

改进 ARX 模型在襄阳站年径流序列预测中的应用

杨娜, 兰平

(南京信息工程大学水文气象学院, 江苏 南京 210044)

摘要:在气候变化和人类活动的影响下,我国部分流域的年径流过程表现出了复杂性波动,常规的统计分析预测模型都有其一定的局限性。多因子自回归模型(ARX 模型)可以较高精度地对具有复杂性波动的系统进行模拟。以受人类活动影响和气候变化影响较为显著的汉江流域的襄阳站为研究对象,采用改进后的 ARX 模型对襄阳站 1960~2002 年的年径流过程进行了模拟,并与多种常用的统计分析方法进行了比较,验证了 ARX 模型在模拟具有突变性的年径流过程的良好性能。根据所率定模型对襄阳站 2003~2012 年的年径流进行了预测,预报合格率达到 90%,说明了 ARX 模型在中长期径流预报中较好的适用性。

关键词:年径流预测;改进 ARX 模型;气候变化;襄阳站

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)05-0058-05

1 引言

受人类活动和全球气候变化的影响,流域水循环系统的动力条件已经发生了变化。这种变化表现在两个方面:首先动力结构更为复杂,从单一自然系统结构变为“人工-自然”二元水循环动力结构^[1],其次,水循环系统中的一些要素特征已经发生了演变,如蒸发、气温、降雨、径流等因子^[2]。这些演变在一定程度上加剧了我国部分流域径流序列的复杂性^[3-4],王元坤^[5]、彭涛^[6]等基于样本熵理论对我国多个流域径流序列的复杂性进行了分析,揭示出变化背景下径流序列呈现出各种复杂性波动。这对准确模拟并预报河川径流的未来演变提出了挑战。

基于径流序列的复杂性波动和趋势演变,传统的时间序列分析法(AR, ARMA 等)已难以适应变化环境下的径流预测,而单一因子分析法如小波分析法^[7]、混沌学^[8]等,虽然在一定程度上提高了径流预报的精度。但由于并不考虑外界影响因子对径流变化规律的影响,应用具有一定的局限性。在传统的时间序列分析方法中加入多因子影响因素成为目前关注的热点。ARX 模型是一种系统辨识方法,具有较强的抗噪声能

力,适用于多维结构的参数识别,可以较高精度地对具有复杂性波动的系统进行模拟^[9],目前常用于系统控制工程中。本文引入 ARX 模型对具有复杂波动性径流过程进行模拟和预测。

2 研究方法

对变化环境下径流演变规律的探索可以从系统分析的角度进行。如果将所研究河流视为一个局部的动态系统,则径流为该系统在陆面上的一个重要的输出,影响径流输出结构特征的因子则是系统的输入。ARX 模型(多因子自回归模型)是具有多输入和输出通道的系统辨识模型,其在输入和输出数据的基础上,根据某一准则,利用实测数据,从一类模型中选取一个拟合得最好的模型,并利用当前实测的输入和输出数据预测系统输出的未来演变^[10],它不仅能够考虑自身系列在时间上的变化规律,同时可以考虑多个影响因子及其在时间上的变化规律。ARX 模型结构简单,具有成熟的参数计算方法。其一般数学表达形式为:

$$A(q)y(t)=B(q)u(t)+e(t) \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 为输出向量; $u(t)$ 为输入向量; A 、 B 为系数矩阵; q 为模型的阶次; $e(t)$ 是均值为 0 的独立随机白噪

收稿日期:2015-09-30

基金项目:江苏省高校自然科学基金项目(14KJB170018);国家自然科学基金项目(41401612)

作者简介:杨娜(1983-),女,河南驻马店人,讲师,博士,主要研究方向为水文气象。E-mail: ynnuist@hotmail.com

声序列。

当有多个输入和输出时,模型中 $y(t)$ 和 $u(t)$ 为矩阵的形式。通过对该模型的反复试验发现:虽然 ARX 模型能够较好地对长时间序列进行模拟,但其输入向量 $u(t)$ 是不考虑 t 时刻的当前值,而是从其后移一刻 $t-1$ 开始回归,这种非同步性一定程度上弱化了输入因子与所预测变量的相关性,从而使得模型的模拟效果不太理想。本文对该模型进行了改进,使系数 B 考虑输入因子的当前值,即利用输入因子的当前状态来影响输出因子的当前状态。这种改进可以有效提高模型的模拟精度和预测精度。改进后的模型结构为:

$$[y(t)y(t-1)\cdots y(t-q)] \begin{bmatrix} 1 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(t)u_1(t-1)\cdots u_1(t-q_1-1) \\ u_2(t)u_2(t-1)\cdots u_2(t-q_2-1) \\ \vdots \\ u_n(t)u_n(t-1)\cdots u_n(t-q_n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1^{(1)}B_2^{(1)}\cdots B_n^{(1)} \\ B_1^{(2)}B_2^{(2)}\cdots B_n^{(2)} \\ \vdots \\ B_1^{(q_n)}B_2^{(q_n)}\cdots B_n^{(q_n)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 为输入向量的个数; q_n 为第 n 个输入向量的阶数。

通过公式(2)的结构可以看出,模型既考虑了预测变量在时间演变中的客观规律,又充分利用了输入因子个体及其在时间过程中的影响,而且模型并不强调各因子的物理意义,具有较好的适用性。通过辨识 ARX 模型的时间系数矩阵和,可以确定模型的结构,对输出向量 $y(t)$ 的下一阶段进行预测。ARX 模型参数的估计采用最小二乘估计法,模型阶次的辨识采用最小信息准则(AIC),模型残差的有效性检验采用残差相关分析法,相关理论的详细描述可参考文献[11]。

3 襄阳站径流模拟模型的建立

位于汉江中游的襄阳站,其站内 85%的径流来自于汉江干流,其余来自于南河、北河和唐白河、小清河。近年来,许多研究已经证实,汉江中下游流域的径流大部分呈现减少趋势^[12]。通过绘制襄阳站 1960~2012 年的径流距平变化图(见图 1)可以看出,襄阳站的年平均径流整体呈现较为明显的减少趋势,而且这种偏枯的现象在 20 世纪 80 年代以后表现得更为明显。采用非参数统计检验法(Mann-Kendall)对襄阳站的径流时间序列进行检验后可以看出(见图 2a): UF 系列在 1966 年以后,除了若干丰水年以外基本上维持在 0 值以下;并且 UF 和 UB 曲线在 0.05 显著性水平阈值范围内存在一个交叉点,即突变点,也就是说,径流在

1986 年发生了由丰到枯的突变。

为了确定影响径流发生演变的环境因子,对汉江中上游流域 20 个气象观测站的降雨和气温观测资料的进行了统计分析,发现:汉江中上游流域的年降雨量的整体变化趋势并不明显,而且在 1986 年以后与径流的相关性变小。年平均气温的增加趋势非常明显,且在 20 世纪 90 年代中期出现了由冷转暖的突变(见图 2b),突变前后年平均气温增幅达到 0.5°C 。因此,除降雨外,气温也将作为径流预测模型的影响因子。

其次,上游水库蓄水调节也对襄阳站的径流演变产生了一定的影响。通过比较丹江口入库年径流与出库年径流过程发现:以 1985 年为节点,丹江口的多年平均入库径流量减少幅度为 18.9%,而其出库控制站黄家港和下游襄阳站的多年平均径流量则分别减少了 21.1%和 20.8%。出

库年径流量的减少幅度大于丹江口入库年径流量的减少幅度,说明人类活动的影响在一定程度上加剧了径流的演变。

基于以上分析可知,襄阳站的年径流过程受到气候变化和人类活动的共同影响,发生了突变,径流序列的复杂性较为明显,只考虑径流系列本身的时间序列分析方法明显无法合理拟合襄阳站的径流变化过程。由于人类活动影响较大,径流与气象因子的变化规律同步性较差,多元回归模型的模拟精度也会受到影响。因此,从系统辨识的角度综合考虑气候变化和人类活动的共同影响,采用 ARX 模型建立多输入模型,通过对各输入因子参数的时效性进行合理控制,可以弱化序列不稳定性对模拟模型精度的影响,在一定程度上提高预测的精度。

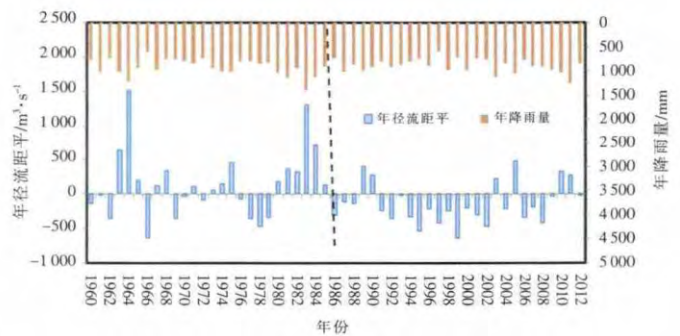


图 1 襄阳站 1960~2012 年径流变化与降雨系列图

Fig.1 The annual flow anomaly change and precipitation change at the Xiangyang station during 1960-2012

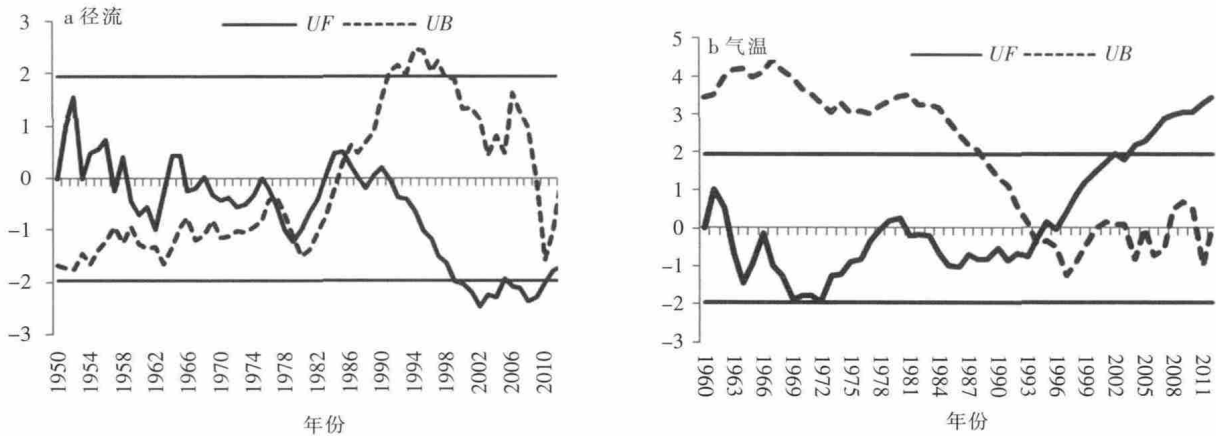


图2 襄阳站径流的M-K突变趋势图(a)和汉江中上游气温M-K突变趋势图(b)

Fig.2 Manna-Kendall curve of the annual discharge at the Xiangyang station during 1950-2012 (a) and temperature in the middle and upper reaches of the Hanjiang River during 1960-2012 (b)

4 模型参数的率定及结果分析

综合考虑气候变化和人类活动的影响,建立ARX模型对襄阳站的年径流过程进行模拟。输入因子为年降雨和年平均气温,统计资料汉江中上游20个气象观测站的雨量观测资料和气温观测资料进行计算;输出为襄阳站的年径流。模型阶数和参数通过matlab编程进行率定。

4.1 多模型模拟效果对比

为了检验ARX模型的模拟效果,同时采用传统的时间序列模型:自回归模型(AR)、自回归滑动平均模型(ARMA);基于水量平衡的多元回归模型(MR)对襄阳站的年径流过程进行了分段模拟,并将各模型模拟值与实测值散点图的相关系数 R^2 及标准均方误差(NMSE)列于表1中。通过对比可以看出:在径流突变前(1960~1985年),采用ARMA模型进行模拟,模拟精度可以达到0.7285。但在丹江口竣工(1973年)之

后,年径流在气候变化和人类活动的共同影响下呈现了由丰转枯的突变,只考虑自身时间序列变化规律的ARMA模型已不再使用,拟合率降至0.5024。相比较而言,考虑了气候变化影响的多元回归模型(MR)的拟合效果在两个阶段表现较为稳定,均优于单一参数的回归模型,但径流发生突变后的模拟精度也大大降低。可见,常规的数理统计模型在对具有突变特征的径流过程进行模拟时,模拟效果会受到较大影响。但采用改进的ARX模型,由于较好地兼顾径流过程自身的发展规律,又考虑多种因子影响的回归,模拟效果并未受到影响,且表现良好。这说明:在传统的时间序列模型中,改进的ARX模型能够较好地适用于受到人类影响和气候变化影响较大地区的河川径流模拟。

4.2 ARX模型年径流预测结果

基于ARX模型较优的模拟性能,取1960~2002年作为模型率定期,取2003~2012为检验期,对襄阳

表1 各模型模拟结果与实测值散点图相关系数及标准均方误差的比较

Table1 R^2 and NMSE of the four models in the different periods

模型		AR	ARMA	MR	ARX
径流突变前(1960~1985)	R^2	0.5363	0.7285	0.745	0.8802
	NMSE	50%	28%	25%	12%
有丹江口影响(1974~2012)	R^2	0.2332	0.5024	0.707	0.9067
	NMSE	89%	50%	29%	10%
整个径流过程(1960~2012)	R^2	0.3692	0.5292	0.701	0.8534
	NMSE	65%	48%	30%	15%

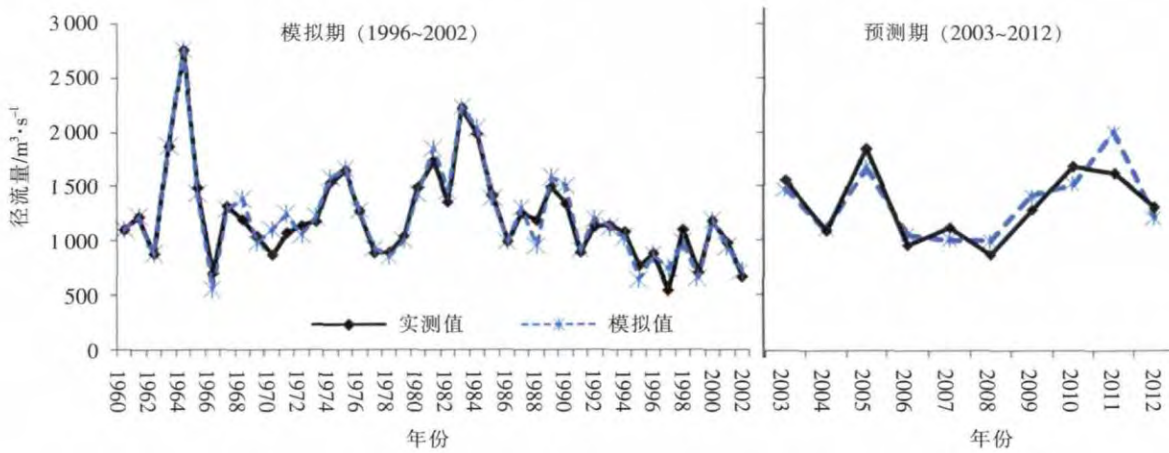


图3 1960~2012年年径流模拟及预测效果

Fig.3 Comparison between the observed and simulated runoff in the simulation period from 1960 to 2002 and those in the prediction period from 2003 to 2012

表2 改进RAX模型的年径流预测结果

Table2 The predicted result of the annual runoff based on the improved RAX model

年份	实测值/m³·s⁻¹	预测值/m³·s⁻¹	相对误差
2003	1 458	1 380	5%
2004	1 020	1 036	2%
2005	1 719	1 557	9%
2006	895	989	11%
2007	1 050	940	10%
2008	820	936	14%
2009	1 200	1 320	10%
2010	1 570	1 420	10%
2011	1 510	1 868	24%
2012	1 220	1 135	7%

呈现的复杂波动性，模型的自回归阶数也较高。图3列出了模拟系列和实测系列的对比，可以看出改进ARX模型较好的模拟效果。

使用率定之后的模型对襄阳站2003~2012年的年径流过程进行预测,预测结果见图3和表2。从预测结果来看,合格率达到90%,改进ARX模型能够较好地满足预测要求。

5 结论

通过对襄阳站的年径流变化特征的分析,认为其年径流在气候变化和人类活动的共同影响下呈现出复杂的突变性。以降雨、气温为输入因子,采用具有多输入多输出通道的改进ARX模型建立了襄阳站的年径流预测模型。并与常规的统计分析方法AR、ARMA、MR的模拟效果进行了比较,验证了改进ARX模型在模拟具有不稳定性和突变性年径流序列具有较好的优势。在此基础上利用改进ARX模型对襄阳站的年径流进行了预测,预测合格率达到90%,满足中长期径流预报的要求。

参考文献:

[1] 武夏宁,江燕. 年径流预报的非线性混合回归模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2010,(11):8-10. (WU Xianing, JIANG Yan. Nonlinear mix regression model for annual flow forecasting [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010,(11):8-10. (in Chinese))

[2] 刘春蓁. 自然气候变异与人为气候变化对径流影响研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2008,4(3):133-139. (LIU Chunzhen. Advances in studying impacts of natural climate variability and anthropogenic climate change on streamflow [J]. Advances in Climate Change

站的年径流进行预测。首先通过模型辨识,得到率定期的ARX441模型,模型模拟精度为0.8614,标准均方误差值(NMSE)14%,模型拟合精度满足要求。各参数值如下:

$$A(q)=1-0.1313q(t-1)+0.09q(t-2)-0.078q(t-3)-0.369q(t-4) \quad (3)$$

$$B_1(q)=1.92q(t)+0.467q(t-1)+0.379q(t-2)-0.265(t-3) \quad (4)$$

$$B_2(q)=-50.47q(t)$$

式中:A为输出时间序列—径流的系数,阶数为4;B₁为降雨系列的系数矩阵,阶数为4;B₂为气温系列的系数矩阵,阶数为1。从率定后的模型结构可以看出:由于降雨与径流的相关性较大,因此径流对降雨因子的依赖性较强,阶数较高;气温与径流的相关性较弱,径流对气温因子的依赖性较弱,阶数较低。由于径流系列

- Research, 2008,4(3):133-139. (in Chinese))
- [3] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性分析[J]. 水科学进展, 2011,22(3):307-314. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu. The sensitivity of runoff to climate change in different climatic regions in China[J]. Advances in Water Science, 2011,22(3):307-314. (in Chinese))
- [4] Wang G.Q., Yan X.L., Zhang J.Y., et al. Detecting evolution trends in the recorded runoffs from the major rivers in China during 1950 - 2010[J]. Journal of Water and Climate Change, 2013,4(3): 252-264.
- [5] 王元坤, 王栋. 基于样本熵理论的长江干流径流序列复杂性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015,43(3):203-207. (WANG Yuankun, WANG Dong. Analysis of complexity of runoff series based on sample entropy in Yangtze River [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2015,43(3):203-207. (in Chinese))
- [6] 彭涛,陈晓宏,庄承彬. 基于样本熵的东江月径流序列复杂性分析[J]. 生态环境学报, 2009,18(4):1379-1382. (PENG Tao, CHEN Xiaohong, ZHUANG Chengbin. Analysis on complexity of monthly runoff series based on sample entropy in the Dongjiang River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009,18(4):1379-1382. (in Chinese))
- [7] 王秀杰,封桂敏,耿庆柱. 小波分析组合模型在日径流预测中的应用研究[J]. 自然资源学报, 2014,29(5):885-893. (WANG Xiujie, FENG Guimin, GENG Qingzhu. Application research on combined models based on wavelet analysis in prediction of daily runoff [J]. Journal of Resources Research, 2014,29(5):885-893. (in Chinese))
- [8] 李红霞,许士国,徐向舟,等. 混沌理论在水文领域中的研究现状及展望[J]. 水文, 2007,27(6):1-5. (LI Hongxia, XU Shiguo, XU Xiangzhou. Current status and prospect of chaos theory research in hydrology [J]. Journal of China Hydrology, 2007,27(6):1-5. (in Chinese))
- [9] 华晨,李柠,李少远. 分布参数系数的时空 ARX 建模及预测控制[J]. 控制理论与应用, 2011,28(12):1711-1716. (HUA Chen, LI Ning, LI Shaoyuan. Time-space ARX modeling and predictive control for distributed parameter system [J]. Control Theory & Application, 2011,28(12):1711-1716. (in Chinese))
- [10] 王乐一,赵文斌. 系统辨识:新的模式、挑战及机遇[J]. 自动化学报, 2013,39(7):933-939. (WANG Leyi, ZHAO Wenxiao. System identification: new paradigms, challenges, and opportunities [J]. Acta Automatica Sinica, 2013,39(7):933-939. (in Chinese))
- [11] Lennart Ljung. System Identification: Theory for the User [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [12] 胡安焱,张自英,王菊翠. 水利工程对汉江中下游水文生态的影响[J]. 水资源保护, 2010,26(3):5-9. (HU Anyan, ZHANG Ziyang, WANG Cuiju. Impact of hydraulic engineering on hydro-ecology in middle and lower reaches of Hanjiang River [J]. Water Resources Protection, 2010,26(3):5-9. (in Chinese))

Application of Improved ARX Model in Predicting Annual Flow at Xiangyang Station

YANG Na, LAN Ping

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

Abstract: With the impact of climate change and human activities, river flow regime presents complex fluctuation in recent years, which brings limitation to the application of those normal statistical analysis flow forecast model. The multi-factor auto-regression model (ARX) can simulate the complex fluctuation system with higher precision and is improved to simulate and forecast the river flow of a highly impacted river reach—the Xiangyang station from 1960 to 2002. By comparing with some traditional simulation methods, the result proves that the improved RAX model performs the best. Based on the RAX simulation model, annual flow at the Xiangyang station from 2003 to 2012 was forecasted. The reliability rate of forecast is 90%, which indicates the applicability of the RAX model in mid-long term river flow forecast.

Key words: annual runoff forecast; improved ARX model; climate change; Xiangyang Station