

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.001

淮河上中游复杂流域洪水预报

李致家,梁世强,霍文博,温娅惠

(河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098)

摘要: 为了提高淮河洪水预报的精确度,以鲁台子和鲁蚌区间作为研究区域,选取2000—2017年之间的13场洪水资料,在降雨径流方面采用新安江三水源模型进行模拟预报,分别将鲁台子以上和鲁蚌区间分为9个和4个自然子流域,进行参数率定;对具有行蓄洪区的淮河干流河段进行节点概化,结合分流比法和马斯京根法,建立了具有行蓄洪区流域的洪水预报模拟方法,取得较好的模拟预报效果。研究表明:在洪量相对误差方面,鲁台子和鲁蚌区间的预报合格率都达到100%;在洪峰相对误差方面,鲁台子流域的合格率达到100%,而鲁蚌区间则达到92.3%。2003年和2007年这2场大洪水的洪峰相对误差和确定性系数方面都得到显著改善。

关键词: 洪水预报;新安江模型;行蓄洪;节点概化;分流比法;淮河流域

中图分类号:P338

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2019)01-0001-06

Study on the flood forecasting in complex basins of upper and middle reaches of Huaihe River

LI Zhijia, LIANG Shiqiang, HUO Wenbo, WEN Yahui

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

Abstract: To improve the accuracy of flood forecasting, 13 flood events between 2000 and 2017 were selected from the sections of Lutaizi and Lubeng, and the Xin'anjiang three-source model (XAJ model) was used to simulate the flood events. The Lutaizi basin can be divided into 9 natural sub-basins and the Lubeng basin can be divided into 4 natural sub-basins. Then, the XAJ model was calibrated for these basins. The node generalizability was carried out in the mainstream section of the Huaihe River with flood diversion and flood retarding areas. Combined with the diversion ratio method and the Muskingen method, the simulation method of flood diversion was established, and fairly good forecasting results were obtained. The research results show that: for the relative error of flood volume, the qualified rates of Lutaizi and Lubeng region are both up to 100%, and the Lutaizi reached a qualified rate of 100% in the flood peak, while the Lubeng region reached 92.3%. In two floods in 2003 and 2007, the relative error and the certainty coefficient of flood peak have been significantly improved.

Key words: flood forecasting; Xin'anjiang model; flood diversion and flood retarding; node generalizability; diversion ratio method; Huaihe River Basin

淮河流域的洪水预报一直是水文预报工作的重点和难点。学者们往往采用水文学与水力学、确定与随机模型以及其相结合的方法,对洪水预报进行研究^[1-2]。国内学者常用的洪水预报模型包括经验预报方法、新安江模型等,其中新安江模型在全国的应用性更高。近几年,国内学者仍致力于新安江模型的研究^[3],仅2017年,就有接近100篇关于新安江模型的文章发表,包括邓元倩等^[4]在陕西洋河流域基于新安江模型进行人工试错法和自动优选法的拟合效果比较。淮河流域上中游分布着大量的水库、行蓄洪区,这些条件增加了预报系统研究的难度,导致模型模拟的精度不高^[5-8],许多学者^[9-10]对此进行了研究,包红军等^[11]在考虑

基金项目: 国家科技重大专项(2016YFC0402705);国家自然科学基金(51679061, 41130639)

作者简介: 李致家(1962—),男,教授,主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

引用本文: 李致家,梁世强,霍文博,等. 淮河上中游复杂流域洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):1-6.

LI Zhijia, LIANG Shiqiang, HUO Wenbo, et al. Study on the flood forecasting in complex basins of upper and middle reaches of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 1-6.

行蓄洪区影响的 Muskingum 演算法基础之上,建立具有行蓄洪区的洪水预报水文学模型。本研究对具有行蓄洪区的淮河上中游地区进行模拟预报,通过对行蓄洪区进行位置和功能上的概化,再结合文中提及的分流比法,建立预报系统,期望提高这方面的研究精度。

1 流域介绍

淮河流域的源头位于河南省的桐柏山,由淮河水系和沂沭泗两大水系组成,地跨湖北、河南、安徽和江苏4个省。淮河干流全长约1000 km,总落差大概200 m。淮河上中游的分界点在洪河口,中下游的分界点在三河口。鲁台子和蚌埠都处于中游。淮河蚌埠以上流域见图1。

鲁台子以上控制流域面积为88630 km²。洪河口以上以山区和丘陵为主,落差大,水流湍急;洪河口以下以平原为主。鲁台子以上主河道长511 km,一级支流有淝河、颍河、史河、潢河、竹竿河、淝河和洪汝河。其中,淮河干流南岸的支流均为山丘河流,源短流急,雨量丰沛,水势凶猛;洪汝河和颍河上游有一部分是山区河道,颍河是淮河最大的支流。

鲁台子至蚌埠区间流域面积32670 km²。鲁台子至蚌埠区间汇入的主要支流为茨淮新河和涡河,存在区间面积为776 km²的1个蓄洪区——瓦淖湖;存在寿西湖、董峰湖、上下六方堤、石姚段、汤渔湖、洛河洼和荆山湖这7个行洪区,蓄量总共约22.91亿 m³。本文将蚌埠以上流域行蓄洪区相对位置进行概化,见图2。



图1 淮河蚌埠以上流域

Fig.1 Upper reaches of the Bengbu Hydrologic Station

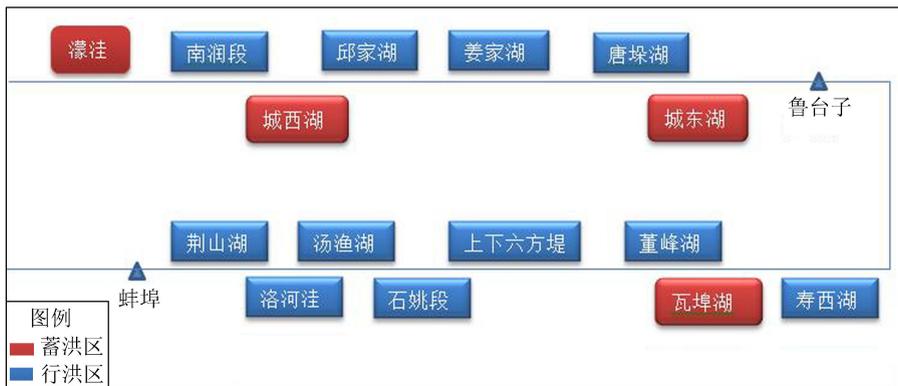


图2 行蓄洪区概化图

Fig.2 Conception model of flood diversion and flood retarding areas

2 降雨径流预报模型

淮河蚌埠以上流域属于湿润流域,新安江模型在提出以后,特别是在湿润半湿润地区,得到了广泛应用,并且精度较高^[12];因此此次研究的水文预报模型应用新安江模型。新安江模型有4个层次结构,分别为蒸发计算、产流计算、分水源计算和汇流计算^[13-14]。

在此次研究中,把鲁台子流域分为9个子流域,流域上9个水库和1个闸作为入流来源。鲁台子至蚌埠区间分为4个子流域,入流个数为2个。研究依据的水文资料时间区间为2000—2017年,根据流量过程选取了13场洪水。参数率定方法采用人工试错法,其中8场洪水用来率定,5场洪水用来检验。

3 具有行蓄洪区的河道洪水演算

具有行蓄洪区的河道洪水演算方法研究一直是淮河中上游防汛工作的重点和难点。重点在于如何考虑行蓄洪区分洪影响的基础上对河道和行蓄洪区作出合理的概化并进行河道洪水演算^[15],难点在于如何准确地确定分洪流量和分洪时间。

3.1 行蓄洪区概化

进行行蓄洪区的概化是为了在对具有行蓄洪区的河道进行洪水演算时易于考虑简洁计算,也是其洪水演算的基础。

就蓄洪区而言,分为单一口门的蓄洪区和具备上下口门的蓄洪区^[16]。单一口门的蓄洪区,将其看作是水库,不考虑内部洪水的演进并认为内部水位一致。对于第二种蓄洪区,由于防洪需要,上下口门的尺寸往往差别较大,这就需要考虑内部洪水的演进。针对行洪区,行洪区与干流的衔接是通过进洪口门和退洪口门的,由于行洪区的调蓄作用,洪水在其内部流速变缓并且蓄滞,内部进行洪水演进时同样采用马斯京根法。

3.2 行蓄洪区处理方法

在此次淮河上中游的分洪模拟中采用的方法是分流比法,需要确定分洪时间和分流比例。分流比法处理行蓄洪区就是估算出行洪或者蓄洪流量与干流流量的比例,然后按照这个比例进行行洪或者蓄洪。这个方法比较简单;此外这个方法有个特点,可以将干流河道上的几个行洪区或者蓄洪区合起来进行处理。但是由于并不是所有的行蓄洪区都有站点监测,因为行洪或者蓄洪流量过程并不完整,这样分洪的比例就不能得到实际的比例,所以只能经验地给出一个比值。这是水文学的方法。

3.2.1 分洪时间的确定

模拟过程中,在已知实测流量过程条件下先进行模型模拟,得到一个预报流量过程,与实测流量过程进行对比,把相差较大的时间点作为分洪开始时间,到洪水退水过程中流量相差较小的时间点作为分洪结束时间。在进行预报时,先预报得到一个流量过程,将其起涨流量时间点与洪峰流量时间点的中间部分作为分洪开始时间,同样可以将退水过程的中间部分作为分洪结束时间。

3.2.2 分流比确定

考虑将流量分为两部分,即河道流量和分洪流量分开用马斯京根算法,但是行洪是无控制的,很难精确地将流量分为河槽流量以及分洪流量。笔者做了这样的处理:

$$\text{河道} \quad Q_{\text{河}}(t) = \begin{cases} Q_t & 0 < t < t_k \\ \alpha Q_t & t \geq t_k \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{分洪} \quad Q_{\text{分}}(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < t_k \\ (1 - \alpha) Q_t & t \geq t_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: α ——分洪比例; t_k ——分洪开始时刻。

在确定分洪比例 α 时,需要有分洪的洪水场次进行确定,将洪量相对误差与洪峰流量相对误差作为目标函数进行率定。此次模拟过程中,在鲁台子流域,对于洪峰流量大于 $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水场次取 $\alpha=0.8$,对于洪峰流量大于 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水场次取 $\alpha=0.7$;在鲁蚌区间,对于洪峰流量大于 $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水场次取 $\alpha=0.8$,对于洪峰流量大于 $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水场次取 $\alpha=0.77$ 。在模拟过程中,场次洪水不同时可以对 α 进行微调。

3.2.3 支流以及行蓄洪区与干流流量的耦合计算

进行干流河道洪水演算时,有2个重点问题需要解决:一是支流来水汇入干流的流量,二是行蓄洪区口门与干流的交换流量。对于支流和蓄洪区来水的计算,采用先合后演的水文学方法;对于行洪区口门与干流交换流量的计算,在进入行洪区时采用分流比计算入流量,行洪区内部则采用马斯京根法进行演算,当行洪区蓄满时水流从行洪区下口门流出并进入干流。

4 模拟结果分析

选取2000—2017年的13场洪水在鲁台子和蚌埠分别进行模拟,尤其是2003年和2007年,这2年的汛期遭遇到了特大洪水,由于降雨量大和降雨时段集中,河段水位超过了警戒水位,动用了行洪区和蓄洪区。这2次洪水的起止时间分别是2003年6月20日到10月1日和2007年6月24日到9月30日,分洪和不分洪的模拟结果对比见表1和图3。

从图3和表1可以看出:在考虑行蓄洪区时,通过分洪处理之后,鲁台子和蚌埠的洪水预报模拟结果明显改善了许多,该结果从确定性系数和洪峰相对误差方面得到了体现。在分洪处理后,鲁台子的20030620

场次洪水的确定性系数达到 0.93(比原来提高了 0.07), 20070624 场次洪水的确定性系数达到 0.93(较原来提高了 0.26); 蚌埠的这 2 次洪水的确定性系数分别达到 0.84 和 0.95, 分别比原来提高了 0.34

和 0.2。尤其是模拟的洪峰值得到了改善, 洪峰相对误差绝对值明显减小。这 2 次洪水, 鲁台子的洪峰相对误差的绝对值分别降低了 11.1% 和 46.9%, 鲁蚌区间则分别降低了 27.4% 和 30.8%, 模拟效果得到较大的改善。2003 年和 2007 年这 2 次特大洪水, 动用了行蓄洪区进行分洪, 而本研究在进行分洪处理之后, 也达到了削峰的效果, 提高了模拟的精确性。

表 1 分洪前后模拟结果对比

Table 1 Comparison of the flood before and after flood diversion

洪号	鲁台子				蚌埠			
	确定性系数		洪峰相对误差/%		确定性系数		洪峰相对误差/%	
	不分洪	分洪	不分洪	分洪	不分洪	分洪	不分洪	分洪
20030620	0.86	0.93	16.2	-5.1	0.50	0.84	29.1	1.7
20070624	0.67	0.93	53.0	6.1	0.75	0.95	39.0	8.2

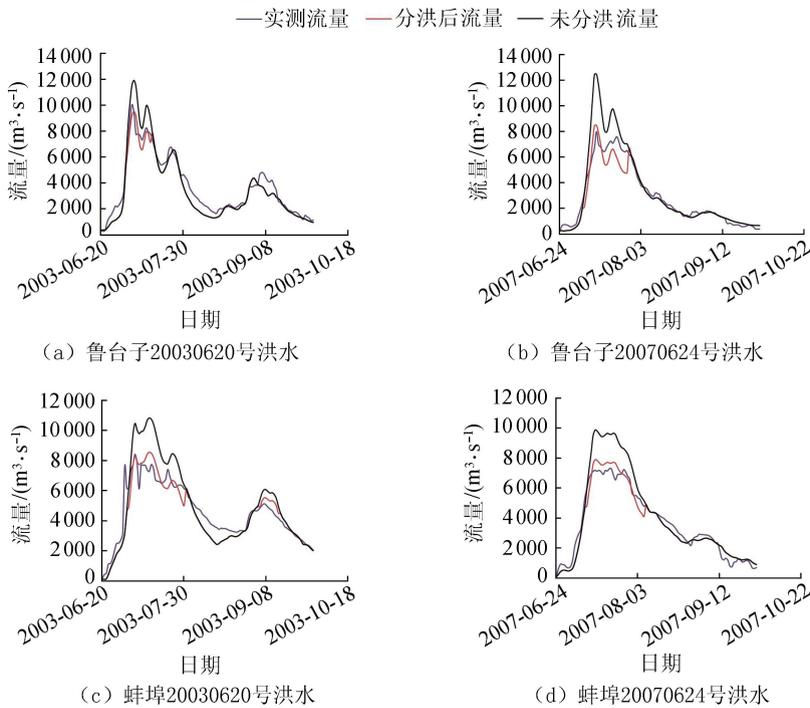


图 3 分洪前后流量过程线对比

Fig. 3 Comparison of flood before and after the flood diversion

表 2 和表 3 分别是进行分洪处理后鲁台子和蚌埠的模拟结果特征值。就确定性系数而言, 鲁台子达到 0.8 的洪水场次为 10 场, 其中率定期有 7 场, 率定期内确定性系数的平均值为 0.89; 验证期有 3 场, 验证期内确定性系数平均值为 0.83。鲁台子的确定性系数均值率定期略高于验证期。蚌埠达到 0.8 的洪水场次为 11 场, 率定期有 7 场, 其率定期内确定性系数的均值为 0.87; 验证期有 4 场, 其验证期内确定性系数的均值为 0.77。蚌埠的确定性系数率定期高于验证期。

根据合格预报要求, 就洪量相对误差而言, 鲁台子误差在 20% 以内的洪水场次为 13 场, 合格率为 100%; 蚌埠合格场次是 13 场, 合格率为 100%。在洪峰相对误差方面, 误差在 20% 以内, 鲁台子有 13 场, 率定期内有 8 场, 合格率为 100%; 验证期内有 5 场, 合格率为 100%。蚌埠也有 12 场, 率定期内 8 场, 合格率为 100%; 验证期内有 4 场, 合格率为 80%。

根据《水文情报预报规范》^[17], 多个相对误差绝对值的平均值表示多次预报的平均相对误差水平。鲁台子洪量相对误差的绝对值的平均值为 8.05%, 洪峰相对误差的绝对值的平均值为 7.4%。鲁台子至蚌埠区间的洪量相对误差的绝对值的平均值为 6.45%, 洪峰相对误差的绝对值的平均值为 6.72%。从这些数据来看, 鲁台子的模拟值平均误差水平低于鲁蚌区间, 这主要是由于淮河在进行调度时主要考虑的水位站点正阳关、南照集、润河集和临淮岗均位于鲁台子上, 并且会优先调用鲁台子以上的行蓄洪区, 考虑到鲁台子的行

表 2 鲁台子模拟结果特征值

Table 2 Characteristic value of simulated results at the Lutaizi Station

分期	洪号	总洪量/亿 m ³		洪量相对误差/%	总洪量/亿 m ³		洪量相对误差/%	峰现时间误差/d	确定性系数
		实测值	预报值		实测值	预报值			
率定期	20000603	136.936	158.094	15.45	5500	5701.5	3.7	0	0.80
	20020612	59.763	65.411	9.45	5620	5387.4	-4.1	-4	0.94
	20020720	77.774	89.070	14.51	5761	5219.46	-9.4	0	0.95
	20030620	332.054	299.089	-9.93	10070	9550.4	-5.1	1	0.93
	20040710	31.199	32.994	5.08	3520	3637.6	3.4	0	0.92
	20050706	299.873	274.722	-8.13	7195	7614.4	5.9	1	0.92
	20070624	247.504	231.253	-6.51	8012	8493.2	6.1	0	0.93
	20090722	50.039	46.638	-7.65	2330	2602.2	11.7	-3	0.72
验证期	20100706	75.853	78.478	3.26	4620	4388.2	-5.1	1	0.88
	20130705	16.012	17.658	8.92	1820	1958.6	7.7	0	0.79
	20150616	104.430	100.926	-3.30	5163	6093.5	18.1	0	0.74
	20160616	94.788	98.901	3.87	4800	4465.2	-8.2	-1	0.85
	20170703	23.963	26.545	8.70	2780	2972.9	7.7	-1	0.87

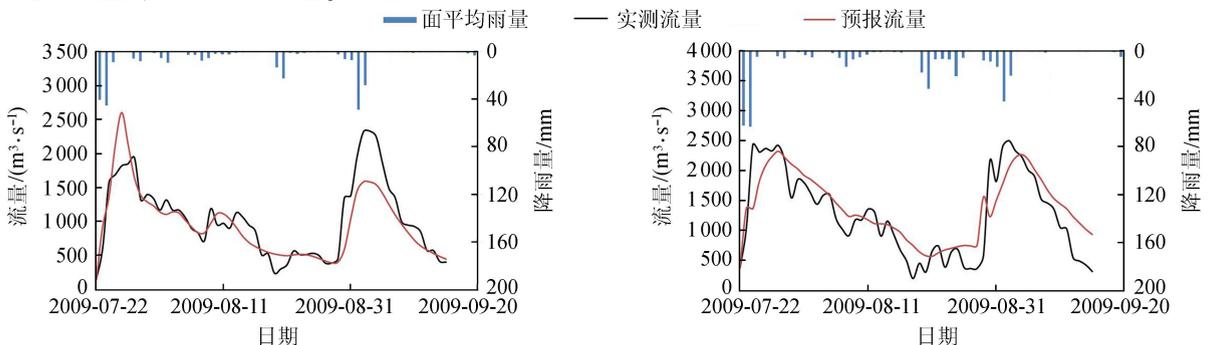
表 3 蚌埠模拟结果特征值

Table 3 Characteristic value of simulated results at the Bengbu Station

分期	洪号	总洪量/亿 m ³		洪量相对误差/%	总洪量/亿 m ³		洪量相对误差/%	峰现时间误差/d	确定性系数
		实测值	预报值		实测值	预报值			
率定期	20000603	152.710	182.494	19.50	6120	6198.5	1.3	0	0.83
	20020612	68.816	71.935	4.53	5600	6058.8	8.2	0	0.94
	20020720	107.738	98.944	-8.17	5950	6270.0	5.4	0	0.86
	20030620	409.108	391.084	-4.41	8430	8565.4	1.7	7	0.84
	20040710	34.227	35.428	3.50	3920	4026.9	2.8	2	0.89
	20050706	356.022	343.152	-3.62	6700	6614.6	-1.2	-2	0.95
	20070624	308.540	302.619	-1.92	7310	7907.1	8.2	-7	0.95
	20090722	61.022	66.739	9.36	2500	2323.5	-7.0	4	0.70
验证期	20100706	91.086	81.284	-10.77	5220	4821.6	-7.6	0	0.90
	20130705	18.215	19.509	7.09	1820	1137.7	-37.4	1	0.43
	20150616	132.552	129.002	-2.68	5480	5281.6	-3.6	0	0.85
	20160616	100.276	98.198	-2.08	4470	4576.7	2.4	0	0.85
	20170703	23.909	25.402	6.24	2890	2904.6	0.6	0	0.80

蓄洪区调用率高于鲁台子以下,这样模拟鲁台子的流量过程难度会大于蚌埠,精确度相应地也会差一些。

由表 2 和表 3 可以看出,鲁台子和蚌埠在 2009 年这次洪水模拟的结果都不是很好;从图 4 来看,这 2 次洪水的模拟结果在整体趋势的拟合效果上较好,但是这 2 次洪水的实测流量过程都呈现明显的锯齿形状,很可能是由于人为调蓄引起的,并不是断面的自然流量过程,这样的洪水过程模拟起来难度较高,在洪峰流量和峰现时间上都有不小的误差。



(a) 鲁台子 20090722 号洪水

(b) 蚌埠 20090722 号洪水

图 4 洪水模拟结果

Fig. 4 Simulation results of the flood event

5 结 语

选取2000—2017年的13场洪水,在鲁台子和鲁台子至蚌埠区间采用新安江模型进行洪水过程模拟预报,并且对行蓄洪区进行节点概化,应用分流比法进行分洪模拟,河道汇流则采用马斯京根法,取得了较好的模拟结果。为了进一步提高模拟的精度,下一步将利用水力学方法对各个重要站点的水位进行模拟预报,更加精确地确定分洪时间和分洪比例,在洪峰和洪量等方面提高精度,更好地为防汛服务;如何在有行蓄洪区的流域更好地将水文学方法和水力学方法进行结合,并采用实时预报方法,将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 李致家,姚成,张珂,等. 基于网格的精细化降雨径流水文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), 2017, 45(6):471-480. (LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG Ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(6):471-480. (in Chinese))
- [2] 韩通,李致家,刘开磊,等. 山区小流域洪水预报实时校正研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(3):208-214. (HAN Tong, LI Zhijia, LIU Kailei, et al. Research on real-time correction method of flood forecasting in small mountain watershed[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(3):208-214. (in Chinese))
- [3] 包红军,王莉莉,李致家,等. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(4):340-346. (BAO Hongjun, WANG Lili, LI Zhijia, et al. A distributed hydrological model based on Holtan runoff generation theory [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(4):340-346(in Chinese))
- [4] 邓元倩,李致家,刘甲奇,等. 基于 SCE-UA 算法新安江模型在沔河流域的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3):27-31. (DENG Yuanqian, LI Zhijia, LIU Jiaqi, et al. Application of Xin'anjiang model based on SCE-UA algorithm in Feng River Basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(3):27-31. (in Chinese))
- [5] MAIDMENT D R. Handbook of hydrology[M]. New York:McCraw-Hill,1992.
- [6] SINGH V P. Computer models of watershed hydrology[R]. Littleton,Colorado,USA:Water Resources Publications,1995.
- [7] 包红军. 基于 EPS 的水文与水力学相结合的洪水预报研究[D]. 南京:河海大学,2009.
- [8] TOKAR A S, JOHNSON P A. Rainfall-runoff modeling using artificial neural networks[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999, 6(2):232-239.
- [9] 包红军,赵琳娜,李致家. 淮河具有行蓄洪区河系洪水预报水力学模型研究[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4):635-641. (BAO Hongjun, ZHAO Linna, LI Zhijia. Hydraulic model for flood forecast of river basin with flood diversion and flood retarding areas of Huaihe River[J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(4):635-641. (in Chinese))
- [10] 包红军,张珂,魏丽,等. 淮河流域2016年汛期洪水预报试验[J]. 气象, 2017, 43(7):831-844. (BAO Hongjun,ZHANG Ke,WEI Li, et al. Test on flood forecasts for Huaihe River in the 2016 flood season[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(7):831-844. (in Chinese))
- [11] 包红军,李致家,王莉莉. 具有行蓄洪区的复杂水系实时洪水预报研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4):5-12. (BAO Hongjun, LI Zhijia, WANG Lili. Real-time flood forecasting for complex watershed with flood diversion and flood retarding areas [J]. Journal of Hydraulic Power, 2009, 28(4):5-12. (in Chinese))
- [12] 李致家,周轶,哈布·哈其. 新安江模型参数全局优化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,33(4):376-379. (LI Zhijia, ZHOU Yi, HABU·Haqi. Application of global optimization to calibration of Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2004,33(4):376-379. (in Chinese))
- [13] 刘欣蔚,王浩,雷晓辉,等. 粒子群算法参数设置对新安江模型模拟结果的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1):69-74,208. (LIU Xinwei, WANG Hao, LEI Xiaohui, et al. The study of the influence of parameter selection of PSO algorithm to simulation result of Xin'anjiang Model[J]. South to North Water Transfer and Water Conservancy Science and Technology, 2018, 16(1):69-74,208. (in Chinese))
- [14] 包为民. 水文预报[M]. 3版. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [15] 李致家. 具有行蓄洪区的河道流量演算方法探讨[J]. 水科学进展, 1997, 8(1):65-70. (LI Zhijia. Research on channel routing method with flood diversion and flood retarding areas [J]. Advances in Water Science, 1997, 8(1):65-70. (in Chinese))
- [16] 常露,刘开磊,姚成,等. 复杂河道洪水预报系统研究:以淮河王家坝至小柳巷区间流域为例[J]. 湖泊科学, 2013, 25(3):422-427. (CHANG Lu, LIU Kailei, YAO Cheng, et al. Real-time flood forecasting system for complicated river channels: a case study from Wangjiaba to Xiao Liuxiang section in the Huaihe River Basin[J]. Journal of Lake Science, 2013, 25(3):422-427. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范:GB/T 22482—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.