

珠江流域干旱时空变化的经验诊断分析*

陈子燊^{1,2}

(1. 中山大学新华学院, 广东 广州 510520;
2. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 根据 1961~2011 年珠江流域多时间尺度标准化蒸散发指数 (SPEI), 应用旋转经验正交函数分解、趋势和突变检验、小波谱与小波全域相干谱分析等方法, 分析珠江流域该时期干旱空间分布与时间变化特征。结果显示: 1) 干旱空间分布与时间变化差异明显, 20 世纪 70 年代以来干旱发生事件持续增多, 21 世纪以来珠江流域中旱、重旱事件、干旱历时和强度都显著加大, 秋旱尤为突出; 2) 根据 SPEI 的 REOF 时空分解, 可将珠江流域划分成 6 个空间模态, 其载荷中心分别位于的东江流域、桂北、桂东南、桂西南、黔南和滇东, 各分区普遍存在干旱趋势, 其中黔南和滇东干旱趋势显著, 已成为珠江流域的干旱中心; 3) 6 个分区的干湿变化具有 2~8 a 的厄尔尼诺变化的振荡周期, 部分分区显示与太阳黑子活动关联的 11 a 及 22 a 变化周期, 各个分区对 ENSO 事件的响应存在显著差异。

关键词: 珠江流域; 标准化降水蒸散量指数; 干旱时空变化; 旋转经验正交函数; 小波分析; 小波全域相干谱
中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2020) 04-0033-10

Empirical diagnostic analysis on spatial and temporal variations of droughts in the Pearl River basin, China

CHEN Zishen^{1,2}

(1. Xinhua College of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510520, China;
2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the multiple time scale index of standardization evaporation (SPEI) in the Pearl River basin from 1961 to 2011, the spatial structure distribution and temporal variation characteristics of drought in the Pearl River basin were analyzed by using the methods of rotating empirical orthogonal function decomposition, trend and mutation tests, wavelet spectral and wavelet global coherence spectral analysis. The results show that: 1) The spatial distribution and temporal variation of drought in the Pearl River basin are significantly different in the past 50 years; the number of drought events has been increasing since the 1970s. The duration and intensity of drought events in the Pearl River basin have increased significantly since the 21st century. 2) According to SPEI's REOF spatial decomposition, the Pearl River basin can be divided into 6 spatial modes, and the load centers are located in the south Guizhou and east Yunnan of the Dongjiang river basin in the north Guangxi, the southeast Guangxi, the southwest Guangxi, and the south Guizhou and the east Yunnan, respectively. There is a general drought trend in each region. The southern Guizhou and eastern Yunnan have become the drought center of the Pearl Riv-

* 收稿日期: 2019-09-22

基金项目: 国家自然科学基金 (41371498, 41771044); 广东省科学院发展专项资金项目 (2019GDASYL-0104003, 2020GDASYL-20200401001); 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金 ([2018] KJ08); 广东省科技计划项目 (2018B030324002)

作者简介: 陈子燊 (1952年生), 男; 研究方向: 极端水文事件与风险研究; E-mail: eesczs@mail.sysu.edu.cn

er basin. 3) The wet-dry variation in six zones has an oscillation period of 2-8 year El Nino variation. Some regions show 11 year and 22 year change periods associated with sunspot activities, and the response of each region to ENSO events is significantly different.

Key words: the Pearl River basin; standardized precipitation evapotranspiration index; spatial and temporal variation of drought; rotation of empirical orthogonal function; wavelet analysis; wavelet global coherence spectrum

干旱是全球影响最大的自然灾害之一,在中国科学技术蓝皮书中,干旱已列为我国气候灾害之首^[1]。干旱属于渐进性灾害,通常灾前无明显征兆,但是当灾害已形成时已构成危害。四类干旱中,气象干旱的直接表现是降水量减少,通常成为农业干旱的前兆。而被认为是气象干旱和农业干旱的延续和发展的水文干旱通常是通过河道径流量、水库蓄水量和地下水位值加以确定,降水量持续减少将影响地区生产生活用水,将形成水资源供需不平衡的社会经济干旱。

目前国内外对干旱监测主要使用标准化降水指数(SPI)、降水距平百分率(R)、Z指数、湿润度指数(MI)、综合气候干旱指数(CI)、土壤水分(SM)指标和帕默尔干旱指数(PDSI)等^[2-10]。其中,被普遍接受的SPI由于假定不同地点旱涝发生概率相同,无法标识频发地区,没有考虑水分的支出,而且由于降水变异性大大高于气温和潜在蒸散发等变量,是否适用于干旱识别还需进一步观测检验。Vicente-Serrano等^[11]提出了标准化降水蒸散量指数(SPEI, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index),类似于标准化降水指标(SPI),但SPEI融合了包括气温蒸散作用与降水之间的水量平衡关系。Sergio等^[12]的研究表明,SPEI可与基于水分平衡原理、计算可能蒸散发量、物理意义较清晰的自校准帕默尔干旱严重程度指数(sc-PDSI, Wells等^[13])相比较。相对于PDSI, SPEI计算相对简便,不仅可消除降水和气温的时空分布差异,还能有效地反映不同区域和时段的旱涝状况,同时具有概率分布和多时间尺度的优势。李伟光等^[14]应用SPEI对中国59年来干旱化的空间分布、四季干旱趋势变化和全国极端干旱事件发生频次进行了分析,并定性分析了干旱发生的原因。陈子燊等^[15]利用SPEI分析了广东1962~2007年来的干湿时空变化特征,研究结果显示,西江流域和北江中下游流域、雷州半岛为主的粤西沿海流域存在着显著的干旱趋势,广东干湿变化普遍具有2~8a的振荡周期,其与ENSO事

件的关联性还有待进一步探索。目前, SPEI已成为分析干旱演变趋势新的理想指标,并应用于干旱与农作物生产评估和水资源管理等领域^[16-18]。进入21世纪以来,珠江流域旱灾强度和频度愈益加大,深入探索其干旱时空变化特征,可为应对区内社会经济干旱问题和水资源风险管理提供科学依据^[16]。

1 研究区域概况

珠江流域是西江、北江、东江三江水系和珠江三角洲水系的总称。流域跨云南、贵州、广西、广东、湖南、江西6省区,面积约45万 km^2 (包括流经越南的1万多 km^2)。珠江流域下垫面类型复杂多样,地形北接南岭山地,西连云贵高原,从西向东总体上可分为3大块:云贵高原、两广丘陵及其山间盆地、珠江三角洲。由于地处对气候变化敏感的南海季风和西南季风交叉影响区,海-陆-气交换强烈,珠江流域雨量充沛,但时空分布不均匀。多年平均降雨1200~2200mm,全流域多年平均降雨为1470mm。然而,珠江流域水面平均蒸发量高达1400mm,中西部往中北部降水依次递减,属于典型的干旱、半干旱少雨区域^[17]。

2 资料与研究方法

采用国家气象信息中心基础资料专项整编的中国地面水平分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的中国气温、降水月值格点数据。数据经交叉验证、误差分析,质量状况良好。经提取获得珠江流域169个格点在1961年1月至2011年12月期间的逐月气温、降水数据。珠江流域河流与行政区位置参见图1。

2.1 标准化降水蒸散发指数和多变量ENSO指数

SPEI计算方法如下:采用Thornthwaite方法计算地表潜在月蒸散发量;计算特定时间尺度降水与蒸散的差值;采用3参数对数逻辑斯特(log-logistic)概率分布计算差值的累积概率;对累积概率密度加以标准正态化。详细的计算方法可参见Vicente-Serrano等^[11]。SPEI干旱等级划分见表1。

表1 SPEI的干旱等级标准
Table 1 SPEI denoted dry grades

干旱等级	极旱	重旱	中旱	基本正常
SPEI值	$SPEI \leq -2.0$	$-2.0 < SPEI \leq -1.5$	$-1.5 < SPEI \leq -1.0$	$-1.0 < SPEI \leq 1.0$
累积概率%	< 2.3	$[2.3 \sim 6.7)$	$[6.7 \sim 15.9)$	$[15.9 \sim 84.1)$

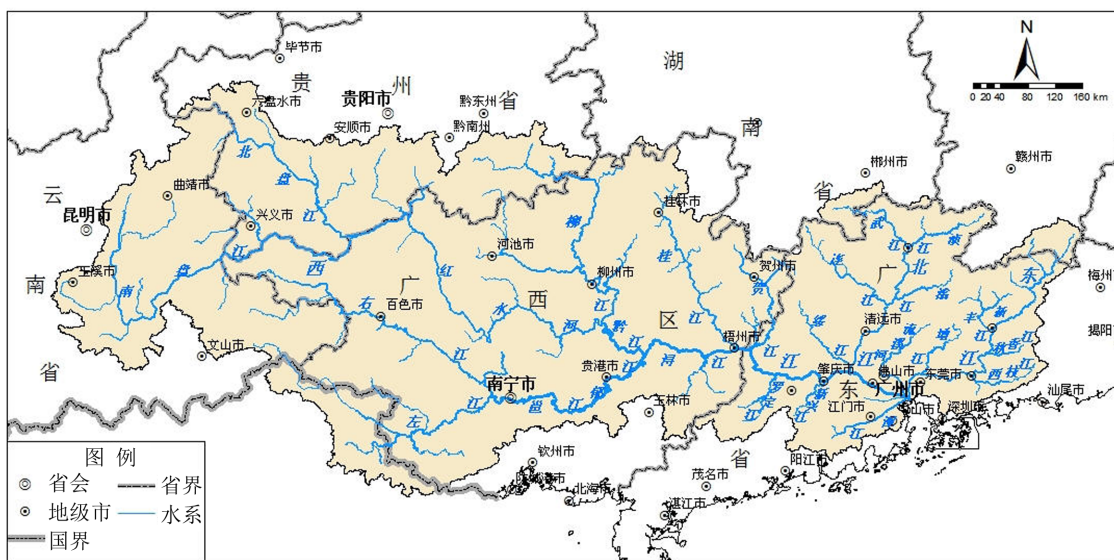


图1 珠江流域河流与行政区位置

Fig. 1 Pearl river basin river and administrative location

使用的多变量ENSO事件指数 (MEI) 可由网站 <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso> 下载。

2.2 时空分解、变化趋势与突变检验

应用旋转经验正交函数 (REOF) 对要素场 A_{ij} 进行时空分解。计算方法如下：设要素场 $A = f(t, x)$ ，其中 t 表示时间， x 表示空间点的标号，以 A_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 表示第 j 次时间第 i 个空间点上的要素值。其中， m 为时间序列的长度， n 为测点数。观测资料矩阵 $A_{m \times n}$ 可分解为两部分：

$$A_{m \times n} = V_{m \times n} \times T_{m \times n} \quad (1)$$

其中， $V_{m \times n}$ 的每一列为矩阵 $\frac{1}{m} AA^T$ 的归一化特征向量， A^T 为 A 的转置矩阵，矩阵 $T_{m \times n}$ 为特征向量的权重系数，将 $T_{m \times n}$ 标准化，记为： $\Lambda^{-2}T$ ，其中 Λ 为 $\frac{1}{m} AA^T$ 的特征值构成的对角阵。记， $L = V\Lambda^{-2}$ ，则：

$$A = V\Lambda^{-2}\Lambda^{-2}T = LF \quad (2)$$

L 为因子荷载阵， F 为因子阵。按照方差极大正交旋转原则将 F, L 加以旋转，使得 L 中各列元素平方的方差之和达最大。由此分解得到的前几

个空间场 (空间模态) 和相应时间向量，使得空间结构更加清晰，有利于对研究要素的空间分区^[19]。

采用世界气象组织 (WMO) 推荐的非参数 Mann-Kendall 检验方法计算时序长期趋势与突变^[20]。

2.3 小波时频分析与相干性检验

采用目前广泛应用的复小波函数 Morlet 小波作为母小波，时间序列 $f(t)$ 的 Morlet 小波变换为^[21]：

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

式中， a 为伸缩尺度参数； b 为平移参数。 ψ^* 为复共轭。

在整个时间域上平均的小波方差谱为子波能量在各尺度的分布为：

$$\overline{W}^2(a) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(a, b)|^2 db \quad (4)$$

小波能谱中的峰值显著性通过红噪音的小波能量谱来检验：

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos(2\pi k/N)} \quad (5)$$

式中, P_k 为傅立叶谱, k 为频率指数, $k=0, \dots, N/2$, α 为时间序列滞后 1 的相关系数, N 为时间序列长度。两个时间序列 X 、 Y 的交叉小波变换为:

$$W_{XY}(S, t) = W_X(S, t)W_Y^*(S, t) \quad (6)$$

式中, $W_X(S, t)$ 、 $W_Y(S, t)$ 分别为时间序列 X 、 Y 的小波变换。

以小波平方相干函数度量两个时间序列 X 、 Y 之间的全域相干性:

$$R_n^2(s) = \frac{|\langle s^{-1}W_n^{XY}(s) \rangle|^2}{\langle s^{-1}|W_n^X(s)|^2 \rangle \langle s^{-1}|W_n^Y(s)|^2 \rangle} \quad (7)$$

式中, 符号 $\langle \rangle$ 表示时间与尺度的光滑。最后, 采用蒙特卡罗方法计算红噪声背景下的统计显著性 [22-23]。

3 珠江流域干旱时空变化特征分析

3.1 珠江流域干旱事件及 SPEI 适用性

为分析 1961~2011 年期间珠江流域的干旱总体演变特征, 首先对流域逐月温度和降水进行区域平均, 再计算 SPEI。以 -1 为 SPEI 游程的截断水平, 干旱事件的历时为 SPEI 连续小于等于 -1 的时间跨度, 干旱事件的强度为干旱事件期间 SPEI 最小值。分析 3、6、12 和 24 个月 4 种不同时间尺度的 SPEI 随时间的振荡过程, 从图 2 可见 3 个月和 6 个月时间尺度 SPEI 表现出季节变化特征, 显示珠江流域几乎历年都出现干旱, 而 12 个月和 24 个月时间尺度的 SPEI 具有明显的年际及年代际振荡特征。统计表明, 期间珠江流域 3 个月时间尺度的干旱事件出现 43 次, 平均持续时间 2.2 个月, 干旱平均强度 1.5。最大持续时间始于 1998 年 9 月, 历时 8 个月。干旱最大强度为 2.5, 出现在 2009 年 2 月, 达特旱级别; 6 个月时间尺度的干旱事件共有 29 个, 平均持续时间 3.3 个月, 最大持续时间始于 2009 年 5 月, 历时 11 个月。干旱最大强度为 2.3, 出现在 1998 年 12 月; 12 个月时间尺度的干旱事件共有 18 个, 平均持续时间 5.1 个月, 历时达 13 个月的最大干旱持续时间分别始于 1963 年 5 月和 2009 年 8 月。其中, 1963 年 5 月干旱强度为 2.1, 达特旱级别; 24 个月时间尺度的干旱事件有 10 个, 平均持续时间 10.4 个月, 最大持续时间始于 2010 年 2 月, 历时 23 个月。华南出现干旱已属常态, 并屡现特旱, 如 1963 年出现跨年的重旱和特旱事件; 1998 年秋到 1999 年春出现持续 8 个月的秋、冬、春 3 季特大干旱 [24]; 2009 年珠江流域西部也

发生了秋、冬、春连旱, 遭受百年一遇大旱的江河来水比特大干旱年 1963 年的流量还少近 30%。对 1961~2011 年来干旱事件的分析表明, SPEI 对珠江流域出现的包括重旱和特旱在内的干旱事件、强度与历时等特性有良好的识别能力, 适用于珠江流域干旱事件的监测与分析。

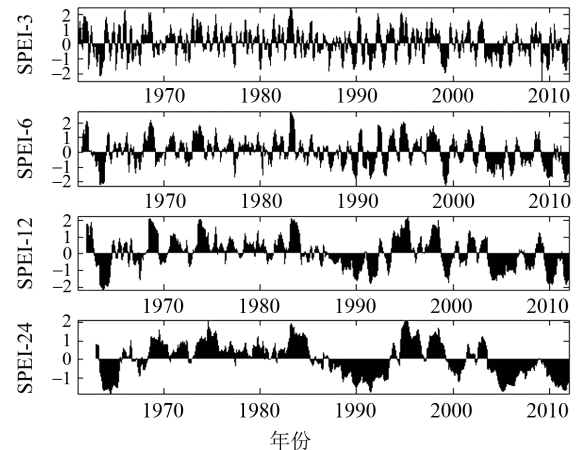


图 2 珠江流域 SPEI 指数的时间振荡

Fig. 2 The time oscillation of SPEI of the Pearl River basin

珠江流域不同时间尺度、不同年代与不同季节干旱事件发生频次的统计结果如表 2、图 3 所示, 具有以下特征: 1) 1961~2011 年来不同时间尺度不同年代干旱事件发生累计频次变化幅度十分明显, 21 世纪前 10 a 干旱出现频次已超过 20%, 反映干旱问题愈加突出; 2) 不同年代珠江流域干旱中心位置变化较大, 20 世纪以来以流域西北区域为干旱中心; 3) 干旱事件具有长期增多的变化趋势, 20 世纪 70 年代以来不同时间尺度的干旱事件频次均出现较大幅度的增加, 其中 2001 年以来中旱和重旱级别的干旱事件出现频次增加明显; 4) 不同年代不同季节的干旱事件与干旱类型发生频次呈较强的随机性, 四季普遍存在干旱现象, 夏旱和冬旱发生频次则呈现波动特征。20 世纪 80 年代以来春旱和秋旱有加重趋势, 尤其是秋旱十分突出, 和黄晚华等 [10] 研究得到的结果相近。

3.2 干旱空间分布和演变特征

为了进一步了解珠江流域内不同区域干旱的时空分布特征, 对珠江流域 169 个格点 3 个月尺度的 SPEI-3 作经验正交函数 (EOF) 分解, 再对提取的前 6 个特征向量做方差最大旋转。旋转前 (EOFs) 和旋转后 (REOFs) 的方差贡献见表 3, 前 6 个模态累积解释方差贡献已占总方差的 85.8%。图 4 为 6 个旋转特征向量等值线图, 可以

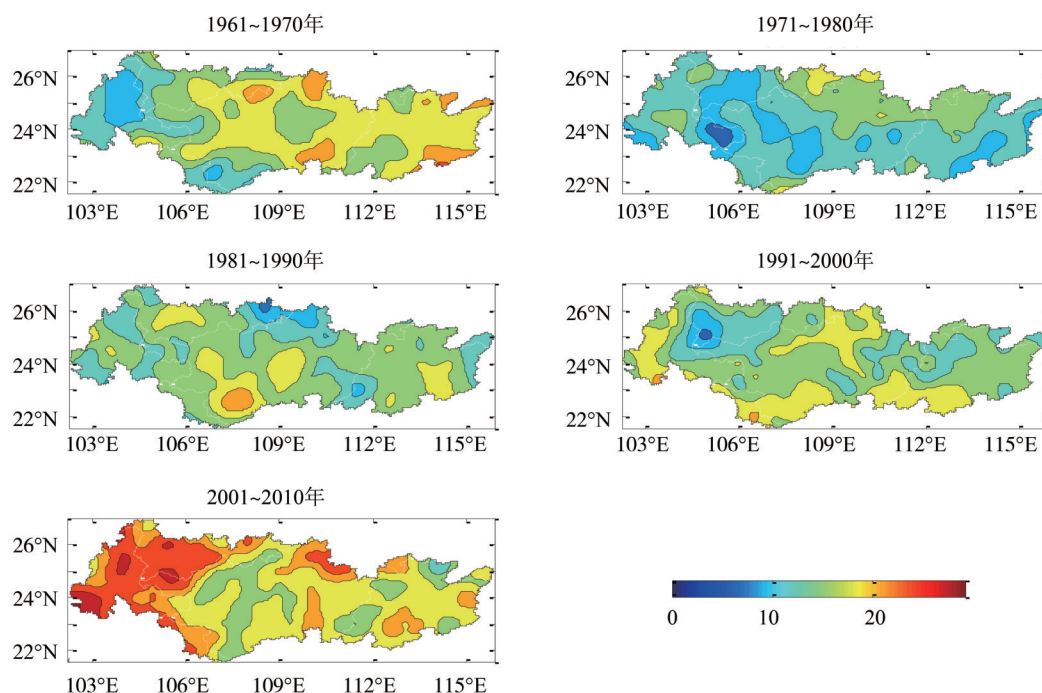


图3 珠江流域不同年代干旱事件发生频次的空间分布

Fig. 3 Spatial variation of the frequencies of drought among different decade in the Pearl River basin.

表2 不同年代间不同时间尺度与季节干旱事件发生频次

Table 2 The frequencies of drought occurrence among different time scales and seasons in different decades

年份	时间尺度/月	中旱	重旱	特旱	旱累计	季节	中旱	重旱	特旱	旱累计
1961~1970		11.06	4.69	1.01	16.76		11.16	3.57	0.39	15.13
1971~1980		8.25	2.83	0.05	11.13		9.76	5.11	0.69	15.56
1981~1990	3	10.75	5.09	0.31	16.15	春季	6.19	1.85	0.51	8.56
1991~2000		12.31	4.88	0.27	17.46		9.39	5.82	0.26	15.46
2001~2010		13.64	6.77	1.13	21.54		10.67	8.58	2.88	22.13
1961~1970		8.55	4.42	1.49	14.46		11.97	7.30	1.54	20.81
1971~1980		6.51	2.03	0.02	8.56		9.05	4.38	0.10	13.53
1981~1990	6	10.77	4.49	0.45	15.71	夏季	18.30	3.81	0.08	22.19
1991~2000		9.76	5.36	0.58	15.70		10.24	3.41	0.10	13.75
2001~2010		15.81	7.09	1.00	23.91		10.32	3.93	0.12	14.36
1961~1970		9.46	6.99	1.38	17.84		11.93	4.26	0.26	16.45
1971~1980		4.55	0.56	0.00	5.11		6.96	1.14	0.00	8.11
1981~1990	12	10.68	2.62	0.09	13.39	秋季	10.24	3.41	0.02	13.67
1991~2000		10.34	4.95	0.41	15.70		15.62	5.05	0.12	20.79
2001~2010		19.26	7.78	1.36	28.39		19.88	10.24	0.26	30.37
1961~1970		13.46	7.19	0.12	20.78		13.31	2.25	1.30	16.86
1971~1980		2.20	0.08	0.00	2.28		14.14	3.24	0.00	17.39
1981~1990	24	11.38	3.67	0.00	15.06	冬季	15.52	3.95	0.00	19.47
1991~2000		10.74	4.36	0.31	15.41		11.66	4.62	0.08	16.36
2001~2010		21.67	7.72	0.35	29.73		12.73	3.38	0.46	16.57

看出, 旋转后的荷载相对集中。按方差大小排序的 6 个空间模态为: 第 1 模态(图 4a) 位于东江流域(图中阴影区, 下同), 旋转后该模态的方差贡献占总方差的 17%。第 2 模态(图 4b) 的荷载中心位于桂北地区, 旋转后该模态的方差贡献率为 15.7%。第 3 模态(图 4c) 的中心位于桂东南地区, 方差贡献率 15.7%。第 4 模态(图 4d) 的中心位于桂西南地区, 方差贡献率 15.5%。第 5 模态和

第 6 模态高荷载区分别位于珠江流域的黔南区域和滇东地区(图 4e, f), 方差贡献率分别为 11.6% 和 10.3%。黔南和滇东两个区域历来受干旱影响, 而且自 20 世纪 90 年代末以来干旱出现频率增大并愈趋严重。按照高荷载区标准划分的珠江流域 6 个区域基本没有重叠, 分区结果显示出了珠江流域干旱空间分布特征。

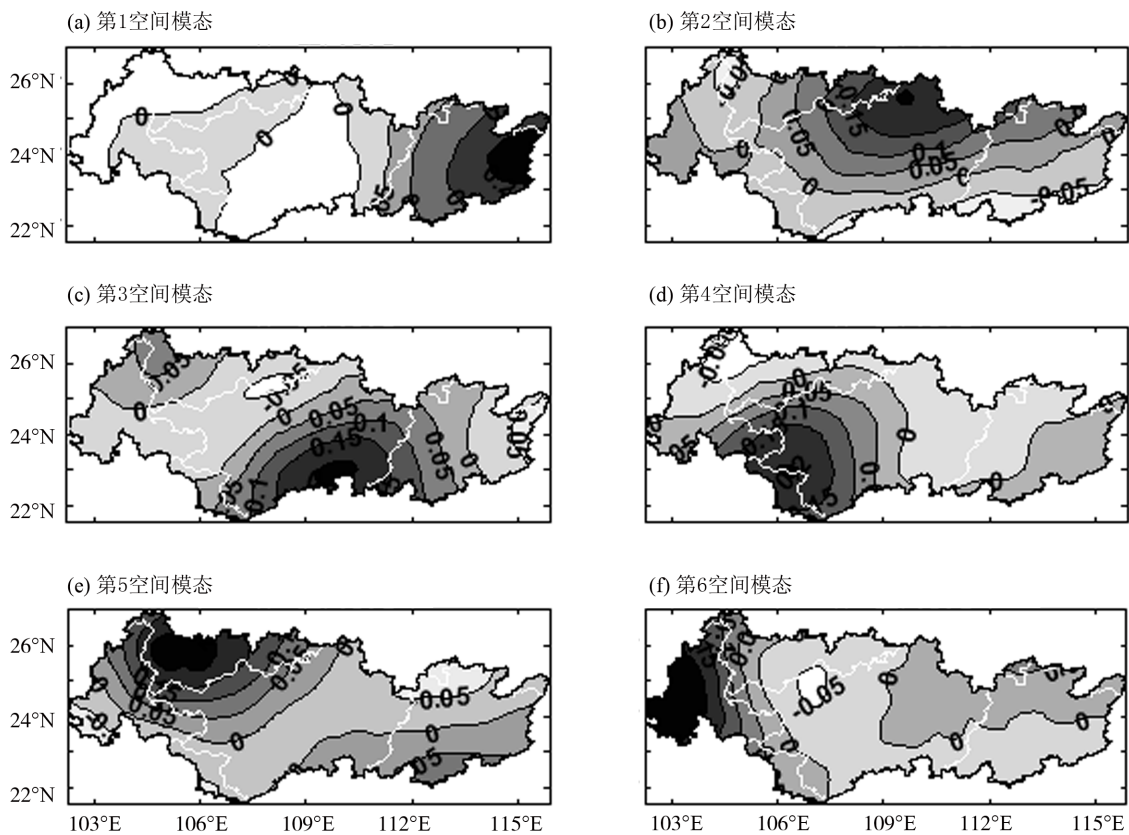


图 4 珠江流域 SPEI 前 6 个 REOF 空间模态

Fig. 4 The first six modes of SPEI from REOF in the Pearl River basin

表 3 前 6 个模态的方差贡献

Table 3 The contributions to total variance from the first six modes

模态	1	2	3	4	5	6	累积贡献率/%
旋转前	51.6	15.3	7.1	5.9	3.2	2.8	85.8
旋转后	17.0	15.7	15.7	15.5	11.6	10.3	85.8

利用 6 个空间模态所对应的时间函数作趋势检验, 图 5 中的 SPEI 各个分区的时间函数经检验后达置信水平 95% 的趋势采用粗直线表示, 表示为 95% 置信水平, 否则表示不存在显著的趋势变化。一致的负倾向率检验结果反映 6 个分区均向干旱发展, 但其中只有分区 5 (黔南区域) 和分区 6 (滇

东地区) 呈现显著变干趋势, 反映珠江流域旱涝演变具有全流域一致性特点。突变检验结果则表明, 6 个分区大约在 2002 年前后都出现旱涝的转变(为省篇幅图略)。

3.3 各分区旱涝变化周期及其对 ENSO 的响应

分别代表 6 个空间模态的时间向量小波功率谱

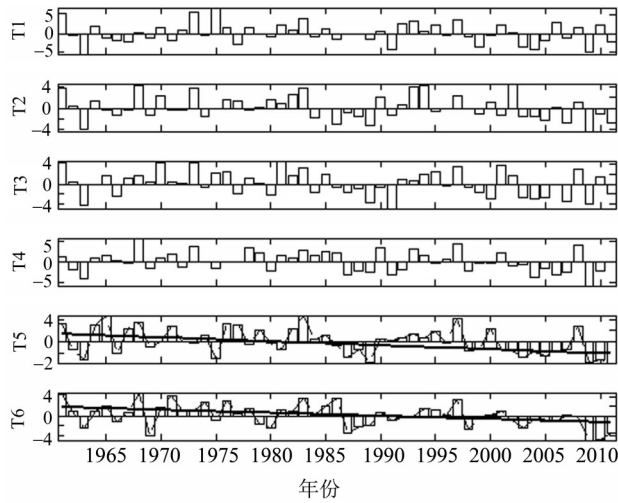


图5 珠江流域SPEI 6个REOF时间向量趋势检验

Fig. 5 The trend tests of first six time functions of SPEI from REOF in the Pearl River basin

及其小波方差谱见图6。图中黑粗等值线表示存在置信水平达95%的时频域。由图6可见，不同分区水旱变化的时间-尺度均无长时段连续性，显示旱涝演变具有显著的时频局部化的振荡特征。经红躁音谱（小波方差谱中的短划线）检验提取的置信水平为95%的小波方差谱的显著周期表明受“厄尔尼诺”或“拉尼娜”影响，各个分区旱涝普遍具有2~7a的振荡周期。对此，已有研究人员发现^[25-26]广东省干旱和厄尔尼诺或赤道太平洋海温异常关系密切。由于珠江流域覆盖面积巨大，各分区所处的地理位置、陆面地形结构与水文气候的差异而影响降水、蒸发及产流过程，旱涝振荡周期和出现时间不尽相同。不同分区还普遍存在约11 a和22 a的年代际振荡周期表明珠江流域旱涝变化与太阳黑子活动和太阳活动磁周期存在关联性^[17]。

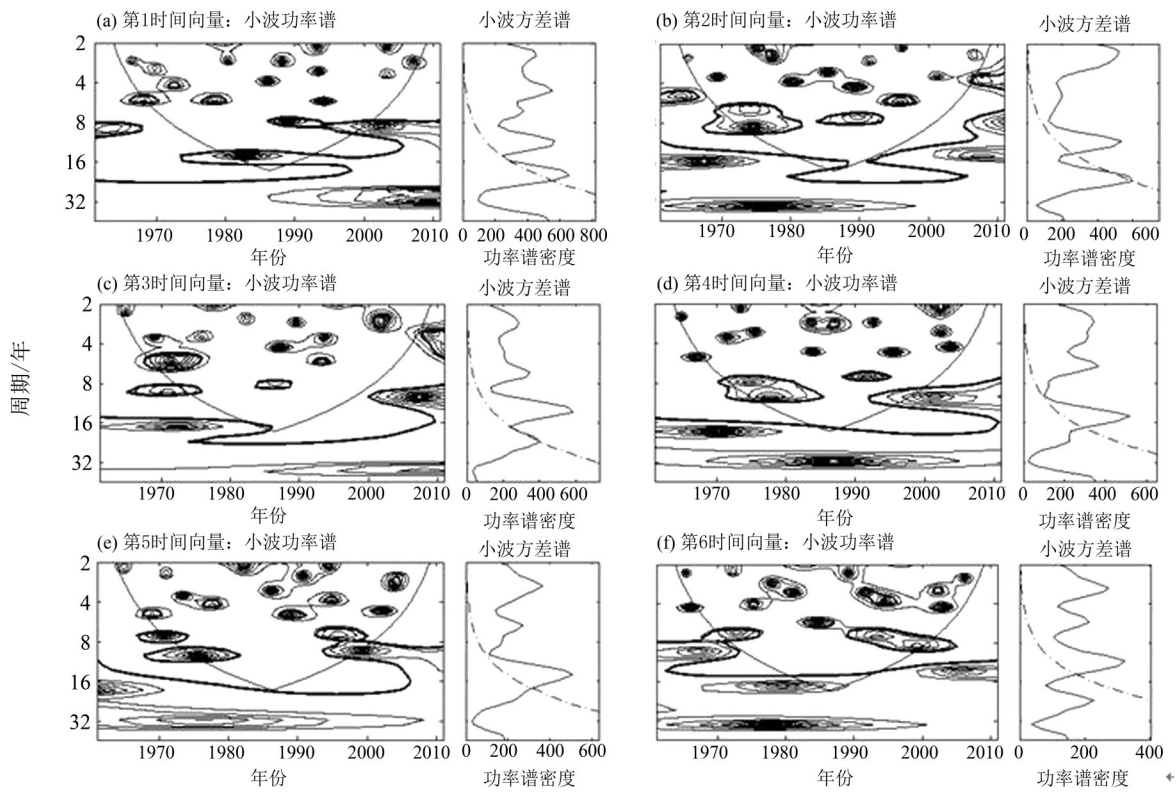


图6 各空间模式对应的时间向量的小波谱

Fig. 6 Wavelet power and variance spectra of the time functions of six regions

表4 各分区显著振荡周期

Table 4 Significant oscillation periods of each partition

分区	I					II				III			
周期/a	2.5	4.6	6.6	11.0	20.2	2.3	5.1	11.0	22.0	2.8	6.6	13.1	22.0
分区	IV					V				VI			
周期/a	2.8	3.6	6.0	8.5	14.3	3.0	6.0	15.6	/	3.0	5.5	11.0	26.2

Schulte 等^[22]曾利用小波交叉谱对美国中大西洋区 3 条主要河流水文气候的年代际变异性与 ENSO 和太平洋 10 年涛动 (PDO) 指数关联的相干诊断, 发现二者之间存在 18 a 和 26 a 的显著相干性。进一步探索珠江流域旱涝时空演变与具有全球指标性的多变量厄尔尼诺事件指标 (MEI) 之间的遥相关结构结果 (见表 5), 检测到各分区都存在着

厄尔尼诺变化周期信号表明, 珠江流域旱涝演变和厄尔尼诺事件关系密切, 变化周期的差异则显示, 流域空间上对 ENSO 事件的响应存在差异。此外, 广西 (桂北、桂东南和桂西南) 的旱涝与厄尔尼诺事件之间还检测到存在更长周期的遥相关结构。

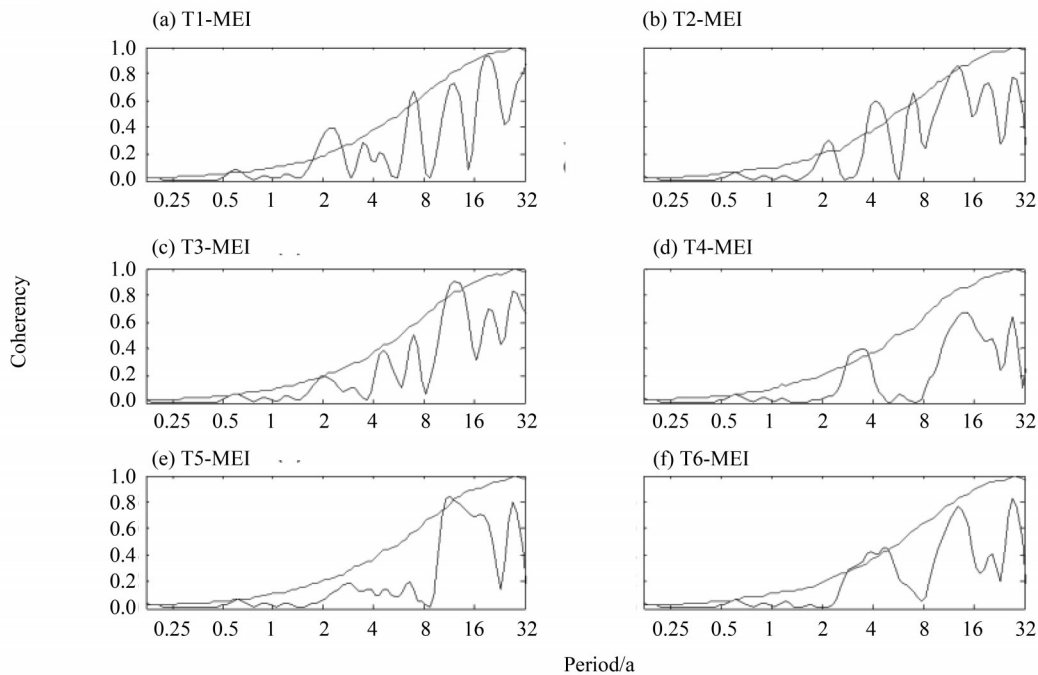


图 7 六个特征时间函数与 MEI 的全域相干谱

Fig. 7 Global coherent spectra of six characteristic time functions and MEI

表 5 各分区时间特征函数与 MEI 的遥相关结构

Table 5 The telecorrelation between the temporal characteristic functions of each partition and MEI

分区	I			II			III		IV	V	VI	
周期/a	2.2	6.9	2.2	4.1	6.9	13.1	2.1	12.4	3.5	11.7	3.9	4.9
相干系数	0.396	0.676	0.305	0.592	0.658	0.857	0.204	0.911	0.403	0.838	0.430	0.454
95%置信水平	0.205	0.567	0.209	0.386	0.573	0.855	0.202	0.779	0.334	0.785	0.348	0.412

4 结 论

1) 1961~2011 年来珠江流域四季干旱现象属于常态, 但空间分布与时间变化明显, 旱涝的变异点出现在 2002 年前后。

2) 21 世纪以来珠江流域中旱、重旱事件、干旱历时和强度都显著加大, 秋旱尤为突出。

3) 根据标准化降水蒸散量指数的 REOF 时空分解珠江流域可划分成 6 个区域, 分别为东江流

域、桂北、桂东南、桂西南、黔南和滇东, 各分区都存在向干旱发展趋势, 其中黔南和滇东干旱趋势显著, 已成为珠江流域的干旱中心。

4) 6 个分区的干湿变化普遍具有 2~8 a、11 a 和 22 a 的振荡周期, 各个分区对 ENSO 事件的响应存在差异。此为构建与赤道太平洋海温异常和太阳黑子活动等指标关联的珠江流域中长期干旱预报模式提供了有益的参考依据。

参考文献:

- [1] 国家科学技术委员会. 中国科学技术蓝皮书第五号——气候[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1990:367.
- [2] WU H, SVOBODA M D, HAYES M J, et al. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27:65-79.
- [3] PATEL N R, CHOPRAP, DADHWALV K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index [J]. *Meteorological Applications*, 2007, 14: 329-336.
- [4] 白永清, 智协飞, 祁海霞, 等. 基于多尺度SPI的中国南方大旱监测[J]. *气候科学*, 2010, 30(3): 292-300. BAI Y Q, ZHI X F, QI H X, et al. Severe drought monitoring in south China based on the standardized precipitation index at different scales [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2010, 30(3):292-300.
- [5] 车少静, 李春强, 申双和. 基于SPI的近41年(1965-2005)河北省旱涝时空特征分析[J]. *中国农业气候*, 2010, 31(1): 137-143. CHE S J, LI C Q, SHEN S H. Analysis of drought-flood spatial-temporal characteristics based on standard precipitation index (SPI) in Heibei Province during 1965-2005[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(1):137-143.
- [6] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1):178-182. LI W G, CHEN H L, ZHU N H, et al. Analysis of drought monitoring on Hainan Island from standardized precipitation index[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 178-182
- [7] 韩海涛, 胡文超, 陈学君, 等. 三种气候干旱指标的应用比较研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(1): 237-243. HAN H T, HU W C, CHEN X J, et al. Application and comparison of three meteorological drought indices [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(1): 237-243.
- [8] 王春林, 郭晶, 陈慧华, 等. 基于土壤水分模拟的干旱动态监测指标及其适用性[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(2): 401-407. WANG C L, GUO J, CHEN H H, et al. Dynamic drought-monitoring index based on soil moisture simulation model and its applicability [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(2):401-407.
- [9] 庄晓翠, 杨森, 赵正波, 等. SPI与K指数在阿勒泰地区应用的对比分析[J]. *沙漠与绿洲气候*, 2011, 5(4): 9-13. ZHUANG X C, YANG S, ZHAO Z B, et al. Application and contrast analysis of SPI and K index in Altay [J]. *Desert and Oasis Climate*, 2011, 5(4):9-13.
- [10] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近58a演变特征[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 50-59. HUANG W H, YANG X G, LI M S, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 50-59.
- [11] VICENTE-SERRANO S M, BEGUEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index-SPEI[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7):1696-1718.
- [12] SREGIO M, VICENTE-SERRANO S M, JUANLOPEZ-MORENO J I, et al. The NAO impact on droughts in the Mediterranean Region[J]. *Advances in Global Change Research*, 2011, 46: 23-40. DOI: 10.1007/978-94-007-1372-7-3.
- [13] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating palmer drought severity index [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17: 2335-2351
- [14] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5):643-649. LI W G, YI X, HOU M T, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(5): 643-649.
- [15] 陈子燊, 黄强, 刘曾美. 1962~2007年广东干湿时空变化特征分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 469-476. CHEN Z S, HUANG Q, LIU Z M. Analyzing the spatial-temporal variation of wet and dry spells during 1962-2007 in Guangdong province [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4):469-476.
- [16] MAVROMATIS T. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27: 911-924.
- [17] LLOYD-HUGHES B, SAUNDERS M A. A drought climatology for Europe[J]. *International Journal of Clima-*

- tology, 2002, 22(13):1571-1592.
- [18] 童娟. 珠江流域概况及水文特性分析[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(1):31-33.
- TONG J. The generalizations and hydrological character analysis of the Pearl River basin[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2007, 13(1):31-33.
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999:269.
- [20] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008, 349:350-363.
- [21] TORRENCE C, GILBERT P C. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79: 61-78.
- [22] SCHULTE J A, NAJJAR R G, LI M. The influence of climate modes on streamflow in the mid-Atlantic region of the United States[J]. Journal of Hydrology Regional Studies, 2016(5): 80 - 99
- [23] 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.
- [24] 陆丹. 1998年秋到1999年春华南特大干旱气候成因[J]. 气象, 2012, 27(1):48-52.
- LU D. The origin study of south china extraordinary drought from autumn 1998 to spring 1999[J]. Meteorology, 2012, 27(1):48-52.
- [25] 唐晓春, 袁中友. 近60年来厄尔尼诺事件对广东省旱灾的影响[J]. 地理研究, 2010, 29(11):1932-1939.
- TANG X C, YUAN Z Y. The influence of the drought disaster caused by El Nino events in Guangdong Province in recent 60 years [J]. Geographical Research, 2010, 29(11):1932-1939.
- [26] 林爱兰, 郑彬, 谷德军, 等. 与广东持续性干旱事件有关的两类海温异常型[J]. 高原气象, 2009, 28(5):1189-1201.
- LIN A L, ZHENG B, GU D J, et al. Two types of sea surface temperature anomaly related to persistent drought events in Guangdong province[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(5):1189-1201.

(责任编辑 秦社彩)