

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.03.003

昭通横江流域年径流预测

宋昭义,李绅东,代堂刚

(云南省水文水资源局昭通分局,云南 昭通 657000)

摘要:针对昭通横江由南到北贯穿昭通全境,水资源量丰富,但南北差异大,南部少、北部多的特点,根据流域内水文站实测年径流、大气环流指数、海温指数及其他指数等资料系列,采用多元回归分析法拟合 1981—2010 年径流,建立了预测模型,验证、预测分析了 2011—2016 年径流量。结果表明:干流控制站预测精度高于干流上段及支流代表站,水利工程建设等人类活动影响是导致出现这样结果的主要原因;多元回归分析在横江流域径流预测中具有一定的适应性,但因指标的差异及相关参数可获取性的差异,预测结果存在区域间、等级间的差别。

关键词:多元回归分析法;年径流;预测模型;横江

中图分类号:P338 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)03-0009-04

Prediction of annual runoff over Hengjiang River Basin in Zhaotong City

SONG Zhaoyi, LI Shendong, DAI Tanggang

(Zhaotong Branch of Yunnan Province Hydrology and Water Resources Bureau, Zhaotong 657000, China)

Abstract: The Hengjiang River, which flows through Zhaotong City from south to north, has abundant water resources. However, the water resources are unevenly distributed in the river basin, with a large quantity in the north and a small quantity in the south. Based on these characteristics, the runoff of the study area from 1981 to 2010 was simulated with the multiple regression analysis method, according to the observed annual runoff from hydrological stations in the river basin, the atmospheric circulation index, the SST index, and other indices. A runoff prediction model was established to predict the annual runoff over the period from 2011 to 2016. The results show that the prediction accuracy of the main stream control stations was higher than that of the upstream and tributary stations, which was attributed to water conservancy project construction and other human activities. This study suggests that multiple regression analysis is applicable to the runoff prediction for the Hengjiang River Basin, but the prediction results are various in different regions and at different levels, due to the differences in indices and accessibility of relevant parameters.

Key words: multiple regression analysis; annual runoff; prediction model; Hengjiang River

水文时间序列的研究方法主要有传统线性时间序列分析方法、不确定性分析方法及非线性时间序列分析方法。其中,线性时间序列分析方法主要指以随机理论为基础的传统时间序列分析方法,不确定性分析方法有随机分析方法、模糊分析方法、灰色系统方法以及它们的耦合,非线性时间序列分析方法包括近年来发展的人工神经网络方法、小波分析方法、混沌理论分析等^[1-2]。多元回归分析是研究多个变量之间关系的回归分析方法^[3-4],按因变量和自变量的数量对应关系可划分为一个因变量对多个自

变量的回归分析及多个因变量对多个自变量的回归分析,按回归模型类型可划分为线性回归分析和非线性回归分析^[5]。年径流预测主要采用统计预测、天气学和数值天气预测等 3 大类方法,没有一种模型能够适用于所有的径流序列,需要进一步加强研究预测模型的适用性及预测精度^[6]。随着相关学科的发展及径流预报实践需求的逐步提升,中长期径流预报研究呈现以下趋势:更加注重多学科综合和跨学科交叉,更加注重预报方法的适用性及预报结果的可靠性和稳定性研究,更加注重高新技术的

作者简介:宋昭义(1974—),男,高级工程师,主要从事水文情报预报及水资源调查评价工作。E-mail:szy118@126.com

应用和发展^[7]。本研究着力探索多元回归分析在昭通横江流域年径流预测中的适应性,以期为横江流域水资源管理提供参考。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

横江是昭通市主要河流,流域地处 103°18'E ~ 104°56'E,26°54'N ~ 28°38'N。系金沙江下段水系的一级支流,发源于贵州威宁草海,径流面积 14 980 km²,昭通市境内面积 11 532 km²,占昭通市土地总面积的 51.4%,流域上段称洛泽河,中段称关河,下段称横江。流域由南向北流经彝良和盐津两县城后,在水富县城汇入金沙江。横江流域属低纬度、高海拔、受季风控制和弧形台阶地形影响的高原季风气候,其主要特点是夏无酷暑,冬无严寒,无明显四季之分,干湿季节分明,干季降水稀少,旱情普遍,雨季降水集中,多洪涝灾害^[8]。流域多年平均降水量在 1 000 ~ 1 300 mm 之间,属于“雨量充足(湿润区)”,水资源总量丰富。降水量的多年变化不大,变差系数 *C_v* 值在 0.15 ~ 0.25 之间,但年内分配很不均匀,主要集中在 5—10 月,占全年降水量的 85% ~ 90%;在空间分布上也很不均匀,总的分布是北部多、南部少,高山多、河谷坝区少。流域南部的昭阳区是昭通市政治、经济、文化中心,其人均、坝均水资源量为全市最低水平,人均水资源量低于 1 000 m³,属于严重缺水。鉴于此,横江流域内水利工程的合理调度,关乎区域工农业生产及城镇生活用水安全。选用适宜的预测方法对横江流域来水进行超前研判,对合理调度水资源具有重要意义。

1.2 研究方法

选取多元回归分析开展预测研究,以寻求地球-大气系统角动量、热量和水分的输送和平衡、各种能量间相互转换、海温变化等与陆地水文要素变化间的函数关系。根据横江流域干支流水文控制站实测年径流、大气环流指数、海温指数、其他指数等资料系列,采用多元回归分析法拟合 1981—2010 年共 30a 径流,以相关系数较大寻求影响横江流域年径流的主要气候因子,按回归分析标准误差、预测期拟合效果等对预报因子进行优选,建立线性回归模型,按模型参数验证、预测 2011—2016 年径流量。以 2011—2015 年 5 a 实测径流检验预测精度,研究多元回归分析在横江流域年径流预测中的适应性。

2 径流预测

2.1 径流代表站

横江河长 306 km,由南向北贯穿昭通市,流域水

系发达,河谷深切。流域内有 8 个水文站(图 1),干流主要控制站点为豆沙关、彝良。其一级支流主要有柿子坝汇入的白水江和岔河汇入的洒渔河。白水江发源于贵州省赫章县毛姑,河长 128 km,流域面积 3 710 km²,区内面积 3 236 km²,控制站点为牛街;洒渔河发源于五莲峰南段 3 110 m 的鲁甸县水磨乡,河长 186 km,流域面积 3 558 km²,控制站点为箐口塘。为考察横江流域干支流径流变化,选取豆沙关、牛街等 4 个水文站径流资料进行分析,横江流域干支流代表水文站基本情况见表 1。

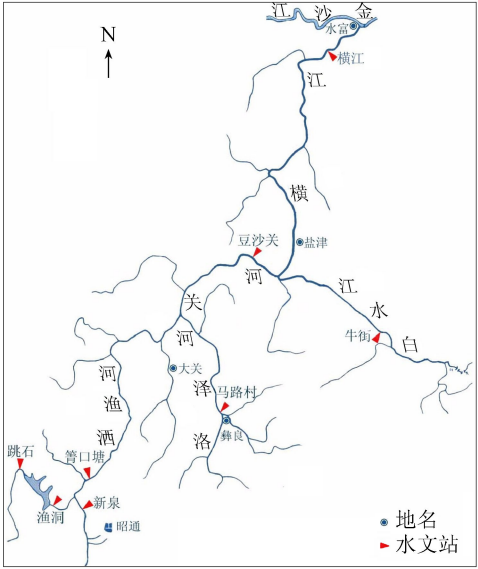


图 1 横江流域水文站点分布示意图

表 1 横江流域干支流代表水文站基本情况

站名	河流名称	流域面积/km ²	观测项目	资料年限
豆沙关	关河	9 410	水位、流量、泥沙、降水、水质、蒸发	1958—2015 年
彝良	洛泽河	3 667	水位、流量、降水、水质	1958—2015 年
箐口塘	洒渔河	2 109	水位、流量、泥沙、降水、水质、蒸发	1954—2015 年
牛街	白水江	2 838	水位、流量、泥沙、降水、水质、蒸发	1958—2015 年

2.2 年径流预测

根据前期水文气象要素,用成因分析与数理统计的方法,对未来较长时间的水文要素进行科学的预测,称为中长期水文预报^[9]。预见期在 15 d 以上、1 a 以内的称为长期预报,目前主要采用天气学法、数理统计法、宇宙—地球物理分析方法和中长期水文预报模型法建立预报模型^[10]。采用多元回归分析法建立年径流预测模型,并对拟合精度进行检验。

2.2.1 预报因子

为考察横江流域干支流径流变化趋势,选用豆沙关、彝良、箐口塘、牛街等水文站 1981—2015 年实测径流资料系列作为因变量,自由变量采用中国气

象局国家气候中心提供的 1980—2015 年逐月大气环流指数(88 项)、海温指数(26 项)、其他指数(16 项),共 130 项。

2.2.2 多元回归分析

用 Excel“CORREL 函数”计算因变量与 130 项指数的相关系数,初选出与横江流域各代表站年径流相关系数较大且无缺测情况的预报因子。用 Excel“数据分析”按选定指数进行多元回归分析,见式(1)~(3)。根据回归统计参数、方差分析结果(表 2),剔除相关关系较差的指数项,优选确定预报因子(表 3),建立线性回归模型,见式(4)。

$$\hat{y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1X_1 + \cdots + \hat{b}_kX_k \tag{1}$$

$$R' = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}} \tag{2}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{3}$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_m \tag{4}$$

式中: $\hat{y}$ 为预测值的估值,m³/s; $\hat{b}_0$ 为初估常数项, $\hat{b}_1, \hat{b}_2, \cdots, \hat{b}_k$ 为初估回归系数; $X_1, X_2, \cdots, X_k$ 为初选预报

因子指数; k 为初选预报因子个数; y_i 为历年实测径流量,m³/s; y 为预测、拟合年径流量,m³/s; $\bar{y}$ 为多年平均实测年径流量,m³/s; R' 为复相关系数; R^2 为线性回归方程的决定系数; b_0 为常数项, $b_1, b_2, \cdots, b_n$ 为回归系数; n 为所采用资料系列的长度; m 为预报因子个数; $x_1, x_2, \cdots, x_k$ 为预报因子指数。

按横江流域径流特性^[6],结合表 3 选定指数所属月份及其监测频次,分析得到各代表站回归模型预见期:豆沙关 205 d、彝良 175 d、箐口塘 144 d、牛街 144 d。

按线性回归模型(1),用代表水文站 1981—2010 年 30 a 径流量及 1980—2009 年大气环流指数、海温指数等拟合模型参数(图 2),按 2010—2015 年相应指数验证、预报 2011—2016 年 6 a 径流量,结果见表 4。

预测 2016 年干流控制站豆沙关年平均流量 130 m³/s,与常年(建站以来)持平;干流上段彝良站 44.3 m³/s,较常年偏多 1.4%;支流洒渔河箐口塘站 19.8 m³/s,偏多 11.2%;支流白水江牛街站 78.6 m³/s,偏多 8.0%。将豆沙关、牛街水文站预测值合并计算,预测 2016 年横江出口断面年平均流量 265 m³/s,偏多 3.1%,为平水年。

表 2 横江流域代表站年径流相关分析及回归误差

站名	预报因子		回归统计				方差分析	
	$ R $ 下限	因子项数	线性回归系数	拟合系数	调整后的拟合系数	标准误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	F 统计量	F 检验显著值
豆沙关	0.41	12	0.877	0.769	0.606	13.48	4.711	0.002 0
彝良	0.42	11	0.847	0.717	0.544	6.913	4.145	0.003 8
箐口塘	0.47	13	0.912	0.831	0.693	2.386	6.045	0.000 5
牛街	0.55	12	0.721	0.520	0.182	11.61	1.537	0.203 3

注: $|R|$ 下限为自变量与因变量间最小相关系数。

表 3 横江流域代表站年径流预报因子及回归系数

豆沙关				彝良				箐口塘				牛街			
月份	指数	b_i	σ_{si}	月份	指数	b_i	σ_{si}	月份	指数	b_i	σ_{si}	月份	指数	b_i	σ_{si}
1	2	12.770	7.302	1	13	0.343	0.288	1	9	-12.220	14.760	4	45	-0.026	0.058
1	15	0.368	1.000	1	15	-0.009	0.495	1	13	0.539	0.516	5	65	0.183	0.103
1	23	-1.200	2.017	1	23	-1.879	0.874	1	15	-0.481	1.045	5	86	0.628	0.476
2	8	-20.130	30.100	2	19	-0.123	0.861	1	20	0.788	1.113	6	35	-0.452	2.068
4	51	-0.007	0.009	4	51	-0.001	0.005	2	19	-0.106	0.416	6	54	-0.002	0.010
5	51	0.001	0.012	5	59	2.345	1.803	2	48	0.600	1.350	8	63	0.064	0.131
5	65	0.194	0.215	5	61	-1.062	1.544	2	72	-0.850	2.775	10	45	-0.052	0.130
5	66	-0.002	0.125	5	65	0.074	0.101	5	59	0.365	0.436	10	63	-0.231	0.385
5	115	0.206	3.135	5	66	-0.011	0.063	5	66	0.014	0.012	10	113	-1.985	5.997
6	114	7.984	10.940	5	115	0.548	1.597	8	69	0.126	0.047	11	26	-2.540	2.428
7	114	13.220	13.840	11	50	1.851	0.799	11	49	0.425	0.795	12	64	-0.006	0.021
10	47	10.880	5.329					11	50	0.658	0.411	12	114	-4.218	6.936
								12	32	0.095	0.196				
$b_0 = -514.7$				$b_0 = -216.1$				$b_0 = -101.2$				$b_0 = -137.7$			

注:月份、指数分别指历年某月、因变量相关关系较好的指数项;自变量指数编号按其权重分类排序; σ_{si} 为第 i 项指数回归计算标准误差;指数 2 为北非副高面积指数(North African subtropical high area index);指数 15 为印度副高强度指数(Indian subtropical high intensity index);指数 23 为北半球副高脊线位置指数(northern hemisphere subtropical high ridge position index)……详见中国气象局国家气候中心网站。

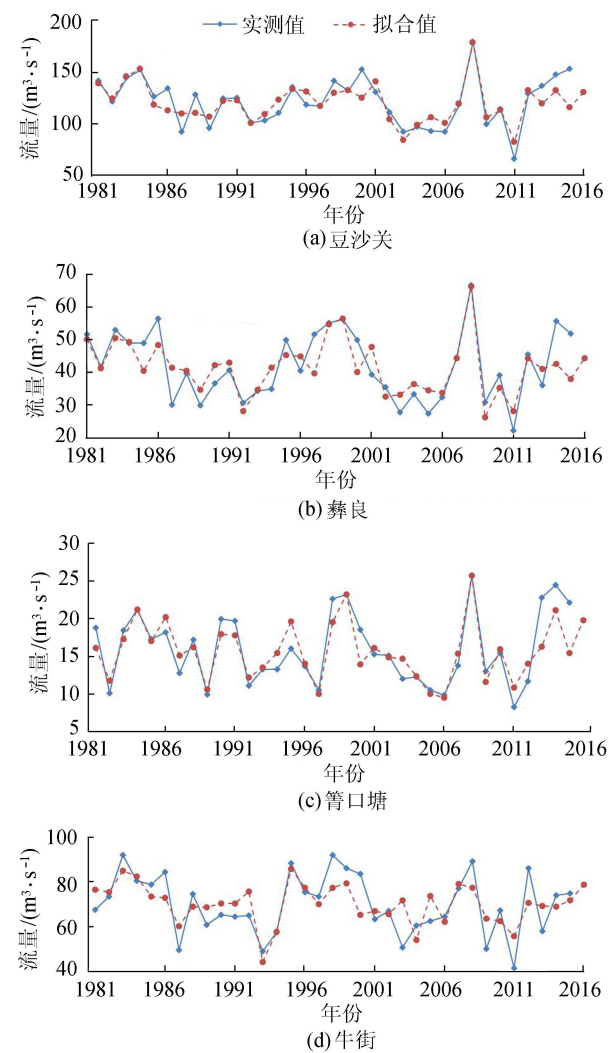


图2 横江流域代表站年径流拟合效果

2.2.3 预报精度

按横江流域干支流代表站 2011—2015 年 5 a 实测、预测年径流,用式(5) 计算预报过程与实测过程之间的确定性系数,按径流实测值的 20% 作为许可误差^[11],计算预测合格率(表 5),以评判多元回归分析在横江流域年径流预测中的适应性。

$$D_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_c(i) - y_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [y_0(i) - \bar{y}_0]^2} \quad (5)$$

表5 横江流域代表站年径流预测精度

年份	豆沙关		彝良		箐口塘		牛街	
	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%
2011	16.7	25.4	6.1	27.4	2.6	31.1	14.1	33.9
2012	2.9	2.2	-1.1	-2.4	2.3	19.6	-15.4	-17.9
2013	-16.7	-12.3	4.9	13.4	-6.5	-28.6	11.0	19.0
2014	-15.4	-10.4	-13.2	-23.7	-3.3	-13.6	-4.8	-6.5
2015	-37.0	-24.2	-13.8	-26.6	-6.7	-30.1	-3.0	-4.0
确定性系数	0.56		0.41		0.49		0.51	
合格率/%	60		40		40		80	

式中: D_c 为确定性系数(取 2 位小数); $y_0(i)$ 为实测值; $y_c(i)$ 为预报值; $\bar{y}_0$ 为实测值的均值; n 为资料系列长度^[12]。

表4 横江流域代表站年径流实测、预测结果对照

年份	豆沙关		彝良		箐口塘		牛街	
	实测	预测	实测	预测	实测	预测	实测	预测
2011	65.8	82.5	22.1	28.2	8.29	10.9	41.5	55.6
2012	129	132	45.4	44.3	11.7	14.0	86.1	70.7
2013	136	120	36.1	41.0	22.7	16.2	58.0	69.0
2014	147	132	55.7	42.5	24.5	21.1	73.8	69.0
2015	153	116	51.8	38.0	22.1	15.4	74.8	71.8
2016	130		44.3		19.8		78.6	

由表 5 可见,干流控制站豆沙关水文站年径流预测确定性系数 0.56,合格率 60%,精度等级为丙级。支流白水江牛街水文站径流预测确定性系数 0.51,合格率 80%,精度等级为丙级。豆沙关、牛街水文站 2016 年径流预测成果可作为参考性预报。干流上段彝良、支流洒渔河箐口塘 2 个水文站径流预测确定性系数分别为 0.41、0.49,合格率均为 40%,水利工程建设等人类活动影响是误差产生的主要因素。

3 结 论

多元回归分析法预测结果物理成因清晰。研究表明,多元回归分析对于横江流域年径流预测具有一定的适应性,2016 年径流预测结果对横江干流及其主要支流白水江水利水电工程调度具有重要参考价值。干流控制站豆沙关、支流白水江牛街站预测精度等级为丙级,为参考性预报,干流上段彝良、支流洒渔河箐口塘两站预测精度偏低,水利工程建设等人类活动影响是误差产生的主要原因,成果供参考。预测 2016 年横江干支流年径流量较水文站建站以来实测均值持平至偏多 11.2% 不等,以支流洒渔河箐口塘偏多最为突出。箐口塘水文站以上流域为昭鲁坝区等,是昭通市重要经济区,2016 年来水略丰,对“滇字一号”昭通渔洞大(二)型水库蓄水有

management to avoid unintended consequences; a case study of Portugal using system dynamics[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 130(1): 1-9.

[18] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 40-45. (CAI Ming, LI Huaen, ZHUANG Yongtao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(7): 40-45. (in Chinese))

[19] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.

[20] 李怀恩, 王莉, 史淑娟. 南水北调中线陕西水源区非点源总氮负荷估算[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 541-544. (LI Huaen, WANG Li, SHI Shujuan. Estimation of total nitrogen load from non-point sources in Shanxi Province water source area of the central line of South-North Water Diversion Project[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2010, 40(3): 541-544. (in Chinese))

与 技术, 2014, 34(1): 162-163. (CHEN Huilin, ZHU Kai. Research progress on characteristics and prediction of annual runoff[J]. Agriculture and Technology, 2014, 34(1): 162-163. (in Chinese))

[7] 李红波, 夏潮军, 王淑英. 中长期径流预报研究进展及发展趋势[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 36-38. (LI Hongbo, XIA Chaojun, WANG Shuying. Research progress and development trend of medium and long term runoff forecasting[J]. Yellow River, 2012, 34(8): 36-38. (in Chinese))

[8] 云南省水文水资源局昭通分局. 昭通市水文特性研究[R]. 昭通: 云南省水文水资源局昭通分局, 1997.

[9] 范钟秀. 中长期水文预报[M]. 南京: 河海大学出版社, 2016.

[10] 包为民. 水文预报[M]. 4 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[11] GB/T 22482-2008 水文情报预报规范[S].

[12] 宋昭义, 谢开荣, 肖军, 等. 鲁甸“8·03”地震牛栏江红石岩堰塞湖水文预报误差及成因分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 6-11. (SONG Zhaoyi, XIE Kairong, XIAO Jun, et al. Ludian 8.03 earthquake Kraal River Hongshiyuan lake hydrological forecasting errors and the causes analysis[J]. Technology of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2016, 47(1): 6-11. (in Chinese))

[13] 张闻胜, 王银堂. 时间序列分解模型在水文要素中长期预报中的应用[J]. 水文, 2001, 21(1): 21-24. (ZHANG Wensheng, WANG Yintang. Application of time series decomposition model in long term prediction of hydrological elements[J]. Journal of China Hydrology, 2001, 21(1): 21-24. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-08-26 编辑: 徐娟)

+++++

(上接第 12 页) 利, 对灌区工农业生产及城镇生活用水安全有利. 工作中, 需加入时间序列分解模型^[13]等其他预测方法, 结合区域水文气象特点、气候趋势预测等对预测结果进行科学研判, 提高预报精度, 为流域水资源管理提供科学依据。

参考文献:

[1] 曹辉, 黄强, 白涛, 等. 径流预测方法对比分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(9): 36-37. (CAO Hui, HUANG Qiang, BAI Tao, et al. Comparative analysis of runoff forecasting methods[J]. Yellow River, 2009, 31(9): 36-37. (in Chinese))

[2] 胡己坤, 曹丽青, 葛朝霞, 等. 非线性逐步回归在宜昌站年径流量预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 1-4. (HU Jikun, CAO Liqing, GE Zhaoxia, et al. Application of nonlinear stepwise regression in prediction of annual discharge at Yichang station[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(1): 1-4. (in Chinese))

[3] 杨肖丽, 任立良, 江善虎, 等. 西辽河源头流域径流变化趋势及影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 37-41. (YANG Xiaoli, REN Liliang, JIANG Shanhu, et al. Analysis of trend and influencing factors of runoff variation in headwater basin of West Liaohe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 37-41. (in Chinese))

[4] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.

[5] 金光炎. 水文水资源随机分析[M]. 北京: 中国科技大学出版社, 1993.

[6] 陈汇林, 朱凯. 年径流的特征及预测研究进展[J]. 农业