

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0086

刘晓清, 祝雪萍, 郑秀清, 等. 碧流河水库流域降水和径流特征变化及成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 71-78, 114. LIU X Q, ZHU X P, ZHENG X Q, et al. Changes of precipitation and runoff and their causes in the Biliu River reservoir basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 71-78, 114. (in Chinese)

# 碧流河水库流域降水和径流特征变化及成因分析

刘晓清, 祝雪萍, 郑秀清, 赵雪花

(太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024)

**摘要:**为全面分析碧流河水库流域降水和径流变化特征,根据流域内1958—2011年的日降水及径流资料,运用基尼系数法、R/S分析法和小波分析法分别分析了降水和径流的年内变化特征、年际变化趋势和周期性特征。结果表明:流域内降水和径流年内分配极度不均匀,年内分配过程呈单峰型,月降水峰值在20世纪80年代后有峰值后移的特点;多年降水量和径流量均有减少趋势,径流量的减少趋势更显著,说明除降水减少外,还受其它因素的影响,如各种人类活动等;降水径流序列都呈现丰-枯交替变化周期,变化主周期均为12~16 a,可能与太阳黑子周期活动有关;20世纪80年代后的径流周期较降水震荡性减弱,说明径流周期变化还受除降水外的其它因素的影响。

**关键词:**碧流河水库流域;降水;径流;基尼系数法;R/S分析法;小波分析法;周期分析

中图分类号:P333 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Changes of precipitation and runoff and their causes in the Biliu River reservoir basin

LIU Xiaoqing, ZHU Xueping, ZHENG Xiuqing, ZHAO Xuehua

(College of Water Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The temporal characteristics of intraannual and interannual precipitation and runoff in the Biliu River reservoir basin were investigated in this study based on daily data from 1958 to 2011. The Gini coefficient method, R/S analysis method and wavelet method were used to explore the intraannual variation, interannual variation and trend, and periodicity of precipitation and runoff. The results showed that the intraannual distributions of precipitation and runoff in the basin were extremely uneven with a unimodal type. The peak values of monthly precipitation moved backwards after the 1980s. Both annual precipitation and runoff had decreased, and the trend of runoff was more significant than that of precipitation, which implied that runoff was also affected by other factors besides precipitation, such as human activities. Both precipitation and runoff sequences exhibited a cycle of abundance and drought change, and the main cycle was 12-16 years, which might be explained by sunspot cycle activity. The oscillation of runoff cycle was weaker than that of precipitation cycle after 1980s, which indicated that other factors also effected runoff generation besides precipitation.

**Key words:** Biliu river reservoir basin; precipitation; runoff; Gini coefficient method; R/S analysis; wavelet analysis; period analysis

目前,有关流域降水和径流特征的研究主要集中在降水径流的趋势性变化、周期性分析<sup>[1-4]</sup>等,对

收稿日期:2019-02-26 修回日期:2019-03-29 网络出版时间:2019-04-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190403.1418.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51509176);山西省自然科学基金(201601D021086, 2016011054);山西省水文局项目(ZNGZ2015-036)

作者简介:刘晓清(1992—),女,山西人,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: liuxq928@163.com

通信作者:祝雪萍(1985—),女,山西人,副教授,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: xpzhu01@163.com

其进行分析研究的方法较多,其中趋势分析方法有 Spearman 秩次相关检验法<sup>[5-6]</sup>、M-K 趋势分析法<sup>[7-9]</sup>和基尼系数法<sup>[10-11]</sup>等;周期性分析方法包括小波分析法<sup>[12-14]</sup>、最大熵谱分析法<sup>[15-16]</sup>、奇异谱分析<sup>[17]</sup>和人工神经网络<sup>[18-20]</sup>等。因基尼系数法可用于分析变量的分配不均匀程度,但在水文领域内应用较少<sup>[10-11]</sup>。小波分析法能较好地揭示水文时间序列在不同时间尺度变化下的主周期,本文将采用二者尝试对研究区降水径流相关特征的变化进行较为全面的分析。目前针对研究区一碧流河水域降水径流的研究多侧重于分析多年趋势性变化程度及多种影响因子(如土地利用<sup>[19]</sup>、气候<sup>[20-21]</sup>等)的变化对径流的影响,而对其周期性的研究则相对薄弱。考虑到研究碧流河水域的降水径流特征变化,对于决策者把握地区水资源变化所处的周期以便于做出应对策略、保障居民正常生活等有重要的现实意义。本文将结合基尼系数法及 R/S 分析法分析降水径流年内年际变化特征;并在此基础上进一步基于小波分析降水径流变化周期性及其影响因素,为碧流河水域的调度和流域内未来水资源的合理开发利用提供依据。

## 1 研究区概况

碧流河流域位于东经 122°17′~122°54′、北纬 39°33′~40°21′,属北温带湿润气候区,碧流河是大连市最长的河流,流域面积 2 814 km<sup>2</sup>。碧流河水域流域(图 1)控制流域面积为 2 085 km<sup>2</sup>,是碧流河流域的 74.1%。水库位于其下游距入海口 55 km 处,是大连市主要的居民用水水源地,其水质较好。流域内 6—9 月为汛期,其多年平均降雨量为 739.4 mm,多年平均径流量 6.12 亿 m<sup>3</sup>(1958—2011 年),且流域



图 1 碧流河水域流域及水文站点位置

Fig. 1 Location of Biliu River reservoir basin and hydrological station

年内最大洪峰流量变化幅度大,年际分配不均匀。祝雪萍<sup>[21]</sup>运用线性回归法、Spearman 秩次相关检验法和 Kendall 秩次相关检验法对碧流河水域内的降水径流变化特征进行过初步分析,得出 1958—2011 年的降水和径流均呈现下降趋势,且径流系列的下降趋势较降水更显著。

## 2 研究方法

### 2.1 基尼系数法

基尼系数主要用于经济领域分布均匀度的量化评价,其原理及计算过程见文献<sup>[22]</sup>。本文采用基尼系数法对研究区降水径流的年内分配特性进行分析;首先用数学方法拟合洛伦兹曲线,得出曲线的函数表达式,用定积分法求出洛伦兹曲线与横坐标轴围成的面积之后计算得出基尼系数 GI。当 GI 小于 0.2 时表示分配绝对均匀;当 GI 大于 0.5 时表示分配高度不均匀,GI 值越大不均匀程度越高。

### 2.2 R/S 分析法

R/S 分析法<sup>[23]</sup>是 1951 年英国水利学家 Hurst 在总结尼罗河多年水文观测资料时提出了 Hurst 指数(Hurst coefficient),根据 Hurst 指数的大小可以判断时间序列趋势成分表现(表 1)是持续性,还是反持续性。R/S 分析法是研究时间序列的分形理论,其计算公式为

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

式中: $R(h)/S(h)$ 为重标极差; $h$ 为区间长度; $a$ 为常数; $H$ 为 Hurst 指数。

R/S 分析法的具体计算步骤如下。

(1)将观测序列  $X(t)$  等分为长度为  $h$  ( $h \geq 3$  的整数)的  $M$  个(取整数部分<sup>[24-25]</sup>)连续子序列。其中,各子序列记为  $D_m$  ( $m=1, 2, \dots, M$ ),其相应元素为  $x_{k,m}$  ( $k=1, 2, \dots, h$ ),  $D_m$  均值为  $\langle x_m \rangle$ 。

(2)计算子序列  $D_m$  ( $h$  个区间)的累计离差  $X_{k,m}$

$$X_{k,m} = \sum_{k=1}^h (x_{k,m} - \langle x_m \rangle) \quad (2)$$

(3)由  $X_{k,m}$  计算出  $D_m$  的极差  $R_m$  和标准差  $S_m$ 。

计算  $D_m$  的重标极差为

$$R_m = \max(X_{k,m}) - \min(X_{k,m}) \quad (3)$$

$$S_m = \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{k=1}^h (x_{k,m} - \langle x_m \rangle)^2} \quad (4)$$

$$(R/S)_m = R_m / S_m \quad (5)$$

(4)对每个子序列,重复以上步骤,则该序列的重标极差为

$$(R/S)_h = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (R/S)_m \quad (6)$$

(5)不断增大  $h$ ,直至  $h=N/2$ (当  $N$  为奇数时,  $h=(N-1)/2$ 。  $N$  为序列长度),得到序列的重标极差系列。对其两边取对数可得

$$\lg(R/S)_h = H \lg a + H \lg h \quad (7)$$

以  $\lg h$  为自变量、 $\lg(R/S)_h$  为因变量做散点图,用最小二乘法拟合直线,直线的斜率为  $H$ 。

表 1 Hurst 指数判断序列趋势表现

Tab. 1 Trend significance based on Hurst coefficient

Hurst 指数	$0 \leq H < 0.5$	$H = 0.5$	$0.5 < H \leq 1$
序列趋势成分表现	相关的、反持续性	不相关的、随机的	相关的、持续性
说明	未来径流的总体变化趋势与过去相反	无	未来径流整体变化趋势与过去一致

### 2.3 小波分析法

20 世纪 80 年代兴起的小波分析法能很好地分析各种水文序列的变化特征<sup>[26]</sup>。其连续形式为

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (8)$$

式中:  $\bar{\Psi}(t)$  和  $\Psi(t)$  的为复共轭函数;  $a$  为表示小波的周期尺度的因子;  $b$  为表示时间上的平移的时间因子;  $W_f(a, b)$  为在不同尺度、不同位置的小波系数。

将时域上关于  $a$  的所有小波变换系数的平方进行积分,求得小波方差

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (9)$$

小波方差反映了波动能量随时间尺度的分布,可以确定一个系列的主周期。经小波变换后,对水文时间序列的分析就变成对小波系数的分析,即小波方差的分析。求解小波方差的方法有多种,本文采用 Morlet 小波函数法。

## 3 结果与分析

### 3.1 降水和径流的年内变化特征

降水的年内变化采用 1978—2011 年碧流河水库流域内的降水系列资料,运用三次一元函数拟合出洛伦兹曲线(图 2),得出 GI 值为 0.70,表明流域内年内降水量分配极度不均匀。图 3 为分时段降水的年内分配情况,汛期(6—9 月)降水量为全年的 74.63%,其中 7、8 月降水量占全年的 52.29%。月降水峰值的发生时间在 20 世纪 80 年代前后出现变化,1958—1979 年的降水量峰值出现在 7 月,而 1980—2011 年的峰值则出现在 8 月,呈现峰值后移的特点。对比各时段月降水量曲线,可以看出各时段年降水量总体呈减少趋势,且各

月的多年平均月降水量随时段依次降低,汛期降水量降低明显。

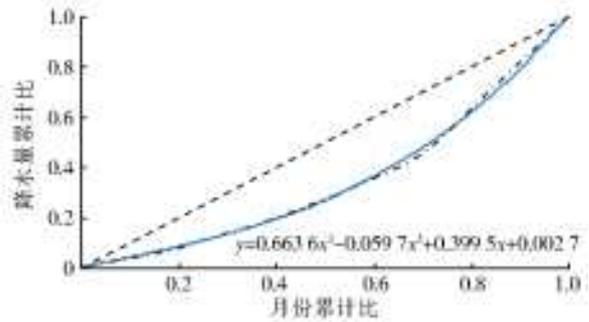


图 2 降水量年内分配洛伦兹曲线

Fig. 2 Lorenz curve of intraannual distribution of precipitation

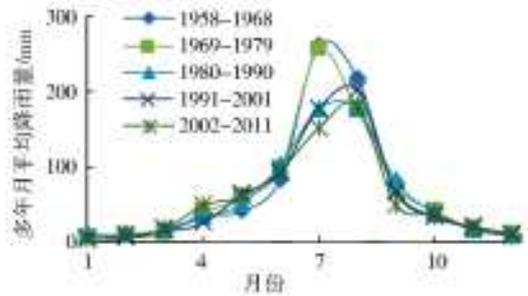


图 3 分时段年平均降水年内分配曲线

Fig. 3 Mean monthly precipitation in different time periods

径流的年内变化采用上述与降水量相同的方法对月径流进行分析,径流量年内分配洛伦兹曲线见图 4,据图 4 计算得出 GI 值为 0.54,即流域内径流的年内分配也极度不均匀,但其不均匀程度略低于降水量。分时段径流的年内分配见图 5。1958—2011 年,6—9 月的径流量为全年的 83.67%,7、8 月的径流量占 70.28%,特殊的 1992 年的年最大径流量出现在 9 月,且 9 月的径流量为全年径流量的 52.24%。各研究期的年内分配过程基本一致,呈单峰型,最大峰值出现在 8 月且峰值在逐年降低,退水曲线在 1991—2001 年上升后在 2002—2011 年又有很大的下降,这在一定程度上表明在本时段内碧流河水库流域的径流量在减少。

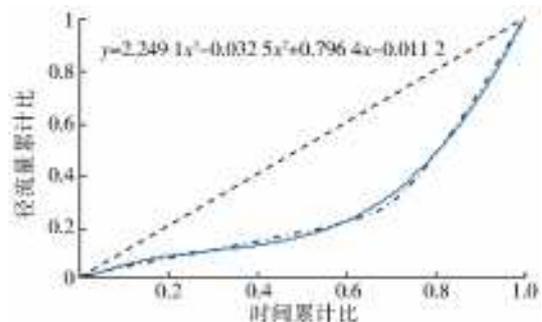


图 4 径流量年内分配洛伦兹曲线

Fig. 4 Lorenz curve of intraannual distribution of runoff

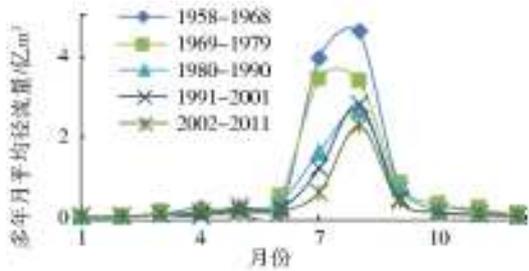


图 5 分时段年平均径流量年内分配曲线  
Fig. 5 Mean monthly runoff in different time periods

### 3.2 降水和径流的年际变化特征

图 6 为研究区 1958—2011 年降水量及距平分析降水量的变化曲线,二者有一致的变化特征。自 1960 年以来,北方气候进入暖干型阶段,降水量呈下降趋势<sup>[27]</sup>,碧流河也不例外。年降水量下降率约为 2.92 mm/(10a)。从 5 年滑动平均曲线可知,研究区降水量在年降水量趋势线附近波动,呈现“增—减”的波动,且在 1986 年后的波动程度变大。

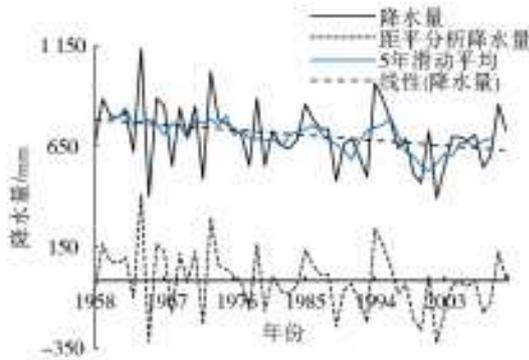


图 6 年降水变化曲线  
Fig. 6 Time series of annual precipitation

年径流量序列和距平分析的变化趋势结果见图 7。二者变化趋势一致,具有相似的“峰”、“谷”特征,峰值发生的时间大致相同,且整体都呈现出递减的趋势。从年径流的变化趋势线来看,年径流量总体上有下降的趋势,其递减速率约为 1.46 亿 m<sup>3</sup>/(10a)。研究区内径流的变化特征与降水一致,同在其趋势

线附近波动且在 1986 年后的波动程度增加。

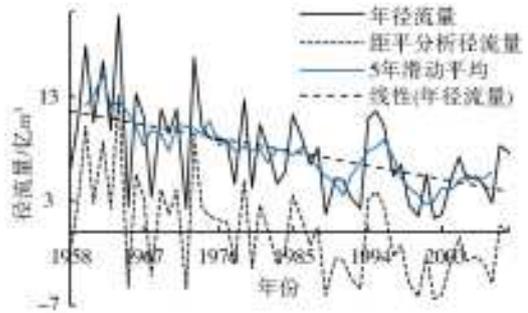
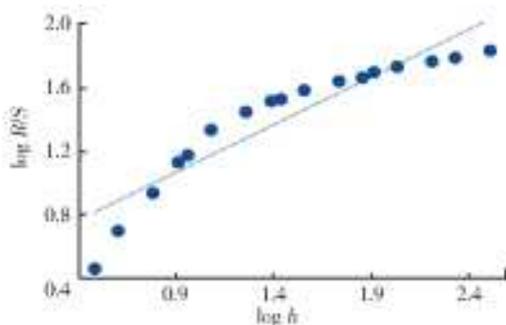


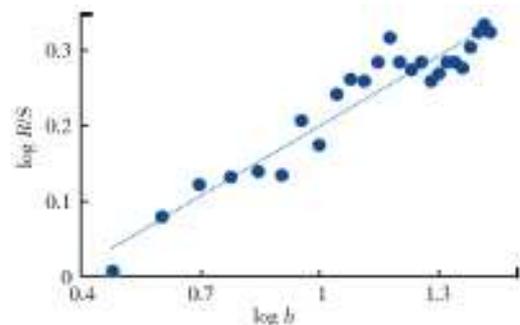
图 7 年径流变化曲线  
Fig. 7 Time series of annual runoff

以上分析可知,降水作为径流的主要来源,其减少在一定程度上导致了径流量的减少,但存在其它因素也导致了径流的减少,比如人类活动、蒸发等。

经过 R/S 分析法分别对径流量以月和年为时间尺度进行分析,结果见图 8。由图 8(a)月径流量的结果分析可知,其 Hurst 指数为 0.59,其值大于 0.5 且接近于 0.5,意味着未来的月平均径流量趋势将与过去相同但持续性较弱,由图 5 的分析可知,现阶段的月降水量在一段时间的增加后出现了下降的趋势,因此预计未来的月径流量会有一些的增加但增加的幅度较小。图 8(b)为年径流量的分析结果,其 Hurst 指数为 0.31,其值小于 0.5,表明未来的年径流量的变化趋势将与过去相反。由图 7 的分析可知,在 1958—2011 年径流整体上呈现的下降趋势较明显,因此预计未来的年径流量会有一些的增加。这与月径流的增加趋势一致,由于月径流量的增加年径流量也会有一些的增加,但其增加的幅度不大。根据分形维数与 Hurst 指数的关系 ( $D=2-H$ ) 计算得出以月为时间尺度计算得出的分形维数值为 1.41;同时,以年为时间尺度计算的分形维数值为 1.69,均在 1.55 左右,说明在一流域上的径流序列,由于它们之间具有自相似性,因此分形维数很接近。



(a) 月径流量的 R/S 分析结果



(b) 年径流量 R/S 分析结果

图 8 径流量 R/S 分析结果

Fig. 8 R/S analysis results of monthly/annual runoff

### 3.3 降水和径流的周期性分析

研究区降水和径流在不同时间尺度下的周期性变化特性可用小波方差图和小波变换实部分布图来表示,为消除数据的起点和终点端的边界部分产生扭曲现象,需对分析的系列进行对称性信号延伸。完成小波变换后,分析序列的小波系数(延伸的信号不分析),以确定其周期性。

#### 3.3.1 降水周期性分析

以月为时间尺度得到的小波方差图中存在的峰值较多(图 9(a))。以明显的峰值为准,它们对应的

时间尺度分别为 32、84、104、189、258、334、442 和 527 个月。最高峰值对应 84 个月,为流域月降水量的主周期,相当于 7 年。第二主周期为 189 个月,第三主周期为 442 个月,分别对应的年份约为 16 a 和 36 a。图 9(b)显示了月降水量在不同时间尺度上的周期性震荡特征,其中 12~24 个月的震荡表现为全局性的,相比之下 50~60 个月的震荡却较小,大致每 200 个月其震荡强度就会发生一次变化,据此推测未来近 200 个月的震荡强度将会有所减少。

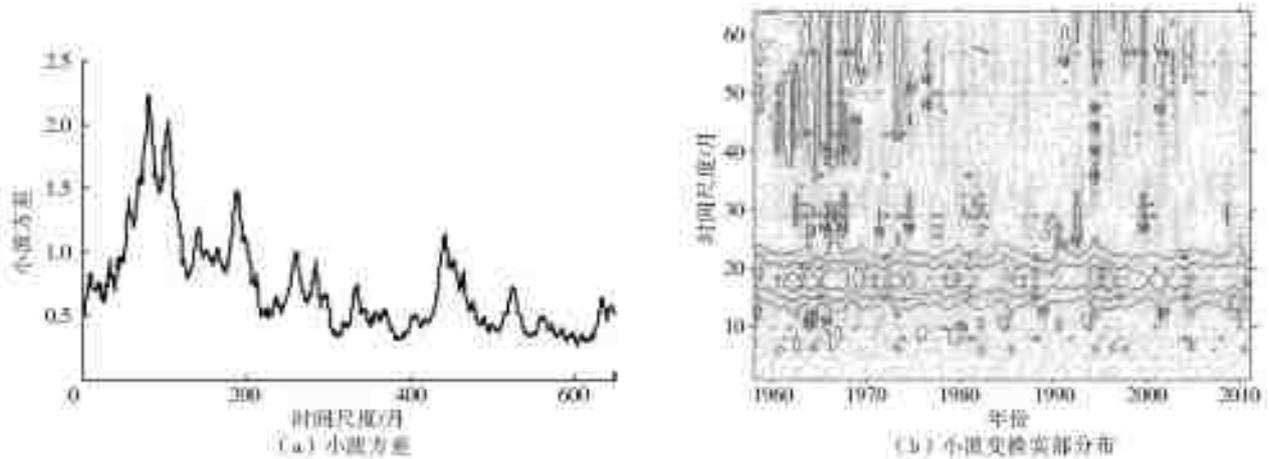


图 9 月降水量小波分析结果  
Fig. 9 Wavelet analysis results of monthly precipitation

从以年为时间尺度的降水量周期性分析结果(图 10(a))可以看出,小波方差图有 3 个峰值,分别为 15 a、26 a 及 37 a 的时间尺度。最大值为 15 a,为年降水量变化的主周期。图 10(b)表明:13~16 a 和 24~30 a 两个时间尺度的震荡特征最为显著。13~16 a 的震荡是局部的,1980 年是其震荡强度变化的分界线,由之前的不明显震荡转化为之后的枯—丰—枯—丰—枯—丰循环交替震荡,其中 1980、

1990 及 2003 年是降水量偏少的枯水年的震荡核心;而 1985 年和 1996 年为降水量较多的丰水年的震荡核心。24~30 a 的震荡是全局性的,主要表现为丰—枯—丰—枯—丰—枯—丰循环交替,由此推测在未来 24~30 a 降水将呈现下降趋势。在 3~7 a 的相对小尺度上,降水量丰—枯循环交替更加频繁。由年降水量的小波分析可知,目前降水量正处于 2014 年为枯水年震荡核心的范围内,降水量是减少的。

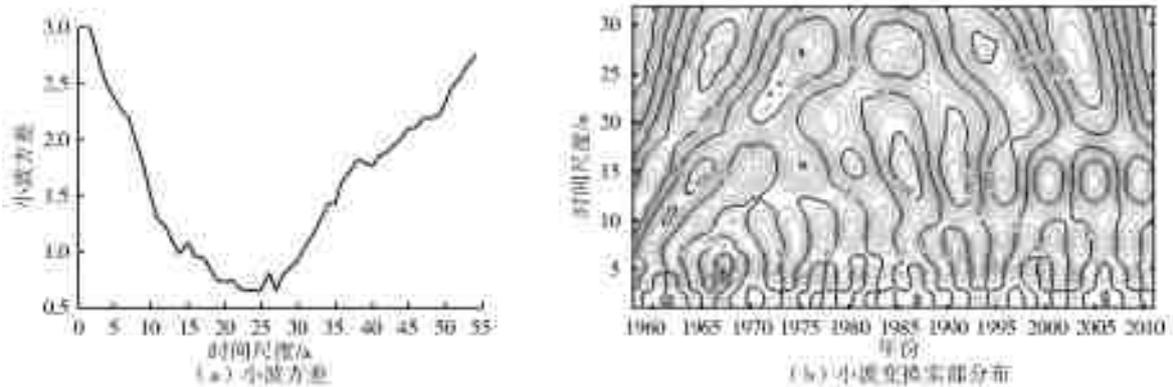


图 10 年降水量小波分析结果  
Fig. 10 Wavelet analysis results of annual precipitation

### 3.3.2 径流周期性分析

月和年时间尺度的径流量周期性分析结果分别见图 11 及 12。由图 11(a)可以看出,月径流量峰值对应的时间尺度分别为 58、80、121、188、212、334 及 452 个月。而最高值对应于 80 个月(约为 7 a),为月径流变化的主周期,而 188 个月(约为 16 a)为其变化的第二主周期。图 11(b)反映的月径流演化过程存

在多时间尺度特征。月径流演变过程中有 9~15 个月,18~21 个月,27~33 个月及 50~60 个月等 4 类丰-枯变化震荡周期。可以看出 18~21 个月尺度上的周期变化在整个时段表现比较稳定。对比图 9(b)及 11(b)可知,虽然月径流周期与月降水周期相似,但自 20 世纪 80 年代后期开始,月径流较月降水的震荡特征有所减弱。

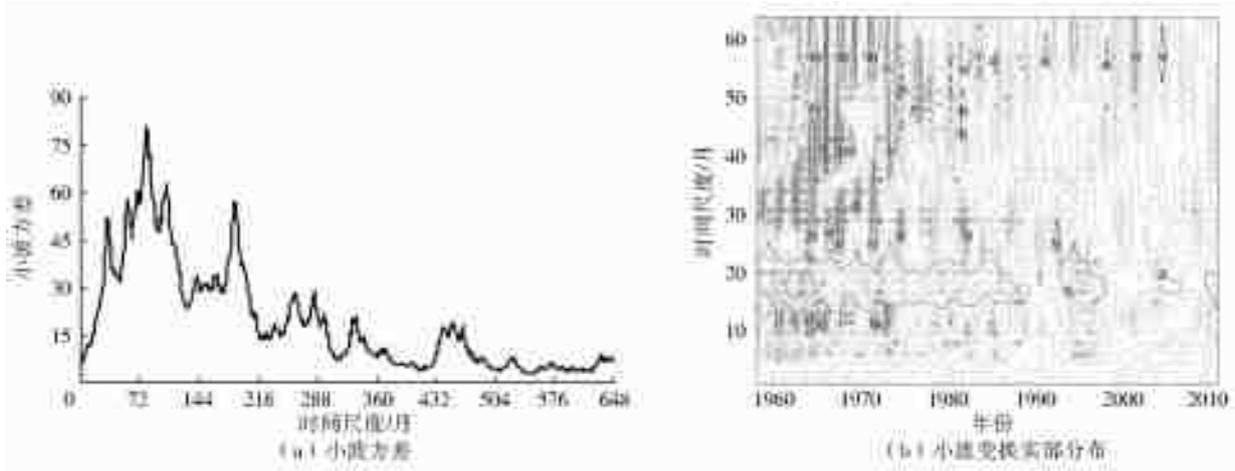


图 11 月径流量小波分析结果

Fig. 11 Wavelet analysis results of monthly runoff

年径流小波方差图 12(a)中有 4 个较明显的峰值,依次对应的时间尺度为 7 a、12 a、21 a 和 37 a。表明其变化周期有 4 个,其中 7 a 为年径流变化的主周期。小波变换实部图 12(b)可以看出有 3 类丰-枯变化震荡周期。其中 4~5 a 的震荡较频繁,表现为全局性震荡。12~16 a 出现了“丰-枯”的 5 次循环交替,其中 1964、1974、1985、1996 和 2006 年为震荡负中心,是径流枯水期;1960、1969、1979、1991 和 2001 年是震荡正中心,是径流丰水期。2011 年也是下一个

“丰-枯”循环交替的震荡正中心,所以在未来的 12~16 a 内将呈现径流量减少的趋势,25~30 a 的震荡嵌套在更长震荡周期里,表现为丰-枯-丰-枯-丰的循环交替。进一步对比图 10(b)及 12(b)可知,虽然年径流周期与年降水周期相似,但自 20 世纪 80 年代后期开始,年径流比年降水的震荡性有所减弱。由年径流量的小波分析可知,目前径流处在以 12~16 a 为周期,以 2011 年为枯水核心的震荡圈内,其径流量也有一定的下降。

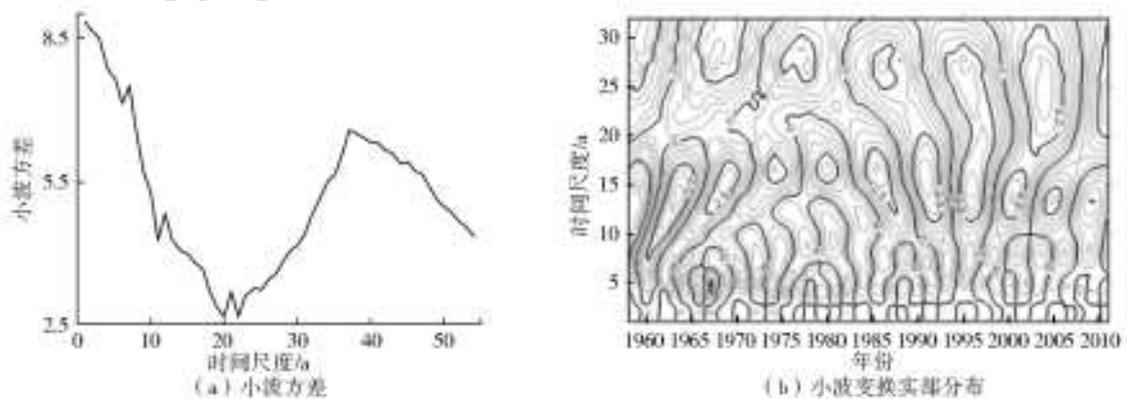


图 12 年径流量小波分析结果

Fig. 12 Wavelet analysis results of annual runoff

### 3.3.3 降水和径流周期性变化原因分析

由以上降水径流的变化周期分析可知,月径流周期与月降水主周期相同,但自 20 世纪 80 年代后

期开始,月径流较月降水的震荡特征有所减弱;年降水量及年径流量的周期相近,大概的周期为 7 a、12~16 a、24~30 a 及 37 a,但也在 20 世纪 80 年代

之后,年径流震荡特征较年降水有所减弱。说明径流变化周期性主要受降水变化周期性影响,但在 20 世纪 80 年代之后有如人类活动加剧等其它因素亦成为影响径流周期的原因。

进一步分析降水径流各个周期的产生原因,分析对比了其 ENSO 和太阳活动的关系,结果表明:7 a 的周期与 ENSO(厄尔尼诺与南方涛动现象)的周期接近,可能受厄尔尼诺现象的影响;12~16 a 的周期与太阳黑子 11.2 a 的变化周期相近,推测其变化主要与太阳黑子运动有关;24~30 a 的周期与太阳活动 22 a 的磁周期有关;37 a 的周期可能与温度和降水以 35 a 为周期变化的布吕克纳周期有关。因此,太阳活动是导致研究区降水径流发生周期性波动的主要原因之一。

#### 4 结 论

选择碧流河水库流域 1958—2011 年的降水和水库入库径流资料,运用基尼系数法、R/S 分析及小波分析法对降水和径流的趋势性及周期性变化进行分析,并对其变化原因进行了初步分析,主要结论如下。

(1)流域内降水径流的年内分配极不均匀;1980 年后,月降水峰值的发生时间由 1979 年之前的 7 月后移至 8 月,且各月的多年平均月降水量随时段依次降低;年降水量和径流量总体都呈现递减的趋势,且径流量减少趋势较降水量更显著,说明其它因素的影响不容忽视。在之后的研究中将对影响降水径流减少的其它因素进行分析。

(2)根据降水径流周期性分析结果,可推测降水在未来 24~30 a 将呈现下降趋势,在 3~7 a 的相对小尺度上,降水量丰—枯循环交替更加频繁;径流在未来 12~16 a 内将呈现减少趋势。由于序列长度较短,对较大时间尺度上的周期性变化特征还有待研究。

(3)不同时间尺度得出的降水径流周期为 7 a、12~16 a、24~30 a 及 37 a。初步分析二者主周期的变化主要受太阳黑子强弱变化影响。但近年来径流变化的周期性在一定程度上受到人类活动等因素的影响,未来将呈现如何的周期性变化还有待进一步的研究。

#### 参考文献(References):

[1] 孙周亮,刘冀,谈新,等.近 50 a 黄河上游汛期降雨径流多尺度时空演变[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1324-1332. (SUN Z L, LIU J, TAN X, et al. Multi-scale spatio-temporal evolution analysis of rainfall and runoff in flood season in upper Huanhe River in recent 50

years[J]. Resources and Environment in The Yangtze basin, 2018, 27 (6): 1324-1332. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201806016.

[2] 董才文,张正栋,蒙金华,等.广东梅江中上游河段气温、降水、径流变化趋势及周期性分析[J].水文,2016,36(3):84-90. (DONG C W, ZHANG Z D, MENG J H, et al. Variance tendency and periodicity of temperature, precipitation and runoff in middle and upper reaches of Meijiang River. [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36 (3): 84-90. (in Chinese)) DOI: 10. 1007/s11434-012-5547-7.

[3] BAO G, LIU Y, LIU N. A tree-ring-based reconstruction of the Yimin River annual runoff in the Hulun Buir region, Inner Mongolia, for the past 135 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 4765-4775.

[4] FROLOVA N L, BELVAKOVA P A, V. Yu, et al. Many-year variations of river runoff in the Selenga basin[J]. Water Resources, 2017, 44 (3): 359-371. DOI: 10. 1134/S0097807817030101.

[5] 赵云,胡彩虹,胡珊.汾河和沁河流域入黄径流锐减事实分析[J].水电能源科学,2012,30(3):31-34. (ZHAO Y, HU C H, H S. Facts analysis of significant reduction in runoff of Fenhe and Qinhe basin[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3): 31-34. (in Chinese))

[6] 陈立华,王焰,易凯,等.钦州市降雨及入海河流径流演变规律与趋势分析[J].水文,2016,36(6):89-96. (CHEN L H, WANG Y, YI K, et al. Analysis of rainfall and river runoff change tendency in Qinzhou City[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(6): 89-96. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2016. 06. 015.

[7] 刘丽芳,王中根,姜爱华,等.近 50 年济南三川流域降雨-径流关系变化分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):22-27,56. (LIU L F, WANG Z G, JIANG A H, et al. Analysis of rainfall-runoff relationship variation characteristics in Sanchuan watershed in Jinan City over recent 50 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16 (1): 22-27, 56. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180004.

[8] 潘娅英,骆月珍,王亚男,等.新安江流域降水、径流演变特征分析[J].水土保持研究,2018,25(6):121-125. (PAN Y Y, LUO Y Z, WANG Y N, et al. Characteristics of evolution of precipitation and runoff in Xin'An River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 121-125. (in Chinese))

[9] 王军,李和平,鹿海员,等.典型草原地区降水-径流演变趋势分析[J].水文,2017,37(4):86-90. (WANG J, LI H P, LU H Y, et al. Variation of precipitation and runoff in typical grassland area[J]. Journal of China

- Hydrology, 2017, 37(4): 86-90. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2017.04.016.
- [10] 王波雷, 马孝义, 范严伟. 基于洛伦兹曲线的乌兰木伦河径流变化分析[J]. 水文, 2008, 28(5): 40-42. (WANG B L, MA X Y, FAN Y W, Analysis of runoff change in Wulanmulun River by using lorrenze curve[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 40-42. (in Chinese))
- [11] 陈鹏, 何军, 徐小峰, 等. 气候变化背景下降雨序列的变异分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 6-8, 5. (CHEN P, HE J, XU X F, et al, Variability analysis of rainfall series under climate change[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(12): 6-8, 5. (in Chinese))
- [12] 曹爽, 秦天玲, 石晓晴, 等. 亚马逊流域降雨径流时空变化分析[J]. 水文, 2018, 38(1): 90-96. (CAO S, QIN T L, SHI X J, et al. Time-spatial distribution of rainfall and runoff in Amazon basin[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(1): 90-96. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2018.01.016.
- [13] 张一鸣, 田雨, 雷晓辉, 等. 三岔河上游近 50 年降水径流变化特征分析[J]. 水文, 2016, 36(5): 79-84. (ZHANG Y M, TIAN Y, LEI X H, et al. Change characteristics of water resources in Sanchahe upstream over past 50 years[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(5): 79-84. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2016.05.016.
- [14] 赵利红. 水文时间序列周期分析方法的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (ZHAO L H. Research of hydrological time series cycle analysis method[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [15] 向亮, 郝立生, 安月改, 等. 51a 河北省降水时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(1): 56-65. (XIANG L, HAO L S, AN Y G, et al. Time-spatial distribution and variational characteristics of rainfall in Hebei Province in 51 years[J]. Arid Zone Research, 2014, 37(1): 56-65. (in Chinese))
- [16] 陈中平, 徐强. 金华江金华站近 50 年来径流量变化特征分析[J]. 科技通报, 2015, 31(11): 71-74. (CHEN Z P, XU Q. Analysis of fifty years runoff change characteristics at Jinhua station in Jinhua River[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(11): 71-74. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7119.2015.11.015.
- [17] 王建莹, 刘燕. 泾惠渠灌区降水径流奇异谱分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(7): 40-44. (WANG J Y, LIU Y. Singular spectrum analysis on precipitation and runoff in the Irrigation area of Jinghui Canal. [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(7): 40-44. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2015.07.008.
- [18] HOSSEINI S M, MAHJOURI N. Integrating support vector regression and a geomorphologic artificial neural network for daily rainfall-runoff modeling[J]. Applied Soft Computing, 2015, 38: 329-345. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.09.049.
- [19] 曹明亮. 土地利用变化对碧流河水库入库径流的影响分析[A]. 中国水利学会水资源专业委员会、中国水利水电科学研究院、大连理工大学. 变化环境下的水资源响应与可持续利用——中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会论文集[C]. 中国水利学会水资源专业委员会、中国水利水电科学研究院、大连理工大学: 中国水利学会, 2009: 5. (CAO M L, ZHANG A J, LI H Y, et al. Analysis on the influence of land use change on runoff of biliu river reservoir[A]. Chinese Hydraulic Engineering Society, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Dalian University of Technology: Response and sustainable use of water resources in a changing environment——Proceedings of the 2009 annual conference of the professional committee of water resources, Chinese Hydraulic Engineering Society [C]. Chinese Hydraulic Engineering Society, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Dalian University of Technology: Chinese Hydraulic Engineering Society, 2009: 5. (in Chinese))
- [20] 王权威. 气候变化对碧流河流域径流的影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018. (WANG Q W, Study on the influence of climate change on runoff in Biliu River basin [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [21] 祝雪萍. 跨流域引水与水库供水联合调度及变化条件对其影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (ZHU X P, Analysis on joint operation of inter-basin water diversion and reservoir supply and impacts of change conditions on it [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [22] CAI S Y, LEIX H, MENG X Y, et al. Ecological flow analysis method based on the comprehensive variation diagnosis of Gini coefficient[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2018, 34(2): 1025-1031. DOI: 10.3233/JIFS-169396.
- [23] 张鑫, 蔡焕杰, 尹晓楠. 应用重标度极差分析法(R/S)分析无定河流域水沙变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 212-217. (ZHANG X, CAI H T, YIN X N. Variation trends analysis of runoff and sediment time series based on R/S method in Wuding River basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S2): 212-217. (in Chinese))

(下转第 114 页)

- [51] 汪建飞,邢素芝. 农田土壤施用化肥的负效应及其防治对策[J]. 农业环境保护, 1998, 17(1): 41-44, 49. (WANG J F, XING S Z. Negative effects of application chemical fertilizers on farmland and the control measures[J]. Agro-environmental Protection, 1998, 17(1): 41-44, 49. (in Chinese))
- [52] 沈景文. 化肥农药和污灌对地下水的污染[J]. 农业环境科学学报, 1992, 11(3): 137-139. (SHEN J W. Pollution of groundwater by chemical pesticides and sewage irrigation[J]. Journal of Agro-environmental Science, 1992, 11(3): 137-139. (in Chinese))
- [53] FAO. FAO Statistical Yearbook 2013[M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013:307.
- [54] 国家统计局. 年度数据[DB/OL]. [2017-01-01]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. (National Bureau of Statistics of China. Annual Data [DB/OL]. [2017-01-01]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. (in Chinese))
- [55] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 692-698. (LIU H B, LI Z H, ZHANG Y G, et al. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37 (5): 692-698. (in Chinese))
- [56] 刘兆辉,江丽华,张文君,等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303. (LIU Z H, JIANG L H, ZHANG W J, et al. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (2): 296-303. (in Chinese))
- [57] 魏欣,李世平. 基于农户行为的农业面源污染机制探析[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2012, 12(6): 26-31. (WEI Xin, LI Shi-ping. Analysis of mechanism of agricultural Non-point Pollution based on Farmers' production behaviors. Journal of Northwest A&F University(Social Science Edition), 2012, 12(6): 26-31. (in Chinese))
- [58] 李印. 美国地下水保护立法的借鉴[J]. 广东社会科学, 2012, 033(6): 240-244. (LI Y. Reference of American groundwater protection legislation [J]. Guangdong Social Sciences, 2012, 033 (6): 240-244. (in Chinese))
- [59] USEPA. Superfund[EB/OL]. [2018-December 07]. <https://www.epa.gov/superfund>.
- [60] 卢义杰. 土地承包期延长 30 年将给农民带来什么[N]. 中国青年报, 2017-10-20 (3). (LU Y J. What will be brought to farmers by 30 years of extension of the land contract[N]. China Youth Daily, 2017-10-20 (3). (in Chinese))

(上接第 78 页)

- [24] 何兵,高凡,唐小雨等. 基于滑动 Copula 函数的新疆干旱内陆河流水文气象要素变异关系诊断[J]. 水土保持学报, 2019, 26(1): 155-161. (HE B, GAO F, TANG X Y, et al. Diagnosis of variation of the relationship between hydrological and meteorological elements in arid Rnland Rivers of Xinjiang based on the sliding Copula function[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 155-161. (in Chinese))
- [25] 李宝玲,李建林,咎明军,等. 河流年径流量的 R/S 灰色预测[J]. 水文, 2015, 35(2): 44-48. (LI B L, LI J L, ZAN M J, et al. R/S grey prediction of river annual runoff[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(2): 44-48. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2015. 02. 009.
- [26] SHOAIB M, SHAMSELDIN A Y, KHAN S, et al. A wavelet based approach for combining the outputs of different rainfall-runoff models[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2018, 32(1): 155-168. DOI: 10. 1007/s00477-016-1364-x.
- [27] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 503-509. (SHAO X M, XU Y Q, YAN C R. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin. [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(4): 503-509. (in Chinese))