

白龙江干流代表站径流变化特征及未来趋势预测

牛最荣, 陈学林, 王学良

(甘肃省水文水资源局, 甘肃 兰州 730000)

摘要:白龙江引水工程被列入国家确定的172项重大水利工程项目之一,分析研究白龙江干流代表站径流变化特征并进行未来趋势预测,为实施白龙江引水工程提供技术支持。对白龙江干流白云、舟曲、武都、碧口4个代表站1956~2013年的实测径流系列资料进行分析,采用周期波均值外延叠加模型、谐波分析模型和逐步回归分析模型组合形成的加法模型对代表站未来径流变化趋势进行分析预测。结果表明:(1)该4站9月份多年平均流量占全年径流量比例最大,主汛期6~9月多年平均流量占全年径流量比例达到50%左右。(2)4个水文站多年径流量变化趋势呈现出逐渐缓慢减少的趋势,上游减少的幅度比下游小。(3)预测2015、2020、2025年年径流量的结果是:白云水文站均小于多年平均值,武都水文站均大于多年均值,舟曲和碧口水文站在多年均值上下浮动。

关键词:白龙江流域;变化特征;径流;趋势预测

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)05-0091-06

1 流域概况

白龙江发源于川、甘、青交界处西倾山东侧郭尔莽梁北麓的甘肃省碌曲县郎木寺附近,曲折东南流,经过四川省若尔盖县、甘肃省迭部、舟曲、武都县,复进入四川省,经青川、昭化二县汇入嘉陵江。白龙江流域地处甘肃省东南部,位于东经 $102^{\circ}30' \sim 105^{\circ}40'$,北纬 $32^{\circ}20' \sim 34^{\circ}10'$ 之间,呈西北~东南走向的狭长梭形,东北部和西北部隔着西秦岭,分别与西汉水流域和洮河流域接壤,西部以岷山为界,连接四川省岷江流域,南部则以摩天岭和四川涪江流域为邻,流域面积 $32\,850\text{km}^2$,跨甘肃省迭部、舟曲、武都、文县等县和四川省九寨沟、青川、昭化三县,在甘肃省境内面积为 $27\,391\text{km}^2$,占流域总面积的83%。白龙江干流全长576km,其中甘肃省境内475km,占82.5%。河源高程4072m,河口高程465m,落差达3607m。

按河道性状和流域特点,划分为上、中、下游三段:

①上游段从发源地至舟曲县城,河长228km,属高原峡谷段,区间有达拉沟、多儿沟、腊子沟等支流汇入,平均宽100m,平均比降11‰,植被覆盖好,蒸发量小,河道穿行峡谷,为侵蚀下切河槽;②中游段从舟曲县城至嵩

子店,河长157km,纵坡较大,支沟众多,泥石流发育,河道流向受山体走向影响,侧蚀力强,流速降低,固体径流沉积造成淤积段,区间有岷江、拱坝河、洋汤河汇入,平均河宽250~300m,平均比降3.1‰;③下游段嵩子店至交汇河口段,河长150km,区间有白水江及其它支流汇入,平均河宽300m,平均比降2‰。该段植被较好,气候温热,降雨充沛。

白龙江支流众多,共有一级支流49条,其中甘肃省境内一级支流34条(左岸16条,右岸18条)。自上而下较大支流有达拉沟、安子沟、尖尼沟、多儿沟、腊子沟、岷江、拱坝河、角弓沟、北峪河、洋汤河、五库河、白水江、小团鱼河、大团鱼河、让水河、青川河、清江河等。

白龙江流域地处青藏高原和四川盆地的过渡区。迭部以上水量很小,迭部至两河口属高山峡谷区,河流比降大,水流湍急,两岸森林茂密,有优良的水电站地址。两河口至武都段河谷开阔,水流平缓,两岸耕地多,植被差,泥石流多发,是白龙江泥沙的主要来源地带。武都以下至临江,是比较开阔的峡谷区。临江以下到碧口,又转入高山峡谷区,地形险峻,山势雄伟,植被良好。碧口以下川谷相间,水流平稳。白龙江流域水系分布见图1。

收稿日期:2014-10-03

基金项目:国家自然科学基金重点项目(91125015)

作者简介:牛最荣(1964-),男,甘肃通渭人,教授级高工,主要从事水文水资源及水环境监测、评价和研究工作。E-mail:zrniu12@sina.com

2 径流变化特征分析

2.1 年内变化特征

对白云、舟曲、武都、碧口4个控制性代表水文站1956~2013年的月年实测径流资料进行统计,各站各月多年平均流量见表1。从各站的各月平均流量占年总数的百分比具体分析白龙江干流代表站径流年内分配的变化规律。从表1可以看出,白云、舟曲、武都、碧口4站9月多年平均流量占全年径流量比例最大,分

别为14.7%、14.3%、13.8%、14%,主汛期6~9月多年平均流量占全年径流量比例达到了一半左右,分别为48.5%、53.1%、51.3%、52%,11月~次年3月多年平均流量占全年径流量比例分别为18.3%、17.8%、18.4%、19%。白龙江干流代表站多年平均流量年内分配柱状分布见图2。

2.2 年际变化特征

白龙江干流从上游往下游依次有白云、舟曲、武都、碧口4个水文站控制。点绘4站1956~2013年多

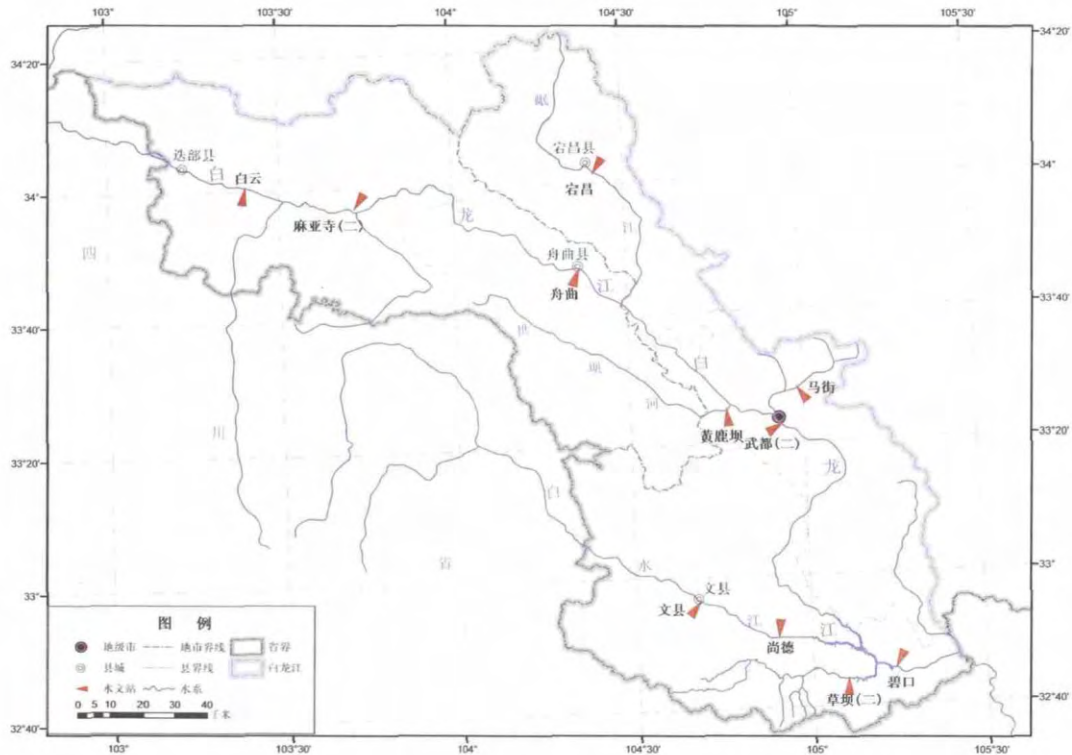


图1 白龙江流域水系分布图

Fig.1 The distribution of the Bailongjiang River system

表1 白龙江干流各站各月多年平均流量统计表

Table 1 The statistics of the monthly mean annual discharge of the stations on the mainstream of the Bailongjiang River

站名	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年总数
白云	月平均流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	8.17	7.78	21.0	10.7	17.6	20.5	28.5	27.7	33.4	26.0	15.2	10.4	227
	各月所占百分比/%	3.6	3.4	9.3	4.7	7.7	9.0	12.6	12.2	14.7	11.4	6.7	4.6	100
舟曲	月平均流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	31.5	28.4	28.86	41.9	83	104	130	118	130	111	61.0	40.5	908
	各月所占百分比/%	3.5	3.1	3.2	4.6	9.1	11.4	14.3	13.1	14.3	12.2	6.7	4.5	100
武都	月平均流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	53.8	48.2	49.1	75.8	147	169	208	192	210	187	108	69.2	1 518
	各月所占百分比/%	3.5	3.2	3.2	5.0	9.7	11.1	13.7	12.7	13.8	12.4	7.1	4.6	100
碧口	月平均流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	116	104	110	166	291	334	428	391	413	347	215	145	3 061
	各月所占百分比/%	4	3	4	5	10	11	14	13	14	11	7	5	100

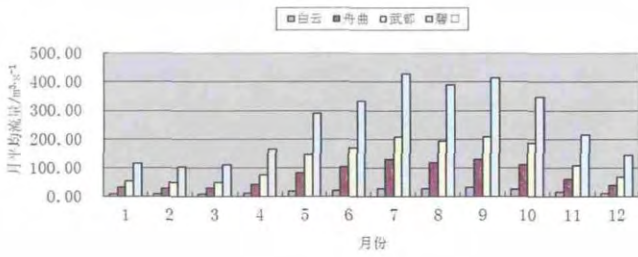


图2 白龙江干流代表站多年平均流量年内分配柱状图

Fig.2 The annual distribution of the mean annual discharge of the representative stations on the mainstream of the Bailongjiang River

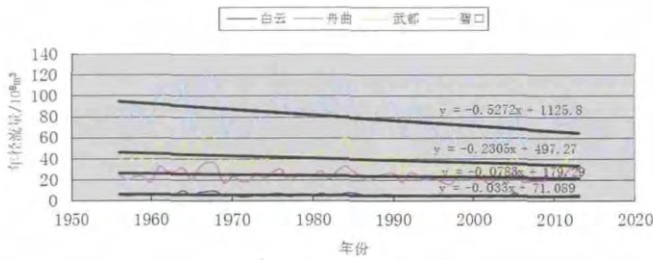


图3 白龙江干流水文站历年径流量变化过程线图

Fig.3 The hydrograph of the annual runoff at the stations on the mainstream of the Bailongjiang River in the past years

年径流量变化过程线(见图3),图3中可以明显看出4站多年径流量变化趋势呈现出逐渐缓慢减少的趋势。上游白云和舟曲水文站逐年径流减少幅度比下游武都和碧口水文站小,趋势方程的斜率依次为-0.03、-0.078、-0.230、-0.5272。

2.3 不同时段径流量变化分析

对白龙江干流白云、舟曲、武都、碧口4个水文站分1956~2013年、1956~2000年、2001~2013年3个时段统计时段平均径流量,其成果见表2。由表2可见,1956~2000年白云、舟曲、武都、碧口4个水文站分别比历年均值偏大3.9%、1.9%、3.8%、4.9%;2001~2013年白云、舟曲、武都、碧口4个水文站分别比历年均值

偏小-13.9%、-7.1%、-13.3%、-19.7%。可以看出,年径流量的变化规律是1956~2000年时段平均径流量均大于多年(1956~2013年)平均径流量,2001~2013年时段平均径流量均小于多年(1956~2013年)平均径流量。

3 未来年径流变化趋势预测

用历年径流变化趋势方程和加法模型两种方法对白龙江干流4站未来径流变化趋势进行预测。

3.1 径流变化趋势方程预测成果

用图3得出的白云、舟曲、武都、碧口4个水文站年径流多年变化趋势方程对白龙江干流4个控制站未来年径流变化趋势方程进行预测,预测结果见表3。

3.2 加法模型预测成果

3.2.1 加法预报模型原理

本次采用甘肃省水文水资源局研究开发的径流长期预报方法^[6],即在数理统计原理的基础上,分析资料系列的长、中、短周期,并假定周期系列在未来很长时间内是不变化的,通过数学模拟的方法求出模型参数,然后用延长后的周期系列进行超长期预测。主要采用周期波均值外延叠加模型、谐波分析模型和逐步回归分析模型组合形成的加法模型进行分析预测。加法预报模型方程如下:

水文资料系列 $X_t =$ 跳跃成分 $T_t +$ 趋势成分 $Y_t +$ 周期成分 $N_t +$ 相依成分 $R_t +$ 随机成分 E_t

3.2.2 白龙江干流控制站年径流预测

下面以白龙江干流白云水文站年径流长期预报为例,对加法预报模型预测成果阐述如下:

- (1)跳跃成分。经计算检验,原始资料系列从第36项数据开始发生跳跃,跳跃量为:-1.27。
- (2)趋势成分。线性趋势方程为: $y = -0.0015t + 4.895$ 。
- (3)周期成分。在信度 $r = 0.05$ 的情况下,共识别出

表2 白龙江干流控制站不同时段多年平均径流量统计

Table 2 The statistics of the mean annual runoff at the control stations on the mainstream of the Bailongjiang River in the various durations

河名	站名	1956~2013年	1956~2000年	1956~2000年	2001~2013年	2001~2013年
		平均径流量 /10 ⁸ m ³	平均径流量 /10 ⁸ m ³	均值与 1956~2013 年均值比 较/%	平均径流量 /10 ⁸ m ³	均值与 1956~2013 年均值比 较/%
白龙江	白云	5.62	5.84	3.9	4.84	-13.9
	舟曲	23.97	24.43	1.9	22.26	-7.1
	武都	39.87	41.40	3.8	34.57	-13.3
	碧口	80.12	84.06	4.9	64.37	-19.7

表3 白龙江干流控制站趋势法径流预测成果表

Table 3 The results of the runoff prediction with trend method of control station on the mainstream of the Bailongjiang River

河名	站名	径流资料系列	径流趋势预测方程式	径流预测值/10 ⁸ m ³			备注
				2015年	2020年	2025年	
白龙江	白云	1956~2013年	$y = -0.033x + 71.089$	4.610	4.444	4.28	
	舟曲	1956~2013年	$y = -0.0783x + 179.29$	21.55	21.16	20.77	
	武都	1956~2013年	$y = -0.2305x + 497.27$	32.84	31.69	30.54	
	碧口	1956~2013年 (1986年、2011~2012年缺测)	$y = -0.5272x + 1125.8$	63.48	60.84	58.20	

表4 不同周期长度和周期波振幅统计表

Table 4 The statistics of the different cycle length and periodic wave amplitude

周期	第一周期		第二周期		第三周期		第四周期		第五周期	
长度/a	17		29		21		25		9	
周期波振幅	-0.304	-0.769	0.320	-0.158	-0.260	-0.119	0.137	-0.254	-0.193	-0.132
	0.244	0.022	-0.486	-0.751	-0.088	-0.032	-0.186	-0.293	0.146	0.330
	-0.198	0.457	0.500	-0.063	-0.651	0.091	-0.248	0.159	-0.027	0.293
	0.347	-0.409	0.078	0.801	-0.483	0.213	0.112	0.051	0.001	0.184
	1.777	-0.523	1.016	0.278	0.524	-0.02	0.152	-0.327	-0.040	
	0.125	1.426	1.003	0.415	0.584	0.352	0.210	0.284		
	1.186	-0.276	0.719	-0.121	0.647	0.186	0.029	-0.210		
	-0.871	-0.323	0.626	-1.388	0.259	-0.091	-0.275	-0.598		
	-0.899		-1.101	-1.323	-0.375	0.901	0.163	0.247		
			-0.058	0.193	-0.873	-0.292	0.205	0.687		
			1.830	-0.579	-1.032		0.041	-0.355		
			-0.025	0.653			0.378	-0.176		
			-0.494	-0.552			0.325			
			-0.108	-0.427						
			0.201							

5个周期。各周期长度和周期波振幅统计见表4。

(4)相依成分。采用改进后的自回归方程： $x(i) = 0.0384x(i-1) + 0.4792x(i-2) + 0.0027$ 。

(5)预报成果表(略)，白云站实测流量与拟合(预测)流量过程线对照见图4。

用上述同样方法预测出白龙江干流舟曲、武都、碧口水文站2015、2020、2025年的年径流量。白龙江干流控制站加法模型径流预测成果见表5。

3.3 径流预测方法及成果对比分析

经过对白龙江干流白云、舟曲、武都、碧口4个水文站径流变化趋势方程预测成果和加法模型预测成果比较，径流变化趋势方程法只考虑了径流资料系列变化趋势，预测成果存在逐年减小的趋势，此法只注重了水文资料系列的连续性，而对水文资料系列的周期性、随机性无法反映出来。加法模型径流预测方法不但考

虑了径流资料系列的趋势成分，同时考虑了径流资料系列的周期成分、相依成分、跳跃成分和随机成分，预



图4 白云站实测流量与拟合(预测)流量过程线对照图
Fig.4 The comparison between the observed runoff and fit (predictive) runoff at the Baiyun station

表5 白龙江干流控制站加法模型径流预测成果表

Table 5 The results of the predicted runoff from the additive method for the control stations on the mainstream of the Bailongjiang River

河名	站名	径流资料系列	模拟误差/%	径流预测值/ 10^8m^3		
				2015年	2020年	2025年
白龙江	白云	1956~2013年	-4.3~6.2	6.80	4.09	4.65
	舟曲	1956~2013年	-19.7~13.5	20.20	20.80	28.50
	武都	1956~2013年	-10.6~16.5	40.70	40.60	43.60
	碧口	1956~2013年	-5.4~10.5	80.30	62.20	65.30

注：碧口站 1986 年、2011~2012 年缺测

测模型具有一定的理论基础，且此法在黑河水量调度来水量预测中得到广泛应用并取得良好的效果，采用加法模型径流预测成果见表 5。

4 结论

通过对白龙江干流白云、舟曲、武都、碧口 4 个水文站 1956~2013 年的月年实测径流资料进行分析，并用中长期水文预报加法模型对代表站未来径流变化进行预测，得出结论如下。

(1) 径流年内分配特征。白龙江干流 4 站 9 月多年平均流量占全年径流量比例最大，分别为 14.7%、14.3%、13.8%、14%，主汛期 6~9 月多年平均流量占全年径流量比例分别为 48.5%、53.1%、51.3%、52%，11 月~次年 3 月多年平均流量占全年径流量比例分别为 18.3%、17.8%、18.4%、19%。

(2) 径流年际变化特征。白龙江干流 4 个水文站多年径流量变化趋势呈现出逐渐缓慢减少的趋势。上游白云和舟曲水文站逐年径流减少幅度比下游武都和碧口水文站小，趋势方程的斜率依次为 -0.03、-0.078、-0.230、-0.5272；1956~2000 年时段平均径流量均大于多年（1956~2013 年）平均径流量；2001~2013 年时段平均径流量均小于多年（1956~2013 年）平均径流量。

(3) 未来径流预测成果。2015~2025 年未来径流变化趋势白云水文站总体表现为逐年减少的趋势，期间呈增大-减小-增大的锯齿形变化过程；舟曲水文站逐年缓慢增大的趋势；武都水文站 2015~2020 年呈

现逐年缓慢减少趋势，2021~2025 年间呈现逐年缓慢增大的变化趋势；碧口水文站呈现逐年缓慢减少的变化趋势。

参考文献：

- [1] 牛最荣,赵文智,黄维东,等. 黑河下游生态调水对水资源时空变化的影响分析[J]. 水文, 2011,31(5). (NIU Zuirong, ZHAO Wenzhi, HUANG Weidong, et al. Impact of ecological water diversion on temporal and spatial change of water resources in Heihe downstream [J]. Journal of China Hydrology, 2011,31(5). (in Chinese))
- [2] 牛最荣,赵文智,陈学林,等. 黑河流域中西部子水系水资源分布特征研究 [J]. 冰川冻土, 2010,32 (6). (NIU Zuirong, ZHAO Wenzhi, CHEN Xuelin, et al. Study of the water resources characteristics in the mid-west sub-water systems of the Heihe River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010,32(6). (in Chinese))
- [3] 牛最荣,赵文智,刘进琪,等. 甘肃渭河流域气温、降水和径流变化特征及趋势研究[J]. 水文, 2012,32(2). (NIU Zuirong, ZHAO Wenzhi, LIU Jinqi, et al. Study on change characteristics and tendency of temperature, precipitation and runoff in Weihe River basin in Gansu [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(2). (in Chinese))
- [4] 牛最荣,赵文智,刘进琪,等. 甘肃渭河流域土地利用及覆被变化对径流的影响研究[J]. 水利水电技术, 2012,43(4). (NIU Zuirong, ZHAO Wenzhi, LIU Jinqi, et al. Study on impact from change of land-use and land-cover on runoff in Weihe River basin in Gansu province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012,43 (4). (in Chinese))
- [5] 胡兴林,杜克胜. 干旱半干旱地区实用水文模拟技术[R]. 甘肃省水文水资源局, 2004. (HU Xinglin, DU Kesheng. The practical hydrological modeling techniques in arid and semi-arid region [R]. Hydrology and Water Resources Bureau of Gansu Province, 2004. (in Chinese))

Runoff Variation Characteristics of Representative Stations on Mainstream of Bailongjiang River and Trend Prediction

NIU Zuirong, CHEN Xuelin, WANG Xueliang

(Hydrology and Water Resources Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Bailongjiang water diversion has been determined as one of the 172 large-scale water projects by the government, which can be offered a technological support by analyzing the runoff variation characteristics of the representative stations on the

mainstream of the Bailongjiang River and predicting the change trend. Based on the observed runoff data from the 4 representative stations (Baiyun, Zhouqu, Wudu and Bikou) on the mainstream of the Bailongjiang River from 1956 to 2013, we made an analysis and forecast of the change tendency of the runoff by using an additive model combined with 3 models (the model of periodic wave mean epitaxial superposition, the model of harmonic analysis and the model of stepwise regression analysis). The results show that (1) the long-term average flow in September usually takes the highest percentage of the total in the whole year at the 4 stations, the long-term average flow from June to September often reach 50% of the total in the whole year; (2) there is a decreasing trend of the mean annual discharge at the 4 stations, of which reduction is less at the upstream stations (Baiyun, Zhouqu) than that at the downstream stations (Wudu, Bikou); (3) the prediction results of the annual runoff in 2015, 2020 and 2025 is that the runoff will be less than the long-term average runoff at the Baiyun station, more than the long-term average runoff at the Wudu station, and the annual runoff will float up or down the long-term average runoff at the stations of Zhouqu and Bikou.

Key words: Bailongjiang River Basin; variation characteristics; runoff; trend prediction

~~~~~  
(上接第 22 页)

### Application of Regional L-moments Analysis Method in Precipitation Frequency Analysis for Taihu Lake Basin

WU Junmei, LIN Bingzhang, SHAO Yuehong

(College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** This paper introduced the concept of regional L-moments analysis method via hydrometeorological approach, to precipitation frequency analysis, taking annual maximum rainfall data of 1d in the Taihu Lake Basin for an example. The 140 rainfall stations in the basin have been divided into 8 hydrometeorological homogeneous regions through four criteria, and applying three goodness-of-fit measures to the data, the best distribution has been chosen for each homogeneous region as GEV, GLO, GEV, GEV, GNO, GNO, GEV and GNO respectively, and the rainfall quantile estimates have been obtained through regional analysis method. The spatial patterns of rainfall quantiles are nearly the same for different return periods in the basin. The southwestern mountainous area exhibits to be a storm high risk area in the basin with potential threat of flash flood and debris flow disasters. The results show that regional L-moments analysis method is of academic and application values, and worth popularizing in the nationwide.

**Key words:** Taihu Lake Basin; precipitation frequency analysis; L-moment; regional analysis method; hydrometeorological homogeneous region

~~~~~  
(上接第 40 页)

Application of BP Neural Network Model in Runoff Simulating for Small Watershed

HE Yiyi^{1,2}, CHEN Xiaohong^{1,2}, ZHANG Yun^{1,2}, DING Hualong^{1,2}

(1.Center of Water Resources and Environment Research, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2.Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The change of runoff is closely related to local economic and social development, as well as regional ecological balance and water management. It is important to research the monthly runoff for better reservoir operation and water allocation. To verify the suitability of monthly runoff prediction method, the data of daily precipitation and runoff from eight hydrological stations in Binjiang River Basin were used to predict monthly runoff based on BP artificial neural network, and the results were compared with those from Runoff Coefficient Method, Xin'anjiang Model and HSPF Model. The study shows that BP artificial neural network performs obvious advantages in predicting runoff, its comprehensive uncertainty factor is 0.91, that is much higher than 0.85 of Runoff Coefficient Method and is fairly equivalent to 0.92 of Xin'anjiang Model and 0.96 of HSPF Model. But, the BP artificial neural network model was easier to operate, at the same time, it had accurate simulation for trend, so there might be a good prospect for promoting. However, the results of BP artificial neural network are generally too large, there is certain space for improving.

Key words: runoff; precipitation-runoff simulating; BP artificial neural network model; method comparison; Binjiang River Basin