

南美洲巴拉那河流域水文气象要素演变特征 及径流变化的气候响应

宁忠瑞^{1,2,3}, 孙晋秋^{2,3,4}, 王国庆^{2,3,4}

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于1951–2014年巴拉那河流域月尺度降水、气温、径流3个要素的观测数据,运用线性回归与Mann–Kendall方法分析了序列的趋势性,运用小波方法分析了序列多时间尺度特征及气象因子与水文要素的内在联系。结果表明:在研究时段内,3个要素均有不同程度的增大趋势,气温与径流量显著上升,降水量不显著上升;在月尺度特征方面,3个要素均存在12个月左右的主周期,同时不同要素存在不同的次周期,其中气温存在微弱的6个月左右的次周期,月均降水量无明显次周期,径流量具有约36个月、48个月、64个月、100个月的次周期;在年尺度特征方面,3个要素均无明显主周期存在,降水量存在约3、4、8、10 a的次周期,气温无明显连续次周期,径流量的次周期特征与降水相似;交叉小波凝聚谱显示,巴拉那河流域月降水量的变化对径流量的影响远大于月均气温变化对其的影响;结合趋势性分析与小波分析可以清晰地了解流域内水文气象要素的变化规律与内在联系。

关键词: 气候变化; 径流变化; 趋势性分析; 小波分析; 巴拉那河流域

中图分类号:TV11

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)04-0052-08

Evolution characteristics of hydro-meteorological variables and runoff response to climate change in the Parana River Basin

NING Zhongrui^{1,2,3}, SUN Jinqiu^{2,3,4}, WANG Guoqing^{2,3,4}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the monthly precipitation, monthly mean air temperature and monthly mean runoff data of the Parana River Basin from 1951–2014, linear regression and Mann–Kendall method are adopted to analyze the tendency of time series, meanwhile, wavelet analysis is used to analyze the multi-time scale characteristics of time series and the inner link between meteorological factors and hydrological factors. The result suggested that during the study period, the three factors of precipitation, temperature and runoff all showed a rising trend to different degrees, the temperature and runoff increased significantly, whereas the precipitation increased insignificantly. On the monthly scale, the three factors all had a main cycle of about 12 months, however they all had different sub-cycles. Among them, air temperature had a weak sub-cycle of about 6 months, runoff had sub-cycles of about 36 months, 48 months, 64 months and 100 months, whereas monthly mean precipitation had no significant sub-cycle. On the annual scale, there was no significant main cycle for all three factors, but precipitation had three sub-cycles of about 3 a, 4 a, 8 a and 10 a, runoff had the same sub-cycles as the precipitation, temperature had no significant and continuous sub-cycle. Wavelet coherence spectrum results showed that monthly precipitation

收稿日期:2020-12-02; 修回日期:2021-04-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0601501)

作者简介:宁忠瑞(2000–),男,山东枣庄人,博士研究生,主要从事全球气候变化等方面的研究。

通讯作者:王国庆(1971–),男,山东成武人,博士,教授,博士生导师,主要从事气候变化和水资源评价等方面的研究。

had a greater impact on the runoff of the Parana River Basin than monthly mean air temperature. The approach combining trend analysis with wavelet analysis can be applied to the analysis of the change patterns of hydro-meteorological variables and their inner links on basin scale with satisfactory results.

Key words: climate change; runoff variation; trend analysis; wavelet analysis; Parana River Basin

1 研究背景

在全球气候变化的背景下,全球气象要素与水文过程已发生了不同程度的改变^[1-2]。气候变化影响了区域水文循环的速度,促使水资源在时空上的重新分配,部分地区的水资源问题可能会变得更加突出,特别是国际河流,其水资源分配与流域内国家资源主权、能源安全等密切相关。基于此,变化环境下的水文过程成为水科学研究的热点问题,受到各国学者的广泛关注^[3-6],从全球、区域、流域等不同尺度认识和掌握变化环境下的水文过程与水资源演变规律具有重要意义。

在对国际河流水资源问题的研究上,刘艳丽等^[7]创新性地解决了跨境流域水利益计算的难题,初步提出了基于水利益共享的水资源分配原则;岳伟鹏等^[8]研究了瓦赫什河上游源区气候要素与水文要素的演变规律。在气候变化对河川径流影响的研究上,张建云等^[9]通过分析青藏高原气候要素与河川径流量演变趋势,揭示了在全球气候变化背景下发源于青藏高原的五大江河的水资源量变化规律;王大伟等^[10]、陈亚宁等^[11]分别研究了克里雅河的径流变化及其对气候变化的响应特征与新疆整体水资源对气候变化的响应特征。

小波分析是研究水文气象要素时间序列在不同周期上的演变特征的一种常用方法^[12-13],刘友存等^[13]研究了乌鲁木齐河出山径流的多尺度特征;梁四海等^[14]研究了黄河源区径流量的周期变化特征;姜瑶等^[15]研究了在水文长序列分析中,小波方法与其他传统方法的性能对比。对于欧亚大陆以外,在流域尺度上分析气象要素的变化趋势及径流对于气候变化的响应特征的研究成果较少,而分析流域不同时间尺度上降水、气温与径流量相关关系的研究更为少见^[16]。因此本文选择位于南美洲的巴拉那河流域作为研究对象,进行了3个方面的研究:(1)运用线性回归分析法与Mann-Kendall趋势检验方法,分析巴拉那河流域月尺度的降水、气温、径流量的变化趋势;(2)运用流域内气象要素、水文要素变化的连续小波功率谱,分析要素变化的周期性规律;(3)根据流域月降水与月均径流量、月均气温与月

均径流量的交叉小波功率谱与交叉小波凝聚谱及其相位差,分析巴拉那河流域水资源变化与气象因子的联系,确定影响流域径流量变化的主要影响因子,为流域水资源管理与合理利用提供理论依据。

2 研究区概况

巴拉那河全长约4 880 km,流域面积 $260 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[17],是南美洲第二大河流。流域内降水资源丰富,多年平均降水量为1 234 mm,西部降水较少,东部降水较多。在地形上,巴拉那河流域内分布有高山、峡谷(瓜伊拉瀑布等)、平原、湖泊等多种地貌类型,地势西高东低。在气候区划上,流域北部为热带草原气候,南部为亚热带季风气候,西部部分地区为温带大陆性气候,气温略有四季分布特征但不明显。巴拉那河流量的主要来源是巴拉那河上游,占总水量的73%,而巴拉圭河则提供剩下的27%。巴拉那河流域及水文站位置如图1所示。

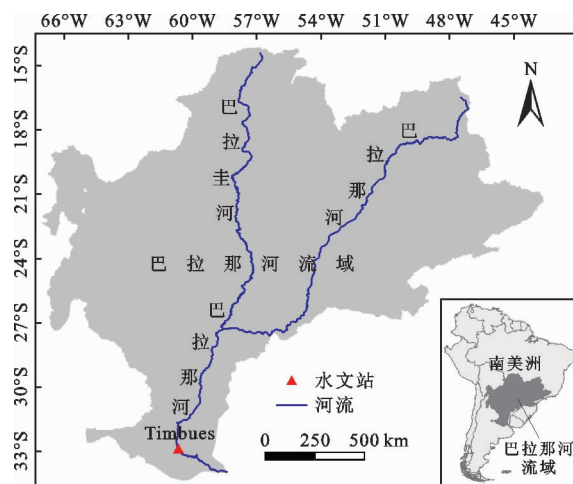


图1 巴拉那河流域及水文站位置示意图

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

本文使用的降水数据来源于全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre, GPCC, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcc.html>),时间序列为1891-2016年,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,数据格式为格点数据;地表气温来源于美国国

家海洋和大气管理局的气候预测中心 (Climate Prediction Center, CPC, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ghcncams.html>), 时间序列为 1948 - 2018 年, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 数据格式为格点数据; 降水与气温数据的研究时段均为 1948 - 2014 年。流量数据来源于全球径流数据中心 (Global Runoff Data Centre, GRDC)。本文选取了巴拉那河流域 1951 - 2014 年的月降水量、月均气温及 Timbues 水文站的同期径流序列进行分析。Timbues 水文站为巴拉那河干流上最后一个水文站, 水文站控制流域 2 350 000 km², 是该河干流上实测径流序列最长的水文站。

3.2 M-K 趋势检验

在研究流域 1951 - 2014 年水文气象因子的变化趋势时采用 Mann - Kendall (M - K) 检验方法。M - K 检验是一种非参数统计方法, 用于检验序列随时间的变化趋势^[18-19]。该方法无要求数据服从特定分布方式, 对随机且非正态分布的水文、气象数据检验的效果较好^[20-23]。通过对数据序列进行计算得到 M - K 检验统计值 Z , 当 Z 为正值时, 表明数据序列呈上升趋势, 反之则为下降趋势; 当 $1.96 < |Z| \leq 2.58$ 时, 表明数据序列在 0.05 的置信水平上变化显著; 当 $|Z| > 2.58$ 时, 表明数据序列在 0.01 的置信水平上变化显著。

3.3 小波分析

3.3.1 连续小波变换 连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 可以用来揭示信号中的周期特征, 并以此判断其未来的发展趋势^[24]。传统的在频域监测周期的数学方法如傅里叶变换, 都假定了周期特征在时间序列上是连续、平稳的, 而小波分析将时间序列扩展到时频空间, 因此可以找到间歇性的局部周期。在地理科学时间序列中, 复 Morlet 小波函数常被用作基函数进行小波变换^[25]。

对于已知水文气象要素长时间序列与 Morlet 小波, 其连续小波变换为:

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

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为时间尺度, 反映序列的周期长度; b 为时间变化; a 与 b 均为无量纲数。

小波变换系数实部等值线可以反映出水文气象序列在不同时间尺度下的周期变化特征^[26]。实部系数为正时表示序列为上升阶段, 系数为负时表示序列处于下降阶段, 等值线越密集表示信号越强。

3.3.2 交叉小波变换 交叉小波变换 (cross wavelet transform, XWT) 功率谱可以显示两个时间序列在多个时间尺度下高能量区的相关关系。

对于两个时间序列 X 和 Y , 其交叉小波功率谱为:

$$W_{XY}(a, \tau) = C_X(a, \tau) C_Y^*(a, \tau) \quad (2)$$

式中: $W_{XY}(a, \tau)$ 为交叉小波功率谱; $C_X(a, \tau)$ 为尺度伸缩系数 a 和时间平移参数 τ 下的小波变换系数; $C_Y^*(a, \tau)$ 为序列 $Y(t)$ 小波变换系数的复共轭。

两时间序列在低频区的相关关系可利用交叉小波凝聚 (wavelet coherence, WTC) 谱更好地表示^[21]:

$$R^2(a, \tau) = \frac{|S[a^{-1}W_{XY}(a, \tau)]|^2}{S[a^{-1}W_X(a, \tau)]S[a^{-1}W_Y(a, \tau)]} \quad (3)$$

式中: S 为平滑算子。

在交叉小波图谱中, 较粗的黑色轮廓线表示红噪声通过了置信水平为 0.05 的红噪声检验, 而边缘效应会使图像变形的影响锥 (channel of interest, COI) 显示为浅色阴影。

4 结果与分析

4.1 水文气候要素演变特征

图 2、3 分别为巴拉那河流域 1951 - 2014 年 3 个主要水文气候要素降水量、径流量、气温的演变过程及年内分配情况。

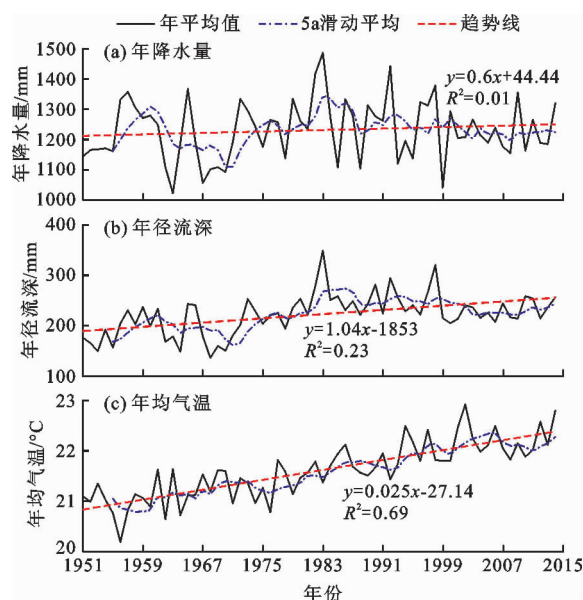


图 2 1951 - 2014 年巴拉那河流域 3 个主要水文气候要素演变过程

由图 2、3 可知, 巴拉那河流域多年平均降水量为 1 234 mm, 降水的年内分配很不均匀, 夏季降水占年降水量的 85% 以上; 降水的年际变化较大, 在 1 022 ~ 1 486 mm 之间波动, 最小年降水量发生在

1963 年,最大年降水量发生在 1983 年。从多年趋势来看,巴拉那河流域的年降水量呈微弱增大趋势,变化速率为 6 mm/10a;5 a 滑动平均序列显示出,流域内年降水量在 1965 – 1975 年呈现略微的减少趋势,1975 – 1995 年呈略微增大趋势,1995 – 2014 年再次体现为减少趋势。

流域多年平均气温为 21.6 ℃。从气温数据 5 a 滑动平均序列来看,1951 – 2014 年巴拉那河流域年平均气温呈现出波动上升现象,平均上升速率为 0.25 ℃/10a,这与联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 报告中所提到的“全球变暖成为无法改变的趋势”^[1]相一致,流域气温上升速率与南美洲整体

气温变化速率 0.2 ℃/10a 大致相同,但与全球平均陆地气温变化速率 0.13 ℃/10a 相比而言,流域温度增幅偏高^[27]。

流域多年平均径流深为 201 mm,最大年平均径流深为 1983 年的 348 mm,最小年平均径流深为 1968 年的 136 mm;从径流的 5 a 滑动平均序列可看出,径流量在 1963 – 1975 年呈现减小趋势,1975 – 2001 年呈增大趋势,2001 – 2014 年再次体现为减小趋势,与流域内年降水量的变化趋势大体相同。分析表明,巴拉那河流域年径流量总体呈现略微上升趋势,平均上升速率为 10.4 mm/10a。

采用 M – K 趋势检验分析流域内主要气象要素与径流深演变趋势结果如表 1 所示。

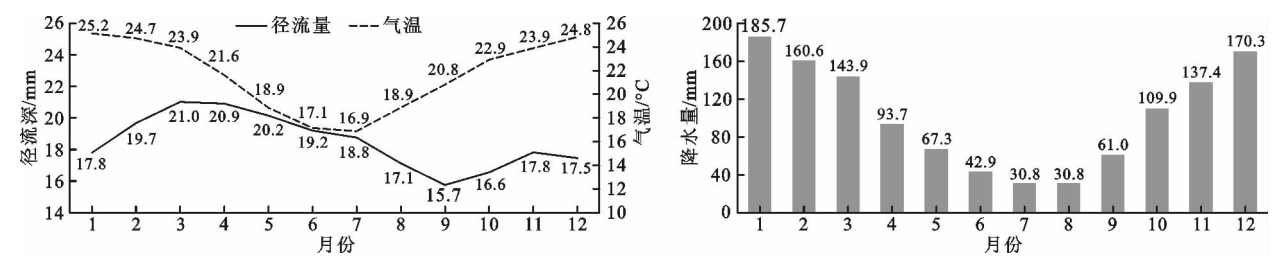


图3 巴拉那河流域降水量、径流量、气温年内分布

表 1 巴拉那河流域各主要水文气候要素 M – K 检验及变化趋势

时段	降水量			气温			径流深		
	变化率/ (mm · (10a) ⁻¹)	Z 值	趋势	变化率/ (℃ · (10a) ⁻¹)	Z 值	趋势	变化率/ (mm · (10a) ⁻¹)	Z 值	趋势
春季	1.61	0.31	增大	0.27	7.23 **	上升	13.1	4.11 **	增大
夏季	4.75	1.71	增大	0.21	6.98 **	上升	7.4	2.39 *	增大
秋季	2.05	0.21	增大	0.28	5.77 **	上升	8.3	2.28 *	增大
冬季	-0.12	0.03	增大	0.24	4.47 **	上升	13.3	3.78 **	增大
全年	6.00	1.27	增大	0.25	8.08 **	上升	10.5	3.95 **	增大

注:“*”代表趋势检验结果通过 0.05 置信水平的显著性检验,“**”代表趋势检验结果通过 0.01 置信水平的显著性检验。

由表 1 可知,巴拉那河流域年均降水量呈增大趋势,但 $Z < 1.96$,为不显著增大趋势,同时四季降水量均为不显著增大趋势。值得注意的是在冬季,降水量趋势性检验结果 Z 值为正,表明降水量呈增大趋势,但降水量的平均变化率为 $-0.12 \text{ mm}/10\text{a}$,即降水量的线性拟合趋势为负,这说明流域冬季降水量的增大或减小趋势不明显,同时不同的趋势判断方法得到的结果不同。姜瑶等^[15]的研究表明,相对于线性回归法,M – K 法受序列异常值影响较小,性能较优,且线性回归法仅适用于趋势单调且无明显周期波动的时间序列。因此本文采用 M – K 检验结果,认为巴拉那河流域冬季降水量呈现波动性增

大趋势;流域年平均气温与四季平均气温均呈非常显著的上升趋势, Z 值通过 0.01 置信水平的显著性检验;流域年均径流量呈现非常显著的上升趋势,且相对于夏、秋两季,冬、春两季上升趋势更为显著,表明该流域径流量在季节尺度上的演变趋势较为明显,径流量的年内分配趋于不均匀。

4.2 小波变换分析

图 4(a)为巴拉那河流域 1951 – 2014 年间月降水量的小波功率谱。功率谱的谱值越高,表示震荡量越强,表明该周期通过置信度检验越显著。由图 4(a)可看出,月降水量的变化存在着 12 个月左右的主周期,无显著次周期存在,体现了月降水量显著的、全局性

的周期变化特征。由于水文气象数据在 12 个月左右的主周期的显著特征掩盖了其在其他时间尺度上的周期特征,本文同时根据流域年尺度的降水数据计算其小波功率谱,如图 4(b)所示。由图 4(b)可看出,巴拉那河流域的年降水量无明显主周期存在,但存在 4 个显著性不同的次周期:(1)3 a 左右(1982–1985 年)的次周期;(2)4 a 左右(1962–1966 年)的次周期;(3)8 a 左右(1962–1970 年)的次周期;(4)10 a 左右(1976–1986 年)的次周期。

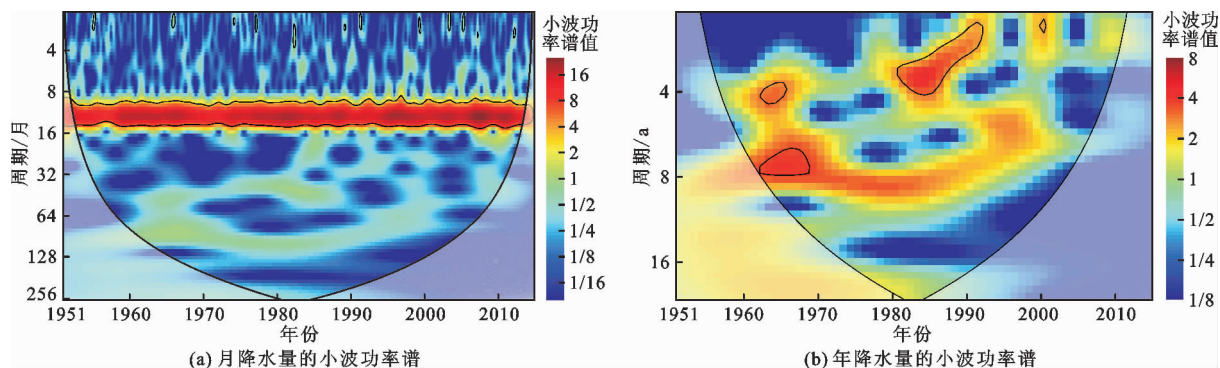


图 4 1951–2014 年巴拉那河流域降水量连续小波功率谱

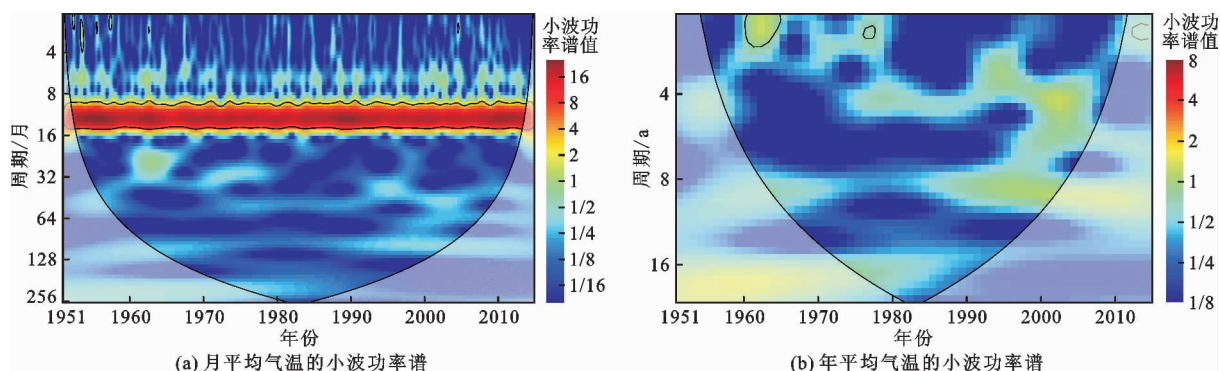


图 5 1951–2014 年巴拉那河流域气温连续小波功率谱

图 6 为 Timbues 水文站 1951–2014 年间月径流量和年径流量的小波功率谱。由图 6(a)可看出: Timbues 水文站的径流量序列存在显著的、全局的 12 个月左右的主周期;序列显示出 4 个显著性不同的次周期,分别为:(1)36 个月左右(1978–1985 年)的次周期,但其显著性在不同时域内表现出一定的差异;(2)48 个月左右(1963–1969 年)的次周期;(3)64 个月左右(1995–2002 年)的次周期;(4)100 个月左右(1956–1985 年)的次周期。图 6(b)所显示出的年径流量周期变化特征与年尺度降水量的次周期特征相似,存在 3 a 左右(1982–1985 年)、5 a 左右(1995–2000 年)、8 a 左右(1956–1986 年)的次周期。

4.3 气象要素与径流的交叉小波分析

交叉小波功率谱可以展示两个要素在不同时域

图 5 为巴拉那河流域 1951–2014 年间月平均气温和年平均气温的小波功率谱。由图 5(a)可看出,与月降水量的小波功率谱相似,月气温的变化同样显示出了 12 个月左右的主周期;同时,月气温的变化还存在着 6 个月左右的次周期,但该周期特征在不同时间域内的显著性存在差异。由图 5(b)可看出,年尺度的气温变化存在 2 个显著性较高的次周期,分别为:(1)4 a 左右(2000–2004 年)的次周期;(2)10 a 左右(1994–2014 年)的次周期。

和频域的相关关系,解释气象要素变化对径流量变化在不同周期尺度上的影响特征。本节分别对巴拉那河流域的月降水量和月气温与 Timbues 水文站的月径流量序列进行交叉小波分析。

4.3.1 月降水量与月径流量交叉小波分析 图 7 为 1951–2014 年巴拉那河流域的月降水量与 Timbues 水文站月径流量的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱。

由图 7(a)可以看出:(1)降水量与径流量二者相关关系最强的特征区域在 1951–2014 年的 8~16 个月的主周期上,该周期关系在时域内也具有较强全局特征,表明在 8~16 个月的主周期上,降水量和径流量存在显著的相关关系;(2)二者的相互作用关系还呈现出 4 个显著性不同的次周期,分别为:① 40 个月左右(1977–1985 年)的次周期;② 48 个

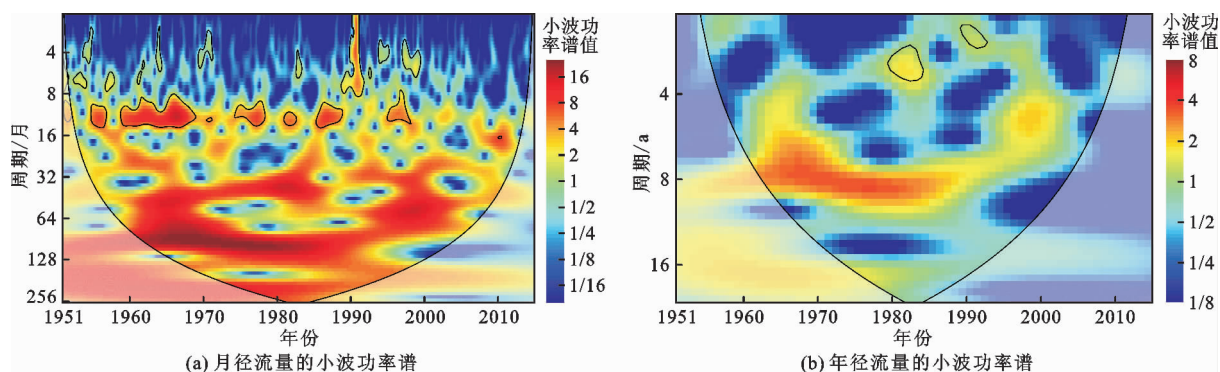
月左右(1962–1968年)的次周期;③72个月左右(1995–2001年)的次周期;④100个月左右(1951–1988年)的次周期;(3)除12个月左右的主周期外,在较大尺度的周期震荡上,周期信号强弱的分布具有明显的局部特征。

由图7(b)中可以看出:(1)月降水量与月径流量存在较好的相关性,在时间频域空间(1951–2014年)存在100个月左右的主周期,几乎穿越整个影响锥的区域,且周期尺度非常宽,表明周期趋于稳定,大周期尺度的月降水变化对月径流量的影响正在加大;(2)在1951–2014年存在1个12个月左右

的次周期,但该周期在1989–1993年和2010–2012年出现了中断;(3)在整个时域上零星分布着10个显示出6个月左右周期的高能量区,各高能量区的相位特性各不相同,出现正、负、正等交错现象,说明该尺度上的月降水量变化对月径流量的变化也有一定的调节作用;(4)各尺度周期小波相关系数较高,且除6个月的周期外,其余周期的相位均呈现正相位,说明降水对径流量的影响是持续、稳定的。

4.3.2 月均气温与月均径流量的交叉小波分析

图8给出了1951–2014年巴拉那河流域月气温与月均径流量的交叉小波功率谱和交叉小波凝聚谱。



注:小波功率谱外圈细线表示 COI

图6 1951–2014年巴拉那河流域 Timbues 水文站径流量连续小波功率谱

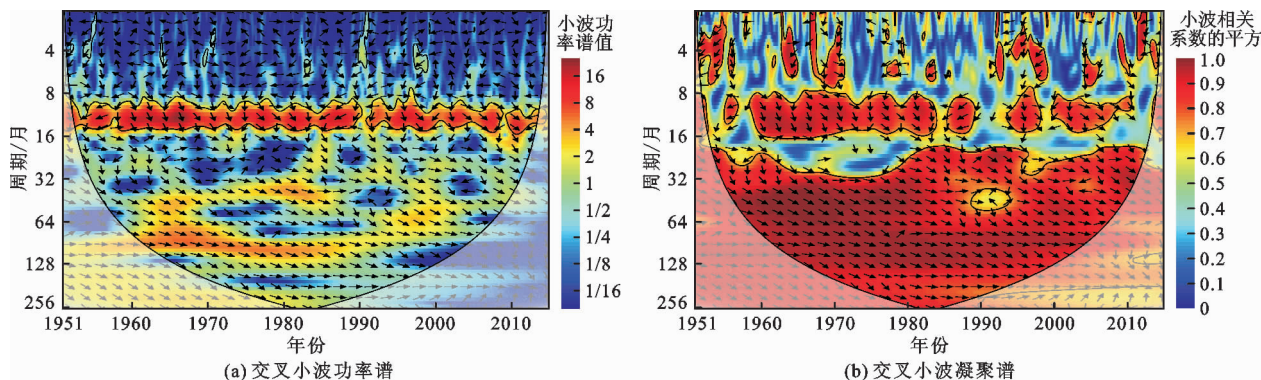


图7 1951–2014年巴拉那河流域月降水量与月径流量的交叉小波图谱

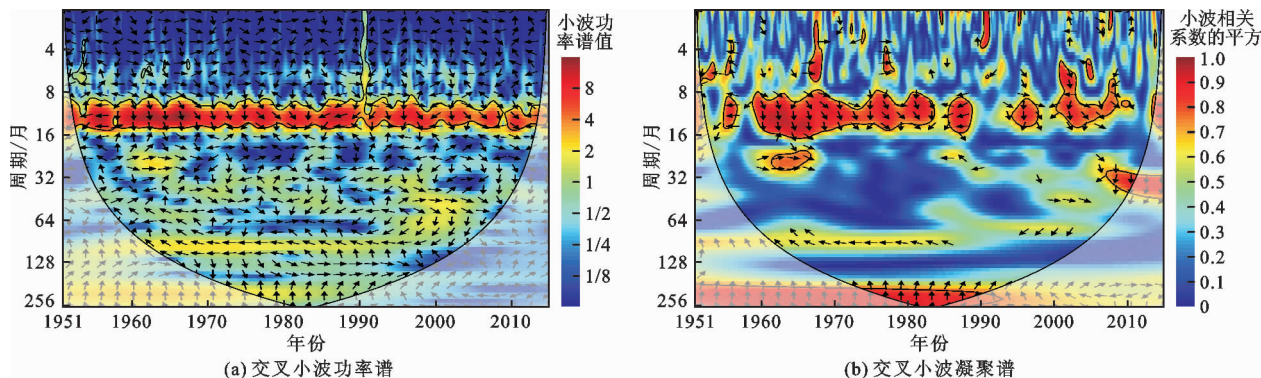


图8 1951–2014年巴拉那河流域月气温与月径流量的交叉小波图谱

由图 8 (a) 可看出: (1) 气温与径流量的相关关系存在 12 个月左右的主周期, 在该周期上二者显著相关; (2) 二者的相互作用关系还呈现出 3 个显著性不同的次周期, 分别为: ① 24 个月左右 (1961 - 1965 年) 的次周期; ② 48 个月左右 (1997 - 2005 年) 的次周期; ③ 100 个月左右 (1955 - 1980 年) 的次周期; (3) 3 个次周期的能量强度都不高, 表明较大尺度周期的气温变化对月均径流量的影响相对于 12 个月的主周期较小。以上结果说明, 径流变化对气温变化的响应在不同时域内的尺度不同, 中小尺度的气温变化对径流量变化的影响较为明显。

由图 8 (b) 可看出: 在 12 个月尺度的主周期上, 1960 - 1985 年间月气温与月径流量的相位存在微弱的正相关, 1985 - 2006 年两者的相位则为负相关 - 正相关 - 负相关交替变化, 表明在该尺度上, 气温变化对径流量的影响较小, 且气温波动对径流的影响呈非显著正相关。对比两幅交叉小波图谱可知, 除贯穿整个时域的 12 个月的主周期外, 其余高能量区所表示出的次周期大体相同, 表明该流域的径流量变化受某一主要要素的主导, 其余要素对径流量变化的影响较小。

4.4 讨论

气候变化对流域径流量产生影响, 了解流域水文气象要素的演变特征, 分析径流量变化对气候要素变化的响应对流域水资源管理预测非常重要。在研究中发现, 气温波动对径流的影响呈非显著正相关, 二者小波功率谱相位在 12 个月周期上呈现出负相关 - 正相关 - 负相关交替变化。一方面, 由巴拉那河流域地形分布可知, 该流域只有西部小部分为山区, 大部分地区为平原区, 说明该河流受融雪径流补给较少, 降水补给较多, 气温升高引起融雪增加; 另一方面, 气温升高可能引起流域内蒸散发量增加, 对河流的补给减少。二者综合影响, 当融雪径流增加量大于流域内蒸散发增加量时, 月气温与月径流量的相位表现为正相关, 反之则为负相关。

继续根据上述分析可知, 二者的相关关系在各主要周期范围内均表现出较强的正相位, 说明在各个时间尺度上流域径流量对降水量变化的响应较为强烈。这是由于巴拉那河流域平原地区较多, 山丘地区较少, 由于气温升高引起的融雪径流增加与流域蒸散发量增加相互抵消, 但降水因地表汇流对河流可以形成有效的补给。

结合小波分析结果与图 2 显示出的水文气象因子时间序列结果可看出, 降水量和径流量 1963 -

1975 年左右与 2001 - 2014 年左右为减小趋势 (5 a 滑动平均线低于趋势线), 1975 - 2001 年左右为增大趋势, 总体呈现减小 - 增大 - 减小的规律, 与小波功率谱显示出的周期特征与起止年份相似。分析研究发现, 巴拉那河流域在 20 世纪 60 年代开始进行全面的水资源调查, 1975 年左右开始进行了大量的水资源开发, 著名的伊泰普水电站即为其中之一。梁忠民等^[28]提出, 流域水资源开发工程建设会改变流域的下垫面特征, 使其由原本的草地、林地变为湖库、水面。下垫面的变化使流域蒸散发特征由土壤蒸发、植物散发为主导变为水面蒸发, 加大了流域的蒸散发量。蓄水工程的建设会使流域的汇流时间缩短, 洪峰流量增加, 峰现时间提前。同时人类社会的不断发展, 尤其是工农业需水量的增加, 使得河流引水量大量增加^[29], 此即解释了径流量的演变趋势在 1975 年前后由降转升, 在 2000 年前后由升转降的现象。

5 结论

(1) 巴拉那河流域降水量、径流量和气温在 1951 - 2014 年期间均呈现上升趋势, 其中气温上升与径流量增大趋势显著, 降水量增大趋势不显著。流域气温平均上升幅度高于全球陆地平均气温变化速率, 与南美洲平均气温变化速率大致相同。

(2) 在月尺度上, 降水量、径流量和气温均存在 12 个月左右的主周期, 且周期变化具有显著的全局性特征; 此外, 气温存在微弱的 6 个月左右的次周期, 降水量无明显次周期, 径流量具有 36 个月左右、48 个月左右、64 个月左右、100 个月左右的次周期; 在年尺度特征方面, 3 个要素均无明显主周期存在, 降水存在 3、4、8、10 a 左右的次周期, 气温无明显连续周期, 径流量的次周期特征与降水相似。

(3) 巴拉那河流域径流量受降水量和气温等共同作用, 但降水量对径流量的影响程度大于气温对径流量的影响程度, 降水量变化是影响流域径流量变化的主要因素。

参考文献:

- [1] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779 - 790.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 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: 303–309.
- [4] PIAO Shilong, CIAIS P, HUANG Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467: 43–51.
- [5] 鲍振鑫,严小林,王国庆,等. 1956–2016年黄河流域河川径流演变规律[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 52–57.
- [6] 王国庆,乔翠平,刘铭璐,等. 气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析[J]. *水利水运工程学报*, 2020(2): 1–8.
- [7] 刘艳丽,孙周亮,刘冀,等. 澜沧江–湄公河流域可分配水量计算与水利共享[J]. *人民长江*, 2020, 51(8): 111–117.
- [8] 岳伟鹏,张合理,陈峰,等. 中亚瓦赫什河上游源区气候水文要素演变特征[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 57–64.
- [9] 张建云,刘九夫,金君良,等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1264–1273.
- [10] 王大伟,师庆东,董弟文,等. 新疆克里雅河径流量变化的气候响应[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1271–1279.
- [11] 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.
- [12] HAO Yonghong, LIU Guoliang, LI Huamin, et al. Investigation of karstic hydrological processes of Niangziguan Springs (north China) using wavelet analysis[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(20): 3062–3069.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 姜瑶,徐宗学,王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. *水利学报*, 2020, 51(7): 845–857.
- [16] LABAT D, ESPINOZA J C, RONCHAIL J, et al. Fluctuations in the monthly discharge of Guyana Shield rivers, related to Pacific and Atlantic climate variability[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57(6): 1081–1091.
- [17] CAMPODONICO V A, GARCÍA M G, PASQUINI A I. The geochemical signature of suspended sediments in the Parana River Basin: Implications for provenance, weathering and sedimentary recycling[J]. *Catena*, 2016, 143: 201–214.
- [18] 鲁菁,张玉虎,高峰,等. 近40年三江平原极端降水时空变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 272–282.
- [19] 岳永杰,乌云珠拉,李旭,等. 根河流域1980–2017年气候和径流的变化特征分析[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(4): 96–105.
- [20] 张建云,王国庆,金君良,等. 1956–2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153–161.
- [21] 谈晓珊,王婕,唐雄朋,等. 1960–2012年澜沧江–湄公河流域气候变化趋势及不同区间的径流响应[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 1–8.
- [22] 王国庆,张建云,管晓祥,等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 313–323.
- [23] 王乐扬,李清洲,王金星,等. 变化环境下近60年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 36–42.
- [24] 黄坤,马龙,吉力力·阿不都外力. 基于小波分析的巴尔喀什湖水位变化特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(3): 570–579.
- [25] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(5/6): 561–566.
- [26] HOU Ying, ZHENG Fang, SHAO Yi. The multi-timescale climate change and its impact on runoff based on cross-wavelet transformation[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2016, 52(6): 564–571.
- [27] SUN Qiaohong, MIAO Chiyuan, DUAN Qingyun, et al. A Review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(1): 79–107.
- [28] 梁忠民,李国芳,王军. *水文分析与计算*[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.
- [29] TOMANIK E, PAIOLA L, MARTÍNEZ – FERNÁNDEZ J, et al. Environmental changes and human work in the region of the upper Paraná River floodplain: Processes and interactions[J]. *Brazilian Journal of Biology*, 2009, 69(2 suppl): 583–589.