



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.002

赵建世, 王君, 赵铜铁钢. 非稳态条件下的中长期径流耦合预报方法[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 07-12. ZHAO Jian shi, WANG Jun, ZHAO Tong tie gang. Coupled model for long term runoff prediction considering non stationarity[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 07-12. (in Chinese)

非稳态条件下的中长期径流耦合预报方法

赵建世, 王君, 赵铜铁钢

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 气候变化会导致水文序列的非稳态性, 从而给水文预报带来新的挑战。以疏勒河上游为例, 提出了一种适于非稳态条件下的新的中长期径流预报方法。根据疏勒河径流的补给来源及其受气候变化的影响, 按照时间序列模型思路, 依次提取趋势项和周期项, 对剩余的随机项采用基于水文-气象遥相关模型, 构建了时间序列与水文-气象遥相关的耦合模型。对比分析时间序列法、水文-气象遥相关法和耦合预报法对昌马堡站径流预报的结果, 发现耦合预报方法不仅精度最高、模型可信度最高, 而且可以描述非稳态的趋势性变化。

关键词: 非稳态; 中长期径流预报; 水文-气象遥相关; 时间序列模型; 疏勒河

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2016) 05-0007-06

Coupled model for long-term runoff prediction considering non-stationarity

ZHAO Jian shi, WANG Jun, ZHAO Tong tie gang

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Climate change can cause non stationarity in hydrological series, bringing more challenges to hydrological prediction. Taking Shule river as a case, this paper explores a new long-term runoff prediction model under non stationarity. Based on runoff recharge sources and climate change in upper reaches of the river, this paper first analyzes the trend term and periodic term of the runoff series, and then builds a multiple regression model based on hydro climatic teleconnection analysis to predict the stochastic term. The issued model couples auto correlation model and hydro climatic teleconnection model by merging the three terms together, and yields ultimate prediction runoff values. Prediction results of the teleconnection based model, the time series model, and the coupling model, are compared. It is shown that the coupling model has the highest precision and provides the most efficient results. Meanwhile, it can capture the nonstationary trend of streamflow.

Key words: non stationarity; long term runoff prediction; hydro climatic teleconnection; runoff auto correlation; Shule river

具有适合预见期和较高精度的水文预报是水资源管理活动的重要依据。对农业生产来说, 月和季节尺度的中长期径流预报对有效制定生产计划及合理配置水资源具有指导作用。疏勒河为西北地区三大内陆河之一, 位于其出山口以下 1.36 km² 处的昌马水库, 除汛期防汛外, 承担着向流域内三大灌区供

水或调水的任务。然而受西北地区气候由暖干向暖湿转型^[1]的影响, 近十余年昌马堡水文站(疏勒河上游干流控制站)的径流序列表现出明显的非稳态性 (Non stationarity)^[2,3], 为水文预报带来了新的挑战。

传统的中长期径流预报模型包括时间序列模型

收稿日期: 2016-04-10 修回日期: 2016-05-10 网络出版时间: 2016-08-18
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160818.1934.005.html>
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51579129)
Fund: National Natural Science Foundation of China(51579129)
作者简介: 赵建世(1975), 男, 河南济源人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zhaojianshi@tsinghua.edu.cn

和基于成因分析的多元回归模型,随着信息技术及数学理论的发展,又出现了神经网络模型、支持向量机模型等^[4,13]。这些方法都不同程度地用到水文序列稳态性的基本假定,因此在非稳态条件下径流预报效果不佳。水文-气象遥相关描述的是水文要素与影响水文过程的气候气象要素之间的相关关系,基于遥相关分析的径流预报方法^[14,20]因具有较强的物理基础而预见期更长、精度更高,这为非稳态条件下的径流预报提供了一个可能的思路。

本研究对疏勒河昌马堡水文站开展枯水期逐月径流预报的研究,针对其水文、气候条件特点,从径流自相关、水文-气象遥相关的基本理论出发,探索适合非稳态条件下中长期径流预报的方法。研究中用到了 1954 年-2011 年昌马堡水文站实测月径流序列,以及来自美国大气与海洋管理局(NOAA)、英国气象局哈德莱中心(Met Office Hadley Centre)、日本海洋科学技术中心(JAMSTEC)等机构的 28 项气候因子数据。

1 研究区与径流特征分析

1.1 研究区概况及径流补给来源

疏勒河上游流域位于东经 $96^{\circ}42' - 99^{\circ}0'$, 北纬 $38^{\circ}18' - 39^{\circ}54'$, 呈现出典型的温带大陆性干旱气候特征,多年平均降水量仅 200~300 mm,且季节性差异明显,而蒸发量达 2 000~3 000 mm。昌马堡水文站位于疏勒河出山口以上,控制面积 1 0951 km²,是疏勒河上游干流的控制站。

疏勒河径流的补给来源主要有大气降水、冰川融水和浅层地下水^[21]。其中降水形成的地表径流约占总径流量的 39%~55%,且多集中在夏季;冰川融水补给主要集中在春末和夏秋季节,约占总径流量的 26%~32%^[2];浅层地下水补给主要集中在非汛期,约占总径流量的 19%~29%。

对西北地区大气降水水汽来源的研究表明,该

区降水主要受太平洋水汽、西风环流带来的大西洋水汽、以及北冰洋和印度洋水汽的影响。其中,冬季以西风带输送的大西洋水汽及北冰洋水汽为主^[2];春季以大西洋水汽为主^[22],至 5 月开始受印度洋的水汽影响^[22];秋季,来自西北方向的水汽是其降水的主要来源^[22]。

1.2 径流的年际变化规律

对昌马堡水文站 1954-2011 年实测年径流序列进行统计分析,径流变化过程见图 1。

1954 年-2011 年昌马堡水文站年均径流量 9.53 亿 m³,极值比为 4.11,变差系数 C_v 为 0.28,表明径流的年际变化较大。由图 1 还可发现,径流序列不仅表现出一定的丰枯变化周期,还呈现出增大的趋势,特别是近十余年,图线上扬明显。对此一些学者经研究认为该站径流在 1997 年-1999 年之间发生了由小变大的突变^[2,3],且之后有继续增加的趋势。发生突变的原因,主要是气候转型、特别是气温升高加速了冰川的消融,同时大气环流的调整促进了来自印度洋及太平洋的水汽向西北地区输送。

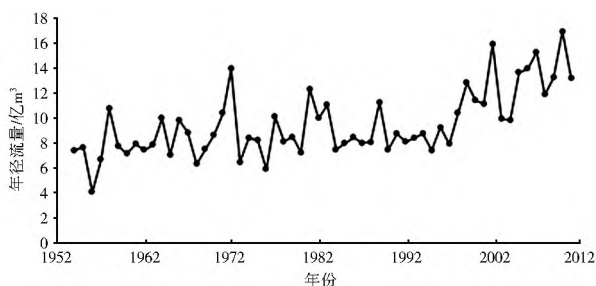


图 1 昌马堡水文站径流变化过程

Fig. 1 Streamflow changing process of Changmabao gauge station

1.3 径流的年内分配特征

以 1999 年为界将 1954 年-2011 年昌马堡站的径流序列分为两个阶段:(1) 1954 年-1998 年;(2) 1999 年-2011 年。分别统计两个阶段的径流年内分配,见表 1。

表 1 突变前后昌马堡水文站径流序列年内分配

Tab. 1 Intra year streamflow distributions of Changmabao gauging station before and after abrupt change (%)

阶段	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1954年-1998年	2.68	2.54	2.92	4.70	6.84	10.73	24.16	24.13	9.80	5.08	3.69	2.73
1999年-2011年	2.88	2.73	3.03	4.69	5.77	9.48	24.51	24.34	10.67	5.42	3.64	2.84
比例变化	0.20	0.18	0.12	-0.01	-1.07	-1.25	0.35	0.21	0.87	0.34	-0.05	0.11

由表 2 可知,汛期为 6 月至 9 月,枯水期为 10 月至次年 5 月,汛期的径流量约占全年的 69%,而枯水期仅占 31%;两个阶段的 1 月至 4 月及 10 月至 12 月各月径流占年总量的比例变化不大,表现为

整体性地增加。对此可能的解释是,5 月至 9 月的径流补给以大气降水和冰川融水为主,10 月至次年 4 月的径流补给以地下水和大气降水为主;不同的补给来源受不同的驱动因素影响,从而突变前后表

现出不同的变化规律。

2 研究方法

2.1 时间序列分析法

径流序列是典型的时间序列,径流预报的时间序列分析方法如式(1)所示。

$$R_t = T_t + P_t + S_t \quad (1)$$

式中: R_t 为径流预测值; T_t 为趋势项; P_t 为周期项; S_t 为随机项。

对于稳态序列,可以通过分解径流序列的趋势项、周期项和随机项,然后叠加进行预报,其中随机项可采用ARMA(自回归滑动平均)等模型进行预测。

2.2 水文-气象遥相关的相关向量机法

水文-气象遥相关是指相隔一定距离的气候气象与水文要素之间的相关性。流域水文过程与全球水循环之间存在着广泛联系,水文、气象的相互影响共同决定了流域径流的丰、枯等水文特征^[5]。本文采用相关向量机(RVM)方法进行水文-气象遥相关分析,RVM是一种基于贝叶斯理论的稀疏概率模型,通过将数据序列用非线性核函数映射到高维空间,在高维空间进行线性回归,来实现非线性向线性的转化。其理论如下。

设预报因子为 $\{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$,经非线性映射到高维空间,在高维特征空间中进行线性回归,得到预报输出值 $y(x)$,即:

$$y(x) = \sum_{i=1}^N w_i k(x, x_i) + w_0 \quad (2)$$

式中: $k(\cdot, \cdot)$ 为核函数; w_i 为权值; w_0 为噪声。

设训练样本集为 $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N, p\{y|x\}$ 服从高斯分布,则训练样本集的高斯似然函数为

$$p(y|\omega, \sigma^2) = 2(\pi\sigma^2)^{-N/2} \exp\left\{-\frac{\|y - \Phi\omega\|^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

式中: $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$; Φ 为 $N \cdot (N+1)$ 的核函数矩阵,且 $\Phi_{nn} = k(x_n, x_n), \Phi_{11} = 1$ 。

为避免 ω, σ 过拟合,为每个 ω 定义高斯先验概率分布函数:

$$p(\omega|\alpha) = \prod_{i=0}^N N(\omega_i|0, \alpha_i^{-1}) \quad (4)$$

基于贝叶斯准则计算权值的后验概率分布,即:

$$p(\omega|y, \alpha, \sigma^2) = (2\pi)^{-(N+1)/2} |\Sigma|^{1/2} \cdot \exp\{- (\omega - \mu)/2\} \quad (5)$$

式中:后验分布的协方差和均值分别为 $\Sigma = (\sigma^2 \Phi^T \Phi + A)^{-1}, A = \text{diag}\{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_N\}; \mu = \sigma^2 \Sigma \Phi^T y$ 。

通过最大化边缘似然分布函数 $p = (y|\alpha, \sigma^2) = N(0, \sigma^2 I + \Phi \alpha^{-1} \Phi^T)$ 即可得到超参数估计值。通过超参数最优值可确定权值,从而得到给定输入下描

述预测不确定度的均值 μ^* 和 σ^2 方差,则预报值服从均值和方差的后验正态概率分布。

2.3 耦合预报方法

在传统的时间序列模型中,随机项 S 包括气象和降雨在内的随机性要素的影响,本研究采用水文-气象遥相关模型描述气象和降雨与径流的统计关系,以此为基础构建时间序列模型和遥相关模型的耦合模型,如下:

$$R_t = T_t + P_t + \left[\sum_{i=1}^N w_i k(x, x_i) + w_0 \right] \quad (6)$$

这一耦合方法的基本假定是:水文序列本身的均值变化有自相关特性,而水文-气象遥相关关系决定了水文序列中随机项的变化。按照时间序列分解模型思路,假设径流序列可分解为趋势项、周期项和随机项,对趋势项仍然沿用传统时间序列的回归方法进行分析;对周期项采用传统的频谱分析法进行分析;而对随机项,则首先甄别气候预报因子,然后采用基于水文-气象遥相关分析的多元回归方法进行模拟和预测。如此,趋势项和周期项代表的是径流的自相关性;随机项则反映了径流与气候因子之间的遥相关性。将各项叠加起来即得到最终的耦合模型和预测结果。

本研究借助R语言核函数程序包(Kernel based Machine Learning Lab, <http://cran.r-project.org>)进行耦合模型的开发。

3 结果与讨论

昌马水库主要服务于下游的灌溉和防洪。在汛期6月-9月,昌马水库的调度方式是平时畅泄,洪水期拦洪调蓄,基本不采用预报信息进行调度。而在10月-5月,昌马水库以灌溉调度为主,需要采用中长期径流预报信息进行灌溉计划的制定和旬月调度管理。因此,本文以1954年-1993年为训练期,1994年-2002年为验证期,采用耦合模型对昌马堡水文站进行了非汛期的中长期预报研究,服务于灌溉调度。另外,本文对比分析了耦合模型和传统的时间序列模型以及基于遥相关模型的预报结果,以此说明耦合模型的相对优越性。

3.1 趋势项分析

采用线性回归法对枯水期逐月径流进行趋势性分析,结果显示各月径流均呈现出比较显著的增加趋势,其中平均趋势变化率最大和最小的月份分别是次年5月和次年3月,见图2、图3。

3.2 周期项分析

将趋势项从原径流序列中去除,对剩余的序列采用频谱分析法进行周期性分析,结果见表2。由

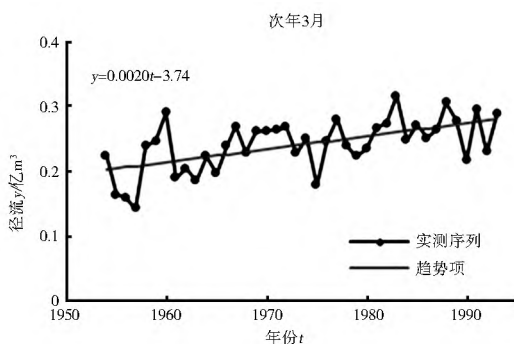


图 2 次年 3 月径流趋势性分析
Fig. 2 Trend analysis of next March

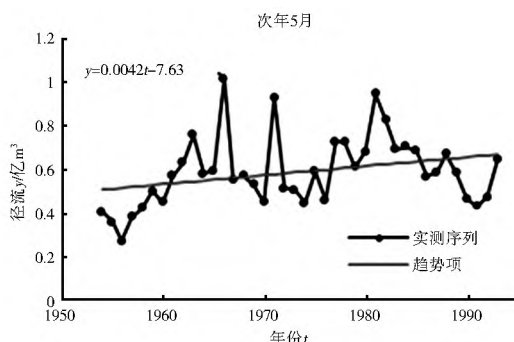


图 3 次年 5 月径流趋势性分析
Fig. 3 Trend analysis of next May

表 2 各月径流序列主要周期

Tab. 2 Main periodic components of each month

月份	主要周期/年
当年 10 月	$T1= 2.9, T2= 4, T3= 2.22, T4= 20, T5= 10$
当年 11 月	$T1= 2.86, T2= 2.5, T3= 6.67, T4= 4$
当年 12 月	$T1= 2.5, T2= 6.67, T3= 2.86, T4= 3.33$
次年 1 月	$T1= 4, T2= 6.67, T3= 2.5, T4= 20$
次年 2 月	$T1= 20, T2= 2.86, T3= 4, T4= 2.5, T5= 6.67$
次年 3 月	$T1= 2.86, T2= 5$
次年 4 月	$T1= 1.54, T2= 3.33, T3= 2.5, T4= 20, T5= 4$
次年 5 月	$T1= 10, T2= 20, T3= 2.86, T4= 2.22$

相关分析, 初步选取预报因子。以当年 10 月为例, 分别对前一年 10 月至当年 9 月的 28 项遥相关因子一共 336 个变量与当年 10 月径流序列进行相关分析, 并对结果进行 t 检验, 将通过假设检验的因子降序排列, 选取前 15 个为初步筛选出的预报因子。之后借助多元回归分析和交叉检验技术选取最终预报因子。仍以当年 10 月为例, 结合成因分析从初步筛选出的预报因子中选取 5 个作为一个预报因子组合, 对训练期样本构建多元回归模型, 进行 5 折交叉检验, 记录平均均方根误差; 比较不同预报因子组合的 5 折交叉检验结果, 将平均均方根误差最小的一组作为最终预报因子。各因子的英文全称见表 3, 最终预报因子见表 4, 括号中数字代表月份。

表 2 可知, 枯水期逐月径流主要呈现出 2~4 年、6~7 年、10 年、20 年的周期性。

3.3 随机项分析

对枯水期逐月径流与遥相关因子进行 Pearson

表 3 气候因子名称

Tab. 3 Names of climatic factors

缩写	全称	缩写	全称
EA	East Atlantic Pattern	QBO	Quasi Biennial Oscillation
NINO3	NINO3 Index	NINO3.4	NINO3.4 Index
NINO4	NINO4 Index	TNI	Trans Ni no Index
CAND	Scandinavia Pattern	EA/WR	East Atlantic/Western Russia Pattern
PDO	Pacific Decadal Oscillation	TSA	Tropical Southern Atlantic Index
PNA	Pacific North American Index	P/EP	Polar/Eurasia patterns

表 4 各月随机项的遥相关预报因子

Tab. 4 Teleconnection factors of each month

预报时段	预报因子
当年 10 月	EA (8), NINO3 (1), P/EP (7), NINO3 (2), NINO3 (12)
当年 11 月	EA (2), EA (6), SCAND (5), PDO (2)
当年 12 月	P/EP (3), PDO (4), SP (6), PNA (1), PDO (2)
次年 1 月	QBO (12), NINO3.4 (8), QBO (1), NINO3.4 (9), QBO (11)
次年 2 月	EP/NP (7), NINO4 (10), EA (8), TNI (9), TNI (8)
次年 3 月	PNA (2), EA (10), MEI (10), NINO4 (10), MEI (11)
次年 4 月	PNA (10), EA/WR (12), PNA (11), PDO (10), TSA (11)
次年 5 月	P/EP (1), QBO (9), QBO (8), TNI (4), NINO4 (11)

3.4 预报结果与讨论

采用耦合模型, 训练期(1954 年–1993 年)和预报期(1994 年–2002 年)的逐月径流预报结果见图 4。

从耦合模型的预报结果来看, 整体上耦合模型在训练期表现较好, 但在预报期的各个月份表现差异较大, 其中在 4 月份和 5 月份表现较好, 但在其他月份表现较差。分析其原因, 可能与疏勒河流域的水情来源有关, 已有研究表明^[22], 疏勒河流域秋冬季的水汽来源主要是西风带输送的大西洋水汽以及来自北冰洋等高纬度地区的水汽; 至 4 月–5 月, 南

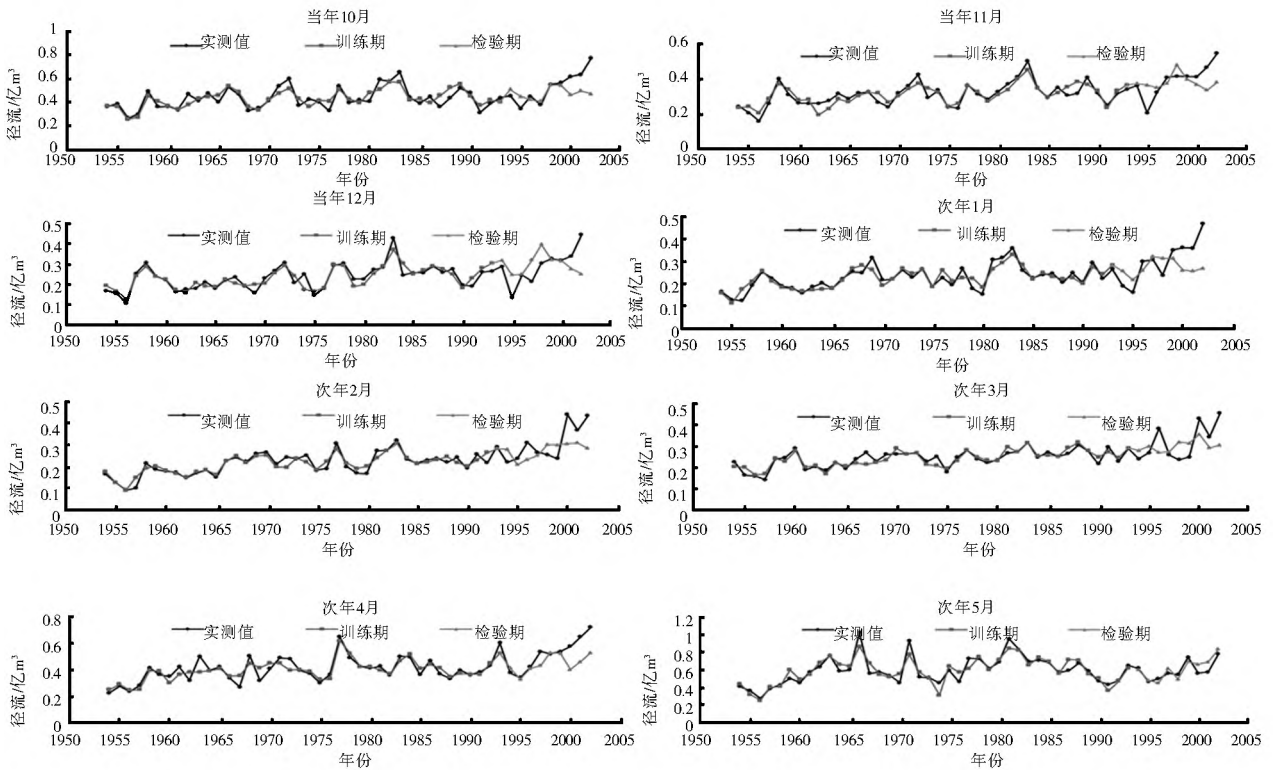


图4 耦合模型预报结果

Fig. 4 Forecast results of coupled model

亚季风开始形成,水汽沿青藏高原的东部向北,对西北地区东部产生主导影响。疏勒河秋冬季水汽来源模式复杂,而4月-5月份的水汽来源相对单一,因此耦合模型在4月-5月份表现较好可能与模型中的趋势项和遥相关项较好地描述了南亚季风影响

有关。

表5对耦合预报与时间序列模型和遥相关预报模型在预报期的预报效果进行了比较,采用平均相对误差和相关系数对三种模型模拟的结果进行了评价和精度对比分析。

表5 不同预报模型的精度评价结果

Tab. 5 Accuracy evaluation results of different forecast models

评价指标	预报方法	当年10月	当年11月	当年12月	次年1月	次年2月	次年3月	次年4月	次年5月
平均相对误差(%)	遥相关	18.12	22.6	31.23	30.43	24.17	20.32	19.42	18.66
	时间序列	18.87	23.03	25.67	27.72	25.54	21.81	16.65	9.96
	耦合模型	15.98	20.57	26.64	25.42	21.86	21.13	13.96	9.57
相关系数	遥相关	0.613	0.022	-0.367	-0.102	-0.157	-0.167	0.164	-0.667
	时间序列	0.457	0.155	0.027	0.027	-0.121	0.184	0.559	0.814
	耦合模型	0.391	0.143	0.088	0.266	0.371	0.294	0.676	0.852

由表5可以看出,耦合模型的预报精度明显好于时间序列模型和遥相关模型多元回归模型,比较三个模型的结果:从平均相对误差看,除当年12月外,耦合模型的结果均小于时间序列模型和遥相关模型;从相关系数看,耦合模型的结果全部为正,且有6个月高于时间序列模型和遥相关模型。由于耦合模型中考虑了径流的趋势项,可以反映疏勒河流域由于气候转型、气温升高加速冰川消融以及大气环流变化促进了印度洋和太平洋的水汽向西北地区输送等原因造成的径流增加趋势^[23];而耦合模型中

的随机项采用了水文-气象遥相关模型,可以反映全球尺度气象要素对当地降雨和气温的影响,从而减少时间序列模型中的不确定项影响。但由于中长期径流预报本身的复杂性和不确定性,模型的精度相对应短期的径流预报,还有很大的提高空间。

4 结语

本研究针对受气候变化影响而呈现出非稳态性的疏勒河昌马堡水文站径流序列开展中长期径流预报的研究,考虑到非稳态径流序列中均值和方差变

化的特性,将径流的自相关性以及与气候因子的遥相关性相耦合用于枯水期逐月径流预报,探索了一种适合非稳态条件下的中长期径流预报方法。研究比较了基于遥相关模型、时间序列模型和耦合预报方法的预报精度,结果表明,本文提出的耦合模型比传统的时间序列模型和水文-气象遥相关的模型性能更好,可提供非稳态条件下的中长期径流预报精度,服务于流域的调度管理实践。

参考文献(References):

- [1] 施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003,23(2):152-164. (SHI Ya feng, SHEN Yong ping, LI Dong liang, et al. Discussion on the present climate change from warm dry to warm wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164. (in Chinese))
- [2] 张鹏,张钰,罗颖,等.疏勒河出山口径流对上游气候变化的响应[J].水资源与水工程学报,2013(5):165-172. (ZHANG Peng, ZHANG Yu, LUO Ying, et al. Response of runoff at mountainous area of Shule river to climate change of upstream [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013(5): 165-172. (in Chinese))
- [3] 何彬,张钰,朱佳君,等.祁连山区三大内陆河近50年来出山径流特征分析[J].水资源与水工程学报,2011(5):1-15. (HE Bin, ZHANG Yu, ZHU Jia jun, et al. Analysis of the features of the mountainous runoff in three inland river basins of Qilian mountain during recent 50 years[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011(5): 1-15. (in Chinese))
- [4] Montanari A, Rosso R, Taqqu M S. A seasonal fractional ARFMA model applied to the Nile River monthly flows at Aswan [J]. Water Resources Research, 2000, 36(5): 1249-1259.
- [5] Ooms M, Franses P H. A seasonal periodic long memory model for monthly river flows[J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(6): 559-569.
- [6] Awwad H M, Valds J B, Restrepo P J. Streamflow forecasting for Han River basin, Korea[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994, 120(5): 651-673.
- [7] C L Wu, K W Chau, Rainfall-runoff modeling using artificial neural network coupled with singular spectrum analysis, Journal of Hydrology, Volume 399, Issues 3-4, 18 March 2011, Pages 394-409.
- [8] Ch S., Anand N, Panigrahi B K, et al. Streamflow forecasting by SVM with quantum behaved particle swarm optimization [J]. Neurocomputing, 2013, 101: 18-23.
- [9] Shi Y., Liu H, Fan M, et al. Parameter Identification of RVM Runoff Forecasting Model Based on Improved Particle Swarm Optimization[M]//Advances in Swarm Intelligence. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 160-167.
- [10] Samui P, Mandla V R, Krishna A, et al. Prediction of Rainfall Using Support Vector Machine and Relevance Vector Machine[J]. Earth Science India, 2011, 4(4).
- [11] Mekanik F, Imteaz M A, Gato Trinidad S, et al. Multiple regression and Artificial Neural Network for long term rainfall forecasting using large scale climate modes[J]. Journal of Hydrology, 2013, 503: 11-21.
- [12] Kirono D G C, Chiew F H S, Kent D M. Identification of best predictors for forecasting seasonal rainfall and runoff in Australia[J]. Hydrological processes, 2010, 24(10): 1237-1247.
- [13] Kashid S S, Ghosh S, Maity R. Streamflow prediction using multi site rainfall obtained from hydroclimatic teleconnection [J]. Journal of hydrology, 2010, 395(1): 23-38.
- [14] 杨龙,田富强,胡和平.结合大气环流和遥相关信息的集合径流预报方法及其应用[J].清华大学学报:自然科学版,2013(5):606-612. (YANG Long, TIAN Fuqiang, HU He ping. Modified ESP with information on the atmospheric circulation and teleconnection incorporated and its application[J]. J Tsinghua Univ: Sci and Tech, 2013(5): 606-612. (in Chinese))
- [15] Li H, Xie M, Jiang S. Recognition method for mid-term runoff forecasting factors based on global sensitivity analysis in the Nenjiang River Basin[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(18): 2827-2837.
- [16] Kirono D G C, Chiew F H S, Kent D M. Identification of best predictors for forecasting seasonal rainfall and runoff in Australia[J]. Hydrological processes, 2010, 24(10): 1237-1247.
- [17] Kashid S S, Ghosh S, Maity R. Streamflow prediction using multi site rainfall obtained from hydroclimatic teleconnection [J]. Journal of hydrology, 2010, 395(1): 23-38.
- [18] 何小刚,赵钢铁,杨大文.分布式水文模型与气象遥相关分析相结合的丹江口水库月入库径流预测[J].水力发电学报,2013(3):4-9. (HE Xiaogang, ZHAO Tongtie gang, YANG Dawen. Prediction of monthly inflow to the Danjiangkou reservoir by distributed hydrological model and hydro-climatic teleconnections [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013(3): 4-9. (in Chinese))
- [19] 赵钢铁,杨大文,蔡喜明,等.基于随机森林模型的长江上游枯水期径流预报研究[J].水力发电学报,2012,(3):18-24,38. (ZHAO Tongtie gang, YANG Dawen, CAI Ximing, et al. Predict seasonal low flows in the upper Yangtze River using random forests model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, (3): 18-24, 38. (in Chinese))
- [20] Kirono D G C, Chiew F H S, Kent D M. Identification of best predictors for forecasting seasonal rainfall and runoff in Australia[J]. Hydrological processes, 2010, 24(10): 1237-1247.
- [21] 谢军健.昌马河流域气候变化与水文特性的关系研究[J].地下水,2012(1):150-152. (XIE Junjian. Research on relation between climate change and hydrological characteristics in Changma river basin[J]. Ground Water, 2012(1): 150-152. (in Chinese))
- [22] 柳鉴容,宋献方,袁国富,等.西北地区大气降水的特征及水汽来源[J].地理学报,2008(1):12-22. (LIU Jianrong, SONG Xianfang, YUAN Guofu, et al. Characteristics of $\delta^{18}O$ in Precipitation over Northwest China and Its Water Vapor Sources[J]. Acta Geographica Sinica, 2008(1): 12-22. (in Chinese))