

吴香华,牛生杰,祁莉,等. 中国南方 6 省 1 月份降水和极端低温的分布特征 [J]. 大气科学学报, 2009, 32 (6): 807-814

中国南方 6 省 1 月份降水和极端低温的分布特征

吴香华^{1,2}, 牛生杰², 祁莉³, 许潇锋², 张曦⁴

(1. 南京信息工程大学 数理学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044;
3. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 4. 美国犹他州立大学 统计学系, 美国犹他州洛根市 84322)

摘要:采用中国南方湖南、湖北、贵州、广西、江西和安徽 6 省近 50 a 1 月份降水和气温资料,运用正交函数分解法和 SYM8 小波分析了它们的时空分布特征,并对极端低温的区域均值进行了广义极值模型拟合,同时研究了降水与气温的相关性。结果表明,该地区 1 月份降水量主要有全区域分布型和南北分布型,极端低温主要有全区域分布型、南北分布型和东西分布型。1 月份降水量的全区域总和以及南北部差值都有先增后减的趋势。全区域的极端低温缓慢增长,南北部的差值先减后增,东西部的差值在 1975 年以前递增,随后几乎趋于稳定。6 省 1 月份极端低温区域均值服从 Weibull 分布,在 95% 置信水平下,预测 50 a 一遇和 100 a 一遇的极小值达 -6.78 和 -7.41 。1 月份降水量与极端低温的相关不显著,与平均气温在局部地区为负相关。

关键词:中国南方 6 省;极端最低气温; EOF 分析;小波分析;广义极值分布模型

中图分类号: P468 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2009)06-0807-08

Spatiotemporal Features of January Precipitation and Extreme Minimum Temperature in Six Southern Provinces of China

WU Xiang-hua^{1,2}, NIU Sheng-jie², QI Li³, XU Xiao-feng², ZHANG Xi⁴

(1. School of Mathematics and Physics, NU IST, Nanjing 210044, China;

2. School of Atmospheric Physics, NU IST, Nanjing 210044, China;

3. School of Atmospheric Sciences, NU IST, Nanjing 210044, China;

4. Department of Mathematics and Statistics, Utah State University, Logan 84322, USA)

Abstract: Based on the January precipitation and temperature data of Hunan, Hubei, Guizhou, Guangxi, Jiangxi and Anhui in 1959—2008, their spatiotemporal characteristics are investigated by the EOF method and the SYM8 wavelet analysis, the regional-averages of extreme minimum temperature are simulated with a generalized extreme value distribution model (GEV), and the correlation between January precipitation and temperature is also studied. Spatial distributions of January precipitation can be mainly decomposed into the entire domain EOF mode and the north-south EOF mode, while the distributions of extreme minimum temperature can be decomposed to the entire domain EOF mode, the north-south EOF mode and the west-east EOF mode. The entire domain value of January precipitation and the north-south difference value both increased at first and then decreased. Extreme minimum temperature showed a slow increasing trend, the north-south difference decreased first and then increased, and the west-east difference successively increased before 1975, then approached a stable value. Besides, a GEV model has been established using the January extreme minimum temperatures, resulting in -6.78 (-7.41) as the extreme minimum temperature with a return period of 50-yr (100-yr) at the 95% confidence level, respectively. Correlation between January precipitation and extreme minimum temperature scarcely exists in a statistical

收稿日期: 2009-05-10; 改回日期: 2009-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40537034); 国家科技支撑计划课题 (2008BAC48B01)

作者简介: 吴香华 (1980—), 女, 江苏南通人, 博士生, 研究方向为气象数据的统计分析, wuxianghua@nuist.edu.cn

sense, while a negative correlation between January precipitation and average temperature does exist in some regions

Key words: six southern provinces of China; extreme minimum temperature; EOF analysis; wavelet analysis; generalized extreme value distribution

0 引言

气候趋势的统计分析,是气象研究领域的重要方向之一。尤其是降水与气温的气候趋势,与干旱、洪水、酷暑、严寒、雪灾等密切联系,对国民经济和人民生活影响很大,也引发了许多学者的研究。不过,人们更多地研究全年或春季、夏季的降水和气温分布特征^[1-10],对南方地区冬季降水和极端气温的研究较少。李爱华等^[1]和钱玮等^[2]分别研究了中国东部和南部的夏季降水的年际、年代际变化。李红梅等^[3]、Yu等^[4]和王颖等^[5]选用降水频率、第95百分位降水量、趋势系数和 EOF 分析等统计方法,分析我国降水量、雨日的时空分布特征和气候变化。唐国利等^[6]和刘晓冉等^[7]分别对南京地区和西南地区的温度变化特征进行分析。孙宁等^[8]、刘学华等^[9]和 Klein等^[10]根据我国气温和降水资料,运用趋势系数、偏态系数、峰度系数、方差变异等统计指标,研究发现全国严寒天和极端低温事件明显减少,高温天数和极端高温事件明显增加,表现为气温变暖趋势;全国极端降水指数和年降水量总体线性变化为增加趋势。

IPCC第三份和第四份报告明确提出,全球平均气温在上升,并且可能造成极端气候事件的增多、增强。2008年初,我国南方发生冰冻雨雪灾害天气,

可见对南方地区冬季降水和极端最低气温的研究具有一定的现实意义。另一方面,统计分析方法和计算机技术的发展,使气象资料的统计分析越来越广泛、深入。本文首先分析了南方6省1月份降水量和极端最低气温的时空分布;然后,用广义极值分布模型拟合极端低温的区域均值,预测出 T 年一遇的最小值;最后,分析了南方6省1月份降水和气温的相关性。

1 资料和方法

1.1 资料

本文所用资料来自中国气象科学数据共享服务网提供的1959—2008年1月的气候资料月值数据集。2008年初,我国遭遇了50 a一遇的持续低温雨雪冰冻天气,波及19个省市,其中湖南、湖北、贵州、广西、江西和安徽6省受灾最严重,本文选择这6省126个基本、基准地面气象观测站及自动站资料。为确保数据的完整性,去除资料有缺失的16站。又因为这次天气过程主要发生在1月,并且1月在气候上代表冬季^[12],最终选取了110站1月份的月降水量、平均气温和极端最低气温数据。这些站点的分布见图1a,位于 $21^{\circ}02'N \sim 34^{\circ}26'N$, $104^{\circ}17'E \sim 118^{\circ}59'E$,海拔为4.5~2 237.5 m,海拔最低为广西钦州,最高为贵州威宁。图1b有4个高值中心,

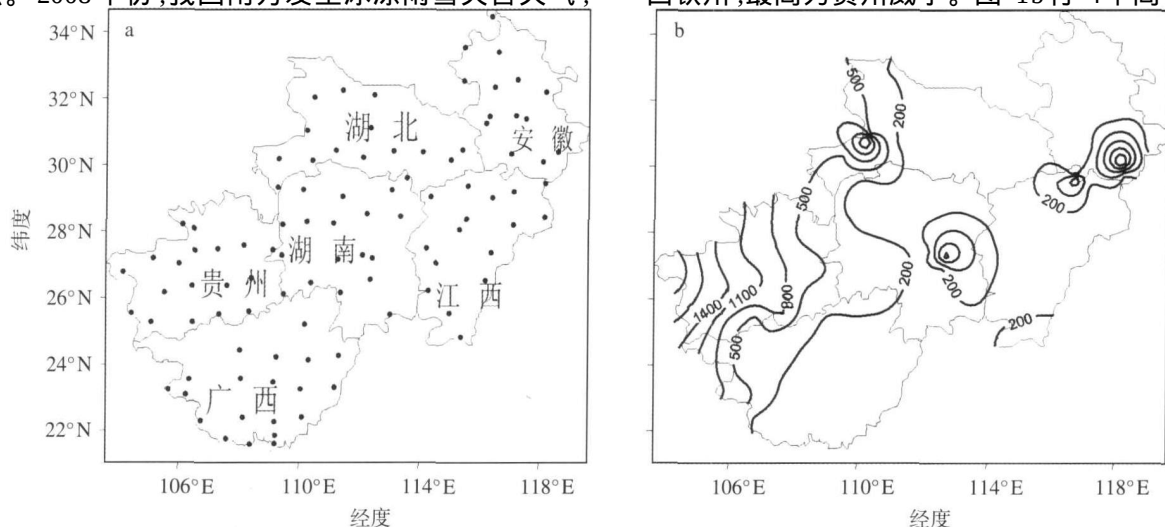


图1 中国南方6省110站分布(a)以及海拔等高线分布(b单位:m)

Fig 1 (a) Geographical locations and (b) elevation contours(m) of 110 stations in six southern provinces of China

安徽南部和湖北西南部最高海拔达 1 400 m 以上,湖南中东部达 1 100 m 以上,江西北部超过 800 m。

1.2 EOF 分析法

本文使用经验正交函数分解法 (EOF 法) 分析南方 6 省 1 月份降水和极端低温的分布特征,可以将气象变量场的时间与空间变化分离开来,并且用尽可能少的模态表达出主要的时间和空间变化。主要思想是,将降水或极端低温的距平观测值矩阵 X 分解成空间函数矩阵 V 和时间函数矩阵 Y 的乘积,并且有“正交”的要求: $v_k' v_l = 0$, $y_k' y_l = 0$ 。其中 v_k 、 v_l 和 y_k 、 y_l 分别是矩阵 V 和 Y 的第 k 行和第 l 行, $k \neq l$ 。

North 等^[14]还指出,气象变量场分解后,应该计算相邻两个特征值之差进行显著性检验,从而判断对该气象变量场的分解是否有意义。设 n 为样本量, λ_i 是第 i 个特征值,如果满足

$$\lambda_i - \lambda_{i+1} \geq e_i = \lambda_i \sqrt{\frac{2}{n}}, \quad (1)$$

则认为第 i 个特征值所对应的经验正交函数的分解是有意义的。

1.3 小波分析

小波分析是近几十年发展起来的一种时频分析方法,本文选取具有正交性质和紧支集程度较高的 SYM8 小波。它是 db8 小波的一种改进,支撑长度为 15,滤波器的长度为 16,消失矩为 8,具有近似的对称性。

小波分析实际上是将信号分解成低频部分和高频部分,对低频部分继续上述分解,而高频部分不做二次分解,依次推得分解系数,重复以上过程直至高频、低频特征显现。近似系数反映低频部分,体现波动的整体趋势,而细节系数对应的是高频部分的细微特征信息。假设 s 是原信号, a_i 和 d_i 分别是分解到第 i 层的近似系数和细节系数,如果分解到 4 层,则有

$$S = a_1 + d_1 = a_2 + d_2 + d_1 = a_3 + d_3 + d_2 + d_1 = a_4 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1. \quad (2)$$

1.4 广义极值分布模型

1.4.1 模型的建立和参数估计

极值理论是数理统计这一学科的一个重要分支,将统计学家的视角从“母体中央分布”延伸到了“极值”。利用极值理论,分析极值随机现象的特点,预测极值出现的概率,具有重要的理论价值和实际意义。设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 取自分布函数为 $F(x)$ 的总体,按从小到大排列为 $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$, 称

$(X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)})$ 为次序统计量。其中 $X_{(1)}$ 、 $X_{(n)}$ 分别称为样本极小值和样本极大值,统称为样本极值,对应的分布称为极值分布。令 $M_n = \max \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 则

$$\begin{aligned} P\{M_n \leq x\} &= P\{X_1 \leq x, X_2 \leq x, \dots, X_n \leq x\} = \\ &= P\{X_1 \leq x\} \cdot P\{X_2 \leq x\} \cdot \dots \cdot P\{X_n \leq x\} = \\ &= \{F(x)\}^n. \end{aligned} \quad (3)$$

统计学家费舍与逛皮特指出,无论原始分布函数 $F(x)$ 是什么形式,线性变换后的样本极大值,都依概率收敛于一个具有三种分布函数 (Gumbel 分布、Frechet 分布、Weibull 分布) 之一的随机变量。1955 年 Genkinson 提出的广义极值分布 (GEV) 模型将三种分布函数统一于一种形式:

$$G_X(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right]^{-1/\xi}\right\}, & -\infty < x \leq \mu - \sigma/\xi, \xi > 0 \text{ 或} \\ \mu - \sigma/\xi \leq x < \infty, \xi < 0; \\ \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]\right\}, & -\infty < x < \infty, \xi = 0. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $-\infty < \mu < \infty$, 为位置参数; $\sigma > 0$ 为尺度参数; $-\infty < \xi < \infty$, 为形状参数; $\xi < 0$ 和 $\xi > 0$ 分别对应 Weibull 分布和 Frechet 分布, $\xi = 0$ 对应 Gumbel 分布。

由 (4) 式,设某极值的概率为 $G_X(x_p) = 1 - p$, 可得极值分位点,

$$x_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{1 - [-\ln(1 - p)]^{-\xi}\right\}, & \xi \neq 0; \\ \mu - \sigma \ln[-\ln(1 - p)], & \xi = 0. \end{cases} \quad (5)$$

分位点 x_p 又称回归期为 $\frac{1}{p}$ 的回报水平。

模型建立后,常用极大似然法估计参数。当 $\xi \neq 0$ 时,对数似然函数为

$$\begin{aligned} l(\mu, \sigma, \xi) &= -n \ln \sigma - (1 + 1/\xi) \times \\ &\quad \sum_{i=1}^n \ln \left[1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma}\right] - \\ &\quad \sum_{i=1}^n \left[1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma}\right]^{-1/\xi}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $1 + \xi \frac{x_i - \mu}{\sigma} > 0$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。当 $\xi = 0$ 时,对数似然函数为

$$l(\mu, \sigma) = -n \ln \sigma - \sum_{i=1}^n \ln \left[\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right].$$

$$\sum_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (7)$$

找到对数似然函数取得最大值时对应的参数值,就是适合模型的参数估计值。这个问题没有直接的解析解,但是采用最优化算法,结合软件编程可以得到数值解。

1.4.2 检验方法

首先可以采用 P-P 图作初步检验,基本思想是将经验分布函数和理论分布函数作对比。若理论分布函数为

$$G(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\} \quad (8)$$

点集 $\{ (y^{(i)}, G(x^{(i)})), i = 1, 2, \dots, n \}$ 应该分布在某一条对角线附近。P-P 图检验的优点是比较简单和易操作,缺陷是比较粗糙。

其次,用 Kolmogorov 检验能够进一步分析理论分布和经验分布的一致性,设 $H: X_1, X_2, \dots, X_n$ 的公共分布为 G 。具体定理为:若 X 为一维且其分布函数 G 在 R^1 内处处连续,则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(\sqrt{n} (G_n - G) < x) \equiv Q(x) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp(-2k^2 x^2) \quad (9)$$

其中: $x \in R^1, G_n - G = \sup_x |G(x) - G_n(x)|$ 。利用这个定理,取定显著性水平 α ,找 c_α ,使 $Q(c_\alpha) = 1 - \alpha$,然后在 $G_n - G$ 大于临界值 $c_\alpha / \sqrt{n}$ 时否定假设 H ,否则接受假设 H 。

2 1 月份降水量的时空变化特征

利用南方 6 省 1 月份的月降水量数据,对距平观测值进行 EOF 分析,结果见表 1。

表 1 中国南方 6 省 1 月份降水量的 EOF 分析结果
Table 1 EOF analyses of January precipitation in six southern provinces

序号	λ_i	累计方差贡献率	$\lambda_i - \lambda_{i+1}$	e_i
1	2 480 203.25	0.512 9	1 660 970.87	496 040.65
2	819 232.38	0.682 3	472 170.28	163 846.48
3	347 062.09	0.754 0	54 212.81	69 412.42

根据显著性检验原则,前 2 个主成分(解释方差总和已达 68.23%)是有价值的。图 2 是 EOF 分析得出的前 2 个特征向量场分布及其时间系数变化情况。通过显著性检验的前 2 个特征向量所代表的空间分布是月降水量的典型分布结构。从图 2a 可

以看出,第 1 特征向量的各个分量都是大于 0 的,说明南方 6 省 1 月份降水量变化趋势具有基本一致的特征,高值中心主要集中在贵州北部和湖南西北部,其荷载值达 0.16 以上。图 2c 显示,第 2 特征向量主要反映了南北变化相反,其中北部主要指湖北中部和北部、安徽西北部。北部降水量较多(少)时,南部较少(多)。

图 2b 和 2d 分别表示前 2 个特征向量场对应的时间系数。第 1 组时间系数反映的是南方 6 省 1 月份降水量的总体变化情况,第 2 组时间系数反映的是南北差异变化情况。图 3 采用 SYM 8 小波对第 1 组时间系数进行四层分解,可分别获取近似系数 a 和细节系数 d 。从图 3 的 SYM 8 小波四层分解的近似系数 a 可分析,各层近似系数 a 的走势较为相近,第三层、第四层的近似系数 a_3 、 a_4 ,已经能明显表现整个南方 6 省 1 月份降水量的趋势,在时间域 0 ~ 39 (1959—1998 年)有缓慢的增长趋势,其后缓慢减少。细节系数 d 体现变化信号的频率,以低层为最高,逐层降低,第一层和第二层的细节系数 d_1 、 d_2 中包含有较高频的变化信号,第三层和第四层的细节系数 d_3 、 d_4 中包含的变化信号频率已经很低了,而且大致可以看出在时间域上 26 处 (1975 年)是个分界,两边的数据有较为明显的不同震荡。第 2 组时间系数的分析(图略)显示,各层近似系数 a 的走势较为相近,第三层、第四层的近似系数 a_3 、 a_4 已经能明显表现南北部 1 月份降水量差异的趋势,在时间域 0 ~ 26 (1959—1975 年)有增长趋势,其后减少。细节系数 d 的结论和第 1 组时间系数类似。

3 极端最低气温的分布特征

3.1 极端最低气温的时空分布

采用 EOF 分析研究南方 6 省近 50 年的 1 月份极端最低气温的时空分布特征,发现前 3 个特征向量(累计方差贡献率达 76.15%,见表 2)通过了显著性检验,是有价值的信号。

表 2 南方 6 省 1 月份极端最低气温的 EOF 分析结果
Table 2 EOF analyses of January extreme minimum temperature in six southern provinces

序号	λ_i	累计方差贡献率	$\lambda_i - \lambda_{i+1}$	e_i
1	14 517.50	0.620 8	12 397.53	2 903.500
2	2 119.97	0.711 4	948.57	423.994
3	1 171.40	0.761 5	411.38	234.280
4	760.02	0.794 0	130.48	152.004

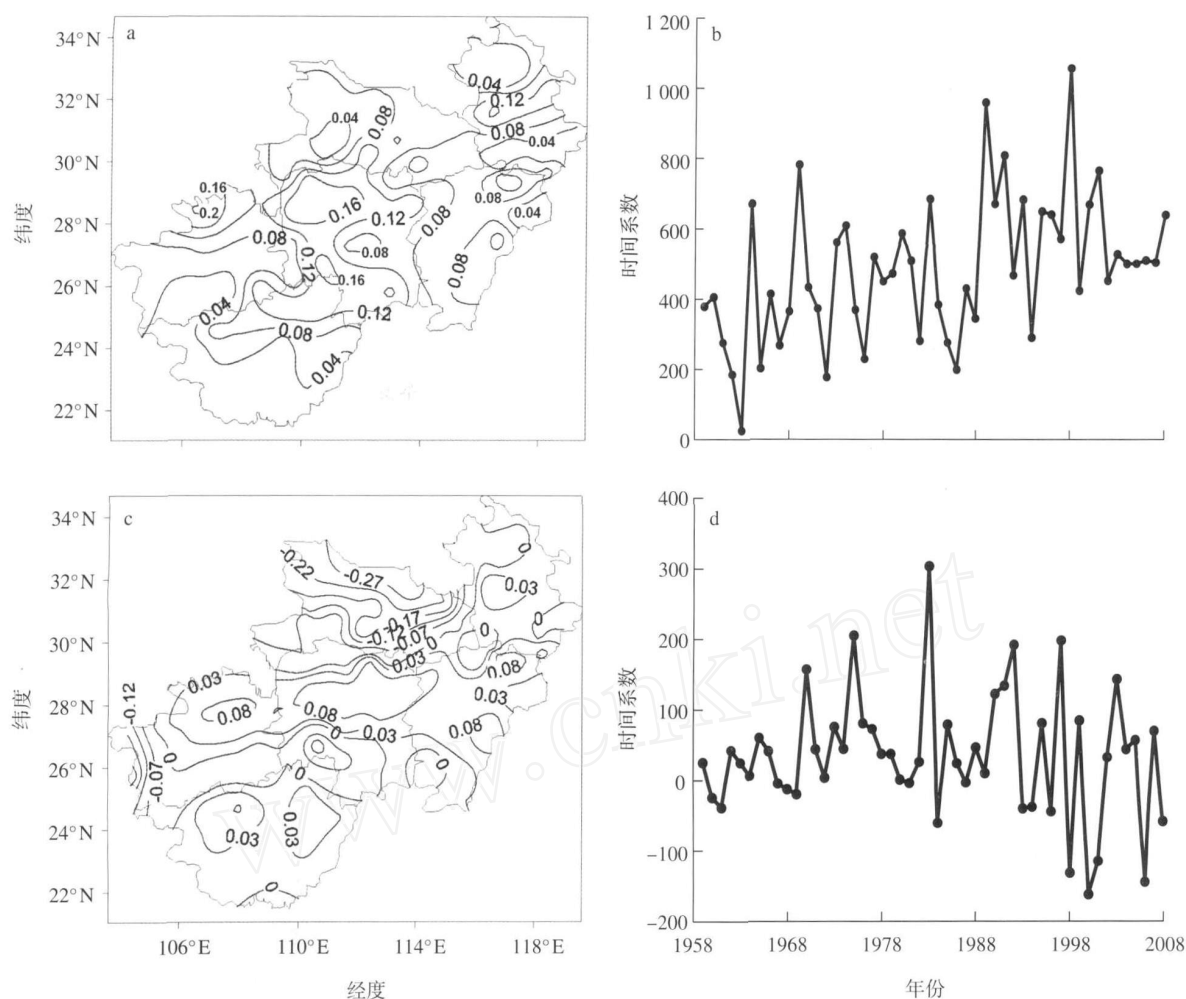


图 2 中国南方 6 省 1 月份降水量经 EOF 分析的第 1(a, b)、第 2(c, d)特征向量场 (a, c)及其时间系数 (b, d)

Fig 2 (a, c) The first two EOF eigenvectors and (b, d) the corresponding time coefficients of January precipitation in six southern provinces of China

从图 4a 可以看出,第 1 特征向量的各个分量都是大于 0 的,说明南方 6 省 1 月份极端最低气温变化趋势具有基本一致的特征,高值中心主要集中湖北省南部,其荷载值达 0.16 以上。图 4c 显示,第 2 特征向量主要反映了南北变化相反的空间分布特征,即当南部的极端最低温度较高(低)时,北部较低(高)。图 4e 显示,第 3 特征向量主要反映了东西变化相反的空间分布特征。

图 4b、d 和 f 分别表示第 1、第 2、第 3 特征向量场对应的时间系数。第 1 组时间系数反映的是南方 6 省 1 月份极端最低气温的总体变化情况,第 2、第 3 组时间系数反映的是南北部差异、东西部差异的变化情况。采用 SYM8 小波分析三组时间系数的总体趋势(图略),整个南方 6 省 1 月份极端最低气温有缓慢的增长趋势;南北部差异在时间域 0~26 (1959—1975 年)递减,随后缓慢递增;东西部差异

在时间域 0~26 (1959—1975 年)递增,随后几乎趋于稳定。细节系数 d 体现变化信号的频率,大致可以看出在时间域 26 处 (1975 年)是个分界,两边的数据呈现不同的震荡。

3.2 基于广义极值分布模型的分析

根据极端低温的区域平均值,建立广义极值分布模型。由上文 1.4.1 节中 (6) 式,得 $\mu = 2.32, \sigma = 1.37, \xi = -0.096$, 极端低温区域均值属于 Weibull 分布, P-P 图显示拟合效果较好 (图 5)。Kolmogorov 检验时,计算出 $G_n - G = 0.08$, 满足

$$G_n - G < c_{\alpha} / \sqrt{n}, \text{拟合效果高度显著 (表 3)}.$$

表 3 Kolmogorov 检验

Table 3 Kolmogorov test			
α	c_{α}	n	$c_{\alpha} / \sqrt{n}$
0.05	1.36	50	0.19
0.01	1.63	50	0.23

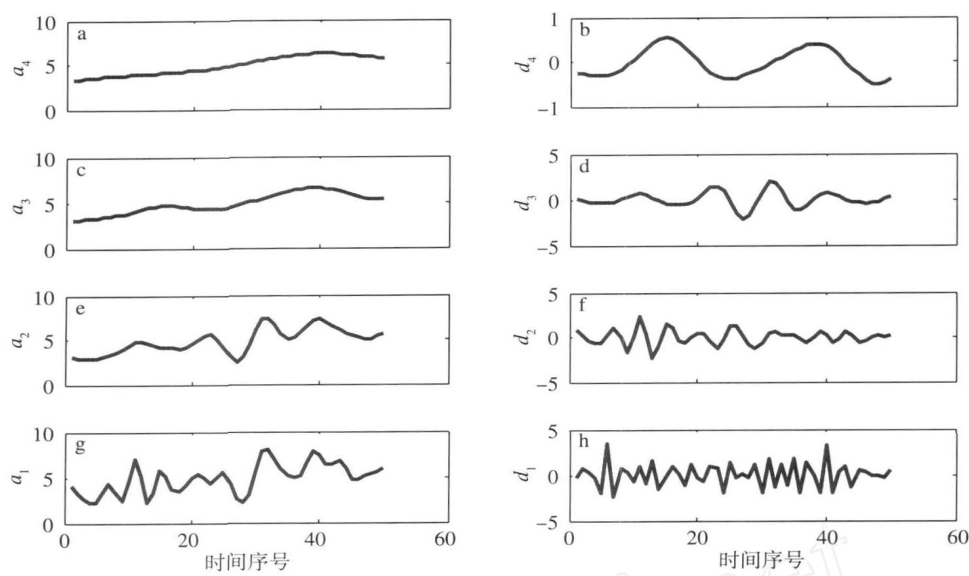


图 3 中国南方 6 省 1 月份降水量第 1 主成分的小波分析
Fig 3 The wavelet analysis for the first principal component value of January precipitation in six southern provinces

在实际应用中,通常要研究 T 年一遇的极值 x_p 。表 4 给出了在 95%置信水平下,回归期为 10 a、30 a、50 a 和 100 a 的极端低温区域均值及其置信下限。已有 50 a 极端低温区域均值数据,最小值、第二最小值分别为 - 7.86 和 - 6.62 ,接近模型预测出的 50 a 一遇的值 - 6.78 ,反映出该模型对这个地区 T 年一遇的严寒预测具有一定参考价值。

表 4 不同重现期极端低温区域均值及其 95%置信水平下的置信下限

Table 4 Regional-averages of extreme minimum temperatures with different return periods and their lower limits at the 5% confidence level

回归期	x_p	置信下限
10	- 5.09	- 9.07
30	- 6.28	- 11.75
50	- 6.78	- 12.98
100	- 7.41	- 14.65

4 1 月份降水量与极端最低气温、平均气温的关系

图 6 是南方 6 省 1 月份降水量与极端最低气温及平均气温的相关系数。从统计意义上考虑,只有具备较高置信水平的相关系数才是有意义的。因此,虽然南方 6 省 1 月份降水量和极端最低气温的相关系数在 - 0.37 到 0.44 之间,但是几乎整个区域的相关系数都没有达到 90% 的置信水平 (图

6a),表明降水量与极端最低气温的相关性不显著。图 6b 反映了降水量和平均气温的相关系数分布,最小值为 - 0.5,最大值为 0.18。相关系数在湖北 (西南部除外)、湖南 (西北部除外)、安徽中西部以及广西南部达到 90% 的置信水平,并且与相关系数小于 - 0.3 的区域几乎完全重合,说明在阴影区域内,降水量和平均气温存在弱负相关性。在冬季,我国南方地区仍然具备足够的水汽条件,但是降水的发生往往需要伴随强冷空气南下。冷气团活跃的次數较多、强度较大时,平均气温较低,降水较多。

5 结论

通过对中国南方湖南、湖北、贵州、广西、江西和安徽 6 省 1 月份降水量、极端最低气温和平均气温的讨论和分析,得出以下结论:

- (1)近 50 a 南方的湖南、湖北、贵州、广西、江西和安徽 6 省 1 月份降水量主要有全区域分布型和南北分布型两种,其中全区域分布型是最主要的。整个地区 1 月份降水量在 1998 年前缓慢增长,其后减少。区域内南北部 1 月份降水量差值以 1975 年为界,先增后减。
- (2)南方 6 省 1 月份极端最低气温主要有全区域分布型、南北分布型和东西分布型。全区域内极端最低气温有缓慢的增长趋势;南北部差值在 1975 年前递减,随后缓慢递增;东西部差值在 1975 年前递增,随后趋于稳定。

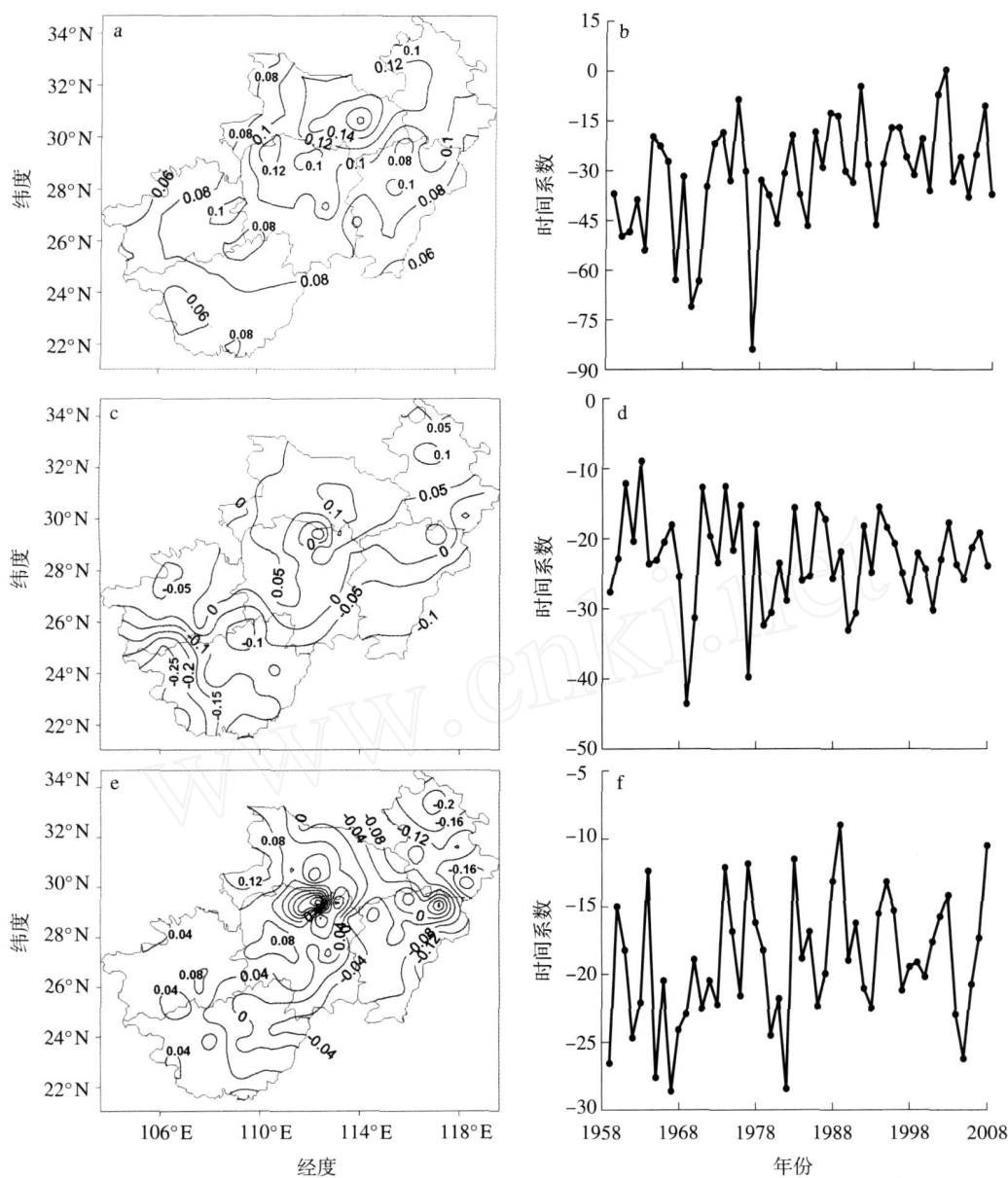


图 4 中国南方 6 省 1 月份极端最低气温经 EOF 分析的前 3 个特征向量场及其对应的时间系数
Fig 4 (a, c, e) The first three EOF eigenvectors and (b, d, f) the corresponding time coefficients of January extreme minimum temperature in six southern provinces of China

(3)极端最低气温的区域均值服从 Weibull 分布。在 95%置信水平下,预测 50 a 一遇和 100 a 一遇的区域均值会达到 - 6.78 和 - 7.41 。

(4)南方 6 省 1 月份降水量和极端最低气温相关性不显著,但是降水量和平均气温在湖北 (西南部除外)、湖南 (西北部除外)、安徽中西部以及广西南部呈现弱负相关。

参考文献:

[1] 李爱华,江志红. 中国东部夏季雨带推进过程的年际、长期趋

势变化 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30 (2): 186-193
[2] 钱玮,管兆勇. 中国南方夏季降水与热带印度洋偶极型海温异常的联系 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30 (1): 9-16
[3] 李红梅,周天军,宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析 [J]. 大气科学, 2008, 32 (2): 358-370.
[4] Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China Washington [J]. Geophys Res Lett, 2007, 34, L01704, doi: 10. 1029/2006GL028129.
[5] 王颖,施能,顾骏强,等. 中国雨日的气候变化 [J]. 大气科学, 2006, 30 (1): 162-170.
[6] 唐国利,丁一汇. 近 44 年南京温度变化的特征及其可能原因的分析 [J]. 大气科学, 2006, 30 (1): 56-68
[7] 刘晓冉,李国平. 西南地区近 40 a 气温变化的时空特征分析

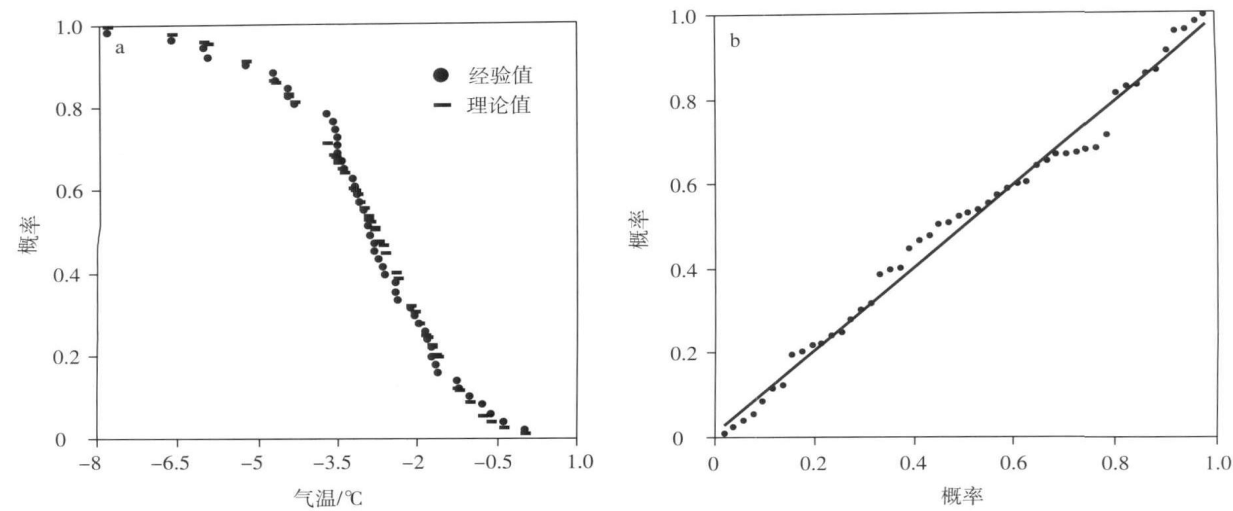


图 5 经验分布函数和理论分布函数的对比 (a)以及 P-P图 (b)
Fig 5 (a) Empirical distribution and Weibull distribution and (b) the probability plot

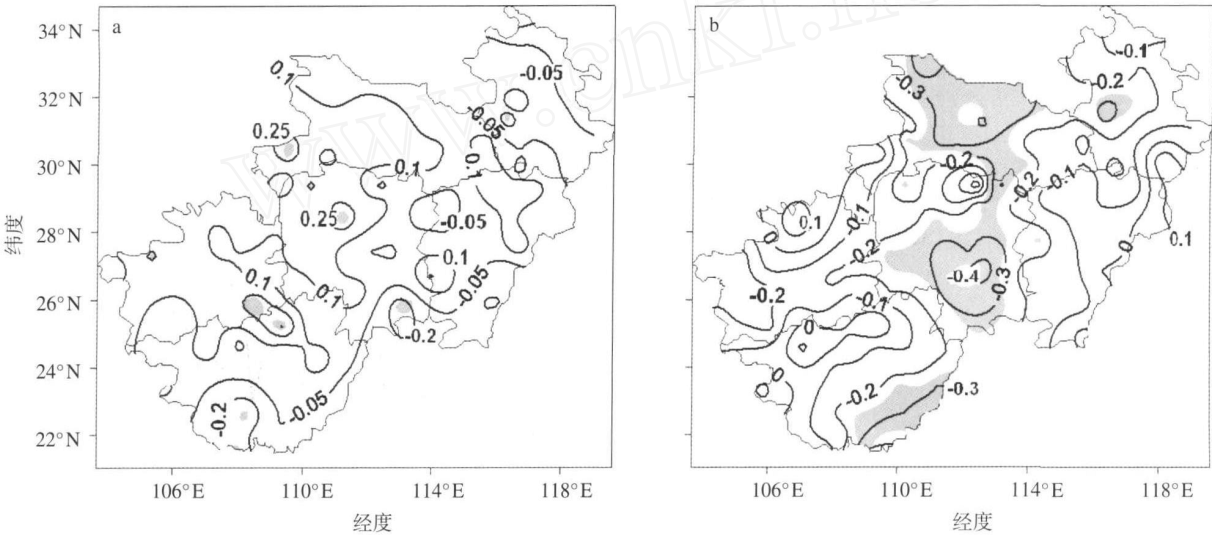


图 6 中国南方 6 省 1 月份降水量与极端最低气温 (a)、平均气温 (b) 的相关系数 (阴影部分达到了 90%置信水平)
Fig 6 Correlation coefficients of January precipitation with (a) extreme minimum temperature and (b) average temperature in six southern provinces (Those significant at a more than 10% confidence levels are shaded)

[J]. 气象科学, 2008, 28 (1): 30-36

[8] 张宁,孙照渤,曾刚. 1955—2005 年中国极端气温的变化 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31 (1): 123-128

[9] 刘学华,季致建,吴洪宝,等. 中国近 40 年极端气温和降水的分布特征及年代际差异 [J]. 热带气象学报, 2006, 22 (6): 618-624

[10] Klein A M G, Konnen G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe [J]. J Climate, 2003, 16: 3665-3680

[11] 李永华,高阳华,廖良兵. 重庆地区年可利用将水资源的变化分析 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31 (3): 422-428

[12] 王惠清,吴忠义. 吉林省气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1997: 55-60

[13] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2004: 142-1180

[14] North G R T, Cahalan B R, Moeng F J. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function [J]. Mon Wea Rev, 1982, 110: 699-706

[15] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79 (1): 61-78

[16] Kotz S, Nadarajah S. Extreme value distributions theory and applications [M]. London: Imperial College Press, 2000: 95-152

[17] Castillo E. Extreme value theory in engineering [M]. London: Academic Press, 1998: 97-226

(责任编辑:倪东鸿)