

R/S-GM(1,1)组合模型在径流预测中的应用

郭巧玲¹, 韩振英¹, 苏宁¹, 刘培旺²

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454003; 2. 黄河中游水文水资源局, 山西 榆次 030600)

摘要:基于R/S分析法能提供有效的非线性科学预测, 河川径流具有灰色禀性, 为了提高河流径流预报精度, 提出了R/S分析与灰色理论相结合的河川径流预测方法。该方法可以克服径流灰色预测存在的数据波动较大时预测精度降低的缺陷。将该方法应用到黑河莺落峡站和正义峡站的年径流量、汛期和非汛期径流量6个序列进行径流预测验证。结果表明: 两站年径流量和汛期径流量序列的预测精度都在90%左右, 非汛期径流量序列在80%以上, 各径流序列预测结果与Mann-Kendall趋势检验一致, 预测结果可靠, 为河流径流量的科学预测提供了一种新方法。

关键词:径流预测; R/S分析; 灰色理论; Mann-Kendall检验; GM(1,1)模型; 黑河

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0015-05

Application of R/S-GM (1,1) model in runoff forecasting//GUO Qiaoling¹, HAN Zhenying¹, SU Ning¹, LIU Pei wang² (1. Institute of Resource & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Hydrology and Water Resources Bureau of the Middle Reaches of Yellow River, Yuci 030600, China)

Abstract: In order to improve accuracy of rivers runoff forecast, a new method combining the rescaled range (R/S) analysis with the grey theory (GM) was proposed, based on that the R/S analysis provides scientific and effective non-linear prediction and rivers runoff has a grey character. This new method using the R/S-GM(1,1) model can overcome the defects of low prediction accuracy when there is a larger fluctuation in data. Then it was applied in the runoff forecast of the Yingluoxia and the Zhengyixia stations in the Heihe River, with the use of six series of the annual runoff, flood season and non-flood season runoff. It is validated that the prediction accuracy of annual runoff and flood season runoff series are about 90%, and those of non-flood season runoff series are more than 80%, and the forecast results of the runoff series are consistent with the Mann-Kendall trend test results. Hence, the predication result is reliable, providing a new approach for accurate runoff forecast.

Key words: runoff forecast; rescaled range analysis; grey theory; Mann-Kendall test; GM (1,1) model; Heihe River

河川径流作为水循环的重要环节,是水资源综合开发利用、科学管理、优化调度最重要的依据^[1]。径流预测是流域防汛、抗旱、水资源合理开发利用和水利工程有效管理的基础^[2]。河川径流受多种因素的影响和制约,表现出复杂、随机、多维等特性,探寻能够提高预测精度的模型对河川径流预测预报具有重要的现实意义和应用价值^[3]。

目前径流预测研究还处于发展阶段^[4],预测方法较多。灰色理论将随机量当作在一定范围内变化的灰色量,将随机过程当作在一定幅区和时区变化的灰色过程,具有广泛的适应性^[5]。对于小样本,通过鉴别系统因素之间发展趋势的相异程度和关联分析,对原始数据进行生成处理,寻找系统变化规律,在数据较少且序列波动小时效果较好^[6]。河川径流由于受众多因素影响,径流序列表现出复杂、多变的不确定性,同时人类对水文信息了解的不完全性,使得河川径流具有灰色禀性^[5],目前将灰色理论应用到河川径流预测的研究较多^[7]。但在非线性水文序列预测中,当数据波动较大时预测精度大幅度降低^[8]。R/S分析法能从分形时间序列中区分出随机序列和非随机序列,为径流时序的复杂性演变提供了一种有效的非线性科学预测方法^[9]。其中,Hurst指数通常用来确定径流时间序列的分形结构和状态持续性,平均循环长度可以判定系统的记忆时间长度^[10]。基于此,本文探讨采用R/S分析与灰色理论相结合的方法进行河川径流预测,寻求能够高效、准确进行径流预测的方法。

1 R/S-GM(1,1) 模型构建

1.1 R/S 分析法

R/S 分析法是由英国学者 Hurst 于 1965 年提出的一种处理时间序列的方法,也称分形时间序列^[11],应用 Hurst 指数 H 来判断趋势性成分的强度,反映序列的持续性。平均循环长度可以判定系统的记忆时间长度,判定历史状态对未来状态的影响。

1.1.1 序列持续性

对于时间序列 $\{x(n), n=1,2,\cdots,m\}$,对于任意正整数 $n \geq 1$,定义均值序列

$$x_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i) \tag{1}$$

累积离差

$$X(t,n) = \sum_{k=1}^t (x(k) - x_n) \quad (1 \leq t \leq n) \tag{2}$$

极差序列

$$R(n) = \max X(t,n) - \min X(t,n) \quad (1 \leq t \leq n) \tag{3}$$

标准差序列

$$S(n) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(t) - x_n)^2 \right]^{0.5} \tag{4}$$

若 $\frac{R(n)}{S(n)} = \left(\frac{R}{S} \right)_n = (cn)^H$,即满足 $\lg(R/S)_n = H \lg c + H \lg n$,说明分析的时间序列存在 Hurst 现象(式中 c 为不依赖于 H 的变量,是反映自然现象固有特性的参数)。以 $\lg n$ 为自变量, $\lg(R/S)$ 为应变量作散点图,以最小二乘估计拟合直线,则 H 为该直线的斜率。 H 取值范围为 $[0,1]$ 。当 $H=0.5$ 时,序列是随机不相关的;当 $0.5 < H < 1$ 时,径流量序列具有状态持续性,即未来与过去呈现相同的变化趋势,且其记忆性不随时间标度而变化, H 越接近 1,序列的持续性程度越强;当 $0 < H < 0.5$ 时,则为一种反持久性序列^[12-14]。

1.1.2 平均循环周期

引入统计量 $V(n)$:

$$V(n) = \frac{\left(\frac{R}{S} \right)}{\sqrt{n}} \tag{5}$$

对于独立随机时间序列, $V(n)$ - $\lg n$ 曲线是平坦的;对于具有状态持续性即 $H > 0.5$ 的过程, $V(n)$ - $\lg n$ 曲线向上倾斜;反之,对于具有逆状态持续性即 $0 < H < 0.5$ 的过程, $V(n)$ - $\lg n$ 曲线向下倾斜。当 $V(n)$ - $\lg n$ 曲线上 $V(n)$ 随 $\lg n$ 的变化趋势发生改变,即曲线出现明显转折时,历史状态对未来状态的影响消失,此时系统的平均循环周期就是对应的时间

跨度 n 。实际拟合时,常会出现多个转折点,遵循最大 H 值且拟合度较高误差较小的原则选择突变点作为序列的平均周期^[15]。

1.2 灰色 GM(1,1) 预测模型

GM(1,1) 模型^[16] 是灰色时间序列预测中应用最为广泛的一种,利用这种模型可对系统发展变化进行全面分析观察,并作中长期预测。

1.2.1 模型建立

设原始序列为

$$X^{(0)}(k) = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \cdots, x^{(0)}(n)\} \tag{6}$$

对 $X^{(0)}(k)$ 作一次累加,得到:

$$X^{(1)}(k) = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \cdots, x^{(1)}(n)\} \tag{7}$$

其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (k=1,2,\cdots,n)$

则 GM(1,1) 模型的微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \tag{8}$$

式中 a, u 为模型参数。

1.2.2 模型参数确定

应用最小二乘法原理,可求解模型参数 a, u ,即

$$(a, u)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \tag{9}$$

$$\text{其中 } B = \begin{bmatrix} -[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)]/2 & 1 \\ -[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)]/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)]/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

1.2.3 模型求解

将时间响应函数离散化,利用初始条件对式(8)求解,得:

$$x^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \tag{10}$$

经累减还原可得原数据序列的估计值:

$$\begin{cases} \hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1) \\ \hat{x}^{(0)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] (1 - e^a) + \frac{u}{a} \end{cases} \tag{11}$$

1.2.4 模型精度及适用范围

残差检验是灰色预测中最常用的一种检验方法,即对实测值和预测值之间的误差进行逐点检验,通过各点的相对残差值,可以计算出预测模型的精度值 $P^{[9]}$ 。

设实测序列如式(6)所示,预测序列为

$$\hat{X}^{(0)}(k) = \{\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \cdots, \hat{x}^{(0)}(n)\} \tag{12}$$

则平均相对残差为

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)|}{x^{(0)}(k)} \quad (13)$$

其精度为 $P = 1 - \bar{\delta} \quad (14)$

若 $P \geq 80\%$, 模型通过残差检验; 若 $P < 80\%$, 则必须对模型进行修正使之满足精度要求才可以进行预测。精度越高, 模型拟合得越好。

1.3 R/S-GM(1,1) 模型组合预测步骤

步骤 1 由公式(1)~(5)求解出赫斯特指数 H 及径流序列平均循环周期 T 。

步骤 2 当径流序列平均循环周期为 N 年, 则第 m 年径流量的值影响到第 $m+N-1$ 年^[10]。

步骤 3 选取序列中连续 $N-1$ 年径流数据作为初始值, 记作 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_{N-1})$, 先对子序列 Q 进行灰色预测, 模型精度大于 80% 即通过残差检验, 否则要进行模型修正。

步骤 4 取 $(q_1, q_2, \dots, q_{N-1})$ 为初始值, 预测第 N 年径流量 q_N , 以 $(q_2, q_3, \dots, q_{N-1})$ 及 q_N 为初始值, 预测第 $N+1$ 年径流量 q_{N+1} , 预测过程见公式(6)~(11), 模型检验过程见公式(12)~(14), 精度大于 80% 时模型精度满足要求。循环上述过程, 可求得今后若干年径流量。

2 实例分析

2.1 数据来源

选取黑河上、中游分界断面莺落峡水文站和中、下游分界断面正义峡水文站两个实例对该方法的预测效果进行验证, 并对两站年径流量、汛期和非汛期径流量进行预测。所用资料是两站 1957—2013 年的逐月径流资料, 所有数据来源于水文站的实际监测。莺落峡水文站是黑河出山口控制站, 莺落峡以上为上游, 河道长约 303 km, 流域面积约 10 万 km^2 ,

是黑河的产流区, 受人类活动影响较小。莺落峡与正义峡之间为中游, 河道长约 185 km, 流域面积约 25.6 万 km^2 , 是黑河的主要耗水区, 也是流域人类活动影响最大的区域^[17]。采用 Mann-Kendall 趋势检验法对莺落峡站和正义峡站的年径流量、汛期和非汛期径流量 6 个序列的变化趋势进行分析(表 1), 在置信度 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下, 莺落峡站年径流量、汛期和非汛期径流量都处于增加趋势, 且相关系数 Z_c 值均通过了显著性检验。而正义峡水文站由于受人类活动和黑河水量统一分配与调度的影响, 年径流量、汛期和非汛期径流量变化趋势有一定的差距。年径流量有一定的减少趋势, 但未通过显著性检验; 汛期径流量表现出增加的趋势, 亦未通过显著性检验; 非汛期径流量呈现出明显的减少趋势, 并通过显著性检验。

表 1 莺落峡站和正义峡站各时段径流序列的 Mann-Kendall 检验

站点	项目	序列初年	序列末年	序列长/ a	Z_c	显著性
莺落峡站	年径流量	1957	2013	57	2.71	显著
	汛期径流量	1957	2013	57	2.41	显著
	非汛期径流量	1957	2013	57	5.16	显著
正义峡站	年径流量	1957	2013	57	-1.21	不显著
	汛期径流量	1957	2013	57	0.12	不显著
	非汛期径流量	1957	2013	57	-5.11	显著

2.2 R/S 分析

对莺落峡站和正义峡站的年径流量序列、汛期及非汛期径流量序列进行 R/S 分析, 分别见图 1、图 2。

由图 1(a)(b)(c) 中拟合公式可知, 莺落峡站全年、汛期和非汛期的 Hurst 指数均大于 0.5, 表明各时段的径流序列均具有持续性。再进行平均周期分析, 由图 1(d)(e)(f) 可知 $V(n)$ - $\lg n$ 曲线出现了多个转折点, 对 $\lg(R/S)$ - $\lg n$ 曲线进行拟合, 选择

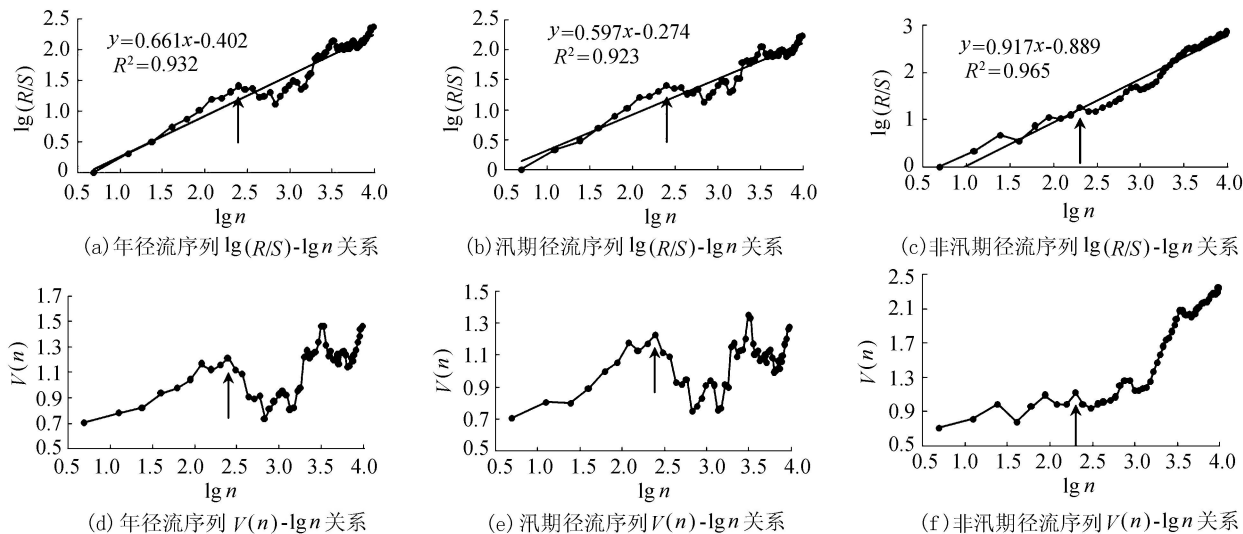


图 1 莺落峡站年、汛期和非汛期 R/S 分析

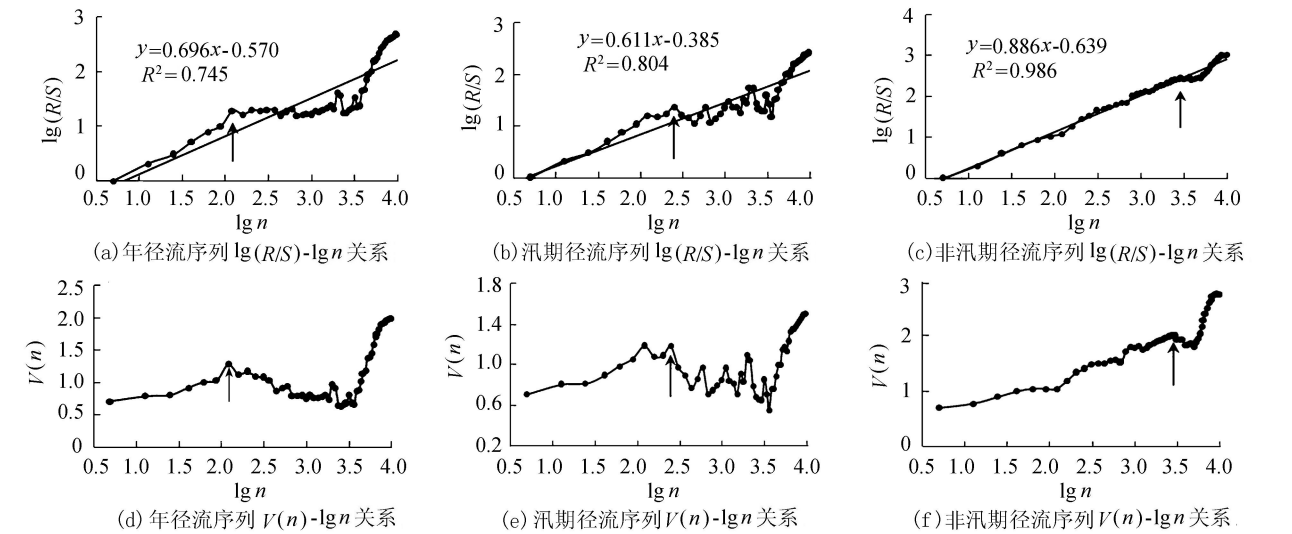


图2 正义峡站年、汛期和非汛期 R/S 分析

Hurst 指数最大且拟合度较高误差较小的突变点,其对应的 n 值即为径流序列的平均循环周期。由此可知,莺落峡站年径流量和汛期径流量序列存在 11 a 的周期,非汛期周期为 10 a,这与太阳黑子活动 11 a 的震荡周期^[18]相一致。认为太阳黑子活动对太阳辐射有明显影响,导致大气环流的变化,进而对降水和径流产生影响^[19]。

正义峡站不同时段径流量序列 R/S 分析见图 2,其全年、汛期和非汛期的 Hurst 指数也都大于 0.5,表明各时段的径流序列具有持续性。平均周期分析表明,年径流量序列周期为 8 a,汛期是 11 a,非汛期是 32 a,年和汛期径流量序列与太阳黑子活动周期较为一致。由于正义峡地处黑河中下游,受中游农业灌溉、工业、生活用水及国家实施的流域水量分配影响较大,非汛期径流量序列周期与太阳黑子活动周期关系较弱。

2.3 径流量预测

根据以上平均周期分析结果,分别取 2001—2010 年、2001—2010 年、2002—2010 年、2004—2010 年、2001—2010 年和 1990—2010 年为莺落峡年径流量、汛期和非汛期径流量,正义峡年径流量、汛期和非汛期径流量序列的检验期,对模型模拟效果进行检验,其精度分别为 92.85%、91.50%、96.86%、

95.01%、80.49% 和 90.41%,满足要求,可以进行径流预测。

径流预测时,首先以各径流序列检验期为初始值,预测 2011 年径流量;将各检验期所在时段后推一年后与 2011 年进行 2012 年各序列径流量预测;以此类推预测 2013 年各序列径流量,各序列 2011—2013 年径流量预测结果见表 2。莺落峡站年径流量、汛期和非汛期径流量预测的误差范围分别是 4.74%~8.35%、0.06%~6.83% 和 11.97%~17.74%,误差均值分别为 6.48%、3.43% 和 14.29%。正义峡站年径流量、汛期和非汛期径流量预测的误差范围分别是 1.72%~17.28%、1.42%~19.21% 和 15.22%~22.57%,误差均值分别为 9.45%、12.04% 和 18.78%,有较好的模拟效果。说明用 R/S-GM(1,1) 组合模型进行径流量预测是可行的。因此,利用该模型预测莺落峡站和正义峡站未来几年径流量变化,见表 3,由此可知,未来几年莺落峡站年径流量、汛期和非汛期径流量总体上处于增大态势。正义峡站年径流量和非汛期径流量处于减小态势,汛期径流量处于增大态势。各序列的径流量变化趋势与 Mann-Kendall 检验法分析结果一致,预测结果可靠。

表2 2011—2013 年莺落峡站和正义峡站径流量预测值与实测值比较

站名	全年径流量				汛期径流量				非汛期径流量			
	年份	实测值/ 亿 m ³	预测值/ 亿 m ³	相对误差/%	年份	实测值/ 亿 m ³	预测值/ 亿 m ³	相对误差/%	年份	实测值/ 亿 m ³	预测值/ 亿 m ³	相对误差/%
莺落峡	2011	18.43	19.97	8.35	2011	15.09	16.12	6.83	2011	3.34	3.74	11.97
	2012	19.19	20.10	4.74	2012	16.26	16.25	0.06	2012	2.93	3.45	17.74
	2013	19.63	20.88	6.36	2013	16.44	17.00	3.41	2013	3.19	3.61	13.16
正义峡	2011	11.05	10.86	1.72	2011	5.93	6.85	15.51	2011	5.12	4.17	18.55
	2012	11.45	10.38	9.34	2012	6.09	7.26	19.21	2012	5.36	4.15	22.57
	2013	11.86	9.81	17.28	2013	7.00	7.10	1.42	2013	4.86	4.12	15.22

表 3 莺落峡站与正义峡站径流量预测 亿 m ³						
站名	时间	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
莺落峡	全年	20.6115	20.7745	20.6984	21.2233	21.4044
	汛期	16.6779	16.8266	16.7283	17.1723	17.2616
	非汛期	3.5553	3.5265	3.5274	3.6054	3.6787
正义峡	全年	9.4608	9.1695	9.1486	8.5967	8.3513
	汛期	6.7719	6.7517	6.8105	7.0631	7.1602
	非汛期	4.1117	4.1087	4.0946	4.0638	4.0376

3 结 论

a. *R/S* 分析法是一种有效的非线性科学预测方法,Hurst 指数可确定径流时间序列状态持续性,平均循环周期可判定系统的记忆时间长度,河川径流具有灰色稟性,采用 *R/S* 分析与灰色理论相结合的方法进行河川径流预测,可以有效克服在预测随机波动性较大的序列时拟合较差、精度降低的缺点。

b. 利用黑河莺落峡站和正义峡站不同时段径流量序列资料进行模型验证,两站年径流量和汛期径流量序列的预测精度都在 90% 左右,非汛期径流量序列在 80% 以上,各径流序列预测结果与 Mann-Kendall 趋势检验一致,说明模型有良好的模拟效果,预测结果可靠。

c. 对比莺落峡站各时段径流量序列和正义峡站各时段径流量序列的模拟效果,莺落峡站各序列的模拟精度高于正义峡站,主要是莺落峡站处于流域上游出山口,受人类活动影响较小,而正义峡站处于流域中下游,受人类活动影响较大所致。

d. 同大多数预测方法一样,当水文序列的波动性越大,跳跃性越强时,*R/S*-GM(1,1) 组合模型的模拟精度将逐渐降低。对于这种情况,还需进一步研究改进。

参考文献:

[1] 王鑫,徐淑琴,李洪涛. 河川径流预测方法比较研究[J]. 中国农村水利水电,2014(4):98-100. (WANG Xin, XU Shuqin, LI Hongtao. A comparative study of runoff prediction techniques[J]. China Rural Water and Hydropower,2014(4):98-100. (in Chinese))

[2] 周秀平,李天翔,王文圣. 年径流预测的最小二乘支持向量机-马尔可夫链组合模型[J]. 水力发电学报,2013,32(4):16-19. (ZHOU Xiuping, LI Tianxiang, WANG Wensheng. Annual runoff prediction based on least square support vector machines-markov chain combined model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(4):16-19. (in Chinese))

[3] 崔东文. 多重组合神经网络模型在年径流预测中的应用[J]. 水利水电科技进展,2014,34(2):59-62. (CUI Dongwen. Application of multiple combined neural network model in annual runoff prediction[J]. Advances

in Science and Technology of Water Resources,2014,34(2):59-62. (in Chinese))

[4] 师彪,李郁侠,于新花,等. 自适应人工鱼群-BP 神经网络算法在径流预测中的应用[J]. 自然资源学报,2009,24(11):2005-2012. (SHI Biao, LI Yuxia, YU Xinhua, et al. Long-term runoff forecast method based on resilient adaptive artificial fish school algorithm and back propagation neural network model[J]. Journal of Natural Resources,2009,24(11):2005-2012. (in Chinese))

[5] 赵雪花,黄强,吴建华. 基于灰色马尔可夫链的径流序列模式挖掘[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(1):1-4. (ZHAO Xuehua, HUANG Qiang, WU Jianhua. Runoff series pattern mining based on grey markov chain [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(1):1-4. (in Chinese))

[6] 张晓伟,沈冰,黄领梅. 基于 BP 神经网络的灰色自记忆径流预测模型[J]. 水力发电学报,2009,28(1):68-71. (ZHANG Xiaowei, SHEN Bing, HUANG Lingmei. Grey self-memory model based on BP neural network for annual runoff prediction [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(1):68-71. (in Chinese))

[7] 吴丽娜,黄领梅,沈冰. 大峪河年径流量的灰色拓扑预测与趋势分析[J]. 人民黄河,2012,34(1):62-65. (WU Lina,HUANG Lingmei,SHEN Bing. Analysis of dynamic trend and grey topology prediction of annual runoff in Dayu River [J]. Yellow River, 2012, 34 (1): 62-65. (in Chinese))

[8] 邱林,孟晓红. 基于灰色神经网络理论的东江水库入库径流量预测[J]. 华北水利水电学院学报,2012,33(2):43-45. (QIU Lin, MENG Xiaohong. Prediction for the runoff into Dongjiang Reservoir based on grey neural network theory [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33 (2): 43-45. (in Chinese))

[9] 李宝玲,李建林,咎明君,等. 河流年径流量的 *R/S* 灰色预测[J]. 水文,2015,35(2):44-48. (LI Baoling, LI Jianlin, ZAN Mingjun, et al. *R/S* grey prediction of river annual runoff [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35 (2): 44-48. (in Chinese))

[10] 李建林,咎明军,李宝玲. 基于 *R/S* 分析的黑河出山口年径流量灰色预测[J]. 地域研究与开发,2014,33(5):127-131. (LI Jianlin, ZAN Mingjun, LI Baoling. Grey prediction of out-mountainous annual runoff of Heihe River based on *R/S* analysis [J]. Areal Research and Development,2014,33(5):127-131. (in Chinese))

[11] 禹朴家,徐海量,刘世薇,等. 阿克苏河年径流变化的非线性特征[J]. 自然资源学报,2011,26(8):1412-1422. (YU Pujia, XU Hailiang, LIU Shiwei, et al. The nonlinear characteristics of annual runoff change in Aksu River [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26 (8): 1412-1422. (in Chinese))

(下转第 68 页)

- al. Analysis of autogenic volume deformation of MgO concrete at long age[J]. Hydro-science and Engineering, 2015(5):54-5. (in Chinese))
- [7] 陈昌礼,唐成书. 氧化镁混凝土在东风拱坝基础中的应用及长期观测成果分析[J]. 水力发电学报, 2006, 25(4): 102-107. (CHEN Changli, TANG Chengshu. The application of MgO concrete in Dongfeng Arch Dam foundation and the analysis of long-term prototype observation results [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(4): 102-107. (in Chinese))
- [8] 赵其兴. 氧化镁混凝土拱坝的宏观变形[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 73-107. (ZHAO Qixing. Macroscopic deformation of MgO concrete arch dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6): 73-107. (in Chinese))
- [9] GB/T 750—1992 水泥压蒸安定性试验方法[S].
- [10] 曹泽生,徐锦华. 氧化镁混凝土筑坝技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [11] 陈昌礼. 水工混凝土中氧化镁安定掺量的判定方法述评[J]. 水利水电技术, 2015, 46(9): 135-138. (CHEN Changli. Review on methods for determining soundness admixing amount of magnesium oxide in hydraulic concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(9): 135-138. (in Chinese))
- [12] 张国新,杨卫中,罗恒,等. MgO 微膨胀混凝土的温降补偿在三江拱坝的研究和应用[J]. 水利水电技术, 2006,
- 37(8): 20-23. (ZHANG Guoxing, YANG Weizhong, LUO Heng, et al. Application and study of MgO micro-expanding concrete for construction of Sanjiang Arch Dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(8): 20-23. (in Chinese))
- [13] 徐琼. 外掺氧化镁混凝土筑坝技术探讨[J]. 人民长江, 2008, 39(8): 52-53. (XU Qiong. Discussion on damming technology of MgO concrete [J]. Journal of Yangtze River, 2008, 39(8): 52-53. (in Chinese))
- [14] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000, 70(3): 1-13. (ZHU Bofang. On Construction of Dams by Concrete With Gentle Volume Expansion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000, 70(3): 1-13. (in Chinese))
- [15] 陈昌礼,方坤河. 外掺氧化镁混凝土安定性模拟试验方法的研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 241-244. (CHEN Changli, FANG Kunhe. Study on simulation test method for invariability of concrete with light-burned magnesium oxide [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 241-244. (in Chinese))
- [16] 王金海. 用水量对混凝土强度的影响[J]. 施工技术, 2005, 34(4): 48-50. (WANG Jinhai. Influence of water consumption on concrete strength [J]. Construction Technology, 2005, 34(4): 48-50. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-03-25 编辑: 郑孝宇)

(上接第 19 页)

- [12] 徐宗学,李占玲,史晓坤. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 121-128. (XU Zongxue, LI Zhanling, SHI Xiaokun. Long-term trends of major climatic variables and runoff in the Shiyang River Basin [J]. Resources Science, 2007, 29(5): 121-128. (in Chinese))
- [13] 赵晶,王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 90-95. (ZHAO Jing, WANG Naiang. R/S analysis of urbanization effect on climate in Lanzhou [J]. Arid Land Geography, 2002, 25(1): 90-95. (in Chinese))
- [14] 张晓伟,沈冰,黄领梅. 和田河年径流变化规律研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(6): 975-979. (ZHANG Xiaowei, SHEN Bing, HUANG Lingmei. Study on the variation law of the annual runoff in Hotan River [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(6): 975-979. (in Chinese))
- [15] 燕爱玲,黄强,刘招. R/S 法的径流时序复杂特性研究[J]. 应用科学学报, 2007, 25(2): 214-217. (YAN Ailing, HUANG Qiang, LIU Zhao. Complicated property of runoff time series studied with R/S method [J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 25(2): 214-217. (in Chinese))
- [16] 何新林,宋玲,郑旭荣. 径流中长期预报的灰色预测方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 1997, 1(3): 234-237. (HE Xinlin, SONG Ling, ZHENG Xurong. A grey forecasting method of mid-long term runoff forecasting [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1997, 1(3): 234-237. (in Chinese))
- [17] 郭巧玲,杨云松,鲁学钢. 黑河流域 1957—2008 年径流变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(3): 77-81. (GUO Qiaoling, YANG Yunsong, LU Xuegang. Analysis of variation character of annual runoff in Heihe River basin from 1957 to 2008 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(3): 77-81. (in Chinese))
- [18] 王兆礼,陈晓宏,杨涛. 近 50a 东江流域径流变化及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1365-1372. (WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, YANG Tao. Runoff variation and its impacting factors in the Dongjiang River Basin during 1956—2005 [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1365-1372. (in Chinese))
- [19] 王云璋,薛玉杰,彭子芳,等. 太阳黑子活动与黄河径流、洪水关系初探[J]. 西北水资源与水工程, 1997(3): 30-36. (WANG Yunzhang, XUE Yujie, PENG Zifang, et al. A preliminary study on the relationship between sunspot activity and Yellow River's runoff and flood [J]. Water Resources and Water Engineering, 1997(3): 30-36. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-11-18 编辑: 骆超)