

# 1962—2007年广东干湿时空变化特征分析

陈子燊<sup>1</sup>, 黄强<sup>1</sup>, 刘曾美<sup>2</sup>

(1. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275; 2. 华南理工大学水利水电系, 广东 广州 510640)

**摘要:** 利用广东省74个气象站点1962—2007年的月降水与气温数据, 计算多时间尺度的标准化蒸散发指数, 采用旋转经验正交函数(EOF)、Mann-Kendall趋势检验和小波分析等方法分析广东近50年来的干湿时空变化特征。研究表明: ① 广东20世纪70年代以来干旱发生事件随时间持续增多, 空间范围扩展; ② 根据 EOF 时空分解的前6个空间模态, 可以将广东划分成6个干湿特征区域, 分别位于珠江三角洲、韩江流域及东江流域上游、西江流域及北江中下游流域、粤东沿海区域、北江上游区域和粤西沿海区域; ③ 广东干湿发展具有明显的东西部差异性, 其中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; ④ 6个分区干湿变化普遍具有2~8年的振荡周期, 但最强振荡周期有所差别。

**关键词:** 干湿时空变化; 标准蒸散发指数; 旋转经验正交函数; 小波分析; 广东

**中图分类号:** P429      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2013)04-0469-08

联合国气象变化专门委员会(IPCC)第4次评估综合报告指出, 全球气候变暖将导致水涝、干旱等极端事件增多, 应对旱涝灾害风险正成为普遍关注的热点问题和人类生存所面临的重大问题。旱涝灾害是极端水文气候事件的表象, 如何准确定义并监测旱涝是一个重要的科学问题。目前国内外用于旱涝定义和监测最常用的指标为标准化降水指数(SPI)<sup>[1]</sup>, 但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, 而且是基于降水变异性大大高于气温和潜在蒸散发等变量的假设前提, 是否适用于旱涝识别还需进一步观测检验。Vicente-Serrano等<sup>[2]</sup>提出的标准化蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)融合了蒸散发作用, 更符合自然界的水量平衡关系, 尤其在全球变暖的背景下, 气温升高对水量平衡的影响不容忽视。由设在世界各地具有不同气候特征的观测站对3个指数的时间序列对比表明, 在全球气候变暖条件下, 考虑了蒸散发作用的帕默尔干旱指数(PDSI)与SPEI两种指标监测到了干旱的严重程度在增加<sup>[3-5]</sup>。对比PDSI, SPEI计算相对简便, 能根据不同尺度计算, 并且由于基于概率计算的特点, SPEI还具有空间可比性的优点, 目前已成为干旱特征分析新的理想指标<sup>[6-7]</sup>。本文利用SPEI分析广东干湿的时间变化和空间分布特征, 以干旱为分析重点, 以为区域水资源规划与防灾减灾的风险管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与基本数据

### 1.1 研究区概况

广东地处典型的东亚季风区, 位于珠江流域及韩江流域尾间, 粤东与粤西沿海分布不少独流入海小流域。广东中西部、北部和东北部为山地丘陵地带, 属于珠江流域的西江水系西江干流段、北江水系与东江水系以及韩江水系蜿蜒其间。珠江三角洲平原区位于中南部, 东西沿海则以台地为主。广东降水空间分布不均, 降水量年内与年际变幅大。历史上的广东旱涝灾害频繁且严重, 平均30年一次大灾, 2~3年一次小灾。随着全球变暖, 极端水文气象事件趋于常态化。经济社会的不断发展, 风险随之加大, 旱涝灾害造成的

收稿日期: 2012-09-17; 网络出版时间: 2013-04-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130410.1725.002.html>

基金项目: 广东水利创新项目(2009-41); 国家自然科学基金资助项目(50839005)

作者简介: 陈子燊(1952-), 男, 福建福州人, 教授, 主要从事极端水文事件与风险研究。E-mail: eesczs@mail.sysu.edu.cn

损失也在持续增加。广东省的旱灾表现为以下特点：① 发生频率高，受灾范围广：“三年二旱”；② 出现灾害时期长：渐进性的干旱灾害一年四季均可发生；③ 群发性显著：年内水、旱、风灾害交替肆虐，旱涝急转，旱涝都很突出；④ 成灾强度大：1949年以来，屡屡出现的春秋连旱、秋冬春连旱、甚则秋、冬、春、夏连旱受旱面积不断攀升；⑤ 枯季珠江三角洲河口区咸潮影响范围大，干旱年份城市供水匮乏问题突出。

## 1.2 基本资料

收集了中国气象局气象信息中心提供的广东86个气象站1951—2007年的逐月平均气温和月降水量数据，基于资料的完整性和代表性，选用1962—2007年之间同步观测的74个测站的观测数据，测站分布位置见图1。

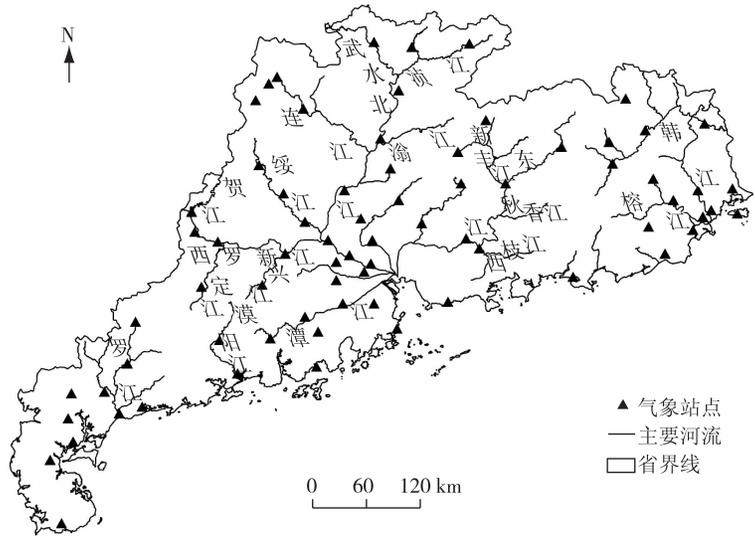


图1 广东主要河流与测站位置示意

Fig. 1 Location of main stream rivers and stations

## 2 研究方法

### 2.1 标准化蒸散发指数

基于水量平衡原理提出的 SPEI<sup>[2]</sup>，首先利用 Thornthwaite 方法计算潜在月蒸散量，进而以潜在蒸散量与降水量差值的概率分布来表征一个区域净降水量偏离正常的程度。计算方法如下：

(1) 计算地表月潜在蒸散发量

$$E_p = 16K \left( 10 \frac{T}{I} \right)^a \quad (1)$$

式中  $E_p$  为潜在蒸散发量，mm； $T$  为月平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ； $I$  为年热指数，等于一年中各月指数  $i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514}$  的累加值； $a$  为经验指数，由与  $I$  的函数关系导出： $a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49$ ；修正系数  $K = \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{M}{30} \right)$ ，其中， $M$  为每月的天数， $N$  为最大日照时数， $N = \left( \frac{24}{\pi} \right) \omega$ ， $\omega$  为日落时太阳时角，由纬度  $\varphi$  和太阳倾角  $\delta$  决定： $\omega = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta)$ ， $\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.405\right)$ ， $J$  为日序数。

(2) 计算逐月降水与蒸散的差值

$$D_i = P_i - E_{P(i)} \quad (2)$$

式中  $D_i$  为第  $i$  个月的净降水量，mm。不同时间尺度的  $D_i$  为

$$D_i^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{i-k} - E_{P(i-k)}) \quad (3)$$

式中  $k$  为月时间尺度。

(3) 计算  $D_i$  的累积概率

采用三参数对数逻辑斯特分布(log-logistic)拟合序列  $D_i$ , log-logistic 的分布函数为

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (4)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别为尺度、形状和位置参数, 由概率权重矩法估计:  $\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - 6w_0w_2}$ ,  $\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta})}$ ,  $\gamma = w_0 - \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta})$ ,  $w_k$  为  $k$  阶样本概率权重矩,  $k = 0, 1, 2, \dots$ 。

(4) 累积概率标准正态化

净降水量服从的 log-logistic 分布为偏态分布, 将偏态分布累积概率值转换为标准正态分布

$$z = W - \frac{c_0 + c_1W + c_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (5)$$

式中  $z$  为标准正态化后的 SPEI 值;  $c_0 = 2.515\ 517$ ;  $c_1 = 0.802\ 853$ ;  $c_2 = 0.010\ 328$ ;  $d_1 = 1.432\ 788$ ;  $d_2 = 0.189\ 269$ ;  $d_3 = 0.001\ 308$ ; 当净降水量累积概率  $F \leq 0.5$  时,  $W = \sqrt{-2\ln(1 - F)}$ , 当  $F > 0.5$  时,  $W = \sqrt{-2\ln F}$ , 相应的  $z$  值取相反数。

由于 SPEI 通过概率密度函数求解累积概率, 再将累积概率标准正态化而得, 消除了降水和气温的时空分布差异, 在不同区域和时段均能有效地反映旱涝状况。SPEI 的旱涝等级划分见表 1。

表 1 基于 SPEI 的干旱等级标准

Table 1 SPEI denoted dry grades

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

### 2.2 时空分解与振荡周期估计

旋转经验正交函数(EOF)分解<sup>[8,9]</sup>是在经验正交函数(EOF)的基础上, 对要素场进行时空分解, 进而做方差最大旋转, 提取方差最大的前几个空间场(空间模态)和相应时间函数。相比于 EOF, REOF 分解得到的空间场通常使得高荷载值集中在某一较小区域上, 其余大片区域的荷载值接近于 0, 空间结构更加清晰, 有利于对研究要素加以分区。采用目前得到较广泛应用的复小波函数 Morlet 为母小波计算各分区时间函数的小波功率谱和时间域平均的小波方差谱, 提取显著周期<sup>[10]</sup>。

## 3 广东干湿时空变化特征分析

### 3.1 近 50 年干旱统计规律

对 74 个测站 1962—2007 年 SPEI 值序列分别统计了不同年代间不同时间尺度与季节的干旱事件的发生频次。其中, 3 个月和 6 个月时间尺度的 SPEI 值可以反映季节性的干湿变化, 而 12 个月时间尺度的 SPEI 值则可以反映干湿的年际变化。统计结果如表 2 所示, 广东干旱事件发生频次具有以下显著特征: ① 依据表 1 的干旱级别, 近 50 年来按月统计的不同年代干旱事件发生累计频次为 13% ~ 23%, 说明干旱问题十分突出; ② 干旱事件具有长期增多的变化趋势, 20 世纪 70 年代以来至 21 世纪初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 2000 年以来中旱和重旱级别的干旱事件出现频次为近几个年代中最多; ③ 季节干旱事件的发生频次均呈现波动特征, 不同季节的中旱、重旱和特旱级别的干旱事件发生频次最多的年代呈现较强的随机性。

为了能清楚地反映广东干旱事件的空间分布, 以月尺度的 SPEI 值统计 20 世纪 70 年代以来不同年代干旱事件发生频次的空间分布。图 2 显示, 20 世纪 70 年代北江流域曾出现较大范围干旱, 20 世纪 80 年代扩

展到东江流域、韩江流域、西江流域和粤西沿海区域，而且发生频次有所增加；20 世纪 90 年代以来干旱范围进一步增大，以沿海区域和珠江三角洲较为突出，发生频次持续加大。

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 Frequencies of drought occurrence among different time scales and seasons in different years

年份	时间尺度	中旱	重旱	特旱	旱累计	年份	季节	中旱	重旱	特旱	旱累计
1962—1969	1 个月	12.49	5.93	1.48	19.89	1962—1969	春季	9.74	5.63	0.28	15.65
1970—1979		7.67	3.94	1.02	12.64	1970—1979		10.63	9.73	3.20	23.56
1980—1989		12.03	3.85	0.63	16.51	1980—1989		6.26	0.63	0.36	7.25
1990—1999		11.57	6.10	1.05	18.72	1990—1999		10.54	5.27	0.77	16.58
2000—2007		13.87	7.63	1.52	23.02	2000—2007		14.58	8.00	1.01	23.59
1962—1969	3 个月	13.77	6.42	2.38	22.58	1962—1969	夏季	12.44	6.76	3.32	22.52
1970—1979		6.10	2.97	0.68	9.75	1970—1979		7.07	2.43	0.59	10.09
1980—1989		9.93	4.29	1.08	15.30	1980—1989		12.79	5.63	0.99	19.41
1990—1999		11.35	6.41	1.35	19.11	1990—1999		11.94	3.56	0.23	15.72
2000—2007		12.99	8.11	2.53	23.63	2000—2007		12.33	10.75	1.97	25.06
1962—1969	6 个月	11.67	6.83	3.31	21.82	1962—1969	秋季	14.25	8.50	1.18	23.93
1970—1979		5.07	2.89	0.84	8.81	1970—1979		5.86	1.71	0.05	7.61
1980—1989		8.46	3.42	0.86	12.74	1980—1989		13.74	4.28	0.63	18.65
1990—1999		11.06	5.68	1.88	18.61	1990—1999		13.02	6.67	1.62	21.31
2000—2007		14.96	8.36	3.12	26.45	2000—2007		14.53	7.15	1.58	23.25
1962—1969	12 个月	13.40	8.78	4.43	26.61	1962—1969	冬季	13.51	2.82	1.13	17.45
1970—1979		6.57	2.70	0.59	9.85	1970—1979		7.12	1.89	0.27	9.28
1980—1989		6.95	1.51	0.07	8.52	1980—1989		15.32	4.86	0.54	20.72
1990—1999		9.20	5.93	2.08	17.22	1990—1999		10.77	8.92	1.58	21.26
2000—2007		15.99	9.47	1.97	27.44	2000—2007		14.02	4.62	1.52	20.16

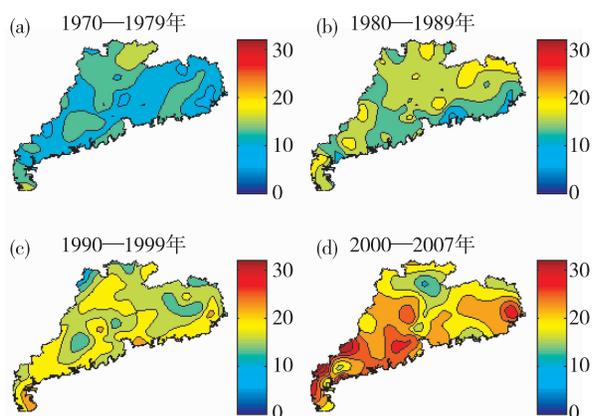


图 2 广东不同年代干旱事件发生频次的空间分布  
Fig. 2 Spatial variation of the frequencies of drought among different decade in Guangdong

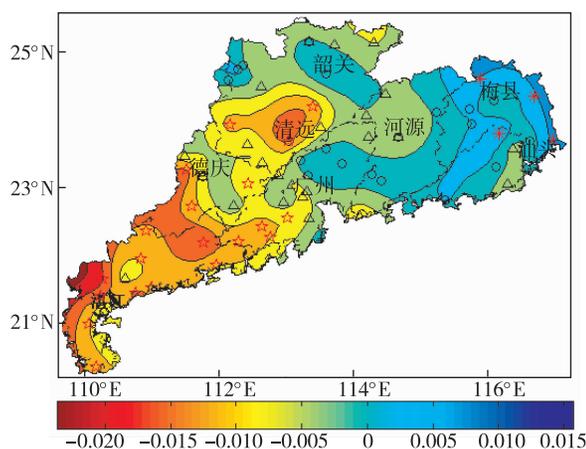


图 3 广东干湿变化趋势的空间分布  
Fig. 3 Spatial variation trend of dry and wet in Guangdong

### 3.2 区域干旱历史变化趋势

鉴于干湿变化的渐进性特点，采用 Mann-Kendall 非参数检验法<sup>[11-12]</sup>对各测站 3 个月尺度的 SPEI 值作近 50 年来的变化趋势检验，正值分别表示水涝和干旱变化趋势。根据图 3，近 50 年来广东干湿变化趋势具有明显的区域性，总体上大致以广州为中线，东部以韩江流域和东江下游以及韶关地区呈现湿涝的趋势（以圆形符号标示的测站），以红色星形符号标注的 4 个测站表示显著湿涝发展趋势；西部以粤西沿海流域及西江流域及北江中下游区域呈现变干的趋势（以三角形符号标示的测站），以红色五角星形符号标注的 20 个测站表示具有显著干旱趋势。据有关研究<sup>[13]</sup>，1961—2010 年华南地区有 5 个时段发生了连续干旱，分别是 20 世纪 60 年代、70 年代后半段、80 年代末、90 年代末和 21 世纪初的前 10 年左右。20 世纪 70 年代干旱和极

端干旱事件较少, 其后明显增多, 干旱持续时间也有所延长, 最近 10 年是干旱最严重的 10 年。对 SPEI 的统计和历史变化趋势分析显示广东近 50 年来的结果与上述结论一致。由于该地区降水呈现微弱增加趋势而温度升高显著<sup>[14]</sup>, 降水增多而 SPEI 指数减小说明温度升高导致蒸散增加应是广东 20 世纪 70 年代以来干旱发展的主因, 也是导致极端干旱事件增多的原因之一。SPEI 指数很好地反映了气候变暖引起的干旱趋势<sup>[13]</sup>。

### 3.3 REOF 空间分区

对广东 74 个测站 1962—2007 年 3 个月时间尺度的 SPEI 值作经验正交函数(EOF)分解, 前 6 个主分量旋转前(PC)和旋转后(RPC)的方差贡献见表 3。根据表 3, 旋转前、后 6 个主分量累积解释方差贡献已占总方差的 80.7%, 但旋转后各分量的方差贡献比旋转前均匀分散。

表 3 前 6 个 PC 和 RPC 对总方差的贡献率

Table 3 Contributions to total variance from the first six PCs and RPCs

方差贡献率/%	主分量						累积贡献率/%
	1	2	3	4	5	6	
旋转前	58.6	9.6	5.9	3.4	1.7	1.5	80.7
旋转后	17.1	16.1	14.1	12.7	10.8	10.0	80.7

图 4 给出了 SPEI 值前 6 个 REOF 空间模态载荷值的空间分布。第 1 模态(图 4(a))的中心区域位于珠江三角洲, 方差贡献率为 17.1%。该区域年内降雨量主要受前汛期(4~6 月)锋面雨和后汛期(7~9 月)热带气旋雨的影响, 年际降水量变幅大, 并且由于该区域近年来城市化发展快, 城市热岛效应导致的蒸发作用强, 净降水量趋于减小。第 2 模态(图 4(b))的高载荷位于以梅县为中心的韩江流域及以河源为中心的东江流域上游, 方差贡献率为 16.1%。从图 4(c)看, 第 3 模态的高载荷位于以德庆为中心的广东西江流域及北江中下游流域, 该区域受前汛期锋面雨影响, 因年内降水变幅大且气温趋于增高, 造成区域内干旱事件增多。方差贡献率为 14.1%。第 4 模态(图 4(d))的高载荷位于以汕头为中心的粤东沿海地区, 方差贡献率为 12.7%, 尽管该区域气温较高蒸发作用强, 但受热带气旋和夏季风双重影响, 区域内净降水量相对丰沛。图 4(e)为 REOF 的第 5 模态, 高荷载区位于以韶关为中心的北江上游区域, 是前汛期降雨带由北向南推移进入广东南岭区域的必经途径, 主要受山区地形阻滞常可形成长时间的降水而引发水涝灾害。方差贡献率为 10.8%。第 6 模态高荷载区位于以雷州半岛为中心的粤西沿海地区(图 4(f)), 虽然该区域会在夏季经常遭遇短历时的台风雨和大风暴雨涝, 但历年大部分时间处于干旱缺水。该模态的方差贡献率为 10.0%。

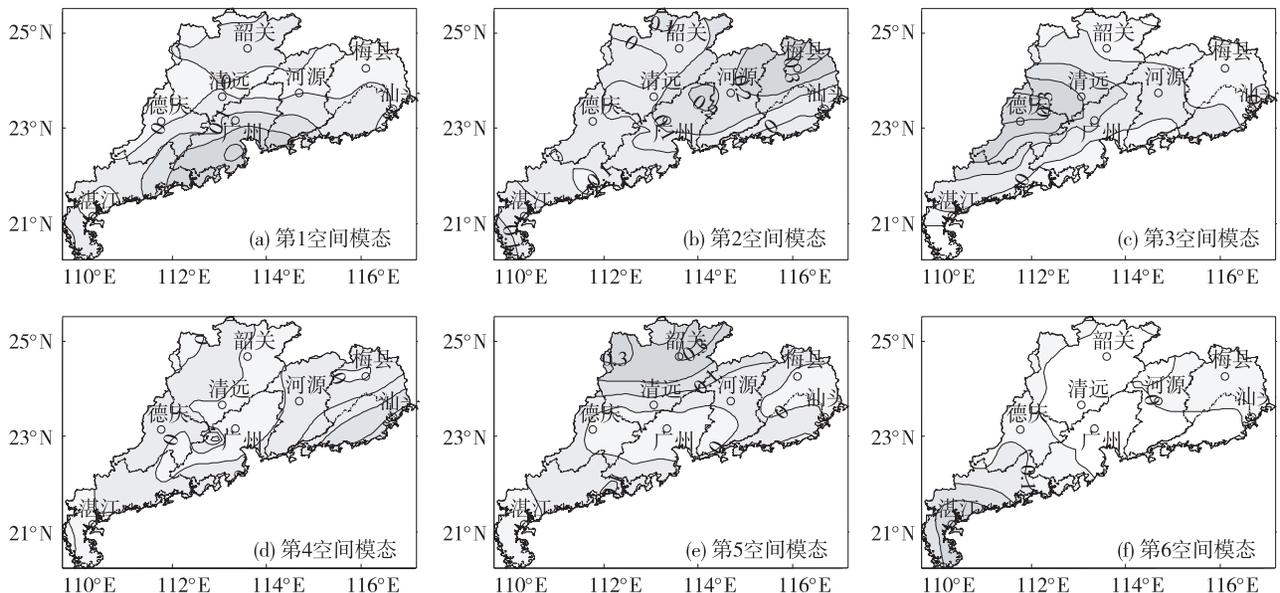


图 4 SPEI 前 6 个 REOF 空间模态特征值的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of the first six modes of SPEI from REOF

根据各模态在空间上的高载荷区,将广东省划分成6个干湿特征区域,相邻区域基本没有重叠。REOF分区结果合理地反映了广东地形和流域分区的实际情况。

### 3.4 各分区水旱历史变化趋势

采用 Mann-Kendall 非参数检验法<sup>[11-12]</sup>对6个分区 REOF 分解的时间特征序列做长期变化趋势检验,检验结果表明(图略),以西江流域为主的分区3和以雷州半岛为主的粤西沿海流域(分区6)存在着显著的干旱发展趋势。此外珠江三角洲和北江上游也存在非显著的偏干旱趋势。而东江中上游区域和粤东沿海则存在非显著的偏湿涝趋势。

### 3.5 各分区水旱变化周期

为了进一步探索广东近50年来不同区域水旱的年际及年代际变化特征,分别对6个分区的时间函数作 Morlet 小波分析。图5为6个分区的 Morlet 小波功率谱及其小波方差图,黑粗等值线表示存在置信水平达95%的变化时间与尺度。由图5(a)~图5(f)可知,不同分区水旱变化的时间尺度分布不均匀,且具有明显的局部化特征,表明水旱变化具有区域差异性;广东各个分区普遍具有7~8年的振荡周期,但由于各区所处的地理位置不同,降水和气温蒸发作用对净降水量的影响存在差异,变化过程不同,但主要周期集中在2~8年之间,反映了 ENSO 事件影响下的广东各区水旱的变化过程。

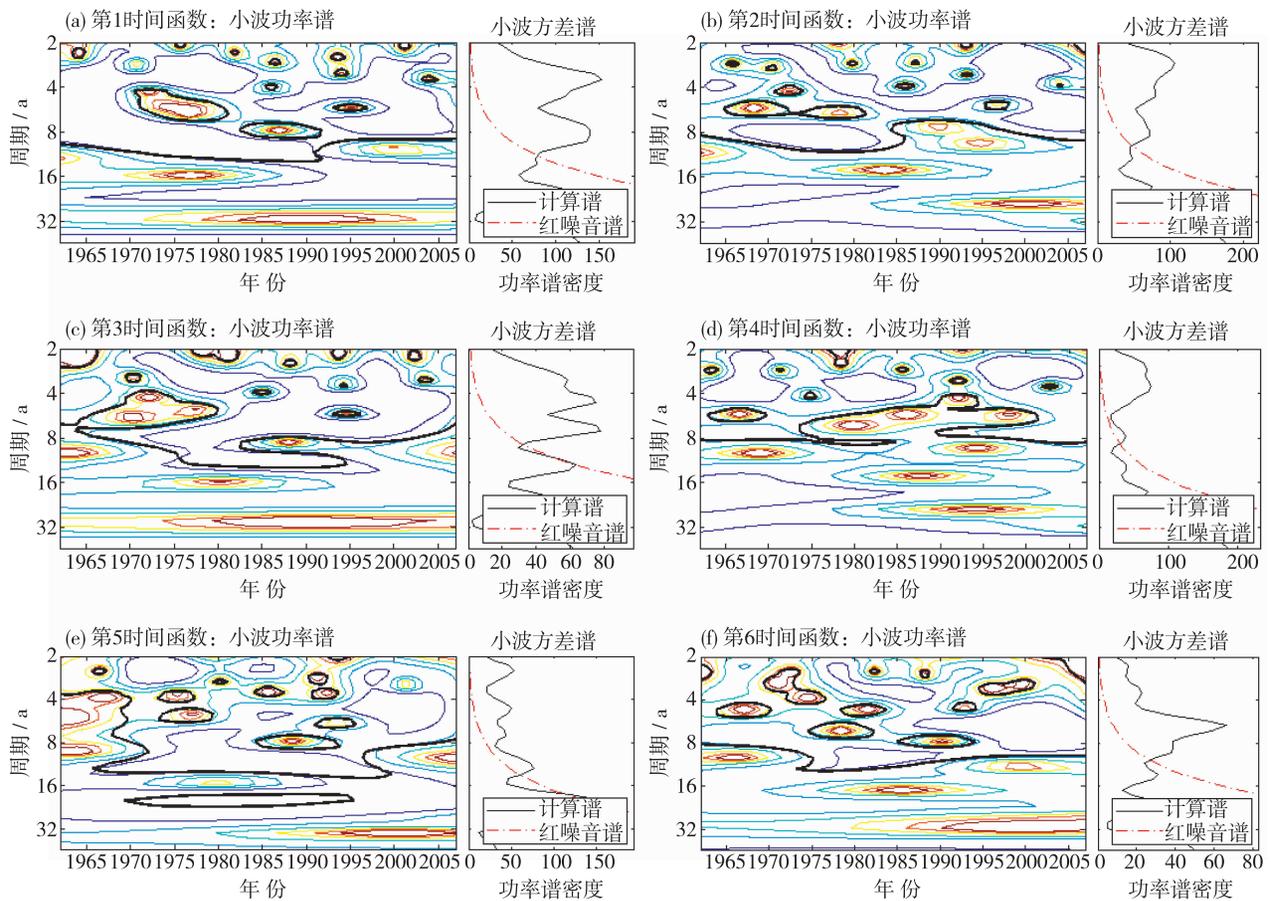


图5 REOF分解的6个分区时间函数的小波功率谱和方差谱

Fig. 5 Wavelet power and variance spectra of the time functions of six regions by REOF

经红噪音谱检验提取的置信水平为95%的小波方差谱的显著周期表明各分区水旱变化的主要振荡周期有所差异:分区1(珠江三角洲)的水旱变化周期的最强信号是3.6 a,其次是7.8 a;分区2(韩江流域及东江流域上游区域)水旱变化存在2.8 a、4.6 a和7.8 a的显著振荡周期,其中最强的振荡信号为2.8 a周期;分

区3(广东西江流域及北江中下游流域)水旱变化存在3.3 a、4.6 a、7.1 a的主要周期以外,还存在12 a的显著振荡周期;分区4水旱变化主要周期基本与分区1相同;分区5同样存在数个2~7 a之间的振动周期,但其中最强的振荡信号为12 a周期;分区6最强的振荡信号则为6 a周期。有关研究<sup>[15]</sup>也指出华南地区降水存在3~4 a、7~8 a、10~11 a和22 a左右的年际和年代际显著振荡周期特征,但这些显著变化周期,尤其是干旱变化和ENSO事件或“拉尼娜”现象或与太阳黑子活动的关联性和响应特征有待进一步研究。

## 4 结 论

(1) 多个时间尺度的SPEI统计结果表明,广东20世纪70年代以来干旱事件发生频次随时间不断增多,特别是2000年以来中旱和重旱级别的干旱事件出现频次为近几个年代中最多。干旱事件发生频次在空间上自北向南、自西向东扩展,而季节干旱事件的发生频次呈现波动特征,不同季节的中旱、重旱和特旱事件发生频次最多的年代表现较强的随机性。

(2) 根据前6个REOF空间模态的最大荷载区划分的广东干湿6个分区分别位于珠江三角洲、韩江流域及东江流域上游、西江流域及北江中下游流域、粤东沿海区域、北江上游区域和粤西沿海区域。REOF分区结果客观地反映了广东流域分区的实际情况,为深入研究各个区域气候变化和水资源规划管理提供了科学基础。

(3) 广东水旱变化趋势具有明显的东西部差异性特征。西江流域、北江中下游流域和以雷州半岛为主的粤西沿海地区存在着显著的干旱趋势,珠江三角洲和北江上游地区也存在偏旱趋势,东江中上游和粤东沿海地区则存在湿涝趋势。

(4) 6个分区干湿变化普遍存在着2~8年之间的振荡周期,但由于各区所处的地理位置不同,降水和气温蒸发作用对净降水量的影响和对ENSO事件的响应存在差异,主要周期有所差别。其中,呈现显著干旱趋势的西江流域和北江中下游流域还存在12年的显著振荡周期,雷州半岛及粤西沿海地区的主要振荡周期为6年。

### 参考文献:

- [1] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. Boston: American Meteorological Society, 1993:179-184.
- [2] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-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.
- [3] ALLEY W M. The palmer drought severity index: Limitation and assumptions[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23:1100-1109.
- [4] NICHILLS N. The changing nature of Australian droughts[J]. *Climatic Change*, 2004, 63:323-326.
- [5] DUBROVSKY M, SVOBODA M D, TRNKA M, et al. Application of relative drought indices in assessing climate change impacts on drought conditions in Czechia[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 96:155-171.
- [6] CAI W, COWAN T. Evidence of impacts from rising temperature on inflows to the Murray-darling basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L07701. [doi:10.1029/2008GL033390]
- [7] LORENZO-LACRUZ J, VICENTE-SERRANO S M, LÓPEZ-MORENO J I, et al. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of Tagus River(central Spain)[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 386:13-26.
- [8] 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. (WEI Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and forecast technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 1999: 269. (in Chinese))
- [9] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 近60年来东北地区参考作物蒸散量时空变化[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2):194-200. (ZENG Lihong, SONG Kaishan, ZHANG Bai, et al. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration over the Northeast region of China in the last 60 years[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2):194-200. (in Chinese))
- [10] TORRENCE C, GILBERT P C. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79: 61-78.

- [11] HAMED K H, RAO A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204: 182-196.
- [12] 徐东霞,章光新,尹雄锐. 近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. *水科学进展*, 2009, 20(3): 416-421. (XU Dongxia, ZHANG Guangxin, YIN Xiongrui. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956—2006[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 416-421. (in Chinese))
- [13] 李伟光, 侯美亭, 陈汇林, 等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(4): 84-90. (LI Weiguang, HOU Meiting, CHEN Huilin, et al. Study on drought trend in south China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(4): 84-90. (in Chinese))
- [14] 中国气象局. 华南区域气候变化评估报告决策者摘要[R]. 北京: 气象出版社, 2011: 16. (China Meteorological Administration. Southern regional climate change assessment report summary for policymakers[R]. Beijing: Meteorological Press, 2011: 16 (in Chinese))
- [15] 王永, 陆维松, 龚燕. 近 53a 中国东部雨季降水的区域特征[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(5): 609-616. (WANG Yong, LU Weisong, GONG Yan. Regional characteristics of precipitation in the rainy season over Eastern China during last 53 years[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(5): 609-616. (in Chinese))

## Analyzing the spatial-temporal variation of wet and dry spells during 1962—2007 in Guangdong province \*

CHEN Zishen<sup>1</sup>, HUANG Qiang<sup>1</sup>, LIU Zengmei<sup>2</sup>

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

2. Department of Water Conservancy and Hydropower Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The multi-scale standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI) is calculated using the monthly precipitation and temperature data observed at 74 meteorological stations during 1962—2007 in Guangdong. The spatial-temporal variation of wet and dry spells is analyzed using the methods of the rotated empirical orthogonal function (REOF), the Mann-Kendall trend test and the wavelet analysis. Results show that both the frequency and spatial extent of drought have increased over time since the 1970s. The whole Guangdong can be divided into six wet and dry regions based on the first six modes of REOF. These regions are located in the Pearl River Delta, the upper Hanjiang River and Dongjiang River basins, the Xijiang River basin and the middle and lower Beijiing River basin, the eastern coastal district, the upper Beijiing River basin, and the western coastal district. The trend of wet and dry spells in Guangdong varies significantly across the province from east to east. Significant upward trends in drought have been detected in the Leizhou Peninsula, the Xijiang River basin and the middle and lower Beijiing River basin, the western coastal district. In addition, the temporal variation of wet and dry spells exhibits a periodic oscillation of period of 2 to 8 years in the six regions.

**Key words:** spatial-temporal variation of wet and dry spells; standardized precipitation and evapotranspiration index; rotated empirical orthogonal function; wavelet analysis; Guangdong

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50839005).