

DOI: 10.5846/stxb201406041150

于文金, 苏荣, 邵明阳, 于步云, 谢涛, 黄亦露. 澜沧江流域暴雨干旱灾害与海温异常波动规律的相关性. 生态学报, 2016, 36(4): - .
Yu W J, Su R, Shao M Y, Yu B Y, Xie T, Huang Y L. Correlation between the regularity of abnormal fluctuation of sea surface temperature and rain and drought disasters in the Lancang River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

澜沧江流域暴雨干旱灾害与海温异常波动规律的相关性

于文金^{1,*}, 苏 荣¹, 邵明阳², 于步云¹, 谢 涛¹, 黄亦露¹

¹ 南京信息工程大学, 南京 210014

² 江西省九江市气象局, 九江 210093

摘要: 基于中国气象局国家气象信息中心提供的澜沧江区域 1961—2011 年 50 年气象资料, 采用 EMD (Empirical Mode Decomposition) 分解、均生函数逐步回归模型、相关分析等方法, 探讨了澜沧江流域极端天气灾害的变化特征, 及其区域极端灾害变化和全球海温异常 ENSO (El Niño/La Niña-Southern Oscillation) 之间的联系。结果表明: (1) 该区域降水和暴雨频次存在多尺度特征, 降水量存在 2 a、7 a、15 a 的变化周期, 且主周期为准 2 a。(2) 降水量和暴雨频度序列的 IMF1 和 IMF2 周期在 2—7 a 之间, 与 ENSO 在年际变化上的信号相吻合, NINO (El Niño) 指数无论春夏秋冬或年际都与暴雨和干旱灾害频次呈现负相关, 而 SOI (Southern Oscillation Index) 指数则呈现正相关, 其中, NINO 指数与干旱相关性指数在秋冬和年际接近 -0.3。(3) 澜沧江流域暴雨和干旱灾害与 ENSO 有重要联系, 且随着气温升高干旱灾害频次明显增加。研究结果显示区域极端气温灾害的变化与全球气候变暖有某种关联, 是全球气候变化的区域响应表现形式之一。

关键词: 澜沧江; 干旱; 脆弱性; 海温指数

Correlation between the regularity of abnormal fluctuation of sea surface temperature and rain and drought disasters in the Lancang River Basin

YU Wenjin^{1,*}, SU Rong¹, SHAO Mingyang², YU Buyun¹, XIE Tao¹, HUANG Yilu¹

¹ Nanjing University of Information and Technology Sciences, Nanjing 210014, China

² Jiangxi province Jiujiang Meteorological Bureau, Jiujiang 210093, China

Abstract: Extreme weather events occur frequently under conditions of global climate change. These extreme events are considered by many scholars to be due to climate warming. However, the mechanisms governing extreme weather events as regional responses to global climate change are unclear, as is the attribution of such extreme disasters to particular sources. Globally, the oceans are one of the most important sources of power, heat, and water vapor transmission, and significant variations of the sea surface temperature (SST) will lead to global climate change. Based on 50 years of meteorological data (1961—2011) for the Lancang region, obtained from the National Meteorological Information Center, the techniques of wavelet analysis, empirical mode decomposition (EMD), mean generating function stepwise regression model, and correlation analysis were used to investigate the link between regional extreme weather disasters in the Lancang River Basin and global climate change from the latter half of the 20th century to the early 21st century. The results showed that various multi-scale features exist in the regional precipitation and storm frequency data with periods of 2, 7, and 15 years, with the

基金项目: 国家重大科学研究计划项目 (2013CB430202); 国家重大科学研究计划项目 (2012CB955900); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

收稿日期: 2014-06-04; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuwj@nuist.edu.cn

2-year cycle being the most important. The EMD method was considered more suitable than wavelet analysis for determining the main cycles because it was better able to deal with non-stationary nonlinear signals. The IMF1 and IMF2 cycles of precipitation and frequent rainstorms were 2—7 years, which coincided with the ENSO inter-annual variability of the signal. The NINO index, regardless of the frequency of winter or annual heavy rain or drought disasters, showed negative correlation, while the SOI showed positive correlation. The coefficient of correlation between the NINO index and winter and annual drought was close to -0.3 . The frequency of drought and extreme temperature events increased significantly with increase in temperature. Thus, climate change and global warming were found to have some connection to one manifestations of the regional response to global climate change. The ENSO index, regardless of the frequency of seasonal or annual heavy rain and drought disasters, showed negative correlation, while the SOI showed positive correlation. The correlation coefficient between the ENSO index, and autumn and winter and annual drought, was close to -0.3 . The NINO index showed correlation with heavy rain, and the SOI showed significant negative correlation with heavy rain and obvious correlation with drought. Therefore, it can be concluded that regional heavy rain might be affected by ENSO, whereas the SOI is one of the more important factors determining the occurrence of drought. The influence of SST on drought and floods is actually transmitted via the response of atmospheric circulation. Various statistical, diagnostic, and numerical experiments have proven that SST thermal anomalies influence mid- and high-latitude atmospheric circulation anomalies, which is important evidence supporting the above conclusion. It has been demonstrated that an important link exists between the occurrence of heavy rain and drought disasters in the Lancang River Basin and ENSO.

Key Words: Lancang River; drought; vulnerability; SST index

全球变化条件下,极端事件频繁发生^[1-4],这种极端的气候事件被许多学者归因于气候变暖^[5-6],而区域极端气候事件对全球气候变化的响应机理尚不清晰,极端气候灾害的归因问题也存在诸多疑点^[7-11]。海洋是热量和水汽输送的重要动力,其海温的异常变化将导致全球气候的变化,澜沧江-湄公河流域纵贯 13 个纬度,最大相对高差近 5000 m,跨 6 种气候带,是一个特殊的环境变化敏感区,探讨海温异常的变化规律与澜沧江-湄公河流域降水特征之间的关联性,对于探究区域暴雨干旱灾害的成因机理及其对气候变化下的区域气候灾害响应机理等重大问题具有重要的意义。

1 资料和方法

1.1 资料来源和处理

本文资料来源于中国气象局国家气象信息中心,气象资料研究时段为 1960—2010 时间序列。海温资料为 1911—2011 年时间序列。为选择足够数量的典型站,使采用的降水资料能够代表研究区降水情况并满足后续分析计算的基本要求,根据多步迭代估计方法^[12]对站点最优个数进行估计,共选取了澜沧江流域及其周边 35 站,数据经严格订正,对于站点个别年份资料缺失问题均经过等距离插值法处理。

1.2 研究方法

(1) EDM 法

本文借鉴 Huang 等^[11-13]提出的经验模态分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD),对站点降水量序列进行分解。EMD 可将时间信号在不同尺度(频率)的波动或趋势进行逐级分解,得到一系列具有不同特征尺度的数据序列,称为本征模函数(Intrinsic Mode Function, IMF),它是目前处理非平稳、非线性信号,特别是分析时间序列趋势的最好方法,相比传统的傅立叶谱分析、小波分析等具有明显的优势^[14-15]。每个 IMF 必须满足下列两点:

- 1) 零点数目与极值点数目相同或者至多相差 1;
- 2) 函数由局部极大值点构成的包络线和由局部极小值点构成的包络线的均值为零。

计算公式为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n MF_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

EMD 分解过程就是依次提取各个 IMF 分量的过程,每次提取都将高频信号分离出,最后得到趋势分量或者是定常值。无论是数字滤波器、小波变换、还是 EMD/HHT 方法,都存在如何处理边界问题^[16],本文采用镜像对称延伸方法解决这一问题。

(2) SVD 分析

奇异值分解(SVD)用于分析两个气象要素场序列之间的相关关系^[17-18],可最大限度地从两个要素场分离出多个相互独立的耦合模态,从而揭示出两要素场所存在的时域性的空间联系。

前 K 个模态的累计平方协方差贡献百分率为:

$$CSCF_k = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^p \sigma_i^2} \quad (2)$$

奇异值按降序排列,即 $\langle a_1, b_1 \rangle = \max$, 第 1 模态对交叉协方差的贡献率最大,其余第 2, 第 3, ..., 一次递减。第 K 个模态异类相关系数分布性表示第 k 个左(右)场的展开系数所反映的右(左)气象场时间变化程度大小的分布,显著相关区则代表了两气象场相互影响的“关键区”,在一定程度上代表了左、右气象场的遥相关性。

(3) 均生函数预测模型

均生函数预测模型(Mean valued Generated Function, MGF)是在多元回归方程的过程中,按照偏相关系数的大小次序把自变量依次引入均生函数延拓矩阵即多元方程,对引入方程中每个自变量的偏相关系数做统计检验,效应显著的自变量就留在回归方程内,以此循此继续选下一个自变量。如果效果不显著,则停止引入新的自变量。由于引入新的自变量,原来已经进入方程的自变量由于变量之间的相互作用的影响,可能会变得不显著,经过统计检验确认后要随时从方程中剔除,把效应显著的自变量保留下。一直到方程不再引入和剔除自变量为止,进而获得最优的回归方程。

均生函数预测模型的流程:选取时间序列——均生函数的构造外延——逐步回归预测模型——构造预报方程——预报方程拟合值和实际值对比——预测中应用。

根据气候的时间序列也即混沌时间序列同时包含不同的变化周期和尺度的震荡性特征,均生函数做为时间序列的预测方法可以完善部分时间序列预测模型的缺陷,能够得到序列极值的预测和拟合比较理想的效果。

2 结果与分析

2.1 EMD 分解结果分析

前人研究发现^[19-22],EMD 分解可能产生虚假分量,只有相关系数较大、图像相似性较好的分量才是最主要的分量。本文计算了各序列 EMD 分解得出的 IMF 分量和原序列的相关系数,对各个分解出的 IMF 项与原序列进行相关系数统计,此外对相关系数进行了 t 检验,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,其中表格中带 * * 部分为未通过显著性检验,同时设置相关系数 1/10 为门限值,未通过显著性检验和未达到门限值的均看做虚假分量。

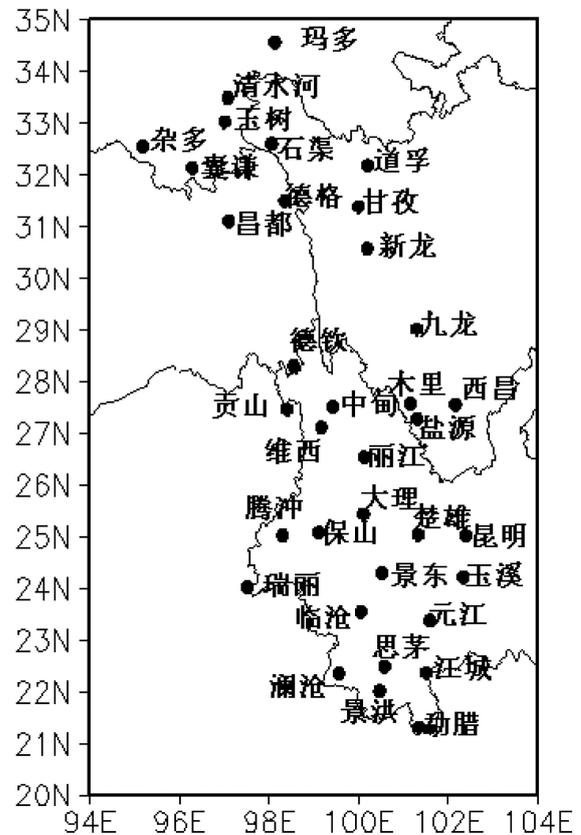


图 1 澜沧江流域站点分布图

Fig. 1 The Map of Lancang River Site

分析结果表明,前两个分量与原序列相符程度比较高,除春季 IMF7、秋冬 IMF8 外,各 IMF1 与原序列相关系数均大于门限值,且绝大部分达到 0.05 显著性水平(详见表 1),显示 EMD 分解的结果比较理想。澜沧江流域降水量序列 EMD 分解的结果显示,澜沧江流域降水量总体来说振幅逐渐变小,而平均周期由短变长。暴雨频次序列 IMF1-IMF5 的平均周期分别为 2.8 a、4.2 a、6.2 a、9.4 a、16.7 a、25 a,降水序列的平均周期分别为 2.9 a、7.1 a、15.4 a、30.8 a(见图 2),二者周期对应关系较好,暴雨频次序列的变化周期小于降水序列周期。从各模态和趋势项的方差贡献率来看,IMF1 的贡献率最大,2.8 a 和 4.2 a 是暴雨频次的主周期,2.9 a 和 7.1 a 为暴雨降雨量的主周期,即准 2 a 周期是澜沧江流域洪灾的稳定主周期,同时也是中国洪灾变化的最主要周期(表 2)。进一步将暴雨变化划分为年际信号(IMF1、IMF2)、年代际信号(IMF3)和几十年际信号(IMF4、IMF5),则各信号的方差贡献率基本上是递减的,且年际信号(前两个分量)包括了最主要的方差贡献率,暴雨频次和降水量序列年际信号的累计方差贡献率分别达 51.3% 和 84.1%(见表 3)。

2.3 海温异常与澜沧江流域灾害相关性分析

气象上把拉尼娜和厄尔尼诺合称为 ENSO(El Niño/La Niña-Southern Oscillation, 简写 ENSO, 音“恩索”)。拉尼娜期间,印度尼西亚和澳大利亚的气压减弱,东南太平洋气压明显升高。厄尔尼诺期间的情况正好相反。这种海洋与大气的相互作用和关联,全球尺度的气候振荡被称为 ENSO 循环。海温变化引起大气环流和洋流的变化,从而改变影响水汽输送的驱动力,最终导致海陆之间水汽和热量交换和输送的变化,从而造成区域极端天气灾害的发生。

表 1 EDM 分解各分量和原序列相关系数

Table 1 The correlation coefficient about EDM decomposition components and raw sequence

季节 Season	Imf1	Imf2	Imf3	Imf4	Imf5	Imf6	Imf7	Imf8
春季 Spring	0.65	0.34	0.30	0.21**	0.31	0.31	0.04**	0.37
夏季 Summer	0.61	0.45	0.28**	0.09**	0.38	0.28**	0.19**	—
秋季 Autumn	0.71	0.51	0.26**	0.30	0.19**	0.27**	0.28**	0.03**
冬季 Winter	0.71	0.51	0.26**	0.30	0.19**	0.27**	0.28**	0.03**

* * 为未通过显著性检验;EDM 为经验模态分解(Empirical Mode Decomposition);Imf 为本征模函数(Intrinsic Mode Function)

表 2 各个 IMF 分量对所有分量的方差贡献率

Table 2 The IMF component on all subscales of the variance contribution rate

季节 Season	Imf1	Imf2	Imf3	Imf4	Imf5	Imf6	Imf7	Imf8
春季 Spring	47.62	19.67	8.19	3.11	5.50	8.29	0.20	7.41
夏季 Summer	38.70	23.80	6.57	6.53	9.14	10.15	5.11	—
秋季 Autumn	58.93	16.01	4.42	8.81	2.83	3.50	5.47	0.01
冬季 Winter	39.83	6.25	15.21	2.91	17.84	7.82	2.77	7.37

表 3 暴雨频次各 IMF 分量的方差贡献率

Table 3 The IMF components of variance contribution rate of rainstorm frequency

分量 Component	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8
分量值 Component value	0.65	0.36	0.51	0.21*	0.32	0.29	-0.04*	-0.11*
贡献率 Contribution rate	51.24	13.58	17.65	2.36	4.78	9.81	0.11	0.49

* 为未通过显著性检验

ENSO 是导致全球各地破坏性干旱、暴风雨和洪水的罪魁祸首,然而,ENSO 波动规律以及引起区域灾害的相关性以及相关机理尚不十分清晰。本研究采用澜沧江流域气象资料、全球海温资料以及灾害资料,探讨暴雨、干旱极端天气灾害与 ENSO 指数之间有何种联动性。

2.3.1 澜沧江流域春季旱涝与前月海温的可能关系

海洋是影响陆面气候的一个重要的因素,它具有非常明显的持续性和非常强的“记忆力”。由于海洋与陆

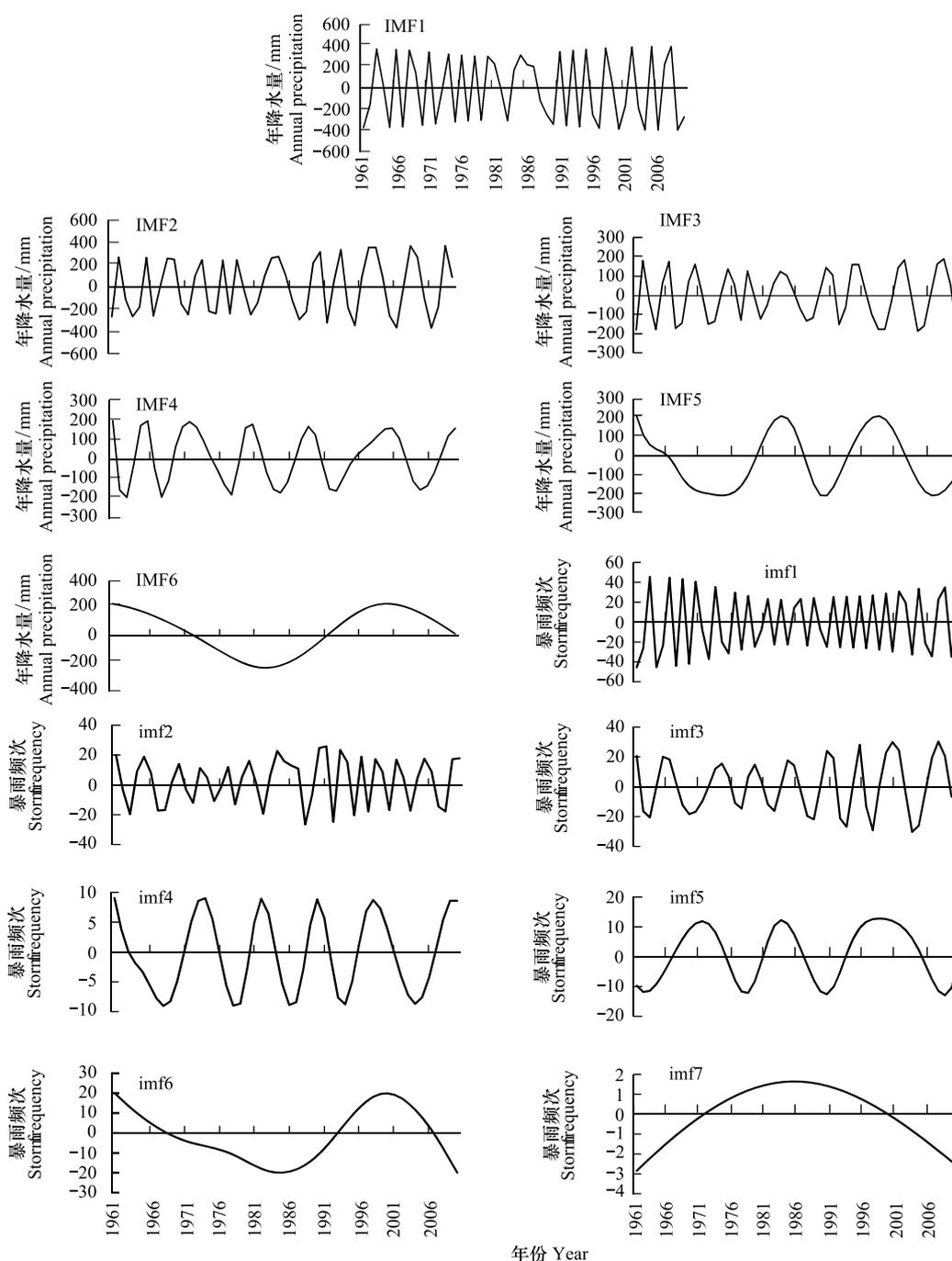


图2 夏季降水量 EMD 分解与暴雨频次 EMD 分解量示意图(1—6 为夏季降水量 EMD,7—12 为暴雨频次 EMD)

Fig. 2 EMD about precipitation in summer and EMD about rainstorm frequency decomposition of decomposition volume diagram (1—6 summer precipitation EMD, 7—12 rainstorm frequency EMD)

地存在着滞后性,本文选用超前 1 个月的海温与澜沧江流域的季节性降水做相关。根据我国澜沧江流域的四季降水量和全球海温的年平均温度分别做相关性(参见图 3,蓝色区域负相关,红色区域正相关)。经过计算,发现澜沧江流域的年降水量和全球 SST(sea surface temperature)无显著相关,故在此不做陈述。

澜沧江流域春季的降水主要与热带太平洋以及印度洋流域南纬 30° 到 60° 之间海温有显著性相关;夏季澜沧江流域的相关区域主要是在印度洋,从赤道到南纬 30° 之间,呈现负相关,说明夏季该海域温度升高时,降水减少;季澜沧江流域的降水与海洋温度的相关主要位于北太平洋,从 30°N 到 60°N 有两处中心点,呈现的是负相关;冬季澜沧江的降水显著相关区位于澳洲以东的南太平洋,这表明当该地区 SST 异常偏高时,西南

地区春季降水易偏多,同时它与南大西洋是呈现的负相关。

夏季海温场与澜沧江流域旱涝 Z 指数场的 SVD 第一模态对比显示,太平洋海温分布主要呈现南北向的分布,当赤道中东太平洋海温偏高,北太平洋海温偏低时,澜沧江流域夏季中部地区偏涝。反之亦然。第二模态显示,澜沧江流域呈现暴雨洪涝时,全球海温呈现厄尔尼诺类型的分布,中东太平洋是负相关,而在西太平洋为显著负相关。

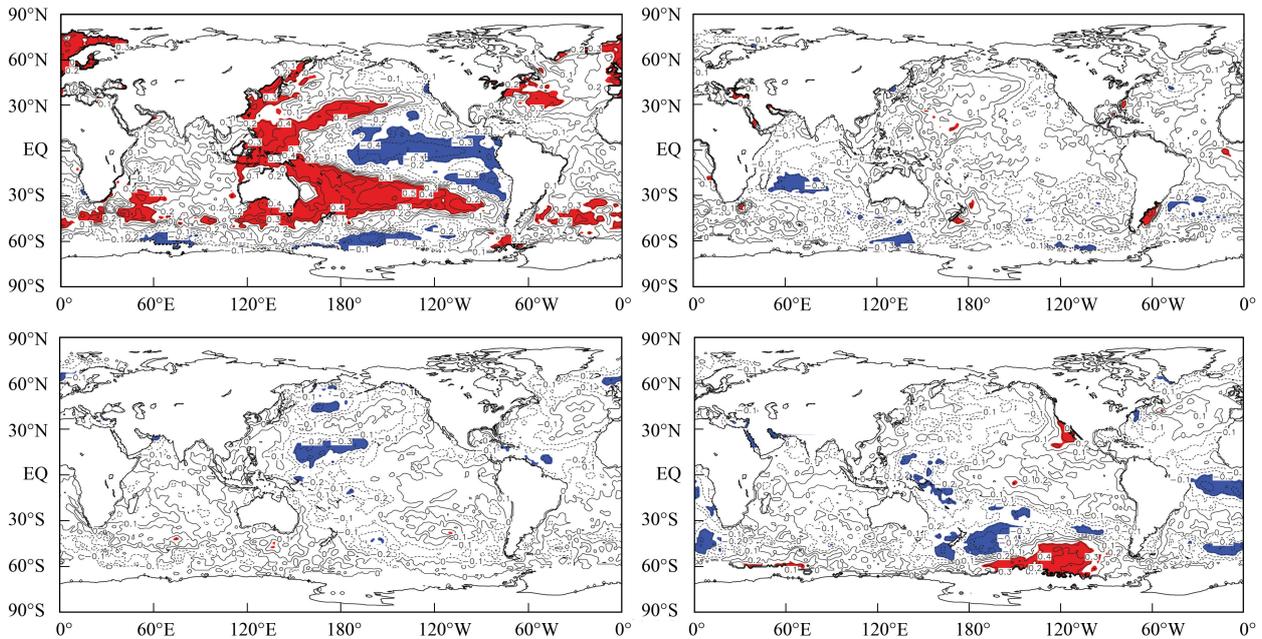


图3 全球前月海温的标准化距平场与澜沧江流域春季旱涝 Z 指数的 SVD 异质相关 (a, b 分别为第 1 和第 2 模态)

Fig. 3 SVD heterogeneity related global before winter SST anomaly field of standardization in the Langcang River Valley and the spring drought index of Z (a, B respectively for the first and the second mode)

2.3.2 海温异常现象与澜沧江流域灾害频次及波动相关性

EMD 方程的分解量 IMF 值显示, NINO 的春、夏、秋、冬以及年际变化 imf1、imf2、imf3、平均值分别为 3.03、2.78、2.94、2.94、3.32; 5.56、4.76、5.56、5.56、5.56; 11.11、8.33、10、10、11.11 (参见图 4); 春季和年际 IMF4 值还显示出 20 年的波动, 从均生函数预测模型 (MGF) 运行结果来看, 过去 55 年历史数据以及延至 2050 年气候变化趋势来看, 春季表现平稳, 夏季和年际变现为上升趋势, 而秋冬两季则表现出下降趋势 (参看图 5), 它的均方根误差为 0.32。而以上研究结果显示, 暴雨频次序列 IMF1-IMF5 的平均周期分别为 2.8 a、4.2 a、6.2 a、9.4 a、16.7 a、25 a, 而降水序列的平均周期分别为 2.9 a、7.1 a、15.4 a、30.8 a, 可见二者之间都存在近 3 年、10 年的周期, 未来 NINO 频率呈现微弱下降趋势, 这与该区域暴雨灾害的趋势也表现出一定的一致性趋势, 同时, 降水量和暴雨频度序列的 IMF1 和 IMF2 周期在 2—7 a 之间, 与 NINO 在年际变化上的信号相吻合。ENSO 是海气耦合系统中最强的年际变化信号, 它对东亚夏季风的强弱变化和我国夏季降水的分布有重要影响, 可以推断澜沧江流域暴雨和干旱灾害与 ENSO 有重要联系。

一些学者在分析中国近 500 a 旱涝时发现^[23-27], 中国东部夏季降水有世纪周期存在, 认为 1873—2000 年东亚夏季风有显著的 80 a 周期, 其次尚有 40 a 周期、8—10 a 周期及准 2 a 周期等。这些结论与本文的分析结果得出的结论有一定差异, 主要原因在于前者是从中长期时间序列得出的长期波动规律, 而本文研究结果更多的是对中短期震荡规律的研究。

为了进一步研究澜沧江区域暴雨及早灾的归因问题, 探讨海温异常与气象灾害的关联, 选择澜沧江流域 100 年来暴雨日数、暴雨量、大旱频次分别与西太平洋海表温度 NINO 指数以及 SOI 指数做相关分析。研究发现, NINO 指数无论春夏秋冬或年际都与暴雨和干旱灾害频次呈现负相关, 与 SOI 指数则呈现正相关, 其中,

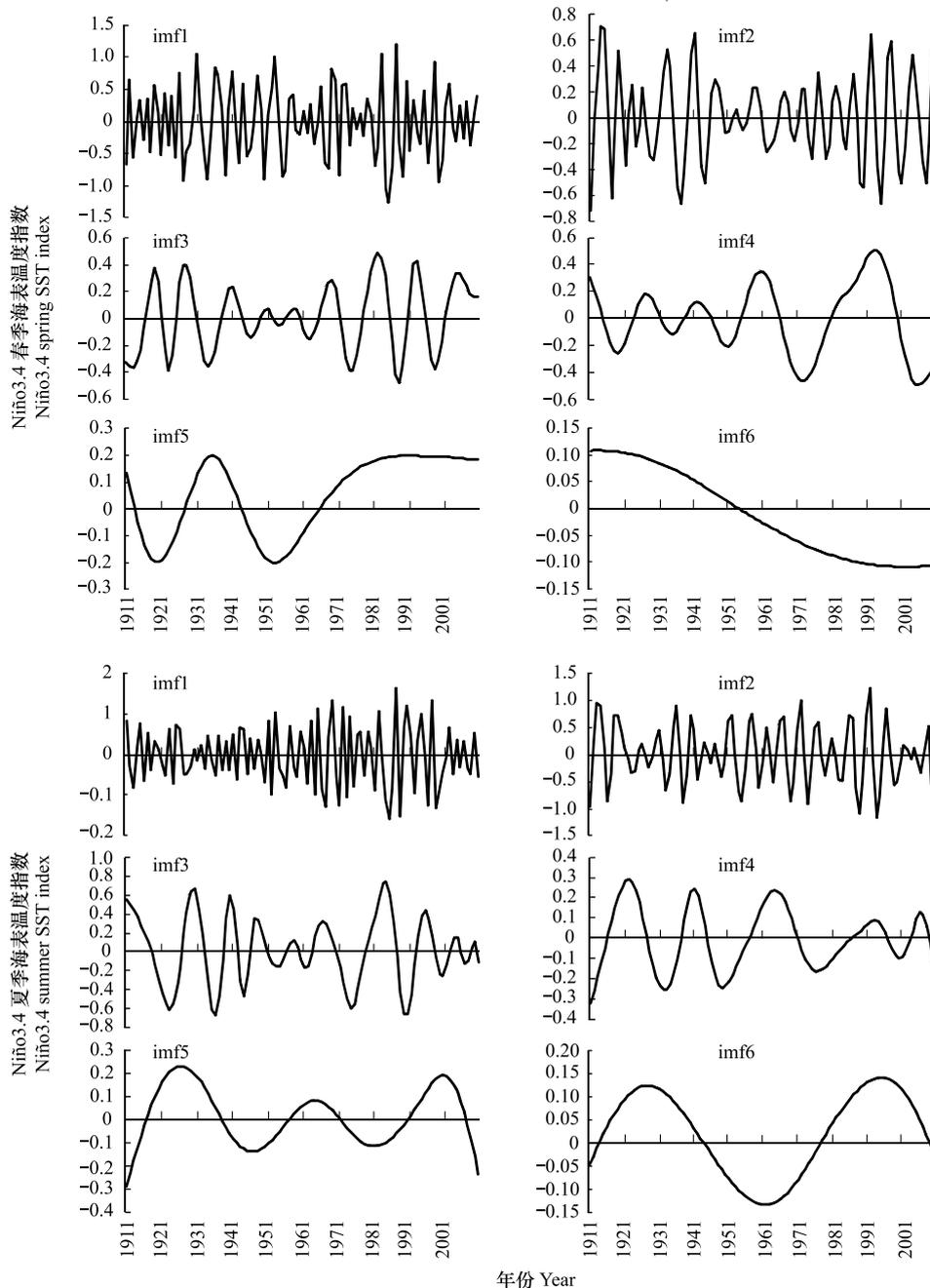
表 4 NINO 指数 EMD 方程分解结果

Table 4 NINO of Structural features, and the decomposed results

季节 Season	Imf1	Imf2	Imf3	Imf4	Imf5	Imf6	趋势 trend
春 Spring	3.03	5.56	11.11	20	--	--	平稳
夏 Summer	2.78	4.76	8.33	--	--	--	上升
秋 Autumn	2.94	5.56	10	--	--	--	下降
冬 Winter	2.94	5.56	10	--	--	--	下降
年际 Annual	3.32	5.56	11.11	20	--	--	上升

NINO 指数与干旱相关性在秋冬和年际接近-0.3, 春夏没有通过 T 值检验, 与暴雨负相关性也是在秋冬以及年际表现明显; 相对的, SOI 指数与该区域暴雨的相关性表现较弱, 与暴雨的相关系数仅在冬季通过了相关检验, 与干旱的相关系数呈现正相关, 且超过了 0.3(具体见表 5)。

可见, NINO 指数与暴雨相关性与 SOI 指数与暴雨的负相关性明显, 而 SOI 指数与干旱的正相关性明显,



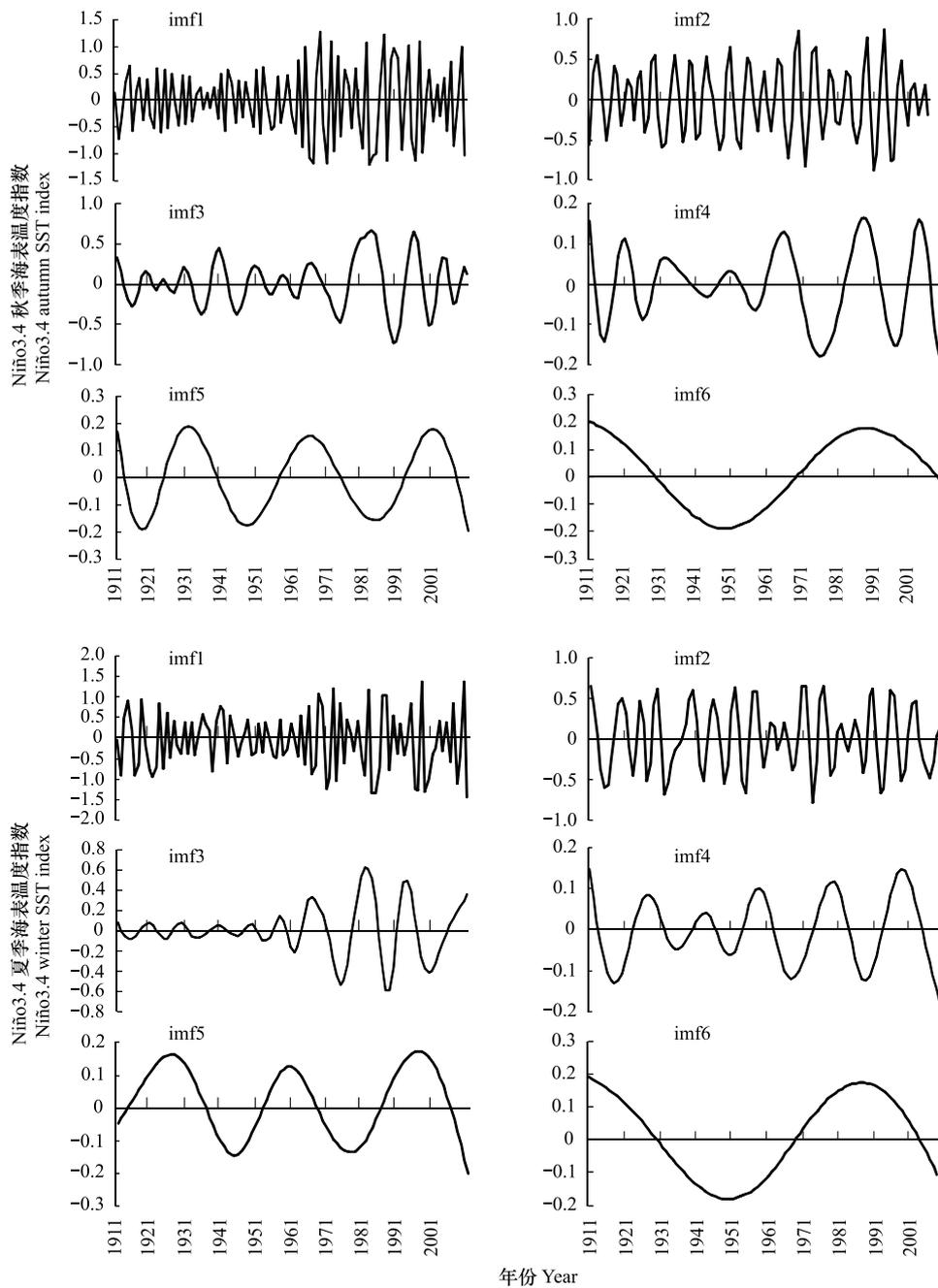


图4 NINO 指数 EMD 分解 IMF 分析图(a\b\c\d 分别表示春季、夏季、秋季、冬季分解图)

Fig. 4 NINO EMD index decomposition analysis diagram of IMF (a\b\c\d\ e represent spring, summer, autumn, winter, the interannual IMF decomposition diagram)

据此,可以推断,该流域的暴雨可能受 ENSO 影响,而 SOI 则是干旱的重要制约因素之一。海温对旱涝的影响,实际上是通过海温对大气环流的响应产生的,大量的统计、诊断以及数值试验的结果也证明海温的热力异常对中、高纬大气环流异常有非常重要的影响,是对以上结论的重要佐证。

3 小结与讨论

(1) 夏季海温场与廊沧江流域旱涝 Z 指数场的 SVD 第一模态表明,与澜沧江流域春季的降水有显著性关系是热带太平洋以及印度洋流域在南纬 30°到 60°之间海温有显著性相关,当赤道中东太平洋海温偏高,北太平洋海温偏低时,流域夏季中部地区偏涝。第二模态,全球海温呈现厄尔尼诺类型的分布,中东太平洋、西

太平洋为显著负相关。

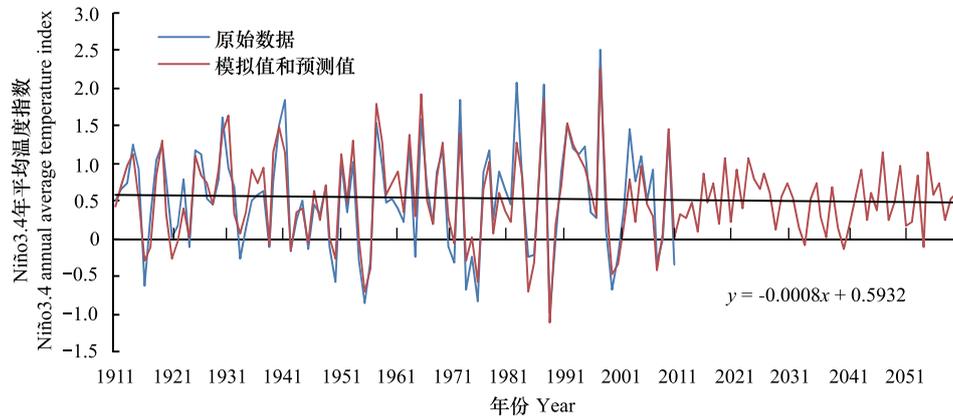


图 5 NINO 指数年际波动及未来 50 年的趋势模拟

Fig. 5 NINO simulation of interannual fluctuations and the trend of future 50 years

表 5 NINO、SOI 与澜沧江流域灾害相关系数

Table 5 The coefficient of Enso, Soi and gallery Lancang River Basin disasters

极端海温事件 Extreme temperature events	年 Annual	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
Niño 和干旱 Niño and drought	-0.30	-0.11 **	-0.25 **	-0.3	-0.34
Niño 和暴雨 Niño and rainstorm	-0.22	-0.09	-0.16	-0.23	-0.27
SOI 和干旱 SOI and drought	0.31	0.17 **	0.17 **	0.32	0.39
SOI 和暴雨 SOI and rainstorm	0.2 ^{0**}	0.02	0.16	0.20	0.29

** 标记为未通过 0.05T 检验;SOI 为南方涛动指数(Southern Oscillation Index)

(2) 降水量和暴雨频度序列的 IMF1 和 IMF2 周期在 2—7 a 之间,与 ENSO 在年际变化上的信号相吻合,Niño 指数无论春夏秋冬或年际都与暴雨和干旱灾害频次呈现负相关,而 SOI 指数则呈现正相关,其中,Niño 指数与干旱相关性在秋冬和年际接近-0.3,SOI 指数与该区域暴雨的相关性表现较弱,与干旱的相关系数呈现正相关,且超过了 0.3,可见,在与暴雨相关性中 Niño 指数相关性比 SOI 指数相关性明显,可推断澜沧江流域暴雨和干旱灾害与 ENSO 有重要联系。

澜沧江区域气候变化和灾害天气的波动规律与全球海温的极端变化具有联动性,区域灾害与全球气候变化具有一定程度的关联性,其两者之间的定量关联和相关作用机理是下一步研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] Kao S C, Govindaraju R. A copula-based joint deficit index for droughts. *Journal of Hydrology*, 2010, 380(1/2): 121-134.
- [2] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [3] Fang X Q, Chen L, Li S. Changes of dominant periods of flood disaster in China during 1644-2004. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 656-661.
- [4] Liu H Y, Lin Z S, Zhang M Y. Wavelet analysis of area affected by flood disaster in China after 1949. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 43-48.
- [5] Yin Y X, Xu Y P, Chen Y. Analysis of variation of flood-affected area in China based on complexity measurement. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(2): 241-246.
- [6] Chen Y, Yin Y X, Chen X W. Change of flood disasters in China since the 1880s and some possible causes. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2110-2120.
- [7] Wang Z, Pei T, Wei G H, Liu X L. The statistical characteristics of natural disasters last 40 years in China. *Journal of Natural Disasters*, 1994, 3(2): 16-21.

- [8] Gong D Y. Seasonal precipitation of China: 1880—2002. <http://adrem.org.cn/Faculty/GongDY/>.
- [9] Wei F Y. Diagnostic and Forecasting Techniques in Modern Climate Statistics. Beijing: China Meteorological Press, 1999.
- [10] Gong Z Q, Zou M W, Gao X Q, Dong W J. On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54 (8): 3947-3957.
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shih H H, Zheng Q, Yen N C, Tung C C, Liu H H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [12] Rilling G, Flandrin P, Goncalves P. On Empirical Mode Decomposition and its algorithms. Technical report, UMR, INRIA, France. IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, 2003.
- [13] Zhu J H, Wang S W, Mu Q Z. 80 a oscillation of summer precipitation in North China and its correlation with Asia summer monsoon. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(11): 1205-1209.
- [14] Wang S W, Zhao Z C. The 36-yr. wetness oscillation in China and its mechanism. *Acta Meteorologica Sinica*, 1979, 37(1): 64-73.
- [15] Mo R P. The interannual variation of precipitation and temperature in China and the relationship with ENSO. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(2): 143-149.
- [16] Zuo H C, Lü S H, Hu Y Q. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(2): 238-244.
- [17] Ye D Z, Huang R H. The Laws of Flood / Drought and Its Causes in the Yangtze River and the Yellow River. Ji'nan: Shandong Science Technology Press, 1996: 15-16.
- [18] Zheng S Z. The comparison of the distribution of flood in China. *Disaster Reduction in China*, 1995, 5(3): 32-35.
- [19] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, Pan X H. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [20] Liu B H, Xu M, Henderson M, Qi Y. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960-2000. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012)*, 2005, 110(D8), DOI: 10.1029/2004JD004864.
- [21] 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 1951—2002 年中国平均最高、最低气温及日较差变化. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 728-735.
- [22] 谈建国, 黄家鑫. 热浪对人体健康的影响及其研究方法. *气候与环境研究*, 2004, 9(4): 680-686.
- [23] 任福民, 翟盘茂. 1951—1990 年中国极端气温变化分析. *大气科学*, 1998, 22(2): 217-227.
- [24] 黄平, 黄荣辉. El Niño 事件对其衰减阶段夏季中国降水季节内演变的影响及其机理. *大气科学学报*, 2010, 33(5): 513-519.
- [25] 李超, 张庆云. 春季长江中下游旱涝的环流特征及对前期海温异常的响应. *气象学报*, 2013, 71(3): 452-461.
- [26] 陈永利, 赵永平, 王凡, 冯俊乔. 热带太平洋次表层海温异常年代际变率及其对中国气候异常的影响. *热带气象学报*, 2011, 27(6): 785-798.
- [27] 周波涛, 赵平, 崔绚. 亚洲-太平洋涛动变化与北太平洋海温异常的联系. *科学通报*, 2010, 55(1): 74-79.