

# 水利工程影响下的历史洪水重现

孙新国<sup>1</sup>, 周惠成<sup>1</sup>, 武 剑<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连, 116024; 2. 河北省水利水电勘测设计研究院, 天津 300250)

**摘要:** 随着社会经济及人口的增加, 第二松花江丰满以上流域相继修建了大量水利工程(水库、闸坝、堤防、蓄滞洪区等), 大大改变了水流的自然状态, 对洪水洪量及过程产生了显著影响。根据水利工程统计资料分析水利工程对洪水的影响规律, 将其应用于历史洪水模拟中去, 洪水模拟合格率由57%提高到86%。采用TOPMODEL模型建立水利工程运行影响下的洪水重现方法, 并将丰满五道沟以上流域历史典型暴雨洪水在当前水利工程条件下重现, 对比分析了历史暴雨洪水发生到现在的过程与当年实测过程的变化。研究结果对当前流域防洪有一定借鉴意义。

**关键词:** 丰满; 水利工程; 洪水重现; TOPMODEL 模型

**中图分类号:** TV211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0832-05

## Historical flood recurrence under the impacts of hydraulic engineering

SUN Xin guo<sup>1</sup>, ZHOU Hui cheng<sup>1</sup>, WU Jian<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering Dalian University of Technology, Dalian 116024; 2. Hebei Research Institute of Investigation and Design of Water Conservancy and Hydropower, Tianjin 300250, China)

**Abstract:** With the rapidly economic development and increasing of population, a large number of hydraulic projects, such as reservoirs, levees, flood storage, and flood detention, were built in the upstream of Fengman Reservoir of the second Songhua River Basin, which changed the natural water flow and had significant impacts on the flood discharge and process. In this paper, based on the measured hydraulic engineering data, the impacts of water conservancy engineering on the flood were analyzed and applied to simulate historical flood. The results showed that the qualification rate of flood simulation increases from 57% to 86%. The flood recurrence method under the influence of water conservancy engineering operation was developed using the TOPMODEL model. Under the condition of current water conservancy engineering, this method was used to simulate the recurrence of historical flood in the upstream of Wudaogou in the Fengman Reservoir, which showed the comparison between the historical flood process and measured process. The research results can provide reference for the flood control in the river basin.

**Key words:** Fengman; water conservancy engineering; historical flood recurrence; TOPMODEL

河流上水库工程的兴建, 改变了水流的天然时程分配, 破坏了水文资料的一致性, 给传统的水文分析计算带来影响, 致使不能反映这一变化的天然状态下的流域洪水预报模型难以满足精度要求<sup>[1,2]</sup>。在汛初或前期久旱无雨情况下, 降雨后大部分地表径流会被中小水库、塘坝拦蓄, 造成实测径流远远小于预报值; 而当前期降雨充足, 水利工程大都蓄满时若突降大雨, 流域内的水利工程可能出现泄流或溃坝的情况, 使得预报洪量偏小。这些偏差对流域兴利效益和防洪安全造成威胁<sup>[3]</sup>。为满足水文分析计算对资料系列一致性的要求, 需对水文资料进行统一处理。传统方法一般采用还原计算的方法来恢复其一致性, 即将受水库影响年份的资料通过各种方法还原到建库前的天然情况, 如李伟佩等<sup>[4]</sup>采用

库容曲线法、进出库水量相减法和水量相关法三种方法计算水库调蓄量, 从而还原水利工程影响下的径流; 陈守煜等<sup>[5]</sup>提出水库断面洪水还原的不恒定流迭代解法, 考虑了动库容的影响, 洪峰计算更加准确。但是很多中小型水库工程的观测资料相当缺乏, 因此采用传统方法对这些地区的洪水进行还原将十分困难, 甚至无法进行。加之还原的洪水只是用来研究天然状态下的流域洪水预报模型, 并不能够模拟实时水利工程影响下的洪水。针对这一情况, 很多学者研究水利工程影响下的洪水预报方法, 如熊金和等<sup>[6]</sup>考虑入水利工程的影响调整原洪水预报方法; 张瑞勋等<sup>[7]</sup>通过洪水频率分析, 还原后的洪水一致性更好说明水利工程的影响; 沈清德等<sup>[8]</sup>将上游水利工程聚合成虚拟水库, 加入其定性调节分析,

收稿日期: 2014-12-03 修回日期: 2015-08-19 网络出版时间: 2015-07-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150730.1717.004.html>

基金项目: 重大国际(地区)合作研究项目(51320105010); 国家自然科学基金项目(51379027; 51109025)

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

得到水利工程影响下的洪水预报过程; 雒文生等<sup>9)</sup>在天然流域产汇流预报原理基础上, 提出了一种能考虑上游大中水库及小水库群(包括塘堰)在防洪、灌溉、发电中的调蓄作用及运用基本规律的径流预报方法。这些方法较好地模拟了水利工程影响下的历史洪水, 然而在实际洪水预报调度作业中, 常常更关心当前水利工程条件对历史暴雨洪水的影响。

本文在已有研究成果的基础上, 采用 TOPMODEL 水文模型通过历史洪水来率定水利工程对洪水的影响规律, 将该规律耦合到水文模型中得到基于水利工程影响的洪水预报模型。据此得到历史暴雨洪水发生到当前水利工程影响情况下的洪水过程线, 不但可以解决洪水资料一致性的问题, 而且与实时防洪调度需要的洪水预报过程相一致, 从而可为流域实时调度决策提供参考。

## 1 水利工程影响下的洪水重现模型

本文选用的半分布式水文模型—TOPMODEL 模型<sup>10-11)</sup>是一个以地形为基础的流域水文模型, 它以地形指数反映下垫面空间变化, 模拟变动产流面积的概念。经过近 30 年的发展, TOPMODEL 在世界各地得到了广泛的应用<sup>12)</sup>。与传统集总式流域水文模型特征相比, TOPMODEL 模型可以根据地形指数和流域平均缺水量计算出了流域各点的缺水量, 能够反映现实下垫面含水量的变化<sup>13)</sup>。由于水利工程蓄水量多少与土壤饱和程度直接相关, 因此通过历史洪水资料率定模型参数与水利工程蓄放作用之间的影响规则, 将其耦合到 TOPMODEL 模型中, 则可得到在现状水利工程影响情景下的洪水重现模型。模型构建的技术路线见图 1。

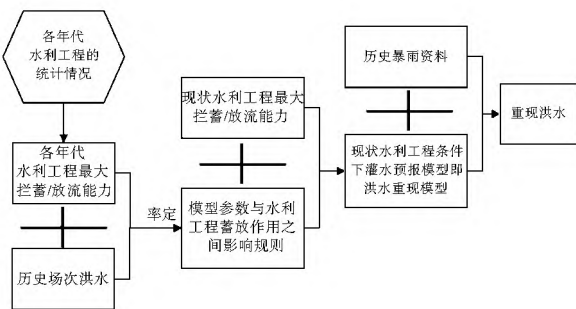


图 1 水利工程影响下的洪水重现技术路线

Fig. 1 Technical flowchart of historical flood recurrence under the impacts of water conservancy engineering

TOPMODEL 模型中,  $S_{uz,i}$  表示在点  $i$  处的非饱和区土壤含水量;  $SD_i$  表示非饱和和层土壤的蓄水能力;  $\alpha = S_{uz,i}/SD_i$  表示水分变化最活跃的土壤非饱和区干旱湿润程度。通过对历史洪水的分析可知, 时段水利工程拦蓄或放流作用与

前期土壤饱和程度有明显的相关关系, 因此提出以下假设:  $\alpha \geq A$ , 水利工程表现为放流作用。  $B \leq \alpha \leq A$ , 水利工程表现为无影响;  $\alpha \leq B$ , 水利工程表现为拦蓄作用。其中  $A, B$  为  $(0, 1)$  之间的常数, 场次洪水总拦蓄量小于洪水开始时水利工程空余库容量  $V_1$ , 总放流量小于洪水开始时水利工程蓄水量  $V_2$ 。

$$V_1 = (1 - \alpha) \cdot V, V_2 = \alpha \cdot V$$

式中:  $V$  为水利工程年代最大影响量。

根据有水利工程运行资料的典型洪水过程中水利工程库容变化分析, 得出各类型水利工程的最大蓄洪比, 应用到所有水利工程中则得到各年代水利工程最大影响能力。

## 2 实例应用

### 2.1 研究流域概况

第二松花江丰满以上流域位于吉林省中南部地区, 分布在东经  $125^{\circ}18' - 128^{\circ}45'$ 、北纬  $41^{\circ}40' - 44^{\circ}05'$  之间。为提高水库预报精度, 将丰满水库流域划分为三个区: 丰满水库蓄水区(I区)、五道沟以上(II区)与白山水库以上(III区)。在丰满水库上游流域, 除上游松江河梯级水库群, 干流的白山、红石、丰满大型梯级水库群外, 仅在白山—丰满水库区间, 还修建了小型水库近 2 000 座, 塘坝更是无以计数, 总库容已超过 10 亿  $m^3$ 。其中五道沟以上(II区)的水库与塘坝的控制面积达到 7 421  $km^2$ , 占相应流域面积的 63.98%, 对洪水总量预报的影响最大<sup>14-15)</sup>; 因此本文以丰满 II 区流域为典型流域开展研究, 其流域内水系、水库与站点情况见图 2。

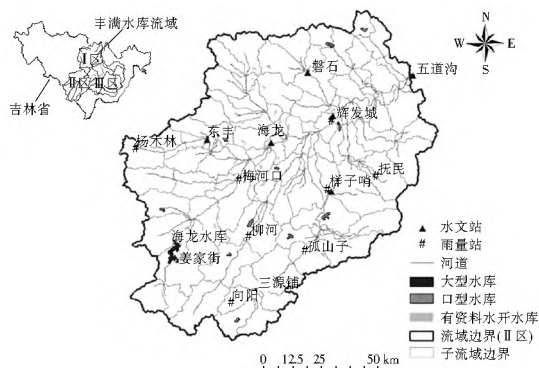


图 2 丰满 II 区流域图

Fig. 2 Fengman subarea II basin

### 2.2 水利工程情况统计与分析

研究流域调查显示, 流域内共有大型水库 1 座, 中型水库 12 座, 小型水库 86 座(其中 23 座有运行资料), 小型水库 390 座, 塘坝则无以计数。各量级水利工程基本情况统计见表 1。

表 1 丰满 II 区各量级水库基本情况统计

Tab. 1 Basic conditions of different reservoirs in Fengman subarea II basin

项目	塘坝	小 II 型	小 I 型	小型汇总	中型	大型	合计
库容/ $10^6 m^3$	54.62	152.63	255.07	407.70	179.82	316.00	958.14
占总库容比例(%)	5.70	15.93	26.62	42.55	18.77	32.98	100.00
控制面积/ $km^2$	2 252.06	1 989.37	1 902.19	3 891.56	729.65	548.00	7 421.27
占全流域比例(%)	30.35	26.81	25.63	52.44	9.83	7.38	100.00

### 2.3 水利工程最大影响量

研究流域水利工程众多,显然要获得这些水利工程在场次洪水中的运行资料是很困难。对于流域出口断面,更应关注这些水利工程的综合作用,因此适宜的方法则是研究水库群的拦蓄特征和运用规律,因此需要解决各类型水利工程对洪水最大影响量的计算问题。

(1) 大型水库影响量计算。根据历史实测运行资料结合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,在主汛期水位会出现高于正常蓄水位,但只是为了调洪。一场洪水结束时水位基本维持在汛限水位而不超过正常蓄水位,因此可知其影响能力

为兴利库容值。

(2) 中型水库影响量计算。由于中小型水库大都没有明确的调度规则,根据有运行资料的水库分析可以看出实际运行中正常库容要略大于设计正常库容值,各水库兴利库容值占总库容约 70%,因此以中小型水库总库容的 70% 作为其影响能力。

(3) 塘坝影响量计算。塘坝在洪水过程中基本上属于需要水时有多大库容就蓄多少,人工控制能力较差,因此将其总库容作为影响能力。

根据各类型水利工程影响量计算方法,结合各年代各类型水利工程库容,可以得到各年代水利工程最大影响量,见表 2。

表 2 丰满 II 区流域各年代水利工程最大影响量统计

Tab. 2 The maximum influences of hydraulic projects in Fengman subarea II basin

年代	总库容/(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )			影响能力/(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )			总影响能力 /10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	折算为径流深 /mm
	大型	中小	塘坝	大型	中小	塘坝		
20 世纪 50 年代		61.0	54.6	0.0	42.7	54.6	97.3	7.9
20 世纪 60 年代		198.0	54.6	0.0	138.6	54.6	193.2	15.7
20 世纪 70 年代	316	405.1	54.6	124.0	283.6	54.6	462.2	37.6
20 世纪 80 年代	316	463.5	54.6	124.0	324.4	54.6	503.0	40.9
20 世纪 90 年代	316	525.7	54.6	124.0	368.0	54.6	546.6	44.4
21 世纪初	316	587.5	54.6	124.0	411.3	54.6	589.9	48.0

### 2.4 历史洪水率定结果

选取 1953 年- 1955 年间 6 场洪水来率定检验天然期模型参数,选取流域 1956 年- 2010 年受水利工程影响期的 14

场历史暴雨洪水进来率定模型参数与水利工程蓄放作用之间的影响规则,最终得到  $A = 0.4, B = 0.28$ ,场次洪水模拟结果见表 3。

表 3 考虑水利工程影响前后模拟结果对比

Tab. 3 Comparison of simulation results before and after the impacts of water conservancy projects

洪号	洪水信息		不考虑水利工程影响模拟结果						考虑水利工程影响模拟结果					
	实测净雨 /mm	$\alpha$	模拟净雨 /mm	相关系数	相对误差 (%)	峰现时间 /d	峰值误差 (%)	合格与否	模拟净雨 /mm	相关系数	相对误差 (%)	峰现时间 /d	峰值误差 (%)	合格与否
19570823	117.5	0.24	104.5	0.76	-11	0	-20	✓	101.5	0.81	-14	0	-18	✓
19600824	59.8	0.32	75.0	0.94	25	0	15	×	75.0	0.94	25	0	15	×
19640811	50.6	0.28	63.1	0.77	25	1	11	✓	55.6	0.83	10	0	1	✓
19640816	137.5	0.45	103.3	0.52	-25	1	-16	×	106.9	0.56	-22	1	-14	×
19710805	76.8	0.20	92.1	0.62	20	1	-4	✓	90.4	0.79	18	1	-16	✓
19750802	102.4	0.30	115.5	0.76	13	1	-13	✓	115.5	0.76	13	1	-13	✓
19850817	99.1	0.37	113.5	0.84	15	0	-2	✓	113.5	0.84	15	0	-2	✓
19860804	112.7	0.33	103.7	0.89	-8	1	-17	✓	103.7	0.89	-8	1	-17	✓
19910722	73.6	0.39	56.4	0.93	-23	1	-23	×	60.9	0.96	-17	1	-20	✓
19910731	83.5	0.45	74.0	0.83	-11	1	9	✓	81.9	0.87	-2	1	10	✓
19950731	267.6	0.20	268.3	0.78	0	1	-22	×	270.8	0.83	1	1	-20	✓
20100729	109.6	0.15	122.5	0.72	12	0	21	×	120.0	0.82	9	0	19	✓
20100810	81.1	0.50	87.5	0.94	8	0	-7	✓	97.7	0.96	20	0	3	✓
20100824	78.1	0.50	77.6	0.81	-1	0	-26	×	87.6	0.84	12	0	-17	✓

由表 3 可以看出,不考虑水利工程影响规则,14 场历史暴雨洪水只有 8 场合格,合格率仅为 57%。不合格场次洪水中,19600824 场次为汛末拦蓄,19640816、19910722 和 19910731 场次均为主汛期前期土壤饱和,水利工程放流。考虑水利工程影响规则后,模拟精度明显高于不考虑水利工程影响的模拟结果,合格率为 86%,说明率定得到的规则能够

描述水利工程对洪水的影响。

### 2.5 历史暴雨洪水重现分析

根据率定的模型参数与水利工程影响规则,结合现状水利工程分布情况得到现状水利工程条件下的洪水重现模型。将历史上比较大的降雨过程输入到模型中可得到历史暴雨洪水的重现过程,见图 3。

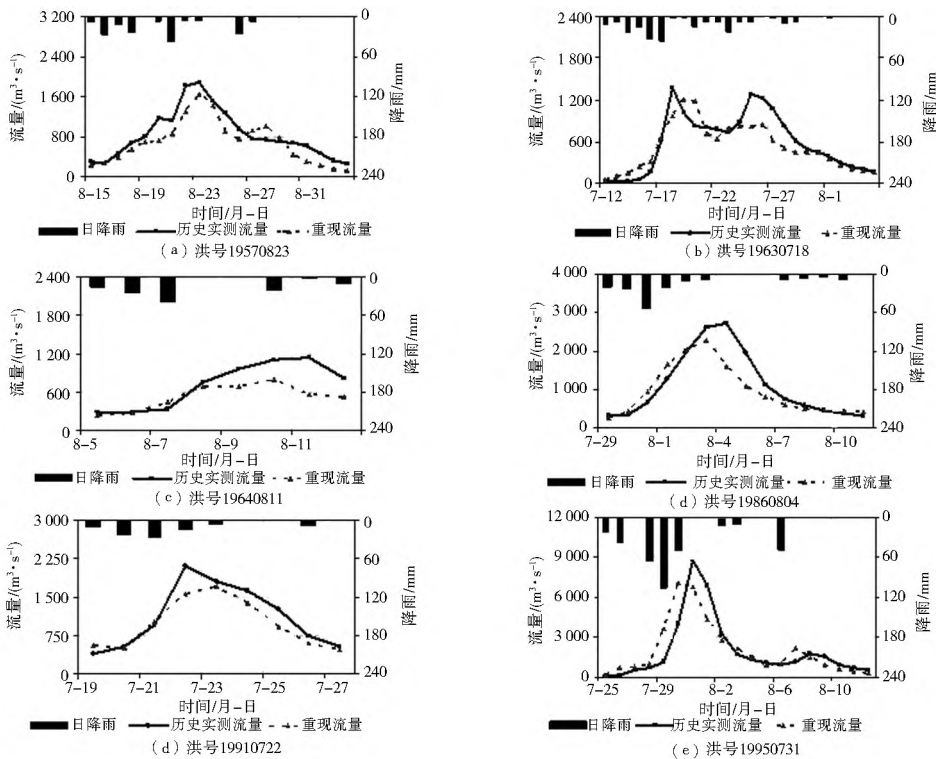


图 3 历史洪水重现过程示意图

Fig. 3 The processes of historical flood recurrence

由图 3 可以看出,受水利工程的影响,历史上的暴雨过程若发生到现在,其流量过程与当年实测流量过程相比,有一定变化,主要表现为受水利工程拦蓄和调蓄作用影响,洪峰和洪量均有一定程度的减小,变化趋势有利于防洪安全。另外洪水发生年代距今越远其变化程度越大,如 19640811 和 19860804 场次洪水重现过程的变化幅度明显大于 19910722 和 19950731 场次洪水。

### 3 结论

流域水利工程建设及运行会造成径流的时程变化规律、洪水形成与演进规律发生一定变化,使得观测到的水文数据失去了一致性,对重建工程项目资料收集造成了困难,也使得现有河道防洪工程的防洪标准不明确,流域洪水预报精度下降,而且对流域防洪规划修订及河道设计防洪流量确定也有很大影响。本文使用 TOPMODEL 模型通过历史洪水率定得到模型参数与水利工程蓄放作用之间的影响规则,结合现状水利工程建设与分布情况得到水利工程影响下的洪水重现模型。重现结果显示,如果历史降雨过程发生到现在,洪水过程朝着对防洪有利的方向变化,说明水利工程整体对防洪安全有积极影响。

重现后的洪水不但能够反映历史暴雨在现状水利工程条件下的洪水过程,对指导流域防洪有一定的借鉴意义,而且使得流域洪水预报方案中的洪水恢复了一致性,对于下一步流域设计洪水和河道防洪工程的防洪标准评定有一定参考价值。但是由于模型误差,水利工程的影响量特别是水利工程放流加大重现洪水过程的情况并不能够完全反映出来,如何将水利工程的影响与模型本身误差区分开来值得进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] 李慧赟,张弛,王本德,等.基于模糊聚类的丰满上游流域降雨径流变化趋势分析[J].水文,2009,29(03):28-31. (LI Hui Yun, ZHANG Chi, WANG Ben de, et al. Analysis of changing trend of rainfall and runoff in upstream of Fengman watershed based on fuzzy clustering[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(03): 28-31. (in Chinese))
- [2] 曹明亮,张弛,周惠成,等.丰满上游流域人类活动影响下的降雨径流变化趋势分析[J].水文,2008,28(05):86-89. (CAO Ming Liang, ZHANG Chi, ZHOU Hui Cheng, et al. Change trend of rainfall and runoff in upstream of Fengman basin under influence of human activities[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(05): 86-89. (in Chinese))
- [3] 郭生练,王金星,彭辉,等.考虑人类活动影响的丰满水库洪水预报方案[J].水电能源科学,2000,18(02):14-17. (GUO Sheng lian, WANG Jin xing, PENG Hui, et al. A flood forecast model taking into account the human activity impact[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2000, 18(02): 14-17. (in Chinese))
- [4] 李伟佩,王玉峰,刘红珍,等.对受水库影响的洪水资料还原的有关问题探讨[J].人民黄河,2000,22(12):14-15. (LI Wei pei, WANG Yu feng, LIU Hong zhen, et al. The discussion of some problems about the flood data affected by the reservoir reduction[J]. Yellow River, 2000, 22(12): 14-15. (in Chinese))
- [5] 陈守煜,方荣.入库洪水还原计算[J].大连工学院学报,1983,22(1):131-136. (CHEN Shou yu, FANG Rong. The returning calculation of flood waves in reservoir[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1983, 22(1): 131-136. (in Chinese))
- [6] 熊金和,郭丽娟,同斌,等.受水利工程影响的乌江流域洪水预报方法浅析[J].人民长江,2011(6):35-37. (XIONG Jin he,

- GUO Li Juan, TONG Bin, et al. Analysis on flood forecasting method of Wujiang River Basin affected by hydropower projects [J]. Yangtze River, 2011(6): 35-37. (in Chinese)
- [7] 张瑞勋, 张涛, 雒文生. 考虑上游水利工程影响的枫树坝水库洪水分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(8): 29-31. (ZHANG Ruixun, ZHANG Tao, LUO Wensheng. Analysis on flood of Fengshuba reservoir basin considering the influence of hydropower projects upstream[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(8): 29-31. (in Chinese))
- [8] 沈清德, 全鸿烈. 水库上游水利工程对中小型水库洪水预报的影响[J]. 东北水利水电, 2002, 21(3): 43-44. (SHEN Qingde, QUAN Honglie. Influence of upstream hydroproject to middle and small flood forecast precision [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China. 2002, 21(3): 43-44. (in Chinese))
- [9] 雒文生, 王祥三, 宋星源, 等. 受水利水电工程影响流域径流预报方法的探讨[J]. 水文, 1991(3): 13-19. (LUO Wensheng, WANG Xiangsan, SONG Xir Yuan, et al. The approach of forecast method of yield runoff in basins influenced by hydraulic and hydroelectric engineering[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1991(3): 13-19. (in Chinese))
- [10] Beven J. Rainfall runoff Modelling [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [11] Beven J. Distributed Hydrological Modelling: Applications of the TOPMODEL Concept [J]. Advance in Hydrological Processes, 1997(11): 1069-1085.
- [12] 刘青娥, 左其亭. TOPMODEL 模型探讨[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2002, 23(4): 82-86. (LIU Qing'e, ZUO Qiting. Discussion on TOPMODEL[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 2002, 23(4): 82-86. (in Chinese))
- [13] 刘青娥, 夏军, 王中根. TOPMODEL 模型几个问题的研究[J]. 水电能源科学, 2003, 2(6): 41-44. (LIU Qing'e, XIA Jun, WANG Zhonggen. Discussion on some issues of TOPMODEL [J]. Hydroelectric Energy, 2003, 2(6): 41-44. (in Chinese))
- [14] 李成林, 孙新国, 彭勇, 等. 丰满流域水利工程对径流变化规律的影响研究[J]. 2013, 11(4): 79-83. (LI Chenglin, SUN Xinguo, PENG Yong, et al. Research of runoff processes changed by hydraulic projects in Fengman basin [J]. 2013, 11(4): 79-83. (in Chinese))
- [15] 张喜峰, 王进, 李文龙, 等. 丰满水库人类活动影响研究与洪水预报实践[J]. 大坝与安全, 2009(4): 34-38. (ZHANG Xifeng, WANG Jin, LI Wenlong, et al. Influence of human activity and flood forecast for Fengman Dam [J]. Dam and Safety, 2009(4): 34-38. (in Chinese))
- (上接第 826 页)
- [9] 徐磊磊, 刘敬林, 金昌杰, 等. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 3073-3080. (XU Leilei, LIU Jinglin, JIN Changjie, et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 3073-3080. (in Chinese))
- [10] 党素珍, 王中根, 刘昌明. 黑河上游地区基流分割及其变化特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2232-2237. (DANG Suzhen, WANG Zhonggen, LIU Changming. Baseflow separation and its characteristics in the upper reaches of the Heihe River Basin [J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2232-2237. (in Chinese))
- [11] Nathan RJ, McMahon TA. Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis. Water Resources Research, 1990, 26: 1465-1473.
- [12] Eckhardt K. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation Hydrological Processes, 2005, 19: 507-515.
- [13] 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 等. 数字滤波法在三峡库区香溪河流域基流分割中的应用[J]. 水文, 2011, 31(6): 18-23. (CUI Yujie, LIU Defu, SONG Linxu, et al. Application of digital filtering theory in baseflow separation in Xiangxi River Watershed of Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(6): 18-23. (in Chinese))
- [14] 董晓华, 邓霞, 薄会娟, 等. 平滑最小值法与数字滤波法在流域径流分割中的应用比较[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2010, 32(2): 1-4. (DONG Xiaohua, DENG Xia, BO Huijuan, et al. A comparison between smoothed minima and digital filtering methods applied to catchment baseflow separation [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2010, 32(2): 1-4. (in Chinese))
- [15] 李鸿雁, 张蕾, 郑龙群, 等. 递归数字滤波法在嫩江流域地下径流分割中的应用[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 631-635. (LI Hongyan, ZHANG Lei, ZHENG Longqun, et al. Application of recursive digital filtering method in groundwater flow separation in Nenjiang River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2013, 49(6): 631-635. (in Chinese))
- [16] 李桂元, 杜新德, 罗利顺, 等. 基于数字滤波法的紫鹊界梯田区水源结构分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(18): 9756-9757, 9945. (LI Guiyuan, DU Xirde, LUO Lishun, et al. Analysis on the water source structure based on the digital filtering method at the Ziquejie Terrace [J]. Journal of Anhui Agri. Sci, 2012, 40(18): 9756-9757, 9945. (in Chinese))
- [17] DAI Zhi jun, CHU Ao, DU Jir zhou, et al. Assessment of extreme drought and human interference on baseflow of the Yangtze River [J]. Hydrological Process, 2010, 24: 749-757.
- [18] QIAN Kai zhu, WAN Li, WANG Xu sheng, et al. Periodical Characteristics of Baseflow in the Source Region of the Yangtze River [J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(2): 113-122.