基于小波分析和灰色预测的莺落峡年径流量特征分析

李培都[1,2], 司建华[1], 冯 起[1], 赵春彦[1,2], 王春林[1,2]
(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 阿拉善荒漠生态水文试验研究站/
内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 101408)

摘 要: [目的] 研究黑河莺落峡年径流量的变化规律及周期特征,为水量调配和水资源管理提供理论基础与科学依据。[方法] 基于黑河莺落峡水文站 1944—2014 年径流量实测资料,采用 Morlet 小波分析、Mann-Kendall 突变和灰色预测等方法分析了莺落峡流域径流变化趋势及其变化特征。[结果] 莺落峡年径流量呈现微弱的增加趋势,年径流量距平百分率的倾向率为 2.78%/10 a。在莺落峡流域径流小波方差分析图中,有 4 个较为明显的峰值,它们依次对应的时间尺度为 43,56,12 和 9 a。43 a 时间尺度对应的最大峰是莺落峡流域年径流变化的第一主周期。根据年径流主周期的循环交替特征推测,在 2020 年左右莺落峡流域处于丰水时期,年径流量预测为 1.843×10^9 m^3。[结论] 莺落峡年径流量周期变化特征明显,径流量呈增加趋势。

关键词: 莺落峡; 年径流量; 小波分析; 灰色预测
文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2017)04-0242-06 **中图分类号**: X824

文献参数: 李培都, 司建华, 冯起, 等. 基于小波分析和灰色预测的莺落峡年径流量特征分析[J]. 水土保持通报,2017,37(4):242-247. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.041; Li Peidu, Sijian Hua, Feng Qi, et al. Analysis of annual runoff characteristics of Yingluoxia based on wavelet analysis and gray prediction [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(4):242-247. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.041

Analysis of Annual Runoff Characteristics of Yingluoxia Based on Wavelet Analysis and Gray Prediction

LI Peidu[1,2], SI Jianhua[1], FENG Qi[1], ZHAO Chunyan[1,2], WANG Chunlin[1,2]
(1. *Key laboratory of Eco-hydrology of Inland River Basin, Alxa Desert Eco-hydrological Experimental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*, 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 101408, *China*)

Abstract: [Objective] The changing regularity and cycle characteristics of annual runoff of Yingluoxia in Heihe River was researched to provide theoretical and scientific bases for water allocation and water resources management. [Methods] Based on the measured data of runoff from Yingluoxia hydrological station in Heihe River basin during 1944 to 2014, Morlet wavelet analysis, Mann-Kendall mutation and gray prediction were used to analyze the trend of runoff and its variation characteristics. [Results] Yingluoxia annual runoff had a slight upward trend, the tendency of annual runoff anomaly percentage rate was 2.78%/10 a. Yingluoxia runoff wavelet variance figure had four obvious peaks, in turn corresponding to 43-year, 56-year, 12-year and 9-year time scales. Among them, the maximum peak is at 43-year time scale, and this is the first major cycle of runoff change. According to the cyclic alternation of main runoff, the Yingluo Gorge basin will be in the period of abundant water in 2020, and the annual runoff is predicted to be 1.843 billion m^3. [Conclusion] The annual variation of runoff is obvious and the runoff is increasing in Yingluoxia basin.

Keywords: **Yingluoxia basin; annual runoff; wavelet analysis; Gray Prediction**

河川径流的变化受自然因素及人类活动的影响,如气候、地貌、土壤、植被等因素,对水文序列规律的揭示一直是水文领域的研究重点[1]。径流演变过程表现出一定的规律性,同时也伴随着强烈的随机性[2]。随着全球气候变暖[3-4],径流量也发生着时空变化,且已成为水文学中的研究热点[5-6]。根据 IPCC

收稿日期:2017-01-18 **修回日期**:2017-02-24
资助项目:国家重点研发计划项目"无控制性工程地区洪水疏渗蓄综合利用技术"(2016YFC0400908)
第一作者:李培都(1989—),男(汉族),甘肃省庆阳市人,硕士研究生,研究方向为寒区旱区水文水资源。E-mail:lpeidu@126.com。
通讯作者:司建华(1979—),男(汉族),甘肃省会宁县人,博士,研究员,主要从事荒漠河岸林生态水文等方面的研究。E-mail:jianhuas@lzb.ac.cn。

第四次评估报告,近 100 a 来全球气温升高了 0.74 ℃[7],这势必影响区域水资源系统时空的再分配过程。同时,河川径流特征的变化还影响水资源的开发利用,并进一步影响着社会经济的发展[8]。在这种全球气候变化下,中国西北地区也存在从暖干向暖湿转变的强劲信号[9-10]。其中,黑河是我国第二大内陆河,发源于青海省祁连山北麓,流经青海、甘肃、内蒙古三省(区)。流域范围介于东经 97°—102°、北纬 37°50′—42°40′,南以祁连山为界,北与蒙古国接壤,东与石羊河流域相邻,西与疏勒河流域相接,流域总面积 1.43×10^5 km^2[11]。黑河干流水系全长 928 km,出山口莺落峡以上为上游,河道长 313 km,河道两岸山高谷深,河床陡峭,气候阴湿寒冷,植被较好,多年平均气温不足 2 ℃,年降水量 350 mm 左右,是黑河流域的产流区[12]。小波分析在水文要素分析中被广泛应用,是一种有时频多分辨率功能的时序分析法。在 1984 年 Morlet[13] 应用于地震数据分析,Kumar等人[14]在 1993 年运用正交小波变换分析了空间降水的尺度和振荡特征。此后,小波分析在水文时间序列分析等方面飞速发展[15-26]。衡彤[27]利用小波变换对降水量时间序列的多时间尺度变化及突变特征进行了探讨;郑龙飞[26]利用小波分析对长江和黄河源区汛期、枯水期径流特征进行了研究;凌红波[28]利用小波分析等方法研究了叶尔羌河年径流量与降水量的集中性及多时间尺度相关关系。本文利用小波分析探讨了黑河莺落峡流域年径流量的周期特征,旨在为黑河流域的水量调配和水资源合理利用提供一定的支撑和理论依据[29]。

1　材料与方法

1.1　资料来源与方法

莺落峡水文站 1944—2014 年径流量时间序列实测资料,采用 Matlab 年进行分析绘图。

1.2　倾向分析和 Mann-Kendall 突变检验

对径流资料进行线性拟合,得到形如 $y=at+b$ 线性函数,利用最小二乘法计算出 a 和 b,斜率 a 就是气候要素变化的一种线性趋势表述[21]。Mann-Kendall 法是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受异常值的干扰[30]。

1.3　周期分析方法

利用 Morlet 小波对黑河流域莺落峡水文站年径流量观测资料进行周期性分析[31,32]。Morlet 小波是常用的复数形式的小波函数,其表达式为:

$$\psi(\eta)=\pi^{-\frac{1}{4}}e^{i\omega\eta}e^{-\frac{\eta^2}{2}} \tag{1}$$

离散时间序列 $x_n(x=0,\cdots,N-1)$ 的连续小波变换可以定义成包含尺度参数 s 和平移参数 n 的函数 $\psi_0(\eta)$ 与 X_n 的卷积:

$$W_n(s)=\sum_{n'}^{N-1}cn'\psi^*\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] \tag{2}$$

式中:$W(s)$——小波变换系数;$*$——复共轭关系。

将小波系数的平方值在 n 域上积分,便得到小波方差,即

$$\mathrm{var}(s)=\int_{-\infty}^{\infty}|W_n(s,n)|^2\mathrm{d}n \tag{3}$$

小波方差随尺度 S 的变化过程,称为小波方差图。由公式(3)可知,它能反应信号波动的能量随尺度 S 的分布。因此,小波方差图将确定信号中不同种尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度,即主周期。由于历史观测资料长度有限,数据两端客观上存在着边界效应,所以在分析前要消除边界效应对数据造成的影响。利用对称延伸法得到长度为原始序列 2 倍的数据序列,待小波变换完成后,保留原始时段内的小波系数进行结果分析。

1.4　灰色预测

灰色预测是对无规律的数据进行累加,得到规律性比较强的数据序列,利用微分方程进行数据信息挖掘的一种模型方法。为了保证此方法的可行性,在预测之前对原始数据序列进行检验。设原始数据序列为 $x^{(0)}=[x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n)]$,计算此序列的级比 $\lambda(k)=\dfrac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)}$, $k=(2,3,\cdots,n)$。

使所有的级比 $\lambda(k)$ 都落在可容覆盖 $\Theta=(e^{-\frac{2}{n+1}},e^{\frac{2}{n+2}})$ 内,则原始数据序列可进行灰色预测。否则,对原始数据序列进行变换,使所计算级比落入可容覆盖区间。通常是取适当的常数,作平移变换 $y^{(0)}(k)=x^{(0)(k)}+c$, $k=(1,2,\cdots,n)$

使序列 $y^{(0)}=[y^{(0)}(1),y^{(0)}(2),\cdots,y^{(0)}(n)]$ 的级比 $\lambda_y(k)=\dfrac{y^{(0)}(k-1)}{y^{(0)}(k)}\in\Theta$, $k=(2,3\cdots,n)$,然后对平移变换后的序列进行灰色预测,预测结果作反向的平移处理,即得到预测结果。由于篇幅有限,本文不再赘述,具体实现过程见参考文献[33]。

2　结果与分析

2.1　年径流量距平百分率趋势分析

莺落峡年径流量呈现明显的增加趋势(图 1),年径流量距平百分率的倾向率为 2.78%/10 a。年径流量较大的 4 个年份分别为 1989,2014,1952 和 1998 年;超出平均值依次为 41.47%,34.34%,31.73%和 31.59%。年径流量较小的 4 个年份分别为 1973,1950,1947 和 1962 年;低于平均值依次为 31.64%,

27.89%,25.19%和 22.32%。从图 1 可以看出,UF 统计量在 1954 年之后一直大于 0,也说明年径流量呈现增加趋势。在 2009 年之后,这种增加趋势超过 0.05 临界线水平,表明年径流量增加趋势是十分显著的。根据 UF 统计量和 UB 统计量的交点位置判断,突变始于 2005 年。

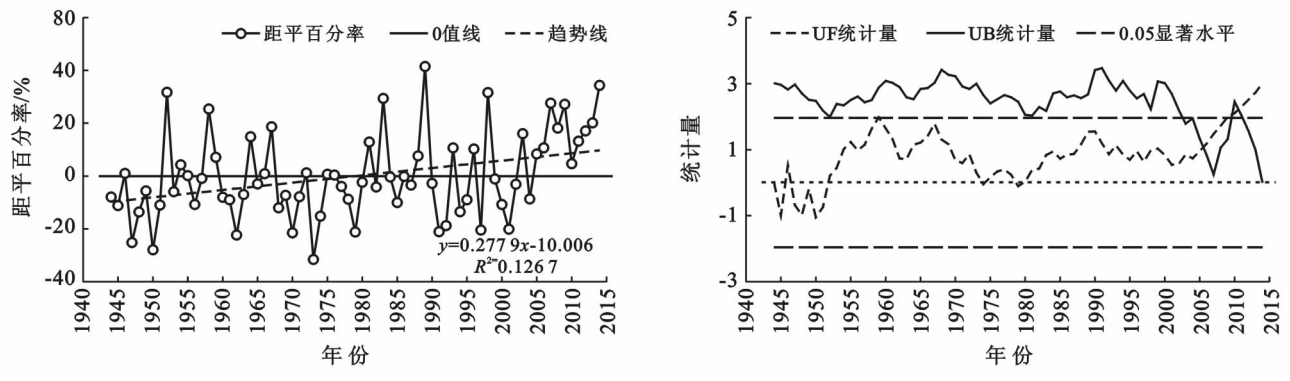


图 1 1944—2014 年莺落峡年径流量距平百分率及 Manner-Kendall 统计量曲线

2.2 径流量的多时间尺度分析

小波分析的结果如图 2 所示。由图 2 可知,莺落峡年径流周期变化过程中存在着 3 类不同的时间尺度特征。其中,35～64 a 尺度特征明显,从 1944—2014 年,表现出枯—丰交替的准 3 次震荡;10～15 a 尺度上存在准 5 次震荡,且这两个尺度的周期变化在分析时段具有全域性;7～12 a 尺度变化特征频繁,但较为稳定,同时存在明显的 2～3 a 短周期。在小波方差图中,存在着较为明显的 4 个峰值,依次对应的是 43,56,12 和 9 a 的时间尺度。其中,最大峰值对应的是 43 a 时间尺度,说明 43 a 左右的周期振荡较强,是年径流变化的第 1 主周期;第 2 主周期为 56 a 时间尺度特征,第 3、第 4 峰值分别对应着 12 和 9 a 的时间尺度,它们依次为流域径流的第 3 和第 4 主周期,表明这 4 个周期的波动控制着莺落峡流域年径流在整个时间域内的变化特征。小波系数模值反映了能量密度在时间域中的分布情况,大小对应着尺度周期性的强弱[34]。

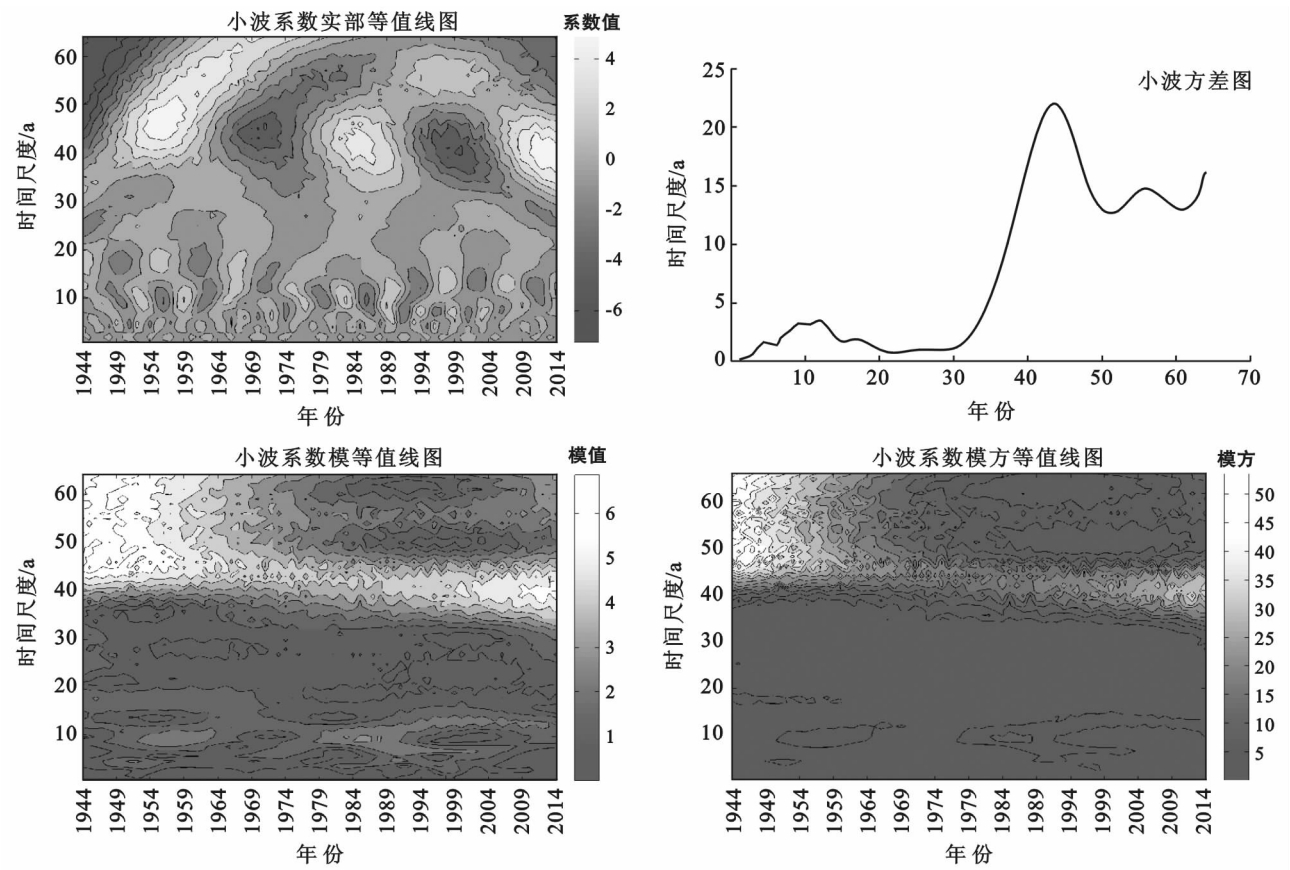


图 2 莺落峡年径流量小波分析结果

在图 2 中,35～64 a 时间尺度的模值最大,但在 1984—2004 年期间,35～64 a 时间尺度的周期变化并不是很明显,18～35 a 时间尺度的周期变化次之,而其他时间尺度的周期性特征变化较小。小波系数的模方可分析出不同周期的震荡能量。由图 2 知,45～64 a 时间尺度的能量最强、周期最显著,在 1984—2009 年之间,这个能量是比较弱的,从总体的研究时间来看,这种变化存在局部性;10～15 a 时间尺度能量虽然较弱,但周期分布比较明显,几乎占据整个研究时域。

2.3　径流量预测及主要周期分析

为了保证灰色预测方法的可行性,利用级比进行检验,使所有的级比落入可容覆盖($e^{-\frac{2}{n+1}}$,$e^{\frac{2}{n+1}}$)(n 为样本数,本文 $n=70$)内,级比检验结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,原始样本级比最大值为 1.491 4,最小值为 0.616 1,级比不能覆盖级比检验区间,对原始样本进行平移变换(向右平移 250 个单位),变换后级比最大值为1.026 8,最小值为 0.969 3,所有级比均落入 区间内,进行灰色预测,预测结果经过平移变换还原后结果如图 4 所示,预测残差和相对误差图 3 所示,相对平均误差为 2.25%。莺落峡年径流量呈现线性增加趋势,到 2025 年,年径流预测结果为 1.843 $\times10^9$ m^3。

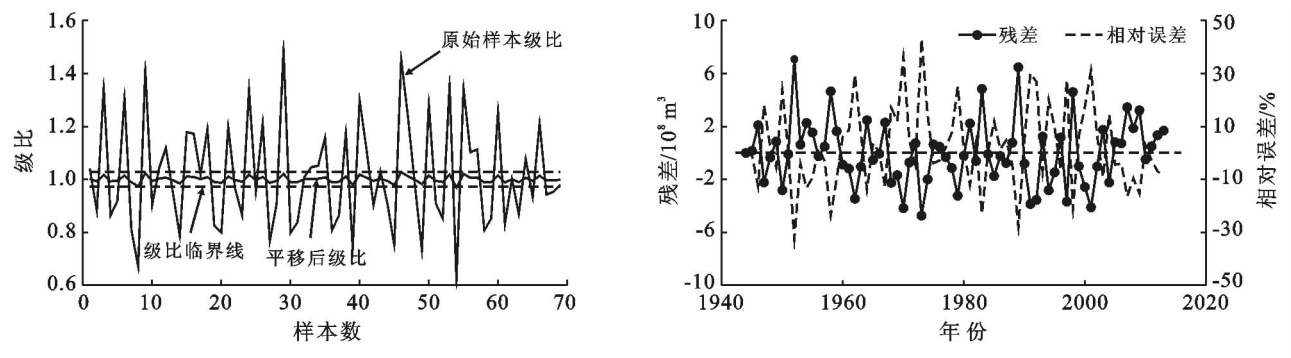


图 3　灰色预测级比检验结果及预测误差

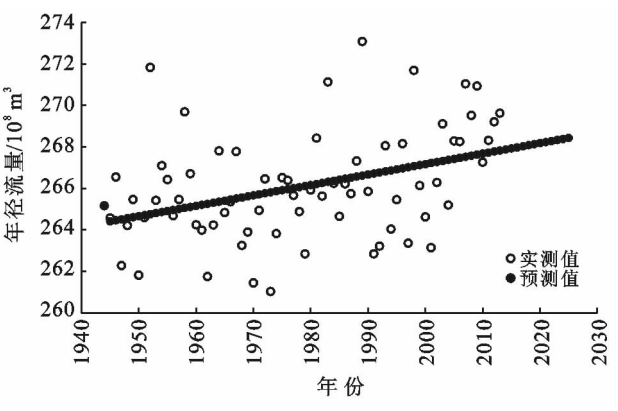


图 4　莺落峡年径流量灰色预测结果

同时根据小波方差检验的结果,绘制了控制流域径流演变的第 1 和第 2 主周期小波系数图(图 5),分析在不同的时间尺度下流域径流存在的平均周期及丰枯变化特征。图 5 显示,在 43 a 特征时间尺度上,流域径流变化的平均周期为 30 a 左右,大约经历了 2 个丰—枯转换期,在 2000 年左右莺落峡将处于一个相对较枯的阶段之后,于 2010 年左右莺落峡将处于一个相对较丰的时期,在研究时间范围内,莺落峡径流量在 1959,1975,1991,2005 年发生了突变。而在 56 a 特征时间尺度上,流域的平均变化周期为 20 a 左右,大约经历了 1.5 个周期的丰—枯变化,年径流突变点也近 6 个,在此特征尺度下未来径流量变化趋势将由枯向丰转变。12 a 尺度和 9 a 尺度的周期振荡已不是很明显。

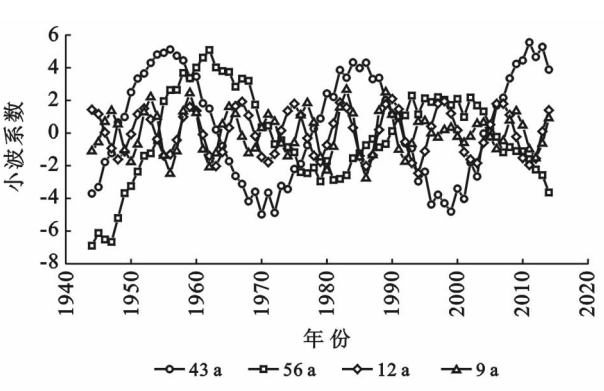


图 5　莺落峡年径流主周期小波变化过程线

3　讨 论

莺落峡年径流量呈增加趋势,这与丁志宏[35]、郭巧玲等[36]的研究结果一致,郭巧玲等[37]研究表明莺落峡径流量年增率为每 5.0×10^7 t/10 a,原因是祁连山区夏季降水增多和冬季气温变暖融雪增加所导致。根据 IPCC 第 5 次报告[38],全球温度增高,这对全球水循环尤其是中国西北干旱区靠冰川和积雪融水补给为主的河流将产生极大的影响[39-41]。曹辉等[42]的研究表明,莺落峡径流没有减少的原因是地处出山

口，是径流形成区，受到全球气候变暖的影响，导致祁连山雪线上升，冰川萎缩，水量补给增加，这是莺落峡年径流量呈现增加趋势的原因之一。戴春霞[43]研究了莺落峡径流量与降雨量之间的关系，总体变化趋势基本一致，但极值不相对应，在2008年左右，降水量过程与莺落峡径流量呈现负相关关系，表明降水并不是影响径流变化特征的唯一因素。根据Manner-Kendall分析结果，突变开始于2005年。针对黑河流域出现的生态问题，如下游断流、湖泊干涸、胡杨林大片死亡、土地沙化、盐碱化等[44-46]，1992年国家计划委员会批复了“黑河干流分水方案”，1997年国务院批准“黑河干流水量分配方案”，2000年实现第一次跨省区调水[47-48]，对黑河流域水量进行统一调度是主要变化原因之一。

在流域径流演变过程中存在着35～64 a，10～15 a以及5～7 a 3类不同尺度的周期变化。其中，35～64及10～15 a两个尺度的周期变化在整个分析时段表现的非常稳定，具有全域性。综合来看，35～64 a时间尺度的能量最强、周期最显著，但它的周期变化具有局部性，莺落峡流域年径流量受多重周期性规律控制，明显地存在2～3 a和5～7 a短期振荡周期；20 a左右的中期振荡周期和50 a左右的长期振荡周期。从振荡的剧烈程度上看，50 a左右的长周期是年径流的主要控制周期，但具有时域性，大概到1970年左右，70年代以后，40 a尺度的周期振荡能量远高于其他时期。

根据年径流的主周期推测，莺落峡流域整个时间序列上的年径流量呈现出偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多的循环交替特征，可以推测2020年左右将处于丰水时期。小波分析的时频化特性可展现降水时间序列的精细结构，清晰地给出各种时间尺度周期的强弱和振荡能量分布状况，对时间序列的演变趋势可以进行定性的估计，从而为分析气候多时间尺度变化特征和短期气候预测提供一种新途径。

4 结论

(1) 莺落峡年径流量以呈现微弱的增加趋势，年径流量距平百分率的倾向率为2.78%/10 a。

(2) 莺落峡流域径流的小波方差图中存在4个较为明显的峰值，它们依次对应着43，56，12和9 a的时间尺度。其中，最大峰值对应着43 a的时间尺度，这是流域年径流变化的第一主周期。

(3) 在43 a特征时间尺度上，流域径流变化的平均周期为30 a左右，大约经历了2个丰—枯转换时期。

(4) 根据年径流主周期的循环交替特征推测，在2020年左右莺落峡流域处于丰水时期，年径流量预测为1.843×10^9 m^3。

[参 考 文 献]

[1] 安全，梁川，刘政. 雅砻江中上游径流变化特性的小波分析[J]. 武汉大学学报：工学版，2008，41(3)：20-24，28.

[2] 刘海猛，石培基，周俊菊，等. 石羊河中游径流损耗特征及其影响因素[J]. 地理科学进展，2013，32(1)：87-94.

[3] 刘卫平，张镭，田鹏飞，等. 1981—2010年甘肃夏季高温天气和高温日数变化分析[J]. 兰州大学学报：自然科学版，2016，52(4)：475-478.

[4] 张红丽，张强，刘骞，等. 中国干旱状况的时空分布特征及影响因素[J]. 兰州大学学报：自然科学版，2016，52(4)：484-491.

[5] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P.. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. Nature, 2005, 438(7066): 303-309.

[6] Beniston M. Climatic change: Implications for the hydrological cycle and for water management[J]. Advances in Global Change Research, 2002, 10(2): 194-198.

[7] 赵一飞，张勃，张亚宁，等. 近50年来黑河流域气候变暖对农业生产的影响[J]. 干旱区资源与环境，2012，26(12)：130-136.

[8] 杨明金，张勃. 黑河莺落峡站径流变化的影响因素分析[J]. 地理科学进展，2010，29(2)：166-172.

[9] 郝兴明，李聪，李卫红，等. 北疆西部近50年来气候、水文变化趋势及其与北大西洋/北极涛动的关系[J]. 中国沙漠，2011，31(1)：191-198.

[10] 时兴合，李生辰，李栋梁，等. 青海湖周边年代际气候振动及其对青海高原气候变化的响应[J]. 中国沙漠，2008，28(5)：931-939.

[11] 楚永伟，蓝永超，李向阳，等. 黑河莺落峡站年径流长期预报模型研究[J]. 中国沙漠，2005，25(6)：77-81.

[12] 王录仓，张晓玉. 黑河流域近期气候变化对水资源的影响分析[J]. 干旱区资源与环境，2010，24(4)：60-65.

[13] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M]. 北京：科学出版社，2002：2-12.

[14] Kumar P, Foufoula G E. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields: 2. Self-similarity in fluctuations[J]. Water Resources Research, 1993, 29(8): 2533-2544.

[15] 胡安焱，郭生练，陈华，等. 基于小波变换的汉江径流量多时间尺度分析[J]. 人民长江，2006，37(11)：61-62，89.

[16] 钟瑞森，郝丽娜，谢蕾. 基于小波变换的开都河径流量多时间尺度分析[J]. 人民黄河，2011，33(8)：34-36.

[17] 黄莹,胡宝清.基于小波变换的南流江年径流量变化趋势分析[J].广西师范学院学报:自然科学版,2015,32(3):110-114.

[18] 梁四海,万力,胡伏生,等.基于小波方法的黄河源头径流量的周期变化规律[J].南京大学学报:自然科学版,2007,43(3):300-308.

[19] 古丽孜巴·艾尼瓦尔,麦麦提吐尔逊·艾则孜,米热古丽·艾尼瓦尔,等.基于小波分析 1956—2010 年焉耆盆地清水河径流量季节变化规律[J].水土保持研究,2016,23(1):210-214,220.

[20] 刘宇峰,孙虎,原志华.基于小波分析的汾河河津站径流与输沙的多时间尺度特征[J].地理科学,2012,32(6):764-770.

[21] 勾丽杰,刘利民.基于小波分析的河北平原四季降水变化特征分析[J].沈阳农业大学学报,2012,43(3):273-278.

[22] 冯夏清.基于小波分析的浑河流域径流量周期分析[J].吉林水利,2015,394(3):39-41.

[23] 夏库热·塔依尔,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等.基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J].水土保持研究,2014,21(1):142-146,151.

[24] 陈连惠,张光锦,陈连芹,等.基于小波分析的柳河地区年降水量和径流量变化规律分析[J].海河水利,2013(2):47-49,57.

[25] 姚阿漫,李文宾.基于小波分析的石羊河流域径流量的变化趋势[J].地下水,2013,35(4):118-119,148.

[26] 邴龙飞,邵全琴,刘纪远,等.基于小波分析的长江和黄河源区汛期、枯水期径流特征[J].地理科学,2011,31(2):232-238.

[27] 衡彤,王文圣,丁晶.降水量时间序列变化的小波特征[J].长江流域资源与环境,2002,11(5):466-470.

[28] 凌红波,徐海量,张青青,等.叶尔羌河年径流量与降水量的集中性及相关性分析[J].中国沙漠,2012,32(6):1757-1764.

[29] 刘志方,刘友存,郝永红,等.黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J].干旱区地理,2014,37(6):1137-1146.

[30] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:69-72.

[31] Torrence G P. Compo. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998,79(1):61-78.

[32] 刘闻,曹明明,邱海军.1956—2005 年榆林地区河川基流量的小波分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):121-126.

[33] 李月秋.灰色预测模型的应用研究[J].数学的实践与认识,2013,43(11):90-95.

[34] 陈浩伟.翁源近 50 年气候变化的多时间尺度分析[J].北京:第 31 届中国气象学会年会:大气成分与天气,气候变化,2014.

[35] 丁志宏,冯平,牛军宜.黑河莺落峡年径流量时序变化的趋势特性及丰枯演化规律研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(10):59-63.

[36] 郭巧玲,杨云松,畅祥生,等.1957—2008 年黑河流域径流年内分配变化[J].地理科学进展,2011,30(5):550-556.

[37] 郭巧玲,杨云松,鲁学纲.黑河流域 1957—2008 年径流变化特性分析[J].水资源与水工程学报,2011,22(3):77-81.

[38] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.

[39] 陈亚宁,徐长春,杨余辉,等.新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J].地理学报,2009,64(11):1331-1341.

[40] 刘友存,刘志方,郝永红,等.基于交叉小波的天山乌鲁木齐河出山径流多尺度特征研究[J].冰川冻土,2013,35(6):1564-1572.

[41] 张强,赵映东,张存杰,等.西北干旱区水循环与水资源问题[J].干旱气象,2008,26(2):1-8.

[42] 曹辉,黄强,畅建霞,等.黑河径流时空演变规律分析[J].水资源与水工程学报,2008,19(5):69-72.

[43] 戴春霞.黑河径流演变趋势及成因分析[J].甘肃水利水电技术,2010,46(9):4-6,9.

[44] 李森,李凡,孙武,等.黑河下游额济纳绿洲现代荒漠化过程及其驱动机制[J].地理科学,2004,24(1):61-67.

[45] 王根绪,程国栋.近 50 年来黑河流域水文及生态环境的变化[J].中国沙漠,1998,18(3):43-48.

[46] 王根绪,王建,仵彦卿.近 10 年来黑河流域生态环境变化特征分析[J].地理科学,2002,22(5):527-534.

[47] 卢振园,唐德善,郑斌,等.黑河下游调水及近期治理生态影响后评价[J].环境科学学报,2011,31(7):1556-1561.

[48] 王钧,蒙吉军.黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素[J].地理科学,2008,28(1):83-88.