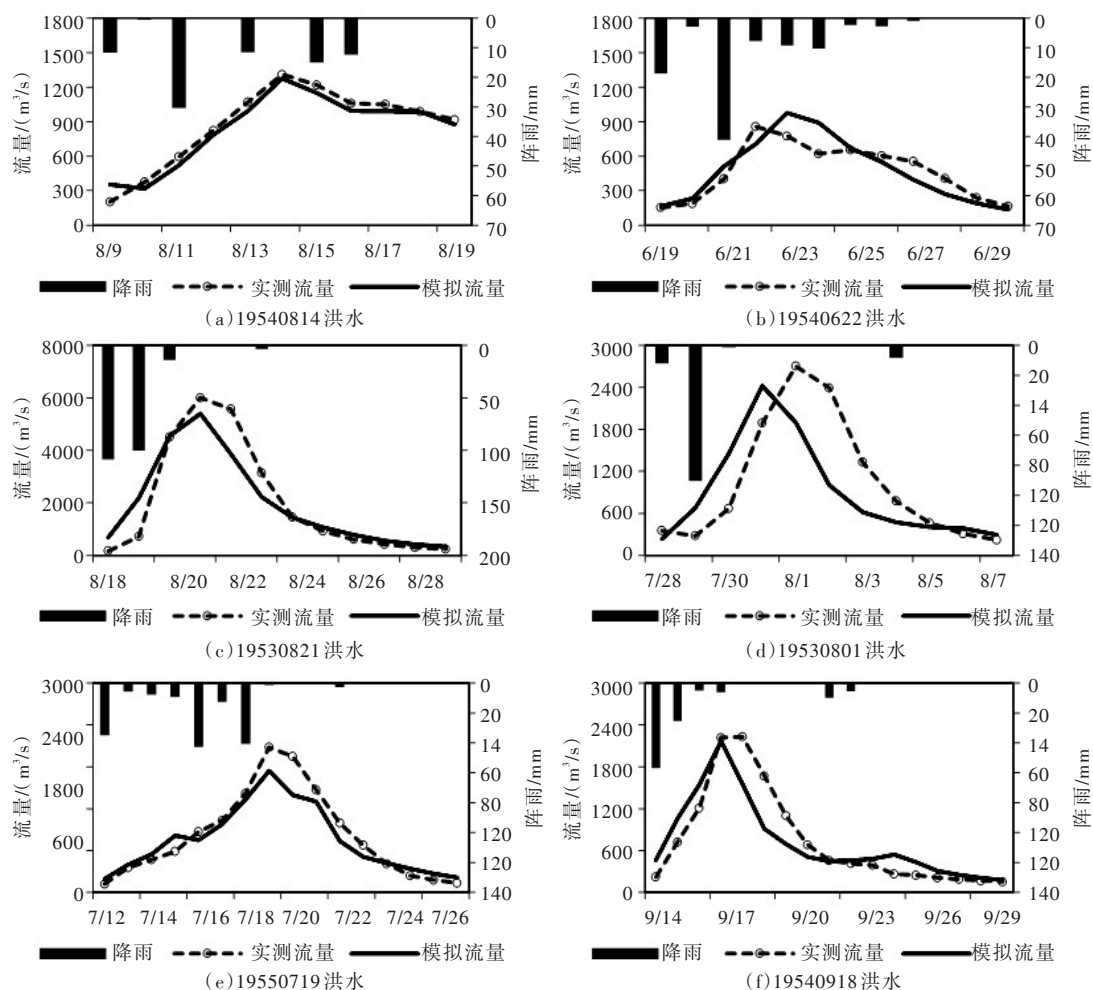


图4 参数率定期和验证期洪水过程模拟结果

依据《水文情报预报规范》SL250-2000中净雨预报相对误差小于20%为合格的标准，表3中的6场洪水全部合格，故将这套参数作为模拟无(少)水利工程影响下的流域产流情况的基础参数。使用该基础参数对研究流域1956—2010年受水利工程影响期的26场历史暴雨洪水进行模拟，结果如表5所示。同样使用上述标准对模拟结果精度进行评定，其26场洪水中净雨模拟不合格的有7场，合格率仅为73%。对不合格场次洪水进行分析发现，水利工程对洪水的影响表现为汛初、汛末拦蓄洪水，使净雨预报相对误差超过实测值的20%。如汛初洪水为20100704和19960720的洪水产流量模拟值分别为45.9和56.6 mm，实测仅为29.2和29.5 mm。汛末洪水19600824、19640811模拟值比实测值大了38.46%和29.24%。而对于主汛期洪水，当前期土壤饱和时，水利工程可能出现主动放流缓解防洪压力，特别是小水库塘坝甚至会出现非人为垮坝泄流情况，使模拟径流小于实测径流。如19640816号洪水前期有一场降雨洪水过程，此次洪水降雨137.5 mm使水利工程出现泄流情况；19910722和19910731号洪水在前期有降雨过程的基础上连续降雨，水利工程大都蓄满，出现放流作用，从而加大出口断面径流量。

5.3 考虑水利工程影响的模型计算结果 在天然状态下模型参数的基础上，根据实测洪水率定出洪水发生前聚合水库蓄水量参数 $B=0.7$ ， $P_{\max}=90$ ， $P_{\min}=20$ ， $t=0.5$ ；聚合水库蓄放模拟图参数 $A=0.7$ ， $m=1.1$ ， $n=0.5$ 。考虑水利工程影响后的洪水产流模拟结果见表4，图5为考虑水利工程影响前后典型洪水过程对比图。

由表4可以看出，考虑水利工程影响后模拟精度有大幅度提高，产流不合格场次由7场减少为0场，合格率由73%提高为100%。19960720、19640811、19600824和19600806号洪水发生前水库初始蓄满率 δ_0 分别为28%、52%、8%和21%，即洪水发生前水利工程蓄水量较少，可拦蓄库容较大，通过聚合水库蓄放模拟图可得到场次洪水的最大拦蓄量，结合时段产流量修正得到考虑水利工

程后的产流量，更接近实测产流量。而洪号为19910722的洪水发生前水库初始蓄满率 δ_0 为99%，即洪水发生前水利工程蓄水量较大，可放流库容较大，通过聚合水库蓄放模拟图可得到场次洪水最大放流量，产流量逐时段加上放流量得到更符合实际的产流量。

表4 考虑水利工程影响前后的模拟结果

序号	洪号	实测净雨 /mm	δ_0	未考虑水利工程响 模拟净雨/mm	考虑水利工程影响模 拟净雨/mm	未考虑水利工程影响 的相对误差/%	考虑水利工程影响 的相对误差/%
1	19560723	81.6	71%	89.0	87.9	9.07	7.72
2	19570823	117.5	63%	110.6	109.5	-5.87	-6.81
3	19600806	87.1	21%	108.4	99.1	24.45	13.78
4	19600824	59.8	8%	82.8	69.6	38.46	16.39
5	19630718	106.5	24%	120.4	113.1	13.05	6.20
6	19640811	50.6	52%	65.7	60.7	29.84	19.96
7	19640816	137.5	99%	106.2	110.5	-22.76	-19.64
8	19710805	76.8	14%	91.8	68.2	19.53	-11.20
9	19750802	102.4	53%	114.9	107.7	12.21	5.18
10	19850808	90.7	62%	77.7	73.9	-14.33	-18.52
11	19850817	99.1	47%	119.4	109.4	20.48	10.39
12	19860804	112.7	60%	104.2	94.7	-7.54	-15.97
13	19910722	73.6	99%	55.9	64.0	-24.05	-13.04
14	19910731	83.5	66%	73.3	71.6	-12.22	-14.25
15	19940710	59.2	66%	67.8	60.5	14.53	2.20
16	19940818	91.0	55%	89.1	82.7	-2.09	-9.12
17	19950731	267.6	23%	253.0	232.1	-5.46	-13.27
18	19960720	29.5	28%	56.6	33.1	91.86	12.20
19	19960726	39.6	74%	43.5	46.0	9.85	16.16
20	19960808	33.0	65%	35.2	34.9	6.67	5.76
21	19960813	61.8	62%	60.2	54.5	-2.59	-11.81
22	19980807	28.5	79%	27.2	30.1	-4.56	5.61
23	20010704	29.2	37%	45.9	26.5	57.19	-9.25
24	20100729	109.6	16%	123.7	92.7	12.86	-15.42
25	20100810	81.1	63%	86.2	77.0	6.29	-5.06
26	20100824	78.1	49%	80.0	67.6	2.43	-13.44

洪水发生前可以根据初始土壤蓄满率确定聚合水库初始蓄水状态，得到场次洪水最大影响量，然而随着洪水过程的进行，水利工程蓄水状态发生变化，根据聚合水库蓄放模拟图可以实时动态模拟水利工程蓄水状态，从而确定其针对来水的蓄放作用。结果显示，考虑水利工程蓄放作用的洪水模拟过程更接近实测洪水过程。对其中具有代表性的洪水过程进行分析可以发现聚合水库对洪水过程的影响分为3种类型，如图5所示：类型(a)，洪水发生前降雨较多，浅层土壤较湿润，水利工程特别是中小水利工程蓄水较多，聚合水库对该类洪水的影响综合表现为放流作用，如19910722号洪水；类型(b)，洪水发生前降雨较少，浅层土壤较干旱，水利工程特别是中小水利工程蓄水较少，聚合水库对该类洪水的影响综合表现为拦蓄作用，如19600824和19960720号洪水；类型(c)，洪水发生前降雨较少，浅层土壤较干旱，水利工程特别是中小水利工程蓄水较少，但洪水量级较大，聚合水库对该类洪水的影响前期表现为拦蓄作用，随着水利工程蓄水量的增加，在洪峰到来前后表现为放流作用，如19600806和19950731号洪水。

6 结论及展望

本文结合流域内水利工程年代分布推求水利工程的聚合库容，利用半分布式水文模型—TOP-
— 314 —

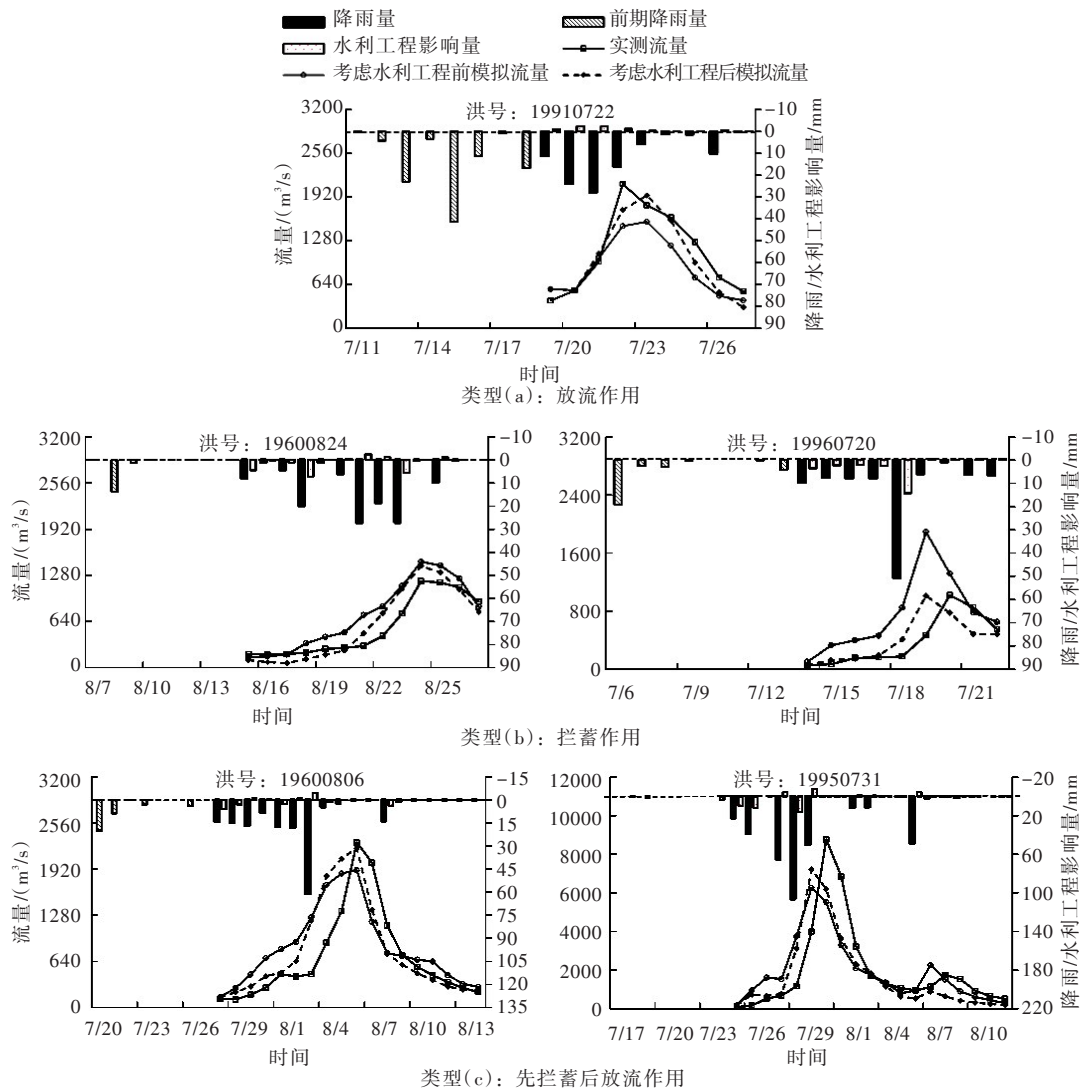


图5 考虑水利工程影响前后的典型场次洪水汇流模拟结果对比

MODEL模型构建水利工程影响下基于聚合水库蓄放水模拟的流域洪水预报方法，并将其应用于丰满Ⅱ区流域。流域内26场洪水的模拟结果显示，天然状态下的模型参数在水利工程影响期的模拟精度比较低，不利于流域正常水文预报工作的开展。而考虑水利工程影响后模型模拟合格率由73%提高到100%，且使用聚合水库蓄放模拟图能够实时模拟聚合水库在洪水中的蓄放作用，修正后的洪水过程与实测过程更加吻合。通过对3种类型的洪水过程进行分析表明聚合水库蓄放模拟图能够较好地反映水利工程对洪水的综合作用。

总之，本文提出的考虑水利工程影响的洪水预报方法能够反映水利工程在一场洪水中的蓄放规律，提高了洪水预报方案精度。但由于模型和资料存在一定误差，特别是一些垮坝和人为扒口的资料很难获得，其对计算结果的影响还需要进一步研究。另外，TOPMODEL模型属于半分布式模型，其按地形指数将流域划分为不同类型的产流区域，那么如何结合水利工程的地理分布来分析水利工程运行对流域洪水的影响也有待于进一步的研究。

参 考 文 献：

- [1] WANG W, SHAO Q, YANG T, et al . Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: a case study in four catchments of the Haihe River basin, China[J] . Hydrological Processes, 2013, 27(8): 1158-1174 .

- [2] HUO Z, FENG S, KANG S, et al . Effect of climate changes and water-related human activities on annual stream flows of the Shiyang river basin in arid north-west China[J] . Hydrological Processes, 2008, 22(16): 3155-3167 .
- [3] BRATH A, MONTANARI A, MORETTI G . Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty)[J] . Journal of Hydrology, 2006, 324(1-4): 141-153 .
- [4] KEZER K, MATSUYAMA H . Decrease of river runoff in the Lake Balkhash basin in Central Asia[J] . Hydrological Processes, 2006, 20(6): 1407-1423 .
- [5] MA H, YANG D, TAN S K, et al . Impact of climate variability and human activity on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment[J] . Journal of Hydrology, 2010, 389(3-4): 317-324 .
- [6] WANG G, XIA J, CHEN J . Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: A case study of the Chaobai River basin in northern China[J] . Water Resources Research, 2009, 45, W00A11, doi: 10.1029/2007WR006768 .
- [7] SCHREIDER S Y, JAKEMAN A J, LETCHER R A, et al . Detecting changes in streamflow response to changes in non-climatic catchment conditions: farm dam development in the Murray-Darling basin, Australia[J] . Journal of Hydrology, 2002, 202(262): 84-98 .
- [8] 王宗志, 程亮, 王银堂, 等 . 高强度人类活动作用下考虑河道下渗的河网洪水模拟[J] . 水利学报, 2015, 46(4): 414-424 .
- [9] PAYAN J, PERRIN C, ANDREASSIAN V, et al . How can man-made water reservoirs be accounted for in a lumped rainfall-runoff model? [J] . Water Resources Research, 2008, 44, W003420, doi: 10.1029/2007WR005971 .
- [10] CALLOW J N, SMETTEM K R J . The effect of farm dams and constructed banks on hydrologic connectivity and runoff estimation in agricultural landscapes[J] . Environmental Modelling & Software, 2009, 24(8): 959-968 .
- [11] ASSANI A A, LANDRY R, DAIGLE J, et al . Reservoirs effects on the interannual variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River Watershed (Quebec, Canada)[J] . Water Resources Management, 2011, 25(14): 3661-3675 .
- [12] DEITCH M J, MERENLENDER A M, FEIRER S . Cumulative effects of small reservoirs on streamflow in northern coastal california catchments[J] . Water Resources Management, 2013, 27: 5101-5118 .
- [13] DESCONNETS J, DIALLO A, TRAORE O, et al . Exemple d'application du modèle CEQUEAU-ONU: évaluation de l'impact des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé, Burkina Faso[C] . IAHS Publication, 1998, 252: 375-385 .
- [14] GUNTNER A, KROL M S, de Araujo J C, et al . Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region[J] . Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques, 2004, 49(5): 901-918 .
- [15] 李抗彬, 沈冰, 宋孝玉, 等 . TOPMODEL模型在半湿润地区径流模拟分析中的应用及改进[J] . 水利学报, 2015(12): 1453-1459 .
- [16] MENG D, MO X . Assessing the effect of climate change on mean annual runoff in the Songhua River basin, China [J] . Hydrological Processes, 2012, 26(7): 1050-1061 .
- [17] LI F, ZHANG G, XU Y J . Spatiotemporal variability of climate and streamflow in the Songhua River Basin, north-east China[J] . Journal of Hydrology, 2014, 514: 53-64 .
- [18] MU X, LI Y, GAO P, et al . The runoff declining process and water quality in Songhua River Catchment, China under Global Climatic Change[J] . Clean-soil Air Water, 2012, 40(4): 394-401 .
- [19] ZHANG A, ZHANG C, FU G, et al . Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China [J] . Water Resources Management, 2012, 26(8): 2199-2217 .
- [20] BEVEN K J, KIRKBY M J . A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J] . Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 1(24): 43-69 .
- [21] CAO M, ZHOU H, ZHANG C, et al . Research and application of flood detention modeling for ponds and small reservoirs based on remote sensing data[J] . Science China Technological Sciences, 2011, 54(8): 2138-2144 .
- [22] EBERHART R, SHI J, KENNEDY Y . Swarm intelligence[M] . San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001 .

(下转第324页)

Study on the calculation model of river water environment capacity considering water intake and tributary

ZHANG Xiao, LUO Jungang, XIE Jiancang

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulic Engineering in Shaanxi,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: In order to provide technical support for total amount control of pollutants and for defining red lines of received-pollutant limits in water function areas, a stepwise summation model is built to calculate water environment capacity, which considers water intake and tributary based on one-dimensional water quality model. The water function area was divided into several reaches to calculate water environment capacity by the control section with sewage outlet, water intake or entrance of tributary. Comparing to the traditional model, this model could control the function area of water quality target neatly, and avoid water environment capacity too strict or too loose. The model was adopted to Shaanxi section of the Weihe River. The calculated results of water environment capacity by the new model, segment first control model and the section-end control model were 73814.43, 36159.96 and 85365.49t/a, respectively. The results show that the new model is more modest and it could calculate water environment capacity between any two control sections. Because of considered intake, tributary and sectional velocity, water environment capacity is also more accurate and reasonable. The new model could provide technical support for the total amount control of pollutants and for defining the red lines of water functional areas.

Keywords: river; water environment capacity; water intake; tributary

(责任编辑: 韩 昆)

(上接第 316 页)

A method for flood forecasting based the operation chart of aggregated reservoir

SUN Xinguo^{1, 2}, PENG Yong¹, ZHANG Xiaoli^{1, 3}, ZHOU Huicheng¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Engineering Management, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223030, China;

3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Hydraulic constructions can dramatically alter the hydrological characteristics of the basin, especially the process and volume of the flood, which make it more difficult to accurately forecast flood. In the present study, we propose a new method for flood forecasting, which can effectively account for the hydraulic constructions. In this method, the hydraulic constructions is firstly aggregated as the equivalent reservoir, whose operation chart of holding and discharging is obtained according to the rule of the single hydraulic construction. Then, the new flood forecasting method is formed by combing the operation chart with the original TOPMODEL calibrated with the natural flood. The proposed method has been applied for forecasting flood in Subarea II of the Fengman basin in Northeast China and results show that the precision is significantly improved with an advance of the qualified ratio of forecasting runoff yield. The situation that the value at beginning of flood season and after a long drought is usually underestimated has also been modified. Three types of typical flood process simulated by the new method are more suitable to observed process. All the results indicate that the method developed can effectively account for the impacts of hydraulic constructions on flood process.

Keywords: flood forecasting; hydraulic constructions; aggregated reservoir; operation chart of holding and discharging; TOPMODEL

(责任编辑: 王成丽)