

集合经验模态分解和交叉小波在赣江流量与太阳黑子活动关系中的应用

万智巍¹, 贾玉连¹, 洪伟君², 蒋梅鑫¹

(1. 江西师范大学 地理与环境学院 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101)

摘要: 为解决传统相关分析方法难以揭示出非线性、非平稳水文序列与外部强迫因子之间在不同时间尺度、不同频域下的相关关系, 提出一种结合 EEMD(集合经验模态分解)和 CWT(交叉小波变换)的综合分析方法, 并将其应用于赣江长时间流量序列与同期太阳黑子数序列的多尺度相关分析之中。研究结果表明: 1950–2015 年赣江流量序列 EEMD 分解的 IMF1 分量的波动振幅最大, 频率最高, 代表了原始序列中的主要变化因素, 是水文序列非线性和非平稳特征的体现。同期太阳黑子数序列的 EEMD 分解结果表明: 1950–1970 年为太阳黑子数上升阶段, 1970–2015 年为下降阶段。CWT 分析表明, 在 11a 周期尺度上赣江流量与太阳黑子数之间由负相关逐渐顺时针转为相差 1/4 个周期, 再转为正相关。其中 1950–2000 年, 二者的相关系数在 0.6 以上, 2001–2015 年相关系数在 0.4 以上。结果表明 EEMD–CWT 综合分析可以有效利用 EEMD 方法将原始信号进行分解, 以得到具有平稳性的 IMF 分量, 并以此为基础通过 CWT 方法得到二者在时域和频域上的相关关系变化过程。该方法可以为探究相关水文气象序列与外部强迫因素之间的多尺度相关关系提供新的思路和技术手段。

关键词: 集合经验模态分解; 交叉小波变换; 流量; 太阳黑子; 赣江

中图分类号: TV121⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0044-06

Application of EEMD and CWT in the relationship between Ganjiang River flow and sunspot activity

WAN Zhiwei¹, JIA Yulian¹, HONG Yijun², JIANG Meixin¹

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to solve the problem that traditional correlation analysis method is difficult to reveal the correlation between non-linear and non-stationary hydrological sequences and external forcing factors in different time scales and different frequency domains, we proposed a new method which is the combination of EEMD and CWT to be applied to the multi-scale correlation analysis of the long term flow series of Ganjiang River and the sunspot series in the same period. The results showed that the IMF1 component of the EEMD decomposition of the Ganjiang River flow series from 1950 to 2015 has the maximum amplitude and the highest frequency, representing the main change factor in the original series, which is the embodiment of the nonlinear and nonstationary characteristics of the hydrological sequence. The results of the EEMD components of the sunspot series in the same period showed that from 1950 to 1970 the sunspot increased and then decreased from 1970 to 2015. CWT analysis showed that the correlation between the Ganjiang River flow and the sunspot series gradually shifted from the negative correlation to the 1/4 cycle

收稿日期: 2017-07-22; 修回日期: 2017-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761045); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室开放基金项目(PK2015003); 江西省自然科学基金项目(20161BAB213075); 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心项目(JXS-EW-00); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ150305); 江西师范大学博士启动基金项目(6902)

作者简介: 万智巍(1984-), 男, 江西南昌人, 博士, 讲师, 研究方向: 全球变化与水资源。

通讯作者: 蒋梅鑫(1961-), 男, 江西泰和人, 学士, 教授, 研究方向: 可持续发展。

lag and then to the positive correlation. From 1950 to 2000, the correlation coefficient of this two series was above 0.6, and the correlation coefficient was above 0.4 from 2001 to 2015. This study shows that the EEMD - CWT comprehensive analysis can effectively use the EEMD method to decompose the original signal to obtain the IMF components with stability. Based on this, the correlation between the two series in the time domain and the frequency domain can be obtained by the CWT method. This method can provide new ideas and technical means for exploring the multi-scale correlation between hydrological meteorological series and external forcing factors.

Key words: ensemble empirical mode decomposition (EEMD); cross wavelet transform (CWT); flow; sunspot; Ganjiang River

1 研究背景

河流的水文要素变化过程是气候变化和下垫面要素交互作用的结果,具有复杂的时空变化演变规律^[1]。近年来,随着全球极端水文、气候事件频发,了解河川径流时空变化规律成为社会的迫切需求^[2-3]。地球作为一个复杂的开放系统,太阳辐射是其重要的外部能量输入和影响因素。研究表明,全球和区域降水在长时间尺度上受到太阳活动的影响,但其具体的影响过程和相互关系在不同区域有着不同的表现形式和规律特征^[4]。Neff 等^[5]的研究论证了全新世以来,太阳活动与印度季风之间复杂的耦合关系。Zhang 等^[6]的研究也表明,太阳活动的变化对东亚区域降水和河流流量有着复杂的影响机制。窦睿音等^[7]的研究表明,太阳黑子数与关中平原的整体干湿状况的关系存在转换现象,20 世纪 70 年代之前二者为反向相关,之后二者之间的关系转换为正相关。

河流流量的变化是区域气象水文活动的综合体现,反映了流域范围内整体的干湿状况,因此流量变化成为气候变化区域响应的指示器^[8]。相关研究表明,尽管太阳黑子活动与河流流量之间存在相关性,但是由于气象水文过程属于非线性、非稳定的复杂系统,如利用传统统计方法分析其相关性可能会受到原始序列中噪音的干扰^[9],难以探究二者之间在不同时域和频域上的复杂相关关系。因此,本文结合集合经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)^[10] 和交叉小波变换 (Cross Wavelet Transform, CWT)^[11],提出一种改进的相关分析方法——EEMD - CWT 综合分析,并将其应用于赣江长时间流量序列和同期太阳黑子数序列之间的相关性分析。文中结果一方面可以为赣江流域水资源和干湿状况长期变化规律和影响因素的探讨提供基础资料,另一方面可以为提高气象水文系统与外部强迫之间的非线性关系研究提供参考和思路。

2 数据与方法

2.1 流量数据与太阳黑子数据

赣江的流量数据来自 1950 - 2015 年南昌外洲水文站的实测资料。外洲水文站位于江西省南昌市范围内的赣江下游右岸 (115.84°E, 28.63°N), 控制面积为 80 948 km², 占整个赣江流域范围的 99% 以上^[12], 因此外洲水文站的流量数据可以反映整个赣江流域的产流情况。外洲水文站设立于 1949 年 10 月, 从 1950 年开始有连续的流量观测数据, 是目前赣江流域最长的流量数据序列 (图 1(a))。

太阳黑子数据来自比利时皇家天文台数据中心, 该研究机构是世界权威的太阳活动观测中心, 因此本文选取其发布的 1950 - 2015 年太阳黑子相对数 (图 1(b)) 作为反映太阳活动状况的序列 (数据下载网址为 <http://www.sidc.be/silso/datafiles>)。

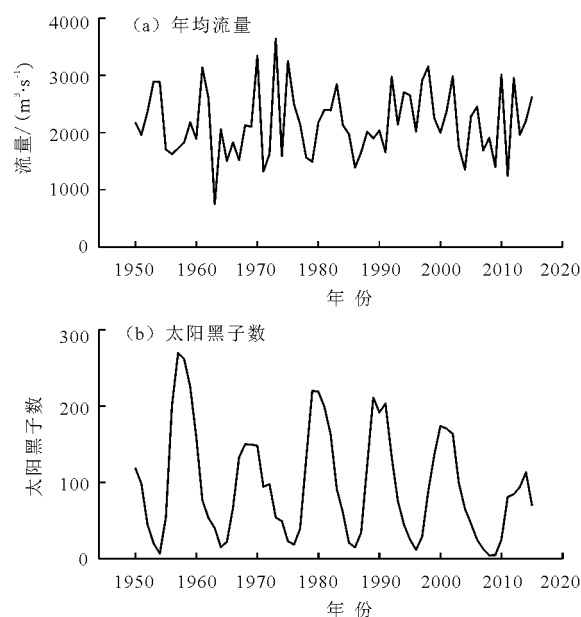


图1 1950 - 2015 年赣江年均流量和太阳黑子数

由图 1 可以观察到, 流量序列与太阳黑子序列之间的相关关系并不明显。因此, 利用 SPSS 20 软

件,对流量数据与太阳黑子数据进行初步的相关分析。结果表明,二者之间的 Pearson 相关系数为 -0.118 ($P = 0.347$)。

2.2 研究方法

2.2.1 EEMD 方法 经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 是一种利用各信号周期不同的振幅频率特征,将原始序列分解为一系列具有不同时间尺度本征模函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 的方法,被广泛应用于水文、气象、地球物理等领域的多尺度时频分析^[13-15]。集合经验模态分解 (EEMD) 则是 EMD 方法的改进算法,通过在原始信号中加入噪声减弱了模态之间的混叠,从而提高了分解的有效性^[16-17]。

2.2.2 CWT 方法 交叉小波变换 (Cross Wavelet Transform, CWT) 是一种结合交叉谱分析和小波分析的新方法,可以同时时域和频域上分析两个信号之间的相关性^[11]。交叉小波能量谱可以反映出两个信号经过小波分析之后具有相同能量谱的区域,因此可以揭示出两个信号在不同时频域上相互作用的程度。其具体计算方法为:

$$W_{XY}(\alpha, \tau) = C_X(\alpha, \tau) C_Y^*(\alpha, \tau) \quad (1)$$

式中: $W_{XY}(\alpha, \tau)$ 为两个信号的交叉小波谱; $C_X(\alpha, \tau)$ 是第一个信号的小波变换系数; $C_Y^*(\alpha, \tau)$ 是第二个信号的小波变换系数的复共轭。

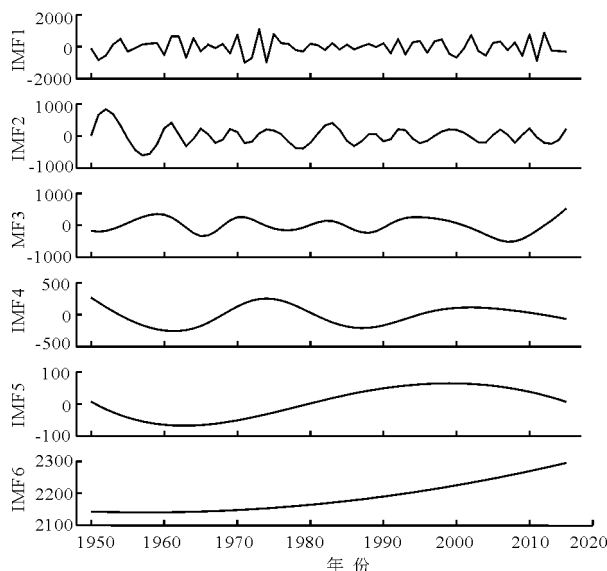
2.2.3 EEMD - CWT 综合分析 本文提出的 EEMD - CWT 综合分析的思路是:首先利用 EEMD 方法将原始信号分解为不同尺度的互相正交的本征模函数 (IMF) 分量,以实现信号的平稳化,降低原始信号中的噪音影响。然后利用多窗谱分析 (Multi - Taper Method, MTM)^[18] 确定原始信号中所存在的各种周期。最后,选择具有相同物理意义的周期尺度下的本征模函数 (IMF) 分量进行交叉小波变换,得到二者的交叉小波能量谱和小波凝聚谱,并以此来分析两个序列在不同时频域上的相关性。

3 结果与分析

3.1 流量的多尺度特征和周期

对 1950 - 2015 年赣江流量序列进行 EEMD 分解 (图 2),共得到 6 个 IMF 分量,其中 IMF1 ~ 5 为不同时间尺度下流量序列的周期项,IMF6 为整个序列的长期变化趋势项。由图 2 可以看出,IMF1 分量的波动振幅最大,频率也最高,但是周期性较差。这一信号代表了原始序列中的主要变化因素,是水文序列非线性和非平稳特征的体现。EMD 方法的提出者——

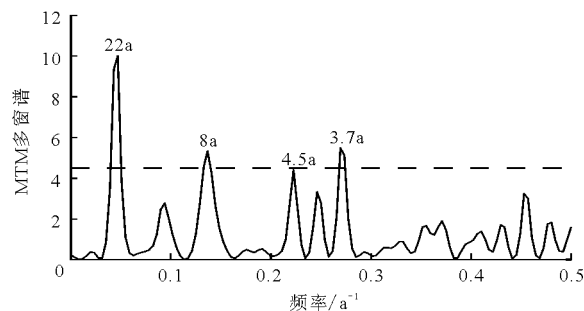
Huang 等^[18]的研究指出,如果趋势项为单调上升或单调下降函数则说明原始信号具有明显的非平稳性。由图 2 可以清楚的观察到 IMF6 为单调上升函数,这也论证了赣江近 66 年来的流量序列具有明显的非平稳性。IMF2 ~ 5 这 4 个分量的周期性和平稳性已经得到了很大程度上的改善,表现出了比较明显的周期变化规律。并且随着分解尺度的递进,其振动幅度和频率逐渐下降,信号的平稳性逐渐增强。如 IMF4 和 IMF5 已经比较接近于正弦波。



(图中纵坐标为相对值)

图 2 1950 - 2015 年赣江流量序列 EEMD 分解

通过对 1950 - 2015 年赣江流量序列的多窗谱 (MTM) 分析表明 (图 3),近 66 年来赣江流量序列具有明显的 22、8、4.5 和 3.7 a 周期 (通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验),其中 11 a 周期也比较明显,但是未能通过相关检验。谱值最大的 22 a 周期即为太阳活动的 Hale 周期^[19],也就是常见的太阳黑子 11 a 周期的 2 倍。另外,准 4 ~ 8 a 的周期很可能与 ENSO 的活动周期有关^[20]。

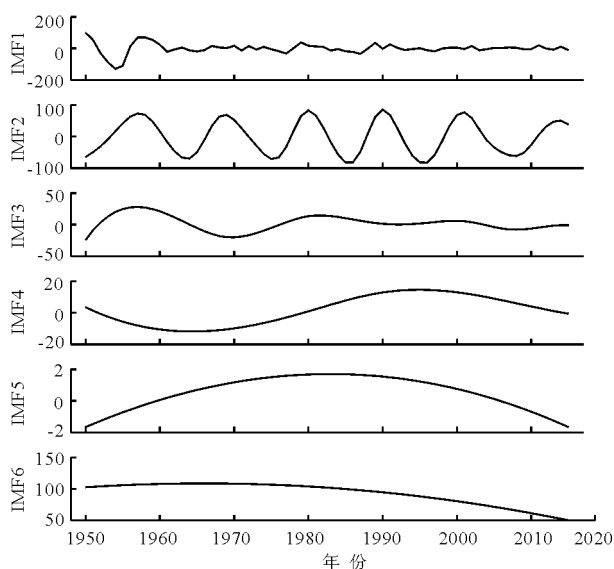


(虚线表示 95% 置信区间)

图 3 1950 - 2015 年赣江流量序列的多窗谱分析

3.2 太阳黑子的多尺度特征和周期

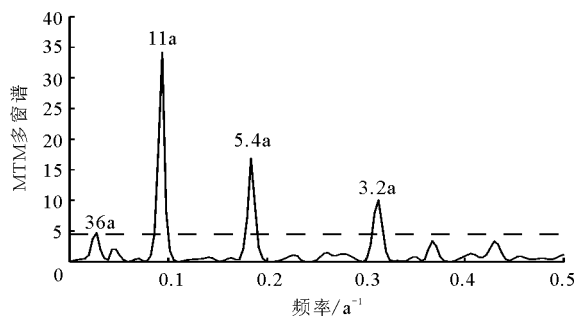
对 1950–2015 年太阳黑子数序列进行 EEMD 分解(图 4),共得到 6 个 IMF 分量,其中 IMF1~5 为不同时间尺度下太阳黑子数序列的周期项,IMF6 为整个序列的长期变化趋势项。由图 4 可以看出,太阳黑子数的变化过程较为平稳,具有明显的周期性特征。在 IMF1 分量中,除 1950–1960 年这段时间外,其余时间其振幅都较为平稳。IMF2~5 这 4 个分量具有非常明显的周期变化特征,各个时间尺度下的变化过程都具有类似正弦波的结构。IMF6 趋势项的变化过程显示,1950–1970 年为太阳黑子数上升阶段,1970–2015 年为下降阶段。



(图中纵坐标为相对值)

图 4 1950–2015 年太阳黑子数序列 EEMD 分解

进一步的多窗谱分析(MTM)表明(图 5),太阳黑子数序列具有显著的 36、11、5.4 和 3.2 a 周期(通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验)。其中太阳黑子数的 11 a 周期表现最为明显,其谱值明显大于其他几个周期。



(虚线表示 95% 置信区间)

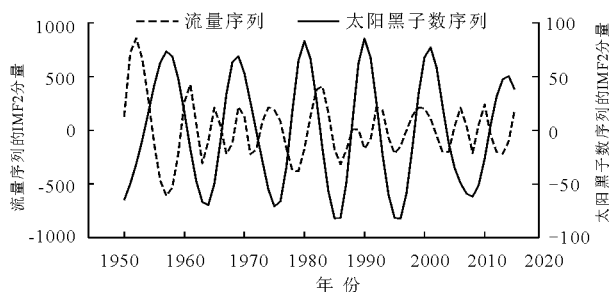
图 5 1950–2015 年太阳黑子数序列的多窗谱分析

3.3 流量与太阳黑子交叉小波分析

现代研究表明^[21–22],太阳活动异常对地球气候系统、降水、流域流量的影响主要是通过影响环流和季风强度实现的。如过去 120 年以来南亚和东亚地区太阳辐射的增强通过影响沃克环流和哈德来环流,最终导致区域降水和流域流量的增加。因此可以通过太阳活动和流量之间的关系,进一步揭示二者在不同尺度下的相互影响过程。

通过前文的分析可知,赣江流量序列与太阳黑子数序列的相关系数仅为 -0.118 ,且未能通过 $\alpha = 0.1$ 的显著性检验,不能直接利用未经处理的原始序列进行二者之间的相关分析。但是,经过 EEMD 分解后,各 IMF 分量的平稳性有了很大程度的改善,周期性特征也更加明显。与此同时,流量和太阳黑子的多窗谱分析(MTM)表明,二者都具有明显的太阳活动周期,因此可以选取具有与太阳活动周期相关的 IMF 分量进行对比分析。以此为基础,经过交叉小波分析得到赣江流量和太阳黑子数之间的交叉小波能量谱和小波凝聚谱。

图 6 为 1950–2015 年赣江流量序列 IMF2 分量与太阳黑子数序列的 IMF2 分量对比。由图 6 可知,赣江流量变化与太阳黑子数序列之间的相关关系在不同时间段内是不一样的。其中,1950–1960 年呈负相关、1961–1973 年呈正相关、1974–1984 年呈负相关、1985–1995 年呈正相关、1996–2007 年为负相关(部分时段相差 1/4 个周期)、2008–2015 年为正相关(部分时段相差 1/4 个周期)。近 66 年来,大体上二者以 11 a 为周期,在负相关和正相关之间交替变换。



(图中纵坐标为相对值)

图 6 1950–2015 年赣江流量序列和太阳黑子数序列的 IMF2 分量对比

图 7 为 1950–2015 年赣江流量与太阳黑子数序列的交叉小波谱和小波凝聚谱,交叉小波能量谱中颜色越偏红表示能量谱密度值越大。由图 7(a)可以观察到在 11 a 周期附近赣江流量与太阳黑子

数的相关关系最为显著,其中黑色实线所围合区域表示通过了 95% 置信度检验,灰色阴影区则表示可能会受到边界效应的影响。图中 $\rightarrow$ 表示二者之间变化的位相一致(正相关), $\leftarrow$ 表示位相相反(负相关), $\uparrow$ 和 $\downarrow$ 则表示二者之间提前或落后 $1/4$ 个周期。在图 7(a)中的 11a 周期尺度上,1950–2015 年二者之间由负相关逐渐顺时针转为相差 $1/4$ 个周期,再转为正相关。小波凝聚谱(图 7(b))中相关

系数较高的区域与交叉小波能量谱(图 7(a))中基本一致,也是在 11 a 尺度上达到最大值。其中 1950–2000 年,二者的相关系数在 0.6 以上,2001–2015 年二者的相关系数也在 0.4 以上。小波凝聚谱可以发现在 32 a 周期尺度上,二者的相关系数值在整个研究时段都在 0.8 以上,但是考虑到本研究的长度只有 66 a,而且由于边界效应的存在,这一相关关系可能并不具有实际意义。

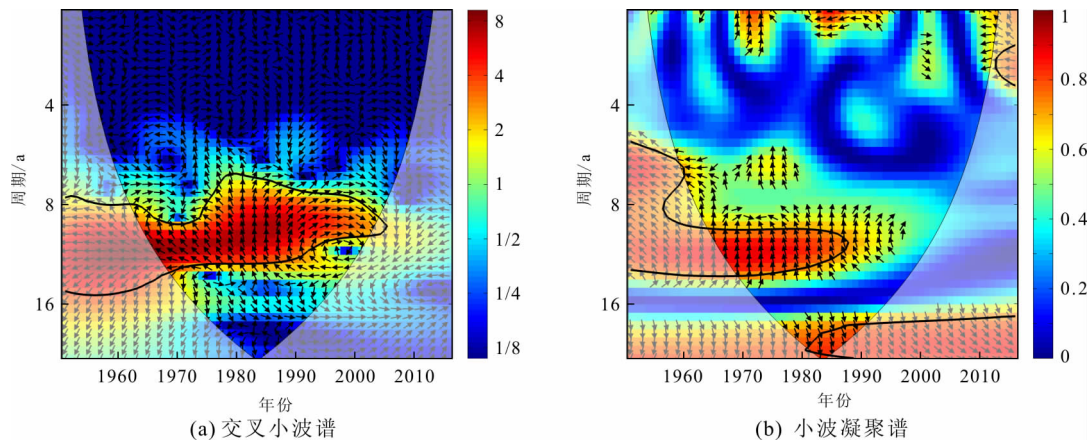


图7 1950–2015 年赣江流量与太阳黑子数序列的交叉小波谱和小波凝聚谱

4 结 论

本文基于赣江外洲水文站 1950–2015 年的长时间流量序列和同期太阳黑子数序列,结合 EEMD 及 CWT 综合分析方法对流量与太阳活动之间的多尺度相关关系进行了分析。研究表明:

(1) EEMD–CWT 综合分析可以有效利用 EEMD 方法将原始信号进行分解,得到具有平稳性的 IMF 分量,并借助多窗谱分析 (MTM) 识别出信号中的不同周期,选择具有相同物理意义的赣江流量序列 IMF 分量和太阳黑子 IMF 分量,再利用交叉小波变换 (CWT) 得到二者在时域和频域上的相关关系变化过程。

(2) 1950–2015 年赣江流量序列的 EEMD 分解结果表明,该序列具有明显的非平稳性,其中 IMF1 分量的波动振幅最大,频率最高,代表了原始序列中的主要变化因素,是水文序列非线性和非平稳特征的体现。

(3) 1950–2015 年太阳黑子数序列的 EEMD 分解结果表明,太阳黑子数的变化过程较为平稳,具有明显的周期性特征。趋势项的变化过程显示,1950–1970 年为太阳黑子数上升阶段,1970–2015 年为下降阶段。

(4) 多窗谱分析 (MTM) 表明,近 66 年来赣江流量序列具有 22、8、4.5 和 3.7 a 周期,太阳黑子数序列具有 36、11、5.4 和 3.2 a 周期。

(5) 交叉小波分析 (CWT) 表明,在 11 a 周期尺度上,1950–2015 年赣江流量与太阳黑子数之间由负相关逐渐顺时针转为相差 $1/4$ 个周期,再转为正相关。其中 1950–2000 年,二者的相关系数在 0.6 以上,2001–2015 年相关系数在 0.4 以上。

参考文献:

- [1] GATES W L. An overview of the results of the atmospheric model intercomparison project (AMIP I) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(2): 29–55.
- [2] 夏 军, 谈 戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战 [J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1–7.
- [3] 范垂仁, 夏 军, 张利平, 等. 中国水旱灾害长期预报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [4] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [5] NEFF U, BURNS S J, MANGINI A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in oman between 9 and 6 Kyr Ago [J]. Nature, 2001, 411(6835): 290–293.
- [6] ZHANG P, CHENG H, EDWARDS R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810–Year chinese cave record [J]. Science, 2008, 322(5903): 940–

- 942.
- [7] 窦睿音,延军平. 关中平原太阳黑子活动周期与旱涝灾害的相关性分析[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(8): 76-82.
- [8] CHEN F, YUAN Y J, WEI W S, et al. Tree-ring recorded hydroclimatic change in Tianshan Mountains during the past 500 years[J]. Quaternary International, 2015, 358: 35-41.
- [9] YEH J, SHIEH J, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2): 135-156.
- [10] WU Zhaohua, HUANG N E. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [11] 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.
- [12] 顾朝军, 穆兴民, 高鹏, 等. 赣江流域径流量和输沙量的变化过程及其对人类活动的响应[J]. 泥沙研究, 2016, 41(3): 38-44.
- [13] JI F, WU Z, HUANG J, et al. Evolution of land surface air temperature trend [J]. Nature Climate Change, 2014, 4(6): 462-466.
- [14] CHEN Yangkang, MA Jitao. Random noise attenuation by F-X empirical mode decomposition predictive filtering [J]. Geophysics, 2013, 79(3): 81-91.
- [15] BREAKER L C, LOOR H R, CARROLL D. Trends in sea surface temperature off the coast of Ecuador and the major processes that contribute to them [J]. Journal of Marine Systems, 2016, 164: 151-164.
- [16] WU Z, HUANG N E, CHEN X. The multi-dimensional ensemble empirical mode decomposition method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(3): 339-372.
- [17] MANN M E, LEES J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series [J]. Climatic Change, 1996, 33(3): 409-445.
- [18] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 1998, 454(1971): 903-995.
- [19] RIND D. The sun's role in climate variations [J]. Science, 2002, 296(5568): 673-677.
- [20] 王钟睿, 钱永甫. 江淮梅雨的多尺度特征及其与厄尔尼诺和大气环流的联系 [J]. 大气科学学报, 2004, 27(3): 317-325.
- [21] 葛全胜, 刘路路, 郑景云, 等. 过去千年太阳活动异常期的中国东部旱涝格局 [J]. 地理学报, 2016, 71(5): 707-717.
- [22] BHATTACHARYYA S, NARASIMHA R. Regional differentiation in multidecadal connections between Indian monsoon rainfall and solar activity [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(24): 177-180.

(上接第 43 页)

- [14] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 海米提·依米提, 马蓉. 1956-2010 年新疆焉耆盆地径流变化特征及驱动力分析 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 670-677.
- [15] 陈青青, 陈超群, 杨志勇, 等. 阿克苏河径流演变及其对气候变化的响应 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 88-93+99.
- [16] 高彦春, 王金凤, 封志明. 白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 467-477.
- [17] 严栋飞, 解建仓, 姜仁贵, 等. 汉江上游径流变化趋势及特征分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 13-19.
- [18] 罗栋梁, 金会军. 黄河源区玛多县 1953-2012 年气温和降水特征及突变分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 185-192.
- [19] 李五勤, 王义民, 孙东永, 等. 基于排列熵的径流突变识别 [J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 19-22.
- [20] 孙东永, 黄强, 张莉. 基于排列熵和小波分析的渭河降水突变研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 229-234.
- [21] 库路巴依·吾布力. 新疆叶尔羌河水文要素变化特性分析 [J]. 水利规划与设计, 2016(5): 41-44.
- [22] 古丽孜巴·艾尼, 满苏尔·沙比提. 叶尔羌河径流量时序变化特征及成因分析 [J]. 科技创新与应用, 2014(13): 298-299.
- [23] 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.
- [24] 刘天龙, 杨青, 秦榕, 等. 新疆叶尔羌河源区气候暖湿化与径流的响应研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 49-53.
- [25] 鲁凤, 徐建华, 陈亚宁, 等. 叶尔羌河源区近 50 年来年径流变化及其对气候变化的响应 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 152-158.