

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01021

水利工程对洪水的影响研究

李成林¹, 薛志春², 彭勇², 周惠成², 刘媛媛¹

(1. 水利部 松辽水利委员会, 长春 130021; 2. 大连理工大学 水资源与防洪研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 水利工程是人类活动对洪水影响极其重要的因子之一, 近些年随着全国各地水利工程的大规模建设, 其影响尤为明显与突出, 且在不同地区对不同类型洪水具有不同的效果。通过对第二松花江丰满以上流域内各类型大、中、小、水利工程的基本运行资料进行调查分析, 同时在按照《水文情报预报规范》进行洪水分类的基础上, 通过统计方法推求出水利工程与不同洪水之间的影响规则, 并将其转化为水利工程影响参数, 嵌入到新安江模型中进行了场次洪水模拟, 在满足预报精度要求的同时得到了水利工程对各类型洪水的影响程度。本研究为进一步探讨人类活动对洪水的影响提供了一个新的思路。

关键词: 人类活动; 水利工程; 洪水分类; 影响

中图分类号: TV 122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0021-05

Impacts of Hydraulic Engineering on Flood

LI Cheng lin¹, XUE Zhi chun², PENG Yong², ZHOU Hui cheng², LIU Yuan yuan¹

(1. Ministry of Water Resources, Songliao Water Resources Commission, Changchun 130021, China;

2. Dalian University of Technology, Water Resource and Flood Control Institution, Dalian 116024, China)

Abstract: Water conservancy project is one of the most important factors of the impacts from human activities on the flood. With the large scale construction of water conservancy engineering projects all over the country in recent years, its effects become more obvious and vary for different types of flood in different regions. In this paper, the basic operation data of large, medium, and small water conservancy projects in the upstream of Fengman of the second Songhua River Basin were analyzed. Based on the flood classification of "Standard of Hydrology Information Forecast", the impact rules between water conservancy projects and different types of floods were determined by the statistical method, and they were converted into the impact parameters of water conservancy projects. These parameters were added into the Xinanjiang model of flood simulation, and the impact degrees of water conservancy projects on different types of flood were then obtained in consideration of the requirement of prediction precision. The research can provide a new idea for study the impacts of human activities on flood.

Key words: human activity; hydraulic engineering; flood classification; influence

洪水的形成往往受气候、下垫面等自然因素与人类活动因素的影响。水利工程作为最重要的防洪工程措施, 其对流域洪水发生的影响越来越大, 甚至可能起到决定性作用。

有关洪水分类与水利工程在洪水中的影响作用的研究已经发展了数十年, 张瑞勋等^[1]采用优化准则与经验适线法分析上游水利工程对枫树坝水库洪水的影响, 董前进等^[2,3]通过投影寻踪和粒子群优化算法对洪水进行分类研究, 汪丽娜等^[4,5]运用鱼群算法与FCM方法进行洪水分类与水库群调度研究, 任明磊等^[6]利用模糊聚类与BP神经网络方法进

行流域洪水的分类预报, 徐冬梅等^[7]用可变模糊集方法进行洪水分类研究, 周晓阳等^[8]基于系统聚类方法提出了贝叶斯实时优化调度规则并进行模拟计算, 梁忠民等^[9]通过流域降雨径流水文模型推求得到上游水库对水库涉及洪水的影响, 郭生练等^[10]通过参数优化与实时校正技术来控制模型参数得到人类活动影响下的丰满水库洪水预报方案。虽然对洪水分类的研究已经有了较多的方法与成果, 但大多集中在提出某种算法或对原算法进行改进, 通过提高计算结果便认为所率定参数代表的是其真值, 而这实际上只是表明该次计算

收稿日期: 2013-01-21 修回日期: 2013-12-03 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01024.html>

基金项目: 水利部公益性行业专项(201001024); 国家自然科学基金(51109025); 教育部博士点基金(20100041120004)

作者简介: 李成林(1965-), 男, 内蒙古乌兰浩特人, 工程师, 硕士, 主要从事水库调度、水利工程运行管理工作。

通讯作者: 薛志春(1986-), 男, 山西吕梁人, 在读博士研究生, 主要从事水文水资源、洪水预报、工程模糊集理论等方面研究。E-mail: xurzhichun2012@163.com

的有效性,不一定能真实反映参数的物理意义,并非是对洪水影响规律的内在诠释,系统误差以及“异参同效”等问题一直都是复杂算法参数率定难以解决的问题,本文基于流域调查获得的大量基础资料,结合模型参数的物理意义来确定相关参数,而非只是通过算法来率定模型参数,确定的模型参数更接近其实际物理意义,因此其后的影响规律分析更具有可靠性。

本文以第二松花江丰满水库五道沟以上作为研究流域,在分类的基础上运用新安江模型进行洪水模拟,分析水利工程的洪水影响规律,为流域防洪调度决策提供一定依据。

1 研究方法

本文选用传统的集总式水文模型——新安江模型,该模型理论发展较为成熟,在国内外都有较广泛的应用,对其模型基本原理不再细述。随着对水文模型研究的不断进步与深入,人们通过不断改进或提出新的算法来提高模型参数率定的效率与结果,从而提高模型模拟精度达到改进效果,如GA^[11]、PSO^[12-13]、SCE-UA^[14]等。同时也有人开始对模型结构与参数组成进行改进,使模型更加适应于流域实际情景。本文通过以下改进模型参数的方法对考虑人类活动影响的流域水文模拟研究进行了探索。

在新安江模型中,流域平均蓄水能力 WM 反映流域特性,基本是一个不变的值。但在工程实际中,下垫面土地利用变化与水利工程建设,使得流域内部发生了巨大变化。在小尺度的短期水文研究中下垫面土地利用变化相比不太显著,而水利工程的不断建设明显改变了流域实际蓄水能力。流域实际蓄水能力由流域天然的蓄水能力 $WM1$ 与水利工程带来的蓄水能力 $WM2$ 两部分组成。水库的蓄水能力可以通过均摊到流域面积上的方式,利用流域调查资料整理,按年代分阶段进行统计分析。

设上游水库的有效拦蓄能力为 $B\text{ m}^3$,流域面积为 $A\text{ km}^2$,该水库反应在流域上的最大蓄水能力为 $WM2(\text{mm})$,则:

$$WM2 = B / 1000A \quad (1)$$

流域的实际最大蓄水能力为:

$$WM' = WM1 + WM2 \quad (2)$$

将改进后的流域蓄水能力参数 WM 用上述值 WM' 替代进行模拟计算,当水库建设逐渐增多,流域总蓄水容量增大的同时,相应的 $WM2$ 也增大。

在水利工程建设最少的年代,流域下垫面可以认为是相对天然的,因此通过有关年代场次洪水进行模型参数率定,就可得到流域天然蓄水能力 $WM1$ 。

在改进新安江模型应用参数的基础上,利用流域调查所得到的有关水利工程资料,结合流域相关水文数据采用遗传算法,就可以进行新安江模型参数率定以及洪水场次模拟。

2 实例

2.1 流域概况

丰满II区五道沟以上流域出口控制站为五道沟水文站,流域面积 $12\,391\text{ km}^2$ 。流域内的辉发河是松花江上游的一个较大支流,全长 240 km ,发源于辽宁省清原县龙岗山脉中

部,流经清原、东丰、柳河、梅河口、辉南、磐石和桦甸7个县(市),于桦甸市头道沟附近注入松花江,汇合后一并汇入松花湖,流域及水利工程分布见图1。该流域属半湿润地区,降水量年内分配不均,7月、8月降水占全年降水量的 44.7% ,多年平均降水 720 mm ,汛期年均降水 510 mm ,占全年降水量的 70% 以上。2006年流域调查显示,区内共有大型水库1座,中型水库12座,小(一)型水库86座,小(二)型水库390座,塘坝则无以计数,中小水利工程总库容为 6.42 亿 m^3 ,占全流域中小型水利工程总库容 7.05 亿 m^3 的 91% ^[15],流域内各类水利工程控制流域面积为 $7\,421.27\text{ km}^2$,占总流域面积的 63.98% 。



图1 丰满II区五道沟以上流域水利工程分布

Fig. 1 Location of hydraulic engineering projects in the upstream of Wudaogou of Fengman II district

通过流域调查得到水利工程的有关资料,如水库基本信息(包括水库名称、经纬度、总库容、防洪库容、控制面积、修建时间)、大中型水库运行信息(包括日入库、出库流量,时段入库、出库流量)、无资料水库及塘坝信息(包括控制面积、总库容、地理位置),结合流域各个控制站的水文资料(日降雨、时段降雨、日流量、时段流量),整理分析后运用传统统计方法进行分析,得到各类型水利工程在不同类型洪水中的影响程度。

2.2 水利工程对一般洪水影响分析

根据《水文情报预报规范》SL 250 2000(以下简称《规范》)中5.1.5规定,根据水文要素重现期将洪水划分为4类:一般洪水、较大洪水、大洪水和特大洪水。一般洪水的发生比较频繁,其主要特征为量小、峰低,一般不会成灾。

通过对流域下垫面及水利工程资料的分析,按水利工程规模将模拟时段分为天然期与人类活动影响期。对天然期场次洪水应用遗传算法进行参数率定,得到天然期新安江模型基本参数,使用天然期参数进行洪水模拟计算即为原始模拟。在天然期参数的基础上加入水利工程影响进行计算即为考虑影响模拟。原始模拟径流和考虑影响模拟径流,以及水利工程影响量、影响程度及其变化趋势分析见表1、图2。

任何水文模型本身都存在模型系统误差,该误差基本控制在水文预报允许误差范围之内,因此,若将实测径流与原始模拟径流的差值作为影响量来考虑必然会将系统误差考虑进去,而原始模拟径流与考虑影响模拟径流的比值可以将这种系统误差相互抵消。该比值可能不是最准确的影响量,但避

表 1 水利工程对一般洪水影响

Table 1 Effects of hydraulic engineering on the general flood

洪号	实测径流/m m	原始模拟径流/mm	考虑影响模拟径流/mm	影响量/mm	影响程度(%)
19560707	21.29	23.55	18.05	- 5.50	- 25.8
19600711	31.09	33.01	25.50	- 7.51	- 24.2
19610824	27.19	38.28	26.30	- 11.98	- 44.1
19620824	17.90	26.28	17.61	- 8.67	- 48.4
19620902	32.71	39.75	27.46	- 12.29	- 37.6
19660711	24.76	23.51	15.54	- 7.97	- 32.2
19660902	27.52	34.90	26.39	- 8.51	- 30.9
19690730	28.73	32.62	22.54	- 10.08	- 35.1
19710904	12.46	21.25	13.90	- 7.35	- 59.0
19730718	31.55	41.36	27.61	- 13.75	- 43.6
19730823	26.18	33.88	22.84	- 11.04	- 42.2
19770630	19.71	28.15	18.00	- 10.15	- 51.5
19790719	27.83	38.61	25.25	- 13.36	- 48.0
19790730	23.27	29.48	19.97	- 9.51	- 40.9
19830808	32.74	43.07	26.92	- 16.15	- 49.3
19870722	25.46	36.62	21.11	- 15.51	- 60.9
19870803	17.73	26.97	15.14	- 11.83	- 66.7
19870907	14.06	21.67	12.27	- 9.40	- 66.9
19930807	28.03	31.79	15.93	- 15.86	- 56.6
19940809	29.94	32.02	16.77	- 15.25	- 50.9

免了系统误差所带来的影响,得到的是实际的水利工程影响量。因此,以原始模拟径流与考虑影响模拟径流的差值作为水利工程的影响量,以影响量与实测值之比作为水利工程对实测径流的影响程度,在表 1 中分别为影响量与影响程度的两列数据。表 2、表 3 中的相应数据的意义与此相同。

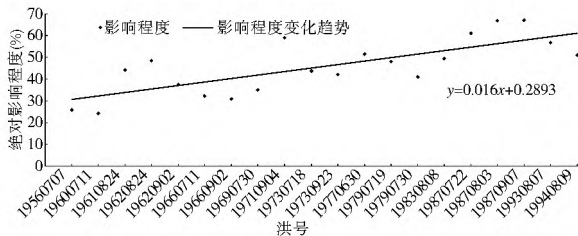


图 2 水利工程对一般洪水影响程度及其变化趋势

Fig. 2 The impact degree and its variation trend of hydraulic engineering on the general flood

图 2 为水利工程对不同年代场次洪水的绝对影响量(影响量的绝对值)及其变化趋势,图 3、图 4 中的数据与图 2 中类似,表示不同类型洪水情形下水利工程对场次洪水的绝对影响量及其变化趋势。

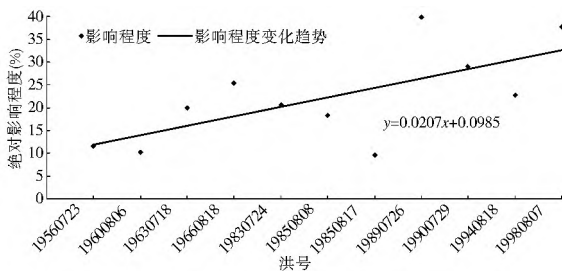


图 3 水利工程对较大洪水的影响程度及变化趋势

Fig. 3 The impact degree and its variation trend of hydraulic engineering on the large flood

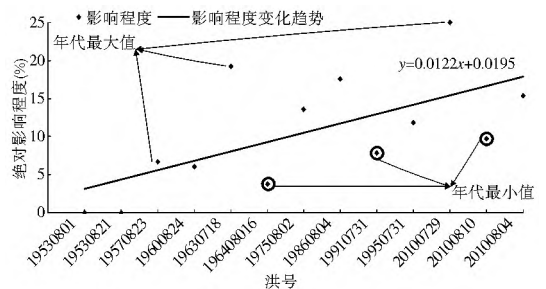


图 4 水利工程对大洪水及以上类型洪水的影响程度及变化趋势

Fig. 4 The impact degree and its variation trend of hydraulic engineering on the super large flood

对于一般性洪水,绝对影响程度与变化时间的线性拟合相关系数为 0.6,尚不到中度相关性,说明水利工程对洪水的绝对影响程度随时间的变化不太明显,但水利工程对一般类型洪水的影响随水利工程的逐年增多整体上呈稳步增加趋势,水利工程对这类洪水的影响基数较大(20% 以上),变化趋势也较快,且其在洪水过程中主要发挥拦蓄作用,使得洪水流量值与峰值均减小。

2.3 水利工程对较大洪水影响分析

据《规范》,较大洪水为重现期在 10~ 20 年之间的洪水,发生的频率较一般洪水要小,但还不至于太大,一般不会造成较大的灾害或者仅有局部成灾发生,通过模型模拟及考虑水利工程的影响计算,其结果与变化趋势分析见表 2、图 3。

对于较大洪水,绝对影响程度与变化时间的线性拟合相关系数只有 0.45。20 世纪 80 年代前的洪水基本在趋势线上下浮动,但 80 年代之后有了较为明显的突变现象,尽管仍是在趋势线上下摆动,但摆动幅度忽大忽小,点距分布极其没

表 2 水利工程对较大洪水的影响

Table 2 Effects of hydraulic engineering on the large flood

洪号	实测径流/mm	原始模拟径流/mm	考虑影响模拟径流/mm	影响量/mm	影响程度(%)
19560723	80.17	101.59	92.40	-9.19	-11.5
19600806	89.24	103.40	94.32	-9.08	-10.2
19630718	104.02	144.67	124.00	-20.67	-19.9
19660818	45.78	57.23	45.64	-11.59	-25.3
19830724	80.33	94.45	77.86	-16.59	-20.7
19850808	79.59	70.04	55.42	-14.62	-18.4
19850817	95.22	117.03	107.90	-9.13	-9.6
19890726	44.96	71.85	53.91	-17.94	-39.9
19900729	55.10	70.14	54.15	-15.99	-29.0
19940818	88.88	97.69	77.41	-20.28	-22.8
19980807	49.75	78.43	59.64	-18.79	-37.8

表 3 水利工程对大洪水及以上类型洪水的影响

Table 3 Effects of hydraulic engineering on the super large flood

洪号	实测径流/mm	原始模拟径流/mm	考虑影响模拟径流/mm	影响量/mm	影响程度(%)
19530801	77.12	67.30	67.30	0.00	0
19530821	172.65	182.93	182.93	0.00	0
19570823	118.00	129.82	121.94	-7.88	-7
19600824	58.15	66.54	63.02	-3.52	-6
19630718	105.68	146.14	125.84	-20.30	-19
19640816	133.98	128.32	123.25	-5.07	-4
19750802	101.12	111.34	97.65	-13.69	-14
19860804	108.80	119.06	99.94	-19.12	-18
19910731	85.78	78.98	72.28	-6.70	-8
19950731	247.70	293.52	264.20	-29.32	-12
20100729	111.04	138.34	110.59	-27.75	-25
20100810	81.23	86.86	78.98	-7.88	-10
20100824	76.73	75.80	64.00	-11.80	-15

有规律。总体上,水利工程对较大类型洪水的影响程度基数比一般类型洪水约小 10%,但随水利工程的逐年增多基本也呈上升趋势,而且这种趋势要比对一般洪水影响程度的趋势增加得更快,且其对洪水的影响使洪水减小。

2.4 水利工程对大洪水及以上洪水影响分析

据《规范》,重现期在 20~50 年间为大洪水,大于 50 年为特大洪水。大洪水的发生本身就比较稀疏,特大洪水的发生更为罕见,这类洪水基本上是峰高、量大型洪水,对流域内及其下游产生较大破坏,因此可以将这两类洪水称为具有破坏性的大洪水来考虑。其场次洪水模拟结果以及考虑水利工程的径流预报结果及其影响变化趋势见表 3、图 4。

对于大型、特大型洪水,水利工程对洪水的绝对影响程度与变化时间的线性拟合相关系数为 0.4,相关系数非常低,场次洪水的点距分布较为散乱,很难找到合适的相关关系。但是从年代最大值、年代最小值的角度来看,随水利工程的不断增加,人类可能的其他活动因素日趋复杂,使得影响程度整体上呈增加趋势,但个别场次洪水可能存在与整体趋势不一致的突变现象。

在以上三种基本分类分析中,既存在着一定的差异性,又有着一定的共同点,首先几类洪水受人类活动影响的绝对量随时间变化的趋势线相关系数差异较大,且普遍较低,但其影响程度基本均呈增加趋势;在每一个变化趋势图中,样

本点越多其相关性越大,在较大与大型洪水中,由于点值样本有限,点的分布较散,点值之间差异性比趋同性特征更加明显,所以相关系数也较低。

通过以上计算分析,可知水利工程对洪水的影响主要为负影响(使之减小),但在不同类型的洪水中影响程度不同,洪水越小影响越大(表 4)。水利工程对一般洪水的平均影响程度将近 50%,对较大洪水的平均影响程度为 22%,而在大洪水及以上洪水中水利工程的平均影响程度仅为 10%。

表 4 水利工程对各类洪水影响程度

Table 4 Effects of hydraulic engineering on different types of flood

洪水类型	影响程度(%)
大洪水及以上	10.50
较大洪水	22.30
一般洪水	45.70

以上表 1-表 3 中所有影响量均为实际影响量。对比发现,水利工程对场次洪水的实际影响量与可影响量并不一致,实际影响量与流域降雨及其分布甚至前期影响雨量即 PA 等因素有关;可影响量为一个极值,是水库最大可发挥的影响程度,在实际场次洪水并不一定会用到。因此在实际每次洪水中,一般洪水、较大洪水、大洪水的实际影响量没有确定的大小先后关系,但可影响量却有明确的大小顺序,大洪

水>较大洪水>一般洪水。

3 结语

通过对丰满五道沟以上各类型洪水的模拟计算结果进行分析,发现水利工程对中、小洪水的影响比大洪水的影响要大很多。一方面因为大洪水本身量较大,即使较小的影响比例也能带来较大的影响量,而小洪水本身量小,就算有再大影响比例也不会有太大的影响量;另一方面是非工程措施发挥的作用也越来越重要。在水库实际控制运行中,基于经济利益的考虑,工程管理人员会尽可能的多蓄水,以达到其发电或灌溉等的经济效益,但同时还要考虑水利工程以及流域本身的防洪安全。因此对蓄/泄水量的控制、出入库流量的调节必须要找到一个边际经济效益最高而边际风险最低的动态平衡点。

本文这种考虑水利工程影响的场次洪水拦蓄符合现阶段我国修建、管理并运行的大量水利工程现状,能有效应对汛期防洪与枯水期抗旱的矛盾。但是在实际研究中对资料的收集难度较大,在小流域探索性研究的同时应逐渐开放有关资料的共享程度,通过不同的模型进行对比研究,继续寻求并深入掌握这种影响规律及其变化对以后水库防洪调度具有重要的借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 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 Rui xun, ZHANG Tao, LUO Wen sheng. Considering the Effects of the Upstream Water Conservancy Project Maple Dam Reservoir Flood Analysis[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008, (8): 29-31. (in Chinese))
- [2] 董前进,王先甲,艾学山,等.基于投影寻踪和粒子群优化算法的洪水分类研究[J].水文,2007,(4):10-14.(DONG Qian jin, WANG Xi an jia, AI Xue shan, et al. Study on Flood Classification Based on Project Pursuit and Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Journal of China Hydrology, 2007, (4): 10-14. (in Chinese))
- [3] 康爱卿,邱林,张亭.基于投影寻踪的洪水分类和识别方法研究[J].华北水利水电学院学报,2009,(2):6-8.(KANG Ai qing, QIU Lin, ZHANG Ting. Research of Classification and Recognition about Flood Based on the Projection Pursuit[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, (2): 6-8. (in Chinese))
- [4] 汪丽娜,陈晓宏,李粤安,等.基于人工鱼群算法和模糊G均值聚类的洪水分类方法[J].水利学报,2009,(6):743-748,755.(WANG Li na, CHEN Xiao hong, LI Yue an, et al. Method for Flood Classification Based on Fuzzy G mean Clustering and Artificial Fish Swarm Algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, (6): 743-748, 755. (in Chinese))
- [5] 彭勇,唐国磊,薛志春.基于改进人工鱼群算法的梯级水库群优化调度[J].系统工程理论与实践,2011,(6):1118-1125.(PENG Yong, TANG Guo lei, XU E Zhi chun. Optimal Operation of Cascade Reservoirs Based on Improved Artificial Fish Swarm Algorithm[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2011, (6): 1118-1125. (in Chinese))
- [6] 任明磊,王本德.基于模糊聚类和BP神经网络的流域洪水分类预报研究[J].大连理工大学学报,2009,(1):121-127.(REN Ming lei, WANG Ben de. Research on Classified Flood Forecast Based on Fuzzy Clustering and BP Neural Networks[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, (1): 121-127. (in Chinese))
- [7] 徐冬梅,陈守煜,邱林.基于可变模糊集理论的洪水分类研究[J].水电能源科学,2011,(1):23-25,5.(XU Dong mei, CHEN Shou yu, QIU Lin. Study on Flood Classification Based on Variable Fuzzy Sets Theory[J]. Water Resources and Power, 2011 (1): 23-25, 5. (in Chinese))
- [8] 周晓阳,张勇传.洪水的分类预测及优化调度[J].水科学进展,1997,(2):27-33.(ZHOU Xiao yang, ZHANG Yong chuan. Flood Classifying Prediction and Optimal Flood Dispatching [J]. Advances in Water Science, 1997, (2): 27-33. (in Chinese))
- [9] 梁忠民,陆波.考虑上游中小水库影响的水库设计洪水研究[J].水电能源科学,2004,(4):27-29.(LIANG Zhong min, LU Bo. Study on Design Floods Under Impact of Small medium Size Reservoirs in Upper stream [J]. Hydroelectric Energy, 2004(4): 27-29. (in Chinese))
- [10] 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(2):14-17.(GUO Sheng lian, WANG Jin xing, PENG Hui, et al. A Flood Forecast Model Taking into Account the Human Activity Impact[J]. Hydroelectric Energy, 2000, (2): 14-17. (in Chinese))
- [11] 鲁帆,蒋云钟,王浩,等.多智能体遗传算法用于马斯京根模型参数估计[J].水利学报,2007,(3):289-294.(LU Fan, JIANG Yun zhong, WANG Hao, et al. Application of Multi agent Genetic Algorithm to Parameter Estimation of Muskingum Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, (3): 289-294. (in Chinese))
- [12] 徐海龙,王晓丹,廖勇,等.一种基于PSO的RBF-SVM模型优化新方法[J].控制与决策,2010,(3):367-370,377.(XU Hai long, WANG Xiao dan, LIAO Yong, et al. New Approach for Optimizing Model of RBF-SVM Based on PSO[J]. Control and Decision, 2010, (3): 367-370, 377. (in Chinese))
- [13] 温海燕.基于粒子群算法的新安江模型参数的优化[J].河北工程技术高等专科学校学报,2011,(3):1-4,21.(WEN Hai yan. Optimizing Parameters of Xin'anjiang Model Based on PSO[J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 2011(3): 1-4, 21. (in Chinese))
- [14] P H H A, LI Zhijia, Wang Shouhui. Application of SCE-UA Method for Calibrating the Xinanjiang Watershed Model[J]. Journal of Lake Science, 2001, (4): 304-314.
- [15] 曹明亮,周惠成,张弛,等.基于遥感数据的小水库塘坝拦洪计算方法研究与应用[J].中国科学:技术科学,2011,(8):1063-1069.(CAO Ming liang, ZHOU Hui cheng, ZHANG Chi, 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, (8): 1063-1069. (in Chinese))