

西江流域径流与气象要素多时间尺度关联性研究

董林垚^{1,2}, 陈建耀¹, 付丛生^{1,3}, 蒋华波¹, 杨雪韵¹

(1. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275; 2. 熊本大学水文研究实验室, 日本 熊本 8608555;
3. 尼伯斯大学地理学院, 加拿大 安大略 P1B8L7)

摘要: 使用水文统计和交叉小波方法对西江流域1961~2005年径流变化特征及其与气象要素的多时间尺度的关联性进行分析。结果表明, 径流量总体呈现减少的变化趋势, 可能是人类活动引起流域内蒸发和入渗增加, 使径流对降水的响应减弱造成的, 径流丰枯变化基本与降水的波动相一致。气温对径流的显著作用主要集中在1990~2000年3~5 a周期上, 径流对气温变化的响应时间为6~12个月; 降水与径流在大部分时频域中呈同相相位变化, 其相互作用主要集中在1992~2003年3~4 a和1980~2000年11~12 a周期上; 大气环流变化对径流的影响主要集中在1965~1975年2~3 a及1993~2000年3~5 a周期上, 对径流的影响可能是通过对区域降水影响实现的, 径流对前一次环流变异响应时间为6~12个月, 对后一次响应时间较快, 时间的差异可能是下垫面的改变引起流域产汇流机制变化造成的。

关键词: 径流; 气象要素; 交叉小波; EOF; 西江流域

中图分类号: TV121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2013)02-0209-07

径流量的影响因素可概括为气候因素、下垫面状况及人类活动^[1-3], 气候因素包括降水、蒸发和气温等; 下垫面状况包括流域地形、地质和植被状况等。近年来, 随着人类活动影响日渐显著和气候变化逐渐加剧, 人类活动和气候变化对径流规律的影响引起国内外水文学家的关注^[4-10]。对径流的变化特征及其与各因素间的关联作用研究可利用交叉谱分析和小波变换等数理统计方法^[11-14]。交叉谱分析是基于Fourier的变换技术, 从频率域上考察两序列的耦合震荡, 可以反映在时间尺度上径流与影响因素的关联。近年兴起的小波变换虽同时具有时、频域分辨能力, 但其作用对象是单一序列, 仅能反映径流在不同时频域上变化规律, 无法反映其他因素对其影响。基于上述原因, 本文尝试使用交叉小波方法分析西江流域径流与气象因素在多时间尺度上的关联作用。

交叉小波分析是一种将交叉谱分析与小波变换相结合的新技术, 它能更好地揭示两序列在时频域上的变化特征和耦合振荡。交叉小波变换在

气候诊断中已有较成熟应用^[15-17], 它能揭示气候变化与大气环流系统之间的作用, 不仅弥补了交叉谱分析的缺陷, 而且发挥了小波变换在时频两域都具有表征信号局部特征的作用。近年来, 已有学者^[18-21]将交叉小波运用于径流影响因素和变化机制研究中。相关研究使用多站点平均^[15]或代表站点法^[17]来提取气象因素的主要时间变化特征。气象因素时空变化特征研究^[22-24]一般使用经验正交函数法(EOF)来提取变化特征。本文的研究将交叉小波分析与EOF变换相结合, 尝试使用EOF方法提取西江流域气温和降水的主要时间变化特征, 使用交叉小波分析西江流域1961~2005年径流与降水、气温及NINO 3区季风环流多时间尺度上的相关作用, 探究径流的变化规律和影响机制。

1 数据与方法

1.1 数据来源

西江是珠江主干流, 发源于云南马雄山, 流经

收稿日期: 2012-01-09; **修订日期:** 2012-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(40571027)、广东省自然科学基金(9251027501000021)、广东水利科技创新与推广项目(2009-2011)、中国气象局气候变化子项目(2009-2010)资助。

作者简介: 董林垚(1987-), 男, 湖北襄阳人, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: donglinyao1987@yahoo.com.cn

通讯作者: 陈建耀, 教授, 博士生导师。E-mail: chenjiyao@mail.sysu.edu.cn

贵州、广西,在广东思贤滘与北江汇合,河长 2 074.8 km,流域面积达 $35.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均年径流量为 $2 277 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。流域出口径流控制站为思贤滘附近的马口水文站,流域内气象站点共 92 个,日常监测项目包括气温,降水,蒸发和太阳辐射等。流域水系及气象、水文站分布见图 1。马口水文站 1961 年 1 月至 2005 年 12 月径流量及流域内 92 个气象站点 1961 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日降水和气温数据由中国气象局气候变化子项目“气候变化对华南水资源的影响评估”(2009~2010)提供;NINO 3 区($5^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}$, $90^\circ\text{W} \sim 150^\circ\text{W}$)海表水温(SST)数据来源于 National Weather Service Climate Prediction Center (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>),包括 1961 年 1 月至 2005 年 12 月共 540 个月海表水温数据。

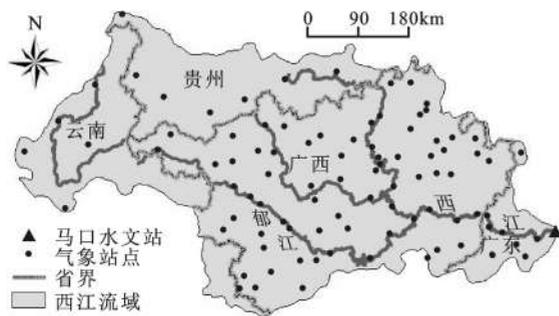


图 1 西江流域示意图

Fig.1 Schematic map of the Xijiang River basin

1.2 研究方法

EOF 也称为主成分分析(PCA),是一种分析数据结构,提取数据主要特征的方法。地学中主成分对应的时间变化(也称时间系数)来表征向量场的时间变化特征。本文使用 EOF 方法^[25,26]提取西江流域降水和气温主要模态的时间系数,用来表征研究区域降水和气温的主要时间变化特征。交叉小波变换主要包括小波能量谱、凝聚谱和位相谱的计算。小波能量谱是用来揭示两序列在不同时频域上相互作用显著性的工具;凝聚谱能够揭示两序列之间的相关性相对频率的依赖关系及其在时域中的变化,表明在不同频率上两者之间的线性相关的程度和信号随时间变动情况;位相谱则反映两序列在不同时频域的滞后时间特征。计算原理^[14,15,27,28]如下(分析中选用 Morlet 小波):

Morlet 小波连续小波:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{i\omega_0 \frac{x-b}{a}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-b}{a} \right)^2} dx, \quad (1)$$

式(1)中, ω_0 为常数, $i = \sqrt{-1}$ 。基于上述变换,两序列 f 与 g 的交叉小波变换定义为:

$$W_{f-g}(a, b) = W_f(a, b) W_f^*(a, b), \quad (2)$$

式(2)中, $W_f^*(a, b)$ 表示复数 $W_f(a, b)$ 的共轭复数。两序列 f 与 g 的交叉凝聚谱定义为:

$$R_n^2(a, b) = \frac{|S(a^{-1} W_{f-g}(a, b))|^2}{S(a^{-1} |W_f(a, b)|^2) S(a^{-1} |W_g(a, b)|^2)}, \quad (3)$$

式(3)中, $| \cdot |$ 表示对复数求模; S 表示对小波系数进行平滑计算,其定义如下:

$$S(W) = S_{\text{scale}}(S_{\text{time}}(W)), \quad (4)$$

$$S_{\text{time}}(W)|_s = (W_n(s) \cdot c_1 \frac{t^2}{2s^2})|_s \quad (5)$$

$$S_{\text{scale}}(W)|_s = [W_n(s) \cdot c_2 \Pi(0.6 \text{ sec})]|_n \quad (6)$$

式(4)~(6)中, c_1 和 c_2 表示标准化常数; Π 表示矩形窗滤波器。按照式(7)给出信度 α 条件下交叉小波凝聚谱的临界值:

$$\gamma_c^2 = 1 - \alpha^{\frac{1}{\nu-1}} \quad (7)$$

式(7)中, ν 为自由度,由序列长度和时间后移确定。同时,交叉相位谱可以表示为:

$$\theta_{f,g} = \arctan\left(\frac{\text{imag}(\langle s^{-1} C_{f,g} \rangle)}{\text{real}(\langle s^{-1} C_{f,g} \rangle)}\right) \quad (8)$$

式中: imag 表示复数的虚部; real 表示实部。

2 水文气象要素变化特征分析

2.1 水文气象要素变化趋势分析

考虑序列完整性及气候分区方法^[25],选取研究区域 70 个站点气温和降水距平数据进行 EOF 计算,气温与降水前 5 个主成分的特征值及方差贡献率见表 1。结果表明气温与降水的第一模态时间系数(贡献率分别达到 45.9% 和 43.51%)能较好的表征研究区域内气温和降水的主要时间变化特征。气温第一模态时间系数(图 2)显示西江流域气温呈高低交替并逐渐上升的变化。时间系数线性拟合表明: 1961~2005 年,气温以每年 0.865°C 的速率增长。降水第一模态时间系数(图 2)表明西江流域降水呈周期波动,总体并未呈现明显的增加或减少趋势。降水时间系数的五年滑动平均值变化情况表明 1961~1982 年降水量变化较平缓, 1982~1992 年呈总体偏低, 1992~2002 年呈总体偏高情形。

表1 气温与降水前5个主成分特征值及方差贡献率

Table 1 The eigenvalues and variance contributions of the five main components of temperature and precipitation

主成分	1	2	3	4	5
气温特征值	5.288	0.688	0.474	0.427	0.376
气温贡献率(%)	45.90	5.97	4.11	3.71	3.19
降水特征值	1211489.0	280937.7	178873.2	124595.3	99256.2
降水贡献率(%)	43.51	10.09	6.42	4.48	3.56

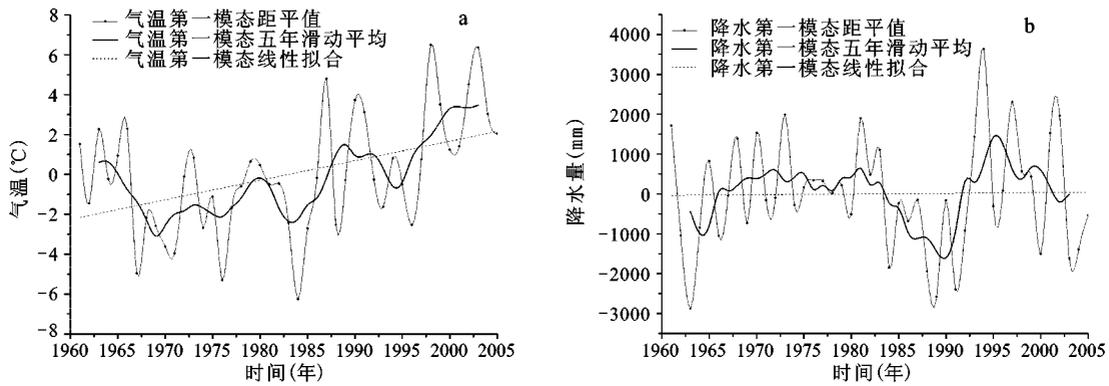


图2 气温(a)与降水(b)EOF第一模态时间系数

Fig.2 The time coefficients of temperature(a) and precipitation(b) in the first mode of EOF

以年代为时间尺度对气温、降水和径流进行统计(图3)。气温总体呈增长趋势,20世纪80年代以来,趋势较明显。径流总体呈降低的变化趋势,气温的升高引起流域内蒸发量增加可能是造成径流减少的因素之一。西江流域在20世纪80和90年代处于平水期,60和70年代处于丰水期,2000年后处于枯水年。区域内降水则呈现70和90年代偏多,其他年代偏少的规律。

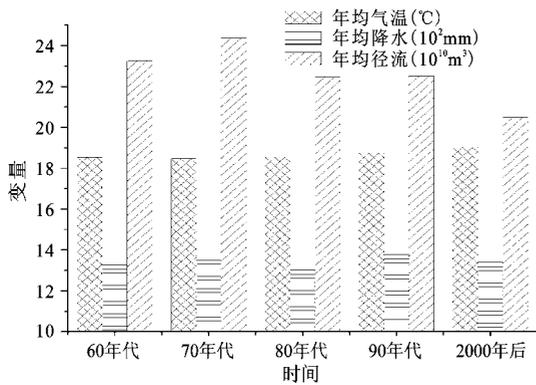


图3 西江流域年均气温、降水和径流量年代变化

Fig.3 The values of annual air temperature, precipitation and runoff in the Xijiang River basin in different decades

2.2 径流量变化特征分析

西江流域年均径流变化(图4a)表明西江流域

年径流量总体呈现下降的趋势,线性拟合结果表明年径流量以每年 $6.70 \times 10^9 \text{m}^3$ 的速率递减。1961~2005年的年最大径流量为 $3\ 158.86 \times 10^9 \text{m}^3$ (1974年),年最小径流量为 $1\ 211.98 \times 10^9 \text{m}^3$ (1963年)。1983~1993年,西江处于丰水期;1993~2001年,处于枯水期。年径流量的丰枯变化与降水的波动情况基本一致,径流与降水的相关系数计算结果为0.829,说明降水对径流的影响作用较强。西江流域的年径流量呈周期波动,为了研究径流量在不同时频域的变化规律,对西江流域年径流量进行小波功率谱计算,结果见图4b(粗线表示信度为95%红噪声检验,细线表示小波影响锥)。

小波变换结果显示西江径流呈2~4 a以及11~12 a周期变化,1960~1975年,2~4 a周期变化显著;1985~1998年,11~12 a周期变化较显著。姜世中和梁川^[29]通过降水和植被变化对龙川江径流量影响分析发现:径流变化中的高频震荡反映了总径流中来自于地面径流的周期变化;低频振荡反映的是来自于土壤中水径流和裂隙中的地下水径流的周期变化。西江流域从20世纪60年代开始大规模修建堤坝与水库,到80年代逐渐稳定,工程建设改变了地表径流的产汇流过程,因此在1960~1975年间径流变化显示高频振荡。同时,径流的周期变化可能与太阳黑子活动相关,美国国

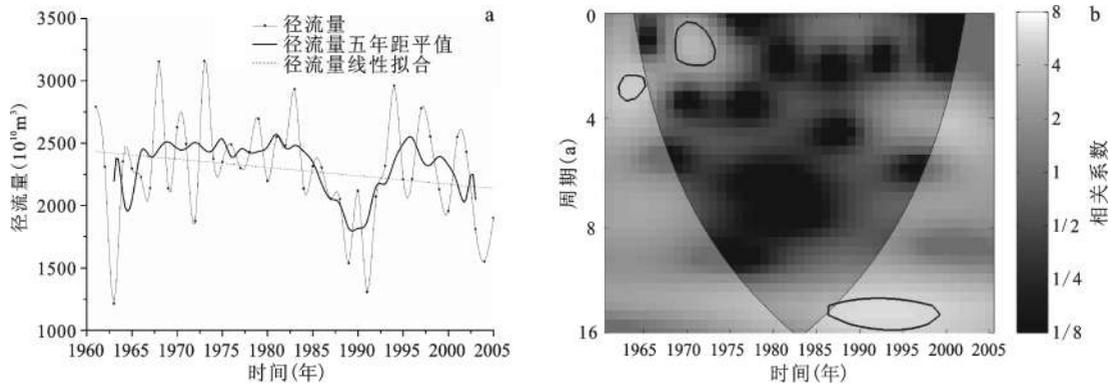


图 4 西江年径流量(a)及小波功率谱(b)

Fig.4 The values (a)and wavelet power spectrum (b)of annual runoff in the Xijiang River

家地球物理数据中心(NGDC)发布的1961~2005年月均太阳黑子相对数显示1988~1998年为太阳黑子运动最活跃的时期,天体异常活动可能通过对区域气象因素的影响来实现对径流的影响^[11,30]。

3 区域气象要素与径流多时间尺度关联性分析

3.1 气温与径流多时间尺度关联性分析

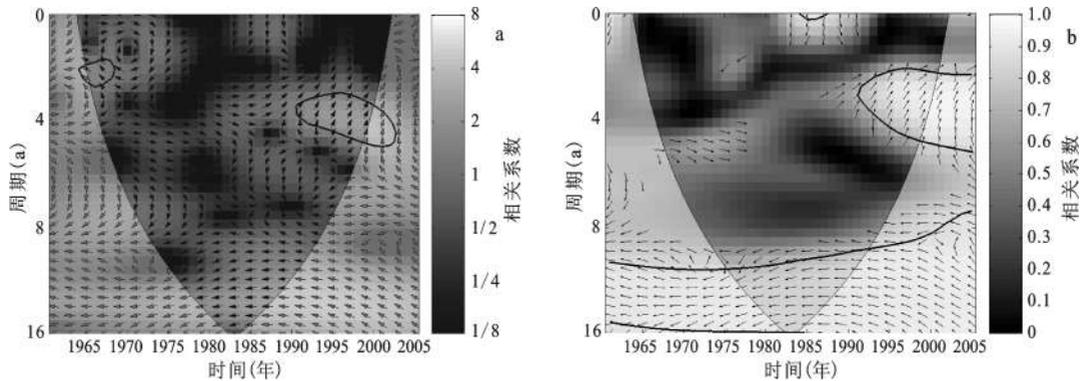
为了研究气温、降水和大气环流与径流多时间尺度关联,分别对气温、降水的第一模态时间系数以及NINO3区SST与径流序列进行交叉小波能量谱、凝聚谱及位相谱计算。结果分别见图5~7。

交叉小波分析结果精确揭示了气温与径流在不同时频域的相互作用及径流对气温的响应时间。图5a显示径流和气温的相互影响主要集中在1990~2000年3~5 a周期上,图5b显示径流与气温在1990~2000年3~5 a周期及20世纪80年代8~10 a周期上存在强相关性。1990年以来,气温年际波

动幅度增大,通过对流域蒸散发过程的影响,对径流作用加强。小波位相谱结果表明径流变化相对气温变化响应较快,时间为6~12个月。

3.2 降水与径流多时间尺度关联性分析

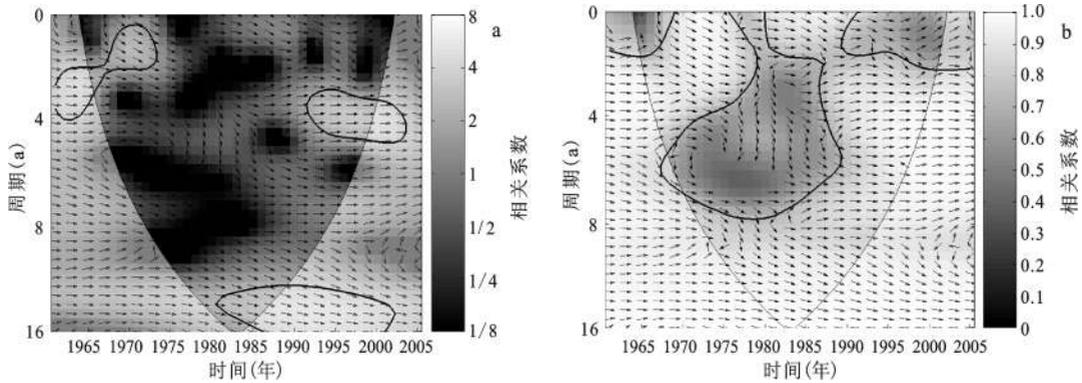
由于产汇流过程受下垫面情况等诸多因素影响,降水与径流的作用过程十分复杂。西江流域降水第一模态时间系数和径流交叉小波分析结果表明(图6):降水与径流功率谱能量主要集中在1965~1975年2~3 a、1992~2003年3~4 a及1980~2000年11~12 a周期上;降水与径流在1965~1988年4~8 a周期上无明显相关关系;降水与径流在大多数时频域中表现同相位关系。西江流域降水与径流存在较高相关性,降水是影响径流变化的最主要因素。降水对径流高频上的作用对应径流中地表径流对降水的响应;低频上的作用是径流组成中地下径流和壤中流相对降水滞后放大引起的。径流对降水响应较快,基本呈同步变化。降水与径流在1965~1988年间相关关系不明显可能



注:粗线表示信度为95%红噪声检验,细线表示小波影响锥,箭头表示相位:向右为同相相位,向左为反相相位。

图5 气温第一模态时间系数和径流交叉小波凝聚谱(a)以及功率谱(b)

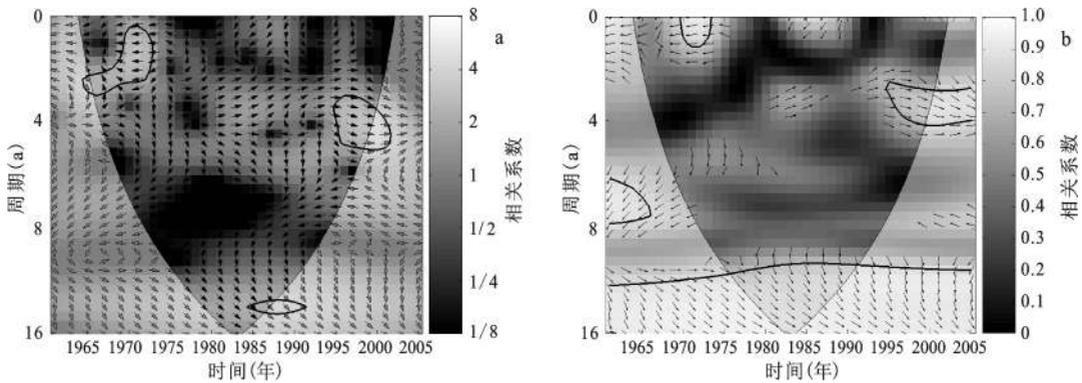
Fig.5 The cross transform spectrum (a)and coherence spectrum(b) between time coefficients of temperature in first mode and annual runoff in the Xijiang River basin



注:粗线表示信度为95%红噪声检验,细线表示小波影响锥,箭头表示相位:向右为同相相位,向左为反相相位。

图6 降水第一模态时间系数和径流交叉小波凝聚谱(a)及功率谱(b)

Fig.6 The cross transform spectrum (a) and coherence spectrum(b) between time coefficients of precipitation in first mode and annual runoff in the Xijiang River basin



注:粗线表示信度为95%红噪声检验,细线表示小波影响锥,箭头表示相位:向右为同相相位,向左为反相相位。

图7 NINO 3区 SST和径流交叉小波凝聚谱(a)及功率谱(b)

Fig.7 The cross transform spectrum(a)and coherence spectrum (b) between SST value in NINO 3 region and annual runoff in the Xijiang River basin

是人类活动造成的:西江流域当时处于水库和堤坝大量修建时期,下垫面的改变使流域产汇机制发生变化,径流对降水响应灵敏性降低。

3.3 环流因子与径流多时间尺度关联性分析

环流的异常变化会影响气候变化。厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)事件是环流变异最著名的例子,ENSO事件的主要特征是当赤道东太平洋海水温度出现异常高相位时,南方涛动指数出现异常低相位^[31]。赤道东太平洋海水温度(SST)某种程度上反映了全球气候异常变化。

NINO 3区位于中国南海海域附近,SST与径流交叉小波计算结果表明(图7):SST与径流的小波功率谱能量主要集中在1965~1975年2~3 a及1993~2000年3~5 a周期上;在前一时频域中,SST与径流呈反相相位变化,在后一时频域中呈同相

相位变化。有研究^[32,33]表明:1993~2000年,NINO 3区出现了45 a来最强烈一次SST异常偏高事件,SST的变化集中在2~5年周期上,西江流域径流变化对此次事件响应较快。在不考虑相位关系的情况下,图6a和图7a有较强相似性,据此可推断大气环流异常变化对西江径流的影响可能是通过对区域降水的影响实现的。降水和径流对1965~1975年间气候异常事件响应时间不同,印证了20世纪60、70年代,水库的大量修建和使用改变了径流的产汇机制的推论。

4 结论

本文将交叉小波运用于径流分析,探讨气温、降水和大气环流与径流在不同时间尺度上的关联,得出以下结论:1961~2005年,气温呈增加趋

势,降水水平波动变化,径流整体呈减少趋势,降水的波动变化与径流的丰枯交替相一致;气温对径流的显著作用主要集中在3~5 a周期,20世纪90年代以来,气温对径流影响作用加强;降水与径流在大多数时频域上呈同相相位关系,径流对降水变化响应较快,降水与径流仅在1965~1988年间相互关系不显著;SST对径流作用集中在1965~1975年2~3 a周期及1993~2000年3~5 a周期上,径流对前一气候异常响应时间约为3~6个月,对后一气候异常响应很快,分析表明异常气候对径流的影响可能是通过对流域内降水的影响实现的。

研究表明交叉小波可以较好的揭示西江流域气温和降水以及环流异常变化与径流在多时间尺度上的关联作用,对分析各因素在不同的时频域上对径流作用机制,反映各因素变化对径流影响具有一定意义。交叉小波功率谱、凝聚谱及位相谱对研究径流变化的影响机制具有较强的实用价值,将其作为分析工具引入径流机制研究中具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 于静洁,刘昌明. 森林水文学研究综述[J].地理研究,1999,8(1): 88~98.
- [2] 芮孝芳. 水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [3] 陈俊合,江涛,陈建耀. 环境水文学[M].北京:科学出版社,2007.
- [4] 徐海量,叶茂,宋郁东. 塔里木河源区气候变化和年径流量关系初探[J].地理科学,2007,27(2):219~224.
- [5] 梁国付,丁彦彦. 气候和土地利用变化对径流变化影响研究——以伊洛河流域伊河上游地区为例[J].地理科学,2012,32(5):635~640.
- [6] 孙宁,李秀彬,冉圣洪,等. 潮河上游降水-径流关系演变及人类活动的影响分析[J].地理科学进展,2007,26(5):41~47.
- [7] Li D F, Tian Y, Liu C M, et al. Impact of land-cover and climate changes on runoff of the source regions of the Yellow River [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004,14(3):330-338.
- [8] Bi H X, Liu B, Wu J, et al. Effects of precipitation and landuse on runoff during the past 50 years in a typical watershed in the Loess Plateau, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2009,24(3):352-364.
- [9] Yu P S, Wang Y C. Impact of climate change on hydrological processes over a basin scale in northern Taiwan [J]. Hydrological Processes, 2009,23(25):3556-3568.
- [10] Hess T M, Holman I P, Rose S C, et al. Estimating the impact of rural land management changes on catchment runoff generation in England and Wales [J]. Hydrological Processes, 2010,24(10):1357-1368.
- [11] 杨建平,丁永健,陈仁升. 长江黄河源区水文和气象序列周期变化分析[J].中国沙漠,2005,25(3):321~325.
- [12] 赵雪花,黄强. 黄河上游径流变化的影响因素分析研究[J].自然科学进展,2004,14(6):700~704.
- [13] 杨明金,张勃. 黑河莺落峡站径流变化的影响因素分析[J].地理科学进展,2010,29(2):166~172.
- [14] 刘宇峰,孙虎,原志华. 基于小波分析的汾河河津站径流与输沙的多时间尺度特征[J].地理科学,2010,32(6):764~770.
- [15] Hudgins L, Huang J P. Bivariate Wavelet Analysis of Asia Monsoon and ENSO[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1996,13(3): 299-312.
- [16] Torrence C, Compo G P. A Practical Guide to Wavelet Analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998,79(1): 61-78.
- [17] 孙卫国,程炳岩. 交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J].应用气象学报,2008,17(4):479~487.
- [18] 南峰,李有利,张宏升. 新疆玛纳斯河径流波动与北大西洋涛动的关系[J].北京大学学报(自然科学版),2006,42(4):534~541.
- [19] Zhang Q, Xu C Y, Jiang T, et al. Possible influence of ENSO on annual maximum stream flow of the Yangtze River China[J]. Journal of Hydrology,2007,333:265-274.
- [20] 李红军,汪志红,刘新春,等. 阿克苏河径流变化与北大西洋涛动的关系[J].地理学报,2008,63(5):491~501.
- [21] 孙卫国,程炳岩,李荣. 黄河源区径流量与区域气候变化的多时间尺度相关[J].地理学报,2009,64(1):117~127.
- [22] 郭英琼,高绍凤. 用EOF分析我国南峰降水的特征[J].中山大学学报论丛,1993,1:43~48.
- [23] 李瑞民,潘小凡. EOF方法分析浙江降水量的分布特征[J].科技通报,1998,14(6):419~422.
- [24] 凌良新,章鹰,陈往溪. 广东年、季降水量时空变化分布特征[J].广东气象,2008,30(6):24~27.
- [25] 马开玉,丁裕国,屠其璞,等. 气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社,1993.
- [26] 陈平,吴诚鸥,刘应安,等. 应用数理统计[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [27] 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, 2004,11:561-566.
- [28] Kijewski T, Kareem A. Wavelet Transforms for System Identification in Civil Engineering [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2003,18:339-355.
- [29] 姜世中,梁川. 降水和植被变化对龙川江径流量的影响[J].四川大学学报,2006,38(5): 58~64.
- [30] 黄磊,邵雪梅. 青海德令哈地区近400年的降水量变化与太阳活动[J].第四纪研究,2005,25(2):184~192.
- [31] 周淑贞,张如一,张超. 气象学与气候学[M].北京:高等教育出版社,1997.
- [32] Srivastava A K, Sinha K C. Assessing peak warming of SST over equatorial eastern Pacific Ocean (Niño 3 region) with the

help of circulation pattern over India during El Niño events[J].
Journal of the Meteorological Society of Japan, 2003,78(3):
279-288.

[33] 王绍武,龚道溢. 近百年来的 ENSO 时间及其强度[J]. 气象,
1999,25(1):9~13.

Recognition on the Relationship Between Runoff and Regional Meteorological Factors of the Xijiang River in Multi-time Scales

DONG Lin-yao^{1,2}, CHEN Jian-yao¹, FU Cong-sheng^{1,3}, JIANG Hua-bo¹, YANG Xue-yun¹

(1. Department of Water Resource and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Hydrology Laboratory, Kumamoto University, Kumamoto City 8608555, Japan; 3. Department of Geography, Nipissing University, Ontario P1B8L7, Canada)

Abstract: Using hydrological statistics and cross wavelet transform analysis, the variation characteristics of the runoff of the Xijiang River and the relation between the meteorological factors and the runoff in multi-time scales are detected in this research. The analysis indicates that the annual runoff decreases, which might be due to the weakened response of runoff to precipitation caused by increasing of evaporation and infiltration effected by human activities. The annual runoff fluctuation shows good correspondence with the precipitation. The cross wavelet analysis revealed that the impact of temperature to river flow occurred in the circle of 3-5 years in 1990-2000, in which the runoff shows lagging of 6-12 months to the temperature variation; the in-phase relations between the precipitation and river flow are found in almost all the time-frequency domains, good coherence can be found in the circle of 3 to 4 years between 1992 and 2003 and 11 to 12 years in 1980-2000; the impact of abnormal climate on runoff mainly occurred in the circle of 2 to 3 years in 1965-1975 and 3 to 5 years in 1993-2000, the impacts to the runoff variation might be carried out by the influence on the precipitation in the basin, the lag time between runoff variation and abnormal climate change event is 6 to 12 months in 1965-1975 while equated almost to zero in 1980-2000, this phenomenon might be caused by the changing of runoff production process effected by the changing of land use.

Key words: runoff; meteorological factor; cross wavelet analysis; EOF; the Xijiang River basin