

基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河 上游径流变化特征

谢智博¹, 穆兴民^{1,2}, 高鹏^{1,2,3}, 邱德勋^{2,3}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了深入探究北洛河上游长时间序列年径流量变化规律及周期特征,加强对流域水资源规划管理和可持续开发利用,基于北洛河上游吴旗水文站 1971—2014 年实测径流量数据,采用 M-K(Mann-Kendall)趋势检验法和 R/S 法(rescaled range analysis)分析了全年及汛期径流量的变化趋势和持续性;并采用 Morlet 小波变换对径流时间序列进行了多尺度周期特征分析。结果表明:(1)从径流量年内分配来看,1971—2014 年,北洛河上游径流年内集中分布在 6—9 月,月最大径流量一般出现在 8 月,分配曲线呈“双峰型”。随着时间推移,径流量年内分配不均匀性逐渐减弱;(2)汛期径流量占年径流量的比例降低,全年和汛期的径流量变化均呈显著减少趋势($p < 0.05$),且未来变化趋势与过去一致的可能性很大,即减少趋势具有一定的持续性(全年和汛期径流量序列 Hurst 值分别为 0.53, 0.69);(3)北洛河上游径流量呈现出多尺度性、主周期性和同步性变化的特点。汛期和全年径流量具有相似且显著的变化周期,主要受到 3, 11, 19 a 左右 3 个主周期的影响。总之,北洛河上游径流量呈显著减少趋势且变化周期比较明显。

关键词:北洛河; 径流; R/S 分析; Morlet 小波变换

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0139-06

Variation Characteristics of Runoff in the Upper Reaches of Beiluo River Based on R/S and Morlet Wavelet Analysis

XIE Zhibo¹, MU Xingmin^{1,2}, GAO Peng^{1,2,3}, QIU Dexun^{2,3}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to deeply study the variation rule and periodic characteristics of long-term sequence annual runoff in the upper reaches of the Beiluo River and strengthen the management of water resources planning and sustainable development and utilization in the basin, the variation trends and continuity of runoff throughout the year and the flood season were analyzed by using the Mann-Kendall test and rescaled range analysis methods, and Morlet continuous wavelet transform method was applied to perform the multi-scale analysis of runoff periodic characteristic in the long time series in the upper reaches of the Beiluo River, based on the runoff data measured by Wuqi hydrological station from 1971 to 2014 in the upper reaches of the Beiluo River. The results showed that: (1) the distribution of runoff in a year concentrated from June to September from 1971 to 2014, the maximum amount of runoff occurred in August, the distribution presented a double-peak curve, moreover, with the passage of time, the non-uniformity of distribution of annual runoff gradually weakened; (2) the proportion of runoff in flood season to annual runoff decreased, the runoff variation in a year and flood season showed the significant decreasing trend ($p < 0.05$), this trend presented a continuity to some extent (Hurst values of runoff in a year and the flood season are respectively 0.53 and 0.69), therefore, there was a high probability about the trend, which will continue in the future; (3) the

收稿日期:2021-01-13

修回日期:2021-03-06

资助项目:国家重点研发计划专题计划“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707)

第一作者:谢智博(1997—),男,河南偃师人,在读硕士研究生,研究方向为生态水文及水土保持。E-mail:1025638702@qq.com

通信作者:高鹏(1976—),男,陕西扶风人,博士,研究员,博士生导师,主要从事生态水文及水土保持研究。E-mail:gaopeng@ms.iswc.ac.cn

runoff variation showed the characteristics of multi-scale, main periodicity and synchronization during the period of from 1971 to 2014, there was a similar and significant runoff variation period in the flood season and the whole year, including the three main periods of 3-year, 11-year and 19-year. In a word, the upstream runoff of the Beiluo River showed the significant decrease trend and the variation periods were obvious.

Keywords: Beiluo River; runoff; R/S analysis; Morlet wavelet

径流量是流域气候及下垫面综合作用的结果,同时是流域水资源分配的重要依据,其变化通常可以使水资源供需关系发生改变从而导致旱涝灾害的发生。黄土高原地区气候暖干化以及大范围退耕还林(草)等生态修复工程的实施导致黄河干流及其支流的径流量发生了显著的变化,进而对流域生态环境和社会经济可持续发展造成一定的威胁^[1-3]。目前,国内众多学者对于径流变化已经做了大量研究。如李二辉等^[4]通过分析黄河干流陕县站和河口镇站径流量演变过程,得到自 1985 年以来,黄河上、中游年径流量呈不断减小趋势,径流变化具有明显的阶段性,经历了枯一丰一枯 3 个时期。在渭河流域径流年际变化方面,黄晨璐等^[5]依据渭河 1956—2016 年实测径流资料,得到渭河径流量呈显著减少趋势,且分别在 1970 年和 1994 年发生突变。对于径流量减少的原因,张丽梅^[6]、Zhao^[7]等对渭河流域多年实测径流数据进行了系统分析,指出剧烈的人类活动所引起的下垫面变化是径流量减少的主要因素,而且在不同水土保持措施的实施阶段,其对径流变化的影响程度要远远大于气候变化(如降水变化和潜在蒸散发)。针对渭河流域径流量未来的变化趋势,王小杰等^[8]研究表明,渭河流域径流量未来变化趋势与历史演变规律具有正相关性,即渭河干流径流将呈持续下降趋势。北洛河是黄河中下游多砂粗砂区和暴雨洪水等自然灾害的主要源头,其水文水资源的变化同样引起了学者们的广泛关注。如晁智龙^[9]和董其广等^[10]以实测水文数据为基础,分析了北洛河流域径流的变化,得出志丹、吴旗、刘家河以及交口的年径流量均表现为极显著减少趋势,而且在 20 世纪 60、70 年代,其径流量在年内分配比较集中,丰水期和枯水期径流量变化趋势与全年基本保持一致。随着近几年北洛河上游年径流量持续偏枯,研究其径流变化趋势和分配特征及周期性变化规律则具有一定的现实意义。

本文基于北洛河上游吴旗水文站 1971—2014 年逐月径流量数据,采用 M-K (Mann-Kendall) 趋势分析法和 R/S 法(rescaled range analysis)分析汛期和全年径流量的变化趋势及其变化连续性,同时采用 Morlet 小波变换分析径流量年周期特征,以期为该流域生态环境建设以及可持续发展提供理论参考。

1 研究区概况

北洛河是渭河的一级支流,黄河二级支流。本文中北洛河上游指的是吴旗水文站以上流域(107°32′39″—108°32′45″E,36°44′57″—37°19′30″N)。流域面积为 3 408 km²,河长 275.6 km,吴旗水文站位于 36.9°N,108.2°E,海拔 1 331.4 m。地貌类型属于黄土高原丘陵沟壑区,地势总体为西北高,东南低。研究区所属气候为温带大陆性季风气候,春季干旱多风,温差较大,夏季闷热,秋季霜冻期较早,冬季风多雪少。流域内主要土壤类型为黄绵土,年均气温 7.7℃,无霜期 96~145 d,多年平均降雨量 454.9 mm,降水量年内分配不均,主要集中在 7—9 月,且多以暴雨形式出现^[11-13]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

根据《黄河流域水文年鉴》中北洛河流域吴旗水文站 1971—2014 年逐日径流量资料整理计算得到月径流量和年径流量,数据序列经过严格检查,以确保其准确和可靠。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验法 Mann-Kendall 趋势检验法(简称 M-K 检验)是一种非参数统计检验方法,广泛应用于水文时间序列的分析研究。因为其能够对水文气象要素的整体变化趋势进行定量刻画,在时间序列分析上具有独特的优势,能够很大程度上减少非正常值对结果的影响,也不会受到数据分布特征的影响,可以对水文气象序列的趋势进行有效的分析研究^[14-16],其统计量的计算与分析可参考文献^[17—19]。

2.2.2 R/S 分析法 R/S 分析法是一种识别时间序列长程相关(反相关)持续性(反持续性)的简单而又有效的方法,能够很好地运用于水文时间序列的分析,为研究时间序列长程相关性提供了理论支撑,其最大优势在于不必假定时间序列的分布特征,能够大大简化对系统的长程相关特性的分析^[20-21]。根据 R/S 分析可以得出 Hurst 指数,其值大小可作为时间序列是否存在趋势性成分的依据,并表征其趋势强度^[22]。对于一个非随机水文序列,首先应该满足^[20,23]:

$$R(h)/S(h) = (ah)^H \quad (1)$$

式中: $R(h)/S(h)$ 为重标极差; h 为增量区间长度; a 为常数; H 为 Hurst 指数,其过程为:

首先,把观测 N 次的径流序列 $\{x(t)\}$ 等分成长度 $h(h \geq 3$ 的整数且 $M_h = n$) 的 M 个连续子序列,各个子序列记为 $D_m(m = 1, 2, \dots, M)$,对应元素为 $x_{k,m}$,求 D_m 均值 \bar{x}_m 。

其次,计算 $D_m(h$ 个期间)的累积离差 $X_{k,m}$:

$$X_{k,m} = \sum_{k=1}^n (x_{k,m} - \bar{x}_m) \tag{2}$$

接着用 $X_{k,m}$ 来算 D_m 极差 R_m 以及其准差值 S_m ,根据以上公式结果来计算 D_m 的重标极差。

$$(R/S)_m = R_m / S_m \tag{3}$$

对于每一个子序列都需要重复以上步骤,那么可以得到整个序列的重标极差。

$$(R/S)_h = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (R/S)_m \tag{4}$$

不断增大 h ,直到满足 $h = N/3$,最终可以得到 $\{x(t)\}$ 的重标极差系列,并且满足公式(1),对公式(1)两边取对数可得:

$$\lg(R/S)_h = H \lg a + H \lg h \tag{5}$$

解释变量为 $\lg h$,被解释变量为 $\lg(R/S)$,以此来作散点图,用最小二乘来拟合直线,直线斜率就是 Hurst 指数。

该方法判断规则:若 $0 < H < 0.5$,该序列具有反持续性,即将来变化趋势与过去变化趋势反向;若 $H = 0.5$,该序列具有随机性,服从布朗运动;若 $0.5 < H < 1$,该序列具有持续性,即将来变化趋势与过去变化趋势同向^[23]。

2.2.3 小波分析法 小波分析(wavelet analysis)在分析水文时间序列方面具有强大的分辨多尺度的功能,而且在时域和频域上具有良好的局部化功能,能识别出水文序列或高或低不同的频率成分和不同时间尺度的主要变化周期,从而对未来发展趋势做出准确预测^[17,24]。本文所用的 Morlet 小波定义如下^[25]:

$$W_f(m,n) = \frac{1}{\sqrt{m}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{ic(\frac{t-n}{m})} e^{\frac{i}{m}(\frac{t-n}{m})^2} dt \tag{6}$$

式中: $W_f(m,n)$ 为小波变换系数; m 为尺度因子,代表小波的周期尺度; n 为时间因子,代表时间上的平移。

$W_f(m,n)$ 能同时反映参数 m 和 n 的特征,并随着二者变化而变化。用 n 当横坐标, m 当纵坐标来绘制关于 $W_f(m,n)$ 的小波变换系数图,根据图中二维等值线闭合中心的正负值和小波系数的零点来判断径流的增减性和突变性。以不同时间尺度 m 为横坐标,以各尺度下的小波方差为纵坐标绘制小波方差图,径流序列的主要变化周期可参照图中各个峰值来确定^[26]。

本文使用 Matlab 软件的 Complex Continuous Wavelet 工具箱计算得到北洛河上游吴旗站 1971—2014 年年径流量和汛期径流量的小波系数后,用 Surfer 16 软件绘制小波变换实部分布图和小波系数模等值线图,用 Excel 2019 绘制小波方差图和第一主周期时间尺度小波系数实部过程线图。小波变换实部分布图能够反映径流量在不同振荡周期尺度下的周期性变化;小波系数模等值线图能够反映不同振荡周期尺度下周期性的强弱,其模越大,周期性特征就越明显;小波方差图反映不同振荡周期尺度下波动能量的分布情况,峰值用来确定径流量的变化主周期^[27]。

3 结果与分析

3.1 径流量年内变化

从图 1 可以看出,北洛河上游径流主要集中在 6—9 月,峰值一般出现在 8 月。1971—2014 年各年代径流量的年内分配过程呈现出基本一致的特点,为“双峰型”,峰值分别出现在 3 月和 8 月,形成春汛和夏汛,且峰值在 20 世纪 70—80 年代以及 20 世纪 90 年代—21 世纪 20 年代均呈现降低趋势。从全年变化趋势来看,1—3 月径流略微增加,主要原因是冰雪融水和春季降水较多,同时由于温度较低,蒸发较弱,所以比较容易产生径流;3—5 月径流略微下降,说明随着温度升高,蒸发随之变大,导致春旱严重;6—8 月径流显著增加,主要原因是夏季降水充沛,雨量大且历时短,地表起伏不平,容易形成地表径流。

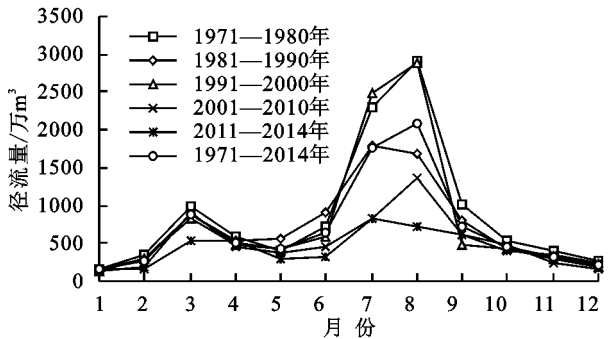


图 1 吴旗水文站不同年代径流量年内分配曲线

由表 1 可以看出,径流量最大极值比出现在 90 年代,而最小的极值比则出现在 2011—2014 年,在整个 44 a 内,极值比有减小的趋势,说明北洛河上游年内分配的相对变化幅度有减小的趋势。北洛河上游不同年代年内分配变差系数为 0.48~1.09,变化幅度较大。20 世纪 90 年代变差系数和完全调节系数均大于多年平均值且为最大值,表明该时期内月径流序列间的差异极大,径流年内分配状况十分不均,可能与这一时期极端天气导致的多场暴雨有关,尤其是发

生于 1994 年 8 月的百年一遇特大暴雨,吴旗水文站产生的径流量是其多年平均径流量的 1.3 倍。2001—2014 年,偏态系数越来越小,说明北洛河上游年内径流分配逐渐趋于对称。整体上,北洛河上游径流年内分配变差系数与完全调节系数以及偏态系数

之间的变化规律呈现出一致性:1971—2014 年,三者数值大体呈不断减小趋势,年内月径流相对月均值的偏斜程度不断减小,年内分配不均匀性逐渐变小,说明随着时间的推移,径流量年内分配不均匀状况有所缓解,即北洛河上游径流量年内分配逐渐趋于均匀化。

表 1 吴旗水文站不同年代径流量年内分配特征值参数

时段	月均值/ 万 m ³	月最大值/ 万 m ³	月最小值/ 万 m ³	极值比 (C _m)	变差系数 (C _v)	完全调节系数 (C _t)	偏态系数 (C _s)
1971—1980	887.35	2914.84	161.42	18.06	0.92	0.35	1.75
1981—1990	714.86	1803.25	166.73	10.82	0.73	0.29	1.18
1991—2000	794.40	2876.14	127.07	22.63	1.09	0.40	1.91
2001—2010	519.05	1363.09	131.49	10.37	0.67	0.27	1.22
2011—2014	430.75	827.04	154.87	5.34	0.48	0.21	0.52
1971—2014	701.81	2073.59	149.07	13.91	0.83	0.31	1.60

3.2 径流量年际变化

北洛河上游全年、汛期的年际径流量序列变化趋势具有较高的一致性(图 2),具体表现为两个径流量序列有着相似的“峰值”和“谷值”特性,并呈现出逐渐减小的趋势。其中,全年径流量序列与汛期径流量序列峰值出现的时间基本相同,以 1975 年和 1981 年为例,汛期和全年径流量序列均各出现一个峰值。两个径流量序列的最大值分别为汛期 1.36 亿 m³(1994 年)、全年 1.62 亿 m³(1994 年),最小值分别为汛期 0.20 亿 m³(2001 年)、全年 0.42 亿 m³(2008 年、2012 年)。根据径流量序列线性回归方程可知:全年和汛期的径流量减少速率较为接近,全年径流量平均每 10 a 减少 0.134 亿 m³,汛期径流量则平均每 10 a 减少 0.115 亿 m³。由于汛期径流量在年径流量中占有较大比重,因此两个径流量序列减少速率相近。径流量减少一方面是因为气候变化,另一方面是因为人类活动的加剧引起流域下垫面发生变化,且后者对径流量变化的影响程度要远大于前者^[6]。为了进一步反映北洛河上游径流变化趋势特性,采用 M-K 趋势检

验法和 R/S 分析法对两个径流量序列变化趋势的显著性和持续性进行分析,结果见表 2。两个径流序列 M-K 检验值和线性拟合结果较为一致,得到的统计量 Z 值均小于 0 且数值远远超出临界值-2.58,表明径流量序列变化趋势均在 0.01 置信水平上显著减少。根据 R/S 分析得出汛期径流量和全年径流量 Hurst 指数为分别为 0.69,0.53,均介于 0.5~1,表明两个径流量序列均存在一定的长期记忆性,即递减趋势在未来都具有一定的持续性,但全年径流量持续性的可能性要小于汛期径流量序列。

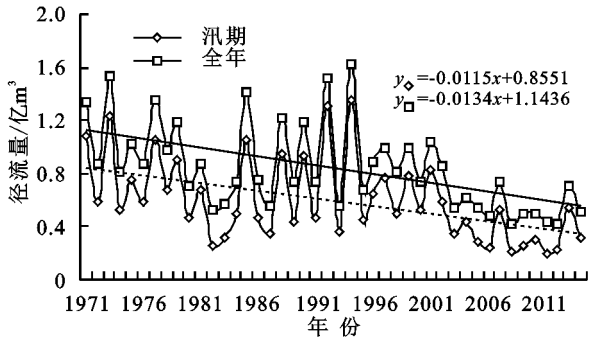


图 2 吴旗水文站各径流量序列线性趋势

表 2 吴旗水文站各径流量序列趋势特征

时间序列	线性拟合		M-K 秩次相关检验			R/S	
	k	趋势方向	Z	趋势方向	显著性	Hurst 值	趋势方向
汛期径流量	-0.012	减少	-3.550	减少	显著	0.69	持续性
年径流量	-0.013	减少	-3.995	减少	显著	0.53	持续性

3.3 径流量周期特征分析

根据多年径流量小波分析结果(图 3),同一时间尺度下,小波系数正值等值线代表丰水期,负值等值线代表枯水期,零值等值线则代表平水期。在 44 a 时间序列中,年径流量存在 2~5 a,16~27 a 两种时间尺度的枯—丰变化振荡周期和 8~14 a 时间尺度的丰—枯变化振荡周期,其中 8~14 a 丰—枯变化震

荡周期和 16~27 a 枯—丰变化振荡周期最为显著。8~14 a 周期性变化具有全域性,共经历了丰—枯—丰—枯—丰—枯—丰—枯—丰—枯 12 个交替变化,具体丰水时段为 1971—1972 年、1977—1980 年、1984—1987 年、1992—1994 年、2000—2002 年、2006—2009 年、2013—2014 年,且 2014 年后实部正值等值线未闭合,说明丰水期在 2014 年后还会持续

一段时间。16~27 a 尺度上,全年径流也存在丰枯振荡,经历了枯—丰—枯—丰—枯—丰—枯—丰 8 个交替变化,但比较紊乱。在 2~5 a 尺度上,周期性最强(图 4),在时域上分布也比较明显,主要发生在 1971—2000 年,振荡中心在 1994 年左右;10~14 a 和 16~24 a 尺度上周期性也比较强,其中 10~14 a 尺度具有全域性,16~24 a 主要发生在 1971—1994 年,振荡中心在 1971—1973 年以及 1975 年左右;其他时间尺度上周期性则相对较弱。

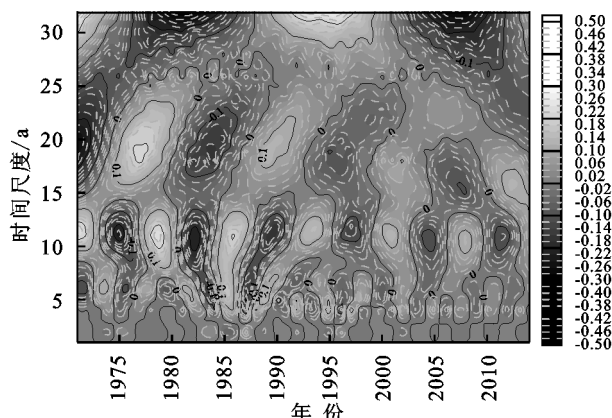


图 3 年径流量小波变换实部分布

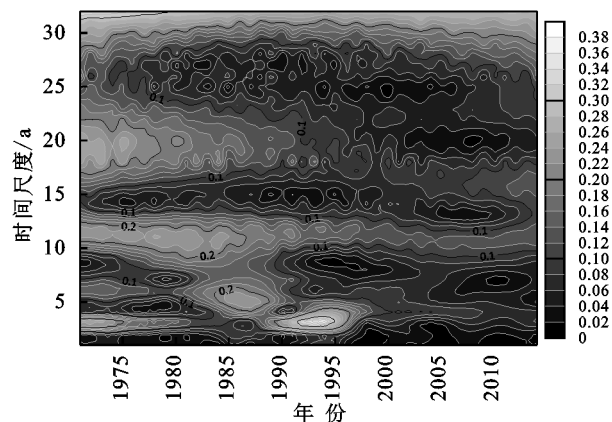


图 4 年径流量小波系数模等值线

从图 5 可以看出,3 个较为明显的峰值,可以看出年径流存在 3,11,19 a 的周期变化特征。其中 3 a 时间尺度对应最大峰值,所以 3 a 的时间尺度对应的周期变化最强烈,是其年径流变化的第一主周期。11 a 和 19 a 时间尺度分别对应第二主周期和第三主周期。将小波方差分析与小波实部时频变化相结合,可以推测出年径流 3 个主周期变化规律相互对应,并且 3 个主周期均和其时间尺度中心相重合。其中,在 3 a 时间尺度上,径流的平均振荡周期为 1.5 a 左右,1971—2014 年大约经历了 19 个丰水期和 18 个枯水期,可以作为水文周期预报的参考性周期,同时根据径流的丰枯周期,可以适当调整工业、农业用水,保证城市生活供水情况(图 6)。另外,年径流序列还可能存在更长时间尺度的变化周期,但这需要更长的径流序列来进一步验证。

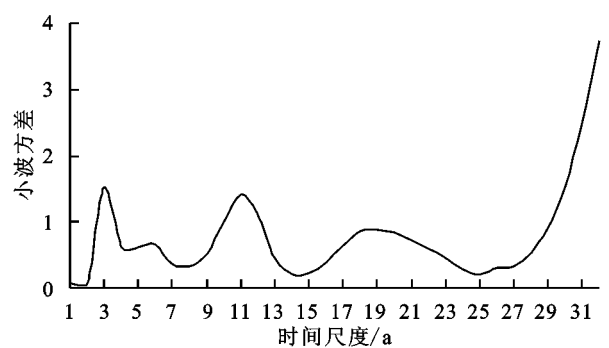


图 5 年径流量小波系数方差

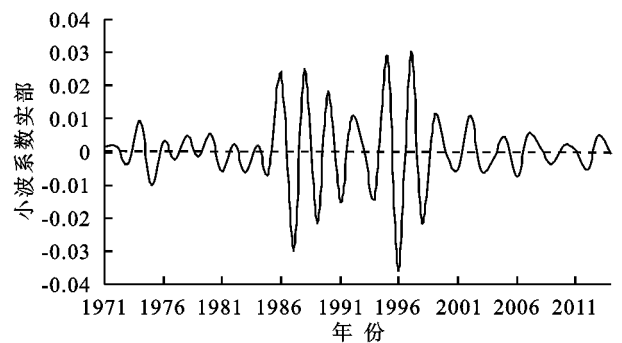


图 6 年径流量 3 a 时间尺度的小波系数实部过程线

汛期径流量序列与年径流存在相似的丰—枯交替变化周期,其所经历的丰枯变化过程也极为相似,且包含的主周期相同(图 7),即均包含 3,11,19 a 共 3 个变化主周期,推测可能和汛期径流量在全年径流量中占有较大比重有关。已有研究表明:西北地区旱涝存在 9 a 和 2~3 a 的短准周期振荡^[28],而且本文得出的结论在有关降水量的周期性研究与主汛期降水与年降水的周期变化较接近的结论相一致^[29],由此可以说明北洛河流域年径流量与西北地区气候的变化周期基本一致。

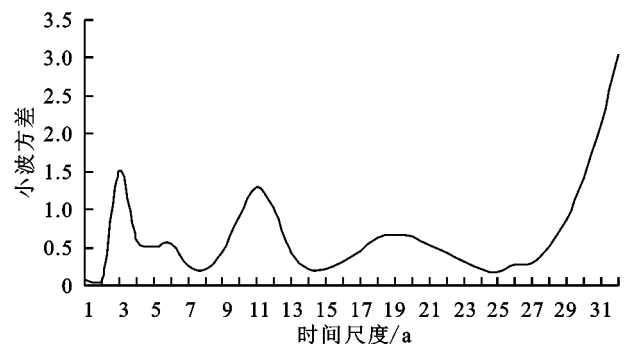


图 7 汛期径流量小波系数方差

4 结论

(1) 北洛河上游年内径流量主要集中分布在 6—9 月,占全年径流的 70% 以上,最大径流量一般出现在 8 月,径流量年内分配曲线呈“双峰型”。2000 年以前,径流量年内分配不均匀程度较大,2000 年之后,年内分配不均匀程度相对较小且逐渐减弱。

(2) 1971—2014 年北洛河上游全年、汛期两个

径流量序列的变化均呈显著减少趋势,其减少过程在未来均存在一定的持续性。

(3) 北洛河上游径流量存在丰—枯交替的多尺度变化特征和多主周期变化规律。年径流量和汛期径流量序列呈现出相似的变化周期,其 3 个主周期依次为 3, 11, 19 a 左右。其中,当时间尺度为 3 a 时,径流量的平均振荡周期为 1.5 a 左右。

参考文献:

- [1] 田鹏,穆兴民,赵广举,等.近 549 年来黄河天然径流量时间变化特征研究[J].水土保持学报,2020,34(6):65-69.
- [2] 董喆.北川河流域径流变化特征及其影响因素分析[D].北京:北京林业大学,2018.
- [3] 郑红星,刘昌明.黄河源区径流年内分配变化规律分析[J].地理科学进展,2003,22(6):585-590.
- [4] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,2014,25(2):155-163.
- [5] 黄晨璐,杨勤科.渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析[J].干旱区地理,2021,44(2):1-16.
- [6] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21):7607-7617.
- [7] Zhao Guangju, Mu Xingmin, Tian Peng, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: a case study of the Wei River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2013,27(26):3852-3863.
- [8] 王小杰,姜仁贵,解建仓,等.渭河干流径流变化趋势及突变分析[J].水利水运工程学报,2019(2):33-40.
- [9] 晁智龙.1959—2011 年北洛河上游流域径流量及其组分变化趋势和时间分配特征[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):23-28.
- [10] 董起广,周维博,刘雷,等.北洛河径流量变化特征分析[J].人民黄河,2014,36(2):20-22,29.
- [11] 葛芬莉.北洛河上游区水沙特性变化分析研究[J].水资源与水工程学报,2013,24(4):145-150.
- [12] 何亮.1980—2019 年北洛河流域土地利用和土地覆被变化分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [13] 孔波,樊晶晶,黄强.北洛河流域分期径流变异诊断及成因分析[J].水资源保护,2019,35(6):52-57.
- [14] 赵雪花.河川径流时间序列研究方法及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [15] 刘红英.降水变化和人类活动对北洛河上游水沙特性的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012:45.
- [16] 肖鹏嵩,代俊峰,王娜.广西降雨量变化趋势分析[J].节水灌溉,2013(2):38-40.
- [17] 李艳,陈晓宏,张鹏飞.北江流域径流年内分配特征的变异性分析[J].水文,2014,34(3):80-86.
- [18] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [19] Sheng Y, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. Journal of Hydrology, 2002,259(1):254-271.
- [20] 燕爱玲,黄强,刘招,等.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.
- [21] 王生雄,魏红义,王志勇.渭河径流序列趋势及突变分析[J].人民黄河,2008,30(9):26-27,29.
- [22] 王兆礼,陈晓宏,杨涛.近 50 a 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):1365-1374.
- [23] 黄诒蓉,罗弈.论 R/S 分析法与股票市场的分形结构[J].现代管理科学,2006,3(1):105-107.
- [24] 叶茂,张鹏,王伟,等.塔里木河流域上游三源流径流变化趋势分析[J].水资源与水工程学报,2010,21(5):10-14.
- [25] Morlet J, Arens G, Fourgeau, et al. Wave propagation and sampling theory and complex waves[J]. Geophysics, 1982,47(2):222-236.
- [26] 潘国营,秦永泰,马亚芬,等.基于 R/S 和 Morlet 小波分析的丹河径流变化特征研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):41-45,50.
- [27] 冯禹昊,朱江玲.基于 Morlet 小波的辽河径流量变化及其成因分析[J].水土保持研究,2019,26(2):208-215.
- [28] 尹吉国,于福亮,李传哲.北洛河天然年径流特性分析[J].人民黄河,2008,30(4):25-27.
- [29] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.

(上接第 138 页)

- [22] 徐建华.计量地理学[M].2 版.北京:高等教育出版社,2014.
- [23] 张亚宁,张明军,王圣杰,等.1961—2015 年中国降水面积变化特征研究[J].干旱区地理,2019,42(4):762-773.
- [24] 邓海军,郭斌,曹永强,等.1961—2016 年中国昼夜降水变化的时空格局[J].地理研究,2020,39(10):2415-2426.
- [25] 任国玉,任玉玉,战云健,等.中国大陆降水时空变异规律: II. 现代变化趋势[J].水科学进展,2015,26(4):451-465.
- [26] 徐新创,张学珍,戴尔阜,等.1961—2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J].地理研究,2014,33(7):1335-1347.
- [27] 王麒麟,范晓辉,王孟本.近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征[J].生态学报,2011,31(19):5512-5523.
- [28] 李斌,解建仓,胡彦华,等.1951—2013 年延安降水特征与典型暴雨分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(12):190-197.