

大别山黄尾河流域径流演变特征分析

顾哲衍¹, 张金池², 陈 杭¹, 杨传清¹, 汤 佳¹, 夏 禹¹

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127;

2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037)

摘要:以大别山黄尾河流域长时间序列的径流资料为基础,利用累积距平法、Cramer 突变检验法、小波分析法等揭示了径流的年际年内变化、周期性变化等特性。研究看出径流的多时间尺度结构明显,主要存在 34~40 年,11~34 年和 10 年以下 3 类尺度的周期性变化规律,其中 10 年以下的小尺度周期变化显著,中心尺度在 6 年左右。径流年内分配不均匀,夏季径流量比例最大,几乎是全年径流量的一半,冬季最小,春季径流量大于秋季径流量。流域受自然、人为干扰等多种因素的综合影响,径流时空变化的随机性、非线性及非平稳性特征显著。

关键词:径流特征;趋势检验;小波分析

中图分类号:S715.3

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2020)02-0005-05

Analysis on the runoff evolution characteristics of Huangwei River Basin in Dabie Mountain

GU Zheyang¹, ZHANG Jinchi², CHEN Hang¹, YANG Chuanqing¹, TANG Jia¹, XIA Yu¹

(1. Jiangsu Provincial Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou 225127, Jiangsu; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu)

Abstract: Based on the long time runoff series data of the Huangwei River Basin in Dabie Mountain, using the cumulative departure method, Cramer mutation test method and wavelet analysis method to reveal characters within the year and inter-annual, periodic change characters and so on. The results showed that the multiple time scale structure of runoff was obvious, which mainly existing in three types of scale periodic change law of 34-40 years, 11-34 years and less than 10 years, in which the small scale periodic change of less than 10 years was significant, and the central scale was around 6 years. The runoff was unevenly distributed throughout the year, with the largest runoff ratio in summer, which was almost half of the annual runoff, the smallest in winter, and the greater runoff in spring than in autumn. Due to the comprehensive influence of natural disturbance, artificial disturbance and other factors, runoff spatial and temporal variation has significant characteristics of randomness, non-linearity and non-stationarity.

Key words: runoff characteristics; trend test; wavelet analysis

径流过程对整个水文水资源系统的演化起决定性作用,会对区域生态环境,经济和社会发展产生重大影响^[1]。受全球气候变异和人为干扰作用的影响,黄尾河流域自 20 世纪开始,降雨量呈现减

少趋势,加上水资源开发利用加剧,形式多样,如农业灌溉、生活用水、水能、城镇建设等,导致地表水资源严重不足和地下水位下降。黄尾河流域水资源来源单一,供需矛盾大,洪旱灾害频繁,1949—

收稿日期:2019-09-23

基金项目:国家林业公益性行业科研专项项目(201104005-04)

作者简介:顾哲衍(1990—),男,工程师,硕士,主要从事水土保持研究工作。

2000 年的 51 年中,有 33 年发生洪旱灾害,重现期为 1~2 年。1969 年、1991 年的洪灾和 1978 年的旱灾最为严重。洪、旱灾害发生的特点是洪灾频率略高于旱灾。洪、旱灾害多集中在汛期^[2]。

径流过程是受气候、地形地貌等自然因素、流域开发利用状况等人为因素的非线性动力系统,具有高度的复杂性及不确定性^[3],本文利用多种方法,从不同的角度对黄尾河流域径流的变化规律进行了研究,以期为内陆性山区流域水资源的合理调控、抗旱防洪等提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄尾河流域位于安徽省西部霍山县与岳西县交界处,地理坐标介于东经 116°5′~116°24′,北纬 30°57′~31°9′之间,流域面积约 266.6 km²(图 1)。流域主体位于岳西县境内,约占流域面积的 80.7%,霍山县境内部分约占 19.3%。黄尾河流域地势西高东低,为高、中、低山河谷地貌,相对高差达 1450 m。气候属亚热带湿润性季风气候,年平均气温 13.5℃,年平均降水量 1 495.2 mm(1970—2009 年),年无霜期 180~210 d。

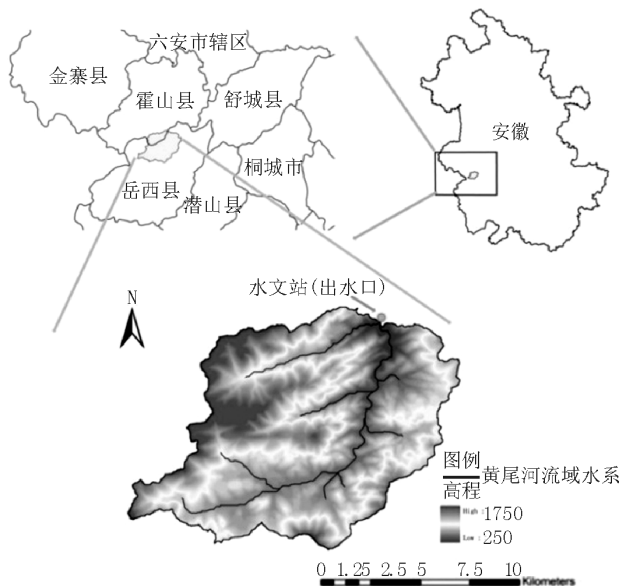


图 1 黄尾河流域区位图

1.2 研究方法

1.2.1 Cramer 检验法

Cramer 检验法^[4]是通过检验子序列与总序列的平均值的差异是否显著来判别突变。算法如下:

对于时间序列 x ,取出某一时间段为子序列 x_1 ,记其均值为 \bar{x}_1 ,总体序列均值为 \bar{x} ,总序列方差为 s ,

则定义统计量为:

$$t = \sqrt{\frac{n_1(n-2)}{n-n_1(1+\tau)}} \cdot \tau \quad (1)$$

式中: n 为序列长度, n_1 为子序列样本长度, $\tau = (\bar{x}_1 - \bar{x})/s$ 。

给定一定显著水平 α ,确定临界统计量 t_α ,若某一时刻临界值小于 t_α ,则表明子序列均值与总体序列均值之间无显著差异,某一时刻临界值大于 t_α ,则可判定突变发生。

1.2.2 小波分析

小波时频分析是一种窗口大小固定不变,时域和频域不断变化的局部优化方法,是傅立叶分析思想的延伸与拓展,其优于传统的频谱分析方法之处就在于具有良好的局部化性质,借助其时频局部化功能来剖析时间序列内部精细结构,这十分有利于分析研究系统的多时间尺度变化^[5]。

(1) 小波变换

小波分析采用 Morlet 小波^[6-7]。设函数 $\psi(t)$ 满足条件式(1),则 $\psi(t)$ 称为基小波或母小波,显然其具有震荡性、能够快速衰减到 0 的特点。

$$\begin{cases} \int_{\mathbb{R}} \psi(t) dt = 0 \\ \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{w} dw < \infty \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\hat{\psi}(w)$ 为 $\psi(t)$ 的频谱。

对 $\psi(t)$ 做空间平移和尺度伸缩可得:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ 为子小波; a 为频谱参数(尺度因子),反映周期大小; b 为时间因子,表示波动在时间上的平移。

对于给定的小波函数 $\psi(t)$,时间序列函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换公式为

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (4)$$

式中: $W_f(a,b)$ 为小波变换系数; $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ 为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。由于实际的水文气象等序列是离散的,因而需对公式做离散化处理:

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \overline{\psi\left(\frac{k\Delta t-b}{a}\right)} \quad (5)$$

式中: $k=1,2,\dots,N$, N 为离散点总数; Δt 为时间取样间隔; $W_f(a,b)$ 是时间序列 $f(t)$ 或 $f(k\Delta t)$ 的单

位脉冲响应滤波器的输出。

(2) 小波方差

将不同尺度 a 的所有小波系数的平方进行积分,可以得到小波方差^[8]随尺度变化的过程,算法(连续形式式(6);离散形式式(7))如下:

$$V_{ar}(a) = \int_R W_f(a, b)^2 db \quad (6)$$

$$V_{ar}(a) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W_f(a, b)^2 \quad (7)$$

小波方差可反映时间序列中所包含的各种尺度的波动及其强弱随尺度变化的特性,因而其可以确定时间序列中所隐含的主副周期。

2 结果与分析

2.1 径流年际变化趋势性分析

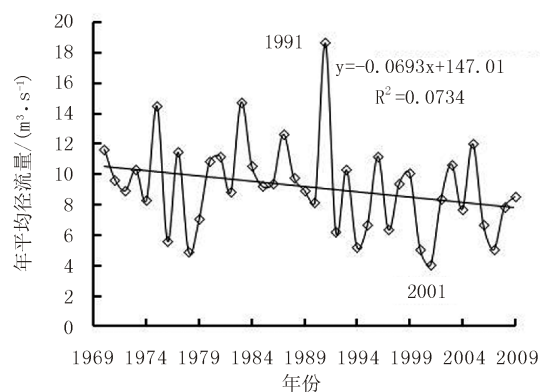
黄尾河流域 1970—2009 年年平均径流量总体呈减少趋势(图 2(a)),由线性倾向估计可知,径流量每 10 年减少速率约为 $0.79 \text{ m}^3/\text{s}$ 。年平均径流量在 1991 年达到峰值 $18.66 \text{ m}^3/\text{s}$,2001 年达到谷值 $4.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由年平均径流量累计距平曲线(图 2(b))可知,40 年间,黄尾河流域径流量存在两个较大的波动时期,主波动时期为 1979—2009 年,以 1991 年为峰值;副波动时期为 1970—1979 年,以 1975 年为峰值。主波动时期内,1979—1991 年,曲线处于上升阶段,表明径流量呈增加趋势;1991—2009 年,曲线处于下降阶段,表明径流量呈减少趋势;副波动时期内,1970—1975 年,曲线处于缓慢上升阶段,径流量呈增加趋势,1975—1979 年,曲线处于下降阶段,且下降幅度明显大于 1970—1975 年曲线上幅度,显然这一时期径流量的减少致使整个副波动时期 1970—1979 年的径流量呈减少趋势。整体而言,黄尾河流域径流量 70 年代呈减少趋势,80 年代呈增加趋势,90 年代又呈减少趋势。

2.2 径流稳定历时分析

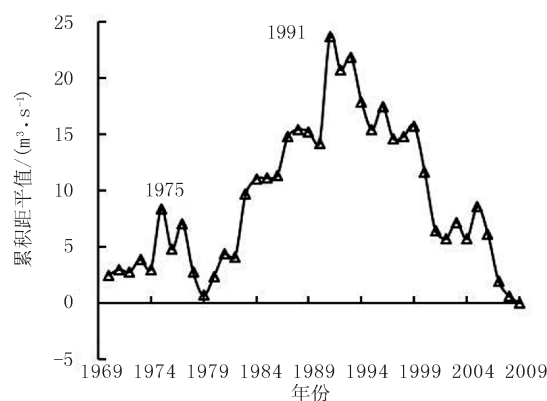
对于某一流域/区域而言,年均径流量序列通常随着时间的推移而渐趋稳定,能够直观反映径流序列这一特性的方法称为年径流量样本均值收敛分析法。其主要思想为将年均径流量的模比系数序列的累积平均值逆序转置,绘制模比系数累积平均值收敛过程线,如图 3,可见自 2009 年起向前累积到 1983 年时,黄尾河流域径流的模比系数累积平均值已非常接近于 1,即可以认为该流域的年均径流量趋于稳定的最短年数为 26 年。

2.3 径流年际变化突变性分析

对黄尾河流域年均径流量进行 Cramer 检验。



(a) 年平均径流量



(b) 累积距平

图2 黄尾河流域年平均径流量变化

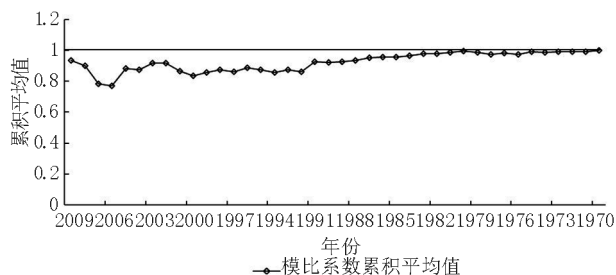


图3 黄尾河流域径流模比系数累积平均值过程线

Cramer 检验法的参数为子序列的滑动长度,本文分别设定了 3 年、5 年、10 年和 15 年为子序列长度,对径流量进行滑动检验,结果表明采用 5 年的子序列长度结果(图 4)最为客观,符合实际。其他子序列长度的结果会出现“欠检验”或“过检验”的现象。由图 4 可知,在 1991 年时,Cramer 检验法的统计量 t_c 曲线超过 0.05 显著性水平的临界值,表明 Cramer 检验法检测出的径流突变时间为 1991 年。

2.4 径流年内分配特性分析

黄尾河流域属亚热带湿润季风性气候,大气降水是河川径流的主要补给源,径流量年内分配极不均匀,季节变化显著。黄尾河流域一般在 6 月中旬进入梅雨季节,此后 1~2 个月内,流域降雨量的增加直接导致径流量的增加。由图 5(a)可知,7 月份

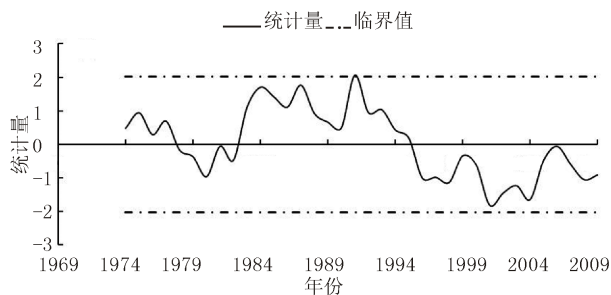


图4 黄尾河流域年平均径流量突变检验

平均径流量最大,约占全年径流量的16.18%,12月份径流量最小,仅占2.76%。径流量自4月后,开始快速上涨,9月开始大幅度下降,主要集中于6、7和8月。根据淮河流域一般以6~9月为汛期,故黄尾河流域的汛期可认为是6~8月。图5(b)显示了黄尾河流域径流的季节分配特征,显然夏季径流量比例最大,约占44.07%,几乎是全年径流量的一半,冬季最小,仅占10.29%,春季径流量大于秋季径流量。

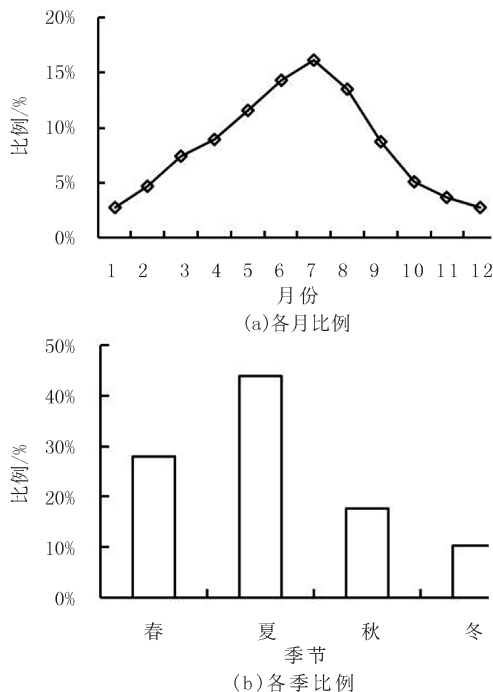


图5 黄尾河流域径流量年内分配统计

2.5 径流周期性和丰枯年变化规律

(1) 小波系数实部分析

Morlet 小波的小波变换系数包含实部和虚部,其实部的变化通常用来描述序列在小波变化域中的波动特性^[6]。由图6可知,黄尾河流域径流的多时间尺度结构明显,主要存在34~40年,11~34年和10年以下3类尺度的周期性变化规律,其中10年以下尺度的震荡次数最多,能量最为集中,表明黄尾河流域径流的小尺度周期变化显著。从较大

尺度34~40年分析,小波系数实部出现“正负”交替的2次振荡,中心尺度在37年左右,其中1970—1994年小波系数实部为正值,表明这一时期径流偏丰,流域处于丰水期;1995—2009年小波系数实部为负值,表明这一时期径流偏枯,处于枯水期。从中间尺度11~34年分析,中心尺度在22年左右,小波系数实部主要出现“负—正—负”交替的3次振荡,其中1970—1984年小波系数实部为负值,表明这一时期径流偏枯,流域处于枯水期;1985—1994年小波系数实部为正值,表明这一时期径流偏丰,流域处于丰水期;1995—2009年小波系数实部为负值,表明这一时期径流偏枯,流域处于枯水期。从主导周期尺度10年以下分析,中心尺度在6年左右,小波系数实部的正负交替震荡10余次,说明黄尾河流域的丰枯年转换频繁,偏枯年有:1974—1975年,1978—1982年,1986—1990年,1994—1997年,2001—2004年,2007—2009年;偏丰年有1970—1973年,1976—1977年,1983—1985年,1991—1993年,1998—2000年,2005—2006年。

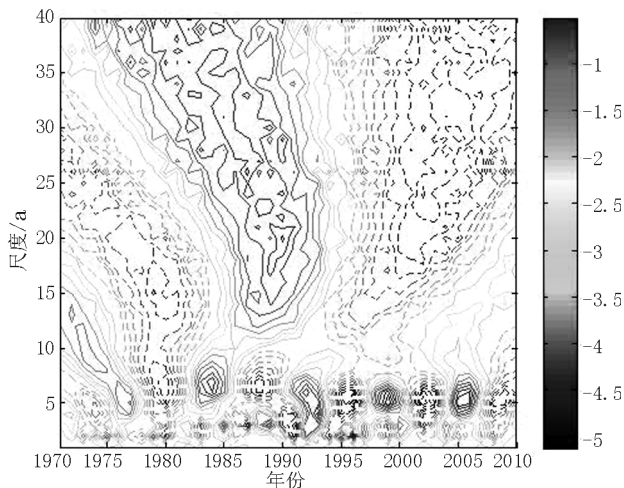


图6 黄尾河流域小波系数实部等值线

(2) 小波方差分析

由图7(a)径流序列的小波方差分析可知:黄尾河流域径流序列在6年周期的震荡最为强烈,即6年为主周期,流域境内的水文水资源利用及早涝灾害等主要受制于6年周期下的丰枯转换特性影响。进一步将6年尺度下的小波系数实部提出图7(b),显然,径流一共发生了10次丰枯交替,转变点为1974年、1978年、1982年、1986年、1990年、1994年、1997年、2001年、2004年和2007年。1974年:枯→丰;1978年:丰→枯;1982年:枯→丰;1986年:丰→枯;1990年:枯→丰;1994年:丰→枯;1997年:枯→丰;2001年:丰→枯;2004年:枯→丰;

2007年:丰→枯。这与图6小波系数实部10年以下尺度分析的结果相吻合,但更加量化、更具准确性。

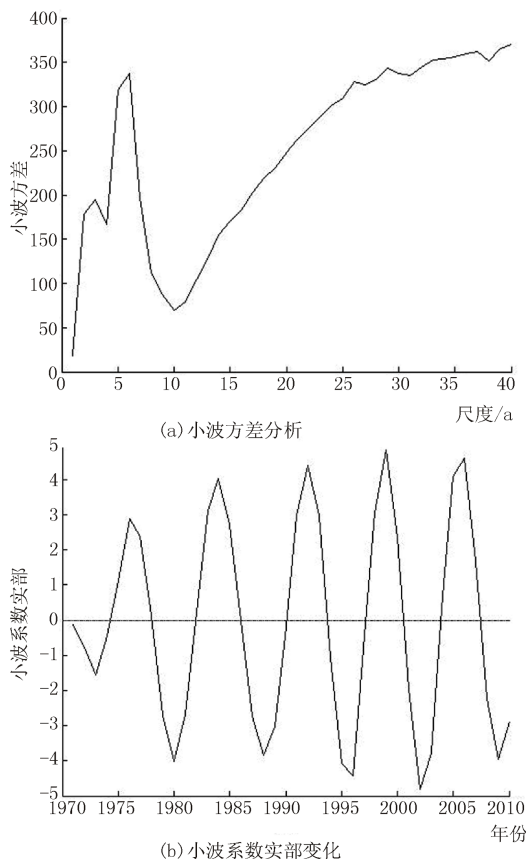


图7 黄尾河流域小波方差分析和6年周期下的小波系数实部变化

3 讨论与结论

本文对黄尾河流域径流演变特性进行了多角度的探讨,结果表明流域径流量总体呈减少趋势,突变时域为1991年左右。径流年内分配不均匀,夏季径流量比例最大,几乎是全年径流量的一半,冬季最小,春季径流量大于秋季径流量。径流的多时间尺度结构明显,主要存在34~40年,11~34年和10年以下3类尺度的周期性变化规律,其中10年以下的小尺度周期变化显著,中心尺度在6年左右。

黄尾河流域径流丰枯交替特性致使境内旱涝灾害频繁。水文序列属离散等间距序列,具有一切时间序列的共性—长程相依性^[9,10]。《岳西县志》^[2]记载的历史上较严重的旱涝灾害有:1978年旱灾,流域入春以后长期少雨,汛期降雨少,6月仅降雨60.3 mm,1年中多次发生旱情,部分地区竹木

枯死。1979年先洪后旱,6月多雨,10月基本无降雨,是典型的秋旱和冬旱年。1983年洪灾,汛期降雨量达820 mm,发生较大洪灾,冲毁堰、河坝及田坝多处。1991年特大洪灾,全年降雨量2 209.5 mm,是历年平均值的1.48倍。1999年洪灾,全年降雨量为1 645 mm,其中6月降雨量527.3 mm,大大超过多年平均降雨量,房屋、农田、桥梁、公路、河坝等设施遭受重创。此外还有1994年旱灾、2000年旱灾及2006年局部洪灾。显然,本文对黄尾河流域6年主周期丰枯转换特性的分析结果很好的表征了径流的周期性波动,具有重要的现实意义。黄尾河流域降水年际变化的幅度不一和年内分配的不均匀是造成径流丰枯转换、旱涝灾害频发的直接原因。此外山高河陡的地貌因素、生态失调的影响、工程抗灾能力较弱、人类活动的因素等亦是重要原因。

参考文献:

- [1] Novotny, E. V., Stefall, H. G. Stream flow in Minnesota: indicator of climate change [J]. Journal of Hydrology, 2007, 334: 319-333.
- [2] 岳西县地方志编纂委员会. 岳西县志(1978—2002) [M]. 合肥:黄山出版社, 2009.
- [3] Pradeep K, Naik, David A. Estimation of Columbia River virgin flow: 1879 to 1928 [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(9): 1807-1824.
- [4] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京:气象出版社, 2007.
- [5] 张学真, 刘燕. 灞河出山径流序列变化的小波分析 [J]. 水资源保护, 2006, 22(3): 12-15.
- [6] 刘力, 杨莉. 基于 Morlet 小波分析的风滩水库径流特性分析 [J]. 湖南电力, 2013, 33(3): 23-25, 28.
- [7] 刘俊萍, 田峰巍, 黄强, 等. 基于小波分析的黄河河川径流变化规律研究 [J]. 自然科学进展, 2003, 13(4): 383-387.
- [8] 张萍, 秦天玲, 冯婧, 等. 基于小波分析的宜昌水文站径流演变规律研究 [J]. 人民长江, 2011, 42(17): 24-27.
- [9] 丁相毅, 贾仰文, 王浩, 等. 气候变化对海河流域水资源的影响 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 604-613.
- [10] 李析男, 胡彩虹, 杨帆. 径流对气候变化响应的定量分析研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 62-66.