

大沽河流域水文情势变化研究

杨富香¹, 拾兵¹, 王成见²

(1.中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266500; 2.青岛市水文局, 山东 青岛 266071)

摘 要: [目的]探究大沽河流域长时间序列下径流的变化趋势和周期特征,为大沽河流域的水资源管理和可持续发展提供理论参考。[方法]基于大沽河流域南村水文站 1956—2020 年和闸子水文站 1956—2016 年的实测径流资料,采用 Mann-Kendall 检验法、滑动 t 检验法分析多年径流量变化趋势和突变时间,采用 Morlet 连续复小波法分析了流域多年径流量的周期特征。[结果]大沽河流域多年径流量整体呈下降趋势,且呈现出汛期(6—9 月)流量多、非汛期流量少的特点,流量峰值一般出现在 8 月。南村站径流于 1976 年发生突变,闸子站径流于 1979 年发生突变。大沽河流域径流量在多个时间尺度下均出现明显的周期变化,第一主周期在 20 a 左右,且在 20 世纪 80 年代之前周期震荡显著。[结论]大沽河流域长时间序列径流量呈现出显著下降的变化趋势,流域径流量在 20 世纪 70 年代发生突变,且存在不同时间尺度周期变化的特征,未来应加强径流变化机理研究。

关键词: 水文情势; 大沽河流域; Mann-Kendall 检验法; 滑动 t 检验法; Morlet 小波分析

中图分类号: TV121; P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0018-09

Study on Hydrological Regime Alteration of Dagou River Basin

Yang Fuxiang¹, Shi Bing¹, Wang Chengjian²

(1.College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao,

Shandong 266500, China; 2.Hydrological Bureau of Qingdao, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: [Objective] The purposes of this study are to elucidate the long-term trends and periodic characteristics of runoff in the Dagou River Basin, and to offer the theoretical insights to guide water resource management and promote sustainable development in the Dagou River Basin. [Methods] The measured runoff data from the Nancun Hydrological Station (1956—2020) and the Zhazi Hydrological Station (1956—2016) were used to analyze the trend of annual runoff changes and abrupt change times using the Mann-Kendall test and sliding t-test. The Morlet continuous complex wavelet method was used to analyze the periodic characteristics of multi-year runoff in the basin. [Results] The annual runoff in the Dagou River Basin was generally declining, and there was a characteristic of more flow during the flood season (June—September) and less flow during the non-flood season. The peak flow usually occurred in August. The runoff of Nancun Station was abrupt in 1976, and the runoff of Zhazi station was abrupt in 1979. The runoff of the Dagou River Basin exhibited significant periodic variations at multiple time scales, with a dominant period of around 20 years, and significant oscillations before the 1980s. [Conclusion] The long-term series runoff of Dagou River Basin showed a trend of significant decline, and the basin runoff suddenly changed in the 1970s, and there were periodic changes in different time scales. In the future, the research on the mechanism of runoff change should be strengthened.

收稿日期: 2023-04-02

修回日期: 2023-06-02

资助项目: 国家自然科学基金(NSFC-山东联合基金)“海洋动力对黄河三角洲地貌演变调控机制与岸滩稳定”(U2006227)

第一作者: 杨富香(1998—), 女, 四川乐山人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: yangfuxiang@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 拾兵(1961—), 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 主要从事河流、河口与海岸动力学研究。E-mail: sediment@ouc.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Keywords: hydrological regime; Dagu River Basin; Mann-Kendall test; sliding t-test method; Morlet wavelet analysis

河川径流是水循环重要的途径,是推动经济发展和社会进步的重要支撑^[1]。但随着水利工程建设和人类活动的影响,径流演变出新的形势,流域水循环呈现出新的特点^[2-4],因此了解水文情势的变化是推动水资源管理进一步发展的基础。目前已有许多国内外学者对水文情势变化开展了一系列研究,为揭示河川径流变化特征做出了巨大贡献。

李乐等^[5]采用有序聚类法和累积距平法对煤炭开采区河道径流进行了突变性分析,基于 Morlet 小波理论对河道径流进行了周期性分析,揭示了煤炭开采区河道径流演变特征。鞠琴^[6]和唐玉兰^[7]等采用 IHA-RVA 法综合分析了流域河段水文情势改变程度的影响,为流域水资源管理提供理论基础。张力文等^[8]对金沙江支流关河流域的水文情势进行了分析,揭示了造成流域输沙变化的关键因素是人类活动。谢智博等^[9]采用 Morlet 小波分析对北洛河上游长时间序列径流的周期变化进行了分析,结果表明北洛河上游流量显著减少且变化周期性较为明显。Kumar 等^[10]采用改进的 Mann-Kendall 法对印度 Bagmati 流域径流进行了趋势性分析。Sharifi^[11]、Wang^[12]和 Forootan^[13]等量化分析了人为因素和气候变化对流域径流变化的影响,分析了径流的变化特征,得出了人类活动是影响径流改变的主要因素。

一些学者对大沽河流域开展了水文情势变化研究,姜德娟等^[14]采用 Mann-Kendall 法对 1960—2008 年南村水文站、产芝水库站及尹府水库站的年径流进行了趋势分析和突变分析,探讨了人类活动和降雨对径流的影响程度。胡萌等^[15]对 1956—2016 年入海径流量序列进行突变和周期性分析,结果表明大沽河入海径流在 1976 年发生突变,且存在 3 个尺度的周期性变化。郑志国等^[16]对流域近 20 a 径流量进行了年际变化分析。盛茂刚等^[17]和崔素芳^[18]分别对流域年降雨量进行了的时空分布特征分析和周期分析,并未对年径流做相关研究。上述研究大多采用 Mann-Kendall 进行趋势和突变分析,但未考虑水文要素自相关性和数据噪声对趋势检验的影响,对径流周期性的研究也相对较少,且大部分研究时间尺度较短,这对研究结果也会产生一定影响。

本文基于大沽河流域南村站 1956—2020 年、闸子站 1956—2016 年实测径流数据,采用 Trend-Free Pre-Whitening-Mann-Kendall(去趋势预置白-Mann-Kendall)

检验法结合 Sen's 法、滑动 t 检验法对流域年均径流的变化趋势和突变时间进行检验,消除径流序列自相关性对检验结果的影响;采用 Morlet 连续复小波分析法对径流的周期性特征进行分析。旨在为大沽河流域的水资源管理和可持续发展提供理论参考。

1 研究区概况

大沽河发源于招远市阜山,由北向南流至莱西市埠后村约 1 km 处,沿莱西、招远边界流向西南,于莱西市道子泊村北约 500 m 处流入青岛市辖区^[14],介于东经 120°07'—120°34',北纬 36°02'—37°5'。该流域属于华北暖温带沿海湿润季风区,温差不大,根据南村水文站实测资料,流域多年平均降水量 668.1 mm,多年平均径流量 31 569 万 m³。干流全长 199 km,流域面积 6 205 km²,河流平均比降 0.536‰,是胶东半岛最大的河流。南胶莱河是大沽河的支流,发源于平度市姚家村分水岭南侧,在胶莱镇刘家花园处流入胶州市,经胶东镇汇入大沽河,干流全长 30 km,流域面积 1 562 km²。主要支流有胶河、墨水河及清水河等。根据闸子水文站多年实测资料,流域多年平均降雨量 672.3 mm,多年平均径流量 9 206 万 m³,多年平均径流深 72.1 mm。

2 数据与方法

2.1 数据来源

南村水文站 1956—2020 年径流数据来源于青岛市水文站,最大径流量出现在 1964 年,为 28.303 7 亿 m³,最小径流量出现在 1981 年、1983 年、1984 年等多个年份,为 0 m³,多年平均值为 3.156 9 亿 m³。闸子水文站 1956—2016 年径流数据来源于《青岛市第三次水资源调查评价》,最大径流量出现在 1964 年,为 7.333 6 亿 m³,最小径流量出现在 2000 年、2002 年、2004 年等多个年份,为 0 m³,多年平均值为 0.920 6 亿 m³。

2.2 数据预处理

由于 Mann-Kendall 检验法对检验样本的要求是样本点独立,但是水文时间序列如年降水、年径流可能存在自相关性,这会导致趋势的显著性增大,因此要对数据进行预处理。采用去趋势预置白(Trend-Free Pre-Whitening)方法^[19]对原始径流数据进行预处理,可降低径流序列中自相关项对后续趋势检验的影响,且可以有效避免结果失真。

(1) 分离原始数据序列的趋势。对于长度为 n 的径流时间序列 $X_t (t=1, 2, \dots, n)$:

$$Y_t = X_t - \beta \cdot t \quad (1)$$

式中: Y_t 为剔除趋势后的序列; β 为原始径流序列的坡度; t 为时间; 采用 Theil-Sen 法, 此法可有效降低噪声的干扰, $\beta > 0$, 表示径流序列呈现上升的趋势, $\beta < 0$ 则表示径流序列呈现下降的趋势。

(2) 自相关性检验。采用 PACE (偏自相关函数) 检验去趋势后的数据序列的自相关性, 该方法能够使低阶自相关不对高阶自相关性产生影响^[20], 采用双侧检验对自相关系数 r 进行显著性检验^[21]。若

r 未通过显著性检验, 即表示该样本数据是一个独立序列, 无需再对数据进行下一步处理, 直接将原始序列带入 Mann-Kendall 趋势检验。两个水文站自相关检验结果如图 1 所示, 可以看到, 南村水文站去趋势后年均、汛期及非汛期径流序列一阶自相关系数均超出临界值, 闸子水文站去趋势后非汛期径流序列一阶自相关系数超出临界值, 年均、汛期径流序列未超出临界值, 且两个水文站并无高阶自相关系数超出临界值, 因此南村站的年均、汛期、非汛期径流序列, 闸子站非汛期径流序列需要进行下一步处理, 其余序列直接将 X_t 带入 Mann-Kendall 趋势检验。

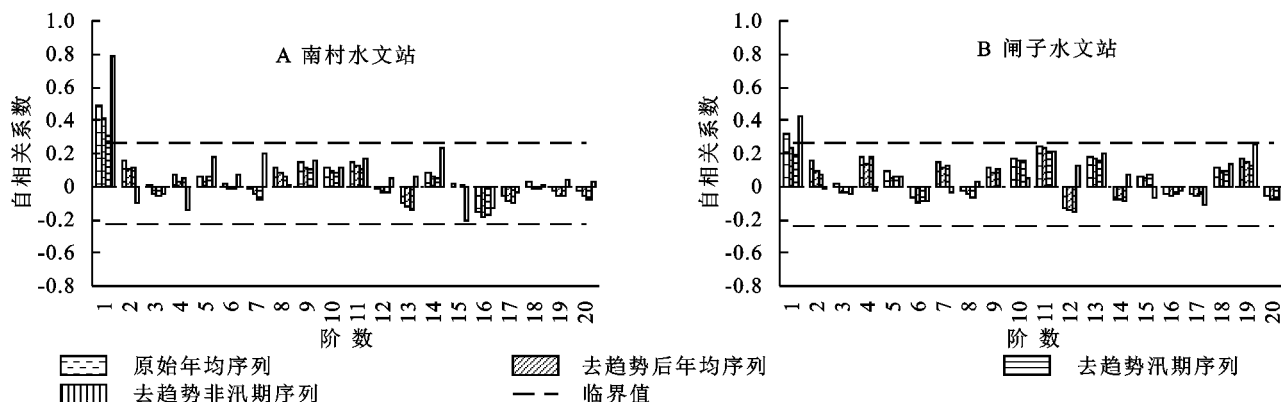


图 1 原径流序列及 Y 自相关检验结果

Fig. 1 Original runoff series and Y autocorrelation test results

(3) 剔除自相关性。采用以下公式去除序列自相关性:

$$Y'_t = Y_t - r \cdot Y_{t-1} \quad (2)$$

$$Y''_t = Y'_t + \beta \cdot t \quad (3)$$

式中: Y'_t 为经预置白处理后的独立白噪声序列; Y''_t 为补还趋势项后的新序列, 此序列不再具有自相关性, 且保证了径流序列趋势的不丢失, 再对 Y''_t 进行 Mann-Kendall 趋势检验。

2.3 趋势和突变点检验

2.3.1 Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall 检验法是用来判断时间序列下气候水文要素的变化趋势以及是否存在突变的方法, 可以确定水文序列的突变时间和趋势变化的显著程度, 具体公式见参考文献[18]。

2.3.2 滑动 t 检验法 滑动 t 检验法是根据两组样本均值的差异是否显著来检验水文序列是否发生突变^[22]。对于具有 n 个样本的时间序列, 选取两个样本序列 n_1 和 n_2 , 比较统计量 t 与临界值可判定该水文序列统计显著性^[23], 但是该检验方法有一个缺点, 即样本选择时具有人为性, 因此需要通过反复设置子序列长度来提高检验的可靠性。

2.4 周期性分析

Morlet 连续复小波分析法是用一簇小波函数系

表示或逼近某一信号或函数, 其小波函数表达式和小波变换的定义见参考文献[24], 以此确定在整个水文序列中存在的主周期和不同尺度的震荡强度。

3 结果与分析

3.1 径流量年内变化分析

图 2 为南村站和闸子站不同时间序列径流量年内分配情况, 可以看出两个水文站径流主要集中在汛期(6—9月), 峰值一般出现在 8 月。南村站 1956—2020 年、1956—1980 年、1981—2000 年及 2001—2020 年 4 个时间序列径流量的年内分配情况基本一致, 均呈现汛期流量多, 非汛期流量少的特点, 这是由于夏季雨水充沛, 容易形成径流, 可以看出大沽河为典型的季节性河流。但是径流峰值在 1956—1980 年、1981—2000 年、2001—2020 年呈现逐渐降低的趋势, 这是由于自 20 世纪 80 年代以来, 流域降水逐渐减少, 为满足城市供水需求, 上游水库基本不向下游供水。闸子站径流量年内分配情况整体与南村站一致, 呈现汛期多, 非汛期少的特点。

3.2 年均径流量趋势性分析

南村水文站 1956—2020 年实测径流量变化趋势如

图 3 所示,南村站年均径流量整体呈下降趋势,最大径流量为 28.3 亿 m³,发生在 1964 年,最小径流量为 0 m³,发生在 1981 年、1983 年、1984 年等多个年份。自 1980 年之后,南村站径流量大多集中在汛期(6—9 月),非汛期(10—5 月)径流量急剧减少,几乎全部为 0。1981—2020 年的多年平均径流量较 1956—1980 年下降 78.4%。

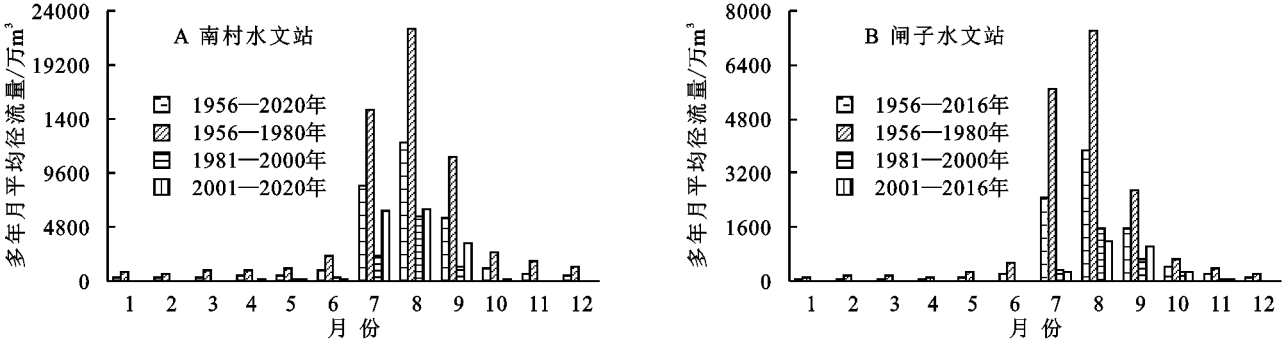


图 2 径流量年内分配

Fig. 2 Annual distribution of runoff

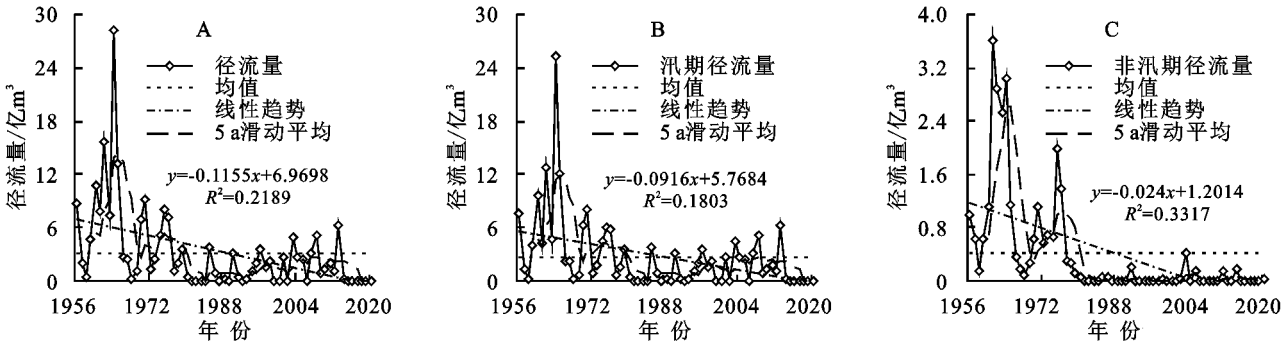


图 3 南村水文站 1956—2020 年年均径流变化趋势

Fig. 3 Variation trend of annual average flow at Nancun station

如图 4 所示,1956—2016 年闸子站年均径流量与南村站一样整体呈下降趋势,最大径流量为 7.3 亿 m³,发生在 1964 年,最小径流量为 0 m³,发生在 2000 年、2002 年、2004 年等多个年份,闸子站径流量主要集中在汛期(6—9 月)。1981—2016 年的多年平均径流量较 1956—1980 年下降 84.5%。趋势检验结

果见表 1,根据趋势检验结果可知,1956—2016 年闸子站年均、汛期、非汛期径流量 M-K 统计 Z 值分别为-4.536 5,-4.244,-3.067 8,年均、汛期径流量下降趋势通过 0.05 显著水平, β 值均小于 0,表明闸子站年均、汛期及非汛期径流量均呈现显著下降的趋势,且闸子站下降趋势较南村站更为显著。

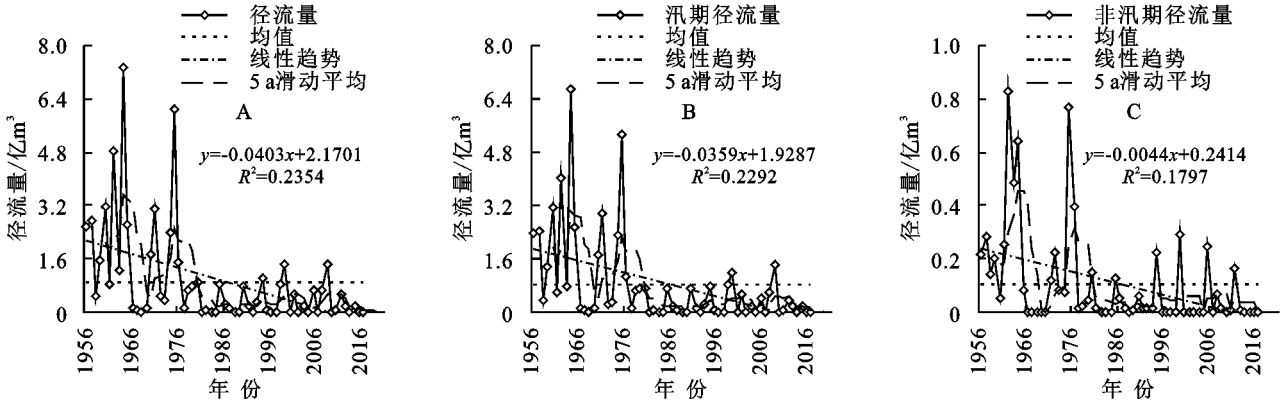


图 4 闸子水文站 1959—2016 年年均径流量变化趋势

Fig. 4 Variation trend of annual average flow at Zhazi station

表 1 趋势检验结果
Table 1 Trend test result

站点	年均		汛期		非汛期	
	β	Z	β	Z	β	Z
南村水文站	-0.0477	-2.9721	-0.0416	-2.6709	-0.0005	-1.6396
闸子水文站	-0.0123	-4.5365	-0.0112	-4.244	-0.0006	-3.0678

3.3 年均径流量突变点检验

采用 Mann-Kendall 检验法(简称 M-K 检验法)、滑动 t 检验法对南村站、闸子水文站的年均径流量进行突变检验,检验结果如图 5—6 所示。根据南村水文站 M-K 检验结果可知,从 1981—2020 年 UF 值始终小于 -1.96 (0.05 显著水平),即径流量自 1981—2020 年均呈显著减小趋势;在 1975 年之前 UF 与 UB 值相等,且发生于 0.05 置信区间内,为年均径流量突变点。从南村站滑动 t 检验结果来看,选取 $n=7, 8, 9, 10$ 时,滑动 t 统计量均通过 0.05 显著水平,在 1965 年左右,1976—1980 年年径流量都发生了突变,因此结合两种检验结果,南村站年均径流量在 1976 年左右发生突变,径流量由多变少。突变前后 20 a 均径流量分别为 6.91 亿 m^3 , 1.14 亿 m^3 , 突变后 20 a 均径流量较突变前减少 83.5%。

根据闸子水文站 M-K 检验结果可知,UF 和 UB 相交于 1978—1979 年,且发生在 0.05 置信区间内,为突变点,UF 值在 1982—2016 年始终小于 -1.96 (0.05 显著水平),表明在 1982—2016 年径流量均呈显著减小的趋势;由闸子站滑动 t 检验结果来看,选取 $n=7, 8, 9, 10$ 时,均通过 0.05 显著水平,在 1965 年左右,1976—1980 年径流量发生了突变,结合 M-K 检验、滑动 t 检验结果来看,闸子水文站年均径流量于 1979 年发生了由多到少突变。突变前后 20 a 均径流量分别为 1.92 亿 m^3 , 0.34 亿 m^3 , 突变后 20 a 均径流量较突变前减少 82.3%。

根据突变分析结果可知,大沽河流域径流量在 20 世纪 70 年代发生突变,且在 80 年代开始呈现显著下降的趋势。这是由于自 20 世纪 80 年代以来,流域降水减少,为满足城市供水需求,上游水库基本不向下游供水。

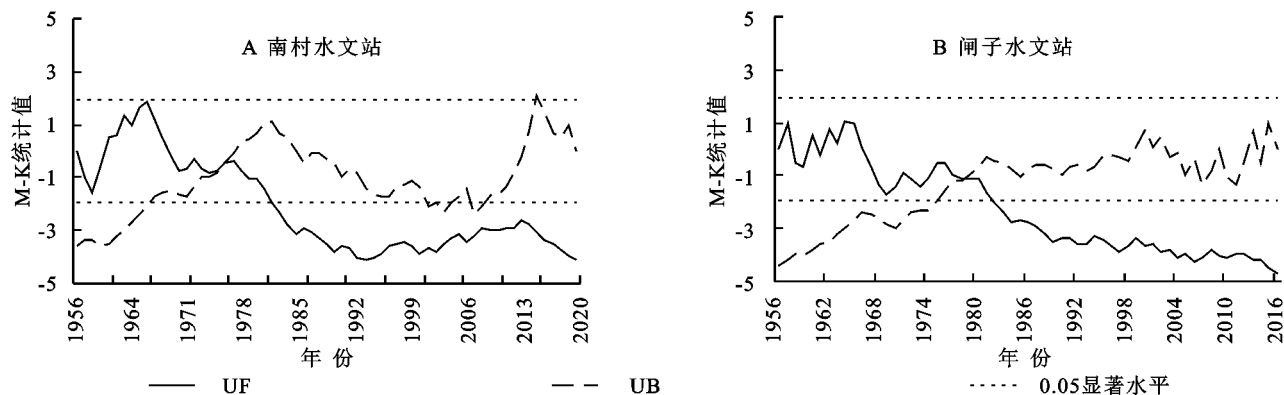


图 5 南村站、闸子站年径流量 M-K 突变检验

Fig. 5 M-K test of annual runoff volumes at the Nancun station and Zhazi station

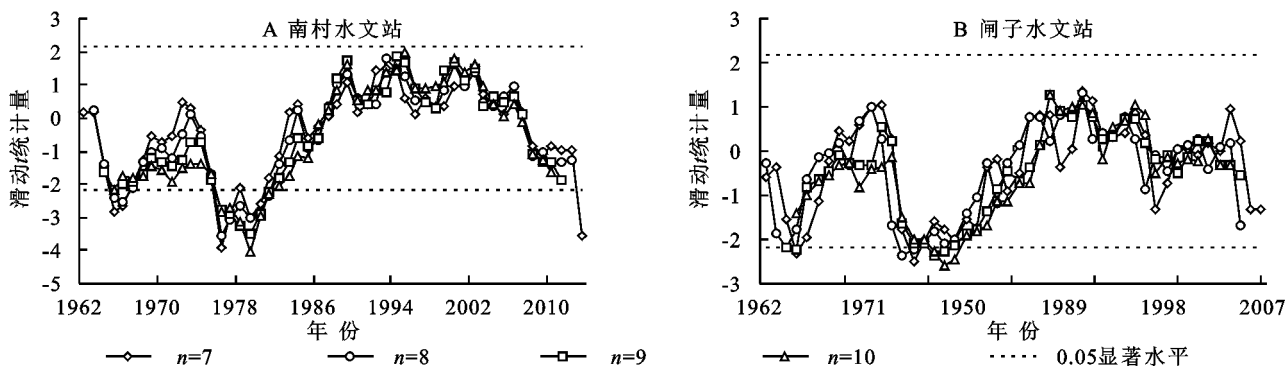


图 6 南村站、闸子站年径流滑动 t 突变检验

Fig. 6 Moving t-test of annual runoff volumes at the Nancun station and Zhazi station

3.4 年均径流周期性分析

采用 Morlet 连续复小波分析法对南村站、闸子

站年均径流量序列做周期性分析。小波系数实部等值线图可以反映出径流序列在不同时间尺度上的周

期变化,以此可以判断径流未来的变化趋势,小波系数实部为正时,表示在该年份径流处于丰水期,若实部为负,则表示处于枯水期;小波系数模值等值线图可以反映不同时间尺度下径流序列周期性的强度,模值越大,表明其对应时间尺度的周期性就越强;小波方差图可以反映径流变化过程中存在的主周期。

南村站年均径流量小波系数实部和模值见图 7,小波方差、和不同时间尺度下的周期变化见图 8。从小波系数实部图可以看出,在 1956—2020 年,南村站年均径流量在 5~8 a,9~12 a,15~30 a 三个时间尺

度上都存在明显的周期性变化。在 5~8 a 时间尺度上出现丰—枯交替的准 11 次震荡,该时间尺度在整个时间序列上表现较为稳定且具有全域性。9~12 a 和 15~30 a 时间尺度在整个时间序列前期表现得较为稳定,但 1976 年以后由于径流量减小,年际之间径流量的变化幅度不大,导致振荡周期表现不稳定。从小波系数模值图可以看出,15~30 a 时间尺度的模值最大,表明在该时间尺度上周期变化最明显,9~12 a 时间尺度的周期变化次之,5~8 a 时间尺度的周期变化最弱。

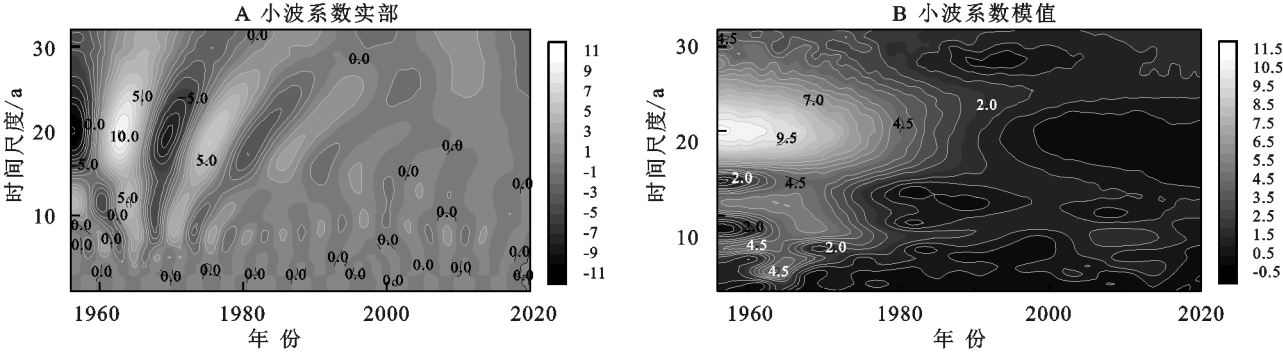


图 7 南村站年均径流量小波系数实部和模值

Fig. 7 Real part and modulus of wavelet transform of annual runoff volumes at the Nancun station

从图 8A 可以看出,整个时间序列南村站年径流量的小波方差共有 3 个峰值,分别是 8 a,11 a,20 a,其中 20 a 时间尺度峰值最高、波动最强,表明该周期为南村站年径流变化的第一主周期;第二峰值对应 11 a,为第二主周期;第三峰值对应 8 a,为第三主周期,3 个周期的波动影响着南村站 65 a 径流量的变化。从南村站不同时间尺度的周期变化(图 8B)可知,在 20 a 时间尺度

上,径流经历了约 4 次较为显著的枯—丰交替变化,平均周期约 16 a,在整个时间序列上,该周期震荡强度一直在减弱;在 11 a 尺度上,径流经历了约 9 次丰—枯交替变化,平均周期约 7 a,该周期强度在 1976 年之后一直持续减弱;在 8 a 尺度上,径流经历了约 11 次丰—枯交替变化,平均周期约 6 a,该周期强度从 1965 年开始减弱到 1997 年再开始增强。

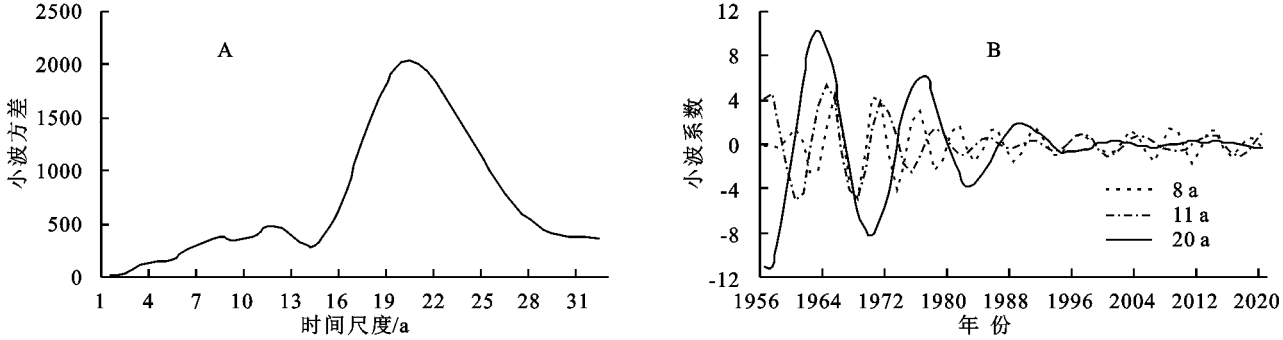


图 8 南村站年均径流小波方差、不同时间尺度下的周期变化

Fig. 8 Wavelet variance diagram and periodic changes at different time scales of annual runoff volumes at the Nancun station

闸子站小波系数实部和模值见图 9,根据闸子站小波实部图可知,闸子站年径流量在整个时间序列(1956—2016 年)上存在 3 个时间尺度的周期性变化,分别是 4~9 a,10~14 a 以及 15~30 a。4~9 a 尺度在 1965—1983 年之前有 4 次较为显著的丰—枯交替震荡,其他时间段震荡较弱;10~14 a 尺度在

1970 年之前有两次较为显著的丰—枯交替震荡,1970 年之后震荡较弱;15~30 a 尺度有三次显著的枯—丰交替震荡,约在 1990 年之后震荡愈来愈弱。从闸子站小波系数模值图可以看出,3 个时间尺度中,15~30 a 尺度的模值最高,表明在该时间尺度下年均径流的周期性最强,4~9 a 次之,10~14 a 最弱。

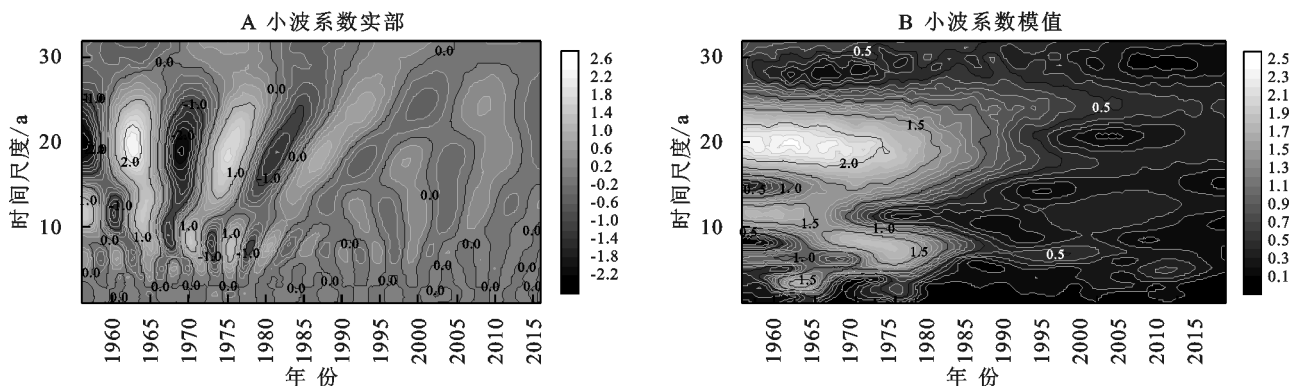


图 9 闸子站年均径流小波系数实部和模值

Fig. 9 Real part and modulus of wavelet transform of annual runoff volumes at the Zhazi station

闸子站小波方差如图 10A 所示,整个时间序列闸子站年径流量的小波方差共有 3 个峰值,分别是 8 a, 12 a, 19 a, 其中 19 a 时间尺度峰值最高、波动最强,表明该周期为南村站年径流变化的第一主周期;第二峰值对应 12 a,为第二主周期;第三峰值对应 8 a,为第三主周期。从闸子站不同时间尺度的周期变化(图 10B)可知,

在 19 a 时间尺度上,径流经历了约 5 次枯—丰交替变化,平均周期约 12 a,在整个时间序列上,该周期震荡强度一直在减弱;在 12 a 尺度上,径流经历了约 7 次丰—枯交替变化,平均周期约 9 a,该周期强度在 1979 年之后一直持续减弱;在 8 a 尺度上,径流经历了约 11 次丰—枯交替变化,平均周期约 6 a。

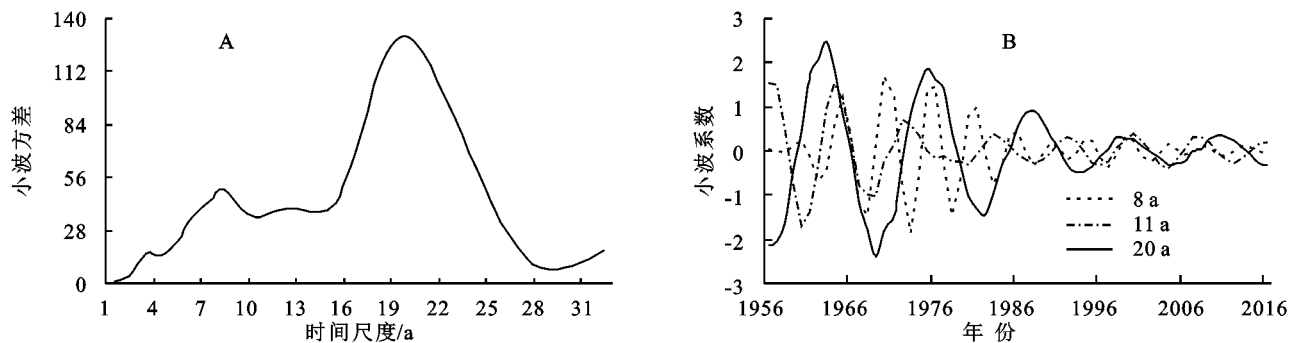


图 10 闸子站年均径流小波方差(年)、不同时间尺度下的周期变化

Fig. 10 Wavelet variance diagram and periodic changes at different time scales of annual runoff volumes at the Zhazi station

4 讨论

根据趋势检验和突变检验结果可知,大沽河流域年径流量在 20 世纪 70 年代发生突变,且在 80 年代开始呈现显著下降的趋势,且大沽河流域年均径流、汛期径流量呈现显著下降的趋势,非汛期径流量呈不显著下降趋势,这与前人对该流域的相似研究结果基本一致。姜德娟等^[14]对大沽河流域南村、产芝、尹府水文站 1960—2008 年的径流量进行了趋势分析,结果表明南村站、产芝站年径流呈显著下降趋势,尹府站呈不显著下降趋势。崔素芳^[18]对南村站多年径流量进行了趋势分析,结果表明径流呈下降趋势。胡萌等^[15]采用 Man-Kendall 突变检验法、累积距平法及滑动 t 检验法对大沽河流域入海径流进行突变检验,结果表明该流域入海径流在 1976 年发生突变。

根据周期性分析结果可知,大沽河流域径流量存在不同时间尺度周期变化的特征,即小尺度的丰—枯交替嵌套在大尺度的枯—丰交替转化过程中,且不同

时间尺度下的丰、枯点并不完全一致,这是由于小尺度周期是整个时间序列的随机性和规律性的综合体现^[15],不确定性较大,而大周期是由大环境影响且决定的,因此大周期更能体现径流总体变化趋势。姜德娟等^[14]对南村站 1960—2008 年径流做了周期分析,发现其存在 5~6 a, 10~11 a 尺度的周期性变化,胡萌等^[15]对大沽河入海径流进行了周期性分析,结果表明其存在 5~8 a, 10~15 a, 17~30 a 三个尺度的周期性变化。这些研究都与此次研究相互印证。周期性的分析结果与所选择序列的时间尺度长短有着密切的关系,该研究周期性时间尺度最大为 32 a,径流序列可能还有更长尺度的周期性变化,但这需要时间尺度更长的径流时间序列加以验证。

5 结论

(1) 南村站和闸子站径流量均具有显著的季节性差异,径流主要集中在汛期(6—9 月),峰值一般出现在 8 月。此外,由于降水的减少,汛期径流均呈现

逐渐减少的趋势,尤其在 20 世纪 70—80 年代之后,汛期径流量显著减少。

(2) 利用 Mann-Kendall 检验法对南村站和闸子站长时间序列径流量进行趋势性分析,结果表明两个站点 β 值均小于 0,表明呈下降趋势。南村水文站年均、汛期径流量的统计值通过 0.05 显著水平,闸子水文站统计量值均通过 0.05 显著水平,即径流量均呈现显著下降趋势,南村水文站非汛期径流量统计值未通过 0.05 显著水平,呈不显著下降趋势。

(3) 采用 Mann-Kendall 检验法和滑动 t 检验法对南村站和闸子站的多年径流量进行了突变检验,结果表明南村站年径流在 1976 年时发生突变,闸子站在 1979 年时发生突变。

(4) 采用 Morlet 连续复小波分析法对南村站和闸子站多年径流量进行了周期性分析,结果表明两个站点均呈现出丰—枯交替的多个时间尺度变化的特点,且在 20 世纪 80 年代之前周期震荡显著。南村站存在 5~8 a, 9~12 a, 15~30 a 三个时间尺度的周期变化,第一、二、三主周期分别是 8 a, 11 a, 20 a; 闸子站存在 4~9 a, 10~14 a, 15~30 a 三个时间尺度的周期变化,其第一、二、三主周期分别为 8 a, 12 a, 19 a。

(5) 总体而言,大沽河流域长时间序列径流量呈现出显著下降的变化趋势,且径流量主要集中在汛期(6—9月);流域径流量在 20 世纪 70 年代发生突变;存在不同时间尺度周期变化的特征,即小尺度的丰—枯交替嵌套在大尺度的枯—丰交替转化过程中,且第一主周期在 20 a 左右。

参考文献(References):

- [1] 高爽, 迺超普, 汤水荣, 等. 长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 4853-4862.
Gao S, Ti C P, Tang S R, et al. Runoff simulation and its response to extreme precipitation in the Yangtze River Basin[J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 4853-4862.
- [2] 练继建, 党莉, 马超. 水库运行对下游河道横向连通性的影响[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2017, 50(12): 1288-1295.
Lian J J, Dang L, Ma C. Effects of reservoir regulation on downstream lateral connectivity[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2017, 50(12): 1288-1295.
- [3] 尚文绣, 靖娟, 尚弈. 小浪底水库调度对黄河下游水文情势的影响[J]. 中国农村水利水电, 2022(10): 91-95, 104.
Shang W X, Jing J, Shang Y. The influence of Xiaolangdi Reservoir operation on flow regime in the Lower Yellow River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(10): 91-95, 104.
- [4] 宋益涛, 王双涛, 罗平平, 等. 变化环境下径流演变的研究方法进展[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2): 68-76, 84.
Song Y T, Wang S T, Luo P P, et al. Advances in research methods of runoff evolution under changing environment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 68-76, 84.
- [5] 李乐, 吴喜军, 周孝德, 等. 基于 Morlet 小波理论的煤炭开采区河道径流演变特征分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(4): 37-40.
Li L, Wu X J, Zhou X D, et al. Evolution characteristics of river runoff in coal mining area based on Morlet wavelet theory[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(4): 37-40.
- [6] 鞠琴, 吴佳杰, 姚婷月, 等. 基于 IHA-RVA 法的渭河流域水文情势变化分析[J]. 水文, 2022, 42(4): 76-82.
Ju Q, Wu J J, Yao T Y, et al. Analysis of hydrological regime change in Weihe River Basin based on IHA-RVA method[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(4): 76-82.
- [7] 唐玉兰, 王雅峰, 马甜甜, 等. 观音阁水库建设运行对太子河本溪段水文情势影响[J]. 水文, 2020, 40(2): 92-96, 79.
Tang Y L, Wang Y F, Ma T T, et al. Influence of construction and operation of Guanyinge Reservoir on hydrological regime in Benxi Reach of Taizi River[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(2): 92-96, 79.
- [8] 张力文, 王秀茹, 宋理桥, 等. 金沙江支流关河流域水文情势评价[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(1): 92-100.
Zhang L W, Wang X R, Song L Q, et al. Evaluation of hydrological situation in Guanhe Basin, a tributary of Jinsha River[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(1): 92-100.
- [9] 谢智博, 穆兴民, 高鹏, 等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河上游径流变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 139-144.
Xie Z B, Mu X M, Gao P, et al. Variation characteristics of runoff in the upper reaches of Beiluo River based on R/S and Morlet wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 139-144.
- [10] Kumar K, Singh V, Roshni T. Variations of precipitation and runoff in the Bagmati River Basin, Bihar, India[J]. Water Practice and Technology, 2022, 17(12): 2554-2569.
- [11] Sharifi A, Mirabbasi R, Nasr-Esfahani M A, et al. Quantifying the impacts of anthropogenic changes and climate variability on runoff changes in central plateau of Iran using nine methods[J]. Journal of Hydrology,

- 2021, 603(Part C):127045.
- [12] Wang H, Ma Y, Yang H, et al. Quantitative evaluation of the impact of climate change and human activities on Jialing River runoff changes in the past 60 years, China [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2023,14(2):590-609.
- [13] Forootan E, Sadeghi S H R. Relative importance of climatic and anthropogenic factors on runoff change at watershed scale[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023,20(3):3059-3070.
- [14] 姜德娟,王晓利.胶东半岛大沽河流域径流变化特征[J].干旱区研究,2013,30(6):965-972.
Jiang D J, Wang X L. Variation of runoff volume in the Dagu River Basin in the Jiaodong Peninsula [J]. *Arid Zone Research*, 2013,30(6):965-972.
- [15] 胡萌,吴振,温鲁哲,等.大沽河入海径流演化特征及其影响因素研究[J].人民长江,2022,53(7):90-97.
Hu M, Wu Z, Wen L Z, et al. Study on evolution characteristics of Dagu River runoff into sea and influencing factors[J]. *Yangtze River*, 2022,53(7):90-97.
- [16] 郑志国,孙楠思,李艳梅.青岛市大沽河流域近 20 年水文情势变化分析[J].山东水利,2022(11):10-12.
Zheng Z G, Sun N S, Li Y M. Analysis of hydrological changes in last 20 years in Dagu River Basin of Qingdao [J]. *Shandong Water Resources*, 2022(11):10-12.
- [17] 盛茂刚,黄修东,左林远,等.大沽河流域近 60 年降水量时空变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):65-68.
Sheng M G, Huang X D, Zuo L Y, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of precipitation in Dagu river basin for recent 60 years[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016,27(2):65-68.
- [18] 崔素芳.变化环境下大沽河流域地表水-地下水联合模拟与预测[D].济南:山东师范大学,2015.
Cui S F. Combined Simulation and Prediction of Surface Water and Groundwater in Dagu River Basin Under Changing Environment[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
- [19] 张洪波,王斌,辛琛,等.去趋势预置白方法对径流序列趋势检验的影响[J].水力发电学报,2016,35(12):56-69.
Zhang H B, Wang B, Xin C, et al. Effects of trend-free pre-whitening methods on trend detection in Mann-Kendall test of runoff series[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016,35(12):56-69.
- [20] 张洪波,李哲浩,席秋义,等.基于改进过白化的 Mann-Kendall 趋势检验法[J].水力发电学报,2018,37(6):34-46.
Zhang H B, Li Z H, Xi Q Y, et al. Modified over-whitening process and its application in Mann-Kendall trend tests[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018,37(6):34-46.
- [21] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-496.
Zhang D W, Cong Z T, Ni G H. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data[J]. *Advances in Water Science*, 2013,24(4):490-496.
- [22] 张献志,汪向兰,王春青,等.黄河源区气象水文序列突变点诊断[J].人民黄河,2020,42(11):22-26.
Zhang X Z, Wang X L, Wang C Q, et al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2020,42(11):22-26.
- [23] 刘琦,孙冰心.M-K 和滑动 T 确定穆棱河流域径流变化突变时间[J].黑龙江水利,2015,1(7):35-37.
Liu Q, Sun B X. Ensure the abrupt runoff change time in Muling River by M-K and sliding T method[J]. *Heilongjiang Water Resources*, 2015,1(7):35-37..
- [24] 李红燕,王志平,羊华,等.基于 Morlet 小波分析的弥苴河径流量变化及其影响因素分析[J].人民珠江,2021,42(3):53-60.
Li H Y, Wang Z P, Yang H, et al. Analysis of runoff change and its influencing factors of Miju River based on morlet wavelet analysis[J]. *Pearl River*, 2021,42(3):53-60.